

BAGYINSZKI GYULA • BITAY ENIKŐ

FELÜLETKEZELÉS

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS FÜZETEK



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET

BAGYINSZKI GYULA – BITAY ENIKŐ
FELÜLETKEZELÉS

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS FÜZETEK

5.

BAGYINSZKI GYULA – BITAY ENIKŐ

FELÜLETKEZELÉS



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2009

A kutatást támogatta:

**Az MTA–OM, DOMUS HUNGARICA SCIENTIARIUM ET ARTIUM
MTA Határon Túli Magyar Tudományosságért Ösztöndíj Program**

A könyv megjelenését támogatta:

a Szülőföld Alap



Lektor: Dr. Czinege Imre CSc

© **Bagyinszki Gyula, Bitay Enikő 2009**

Kiadja: Az Erdélyi Múzeum-Egyesület

Felelős kiadó: Sipos Gábor

Sorozatszerkesztő: Bitay Enikő

Olvasószerkesztő: Kerekes György

Borítóterv: Könczey Elemér

Műszaki szerkesztő: Szilágyi Júlia

Nyomdai munkálatok:

F&F International Kft. Kiadó és Nyomda, Gyergyószentmiklós

Tel./Fax: +40-266-364171

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

BAGYINSZKI GYULA

Felületkezelés / Bagyinszki Gyula, Bitay Enikő. - Cluj-Napoca : Societatea Muzeului Ardelean, 2009

Bibliogr.

ISBN 978-973-8231-76-4

I. Bitay Enikő

621.7

Tartalom

Előszó	9
1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai	11
1.1. Alkatrészek és szerszámok felületkezelésének károsodási formái	11
1.1.1. Kopás és megeresztődés	11
1.1.2. Korrózió és revésedés	15
1.1.3. Mechanikus és termikus fáradás	19
1.2. A felületkezelési eljárások szerepe és rendszere	23
1.2.1. Technológiafejlesztési irányzatok	23
1.2.2. Lokális anyagszerkezet-módosítás	24
1.2.3. Felületkezelések rendszerezése	25
1.3. Nagy energiasűrűségű hőforrások jelentősége	29
1.3.1. Lézer	41
1.3.2. Elektronsugár	45
1.3.3. Plazma	47
2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői	50
2.1. Felületek makro- és mikroszerkezete	50
2.1.1. Ideális és reális felület, felületi hibák	50
2.1.2. Felületi hullámosság és érdesség	55
2.1.3. Anyagfelületek optikai és esztétikai jellemzői	57
2.2. Felületek előkészítése kezeléshez	59
2.2.1. Oxid- és revementesítés	62
2.2.2. Zsír- és olajmentesítés	69
2.2.3. Egyéb előkészítő műveletek	71
3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések	72
3.1. Felületszilárdítás	72
3.1.1. Sörétszórásos felületszilárdítás	74
3.1.2. Ütőtestes felületszilárdítás	77
3.1.3. Ütőszeges felületszilárdítás	80
3.1.4. Vasalásos felületszilárdítás	81
3.1.5. Görgőzéses felületszilárdítás	85
3.1.6. Robbantásos felületszilárdítás	87
3.1.7. Lézerimpulzusos felületszilárdítás	88
3.2. Felületedzés	88
3.2.1. Lángedzés	95
3.2.2. Indukciós edzés	101
3.2.3. Lézeres edzés	111

Tartalom

3.3. Felületi átolvasztás	118
3.4. Felolvasztó hegesztés	135
4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések	137
4.1. Védőbevonatolás	137
4.1.1. Ráragasztás	137
4.1.2. Műanyaggal való bevonatolás	140
4.1.3. Festés, lakkozás	141
4.1.4. Zománcozás	144
4.1.5. Kémiai fémleválasztás	144
4.1.6. Galvanizálás	147
4.2. Termikus szórás	153
4.2.1. Lángszórás	156
4.2.2. Ívzsórás	159
4.2.3. Plazmaszórás	159
4.2.4. Robbantásos szórás	161
4.3. Plattírozás	162
4.3.1. Húzásos plattírozás	162
4.3.2. Folytatásos plattírozás	162
4.3.3. Hengerlésekes plattírozás	163
4.3.4. Dörzsplattírozás	164
4.3.5. Robbantásos plattírozás	165
4.4. Gőzfázisból történő bevonatolások	167
4.4.1. PVD vagy fizikai gőzfázisú bevonatolás	173
4.4.2. CVD vagy kémiai gőzfázisú bevonatolás	177
4.5. Ionimplantáció	181
4.6. Passziválás	183
4.7. Termokémiai kezelések	186
4.7.1. Acélok cementálása	186
4.7.2. Acélok nitridálása	189
4.7.3. Acélok nitrocementálása és karbonitridálása	195
4.7.4. Acélok boridálása és szilikálása	196
4.7.5. Termokémiai kezelés fémes elemekkel	197
4.8. Felületi ráolvasztás	199
4.8.1. Tűzi mártó fémbevonás	199
4.8.2. Termikusan szórt rétegek utókezelése	200
4.8.3. Vastag fémbevonatok ráolvasztása	201
4.9. Felületötvözés	202
4.10. Felrakó hegesztés	204
4.10.1. Szerszámok felrakó hegesztése	211
4.10.2. Takarékszerszámok készítése	214
4.10.3. Kopásálló rétegek felrakása	217
5. Duplex felületkezelések	224
5.1. Duplex anyagszerkezet-módosulatok	224

	Tartalom
5.2. Duplex termokémiai kezelések.....	225
5.3. Duplex felületkezelések.....	225
5.3.1. Lézeres felületedzés és nitridálás kombinálása.....	228
6. Egyéb felületi technológiák.....	235
6.1. Abrázív felületi megmunkálás.....	235
6.2. Lézeres hónolás.....	239
6.3. Nyomtatott huzalozású elektronikai áramkört lapok gyártása.....	242
6.4. Félvezető alapú elektronikai alkatrészek előállítása.....	246
6.5. Bevonatos kompozitok készítése.....	249
6.6. Fémszínezés.....	251
6.7. Átmeneti korrózióvédelem.....	253
7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése.....	255
7.1. Vizuális vizsgálatok.....	255
7.2. Roncsolásmentes vizsgálatok.....	264
7.3. Fénymikroszkópi vizsgálatok.....	267
7.4. Elektronmikroszkópi vizsgálatok.....	271
7.5. Analitikai vizsgálatok.....	273
7.6. Keménységmérés.....	277
7.7. Tapadási szilárdság vizsgálata.....	281
7.8. Kopásállósági vizsgálatok.....	282
7.9. Korrózióállósági vizsgálatok.....	284
7.10. Esettanulmányok, különleges vizsgálati módszerek.....	286
Irodalom.....	333
Surface engineering (Summary).....	347
Contents.....	348
Oberflächenbehandlung (Zusammenfassung).....	351
Inhalt.....	352
Tratamente de suprafață (Rezumat).....	355
Cuprins.....	356

Tartalom

Előszó

Az ipari gyakorlatban egyre fontosabb az anyag- és energiatakarékos – ezáltal környezetkonform – gyártást elősegítő technológiák alkalmazása a megmunkálási műveletek, az üzemi igénybevételek, illetve a speciális követelmények szempontjából még éppen szükséges minimális munkadarab-térfogatra korlátozva. E koncepciónak általában megfelelnek a felületkezelő eljárások, melyekkel károsodásállóságot (kopás-, megeresztés-, korrózió-, reve- és fáradásállóságot) javító, gyakran dekoratív felületi kérges, rétegek hozhatók létre az egyébként – más követelmény vagy előírás hiányában – olcsóbb, könnyebben megmunkálható, szívósabb alapanyagon (alaptesten). A felületkezelésekkel a helyi (lokális) igénybevételekhez, követelményekhez igazítható(k) a munkadarabok arra kijelölt tartománya(i), általában az alapanyag (alaptest) nagyobb tömegének jelentősebb szerkezet- és tulajdonságváltoztatása nélkül.

Jelen könyv a „surface engineering”, vagyis a tervezett felületmódosítás módszereit tekinti át, természetesen a teljesség igénye nélkül, koncentrálna a gépészeti alkalmazásokra. A bemutatott felületkezelési eljárásokat általában az anyagszerkezet-módosító technológiák közé sorolják, de egy részük bevonatos kompozitok előállítására is alkalmazható. Rendszerint az alakadó (öntő, szinterelő, alakító, forgácsoló, vágó), illetve esetenként a kötő (hegesztő, forrasztó, ragasztó, mechanikusan kötő) technológiák után következnek a műveleti sorrendben.

Nemcsak hőkezelési jellegű (felületedző, termomechanikailag kezelő, fizikai gőzfázisú bevonó, kémiai gőzfázisú bevonó, termokémiaailag kezelő, felületi ráolvasztó) eljárások, hanem alakítási (hidegalakítással felületszilárdító), ömlesztő hegesztési (felületi átolvasztó, felolvasztó hegesztő, felületötvöző, felrakó hegesztő) és fizikai-kémiai (felületi rétegbevonó) műveletekkel operáló, illetve ezeket kombináló ún. duplex eljárások is szerepelnek e könyvben.

A különböző felületkezelő eljárások bemutatása mellett a könyv foglalkozik azokkal a károsodási formákkal, amelyek a kezelést indokoltá teszik, az anyagfelületek néhány fontos jellemzőjével, a felületelőkészítés módszereivel, valamint a rétegminősítést szolgáló anyagvizsgálatokkal is.

A könyv célja alapvető elméleti és gyakorlati információkat nyújtani alkatrészek, szerkezetek, szerszámok konstrukciós és formatervezésére, anyagának kiválasztására és gyártása, avagy felújítása technológiájának kidolgozására irányuló mérnöki feladatokhoz, illetve az ezek megoldására felkészítő mérnökképzéshez.

Abban a reményben, hogy ez a célkitűzés akárcsak részben is megvalósul, sok tanulmányi és munkabeli sikert kívánnak, egyúttal köszönetüket fejezik ki az angol, német, román fordításában való közreműködésükért: dr. Chiorean Deliának, dr. Kolozsvári Zoltánnak és dr. Kovács Mihálynak.

A szerzők

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

1.1. Alkatrészek és szerszámok felületi károsodásának formái

Az üzemelés során az alkatrészeket és szerszámokat, illetve azok anyagát érő mechanikai, termikus, vegyi, biológiai, elektromos, mágneses, sugár- és hanghatások, igénybevételek által kiváltott elhasználódási, károsodási formák sokfélék (1.1. ábra). A rövid üzemelés során fellépő károsodási folyamatok nem lehetnek meghatározók egyetlen termék esetében sem, ezek megelőzése alapvető tervezési, gyártási, üzemeltetési és ellenőrzési (állapotfelügyeleti) feladat. A hosszabb üzemelés (tartós használat) során fellép(het)ő károsodásfelhalmozódási folyamatok érint(het)ik a termék anyagának egészét (nem lokalizáltak) vagy egy résztartományát (lokalizáltak), miközben a biztonságos üzemeltetés szempontjából eredetileg helyesen megválasztott anyagtulajdonságok megváltoz(hat)nak.

Ezen – gyakran elkerülhetetlen – károsodásfelhalmozódási folyamatok vizsgálatával lehet az anyagok károsodásállóságát (károsodással szembeni ellenállását) megítélni, rangsorolni, illetve az anyagokból készített alkatrészek ún. maradékélettartamát (hátralévő üzemidejét) becsülni, ami sok esetben nem jellemezhető konkrét mérőszámokkal, hanem a (rendszerint nagyszámú) befolyásoló tényezők segítségével határértékeket, kritériumokat lehet felállítani, tervezési, gyártási és üzemeltetési szempontokat megadni. Az igazán korrekt károsodásállósági jellemzőket nem modell- (próbatest-) kísérletekből, hanem üzemszerű- (gyártmány-) vizsgálatokból lehet nyerni, egy-egy konkrét esetben.

A felületkezelés mint felületi anyagszerkezetet módosító technológia legfontosabb, leggyakoribb alkalmazási területei a kopásállóság, illetve az azzal szorosan összefüggő megeresztésállóság és a korrózióállóság javítását célozzák, vagyis a kopási és korróziós folyamatokat befolyásolják, lassítják.

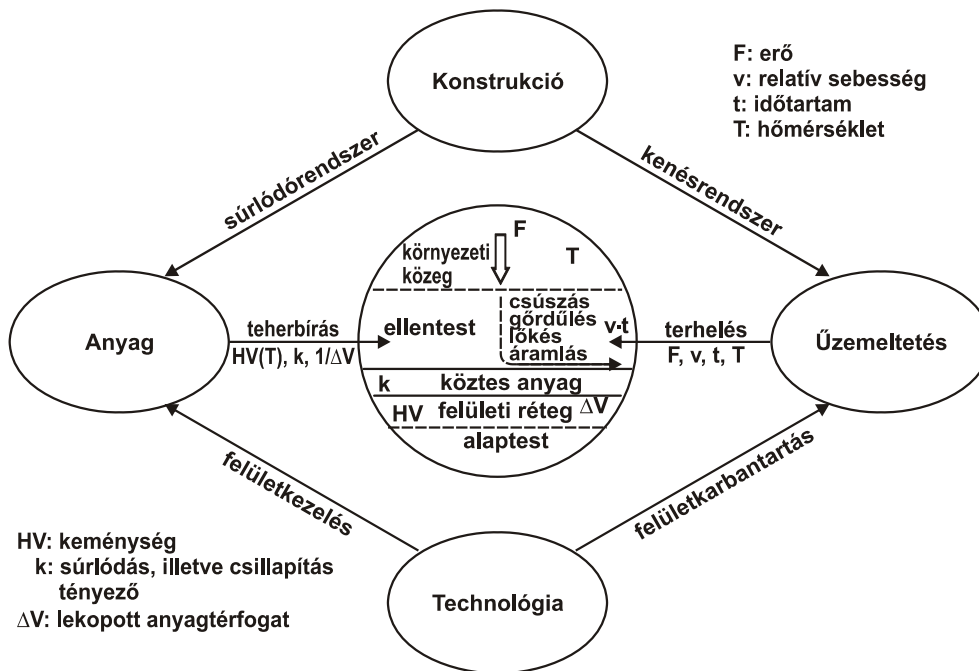
1.1.1. Kopás és megeresztődés

A kopás szilárd testek felületén bekövetkező anyagvesztés, amelyet szilárd, cseppfolyós vagy légnemű közeggel való érintkezés és relatív elmozdulás (azaz két anyag közötti interakció) okoz. A relatív elmozdulásnak négy alapformája különböztethető meg: csúszás, gördülés, lökés és áramlás, melyek külön-külön vagy kombináltan is jelentkezhetnek. A tribológiai igénybevétellel összefüggő kopási folyamatot sok paraméter befolyásolja, így az előidézett kopás, illetve az ezzel szembeni kopásállóság rendszerjellemző, azaz minden folyamat-„résztvevő” (1.2. ábra) hatásának eredője.

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

rövidebb üzemelés során fellépő, makroszkopikusan lokalizált károsodási folyamatok				hosszabb üzemelés során fellépő, makroszkopikusan nem lokalizált lokalizált károsodásifelhalmozódási folyamatok			
tervezési, kivitelezési hibával és/vagy nem rendeltetésszerű használattal összefüggő folyamatok				fizikai elváltozásokkal és/vagy kémiai átalakulásokkal összefüggő folyamatok		folytonossági hiányok keletkezésével és/vagy növekedésével összefüggő folyamatok	
rugalmas		képlékeny		anyagfolytonosság megszakadása			
nagy deformáció	instabilitás	nagy deformáció	instabilitás				
beszorulás	kihajlás	megfolyás	kontrakció	törés	<div><div><div>reológiai károsodás:<ul style="list-style-type: none">- kúszás (alakváltozás)- relaxáció (feszültségváltozás)</div><div>melegszilárdság-csökkenés:<ul style="list-style-type: none">- kilágylás (terhelhetőség csökken)- megeresztődés (kopásállós. csökk.)</div><div>öregedés:<ul style="list-style-type: none">- sugárzásos ridegedés- klimatikus ridegedés</div></div><div><div>kopás:<ul style="list-style-type: none">- adhéziós kopás:<ul style="list-style-type: none">- hideghegedéses kopás- meleghegedéses kopás- tribokémiai kopás:<ul style="list-style-type: none">- kenéstechnikai kopás- illesztéstechnikai kopás</div><div>korrozio:<ul style="list-style-type: none">- felületi korrozio:<ul style="list-style-type: none">- passzíváló korrozio- egyenletes korrozio- anyagon belüli korrozio:<ul style="list-style-type: none">- szelektív korrozio- általános korrozio</div><div>hőkárosodás:<ul style="list-style-type: none">- oxidáció- gyulladás</div><div>biokárosodás:<ul style="list-style-type: none">- lebomlás (vegyhatásos károsodás)</div></div><div><div>fáradás:<ul style="list-style-type: none">- kisciklusú ($N_f \leq 10^4$) fáradás- nagyciklusú ($N_f > 10^4$) fáradás</div><div>törés:<ul style="list-style-type: none">- képlékeny (stabil) törés- rideg (instabil) törés</div><div>hidegszívósság-csökkenés:<ul style="list-style-type: none">- ütmunka-csökkenés- átmeneti hőmérséklet növekedés</div><div>abrazív kopás:<ul style="list-style-type: none">- forgácsoló kopás- erodáló kopás</div><div>fáradásos kopás:<ul style="list-style-type: none">- pittingképződéses kopás- rétegfelbomlásos kopás</div><div>behatoló korrozio:<ul style="list-style-type: none">- lyukkorrozio- feszültségkorrozio</div><div>anyagok közötti korrozio:<ul style="list-style-type: none">- réskorrozio- kontaktkorrozio</div><div>termikus fáradás<ul style="list-style-type: none">- hősokk</div><div>elfogyás<ul style="list-style-type: none">- rágásos károsodás</div></div></div>		

1.1. ábra
Anyagok károsodási formái



1.2. ábra

A kopási folyamat összetevői

A kopás létrejötte szorosan összefügg az egymáson elmozduló testek között fellépő súrlódással, amit befolyásol az érintkező felületeket összenyomó erő, a felület makroszerkezete (hullámosság, érdesség), az érintkező testek felületi rétegének anyagi minősége, illetve tulajdonságai, az alkalmazott kenőanyag és kenési mód. A szilárd testek felületi tulajdonságai eltérnek az anyag belsejére jellemző „térfogati” tulajdonságoktól. Ez abban is megnyilvánul, hogy a felszíni atomok kötés szerkezete nem szimmetrikus, illetve energiaszintjük magasabb, ezért reakcióképesebbek, megkötnek a környezetükből gáz-, víz-, illetve szerves és szervetlen anyagrészecskéket.

A kopás következtében fellépő anyaglehordás, a kopási mechanizmus formái:

- Adhéziós vagy hegedéses kopás: egymással súrlódó, viszonylag kis sebességgel elmozduló testek esetén, nagy felületi nyomás hatására, elsősorban fémes anyagok között, folyadékkenés vagy oxidhártya hiányában jön létre. Maga az adhézió a súrlódó felületek határrétegében fellépő tapadó kötés, amely a testek egymáson való elmozdulásakor elnyíródik, és következményeként a felületről részecskék szakadnak ki. Ez a hidegen vagy melegen (kisebbségi vagy nagyobb hőmérsékleten) bekövetkező kopás viszonylag lokalizált, a felület egyes részein intenzív, máshol alig tapasztalható.

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

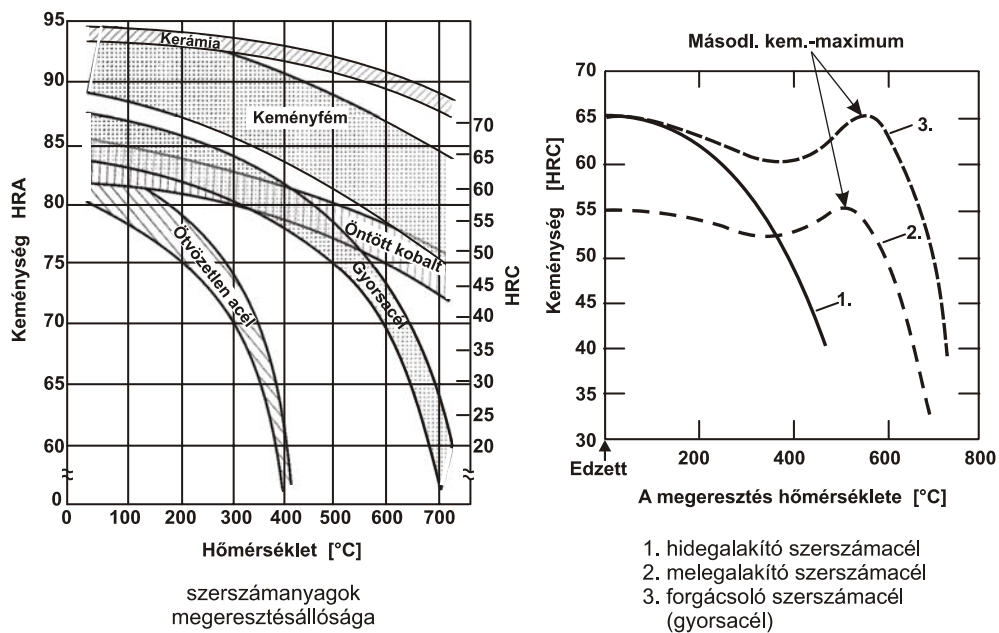
- **Abrazív kopás:** a keményebb felület kiálló csúcsai elmozduláskor mélyedéseket, barázdákat, karcolásokat hoznak létre a lágyabb felületben, mikroforgácsok leválasztásával, vagy a két súrlódó felület közé viszonylag apró szemcséjű, kemény, csiszoló hatású szennyezőanyag kerül, ami karcolva a felület(ek)et anyaglehordást eredményez. Az ilyen kopási folyamatot hasznosítják is az ún. abrazív megmunkálási eljárásoknál, mint pl. köszörülés, csiszolás. A kavitáció olyan eróziós folyamat, amelyet áramló folyadékokban – gőzbuborékok keletkezésével, majd összeroppanásával keltett – nyomáshullámok váltanak ki.
- **Fáradásos kopás:** a váltakozó (ciklikus) terhelés hatására a felületi réteg kifárad, mikrorepedések keletkeznek benne, ezek növekedése a réteg lepattogzását, gödrösödését, pittingesedését vagy a réteg felbomlását okozza. Kialakulását elősegíti a felület alatt (annak közelében) ébredő, felülettel párhuzamos, váltakozó nyíró feszültség, pl. gördülő súrlódással működő alkatrészekben.
- **Tribokémiai kopás:** a tribológiai (súrlódó-koptató) igénybevétellel egyidejűleg kémiai reakció is fellép az alap- és az ellentest között, a köztes anyag vagy a környezet hatására. Az egyik esetben a kenőanyag bomlástermékei és/vagy adalékanyagai támadják meg az egymáson elmozduló felületeket. A másik eset kis amplitúdójú alternáló (rezgő) mozgás hatására, oxigén vagy más reakcióképes gáz jelenlétében jön létre, ha az érintkező felületek közül legalább az egyik fémes. Gyakran tapasztalható ez a kopási forma zsugorkötéssel, csavarokkal, ékekkel, csapszegekkel összekötött, illesztett rezgő elemeknél.

A kopás csökkentésének, illetve a kopási folyamat lassításának anyagválasztási, konstrukciós, technológiai és üzemeltetési lehetőségei vannak, melyekre néhány példa felsorolásszerűen:

- **anyagválasztási szempontok:**
 - nagy keménységű és rugalmassági modulusú anyagok választása;
 - egymáshoz kis affinitású súrlódó anyagpárok társítása;
- **konstrukciós szempontok:**
 - elmozduló felületek közé idegen részecskék bejutását megakadályozó, de megfelelő kenést biztosító szerkezeti kialakítás;
 - a felületi mechanikai terhelés és az azzal összefüggő melegedés éppen szükséges mértéken való maximalizálása, esetenként gyorsan cserélhető és olcsó kopóbetétek alkalmazása;
- **technológiai szempontok:**
 - optimális (sem túl nagy, sem túl kicsi) felületi érdesség és hullámosság beállítása;
 - az adott feladatra előnyös felületkezelési eljárások alkalmazása;
- **üzemeltetési szempontok:**
 - felesleges üresjáratok, rezgések csökkentése, kiküszöbölése;
 - hűtés-kenés folyamatos biztosítása, kenőanyag előírás szerinti cseréje.

A megeresztődés a hőmérsékletváltozás (növekedés) következtében létrejövő – szövetszerkezeti átalakulás és/vagy összetétel módosulás miatti – kopásállóság-változást (meleg kopásállóságot) jellemzi. A megeresztésállóságot különböző hőmérsékleteken tartósan hőn tartott, majd lehűtött – előzetesen edzett – próbatesteken mért keménységek, illetve ezek alapján megszerkesztett megeresztési diagram alapulvételével lehet megítélni. Ként megadható egy határhőmérséklet, amelyen az előírt keménység még tartható, vagy egy minimális keménység, amit egy meghatározott hőmérsékleten biztosítani kell.

Az **1.3. ábra** néhány szerszámanyag megeresztési görbéjét mutatja, melyben a keménység változása fejezi ki a kopásállóság változását. Egyes nemesíthető (szerszám-) acélokban a megeresztés hatására kiváló szekunder (másodlagos) karbidok egy jellegzetes keménységmaximumot eredményeznek az 500–600 °C-os hőmérséklet-tartományban, ami lehetővé teszi ilyen maximális hőmérsékleten való tartós alkalmazásukat.



1.3. ábra
Megeresztési diagramok

1.1.2. Korrózió és revésedés

A korrózió jellemzően a fémes szerkezeti anyagok károsodása, mely környezeti hatásra fellépő, mérhető elváltozást (méret- és tömegcsökkenést), illetve a mechanikai terhelhetőség és a felhasználhatóság romlását okozó fázishatár-reakciók fo-

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

lyamata. A károsodás többnyire a felület irányából – a környező folyadékokkal és gázokkal (mint korróziós közegekkel) kémiai vagy elektrokémiai reakciók következtében – végbemenő, spontán folyamatok eredménye. Az exoterm (hőtermelő) korróziós folyamatok hajtóereje a fémes anyagok és vegyületeik közötti szabadenergia-különbség. Lényegében a kohászati redukciós folyamatok „ellentétéről” van szó, azaz a fémek újra ércbeli oxid, szulfid, karbonát vagy más stabil (az alacsonyabb energiaszintű) vegyületformájukat érik el. A fémeken a korróziós károsodások gyakran vizes oldatok (elektrolitok) hatására anódos fémoldódásként jelentkeznek. A folyamat a fém ionjainak oldódásából (kristálysírból való kilépéséből) és az oxidálóelem redukciójából áll, melyek térben elválasztva (az ionátmérőhöz képest nagyságrendileg nagyobb távolságok mellett), helyi galvánelem képződésével mennek végbe. A kémiai hatáshoz társulhat termikus vagy mechanikai igénybevétel is.

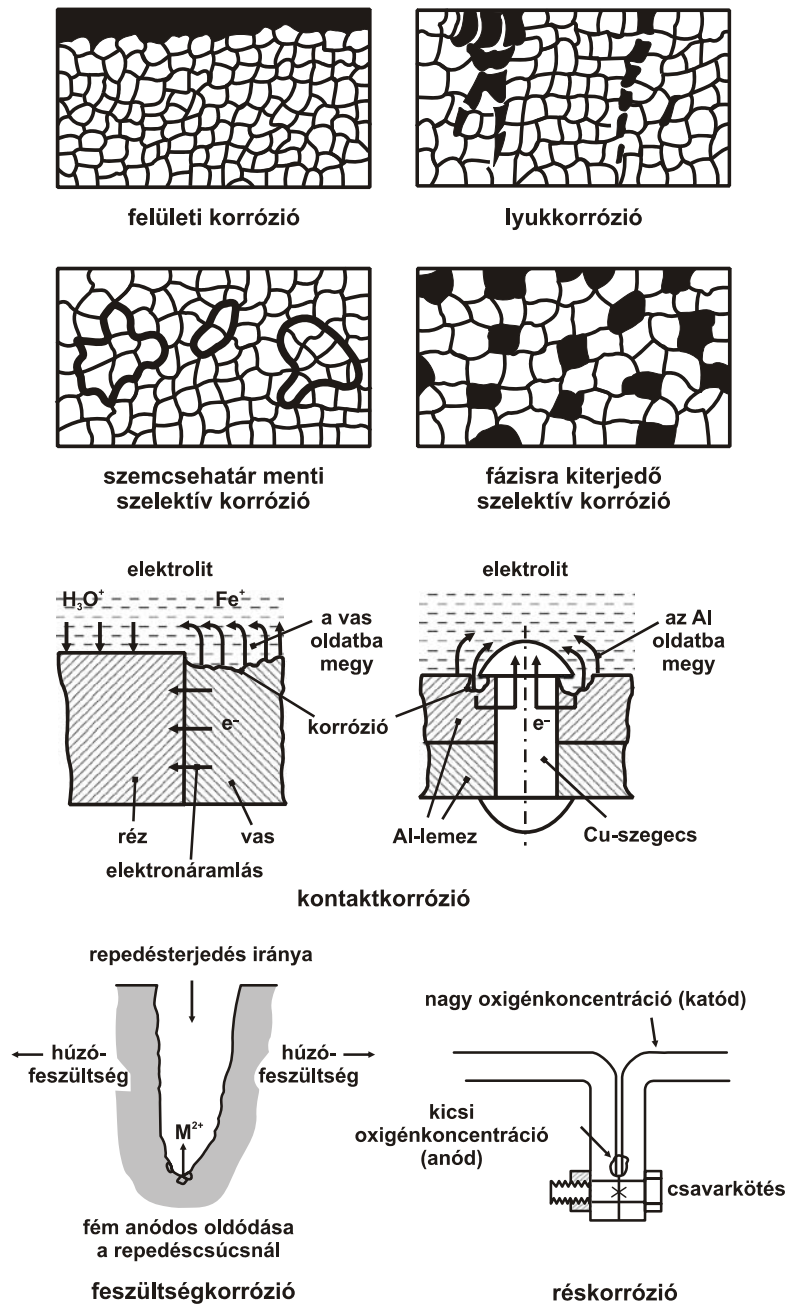
A kémiai („száraz”) korrózió során egyszerre megy végbe az oxidáció és a korróziós közeg oxidáló komponensének redukálása, általában fémnek száraz gázokkal (nagy hőmérsékletű levegő, füst) vagy elektromosan szigetelő folyadékokkal (szerves oldószerek, kéntartalmú kőolajipari termékek) való érintkezésekor. A fém-, illetve a nemfém-ionok egymáshoz ionátmérőnyi távolságra kerülve hoznak létre kisebb szabadenergiájú vegyületet, ami ha összefüggő, jól tapadó és tömör réteget képez, viszonylagos korrózióállóságot ad (pl. az alumíniumnál). Az elektrokémiai („nedves”) korrózióhoz két „elektroda” kell: a roncsolódó, nagyobb potenciálú (elektropozitívabb) anód és a nem károsodó, kisebb potenciálú (elektronegatívabb) katód, melyek elektrolitként ható közeg révén kontaktusba kerülnek. A két „elektroda” lehet két különböző potenciálú anyag vagy egy anyagon belül két eltérő potenciálú anyagrész; így potenciálkülönbséget (ún. oldási potenciált) okozhat, pl.:

- egy szövetszerkezet két fázisának összetételkülönbsége (pl. perlitben a ferrit anód és a karbid katód);
- különböző mértékű hidegalakítást szenvedett anyagrészek energiaszintkülönbsége (pl. az alakváltozott rész az anód és a nem alakváltozott rész a katód);
- szemcse és környezete közötti energiaszint-különbség (pl. a szemcsehatár vagy a kisebb szemcse az anód, illetve a behatárolt szemcse vagy a nagyobb méretű szemcse a katód);
- alapanyag és eltérő elektrokémiai potenciálú sérült bevonata (pl. cink az anód és vas a katód, vagy vas az anód és ón a katód);
- korróziós közeg oxigénkoncentráció-különbsége (pl. a kisebb oxigéntartalmú közeggel érintkező anyagrész az anód és a nagyobbval érintkező a katód).

Fémek savban vagy lúgban történő oldódása helyi elem nélküli károsodási folyamat, hidrogénképződéssel vagy oxigénfogyasztással.

A korrózió megjelenési formái (1.4. ábra):

- Felületi korrózió, melynek során egyenletesen csökken az anyag vastagsága a közeggel történő érintkezéskor, miközben különböző oldhatóságú korróziós termékek keletkeznek, sőt egyes esetekben a felületen jól tapadó, tömör – ezáltal a további károsodást gátló – passzív védő(oxid)réteg keletkezhet.



1.4. ábra
Korrózió formái

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

- Behatoló (helyi) korrózió, amelynek egyik esete a koncentrációs helyi elem képződésével összefüggő lyukkorrózió, ami főként felületi bevonatok sérüléseinek alakul ki. Másik eset a feszültségkorrózió, amely a húzófeszültség és a korróziós közeg egyidejű hatásaként repedésképződést, illetve -terjedést okozva.
- Anyagon belüli korrózió az ún. szelektív korrózió, melynek során az anyag egyes összetevői (ötvözői), illetve fázisai vagy szennyezőelemek képezte kiválásokkal terhelt szemcsehatárai (kristályközei) „kioldódnak”. Viszont bizonyos közegekben általános (minden fázisra kiterjedő) korrózió is kialakulhat.
- Anyagok közötti korrózió során az érintkező, kontaktusban lévő fémek közül a kevésbé nemes fém korróziós fogyása következik be. Azonos anyagok közötti rés miatt is kialakulhat korrózió, ami a résen belüli és a résen kívüli korróziós közeg koncentrációkülönbségei (pl. oxigéntartalom-változás) következtében lép fel.

A korrózió intenzitása, illetve sebessége a kopáshoz hasonlóan állandósult, növekvő vagy csökkenő lehet, amit befolyásol a korróziós közeg koncentrációja (töménysége), a hőmérséklet, a nyomás, a statikus vagy változó mechanikai és hőfeszültség, az elektromos áram („kóboráram”), tribológiai hatás stb. is.

A korróziós folyamat, illetve a korrózióállóság két úton befolyásolható:

1. A szerkezeti anyagra ható közeg módosításával:

- oxigén vagy más korróziós hatóanyag (szén-dioxid, kén-oxidok, nitrozus gázok, füstgázok, vegyipari gázok; gőz, páratartalom, csapadék, felszíni vizek, folyékony és szilárd vegyi anyagok, folyékony fémek és sóoldadékok; talajjal való érintkezés stb.) kizárása;
- pH érték kedvező módosítása vagy passzíváló anyagok adagolása.

2. A korróziós közeggel érintkező szerkezeti anyag változtatásával, védelmével:

- passzíváló (passzíválódó), illetve korrózió ellenálló ötvözetek (pl. korrózióálló acél, hőálló acél, titánötvözetek, alumínium) alkalmazása;
- alternatív (nem korrodáló) anyagok (pl. műanyagok, kerámia) használata;
- passzív korrózióvédelem: felületkezelés (pl. festés, galvanizálás, plattírozás, tűzi horganyzás; termikus szórás nemesebb fémekkel, kerámiával, műanyaggal);
- aktív korrózióvédelem: katódos védelem elhasználódó anódokkal (Zn, Mg) való összeköttetésben vagy anódos védelem külső áramforrás igénybevételével.

A revésedés fogalma egyfajta magashőmérsékleti korróziót takar, azonban itt a korrózió a szó hagyományos értelmében vett oxidációt jelent. Ha a keletkező oxidációs (égés)termék porózus szerkezetű, rossz tapadóképeségű, akkor reve formájában leválik a felületről, szabaddá téve az utat a további károsodásnak. Reveállásról valójában csak a fémeknél, tűzállóságról pedig az oxidkerámiáknál beszélhetünk. Azon fémek tekinthetők jó reveállónak, melyek felületén jól tapadó passzíváló védőoxidréteg keletkezik, gátolva a további károsodást. Az igazán tűzálló anyagoknak oxidoknak (oxidkerámiáknak) kell lenniük, hiszen ezek elégetése

(oxidálása) már lehetetlen, így csak az olvadáspontjuk szab korlátot alkalmazási hőmérsékletüknek.

1.1.3. Mechanikus és termikus fáradás

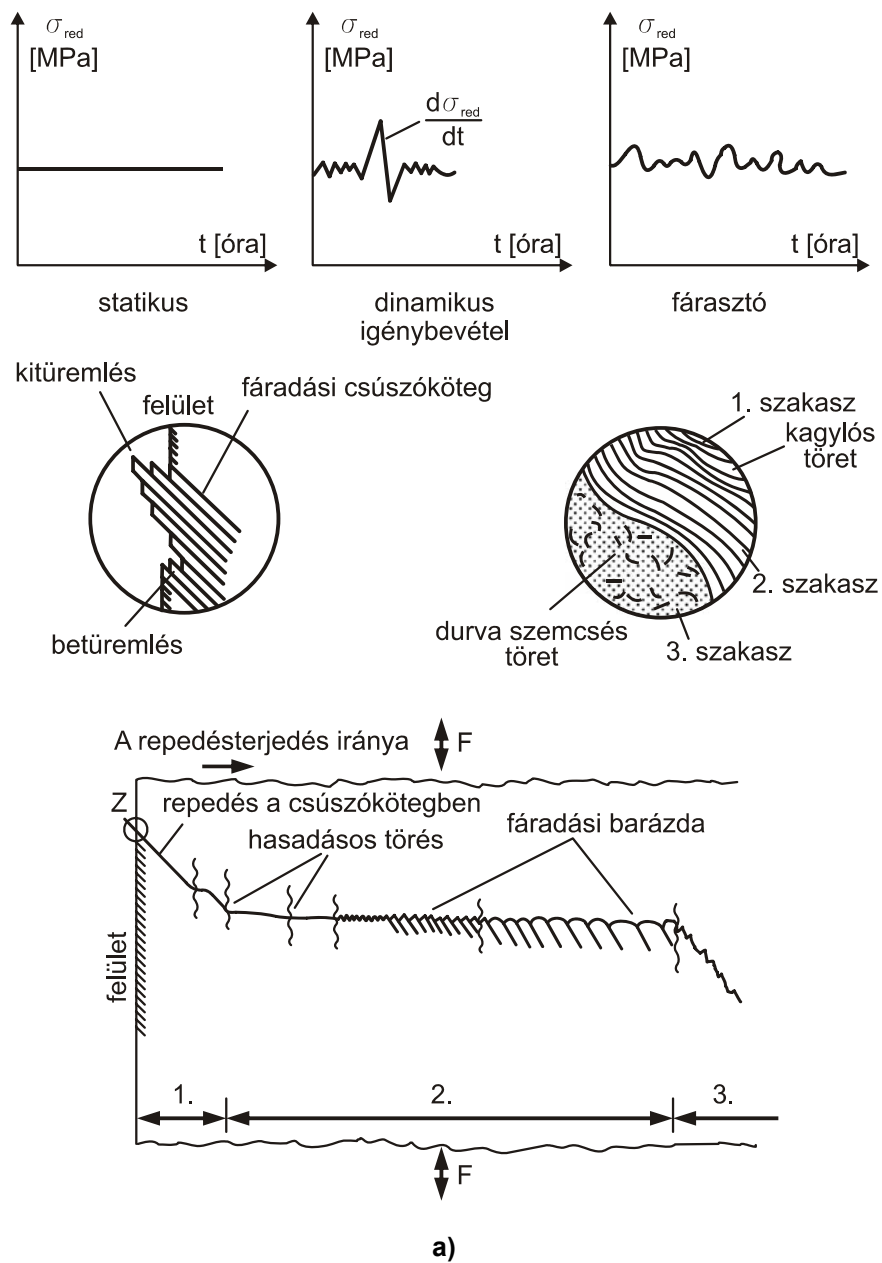
Az anyag(ki)fáradás ciklikusan ismétlődő igénybevétel(ek) hatására létrejövő, lokális anyagszerkezet-változás nyomán keletkező mikrorepedésből indul ki, szívós repedésterjedéssel folytatódik, majd (rideg)töréssel fejeződik be. A lokális szerkezetváltozás, illetve mikrorepedés a maximális feszültség helyén, azaz rendszerint az anyag, illetve az alkatrész felületén alakul ki. A fáradt törés létrejötte tehát három szakaszra bontható (**1.5/a. ábra**). Halmazódó károsodások eredményeként mikrorepedés keletkezik (1. szakasz), ez az ismétlődő igénybevételek hatására szívósan (energiaátlépés mellett) terjed (2. szakasz), végül a maradó keresztmetszet ridegen (energiafelszabadulás mellett) törik (3. szakasz). A három szakasz aránya döntően az anyagminőségtől függ. Ridegebb anyagok, illetve termékek élettartamát a mikrorepedések keletkezése és gyors terjedése határozza meg. Szívósabb anyagoknál – mikrorepedés jellegű hibát eleve feltételezve – a második szakasz, azaz a repedésterjesztés nagyobb energiaigénye mérvadó.

Egy anyag (illetve termék) fáradásállósága annál jobb, minél finomabb szemcséjű, minél kevésbé tartalmaz külső makroszerkezeti bemetszéseket (éles sarkokat, hirtelen keresztmetszet-változásokat) és belső makroszerkezeti inhomogenitásokat (folytonossági hiányokat, anyagi heterogenitásokat), minél kedvezőbb a felületi feszültségállapota (pl. húzó helyett nyomó) és kisebb a felületi érdessége.

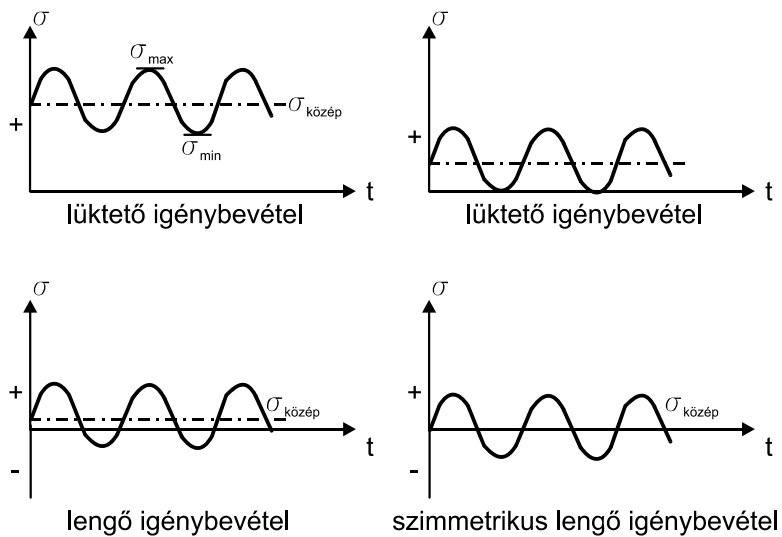
A fáradást kiváltó feszültség időbeli változásának (**1.5/b. ábra**) egyszerűsített leírása, hogy egy $\sigma_{\text{közép}}$ közép-feszültség „körül” $\pm \sigma_a$ feszültségamplitúdó ingadozik periodikusan. A feszültség az anyagban alakváltozást okoz, mely lehet tisztán rugalmas, vagy ha az amplitúdó nagyobb, akkor rugalmas-képlékeny. Az ún. nagy ciklusszámú (Wöhler-féle) fáradás (törésig elviselt ciklusszám: $N_t \gg 10^4$) során az igénybevétel ($\sigma_{\text{max}} < R_{p0,2}$), illetve az alakváltozás teljesen rugalmas, és a tönkremenetelt felületi elváltozásokból, hibákból, feszültséggyűjtő helyet jelentő konstrukciós részletekből kiinduló repedés okozza. Ez jellemző pl. a legtöbb forgó gépalkatrész (tengely, csapágó, kerék stb.) fáradására.

A törésig elviselt N_t ciklusszámot az alkalmazott (maximális) feszültség függvényében ábrázolva, a kapott diagram (**1.5/c. ábra**) szerint minél nagyobb a feszültség, annál hamarabb következik be a törés. Ezekben a Wöhler-görbékben – acéloknaál – kijelölhető egy σ_k feszültségérték, az ún. kifáradási határ, amelynél kisebb feszültséget alkalmazva az anyag fáradással nem megy tönkre, azaz elvben végtelesen (gyakorlatban 10^7 -nél nagyobb) ciklusszámot is elvisel. Alumíniumnál, polimerreknél nincs vízszintes aszimptota, tehát kifáradási határ sem értelmezhető, hanem egy élettartamérték adható meg, ami az adott feszültség szinten (törésig) elviselhető ciklusok száma.

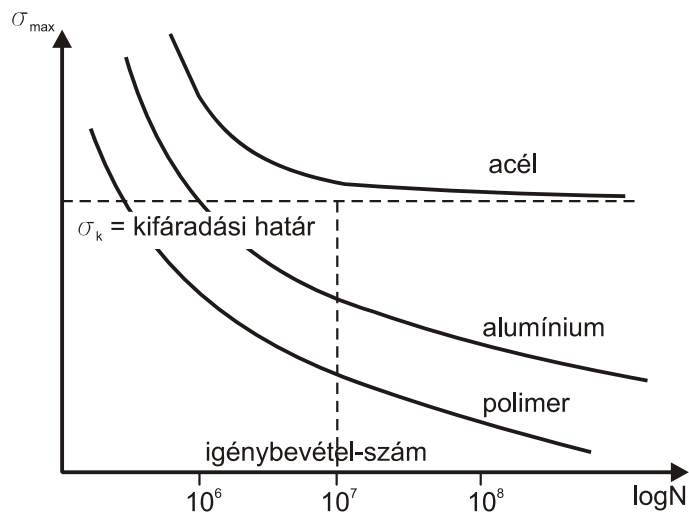
1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai



1.5/a. ábra
A mechanikus fáradás jellemzői



b)



c)

1.5/b-c. ábra
A mechanikus fáradás jellemzői

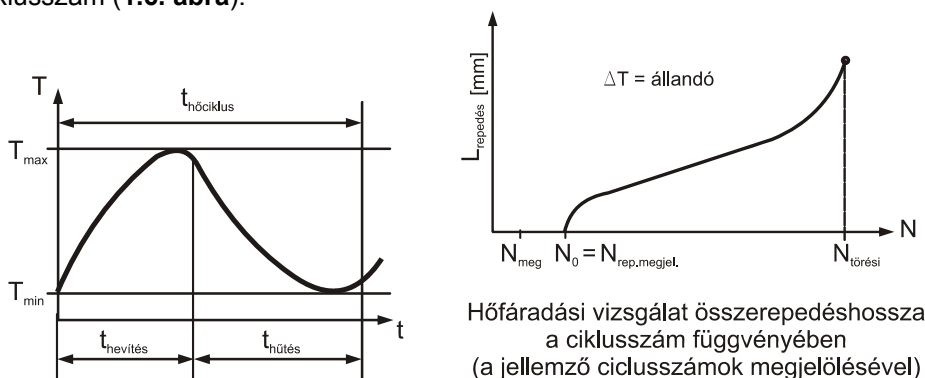
Meg kell jegyezni, hogy a Wöhler-görbék és a belőlük származtatható kifáradási határ, illetve élettartam nem tekinthető olyan általános érvényű anyagjellemzőnek, mint amilyen pl. a folyáshatár vagy a szakítószilárdság. Ugyanis a fárasztóvizsgá-

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

latok eredményeit sok paraméter befolyásolja: az igénybevételi jelleg (húzó-nyomó, hajlító, csavaró) és mód (lengő, lüktető) mellett a próbatestek geometriája és felületminősége, a mértékadó, illetve megengedett törési valószínűségi szint (1–5%), a ciklikus igénybevétel frekvenciája és amplitúdója, a terhelésfelfutás sebessége, a hőmérséklet és az esetleges korróziós hatás is. Ezért a kapott eredmények első-sorban különböző anyagok fáradási hajlamának összehasonlítására, technológiák fáradásállóságra kifejtett hatásának megítélésére alkalmasak. Szokás ún. fáradási rátát is megadni, mely a kifáradási határ és a folyáshatár hányadosaként értelmezett, mértékegység nélküli szám: $f = \sigma_k / R_{p0,2}$.

A hőfáradás vagy termikus fáradás olyan anyagkárosodás, melynek során a ciklikusan változó ΔT hőterhelés (vagy hő- és mechanikai terhelés) változó képlékeny alakváltozást idéz elő az anyag felületközeli rétegeiben, a külső és belsőbb anyagrészek eltérő és akadályozott hőtágulása következtében. A termikus fáradással szemben ellenállóbb anyagok magas hőmérsékleti szilárdság-szívósság aránya optimalizált, azaz a szívós repedésterjedéssel szemben is megfelelő ellenállást tanúsítanak. Továbbá hővezető képességük és hőtágulási együtthatójuk viszonya olyan, hogy az anyag, illetve a belőle készült alkatrész felülete és belső részei között kialakuló hőmérséklet-gradiens ne okozzon kritikus mértékű hőfeszültségeket. Ezek a követelmények nem (vagy nehezen) valósíthatók meg együtt, ezért a hőfáradásra igénybe vett gyártmányokat (pl. melegalakító szerszámokat) élettartamra (igénybevételi ciklusszámra) méretezik.

A hőfáradási vizsgálatok során az anyagban a valós hőciklus hatására kialakuló feszültségállapotot modellezik. Különböző ciklusszámig terhelte próbatestsorozaton megmérhető a kialakult repedéshálózat átlagos mélysége vagy az összrepedéshossz, illetve a keménységcsökkenés mértéke. Ezeket az igénybevételi ciklusszám függvényében ábrázolva a tönkremeneteli folyamat intenzitása jellemezhető. A kritikus ciklusszám pl. az első repedés megjelenéséhez vagy a repedéshálózat meghatározott átlagos mélységének eléréséhez rendelhető. Ennek és egy biztonsági tényezőnek a hányadosából képezhető a megengedett terhelési ciklusszám (**1.6. ábra**).



1.6. ábra
Hőfáradás termikus ciklusa és jellegzetes ciklusszámjai

1.2. A felületkezelési eljárások szerepe és rendszere

1.2.1. Technológiafejlesztési irányzatok

A technológiák és a gyártási eljárások – köztük a felületkezelési módszerek – kiválasztásakor, tervezésekor célszerű tekintettel lenni a korszerű fejlesztési irányzatokra, illetve elvekre, mint pl.:

- „Material tailoring”, illetve „inclusion tailoring” (anyag-, illetve zárványtervezés), azaz kihasználni a technológiákban rejlő anyagszerkezet-módosítási lehetőségeket (mechanikus ötvözés, pórusos szerkezet kialakítása, gradiens anyagok, kompozitok), csökkentve a szükséges műveletek számát is;
- Gyártás közel a végső alakra, vagyis a készhez közeli állapotot lehetőleg egy (vagy kisszámú) gyártási eljárással közelítsük meg. Ennek révén az elérhető pontosság, felületi simaság legyen megfelelő, a további megmunkálás csak a legszükségesebb felületekre terjedjen ki. Ez a „near net shape technology” elv tehát azt fejezi ki, hogy olyan technológiát (pl. süllyesztékes kovácsolás) alkalmazzunk, mely a végső (kész) termékalakot minél kevesebb időráfordítással, minél pontosabban megközelítve képes produkálni, csökkentve a költséges – de a pontos méretbeállításához és a felületi érdesség biztosításához szükséges – forgácsolás mennyiségi igényét;
- „Do it well first step”, vagyis elsőre jól produkálni, megfelelő minőségirányítási feltételek biztosításával;
- Maximális teljesítmény – minimális költség, azaz a lehető legtöbbet hozzuk ki a termékből egy meghatározott eladási ár mellett. Ha sorrendbe rakjuk teljesítmény/ár szerint a termékeket, korlátozó tényezőt jelent(het) a fizetőképesség (fizetőképes kereslet);
- A minimális energiafelhasználás kifejezi, hogy a szerkezeti anyagok szoros kapcsolatban vannak az energiával, amely előállításukhoz, terméké váló feldolgozásukhoz, majd hulladékká válásuk utáni kezelésükhöz szükséges. Ökológiai szempontból nem mindegy, hogy mennyi egy anyag, illetve termék fajlagos (tömegegységre vonatkoztatott) energiatartalma, ami kitermelése, előállítása, feldolgozása energiaigényét jelenti. Ugyanis a hagyományos energiahordozókból (szén, kőolaj, földgáz) történő energiakinyerés jelentős környezetszennyezéssel jár. Így a még „tisztának” nyilvánított elektromos energia alkalmazásakor is tekintettel kell lenni arra, hogy az azt előállító szén-, kőolaj- (pakura-) vagy földgáztüzelésű erőmű tetemes levegő- és vízszennyezést okoz. Tehát ez esetben nem közvetlenül a gyárban, hanem az erőműnél lép fel környezetszennyezés, azaz a gyártás szempontjából közvetetten jelentkezik.
- A környezetvédelem, újrafelhasználhatóság igényli, hogy környezetkonform irányba fejlesszük az anyagokat, a termékeket, a szolgáltatásokat és az alkalmazott technológiákat. Különösen fontos a károsanyag-kibocsátás csökkentése, az előzőekben már említett energiafelhasználás mérséklése

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

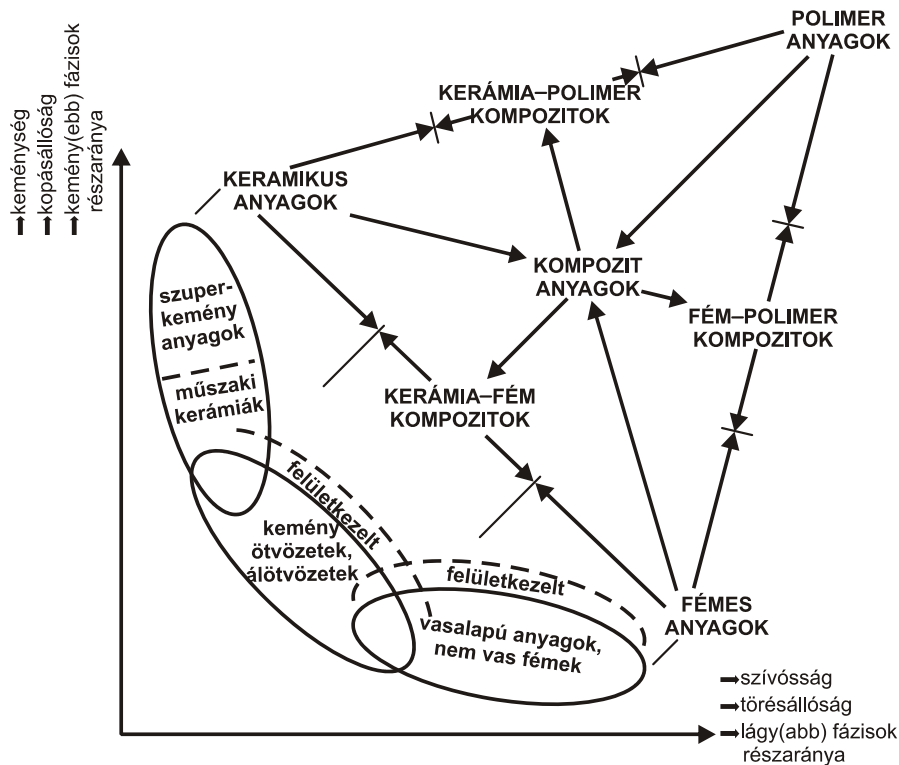
és/vagy újrahasznosítható (recikálható), illetve biológiailag lebomló anyagok alkalmazása. A reciklási hányad – mint egy 0 és 100% közötti arányszám – kifejezi, hogy mekkora az adott anyagból készült tipikus termékek használat (üzemeltetés) utáni újrahasznosításának szokásos, illetve ésszerű (elfogadható) mértéke az összmenyiséghez képest.

1.2.2. Lokális anyagszerkezet-módosítás

Az anyagokat feldolgozó alkatrész- és a szerszámgyártás gyakori dilemmája a két fizikailag ellentétes tulajdonság (keménység ↔ szívósság) arányának kompromisszumos (szilárdságot is mérlegelő) beállítása, ami gyakran a felületkezelés alkalmazását teszi indokolttá. Ha ezen két tulajdonság, illetve rokonjellemzői koordináta-rendszerében helyezzük el az anyagcsoportokat (**1.7. ábra**), jól érzékelhető az előbbi megállapítás.

Felületkezelő (felületi kérgesítő) eljárásokkal – a helyi (lokális) igénybevételekhez, követelményekhez igazodva – a felülettől a mag (belsőbb anyagrészek) felé változó tulajdonságok hozhatók létre eltérő fázisátalakulások előidézésével és/vagy különböző kémiai összetétel beállításával, minek révén megvalósítható a két fizikailag ellentétes tulajdonság – a keménység (kopásállóság) és a szívósság (törésállóság) – bizonyos fokú összhangja.

Felületkezelési eljárások alkalmazása révén tehát kopásálló, megeresztésálló, korrózióálló, reveálló, növelt kifáradási határú vagy éppen dekoratív felületi kérges, rétegek hozhatók létre, miáltal csak a felületre (kis anyagtérfogatra) korlátozódik a különleges anyag felvitele és/vagy a nagy fajlagos energiabevitel, általában az alapanyag nagyobb hányadának számottevő szerkezet- és tulajdonságváltoztatása nélkül.



1.7. ábra

Anyagcsoportok alapvető jellemzői

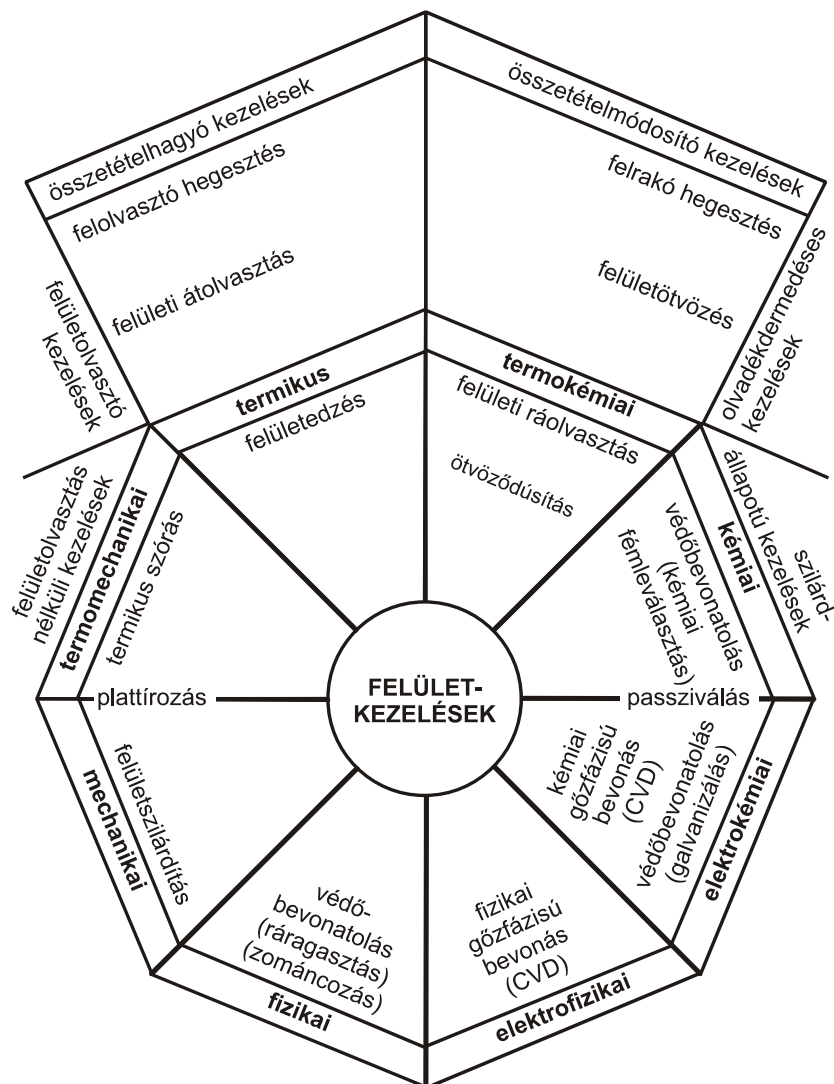
1.2.3. Felületkezelések rendszerezése

Az **1.8. ábra** bemutatja a felületkezelési eljárások egy lehetséges felosztási rendszerét. Ezen felosztás alapja az, hogy a kezelendő tárgy felületén várhatóan fellépő maximális hőmérséklet meghaladja-e a tárgy anyagának olvadáspontját, vagy nem, illetve idegen anyag (hozaganyag) rákerül-e az alapanyag felületére, vagy nem. Ezek szerint beszélhetünk felületolvadásos vagy felületolvadás nélküli, illetve összetételváltozásos vagy összetételváltozás nélküli felületkezelésről. A további rendezőelv a kezelésre jellemző anyagtudományi jelenség (folyamat), illetve idegenanyag-kötődési mód: alakítási keményedés és/vagy maradó nyomófeszültség kialakulása; allotróp átalakulás és/vagy nemegyensúlyi szövetszerkezet létrejötte; gyors dermedés és/vagy kristályosodási mikroszerkezet-finomodás; illetve fizikai hatások és/vagy adhéziós kapcsolódás; kémiai átalakulások és/vagy diffúziós folyamat; valamint a metallurgiai reakciók és/vagy kohéziós kötés. A felületolvadásos kezelésekben belül a felületi átolvasztás a felolvasztó hegesztéssel, a felületötvöztetés a felrakó hegesztéssel rokon alapokon nyugszik, illetve azokat hasonló célból alkalmazzák.

Kezelés előtt vagy közben az alapanyag felületére kerülő idegen anyag	
Kezelés során az alapanyag felületén várhatóan fellépő maximális hőmérséklet az alapanyag olvadáspontjánál	
nincs → összetételváltozás nélküli kezelés	van → összetételváltozásos kezelés
<p>nagyobb → felületolvadási kezelés</p> <p>gyors dermedésen és/vagy kristályosodási mikroszerkezet finomodásán alapuló eljárások</p> <p>felületi atollvasztás</p> <ul style="list-style-type: none"> lézerrel elektronsugárral plazmával <p>felolvasztó hegesztés</p> <ul style="list-style-type: none"> volfrámelektrodás ívhegesztéssel gázhegesztéssel 	<p>kisebb → felületolvadás nélküli kezelés</p> <p>allotróp átalakuláson és/vagy nemegyensúlyi szövetszerkezet létrejöttén alapuló eljárások</p> <p>felületedzés</p> <ul style="list-style-type: none"> bemártó edzés lángedzés indukciós edzés plazmás edzés elektronsugaras edzés lézeres edzés <p>felületiszilárdítás</p> <ul style="list-style-type: none"> sörétszórásos felületiszilárdítás ütötestes felületiszilárdítás ütőszeges felületiszilárdítás vasalásos felületiszilárdítás görgözéses felületiszilárdítás robbantásos felületiszilárdítás lézerimpulzusos felületiszilárdítás
metallurgiai reakciókon és/vagy kohéziós kötésen alapuló eljárások	<p>fizikai hatásokon és/vagy adhéziós kapcsolódáson alapuló eljárások</p> <p>védőbevonatolás</p> <ul style="list-style-type: none"> ráragasztás műanyaggal való bevonatolás festés zománcozás kémiai fémleválasztás galvanizálás <p>termikus szórás</p> <ul style="list-style-type: none"> lángszórás ívszórás plazmaszórás lézerszórás robbantásos szórás <p>plattírozás</p> <ul style="list-style-type: none"> húzásos plattírozás foltyatásos plattírozás hengerlésees plattírozás dörzsplattírozás robbantásos plattírozás <p>fizikai gőzfázisú bevonás</p> <ul style="list-style-type: none"> vákuumgőzölés katódporlasztás ionsugaras bevonatolás ionsugaras leválasztás
	<p>kémiai átalakulásokon és/vagy diffúziós folyamaton alapuló eljárások</p> <p>kémiai gőzfázisú bevonás</p> <ul style="list-style-type: none"> hagyományos CVD kombinált CVD kémiai szórás reaktív kémiai szórás <p>passzíválás</p> <ul style="list-style-type: none"> ionimplantáció kémiai oxidálás anódos oxidálás vegyülettréteg-kialakítás <p>ötvöződúsítás</p> <ul style="list-style-type: none"> porközegben sóoldékban gázközegben <p>felületi ráolvasztás</p> <ul style="list-style-type: none"> bemártással hőkezeléssel lánggal plazmával elektronsugárral lézerrel
	<p>felület-ötvözés</p> <ul style="list-style-type: none"> lézerrel elektronsugárral plazmával <p>...</p> <ul style="list-style-type: none"> volfrámelektrodás ívhegesztéssel fogyóelektrodás ívhegesztéssel salakhegesztéssel szikrahegesztéssel gázhegesztéssel

1.8. ábra
Felületkezelési eljárások felosztása

A **1.9. ábra** a felületkezelő eljárások olyan csoportosítási sémáját mutatja, melyben a rendezőelvet a felületi rétegképzést biztosító alapvető hatás (mechanikai, termomechanikai, termikus, termokémiai, kémiai, elektrokémiai, elektrofizikai, fizikai) jelenti. További rendezőelv a kezelendő felület jellegzetes csúcshőmérséklete, azaz a zárt nyolcszögben a felületolvasztás nélküli, míg a két „túlnyúló” szegmensben a felületolvadási kezeléscsoportok találhatók.



1.9. ábra
Felületkezelési eljárás csoportok

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

A **1.10. ábra** az ismert energiaforrások felületkezelésekhez való alkalmazhatóságát szemlélteti (a fekete mezők a járatos, a szürke mezők az elvileg lehetséges eseteket jelölik), vagyis az alkalmazott energia eredete szerint megkülönböztethetők:

- elektromos ívhő hasznosítók, melyeknél gázközegben nagy hőmérsékletű ki-sülés, illetve részben ionizált állapot – normál- vagy plazmaív – hatása érvényesül;
- elektromos ellenálláshő hasznosítók, melyeknél nagy erősségű áram átveze-tése (közvetlen betáplálás) vagy nagyfrekvenciás árammal gerjesztett induk-tor mágneses tere általi örvényáram-indukálás (közvetett betáplálás) a szilárd vagy olvadék állapotú anyagban Joule-hőt fejleszt;
- termokémiai reakcióhő hasznosítók, melyeknél exoterm (hőtermelő) oxidáci-ós vagy redukciós kémiai folyamatok mennek végbe;
- termokémiai transzportfolyamatokat aktiválók, melyeknél az anyagokban atomátrendeződéssel (anyagtranszporttal) járó diffúzió vagy oldódás megy végbe;
- mechanikai alakváltozás energiáját hasznosítók, melyeknél a jelentős hideg-alakítás vagy nagy nyomásimpulzus okozta deformáció mértéke a meghatá-rozó;

Energia forrása	FELÜLETKEZELÉSI ELJÁRÁS	Összetételváltozás nélküli felületkezelés				Összetételváltozásos felületkezelés			
		Felületolvadás nélküli		Olvadásos		Felületolvadás nélküli		Olvadásos	
		felület-szilárdítás	felület-edzés	felületi átolv.-felolv. heg.	(termikus) szórás	plattírozás	termokémiai kezelés	felületi ráolvasztás	felületolv. felrakó heg.
normálív	IV								
plazmaív	PLAZMA								
áram-átvezetés	ELLENÁLLÁS								
áram-indukálás	INDUKCIÓS								
oxidáció	LÁNG								
redukció	TERMIT								
diffúzió	DIFFÚZIÓS								
szilárdoldat képződés	OLDÓ								
hidegsajto-lás	HIDEGALAKÍTÁSOS								
nyomás-impulzus	ROBBANTÁSOS								
mikro-súrlódás	ULTRAHANGOS								
makro-súrlódás	DÖRZS								
elektronsu-gár	ELEKTRONSUGA-RAS								
ionsugár	IONIMPLANTÁCIÓS								
monokroma-tikus fény	LÉZERES								
polikroma-tikus fény	FÉNYSUGÁRZÁSOS								

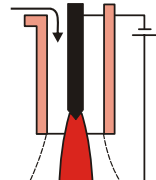
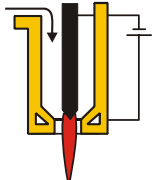
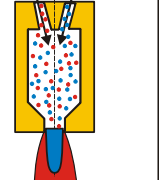
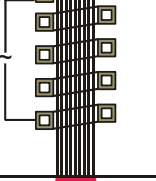
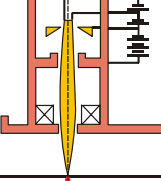
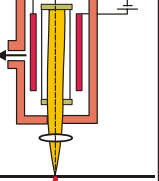
1.10. ábra
Energiaforrások felületkezelésekhez való alkalmazhatósága

- mechanikai súrlódás energiáját hasznosítók, melyeknél az összekötendő anyagfelületek menti mikro- vagy makrosúrlódás okozta dörzshatás érvényesül;
- részecskesugárzás energiáját hasznosítók, melyeknél elektronok vagy ionok alkotta fókuszolt sugár anyagba ütközése és lefékeződése hőt fejleszt;
- elektromágneses sugárzás energiáját hasznosítók, melyeknél fotonok alkotta fókuszolt monokromatikus lézersugárzás vagy polikromatikus fénysugárzás anyagbeli abszorpciója érvényesül.

1.3. Nagy energiasűrűségű hőforrások jelentősége

Az alkalmazható eljárások közül egyre inkább előtérbe kerülnek az ún. nagy energiasűrűségű (nagy teljesítménysűrűségű) felületkezelések, melyeknek összetétel-változtatás nélküli vagy összetételváltoztatásos, illetve felületolvasztás nélküli vagy felületolvasztásos változatai egyaránt jól használhatók lokális, azaz csak az arra kijelölt felületrészekre korlátozandó kezelésekhez.

A nagy energia- (vagy teljesítmény-)sűrűségű hőforrások – a plazma, az elektronsugár és a lézer – elvét vázlatosan a **1.11. ábra** mutatja további három jellegzetes technológiai hőforrással együtt.

HEVÍTŐ HŐFORRÁS	elektromosan vezető anyagokhoz	elektromosan nem vezető anyagokhoz is	
előállít önmagában nagy hőmérsékletet ↓ hőfejlődés a hőforrásban	ívhevítés (4000–5000°C) 	plazmahevítés (10 000–20 000°C) 	lánghevítés (3000–3200°C) 
nem állít elő önmagában nagy hőmérsékletet ↓ hőfejlődés a munkadarabban	indukciós hevítés 	elektronsugaras hevítés 	lézeres hevítés 

1.11. ábra

Fontosabb hevítő hőforrások

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

Egyébként a nagy energiasűrűségű megmunkálások (megmunkáló eljárások) családjába sok mindent belefoglalnak, így:

- a felületi rétegfelvitelt biztosító termikus (láng-, elektromos ív-, plazma-, lézer-, robbantásos) szórását;
- az alakadási (alakítási) célú nagy sebességű szerszámos, nyomáshullámos (robbantásos, elektrohidraulikus, mágneses, ultrahangos) megmunkálást; a lézeres termikus hajlítást, egyengetést és forgácsolást, továbbá az integrált lézeres – mechanikus forgácsoló megmunkálást szerszámcsereeléssel;
- funkcionális (nem csak geometriai) prototípusok gyors előállítására (rapid prototyping) hivatott lézeres litográfiát, szelektív lézeres szinterelést és közvetlen lézeres gyártást;
- a felületi rétegek átalakítására irányuló
 - plazmás, elektronsugaras, lézeres, szilárdító, edző, átolvasztó, ráolvasztó, ötvöző eljárásokat (beleértve a különféle célú megmunkáló hengerek felületérdesítését, illetve -texturálását is),
 - ionimplantációt,
 - indukciós és ellenállásos gyorsítókezelést;
- anyagegyesítő, illetve anyagszétválasztó (plazma-, elektronsugaras, lézeres) hegesztést, illetve vágást és a nagy sebességű vízsugaras vágást, hozzáértve:
 - az olcsó és gyors alakítószerszám-előállítási módszert, mely lemezből lézerekkel kivágott szerszám-„szeletek” egymásra építését jelenti;
 - lézeres hegesztés és vágás, illetve képlékeny alakítás kombinált alkalmazásával végzett prototípusgyártást, sőt szériagyártást (pl. összeszerelt autók karosszéria-lemezrészecskék gyártása és megmunkálása);
- továbbá az üvegfémek (fémüvegek) előállítására alkalmas gyorsdermesztő módszereket.

Nagy energiasűrűségről (nagy teljesítménysűrűségről) akkor szokás beszélni, ha a fajlagos teljesítmény- (energia-) bevitel meghaladja a $10^2 \text{ W/mm}^2 = 10^4 \text{ W/cm}^2 = 10^8 \text{ W/m}^2$ -es értéket. Az **1.1. táblázat** összehasonlítja néhány ilyen hőforrással végzett hevítés jellegzetes adatait. Az említett határérték azonban nem különíti el jól és egyértelműen a hagyományos, illetve az általában nagy energiasűrűségűként emlegetett hőforrásokat, eljárásokat. Talán ez indokolhatta, hogy bevezették az ultra- (vagy extrém) nagy energiasűrűség fogalmát is, mely már ténylegesen csak a plazmás, de főképp az elektronsugaras és a lézeres eljárásokat jellemezheti, ami számszerűsítve a $10^4 \text{ W/mm}^2 = 10^6 \text{ W/cm}^2 = 10^{10} \text{ W/m}^2$ -es érték – sugárfókuszolás útján történő – megvalósíthatóságát jelenti.

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

1.1. táblázat. Hőforrások technológiai jellemzői

hevíítési módok \ jellemzők		teljesít- mény- sűrűség [W/mm ²]	hatás- időtar- tam [s]	jellemző felületkeze- lési réteg- mélység [mm]	hőforrás hőmérséklet [°C]
hőfejlődés a munkadarab- ban	ellenállás és impulzusheví- tés	10 ¹ –10 ³	0,01–0,2	0,2–1,0	-
	indukciós hevít- tés	10 ⁰ –2·10 ²	0,1–5,0	0,5–2,5	-
	indukciós im- pulzushevíítés	10 ¹ –3·10 ²	0,001– 0,5	0,05–0,5	-
hőfejlődés a hőforrásban	lánghevíítés*	10 ¹ –5·10 ²	0,1–2,0	0,5–3,0	3000–3200
	elektromos ívhevíítés**	5·10 ⁰ –2·10 ²	0,1–1,0	0,1–2,0	4000–5000
	plazmaheví- tés***	5·10 ⁰ –10 ³ (5·10 ⁰ –10 ⁶)	0,01–0,1	0,01–1,0 ⁺	10 000– 20 000
hőfejlődés hőforrás– munkadarab kölcshatás- kor	elektronsuga- ras hevítés	10 ¹ –10 ⁷	0,001– 0,1	0,01–0,5 ⁺	-
	lézeres hevítés	10 ¹ –10 ⁷	0,001– 0,1	0,01–0,5 ⁺	-
	lézeres impul- zushevíítés	10 ² –10 ⁸	0,001– 0,1	0,01–0,5 ⁺	-

* C₂H₂+O₂ láng **AWI ív

***Ar-plazma

⁺ olvasztáskor ennél több is lehet

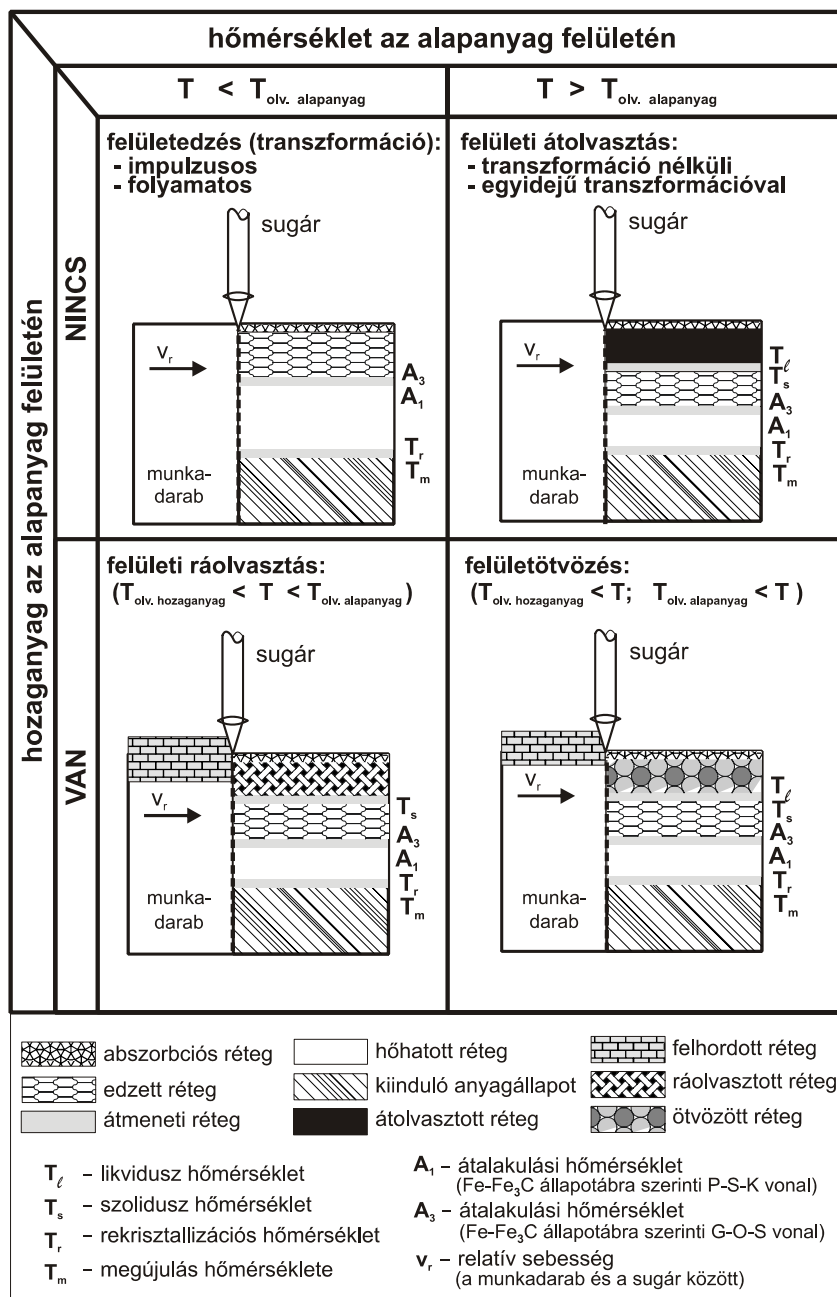
Az **1.12. ábra** csak ezeket az ultranagy energiasűrűségű – tehát plazmás, elektronsugaras, lézeres – felületkezeléseket foglalja össze, zárójelben megemlítve az adott eljárások elterjedt angol elnevezéseit is. Az ábrában szereplő szilárd állapotú és olvadék állapotú, illetve termikus és termokémiai kezeléseken kívül egyes szakirodalmak megemlítenek gőz állapotú felületkezelő (lézerrel intenzifikált pirolízises és fotolízises CVD, lézeres PVD stb.) és elektrolitikus (lézerrel gyorsított árammentes bevonó, eloxáló, stb.) eljárásokat is.

Az **1.13. ábra** pedig még tovább szűkítve (szemléltető vázlatokkal kiegészítve) a lézeres és az elektronsugaras felületedzést, felületi átolvasztást, felületi ráolvasztást és felületötvöztést hasonlítja össze.

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

alapanyag felületi rétege			
alapanyag felületi rétegében	szilárd állapotban marad	olvadék állapotba kerül	
	Felületszilárdítás (surface strengthening)	Felületedzés (surface hardening)	Felületi átolvasztás (surface remelting)
	elektronsugárral, lézerrel	elektronsugárral, lézerrel	elektronsugárral, lézerrel
	<ul style="list-style-type: none"> → lökéshullámos felületszilárdítás (shock wave treatment) → impulzusos keményítés (shock hardening) 	<ul style="list-style-type: none"> → allotrópiát mutató anyagok keményítése (transformation hardening) → allotrópiát nem mutató anyagok lágyítása (recrystallization annealing) 	<ul style="list-style-type: none"> → mikroszerkezet-finomítás (microstructure refinement) → homogenizálás (homogenisation) → sűrűség-növelés (densification) → zománcozás, üvegesítés (glazing, vitrification)
	összetételváltás	Termikus szórás (thermal spraying)	Felületi ráolvasztás (surface cladding)
		plazmával, lézerrel	elektronsugárral, lézerrel
	<ul style="list-style-type: none"> → plazmaszórás (plasma spraying) → lézerszórás (laser spraying) 	<ul style="list-style-type: none"> → homogenizálás (homogenisation) → sűrűség-növelés (densification) 	<ul style="list-style-type: none"> → ötvözőelemek oldatba vitele (alloying treatment) → diszperz részecskék bevitele (particle injection)
		Előbevonással (azaz 2 lépésben) Por-, huzal- vagy reaktív gáz-adagolással (azaz 1 lépésben)	

1.12. ábra
Ultranagy energiasűrűségű felületkezelések



1.13. ábra

Lézeres és elektronsugaras felületkezelési technológiák és hatásuk (acélok esetében)

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

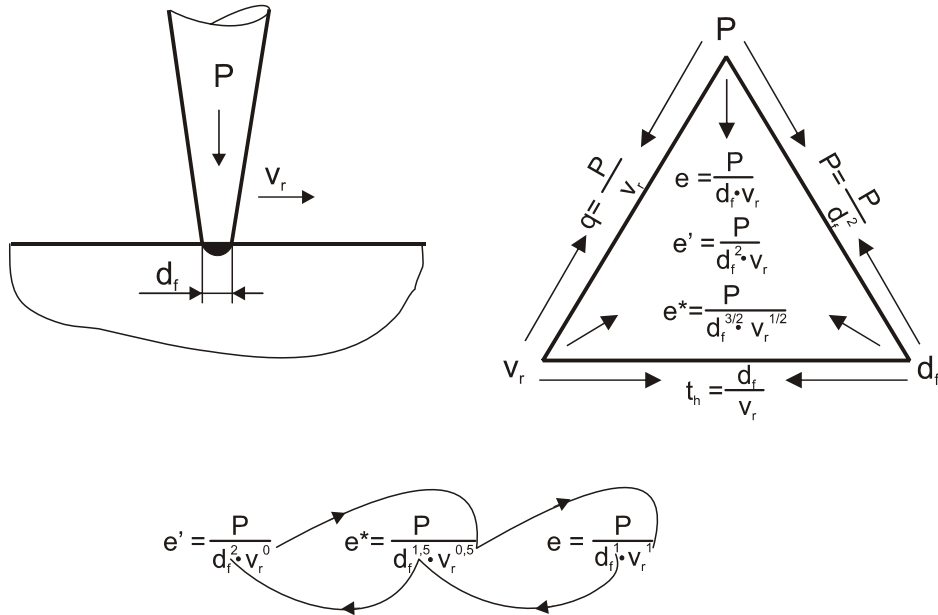
Az extrém nagy energiasűrűségű, azaz fókuszolható hőforrások mint koncentrált hőbevitelt biztosító technológiai megoldások fontosabb technikatörténeti vonatkozásai a következők:

- A plazmával (ionizált, vagyis elektromosan vezető gázokkal) H. Gerdiennek és A. Lotznak már 1922-ben sikerült kb. 50 000 K állandósult hőmérsékletet elérni. Az első gyakorlati plazmaíves megmunkálóeszköz az 1955-ben kifejlesztett vágópisztoly volt. Felületkezelési célokra 1961-től, hegesztésre 1963-tól alkalmazzák a technikai (viszonylag kis ionizációs tényezőjű) plazmát.
- Németországban a Siemens cégnél M. von Pirani már 1907-ben szabadalmi jogot kapott az elektronsugarak hőforrásként való alkalmazására, nagy olvadáspontú fémek olvasztására. Elektronsugaras hegesztőberendezéssel 1950-ben Steigerwald végzett sikeres kísérleteket, majd 1958-ban helyezték üzembe a valóban jól használható berendezések első példányait. Főként megfelelő vákuumtechnikai feltételek hiánya eredményezte ezt az 1907-hez képest jelentős „késést”.
- A lézer (LASER = *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* = fényerősítés a sugárzás gerjesztett emissziójával) alapvető tulajdonságait Albert Einstein már 1917-ben felismerte, de csak a mézer (MASER = *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* = mikrohullámú erősítés a sugárzás gerjesztett emissziójával) felfedezése után 1960-ban sikerült az amerikai Theodore Harold Maimannak kísérletileg bizonyítania a mézerben megvalósuló mikrohullámú erősítést impulzusüzemű rubinlézer konstrukcióval az optikai színek tartományban is. 1962 óta foglalkoznak szerkezeti anyagok lézeres megmunkálásának technológiáival.

A fókuszolható technológiai hőforrások beállítási paraméterei közül az anyagmegmunkálási hőciklust (termikus anyagtechnológiai folyamatokat) és annak eredményét lényegesen meghatározza:

- a sugárteljesítmény: P [$W = J/s$],
- a fókuszolt sugár által érintett anyagzóna – felületi fókuszolt – jellemző mérete: d_f [mm],
- a munkadarab és a sugár egymáshoz viszonyított relatív sebessége v_r [mm/s].

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai



1.14. ábra

Nagy energiasűrűségű technológiák paraméterösszefüggései

Az **1.14. ábrán** látható technológiai paraméter-háromszögből adódnak a nagy energiasűrűségű megmunkálások fő energetikai, illetve energiasűrűségi jellemzői:

- a teljesítmény (P) és a relatív sebesség (v_r) hányadosa, ami az ömlesztő hegesztésekre is általánosan értelmezett fajlagos hőbevitel vagy szakaszenergia:

$$q = \frac{P}{v_r} \quad \left[\frac{J}{mm} \right]. \quad (1.1)$$

- a teljesítmény (P) és a fókuszfoltméret (d_f) négyzetének hányadosa, a teljesítménysűrűség, mely tartalmaz egy fókuszgeometria-faktort (Y) is, aminek értéke négyzetfolt esetén 1, köralak esetén $\pi/4 = 0,785$:

$$p = \frac{P}{Y \cdot d_f^2} = \frac{P}{Y \cdot d_f^2 \cdot v_r^0} \quad \left[\frac{W}{mm^2} \right]. \quad (1.2)$$

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

- a fókuszfoltméret (d_f) és a relatív sebesség (v_r) hányadosa, az ún. hatásidő-tartam, azaz egy felületi anyagi pont fókuszfoltban való tartózkodási ideje:

$$t_h = \frac{d_f}{v_r} \quad [s] \quad (1.3)$$

- a teljesítménysűrűség (p) és a hatásidőtartam (t_h) szorzata vagy másképpen a teljesítmény (P) és a fókuszfoltméret (d_f) – relatív sebesség (v_r) szorzat hányadosa, ami felületi energiasűrűségnek vagy fajlagos planimetrikus energiabevitelnek is nevezhető a mértékegysége alapján:

$$e = p \cdot t_h = \frac{P}{Y \cdot d_f \cdot v_r} = \frac{P}{Y \cdot d_f^1 \cdot v_r^1} \quad \left[\frac{J}{mm^2} \right]. \quad (1.4)$$

- a teljesítménysűrűség (p) és relatív sebesség (v_r) hányadosa vagy másképpen a teljesítmény (P) és a fókuszfoltméret négyzete (d_f^2) – relatív sebesség (v_r) szorzat hányadosa, ami térfogati energiasűrűségnek vagy fajlagos volumetrikus energiabevitelnek tekinthető a mértékegysége alapján:

$$e' = \frac{p}{v_r} = \frac{P}{Y \cdot d_f^2 \cdot v_r} \quad \left[\frac{J}{mm^3} \right]. \quad (1.5)$$

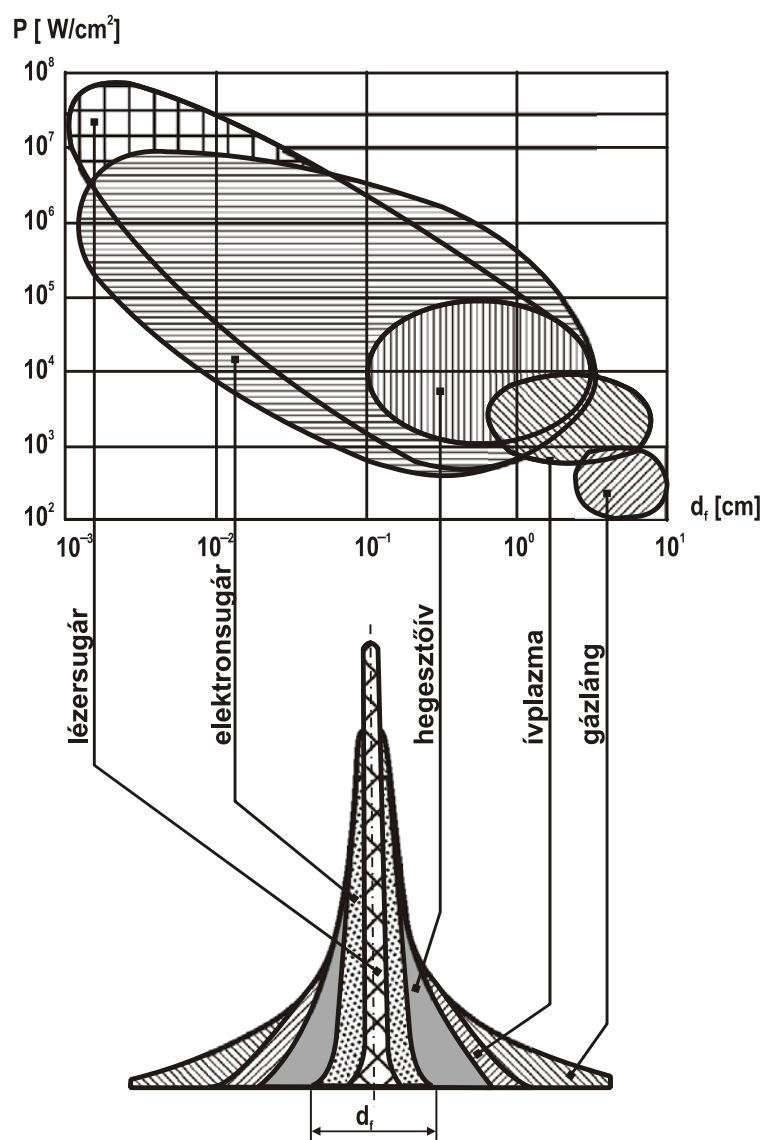
Ez utóbbi kettő jobban kifejezi a technológia „hatását”, mivel mindhárom paramétert együttesen figyelembe veszi, sőt megadható az energiasűrűségnek egyfajta „súlyozott” értéke is (**1.14. ábra** alsó része), amelyben a fókuszfoltméret (d_f) és a relatív sebesség (v_r) hatása kitevőiken keresztül „korigálva” szerepel:

$$e^* = p \cdot \sqrt{t_h} \cdot Y = \frac{P}{d_f \cdot \sqrt{d_f} \cdot v_r} = \frac{P}{d_f^{3/2} \cdot v_r^{1/2}} = \frac{P}{d_f^{1,5} \cdot v_r^{0,5}} \quad \left[\frac{J}{mm^2 \sqrt{s}} \right]. \quad (1.6)$$

Az **1.15. ábra** néhány termikus eljárás hőforrását hasonlítja össze a hatásidőtartam (t_h) és a teljesítménysűrűség (p) logaritmikus koordináta-rendszerében. Jól megmutatkozik az elektronsugaras és a lézeres technológiák hagyományos mód-szerekkel nem „helyettesíthető” sajátossága, a bennük rejlő technikai lehetőségek különlegessége. Az előzőekben meghatározott teljesítménysűrűség, illetve hatásidőtartam logaritmikus függvénykapcsolatának lineáris paramétervonalai a két tényező szorzataként felírható felületi energiasűrűség állandó értékeit jelölik ki. Eb-

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

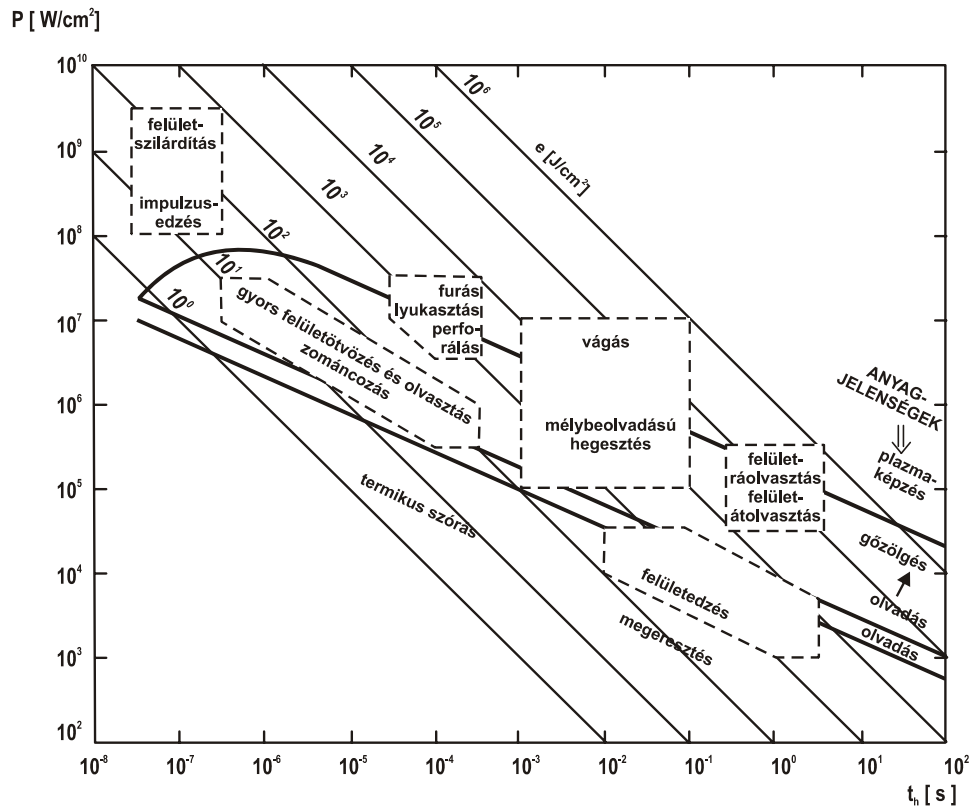
ben az értelemben az **1.16. ábra** az elektronsugaras és a lézeres megmunkálási eljárás(változatok) egyes tartományait ábrázolja.



1.15. ábra

Termikus eljárások hőforrásainak jellemzői

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai



1.16. ábra
Elektronsugaras és lézeres eljárások paramétertartományai

Viszonylag kis teljesítménysűrűségeknel – melyek hatására még nem következik be a felület menti réteg megolvadása – a gyors melegedés, illetve lehűlés következtében edződés (keménységnövekedés) vagy rekrisztallizáció (kilágyulás) következik be. A teljesítménysűrűség további növelése révén elérhető a munkadarab felületének megolvadása, majd tovább növelve a sugárintenzitást, megindul az alapanyag elpárolgása. Ha a felület könnyen gőzzé váló szennyezőket tartalmaz, akkor lehetővé válik a felület tisztítása is. Lézer esetében az elpárolgott anyagrészecskék abszorbeálják a beeső fényt, elősegítve ezáltal plazmaáttörés kialakulását. A plazmával járó lökéshullám, UV-sugárzás és magas hőmérséklet hatására lehetővé válik a környező atmoszféra atomjainak, ionjainak az alapanyagba való beépülése (szintézis, oxidáció stb.). A gyors hűtés – egy bizonyos küszöbérték meghaladása után – a felület menti réteg üvegesedését, amorfizálódását okozhatja. Az esetek többségében a felületi réteg keménységének lényeges növekedése figyelhető meg, ami a technológiai felhasználás szempontjából elsődleges fontosságú.

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

A nagy energiasűrűségű (nagy teljesítménysűrűségű) hőforrásokkal (lézerrel, elektronsugárral) végezhető lokalizált felületkezelésnek két legismertebb anyagbevitel-mentes (ötvöztetés nélküli) lehetősége allotróp átalakulást mutató ötvözetek – elsősorban acélok – esetében:

- felületkezelés szilárd állapotban, azaz átolvasztás nélküli felületedzés;
- felületkezelés olvadék állapotban, azaz felületi átolvasztás és azzal járó edzés.

Mindkét variáció azonos elven alapul: a besugárzott területen a hőforrás energiájának abszorbeált része hővé alakul, és egy igen rövid időtartamon belül magas hőmérsékletre (ausztenitesítési, olvadási, párolgási stb.) hevül az anyag vékony felületi rétege. Míg az elsőt inkább szerkezeti acélok, illetve gépalkatrészek, a másodikat elsősorban szerszámacélok vagy megmunkáló szerszámok esetében alkalmazzák. A felületi edzéskor és a felületi átolvasztáskor az önedződés és a gyors dermedés következtében a funkcionális szempontból kijelölt, továbbá jól behatárolt és relatíve vékony felületi rétegben kialakuló keménységnövekedés a meghatározó tényező. Ez átolvasztásnál még szemcsefinomodással is párosul. Meg kell jegyezni, hogy felületkezelt rétegsávok (trackek) átfedésekor bizonyos helyeken a fellépő megeresztő hatás keménységcsökkenést eredményez(het).

A kívánt célt (csak olvasztás nélküli edzés vagy átolvasztás is) befolyásoló paramétereket, azaz a nagy energiasűrűségű felületkezelés technológiai jellemzőit három jellegzetes csoportba sorolhatjuk, úgymint anyagminőségi, hőbeviteli és sugárminőségi paraméterek. Ez utóbbiak alap- és segédértékei együttesen az ömlesztő hegesztéstől, a segédértékei önmagukban a nagy energiasűrűségű hegesztéstől teszik eltérővé az olvasztásos felülettechnológiákat. Ezen paraméterek rendszerezett áttekintését teszi lehetővé az **1.2. táblázat**.

Az alkalmazható nagy energiakoncentráció tehát igen rövid hevítési periódust és nagy hőmérséklet-gradienst eredményez az „exponált” felületi zónában. A hűlési periódusban a hőáram a munkadarab összterfogatához képest csekély kiterjedésű hevített zónából a hőmérséklet-gradiens irányának megfelelően a hideg(ebb) alaptestbe irányul. Ez az „önhűtési” folyamat az anyag hővezetési tényezőjétől függően rendkívüli hűlési sebességet biztosít, az acélok átalakulási hőmérsékletei eltolódnak, a fázisátalakulást szenvedő anyagmennyiség megváltozik. A munkadarab egészéhez képest alacsony termikus terhelés csekély méret- és alaktorzulást eredményez, általában utánmunkálási igény nélkül.

A nagy teljesítménysűrűségű elektron- és lézersugaras hőforrások és a velük végzett felületkezelések további jellemzői:

- gyorsan ki-be kapcsolhatók, pontosan, tehetetlenség nélkül, kontaktusmentesen adott helyre és mélységre (bonyolult geometriák követésére) pozícionálhatók;
- az egyébként nehezen hozzáférhető kezelési helyek is egyszerűen elérhetők (a sugárforrás–munkadarab távolság nincs szűk tartományra korlátozva);
- pontosan beállítható és jól ellenőrizhető a fókuszpozíció és a fókuszméret, illetve a kezeléssáv-követés;

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

1.2. táblázat. Nagy energiasűrűségű felületkezelés technológiai jellemzői

	anyagminőségi paraméterek	energiabeviteli paraméterek	sugárminőségi paraméterek
	alapanyag	közvetlen hőbevitel	sugárkoncentráció
szükséges alap-paraméterek	<ul style="list-style-type: none"> – kémiai összetétel, karbon, illetve ötvözőegyenérték ($C, \Sigma O_i, C_e, \bar{O}_e$) – hőfizikai jellemzők ($\lambda, a, L; T_{op}, (T_s, T_i); T_{rek}, A_1, A_3$) – geometriai jellemzők (alak, méretek, felülettopográfia) – kiinduló állapot (szemcse-nagyság, szövetszerkezet) 	<ul style="list-style-type: none"> – teljesítmény (névleges, maximális) – effektív érték (hatásfok, abszorpciós tényező) – üzemmód (folyamatos, szakaszos) – relatív sebesség (mozgó sugár, mozgó munkadarab) 	<ul style="list-style-type: none"> – fókuszolt (méret, alaktényező) – munkatávolság, fókuszpozíció (fókuszáram, defókusz) – sugárprofil, módus-szerkezet (energiaeloszlás, polarizáció) – környezeti közeg és nyomás (vákuum, védőgáz)
	hozanyag	közvetett hőbevitel	sugáreltérítés
lehetséges segéd-paraméterek	<ul style="list-style-type: none"> – összetétel (ötvözők, szennyezők) – finomság (szemcseméret, méretoszlás) – felviteli mód (kezelés előtt, kezelés közben) – réteggeometria (vastagság, pórusosság) 	<ul style="list-style-type: none"> – totális előmelegítés (egész munkadarabra, T_0, mód) – lokális előmelegítés (következő rétegsávra, T_0^*) – lokális utóhőntartás (előző rétegsávra, sávfedezés) – totális utóhőntartás (egész munkadarabra, T_u, mód) 	<ul style="list-style-type: none"> – kezdőpozíció (statikus sugárelpozicionálás) – pályaalak (dinamikus sugármozgatás) – amplitúdó (dinamikus sugármozgatás) – frekvencia, ciklusidő (dinamikus sugármozgatás)

- a teljesítmény nagy pontossággal szabályozható (csak az melegszik, amit kezelni akarunk), de az elérhető kezelési mélység limitált;
- könnyen (tisztán elektronikus úton) valósul meg a folyamatszabályozás (a folyamatparaméterek egyszerűen, flexibilisen, gyakran fokozatmentesen változtathatók, adott berendezésnél jól reprodukálhatók), a kezelési ciklus gyorsan ki-be kapcsolható, illetve jól automatizálható (minden eljárásparaméter számítógéppel vezérelhető);
- a folyamatos mellett impulzusos üzemmód is lehetséges;
- a kisebb hőbevitel, illetve kisebb termikus igénybevétel következtében a munkadarab nagyobb tömege hideg rugalmas állapotban marad, keskenyebb hőhatásövezet jön létre, kisebbek a deformációk és a méretváltozások, lehetővé válik előzetesen hőkezelt, illetve hőérzékeny állapotú anyagok felületkezelése is;
- a vákuumos, illetve a védőgázos kezelésnél sima, tiszta, szennyezés-, oxidáció- és ötvözőkiegész-mentes felület érhető el különösebb utómunkálási igény nélkül;
- a nagyobb alkalmazható kezelési sebesség révén kisebb a fűdő, nő a termelékenység, viszont magasak a beruházási és az üzemeltetési költségek, így jó kihasználtsági fokra kell törekedni a meglévő berendezésnél;
- a „láthatatlan” sugárveszély egészségkárosító hatása ellen biztonsági eszközökre, illetve intézkedésekre van szükség.

1.3.1. Lézer

Közzel fél évszázada a lézer felfedezése új távlatokat nyitott számos tudományágban. Az első évtizedben elsősorban laboratóriumi körülmények között kezdődtek meg a lehetséges alkalmazások feltérképezései. A második évtized már hozott jó néhány vitathatatlan eredményt a mérés technikától egészen a távérzékelésig, míg a harmadik évtizedben a lézer az ipari eszközök rangjára emelkedett. Azóta alkalmazása egyértelműen nagy perspektívát jelent, a kiépült és a fejlesztés alatt álló technológiai háttér révén a tömeggyártásban való alkalmazása is gazdaságossá válik. Az ipari gyakorlatban leggyakrabban a $10,6\ \mu\text{m}$ hullámhosszú CO_2 - ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$) és a $1,06\ \mu\text{m}$ hullámhosszúságú $\text{Nd}:\text{YAG} = (\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12})$ lézereket használják leginkább, mivel az ezek által kibocsátott fény az infravörös tartományba esik, s ezt a megmunkálható anyagok többsége jól abszorbeálja.

A lézersugárzást alkotó fotonok a kezelt felületről részben visszaverődnek, részben elnyelődnek. Ez utóbbiak energiájukat a megmunkálandó anyag atomjainak, illetve molekuláinak rezonanciafrekvenciájukon történő gerjesztéssel adják át. A fotonok behatolási mélysége igen csekély, így a jelentős mélyhatást a koncentrált energia hővezetés útján való terjedése okozza. Természetesen a kezelés közvetlen helyétől távolodva a felhevült részek a külső környezet felé hőt adnak le. Ha a lézersugár intenzitása elegendően nagy, és a relatív mozgási sebesség nem túl gyors, akkor a lézersugár közepén a munkadarab bizonyos vastagságában fémgőz keletkezik, és gőzzel telített csatorna alakul ki. Ebben a gőzcsatornában a sugárterjesztmény jelentős része vagy a plazmaképződés miatt, vagy a Fresnel-mechanizmusnak megfelelően a csatorna falán kialakuló abszorpció miatt és a többszörös visszaverődés folytán – amely a gőzcsatornát mint egy fekete testet működteti – elnyelődik.

A nagy teljesítményű lézersugár – szemben az elektronsugárral – vákuum nélkül is nagy energiasűrűséget biztosító, térben és időben koherens, kis divergenciájú monokromatikus fénynyaláb, mellyel bármilyen optikailag elérhető felület megmunkálható. A lézersugárforrások hatásfoka viszonylag alacsony, ezért a lézeres megmunkálási folyamatok hatékonyságát döntő mértékben befolyásolja az elnyelt energiahányad. Minél nagyobb hatékonysággal tudjuk elnyelezni az anyagfelületre érkező energiát, annál gyorsabban és gazdaságosabban tudjuk a lézeres kezeléseket megvalósítani. Az elnyelt energia mennyisége nagyon sok tényezőtől függ, amelyek közül a legfontosabbak: a lézersugár teljesítménysűrűsége, módus-szerkezete, a besugárzott felület abszorbeáló képessége.

Az indukált emissziós folyamattal keltett elektromágneses tér bizonyos megengedett konfigurációk (módusok) felvételére kényszerül a peremfeltételeknek (cső-átmérő, tükrörlak, rezonátorerősítés, lézergyag-inhomogenitás, pumpáló teljesítmény) megfelelően. Mivel az ideálistól eltérően általában több átmenetből keletkezik a lézerfény – beleértve az egynél több axiális hullámból keletkező longitudinális, illetve a különböző keresztmetszeti intenzitáseloszlású transzverzális (TEM) módusokat –, így kisugározva bizonyos kitüntetett eloszlásokban lép ki, egyszerűbb vagy bonyolultabb alakzatokat felvéve. A módusszerkezet osztályozása a

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

terjedési irányra merőleges síkban látható kimeneti eloszlásképpen alapul. A Transzverzális ElektroMágneses (TEM) módusszám jelölése (indexelése) e síkban lévő két merőleges tengelyen található zérushelyek számával történik, azaz a módusszámok eggyel kisebbek, mint a „fényes” zónák számai. A legegyszerűbb, jól fókuszolható, Gauss-energiaeloszlású TEM_{00} -módus, illetve -sugár a még jobb fókuszolhatóság érdekében instabil rezonátorral továbbformálható.

A felület abszorbeáló képességét (abszorpciós tényezőjét) befolyásolja az anyag fajtája, felületi minősége (topográfiája, érdessége stb.). A kezelendő munkadaraboknak rendszerint adott az anyaga, felületi mikrogeometriája, így ezeket az abszorbeáló képesség szempontjából – az esetek többségében – nem tekintjük változtatható paramétereknek. Célszerű tehát valamilyen jó abszorpciós tényezővel rendelkező vékony bevonati anyag (fekete festék, grafit, foszfátréteg stb.) felvitele kezelés előtt. Mivel egyes anyagok kezelése csak előmelegített állapotban lehetséges, ezért a munkadarab kiindulási hőmérsékletéhez is igazodni kell a megfelelő abszorpciós bevonatanyag kiválasztásakor.

A lézersugár mint monokromatikus (egyszínű) elektromágneses energianyaláb igen jól és pusztán optikai eszközökkel terelhető tetszőleges megmunkálási helyre. A jó fókuszolhatóság, illetve a nagy teljesítménysűrűség érdekében ugyan nincs szükség vákuumra, de bizonyos anyagok, ötvözetek nagy megmunkálási tisztaságot igényelnek, ezért az atmoszferikus (védőgáz) mellett részleges vákuumú vagy nagyvákuumú eljárásváltozatokat is alkalmaznak. A lézeres kezelés kis határfoka ellenére az egyik legflexibilisebb eljárás.

Adott anyagminőség és adott sugárteljesítmény esetén a kezelt anyagréteg alakját elsősorban a teljesítménysűrűség és azon belül is a teljesítményeloszlás (stacioner sugár esetén többnyire Gauss-eloszlás) szabja meg. A réteggeometria tehát a teljesítménysűrűség és a teljesítményeloszlás változtatásával szabályozható, ami egyenértékű a hőciklus szabályozásával. E szabályozás három legelterjedtebb módszere a következő:

- A sugár defókuszálása (szélesítése) a stacioner sugárral való kezelés egyik módja. Ennek célja keskeny és mély hegesztési varrat helyett korlátozott mélységű és adott szélességű felületolvasztott vagy felületedzett anyagsáv(ok) létrehozása.
- A sugár oszcillálása (lengetése, rezgetése) a sugár dinamikus eltérítését jelenti. A hőciklus az eltérítés pályájától, irányától, frekvenciájától és amplitúdójától függ. E dinamikus eltérítéskor a hőeloszlás a munkadarabon már nem Gauss-eloszlású.
- A sugár pulzálása (szaggatása) elektronikus úton – a sugár be-ki kapcsolásával – impulzusos kezelést tesz lehetővé. Az impulzus frekvenciájának és kitöltési tényezőjének megválasztásával elérhető, hogy a sugárszaggatás ellenére a kezelt anyagsáv folyamatos maradjon. Míg a sugár defókuszálása és lengetése a hőbevitel bizonyos mértékű növelése révén a munkarendet lágyabbá teszi, addig az impulzustechnika célja a munkarend még keményebbé tétele az effektív hőbevitel csökkentésével. Ezzel a kezelt anyagsáv vi-

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

szonylagos szélessége – a folytonos sugárral elérhető mérethez képest – tovább csökkenthető.

A lézerek fontos működési paramétereivel kapcsolatban a következő további szempontoknak kell figyelmet szentelni:

- **Hullámhossz:** az indukált emissziós lézerfolyamatban részt vevő átmenetek energiakülönbségétől és az optikai üreg (rezonátor) rezonancia-hullámhosszaitól függ. A megmunkálandó anyag abszorpciós (elnyelési) tényezőjét befolyásolja, hogy a hullámhossz az optikai tartomány melyik részére esik. A gyakorlatban elterjedt CO₂-lézereknél a 10,6 μm az infravörös, Nd:YAG-, illetve Nd:üveg-lézereknél az 1,06 μm a közeli infravörös tartományba esik. Ez utóbbit a fémek jobban abszorbeálják.
- **Polarizáció:** a lézer mint fénysugár viselkedése a fény terjedési irányára merőleges, egymással derékszöget alkotó elektromos és mágneses rezgések fogalmával írható le. Egy sugár akkor síkban poláros, ha az elektromos rezgés csupán egy síkban történik. A lézer kimenete lehet polarizált vagy nem polarizált, sőt polarizált sugárnyalábot a nem polarizáltból is létre lehet hozni megfelelő polarizáló anyagok, prizmák alkalmazásával, de ez együtt jár a kimeneti intenzitás csökkenésével. Ha a polarizáció síkja párhuzamos a kezelés irányával, akkor nagyobb, ha merőleges, akkor kisebb relatív sebesség engedhető meg a megfelelő rétegeometria érdekében. Lineáris polarizáció (nem forgó polarizációs sík) esetén a felületkezelés iránya (polarizációs szög) pontosan tartandó, cirkuláris polarizáció (forgó polarizációs sík) esetén tetszőlegesen megválasztható.
- **Abszorpciós tényező:** a lézersugár és az anyag találkozásakor a sugárzás egy része visszaverődik, más része elnyelődik. Az elnyelődés mértéke alapvetően a sugárzás hullámhosszától és az anyag minőségétől függ. Pl. az acélok rossz abszorpciója a CO₂-lézer 10,6 μm hullámhosszán azáltal jön létre, hogy a reflektáló képesség ebben a hullámhossztartományban az elektromos vezetőképességgel növekszik. Az olvadáspont alatti hőmérséklet-tartományban a fémek elnyelőképessége, abszorpciós tényezője kicsi. Az olvadék- és gőzállapotban, továbbá speciális bevonat alkalmazásakor viszont jelentősen megnövekszik. Mivel pl. a lézeres edzés és az olvasztás előtti felmelegedés általában szilárd állapotban történik, célszerű tehát a munkadarabok felületének elnyelési tényezőjét különböző bevonatok segítségével megnövelni. A legelterjedtebben a grafitot, a magnézium- és cinkfoszfátot, molibdén- és vas-szulfidot alkalmazzák spray, illetve lakk formájában, mivel nagy elnyelőképeséget eredményeznek különböző hevítési sebességek esetén is, továbbá a bevonat jól reprodukálható. Az abszorpciós bevonatok vastagságának megválasztásánál figyelembe kell venni: a túl vékony bevonatot a lézer könnyen roncsolja, s ezután a fém újra tükröz; túl vastag bevonat esetén pedig sok teljesítményt emészt fel ennek a rétegnek a „fűtése”. Az optimális rétegvastagság általában 0,065–0,1 mm tartományba esik. Az abszorpció a hullámhosszon és az elnyelő anyag fajtáján kívül nagymértékben függ a sugárzás beesési szögétől és polarizációjától is. Így a CO₂-lézer su-

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

gárázásának abszorpciója olyan polarizáció esetén, amelynél az elektromos tér vektora a beesési síkban (az elnyelő felületre vonatkoztatott merőleges és a sugártengely beesési iránya által meghatározott síkban) helyezkedik el, növekvő beesési szögnél megnő, és acélok esetében 80–85°-os beesési szögnél eléri kb. 80%-os maximumát (ilyenkor a beesési szög és az ún. Brewster-szög megegyezik egymással). Abban az esetben, amikor a polarizáció a beesési síkhoz képest merőleges, az abszorpció viszonylag kicsi marad. Az optimális beesési szög és a belőle származtatott abszorpciós maximum anyagjellemzőktől (pl. az elektromos vezetőképességtől) is függ. Az abszorpciós együttható fémek esetében az elektromos vezetőképességgel fordítottan, azaz az elektromos ellenállással egyenesen arányos. Mivel a fémek ellenállása a hőmérséklettel növekszik, a CO₂-lézersugár annál jobban elnyelődik, minél magasabb a munkadarab kiindulási hőmérséklete. Arra is tekintettel kell lenni, hogy a hőmérséklet a felületkezelési folyamat alatt bevitt hő miatt változik. Ha a folyamat hosszabb ideig tart, akkor a felületkezelési sáv végén nagyobb hatásmélység adódik, mint a nyomvonal elején. A fémek hevítésekor ún. futtatási színek figyelhetők meg, amelyek a lézersugár előtt és mellett rögtön megnövelik az abszorpciót. Ha a felületi érdesség az alkalmazott hullámhossz tartományába esik, akkor egyébként változatlan paraméterek mellett megnő az abszorpció. Ha az érdesség nagyobb a hullámhossznál, akkor a sugárzás a többszörös visszaverődés miatt még erősebben elnyelődik. Megállapítható, hogy az abszorpciós együttható a legfontosabb lézertechnológiai jellemzők közé tartozik, viszont meghatározása az előzőekben említettek miatt meglehetősen sok bizonytalansági elemet tartalmaz. (Felületkezelés előtt feltétlenül fontos a rozsdától, revétől, kenőanyag-maradékoktól való gondos megtisztítás is.)

- Védőgáz: egyik feladata az, hogy az éppen kezelés alatt álló felületet a környező atmoszféra hatásaitól megvédje, a másik az, hogy a lézeroptikát a keletkező gőzöktől, a fűvókát a túlhevüléstől óvja. E feladatokhoz viszonylag kis gázáramlás elegendő. Mivel a védőgázáram érintkezésben van a kezelési sávval, ez bizonyos hűtőhatást eredményez, befolyásolva a kezelési mélységet. Az ismételhetség érdekében mindig ugyanazon gázhozzávezetési megoldást kell alkalmazni. A védőgáznak jó hővezető képességűnek kell lennie, továbbá nem szabad ionizálnia (nagy ionizációs feszültséggel kell rendelkeznie), nehogy a lézersugarat visszaverő plazma alakuljon ki. A legjobb megoldást kínáló, de túl drága hélium helyett megfelel az argon is, sőt néhány esetben a nitrogén és a szén-dioxid is szóba jöhet.

A lézeres anyagmegmunkálás tehát sok, időnként változó paramétértől függ. Még ha az anyagminőség és munkadarabok méretei abszolút állandóak is – amit az ipari gyakorlatban nem lehet biztosítani –, a folyamatparaméterek változása bekövetkezik a hosszabb megmunkálási időszakok alatt. Ennek következtében mindig állandó minőség csak korlátozott körülmények (feltételek) mellett szavatolható. Ennek oka az optikai rendszerben mechanikailag és hőtanilag okozott változások, az optikai elemek szennyezettsége és elöregedése, a működő (működtető)

gázt továbbító csőfej kiégése vagy szennyezettsége, a rögzítőelemek kopása, eltérései, hatások az elektromos ellenőrző rendszerben stb. Továbbá az intenzív lézertény és az anyag kölcsönhatása fizikai értelemben dinamikus folyamat, amelynél a sugárzás-visszaverődés következtében „feedback” (visszatáplálás) történhet a lézerezonátorba, melynek eredménye a lézertényintenzitás-eloszlás ingadozása lehet.

1.3.2. Elektronsugár

Elektronsugarak katódból kilépő, kis kezdeti energiájú elektronok elektrosztatikus mezőben való felgyorsításával állíthatók elő. Az elektrosztatikus tér a nagy pozitív potenciálú anód hatására alakul ki. A kezdetben párhuzamosnak feltételezhető sugár nagy vákuumban az elektronáram-sűrűség növekedésével tágulást mutat, ami az azonos töltésű elektronok közötti Coulomb-erő okozta ún. negatív tértöltés hatása. Ez az elektronsugárzó geometriai kialakításával a gyorsítási szakaszon, illetve részecskékké váló ütközéssel a gyorsítás utáni szakaszon kompenzálódik. A termikus katód által biztosítható telítési elektronáram-sűrűség a hőmérséklettől függ. Kis teljesítmény esetén a katód közelében negatív előfeszültségű vezérlő-elektrod található, amellyel állandó gyorsítófeszültség mellett a sugáráram változtatható.

Vezérlőelektrodával ellátott háromelektrodos rendszerben sugárformálás, illetve sugárkeresztelés („cross-over”) jön létre. Itt a legkisebb a sugár keresztmetszete és legnagyobb az áramsűrűsége. A fókuszolórendszer feladata e keresztmetszet leképezése élesen a munkadarab felületére, mely elektrosztatikus vagy mágneses lencsék segítségével valósítható meg. Az elterjedtebb mágneses lencsék tekercsein átfolyó áram változtatásával a képtávolság (fókuszfolt-pozíció) könnyen beállítható, és ezáltal a sugár-teljesítménysűrűség változtatható, de nagy értéke csak vákuumban biztosítható, különben az elektronsugár szétszóródik. Az elektronsugarat elektrosztatikus vagy mágneses eltérítőtér segítségével irányítani is lehet két koordinátairányban, lehetővé téve a bonyolultabb pályakövetést, illetve a lengetést.

Elektronsugaras anyagmegmunkáláskor a munkadarabbal ütköző sugár energiamegoszlása a következő:

- általában 70%-nál nagyobb energiahányad az anyagban hőfejlesztésre ténylegesen felhasznált energiarész, ez az érték a sugárzótér részecskesűrűségének (gáz, gőz, plazma) növekedésével romlik;
- rendszerint 30%-nál kisebb energiahányad a munkadarabról rugalmasan visszaverődő elektronok okozta energiavesztés, ami a munkatér parazita melegedését okozza;
- 1%-nál kisebb energiarész röntgensugárzássá, főként fékezési sugárzássá alakul, mely nagy elektronenergia esetén a kezelőszemélyzetet veszélyeztetheti;
- létező, de elhanyagolható mértékű veszteség a munkadarabon szekunder elektronemissziót vált ki, ami vezérlőhatásként felhasználható;

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

- a sugárzótér részecskesűrűség-értéke és -eloszlása által meghatározott energiarész a gőz- és gáZRészecskékkel és töltéshordozókkal kölcsönhatásba lépő elektronok hatása, mely hasznos is lehet a negatív tértöltés kompenzálása szempontjából.

Az előzőekből következik az elektronsugaras megmunkálások jó hatásfoka. Az elektronsugárral bombázott anyagba az elektronok ún. közvetlen behatolási mélysége mindössze néhányszor tíz mikrométer, ennek ellenére igen mély és keskeny hegesztési ömledék, illetve varrat is létrehozható a nagy teljesítménysűrűségű sugár fókuszfoltja alatt.

Az elektronsugaras anyagmegmunkálás technológiai paraméterei:

- az időegység alatt a munkadarab felületéhez jutó elektronok számát meghatározó sugáráram, melynek növelése adott gyorsítófeszültség esetén a beolvadási mélységet növeli;
- a munkadarab felületéhez érkező elektronok sebességét meghatározó gyorsítófeszültség, melynek növelése adott sugáráram mellett a sávmélység és a sávszélesség viszonyszámát növeli;
- az elektronnyaláb koncentrációjának fokát a munkadarab felületén meghatározó fókuszáram, mely adott teljesítményszint és munkatávolság mellett a fókuszfolt átmérőjét szabályozza;
- a koncentrált elektronnyaláb és a munkadarab adott térfogatának kölcsönhatási időtartamát meghatározó relatív hegesztési sebesség, melynek növelése adott teljesítményszint esetén a sávmélységet és sávszélességet csökkenti;
- a munkadarab környezettisztaságát és reakcióképességét meghatározó kamranyomás;
- az elektronsugár munkadarab-környezettel való kölcsönhatásának idejét meghatározó munkatávolság.

Az első két paraméter a sugárteljesítményt, illetve az első három a teljesítménysűrűséget határozza meg. A sugárteljesítmény és a kezelési sebesség pedig a fajlagos hőbevitelt. A munkatávolság (az elektromágneses lencse fókuszja és a munkadarab felülete közötti távolság) a fókuszáramot teszi egyértelművé. Valamennyi paraméter hatással van a beolvadási mélységre. A kezelt sáv alakja befolyásolható a sugár eltérítésével, illetve lengetésével is, valamint impulzusteknikával a termikus folyamat munkarendje keményebbé tehető.

Egy konkrét esetben az elektronsugaras technológia főbb műveletei a következők:

- előkészítő műveletek: munkadarabok tisztítása, demagnetizálása (nemkívánatos sugáreltérülés megelőzése), esetleg előmelegítése, beállítása, rögzítése;
- technológiai paraméterek megválasztása és beállítása (anyagminőség és vastagság, illetve berendezésadatok [U_{gy} , P_{max}] ismeretében): munkatávolság $\rightarrow$ fókuszáram, kezelési sebesség $\rightarrow$ sugáráram;
- szükséges kamranyomás elérése;
- sugárpozicionálás kis teljesítménnyel;

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

- technológiai ciklus végrehajtása;
- belevegőzés a kamrába vagy lassú hűtés vákuumban, esetleg utóhőkezelés.

Az elektronsugárnak nincs saját hőmérséklete, így az 1200–1400 °C-ra felhevített katódból kilépő elektronok 10^8 m/s nagyságrendű – vákuumban nagy gyorsítófeszültséggel elérhető – sebessége révén nyert nagy kinetikai energia hasznosul az anyagmegmunkálás során. A megmunkálandó felülettel ütköző sugárraláb kisebb része visszaverődik a felületről, nagyobb része egy vékony rétegbe behatolva lefékeződik, elnyelődik, és energiáját átadja a munkadarab anyagi részecskéinek. Az elektronsugaras eljárásokra jellemző nagy tisztaság és teljesítménysűrűség a vákuumtechnikának köszönhető, ám a vákuumkamra méretei behatárolják a kezelhető darab méreteit, illetve a vákuum létrehozásának időigénye csökkenti a berendezés kihasználtsági fokát és a termelékenységet. A nagyobb termelékenység, a jobb kihasználtsági fok elérése indokolta a nagyvákuumos mellett a középvákuumos és a nemvákuumos eljárásváltozatok megjelenését, bizonyos kompromisszumok árán.

1.3.3. Plazma

A plazma az anyagok harmadik és negyedik (azaz a semleges gáz, illetve a teljesen ionizált) halmazállapota közötti átmeneti állapot. Az ionsűrűség és az összes részecskesűrűség hányadosa – az ionizációs tényező értéke – alapján két jellegzetes plazmatartomány különböztethető meg:

- nagymértékben ionizált, ún. fizikai plazmák, melyek ionizációs tényezőjének értéke megközelíti az egyet, és hőmérsékletük tízmillió °C nagyságrendű (pl. magfúziónál);
- kismértékben ionizált, ún. technikai vagy technológiai plazmák, melyek ionizációs tényezőjének értéke kisebb 10^{-4} -nél, és hőmérsékletük 5000–50 000 °C közötti (pl. anyagmegmunkálásnál).

A technológiai gyakorlat szempontjából tehát az utóbbi plazmatípusnak van jelentősége, amely tulajdonképpen molekulák, atomok, ionok és elektronok keveréke. Ha a plazma termodinamikusan (hőnek és más energiatípusnak kölcsönös átalakulását tekintve) egyensúlyi állapotban van, akkor a plazmában található összes részecske közepes hőmérséklete azonos, és ezen állapot hatására kedvezően alakul a hevítendő anyagra történő hőátvitel.

A plazma az elektronsugárhoz és a lézerhez viszonyítva kevésbé flexibilis (köttőségmentes alkalmazhatóságú) hőforrás, azaz gyors mozgatása, pontos pozícionálása (pl. bonyolult geometriák követésénél), valamint energiájának, illetve keresztmetszetének gyors változtatása nehézkes. Viszont a plazma részecskéinek igen nagy energiaszintű ($1\text{--}10^6$ eV) állapota révén érhető el a nagy hőmérséklet. Megfelelő égőfejjel, jó „fókuszálással” 10^6 W/cm² teljesítménysűrűség is elérhető a megmunkálandó felületen. Sőt a hevítési sebesség impulzus üzemmódban (10^{-5} – 10^{-8} s impulzusidővel), nagy kiáramlási sebességgel ($5\cdot 10^3$ – $3\cdot 10^4$ m/s) tovább fokozható, forráspontig történő melegedés 10^{-6} – 10^{-5} s alatt is elérhető.

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

Valamely gáz plazmává alakításához, azaz a gáz ionizálásához (elektronjának „leszakításához”), elegendően nagy energia hozzávezetése szükséges. Ennek egyik lehetséges módja két elektróda között égő nagy hőmérsékletű ív, ami fűjja a gázt, és közben átadja a szükséges energiát. A gáz többszörös ionizálásához (pl. $N \rightarrow N^+ \rightarrow N^{++}$ vagy $Ar \rightarrow Ar^+ \rightarrow Ar^{++} \rightarrow Ar^{+++}$) nagyobb energiára van szükség, de ehhez nagyobb plazmahőmérséklet is társul.

Ipari alkalmazásoknál – a kívánt hőátadás létrejötte szempontjából – fontos jellemző a plazma hő(energia)tartalma, fajlagos elektromos ellenállása és hővezető képessége is. Mivel a többatomos (molekuláris) gázokat ionizálás előtt általában disszociálni (atomjaira bontani) kell, energiatartalmuk nagyobb, mint az azonos hőmérsékletű egyatomos gázoké, viszont nehezebb előállítani pl. nitrogénplazmát, mint argonplazmát. Ugyanakkor a kétatomos gázok hővezetési tényezőjének – a molekuladisszociáció tartományában – egy kiugró maximuma van, ami szilárd anyagok olvasztása esetén jobb hőátadást eredményez. Ám a nagyobb disszociációs fok eléréséhez kisebb hővezetőképesség szükséges, nehogy a részecskék energiája gyorsan a környezetnek adódjon át, és ezáltal a munkadarabba kisebb hányad jusson.

A technológiai plazmát létrehozó ív katódja (negatív pólusa) oxiddal ötvöztött volfrámelektroda, anódja (pozitív pólusa) pedig egy gyűrű alakú, vízhűtéses rézfúvóka vagy a munkadarab. Az első esetben nem átvitt ívről, vagyis plazmasugárról, a második esetben átvitt ívről, vagyis plazmaívről beszélünk. A helyi elektródabeégés csökkentésének (élettartam-növelésének), azaz az ívtalppont áthelyezésének egyik módja axiális irányú mágneses tér alkalmazása, amelynek hatására az elektromos ív pörögni kezd. Másik lehetőség a plazmagáz érintőleges bevezetése és ezáltal pörgő-örvénylező ív- és gázmozgás kialakítása (Vortex-hatás).

Kísérletek tanúsága szerint a teljesítménysűrűség szabadon égő ív és 200 A feletti áramerősségek esetén már kevésbé változik. Az átvitt hőfluxus sűrűségének, a gázsebességnek és a hőmérsékletnek a növelésére a fúvókával szűkületet kell létrehozni az ívben. A plazmaívet módosítható a plazmagáz és a védőgáz összetételével, térfogatáramával, hideg plazmagáz vagy fókuszáló gáz alkalmazásával. A fúvóka intenzív hűtése az ív további szűkítését eredményezi. Lamináris (párhuzamréteges) plazmaáramláshoz általában nagyobb teljesítményre van szükség, mint a turbulenshez (örvényleteshez), viszont ez utóbbinak kedvezőtlenebb a hőmérséklet-eloszlása.

Egy plazmaberendezés fő egységei a következők:

- Plazmaégőfej: a feladattól függően különböző terhelhetőségű és alakú lehet. Egyenes polaritású max. 225 A-rel, gépi fej max. 500 A-rel terhelhető folyamatosan. Fordított polaritással tartósan csak néhány plazmafej használható, mivel ehhez vastag és különlegesen jól hűtött elektróda szükséges.
- Elektróda: max. 2% tórium-, esetleg cirkónium- vagy lantán-oxid ötvöztetésű volfrámból készül, mely egyenes polaritás esetén kúpos (20–60°), fordított polaritás esetén félgömb végződésű. Méretét az áramnem és az áramerősség határozza meg.

1. A felületkezelés alkalmazási szempontjai

- Plazmafúvóka: többnyire rézből készül, és a nagy hőterhelés miatt közvetlenül vagy közvetve hűthető. Mérete elsősorban az áramerősségtől és a plazmagáz mennyiségétől függ.
- Áramforrás: a főív áramforrása az esetek többségében fokozat nélkül állítható eső statikus jellegű, egyenáramú (DC). Üresjáratú feszültsége 65–80 V, esetenként a 100 V-ot is meghaladhatja. Bizonyos alkalmazásokhoz célszerű az olyan áramforrás telepítése, mely rendelkezik áramprogram, illetve gázáramlás-változtatás lehetőségével, egyenáram-pulzálás (I_a , I_i , t_a , t_i), valamint polaritásváltoztatás (I_{ep} , I_{fp} , t_{ep} , t_{fp}) lehetőségével. A negatív polaritású elektródával létrehozott segédívet (2–10 A) vagy önálló áramforrás, vagy a főív áramforrása áramkorlátozó ellenálláson keresztül táplálja.
- Beállító- és vezérlőegység: általában az áramforrásban van elhelyezve (de lehet külön is), mely az áramerősség-idő programok beállítása, illetve végrehajtása mellett ellátja a plazma-, a védő-, és esetenként a harmadik plusz (fókuszoló) gázt adagoló szelepek működtetését, valamint a segéd- és főív gyújtórendszerének vezérlését is.
- Hűtőkör: leggyakrabban az áramforrásba van beépítve (de lehet kívül is), melyhez a plazmagenerátor szűk csatornáiból eredő nyomás és a nagy víz-tisztasági igény miatt hálózati víz nem használható.

Plazmagázként gyakran argont használnak, mely semleges jellege révén sem az elektródával, sem a fúvókával, sem a hegfürdővel nem lép kémiai reakcióba. Oxidáció elleni védőgázként ugyancsak argont használnak, esetleg néhány százalék (5–8%) hidrogénnel keverik, ami elősegíti a plazmaoszlop összeszűkülését. Esetenként héliumot is alkalmaznak a védőgázkeverékben vagy önállóan.

Az áramerősség értékénél 100–300 A (500 A) a szokásos tartomány. Az impulzusteknika előnye, hogy a megfelelő eredményt nyújtó technológiai adatok sávja lényegesen szélesebb, mint az állandó áramerősségűeké. A szükséges áramerősséggel összefüggésben a plazmafúvóka átmérőjére, az elektróda típusára, a plazmagáz térfogatáramára, illetve a védőgáz összetételére vonatkozóan ajánlások tartalmaznak adatokat. A védőgáz térfogatárama leggyakrabban 5–20 liter/min között változik.

A plazmaív (plazmasugár) teljesítményét, párhuzamosságát (koncentráltságát), a munkadarabra jutó teljesítménysűrűséget elsődlegesen a plazmaáram, a plazmafúvóka átmérője és kialakítása, a plazmagáz fajtája és térfogatárama, valamint a védőgáz fajtája határozza meg.

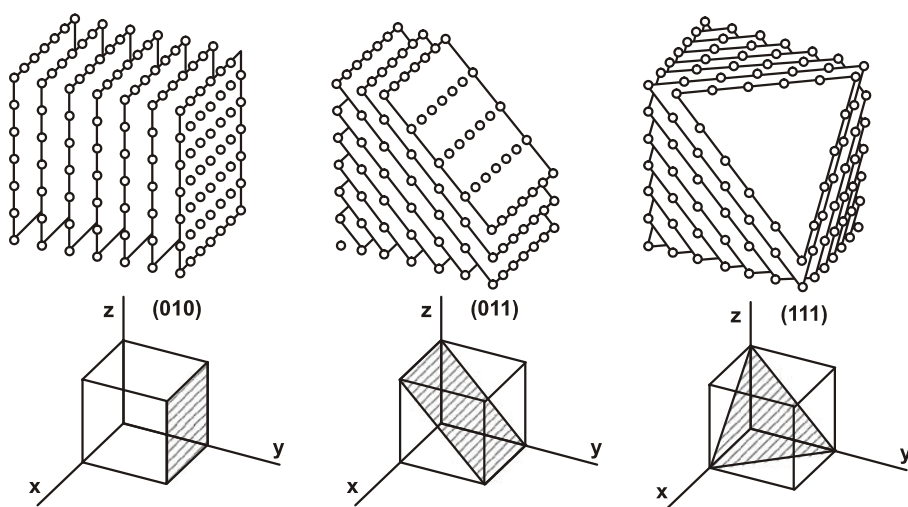
2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

2.1. Felületek makro- és mikroszerkezete

2.1.1. Ideális és reális felület, felületi hibák

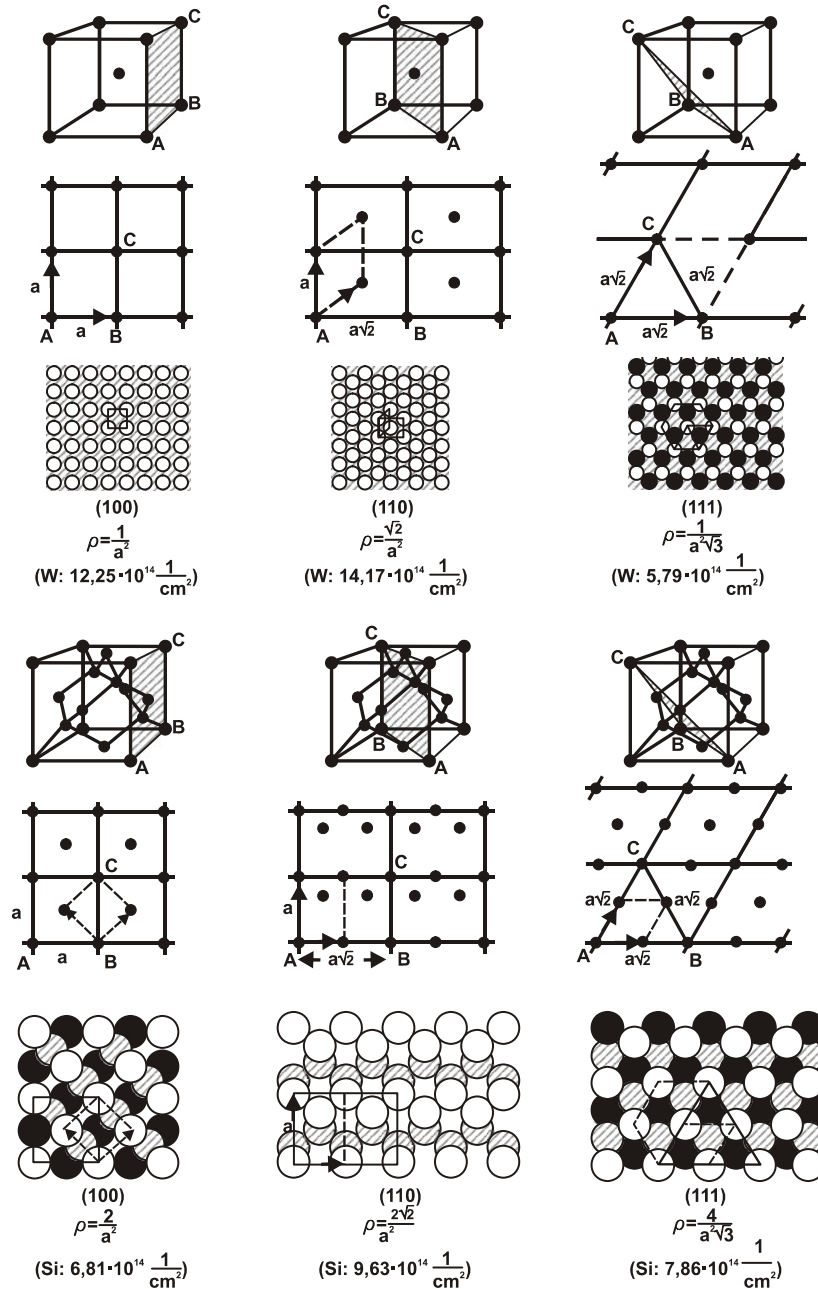
Az ideális felület:

- mindig tiszta, azaz idegen atomoktól mentes;
- szerkezete az ideális tömbanyag valamely rácssíkjának szerkezetével megegyezik (beleértve az összetétel egyezését is);
- az ideális tömbanyag adott Miller-indexű rácssíkja mentén, egy geometriai síkkal történő elmetzés útján keletkezik (**2.1. ábra**).



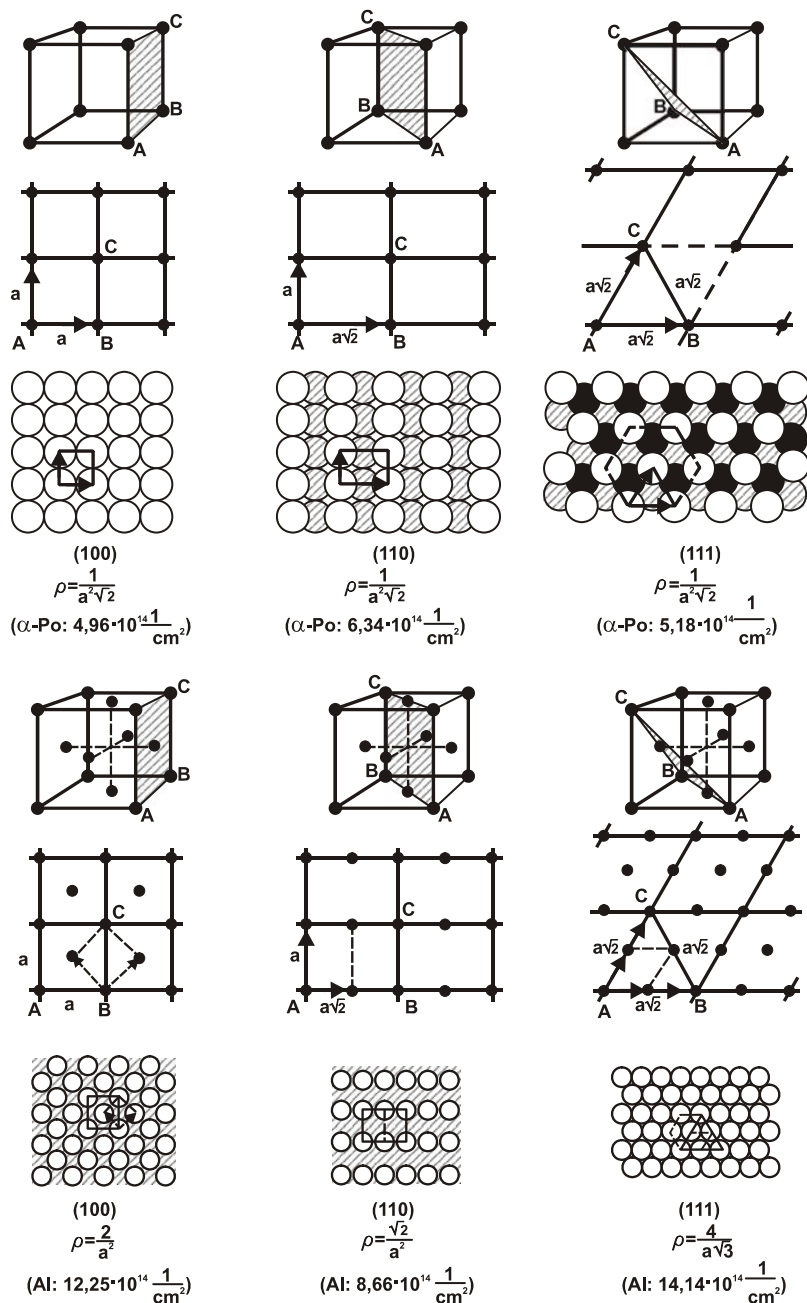
2.1. ábra (I.)

Ideális felületek származtatása és azokat jellemző ρ felületi atomsűrűségek



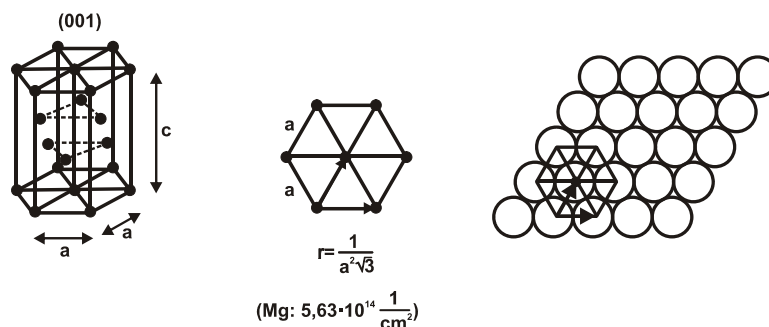
2.1. ábra (II.)
Ideális felületek származtatása és azokat jellemző ρ felületi atomsűrűségek

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői



2.1. ábra (III.)

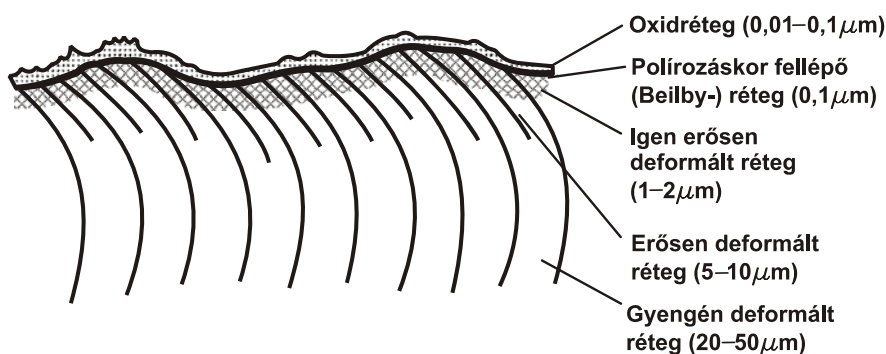
Ideális felületek származtatása és azokat jellemző ρ felületi atomsűrűségek



2.1. ábra (IV.)

Ideális felületek származtatása és azokat jellemző ρ felületi atomsűrűségek

A makroszkopikus és mikroszkopikus felületi hibák jelenléte miatt az ideálistól, illetve kváziideálistól eltérő reális felület az anyag (termék) megmunkált, gyakran sokféle eljárással befolyásolt része (2.2. ábra).



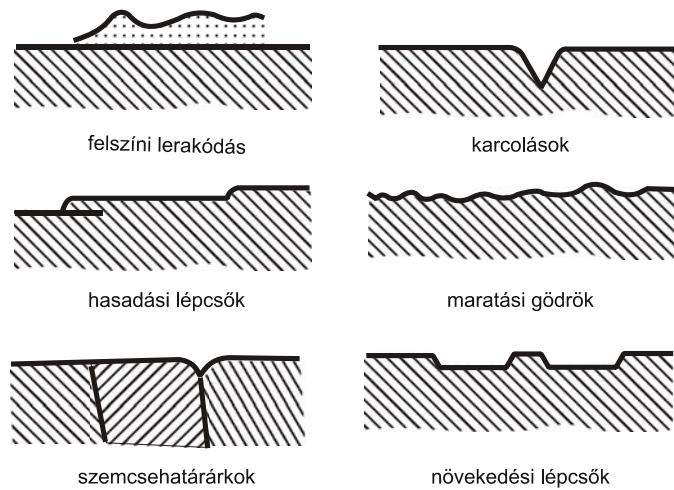
2.2. ábra

Megmunkált reális felület

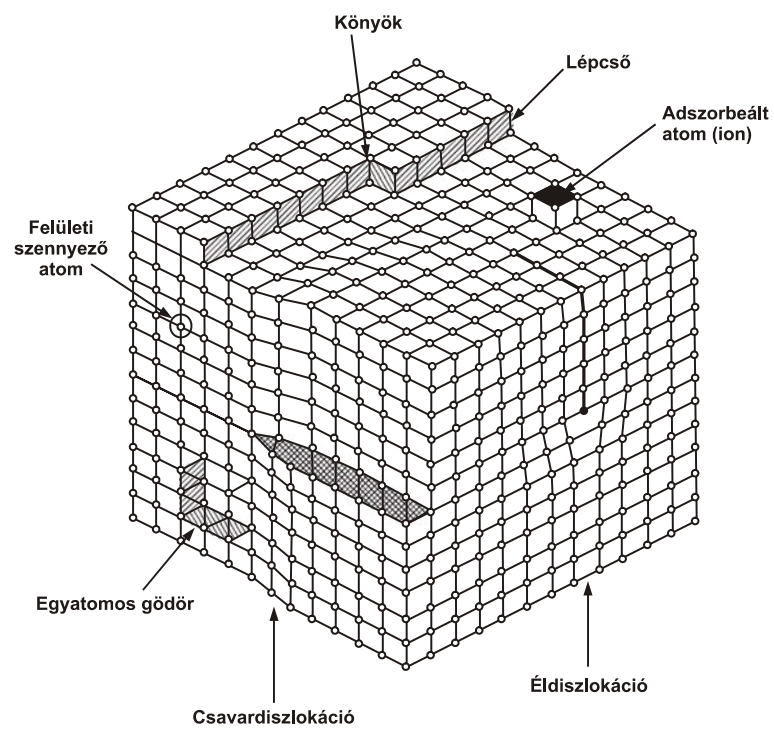
Az említett makroszkopikus felületi hibák (geometriai eltérések):

- egyenetlenségek: hullámosság, görbültség, érdesség, felszíni lerakódás, karcolások, hasadási lépcsők, maratósi gödrök, szemcsehatárak, növekedési lépcsők (2.3. ábra);
- szerkezeti eltérések (tömbanyaghoz képest): deformáció, szemcseméret-változás;
- összetételi különbségek: adszorpciós réteg (oxigénatomok a gázfázis oldalán helyezkednek el), oxidált réteg (oxigénatomok beépülnek a külső atomi rétegek atomjai közé), szegregációs réteg (oldott idegen atomok beépülnek a tömbanyagba és a határok rosszul rendezett tartományába); szennyeződés (gázfázisból, tömbfázisból).

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői



2.3. ábra
Makroszkopikus felületi hibák

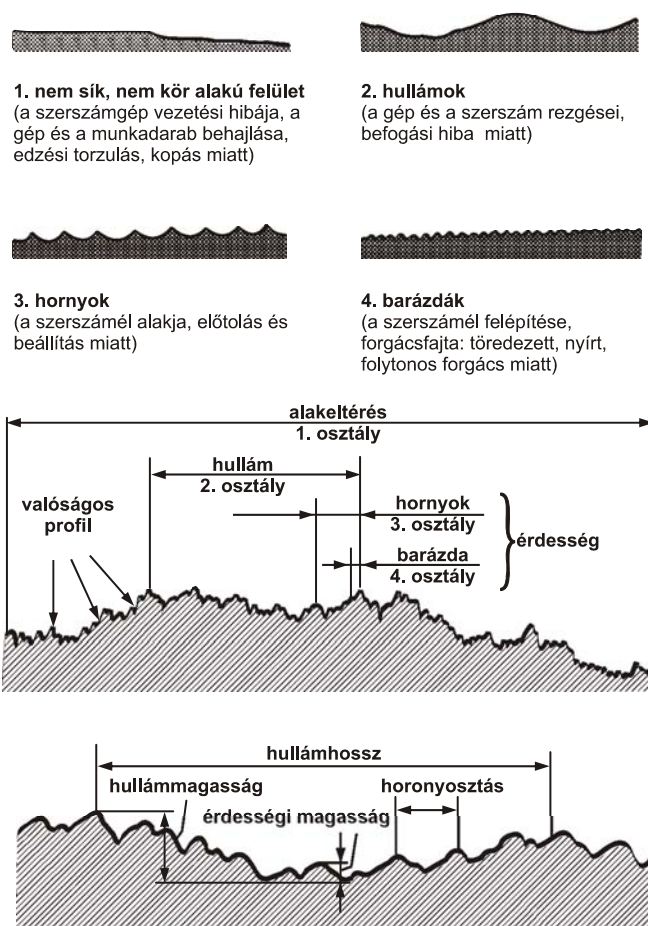


2.4. ábra
Mikroszkopikus felületi hibák

A (szub)mikroszkopikus felületi hibák lépcsők, lépcsőélek, könyökök által elválasztott teraszok, adszorbeált saját vagy idegen atomok (adatombok), vakanciák, továbbá felületre kinőtt él-, illetve csavardiszlokációk, szemcsehatárok lehetnek (2.4. ábra).

2.1.2. Felületi hullámosság és érdesség

A 2.5. ábrán forgácsoló – gyakran befejező megmunkálást jelentő – technológiák által kialakított anyagfelületek nagyított metszetei láthatók. Az anyagok (termékek) valóságos felületei, tehát nem ideálisan simák, hanem kiemelkedések (csúcsok) és bemélyedések (árkok) sorozatából állnak.

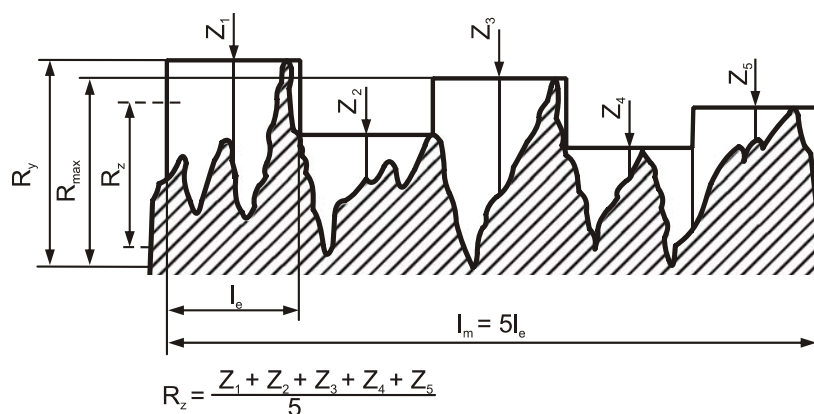


2.5. ábra
Anyagfelületek geometriai jellemzői

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

A valós felület nagyított metszetét tekintve az ismétlődő szabálytalanságok relatív nagyságrendje szerint megkülönböztethetünk:

- hullámosságot, amelynek periodicitása („hullámhossza”) viszonylag nagy, és ehhez képest mélysége („amplitúdója”) viszonylag kicsi;
- érdességet, amelynek periodicitása („hullámhossza”) viszonylag kicsi, és ehhez képest mélysége („amplitúdója”) viszonylag nagy.



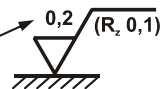
Az érdesség mérőszámai: R_y , R_{max} , R_z

R_y = maximális érdesség

R_{max} = helyi maximális érdesség

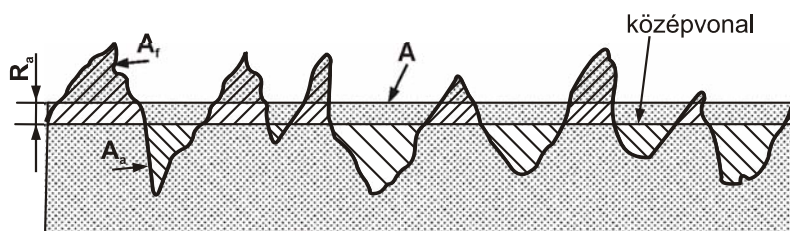
R_z = egyenetlenségi magasság

R_a vagy más érdességi mérőszám



$$\sum A_f = \sum A_a$$

$$A = \sum A_f + \sum A_a$$



Az A terület a középvonal feletti területek (A_f) és az az alatti területek (A_a) összege

R_a = átlagos érdesség

2.6. ábra
Felületi érdességi mérőszámok értelmezése

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

Az érdességet szabványos mérőszámokkal szokás jellemezni. A **2.6. ábra** jelöléseit felhasználva definiálható:

- a maximális érdesség (R_y), mely a legmagasabb csúcs és a legmélyebb árok közötti távolság. A helyi maximális érdesség ($R_{\max}$) az $\ell_m = 5 \cdot \ell_e$ alaphosszon (mérőszakaszon) előforduló legnagyobb csúcs–ároktávolság.
- az egyenetlenségi magasság (R_z), mely 5 egymással határos, egyforma hosszúságú mintaszakaszon ($\ell_e = \ell_m/5$) mért helyi maximális érdesség (Z_i) számtani középértéke:

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}; \quad (2.1)$$

- az átlagos érdesség (R_a), mely az észlelt érdességprofil pontjainak az $\ell_m = 5 \cdot \ell_e$ alaphosszon (mérőszakaszon) megállapítható középvonalhoz képesti átlagos távolsága. Ez a középvonal úgy osztja ketté egy geometriai egyenessel az észlelt érdességprofil, hogy a felette lévő kiemelkedések területe (ΣA_f) és az alatta lévő bemélyedések (ΣA_a) területe megegyezik. Az R_a átlagos érdesség tehát az $A = \Sigma A_f + \Sigma A_a = \ell_m \cdot R_a$ egyenletből:

$$R_a = \frac{1}{\ell_m} A = \frac{1}{\ell_m} (\Sigma A_f + \Sigma A_a), \text{ ami tulajdonképpen az } R_a = \frac{1}{\ell_m} \int_0^{\ell_m} |z(x)| dx \quad (2.2)$$

integrál érdességmérő műszerrel meghatározott értéke, ahol $z(x)$ a felületi érdesség profilgörbáját leíró – analitikus formában nem definiált – függvény. A használatos érdességi osztályok (felületminőségi előírások) R_a és R_z értékeit μm -ben szokás megadni, és az egyes értéktartományokhoz különböző anyagmegmunkálási eljárásokat lehet hozzárendelni (**2.7. ábra**).

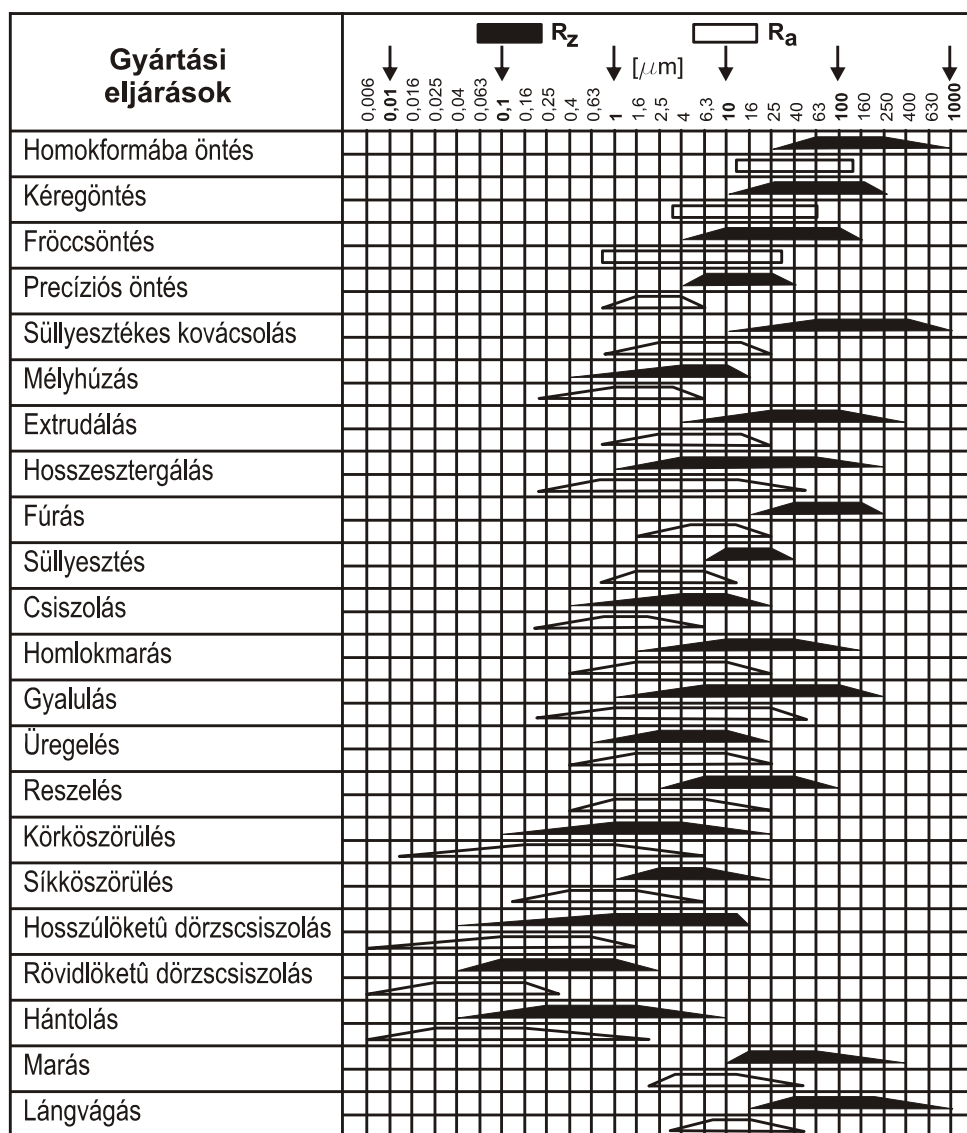
Az ábra kapcsán is érzékelhető a felületkezelés jelentősége, amivel az élettartam befolyásolható, ugyanis néhány kivételtől eltekintve a tönkremenetel általában a felületi rétegben keletkező elválásból indul ki.

2.1.3. Anyagfelületek optikai és esztétikai jellemzői

A szerkezeti anyagok hullámtermészetű, elektromos és mágneses komponensekből álló elektromágneses rezgésekkel, illetve azokon belül például a technológiai lézersugárzással való kölcsönhatása optikai jellemzőiktől függ. A szerkezeti anyagokra eső λ hullámhosszú (vagy színeképes sugárzéeloszlású) fénysugárzás intenzitása (I_0) megegyezik az anyag által áteresztett (transzmittált I_t), elnyelt (abszorbeált I_a) és visszavert (reflektált I_r) sugárintenzitás összegével:

$$I_0 = I_t + I_a + I_r. \quad (2.3)$$

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői



2.7. ábra

Anyagmegmunkáló technológiákkal megvalósítható felületi érdességek

Átrendezve:

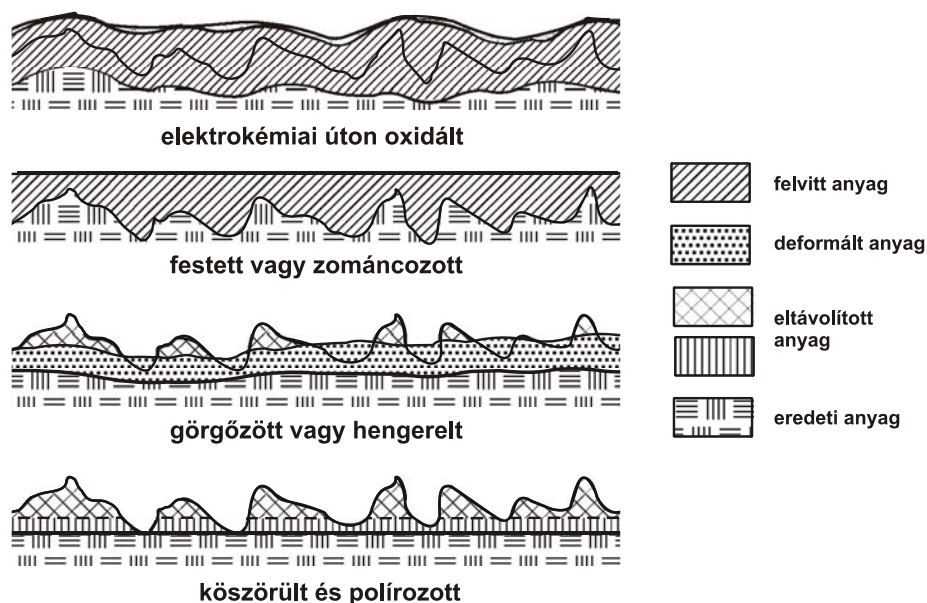
$$1 = \frac{I_t}{I_0} + \frac{I_a}{I_0} + \frac{I_r}{I_0}, \quad (2.4)$$

melyből adódnak az anyagok fontos optikai tulajdonságai:

- a fényáteresztési (transzmissziós) tényező: $\tau(\lambda) = I_t/I_0$,
- a fényelnyelési (abszorpciós) tényező: $\alpha(\lambda) = I_a/I_0$,
- a fényvisszaverési (reflexiós) tényező: $\rho(\lambda) = I_r/I_0$.

Az optikai jellemzők mindegyike függ a λ fényhullámhossztól. A fémek hullámhosszfüggő visszaverődési tényezői közül a nagyobbakat tükrök készítésénél használjuk ki. Amennyiben valamely mutató (főként az elnyelési és visszaverődési tényező) nem kielégítő, úgy lehetőség van módosítására különböző bevonatok alkalmazásával. A lézeres anyagtechnológiáknál (felületkezelés, vágás, hegesztés stb.) abszorpciónövelő (reflexiócsökkentő) bevonatokat (grafit, fekete festék, foszfát stb.) alkalmaznak az anyagfelületen a jobb energiahasznosítás, illetve a technológia eredményes kivitelezhetősége érdekében.

A **2.8. ábra** néhány – részben felületkezeléssel is befolyásolt – anyagfelület nagyított metszetét mutatja. Az eltávolított, deformált vagy felvitt anyag befolyásolja a felület esztétikai megjelenését, fényes vagy matt voltát.



2.8. ábra

Anyagmegmunkáló technológiákkal befolyásolt felületek metszete

2.2. Felületek előkészítése kezeléshez

A felületkezelés sikeressége, a létrehozott felszíni réteg jósága nagymértékben függ a felületelőkészítéstől, illetve annak gondosságától. A felületelőkészítés azon műveletek összessége, amelyekkel adott felületi sajátosságú és kiindulási állapotú munkadarabokat alkalmassá tesznek arra, hogy felületükön az előírt minőségű és tulajdonságú réteg, illetve bevonat létrehozható legyen, azaz

- tiszta, szennyeződésmentes (képződött és tapadt szennyezőktől mentes),
 - oxid- és revementes, illetve rozsa- és korróziónyomoktól mentes,
 - zsirtalan és olajtalan, illetve festék- és lakkmaradvány-mentes;
- megfelelően aktivált vagy passzívált;
- szükség szerint simított vagy érdesített;
- egyéb műszaki és esztétikai követelményeket is kielégítő (repedésmentes, nem kezelendő részekben takart stb.)

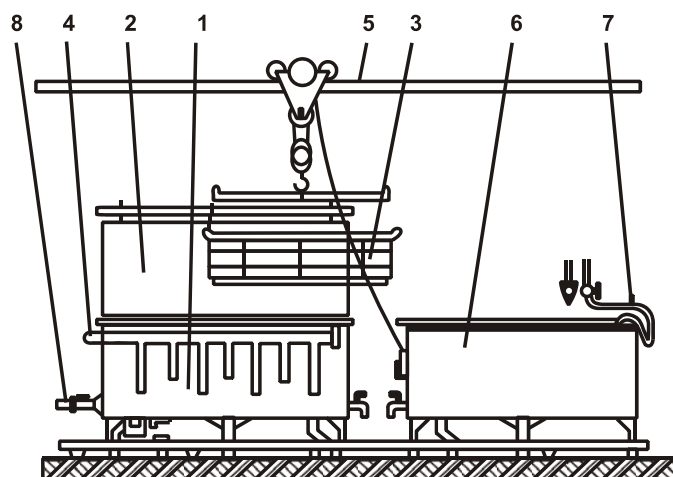
alapfelület előállítás.

A felületi szennyeződések környezeti hatások, gyártási műveletek következtében a munkadarab felületén képződött vagy arra tapadt, a réteg, illetve bevonat kialakítása szempontjából kedvezőtlen hatású anyagok:

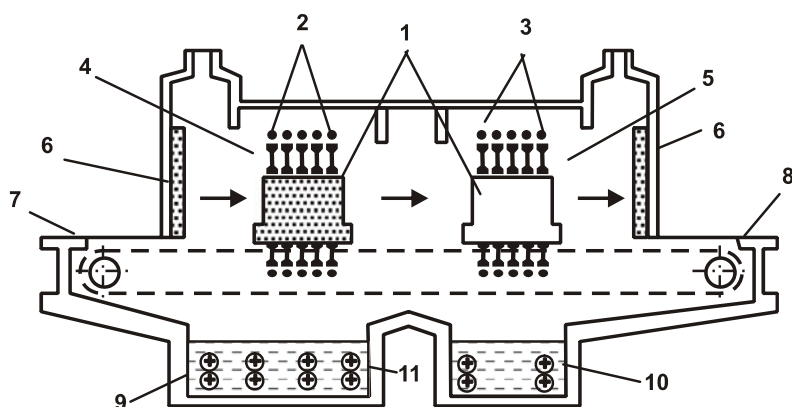
- szervetlen szennyezőanyagok, melyek külső (atmoszferikus) hatásra vagy a melegmegmunkálás nyomán a munkadarab anyagából képződnek (oxid, reve, rozsa, korróziós termékek), vagy a felületére tapadnak (por, korom, zárvány, forgács, hegesztési salak; savas, lúgos, illetve sós szennyeződések);
- szerves szennyezőanyagok, melyek a külső környezetből a munkadarab felületére tapadnak, lerakódnak: zsír, olaj (szénhidrogén-származékok, illetve állati és növényi eredetűek), festék, lakk.

A felületi szennyeződések kimutatása, illetve a felülettisztaság meghatározása történhet:

- szemrevételezéssel, kézi nagyítóval, illetve műhelymikroszkóppal mindenféle szennyeződés jelenlétének és mértékének kimutatására;
- vízcseppterületes módszerrel, felületre csepegtetett vízzel a zsír- és olajszennyeződések kimutatására, amelyeken a nagy vízcsepp cirádás alakot vesz fel vagy „gurul”;
- vízfolytatós módszerrel a zsír- és olajszennyeződések kimutatására, amelyeken vízhatrtyaszakadás, vízszigetképződés vagy vízcseppgördülés tapasztalható;
- fluoreszcenciás módszerrel, ultrabolya sugárzást kibocsájtó lámpával a fluoreszkáló zsír- és olajszennyeződések kimutatására;
- kémhatásvizsgálat indikátorpapírral, a savas vagy a lúgos szennyeződések jelenlétének kimutatására;
- felületről származó szennyeződésminta laboratóriumi elemzésével, mindenféle szennyeződés jelenlétének és mértékének kimutatására.



1. mosóoldattartály, 2. tartályfedél, 3. merítőkosár,
4. mosóoldatot keringető vezeték, 5. daruszerkezet,
6. öblítővíztartály, 7. kézitömlő, 8. fűtőgázvezeték



1. mosandó alkatrészek, 2. mosóoldat-fűvókák, 3. öblítővíz-fűvókák,
4. mosókamra, 5. öblítőkamra, 6. függöny, 7. felrakóhely, 8. levételi hely,
9. mosóoldattartály, 10. öblítővíztartály, 11. fűtőbetétek

61

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

2.1. táblázat. Felülettisztítás és mosás célja és technológiái

A tisztítás és a mosás	
célja	technológiái
A gép, szerkezeti egység vagy szerelési egység teljes tisztítása és mosása (zsírtalanítása)	mechanikai tisztítás külső teljes mosás - vízsugaras - gépesített vegyszeres
Az alkatrészek részleges tisztítása és mosása (zsírtalanítása)	mosás gőzzel és vízzel mosás alkálikus oldatokban - merítéssel - vízsugaras mosással - zuhanyozással
Az alkatrészek műveletek közötti mosása, tartósítóanyagok eltávolítása	merítőmosás folyadékba vagy gőzbe merítéssel
Festékbevonatok eltávolítása	mechanikai eljárás merítés alkálikus fürdőbe triklór-etilén gőzbe helyezés
Vízkezelés	mechanikai eljárás alkálikus és savas fürdőbe merítés
Koromlerakódások eltávolítása	vegyszeres eltávolítás súrolósugaras tisztítás ultrahangos tisztítás

2.2.1. Oxid- és revementesítés

Az anyagfelületeken korróziós közeg(ek) és/vagy nagy hőmérséklet hatására képződött szervesetlen oxid-, illetve revertegek eltávolítása mellett a felület aktiválása vagy passzíválása, valamint simítása avagy érdesítése is szerepet kap.

Mechanikai módszerek

Szemcsékkel végzett felületelőkészítés:

- erősen kötött (beágyazott) szemcsékkel: korongcsiszolás, szalagcsiszolás;
- lazán kötött szemcsékkel: fényesítés és tükrösítés csiszolópasztákkal (polírozás);
- kötetlen csiszolószemcsékkel, -porokkal, -szuszpenziókkal: folyadéksugaras vagy sűrített levegős homok-, korund-, acélszemcsefúvás; röpitőkerekes szemcseporítás.

A felületi egyenetlenségeket csökkentő korongcsiszolás végezhető kerámia-, műanyag- vagy gumikötésű köszörűkoronggal, ragasztott szemcséjű nemezkoronggal, gumikoronggal, gumiszövetkoronggal, szövetkoronggal, csiszolóvászoncsíkokból álló lemezkoronggal. Természetes csiszolószemcseként korund, gyémánt, mesterséges csiszolószemcseként elektrokorund, szilíciumkarbid, bórnitrid,

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

tripoli (körkefe sörte) alkalmazható. Lágyabb anyagokhoz durvább szemcsés, nyitott szerkezetű, keményebb korong, míg keményebb anyaghoz finomabb szemcsés, zárt szerkezetű, lágyabb korong célszerű. Kisebb felületekhez keményebb, nagyobb felületekhez lágyabb korong jöhet szóba.

Szalagcsiszolás végtelenített vászon-, gyapjuszövet- vagy papírszalagra enyvel, illetve műgyantával felragasztott Al_2O_3 -, SiC -, ZrO_2 -szemcsékkel végezhető. A csiszolásokat merőleges irányokban váltakozva, rezgésmentesen, szárazon vagy nedvesen, különböző szemcsefinomsági fokozatokkal ajánlott végezni. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a nagyolást köszörűkoronggal, az előcsiszolást és a durvacsiszolást nemezkoronggal, a finomcsiszolást lemez-, szövet-, gumiszövet- vagy gumikoronggal javasolt megoldani.

A csiszolás után visszamaradó érdesség csökkenthető szövetkorong (pamut, gyapjú) működő felületére kent csiszolópasztával (1/3 rész kötőanyag + 2/3 rész csiszolószemcse). Alumínium fényesítéséhez papírsinórokból, színes- és nemesfémek fényesítéséhez gyapjúfonalakból álló körkefe használható.

A tükrösítés mint kémelő fényesítés az anyagi minőségtől függő – legnagyobb fényvisszaverést megközelítő – reflexiós tényezőjű felület kialakítását célozza, a látható fénysugarak hullámhosszához képest minél kisebb felületi egyenetlenségek elérésével.

Drótkéfézés kézi vagy gépi (kör-, csésze- vagy ecset-) kefékkel tisztítás, revétlenítés, rozsdátlanítás, korábbi csiszolásnyomok eltávolítása, bizonyos mértékű sorjaeltávolítás, éllekerekítés vagy különleges felületmegjelenés (vonalkázott matt, pontszerű matt effektussal) végett alkalmazható. A kefék készülhetnek fémhuzalból (acél, sárgaréz, foszforbronz), szintetikus szálból (perlon, nejlon), növényi szálból (szizál, fibrisz) vagy állati szőrből (ló-, kecskebőr). A rövid szálú kefe keményebb, erősebb hatású, elsősorban egyszerű geometriájú felületekhez, a hosszú szálú kefe lágyabb, gyengébb hatású, főként bonyolultabb geometriájú felületekhez javasolható. A sűrűbb szálú kefe nagyobb csiszolóhatású, míg a ritkább szálú kefe nagyobb ütőhatású.

A szemcsefúvás összetett hatású előkészítő művelet, ugyanis egyidejűleg kalapál (hidegen alakít, tömörít, felületet kiegyenlít, szilárdít, keményít), érdesít (durvít, tapadófelületet növel, aktivál), hántol (felületet tisztít, régi bevonatot, illetve felületi réteget eltávolít, revétlenít, rozsdátlanít, sorjáz), csiszol (simít, fényesít vagy mattít). A felgyorsított szóróanyag nagy sebességgel csapódik a felületre, ahol 70–90°-os becsapódási szög esetén az ütőhatása, kb. 35°-os becsapódási szög esetén a hántoló, csiszoló hatása érvényesül. A szabálytalan vagy szabályos alakú (sarkos, hengeres, gömbszerű) szóróanyagszemcsék kinetikus energiája alakul át az előbbi hatásokká, de a szemcsék bizonyos hányada visszaverődik, visszapattan a felületről. A 4–12 mm belső átmérőjű fúvókában használható legnagyobb szemcseméret a fúvókaátmérő kb. 20%-a. Szóróanyag lehet öntvényösörét vagy -zúzalék, acél, illetve nehézfémhuzal- vagy lemezevágdalék; kvarchomok, murva, korund, kohósalakszemcsék, illetve üveggyöngy. Esetenként favagdalék, gyümölcsmag, tört dióhéj, műanyag-granulátum is szóba jöhet. Szemcsevivő anyagként sűrített levegő, kis- vagy nagynyomású víz, illetve gőz alkalmazható.

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

A fémek és a keramikus szórószemcsék keménységét és felhasználási javaslatait teszi összehasonlíthatóvá a **2.2.** és a **2.3. táblázat**. A csiszolóanyagoknak nemcsak keményebbnek kell lennie a csiszolandó tárgynál, hanem a megközelítőleg egyenletes szemcsenagyság és szemcsealak is fontos.

2.2.táblázat. Fémek Mohs-keménysége

Volfrám	4,5–8	Nikkel	3,8	Alumínium	2,6
Acél	4,5–6,5	Sárgaréz	3,5	Kadmium	2,0
Kobalt	5,5	Wood-fém*	3,0	Magnézium	2,0
Vas	4,5	Réz	2,9	Ón	1,7
Platina	4,3	Arany, ezüst, cink	2,7		

* 4 rész Sn + 8 rész Pb + 16 rész Bi + 4 rész Cd

2.3. táblázat. Keramikus szórószemcsék keménysége és felhasználása

Anyag	Mohs-keménység	Felhasználási terület
Gyémánt	10	keményfémek, könnyűfémek
Bór-karbid	9,7	műanyagok
Szilícium-karbid (karborundum)	9,5	vas, acél, üveg, öntöttvas, sárgaréz, könnyűfémek
Elektrokorund	9,4	vas, acél
Természetes korund	9,0	kovácsolt vas, acélöntvény
Naxoszi smirgli	8–9	temperöntvény, kovácsolt vas
Króm-oxid	8–9	ötvözött acél, nikkel, króm
Kvarc	8	fa, bőr, fém
Levantei smirgli	7	vas, acél, bronz, sárgaréz
Timföld	7	fa, bőr, lakk
Polírvörös	5	vas, acél
Tripoliföld	3	színesfém

A tisztító, érdesítő és szilárdító szemcseszórás során a szóróanyag-szemcséket nagy fordulatszámú lapátkerek (szórókerek) centrifugális erő révén röpítik a munkadarab felületére, mintegy 70–80 m/s becsapódási sebességgel. A szemcsebevezetés a szórókerekbe a nehézségi erő segítségével, sugár- vagy tengelyirányban történhet.

Ömlesztéses előkészítés koptatóadalékkal vagy anélkül lehet:

- száraz vagy nedves koptatás,
- csúszvacsiszolás forgó dobban, vibrátorban, centrifugában,
- merítés álló vagy forgó szemcsetartályba.

A munkadarabok egymáshoz verődésével, ütőhatással megvalósuló koptatás 20–40 1/min fordulatszámmal forgatott dobokban vagy harangokban történhet, akár többórás kezelési időtartammal. A száraz koptatás koptatóadalékkal vagy anélkül végezhető. A dörzsölőhatást fokozó koptatóadalék acélokhoz homok, hor-

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

zsaköliszt, csiszolószemcse, acélsörét, míg színesfémekhez fűrészpor vagy bőr-hulladék lehet. A nedves koptatás a koptatóadalékhoz adott, annak hatását fokozó és egyben kémiai pácoló hatást is kiváltó vízzel vagy híg kénsavval történhet.

A revétlenítő, oxidmentesítő, tisztító, csiszoló-simító, fényesítő, sorjázó csúszvacsiszolásnál az ütohatás kiküszöbölésével történik a felületelőkészítés. A berendezésekbe helyezendő töltet munkadarabokból + csiszolótestekből (természetes közúzalék, folyami kavics, horzsakőpor, csiszolószemcsék, gránitgolyók, mészkögolyók, acélgolyók, bőrdarabkák, fakockák, fűrészpor) + kémiai kezelőszerekből (oldatokból) áll. Ez utóbbiak a csúszást elősegítik, a lecsiszolódtott anyagrészeket elszállítják.

A forgó mozgású berendezések gördülő-csúszó mozgással operáló, meghatározott átmérőjű és fordulatszámú hengeres vagy szögletes dobok, amelyekben a töltettérfogat 65–70%-a lehet a dobtérfogatnak. A rezgő mozgású berendezések gördülő-csúszó + harmonikusan gerjesztett rezgőmozgással operáló, meghatározott frekvenciájú és amplitúdójú vibrátorok (vibrációs gépek), amelyekben főként sorjázás, csiszolás, fényesítés érvényesül. A centrifugál-csúszvacsiszoló olyan berendezések, amelyekben a dobok lassú saját forgása és a bolygókerék (rotor) gyors forgása egymással ellentétes, így a különböző tömegű részecskék sebességkülönbsége révén ütközés és ütdés nélküli lágy csiszolómozgás valósul meg.

Merítés során vagy a forgó orsóra erősített munkadarabokat merítik be csiszolószemcséket tartalmazó nyitott álló tartályba, vagy az álló befogott munkadarabokat merítik be csiszolószemcséket tartalmazó nyitott forgó tartályba. Hidrodinamikus előkészítés, vízszugaras revétlenítés nagynyomású vízszugár üto-repesztő hatásával, revetördelés és -lesodrás céljából végezhető.

Termikus módszerek

A szűrőlággal, lánggeregelyével végzett lángszugaras oxidmentesítés az alapanyag és az oxidréteg hőtágulás-különbségét használja ki, illetve annak révén lepattogzást idéz elő. Alkalmazása előtt az éghető és mérgező anyagokat el kell távolítani a felületről és a munkavégzés környezetéből. A munkadarab hőmérséklete max. 200 °C, minimális falvastagsága acél esetében 4–6 mm, öntöttvas esetében 12 mm legyen. Az egyenes, fésű, gereblye, kör, ív, lapos, T, L alakú égőfejekbe vezetett éghető gázkeverék $C_2H_2+O_2$, földgáz + O_2 , PB-gáz + O_2 lehet. Az elégetett gáz hője gyors lokális hevítést eredményez, ami egyenetlen hőtágulást okoz az alapfém és a reveréteg határán, miáltal a reveréteg széttöredezik és lepattogzik. A hevített felületen a reve- és oxidréteg dehidratálódása, redukálódása, majd felrepedezése, illetve fellazulása következik be, ami például a drótkéfével való eltávolíthatóságot lehetővé teszi.

Kémiai módszerek

Az oxidmentesítés történhet:

- savas pácolással,
- kombinált lúgos kezeléssel,
- sóoldadékban.

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

A **2.4. táblázat** ismerteti a fémek oxidmentesítéséhez használható pácfürdők jellemzőit.

2.4. táblázat. Fémek oxidmentesítéséhez használható pácfürdők jellemzői

A fém fajtája	A pácfürdő		A kezelés időtartama, min
	összetétele, tömeg %	Hőmérséklete, °C	
Ötvöztelen acélok	10–20 H ₂ SO ₄	20–60	5–120
	5–10 HCl	20	5–60
Ötvözött acélok	10–20 H ₂ SO ₄ + 10 HCl	40–60	5–60
Nikkel, kobalt	15–20 H ₂ SO ₄ + 7,2 Na ₂ CO ₃ + 1,8 NaNO ₃ + 9 NaCl	70–80	1–10
Alumínium és alumínium-ötvözetek	200 NaOH (vagy Na ₂ CO ₃) + 30 NaCl	60–90	30–120
	45–500 HNO ₃ + 50 HF (vagy 30 NH ₄ F)	20	15–30
Magnézium és magnézium-ötvözetek	<i>Előpác:</i> 12 HCl + 146 HNO ₃ + 4 K ₂ Cr ₂ O ₇ <i>Pác:</i> 50 HNO ₃	20	2–25 2–5
	<i>Előpác:</i>		
	<i>BS-eljárás:</i> 420 HNO ₃ + 180 K ₂ Cr ₂ O ₇	20	5–45
	<i>BA-eljárás:</i> 50 K ₂ Cr ₂ O ₇ + 10 AlCr(SO ₄) ₃	70	10–30
	<i>BM-eljárás:</i> 40 K ₂ Cr ₂ O ₇ + 60 MgSO ₄ ·7H ₂ O	20	60–120
	<i>BSA-eljárás:</i> 50 K ₂ Cr ₂ O ₇ + 14 HNO ₃ + 10 AlCr(SO ₄) ₃ <i>Pác:</i> 50 HNO ₃	20	5–15
Réz	100–200 H ₂ SO ₄	20–40	20–300
Bronz	100–200 H ₂ SO ₄ , <i>utópác:</i> 150 KCN (30 s)	20	30–600
Ón	20–30 HCl	20	120–300
Ólom	20 HNO ₃	20	60–300
Cink- és óntövezetek	80–800 H ₂ SO ₄ + 80–800 HNO ₃	20	30–60

A savas pácolás során a reve- és rozsdaeltavolítás tehát savakkal történik, miközben a tisztítóoldat hatóanyag-töménysége folyamatosan csökken, fémsótartalma folyamatosan növekszik. Egyedi munkadarabokat álló kádban bemártással, szalag- vagy huzaltermékeket áthúzó rendszerű kádban, technológiai utasítás szerinti sebességgel pácolnak.

Vas és ötvözetek oxidmentesítése történhet:

- kénsavas pácolással, 28%-os töménységgel, 50–80 °C-on;
- sósavas pácolással, 10–20%-os töménységgel, 30–40 °C-on (esetenként 55–65 °C-on);
- foszforsavas pácolással, 10–20%-os töménységgel, 40–70 °C-on (utópácolásnál 2%-os töménységgel, 40–70 °C-on);

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

- savkeverékes pácolással vagy különböző savas pácolások egymás utáni alkalmazásával.

Az alapfém (vas) oldódása a pácsavban hidrogéngáz-fejlődéssel jár, aminek egy része – a vasban abszorbeálódva – hidrogénridegséget (pácolási ridegséget) okoz. Megelőzése érdekében célszerű inhibitorok (antimonsók, alifás vagy aromás szerves vegyületek) alkalmazása, míg csökkentése végett utólagos hőkezelés szükséges, 150–200 °C-on, 2–3 órás időtartammal, gázkemencében vagy olajfürdőben. A felületelőkészítés menete tehát a következő:

- mechanikus revelazítás, revetörés;
- pácolás, biztosítva a pácoltat fűtését, a keletkező gőzök elszívását, a sav-, illetve sókoncentráció szűk tartományban való tartását, a munkadarab mozgását, a kezelési idő pontos betartását, inhibitorok adagolását;
- alapos öblítés, mosás;
- szárítás;
- átmeneti védelem, konzerválás.

A réz- és más színesfémek (cink, ólom, ón, kadmium és ötvözeteik) pácolása 10%-os kénsavban, 40–50 °C-on történhet. Az alumínium és ötvözetek esetében a lúgos pácolást NaOH-ban, a savas pácolást HNO₃-ban vagy HF-ben lehet elvégezni. Magnézium és ötvözetek esetében a savas pácolást H₃PO₄-ban vagy H₂SO₄-ban szokás végrehajtani. Titán és ötvözetek esetében a savas pácolást HNO₃-ban vagy HF-ben javasolt végezni.

Lúgos kezeléssel végzett kombinált – oxidmentesítő és zsírtalanító – pácolás során:

- az oxidmentesítő kelát- és komplexképző szerves adalék az oxidokkal vízben jól oldódó komplex vegyületeket képez pácolási ridegség nélkül;
- a forró tömény lúgoldat (ecsetelés, bemártás, szórás útján) a zsírtalanítást biztosítja.

Az 1:1 arányban kevert alkálifémhidrid + alkálilúg olvadáskor 300–400 °C-on, mártókezeléssel az oxidréteg egy része lehámlik, másik része színfémme redukálódik, de hidrogénridegedés nem lép fel.

Elektrokémiai módszerek

Az oxidmentesítés savas vagy lúgos pácoltatban végzett katódos kezelés, amelynek során a bőségesen fejlődő hidrogéngáz (és oxigéngáz) mechanikai hatása lazítja fel, illetve löki le a rozsdát a fémfelületről. E gyors és hatásos felületelőkészítés folyamán hidrogénridegedés nem lép fel. Az elektrokémiai fényszerítő pácolás (elektrofényesítés) bonyolult profilú, homogén szövetszerkezetű és kémiai összetételű alapanyag felületi kiemelkedéseinek vékonyabb, a bemélyedéseinek vastagabb, nehezen átjárható folyadékfilmet hoz létre. Ezáltal a kiemelkedéseken gyors, a bemélyedéseken lassú az oldás. Az áramsűrűség növelése erősebbé, csökkentése gyengébbé teszi az oldást.

A **2.5. táblázat** fémfelületek kémiai és elektrokémiai polírozására használható oldatokat ismerteti.

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

2.5. táblázat. Fémfelületek kémiai és elektrokémiai polírozására használható oldatok

A fém fajtája	A fürdő		A kezelés időtartama	Az áram	
	összetétele, g/l	hőmérsék- lete, °C		feszültsége, V	sűrűsége, A/dm ³
Kémiai polírozás					
Vas és acél	Előpác: 10 HCl vagy 20 H ₂ SO ₄	20–30	5–120 min	–	–
	Pác: 1400 HNO ₃ + 10 korom	20	1–2 s	–	–
	10–150 H ₃ PO ₄	60–70	1–2 min	–	–
Alumínium, AlMg- és AlMgSi-ötvöze- tek	Előpác: 5–60 HNO ₃ + 10–15 HF + + 1–15 CrO ₃ + 1–6 NiSO ₃ , H ₂ O vagy Cu(NO ₃) ₂ · 3 H ₂ O	60–70	1–3 min	–	–
	Pác: 600 H ₃ PO ₄ +350 P ₂ O ₅ + 4 HNO ₃	85–90	3–5 min	–	–
	Előpác:130 HNO ₃ +5–10 NaCl+ korom	20	0,5–2	–	–
Réz és réz- ötvözetek	Pác: 625 HNO ₃ +920 H ₂ SO ₄ +2 HCl	20	10–60 s	–	–
	850 H ₃ PO ₄ + 300 CH ₃ COOH+ +280 HNO ₃ + 10 melasz	25	2–4 min	–	—
Elektrokémiai polírozás					
Armco-vas, szürkeöntvény, ötvözetlen acél	750 (CH ₃)CO ₂ O + 295 HClO ₄ (ρ=1,6 kg/dm ³) + 5 fémalumínium	15–20	4–5 min	50	3–6
Rozsdamentes acél	45–67% H ₃ PO ₄ +40–20% H ₂ SO ₄ + +13–15% H ₂ O + glicerinalalék	80–85	4–5 min	–	7–20
Ötvözetlen acél	65–70% H ₃ PO ₄ +12–15% H ₂ SO ₄ + +5–6% CrO ₃ +víz	65–75	10–15	–	35–40
Réz	H ₃ PO ₄ (ρ=1,3 kg/dm ³)	18–20	5	2	0,6–0,8
	530 H ₃ PO ₄	15–22	10–15	1,6–2	8–10
Sárgaréz 70/30, 60/40	430 H ₃ PO ₄ (ρ=1,6 kg/dm ³)	18–22	5	2	13–15
	530 H ₃ PO ₄	18–22	5	2	9–11
Alumínium	Brytal-eljárás 150 Na ₂ CO ₃ + 50 Na ₃ PO ₄ Derítés: 2,5–80 NaOH-oldatban (20°C-on) 0,5–30 min-ig Anódos oxidáció: 200 KHSO ₄ Alzak-eljárás 5–50 HBF ₄ vagy 100–600 H ₂ SO ₄ (66Bé°) + + 2–15 HF (16Bé°) vagy 10–250 CrO ₃ +2–15 HF(16Bé°) Derítés: 10–80 Na ₂ CO ₃ + 5–30 K ₂ CrO ₄ -oldatban (70–95°C-on) 0,5–3 min-ig Anódos oxidáció: 70 H ₂ SO ₄	80 35 20–60 30–70 30–70 20	5–10 12–15 5–15 3–30 5–30 10	9–12 10 5–25 8–10 16–22 20	3,3–3,8 0,55 1–8 1–11 2–15 1,3
Cink	250 KOH	18–22	15	6	16
Ón	850 (CH ₃ CO) ₂ O+320 HClO ₄ (ρ=1,6kg/dm ³)	15–20	8–10	25–40	9–15
Ólom	650–750 (CH ₃ CO) ₂ O + + 560–400 HClO ₄ (ρ=1,6 kg/dm ³)	15–20	3–5	2–3	1–2

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

2.2.2. Zsír- és olajmentesítés

A kezelendő felület aktiválását vagy passziválását is megvalósító, zsír és olajmentesítő, vagyis a szerves szennyeződések eltávolító fontosabb eljárásokat és alkalmazási jellemzőiket a 2.6. táblázat foglalja össze.

2.6. táblázat. Zsirtalanító eljárások és alkalmazási jellemzőik

Eljárás	Tisztítóanyag	A hatás ideje, min	Hőmérséklet, °C	Koncentráció, %	Berendezés	Alkalmazási terület	Előny	Hátrány
Oldószeres zsirtalanítás	petróleum	5–10	—	100	szóróberendezés vagy merítőberendezés	zsirtalanítás	—	—
	triklór-etilén perklór-etilén	3–5	60–70 140	100	merítőberendezés, gőzsugaras berendezés	zsír, olaj, gyanta, viasz, kátrány, paraffin	nem éghetők	robbanásveszély, fotokémiai szétbomlás
Elektrolitikus zsirtalanítás	alkali-hidroxid, alkáli-szilikát foszfátok	1,5–2	20–30	10–30	merítőberendezés	zsirtalanítás	rövid kezelési idő, gazdaságos alkalmazás	hidrogenfejlődés, alkáli fémek a fürdőben nem kívánatosak
Emulziós zsirtalanítás	petróleum, orsóolaj	—	60–80	1–2	szóróberendezés vagy merítőberendezés	zsirtalanítás	—	kisebb tisztítási teljesítmény, az oldatok hajlamo- sak a habképző- ződésre
Alkálikus eljárás	nátrium-hidroxid	20–30 10–20 5–10	100 60–70 140	5–10 0,5–3	főzőberendezés, szóróberendezés, gőzsugaras berendezés	lakkozás, festés, zsirtalanítás	gazdaságos, sokoldalú alkalmazhatóság	a bőrre maró hatású, a lágy- és könnyűfémeket megtámadja
	foszfátok	kb. 15	60–80 90–95	1–3 4–7	szóróberendezés	lakkozás, zsirtalanítás	könnyűfémre, vasféleségekre különösen hatásos	—
Fémtisztítás savas anyagokkal	alkohol, észter, kénsav, sósav, foszforsav	— 30–40 5–10 30	60 40 40 50–80	15–25 10 10 2–15	—	vékony zsír- és olajréteg eltávolítása	bonyolult alkat- részek tisztítására gazdaságosabb, mint a merítés vagy szórás	kézi munka, utó- passziválás szükséges
	tömény salétromsav, fluorsav	1–3	15–20	tömény	merítőberendezés	rozsdá- kazánkó- reveeltávolítás, zsirtalanítás, rozsdamentesítés	hosszú kezelési idő alatt nagy a fémfelület megtá- madásának a veszélye, na- gyobb savfel- használás, drágább az ásványi sóknál	
Ultrahangos tisztítás	alkálikus oldatok, szerves oldószerek, tisztító emulziók	0,5–5	függ az oldószer- től, az oldatnak megfelelően	az alkalmazott oldatnak megfelelően	merítőberendezés	szenesedett olaj, kazánkó, reve, lakk, rozsdá, zsír eltávolítása	rövid kezelési idők, munkaerő- megtakarítás	az ultrahangos berendezés nagyon drága

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

Kémiai módszerek

Szerves oldószerben végzett mosás zárható berendezésben, egészség- és környezetvédelmi szabályok ellenőrzött betartása mellett valósítható meg. Oldószerként halogénezett (telített vagy telítetlen, klórozott) szénhidrogének (bomlás megelőző inhibitorokkal), fluorozott (telített, klórozott-fluorozott) szénhidrogének (kisebb bomlékonysággal, jobb zsírolódóképességgel), valamint ásványolaj-lepárlási termékek (gázolaj, petróleum) jöhetnek szóba. Hatékonyság javítása érdekében az oldószer melegítése (lepárlási termékek kivételével), keverése vagy a munkadarab mozgatása alkalmazható. További javító megoldás lehet a folyékony, majd gőzfázisú oldószerrel több szakaszban végzett kezelés. Szóró- vagy permetezőberendezéssel bonyolult vagy furatos darabok tisztítása is megoldható.

Lúgos és emulgeáló oldatokban forráspontjuk közelében végzett főzés során a növényi és állati eredetű zsírok elszappanosodnak, az ásványi eredetű olajok és zsírok emulgeálódnak, majd a felületről leoldódnak. Nátronlúg (NaOH), szóda (Na_2CO_3) és nátrium-foszfát vagy trisó (Na_3PO_4) vizes oldatába felületaktív anyagokat (nátrium-metaszilikát, nátrium-metafoszfát) is adagolnak a jobb felületnedvesítés és a habzáscsökkentés érdekében. A művelet közbeni mozgatás kedvező hatású, továbbá a zsírtalanító kádba épített nagyfrekvenciás (200–800 kHz) ultrahang-generátor (1 W/cm^2 intenzitással) segítségével a hatásosság jelentősen megnövelhető, különösen bonyolult vagy furatos munkadaraboknál, viszont nem alkalmazható repedésre hajlamos darabokhoz. Egyes ötvöztetett acéloknál lúgridegedés (pl. rugóacéloknál rugalmasságcsökkenés), más fémeknél (pl. Al, Zn, Sn és ötvözeik) esetében felületi mattulás, illetve bemaródási veszély léphet fel. A 2.7. táblázat a lúgos fémzsírtalanító fürdők jellemzőit foglalja össze.

2.7. táblázat. Lúgos fémzsírtalanító fürdők jellemzői

A zsírtalanítandó fém	A zsírtalanító fürdő összetétele, g/l	Hőmérséklet, °C	Kezelési időtartam
Vas, öntöttvas, ötvöztetlen és ötvöztetett acél	80–100 NaOH + 40–60 Na_3PO_4 + 10–20 Na_2CO_3 + 2 alkil-aril-szulfonát (vagy alkil-szulfát)	95–100	30–60 min
	100–400 NaOH + 30–50 Na_2CO_3 + 180 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	95–100	30–40 min
Alumínium és ötvözei	50–500 Na_2CO_3 + 50–300 Na_2PO_4 + 50–100 NaOH + 20 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	60–90	50–90 s
Réz és ötvözei	60 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ + 30 NaOH + 10 NaCN	80–90	2–5 min
Magnézium és cink	előzsírtalanításhoz triklóretilén, zsírtalanításhoz 50 HNO_3	20	30–90 s
Ólom és ón	100 NaOH + 20 NaCN	80–100	5–10 min

2. A kezelendő anyagfelületek jellemzői

Az emulziós tisztítás egyesíti az oldószeres és a lúgos tisztítás előnyeit. A szerves és szervetlen szennyezőket emulgeálja, diszpergálja, oldja, majd eltávolítja víztelenítő hatású felület létrehozásával. A koloid rendszerű tisztítóemulziók 10–50% aromás és alifás halogénezett szénhidrogéneket, illetve keverékeiket, 0,5–10% felületaktív anyagot és 30–90% vizet tartalmaznak.

A gőzsugárfúvatásos tisztítás nagy berendezések, felületek szabadtéri tisztítására szolgál. A kb. 140 °C-ra túlhevített (5–9 bar túlnyomású) vizet szűk fúvókán bocsátják át, és a kilépő gőz, illetve forró vízpermet hőhatása + kinetikus energiája a felületen lévő szennyeződések megelágyítja, fellazítja, leszaggatja. A tisztítóhatás és iszapképződés javítása néhány százalék lúgos adalékanyaggal, az utólagos futórozda-képződés megelőzése foszfátózószert adagolásával biztosítható.

Elektrokémiai módszerek

Lúgos oldatokban, elektrolízis közben fejlődő gázok mechanikai hatásával végzett kezelés a felületen és a pórusokban nyomokban visszamaradt szennyeződések is eltávolítja. Vasalapú darabok felületelőkészítésekor:

- a katódos zsírtalanítás során a munkadarab a katód, kis C-tartalmú acéllemez az anód, miáltal erőteljesebb a mechanikai hatás, de nehézfémkiválás lehetséges a munkadarabra;
- az anódos zsírtalanítás során a munkadarab az anód, kis C-tartalmú acéllemez a katód, miáltal gyengébb a mechanikai hatás, de nincs szennyezés-kiválás a munkadarabra.

Termikus módszerek

A leégetéses tisztítás kevésbé hőérzékeny anyagoknál, redukáló atmoszférában oxid- és zsírmintes felületet produkál, ami után vizes vagy vegyi öblítés és párologtatásos, mechanikus, abszorpció, oldásos vagy vízkiszorításos szárítás következik.

2.2.3. Egyéb előkészítő műveletek

A megtisztított felület roncsolásmentes repedésvizsgálatát (a **7. fejezetben** ismertetett vizuális, folyadékbehatolásos, mágnesezhető poros, örvényáramos módszerekkel) is célszerű elvégezni a hibás munkadarabok kiszűrése s ezáltal a felesleges további munka elkerülése céljából. Egyes összetételváltozásos felületkezelési eljárásoknál szükséges lehet a nem kezelendő felületrészek takarása, a szelektív (bizonyos felületrészekre korlátozódó) kezelés lehetővé tétele is, például árnyékolódobozzal, műanyag szalaggal, galvanotechnikai védőlakkal vagy más speciális bevonóanyaggal. Lézeres kezeléseknél különösen fontos a kellően nagy abszorpció tényező beállítása.

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

3.1. Felületszilárdítás

A képlékenység a fémek fontos tulajdonsága. Ez annak tulajdonítható, hogy a fém kristály rácsszerkezetében a fématomok (pontosabban a fémionok) könnyen elmozdulhatnak egymáson a kötés gyengülése nélkül. Ugyanis a fémrács egyik atomsíkját a másikon eltolva a rácspontok „környezete” – szemben az ionos vagy kovalens kötésű rácsokéval – változatlan marad. A fémek legtipikusabb rácsa a felületen középpontos köbös, melynek koordinációs száma a maximális 12. Egy elemi elmozduláskor az atomnak 11 „régi” szomszédja megmarad, és csak eggyel szűnik meg a kapcsolata. Emiatt az alakváltozás ezen elemi lépéséhez csak a kötéserő $1/12$ -ét kell legyőzni, szemben pl. a rideg gyémánt esetével, melynek négyes koordinációja miatt $1/4$ -nyi kötést kellene egy elemi elmozduláshoz megbontani, ha egyáltalán képlékenyen alakítható volna.

Az összalakváltozást csúszósíkokon bekövetkező elemi elmozdulások sorozata hozza létre. Az alakváltozást tovább könnyíti, hogy a „szomszédjukat cserélő” atomok nem egyedi pontokként vannak jelen az anyagban, hanem folyamatos (általában térbeli) vonalat, azaz diszlokációt alkotnak. Ezáltal nem egyszerre csúszik az egész atomsík, hanem a diszlokáció – mint az elcsúszott és el nem csúszott részek határvonala – atomsoronként, atomtávolságnyi elemi elmozdulások sorozatát teszi lehetővé. A diszlokáció nagyságát az ún. Burgers-vektorral (b) szokás jellemezni. Ha a diszlokációvonalat egy rá merőleges síkban „körbejárjuk”, az egyes elemi „lépések” mint vektorok eredője nem nulla, hanem a Burgers-vektorral egyenlő. A diszlokációvonalak általában összetettek, a kristályrácsban „ágas-bogas” hálózatot alkotnak, és a pontszerű hibák is gyakran ezek mentén helyezkednek el. A diszlokációk mennyiségi jellemzésére szolgál a diszlokációsűrűség, mely az egységnyi felületen lévő diszlokációvonal-metsződések számát jelöli.

A rekristallizációs (újrakristályosodási) hőmérséklet alatt végzett képlékeny hidegalakítást a szemcsék alakjának és a csúszósíkok orientációjának megváltozása kíséri, a nyomott anyagzónákban rövidülés, a húzottakban megnyúlás következik be. A gyakorlatban használt fémek sokkristályosak (polikristallinok), így elvileg makroszkopikusan izotrópok, azonban az alakítás ezt bizonyos mértékig megváltoztatja a szálak szerkezet (szemcsehatár menti szennyezések rendeződése), illetve a textúra (szemcsedeformációval együtt járó kristálytani irányítottság) kialakulása miatt.

Becslések szerint a nem alakított anyag kristályrácsában a diszlokációsűrűség 10^8 – $10^9/\text{cm}^2$, míg hidegalakítás után 10^{11} – $10^{12}/\text{cm}^2$ nagyságrendűvé válik, amiből következik, hogy képlékeny alakváltozás során újabb diszlokációknak kell termelődniük. Az újabb diszlokációkat termelő anyagszerkezeti mechanizmust megmagyarázóikról Frank–Read-féle forrásnak szokás nevezni. Az így megnövekedett

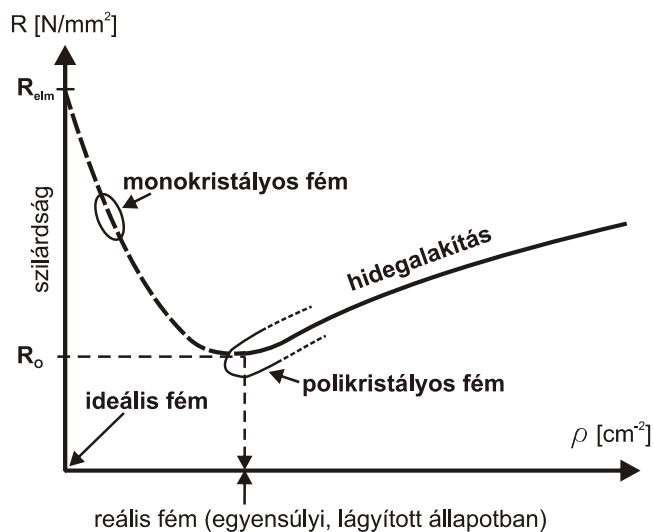
3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

értékű diszlokációsűrűség következtében a diszlokációk már nem tudják az alakváltozást segíteni, hanem – egymás csúszósík menti mozgását gátolva – ellentétes hatást váltanak ki. Ilyenkor az alakítás akadályozottá válik, vagyis nagyobb mechanikai anyagellenállást, ΔR szilárdságnövekményt, azaz alakítási keményedést tapasztalunk:

$$\Delta R = \alpha \cdot G \cdot |b| \cdot \sqrt{\rho} = \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{b \cdot L}} \approx 0,01 \cdot G, \quad (3.1)$$

ahol α az anyagminőségtől függő tényező, G a csúsztató rugalmassági modulus, $|b| = b$ a Burgers-vektor abszolút értéke, ρ a diszlokációsűrűség, ε az alakváltozás mértéke, L a diszlokációk átlagos szabad úthossza.

A diszlokációsűrűség polikristályos fémek lágyított (egyensúlyi) hőkezelési állapotára jellemző értékénél a szilárdságnak minimuma van (3.1. ábra). Tehát diszlokációmentes (ideális) anyagban növelve a diszlokációvonalak számát a szilárdság csökken az alakváltozás (elcsúszás) könnyebbé válása révén. A lágyított (egyensúlyi) állapotbeli diszlokációsűrűség külső hatásra (pl. képlékeny hidegalakítás) megnövekszik (megsokszorozódik), és a diszlokációk ilyen nagy számban már egymás mozgását akadályozzák, az alakváltozó-képességet rontják, vagyis a már említett alakítási keményedést okozzák.



3.1. ábra
Alakítási keményedés mint a felületszilárdítás alapja

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

Ez a hidegalakítási keményedés és maradó nyomófeszültség bevitele jellemzi a felületszilárdítási eljárásokat, amelyek a kifáradási határt, a kopásállóságot növelik, az érdességet csökkentik.

3.1.1. Sörétszórásos felületszilárdítás

Ez az eljárás nagy sebességgel becsapódó sörétszemcsék kinetikai energiájával végzett felületszilárdítás. Az előgyártmányokat kezelés előtt megtisztítják, a korróziós nyomokat eltávolítják, de a kiindulási felületi érdesség is fontos befolyásoló tényező. Homogén, nagy keménységű felület elérése céljából a kiindulási érdesség kicsi legyen. Egyébként a kezelés után felére, harmadára csökken a felületi érdesség, ami függ:

- a munkadarab és a sörét anyagának keménységétől;
- a sörét méretétől;
- a sörétezés idejétől.

A sörét általában kb. 2,5% szilíciumtartalmú öntöttvas 0,5–3, esetleg 5 mm nagyságú gömb alakban vagy hasonló átmérőjű, kb. 0,9% széntartalmú acélhuzaldarab. Az acélsörét ugyan drágább, de tartósabb. Háromféle sörétszórási mód ismeretes:

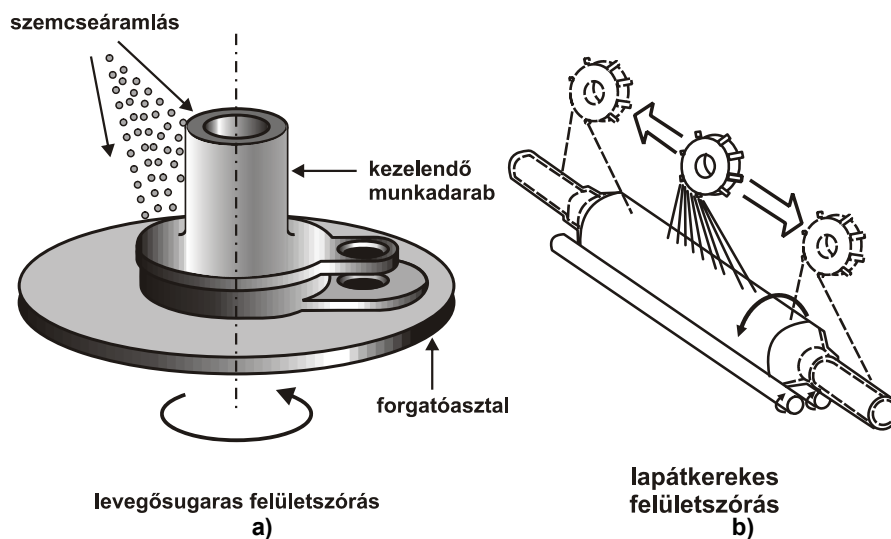
- Gravitációs sörétszóráskor a sörét 4–10 m magasról, szabadeséssel esik a sörétezendő tárgyra. A sörét sebessége és a berendezés teljesítménye kicsi.
- A pneumatikus vagy levegősugaras sörétszórás (**3.2/a. ábra**) berendezése egyszerű, teljesítménye nagy, a sörét sebessége 30–50 m/s. Hátránya, hogy a berendezés egyes alkatrészei (pl. fúvóka) gyorsan elhasználódnak.
- A mechanikus sörétszórás (**3.2/b. ábra**) berendezése $n = 600\text{--}3500$ 1/min fordulatszámmal forgó lapátokkal szórja a sörétet a munkadarabra. A sörét sebessége 70–150 m/s. Teljesítménye igen nagy, ezért ez a leggyakrabban használt sörétszóró berendezés. Lapátja azonban gyorsan kopik, élettartama mindössze 80–120 üzemóra.

A sörétező berendezések munkaterei öntöttvasból, bronzból vagy kopásálló gumiból készülnek. A sörétezés koptató hatása miatt ezeket gyakran kell cserélni. Acél munkadarabokat acél, esetleg öntöttvas söréttel söréteznek, színesfémekhez alumínium-, vagy üvegszemcsét használnak, hogy a betapadt szemcserészek ne okozzanak kontaktkorróziót.

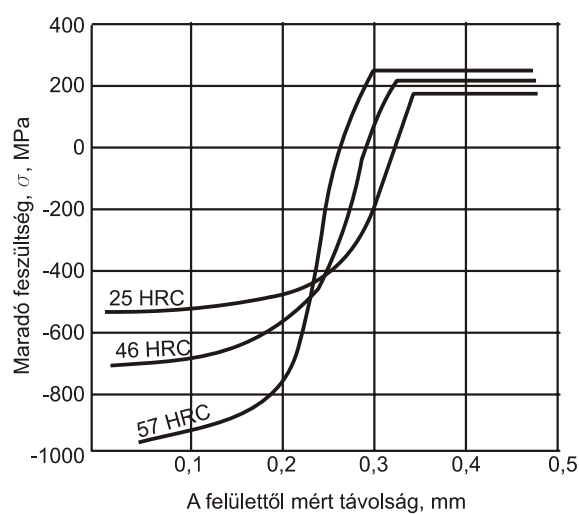
Az eljárással acél és színesfém alkatrészek kezelhetők, pl.

- forgattyústengelyek;
- hengerperselyek;
- dugattyúgyűrűk;
- torzióstengelyek.

A sörétezés ideje általában 2–14 min, az elérhető érdesség $R_a = 25\text{--}50$ μm . A keményíthető rétegvastagság 0,2–0,5 mm, 400–800 MPa maradó nyomófeszültséggel. A felületi rétegben maradó nyomófeszültség változását a **3.3. ábra** szemlélteti.



3.2. ábra
Sörétszórásos felületszilárdítás



3.3. ábra
A felületi rétegben maradó feszültség változása

anyag 0,4% C-tartalmú ötvöztelen acél; a sörét mérete $d = 0,6-1$ mm; sebessége $v = 65$ m/s; a sörézés ideje 2 min

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A keményedés mélysége függ

- a sörét és a munkadarab anyagától;
- a sörét sebességétől;
- a sörét méretétől.

A sörétezés hatása, minősége Almen-próbatestekkel ellenőrizhető. Az 1,3 vagy 2,4 mm vastag acélból készült lap alakváltozásából (görbültségéből) következtetnek a sörétezés hatására. Bizonyos idő után a próbalap görbesége már nem változik, ez a sörétezés telítődési ideje, vagyis legfeljebb ennyi ideig érdemes sörétezni.

A sörétezés jellemzőinek hatását a munkadarabra a **3.1. táblázat** foglalja össze.

3.1. táblázat. A sörétezés jellemzőinek hatása a munkadarabra

Jellemzők	A munkadarab			
	érdességét	keményített rétegének vastagságát	réteg-kemény-ségét	maradó nyomó-feszültségét
A munkadarab keménysége	csökkenti	csökkenti	csökkenti	növeli
A sörét átmérője	növeli	növeli	növeli	növeli
A sörét sebessége	növeli	növeli	növeli	növeli
A sörétezés ideje (a telítettséig)	csökkenti	növeli	növeli	növeli
A sörétfelhasználás	növeli	növeli	növeli	növeli

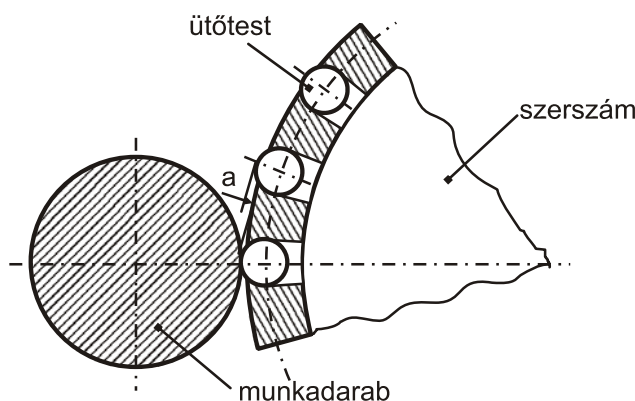
A felületi rétegben keletkező nyomófeszültség jelentősen növeli a húzásnak, hajlításnak kitett alkatrészek élettartamát (**3.2. táblázat**).

3.2. táblázat. Várható élettartam-növekedés sörétezés után

Alkatrész	Várható élettartam-növekedés
Járműlaprugók (húzott oldal)	4–10-szeres
Csavarrugók	10–12-szeres
Hegesztési varratok	3-szeres
Belső égésű motor főtengelye	6–9-szeres
Csigafúrók	1,3–2-szeres
Hidegsajtoló szerszámok	1,3–2-szeres

3.1.2. Ütőtestes felületszilárdítás

Egy gyorsan forgó (15–40 m/s kerületi sebességű) szerszám kerülete mentén golyókat vagy valamilyen más alakú ütőtesteket helyeznek el. A centrifugális erő hatása a golyókat vagy görgőket a legnagyobb lehetséges sugárra nyomja ki. Ezek az ütőtestek ütögetik, hengerlik a keményítendő munkadarabot, kb. 0,6–0,8 mm rétegvastagságban. Tartósságnöveléshez rendszerint golyókat (**3.4. ábra**) használnak, alakos testek (pl. menetek vagy csapok) pontos méretre munkálásához görgőket (**3.5. ábra**). A golyók kirepülését a golyófészek vagy kosár, a görgőket a görgők csapjai akadályozzák meg, az ütésekhez szükséges játékot (kb. 1 mm-t) azonban lehetővé teszik. A golyók vagy görgők legnagyobb lehetséges kitérésének és a munka közbeni kitérésnek a különbsége az „a” átfedés (**3.4. ábra**). A szerszámba foglalt 7–10 mm átmérőjű golyók vagy görgők kenés (orsóolaj és petróleum 60:40 arányú keverékével) mellett végzik a felületkezelést.

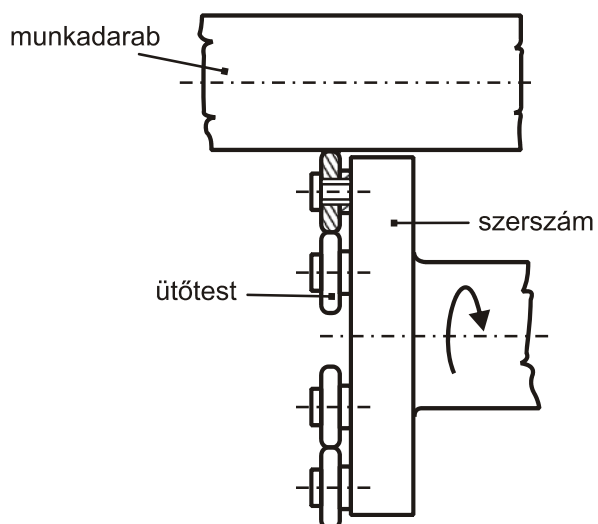


3.4. ábra.
Felületszilárdítás golyó ütőtestekkel

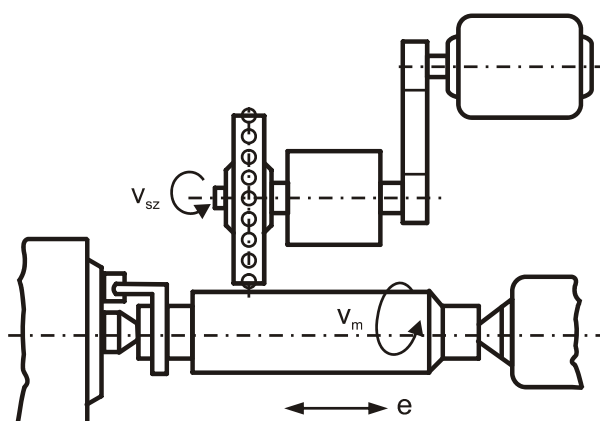
A szerszámokat rendszerint köszörűgépbe, eszterga-szánkösörűbe vagy marógépbe fogják be (**3.6. ábra**). A felület keménység-, illetve szilárdságnövekedése függ

- a munkadarab anyagától;
- az ütőtest alakjától és méretétől;
- az ütőtestek számától;
- az ütőtestek sebességétől;
- a szerszám átfedésétől;
- a munkadarab kerületi sebességétől (30–90 m/min);
- a fogások számától.

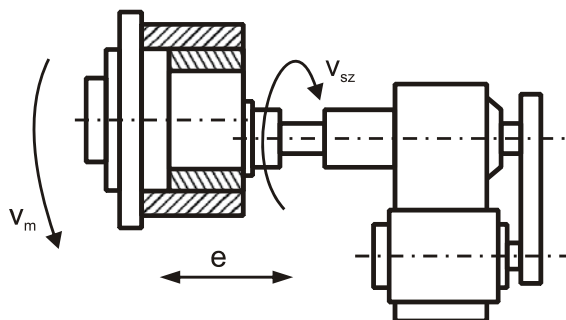
A technológiai adatok kiválasztásához nagy segítséget nyújt az ütésnyomok vizsgálata, amelyet a kerületi sebesség és az átfedés lényegesen befolyásol (3.7. ábra). A technológiai adatokat a 3.3. táblázat foglalja össze.



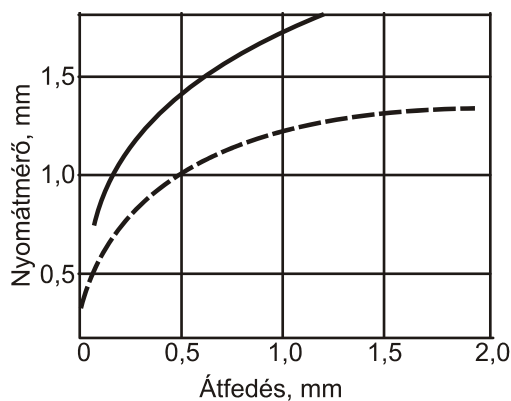
3.5. ábra.
Felületszilárdítás görgő ütőtestekkel



3.6. ábra (I.)
Ütőtestes felületszilárdítás berendezései



3.6. ábra (II.)
Ütőtestes felületszilárdítás berendezései



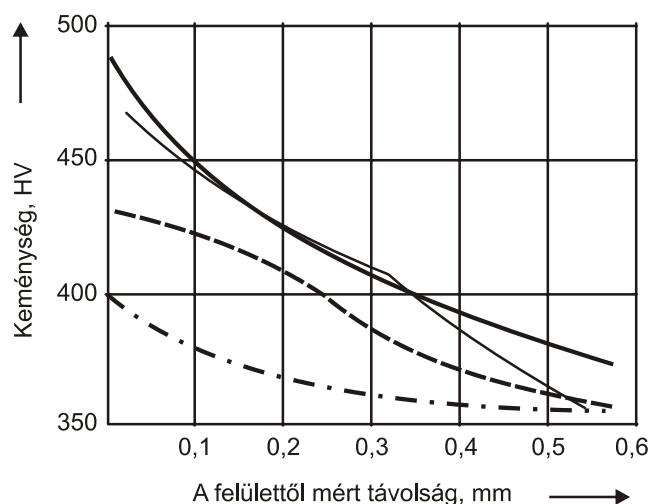
3.7. ábra
Az ütésnyom az átfedés és a sebesség függvényében
folyamatos vonal $v = 25,8$ m/s; szaggatott vonal $v = 12,7$ m/s; a golyó átmérője $d = 10$ mm

3.3. táblázat. Ütőtestekkel végzett felületszilárdítás technológiai irányértékei

Munkadarab	Kerületi sebesség: v [m/s]	Fordulatonkénti előtolás: f [mm]	Járat- vagy fogásszám	Görgőjáték vagy ütésnagyság [mm]	Várható keménység: HV
Acél	15–40	0,04–0,16	2–3	0,1–0,25	350–550
Öntöttvas	15–20	0,04–0,16	2	0,1–0,25	300–600
Sárgaréz	15–20	0,08–0,10	2	0,1–0,2	300–600
Bronz	8–15	0,02–0,20	2	0,1	250–300

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A felületi réteg keményedését a technológiai adatok, illetve a felülettől mért távolság függvényében a **3.8. ábra** szemlélteti.



3.8. ábra

A felületi réteg keményedése
a technológiai adatok és a felülettől mért távolság függvényében

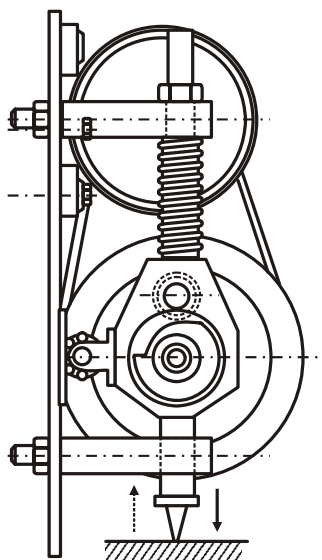
a munkadarab kerületi sebessége $v_{mdb} = 60$ m/min; fordulatonkénti előtolása $f = 0,08$ mm;
az ütések száma $N = 70$ 1/min; vastag folyamatos vonal $v = 41$ m/s és $a = 0,15$ mm; vékony
folyamatos vonal $v = 41$ m/s és $a = 0,05$ mm; szaggatott vonal $v = 15,5$ m/s és $a = 0,15$ mm;
pontvonal $v = 15,5$ m/s és $a = 0,05$ mm („v” az ütési sebesség, „a” az átfedés)

3.1.3. Ütőszeges felületszilárdítás

Az eljárás mechanikusan, pneumatikusan vagy elektromechanikusan rezgetett, gömbvégződésű ütőfejjel vagy ütőszeggel történő felületszilárdítás (**3.9. ábra**).

A felületi rétegben akár 1000 MPa-ig terjedhető maradó nyomófeszültség keletkezik, és a keménység 30–50%-kal nagyobb a kiindulási állapothoz képest. Alkalmazási területek például:

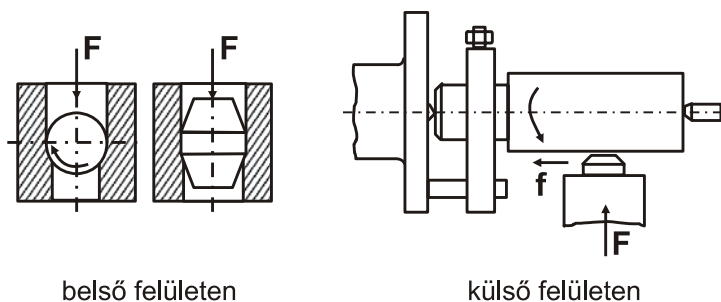
- nagymodulú fogaskerek fogárkai fáradásállóságának növelése, (30–35%-os kifáradási határ és keménységnövekmény érhető el 3 mm átmérőjű gömbfej, 1200/min ütésszám, 30 mm/min előtolás mellett),
- hegesztési varratok utókezelése,
- lépcsős tengelyek keresztmetszet-változásainak egyenszilárdságúvá tétele,
- öntöttvas gépelemek lekerekítéseinek kezelése,
- forgattyústengelyek egyenszilárdságúvá tétele stb.



3.9. ábra
Ütőszeges felületszilárdítás

3.1.4. Vasalásos felületszilárdítás

Felületek vasalásakor (**3.10. ábra**) a munkadarabnál keményebb anyagú szerszám nagy nyomóerő és kenőanyag (ásványi olaj + petróleum) alkalmazása mellett végigcsúsztatva csökkenti a munkadarab felületi érdességét és növeli felületi keménységét.



3.10. ábra
Vasalásos felületszilárdítás

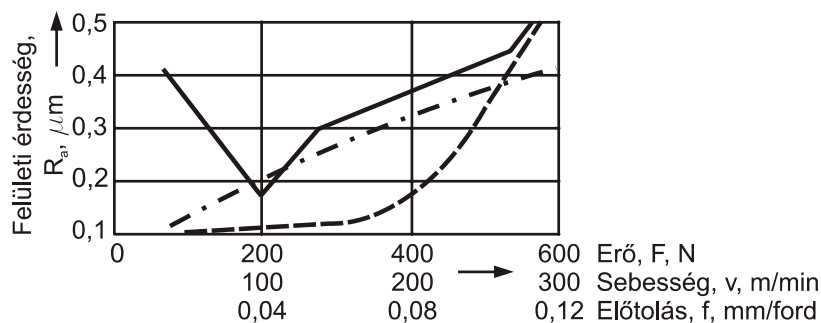
A külső hengeres felületeket rendszerint esztergán vasalják. A gyémántból vagy szuperkemény anyagból (kőbős bórnitrid, szerszámkerámia) készült vasalószerszámot a kés helyére fogják be. Acél- és alumíniumötvözetből készült alkatrészek

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

vasalási sebessége 25–200 m/min. A külső hengeres felületek vasalásának technológiai irányértékeit a **3.4. táblázat** foglalja össze, míg a technológiai jellemzők hatását a felületi érdességre a **3.11. ábra** szemlélteti.

3.4. táblázat. Külső hengeres felületek vasalásának technológiai irányértékei

A munkadarab		A szerszám lekerekítési sugara r [mm]	Vasalóerő F [N]	Fordulaton- kénti előtolás f [mm]
anyaga	keménysége			
0,45% karbontartalmú öt- vözetlen acél	180–200 HB	3,4	137	0,1
			137	0,02
			93	0,08
	45 HRC	3,4	420	0,2
			420	0,1
	60–61 HRC	1,2	137	0,02
137			0,05	
137			0,05	
ötvözött alumínium	182 HB	3,4	117,5	0,05
			117,5	0,05
			117,5	0,15
			117,5	0,08

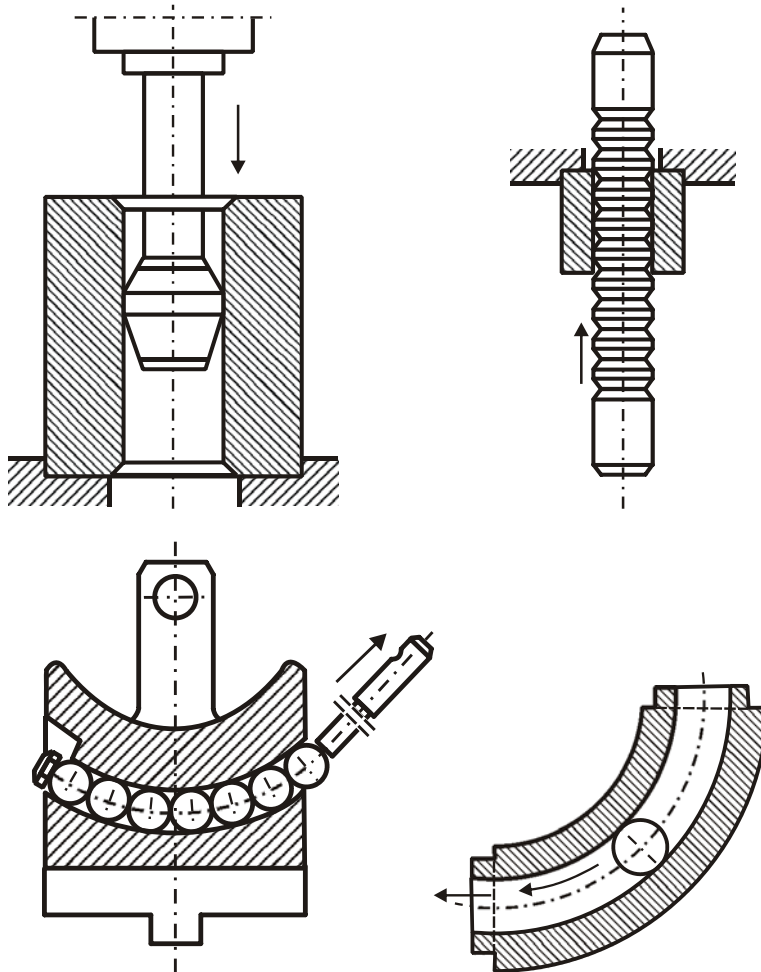


3.11. ábra

A vasalt felület érdessége a technológiai jellemzők függvényében

folyamatos vonal R_a az F erő függvényében; szaggatott vonal R_a az f előtolás függvényében; pontvonal R_a a v sebesség függvényében

Belső hengeres felületek vasalásakor golyót vagy kettőskúpos vasalószerszámot sajtolnak át a furaton sajtoló- vagy üregelőgéppel (**3.12. ábra**), 2–7 m/min kezelési sebességgel. A vasalás során nő a furat pontossága, kisebb lesz a felületi érdessége, növekszik a kopással, kifáradással szembeni ellenálló képessége. Belső hengeres felületek vasalására alkalmas szerszámok acélokhoz keményfémről, színesfémekhez golyóscsapágyacélból készülnek.



3.12. ábra

Belső hengeres felületek vasalása

A szerszám természetesen átfedéssel készül a vasalandó furathoz képest. A δ átfedés a következőképpen értelmezhető:

$$\begin{aligned}\delta &= \delta_{\text{szerszám}} - \delta_{\text{mdb előtte}} = \delta_{\text{maradó}} + \delta_{\text{rugalmas}} = \\ &= (\delta_{\text{mdb utána}} - \delta_{\text{mdb előtte}}) + (\delta_{\text{szerszám}} - \delta_{\text{mdb utána}}).\end{aligned}$$

Az átfedés mértéke függ

- a munkadarab anyagától;
- a furat méretétől;

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

- a furat előző megmunkálási módjától, érdességétől;
- a szerszám rugalmassági tulajdonságaitól.

Az átfedés nagyságára a **3.5. táblázat** ad tájékoztató értékeket. Az átfedés növelésével nő az alakítóerő (**3.6. táblázat**) és a keményedés, csökken a vasalt felület érdessége. Az átfedés hatását az érdességre a **3.13. ábra** szemlélteti.

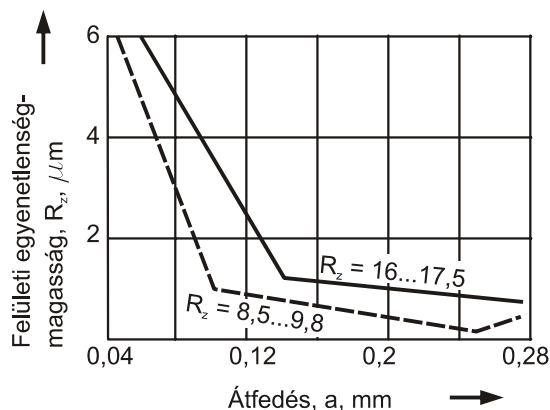
3.5. táblázat. Az átfedés értéke furatvasaláskor

A munkadarab			Viszonylagos átfedés, [mm]
anyaga	vasalás előtti megmunkálása	felületi érdessége, R_a [μm]	
0,10–0,20% karbontartalmú ötvöztelen acél	esztergálás	4–7 8–20	5,8–7,2 6,2–8,0
	dörzsölés	6–9	4,0–5,6
	üregelés	2–10	3,5–4,5
	köszörülés	3,2–9,4	4,5–5,7
0,30–0,45% karbontartalmú ötvöztelen acél	esztergálás	4–7 8–20	6,0–7,4 6,4–8,2
	dörzsölés	6–9	5,0–6,2
	üregelés	2–10	4,2–5,2
	köszörülés	3,2–9,4	5,0–6,2
280 MPa szilárdságú öntöttvas	esztergálás	4–7	6,0–7,6
	dörzsölés	6–9	5,0–5,6
	üregelés	2–10	4,0–4,5
	köszörülés	3,2–9,4	4,8–5,5

Megjegyzés: Viszonylagos átfedés: $(a/d_0)10^{-3}$, ahol „a” az átfedés; d_0 a kalibráló szerszám átmérője.

3.6. táblázat. A furatvasaló erő irányértékei [MN]

Furatátmérő: d [mm]	Átfedés: a [mm]						
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
30	18	24	30	35	42	50	55
40	22	37	48	60	–	–	–

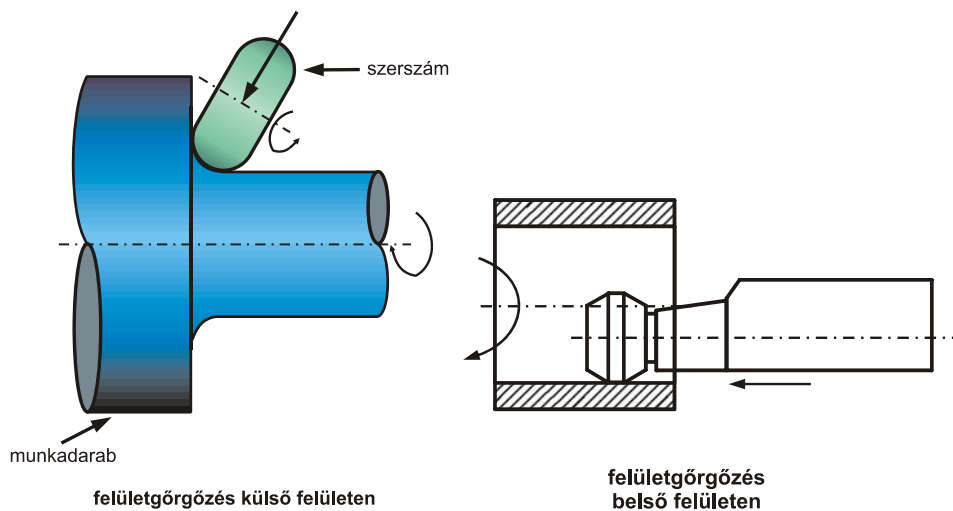


3.13. ábra

Az „a” átfedés hatása a vasalt felület R_z felületi egyenetlenségmagasságára

3.1.5. Görgőzések felületszilárdítás

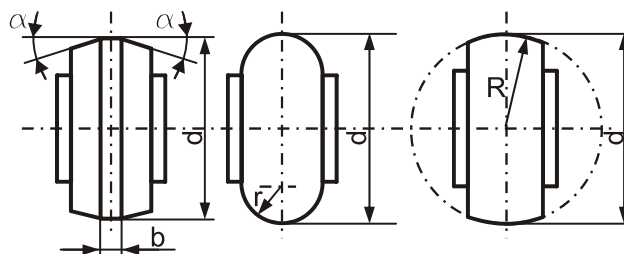
A felületgörgőzés (3.14. ábra) nagy keménységű, szabadon forgó szerszám nagy nyomóerő és kenőanyag alkalmazása mellett gördítésével, belső vagy külső felületen megvalósuló felületszilárdítás. A szerszámacélból vagy golyóscsapágyacélból készített, eszterga szánjára felszerelhető szerszám kenőanyaga transzformátorolaj és oleinsav 95:5 arányú keveréke. A felület az alakváltozás következtében keményedik, érdessége csökken.



3.14. ábra (I.)

A felületgörgőzés elve és szerszámai

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

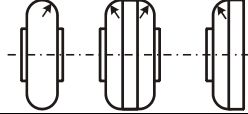


3.14. ábra (II.)

A felületgörgőzés elve és szerszámai

Görgőzhetők külső, belső hengeres és síkfelületek. Külső hengeres felületek esztergán vagy célgépeken kezelhetők. A görgőzés legfontosabb technológiai irányértékeit a 3.7. táblázat foglalja össze.

3.7. táblázat. A felületgörgőzés technológiai irányértékei

A szerszám jellegzetes alakja	
A szerszám anyaga	szerszám- vagy golyóscsapágyacél
A szerszám átmérője: d [mm]	20–200
A szerszám lekerekítési sugara: R [mm]	0,5–200
Hengerlőerő: F [N]	200–200 000
Előtolás: f [mm/fordulat]	0,2–2
Elérhető felületi érdesség: R_a [μm]	0,01–1

A görgőzéssel elérhető felületi érdesség függ

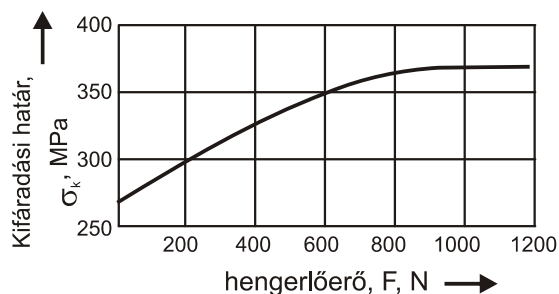
- a hengerlőerőtől;
- a henger alakjától és lekerekítési sugarától;
- az előtolás nagyságától;
- a fogások számától.

A görgőzés sebessége nem befolyásolja lényegesen a felületi érdességet. Általában nagyobb hengerlőerővel kisebb felületi érdesség érhető el, nagyobb lekerekítési sugarú görgő simább felületet alakít ki, valamint az előtolás csökkentésével is csökken a felületi érdesség. A fogások számának növelése kezdetben csökkenti a felületi érdességet, de az optimális fogásszám túllépése után a felületi érdesség nő, a felület kihengerlődhet, kipereghet, kifáradás szempontjából igen kedvezőtlené válhat.

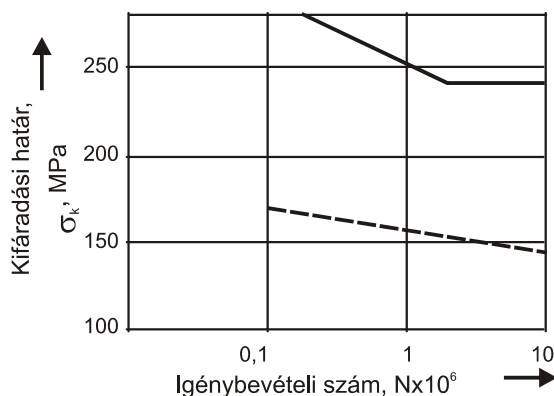
A görgőzési technológiai adatok kedvező megválasztásával a kopásállóság és a kifáradási határ nő. A 3.15. ábra a kifáradási határ változását szemlélteti a hen-

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

gerlőerő függvényében. Kopásnak kitett alkatrészeket (lengéscsillapító rúd, vasúti kerékpábrabroncs) gyakran görgőznek. Nagyméretű, bonyolult alakú alkatrészek kifaradási határát is görgőzéssel növelik. A **3.16. ábrán** öntöttvas forgattyústengelyek kifaradási határa látható görgőzetlen és görgőzött állapotban.

**3.15. ábra**

A kifaradási határ a hengerlőerő függvényében
(az acél karbon tartalma 0,45–0,48%)

**3.16. ábra**

Forgattyústengelyek kifaradási határa

folyamatos vonal: görgőzött állapotban; szaggatott vonal: görgőzetlen állapotban

3.1.6. Robbantásos felületszilárdítás

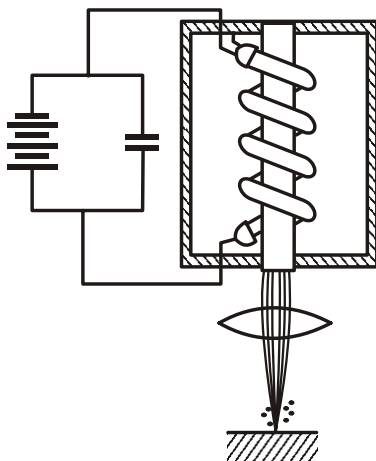
A robbantásos felületszilárdítás az elmozdulásában megakadályozott munkadarab felületi rétegének hidegalakítása detonáció lökéshullámai nem visszaverődő részének energiájával. A levegő, víz, homok, műanyag stb. nyomásközvetítő közeg segítségével, a kezelendő felületre terített robbanóanyag-réteg detonációja révén a nyomáshullám végighalad a fémfelületen, minek következtében a felületi réteg alakváltozik, tömörödik, keményedik. A lökéshullám sebessége 1000–10 000 m/s,

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

nyomása 10^5 bar lehet. Alkalmazások közül megemlíthetők a vasúti sínkeresztelődések, illetve -elágazások, valamint a bányászati vágó- és fúrószerszámok felületkezelései.

3.1.7. Lézerimpulzusos felületszilárdítás

A lézerimpulzusos felületszilárdítás (3.17. ábra) szintén lökeshullámokkal történik, amelyeket nagy energiájú lézerimpulzusok anyagra hatásakor képződő gőzök plazmaállapotba kerülése vált ki a fókuszált lézersugár hatáskeresztmetszetében. A maradó nyomófeszültséget is eredményező kezelés a lézersugár lengetésével terjeszthető ki a teljes kezelendő felületre, ugyanis a hőfejlődés nélkül terjedő lökeshullám egyszerre csak egy ponton hat. Kezeléskor a fókuszolt lézersugár teljesítménysűrűsége 10^8 – 10^{10} W/cm², impulzusainak időtartama 10^{-8} – 10^{-6} s.

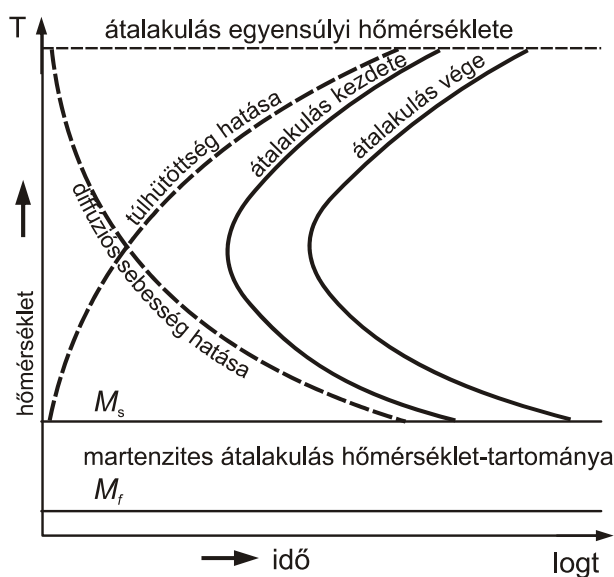


3.17. ábra
Lézerimpulzusos felületszilárdítás

3.2. Felületedzés

Az egyensúlyi (állapotábra szerinti) átalakulási hőmérséklethez képest a homogén szilárd oldat jelentős mérvű ΔT túlűtése a diffúzió (atomelmozdulás, illetve -átrendeződés) lehetőségét gátolja, esetleg meg is szünteti, tehát kellően gyors hűtéssel második fázis kiválása megakadályozható. Az átalakulási folyamatot két ellentétes hatás befolyásolja: a ΔT túlűtéssel az átalakulási kényszer nő, viszont az így elért alacsony(abb) hőmérsékleten a diffúzió sebessége csökken. E két hatás együttesen eredményezi, hogy az acélok ausztenitje átalakulásainak T hőmérséklettől függő t időszükségletét – T-logt koordináta-rendszerben – C alakú görbék jellemzik (3.18. ábra).

Az acélok nem egyensúlyi átalakulásának alapja tehát a folyamatok „késése”, vagyis a perlités átalakulás PSK-vonala = $A_1 = 727\text{ °C}$, az $\alpha \leftrightarrow \gamma$ átalakulás GOS-vonala = $A_3 = f(C\%)$ és a cementitkiválás ES-vonala = $A_{cm} = f(C\%)$ hevítési, illetve hűtési sebességtől függő mértékű „eltolódása”. Ezek szerint hevítéskor az egyensúlyihoz képest nagyobb (A_{c1} , A_{c3} , A_{ccm}), hűtéskor kisebb (A_{r1} , A_{r3} , A_{rcm}) hőmérsékleteken megy végbe az átalakulás. A nem egyensúlyi átalakulások nemcsak az átalakulási hőmérsékleteket, hanem a hevítéskor és a hűtéskor keletkező szövetelemek mennyiségi és minőségi viszonyait is megváltoztatják.



3.18. ábra
Átalakulási C-görbék származtatása

A hevítés során bekövetkező nem egyensúlyi átalakulásokat (kezdet, vége, eredménye) a folyamatos hevítésre vonatkozó és az izotermikus ausztenitesítési diagramok szemléltetik. A folyamatos hevítésre felvett T - $\lg t$ diagramban (3.19/a. ábra) egy felhevítési sebességvonalat kiválasztva az ausztenitesedés kezdetét az A_{c1} , befejeződését az A_{c3} görbével való metszéspont fejezi ki. Az A_{c1} és az A_{c3} függvénygörbék asszimptotái az A_1 és A_3 egyensúlyi átalakulási hőmérsékletek, melyek elvben a végtelen lassú hevítéshez tartoznak. A diagramból az is látható, hogy a perlit ausztenitesedése nem egy adott hőmérsékleten, hanem hőmérséklet-intervallumban ($A_{c1s} - A_{c1f}$) megy végbe. A diagram szintén mutatja, hogy az ausztenített alakulás A_{c3} hőmérsékleten ugyan befejeződik, de ekkor az ausztenit még inhomogén, vagyis az előzőleg perlités helyeken több, míg a korábban ferrites helyeken kevesebb karbont tartalmaz. Az ausztenit homogenitása így később, a diagramban szintén jelölt vonal felett tekinthető megfelelőnek, ahol viszont megindul a szemcsedurulás is. Ezért az ausztenitesítés hőmérsékletét és

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

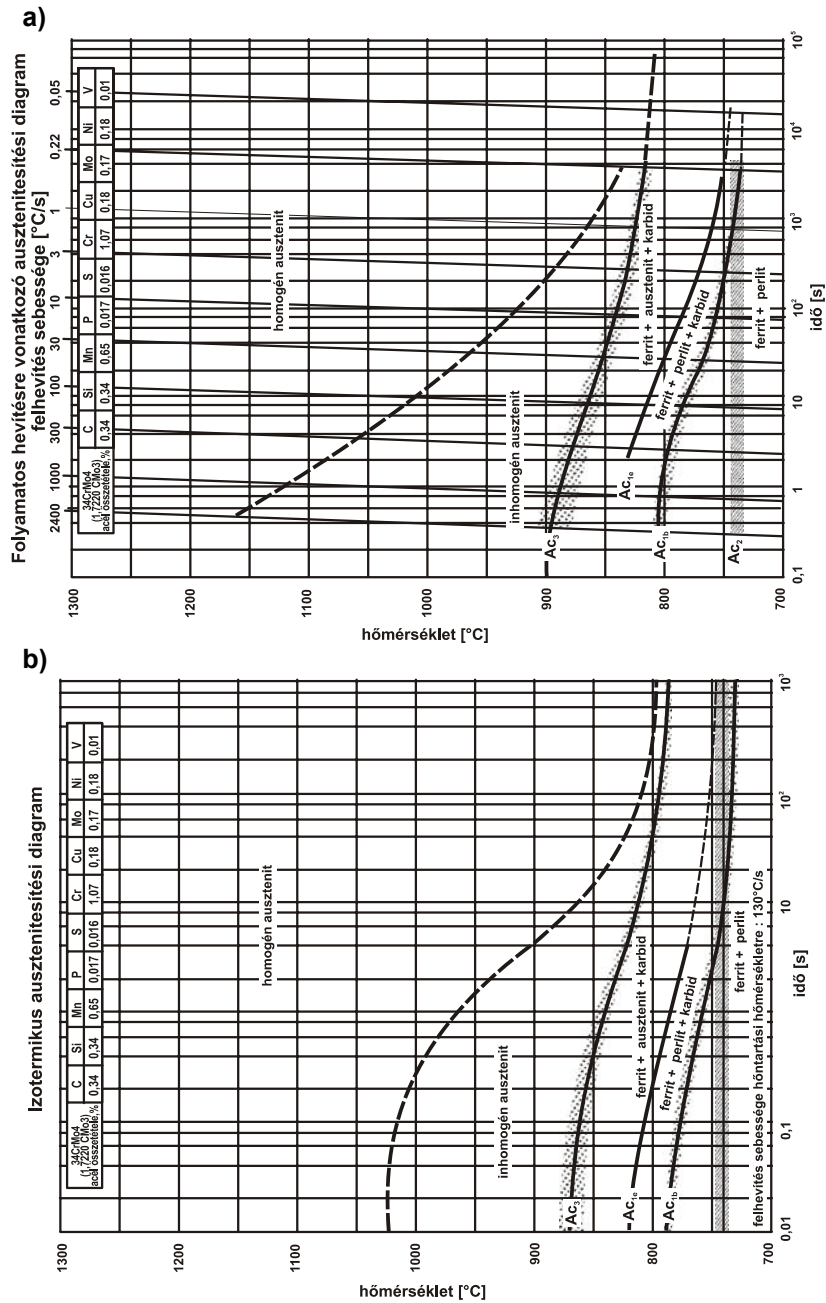
időtartamát úgy kell megválasztani, hogy elfogadható homogenitású, de még finomszemcsés ausztenit jöjjön létre az ebből az állapotból induló hőkezelés(ek)hez.

Az ausztenítés izotermikus viszonyok közötti vizsgálatához a felhevítésnek olyan gyorsnak (pl. 104 °C/s) kell lennie, hogy időszükséglete az ausztenítés szempontjából elhanyagolható legyen. Így konstans hőmérsékleten – izotermán – értékelhető az ausztenítés folyamata, a kezdetéhez és befejeződéséhez szükséges időtartam **(3.19/b. ábra)**. Meg kell jegyezni, hogy egy-egy ausztenítési diagram csak adott kémiai összetételre, konkrét előzetes hőkezelési állapotra és ebből adódó kiindulási szövetszerkezetre értelmezhető, illetve alkalmazható.

Az ausztenítést követő hűtés (hőkezelés) menetét diffúziós és diffúziómentes átalakulásokra a folyamatos hűtésre vonatkozó ausztenítálatalkulási diagramok szemléltetik. A szintén T-logt koordináta-rendszerben felvett diagramok egy bizonyos hűtőközeg által meghatározott hűtési sebességvonal (lehülési görbe) mentén mutatják az átalakulások kezdő és vég hőmérsékletét, a hozzájuk tartozó időtartamokat, valamint a várható szövetelemeket, illetve keménységértékeket is **(3.19/c. ábra)**.

Az ausztenítálatalkulás izotermikus viszonyok közötti vizsgálatához olyan gyors hűtést kell biztosítani a konstans hőmérséklet eléréséig, hogy annak időtartama elhanyagolható legyen az átalakulásokéhoz képest. Az izotermikus ausztenítálatalkulási diagram **(3.19/d. ábra)** konstans növelt hőmérsékleten (izotermán) diffúziós átalakulásokra mutatja az átalakulások kezdetéhez és befejeződéséhez szükséges időtartamokat, továbbá a kialakuló szövetszerkezet összetevőit, keménységét. Diffúziómentes átalakulásra a diagram nem értelmezhető, mert az elsősorban hőmérséklet-különbség függvénye. Egy ausztenítálatalkulási diagram csak adott kémiai összetételre és kiinduló ausztenites állapotra (homogenitás, szemcseméret) vonatkozik, ezért elsősorban a hőkezelési gyakorlat szempontjából kvázioptimális $A_3 + 50$ °C (hipoeutektoidos acélnál), illetve $A_1 + 50$ °C (hipereutektoidos acélnál) hőmérsékleten végzett ausztenítést követő átalakulásokra készítik el a diagramokat. Mint látható, nem egyensúlyi viszonyok között az α -ferrit és a „cementitlemez” perlit mellett „ferritűs” bénit, illetve martenzit szövetelemek is képződhetnek az acélokban.

Az acélok (a vasnak metastabil rendszerben kristályosodott ötvözetek) a legfontosabb fémes szerkezeti anyagok, melyekben a karbon egyensúlyi körülmények között Fe_3C (vaskarbid) vegyület formájában van jelen. Ezen $Fe-Fe_3C$ ötvözetek fontos C-koncentrációi szerszámacélok esetén 2,14%-nál, szerkezeti acélok esetében 0,76%-nál kisebbek. Ha ezeket az anyagokat az állapotára szerinti γ -mezőbe felhevítjük (ausztenítjük) és ott hűtjük, akkor a bennük található α -szilárd oldat allotróp módon (térben középpontos köbösből felületen középpontos köbössé) átalakul, és a keletkező ausztenitben az összes karbidfázis oldódik. Ha ezután lassan (kvázi egyensúlyi körülmények között) visszahűtjük, akkor diffúzió révén a karbidfázis (cementit) kiválik, és az α -fázis (ferrit) is újra létrejön, az állapotábrának megfelelően **(3.20/a. ábra)**.

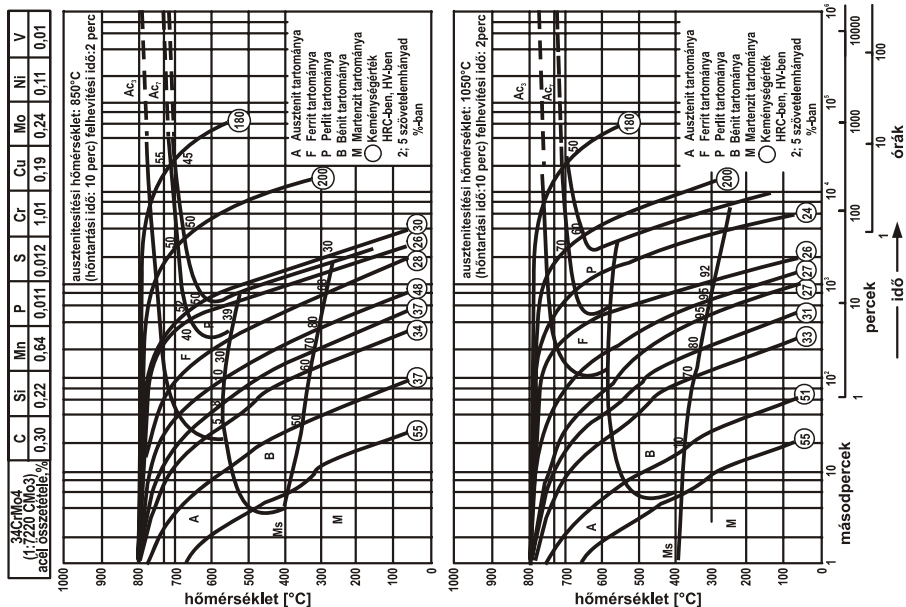


3.19/a-b. ábra
Ausztenitesítési diagramok (34CrMo4 acélra)

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

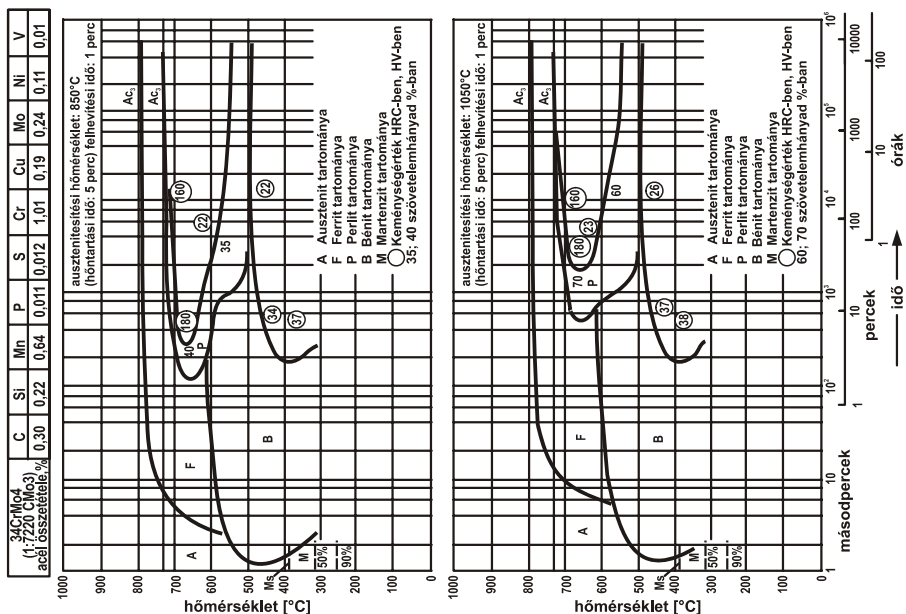
c)

Folyamatos hűtésre vonatkozó ausztenitátalakulási diagram



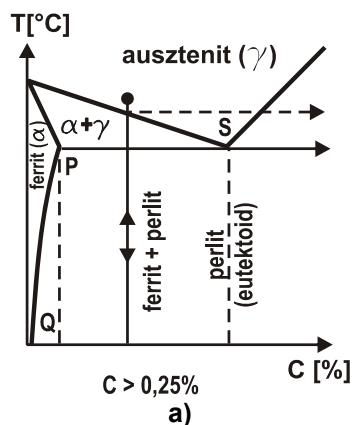
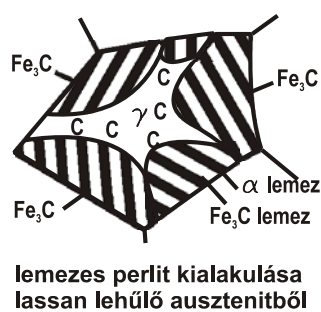
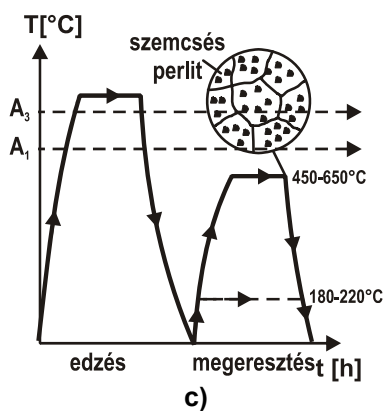
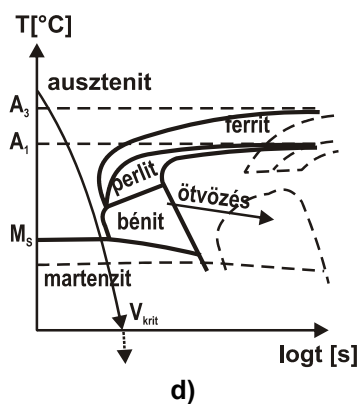
d)

Izotermikus ausztenitátalakulási diagram

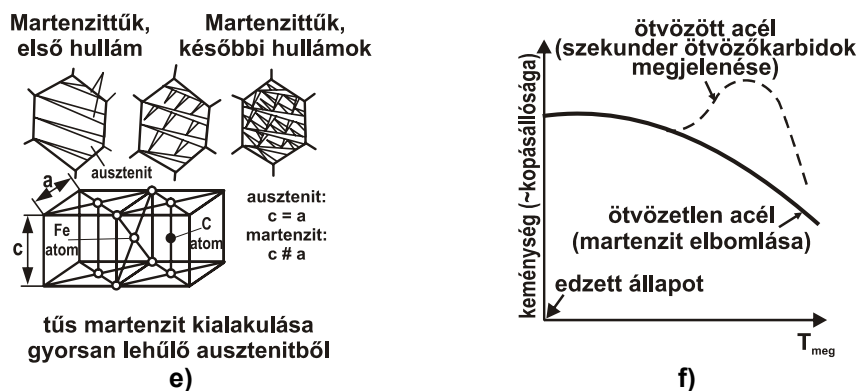


3.19/c-d. ábra
Ausztenitátalakulási diagramok (34CrMo4 acélra)

Az eutektikumhoz hasonló formáció is kialakul, azonban ez nem folyékony olvadékból, hanem szilárd oldatból keletkezik, így eutektoidnak vagy másképpen perlitnek nevezik. Ezen cementit- és ferritlemezekből álló perlit (**3.20/b. ábra**) mennyisége a karbontartalom függvénye, az acél 0,76% C-nál tisztán perlites (eutektoidos), 0,76% C alatt hipoeutektoidos (ferrit-perlites) acélokról, felette hipereutektoidos (perlit-cementites) acélokról beszélünk.



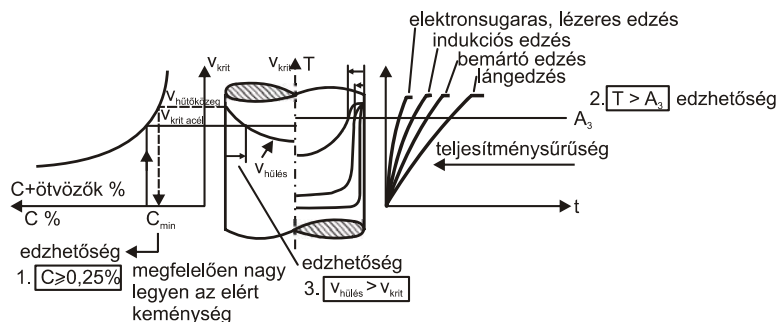
3.20. ábra (I.)
Acélok hőkezelése



3.20. ábra (II.)
Acélok hőkezelése

Tehát ha az acélt ausztenítésre hevített állapotból gyorsan hűtjük (azaz eddzzük, **3.20/c. ábra**), a $\gamma \rightarrow \alpha$ átalakulás diffúzió nélkül (nagyon gyorsan, „hullámszerűen”), rácsátbillenéssel megy végbe. Ez a nem egyensúlyi – folyamatos hűtésre vonatkozó ausztenitátalakulási diagramban (**3.20/d. ábra**) értelmezhető – martenzites átalakulás karbonnal túltelített α -szilárd oldatot (martenzitet) eredményez, melynek térközepes köbös rácsa tetragonálissá torzult (**3.20/e. ábra**). A martenzites szerkezet eredményezi az acél legkeményebb, de egyben legridegebb állapotát is, ezért az edzett acélt használat előtt meg kell eresztetni. Ha a keménység (kopásállóság) megtartása a cél, akkor a repedésveszélyt mérséklő – kisebb hőmérsékletű (180–250 °C) – feszültségcsökkentő megeresztést kell alkalmazni. Ha kedvező szilárdság–szívósság (repedésterjedéssel szembeni ellenállás) arányt kívánunk beállítani, akkor nagyobb hőmérsékletű (500–650 °C) megeresztést célszerű alkalmazni (**3.20/c. ábra**). Az ilyen megeresztés során a martenzitből – de a kevésbé rideg bénitből is – a karbid apró gömbszerű alakzatok formájában kiválik, és ún. szferoidit (finomszemcsés perlit) jön létre. A létrejövő karbidfázis mennyisége, mérete, eloszlása határozza meg a nemesített acél mechanikai tulajdonságait. Nagyobb hőmérsékleteken (680–710 °C) az acél már kilágyul, a szemcsés szerkezetben durvább karbidok vannak jelen. Egyes ötvözött acélokban a nagyobb hőmérsékletű megeresztés során megeresztésállóságot javító szekunder ötvözőkarbidok válnak ki (**3.20/f. ábra**).

A nem egyensúlyi szövetszerkezetet létrehozó felületedzés akkor valósul meg, ha az edzhetőség három kritériuma (az anyag megfelelő interszticiós ötvözőtartalma: $C \geq 0,25\%$, átalakulási hőmérséklet feletti homogenizáló izzítás: $T > A_3$, majd a kritikusanál nagyobb hűlési sebesség: $v_{hűlés} > v_{krit}$) közül a második csak bizonyos felületi kéregvastagságban teljesül (**3.21. ábra**).



1. feltétel elhagyása a teljes keresztmetszetben: betétben edzhető acél $\rightarrow$ termokémiai kezelés: cementálás $\rightarrow$ felületen $C \geq 0,25\% \rightarrow$ betétedzés: $T > A_{3\text{körög}}$; $V_{\text{hűlés}} > V_{\text{krit}}$ körög
2. feltétel elhagyása a teljes keresztmetszetben: nemesíthető acél $\rightarrow$ felületedzés $\rightarrow$ felületen $T > A_3 \rightarrow V_{\text{hűlés}} > V_{\text{krit}}$ $C \geq 0,25\%$
3. feltétel elhagyása a teljes keresztmetszetben: nemesíthető acél $\rightarrow$ hevítés $T > A_3 \rightarrow V_{\text{hűlés}} > V_{\text{krit}}$ és $V_{\text{hűlés}} > V_{\text{krit}}$ a felületen a magban $C \geq 0,25\%$
veszélyes hőfeszültségek miatt nem alkalmazható!

3.21. ábra
Edzhetőségi feltételek

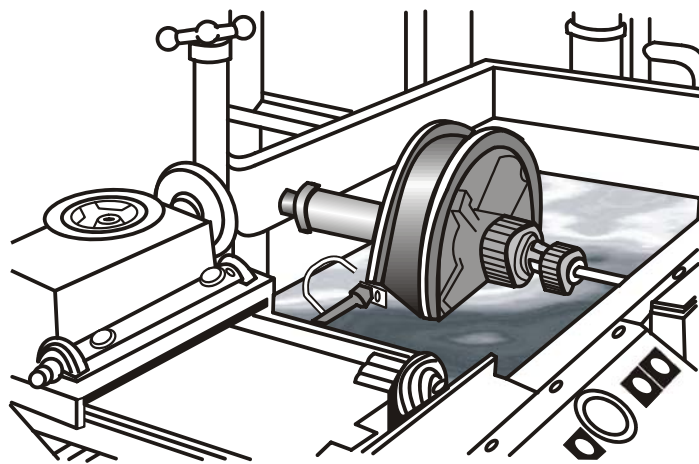
A teljes térfogatukban nemesített acél munkadarabok felületének gyors felhevítése só- vagy fémolvadékba mártással, éghető gáz lángjával, illetve reakcióhőjével, nagyfrekvenciás induktorkal gerjesztett örvényáram- és mágneses hiszterézis-veszteséggel, nagy hőmérsékletű technikai plazmával, elektronsugár kinetikai energiájának átalakulásával vagy lézersugárzás abszorbeálódó fotonáramával történhet. A gyors lehűtést a nagyobb tömegében hidegen maradó munkadarab intenzív hőelvonása és/vagy a ráfújt vízpermet biztosítja.

3.2.1. Lángedzés

Lángedzéskor az anyagot az előírt mélységben termokémiai reakcióhővel A_3 fölé hevítik, majd pl. vízpermettel a kritikushoz nagyobb sebességgel lehűtik. Így a munkadarab felületén kemény kéreg keletkezik, a maga szívós marad. Főleg kopásnak kitett alkatrészek felületi keménységét fokozzák vele, pl. nagyméretű fogas- és lánckerek, kötélfornyok, tengelyek, hengerek, esztergaszán-vezetékek, orsók, csúszólapok, forgattyústengely-csapok. Különösen ott van jelentősége, ahol a nagy méretek következtében más edzési mód nem jöhet számításba, vagy kicsi a darabszám, mert beruházási költsége nem nagy.

Az egyszerű, gyors és olcsó lángedzés annál gazdaságosabb, minél kisebb az edzendő felület az összfelülethez képest. Tömeggyártás esetén a munkafolyamat-

ba kell a berendezést integrálni, ezzel megtakarítható a felesleges szállítás a hőkezelőüzem és a megmunkálóműhelyek között. Az állandóan üzemkész állapotban levő lángedzőgép (**3.22. ábra**) gyakran a nem teljesen kihasznált hőkezelő kemence helyébe lép. A berendezés üzembe helyezése gyors, mert nem kell felfűteni, mint pl. a kemencét. Lángedzéshez általában acetilént, ritkábban metánt, propánt vagy világítógázt használnak.



3.22. ábra
Lángedzőgép

Az acetilén színtelen, nem mérgező, jellegzetes szagú gáz. Nagy égési sebessége és lánghőmérséklete teszi alkalmassá lángedzésre. Előnye, hogy a felhasználás helyén könnyen hozzáférhető palackokban forgalmazzák. Levegővel keveredve 3–65%-os, oxigénnel keveredve 3–93%-os koncentráció között robban. A tiszta acetilén kisebb nyomáson meggyújtva lassan, robbanás nélkül ég. Az önrobbanás határa 0,2 MPa túlnyomás, 100 °C-on.

A világítógáz (városi gáz) összetétele előállítási helyétől függően változhat. A nem éghető alkotók (nitrogén, oxigén, szén-dioxid) legfeljebb 8–10%-ot tehetnek ki, különben az égési sebesség és a hőmérséklet igen alacsony lesz. Szén-monoxid-tartalma miatt mérgező. Levegővel keveredve 8–22%-os koncentrációnál robban. Előnye a korommentes égés és az égők hosszú élettartama. Világítógázzal 2000–2900 °C lánghőmérséklet állítható elő. Üzemi nyomása 0,03–0,05 MPa túlnyomás. Ha a távvezetékben ennél kisebb a gáz nyomása, sűrítőt kell beiktatni. A nagy teljesítményű égőkhöz világítógázt használnak.

A metánt (CH_4) tisztán ritkán használják, inkább földgázban mint fő alkotót (95%-ban). Levegővel keverve 5–15%-os koncentráció között robban. Lánghőmérséklete alacsony (2000 °C), égési sebessége is kicsi üzemi nyomása 0,05–0,1 MPa túlnyomás. Csak kisméretű munkadarabok lángedzésére alkalmas.

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A propán ideális égőgáz lángedzéshez, mivel a láng hőmérséklete 2850 °C. A palackban folyékonyan tárolható, kiáramlaskor gőzölög el. Gyulladás sebessége igen kicsi (2,5–4 m/s), ezért a lángvisszacsapás veszélye minimális. Üzemi nyomása 0,05–0,1 MPa. A propánt legtöbbször butánnal keverik, és mint ún. PB-keveréket használják.

Fűtőérték szempontjából legkedvezőbb a propán és az acetilén. Ha azonban az égés tiszta oxigénnel megy végbe, az égési hőmérséklet gyakorlatilag független a fűtőértéktől. Sokkal fontosabb a hevítési sebesség és a lángvisszavágásra való hajlam. Fogyasztás szempontjából legjobb a városi gáz. Lökésszerű terhelést is elvisel, mindig a kellő mennyiségben áll rendelkezésre, ezért nagy felületet lehet vele edzeni. Ugyanez a földgázra is vonatkozik. A palackozott gáz hátránya, hogy nagy teljesítményigény esetén sok palackot kell használni. Hevítési sebesség szempontjából az acetilén a legjobb, mert ennek égésekor keletkezik a legtöbb hő, és lánghőmérséklete a legmagasabb, így vékony kérget lehet edzeni vele.

Tehát a rétegvastagság a hevítés sebességével szabályozható. A mag érintetlen a hőhatástól, az előzetesen már hőkezelt (pl. nemesített) állapotban megmarad. A kéreg és a mag vegyi összetétele ugyanaz, így kisebbek az edzéskor fellépő feszültségek, mint betétedzés után. A kéregleválás igen ritka; csak akkor tapasztalható, ha valamilyen anyaghiba az edzett réteget megszakítja. Az átmenet a kéreg és a mag között fokozatos. Mivel a hevítés lokális jellegű, kisebb a vetemedés, utólagos egyengetés nem szükséges. Nem fordul elő, hogy egyes helyeken az edzett rétegeket leköszörülnek, mivel a réteg vastagsága viszonylag nagy.

A lángedzési eljárások két fő csoportba sorolhatók:

- szakaszos lángedzések,
- folyamatos lángedzések.

Szakaszos lángedzés esetén a hevítés és hűtés egymást szakaszosan követi. Először az egész felületet felhevítik az edzési hőmérsékletre, majd ezután kezdődik a hűtés.

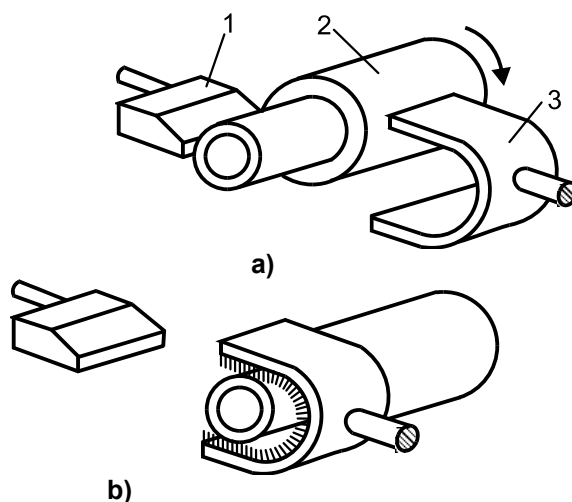
A kézből való edzést vagy pontedzést akkor alkalmazzák, ha az edzőláng keresztmetszete akkora, hogy az egész edzendő felületet egyidejűleg tudja melegíteni. Lánghegesztésnél is használatos pisztollyal hevítenek, és mártva vagy folyadéksugárral hűtenek. Így edzhetők pl. a szelepvégek, a csavarvégek, a sínvégek és a sínütközők.

Az ingamozgásos köpenyedzést akkor alkalmazzák, ha az égő valamilyen irányban túl keskeny ahhoz, hogy az egész felületet felhevítse. Az égőt ilyenkor ide-oda mozgatják a munkadarab felett. A hűtőpermetezőnek viszont már akkorának kell lennie, hogy ne legyen szükség a mozgatására. Az eljárás igen mély edzett réteget eredményezhet éppen a hosszú hevítési idő következtében. A lökethosszt az edzendő hossz szabja meg, az égő szélességét a munkadarab szélessége. Az égőt addig kell ide-oda mozgatni, amíg a munkadarab fel nem veszi az edzési hőmérsékletet. Az ingamozgásos köpenyedzést síkfelületek edzésére ritkán alkalmazzák, ugyanis ott inkább az előtolásos edzés kerül előtérbe.

A forgó szakaszos (gyorsforgásos) lángedzés folyamán a munkadarab állandó sebességgel forog a hevítés és a hűtés alatt is. Az égő hossza megegyezik az

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

edzendő csap hosszával (3.23. ábra). Az eljárás előnye, hogy a keménység és a rétegvastagság egyenletes. A munkadarab forgási sebességét úgy kell meghatározni, hogy a forgó csapok kerületi sebessége 10–25 m/min legyen. A hevítési idő a csap átmérőjétől függ. Forgó, szakaszos lángedzéshez több égő is alkalmazható, egymástól 180°, illetve 120°-ra. Ezáltal – a növekvő hőteljesítmény következtében – csökken a hevítés ideje, nő a termelékenység, kisebb az energiafogyasztás. Kiseb az edzés következtében keletkező vetemedés és a revésedés lehetősége is. A többégős megoldás hátrányai: a berendezés bonyolultabb, vékonyabb az edzett réteg a fokozottabb hőtorlódás következtében, élesebb az átmenet a kéreg és a mag között. Darukerekekhez pl. 4–8–12–16 égőfejes melegítő berendezést használnak, miáltal a felület keménysége egyenletesebb és a réteg sokkal mélyebb, mint egyégős edzés esetén.



3.23. ábra

Forgó szakaszos edzés

a) hevítés; b) hűtés

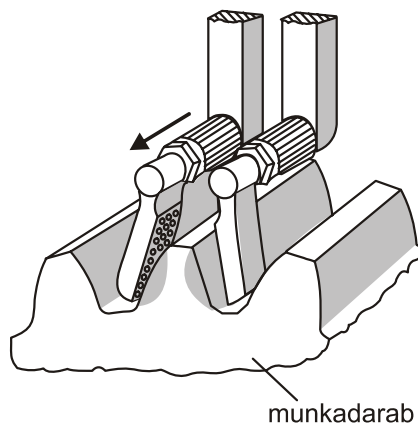
1 égő; 2 munkadarab; 3 hűtőfej

Folyamatos lángedzéskor a láng vagy a lángsor egyszer halad el a melegítendő felület előtt (vagy a felület halad el a láng előtt). A felhevített sávot minden esetben folyamatosan hűtik. Tehát a hevítést és hűtést egy műveletben végzik.

Előtolásos (síklap-) edzés (3.24. ábra) esetén az égő és hűtőfej szélessége a munkadarabbal azonos. Vagy az égő és ezt követően a hűtőfej halad el a munkadarab felett, vagy a munkadarabot mozgatják az égő és hűtőfej alatt. A hűtőfej mindenképpen az égőfejet követi úgy, hogy csak egy vékony edzett réteg keletkezzék. Az előtolás nagyságát (5–15 cm/min) úgy állapítják meg, hogy a láng által felmelegített sáv felvegye az edzési hőmérsékletet. Az elérendő rétegvastagság szempontjából fontos az égőfej és hűtőfej közötti távolság. Az edzett réteg ugyanis an-

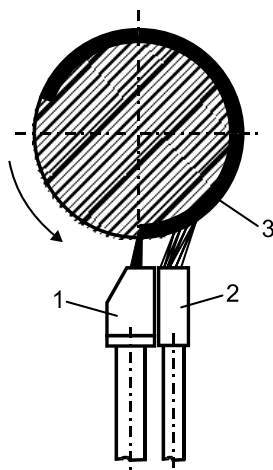
3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

nál vékonyabb, minél nagyobb az égők hőteljesítménye, az előtolás sebessége, és minél kisebb az égő és hűtőfej közötti távolság.



3.24. ábra
Előtolásos edzés

Az egyfordulatos folyamatos lángedzés elve a **3.25. ábrán** látható. A munkadarab (3) megfelelő előtolással folyamatosan egyszer halad el az égő (1) előtt, majd a hűtőfej (2) a felhevített palástrészt folyamatosan hűti. Az edzés egyetlen fordulat alatt megy végbe.

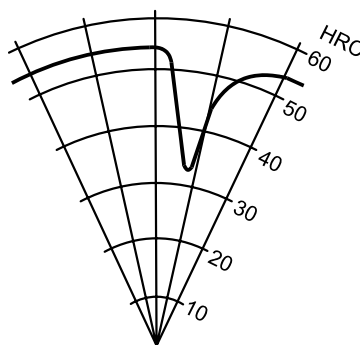


3.25. ábra
Az egyfordulatos folyamatos lángedzés elve
1 égő; 2 hűtőfej; 3 munkadarab

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A rétegmélységet a hevítőberendezés teljesítménye, az előtolás, az égő és a hűtőfej közötti távolság, továbbá az edzendő felület és az égőfej közötti távolság befolyásolja. A rétegmélység előírásakor a várható kopásból kell kiindulni. Mivel a feszültségek nem a felületen a legnagyobbak, mély edzett réteg előállítására kell törekedni. A forgó munkadarab kerületi sebességét úgy állapítják meg, hogy a láng által felhevített sáv felvegye az edzési hőmérsékletet. Minél nagyobb a munkadarab átmérője, annál kisebb az előtolás. Minél nagyobb az acél karbontartalma, és minél erősebben ötvözött, annál nagyobb az előtolás. Az edzendő felület és az égő közötti távolság 10–25 mm, ami elsősorban a munkadarab átmérőjétől függ. Minél nagyobb az edzendő munkadarab átmérője, annál kisebb ez a távolság. A távolság az anyag összetételétől is függ. Minél nagyobb az acél karbontartalma és minél erősebben ötvözött, annál távolabb kell vinni az égőt az edzendő felülettől.

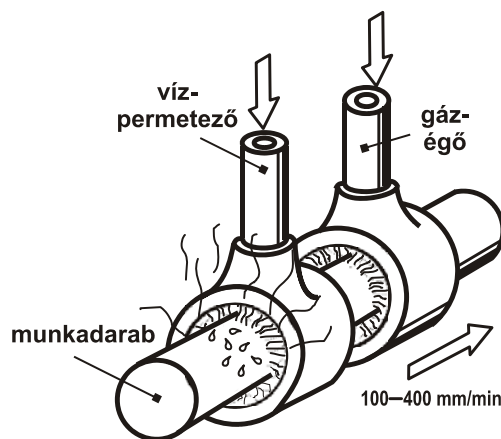
A hűtővíz hőmérséklete 20 °C-nál nagyobb legyen, nehogy repedések keletkezzenek. Célszerű víztartály beállítása, amely a hűtővíz hőmérsékletét és nyomását stabilizálja. Az egyfordulatos folyamatos lángedzést sokan még ma is fenntartással fogadják a lágycsíkosság (3.26. ábra) veszélye miatt. A lágycsík ott képződik, ahol befejezik az edzést, mert a láng előrehatoló melege a már létrehozott edzett kérget bizonyos mértékig kilágyítja. A lágycsík jelentősége annál kisebb, minél nagyobb a munkadarab. Az egyfordulatos edzésre jellegzetes példa a darufutókerek és a vasúti kocsik kerekeinek lángedzése.



3.26. ábra
Lágycsíkosság

Forgó előtolásos edzés során a munkadarab a saját tengelye körül forog, az égő és a hűtőfej pedig a hengeres munkadarab alkotója mentén haladó mozgást végez. A két mozgás eredőjeképpen a láng csigavonalszerűen halad végig a felületen. Főleg kis átmérőjű, hosszú forgástestek edzésére (3.27. ábra) alkalmas, ezek ugyanis egyfordulatos folyamatos vagy forgó, szakaszos lángedzéssel nem kérgesíthetők. A munkadarabot az egyenletes hevítés és az egyenletes rétegmélység végett kell forgatni, mivel a munkadarabot az égőben annyira központosan nem lehet elhelyezni, hogy forgatás nélkül is egyenletesen hevüljön. Az előtolást és a fordulatszámot célszerű fokozat nélkül szabályozni, ugyanis az átmérőnek

megfelelő előtolással való edzés során akkor is meg tudják valósítani az edzés egyenletességét, ha néhány technológiai adat (pl. a nyomás) üzem közben megváltozik.



3.27. ábra

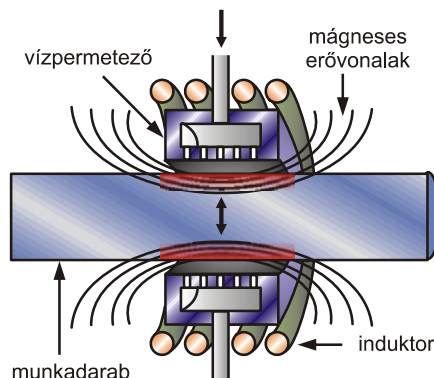
Kis átmérőjű, hosszú tengelyek edzése

Az égő vagy teljesen zárt gyűrű, vagy körív alakú, és szegmensekből áll. A nem teljesen zárt gyűrűbe könnyebb behelyezni a munkadarabot és egyszerűbb kivenni. Ha az égő több körív alakú szegmensből áll, akkor az ívek száma szerint 2–3–4–8-részes égőről beszélhetünk. Az égővel rendszerint egybeépített hűtőfej legtöbbször teljesen körbefogja a munkadarabot, hogy a hűtés minél egyenletesebb legyen.

A lángsugár és a vízszugár közötti távolság 10–20 mm. Az égő vagy egybe van építve a hűtőfejjel, vagy a hevítőberendezéstől külön álló hűtőfejet alkalmaznak. Ha az égő és a hűtőfej külön egységet képez, akkor ez módot nyújt a rétegmélység további szabályozására. Minél közelebb van a hűtőfej az égőhöz – változatlan technológiai adatok esetén –, annál vékonyabb edzett réteg állítható elő.

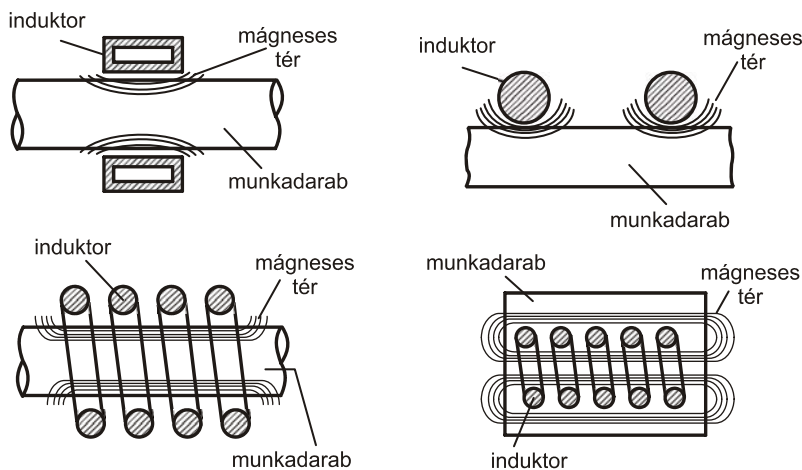
3.2.2. Indukciós edzés

Az indukciós felületi edzés (3.28. ábra) célja gépelemek vagy szerszámok felületi keménységének és ezáltal a kopásállóságának, kífáradási határának növelése úgy, hogy a magjuk szívós maradjon. Az acél felületi rétegének igen nagy sebességű felhevítése jellemzi az eljárást.



3.28. ábra
Indukciós edzés

A vezetőben átfolyó váltakozó áram váltakozó elektromágneses mezőt hoz létre, amely az áram útját körkörösén veszi körül. A mágneses mező erőssége a vezetőtől növekvő távolsággal arányosan csökken. A váltakozó áramot tekercsszerű vezetőn, ún. induktoron átvezetve és e tekercsbe mágnesezhető anyagú munkadarabot helyezve (**3.29. ábra**) a fémbe elektromos feszültség indukálódik, amely elektromos áramot hoz létre. Az áram hatására – a fém ellenállása következtében – hő fejlődik. A hőfejlődés növekvő frekvenciával nő. A melegedést részben a Joule-veszteség, részben a hiszterézisveszteség okozza. A hiszterézisveszteségek csak a Curie-pontig ($A_2=769\text{ }^{\circ}\text{C}$) lépnek fel, ahol az acél mágneses permeabilitása nagymértékben lecsökken.



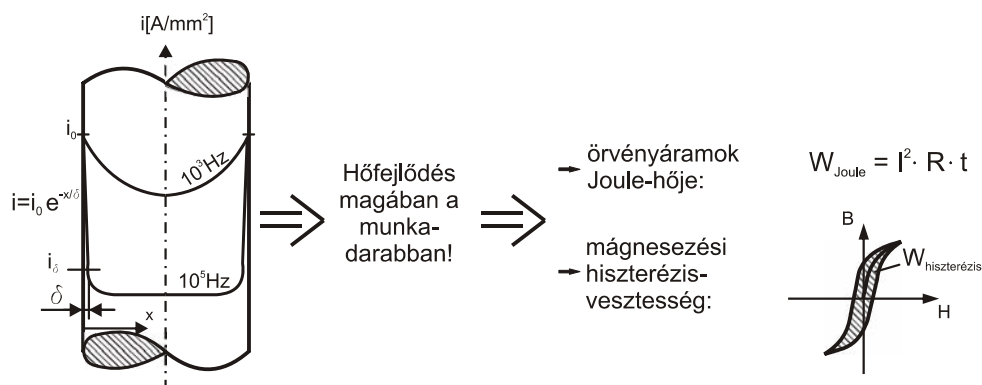
3.29. ábra
Munkadarab az árammal átjárt induktor mágneses terében

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A hagyományos hevítési módszerekkel összehasonlítva indukciós hevítéssel lényegesen nagyobb teljesítmény vihető át az acél felületére:

- áramlással $0,5 \text{ W/cm}^2$,
- sugárzással 10 W/cm^2 ,
- kontaktussal 20 W/cm^2 ,
- lánggal $1\,000 \text{ W/cm}^2$,
- indukcióval $15\,000 \text{ W/cm}^2$.

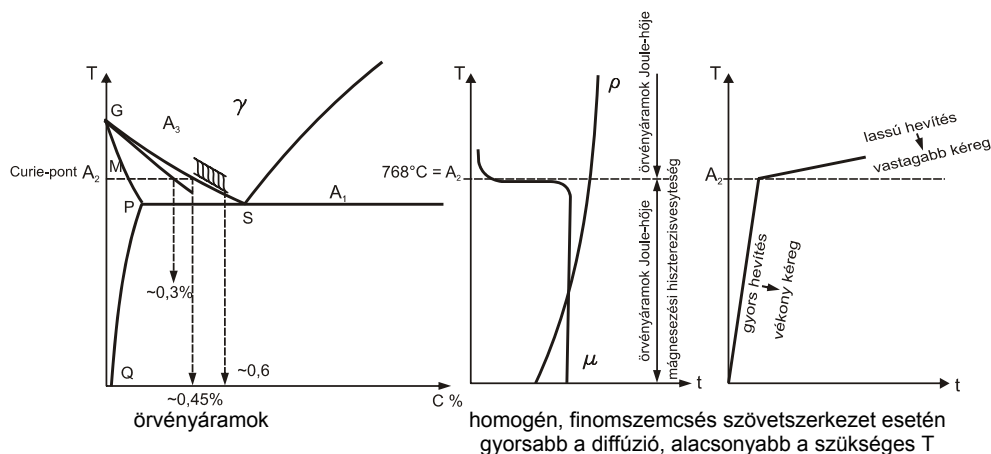
Indukciós hevítéssel tehát az előírt hőmérséklet lényegesen gyorsabban érhető el, mint hagyományos módszerekkel. Más hevítési eljárásokkal összehasonlítva a legalapvetőbb különbség abban van, hogy a hő magában a munkadarabban keletkezik. Indukciós hevítéskor az indukált örvényáramok erőssége – és ezzel együtt a hőfejlődés – a munkadarabban kívülről befelé haladva csökken (**3.30. ábra**). E jelenséget szkinhatásnak nevezzük, ami azt jelenti, hogy az indukált örvényáramok sűrűsége(i) – és ezzel együtt a hőfejlődés – a munkadarabban kívülről befelé haladva csökken, de intenzitása növekvő frekvenciával nő (nagy hőtorlódás lép fel a felületi rétegben → gyors hevítés).



- középfrekvenciás forgógenerátor tirisztoros áramátalakító:
10–100 kW, 3–10 Hz; $\delta = 5\text{--}8 \text{ mm}$
- nagyfrekvenciás oszcillátor elv alapján működő csőgenerátor:
0,5–500 kW, 400–2500 Hz; $\delta = 0,4\text{--}1 \text{ mm}$

3.30. ábra (I.)
Indukciós hevítés jellegzetességei

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések



3.30. ábra (II.)

Indukciós hevítés jellegzetességei

A nagyfrekvenciás áram behatolásának δ mélysége függ az f frekvenciától, a hevített acél ρ fajlagos ellenállásától és μ mágneses permeabilitásától:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \text{ mm.} \quad (3.2)$$

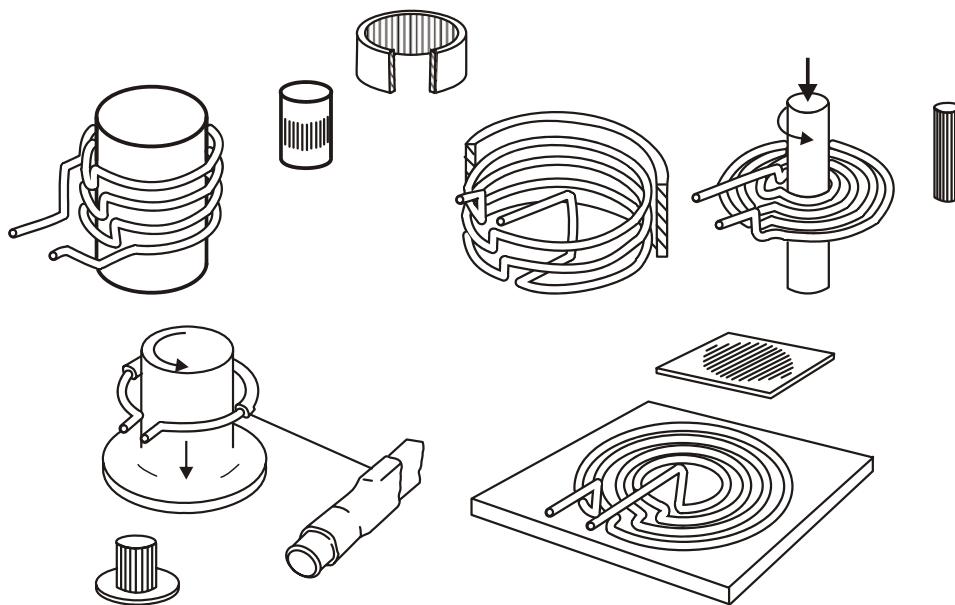
Az egyenlet szerint növekvő frekvenciával csökken az áram behatolásának mélysége. A gyakorlatban használatos frekvenciatartományok és a hozzájuk tartozó behatolási mélységek:

középfrekvencia	3–10 kHz	$\delta = 8\text{--}5 \text{ mm}$,
nagyfrekvencia	400–2500 kHz	$\delta = 1\text{--}0,4 \text{ mm}$,
nagyfrekvenciás impulzus	27 MHz	$\delta \approx 0,1 \text{ mm}$.

Az indukciós edzéshez szükséges középfrekvenciás áramot forgó generátorral, tirisztoros vagy tranzisztoros áramátalakítással, a nagyfrekvenciás áramot az oszcillátor elv alapján működő csőgenerátorral állítjuk elő. Az oszcillátor áramát nagyfrekvenciás transzformátoron keresztül az induktorra csatlakoztatjuk. A generátorok teljesítménytartománya:

középfrekvenciás generátor:	10–1000 kW,
nagyfrekvenciás generátor:	0,5–500 kW.

Az indukciós edzőberendezés fontos része az induktor. A hevítés hatása nemcsak a generátor teljesítményétől és a hevítés idejétől, hanem az induktor méretétől, kialakításától és elrendezésétől is függ (**3.31. ábra**). Az induktor készítése legnagyobb részben gyakorlati tapasztalatokon alapul. A hevítési képhez szükséges induktor kialakítása számításal nem határozható meg, és általános érvényű szabály is csak korlátozott mértékben állítható fel.



3.31. ábra

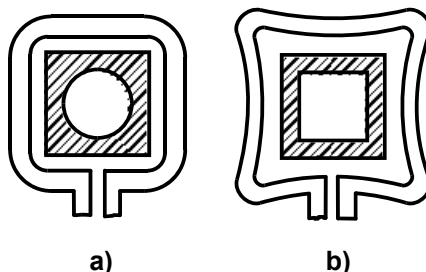
Induktorok kialakítása és elrendezése

Az áramsűrűség az induktorokban $4000\text{--}6000\text{ A/cm}^2$ is lehet, ezért az ellenállásuk kicsi legyen. E célra rézet használnak, nagyobb igénybevétel esetén ezüstöt, de jól beváltak a rézből készült ezüstözött induktorok is. Az induktorban keletkező hő – amely a hasznos teljesítmény 20–30%-át is elérheti – hűtővízzel el kell vezetni. Részben ezért, részben a szkinhatás miatt az induktorok csőből készülnek. A nagyfrekvenciás áram szempontjából a vezető ellenállása annál kedvezőbb, minél nagyobb a felülete a keresztmetszetéhez képest. Ezért a négyszögletes keresztmetszetű csőnek jobb a hatásfoka, mint a kör keresztmetszetűé. A vezetőfelület lemezcsík felhegesztésével is növelhető.

A kellő alakhűséggel kialakított induktornak hevítéskor is meg kell tartania rögzített helyzetét, ezért stabilan kell felszerelni a nagyfrekvenciás transzformátorra. Az induktort tartó hozzávezetésnek lehetőleg rövidnek és a száruk egymástól való távolságának minimálisnak kell lennie. Ilyen módon az induktor hatásfoka kedvezőbb.

Az induktor és a hevítendő felület közötti távolság, az ún. csatolás lehetőleg $0,5\text{--}1,0\text{ mm}$ legyen. Minél kisebb, annál jobb az induktor hatásfoka. Az éles sarkok és kis keresztmetszetek a nagy áramsűrűség és a rosszabb hőelvezetés miatt túlhevítésre érzékenyek (3.32/a. ábra). Ezért ilyen helyeken a csatolási távolságokat bizonyos mértékig meg kell növelni (3.32/b. ábra).

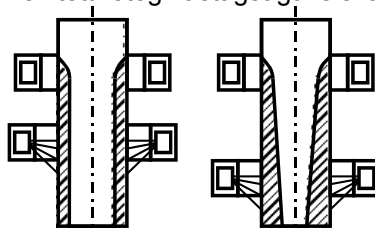
3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések



3.32. ábra

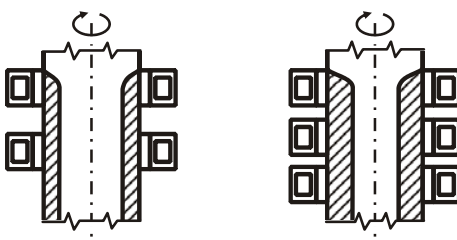
Az élek túlhevülése a csatolás rontásával elkerülhető

Az edzendő kéreg vastagsága a fajlagos teljesítménnyel, az előtolás sebességével, az acél kémiai összetételének figyelembevételével állítható be. Az induktor és a hűtőfej közötti távolsággal bizonyos határokon belül jól szabályozható a hevítés mélysége (3.33. ábra). Túl nagy távolság esetén a hevített övezet hőmérséklete annyira lecsökkenhet, hogy a felület keménysége az elérhetőnél kisebb lesz. Többmenetes induktorkal a menetek egymás közötti távolságával az edzendő felület hőmérséklete és így a hevített réteg vastagsága is szabályozható (3.34. ábra).



3.33. ábra

A hűtés késleltetésének hatása a kéreg vastagságára

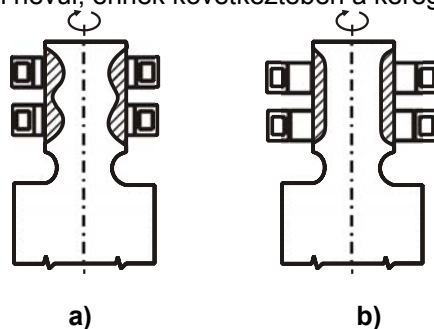


3.34. ábra

A menetek egymás közötti távolságának hatása a hevített réteg vastagságára

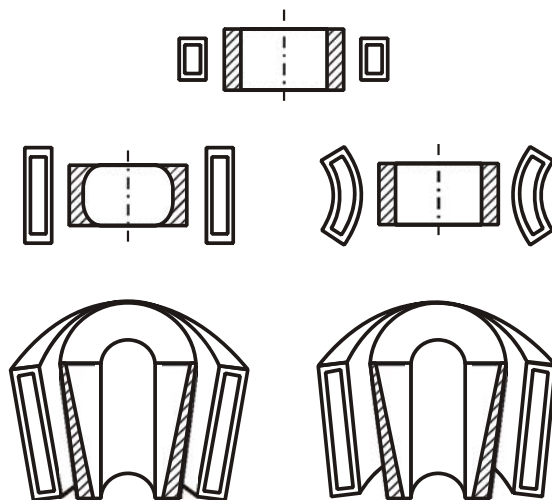
Hengeres tárgyak edzésekor a hevítés a csatolási távolságnak, a menetek egymástól való távolságának és az induktor keresztmetszetének növelésével tetszés szerint változtatható. A 3.35. ábra arra mutat példát, hogy miként kell a tengely

végét egyenletes mélységben beedzeni. Ha a **3.35/a. ábrán** látható induktort használjuk, akkor a szoros csatolás miatt a hevített réteg nem lesz egyenletes. A hevítés ideje nagyon rövid, a hőmérséklet kiegyenlítődéskére nincs idő, az edzett kéreg ennek megfelelően változó keménységű és változó mélységű. Egyenletesebb hevítés céljából a csatolási távolságot növelni kell (**3.35/b. ábra**), így a munkadarab homogénebb mezőben hevül, ennek következtében a kéreg egyenletes lesz.



3.35. ábra
Tengelyvég edzése

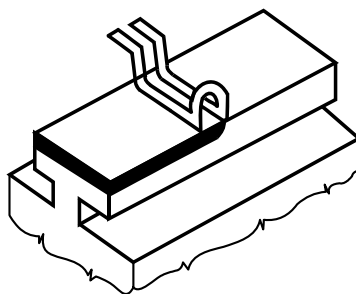
A homlokfelületen fellépő hőtorlódás csökkentésére célszerű az induktort úgy kialakítani, hogy magassága legalább 1 mm-rel kisebb legyen (**3.36. ábra**). Hasonló szempontból az előtolásos edzés esetén célszerű a hevítést a tárgy felső pereme alatt 1–2 mm távolságban megszüntetni.



3.36. ábra
Az edzett kéreg alakjának változása a csatolás módosításának hatására

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A sík felületet (lapot) edző induktorokat hajtúszerűen alakítják ki, és az edzést előtolással végzik, hogy a munkadarab éleinek túlhevülését elkerüljék. A hűtőkészüléket közvetlenül az induktor után helyezik el (**3.37. ábra**). Ügyelni kell arra, hogy a hűtőfolyadék ne folyhasson az induktor alá. Ezért vagy a hűtőkészülék kifolyónyílásait alakítják ki úgy, hogy ez ne történjék meg, vagy fúvott levegőt használunk. Függőleges irányú előtolásos edzéskor a hűtőfolyadék az induktor alatti övezettől sokkal egyszerűbben távol tartható. Nagy teljesítményű indukciós edzőgépekhez nem használnak külön hűtőkészüléket, hanem az induktoron átfolyó hűtővíz egy részét megfelelően elhelyezett furatokon keresztül a munkadarabra juttatják.



3.37. ábra

Hajtú alakú induktor felhajtott végekkel, sík felület edzésére

Az indukciós edzés a hagyományos edzéstől a hevítés módjában tér el, ugyanis

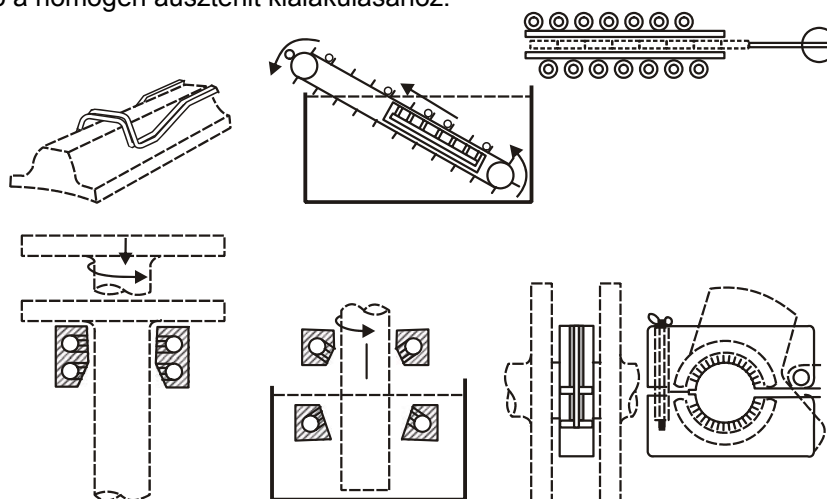
- a hő magában a munkadarabban keletkezik,
- igen nagy a hevítés sebessége.

Hagyományos edzéskor a ferrit és a cementit ausztenitté alakulása lassan megy végbe, és néhány perctől óráig tartó időt igényelhet. Indukciós hevítéskor az ausztenit tökéletes átalakulásához – a nagy hevítési sebesség folytán – jóval magasabb hőmérséklet kell, mint hagyományos edzés esetén. A nagy hevítési sebesség és a szkinhatás együttesen a felületi rétegben igen nagy hőtorlódást okoz. A hevített övezet hűlése a felületre juttatott hűtőközeg és a hideg mag erőlyes hőelvonása következtében nagyon gyors (**3.38. ábra**).

Az edzett kéreg vastagsága kicsi, és a mag szívós marad. A generátor frekvenciahatárán belül a fajlagos teljesítménnyel és egyéb technológiai adatokkal (hevítési idő, előtolás stb.) az edzett kéreg vastagsága igen jól változtatható.

A Curie-pontnál ($A_2 = 769\text{ °C}$) alacsonyabb hőmérsékleten a μ permeabilitás igen nagy, a ρ fajlagos ellenállás viszont kicsi. Hevítéskor a 769 °C -ot túllépve a permeabilitás ugrásszerűen csökken (a ferromágneses acél paramágnesessé válik), ugyanakkor megnő a fajlagos ellenállás. E változások következtében 769 °C alatti hőmérsékleten az induktorhoz csatolt felület igen nagy teljesítményt vesz ki a generátorból, míg a Curie-pont túllépése után a teljesítmény jelentősen csökken. E jelenség igen jól észlelhető állóedzéskor. Indukciós edzéssel olyan acélok kérgesíthetők, amelyek karbontartalma legalább 0,35%, hogy az acél A_3 hőmér-

séklete a Curie-pont alá kerüljön, illetve a munkadarab előzetesen megfelelő szilárdságra nemesíthető legyen. Az ötvözőelemek csökkentik a szükséges hűtési sebességet, a repedésérzékenységet mérsékelik, a szemcsefinomságot javítják. Az elérhető felületi keménységet a karbontartalom határozza meg. Az ausztenitesedés időtől és hőmérséklettől függő diffúziós folyamat. Eredményes edzés – legnagyobb keménység – csak homogén ausztenites állapot elérése után való hűtással érhető el. Az indukciós edzést jellemző gyors hevítés és az azt követő hűtés következtében igen kis idő áll rendelkezésre a homogén ausztenites állapot elérésére, ezért csak a hőmérséklet jelentős növelésével érhető el a homogén ausztenites állapot. A diffúzió gyorsabban végbemegy, ha a kiindulási szövetszerkezet homogén, finomszemcsés. Ilyen esetben alacsonyabb hőmérséklet is elegendő a homogén ausztenit kialakulásához.



3.38. ábra

Hűtési módok indukciós edzéskor

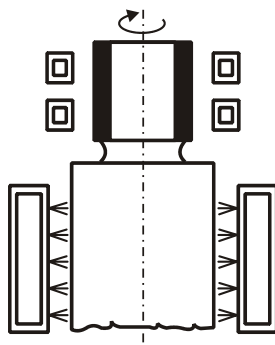
Az indukciós edzés üzemi gyakorlatban kialakult és alkalmazott eljárásai két technológiai csoportba sorolhatók:

- állóedzés, amikor a munkadarab és az induktor egymáshoz viszonyított helyzete a hevítés és a hűtés során nem változik;
- előtolásos edzés, amikor a munkadarab és az induktor egymáshoz viszonyított helyzete a hevítés és a hűtés során változik.

Mindkét technológia végezhető a munkadarab forgatásával vagy anélkül.

A munkadarab forgatásával megvalósuló állóedzéskor a munkadarab egész felületét egyszerre hevítik az ennek megfelelően kialakított induktorban. A hevítés befejezésekor a munkadarabot hűtőfolyadékba merítik, vagy a felhevített részét hűtőfolyadék-permettel hűtik (3.39. ábra). A hevítés és hűtés ideje alatt a munkadarab 150–200 1/min sebességgel forog a saját tengelye körül, ezáltal a munkadarab szimmetriahibáiból adódó hevítési rendellenességek kiküszöbölhetők.

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

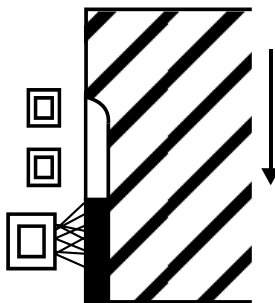


3.39. ábra

Állóedzés a munkadarab forgatásával

A munkadarab forgatása nélküli állóedzés lényegében ugyanolyan eljárás, mint az előbbi, azzal a különbséggel, hogy a munkadarab nem forog. Főleg szabálytalan, nem szimmetrikus felületek hevítésére alkalmas.

A munkadarab forgatása nélküli előtolásos edzéskor az edzendő felületnek csak egy részét hevítik. A munkadarab és az induktor közötti relatív mozgással az induktor szélességének megfelelő szélességű sávban a felület felhevül (**3.40. ábra**). Miután az induktor a felhevített részt elhagyta, az induktor alatt (vagy mellett) elhelyezett hűtőfejen keresztülráamló folyadékkal lehűtik azt.

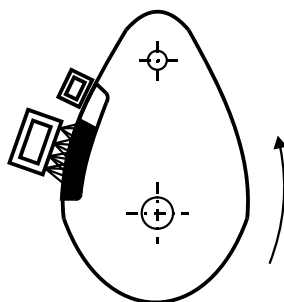


3.40. ábra

Előtolásos edzés a munkadarab forgatása nélkül

A munkadarab forgatásával végzett előtolásos edzéskor a két csúcás közé befogott munkadarabot 200–500 1/min fordulatszámmal forgatják. A fordulatszám az előtolás sebességétől, a munkadarab átmérőjétől és a hevített sáv szélességétől függ. Általános szabály, hogy a munkadarab legalább öt fordulatot tegyen meg az alatt az idő alatt, amíg az induktornak megfelelő szélességű sáv az induktoron áthalad. Az eljárást forgástestek edzésére alkalmazzák.

Integrációs edzés során a hajtúszzerűen kialakított induktor előtt a munkadarabot lassan forgatják (**3.41. ábra**). Az edzett felületek találkozásánál a kéreg keménysége kisebb lesz, ezért célszerű e lágyabb sávot a kisebb igénybevételű felületen kialakítani. E találkozási sávot nem edzik átlapolva, mert a megeresztési tartományban feszültségi repedések keletkezhetnek.



3.41. ábra
Integrációs edzés

3.2.3. Lézeres edzés

Az acélok termikus technológiái – a megvalósuló hőciklus csúcshőmérséklete alapján – a következő részfolyamatokat eredményezhetik:

1. ha a csúcshőmérséklet A_{c1} alatti, akkor csak megeresztődéssel járó folyamatok mennek végbe;
2. ha a csúcshőmérséklet A_{c1} feletti, de szolidusz alatti, akkor részleges vagy teljes ausztenitesedéssel, illetve azzal összefüggő átalakulásokkal – vagyis edzéssel – járó folyamatok is végbemennek;
3. ha a csúcshőmérséklet szolidusz feletti, akkor részleges vagy teljes olvadással, illetve azt követő dermedéssel járó folyamatok is végbemennek.

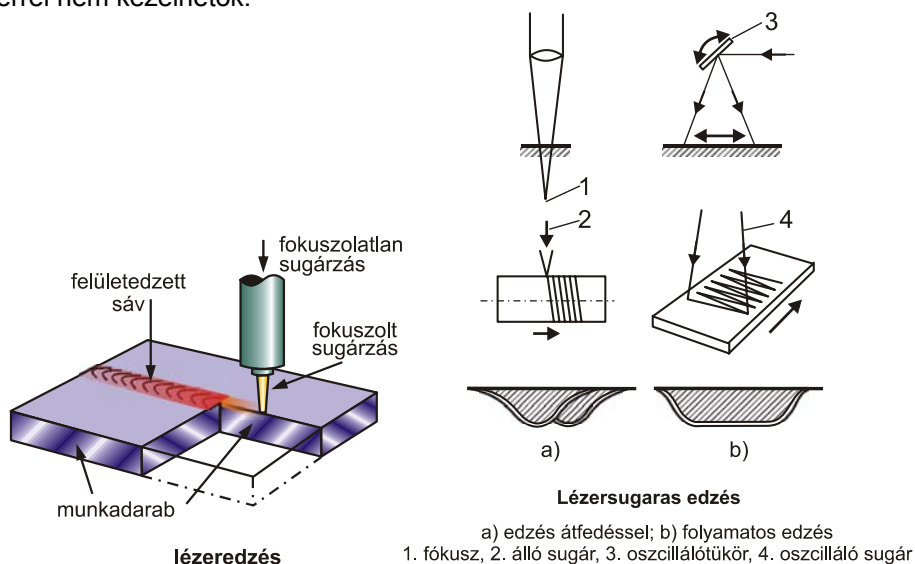
Ha a fenti időbeli változásoknak az anyagban való helyfüggő eloszlását tekintjük, akkor a technológiai eljárás csoportokra a következők jellemzőek:

- a felületi hőkezelő eljárásoknál az első vagy az első két részfolyamat a meghatározó;
- a felületi átolvasztó és az ömlesztve hegesztő eljárásoknál mind a három részfolyamat megvalósul, tekintettel a hőhatásövezeti jelenségekre is.

Az eljárás csoportokon belüli fő különbségek abban nyilvánulnak meg, hogy az említett részfolyamatok a maximális hőmérséklettel jellemezhető anyagi pontok mentén – a hely függvényében – milyen arányt képviselnek, azaz milyen a hőmérséklet-gradiens, illetve annak változása. Ezt vizsgálva, az alapvető eltérés a hőforrás koncentráltságában mutatkozik. A hőforrás koncentráltságának (koncentráltságának) elterjedt mérőszáma a már említett teljesítménysűrűség vagy az energiasűrűség.

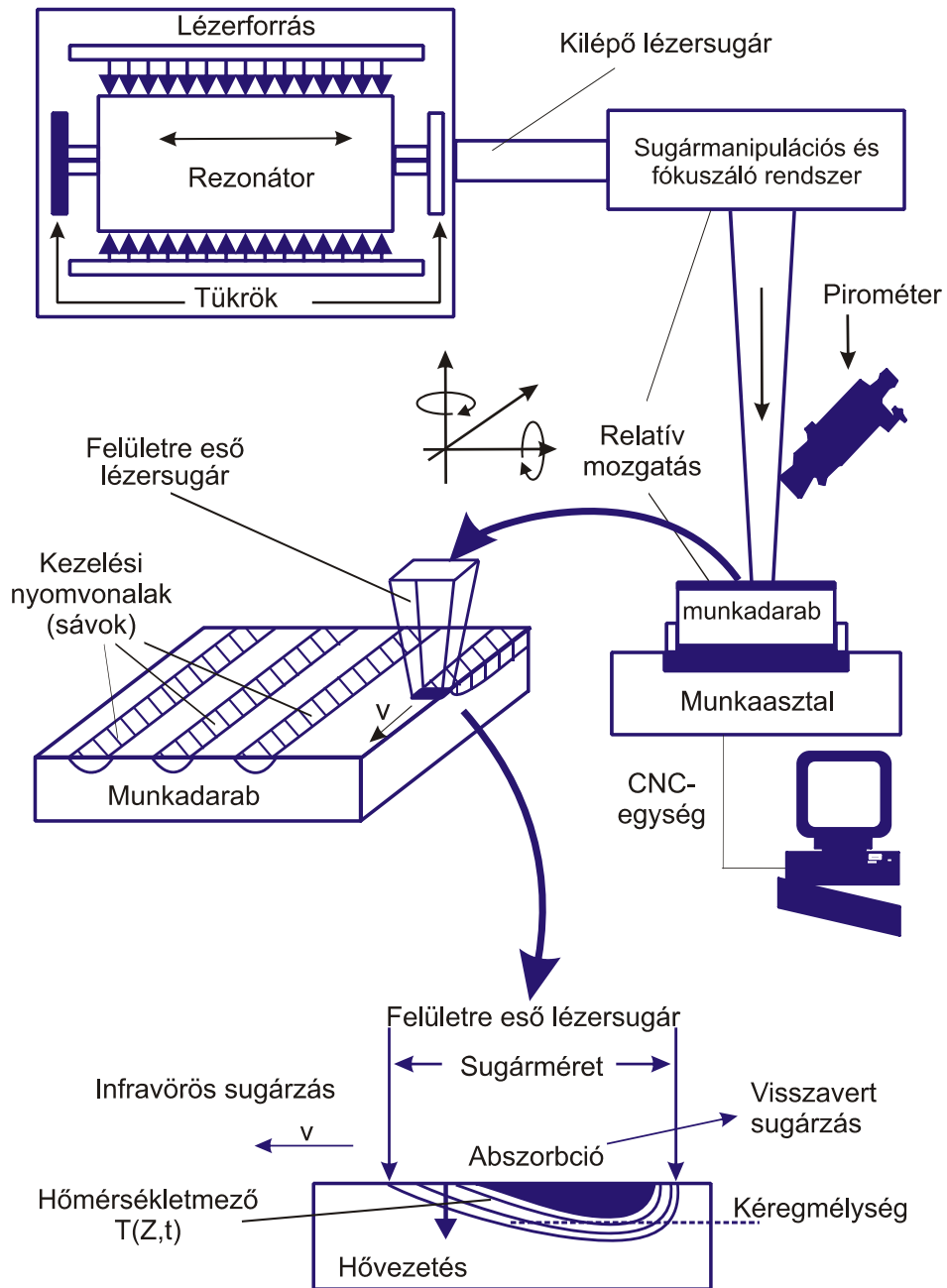
3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

Az olvasztás nélküli edzéssel (transzformációval) operáló technológiák a szerkezeti acélok területén terjedtek el. A létrehozott edzett rétegek mélysége néhány tizedmilliméterig terjed. Például gépkocsialkatrészek felületedzését végzik így, a nagyfrekvenciás indukciós edzést vagy – ha a követelmények megengedik – a cementálás + edzést (betétedzést) helyettesítve. A bonyolult alakú felületek keményítésére is jól beváltak ezek a szilárd anyagállapotú felületkezelések. A lézeres edzés (**3.42. ábra**) lehetséges, pontosabban célszerű alkalmazásai a következőkben foglalhatók össze: nagyméretű alkatrészek, amelyeknek csak néhány kritikus pontjában szükséges a keményítés; nagy kiterjedésű felületek rasztermintás kezelése; kisméretű alkatrészek, melyek lokálisan és torzulásmentesen más módszerrel nem kezelhetők.



3.42. ábra
Lézeres edzés

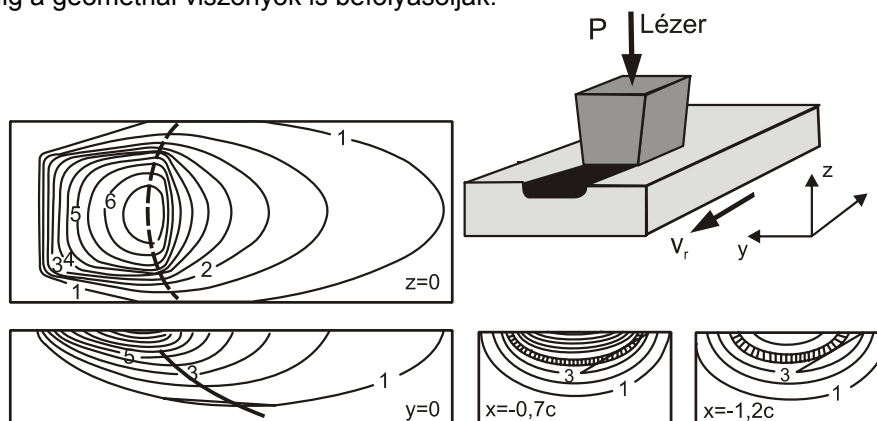
A felületi edzés csak akkor lehet gazdaságos lézerrel, ha azt más, hagyományos módszerekkel nem vagy csak káros kompromisszumok árán lehet megvalósítani. Figyelembe kell venni azt is, hogy a lézersugár célszerűen formált, de geometriailag jól meghatározott foltja vándorol a kezelendő felszínen (**3.43. ábra**), tehát összefüggő homogén hőkezelt réteg többnyire nem érhető el. Az alkatrész szempontjából ez előny is lehet ott, ahol a hagyományos eljárás nem tudott szelektív, azaz csak az érintkező sávokra kiterjedő kezelést biztosítani, elkerülve például a sarkok beedződését. Az egymás mellett futó, lézerrel edzett sávok között mindig van valamilyen mértékben megeresztődött rész. Megfelelő tükrökkel vagy tükrözgetéssel lehet elérni azt, hogy a hőkezelés egy széles sáv vagy gyűrű stb. alakú felületen egyszerre történjék meg. A kis hőbevitel a munkadarab vetemedési veszélyét csökkenti.



3.43. ábra
Lézeres felületedzés jellegzetességei

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A lézeres felületi edzés – egy meghatározott ciklusú és teljesítményű hőbevitel mellett – alapvetően az alkatrész anyagának hővezető képessége által szabályozott (3.44. ábra). A hőbevitelt a befolyásolható abszorpció segíti, a hőelvezetést pedig a geometriai viszonyok is befolyásolják.



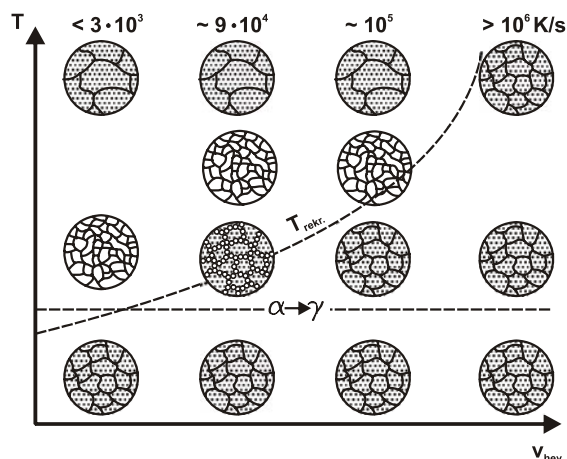
3.44. ábra

Hőmérsékleteloszlás lézeres felületedzéskor

A rendkívül gyors hevítés következtében az acélok kritikus átalakulási hőmérsékletei eltolódnak, a fázisátalakulást szenvedő anyag mennyisége megváltozik. Igen nagy számú, elnyúlt alakú ausztenitcsíra keletkezik, a túlhevítés ellenére sincs szemcsedurvulás. Felületkezelés előtt edzett és megeresztett acélokban igen finom szemcsés ausztenit keletkezhet a fázisátalakulást követő rekristallizáció eredményeként (3.45. ábra). A réteg hőmérsékletének növelésével megnő a diffúzió sebessége, ezért a kezelési idő rövidülhet, impulzustechnika is lehetséges. A nagyobb diffúziós sebesség növeli a szilárd oldat ötvözőtartalmát, ami nagyobb melegszilárdságot, jobb megeresztésállóságot eredményezhet.

Nagyobb teljesítményekkel történő lézeres kezelésekhez hűtött vörösréz parabolatükört kell használni, mivel a Zn-Se lencsék szétrobbanásveszélye ilyenkor fennáll. Vonalszerű kezelésnél a lézersugár intenzitása a kimenő teljesítmény szabályozásával avagy defókuszálással változtatható.

A defókuszálás következtében a gyújtófolt kiterjed, ugyanakkor a teljesítménysűrűség drasztikusan lecsökken. Ahhoz, hogy nagyobb területen ugyanolyan mélyen lehessen kezelni, szegmensekből álló parabolatükört kell alkalmazni. A tükör minden egyes szegmense egy-egy sávot képez le a fókuszfoltra, amelyek szuperponálásával egy relatíve egyenletes intenzitáseloszlás nyerhető a fókuszfoltban, s várhatóan a kezelési mélység is egyenletes(ebb) lesz. Ilyen tükörrel defókuszálva a sugár nagyobb területű négyszöget fog besugározni, illetve azonos folyamatsebesség mellett az egy pontra jutó behatás ideje meghosszabbodik.



3.45. ábra

Lézeres felületedzés hevítési sebességének hatása

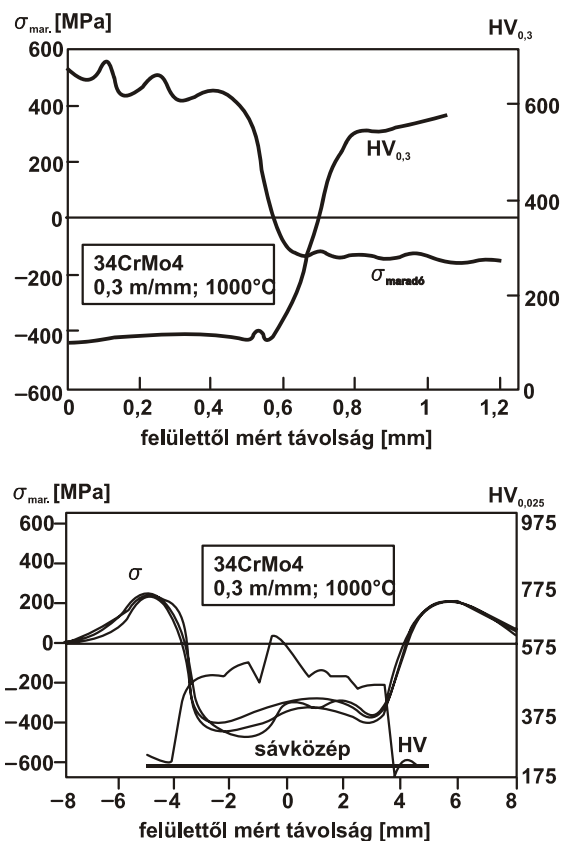
Egyes lézergyártók konkrét munkadarab-profilhoz igazodó intenzitáseloszlású tükröket is készítenek. Ha a lefedett terület a felületkezelési folyamathoz nem elegendő, akkor több egymással párhuzamos, egymást átfedő sávot kell elkészíteni. Kis teljesítménytartományú lézerek esetében a szükséges teljesítménysűrűséghez nagyon kicsi fókuszoltméret tartozik, és ezáltal időegység alatt sokkal kisebb felületrész kezelhető (kisebb a termelékenység), mint a nagy teljesítményű lézerekkel, nem beszélve az elérhető rétegvastagságról.

A felületek edzését tehát gyakran egymás mellé rakott sávokban végzik. Különös figyelmet kell fordítani az oldalirányú hőelvezetésre. Ha az átlapoló sáv előzőleg átlépte az ausztenitációs hőmérsékletet, és az átfedő sáv hőérintett zónája eléri a már megedzett tartományt, akkor minden esetben számolni kell a megeresztési hatással. Ez azt jelenti, hogy a martenzites edzés során az átlapolás következtében csökken a keménység. Ezen csökkent keménységű részek szélességét és mélységét lényegében a martenzit megeresztésállósága (keménységtartása), a hőmérséklet-eloszlás és a sávok közötti távolság határozza meg. Amikor a kezelés hosszabb ideig tart, a munkadarab fokozatosan felmelegszik. Emiatt szükséges lehet egy közbelső hűtés beiktatása is, amint a darab hőmérséklete a martenzitpont közelébe kerül.

Ha nem teljes felszínen edzik a felületi réteget, hanem csak egyes nyomvonalak, sávok mentén, tekintettel kell lenni a maradófeszültség-viszonyokra. Az edzett réteg mellett, a hőhatásövezetben húzófeszültségek ébrednek (3.46. ábra). A keresztmetszeti maradófeszültség-eloszlást vizsgálva megállapítható, hogy az edzett rétegben kialakuló nyomófeszültség értéke nem függ jelentősen a technológiai paramétereiktől, ugyanakkor a nyomvonal mentén ébredő húzófeszültségek nagysága az eljárás csúcshőmérsékletének és a pásztázási sebességnek a függvényében jelentősen változik. Átlapoló nyomvonalak esetén a sávok között jelentős

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

húzófeszültségek ébrednek. Ezek káros hatása elkerülhető, ha a szomszédos sávok kezelése olyan gyors egymásutánban történik, hogy az újrahevítés még a martenzites átalakulást megelőzően jön létre. Bizonyos esetekben nem is a keménységnövelésen van a lézeres hőkezelés alkalmazásának hangsúlya, hanem a felületi feszültségállapot olyan megváltoztatásán, amely például a kifaradási határ növekedését biztosítja.



3.46. ábra

Lézeres felületedzés okozta maradó feszültségek

A diffúziós folyamatok (koncentráció-kiegyenlítődés) gyorsítása érdekében – az Arrhenius-egyenlet $D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}$ értelmében – növeljük a hőmérsékletet. Jelen-tős mennyiségű karbidképző elemmel ötvözött szerszámacélok karbidoldódása még akkor sem következik be teljesen, ha a hőmérsékletet az olvadáspontig növel-jük. Az ausztenitzemcsék durvulása azonban végbemegy. Ilyen okok miatt az ol-

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

vasztás nélküli gyors helyi hőkezelés – felületedzés – alkalmazása elsősorban ötvözetlen, illetve gyengén ötvözött szerkezeti és szerszámacéloknál előnyös.

Mint minden edzési eljárás, a lézeres edzés is alapvetően három szakaszra bontható. Az első szakasz a hevítés A_{c1} , illetve A_{c3} hőmérséklet fölé, a második egy hőtartási szakasz, amelynek során az alapszövet lehető legnagyobb részének ausztenítetté kell alakulnia. A befejező hűtési szakaszban – megfelelően nagy hűtési sebesség esetén – martenzites szövetszerkezet alakul ki.

A lézeres edzéskor a hevítés sebessége 10^3 – 10^7 K/s között változik. Ez jelentősen meghaladja a hagyományos hőkezelő eljárásoknál szokásos értékeket, ezért itt az ausztenitesítési hőmérséklet is feljebb tolódik. A magasabb hőmérséklet kedvező az ausztenit kialakulása szempontjából, mivel az diffúziós folyamat eredménye, és a diffúziós folyamatok sebessége exponenciális összefüggésben van a hőmérséklettel. Ezért lézeres edzéskor az ausztenites átalakulás időszükséglete jelentősen lecsökken, kicsi lehet a hőtartási idő. A szükséges hőtartási időt az ausztenitesítési diagramokból szokás meghatározni, de ezeket általában csak $2,4 \cdot 10^3$ K/s sebességig dolgozták ki, viszont lézeres edzéskor előfordulnak olyan esetek, melyekre nincs adat a szakirodalomban.

A külön hűtőközeg nélküli önedződésre jellemző hűlési sebesség 10^3 – 10^5 K/s között változhat. A folyamatos átalakulási diagramokat tanulmányozva belátható, hogy ez mindenütt nagyobb, mint a martenzites szerkezet kialakulásához szükséges kritikus hűtési sebesség. Lézeres hőkezeléssel 0,05–1 mm mélységű edzett kéreg állítható elő, melynek keménysége meghalad(hat)ja a hagyományos eljárásokkal előállítható értéket. Ez megfelel annak a fejlődési iránynak, mely szerint az edzett rétegek vékonyak, de a lehető legnagyobb keménységűek legyenek.

A nagy energiasűrűségű és egyben gyorshevítéses technológiák szilárd anyag-állapotú változataihoz – acélok esetében – felhasználhatók a folyamatos hevítésre érvényes ausztenitesítési diagramok. Ezen diagramok tulajdonságbecslésben történő felhasználása lehetővé teszi a kiinduló (hőkezelési) állapot mint felületkezelési információ (technológiai alapadat) beépítését, figyelembevételét.

Egy tulajdonságbecslő modell segítségével – az ausztenitesítési diagramok és néhány összefüggés alapul vételével – lehetővé válik a várható keménység és az edződési mélység előrejelzése (predikciója). Az edződési mélység kalkulálható azon felülettől mért pontok alapján, amelyek hőciklusa még éppen elérte az A_1 átalakulási hőmérsékletet, vagy azon pontok alapján, amelyek keménysége legalább 550 HV értékű.

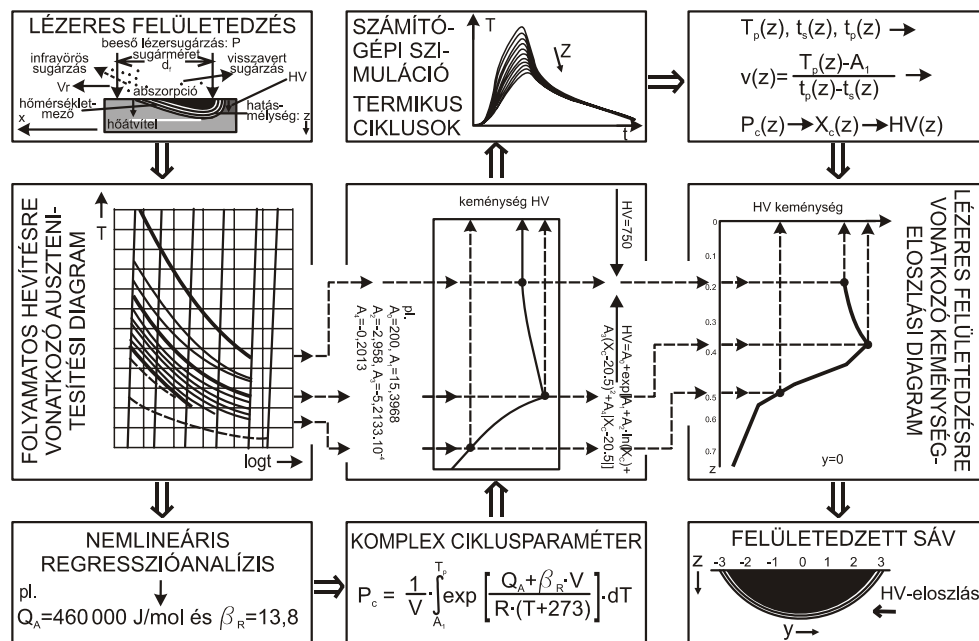
A modell olyan komplex folyamatparamétert vezet be és alkalmaz, mely számszerűen jellemzi a gyors hevítést, ausztenitesítést és hűlést magában foglaló teljes hőciklust. Ugyanis az nemcsak a hőmérséklettől, hanem a hőmérséklet-változás mértékétől is függ. A lehűlés után kialakuló keménység közvetlenül számítható mint ezen komplex paraméter függvénye. A keménységeloszlás predikciója pedig lehetővé teszi az edződési mélység meghatározását, ami a felületi hőforrás körül kialakuló izotermák alapján is kalkulálható.

A becsült keménység változása a felülettől mért távolság függvényében összhangot mutat mind az ausztenitesítési diagram mérési adataival, mind az átalakulások kinetikájára vonatkozóan vázolt megfontolásokkal. A keménység lokális

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

növekedése, majd csökkenése döntően az ausztenitesítés részleges vagy teljes voltának, valamint a maradék ausztenit előfordulásának szükségszerű velejárója. Mind a részleges ausztenitesedés, mind a maradék ausztenit mennyiségi növekedése hatékonyan közrejátsszik abban, hogy a kéreg keménysége helyenként elmarad az ideális karbonkoncentrációjú ausztenitből képződő, elvben teljesen martenzites szövet lehetséges maximális keménységétől.

Ez a keménység-előrejelzési, keménységbecslési eljárás mindazon gyorsheví-tésen alapuló (indukciós, lézeres, elektronsugaras) felületedzési technológiák tervezéséhez felhasználható, amelyeknél a megfelelő folyamatos ausztenitesítési diagramok előzetesen rendelkezésre állnak, továbbá a munkadarab felületi zónájá-ra jellemző hőmérsékletmező ismert (például számítógépi szimuláció révén). A **3.47. ábra** ennek szellemében szemlélteti az eljárás folyamatsémáját, és összefog-lalóan mutatja az egyes diagramok egymásnak megfeleltethető jellegzetes értékeit.



3.47. ábra
Predikciós eljárás folyamatsémája

3.3. Felületi átolvasztás

A mikroszerkezet kvalitatív megközelítésben az anyag fázisainak egymáshoz képest való eloszlását, arányát és alakj jellegzetességeit foglalja magában, míg a kvantitatív jellemzők az egyes fázisokra, illetve az azokat alkotó szemcsékre, to-

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

vábbá mennyiségi, illetve dimenzionális jellemzőikre – számszerűsíthető adatokra – korlátozódnak. Különösen fontos a szemcsék méretének ismerete, ugyanis az anyagok tulajdonságai – főként fémek és kerámiák esetében – szemcseméret-függők. Általában finomszemcsés anyagszerkezetre törekszünk, mert az a mechanikai tulajdonságokra – köztük az R szilárdságra – kedvező hatással van, amit a Hall–Petch-képlet fogalmaz meg matematikai alakban az R_0 szilárdsági konstans, a k anyagállandó és a $\bar{d}$ átlagos szemcseméret segítségével (a képlet közelítésében G a csúsztató rugalmassági modulus):

$$R = R_0 + \Delta R = R_0 + \frac{k}{\sqrt{\bar{d}}} \approx 0,001 \cdot G \quad (3.3)$$

A szemcseméret meghatározása a szilárd anyag megfelelően előkészített síkmetszetének mikroszkópi vizsgálatán alapul. A $\bar{d}$ átlagos szemcseméret legegyszerűbben úgy határozható meg, hogy egy L_0 hosszúságú egyenes vonal által „metszett” szemcsék száma (N) ismeretében képezzük az alábbi hányadost:

$$\bar{d} = \frac{L_0}{N} \quad (3.4)$$

A lézer-, az elektron- és a plazmasugár kellően nagy teljesítményének igen kicsi felületre (fókuszfoltra) koncentrálásával a munkadarab vékony felületi rétege megolvasztható, sőt elgőzölögtethető. Mivel a munkadarab térfogata túlnyomórészt hideg állapotban marad, így annak hőelvonó (hűtő) hatása igen nagy dermedési sebességet, s azáltal finomszemcsés mikroszerkezetet eredményez az előzőleg megolvadt rétegben.

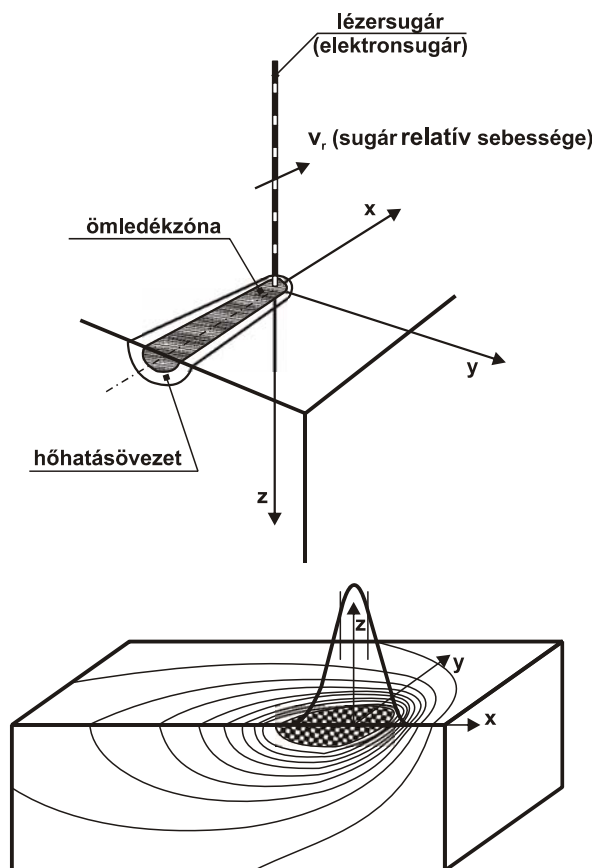
Az olvasztásos kezeléssel a felületedzésnél leírt keménységcsökkenési probléma másképpen jelentkezik. Az átfedési területek optimálásakor elsősorban az egyenletes kezelési mélységre kell ügyelni. Az átolvasztási folyamat után az anyag megdermed és újrakristályosodik, miközben a felületen zsugorodási feszültségek ébrednek, megnövelve a repedésveszélyt. A repedésre való hajlamot általában csökkenteni lehet a munkadarab előmelegítésével. Bizonyos esetekben a visszamaradó feszültségcsúcsok leépítése érdekében utólagos hőkezelésre is szükség lehet, de a hőtartási hőmérsékletet és időt optimalni kell, mivel a repedésképződés elkerülésének ez a módja keménységcsökkenéssel jár együtt.

Az olvasztásos technológiák vagy kihasználják a hőciklust egyidejű edzésre is, vagy anélkül dolgoznak. Az előbbit főleg ötvözt (szerszám)acéloknál, az utóbbit Al- és Cu-ötvözeteknél használják. A felületi olvasztások akkor képesek az olvadt zónában gyors dermedést és hűtést biztosítani, ha az olvadék körül elegendően nagy hőmérséklet-gradiens alakul ki (**3.48. ábra**).

A teljesítménysűrűség a rétegsáv alakján, mélység/szélesség arányán keresztül befolyásolja a lehűlési sebességet és az olvadékszóna létidejét. Ez nemcsak a rétegsáv szövetszerkezetét határozza meg, hanem azokat az időtartamokat is, ame-

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

Ilyek alatt a kezelt zóna egy-egy kritikus hőmérséklet-tartományon keresztül jut. Mérsékelt energiasűrűség és a sugár nem túl gyors mozgatása esetén a munkadarab a felülettől kiindulva felmelegszik, és a hővezetés gömbfelülethez közel álló izotermákat hoz létre.

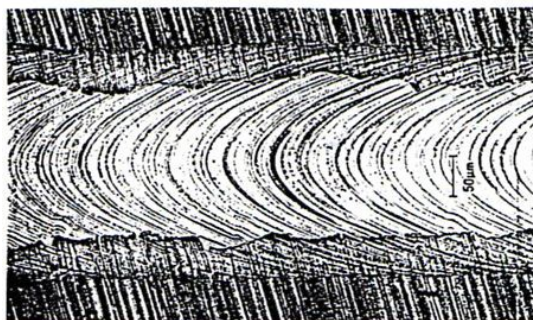


3.48. ábra
Felületi átolvasztás hőhatásai

Ennek megfelelően a hagyományos ömlesztő hegesztések varrataihoz hasonló alakot kapunk, a rétegsáv mélysége nem vagy alig lesz nagyobb a szélességénél. Ha az energiasűrűséget növeljük – a sugarat kisebb foltra fókuszáljuk, illetve a teljesítményt fokozzuk –, a behatolási mélység jobban nő, mint a szélesség, így relatíve keskeny ömlék-, illetve rétegzóna és hőhatásövezet jön létre. A munkadarabbal közölt teljesítmény és a relatív sebesség (fajlagos hőbevitel) variálásával a kezelt sáv szélessége befolyásolható.

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

Az átolvasztott rétegsávok felülete többé-kevésbé pikkelyezett (**3.49. ábra**), ami azzal függ össze, hogy az ömledéknek bizonyos – időben változó – mechanikai instabilitása van, és ez a megolvadt tömeg mozgása folytán a felületen közel periodikus dermedési struktúrát alakít ki.



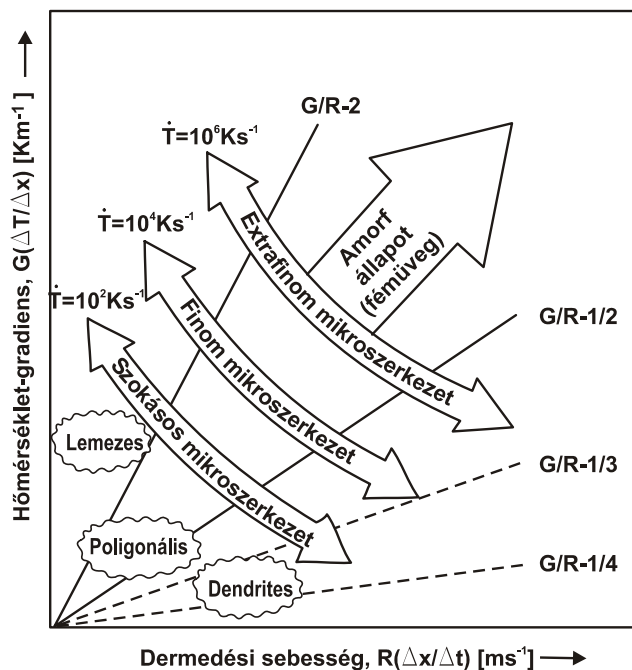
3.49. ábra

Felületi átolvasztással létrehozott sáv pikkelyezettsége

Az eljárásokra jellemző nagy hűlési sebesség a rétegszerkezetre lehet hasznos, de káros is. A keskeny rétegsávoknál megfigyelhető nagy hőmérséklet-gradiens ugyanis nagy feszültséggradiens kialakulásához vezethet, ami a repedésveszélyt növeli. Viszont ez az övezet olyan kicsi, hogy a repedésveszély az esetek többségében nem realizálódik folytonossági hiányokban. Az anyag összetételétől, rugalmassági és képlékenységi tulajdonságaitól függ, hogy a két hatás közül melyik a jelentősebb, ezért nincs általános érvényű szabály az optimális olvasztott sávalakra és ezen keresztül az olyan kezelési adatokra, amelyek teljesen hibátlan réteget garantálnak.

Az olvadt zóna határán lévő folyékony–szilárd sávban fellépő energiatranszport-, impulzustranszport- és anyagtranszport-folyamatok együttesen határozzák meg a dermedéssel kialakuló réteg szerkezetét. Többkomponensű rendszereknél ehhez még hozzáadódik a fázisok állandóan változó mennyisége és minősége is. Ezek a bonyolult – matematikailag nem vagy csak nehezen kezelhető – mikrofolyamatok és áramlások kíséretében lezajló hőátadások a koncentrációkülönbség és a túlhűtés együttes hatására különböző dermedt mikroszerkezetet eredményezhetnek. Ezt a szövetszerkezetet a kialakult szilárd oldali hőmérsék-

let-gradiens (G [K/m]), a hűlési sebesség ($\dot{T}$ [K/s]) és a szilárd–folyékony határfelület haladási sebessége (R [m/s]) együttesen határozza meg (**3.50. ábra**), közöttük pedig a dermedés során a következő összefüggés áll fenn: $\dot{T} = G \cdot R$.



3.50. ábra
Felületi átolvasztás során létrejövő mikroszerkezetek

Fémfelületek nagy energiasűrűségű sugárzással (lézer, elektronsugár) való kezelésekor képződött. Az olvadék megszilárdulása – az intenzív hőelvezetés következtében – 10^5 K/s vagy még ennél is nagyobb sebességgel következik be. A gyors megszilárdulás miatt metastabil állapotú anyag jön létre, melyet

- finom szemcseszerkezet,
- metastabilis fázisok kialakulása,
- egyes ötvözőelemek oldékonyságának növekedése,
- a diszperz fázisok (kiválások) kis mérete és homogén eloszlása,
- esetleg amorf (üvegszerű) szerkezet megjelenése

jellemez.

Amorf szerkezetű ötvözet csak bizonyos összetételeknél képződik. Gyakorlati szempontból a 3d átmeneti fémek (Fe, Ni, Co) bórral, szilíciummal, foszforral és szénnel képzett ötvözetek a legfontosabbak (10–15 atom% metalloiddtartalom felett). Amorf szerkezetű ötvözeteket ma már nemcsak olvadékok gyors megszilárdításával, hanem kémiai módszerekkel (vizes oldatból történő leválasztással), szilárd fázisban végbemenő diffúzióval (mechanikai ötvözés), ionokkal történő besugárzással és egyéb módszerekkel is készítene.

Ha a munkadarab felületének összetétele és a megszilárdulás körülményei nem teszik lehetővé amorf réteg képződését, akkor a gyors megszilárdulás révén finom,

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

ún. mikrokristályos szemcseszerkezet alakul ki a felszínen. A mikrokristályos ötvözetek további lehetőséget nyújtanak a felület módosítására, a mechanikai és egyéb tulajdonságok javítására. A kedvező hatás ilyenkor a szemcseméret csökkenése, metastabilis fázisok kialakulása, az oldékonysági határ megváltozása, a kiválások méretének csökkenése és nagy ponthiba-koncentráció létrejötte révén alakul ki.

Az amorf és mikrokristályos felületi rétegek olvasztással történő létrehozására a lézeres, illetve elektronsugaras berendezéseket használják. Mindkét esetben vagy a sugárnyalábot, vagy a munkadarabot mozgatják. Eredményül „csíkozott” felületet kapnak. A lézeres felületi olvasztásnál leginkább folyamatos üzemű CO₂-teljesítménylézereket (500 W felett) vagy impulzusüzemű szilárdtest-, illetve excimerlézereket használnak. Utóbbiakkal sikerült az eddigi legnagyobb megszilárdulási sebességeket ($>10^{12}$ K/s) elérni. Elektronsugaras felületi olvasztásokat általában kissé módosított elektronsugaras hegesztő-berendezésekkel végeznek, a foltátmérő általában néhány mm, a teljesítmény néhány száz W.

Az amorf anyagok egyébként olyan szilárd testek, melyekben nincs hosszú távú kristálytani rendezettség. Az amorf fémek gyakorlatilag fontos tulajdonságai, illetve a tulajdonságok sajátos kombinációja alapjaiban ezen két tényezőre vezethetők vissza. A rövid távú rendtől függ a mágneses telítés, a Curie-pont, a magnetostrikciós állandó, a szakítószilárdság, a keménység, az elektromos ellenállás hőfoktényezője stb. A hosszú távú rendezetlenségnek megfelelő homogenitás és izotrópia magyarázza meg a nagy permeabilitást, a kis koercitív erőt, az akusztikus rezgések csillapítását, a nagy elektromos és korróziós ellenállást, az alakítási keményedés hiányát és a szakítószilárdság iránytól való függetlenségét.

Az amorf fémek egyedi módon társítanak olyan tulajdonságokat, melyek a hagyományos (kristályos szerkezetű) fémeknél összeférhetetlennek tűnnek, pl.

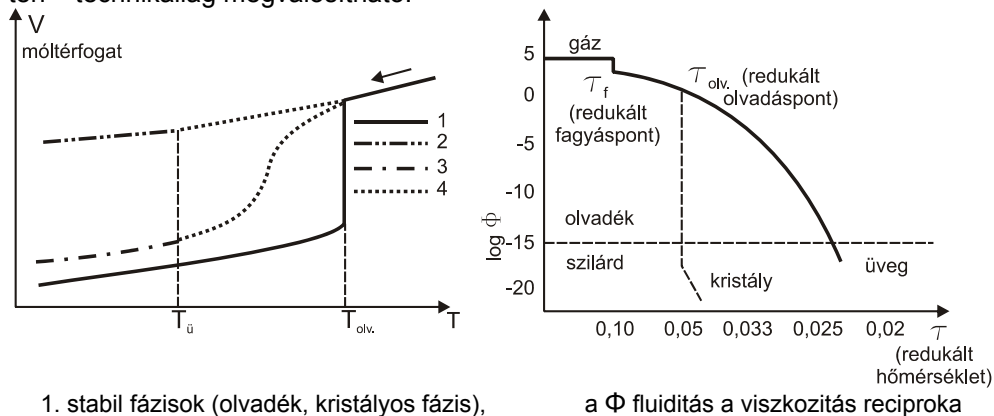
- a mechanikai keménységet és kopásállóságot kedvező lágymágneses tulajdonságokkal;
- a nagy magnetostrikciós állandót nagy rugalmassági modulussal;
- a kis mágnesezési veszteséget nagy mágneses permeabilitással;
- a nagy keménységet és szakítószilárdságot nagy mechanikai szívóssággal.

Pol Duwez és munkatársai mutatták meg, hogy egyes fémolvadékok extrém gyors hűtésével hosszú távú kristálytani rendet nélkülöző, üvegszerkezetű fémek (fémüvegek, üvegfémek) állíthatók elő. A kétféle megszilárdulás közötti termodinamikai különbséget a **3.51. ábra** mutatja. Az olvadékkristályos fázis közötti átmenet esetén a fajlagos térfogat, az entrópia ugrásszerűen változik meg (elsőrendű fázisátalakulás). Az üvegszerű megszilárdulásnál az olvadék jelentősen túlhűthető, az ún. üvegesedési hőmérsékleten (T_u) a viszkozitás, a fajhő és a hőtágulási együttható szignifikánsan változik.

Egyes anyagfajták, pl. szilikátüvegek, egyes műanyagok könnyen vihetők üvegállapotba. Elvileg akármilyen anyag előállítható amorf szerkezetben, ha a megszilárdulás eléggé gyors. Az olvadáspont (T_{olv}) és az üvegesedési hőmérséklet közötti tartományban kell a hűlési sebességnek nagynak lennie, gyorsabbnak, mint a kristálygócképződés, illetve -növekedés sebességének. Tiszta fémek esetén a kristályosodás csak igen gyors hűtéssel (például tiszta nikkel esetében 3×10^{10} K/s)

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

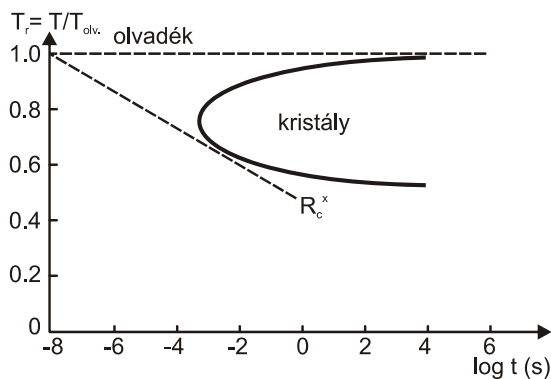
kerülhető el. Ez a kinetikai feltétel jól látható a **3.52. ábrán** feltüntetett TTT diagramon. Az R_c^x egyenes, az ún. kritikus hűtési sebességnek felel meg, ez az a sebesség, amely mellett nem lép fel kristályosodás. Számos ötvözetrendszernél a kritikus hűtési sebesség a 10^2 – 10^7 K/s tartományba esik, mely – vékony szalagok esetén – technikailag megvalósítható.



1. stabil fázisok (olvadék, kristályos fázis),
2. üveg, nem fémes,
3. fémüveg,
4. túlhűtött olvadék.

a Φ fluiditás a viszkozitás reciproka

3.51. ábra
Üvegszerű megszilárdulás jellemzői



3.52. ábra
Tiszta fém kristályosodási TTT diagramja

A **3.8. táblázat** néhány fémre, illetve ötvözetre megadja az üvegek képződés szempontjából fontos fizikai adatokat ($T_{olv.}$: liquidus hőmérséklet, T_0 : üvegesedési hőmérséklet, T_k : kristályosodási hőmérséklet, R_c^x : kritikus hűlési sebesség).

A táblázatból is látható, hogy az üvegek képződésre hajlamos ötvözetek főbb típusai a következők:

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

- Átmeneti fém vagy nemesfém + metalloid: pl. $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$, $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$, Au-Si . A vas tág határok között helyettesíthető 3d, 4d átmeneti fémekkel, a metalloid elem leggyakrabban B, Si, P, C, Ge. Gyakorlati szempontból ez az ötvözetcsalád a legfontosabb.
- A „korai” és „kései” átmeneti fémek ötvözetek: pl. Ni-Nb, Ta-Ir, (Co,Ni,Cu)-Zr, Ti-Ni, Y-Co.
- A II. csoport fémek + átmeneti fémek ötvözetek: pl. Be-Ti, Be-Zr.
- Aktinidák és átmeneti fémek ötvözetek: pl. U-V, U-Cr, U-Co.
- Lantanidák és átmeneti fémek ötvözetek: pl. Co-Sm, Ni-Gd, Au-La stb.

3.8. táblázat. Fémek üvegtévesztési jellemzői

anyag	T_{olv} [K]	$T_{\text{ü}}$ vagy T_{k} [K]	$T_{\text{olv}} - T_{\text{ü}}$ [K]	$T_{\text{ü}}/T_{\text{olv}}$	R_{c}^{x} [K/s]
Ni	1725	(425)	(1300)	0,25	$3,0 \times 10^{10}$
Fe_{91}B_9	1628	(600)	(1028)	0,37	$2,6 \times 10^7$
$\text{Fe}_{89}\text{B}_{11}$	1599	(640)	(959)	0,40	$3,0 \times 10^7$
Te	723	(290)	(433)	0,40	$3,2 \times 10^6$
$\text{Au}_{77,8}\text{Ge}_{13,8}\text{Si}_{8,4}$	629	293	336	0,47	$7,4 \times 10^5$
$\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$	1448	760	688	0,52	$1,0 \times 10^6$
$\text{Fe}_{41,5}\text{Ni}_{41,5}\text{B}_{17}$	1352	720	632	0,53	$3,5 \times 10^5$
$\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	1393	785	608	0,56	$3,5 \times 10^5$
Ge	1210	(750)	(460)	0,62	$5,0 \times 10^5$
$\text{Fe}_{79}\text{Si}_{10}\text{B}_{11}$	1419	818	601	0,58	$1,8 \times 10^5$
$\text{Ni}_{75}\text{Si}_8\text{B}_{17}$	1340	782	558	0,58	$1,1 \times 10^5$
$\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$	1258	736	522	0,59	$2,8 \times 10^4$
$\text{Pt}_{60}\text{Ni}_{15}\text{P}_{25}$	875	500	375	0,57	$4,0 \times 10^3$
$\text{Pd}_{82}\text{Si}_{18}$	1071	657	414	0,61	$1,8 \times 10^3$
$\text{Ni}_{62,4}\text{Nb}_{37,6}$	1442	945	497	0,66	$1,4 \times 10^3$
$\text{Pd}_{77,5}\text{Cu}_6\text{Si}_{16,5}$	1015	653	362	0,64	$3,2 \times 10^2$
$\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{20}$	916	602	314	0,66	$1,2 \times 10^2$

Az amorf anyagok hőkezelésekor az atomi szerkezet különféle változásai következnek be. Alacsony hőmérsékleten végzett hőkezelések során relaxációs folyamatok, az amorf állapoton belül végbemenő atomi átrendeződések játszódnak le. Az üvegesedési hőmérsékleten ($T_{\text{ü}}$) kis endoterm effektus jelzi a szerkezet finom megváltozását. A kristályosodási hőmérsékleten (T_{k} vagy T_{x}) jelentős exoterm folyamat figyelhető meg, mely a szerkezet, az elektromos ellenállás és egyéb fizi-

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

kai állandók nagymértékű változásával jár együtt. Az amorf anyagok termikus stabilitását általában a kristályosodási hőmérséklettel jellemzik. Értéke kismértékben függ a felfűtési sebességtől (tipikus érték: 20 K/min), a minta előéletétől és természetesen összetételétől. A különböző fizikai módszerek (transzmissziós elektron-mikroszkóp, koercitív erő, ellenállásváltozás mérése, röntgendiffrakció, Mössbauer-spektroszkópia stb.) különböző érzékenységgel tudják észlelni a kristályosodás kezdetét, ez további bizonytalanságot jelent a T_k megadásában.

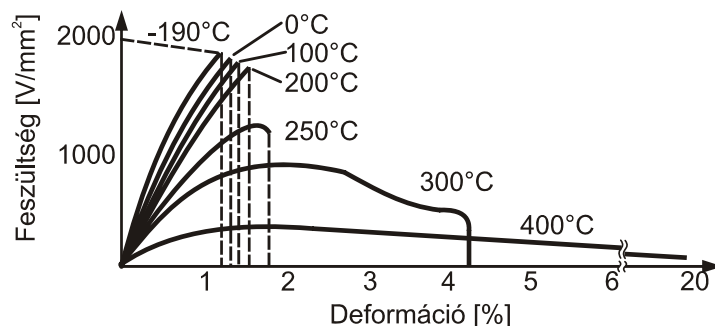
Az amorf anyagok kristályosodása a többi szilárd fázisú reakcióhoz hasonlóan több lépésben mehet végbe, számos ötvözetnél több kristályosodási hőmérséklet figyelhető meg.

Az amorf ötvözetek kristályosodási hőmérséklete nagyon különböző lehet, ahogy az a táblázatból is látható. A gyakorlatban használatos üvegfémek kristályosodása néhány száz °C-on kezdődik, a szakirodalom közel 1000 °C-os T_k -ról is beszámol.

A fémüvegek mechanikai tulajdonságainak kísérleti vizsgálatát nehezíti az a körülmény, hogy a fémolvadékok gyorshűtésével csak vékony, 30–100 µm-es szalag vagy huzal készíthető. Ez az alak számos mérésnél, pl. a mikrokeménység meghatározásánál nehézséget okoz. A fémüvegek szívóssága közel négy nagyságrenddel nagyobb, mint a szilikátüvegeké, és többszöröse a vasalapú polikristályos ötvözetekének. A nagyfokú szívósság a fémüveg képlékenységének tulajdonítható. A képlékenység akadályozza a repedések tovaterjedését is. A képlékeny alakváltozás során a fémüvegek esetében nem tapasztalható az alakítási keményedés.

A hőmérséklet növelésével egy ún. folyási hőmérséklet figyelhető meg, ez alatt a folyás inhomogén, felette pedig homogén és viszkózuszerű a minta teljes térfogatában. A **3.53. ábrán** a feszültség-deformációgörbe hőmérsékletfüggése látható $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$ üvegfémén, mely ötvözet 200 °C felett képlékenyen alakítható.

Ezt kihasználva a szalag alakú üvegfém nyomás alatt tömbösíthető az amorf szerkezet megtartásával, amennyiben a hőmérséklet a folyási és az üvegesedési hőmérséklet közé esik. A fémüvegekben a nagy szívósság nagy szakítószilárdsággal párosul. Egyes vasalapú fémüvegek szakítószilárdsága eléri a 3500 N/mm²-t, amely érték a legjobb acélokéhoz mérhető. A fémüvegek mechanikai tulajdonságaira vonatkozóan néhány jellemző adatot a **3.9. táblázat** foglal össze.



3.53. ábra

Feszültség-deformációgörbe hőmérsékletfüggése Pd₈₀Si₂₀ üvegfémre

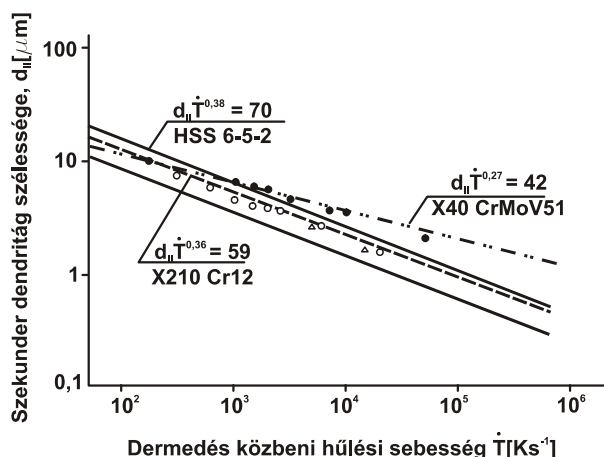
3.9. táblázat. Fémüvegek mechanikai tulajdonságai

Összetétel	HV keménység	R _m (MPa) szakítószilárdság	E (GPa) rugalmassági modulus
Pd ₇₇ Cu ₆ Si ₁₇	455	1570	93
Pd ₆₄ Ni ₁₆ P ₂₀	452	1600	94
Pd ₁₆ Ni ₆₄ P ₂₀	541	1800	106
Pt ₇₅ P ₂₅	344	–	93
Co ₇₅ B ₂₅	1155	–	180
Fe ₇₅ B ₂₅	1314	–	179
Nb ₅₀ Ni ₅₀	893	–	132
Zr ₅₀ Cu ₅₀	580	–	85
Ti ₅₀ Cu ₅₀	610	–	100

A felületi rétegek egyik legfontosabb jellemzője mikrokeménységük. Általában elmondható, hogy az amorf fémek mikrokeménysége egyes esetekben magas: a Vickers-keménység 300–1300 között változik, az üvegösszetételtől függően. A fém-metalloid típusú amorf ötvözetekben a metalloid koncentráció növekedésével a keménység nő, a kovalens jelleg erősödik. Adott fém (pl. vas) esetén a keménység a P, Si, C, B sorrendben növekszik. Ez azt mutatja, hogy a keménység kialakításában nemcsak a metalloidatom mérete, hanem a töltésátadás is szerepet játszik. Az amorf ötvözetek sorában a legnagyobb mikrokeménységet Mo₄₀Fe₄₀B₂₀ összetételnél találták: HV = 1950 (100 g-os terhelés esetén). Ezen ötvözetek kristályosodási hőmérséklete 800 °C felett van.

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A korróziós tulajdonságok értelmezése szempontjából nincs alapvető különbség a fémüvegek és a kristályos fémötvözetek között. Mindkét esetben az elektródpotenciál értéke határozza meg az elektronleadási hajlandóságot és ezzel a korróziós feszültség értékét. De kevésbé „nemes” fémötvözet is lehet jó korrózióálló, amennyiben összefüggő, szilárd védőréteg alakul ki a felszínén. Akár a kristályos fémötvözetek esetén, a fémüvegek számára is a króm hozzáadása biztosítja a homogén, összefüggő, hidratált króm-oxid–hidroxid $\text{CrO}_x(\text{OH})_{3x}\text{H}_2\text{O}$ védőréteg kialakulását. A fémüvegek homogén, egyfázisú szerkezete (aktív göcök hiánya) növeli, de önmagában nem biztosítja a korrózióállóságot. A széles körben használt Fe-Si-B, Co-Fe-Si-B, Ni-Si-B, Fe-Ni-B fémüvegeknek csekély a korrózióállósága. A Cr hatékonysága függ az ötvözetben lévő metalloidektől is, pl. $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{10}\text{B}_{13}\text{X}_7$ fémüveg esetén X = Si, B, C, P sorrendben javul a korróziós ellenállás. A metalloid fajtájától függ a védőréteg kialakulásának sebessége. Leginkább a foszfor segíti a króm oldódását, így a krómmal és foszforral történő ötvöztetés biztosítja mind a fém–metalloid, mind a fém–fém típusú fémüvegek korrózióállóságát.



3.54. ábra

Szekunder dendritágak szélessége és a dermedés közbeni hűlési sebesség kapcsolata

A dermedés közbeni hűlési sebesség növelése a túlhűtés következtében hat a kritikus – azaz stabilissá váló – szilárd csírák méretére. Minél nagyobb a hűlési sebesség, illetve a túlhűtés, annál kisebb a dermedő szerkezet jellemző mérete (szemcseméret, dendritméret). A bonyolult, többfázisú anyagi rendszerek – tipikusan a szerszámacélok – gyors dermedésénél a dermedés közbeni hűlési sebességet a szekunder dendritágak szélességi méreteiből is szokás meghatározni.

A szekunder dendritágak szélessége (d_{II}) és a dermedés közbeni hűlés sebessége ($\dot{T}$) közötti kapcsolatot a mindenkor anyagi tulajdonságai határozzák meg a $d_{II} \cdot \dot{T}^a = b$ összefüggés szerint, ahol a és b az anyagtól függő állandók. A

3.54. ábrán egy gyorsacélra, egy meleg-, és egy hidegalakító szerszámacélra láthatók számszerűsíthető értékek. Ezzel visszavezethető a bonyolult dermedési folyamatok eredményének jellemzése egy egyszerű metallográfiai vizsgálatra és a dermedés közbeni hűlési sebesség mérésére.

A dermedés közbeni hűlési sebesség növelése számos következménnyel jár a fémes anyagok – így az acélok – szerkezetét és tulajdonságait, illetően:

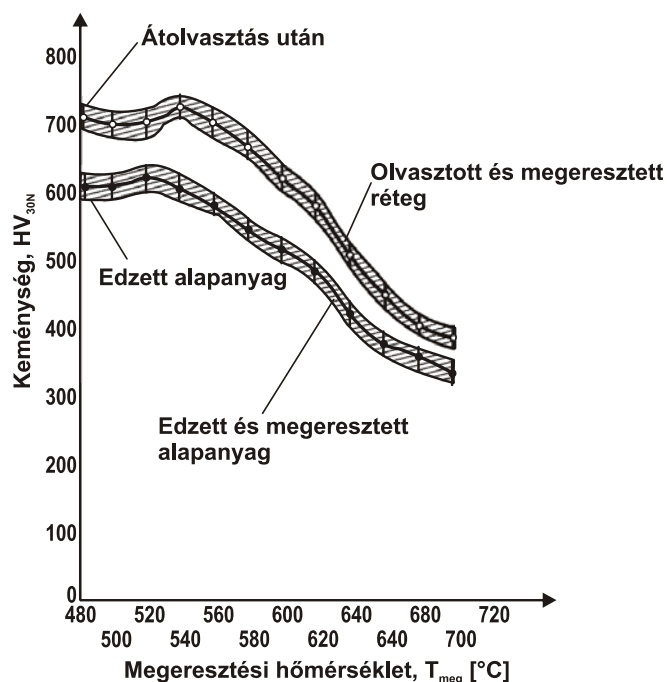
- megnő az oldott ötvözőtartalom szilárd állapotban (a hőmérséklet növelésével jelentősen megnő a diffúzió sebessége, az átalakulások nem egyensúlyi hőmérsékleteken játszódhatnak le);
- csökken a szemcseméret, finomdendrites mikroszerkezet alakul ki;
- megváltozik, finomodik a kiválások mérete, eloszlása, minősége (dúsulás nélküli kristályosodás, tökéletes homogenizálódás megy végbe);
- metastabil fázisok jönnek létre, az egyensúlyihoz képest eltérő fázisok alakulnak ki, egyes átalakulások elmaradhatnak;
- nagy pontthiba-koncentráció alakul ki, és diszlokációsűrűség-növekedés lép fel a dendritekben (a hőmérséklet- és a koncentrációkülönbség növekedés, illetve a dendritághossz csökkenésének hatására);
- rendkívül nagy dermedési sebesség esetén amorfréteg keletkezhet, ha a túlhűtés meghaladja az olvadék viszkozitásától függő kritikus értéket;
- öntött anyagokban (öntvényekben) a pórusok, zárványok és hidegráfolyások eliminálhatók, az érdességprofil módosítható (simítható: pl. $R_z = 25\text{--}75\mu\text{m}$ helyett $9\text{--}15\mu\text{m}$), konvex (élek) és konkáv (sarkok) geometriák görbületváltozással átolvaszthatók vonalfókuszos lézerkezeléssel);

Vasalapú ötvözeteknél az előzőeken túlmenően:

- a karbidok oldódása az erősen túlhevített olvadékokban az ömledék rövid létezési idejének ellenére végbemegy;
- a karbidok oldódását az erős karbidképző ötvözők befolyásolják, így ezek nagyobb oldódási szintje mellett a karbon oldódási szintje is nagyobb (a durva karbidok eltűnnek);
- az ötvöztelen acéloktól és az öntöttvasaktól eltérően az ötvözött (szerszámacélokban a megnövekedett oldott karbontartalom ellenére a martenzit rácstorzultságában anomália van, a c/a értéke csökken, ami a visszamaradó ausztenit és a δ -ferrit mennyisége növekedésének, továbbá a karbonatomok energetikailag kedvezőbb, de nem egyenletes eloszlásának tulajdonítható;
- a nagyobb oldott ötvözőtartalom miatt csökken az M_s hőmérséklet;
- a finom szemcseméret, a kis szemcsékben létrejövő igen finom tűs martenzit és kialakuló diszperz mikrokiválások a szilárdság, illetve a keménység jelentős növekedését idézik elő (egyes karbidtípusok nem jelennek meg);
- a finom szemcseméret miatt nem tudnak kialakulni nagyméretű inkoherens kiválások, amelyek bizonyos esetekben a szívósság növekedését is eredményezhetik;
- erőteljesebb kiválások keményedés, ezáltal nagyobb melegsilárdság, illetve melegkeménység érhető el megeresztéskor (**3.55. ábra**);

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

- az erőteljesebb interstíciós oldódás, a nagyobb diszlokációsűrűség, a martenzites átalakulás és a kiválásos keményedés egyfajta „eredőjeként” ún. szuperkeménység érhető el;
- öntöttvas termékek felületi rétegében stabilis grafit helyett metastabilis vas-karbid precipitátumok hozhatók létre kopásállóbb ledeburitba foglalva (helyettesíthető az AWI felolvasztó hegesztés).



3.55. ábra

Melegalakító szerszámacél növelt megeresztésállósága

A felületi átolvasztással létrehozott finom dendrites szövetek dendritjeiben mért karbon- és ötvözőtartalom nagyobb, mint a szokásos hőkezeléseknél, ami az eutektikus karbidmennyiség csökkenésének a következménye. A nagyobb oldott karbon- és ötvözőtartalom lehetőséget ad a nagyobb mennyiségű finom, diszperz karbidkiválásra a megeresztés során.

Azoknál a szerszámacéloknál, amelyeknél a gyors dermedést és a lehűtést követően csak martenzites átalakulás játszódik le (pl. X 40 CrMoV 5 1 1), az olvasztott és megeresztett réteg keménysége és megeresztésállósága – az előzőek következtében – nagyobb, mint a szokásos hőkezelések esetén. Melegalakító szerszámok működő részeinek felületi átolvasztásával csökken a képlékeny alakváltozás miatti méretnövekedés, nő a tartósság

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

Azoknál a szerszámacéloknál, amelyeknél a gyors dermedést és lehűtést követően a martenzit mellett ausztenit, ferrit és jelentős mennyiségű eutektikus karbid is jelen van (pl. X 210 Cr 12), újraedzéssel elő lehet állítani olyan réteget, amelynek keménysége és megeresztésállósága – a nagyobb karbon- és ötvözőtartalom miatt – nagyobb, mint a szokásos hőkezelések után. A felületi átolvasztással létrehozott rétegben a ledeburitos acélok hajlítózsilárdságát elsősorban az eutektikus karbidok finomsága befolyásolja, a megeresztés hatása nem számottevő. Az átolvasztott réteg hajlítózsilárdsága eléri a jól átkovácsolt anyagra jellemző értékeket.

A felületi átolvasztásnak főképp a forgácsmentes alakítás szerszámainak gyártásában van nagy perspektívája. Az alakítószerszámok közül a melegalakító szerszámoknál nemcsak a keménység (kopásállóság) fontos, hanem a megeresztésállóság, a felületi rétegek termikus stabilitása is. Természetesen ez a nagy sebességű forgácsolás szerszámaival szemben is alapkövetelmény. A felületkezelt alkatrész utólagos megeresztésekor vagy az üzemszerű alkalmazás közben a szövetben különböző változások játszód(hat)nak le, mint például a maradék ausztenit átalakulása vagy a szekunder karbidok kiválása.

Megjegyzendő, hogy a megeresztésállóság lényegesen nagyobb mérvű javítása felületötvöztéstől, azaz átolvasztás és ötvözőbevitel együttes alkalmazásától remélhető. A probléma összetettségét tovább fokozza, hogy a pontról pontra változó szerszámtömb élettartama akkor a legnagyobb, ha egyes felületrészei más-más ötvözöttséggel készülnek. Ugyanis a melegalakító szerszámok igénybevételeből adódóan háromféle jellegzetes tönkremenetel figyelhető meg a szerszám különböző részein: anyagáramlásból származó melegkopás a felületeken, hőfáradás a legnagyobb hőingadozás helyén (pl. a vállaknál, peremeknél) és mechanikai fáradás a sarkoknál.

Alakítószerszámok élettartam-kritériumaként pl. a gyártott (megmunkált) darabszám függvényében értelmezett:

- kibővülést, méretváltozást, kopást szokás megadni melegalakító szerszámok esetében;
- munkadarab-sorjamagasságot, felületi érdességet hidegkivágó szerszámok esetében.

Mindkét esetben a kopásállóság, azaz a felületi keménység növelésével élettartam-javulást lehet remélni.

A felületi átolvasztás során – a szerszámok működő felületein – az acélátolvasztás (finomítás) és a porkohászati porgyártás gyorsdermesztési folyamatához hasonlóan szándékozunk finomítani az eutektikus karbideloszlást. Mivel teljes keresztmetszetben ez a hatás nem lenne kihasználva, ott általában nem is gazdaságos elvégezni.

Felületi átolvasztásnál ugyanazok az elektronsugaras és lézeres berendezések használhatók, amelyek hegesztés céljára készültek, illetve terjedtek el. Azonban a sugár mozgatását, pozicionálását és a kezelendő munkadarab manipulálását (forgatás, mozgatás, helyzetbeállítás) elektronikus, illetve számítógépes vezérléssel célszerű megoldani az elfogadható termelékenység és reprodukálhatóság érdekében.

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

A korábban említett anyagminőségi, energiabeviteli és sugárminőségi paraméterek közül a felületolvasztási hőciklust és annak eredményét lényegesen meghatározza:

- a munkadarab anyagának hővezetési tényezője (λ),
- a munkadarab anyagának több hőfizikai jellemzőjét (a hővezetési tényezőt, a sűrűséget és az állandó nyomáson értelmezett fajhőt) „összefogó” hőmérsékletvezetési tényező (a), amely a vizsgált felületkezelések tranziens hőfolyamatai sebességének alapvető meghatározója;
- a munkadarab anyagának olvadási hőmérséklete (T_{olv});
- a sugárteljesítmény (P);
- a fókuszolt sugár által érintett zóna – felületi fókuszfolt – jellemző mérete (d_f);
- a munkadarab és a sugár egymáshoz viszonyított relatív sebessége (v_r).

A technológiatervezés alapfeladata a teljesítmény, illetve a teljesítménysűrűség (teljesítmény – fókuszméret) és a relatív sebesség értékének együttes helyes megválasztása, továbbá a sáveltolás mértékének meghatározása. Természetesen ebbe beleértendő a felület megfelelő előkészítése, az abszorpciós tényező „beállítása”. Ehhez kiindulási információként szükséges az alábbiak ismerete: a munkadarab anyagminősége, különös tekintettel a hőfizikai jellemzőkre; a munkadarab jellemző méretei és alakú sajátosságai; a létrehozandó felületi réteggel szemben támasztott követelmények: réteggeometria, keménység.

A legnagyobb hatáserősséggel bíró teljesítmény megválasztása függ:

- a munkadarab és a kialakítandó réteg geometriájától; mivel a munkadarabok geometriája általában nem egyszerű, az alak és a méretek a kialakuló termikus folyamatot és így a teljesítményigényt jelentős mértékben befolyásolhatják;
- az anyag hőfizikai tulajdonságaitól: hővezetési tényezőtől, fajhőtől, sűrűségtől, olvadási hőmérséklettől, olvadáshőtől; a különböző anyagból készült, de hasonló geometriájú darabok felületolvasztási teljesítményigényének aránya az olvadási hőmérsékletek és hővezetési tényezők szorzatának arányával kb. megegyezik;
- bizonyos mértékben, illetve tartományban a relatív sebességtől, amelynek olyan értékét kell beállítani, hogy megfelelő, egyenletes rétegszélesség és -mélység legyen elérhető; a lézeres felületkezelés sebessége állandó fókuszátmérő mellett a növekvő lézerteljesítménnyel arányosan növelhető, mivel az egységnyi idő alatt bevitt energia nagyobb, és így állandó rétegsávszélesség esetén az időegység alatt felolvasztott anyagmennyiség is megnő; ugyanezen okból a beolvadási mélység növeléséhez a relatív sebesség csökkentendő;
- a felületi réteg mentén kialakuló hőkezelt (hőhatott) zóna nagyságának megengedhető mértékétől, mely befolyásolható az energiasűrűség változtatásával vagy impulzus-üzem módú kezeléssel.

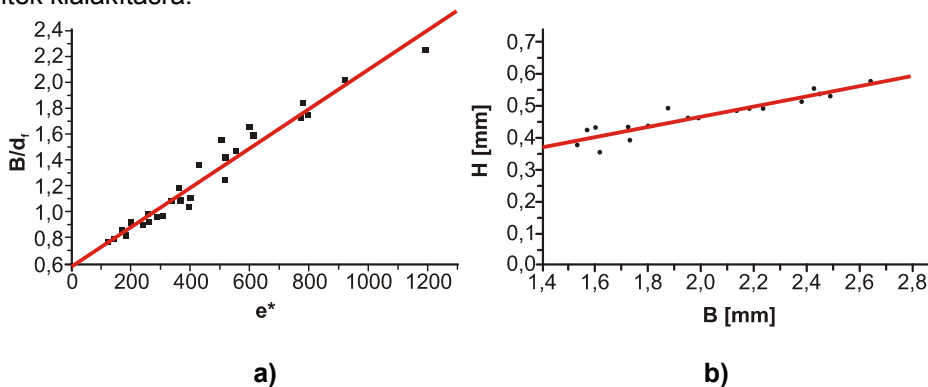
Ahhoz, hogy a szükséges beolvasztó hatás ki tudjon alakulni, az energiasűrűségnek el kell érni a kritikus feletti értékeket, amit a lézerteljesítmény és a relatív sebesség helyes megválasztása mellett a fókuszméret is befolyásol. A fókuszálha-

tóságot a hullámhosszon, az optika fókusztávolságán, illetve az optikára érkező sugárnyaláb átmérőjén kívül befolyásolja a módusszerkezet, a divergencia mértéke és az aberráció (leképezési hiba) nagysága is. A fókuszfolt jellemző mérete – aminek a definiálása eltérő lehet tekintettel az energiaeloszlás nem egyenletes voltára – általában a tizedmillimétertől néhány milliméterig terjedő nagyságrendben mozog. Ez a fókuszméret vagy a felületen jelenik meg, vagy ahhoz képest negatív, illetve pozitív irányban „eltolható”, azaz alá- vagy föléfókuszálás (defókusz) valósítható meg.

A lézer kimenete lehet folytonos vagy impulzusos. Ez utóbbinál a névleges teljesítmény gyakran wattokban fejezhető ki, de mivel az impulzus időtartama rendkívül rövid is lehet (Q-kapcsolás), a kimenő teljesítmény a megawatt nagyságrendet éri el (igen kicsi összenergia mellett). A gázlázerek kimenő teljesítménye alapvetően a gerjesztett térfogat függvénye. Folyamatos gázáramlás hatékony hűtéssel nagy teljesítmények elérését teszi lehetővé.

Olyan bonyolult folyamatokat, mint amilyenek a lézeres felületi átolvasztást – különösen ötvözt (szerszám)acélok esetében – kísérik, pusztán csak elméleti úton nem lehet „megközelíteni”, mindenképpen szükség van célszerűen kivitelezett kísérletekre, azokból származtatott empirikus összefüggésekre.

A kiválasztott modellanyag az X 32 CrMoV 3 3 típusú melegalakító szerszám-acél. A melegalakított, 46–48 HRC keménységűre nemesített (edzés: 1040 °C/olaj; megeresztés: 550 °C) darabokon az olvasztott rétegek lézeres berendezésen kerültek kialakításra.



3.56. ábra

Lézeres felületi átolvasztás sávgeometriai adatai

Szerszám-acél lézeres felületi átolvasztása kapcsán az olvasztási sáv szélesség (B) – a felületi fókuszfolt mérete (d_f) arányszámának (B/d_f) 1.1–1.6 (1.3. alfejezet) technológiai paraméterformuláktól való függését vizsgálva, az elvégzett lineáris regressziós analízisek eredményei szerint a súlyozott energiasűrűség adott legjobb ($R = 0,97776$) korrelációt (**3.56/a. ábra**). Ennek megfelelően az alábbi számítási képlet adódott:

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések

$$\frac{B}{d_f} = 0,581 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot e^* \Rightarrow B = d_f (0,581 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot e^*) . \quad (3.5)$$

Az előzőek szerint kalkulálható olvadási rétegszélesség (B) és a beolvadási mélység (H) viszonyát is elemezve, a kapott $R = 0,9337$ korrelációjú egyenes (3.56/b. ábra) egyenletével H is számítható:

$$H = 0,146 + 0,16 \cdot B \quad [mm] . \quad (3.6)$$

A beolvadási profilgörbék 5 jellegzetes pontjukra illesztett $y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2$ alakú polinommal közelíthetők. A minden esetben $R > 0,98$ korrelációs együtthatóval illeszkedő görbe szakaszok és a felület síkja (vetületi egyenese) közötti területet numerikusan integrálással meghatározva, az olvadási keresztmetszetre (A_{olv}) felírható, hogy:

$$A_{olv} \approx 0,72 \cdot H \cdot B \quad [mm^2] . \quad (3.7)$$

Ennek és a relatív sebességnek az ismeretében számítható az időegység alatt felolvasztott anyagtérfogat:

$$V_{olv} = A_{olv} \cdot v_r \approx 0,72 \cdot H \cdot B \cdot v_r \quad \left[\frac{mm^3}{s} \right] . \quad (3.8)$$

Ebből pedig – az L olvadáshő pontos értékének ismeretében – kalkulálható az átolvasztás teljesítményszükséglete:

$$P_{olv} = V_{olv} \cdot L \approx 0,72 \cdot H \cdot B \cdot v_r \cdot L \quad [W] . \quad (3.9)$$

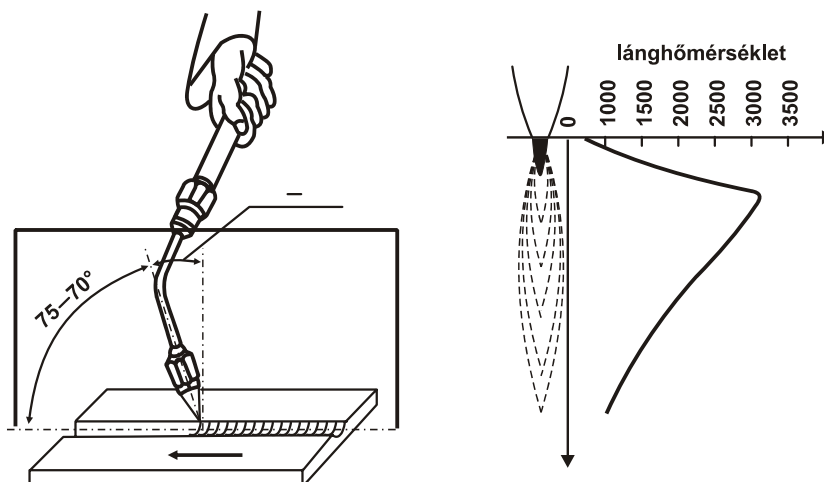
A technológiatervezés alapfeladata a teljesítménysűrűség (teljesítmény és fókusz méret) és a relatív sebesség értékének helyes megválasztása. Természetesen ebbe beleértendő a felület megfelelő előkészítése, illetve az abszorpció tényező „beállítása” is (pl. igen vékony, de egyenletes grafitbevonattal). Kiinduló információként szükséges az alábbiak ismerete:

- a munkadarab anyagminősége, különös tekintettel a hőfizikai jellemzőkre (hővezetési tényező, fajhő, sűrűség, hőmérséklet-vezetési tényező, olvadási hőmérséklet, olvadáshő);
- a munkadarab jellemző méretei és alaki sajátosságai, illetve előmelegítési hőmérséklete;
- a megmunkálás eredményével szemben támasztott követelmények: réteggeometria, rétegekeménység és annak eloszlása;
- az alkalmazandó védőgáz összetétele, illetve áramlási sebessége;

- a lézerberendezés „gépállandói”: módusszerkezet (pl. TEM₀₀), működési hullámhossz (a gyakorlatban elterjedt CO₂-lézereknél a 10,6 μ m az infravörös, Nd:YAG-, illetve Nd:üveg-lézereknél az 1,06 μ m a közeli infravörös tartományba esik, s ez utóbbit a fémek jobban abszorbeálják), polarizáció (lineáris vagy cirkuláris).

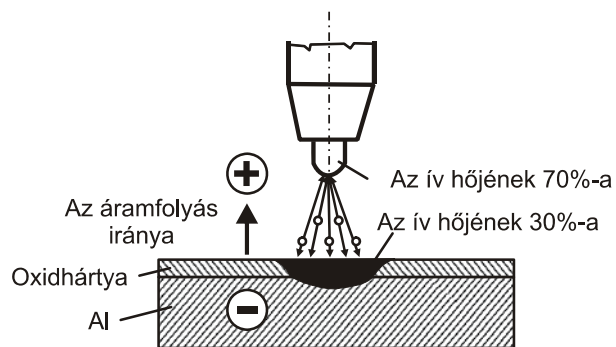
3.4. Felolvasztó hegesztés

A felolvasztó hegesztés is tulajdonképpen felületi átolvasztás, de az elérhető energiasűrűség, dermedési sebesség, illetve szerkezetmódosulás „szerényebb”. Olyan ömlesztő hegesztési eljárások jöhetnek itt szóba, amelyek hozaganyag-adagolás nélkül is „működnek”. Ezért gázhegesztéssel és volfrámelektrodás semleges védőgázos ívhegesztéssel (**3.57. ábra**) lehet felolvasztó kezeléseket végezni, pl. öntöttvas termékek felületi rétegében grafit helyett metastabil, kopásállóbb vaskarbid (ledeburit) létrehozásával. Tulajdonképpen egyfajta kéregöntvényt hoznak létre, melynek felületi rétege karbidosan, belső magja grafitosan kristályosodott. Így kombinálhatók a kopásálló fehér (karbidos) öntöttvas és a kevésbé rideg szürke (grafitos) öntöttvas előnyei.

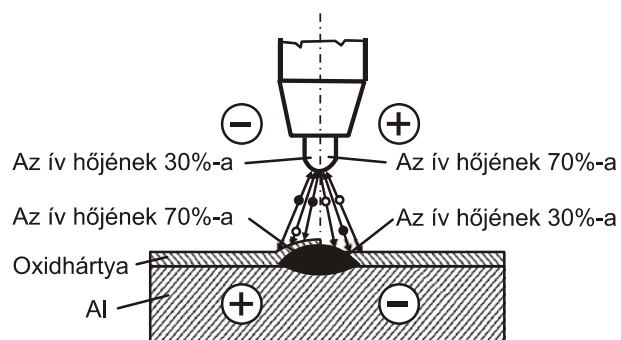


3.57. ábra
Felolvasztó hegesztés gázhegesztéssel

3. Anyagfelvitel nélküli felületkezelések



fordított polaritás esetén



Váltakozó áram esetén

3.58. ábra

Alumínium felolvasztó hegesztése volfrámelektrodás semleges védőgázos ívhegesztéssel

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

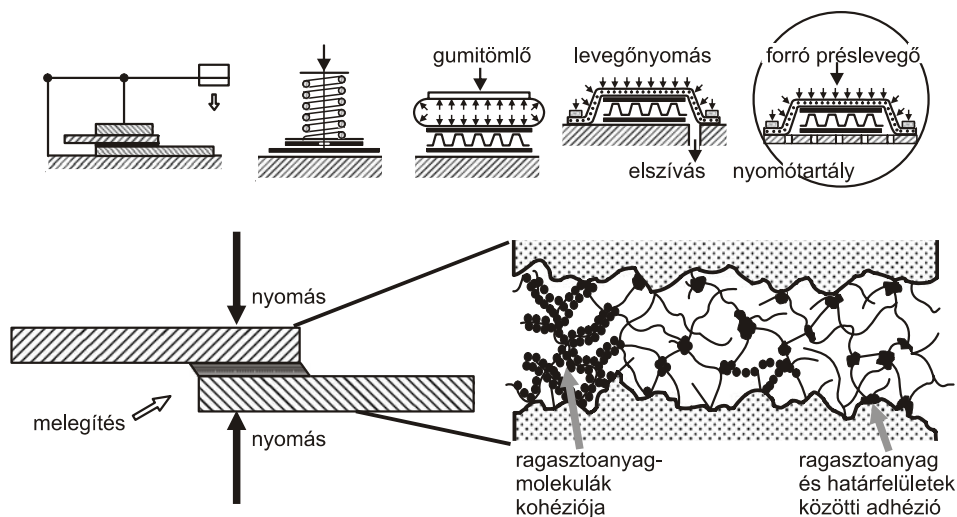
4.1. Védőbevonatolás

Védőbevonatolás alkalmazása során különféle fémes vagy nemfémes, elsősorban korrózió és kopás elleni védőbevonatok hozhatók létre a védendő tárgy felületén.

4.1.1. Ráragasztás

Ráragasztáskor megfelelő arányban kikevert, egyenletesen vékony rétegben felhordott, majd előszáritás és térhálósítás útján kikeményedő ragasztóréteg köti a por, lemez vagy fólia alakú bevonatanyagot a – kikeményítéshez szükséges hőkezelés során nem kilágyuló fémötvezetből készült – tárgy felületéhez.

A ragasztott kötés tulajdonságait a ragasztandó anyagpár felületállapota, illesztésük módja és mérete, a ragasztó nedvesítőképessége, illetve felületi feszültsége, a megszilárdult ragasztó egyedi tulajdonságai (pl. szilárdság, hőállóság), a kötési reakciót elősegítő esetleges hőkezelés határozza meg (**4.1. ábra**). A ragasztók zöme szerves vegyület, mely fizikai úton (pl. oldószervesztéssel) vagy kémiai reakció által (pl. polimerizációval) szilárdul meg. A kötés adhéziósan vagy esetenként a ragasztandó felület részbeni oldásával jön létre.



4.1. ábra
Ráragasztáskor létrejövő kötés jellemzői

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

Megfelelő mértékű átlapolással és szorítónyomással kialakított kötésben a hidegragasztók szobahőmérsékleten is kikeményednek, de 100 °C-ig terjed(het)ő hőmérséklet-intervallumban kötésük meggyorsítható. A melegítés nem csupán a kötési időt rövidíti, hanem a létrejövő kötés szilárdsága és megbízhatósága is nagyobb a szobahőmérsékleten végbemenő keményedéshez képest. Az illesztés és a rögzítés után kezdődő kikeményedési idő 20 °C-os hőmérsékleten max. 24 óra. A végleges szilárdságot többnyire még megnöveli az utókeményedés. A hidegragasztók rendszerint folyékony halmazállapotúak, amelyeket 0,05–0,2 mm egyenletes rétegvastagságban kell a felületre juttatni.

A hideg- és a melegragasztók kötési módjuk szerint lehetnek:

- kémiai reakció nélkül (fizikai úton) kötő ragasztók:
 - oldó- vagy diszpergálószer elpárolgásával kikeményedő folyékony ragasztók;
 - vízfelvétel hatására kikeményedő gittek;
 - megolvasztandó, majd újradermedő szilárd ragasztók;
- kémiai reakcióval kötő ragasztók:
 - polimerizációs ragasztók: monomerek folyamatos „összeadódásával”, katalizátor jelenlétében kötnek, számottevő térfogatcsökkenés nélkül;
 - polikondenzációs ragasztók: kötési reakciójukban melléktermék keletkezik, s mivel a ragasztó kötés közben jelentősen zsugorodik, az adhéziós erők nagyon lecsökken(het)nek, ezért különösen fontos a megfelelő szorító nyomás.

A meleg- és részben a hidegragasztók fizikai tulajdonságaik alapján lehetnek:

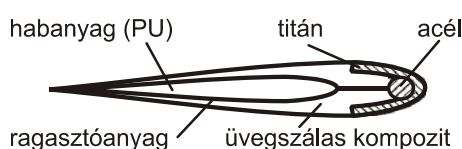
- folyékony ragasztók, amelyek polimerizálандó vagy polikondenzálандó monomerek, oldószeres oldatok és diszperziók (finom eloszlású ragasztóanyag-víz szuszpenziók);
- szilárd (rúd, film, por) ragasztók, amelyek szobahőmérsékleten amorf szerkezetű túlhűtött olvadékoknak tekinthetők, és általában megolvasztva, majd újradermesztve létesítenek kötést az összeerősített anyagok között;
- ragasztópaszták, amelyek sűrű (nagy viszkozitású), gittszerű anyagok, nagymennyiségű és speciális töltőanyag-tartalommal.

Oldószeres ragasztók használatakor nagyon fontos az ún. nyitott (előszáritási) időtartam gyártó által ajánlott értékének betartása, amit az oldószer elillanásának lehetővé tétele végett pormentes körülmények között, összeillesztés előtt kell biztosítani. A ragasztóréteg kikeményedése nagyjából ezen időtartam alatt következik be, ami néhány perctől több óráig terjedhet. A száradási idő jelentős csökkentése a ragasztóréteg illesztés utáni zsugorodását növelheti, rontva a kötés szilárdságát. A diszperziós ragasztók felhordásuk után, illetve a bevont felületek összeillesztése előtt a diszpergálószer elpárolgása (száradás) folytán keményednek.

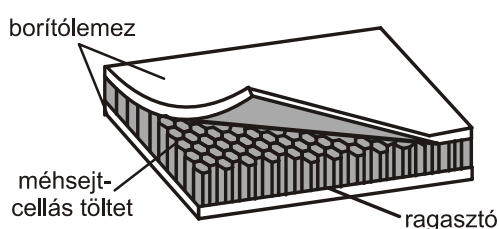
Az olvadékragasztók lehűlésük folyamán keményednek, ezért célszerű az összeillesztést követően még néhány percig az olvadási hőmérsékleten tartani, hogy nedvesítő hatásuk fokozódjék. A szobahőmérsékleten kötő reaktív ragasztók térhálósodása a ragasztóanyag kémiai felépítésétől függően néhány perctől egy

napig tarthat. Térhálósodásuk előrehaladását a viszkozitásuk és a keménységük növekedése jelzi. A melegen kötő reaktív ragasztók adott hőmérsékleten, meghatározott kezelési időtartammal és nyomáson térhálósodnak. Erre a célra ellenállásfűtésű kemencék, nagyfrekvenciás indukciós hevítőberendezések, infrasugaras lámpák stb. alkalmazhatók.

Lehetőség van önmagában kopás-, korrózió- vagy vegyszerálló, majd térhálósodás után megmunkálható fémgittek, paszták önálló alkalmazására (akár kopott alkatrészek felújításakor) vagy kompozitok létrehozására (**4.2. ábra**)



helikopter-rotorlapát



szendvicsszerkezet

4.2. ábra

Ragasztott kompozitok

A ragasztás alkalmazási előnyei:

- különböző anyagok között a potenciálkülönbségből adód(hat)ó kontaktkorróziót hatástalanítja;
- a kötés kikeményítéséhez elvégzendő (hő)kezelés nem okoz kilágyulást;
- a terhelés egyenletesen oszlik el a kötésben, nincsenek feszültséggyűjtő helyek;
- ragasztás után a felület közvetlenül festhető, polírozható, a kifolyt ragasztófelület leggyakrabban könnyen eltávolítható és így a kötés „varratdudor”-mentes, sima, aerodinamikailag kedvező felületminőségű;
- a ragasztóréteg sok vegyszernek ellenáll, nem korrodál, rezgéscsillapító, könnyű;
- egyes ragasztófajták, illetve fémgittek repedések, törések, felületi porózusság és egyéb tömítetlenségek javítására is alkalmasak;
- különböző anyagkombinációk is egyesíthetők;
- tetszőleges nagyságú felületek köthetők össze;

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

- általában nem indokol költséges beruházást, nem igényel szakképzett munkaerőt.

A ragasztás felmerülő hátrányai:

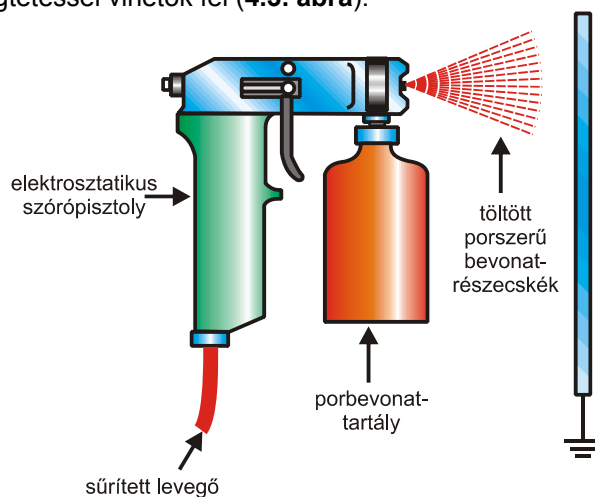
- gondos felületelőkészítést igényel;
- gyakran rögzítő-, szorító- és hőkezelő-berendezésre van szükség;
- csak a kikeményedési idő (néhány perc–24 óra) eltelte után terhelhető a kötés, az átfutási idő így viszonylag nagy;
- a kötés csak max. 70–150 °C-ig tartja meg a szilárdságát;
- a húzó- és a lefejtő igénybevétellel szemben kicsi a ragasztóréteg ellenállása.

4.1.2. Műanyaggal való bevonatolás

Minimum 50 °C-ig szemcsés szerkezetű, 40–400 µm részecskeméretű, hőre lágyuló műanyagporokkal kialakítható bevonatok jellemzői:

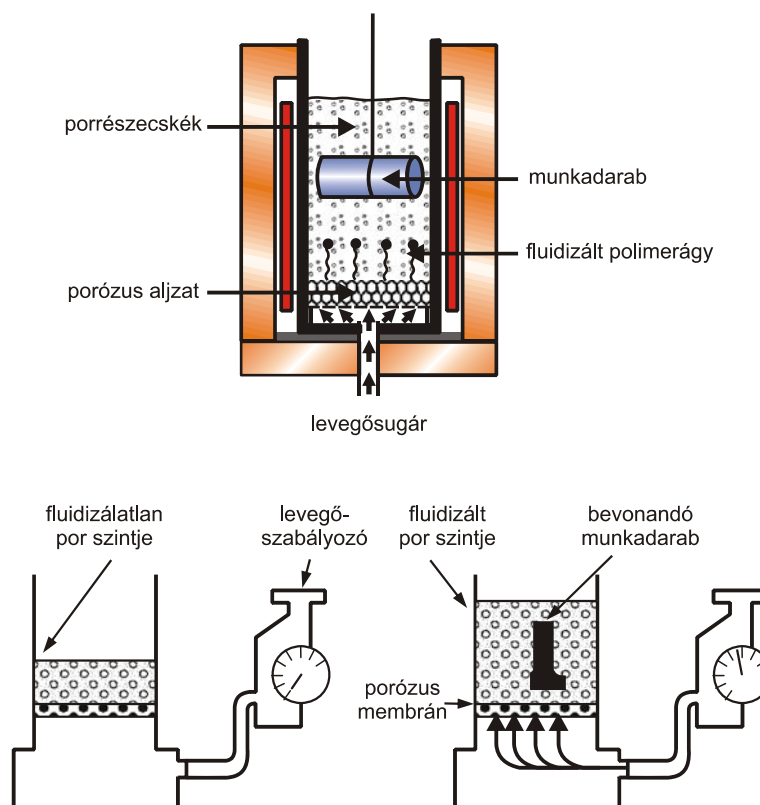
- igen jó korróziós védőhatás időjárás és vegyszerhatás ellen;
- festékénél jobb vízmentesség és fizikai-kémiai stabilitás;
- egyetlen művelettel 100–1000 µm vastag, elfolyásmentes réteg kialakíthatósága;
- tűzveszélyes, egészségre ártalmas oldószerektől való mentesség;
- viszonylag kopásálló, elektromosan szigetelő bevonat megvalósíthatósága.

A kisebb szemcseméretű porok elektrosztatikus szórással, a nagyobbak fluidágyas lebegtetéssel vihetők fel (4.3. ábra).



Elektrosztatikus szórás

4.3. ábra (I.)
Műanyagbevonatok felvitele



Fluidágyas bevonatolás

4.3. ábra (II.)
Műanyagbevonatok felvitele

4.1.3. Festés, lakkozás

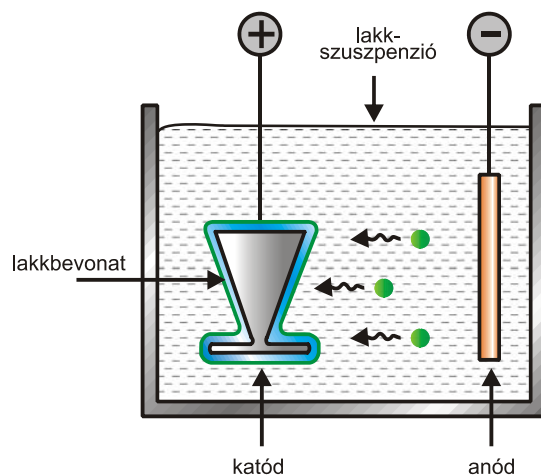
Festés, lakkozás során természetes és/vagy műgyanta kötőanyagú, szobahőmérsékleten száradó vagy növelt hőmérsékleten kikeményedő szerves bevonat(rendszer) alakítható ki szabadtéri vagy erősen igénybe vett beltéri objektumok felületén.

A kellő védelmet biztosító bevonatrendszer kialakításának műveleti sorrendje a következő:

- felületelőkészítés: zsírtalanítás, oxidmentesítés, esztétikailag vagy műszakilag zavaró egyenetlenségek eltávolítása;

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

- egyes szabadtéri vagy erősen igénybe vett zárttéri acélszerkezetek esetében fémbevonat létrehozása;
- fémek felületén összefüggő, tapadásjavító, termodinamikailag stabilabb állapotot jelentő védő oxid-, kromát- vagy foszfátréteg kialakítása;
- alapozás, vagyis a fémfelület és a festékbevonat-rendszer többi rétege közötti megbízható kötés biztosítása, összhangban az alapanyag, a közbenső és a bevonóréteg minőségével, továbbá a klímaállósági követelményekkel;
- felületi hibák javítása tapaszolással, a védőbevonat esztétikai értékének növelése érdekében, de a bevonatrendszer klímaállóságának bizonyos fokú romlását előidézve;
- száraz és nedves csiszolás a tapaszolás felületi egyenetlenségeinek megszüntetése végett, de az alapozóréteg megsértése nélkül;
- az alapozó- és a leendő fedőbevonat közé közbülső réteg felvitele matt vagy félmatt kivitelben, elsősorban nagyobb klímaállósági követelmények esetén;
- fedőlakk- vagy átvonó zománcréteg létrehozása egy vagy több rétegben;
- szárítás (esetleg beégetés) az oldószer elpárolgotatása, illetve a polimerizációs, polikondenzációs vagy poliaddíciós kikeményítési reakciók elősegítése érdekében.



Elektroforetikus és autoforetikus festés

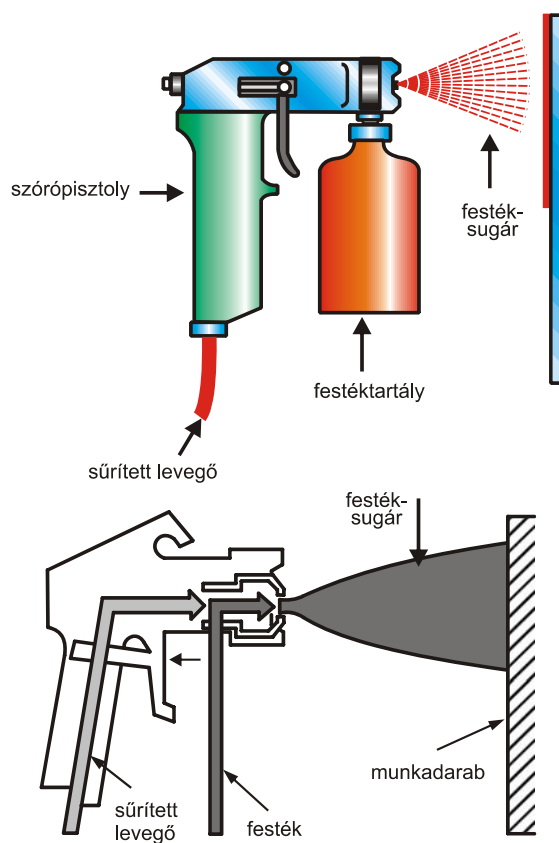
4.4. ábra (I.)
Festékek felhordása

A festékek

- kötőanyaguk szerint:
 - természetes kötőanyagúak,
 - műgyanta kötőanyagúak

- vagy természetes és műgyanta kötőanyagúak;
- száradásuk és kikeményedésük szerint:
 - levegőn (20 ± 5 °C-on) száradók,
 - alacsony hőmérsékleten ($60\text{--}80$ °C-on) kikeményedők,
 - közepes hőmérsékleten ($120\text{--}180$ °C-on) kikeményedők,
 - magas hőmérsékleten ($180\text{--}300$ °C-on) kikeményedők lehetnek.

Az egyes rétegek ecseteléssel, szórással, bemártással vagy más eljárással (pl. elektroforézissel) juttathatók a védendő felületre (**4.4. ábra**). A szórás sűrített levegővel (hidegen vagy melegen), nagynyomású porlasztással, elektrosztatikus szórással, elektromágneses rezgődugattyúval porlasztva történhet.



Festékszórás

4.4. ábra (II.)
Festékek felhordása

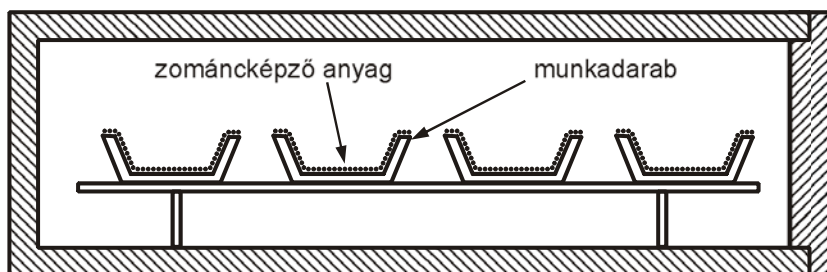
4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.1.4. Zománcozás

A (tűz)zománcozás (4.5. ábra) kerámiai módszerekkel létrehozott – a védendő fém hőtágulási együtthatójához „hangolt”, anyagával színezett – zománcüveg, vagyis nem teljesen felolvasztott oxidkerámia-réteggel történik. A zománcozható alapanyagok közé hidegen hengerelt mélyhúzóható acéllemez, szürke öntöttvasak, kohóalumíniumok, Al-Mn ötvözetek, réz, ezüst, arany és ötvözeik tartoznak. Az előállítható bevonat kopás-, hő- és vegyszer- (sav-, lúg-) álló, dekoratív, de rideg (lepattogzásra hajlamos).

A zománcok összetevői:

- hálózatképző elemeket tartalmazó anyagok: kvarc, kaolin stb.
- átmeneti (üvegképző) elemeket tartalmazó anyagok: Al_2O_3 , TiO_2 stb.
- módosító (olvasztási hőmérsékletet, rugalmasságot, fényességet szabályozó, illetve a hőtágulási együtthatót az alapfémére növelő) anyagok: Na_2CO_3 , CaCO_3 , Li_2CO_3 , BaCO_3 stb.
- oxidáló (szerves szennyeződések szén-dioxiddá és vízzé alakító, illetve azokat eltávolító) anyagok: NaNO_3 , KNO_3 , MnO_2 stb.
- kötő (zománc–alapfém közötti) anyagok: CoO , Co_3O_4 , NiO , Ni_2O_3 , MoO_3 stb.
- fehérítő (átlátszóbból átlátszatlanra tevő) anyagok: Na_3AlF_6 , Na_2SiF_6 , CaF_2 , SnO_2 , Sb_2O_3 , TiO_2 stb.
- színtestek: CdS (sárga), Cr_2O_3 (zöld), Fe_2O_3 (barna) stb.



4.5. ábra
Tűzi zománcozás

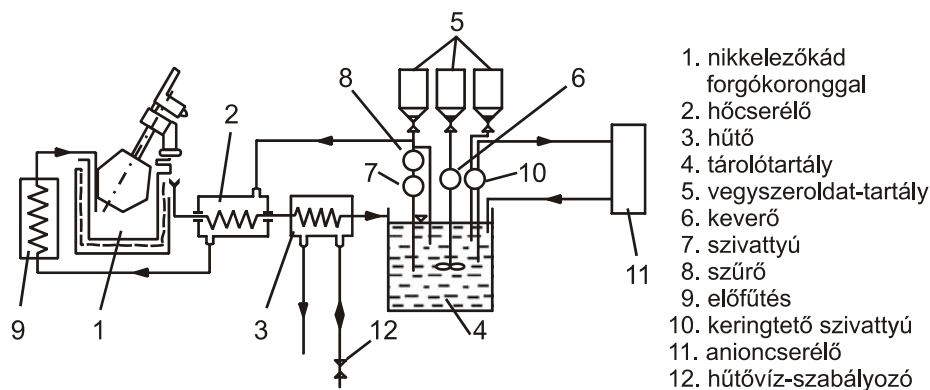
A zománcozás főbb műveletei: felületelőkészítést követő savas pácolás → semlegesítés → zománciszap-felvitel bemártással, szórással vagy más módszerrel → szárítás (60–120 °C-on) → beégetés (550–900 °C-on).

4.1.5. Kémiai fémleválasztás

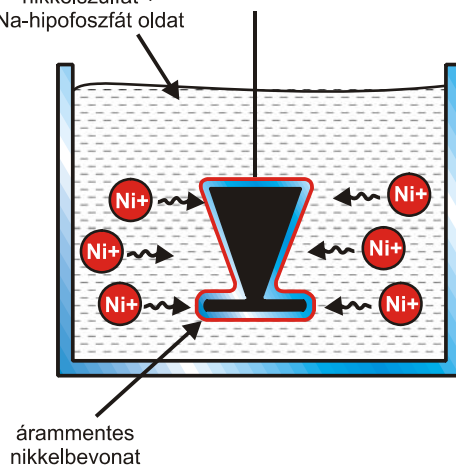
Az áram (külső áramforrás) nélküli kémiai fémleválasztás (4.6. ábra) során az elektronegatívabb (bevonandó) fém az elektropozitívabb (bevonó) fémet erős savakkal képezett sóinak oldatából (15–90 °C hőmérsékleten) a felületére leválasztja

(4.1. táblázat), miközben kismértékben oldatba megy (pl. $\text{Fe} + \text{CuSO}_4 \rightarrow \text{Cu}$ bevonatú $\text{Fe} + \text{FeSO}_4$).

Ezen ioncserén (töltéscserén) alapuló, nagy vegyszerköltségű eljárás során csak rendkívül vékony ($0,1\text{--}0,5\ \mu\text{m}$), nem túl jól tapadó bevonatok választhatók le, ugyanis, ha az elektronegatívabb fém felületét az elektropozitívabb beborítja, megszűnik a potenciálkülönbség és így a további fémleválás. A két fém közötti potenciálkülönbségen kívül a bevonat leválási sebessége függ a fémoldat koncentrációjától és a hőmérséklettől. A túl gyors vagy a túl lassú leválás szivacsos, csekély védőértékű bevonatot eredményez. Fontos a kezelendő tárgy felületének megfelelő előkészítése és kezelés közbeni mozgatása.



bevonatoló fürdő:
nikkelszulfát +
Na-hipofoszfát oldat



4.6. ábra
Kémiai fémleválasztás

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.1. táblázat. Kémiai fémleválasztás anyagai

kevésbé nemes alapfém	nemesebb bevonófém	kezelő fémsó + adalék
Fe	Cu, Sn, Ni, Ag	CuSO ₄ , SnCl ₂ , NiHCl, AgNO ₃
Cu	Sn, Ag	SnCl ₂ , AgNO ₃
Al	Zn	ZnO + NaOH
Cu-Zn (sárgaréz)	Ni, Hg, Ag, Au	NiCl ₂ , K[Hg(CN) ₂], AgNO ₃ , AuCl ₃
Zn	Ag, Au, Ni, Cu	AgCN, AuCl ₃ , NiSO ₄ , CuSO ₄

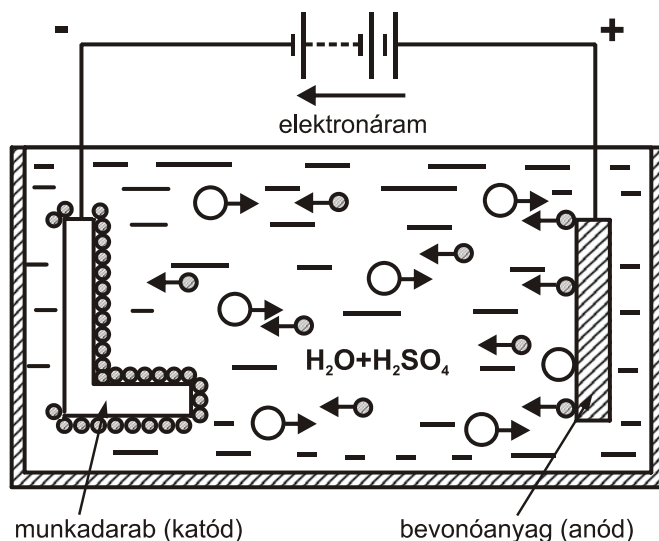
A kontakt eljárás akár 0,5 µm-nél is vastagabb réteget biztosító, gyorsított ioncserés eljárás, melynél a fémsóoldatba (CuSO₄, NiSO₄, SnCl₂, AgNO₃, AgCl₂) még az alapfémnél (pl. acél, réz) is elektronegatívabb (kontakt) fémet (pl. Al, Zn) merítenek, és azt vezető huzallal az alapfémmel összekötik. Így a bevonandó alapfém és a kontaktfém külső áramforrás nélkül is galvánelemet alkot, a kontaktfém mint anód oldódik, majd az alapfémre mint katódra az oldatban lévő fém leválik. Kisebb alkatrészek esetében a bemártókosár készül kontaktfémből. Ha a kontaktfém bevonódik, gyorsító hatása megszűnik, ezért HNO₃-val le kell oldani.

A redukciós eljárás során a fémbevonat (Me = Ni, Cu, Ag, Pd, Co) leválasztásához szükséges elektronokat (e⁻) a leválasztani kívánt fém sóoldatában egyidejűleg jelen lévő redukálószer (Re) oxidációja szolgáltatja: $Re^{n+} \rightarrow Re^{e(n+z)+} + z \cdot e^{-}$, illetve $Me^{z+} + z \cdot e^{-} \rightarrow Me$. Előfeltétel, hogy a redukálóanyag redukciós potenciálja negatívabb legyen, mint a leválasztandó fémé. Ha túl nagy a redoxpotenciál-különbség, akkor iszapszerű bevonat válik le. A redukálószer utánadagolásával elvileg bármilyen vastag fémréteg leválasztható, sőt megfelelő előkezelés után elektromosan nem vezető anyagok (műanyagok) is fémezhetők. A megfelelő hőmérsékletű redukciós oldat főbb összetevői az ellenőrizhető fémleválás, illetve a fémsóoldat önbomlásának megakadályozása érdekében:

- a leválasztandó fémionokat adó fémsó: NiSO₄, NiCl₂, CuSO₄, AgNO₃;
- a külső áramforrás helyett elektronokat átadó redukálószer, ami savas közegben hipofoszfít, foszfít, hidrogén-szulfid, szulfít stb., illetve lúgos közegben formaldehid, formiát, hidrazin, borát stb.;
- pufferanyagok és komplexképzők (citromsav, ecetsav, almasav, borkősav és sóik; NH₄Cl, KCN) a kívánt pH állandó értéken tartására, a leválasztandó fém kis ionkoncentrációjának biztosítására, idegen fémszennyeződések, illetve oldhatatlan melléktermékek komplexben tartására, az oldat stabilizálására, redoxipotenciál kialakulásának elősegítésére;
- gyorsítók (borostyánkősav, adipinsav és sóik; alkáli-fluoridok, tetraborátok, szelenátok) a redukálószer aktiválására, a fémleválás gyorsítására;
- stabilizátorok (tiokarbamid, PbS, SnS; Pb-, Sn-, As- és Mo-ionok) a spontán redukciós folyamatok, illetve az oldatönbomlás megakadályozására;
- nedvesítő- és fényesítőanyagok: alkil-aril-szulfonátok stb.

4.1.6. Galvanizálás

A galvanizálás (4.7. ábra) mint elektrokémiai eljárás során a katódként kapcsolt bevonandó fémtárgyra elektrokémiai úton fémes bevonatot választanak le elektrolitként ható, fémsókat tartalmazó vizes oldatból. Ilyen módon vörös- vagy sárgaréz; fényes vagy fekete nikkel; fényes, kemény vagy fekete króm; Zn-, Cd-, Sn-, Pb-, Fe-, Co-, Ag-, Au-, Rh-, Pd-, Pt-, Ru-, As-, Sb- vagy ötvözetbevonatok hozhatók létre acél, réz, cink, nikkel anyagú munkadarabokon. Míg a fémek elsőrendű vezetők (bennük elektronok „szállítják” az áramot), addig az elektrolitok másodrendű vezetők (bennük ionok „szállítják” az áramot).



4.7. ábra
A galvanizálás elve

Az elektrolitok mint elektromosan töltött részecskéket tartalmazó oldatok vagy olvadékok komponensei a következők:

- fémsók, a rétegleválasztáshoz szükséges fémionok leadására;
- vezetősók az oldat vezetőképességének növelésére, melyek nagy ionmozgékonyosságú, jól disszociálódó, az anód oldékonyágát növelő savak vagy lúgok;
- pH-beállítók (pufferanyagok): savak, lúgok, foszfátok, citrátok, borátok;
- fényesítők a kristály-, illetve szemcseszerkezet finomítására, keménységnövelésre, fényfokozásra;
- kiegyenlítők a felületi érdesség csökkentésére;
- felületaktív anyagok a jobb nedvesítés elősegítésére, a pórusosság csökkentésére.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

Az anódnál oldódás ($\text{Me} \rightarrow \text{Me}^{z+} + z \cdot e^-$) vagy oldhatatlanság esetén oxigénfejlődés ($4 \text{ OH}^- \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4 e^-$), míg a katódnál fémkiválás ($\text{Me}^{z+} + z \cdot e^- \rightarrow \text{Me}$) történik. A leválasztott fém tömege ($m = \rho \cdot V$) – Faraday I. törvénye értelmében – elsősorban áramerősség (I) és az idő (t), vagyis az elektromos töltésmennyiség $Q = I \cdot t$ függvénye:

$$m = A \cdot I \cdot t \cdot \eta, \quad (4.1)$$

ahol „A” az anyagminőségtől függő elektrokémiai (leválasztási) egyenérték: $A = M/(F \cdot z) = \text{moláris tömeg}/(\text{Faraday-állandó} \cdot \text{elektromos töltések száma})$; $F = 96\,500 \text{ C}$; η az elektrolit fajtájától, töménységétől, hőmérsékletétől függő áramkihasználás vagy áramhatásfok (a gyakorlatilag leválasztott fémmennyiség és az elvileg leválasztható fémmennyiség hányadosa).

A bevonat rétegvastagsága

$$s = \frac{A \cdot I \cdot t \cdot \eta}{\rho \cdot K}, \quad (4.2)$$

ahol ρ a leválasztandó fém sűrűsége, K a katódfelület.

Ezek alapján a fémleválasztás

$$\text{sebessége:} \quad v = \frac{s}{t} = \frac{A \cdot I \cdot \eta}{\rho \cdot K}; \quad (4.3)$$

$$\text{időtartama:} \quad t = \frac{s \cdot \rho \cdot K}{A \cdot I \cdot \eta}; \quad (4.4)$$

$$\text{áramsűrűsége:} \quad i = \frac{s \cdot \rho}{A \cdot t \cdot \eta}. \quad (4.5)$$

A galvanizálásra kerülő felületek helyes és helytelen kialakításait mutatja a **4.8. ábra**.

A rezezés világosvörös színű, levegő hatására vékony oxidréteget képező és barnásfeketére színeződő, de oxidálósavakban, illetve nátrium-cianidban oldódó bevonatot eredményez. Alkalmas közbenső réteggént korrózióvédő nikkelezés alá, végső bevonatként elektroformázó nyomóhengerek bevonására, nyomtatott huzalozású lemezek készítésére, finommechanikai és elektronikai alkatrészek bevonatolására, acélalkatrészek szelektív hőkezelés előtti védelmére.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

Helytelen	Helyes	Megjegyzés
		Minden élet le kell kerekíteni, a minimális rádiusz 0,8 mm
		Különösen kerülni kell a belső éles sarkokat. Nagyon megkönnyíti az egyenletes rétegeloszlást, ha az alkatrész kismértékben homorú
		Ha a zsákfurat elengedhetetlen, lehetőleg lekerekített kiképzést kapjon. Mélysége ne legyen nagyobb, mint az átmérője
		A homorított mélyedések javítják az egyenletes rétegeloszlást
		Kiugró éles sarkok különlegesen vastag és gyakran durvaszemcsés bevonat leválasztását eredményezik
		A gyűrű alakú tárgyak kiemelkedései lehetőleg lekerekítettek legyenek
		A lekerekítések és homorítások növelik a rétegegyenletlenséget
		A külső és belső lekerekítés egyenletes rétegvastagságot eredményez

4.8. ábra

Galvanizálásra kerülő felületek helytelen és helyes kialakítása

A nikkelezés az egyik leggyakrabban alkalmazott bevonat fém tárgyak korrózió elleni védelmére, ugyanis semleges, lúgos és gyengén savas atmoszférának jól ellenáll. Korrózióállósága mellett keménysége, fényvisszaverő-képessége és díszítő jellege is fontos műszaki követelmény. A védendő tárgy alapanyaga legtöbbször acél-, réz- és cinköntvény, illetve ezek ötvözetei, amelyekre – a felhasználás körülményeitől függően – matt, fényes, selyemfényű, fekete, kemény stb. nikkelbevonatot lehet leválasztani. Levegőn gyorsan vékony oxidréteg alakul ki rajta, miáltal fénye jelentősen csökken, így ennek megelőzésére vékony krómbevonatot választanak le rá. A fényes vagy matt nikkelrétegre felvitt kb. 2 µm-es fekete nikkelréte-

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

get dekoratív, illetve műszaki célokra, elsősorban az autó-, a szerelvény-, a fegyver- és az optikai iparban alkalmazzák.

A krómozás kemény, kopásálló bevonatot eredményez, aminek felületén oxidálóanyagok hatására korróziócsökkentő vékony oxidréteg alakul ki. Jól ellenáll gázok, savak (HCl és HF kivételével), sók, lúgok korróziós hatásának. A 0,25–0,5 μm -es díszítő krómozás közbenső vékony Ni bevonaton csökkenti a mattulást, és növeli a korrózióállóságot. A műszaki vagy keménykrómozás viszonylag vastag bevonatot választ le tengelyeken, dugattyúkon, szelepeken, prés-, fröccsöntő- és hidegalakító szerszámokon. Jól keménykrómozhatók a gyengén és közepesen ötvöztött acélok, a finomszemcsés öntöttvasak. Az erősen ötvöztött acélok, az Al, Cu, Ni és ötvözeik esetében a következő, speciális előkezelést is magában foglaló technológia javasolt: oldószeres zsírtalanítás $\rightarrow$ feszültségmentesítő hőkezelés $\rightarrow$ szemcsefűvás $\rightarrow$ szerszámozás, felfüggesztés $\rightarrow$ előmelegítés $\rightarrow$ anódos maratás $\rightarrow$ meleg vizes öblítés $\rightarrow$ krómozás $\rightarrow$ takaréköblítés $\rightarrow$ végöblítés $\rightarrow$ szárítás $\rightarrow$ leszedés a függesztő szerszámról $\rightarrow$ hidrogénmentesítő (ridegségcsökkentő) hőkezelés $\rightarrow$ ellenőrzés. Az optikai, röntgen-, fotó- és műszeripari alkalmazású feketekrómozás 900 °C-ig stabil bevonatának színét a 20–30% Cr_2O_3 beépülése okozza. Nagy hőmérsékleten működő gépalkatrészek felületi keménységét és kopásállóságát növelő diszperziós krómozás bevonatába SiC épül be.

A horganyzás (cinkezés) acélalkatrészek, acélöntvények, acélszalagok és huzalok korrózióvédelmére szolgál. Mivel a cink elektronegatívabb, mint a vas, így amíg van bevonat, addig a védelem is fennáll. A díszíthetással is bíró cink a legolcsóbb galvanizálásra használható fém, melynek felületén szürkésfehér oxid és karbonát (fehérrozsa) képződik, lassítva a bevonat további korrózióját. 10–15% Ni vagy 0,2–0,3% Co bevitelével a korrózióállóság 3–4-szeresére növelhető, elsősorban kötőelemek horganyzásakor.

A kadmiumozást nem élelmiszeripari célú acéltárgyak korrózió elleni védelmére, elektronikai iparban felhasznált színesfémek forraszthatóságának javítására alkalmazzák. Atmoszferikus hatásoknak, tengeri és trópusi klímának jól ellenáll, de szerves oldószerek és kénvegyületek megtámadják. Az ezüstfehér színű fém felületén a levegő szén-dioxidjának hatására szürkésfehér színű, karbonáttartalmú réteg képződik.

Az ónozás élelmiszer- és konzervipari gépek, berendezések és csomagolóanyagok felületvédelmét szolgálja, de alkalmazzák híradástechnikai, illetve mikroelektronikai alkatrészek forraszthatóságának javítására, továbbá nyomtatott huzalozású lemezek fémes maszkolására is. Az ezüstfehér bevonaton vékony, összefüggő oxidréteg képződik, ami védi a további korróziós károsodástól. Híg savak nem támadják meg, de a sósav és a kénsav oldja. Sárgarezek és cinkötvözetek bevonása előtt diffúziógátló (kedvezőtlen intermetallikus vegyületek képződését megakadályozó) Cu-, Ni-, Fe-, Co-bevonatot kell készíteni.

A vasazást alkalmazzák öntöttvas tárgyak köztes bevonására (tapadásnövelő előkezelésként) tűzi ónozás előtt, forrasztópákák diffúziógátlására, hibás alkatrészek felújítására, mágneses bevonatok, illetve árnyékolások előállítására híradástechnikai alkatrészekben, porózus krómbevonatok leválasztása előtt, nehezen

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

foszfátosztható ötvözetek előkezelésére. A vasbevonat jól tapad gyengén ötvözött acélokon, öntöttvasakon, Ni- és Cu-ötvözeteken, de a bevonatba beépülő hidrogént hőkezeléssel (900 °C-on, védőgázban) el kell távolítani.

A kobaltozás során létrejött bevonat a nikkelnél jobb kopásállósággal rendelkezik, közel azonos alakíthatóság, illetve jó mágnesezhetőség mellett. Mivel költséges eljárás, a korrózió elleni védelemben nem használatos.

Az ezüstözés eredményét nagyfokú kémiai ellenálló képesség (vegyiparban), jó hővezető képesség, kiváló elektromos tulajdonságok és forrasztathóság (híradástechnikai, műszer- és elektronikai iparban), nagyfokú fényvisszaverő képesség (optikai iparban tükrökhöz), kiemelkedő dekorativitás és esztétika (ékszer-, ötvös- és díszműiparban, vendéglátóiparban) jellemzi.

Az aranyozást dekoratív hatása miatt az ékszer-, óra- és bizsugyártásban, kiváló kémiai és klimatikus ellenálló képességet + nagy és állandó elektromos vezetőképeséget + tökéletes forrasztathóságot + jó hőállóságot + állandó keménységet és kopásállóságot biztosító bevonata miatt elsősorban elektronikai, számítástechnikai alkatrészek (pl. érintkezők, kontaktusok, tranzistorok, félvezetők, nyomtatott áramkört elemek) és űrkutatási műszerek gyártásában alkalmazzák, leggyakrabban Cu, Ni és ötvözetei bevonására. Takarékos megoldásokra törekedve igen vékony bevonatokat hoznak létre, csak az éppen szükséges kiterjedésű felületeken.

A palládiumozás jó korrózióállóságot eredményez, pl. ezüstbevonat védelmére ipari gázok (CO₂, H₂S, SO₂) korrodáló hatásával szemben. 1,5–2,5 μm Pd- vagy Pd-Ni-bevonat kombinálva 0,2–0,4 μm keményarany (0,2% Co, 0,24% C, 0,3% N, 0,14% K) bevonattal, gazdaságos és műszakilag egyenértékű megoldása az aranybevonat helyettesítésének.

A ródiумozással előállítható bevonat különlegesen nagy kémiai ellenállóképeséget, keménységet és karc-, illetve kopásállóságot biztosít műszer-, híradástechnikai és elektronikai ipari érintkezők, csúszókontaktusok felületkezelésekor, viszonylag jó elektromos vezetőképeség mellett. Az elváltozás nélkül –60 – +300 °C között alkalmazható ródiумbevonat savakban, lúgokban nem oldódik, de a klórgáz nagy hőmérsékleten megtámadja. Dekoratív, rideg színű (hideg fényű), emberi izzadságra nem érzékeny bevonatot képez ezüstözött vagy színezüst tárgyakon, gyémántköves fehérarany ékszereken. Nagyobb hőmérsékleten és agresszív atmoszférában üzemelő reflektorok, tükrök bevonására is alkalmas ott, ahol az ezüst már nem felel meg. A 0,05–0,3 μm vastag ródiумbevonat közvetlenül leválasztható Ni-re, Ag-re, Au-ra, Pt-ra és ezek ötvözeteire, míg a többi fémre Ni-, Ag- vagy fehérarany közbenső bevonat után.

A ruténiumozás a palládiumozásnál jobb elektromos vezetőképeséget biztosít, azonos technikai tulajdonságok, de kisebb költségek mellett. Termikusan erősen igénybe vett elektromos érintkezők, kontaktusok gyártásán kívül platina helyettesítésére is alkalmazzák nem oldódó nemesfém- és galvanotechnikai titánanódokon.

A platinázás ezüst és fehérarany ékszerek dekoratív bevonására, gyógyászati és laboratóriumi eszközök, vegyipari berendezések és szerelvények felületkezelésére alkalmazható. Nagy kémiai ellenálló képeséget biztosít, de költséges.

Az ólmozás igen jó csúszási jellemzőket eredményez siklócsapágak gyártásában. Alkalmazzák továbbá gázkazánok és kénsavas akkumulátorok csatlakozó

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

szerelvényeinek bevonására is. A felületén képződő szürke, összefüggő védőréteg további védelmet biztosít. Acélra, öntöttvasra, rézre és ötvözeteire közbenső réteg nélkül leválasztható.

Az indiumozás síklócsapágyakhoz igen jó csúszási tulajdonságot biztosít, továbbá jól forrasztható és légköri korróziós hatásoknak ellenálló bevonatot eredményez.

Az alumíniumozás acélból készült tárgyak hőálló bevonatának alapját képezi, pl. rakétatechnikai alkalmazásokhoz.

Az arzénózás és az antimonozás sötétszürke, dekoratív díszítőbevonatot produkál vörösrézen, sárgarézen és bronzon.

Színfémbevonatok mellett ötvözetbevonatok is leválaszthatók többek között réz-, nikkel-, ón-, cink-, kobalt-, vas-, ezüstötvözetekből:

- Jellegzetes rézötvözet-bevonatok: tombak (82–90% Cu + 18–10% Zn), sárgarézt (60–80% Cu + 40–20% Zn pl. Ni-bevonat alá), spekulum (45–60% Cu + 55–40% Sn), nikkelex (85–90% Cu + 15–10% Sn), ónbronz (70–80% Cu + 16–20% Sn + 5–7% Zn), kadmiumbronz (80–90% Cu + 20–10% Cd); ez utóbbi kettő Al-galvanizálás köztes bevonata.
- Ni-Fe-ötvözetek révén 20–30% Ni-megtakarítás érhető el, több esetben a tiszta Ni helyettesítéseként. Fe, Co, Mn ötvözéssel keménységnövelés, mágneses tulajdonságok javítása, hőállóság fokozása érhető el. 15–20% vastartalmú ötvözetekkel jó korrózió- és nedvességállóság, jó krómozhatóság is biztosítható. Jól tapadnak az alapfémhez, köztes bevonatként alkalmazhatók vörös- és sárgarézt bevonatokhoz. A vastag bevonatokba beépülő hidrogén hőkezeléssel eltávolítható. A Ni-Co és a Ni-Mn-ötvözetek műanyag-, cink-, alumínium-, üveg-présszerszámok, illetve fröccsöntő szerszámok elektroformázásához is használhatók.
- Az ón-ötvözetek jó korrózióállósággal, duktilitással, kiváló forrasztatósággal rendelkeznek. A kedvező csúszási tulajdonságokkal bíró, 40% Pb-tartalmú ötvözet síklócsapágyakhoz, nyomtatott huzalozású lemezek forrasztást elősegítő bevonataként alkalmazható. A pórusmentes, jól polírozható, jó sav- és lúgállóságú, 35% Ni-tartalmú ötvözet nemesfém bevonatok helyettesítésére szolgál elektronikai és laboreszközök gyártásában. A 25% Co-tartalmú ötvözet jól helyettesítheti apró alkatrészek dekoratív Cr-bevonatát.
- Cinkötvözetek közül a jól krómozható és passzíválható Cu-tartalmúak helyettesíthetik a Ni-t; a jól forrasztható Co-, illetve a Sn-tartalmúak pedig a Cr-t helyettesíthetik azonos színük, kiváló korrózióállóságuk révén, elsősorban apró alkatrészekben.
- A kobaltötvözetek közül a W-ötvöztésűek keménykróm bevonatok helyett, a 10% Ni-tartalmúak mágneses tárolók gyártásában jöhetnek szóba.
- A Ni-, Cr-, W- vagy Zn-tartalmú vasötvözetek kopásálló bevonatként, továbbá az elektroformázásban kaphatnak szerepet.
- Az ezüstötvözetekre az ezüst kis olvadáspontja, kis keménysége, gyenge kénhidrogén-állósága miatt lehet szükség. A Cd-, Pb-, Sb-, Cu-, Pd-ötvöztésűek elektromos kontaktusok bevonására, a Pb-, Tl-, In-tartalmúak

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

nagy igénybevételű csapágycsúcsok sűrűdés csökkentő bevonataként alkalmazhatók. A max. 25% Zn-tartalmú ötvözetekkel elkerülhető a homályosodás, és Ag-takarékosság érhető el.

Az alumínium a felületi védőoxidrétegének eltávolítása, illetve tapadásbiztosító alapozóréteg (nemfémes réteg elektromosan vezető pórusokkal; Zn-, Fe-, Cu-, Sn-réteg) létrehozása után galvanizálható. A bevonóanyagok általában elektropozitívabbak, így laza, rosszul tapadó réteget eredményeznek, ráadásul a hőtágulási együtthatójuk kisebb az alumíniuménál.

Műanyagok is galvanizálhatók maratás (Van der Waals-kötésre aktív góccok képzése), érzékenyítés és aktiválás (azaz fémréteggé történő elősegítő kristálymagok létrehozása), illetve kémiai előbevonás (Cu, Ni) után. Cél a fémek mechanikai és dekoratív tulajdonságainak egyesítése a műanyagok egyszerű és nagy termelési mennyiségű gyártásával, illetve kis sűrűségével.

4.2. Termikus szórás

Termikus szórás a por, granulátum, pálcá vagy huzal formájában adagolt hozaganyag (4.2.–4.4. táblázat) részleges vagy teljes megolvastásával és így folyamatosan képződő nagy hőmérsékletű részecskék kezelendő felületre szórásával, termomechanikai úton jön létre bevonat.

4.2. táblázat. Szórt bevonatok készítéséhez használható fémek és kerámiaanyagok

Tiszta fémek	Ni, Cr, Ti, Mo, Cu, Al, W
Ötvözetek	NiCr, NiCrFe, CoCrFe, CuAl, CuAlIn, NiCrAl, NiCrW, FeCr, NiAl, NiTi, NiC (álötvözetek), NiCrBSi, CoNiCrBSi stb.
Fémkarbidok	WC, Cr ₃ C ₂ , TiC, MoC stb. leggyakrabban NiCr, Co, NiAl fémes mátrix anyaggal szórva
Boridok	TiB ₂ , ZrB ₂ , CrB ₂
Szilicidek	MoSi ₂
Nitridek	TiN, HfN
Oxidkerámiák	Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ +TiO ₂ , Al ₂ O ₃ +Cr ₂ O ₃ stb. Zr ₂ O ₂ , Zr ₂ O ₂ +CaO, Zr ₂ O ₂ +Y ₂ O ₃ stb. TiO ₂ , HfO ₂ , Cr ₂ O ₃

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.3. táblázat. Szórt bevonatok készítéséhez használható fémek és kerámiaanyagok jellemzői

Az anyag neve	Vegyjel, képlet	Olvadáspont °C	Sűrűség kg/m ³	Felületi tömegsűrűség 0,1 mm rétegvastagságnál g/m ³
Vas és acél	Fe	1250–1528	7860	780
Réz	Cu	1083	8930	780
Cink	Zn	407	7130	700
Ón	Sn	232	7280	740
Ólom	Pb	327	11340	1140
Sárgaréz	CuZn	1050		870
Bronz	CuSn	1000–1050		890
Alumínium	Al	658	2700	270
Volfrám	W	3370	19100	–
Kvarc	SiO ₂	1477	2650	–
Titán-oxid	TiO ₂	1775	3840	–
Alumínium-oxid	Al ₂ O ₃	2050	3900	–
Króm-karbid	Cr ₃ C ₂	2060	6720	–
Mg-Al-spinell	MgO·Al ₂ O ₃	2115	3600	–
Szilícium-karbid (karborundum)	SiC	2250	3190	–
Króm-oxid	Cr ₂ O ₃	2275	5210	–
Cirkonszilikát	ZrO ₂ ·SiO ₂ (ZrSiO ₄)	2500	4690	–
Berillium-oxid	BeO	2580	2990	–
Cirkónium-oxid	ZrO ₂	2690	5800	–
Volfrám-karbid	W ₂ C, WC	2700	17330	–
Magnézium-oxid	MgO	2800	3490	–
Titán-karbid	TiC	3250	4880	–

A hőt láng, elektromos ív, plazma- vagy lézersugár, illetve gázkeverék ciklikus robbanása biztosítja (4.5. táblázat), míg a felületre szórást sűrített levegő, plazmaáramlás vagy detonációsorozat „végzi”. Fémek, fémötvözetek, fémvegyületek, kerámiák vagy műanyagok alkotta bevonat kötési (tapadási) szilárdsága arányosan növekszik a szórt részecskék mozgási energiájával és hőmérsékletével, a kezelendő felület tisztasági fokával, a felületelőkészítő aktiválás és a szórás között eltelt időtartam rövidítésével, a felületi érdesség megfelelő profilalakjával. A szórt bevonat porozitása elsősorban a részecskebecsapódási sebesség növelésével csökkenthető. Az alkalmazási területek mintegy 60%-át a kopásálló bevonatok jelentik, kb. 1%-ot tesz ki a korrózióvédelem, 10% körüli az elektronikai vékonyrétegek aránya, míg a megmaradó kb. 15% egyéb célokat szolgál.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.4. táblázat. Szórt bevonatok készítéséhez használható fémek és kerámiaanyagok alkalmazásai

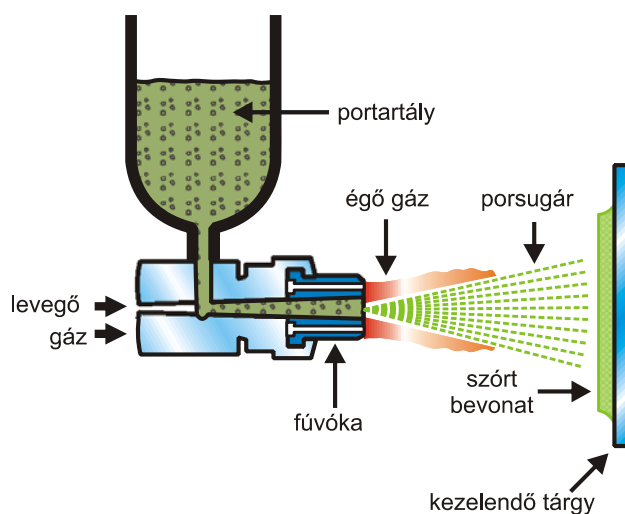
Alkalmazási terület	Alkatrész	Bevonóanyag
Repülőgépgyártás	nagynyomású kompresszorlapátok felülete turbinalapátok felülete, fúvócső égőkamra	Cr_3C_2 , NiCr CoCrAlY, NiCrAlY, CrNiAl $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$
Textilgépgyártás	szálvezető villák, tépő hengerek, műszálglyártó berendezések	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ Cr
Gépipar	siklócsapágyak dugattyúgyűrűk dízelmotor-dugattyúk felülete hengerfej bélése, előkamra szerszámgép csúszófelületek szivattyúk tömítései	Mo, AlBz Mo $\text{ZrO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ FeCr_{13} , Cr_2O_3 Al_2O_3 , Cr_2O_3
Vegyigépgyártás	szelepek, tolózárok, csúszófelületek szivattyú-járókerek vegyszerreaktorok védelme	Al_2O_3 Al_2O_3 Al_2O_3 , Cr_2O_3
Kohászat	öntőüstök, olvasztókemencék falazata hengerek felülete	Al_2O_3 WC+Co+NiCr
Papíripar	hengerek felülete	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$

4.5. táblázat. Termikus szórási eljárások alkalmazástechnikai jellemzői

Megnevezés	Energiahordozó közeg	Elérhető hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]	Szórható anyag fajtája	Szórható anyag formája	Részecske-sebesség [m/s]	Szórási teljesítmény [kg/h]
Huzal-	lángszórás C_2H_2 , C_2H_4 , C_3H_8 , $\text{H}_2 + \text{O}_2$	≤ 3160	fém	huzal	≤ 200	6–8
Por-		≤ 3160	minden anyag	por	≤ 50	3–6 (kerámia: 1–2)
Nagy sebességű		≤ 3160	minden anyag	por	≤ 550	4–8 (kerámia: 2–4)
Műanyag		≤ 3160 , de CO_2 hűtés kell	műanyag	granulátum	≤ 30	2–4
Ívszórás	elektromos áram	≈ 4000	elektromosan vezető anyagok	huzal	$\approx 150\text{--}300$	8–20 – 50
Plazmaszórás	Ar, He, H_2 , N_2 , elektromos áram	≤ 20000	minden anyag	por	≤ 450	4–8
Lézerszórás	CO_2 , He, N_2 , Ar, elektromos áram	≤ 10000	minden anyag	por	> 1	1–2
Robbantásos szórás	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$, elektromos szikra	> 3160	minden anyag	por	≈ 600	3–6

4.2.1. Lángszórás

Az oxigén–acetilén gázos lángszóró berendezésekkel (4.9. ábra) elérhető viszonylag kicsi tapadási szilárdság (10 N/mm^2) és nagy porozitás (5–25%) a lángban repülő részecskék kis sebességéből (80–100 m/s) ered. Az oxigén–acetilén keverék égési hőmérséklete tökéletes keveredés esetén 3160°C .



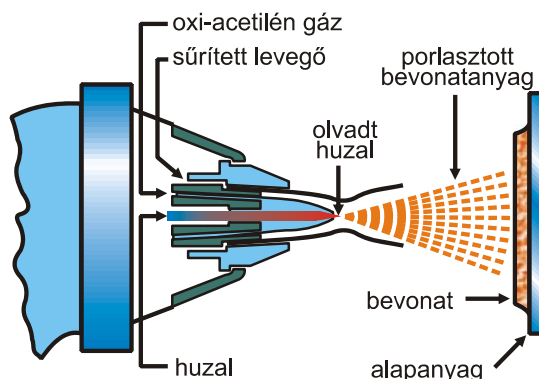
4.9. ábra (I.)
Por lángszórása

Az acetilén gáz nyomását biztonsági okokból 1,5 barnál nagyobb értékre nem célszerű növelni (önbomlás miatt), ezért ilyen kis túlnyomással nem növelhető az égő gáz sebessége a hangsebesség fölé. Egy másik eljárásnál metilacetilén–propadién gázkeveréket használnak égőgázként, oxigénben elégetve. Ez MAPP-gázként ismert, égési hőmérséklete 2900°C , munkanyomása 4–5 bar körüli érték. Az eljárás ismert Hypersonic Spray System, Hypersonic Flame Spraying, illetve Jet Kote Process néven is.

A MAPP-gázt és az oxigént egy előkeverő rendszerben összekeverik és a tengely körül koncentrikusan elhelyezkedő furatokon az égőkamrába vezetik. A kamrába befűjt gázkeverék köpenyszerűen körülveszi az égő tengelyében nitrogén gázáramban fluidizálva befűjt port. A MAPP-gáz és az oxigén begyűjtása hidrogénnel történik, ami folyamatosan is éghet, míg a MAPP-gáz adagolása csak a porszórás időtartama alatt történik. Az égőkamrából az égő gázkeverék expanziós Laval-fúvókán keresztül távozik. A MAPP-gáz égése lassú, és ez biztosítja, hogy a fúvóka teljes (120–150 mm) hosszában (sőt azon túl is) folyamatos a hőtermelés. A porok adagolása és nitrogénnel történő fluidizálása külön adagolóval történik. A MAPP gáz elnyújtott égése és a láng nagy sebessége miatt a szórandó tárgyat távol, kb. 300 mm-re helyezik el a fúvóka nyílásától. Az 5–45 μm szemcseméretű

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

WC-Co porokkal (88% WC + 12% Co) végzett sebességmérések szerint 8 bar O₂, 4 bar MAPP-gáz és 4 bar N₂ vivőgáz nyomásnál, a fúvókától 300 mm távolságban a részecskék közepes sebessége 315 m/s (min. 100 m/s, max 500 m/s). Nikkel alapú fémporral (szemcseméret: 5–45 µm) végzett kísérletnél 400 m/s közepes sebességet értek el.



4.9. ábra (II.)
Huzal lángszórása

A szórt bevonatok tulajdonságaira jellemző, hogy a WC-Co (88/12) bevonatok porozitása 2% alá csökkenthető, a pórusok mérete 10 µm-nél kisebb. A mikroszkópi csiszolatokon mért keménység (HV 200 g) 940–960 HV közötti, a merőleges tapadási szilárdság nagyobb, mint 70 MPa.

Az eljárás alkalmazására jellemző, hogy főként WC-Co-bevonatok szórását végzik vele, és a robbantásos porfelszórást is kiválthatja az olcsóbb berendezés révén. Az eljárás mindazokon a területeken alkalmazható, ahol a plazmaszórás és a robbantásos szórás használatos.

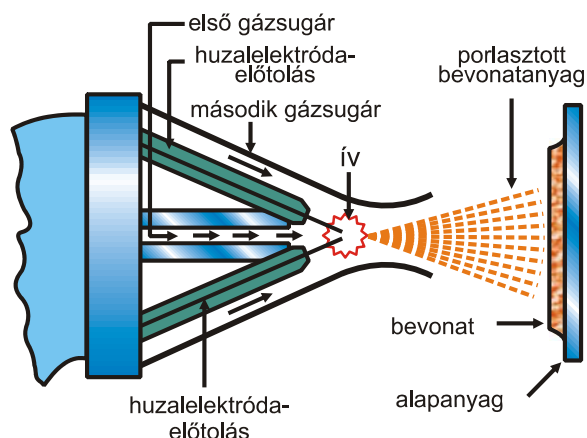
4.2.2. Ívszórás

A huzal formában kialakított bevonóanyagot elektromos ív hőenergiájával megolvasztják, és az olvadékcseppeket sűrített levegővel szétporlasztva a bevonandó tárgy felületére repítik (**4.10. ábra**). Az ívet közvetlenül a két huzalvég között hozzák létre úgy, hogy a két huzalt görgős előtoló szerkezettel 60–90°-os szögben egymásnak ütköztetik. A görgők stabil feszültségű egyenáramú tápegységhez csatlakoznak. Az íven sűrített levegősugarat fújnak keresztül, amely a huzalvégekről leolvadó cseppeket szétporlasztja. Az ív hőmérséklete meghaladja a 4000 °C-t, az ívoszlopban felszabaduló hőenergia nagy része a sűrített levegőárammal távozik.

A huzalok előtolási sebessége és a huzalok leolvadása között az egyensúlyt az ívet fenntartó tápegység karakterisztikája biztosítja, a hegesztő áramforrások ún. belső szabályozásához hasonlóan. Ha a leolvadás gyorsabb, mint az előtolási se-

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

besség, a huzalvégek (ívtalppontok) távolodnak egymástól. Ekkor az ívfeszültség növekszik, és ennek eredményeként az íváram csökken. Ez a leolvadási sebesség csökkenését és az egyensúly helyreállítását eredményezi. Gyorsabb előtolási sebesség az előzőekkel ellentétes irányban hat. Másodpercenként mintegy ezer részecske szakad le, és kb. 300 m/s-os sebességgel ütközik a tárgyfelületre.



4.10. ábra
Ívszórás

Egyes ívszóró berendezéseknél a cseppleolvadást szabályozzák. Az egyenáramú tápegység feszültségére középfrekvenciás impulzusokat modulálnak tranzisztoros tápegységről. Az áramimpulzusok hatására gyors leolvadás történik, és az olvadékcseppek száma megnő, tehát finomabb porlasztás érhető el, mint a hagyományos eljárással. Másik irányzat a zárt fúvókarendszerek alkalmazása, ahol az ívtalppontokat a tengelyirányú főfúvókán kívül levegősugárral, ferdeszögben fújják, ezáltal a porlasztás intenzitását növelik.

A huzalos ívszórással készült bevonatok tapadási szilárdsága és tömörsége lényegesen nagyobb, mint a lángszórt bevonatoké, de nem éri el a plazmaszórt bevonatok értékeit. A legnagyobb szóróberendezések teljesítménye Al-szórás esetén eléri akár az 50 kg/h értéket. A felhasznált hőenergia – a felszórt fém súlyegységére vonatkoztatva – a lángszóráshoz viszonyítva 1/9-e, a plazmaszóráshoz viszonyítva 1/15-e.

A huzalos ívszórási eljárást nagy teljesítményénél, széles (nagy keresztmetszetű) szórósugaránál fogva nagyméretű tárgyak korrózió- vagy kopásálló réteggel való bevonására alkalmazzák. A leggyakoribb területeket a **4.6. táblázat** tartalmazza. Ezeket a bevonatokat minden esetben szerves tömítőanyagokkal (festékekkel), egy vagy több rétegben tömítik. A szórt Al- vagy Zn-bevonat érdességénél fogva kiváló tapadást biztosít a festékbevonatok számára, pl. 175 μm vastag Zn-bevonat élettartamát 20–25 évre adják meg hídszerkezeteken.

4.6. táblázat. Huzalos ívszórás alkalmazási területei

Alkalmazási terület	Alkatrész	Bevonóanyag
légköri korrózióvédelem	olajtároló tartály külső felülete acéltornyok (tv, rádió) hidak vasúti kocsi, mozdonyalvázak távvezeték-oszlopok, lámpaoszlopok	Al, Al Zn Al Al Zn Al
víz alatti létesítmények korrózióvédelme	zsilipszerkezetek hajótestek olajfúró-szigetek	Zn Al Al, Zn
hőkorrozó elleni védelem	kazánszerelvények kemencealkatrészek	Al Al
gépipari alkatrészek korrózió elleni védelme	tengelyek hengerek szárítóhengerek	13% Cr-acél monel-fém, Mo rozsdamentes acél
vegyipari gépgyártásban felületkezelés	reaktoralkatrészek tartályok	Ti, Ta (Ar-védőgázos kamrákban)

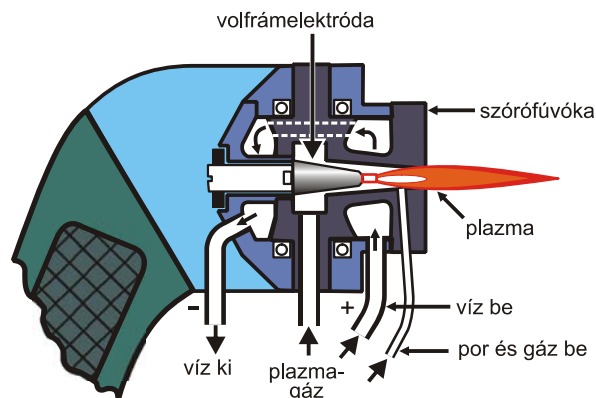
4.2.3. Plazmaszórás

A plazma előállítására szolgáló eszköz a plazmagenerátor, amelynek a gyakorlatban két fő típusát alkalmazzák: a „belső íves” rendszerűt és a „külső íveset”. A plazmagenerátort leggyakrabban egyenáramú tápegységből táplálják. A plazmagenerátorokban tóriumozott volfrámelektrodát alkalmaznak katódként, és hengeres furatú rézhüvelyt vagy gyűrűt anódként, a kettő közötti szűk résben áramlik a plazmaképző gáz. Az elektromos ív nagyfeszültségű, nagyfrekvenciás szikrakisülés csatornájában alakul ki, amit a gázáramlás vagy mágneses tér stabilizál. Az eső jellegű tápegység karakterisztika és az ív karakterisztikájának a metszéspontjában jön létre a stabil munkapont, amellyel a berendezés üzemel.

Gyakorlatilag minden plazmás berendezéstípusban megtalálhatók a következő részegységek: gázellátó-egység, fő tápegység, segédív tápegysége, hűtőegység, szivattyú, poradagoló, plazmagáz, vívógáz, gyújtóegység, plazmagenerátor. A különböző célú berendezésekben csupán a részegységek paraméterei változnak az igényektől függően.

A plazmaszóró berendezések működése a belsőíves rendszeren alapszik (4.11. ábra). A bevonatképzéshez szükséges anyagot por (néha huzal) állapotban a plazmagenerátor fúvókáján kilépő nagy sebességű és nagy hőmérsékletű plazmasugárba juttatják. A bevonóanyag részecskéit a plazmasugár gyorsítja, és hőcsere révén hevíti. A részecskék a tárgyfelületbe való ütközés pillanata után ellapulnak, és a tárgyfelülethez vagy egymáshoz tapadnak.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



4.11. ábra
Plazmaszórás

A belső íves plazmagenerátor termikus hatásfoka 50–85% között változik, az üzemelési paraméterektől függően. A por állapotú bevonóanyagok a plazmasugárba adagolása történhet a fúvókán belül vagy kívül, különböző adagolási szög-helyzetekben. Ez lehetővé teszi, hogy plazmaszórással a hőre lágyuló műanyagoktól a volfrámig minden olyan szilárd anyagból bevonat készülhessen, amely határozott olvadási vagy lágyulási hőmérséklettel rendelkezik.

A plazmagáz és a szilárd bevonóanyag közötti intenzív hőcsere érdekében majdnem kizárólag por állapotú bevonóanyagokat használnak. A nem tiszta anyagok leggyakrabban mechanikus keverékek, azonban a bevonatos formák is előfordulnak. Például a Ni-Al-nál az Al-részecske Ni-lel van bevonva, a WC-Co-nál a WC-ot Co-burok veszi körül.

Az eljárás nemcsak az új termékek előállításánál terjedt el, hanem alkatrészek felújításánál is alkalmazzák. Plazmaszórási eljárások főbb jellemzői és a velük elérhető bevonatok tulajdonságai:

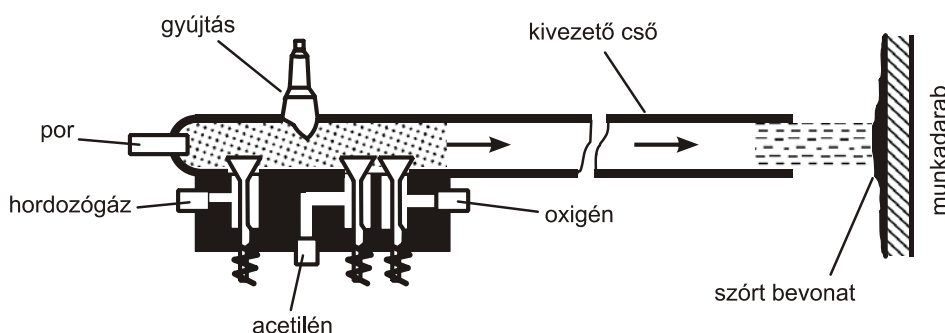
- Hagyományos plazmaszórás: 20–40 kW közötti teljesítménnyel történik, az elérhető gázsebességek kb. 400–1000 m/s közötti értékek, míg a porrészecske-sebességek kb. 80–300 m/s között vannak. A rétegek tapadási szilárdsága 7–25 MPa, porozitás fémeknél 4–10%, kerámia anyagoknál 5–15%. A bevonási teljesítmény fémeknél 5–8 kg/h, oxidkerámia anyagoknál 3–5 kg/h.
- Nagy energiájú plazmaszórás: 50–80 kW teljesítménytartományban, de a hagyományoshoz képest 2–3 szoros gázfelhasználással történik. Az elérhető gázsebességek 1000–3000 m/s, a porrészecske-sebességek 200–610 m/s lehetnek. A bevonatokkal elérhető tapadási szilárdság 20–67 MPa, míg a porozitás fémeknél 1–5%, kerámia anyagoknál 2–10%. A bevonatok kopásállóság szempontjából kb. 30–50%-kal felülmúlják a hagyományos plazmaszórással készült bevonatokat. Nem túl gazdaságos, mert 50–70% között van a porrészecskék feltapadási aránya (a többi visszaverődik a felületről).

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

- Alacsony nyomású vagy vákuum plazmaszórás: 40–60 kW teljesítménnyel, alacsony nyomású (20 mbar) kamrában történik. Hatására a plazmasugár hosszúsága 400–600 mm-re növekszik, és a sebessége is jelentősen megnő. Mivel a részecskék nem kerülnek kapcsolatba a környezet O_2 - és N_2 -tartalmával, az így készült bevonatok tömörebbek, kevesebb oxidzárványt tartalmaznak, mint a levegőn végzett szórásnál. A tapadási szilárdság növelése céljából egy külön áramforrásról kb. 100–150 A áramot hoznak létre a plazmagenerátor katódja és a munkadarab között.
- Vízgőz munkagázos plazmaszórás: 150–200 kW teljesítményű berendezéssel történik. Munkagázként vízgőzt alkalmaznak, katódként grafitot, anódként rézből készült forgótárcsát, fúvókaként rézhüvelyt használnak. Az anódfojt a tárcsa peremén alakul ki, a grafit katód a vízgőz hatására fogy, előtolása kb. 5 mm percenként. Szórási teljesítménye igen nagy, kb. 15 kg/h Al_2O_3 -bevonat létrehozására is képes, de fémek szórására nem igazán alkalmas. A plazmagenerátor nagy tömege és zajszintje (kb. 135 dB) csak gépesített szórásra teszi alkalmassá.
- Sűrített levegős plazmaszórás: munkagázként sűrített levegőt alkalmaznak, katódja réz hűtőtömbbe sajtolt cirkónium. A levegő munkagáz következtében fémek szórására nem igazán alkalmas, továbbá jelentős mennyiségű nitrogén-oxid és ózon képződésével kell számolni az üzemeltetés alatt.

4.2.4. Robbantásos szórás

Az 1950-es évek végétől elterjedt technológia a detonációs vagy lökeshullámos bevonatolás. Az eljárás lényege, hogy nagy sebességgel ütköztetik a munkadarabot a bevonat anyagával; vagyis rárobbantják, rálövik az erre a célra kialakított ágyúból a megfelelő keveréket a hordozóra. Több válfaja ismeretes attól függően, hogy milyen állapotú a bevonásra szánt anyag (szilárd por, folyadék, keverék stb.); milyen a robbantási folyamat (közös terű robbantás, rálövés stb.).



4.12. ábra
Robbantásos szórás

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

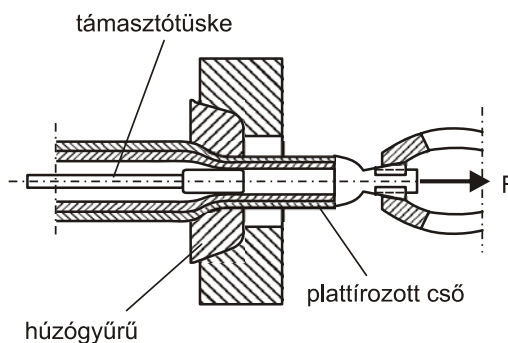
A legegyszerűbb eljárás (4.12. ábra) során a felszórandó poranyagnak szabályozott gázrobbantással igen nagy kinetikus energiát adnak, és a hordozó felületének ütköztetik. A gázrobbantáshoz általában oxigén–acetilén gázkeveréket használnak. A folyamatos robbantás gondos por- és gázadagolást igényel. Az így készülő bevonatok vastagsága változó (általában néhány tized mm), porozitásuk elég alacsony (0,5%), keménységük esetenként igen nagy. A kötés tapadási (adhéziós) szilárdsága kb. 70 MPa, és a bevonat érdessége 6–10 μm .

4.3. Plattírozás

A plattírozási vagy borítási eljárások egyik csoportja a bevonatot képező plattíryananyag és a plattírozandó anyag együttes képlékeny alakításával valósul meg. Az eljárások másik csoportjánál a nagyobb tömegű, fixen alátámasztott plattírozandó darabra robbantás vagy súrlódás (dörzsölés) révén kerül rá a plattírréteg.

4.3.1. Húzásos plattírozás

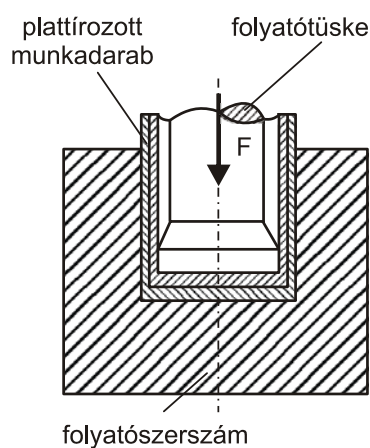
Húzásos plattírozás (4.13. ábra) során a plattírozandó csövet vagy rudat a ráhúzott plattíryananyagcsővel együtt egy meghatározott alakváltozást biztosító húzógyűrűn húzzák át.



4.13. ábra
Húzásos plattírozás

4.3.2. Folyatásos plattírozás

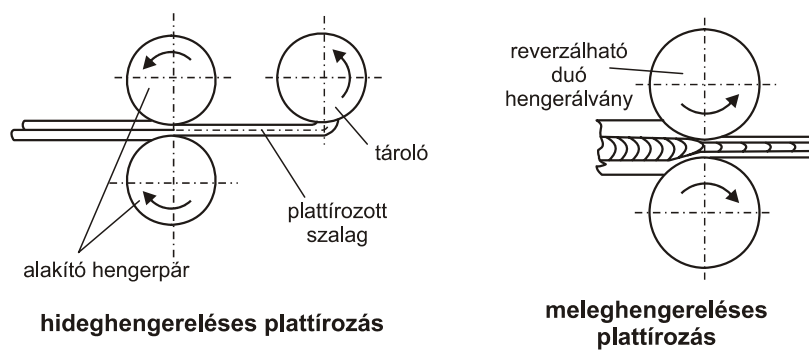
Folyatásos plattírozáskor (4.14. ábra) a plattírozandó, illetve a plattíryanagegyüttes hátrafolyatásával hozzák létre a bimetall csövet, amelyben a plattírréteg a külső vagy a belső oldalon is lehet.



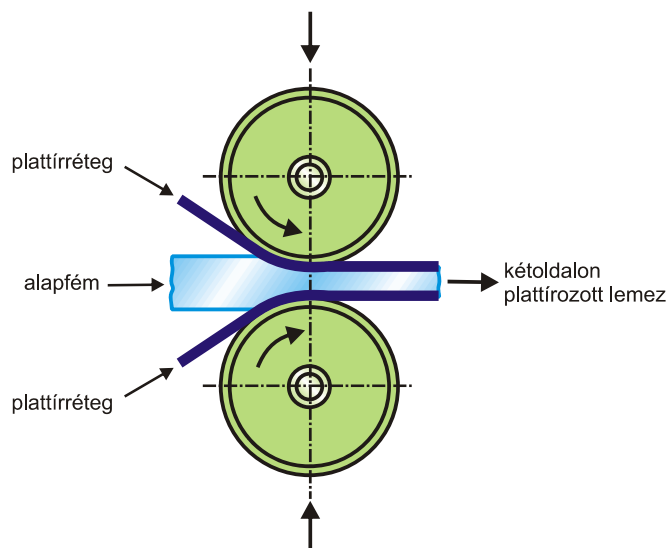
4.14. ábra
Folyatásos plattírozás

4.3.3. Hengerléses plattírozás

A hideg- vagy megleghengerléses plattírozásnál (4.15. ábra) a plattírozandó anyagot és a plattírányagot együttesen hengerlik a méreteiktől (vastagságuktól) és alakítási szilárdságuktól függő hőmérsékleten. A plattírréteg a kezelendő lemez, illetve szalag egyik vagy mindkét oldalára felvihető.



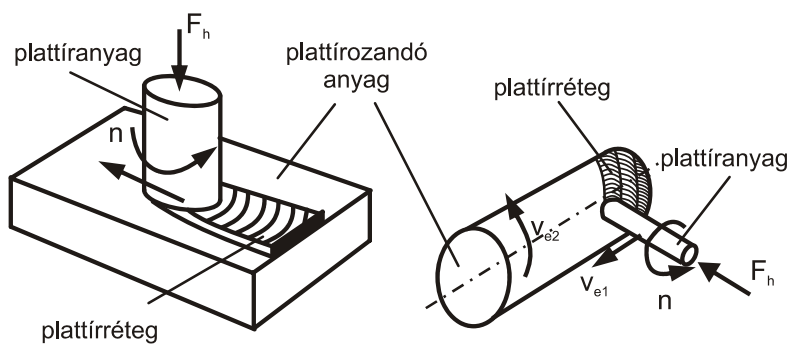
4.15. ábra (I.)
Hengerléses plattírozás



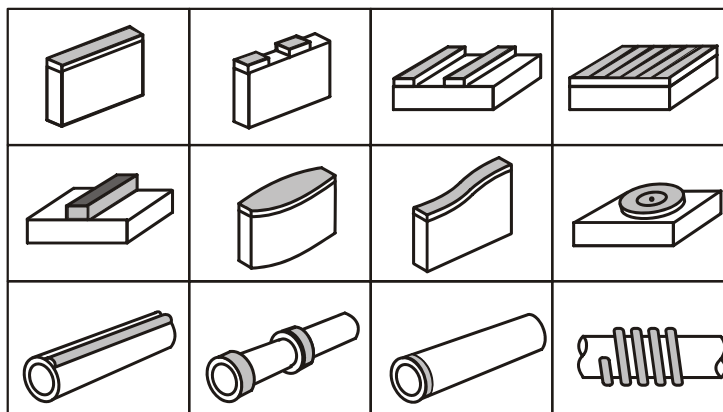
4.15. ábra (II.)
Hengerléses plattírozás

4.3.4. Dörzsplattírozás

Dörzsplattírozáskor (4.16. ábra) a plattírányag rudat forgatás (n) közben hozzányomva (F_h) a munkadarabhoz (plattírozandó anyag) a két anyag határán súrlódási hő, illetve dörzshatás alakul ki. Megfelelő elmozdítással (v_e) a teljes felületre kiterjedő folyamatos plattírréteg hozható létre.



4.16. ábra (I.)
Dörzsplattírozás

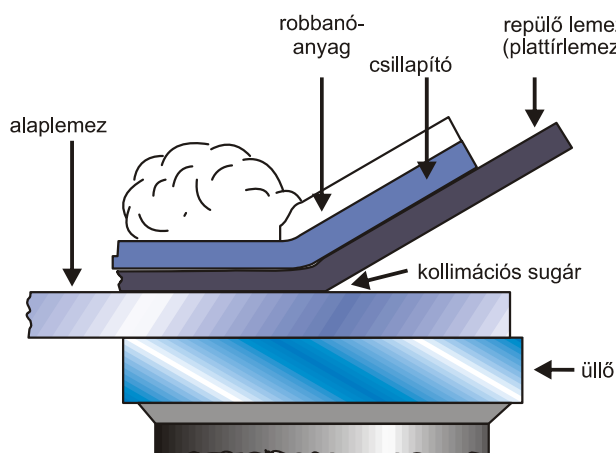


Dörzsplattírozással bevonható alakzatok

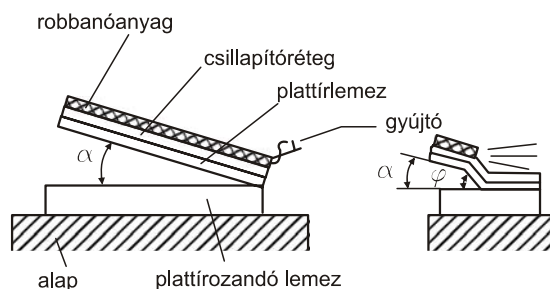
4.16. ábra (II.)
Dörzsplattírozás

4.3.5. Robbantásos plattírozás

A robbantásos plattírozás (4.17. ábra) célszerűen beállított plattírlemezre kerülő robbanóanyag-réteg teljes szélességben történő begyűjtésével indul. A kialakuló detonációs nyomáshullám a plattírlemezt nagy sebességgel felütközteti a stabilan rögzített alaplemezre, melynek felületén kialakuló normál- és csúsztatófeszültségek hatására kötődik a plattírréteg.

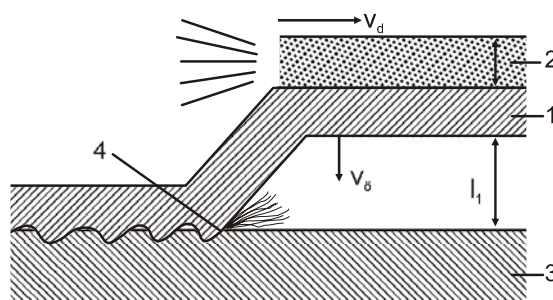
4.17. ábra (I.)
Robbantásos plattírozás

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



4.17. ábra (II.)
Robbantásos plattírozás

Azonos vagy különböző anyagminőségű fémek felületi kötését kialakító eljárás energiaforrása a robbanóanyag, „szerszáma” a detonáció kiváltásával létrehozott nyomáshullám. A kötés kialakulásának mechanizmusát a **4.18. ábra** szemlélteti.



4.18. ábra
A kötés kialakulásának mechanizmusa robbantásos plattírozásnál

A plattírlemez (1) és az alaplemez (3) összezapódásánál fellépő nagy nyomás miatt az alaplemez benyomódik, és a benyomódás mellett kidutorodás jön létre. Ugyanakkor az összezapódási zónából kifröccsen egy megolvadt fémsugár (4), ami az alaplemez és a plattírlemez anyagából tevődik össze. A fémsugár létrejötte következtében a lemezekon fémtiszta felületek alakulnak ki, amelyek kötésbe kerülnek egymással. A fémsugarat a folyamat előrehaladása során az alapfém kidutorodása fokozatosan eltéríti, és a rácsapódó plattírlemez bezárja. Ezután a becsapódási pont a kidutorodás tetejére tevődik át, majd az egész ciklus megismétlődik, és jellegzetes hullám formájú kötés jön létre. Jó minőségű kötés létrehozása érdekében a technológia paramétereit (v_d detonációsebesség, v_δ összezapódási sebesség, l_1 légrés, R = robbanóanyag/burkolólemez tömegarány) úgy kell méretezni, hogy az összezapódás pontjában a fémek képlékeny alakváltozása bekövetkezzék, de a létrejövő feszültségek a fémeket ne roncsolják.

A robbantásos plattírozás elvét alkalmazó eljárások a kötendő fémek alakja szerint:

- lemezplattírozás: ez esetben a kötést lemez formájú anyagok között hozzák létre, pl. réz–ezüst összetételű, kétrétegű villamos érintkezőanyag készítésekor; a plattírozott tömbből hengerelhető ki az érintkezők alapanyagául szolgáló szalag;
- rúdplattírozás: ez esetben a kötés egy rúd külső felülete és az azt teljes hosszában vagy egy szakaszán körülvevő cső belső felülete között jön létre; példaként acélrúd és rézcső kötése említhető.

Robbantásos plattírozással a gyártmányokat vagy különleges műszaki paraméterek elérése érdekében, vagy egyszerűen gazdasági megfontolásból készítik. Az ismertebb alkalmazás két- vagy többrétegű plattírozott alapanyagok gyártása, melyek a következő iparágakban kerülnek felhasználásra:

- villamosipar: alumínium–réz, alumínium–acél, réz–acél síncsatlakozások és kábelösszekötő szerelvények; réz–ezüst, acél–ezüst, réz–acél érintkezőanyagok;
- vegyipar és reaktortechnika: acél–titán, acél–tantál, acél–bronz anyagú tartályok, autoklávok, hőcserélő csőfalak, csatlakozódíomok;
- járműipar: ötvözetlen acél – rozsdamentes acél, alumínium–acél, alumínium–titán anyagok, autók, hajók és repülőgépek karosszériáihoz és szerkezeti elemeihez.

A következő plattírozott termékek gyártása is megvalósítható:

- többrétegű érintkezőanyagok (acél–ezüst, réz–ezüst, réz–alumínium stb.);
- acél–alumínium csatlakozódíomok alumíniumkohászati célokra;
- alpakka–ezüst, acél–nikkel szalagok gombakkumulátorok gyártásához;
- réz–acél, réz–alumínium, acél–alumínium kétrétegű csavaralátétek kontakt-korrózió csökkentése céljára.

4.4. Gőzfázisból történő bevonatolások

Ezek a bevonatolási technológiák bizonyos területeken máshogy nem megvalósítható bevonatok létrehozására alkalmasak. Elterjedésük különösen széles körű a forgácsolószerszámok gyártása területén. Például a keményfémlapkák ma már többségükben ilyen bevonatolással készülnek. A gőzfázisból történő bevonatolások két alapvetően különböző alcsoportja:

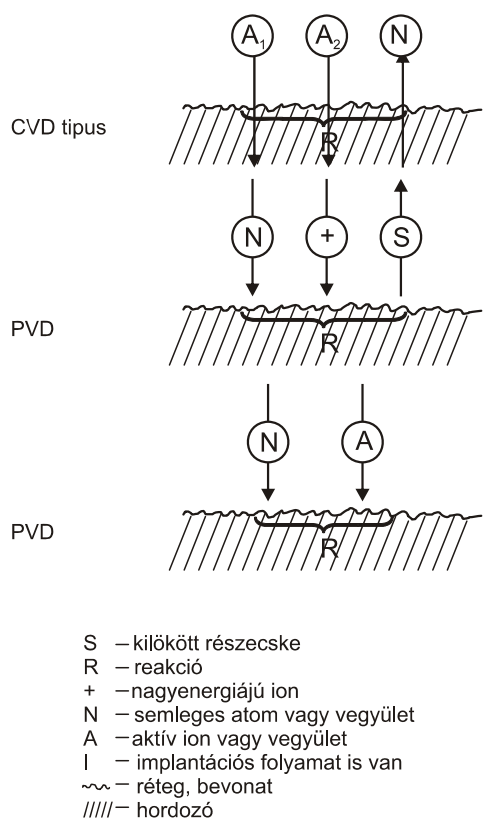
- a fizikai típusúak (PVD, Physical Vapour Deposition),
- a kémiai típusúak (CVD, Chemical Vapour Deposition).

Mindkét eljárás csoport a mikroelektronikai ipar talajából nőtt ki és került szélesebb körű felhasználásra. Alkalmasak arra, hogy tribológiai célokra elemeket, vegyületeket, ötvözeteket és kompozitanyagokat válasszanak le finomra köszörült vagy polírozott felületekre. A keletkező rétegek tömörek, vastagságuk 0,1–15 µm között folyamatosan szabályozható, felületi érdességük, tapadásuk kiváló. A réteg-

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

épülés sebessége a PVD-technológiáknál kb. 1–100 $\mu\text{m}/\text{óra}$, a CVD-technológiáknál kb. 1–3 $\mu\text{m}/\text{óra}$.

A PVD- és CVD-eljárások lényege, hogy a felületi bevonat kialakításakor a megfelelő reakciók a hordozó felületén jönnek létre, biztosítva ezzel a bevonás egyenletes minőségét. A PVD-eljárásokban a gőzfázis átalakítandó vegyületet vagy nem tartalmaz, vagy a meglévő vegyület bomlása még gőzfázisban megtörténik fizikai úton. A CVD-eljárások ezt a célt valamilyen vegyületnek (vagy vegyületeknek) felületen történő termokémiai bontásával és újabb reakcióval érik el. A felületi reakciók alapjelenségeit a kétféle eljárás családra a **4.19. ábra** mutatja be.

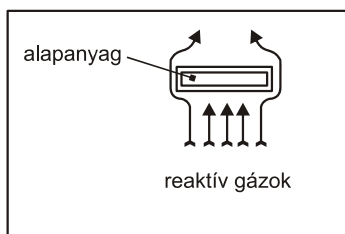


4.19. ábra

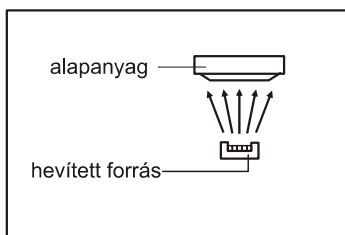
A PVD és CVD felületi reakcióinak alapjelenségei

Mind a CVD-, mind a PVD-technológiáknak több altípusát alkalmazzák. Ezen belül is szinte mindenfajta bevonathoz, alapanyaghoz más-más paraméterek megválasztása szükséges. Az egyes altípusoknak nem minden esetben alakult ki a nemzetközileg egységesen használt elnevezése. Összehasonlítás végett a **4.20. ábra** mutatja az egyes eljárásváltozatok legfontosabb jellemzőit.

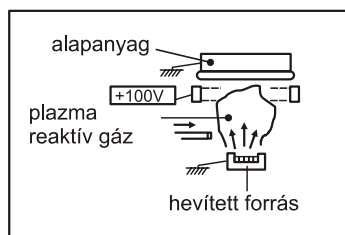
4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



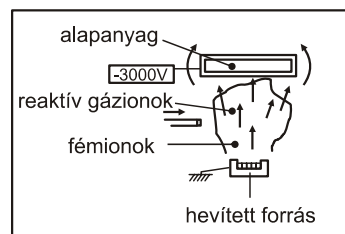
CVD: reakcióhőmérsékletre felhevített alapanyagon kémiai reakcióból csíráképződéssel és növekedéssel vegyi bevonat kialakítása
CNTD: termokémiai bevonás vegyi úton vezérelt (csíráképződéssel orientált) kristálynövekedéssel
Tapadás, behatolás: jó
Nyomás: 10^2 – 10^5 Pa
Bevonási sebesség: $10 \mu\text{m/h}$



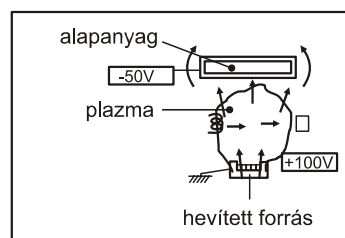
PVD: hevített forrásból elpárologtatott atomok közvetlen, fizikai leválasztása a kordozón
Tapadás, behatolás: gyenge
Nyomás: 10^{-3} Pa
Bevonási sebesség: 10 – $100 \mu\text{m/h}$



ARE: az elpárologtatott atomok és a reaktív gáz aktiválása a forrás szekunder elektronjaival, vegyületi réteg kialakításához alacsony hőmérsékletű hordozón
Tapadás: jó
Nyomás: 2 – 10 Pa
Bevonási sebesség: $100 \mu\text{m/h}$



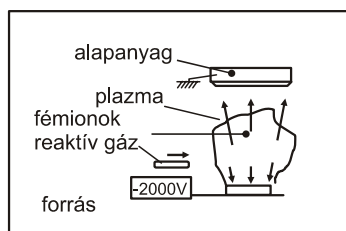
IP: elpárologtatott atomok és reaktív gáz ionizációja önfenntartó gázkisülésben és a keletkező ionok vegyületi réteggé történő kondenzációja előfeszített hordozón
Tapadás, behatolás: kitűnő
Nyomás: 1 – 15 Pa
Bevonási sebesség: $100 \mu\text{m/h}$



EARE: kisegítő elektródával fenntartott plazmás ionizációból történő vegyületi réteg leválasztás
Nyomás: $0,1$ – 10 Pa

4.20. ábra (I.)
A PVD- és CVD-alapeljárások legfontosabb jellemzői

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

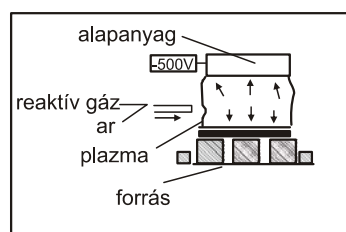


DS-PVD: önfenntartó gázkisülésben keletkező pozitív ionok bombázásával gázfázisba vitt anyag közvetlen vagy reakció utáni kondenzálódása az alacsony hőmérsékletű hordozón.

Tapadás: jó

Nyomás: 1–10 Pa

Bevonási sebesség: 1–10 $\mu\text{m/h}$

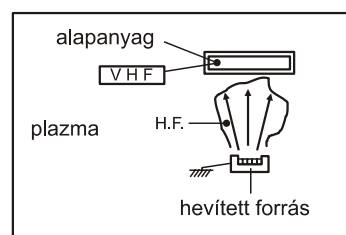


MS-PVD: hasonló az előzőkhöz

Tapadás: kitűnő

Nyomás: 1–10 Pa

Bevonási sebesség: 10–100 $\mu\text{m/h}$



LPPD: az elpárolgatott atomok és reaktív gázok ionizációja nagyfrekvenciás gerjesztéssel fenntartott alacsony nyomású gázkisülésben, és a keletkező ionok vegyületi réteggé történő kondenzációja hideg hordozón.

Tapadás: jó

Nyomás: 0,1–1 Pa

Bevonási sebesség: 10–100 $\mu\text{m/h}$

PVD	Physical Vapour Deposition	Fizikai gőzfázisú bevonatolás
DS-PVD	Diode Sputtering-PVD	Diódás porlasztású PVD
MS-PVD	Magnetron Sputtering-PVD	Magnetronos porlasztású PVD
LPPD	Low Pressure Plating Deposition	Alacsony nyomású bevonatolás
CVD	Chemical Vapor Deposition	Kémiai gőzfázisú bevonatolás
EARE	Enhanced ARE	Növelt aktiválású reaktív párologtatás
IP	Ion Plating	Ionos bevonás
ARE	Activated Reactive Evaporation	Aktivált reaktív párologtatás

4.20. ábra (II.)

A PVD- és CVD-alapeljárások legfontosabb jellemzői

Új CVD- vagy PVD-bevonatos hidegalakító szerszámok gyártásának vázlatos műveleti sorrendje a következő:

1. kiválasztott anyag beszerzése rúd, tömb vagy lap formájában
2. nagyoló megmunkálás
3. feszültségsökkentő hőkezelés 600 °C-on

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4. simító megmunkálás
5. vákuumedzés
6. megeresztés kb. 500 °C-on, min. kétszer 58–60 HRC-re
7. szerszámblokk összeszerelése és beállítása
8. 5000–10 000 darabos előszéria alakítása a megfelelőség ellenőrzésére
9. felületelőkészítés: homokfúvás, polírozás, tisztítás a felületi érdesség beállítása, illetve a kis súrlódási tényező (kedvező siklási jellemzők) biztosítása érdekében ($R_a < 1 \mu\text{m}$ tükröfényes állapot beállítása)
10. CVD- vagy PVD-bevonatolás
11. CVD esetén második edzés és megeresztés vákuumkörnyezetben
12. szerszámblokk-összeállítás
13. szerszámblokk-beállítás
14. terheléspróbák

Használt hidegalakító szerszámok felújításakor további feladatként felmerülő javító hegesztés műveleti sorrendje:

1. szerszámanyaghoz, hegesztési eljárásához és a geometriai torzulások minimalizálásához igazodó hegesztőanyag kiválasztása és beszerzése
2. előmelegítés 400 °C-ra
3. hegesztés
4. hevítés 450 °C-ra, 2–3 órás hőntartással
5. lassú hűtés

CVD és PVD bevonatok alkalmazási jellemzői (**4.7. táblázat**):

- összetétel
- típus
- azonosító szín
- bevonatoló eljárás
- bevonatolás hőmérséklete
- rétegszerkezet (mono-, multi-, gradiens-, nano-)
- rétegvastagság [μm]
- mikro- vagy nanokeménység (HV0,05)
- súrlódási tényező (száraz acélon)
- hővezetési tényező [W/mK]
- termikus stabilitás határhőmérséklete (oxidációs hőmérséklet) – maximális alkalmazási hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
- bevonat belső (nyomó) feszültsége [GPa]
- megmunkálható anyagok
- kulcsfontosságú jellemzők, illetve előnyök
- korrózióállóság
- vízzoldhatóság
- újrabevonatolhatóság
- alkalmazási adatok – elsődleges alkalmazási javaslatok (**4.8. táblázat**)

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.7. táblázat. PVD- és CVD-bevonatok jellemzői

mono = egyrétegű; multi = többrétegű; gradiens = többrétegű, elmosódott határfelületű; nano = nanoszerkezetű
(A bevonatos kompozitok egy része az ún. *gradiens anyagok* közé tartozik. Ez azt jelenti, hogy mikroszerkezetük és/vagy összetételük megtervezett, minek révén fokozatos
változásokat – elmosódott réteghatárokat – tartalmazó darabok övántására alkalmaznak a várható üzemiállás helytelen váltókor követelményeinek megfelelően)

összetétel	TiN	TiCN	TiCN+TiN	TiAlN	TiAlN+TiN	TiAlN+WC/C	WC/C	AlC/N	CrN	CrC	Zn	MoS ₂	MoST	polikristályos gyémánt	gyémánt-graft	TiC	TiC+TiN
tipus	kemény, kopásálló	kemény, szívós, hőszokkálló		kemény, oxidáció-álló	kemény, szívós, hőálló	kemény, jó sikkási	kis súrlódási, jó sikkási	kemény, kopásálló	oxidáció-állóság	csakély adhézió	csakély adhézió	lágú, kenhető	kemény, jó sikkási	kemény, stabil	DLC		
azonosító szín	arany	kékesszürke	arany	indigakék-szürke	arany	fehérszürke	sötétszürke	kékesszürke	ezüst	ezüst	arany	ezüst	ezüst	fényes szürke	sötétszürke		
bevonatoló eljárás	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	CVD	CVD
bevonatolás hőmérséklete [°C]	350–500	500	500	480–600	480–500	500	250	500	350	350	150		700				
bevonat szerkezet: mono-, multi-, gradiens-, nano	mono	multi, gradiens	multi, gradiens	mono, multi, nano	multi, nano	lemez, nano		mono	mono	mono		mono	mono	mono	mono		
rétegvastagság [µm]	1.0–5.0	1.0–7.0		1.5–12.0	1.5–5.0	3.0–6.0	1.0–4.0	2.0–6.0	1.0–10.0	1.0–10.0	1.0–4.0	0.5–1.0		4.0–30.0	1.0–10.0		
mikro- vagy nano-keményesség [HV0.05]	2200–3000	3000–4000	3000	3300–4500	3000–3500	3000	1000	3200	1750–2500	1850	2200–2800	20–50	2000	8000–10000	1000–4000	3200	3000
súrlódási tényező (száraz acélon)	0.40–0.65	0.25–0.45	0.4	0.25–0.50	0.25–0.50	0.15–0.20	0.10–0.20	0.40	0.40–0.55	0.5	0.5	0.05–0.15	0.01–0.06	0.05–0.20	0.05–0.20	0.60	0.65
hővezetési tényező [W/m K]	70	10		50	50	800											
termikus stabilitási határ (oxidációs) max. alk. hőmérséklet [°C]	500–600	400–465	400	800–900	800		300	1100	650–700	700	550	800	450	800	300–450	350	500
bevonat becsült feszültség [GPa]	-1.5–-2.5	-4.0	-0.4	-1.1–-4.0	-1.3–-1.5	-1.7–-2.0		-3.0	-1.5–-2.0								
megmunkálható anyagok (vágási alkalmazásoknál)	acélok	acélok HRC>40, Ti, Ni, bronz	minden	öntővasak, Ko acélok, Al- és Ti-ötv.	minden				Cu-ötv., bronz, sárgaréz		alakítható alumínium, titán			öntészei alumínium, grafit	Al-ötv., Cu-ötv., grafit		
külsőfontosságú jellemzők ill. előnyök	széles körű, károsodásmentes												szilárd kenőanyag			jó	jó
korrozálhatóság	jó	jó		jó					kiváló			igen	jó				
vízoldhatóság	nem						nem					nem					
újra-bevonathatóság	igen						igen					nem					
alkalmazási adatok, elsődleges alkalmazási javaslatok	forgácsolás, alakítás, fűrészesítés	marás, sajtolás, alakítás, hűtés	forgácsolás, alakítás, fűrészesítés	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.	fűrés, esztergálás, szárazforg.

4.8. táblázat. Ajánlott PVD- és CVD-bevonatok az alkalmazás függvényében

Alkalmazás	Jó	Jobb	Legjobb
Lyukasztás (Piercing)	TiN	TiCN CVD TiC/TiN	MoST™
(Lemez)kivágás (Blanking)	TiN	CVD TiC/TiN	TiCN
Finomkivágás (Fine Blanking)	TiN	TiCN	MoST™
(Mély)húzás (Drawing), Peremzés (Flanging), Profilalakítás (Forming), Folyatás (Extrusion)	CrN	CVD TiC/TiN vagy TiCN	CVD TiC vagy MoST™
Hidegfejezés (Cold Heading) / Ütvesajtolás (Impact Extrusion)	TiN	CVD TiC/TiN	MoST™

4.4.1. PVD vagy fizikai gőzfázisú bevonatolás

Fizikai gőzfázisú bevonás (Physical Vapour Deposition $\equiv$ PVD) esetében a bevonóanyagot (**4.21. ábra**) vagy a leendő bevonat komponenseit (melyek átalakítandó vegyületeket nem tartalmaznak) fizikai módszerekkel (párologtatással, porlasztással) szilárd állapotból gőzfázisba viszik, és az így létrejött bevonatalkotórészeket a munkadarab felületére csapatják. A kezelés vákuumban történik, és a munkadarab-felület hőmérséklete nem haladja meg az 550 °C-ot, így előnyös készre forgácsolt, illetve. nemesített gyorsacél szerszámok bevonására is, pl. max. 4 μm vastag TiN-réteggel ($2 \text{ Ti} + \text{N}_2 \rightarrow 2 \text{ TiN}$), hiszen nem következik be allotróp átalakulás miatti méretváltozás vagy nagyfokú megeresztődés (kilágulás).

Az eljárásváltozatok – vákuumgőzölés, katódporlasztás, ionsugaras bevonatolás, illetve leválasztás – megkülönböztetésének alapja az, hogy megolvasztott párologó vagy hideg atomütköztetéssel porlasztott bevonóanyaggal, illetve elektromosan semleges (földelt) vagy negatív potenciálra kapcsolt bevonandó anyaggal működnek-e (**4.22. ábra**). Az ionsugaras eljárásváltozatoknál a keletkező plazma lehetővé teszi keményebb, tartósabb rétegek képződését a bevonatoló kamrából, vákuumrendszerből, hevítőberendezésből és gázellátó egységből álló célberendezésben.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

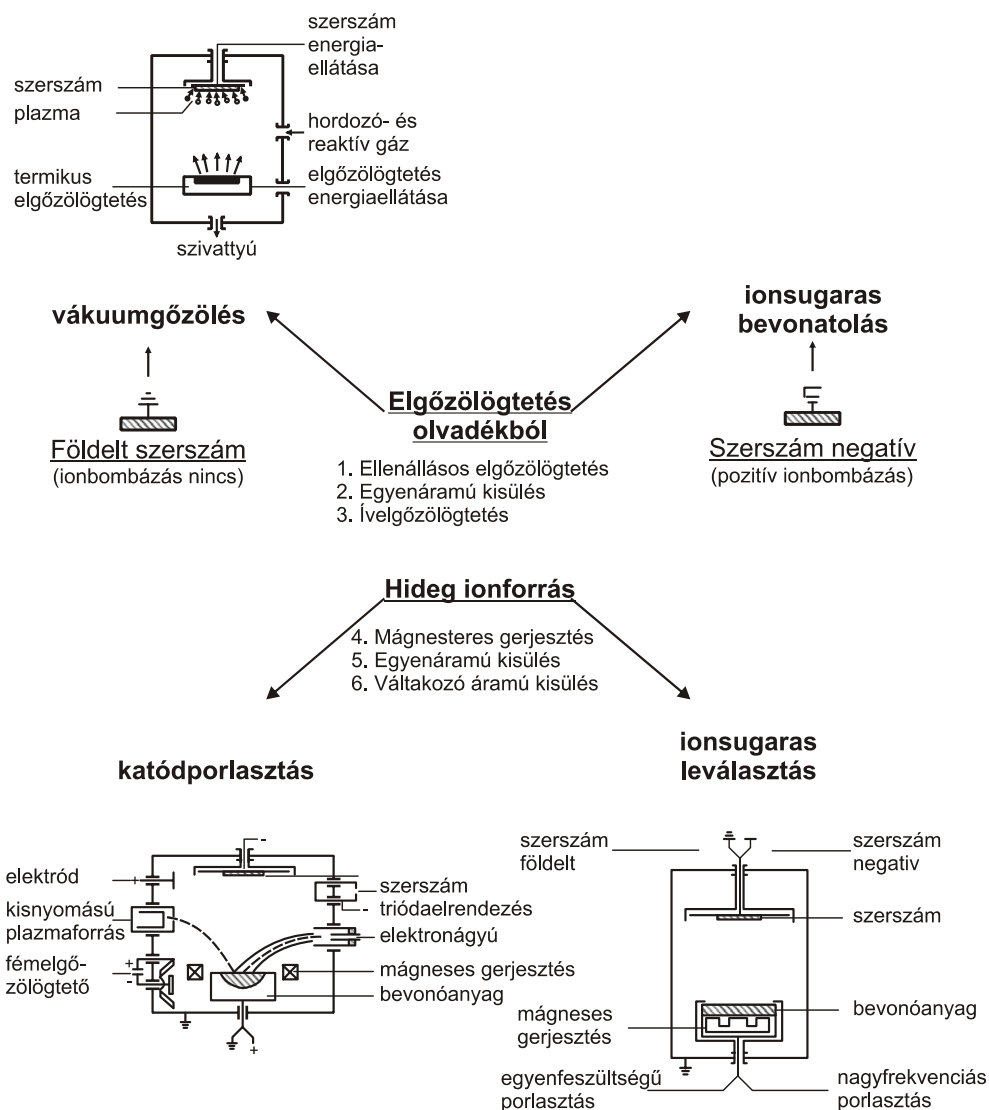
Elem Vegyület	B	Be	Mg	Al	Si	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	La	Hf	Ta	W
Hidrid						ScH ₂	TiH ₂		CrH CrH ₂						ZrH ₂	NbH ₂						
Borid	B	Be ₂ B ₃		AlB ₃	SiB ₃		TiB ₂	VB ₂	CrB CrB ₂	MnB	FeB Fe ₃ B Fe ₂ B	CoB	Ni ₃ B NiB Ni ₂ B ₃		ZrB ₂	NbB ₂	MoB Mo ₂ B ₃ Mo ₃ B		LaB ₃	HfB ₂ HfB ₆	TaB TaB ₂	
Karbid	B ₄ C	Be ₂ C			SiC		SiB ₃	TiC	VC VC ₂ VC ₃		Cr ₃ C ₂ Cr ₂ C ₃ Cr ₇ C ₃	Fe ₃ C	Co ₃ C	Ni ₃ C	ZrC	NbC	MoC MoC ₂			HfC	TaC Ta ₂ C ₃	WC W ₂ C W ₃ C
Nitrid	C-BN h.BN	Be ₃ N ₂		AlN	Si ₃ N ₄		TiN	VN	Cr ₃ N Cr ₂ N		Fe ₃ N Fe ₂ N Fe ₄ N	Co ₃ N	Ni ₃ N		ZrN	NbN	MoN ₂			HfN	TaN	W ₂ N
Oxid		BeO	MgO	Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃	SiO ₂ SiO ₂		TiO ₂	VO ₂	Cr ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃				ZrO ₂		SnO ₂			HfO ₂		WO ₂
Szilicid	B ₄ Si						TiSi TiSi ₂ Ti ₃ Si ₂	VS ₂	CrSi ₂	MnSi	FeSi	CoSi	NiSi		ZrSi	NbSi ₂	MoSi ₂			HfSi ₂		WSi ₂
Foszfid	BP		MgP	AlP							FeP	CoP	Ni ₃ P Ni ₂ P									
Szulfid											FeS					NbS ₂	MoS ₂					WS ₂
Szelenid																NbSe ₂	MoSe ₂				TaSe ₂	WSe ₂

4.21. ábra

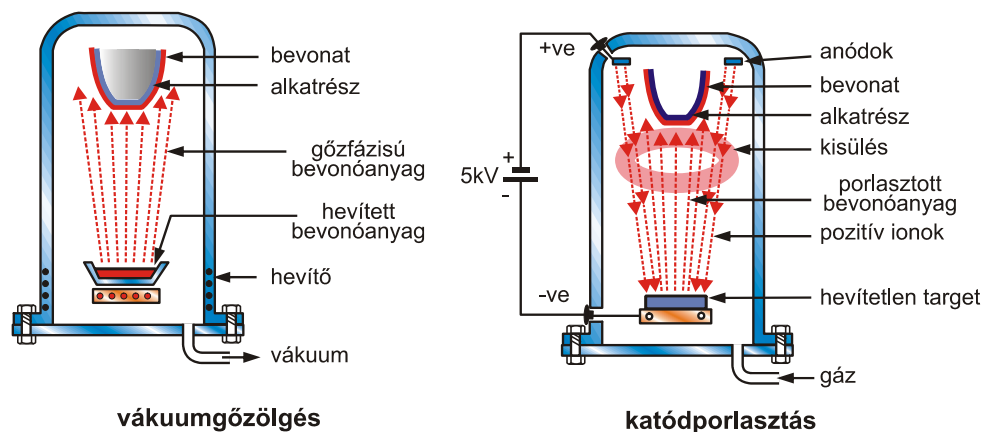
Tribológiai és dekoratív célú bevonatoló vegyületek

Alkalmazási jellemzők:

- vékonyabb és kisebb szilárdságú lemezek alakító szerszámaihoz; vékony bevonatos lemezek alakításához; kedvezőtlen kenési viszonyokhoz, felülethevüléssel járó alakításokhoz; továbbá szerszámfelújításra is alapos felület-előkészítés és szükség szerinti javító hegesztés után;
- kemény, kopásálló, kedvező súrlódási tényezőjű, vékony filmszerű bevonatok előállítására;
- „kis hőmérsékletű” eljárás, rendszerint 500 °C-os, illetve annál kisebb hőmérséklettel, a geometriai torzulások minimalizálása érdekében, de limitált adhéziós tapadással, számottevő diffúziós hatás nélkül;
- nagyvákuumos (10⁻⁵ mbar) környezetben, a reaktív fém vagy vegyülete elgőzölögtetésével és ionizálásával, az ionok hozzávezetett gázzal való reakciójával, majd a reakcióterméknek – munkadarab és kamrafal között alkalmazott feszültségkülönbség hatására – felületre történő lecsapódásával;
- általában 1–6 µm bevonatvastagság elérésével;
- kezelés után 150 °C-ra történő lehűtéssel, felületi oxidáció elleni védelemmel;
- a bekövetkező kilágyulás miatti utólagos hőkezeléssel – edzéssel és megereztéssel – minimalizálva a bekövetkező geometriai torzulásokat;
- a katódporlasztással, majd a hordozó felületén való lecsapolással.



4.22. ábra (I.)
PVD-eljárásváltozatok



4.22. ábra (II.)
PVD-eljárásváltozatok

A bevonati anyagok és a bevonandó felület tisztasága (oxigén-, vízgőz- stb. mentes), valamint a párologtató források működése végett a fenti folyamatokat nagyvákuumban, kb. 10^{-4} Pa nyomáson kell elvégezni. A vákuumrendszer alkalmazása ugyan költséges, de így rendkívül tiszta, homogén, jól tapadó réteg állítható elő. A felületi minőség olyannyira kiváló, hogy a technológia dekoratív bevonatolásokra, fényvisszaverő felületek kialakítására is alkalmas utólagos megmunkálás nélkül.

A vegyületi rétegek csaknem teljes spektrumban, széles sztöchiometriai tartományban vihetők fel, tetszőlegesen alacsony hőmérsékletű szubsztrátra. A vegyületek kialakításához szükséges energiát nem termikus gerjesztéssel, hanem fizikai aktiválásokkal biztosítják:

- önfenntartó gázkisüléssel;
- elektrongerjesztéssel (az elektronsugaras párologtató szekunder elektronjával), segédelektroda termikus emissziójával;
- rádiófrekvenciás gerjesztéssel.

A hordozó hőmérsékletét ennek ellenére érdemes néhány száz °C-osra választani. A magasabb hordozóhőmérséklet és az alacsonyabb gáznyomás ugyanis bizonyos határokon belül fokozza a felületi részecskék mozgását, vagyis csökkenti a keletkező réteg strukturális hibáit és ezen keresztül a belső feszültségeit. Természetesen a paraméterek változásával megváltoznak a fázisviszonyok is, amelyet a réteg színe is jellemez.

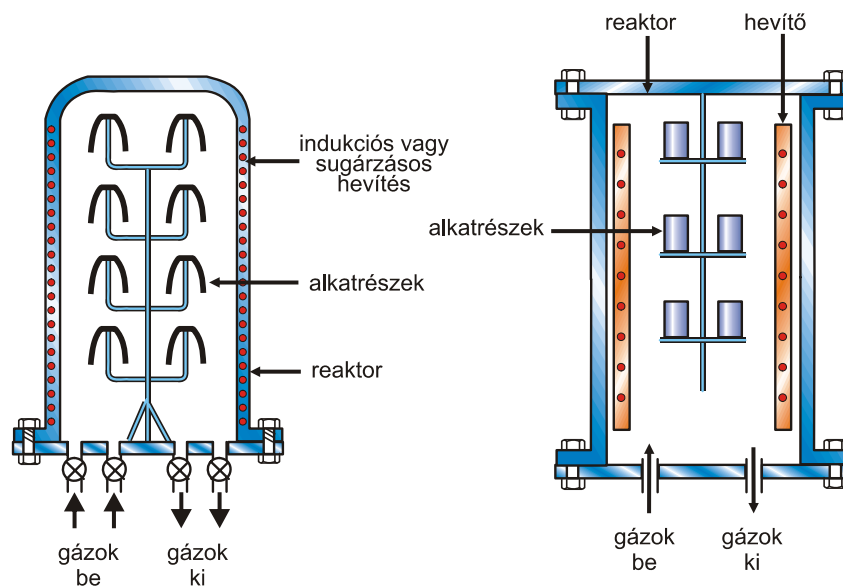
PVD-technológiával lehetőség van szubmikronos rétegek leválasztására is, amelyeknek sűrűdácscsökkentő hatása sok területen előnyös lehet. A PVD-technológiák hátránya ugyanakkor az alak- és kontúrhűség megoldásának nehézsége. Az egyenes vonalú anyagátvitelt megvalósító eljárások esetén külön kell gondoskodni a munkadarab megfelelő, egyenletes mozgatásáról, forgatásáról. A

rendezetlen anyagtranszport esetén (plazmaeljárások) már jobb a helyzet, de nem mindig kielégítő.

4.4.2. CVD vagy kémiai gőzfázisú bevonatolás

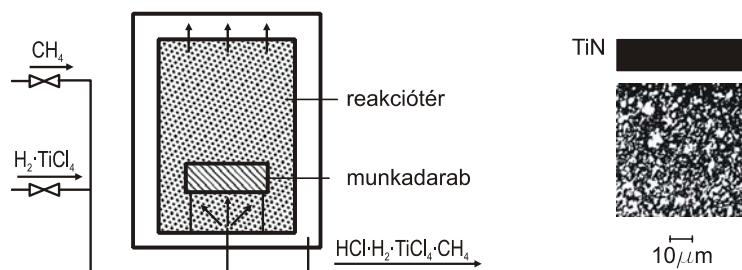
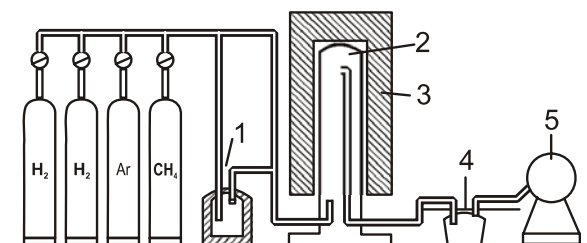
Kémiai gőzfázisú bevonás (Chemical Vapour Deposition $\equiv$ CVD) során két vagy több szabályozott összetételű, gőz-, illetve. gázállapotú vegyületet – megfelelő hőközlés mellett – kémiai reakcióba visznek, aminek során a bevonandó tárgy felülete közelében termokémiai bomlás és további reakciók játszódnak le. Az így keletkező gőzfázisú reakciótermék a munkadarab felületére lecsapódva szilárd bevonatréteget képez és rendszerint gázfázisú melléktermékek is keletkeznek. A kezelés a PVD-hez hasonlóan vákuumban történik, 850–1050 °C-os hőmérséklet-tartományban.

Mivel a kezelendő tárgy jelentős hőhatásnak van kitéve, ezért főként keményfémszerszámok felületkezelésére alkalmas, max. 10 μm rétegvastagságban. Az eljárásváltozatok (4.23. ábra) – hagyományos CVD: pl.: $(\text{TiCl}_4) + \{1/2 \text{ N}_2\} + \{2 \text{ H}_2\} \rightarrow [\text{TiN}] + \{4 \text{ HCl}\}$; kombinált CVD: $\{\text{CH}_4\} \rightarrow [\text{C}_{\text{gyémánt}}] + \{2 \text{ H}_2\}$; kémiai szórás: pl. $(\text{TiCl}_4) + \{\text{CH}_4\} + [2 \text{ Fe}] \rightarrow [\text{TiC}] + (2 \text{ FeCl}_2) + \{2 \text{ H}_2\}$; reaktív kémiai szórás – aszerint különböztethetők meg, hogy a leendő bevonatkomponens gőz állapotba vitele párologtatással vagy porlasztással történik-e, illetve a reakciókat csak hőközlés (hőkezelés) vagy plazmaaktiválás is segíti-e (a reakcióegyenletekben a () folyékony, a { } gáz és a [] szilárd állapotot jelöl).



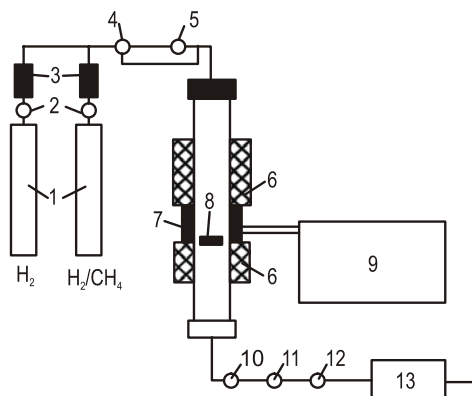
4.23. ábra (I.)
CVD-eljárásváltozatok

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



CVD bevonatoló berendezés

1. TiCl₄ - elgőzölgtető, 2. retorta, 3. fűtőharang
4. leválasztó (ciklon), 5. vékuumszivattyú



Gyémántréteget felvivő berendezés

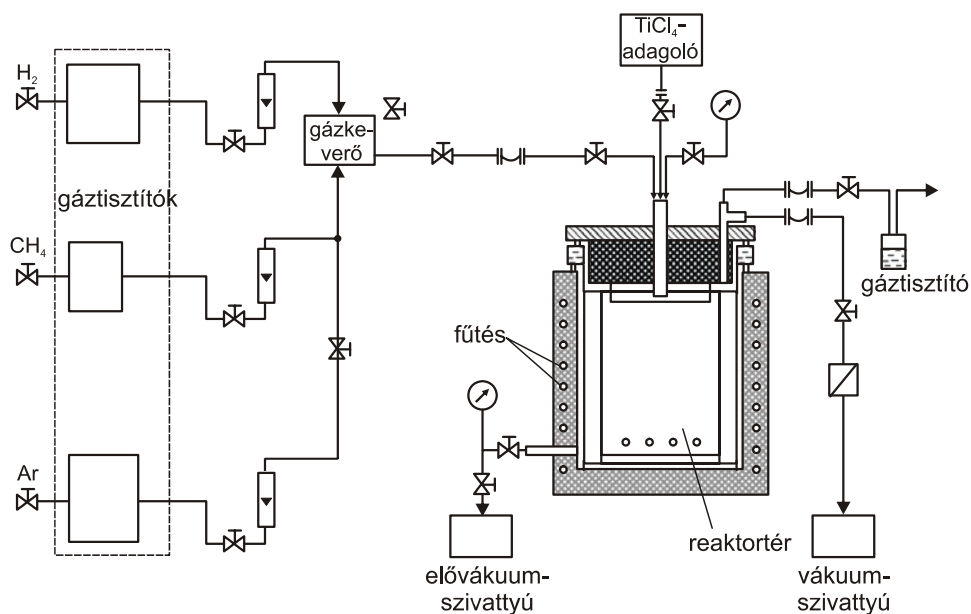
1. gázellátás, 2. reduktor, 3. rotaméterek, 4. háromállású szelep,
5. túszelep, 6. kemence, 7. reakciós kamra, 8. minta, 9. generátor,
10. vákuummérő, 11. túszelep, 12. vízcsap, 13. szivattyú

4.23. ábra (II.)
CVD-eljárásváltozatok

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

Alkalmazási jellemzők:

- 2 mm-nél vastagabb és akár 400 MPa szilárdságú lemezek kivágó-, alakító-, mélyhúzószerszámaihoz; korrózióálló és bevonatos lemezek kivágásához és alakításához; kenéshiányos, felülethevüléssel járó alakításokhoz; továbbá szerszámfelújításra is, alapos felületelőkészítés és szükség szerinti javító hegesztés után;
- általában Ti-komponensű bevonatok – pl. TiC, TiCN, TiN – előállítására (4.24. ábra), mono- vagy multiréteg formájában;
- „nagy hőmérsékletű” eljárás, esetenként 1000 °C-os, illetve annál nagyobb hőmérséklettel, a jó adhéziós tapadás és a kölcsönös diffúzió érdekében, de geometriai torzulások veszélyével;
- inert (Ar) vagy redukáló (H_2) gázatmoszférában történő felhevítéssel, majd reaktív gázok – CH_4 karbidokhoz, N_2 nitridekhez – és 550 °C-on elgázosított folyékony $TiCl_4$ fémes prekursor (elővegyület) hozzávezetésével;
- általában 8–10 μm bevonatvastagság elérésével;
- kezelés után 150 °C-ra történő lehűtéssel, felületi oxidáció elleni védelemmel;
- a bekövetkező kilágyulás miatti utólagos hőkezeléssel – edzéssel és megereztéssel – minimalizálva a bekövetkező geometriai torzulásokat.



4.24. ábra

Acélfelületek titánkarbiddal történő bevonatolása CVD-technológiájának vázlata

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

A reakciótérben elhelyezett szubsztrát hőmérsékletét a reakciófeltételnek megfelelő értékre kell beállítani, míg az áramló gőzökét ennél alacsonyabbra, hogy a reakció a hordozó felületén jöjjön létre. A rétegnövekedés sebessége a felületen kialakuló egyensúlyi állapottól függ. Néhány jellemző reakció egyenletét a **4.9. táblázat** adja meg.

4.9. táblázat. Néhány jellemző CVD-reakció

Réteg anyaga	Képzési reakció	Vivőgáz	Hőmérséklet (K)	Réteg vastagság (mm)	Keménység (HV)
TiC	$\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{YTic} + 4 \text{HCl}$ $\text{TiCl}_4 + \text{C} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{YTic} + 4 \text{HCl}$	H_2	1200–1350	6–8	>3000
Cr_7C_3	$\text{CrCl}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{YCr} + 2 \text{HCl}$ $7 \text{CrCl}_2 + 3 \text{CH}_4 \rightarrow \text{YCr}_7\text{C}_3 + 14 \text{HCl}$	Ar	1200–1400	8–12	~2000
$\text{W}_{2,3}\text{C}$	$2 \text{WF}_6 + \text{C}_6 + 13 \text{H}_2 \rightarrow \text{W}_2\text{C} + 5 \text{CH}_4 + 12 \text{HF}$ $2 \text{WF}_6 + \text{CH}_4 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{W}_2\text{C} + 12 \text{HF}$	Ar	600–800	20–50	~2000
Al_2O_3	$2 \text{AlCl}_3 + 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + 6 \text{HCl}$	H_2	1100–1500	2–4	>2400
TiN	$2 \text{TiCl}_4 + \text{N}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow 8 \text{HCl} + 2 \text{TiN}$	H_2	950–1300	5–10	>1800

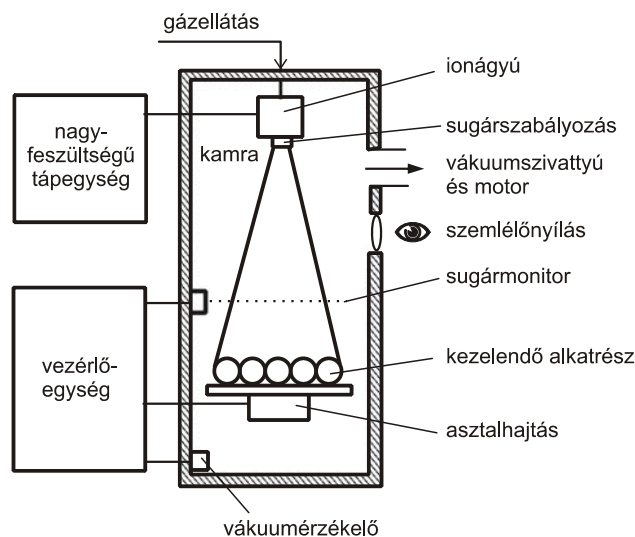
Az előállított rétegek sztöchiometriai aránya a reagens gáz adagolásával szabályozható, továbbá megfelelő gázadagolással arra is lehetőség van, hogy egyidejűleg több elemet, vegyületet válasszanak le. Az előállított rétegek nagy tisztaságúak, jól kötődnek a szubsztráthoz és kontúrhűek. Még bonyolult geometriájú munkadarabokon is viszonylag homogén réteg képződik.

Számos esetben viszont a rétegépülés magas hőmérséklete nehezen megoldható (pl. acélnál), vagy leküzdhetetlen problémát (pl. műanyagoknál) jelent. Acél esetében a legtöbb CVD-folyamat meghaladja az ausztenitesítési hőmérsékletet. Ha kezelést követő *in situ* edzésre nincs lehetőség, úgy az acélhordozó a bevonatolást követő lehűlés során kilágyul. Az utólagos nemesítő hőkezelés rendkívül kényes művelet, mert védőatmoszférában vagy vákuumban kell elvégezni úgy, hogy sem a felvitt bevonat ne károsodjon, sem a munkadarab ne deformálódjon. Bizonyos anyagok felvitele (pl. ZrC, HfC, TaC) még keménység hordozóra is gondot jelent a túl magas (~1600 °C) reakcióhőmérséklet miatt.

A WC-vegyületen kívül bizonyos bórvegyületek (pl. TaB_2 , TiB_2 , H-BN stb.) alacsonyabb hőmérsékletű felvitelét is megoldották. További lehetőség a gázaktiválás nem termikus úton történő növelése (pl. rádiófrekvenciás gerjesztéssel), ami a szükséges kémiai reakciók hőmérsékletét csökkenti. Ezzel a megoldással a CVD-technológia kombinálttá válik, CVD–PVD folyamatokat egyaránt magában foglal.

4.5. Ionimplantáció

Ionimplantációnál (4.25. ábra) kb. 10^{17} ion/cm² mennyiségű, nagy sebességre gyorsított N-, Mo-, Ti-, Co- stb. ion bombázza a vákuumban, illetve hűtött asztalon elhelyezett tárgy felületi rétegét, és max. 1 µm mélységre behatol abba, járulékos nyomófeszültséget is létrehozva. A belőtt ionok vegyületet képezhetnek, növelik a rácshibák számát és így a szilárdságot is. Mivel a kezelés irányfüggő, az éppen kezelés alatt álló felületrész normálisának az ionforrás irányába kell mutatnia, azaz a munkadarabot pozicionálni kell.



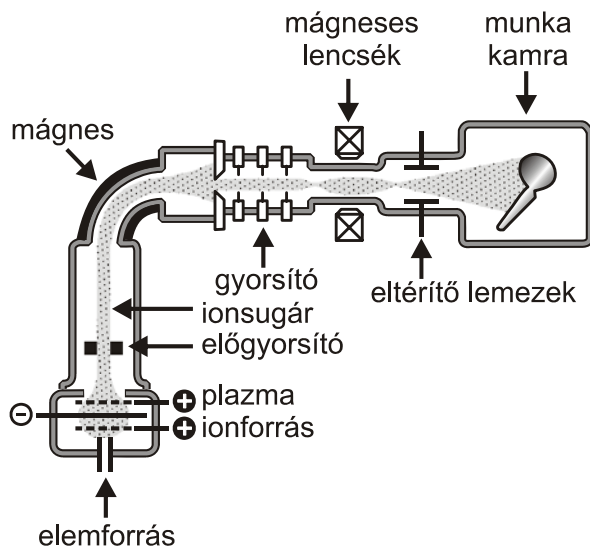
4.25. ábra (I.)
Ionimplantáció

Fémes és nemfémes anyagok ionsugaras kezelésével olyan anyagszerkezet-módosítás érhető el, melynek során az adott gyártmány élettartama, igénybevételekkel, korrózióval szembeni ellenállása jelentősen nő. Ugyancsak ezen eljárással oldható meg a mikroelektronikai ipar egyes alkatrészeinek előállítása. A technológia alkalmas továbbá metastabil szerkezetek előállítására, valamint a termék felületének bizonyos mélységű „atomötvöztetésére”. Ez hagyományos metallurgiai folyamattal megvalósíthatatlan. Lehetséges az ionsugárzás más eljárásokkal való kombinációja. Az eljárásvariációkon alapuló technológiák segítségével megoldható a szerkezeti anyagok tartós korrózióvédelme, a működő felületek élettartam-növelése, a különböző fizikai tulajdonságokkal rendelkező rétegek együttdolgozása.

Az ionsugárzással – számottevő anyagfelhasználás nélkül – olyan anyagtulajdonságok érhetők el, amelyeket monolit anyagok csak részben biztosítanak. Azo-

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

nos eljárás és berendezés alkalmazható a gépipar, a műanyagipar, a mikroelektroonikai ipar területén. Ebből következően a beruházás összege gyorsan megtérül.



4.25. ábra (II.)
Ionimplantáció

A 4.10. táblázat az ipari alkalmazásokból sorol fel néhányat, melyek célja lehet:

- az elektronikai iparban használatos nyákfúrók élettartamának növelése,
- volfrám-karbid-alapú szerszámok éltartósságának növelése,
- abrazív kopásnak kitett felületek ellenállóképességének növelése,
- korrózióállóság növelése,
- az ionsugárzás és egyéb technológiák kombinációja.

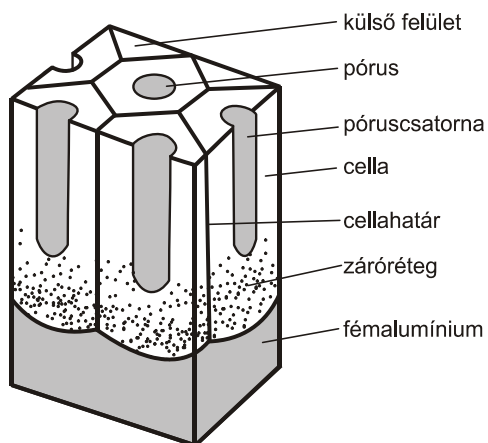
4.10. táblázat. Nitrogénimplantációval javított kopásállóság

Alkalmazás	Anyag	Élettartam-javulás
Alumínium sörösdoboz présszer- száma	D2 szerszámacél	3-szoros
Huzalvezető	kemény Cr-lap	3-szoros
Rézrúd finisher-henger	H13 acél	3-szoros
Papírszeletelő	1,6% Cr + 1% C acél	2-szeres
Szintetikus gumi vágószerszáma	WC + 6% Co	12-szeres
Fenolgyanta kinyomó	M2 gyorsacél	5-szörös
Menetvágó	M2 gyorsacél	5-szörös
Szerszámbetétek	4% Ni + 1% Cr acél	3-szörös

Alkalmazás	Anyag	Élettartam-javulás
Alakító szerszám	12% Cr + 2% C acél	csökkent adhéziós kopás
Fűtőanyag-fúvóka mérő	szerszámacél	100-szoros
Műanyagvágó	gyémántszerszám	2–4-szeres
Izületprotézis	Ti(6Al)4V	100-szoros
Fogorvosi fűrő	WC + Co	2–7-szeres
Precíziós lyukasztó	WC + 15% Co	2-szeres
Keréksajtó	WC + Co	2-szeres
Rézrúd megmunkáló	WC + 6% Co	5-szörös
Vágószerszámok	WC + Co	3–4-szeres
Fúvókák üveg és fémtöltésű műanyagokhoz	szerszámacél és krómzott acél	4–6-szoros
Nitridált acél öntőforma	szerszámacél	jobb, mint bármelyik eljárással külön
Műanyagsajtoló	P20 szerszámacél	4-szeres

4.6. Passziválás

Passziváláskor a kezelendő tárgy felszíni rétege – megfelelő kezelőatmoszférában – kémiai összetételét és szerkezetét tekintve is módosul (4.26. ábra).



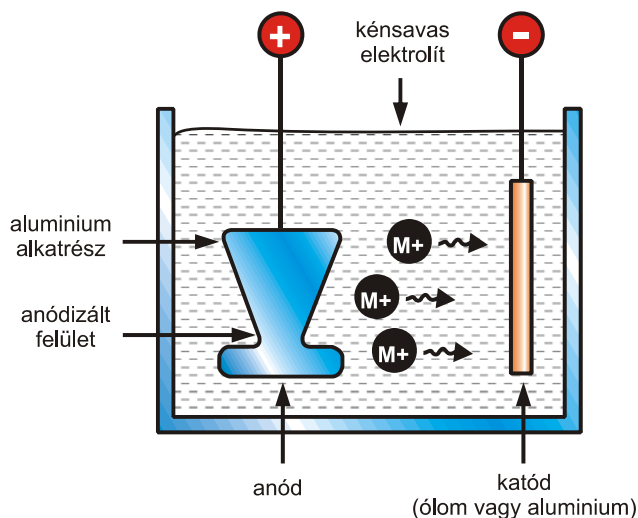
4.26. ábra
Anódos oxidréteg szerkezete

A kémiai oxidálás, az anódos oxidálás, a vegyüetréteg-kialakítás célja a termodinamikailag instabil állapotú fém felületén egy alacsonyabb energiaszintű, stabi-

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

labb állapotú réteg előállítására a fém azon természetes „törekvése” kihasználásával, mely összefüggő védőréteg kialakításában nyilvánul meg.

A kémiai oxidálás kisebb védőértékű rétegek előállítását teszi lehetővé sóoldatokba mártással, vas és színesfémek felületén. Az anódos oxidálás sóelektrolitokban áramátvezetéssel (elektrokémiai folyamatként) alumíniumhoz, illetve ötvözeihez alkalmazható (4.27. ábra).



4.27. ábra
Anódizálás

A felületi oxidfilm számos esetben hasznos védelmet nyújt adhézios kopás ellen. Fémek felületén a természetes folyamatban kialakuló oxidhártya igen csekély, ezért erősítésére célirányos technológiákat dolgoztak ki. A vas és acél anyagokat sok vizes oldatba vagy megolvasztott nitrát-nitrit fürdőbe mártják, majd 300–600 °C-os vízgőz atmoszférában tartják.

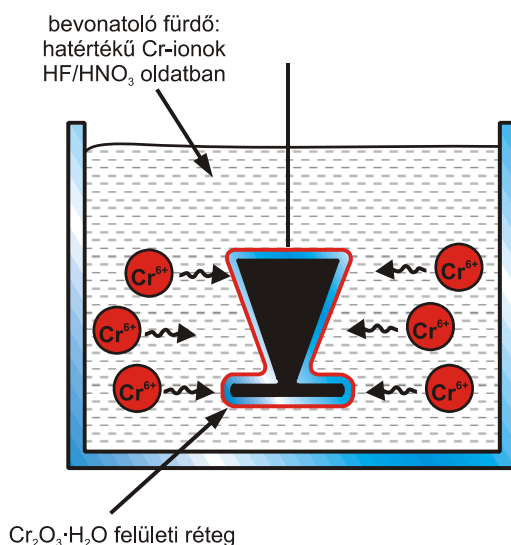
Alumíniumon és ötvözein az ún. anódos oxidálást alkalmazva, a munkadarabokat hígított sófürdőben anódként kapcsolják, ahol a felületük alumínium-oxidra alakul át. Ez a védőfelület elsősorban esztétikai és korrózióvédelmi célokat szolgál. Fokozott kopási igénybevétel esetén lehetőség van „kemény anódos oxidálás” alkalmazására, amivel 70–80 µm vastagságú, abrazív kopásnak is ellenálló oxidos kéreg készíthető. Magnézium-, horgany- és titánötvözetek is oxidálhatók anódos eljárással.

Eljárások alumíniumötvözetből készült alkatrészek kopás- és korrózióvédő kezeléséhez:

- „Hart-Coat”: 0,2 mm vastagságot is elérő, 350–550 HV keménységű kérget eredményez;

- „Hart-Coat-Cu”: elsősorban rézet tartalmazó Al-ötvözetek kezeléséhez; kéregvastagság 0,15 mm-ig, keménység : 300–450 HV;
- „Hart-Coat-GD”: nagy szilíciumtartalmú, nyomásos Al-öntvényekhez; kéregvastagság ~0,06 mm, keménység ~450 HV.

A vegyültreteg-kialakítás foszfátózást, kromatózást (4.28. ábra) stb. jelent savban, sóban, vagy lúgban végezve. Az ilyen kezelés célja lehet többek között hidegalakítás elősegítése, lakktapadás javítása, megmunkáló szerszámok élettartamának növelése.



4.28. ábra
Kromatózás

Foszfátózásnál a felületeken vas, mangán/vas, cink/vas, cinkfoszfát fázisok keletkeznek, amelyek gátolják a súrlódó felületek közötti hideghegedést. A kezelendő munkadarabokat 5–40 percig, 70–100 °C hőmérsékletű, megfelelő foszfátokat és reakciót gyorsító katalizátorokat tartalmazó oldatba mártják, esetleg ilyen oldattal felszórják. Ezzel az eljárással vas, acél, alumínium, cink stb. felületek egyaránt kezelhetők, de a hatása csak korlátozott időre terjed ki.

A kén és néhány szulfid igen jó kenési tulajdonságokkal rendelkezik, több elektrokémiai eljárás ismeretes a felvitelükre. A „Sulf-BT” eljárásnál nátrium és kálium-tiocinát megolvasztott keverékét alkalmazzák elektrolitként. Áramsűrűség kb. 3,2 A/dm², hőmérséklet kb. 190 °C, kezelési idő kb. 10 perc. Így 7–8 µm vastagságú FeS konverziós kéreg nyerhető acél munkadarab felületén. A „Molymuz” eljárásnál molibdén- és kénvegyületek vizes oldatából elektrolízissel szintetizálnak a munkadarab felületén MoS₂-ot. Vas, acél és színesfém felületeken egyaránt alkalmazható.

4.7. Termokémiai kezelések

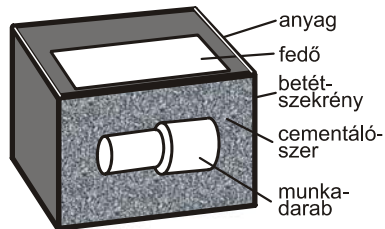
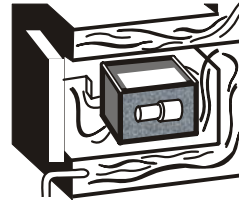
Ötvöződúsítás vagy termokémiai kezelés történhet aktív szabad ötvözőatomokat leadó porközegekben, sóolvadékban vagy gázközegekben. Az eljárás célja a kezelendő tárgy felületének feldúsítása a tárgy anyagában oldódó fémes vagy nemfémes elemmel (vagy elemekkel), növelt hőmérsékleten, diffúzió révén, megfelelő koncentrációra törekedve. Szükség szerint – eljárástól függően – további hőkezelésekkel együtt érhetők el a kívánt tulajdonságok. Egyes bediffundáló elemfajták esetében szilárd oldat létrejötte mellett vegyületfázisok is képződhetnek.

A termokémiai kezelések fő paraméterei: a felületi ötvözőpotenciál, a hőmérséklet és a diffúziós időtartam, melyek elsődleges meghatározói a kialakuló rétegvastagságnak, illetve a koncentrációeloszlásnak. Fémes elemekkel a kromálás, alitálás, titánózás, vanádiumozás, volframozás stb.; nemfémes elemekkel a cementálás, nitridálás, boridálás, szulfidálás, szilikálás stb.; több elemmel a nitrocementálás, karbonitridálás, titánnitridálás, oxinitridálás, szulfonitridálás, oxikarbonitridálás, krómalitás, krómboridálás stb. valósul meg. Ezek közül széles körű ipari alkalmazást mutat az acélok felületkezelésére alkalmazott cementálás és nitridálás.

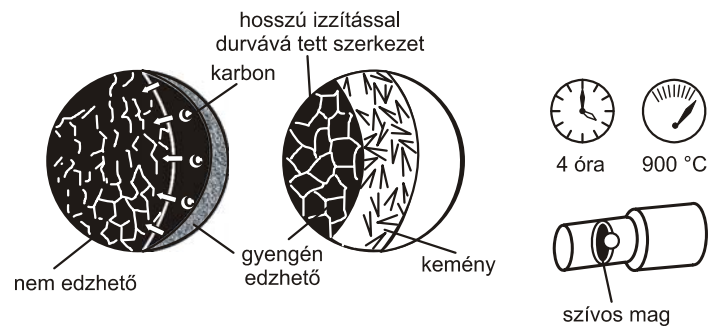
4.7.1. Acélok cementálása

Az ausztenites állapotban (A_3 hőmérséklet felett) történő cementálás (4.29. ábra) során az egyébként nem edzhető, azaz „betétben edzhető” ($C < 0,2\%$) acél vékony felületi kérgét karbonban feldúsítják ($C > 0,35\%$). A cementálást követő „magraedzés” során a szívósan maradó magot finomszemcséssé teszik, illetve a „kéregedzéssel” nagy kopásállóságú kemény felületet állítanak elő.

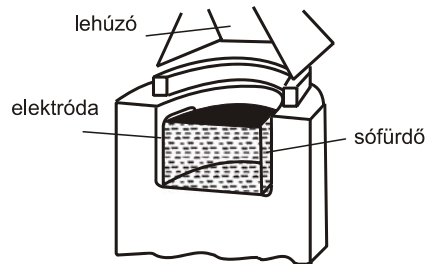
Ebben a folyamatban a munkadarab felületi rétegében a karbontartalmat 0,75–1,2%-ra dúsítják fel diffúzió útján. A szokásos kéregvastagság 0,1–3,0 mm. A legtöbb esetben a cementálást követően edzik a munkadarabot (ún. betétedzés), így viszonylag egyszerű eszközökkel jó minőségű kéreganyag-kombinációt valósítanak meg. A létrejött kemény, kopásálló felületi zóna és a szívós, nagy szilárdságú mag klasszikus példája az anyagtulajdonságok célirányos egyesítésének. Cementálásnál mód van parciális kezelésre is, a nem kívánt felületek levédésével (pl. galvanikus rézbevonattal). A hagyományos cementálási technológiák (szilárd közegű szemcsés, pasztás; folyékony közegű sófürdős, csepegtetős; gázközegeű eljárások) mellett újabb technológiák is megjelentek: ionos, fluidizált közegű, vákuumos cementálás. A 4.11. táblázat cementálósókról, a 4.12. táblázat cementálógázokról ad információkat.



A csapágycsap behelyezése a kemencébe cementáláshoz



A gyors hűtés után



Sófürdő az acél edzéséhez, cementálásához vagy megeresztéséhez

4.29. ábra
Acél cementálása

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.11. táblázat. Cementálósók

Csoport	Összetétel, tömeg %		Üzemi hőmérséklet, $T_{ü}$, °C	Felhasználás	Megjegyzés
A	80 NaCN 20 KCl		750–800	Kisméretű műszeralkatrészekhez, 0,1–0,3 mm kéregvastagságig	Grafittakaró nélkül használható; vízben jól oldódik
B	50 NaCN 10 KCl 40 BaCl ₂		800–900	0,5–0,8 mm kéregvastagságig	Grafittal lefedhető egyalkotós cementáló fürdő
C	I.	98 NaCN 2 faszénpor	850–930	0,3–1 mm kéregvastagságig	Csak 25% I. aktivátorsóval keverve használható; vízben jól oldódik
	II.	85 BaCl ₂ 10 NaCN 5 NaCl	850–930	0,5–1,8 mm kéregvastagságig	Csak 60% II. aktivátorsóval és 5% NaCN-nel keverve használható; vízben rosszul oldódik
Aktivátorsók*	I.	50 Na ₂ CO ₃ 50 KCl	850–930	Aktivátor a C I. cementáló sóhoz	Csak 25% I. aktivátorsóval keverve használható; vízben jól oldódik
	II.	50 BaCl ₂ 30 KCl 20 NaCl	850–930	Aktivátor a C II. mélycementáló sóhoz	Csak 60% II. aktivátorsóval és 5% NaCN-nel keverve használható; vízben rosszul oldódik

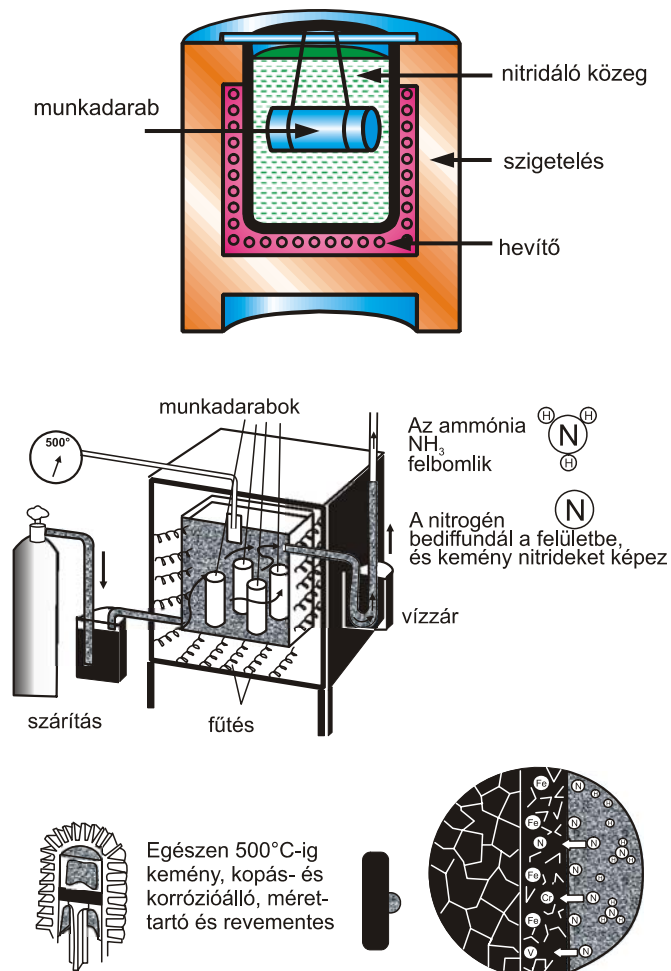
* Az aktivátorsók erősen széntelenítő hatásúak, és csak 3–30% cianiddal keverve alkalmazsak edzésre. az I. aktivátorsó széntelenítő hatása erősebb.

4.12. táblázat. Endogáz és nitrogén-hordozógáz (szintetikus) cementáló gázatomoszférák jellemző tulajdonságai

Atmoszféra	Dúsított endogáz		Dúsított nitrogén rendszer	
	propán	földgáz	propán	földgáz
CO %	23–25	20–22	4–6	2–4
H ₂ %	30–32	40–42	8–10	10–12
CH ₄ %	0,4–0,8	0,5–1,5	0,5–1,5	3–5
CO ₂ %	0,12–0,35	0,1–0,3	1,3–0,1	0,02–0,08
Harmatpont, °C	+5 – –10	0 – –15	–20 – –40	–20 – –40
Oxigén potenciál, kJ/mol	–445 – –462	–449 – –446	–470 – –504	–483 – –525

4.7.2. Acélok nitridálása

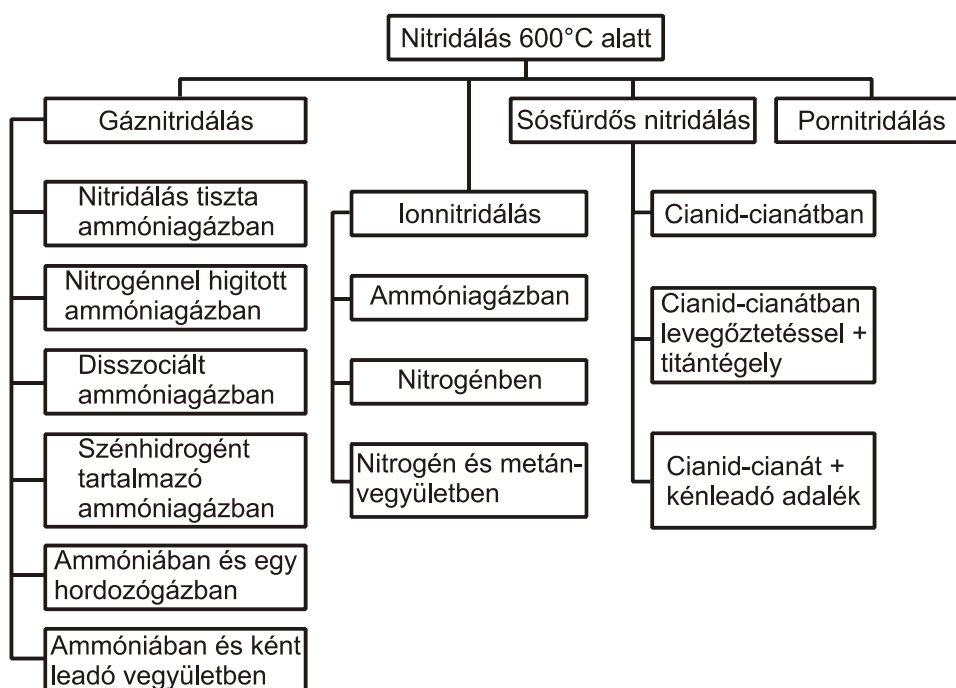
A ferrit-perlites, illetve nemesített állapotban (A_1 alatt) végzett nitridáláskor (4.30. ábra) a felületbe juttatott atomos nitrogén – az ott lévő nitridképző ötvözőkkel (Cr, Al, Mo) történő reakciója révén – elsősorban nagy keménységű nitridvegyületek létrejöttével biztosít jó felületi kopásállóságot. Az így kapott kéreg keményebb és megeresztésállóbb, mint a cementálás + edzés, illetve a felület-edzés utáni martenzites kéreg, mely a 180–220 °C-os feszültségcsökkentő megeresztés hőmérsékletéig alkalmazható (4.13. táblázat).



4.30. ábra
Acélok nitridálása

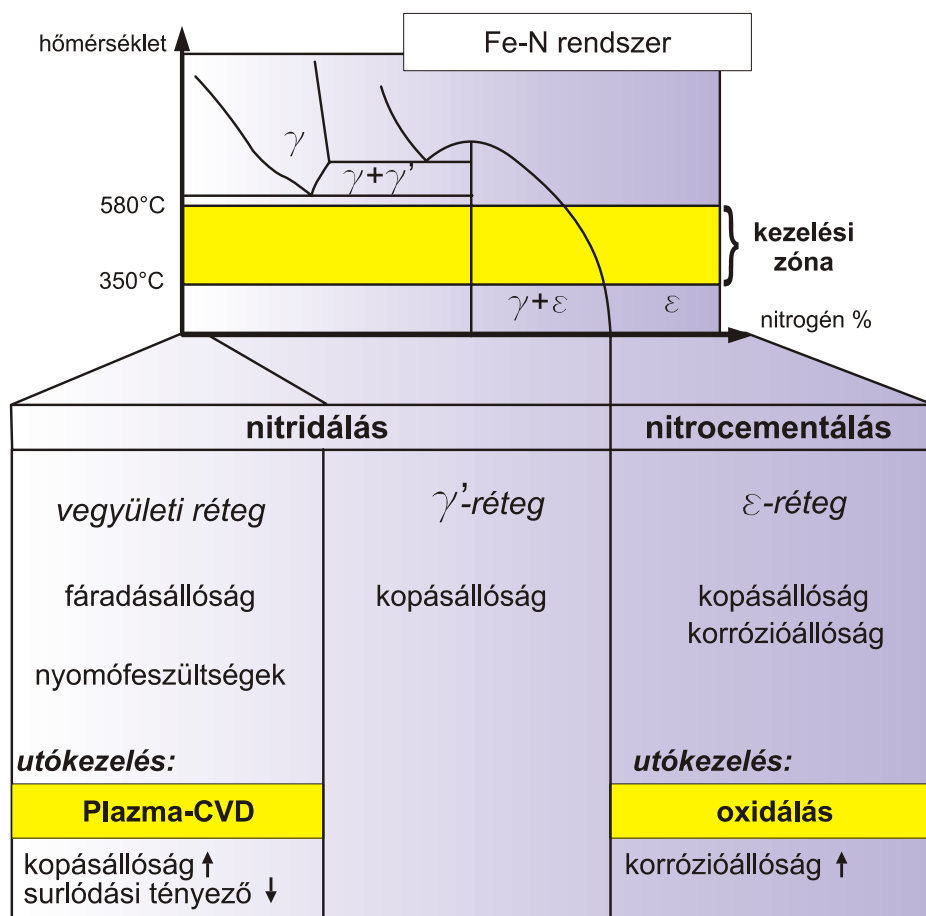
4.13. táblázat. Acélok felületkezeléseinek összehasonlítása

felületkezelés jellemzője	cementálás + betétedzés	felületedzés	nitridálás
elérhető Vickers-keménység	670–800	500–800	600–1100
HV 610 érték felülettől mért távolsága	0,4–1,5 mm	0,5–10 mm	0,1–0,5 mm
keménységcsökkenés kezdeti hőfoka	150°C	150°C	400°C
vetemedés mértéke	nagy	mérsékelt	kicsi
dinamikus igénybevételi ellenállás	nagy	közepes	kicsi



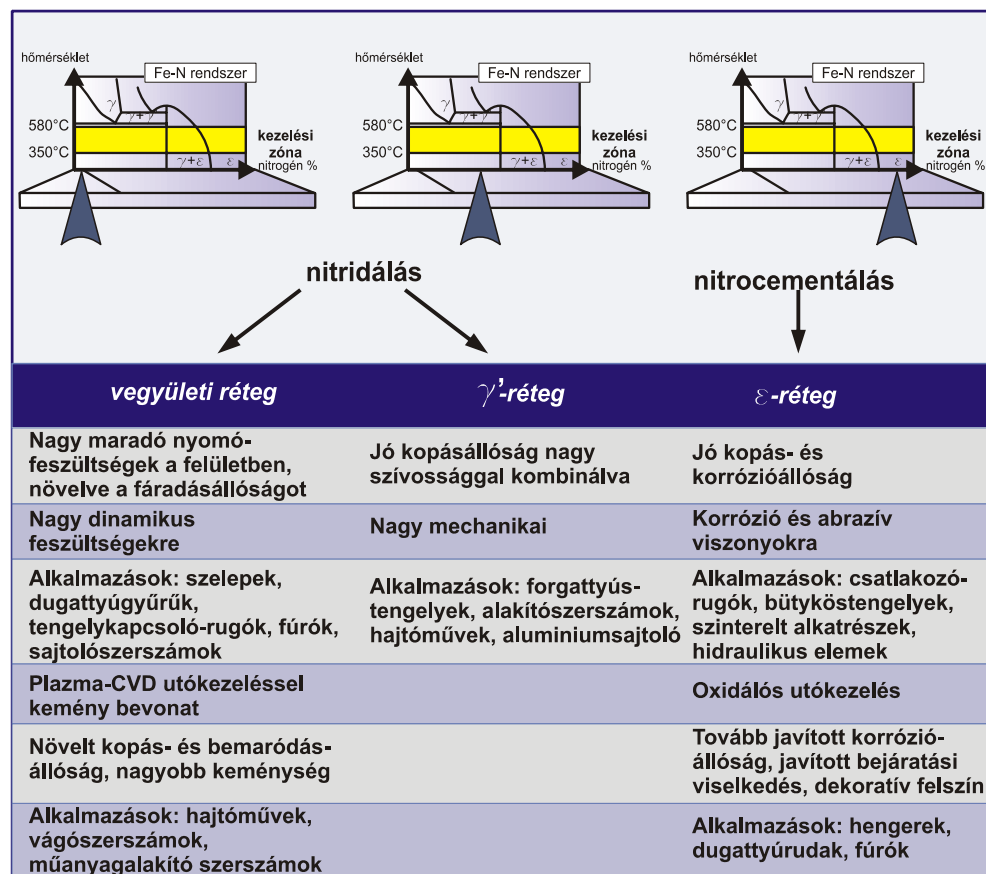
4.31. ábra
Nitridálás 600 °C alatt

A nitridálás az egyik legelterjedtebben alkalmazott diffúziós eljárás. Nitridálás következtében az acél alapanyagú munkadarabok felületén vékony, tömör vas-nitrid réteg (Fe_2N , Fe_4N) képződik, amelynek kopási és siklási tulajdonságai kedvezőek, alatta pedig egy nitridekben szegényebb diffúziós zóna helyezkedik el. A vegyületi zóna keménysége elérheti az 1100 HV értéket, vastagsága a néhány mikront, a diffúziós zónáé pedig a 0,1–1,0 mm-t. A nitridálási technológiák nitrogénleadó közeg és berendezés tekintetében a **4.31. ábra** szerint csoportosíthatók.



4.32. ábra
A nitridálás jellegzetességei (I.)

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



4.33. ábra
A nitridálás jellegzetességei (II.)

A nitridálás jellegzetességei (4.32. és 4.33. ábra):

- A nitridált kéreg maximális keménysége növekvő kezelési hőmérséklettel csökken, növekvő kezelési időtartammal növekszik. A nitridált kéreg vastagságát – vagyis a növelt nitrogénkoncentrációjú zóna mélységirányú kiterjedését – a hőmérséklet és az idő növelése egyaránt növeli, miközben a felszín nitrogénkoncentrációja gyakorlatilag nem változik.
- Az 500–550 °C-os nitridálás megfelelő (kb. 0,3–0,4% C-tartalmú, nitridképzőkkel ötvözött, 600–650 °C-os megeresztéssel nemesített) acélon keményebb kérget hoz létre, mint a betétedzés (cementálás + edzés).
- A nitridált kéreg legkeményebb része nem közvetlenül a felületen van, hanem a beljebb lévő γ' -fázisú vagy a martenzitessé alakuló nitro-ausztenites

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

rétegbe esik. A hatásos nitridképzők (Al, Cr, Mo) az elérhető kéregvastagságot ugyan csökkentik, de keménységnövelő hatásuk bizonyos értelemben szuperponálódik.

- Az ötvöztött acélok kérgesítésének eredménye (maximális keménység, kéregvastagság) az ötvöztetlenekétől eltérően alakul, hiszen Fe_3C , illetve Fe_4N mellett M_3C , M_4N stb. vegyületek is képződnek.

Nitridálás sófürdőben

Alapeljárásnak azt a technológiát tekinthetjük, ahol a fürdő kénvegyületek és cianidsók megolvasztott keverékéből áll. A szokásos kezelés hőmérséklete 540–600 °C, időtartama 2–3 óra. A kéregben nitridek mellett karbidok és szulfidok is létrejönnek. A Tenifer-eljárás levegőátfúvással kombinálva kénmentes módszert alkalmaz.

A munka- és környezetvédelmi követelmények szigorodása miatt előtérbe kerültek a cianidsómentes technológiák. Ilyen például a „Sursulf” eljárás, ahol alkálicianátból naszcensz nitrogén szabadul fel, miközben a cianátok karbonátokká oxidálódnak. A jelenlévő lítiumsók az oxidáció sebességét mintegy a felére csökkentik. Speciális regeneráló sók hozzáadásával a karbonátok újra aktív nitridálószerre, cianáttá alakíthatók. Ha a fürdő ként is tartalmaz, a kezelt darabok kérgében kénvegyületek keletkeznek. Megfelelő folyamatvezetés esetén a Sursulf-fürdők cianidtartalma kisebb, mint 0,2%. A Tenifer-TFI eljárásnál ezt az értéket 3%-ban adják meg.

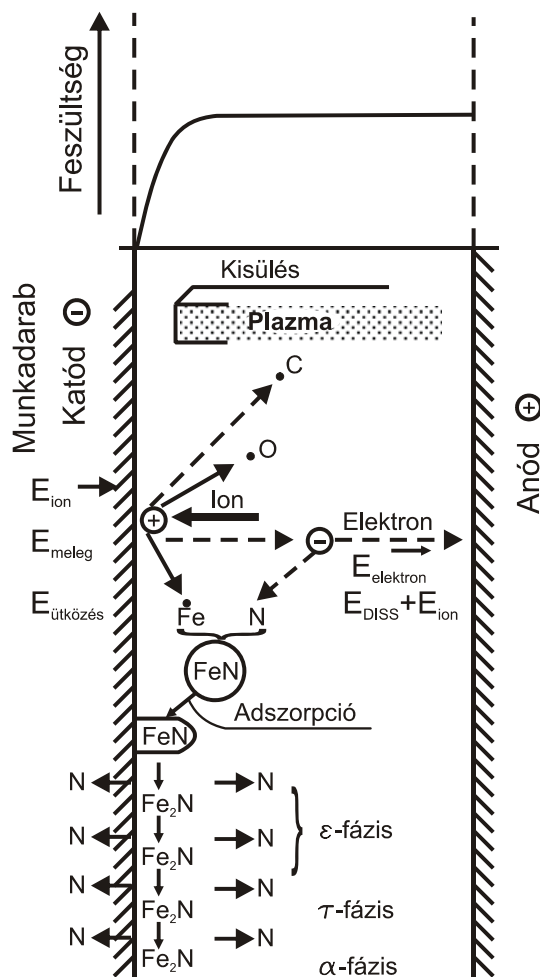
Nitridálás gázközegben

Rendszerint ammónia gázt disszociálnak 500–550 °C-on, és a keletkező naszcensz nitrogén a felületbe diffundál. A szükséges kezelési idő 12–96 óra, a diffúziós rétegmélység 0,15–0,70 mm.

Ion- (plazma-) nitridálás

A nitrogént alacsony nyomású munkatérben, áramerős glimmkisülés plazmájaként juttatják a munkadarab felületére (4.34. ábra). A munkadarab felmelegedését a diffúzióhoz szükséges 350–600 °C-ra az ionok ütközési energiája biztosítja. A kezelési idő a kívánt kéregmélységtől és a munkadarab anyagától függően 10 perc és 36 óra között változik.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



4.34. ábra
Ion- (plazma-) nitridálás

Ez az egyetlen olyan nitridálási eljárás, ahol lehetőség van monofázisú vegyületi zóna és nitridhálóméntes diffúziós zóna kialakítására. Az ionos nitridálás további előnye, hogy minimális a munkadarabok elhúzódnása, illetve méretváltozása, ami többnyire szükségtelessé teszi az utólagos megmunkálást. Kielégíti a munka- és környezetvédelmi követelményeket, jól automatizálható, így alkatrészgyártó sorokba közvetlenül beilleszthető. Ionos nitridálásra szinte valamennyi acél- és öntöttvasféleség alkalmas.

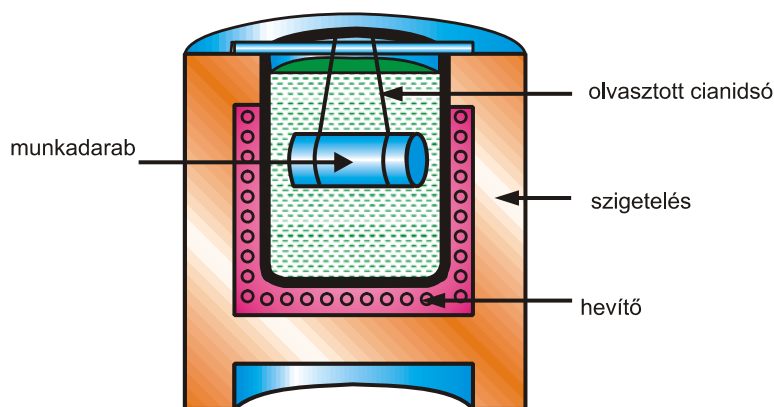
4.7.3. Acélok nitrocementálása és karbonitridálása

A munkadarab felületi rétegében a karbon és a nitrogén egyidejű dúsításával egyesítik a két különálló eljárás előnyeit (4.14. táblázat). Magas hőmérsékletű folyamatoknál (nitrocementálás) a karbon diffúziója a döntő, és szén–nitrogén tartalmú, martenzit jellegű fázis alakul ki. Alacsony hőmérsékletű technológiáknál (karbonitridálás) karbonitrideket tartalmazó vegyületi zóna és alatta növelt nitrogén- és karbontartalmú diffúziós zóna képződik.

4.14. táblázat. Nitrocementáló gázatmoszférák összetétele és óránként adagolandó mennyisége

A kemence		A gáz összetétele, térf. %			Átáramló összes gáz, m ³ /h
típusa	térfogata, m ³	hordozó- gáz	földgáz	ammónia	
Szakaszos üzemű	0,288	68,8	20,8	10,4	6,8
	1,415	90,0	6,0	4,0	14,2
	2,830	83,3	8,3	8,3	10,2
Folyamatos üzemű	8,050	94,3	2,3	3,4	42,0
	25,0	86,0	7,0	7,0	28,3
	25,0	91,0	4,0	5,0	31,1
Forgó retortás	0,057	95,0	2,5	2,5	6,2

A karbonitridálás só- és gázkezezből egyaránt elvégezhető (4.35. ábra). Néhány jellemző paraméterét a 4.15. táblázat tartalmazza. Gyakorlati megvalósítására számos eljárást szabadalmaztattak a hőkezelő berendezéseket gyártó világcégek (Nidroc-eljárás az Aichelin cégnél, Nikotriev-eljárás az Ipsen cégnél, Oxycad-eljárás a Safed cégnél stb.).



4.35. ábra
Karbonitridálás

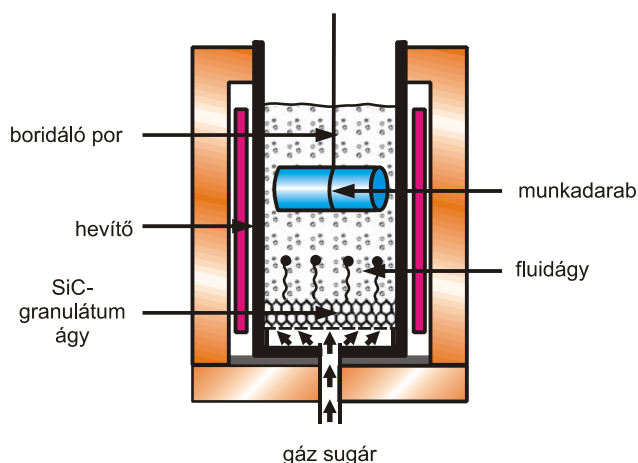
4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.15. táblázat. A karbonitridálás paraméterei

Karbon-, nitrogénleadó közeg %	Kezelés			Megjegyzés
	Hőmérséklete °C	Időtartama óra	Kéregmélysége mm	
Endogáz (80–90) + NH ₃ (2,5–5)	840	5–9	0,5–1,0	
Földgáz (5–8) + NH ₃ (2,5–5)	860	5–9	0,5–1,0	
Na ₂ CO ₃ (25–30) + NaCl (25–50) + NaCN (20–25)	820–870	<1	<0,35	
BaCl ₂ (50) + NaCl (40) + NaCN (10)	840–900	<4	<1,0	
Endogáz (50) + NH ₃ (50)	570	3	0,5	15–20 mm vegyületi zóna ötvöztelen és gyengén ötvözött acélok
EXO gáz (50) + NH ₃ (50)	570	2	~0,5	
NaCN (25–30)	560	<3	<0,4	
KCNO (25–40)	580	<3	<0,4	

4.7.4. Acélok boridálása és szilikálása

A bór rendkívül kis mértékben oldódik vasban, ezért bórleadó közegben a termikus kezelés során FeB és Fe₂B-ből álló vegyületi zóna képződik a munkadarabok felületén. A réteg vastagsága ~0,15 (max. 0,3) mm, mikrokeménysége eléri a 2000 HV-t. A kéregnek az alapszövethez kapcsolódására az igen kedvező „fokozatos” kötődés a jellemző. A boridált felületek jó siklási tulajdonságokkal rendelkeznek, alacsony a hideghegedési hajlamuk, kiváló a korróziós, eróziós és kavitációs ellenállásuk. A boridálás (4.36. ábra) történhet (4.16. táblázat) gázközegeből, sófürdőből és szilárd közegeből (por, szemcse) vagy ionosan is.

4.36. ábra
Boridálás

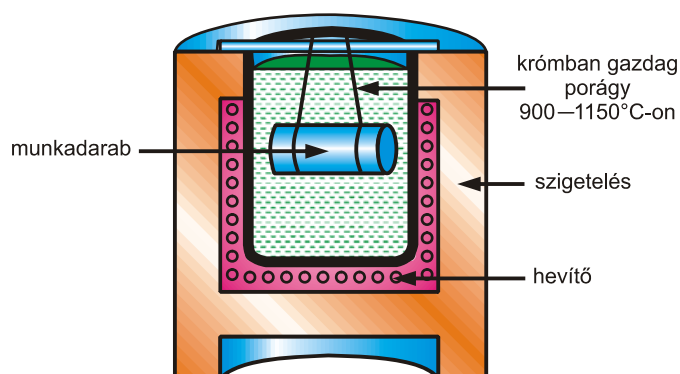
4.16. táblázat. Boridálás paraméterei

Közeg	Boridáló anyag	Kezelés	
		Hőmérséklete °C	Időtartama óra
Gáz	$\text{BCl}_3 + \text{H}_2$	850	3–6
	$\text{B}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$	800	3–4
Sófürdő	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{Ba}_2\text{O}_3 / \text{Na}_2\text{SiO}_3$, vérlugsó	950	2–6
Por	amorf bór + Al_2O_3 + katalizátor / aktivátor	1000	6

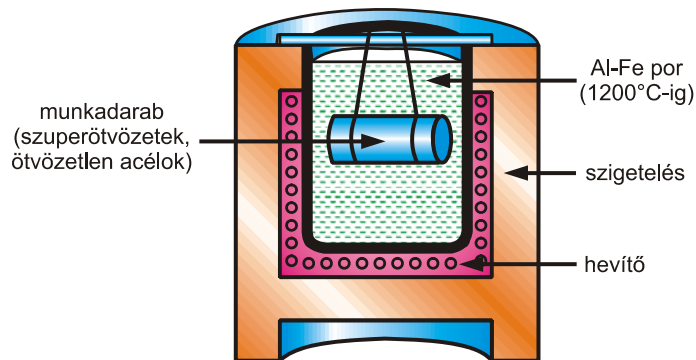
Szilikálásra általában gázközegű eljárást alkalmaznak. A kezelendő munkadarabokat szilícium-karbiddal együtt, klórgázzal átáramoltatott, fűtött forgócsöves kemencébe helyezik. A kezelési hőmérséklet 950–1000 °C, kezelési idő ~2 óra. A legfeljebb 1 mm vastagságú réteg 15%-ig terjedő Si-tartalmú α -keverék-kristályból áll, de kisebb mennyiségben Fe_3Si -fázis is előfordul. A szilicides rétegek korrózióállósága kiváló, elsősorban savakkal szemben.

4.7.5. Termokémiai kezelés fémes elemekkel

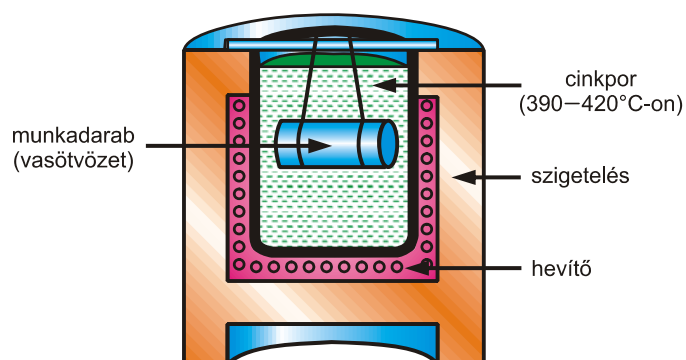
Fém tárgyak felületvédelme fémes anyagok (Al, Zn, Sn, Cu, Cr) termikus diffúziójával is kialakítható. Tribológiai célokra elsősorban krómot diffundáltatnak magas karbontartalmú acélok felületi rétegébe, és a keletkező krómkarbidok keménységnövelő hatását használják fel. Porba ágyazásnál ferro-krómot alkalmaznak megfelelő katalizátorok jelenlétében 8–15 órás, 950–1050 °C-os izzítással (4.37. ábra). Gázközegű eljárásnál króm-, ferrokrómporból sósavval vagy klórgázzal króm-kloridot állítanak elő, és azt reagáltatják a munkadarab felületével. A kezelés ideje és hőmérséklete azonos az előzőével. A kialakuló réteg legfeljebb 0,1 mm vastag, keménysége függ az alapacél karbontartalmától: 250–1350 HV értékű.

4.37. ábra
Kromálás

A 4.38. ábra az alítálás, a 4.39. ábra a serardírozás vázlatát mutatja.



4.38. ábra
Alítálás



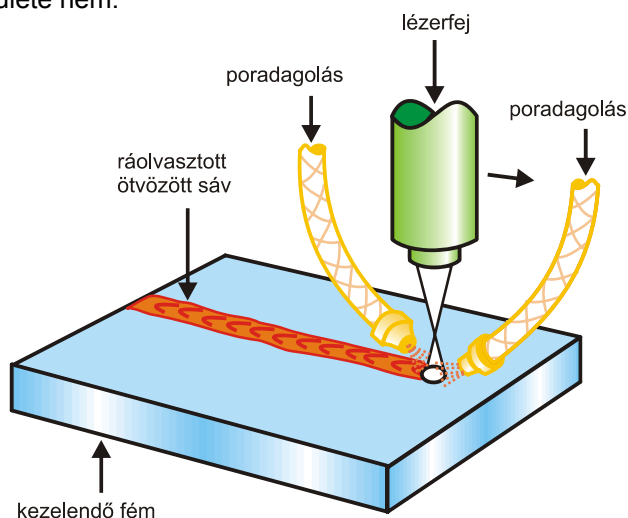
4.39. ábra
Serardírozás

Ismeretesek olyan kombinált technológiák is, amelyeknél a kezelendő fémtárgyra galvanikus úton viszik fel a kiválasztott fémeket és azt utána aktív gázban bediffundáltatják. Ilyen eljárások például a következők:

- acél anyagra ón leválasztása és nitrogén atmoszférában történő diffundáltatása („Stanal”);
- acél anyagra bronzötvözet leválasztása és nitrogénben történő diffundáltatása („Forez”);
- sárgaréz és bronz anyagokra ón + kadmium leválasztása és levegőben történő diffundáltatása („Delsun”);
- alumíniumötvözetekre indiumalapú komplex ötvözet leválasztása és levegőn történő diffundáltatása („Zinal”).

4.8. Felületi ráolvasztás

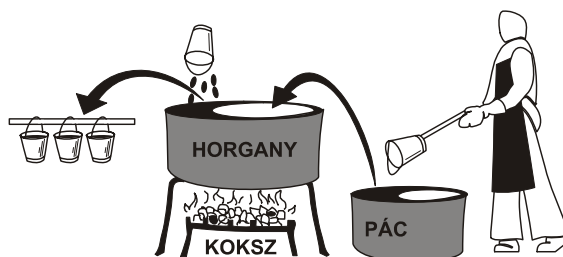
A felületi ráolvasztásra (4.40. ábra) jellemző, hogy a felületre előzetesen vagy kezelés közben felvitt bevonatréteg részlegesen vagy teljesen megolvad, de a kezelendő tárgy felülete nem.



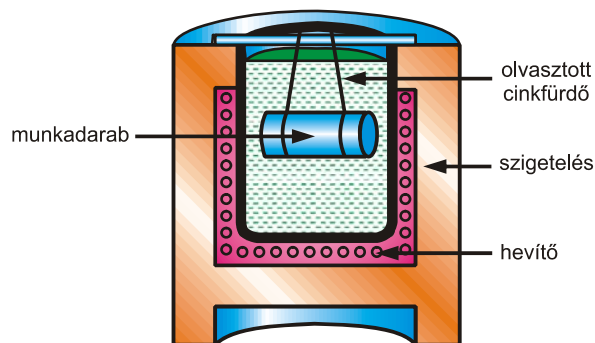
4.40. ábra
Lézeres felületi ráolvasztás

4.8.1. Tűzi mártó fémbevonás

A fémolvadékba mártással (4.41. ábra) végzendő tűzi mártó fémbevonás (cinkezés, ónozás, ólmozás, alumíniumozás stb.) után a legkülső, tisztán bevonófémet tartalmazó réteg többszörös átmeneti diffúziós réteggel kötődik a kezelt tárgy felületéhez. Természetesen csak olyan bevonó fémek jöhetnek szóba, amelyek a munkadarab anyagának olvadáspontjánál lényegesen kisebb hőmérsékleten olvadnak meg.



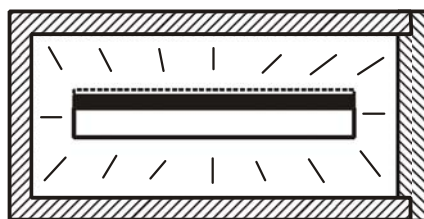
4.41. ábra (I.)
Tűzi mártó horganyzás



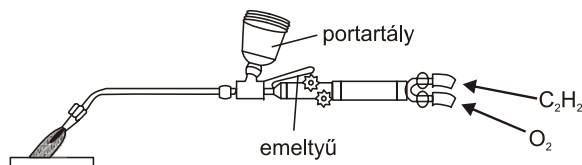
4.41. ábra (II.)
Tűzi mártó horganyzás

4.8.2. Termikusan szórt rétegek utókezelése

A hőkezeléssel, lánggal, plazmával, elektronsugárral vagy lézerrel végezhető kezelés (**4.42. ábra**) egyik fő alkalmazási területe a termikus szórással felvitt adhéziósan tapadó, porózus, inhomogén rétegek utókezelése. Hatására a felszórt réteg tömörödik, homogenizálódik, simább felületűvé válik, illetve a nagy hőmérsékletű diffúziós folyamatok révén növekszik az alapanyaghoz való tapadásának szilárdsága.

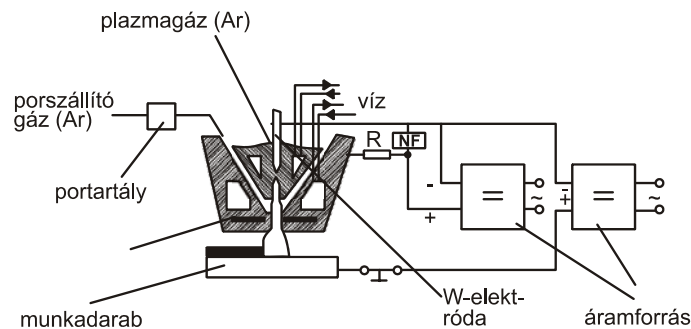


felületi ráolvasztás hőkezeléssel

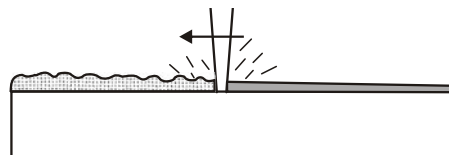


felületi ráolvasztás lánggal

4.42. ábra (I.)
Termikusan szórt rétegek utókezelése felületi ráolvasztással



felületi ráolvasztás plazmával



felületi ráolvasztás lézerrel

4.42. ábra (II.)

Termikusan szórt rétegek utókezelése felületi ráolvasztással

4.8.3. Vastag fémbevonatok ráolvasztása

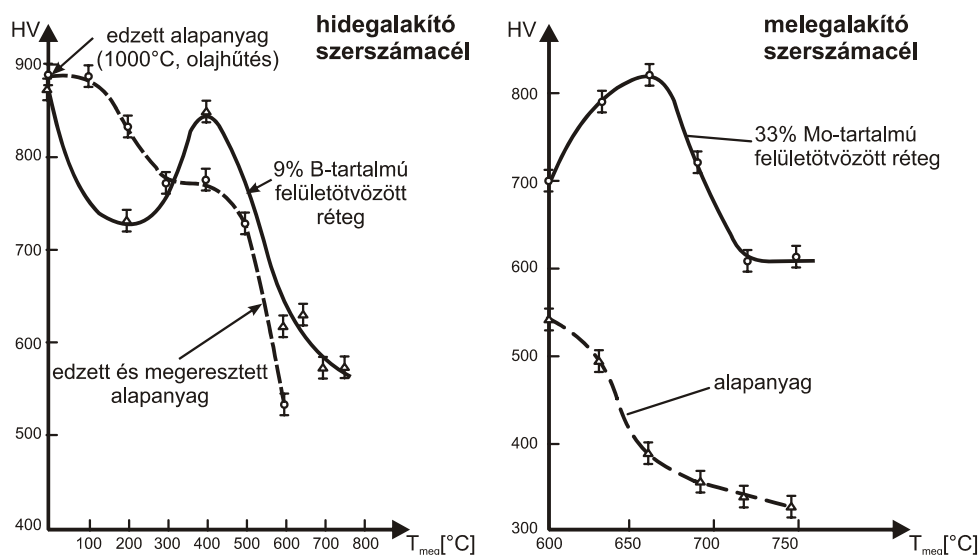
Fontos alkalmazást jelent a tűzi mártó fémbevonással nem létrehozható vastagságú, agresszív korróziós közegek hatásának ellenálló fémrétegek kialakítása a védendő tárgy felületén. Ilyenkor a bevonó fémet nem olvadékfürdő alakjában használják, hanem a munkadarab megfelelően előkészített felületén hozzák olvadék állapotba.

Jellemző példa az acéltartályok belső felületének savállóvá tétele ún. homogén ölmózással. A csíkokra vágott ólomlemezeket az előőnozott vasötvözet felületére helyezve nagy hőmérsékletű lánggal végzik a ráolvasztást. Az ón párnarétegre azért van szükség, mert a vas és az ólom kölcsönösen oldhatatlan, így direkt kötés nem jönne létre. A hőkezeléskor, azaz kemencében történő ráolvasztáskor semleges vagy redukáló atmoszférában végzik a hevítést, a hőntartást és a lehűtést is, lehetőséget adva a diffúziós folyamatok megfelelő lejátszódásának, illetve belső sajátfeszültségek kialakulása elkerülésének.

4.9. Felületötvöztetés

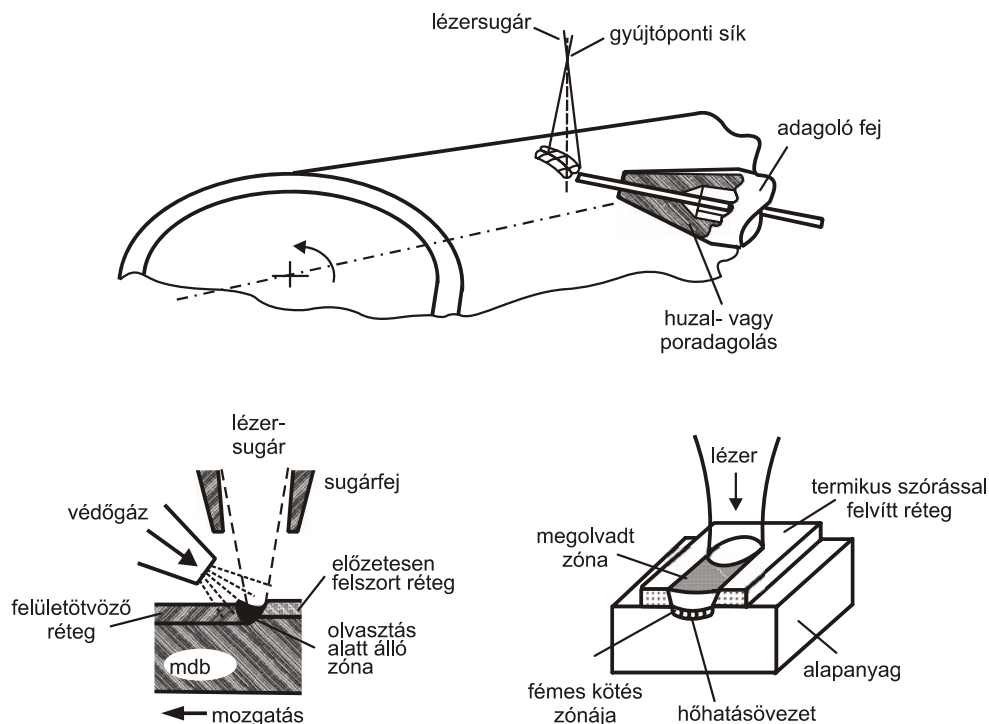
A felületötvöztetés, nagy energiasűrűségű hőforrásokkal (lézer, elektronsugár) végzett felületi átolvasztás, amelynek során az előzetesen vagy a folyamat közben felvitt ötvözőanyag belekeveredik, beleolvad, beleötvöződik az alapanyag megolvastott, majd gyorsan megdermedő felületi rétegébe.

A rendszerint por alakú ötvözőanyag felvihető kötőanyaggal vagy anélkül. Kötőanyagként pl. acetonban oldott cellulózt alkalmaznak, míg kötőanyag nélküli felvitelhez a termikus szórás vagy a közvetlen ráfúvás (rászórás) jöhet szóba. Némely ötvözőanyag felületre juttatható vékony fóliaként vagy galvanikus úton is. A lézer-, elektron- vagy plazmasugárral végezhető felületötvöztetés célja elsősorban sav-, hő- vagy kopásálló réteg kialakítása. A 4.43. ábra elektronsugaras felületötvöztéssel elérhető megeresztésállóság-javulást mutat egy hidegalakító és egy melegalakító szerszámacél esetében.



4.43. ábra
Felületötvöztetés hatása alakító szerszámacélok megeresztésállóságára

A lézeres felületötvöztetés (4.44. ábra) lehetőséget ad arra, hogy olcsó szerkezeti anyagból készült munkadarab felületeinek tulajdonságait szelektíven úgy változtassák meg, hogy a helyi igénybevételnek leginkább ellenálljon. Mivel a viszonylag olcsó alapanyag kedvező felületi tulajdonságai kevés drága ötvözővel létrehozhatók, az eljárás alkalmazása a műszaki előnyök mellett jelentős gazdasági megtakarítással is jár. Műszaki előnyökön egyrészt a termékminőség javulása, másrészt az újabb konstrukciós lehetőségek értendők.



4.44. ábra
Lézeres felületötvözés

A vonal mentén haladó (pásztázó) fénysugár csak azon a területen vált ki olvadáráramlást, ahová fókuszálódik. A haladási irányra merőlegesen rezgetett sugárnál a helyi olvadáráramlás a teljes szélességre kiterjed. Ekkor az áramlás többirányú, ami az ötvöző keveredését elősegíti. A dendritok morfológiájából arra következtetnek, hogy a hűlési sebesség az ötvözött kéregben, a teljes megolvadt vékony felületi rétegben azonos. A lézersugaras felületötvözés igen nagy előnye az is, hogy az oldódási határt többszörösen túllépő összetételű ötvözetek hozhatók létre (pl. Fe-Mo 28–36%). A **4.45. ábra** az ötvözőelemek hatását mutatja a szerszámacélok tulajdonságaira.

A lézeres felületötvözés műszaki gazdasági előnyeivel fogva rendkívül széles körben alkalmazható, különös tekintettel bonyolult kialakítású alkatrészek felületi tulajdonságainak helyi megváltoztatására. A gyakorlati alkalmazások azt mutatják, hogy gyorsacél szerszám kiválasztott felületeit volfrám-karbiddal ötvözve a forgácsoló szerszám élettartama 100–200%-kal nő, míg az alumínium felületének a hőállósága Fe vagy Mn és Ni felületi beötvözésével jelentősen növelhető.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

A szerszámacél tulajdonságai												
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Ta	Nb
Keménység	↑↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑			
Átvezetőség	↑	↑↑↑	↑	↑↑	↑	↑	↑↑↑	↑↑				
Megeresztési ridegség		↑	↑	↑	↑	↓	↓					
Megeresztésállóság			↑	↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑			
Melegsilárdság				↑	↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑		
Szívósság	↓↓		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓			
Hővezető képesség	↓		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑			
Forgácsolhatóság	↓		↓	↓	↓↓	↓	↓	↓↓				
Melegátalakíthatóság	↓		↓	↓		↓	↓	↓↓				
Kopásállóság	↑		↑	↑		↑	↑	↑↑		↑	↑	↑

Megjegyzés:

* A tulajdonságot ↑ kicsit; ↑↑ közepesen; ↑↑↑ nagyon javítja vagy ↓ kicsit; ↓↓ közepesen rontja az ötvözőelem

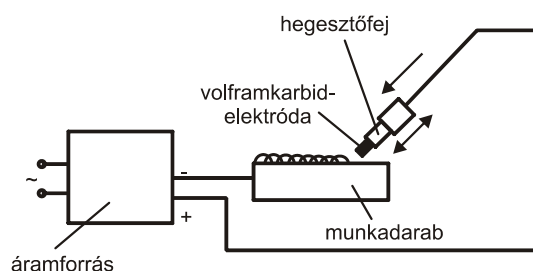
4.45. ábra

Ötvözőelemek hatása a szerszámacélok tulajdonságaira

4.10. Felrakó hegesztés

A felületötvöztetéshez hasonló elvet, de kisebb teljesítménysűrűséget és dermedési sebességet megvalósító felrakó hegesztési eljárások a vastagabb rétegek létrehozásának módszerei. A kötőhegesztésnél megismert ömlesztő eljárások közül első-sorban ívhegesztéssel lehet felrakó hegesztést végezni.

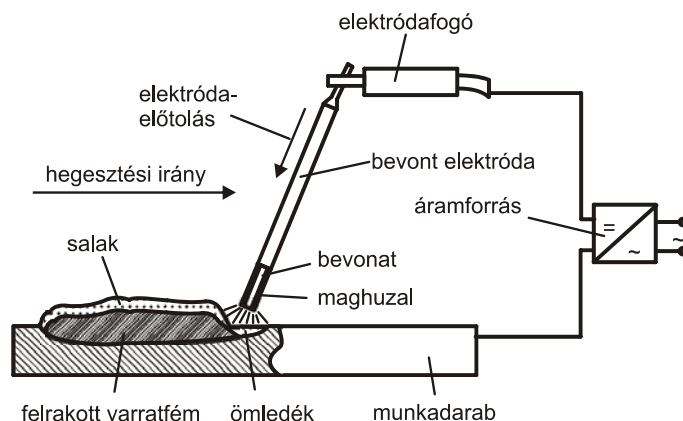
Szikrahegesztéskor (4.46. ábra) a felhegesztett réteggel megegyező anyagú rezgetett elektróda és a munkadarab érintkezésekor – az áramforrás feltöltött kondenzátorainak kisülése révén – keletkező szikrakisülés az elektródából darabokat tép le (elektroerózió), amelyek a munkadarabbal kohéziós kapcsolatba kerülnek. A hegesztőfej a rezgőmozgáson kívül az elektróda fogyási sebességével megegyező sebességű előtolómozgást is végez.



4.46. ábra

Szikrahegesztés

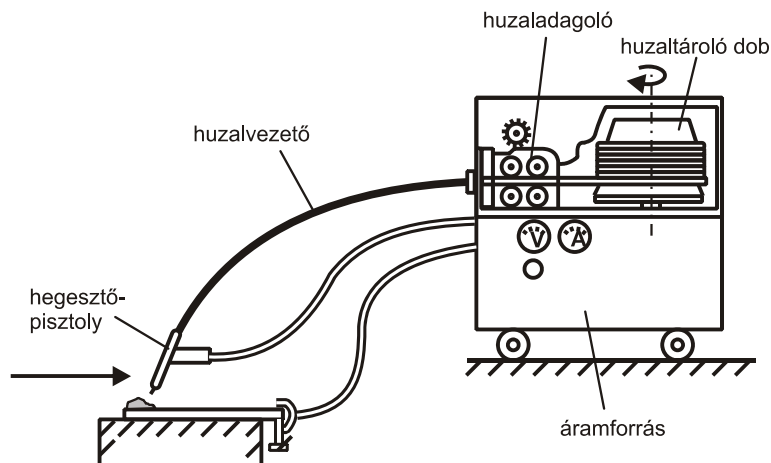
Bevont elektródás kézi ívhegesztés (4.47. ábra) során a hegesztőív – mint hosszan tartó elektromos kisülés – megömlesztí az alapanyag felületi rétegét és a keramikusan bevonatú elektródát, amelyek közös ömledékfürdőjéből dermed meg a felrakott varratfém.



4.47. ábra

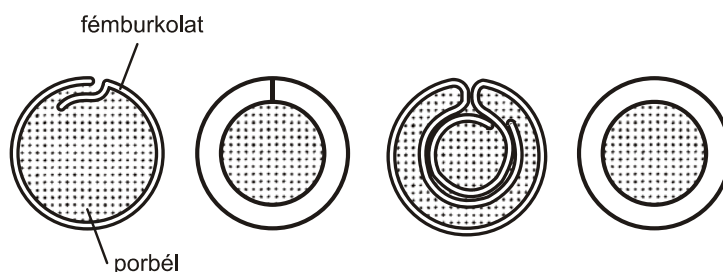
Bevont elektródás kézi ívhegesztés

Porbeles huzalelektrodával végzett ívhegesztés (4.48. ábra) esetében az elektromos ív által megömlesztett elektródahuzal portöltetének egy része gázzá alakulva védi az ömledékfürdőt.



4.48. ábra (I.)

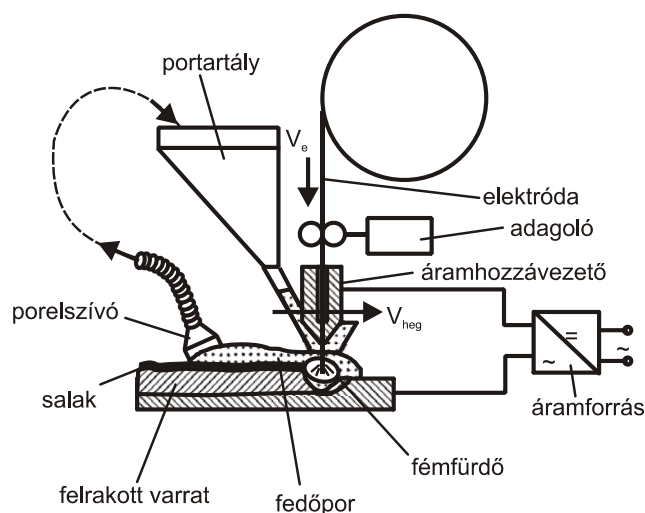
Porbeles huzalelektrodával végzett ívhegesztés



4.48. ábra (II.)

Porbeles huzalelektrodával végzett ívhegesztés hozaganyagának keresztmetszete

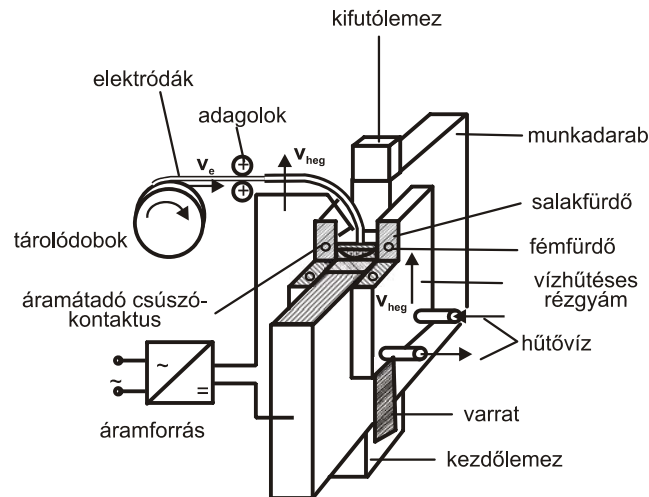
Fedett ívű hegesztés (**4.49. ábra**) során a tekercselhető, fogyó csupasz elektrodahuzal (tömör vagy porbeles) és a munkadarab között létrehozott ív fedőpor alatt ég. A fedőpor feladatai: salakképzés, ötvözés, ívstabilizálás, levegő kizárása.



4.49. ábra

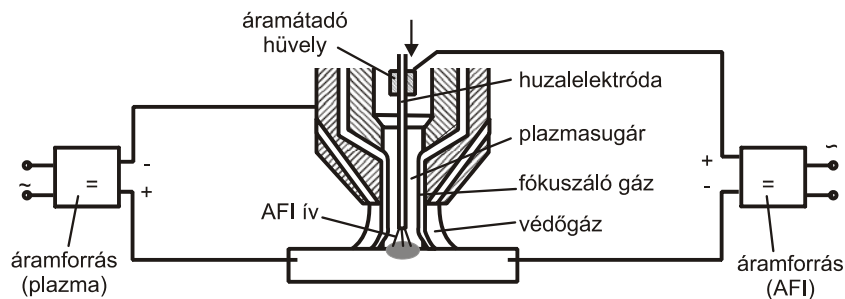
Fedett ívű hegesztés

Elektro-salakhegesztéskor (**4.50. ábra**) a varratömledék védelmét biztosító, fedőporból képzett folyékony salak – az ívköznél jobb elektromos vezetőképessége révén – az ív kialvása után zárja az áramkört. A fellépő ellenállás hatására a salakban hő fejlődik, kb. 2300°C-ra felhevül, és a folyamatosan előtolt elektródahuzalt, valamint keskeny sávban a munkadarabokat megolvasztja, közös varratömledéket képezve.



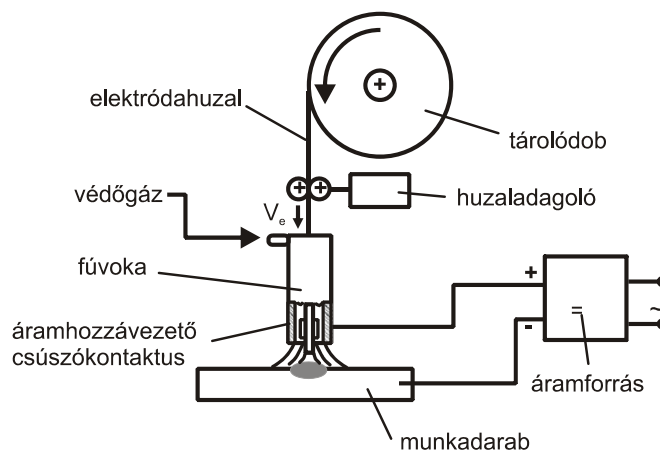
4.50. ábra
Elektro-salakhegesztés

Plazma-fogyóelektródás védőgázos ívhegesztés (**4.51. ábra**) esetében elsőként az AFI-ív gyullad ki, majd néhány másodperc után a plazmasugár önmagától létrejön. A plazma által stabilizált AFI-ív nagy huzalkinyúlással nagy fajlagos leolvadást eredményez, a hegesztési sebesség megnövelhető.



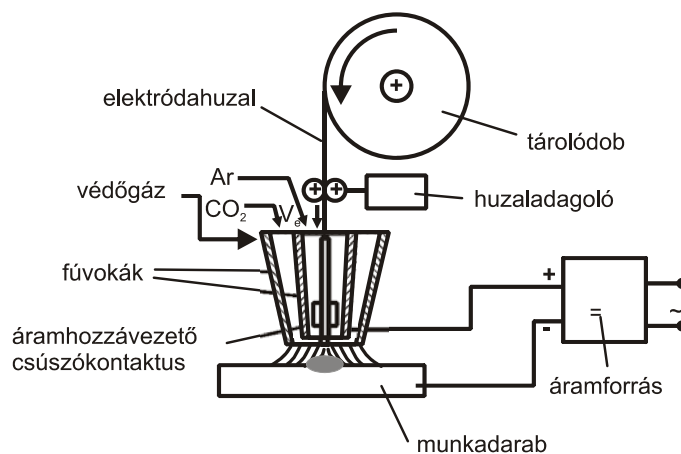
4.51. ábra
Plazma-fogyóelektródás védőgázos ívhegesztés

Fogyóelektródás védőgázos ívhegesztés (**4.52. ábra**) során a tárolódobra feltetkercselt elektródahuzalt – a leolvadással megegyező sebességgel – előtolóberendezés juttatja el a hegesztés helyére. Az elektromos ív a huzal és az alapanyag között ég. Az áramhozzávezetés közel az ívhez történik, így nagy áramsűrűségek érhetők el. A megömlesztett anyag levegőtől való védelmét az elektródahuzal körül koncentrikusan elhelyezkedő fúvókán kiáramló védőgáz által létesített gázburok biztosítja.



4.52. ábra
Fogyóelektrodás védőgázos ívhegesztés

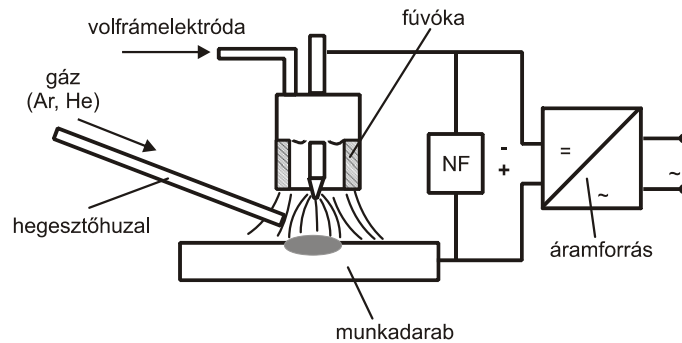
Kettősgázfűvókás fogyóelektródás ívhegesztéskor (**4.53. ábra**) két fűvókán keresztül 80–85% szén-dioxid és 15–20% argon védőgázt vezetnek az ívhez úgy, hogy az argon gázburok csak a huzalvég környezetében létesítsen semleges védőgáz-atmoszférát. Az elrendezés következtében a hegesztőhuzalról finomcsepes fémátvitellel jut a hozaganyag a huzal tengelyirányában a hegfüldőbe.



4.53. ábra
Kettősgázfúvókás fogyóelektrodás ívhegesztés

Volfrámelektrodás semleges védőgázos ívhegesztés (**4.54. ábra**) során a volfrámelektroda és az alapanyag között ég az ív. Az ömledéket semleges (nemes) védőgáz védi. Ha a védőgáz argon, AVI-hegesztésről beszélünk. Az ív gyújtására

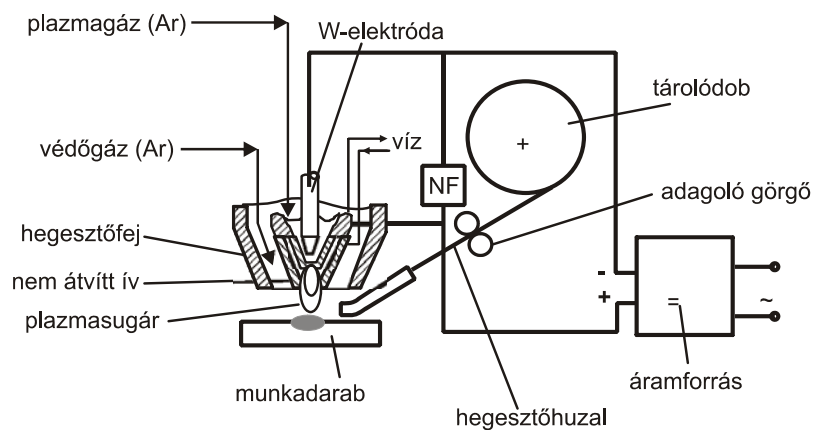
egy nagyfrekvenciás, nagyfeszültségű áramforrás szolgál, amely szikrakisülés révén ionizálja az ívközt, és ezzel lehetővé teszi az ív begyújtását az elektróda alapanyagához való érintése nélkül.



4.54. ábra

Volfrámelektrodás semleges védőgázos ívhegesztés

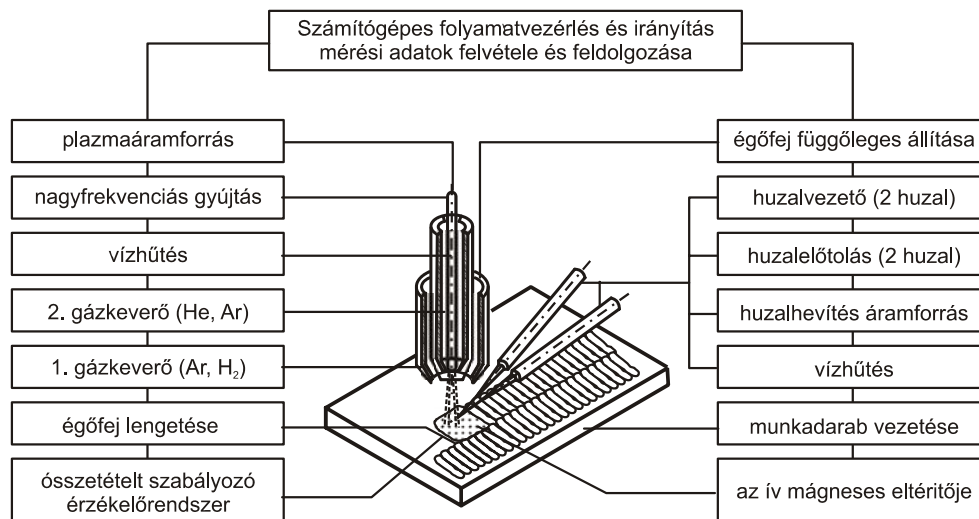
Plazmasugár-hegesztésnél (**4.55. ábra**) az ív a volfrámelektroda és a rendszerint vízhűtésű rézfúvóka belső fala között ég (nem átvitt ív), s így a plazmasugár kiválik az ívoszlopból. Az ívgyújtást nagyfrekvenciás áramforrás (NF) által létrehozott szikrakisülések biztosítják. A hegfürdőt külön védőgáz óvja, amit a külső fúvóka vezet az ív, illetve. a plazmasugár köré.



4.55. ábra (I.)

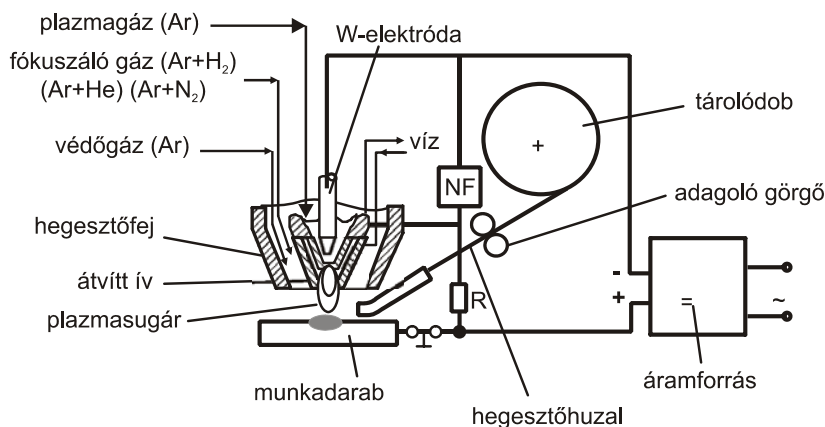
Plazmasugár-hegesztés

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



4.55. ábra (II.)
Plazmasugár-hegesztés

Plazmaívhegesztés (**4.56. ábra**) során a plazmafúvóka által leszűkített ív a volfrámelektroda és a munkadarab között ég (átvitt ív). A plazmaív megfelelő koncentrációját fókuszáló gáz segíti elő. A többi azonos a plazmasugár-hegesztéssel említettekkel.



4.56. ábra
Plazmaívhegesztés

A bevonatos elektróda, pálcá, huzal, (tömör, porbeles), szalag (tömör, porbeles) hozaganyagból, hegeszthető vagy előmelegítéssel (esetleg közbelső réteg felra-

kásával) hegeszthetővé tett alapanyagokon (gyakran acélokon) akár 15 mm vastag rétegek is kialakíthatók. A hozaganyagok összetételüket tekintve vasalapúak vagy vasban szegények lehetnek. Míg az előbbiek között alacsony és közepes ötvöztartalmúak (túlnyomórészt martenzites szövetszerkezetű réteget eredményezők), magas ötvöztartalmúak (kopásálló vagy korrózióálló ausztenites szövetszerkezetű réteget eredményezők) vagy szívós anyagrétegbe beágyazódó nagy keménységű fázisokat tartalmazók lehetnek, addig az utóbbiak a Co- vagy Ni-bázisú keményötvözetek, a fémkarbidok vagy a nem vasfémek, illetve ötvözeteik közül kerülnek ki.

A szerszámok és gépalkatrészek felrakása, illetve javítása igen előnyös lehet, mert nemcsak az eredetinek megfelelő minőség érhető el, hanem a hegesztőanyag és -technológia körütekintő megválasztásával a felújítás az eredetinel hosszabb élettartamot is eredményezhet.

A felrakó és javító hegesztések varratának összetétele általában nagyon eltér az alapanyagétól, előfordulhat, hogy a keveredés miatt az első varrat vagy réteg tulajdonsága merőben különbözik az alapanyagétól és a varratétól. Megnő pl. az edződési hajlama, vagy olyan kiválások jelentkeznek, amelyek következtében elrepedhet. Ezek csak az acélok tulajdonságváltozásait figyelembe vevő hegesztéstechnológia kidolgozásával és megvalósításával kerülhetők el, amihez az alapanyag és a hegesztőanyag összetételének ismerete elengedhetetlenül szükséges.

4.10.1. Szerszámok felrakó hegesztése

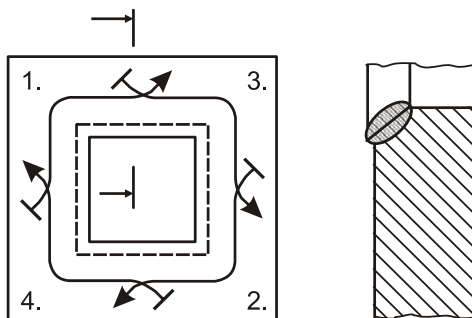
A szerszámacélok az összetételükből következően edződésre rendkívül hajlamosak, ezért hegesztéskor elő kell melegíteni azokat. Erősen ötvözött (hideg- és melegalakító, forgácsoló) szerszámacélok közös jellemzője, hogy az edzési hőmérsékletéről 400–600 °C hőmérséklet-tartományba (az előmelegítési hőmérsékletre) kb. fél órán belül lehűtve, több napon át is lágyak, ausztenites szövetszerkezetűek maradnak. Tekintettel arra, hogy az alapanyaghoz hasonló összetételű hozaganyaggal kell hegeszteni, az említett hőmérséklet-tartományban még többórás munka után is képlékeny mind az alapanyag, mind pedig a varrat, ezért a repedésveszély elhanyagolható. A hegesztés befejezése után, anélkül hogy tovább hűtenének, lágyítást végeznek, hogy a „működő” felület a varratból forgácsolással ki-munkálható legyen. A megmunkálást edzésnek és keményítő megeresztésnek kell követnie, a szerszám felhasználási területének megfelelően. A hegesztéssel összefüggésben előforduló hőkezeléseket a **4.17. táblázat** tartalmazza, amelyben az összetétel és a keménység csak tájékoztató érték. A „Keménység” oszlop esetében a számlálóban levő számok az edzés utáni, a nevezőben levők a keményítő megeresztés utáni értékek.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.17. táblázat. Felrakó hegesztéssel összefüggő hőkezelések

A varrat összetétele, %						A hőkezelés megnevezése és hőmérséklet-tartománya, ° C				Keménység HRC	Alkalmazási terület
C	Cr	W	V	Co	Mo	edzés	meg-eresztés	lágylítás	előmelegítés hegesztéshez		
0,8	4	18	1,5	5	0,5	1240–1280	520–580	770–840	380–500	65/55	Gyors-acél jellegű varratok
0,8	4	18	1	–	0,5	1250–1290	500–570	770–840	390–500	65/66	
1,3	4	12	4	5	1,0	1210–1250	550–580	770–840	400–500	65/66	
1,2	5	12	3	–	–	1220–1270	510–550	770–840	400–500	64/65	
1,3	4	10	3	10	4,0	1200–1240	500–560	770–840	320–500	65/68	
0,9	4	6	2	5	5,0	1190–1230	520–560	770–840	350–500	65/67	
0,9	4	7	2	5	5,0	1190–1230	500–570	770–840	370–500	65/66	
1,3	4	7	3	12	5	1200–1240	540–570	770–840	400–500	65/66	
1,0	4	2	1	8	10	1170–1210	500–560	770–840	380–500	64/68	
1,0	4	2	2	–	9	1170–1210	520–580	770–840	400–500	65/66	
2,0	13	–	–	–	–	920–1000	480–510	800–850	380–450	64/60	Varratok hidegalakító és vágószerszámokhoz
1,0	5	–	–	–	1	950–980	480–520	800–850	380–450	65/58	
0,4	5	–	1	–	1,5	1020–1090	430–470	800–840	380–420	56/48	
0,4	2,5	10	0,4	–	–	1080–1150	560–620	810–830	460–500	53/58	Varratok melegalakító és vágószerszámokhoz
0,3	2	5	–	–	–	980–1080	560–620	780–850	480–500	48/50	
0,4	5	1,3	0,3	–	1,5	1000–1050	470–500	750–800	400–450	54/55	
0,4	3	0,2	0,5	3	3	1000–1070	500–570	750–800	450–500	54/53	
0,4	5	0,1	1,0	–	1	1020–1080	480–520	750–800	380–450	54/55	
0,4	5	–	0,6	–	3	1030–1080	480–520	750–800	440–480	55/54	

A javító hegesztés során nem kell feltétlenül elérni az edzési hőmérsékletet, elegendő ennél 100–150 °C-kal kisebb hőmérséklet is, amelyen a munkadarab gyakorlatilag már ausztenitesnek tekinthető. Ha nem áll rendelkezésre kellően nagy méretű és nagy hőmérsékletű kemence, amelyben az ausztenitesítési hőmérséklet elérhető, elegendő a szerszámot csak az előmelegítési hőmérsékletre hevíteni. Az alapanyag ilyenkor hegesztés közben keményebb, mint az előbbi esetben, amikor az edzési hőmérsékletre hűtötték le erre a hőmérsékletre, de legfeljebb 100 mm hosszúságú varratszakaszokban – és e szakaszokat kalapácsütésekkel nyújtva –, a **4.57. ábrán** megadott sorrendben hegesztve, a felújítás repedésmentesen elvégezhető.



4.57. ábra

Kivágószerszám javítóhegesztésének sorrendje az elkopott él teljes hosszában

Hegesztés után egy órán át hőkiegyenlítő hűntartást végeznek, majd ezt követően nyugvó levegőn vagy homokba ágyazva hagyják lassan szobahőmérsékletre lehűlni a munkadarabot. Ezután a keményítő megeresztés hőmérsékletén kétszer egymásután félórás hűntartást végeznek. A varrat forgácsolással nem vagy csak nehezen munkálható meg, ezért a hegesztéshez réz- vagy grafitgyámot kell használni a fürdő megtámasztására. Kicsorbult felületek vagy élek köszörülésekor futtatási szín nem jelenhet meg. Tekintettel arra, hogy a kezdő- és a végkráter gyakran zárványos, ez pedig elsősorban finom éleken nem engedhető meg, az ívet a homlokapon húzzák, és ezután viszik át a leendő varrat helyére, majd ismét a homloklapra kilépve szakítják meg. Ezeket a nyomokat a homlokfelületről később köszörüléssel el lehet távolítani, de köszörülés azért is szükséges, mert előmelegítés, hűntartás és az esetleges hőkezelések közben a felület oxidálódik, és némi vete-medéssel is számolni kell.

Javasolt műveleti sorrendek:

a) sorrend:

1. hevítés az ausztenitesítési hőmérsékletre, majd hűtés az előmelegítés hőmérsékletére;
2. hegesztés;
3. lágyítás;
4. forgácsoló megmunkálás;
5. edzés és keményítő megeresztés.

b) sorrend:

1. hevítés az előmelegítési hőmérsékletre;
2. hegesztés gyám mellett,
3. hőkiegyenlítő hűntartás egy órán át;
4. hűtés nyugvó levegőn vagy homokban;
5. keményítő megeresztés egy órán át;
6. megmunkálás köszörüléssel.

Ha a felrakás, illetve javítás az élnek vagy a felületnek csak kis részére terjed ki, számolni kell azzal, hogy a varrat és az eredeti alapanyag találkozásának kör-

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

nyezetében a szilárdsági tulajdonságok kedvezőtlenül megváltoznak. Az ilyen javítások csak szükségmegoldásként fogadhatók el; ezért kedvezőbb, ha a teljes élt vagy felületet eltávolítják, és ezután végzik el a felrakó hegesztést.

Közepesen ötvözött és ötvözetlen szerszámacélok előmelegítési hőmérsékletét a kisebb karbontartalmúak esetében 200–300 °C-ra, a többihez 300–400 °C-ra választják, ha az alapanyaggal közel azonos összetételű hozaganyaggal javítanak. Célszerűbb azonban erősen ötvözött hozaganyagot használni olyan módon, hogy hegesztés előtt a teljes dolgozó felületet eltávolítják. Ilyenkor a b) hegesztési sorrendet kell követni, esetleg azzal a módosítással, hogy a 3. pont után az a) sorrend 3., 4. és 5. művelete következzen.

Süllyesztékek és melegmunkáló szerszámok vállalai és tuskéi nagy hőingadozásnak vannak kitéve. Ilyen helyeken nikkel- vagy kobaltalapú

50–60% Ni + 15–17% Mo + 15–17% Cr + 0,03–0,05% C összetételű vagy

50–60% Co + 15–25% Cr + 0–10% Ni + 0,3–0,4% C összetételű,

ún. lágyötvözetű hozaganyagot használnak. Ezek még 600–700 °C-ra hevülve is jól viselik az igénybevételeket, és hőingadozásra (hősokkra) viszonylag érzéketlenek.

A nikkel- és a kobaltalapú lágyötvözetű hozaganyagok használata esetén a szerszámtest anyagminőségének megfelelő előmelegítés elegendő. A varratok jól megmunkálhatók, de az első ütések hatására némi méretváltozás mellett 500–550 HV-re keményednek. A nikkelalapú varratok 760–800 °C hőmérsékleten 3–4 órás hőntartás után levegőn hűtve 300–350 HB keménységet érnek el, és ezt kb. 800 °C üzemi hőmérsékletig megtartják.

4.10.2. Takarékszerszámok készítése

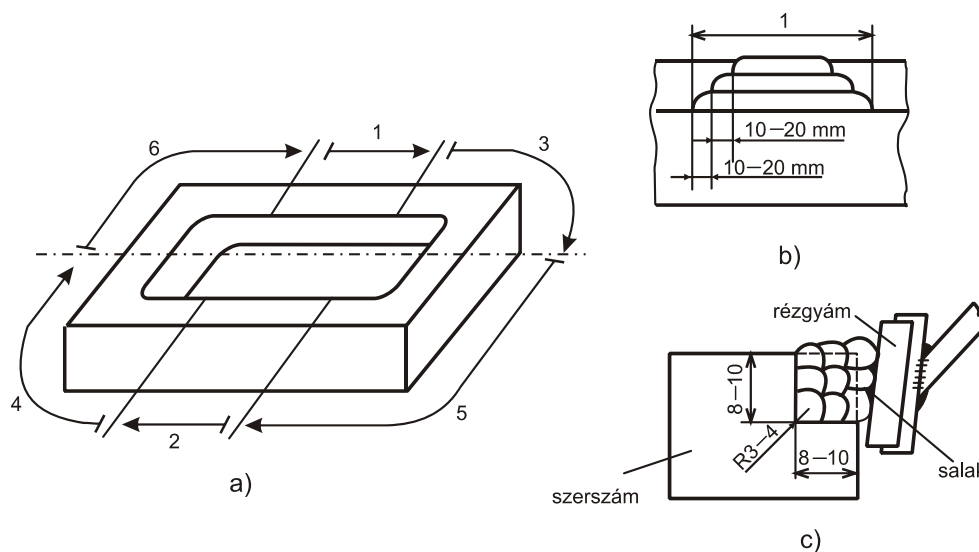
Az erősen ötvözött elektródákkal, illetve az említett helyeken nikkel- és kobaltalapú hozaganyagokkal javított, közepesen ötvözött vagy ötvözetlen acélból készült szerszámok élettartama hosszabb, mint új állapotukban volt. Ennek az a magyarázata, hogy javításkor a különböző felületrészeket az igénybevétellel szemben legmegfelelőbb összetételű hozaganyaggal lehet elkészíteni. Ezeket a varratokat azonban a szerszámacélokhoz olcsóbb nemesíthető acélokra is fel lehet rakni; így készülnek az ún. takarékszerszámok.

A forgácsoló és a hidegalakító takarékszerszámok készítéséhez általában C 45, C 55 vagy S 70, esetleg M 1 acélt használnak. A süllyesztékek és a melegalakító szerszámok használat közben néhány száz °C-ra hevülhetnek, ezért az ilyen szerszámok alapanyaga legalább NK minőségű melegalakító szerszámacél legyen.

A varratok erősen ötvözött acélok, illetve az előbb említett helyeken nikkel- vagy kobaltalapú lágyötvözetek. Az alapanyag összetétele ettől lényegesen eltér, ezért a tapasztalat szerint csak a harmadik varratsor vehető a hozaganyaghoz már közel azonos összetételűnek. Hegesztéskor az áramerősség csökkentésével és az elektróda döntésével érhető el az, hogy a beolvadás mértéke (azaz az alapanyag részaránya a varratban) minél kisebb legyen.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

Nagyméretű kivágólap készítéséhez gyámot (4.58. ábra) használnak. Az előmunkált padka mérete kb. 10×10 mm legyen azért, hogy mind függőlegesen, mind vízszintesen legalább a harmadik varratból lehessen a vágóélt kimunkálni. Egy-egy varratszakaszt célszerű teljes keresztmetszetében feltölteni, ilyen módon ugyanis kisebb a valószínűsége, hogy közben a szakasz hőmérséklete az előírt előmelegítési hőmérséklet-tartomány alsó határértéke alá süllyed. Ügyelni kell arra, hogy a kezdő- és a végkráterek ne kerüljenek egy síkba.



4.58. ábra

Nagyméretű kivágólap készítése takarékszerszámhoz

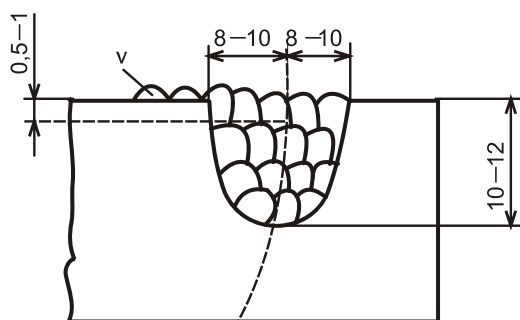
a) hegesztési sorrend; b) a varratszakaszok elkészítése; c) a rézgyám használata

Az ún. horonyba rakás módszerével a leendő vágóél helyén megfelelő méretű vályút készítenek, és a belső részeket hegesztés után eltávolítják (4.59. ábra). Természetesen ilyenkor a varratot forgácsolás előtt lágyítani kell, majd edzeni, keményíteni. A kezdő- és végkrátert 0,5–1,0 mm mélységben köszörüléssel el kell távolítani a homlokfelületről hegesztés után.

Kisméretű lyukasztó- vagy forgácsolószerszámot a 4.60. ábrán látható rézgyámban célszerű készíteni.

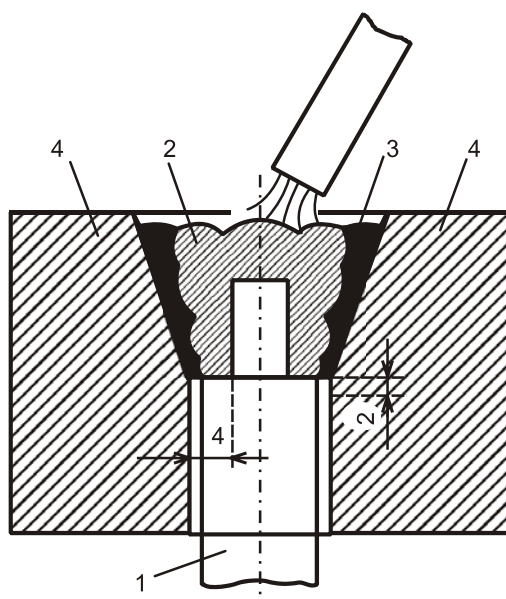
A takarékszerszámok készítésekor a b) műveleti sorrend az általános. Kis tömegű szerszámok készítésekor a varrat környékének hőmérséklete esetleg túllépi az előírt előmelegítési hőmérséklet-tartomány felső határértékét, ez káros, mert a varrat kilágyul, ezért ilyenkor utólagos edzés szükséges.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések



4.59. ábra

Takarékszerszám készítése a horonyba rakás módszerével
(a kimunkálendő vágóélt szaggatott vonal jelöli)



4.60. ábra

Kisméretű lyukasztószerszám egytömögű felrakó hegesztése

1 C 55 minőségű szerszámszár; 2 varrat; 3 salak; 4 két félből álló rézgyám

A kis, 1–2 kg tömegű szerszámok, kaparókörmök felrakott rétegének legfelső varratait 5–6 mm mélyen 1200 °C-nál nagyobb hőmérsékleten tarthatja a hegesztéssel bevitt hő. Ilyenkor a hegesztést befejezve olajedzés, majd keményítő megereztés végezhető.

4.10.3. Kopásálló rétegek felrakása

A koptatásnak kitett alkatrészek keményfémből vagy keményötvözetből, esetleg erősen vagy közepesen ötvözött acélból, valamint nemesíthető acélból készülnek. A keményfémből vagy keményötvözetből készült alkatrészek hegesztéssel nem javíthatók. Az erősen ötvözött acélból készült alkatrészekre az előzőekben ismertetett technológia érvényes. Általában a b) műveleti sorrendet követik, és az alapanyaghoz közel azonos összetételű hozaganyagot választanak. A legfeljebb közepesen ötvözött és az ötvözetlen nemesíthető acélból készült gépalkatrészeket hegesztéskor a **4.18. táblázatban** feltüntetett előmelegítési hőmérsékletre kell hevíteni akkor, ha a varrat keménysége nem haladja meg a 35 HRC értéket.

4.18. táblázat. Felrakó hegesztésekhez használatos acél alapanyagok előmelegítési hőmérséklete

Az anyag jele	Összetétel, %					Hőmérséklet, T, °C
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	
C 25, A 44 B	0,20–0,30	0,40–0,70	–	–	–	100–200
C 35, A 50, Aö 50	0,30–0,40	0,50–0,80	–	–	–	200–300
C 45, A 60, Aö 55	0,40–0,50	0,50–0,80	–	–	–	230–320
C 55, A 70, Aö 60	0,50–0,60	0,60–0,90	–	–	–	260–340
C 60	0,55–0,65	0,60–0,90	–	–	–	300–350
Mn 1, Aö 20 Mn	0,25–0,35	1,2–1,7	–	–	–	230–300
Aö 35 Mn,	0,35–0,45	0,8–1,1	–	–	–	260–350
Aö 30 MnSi	0,35–0,45	1,1–1,4	–	–	–	300–350
Mn 2	0,35–0,45	1,6–1,9	–	–	–	330–400
BC 2	0,1–0,2	0,4–0,6	0,4–0,7	–	–	150–250
BC 3	0,15–0,20	1,0–1,3	0,8–1,1	–	–	200–300
Cr 1	0,30v0,40	0,6–0,9	0,9–1,2	–	–	300–350
Cr3	0,35–0,45	0,6–0,9	0,9–1,2	–	–	350–400
BNC 2	0,1–0,2	0,4–0,7	0,5–1,0	3,0–4,0	–	200–300
BNC 5	0,1–0,2	0,4–0,7	1,0–0,7	1,0–1,7	–	200–300
BNCMo 3	0,1–0,2	0,4–0,8	1,0–0,4	3,5–4,5	0,2–0,3	250–350
Aö 40 CrNi,	0,3–0,4	0,4–0,8	1,0–2,0	–	–	250–400
CMo 1	0,2–0,3	0,5–0,8	0,9–1,2	–	0,12–0,3	250–350
CMo 3	0,3–0,4	0,5–0,8	0,9–1,2	–	0,15–0,3	300–400
CMo 4	0,4–0,45	0,5–0,8	0,9–1,2	–	0,15–0,3	320–400
NCMo 3	0,35–0,45	0,7–1,0	0,4–0,6	0,4–0,7	0,15–0,3	200–300
NCMo 4	0,35–0,45	0,5–0,8	0,6–1,2	0,7–1,0	0,15–0,3	230–300
NCMo 5	0,3–0,4	0,4–0,8	1,2–1,7	1,0–1,7	0,15–0,3	260–350
NCMo 6, Aö 30 CrNiMo,	0,25–0,35	0,3–0,6	1,2–2,2	1,7–2,2	0,30–0,5	300–350
NCMo 7	0,3–0,4	0,3–0,6	1,5–2,0	3,0–4,0	0,30–0,5	350–400
AöMn 12	0,8–1,4	11,0–14,0	–	–	–	Előmelegítés tilos

Mivel ezek az alapanyagok viszonylag lágyak, és így gyorsan kopnak, az alkatrészeket az alapanyagnál erősebben ötvözött varratösszetételt eredményező hozaganyaggal célszerű felrakni, és ekkor az előmelegítés hőmérsékletét a varrat összetétele szabja meg:

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

- 35–45 HRC keménységű varratok felrakásakor az alapanyag összetételétől függetlenül 150–200 °C;
- 45–55 HRC keménységű varratok készítésekor 200–300 °C;
- erősen ötvözött, edződő varratokhoz a b) műveleti sorrend ajánlott, így az előmelegítés hőmérséklete 400–600 °C;
- a keményötvözetű varratok készítésekor szintén 400–600 °C, függetlenül az alapanyag összetételétől.

4.19. táblázat. Hozaganyagok összetétele kopásálló felületek felrakó hegesztéséhez

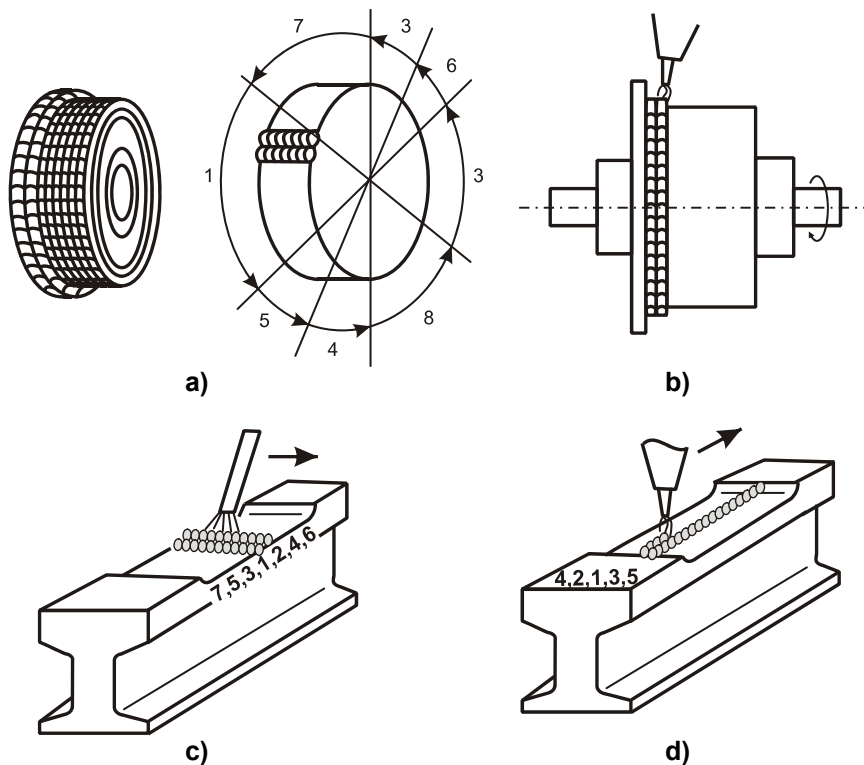
Sor-szám	Összetétel, %					HRC (HB)	Ellenálló képesség*				Ár-szor-zó**
	C	Mn	Cr	W	egyéb		Ko-pás-sal	Ütés-sel	Kor-rózió-val	°C hő-mér-sék-letig	
1.	0,1–0,3	0,2–2,0	0,0–1,0	0,0–0,8	Mo	(250)	1	9	1	250	1,5
2.	0,2–0,4	1,0–2,0	1,0–2,0	-	-	(300)	2	8	1	250	1
3.	0,5–0,6	0,2–0,4	-	0,7–1,2	Mo	(300)	2	9	1	250	2,5
4.	0,2–0,4	2,0–3,0	2,0–3,0	-	-	(350)	3	7	1	250	2
5.	0,8–0,9	0,3–0,5	-	0,8–1,4	Ni=9–11	(350)	3	8	1	300	3
6.	0,3–0,5	2,0–3,0	2,0–3,0	-	Si	(400)	4	7	1	250	3
7.	0,1–0,15	0,5–1,0	28,0–30,0	-	Si, Mo	(250)	4	10	10	300	8
8.	0,4–0,6	0,5–1,5	1,5–2,5	-	Mo, Si	50	5	7	1	300	3
9.	0,5–0,7	0,4–0,7	2,0–9,0	-	Mo=5–6	55	5	6	2	400	3,5
10.	0,6–0,8	0,5–2,0	7,0–9,0	3,0–6,0	V	60	6	5	3	400	4
11.	0,6–0,8	0,5–1,5	3,0–5,0	16–18	-	60	6	4	2	500	10
12.	0,7–0,9	0,2–0,5	4,0–6,0	-	-	63	7	3	2	550	13
13.	1,0–1,3	0,3–0,6	11–13	-	-	63	7	2	4	400	4
14.	3,0–4,0	-	20–25	-	Si, Mo	55	7	3	4	400	6
15.	4,0–5,0	0,0–5,0	20–35	0,0–5,0	Mo, Co	60	8	2	3	400	10
16.	5,0–6,0	-	20–25	-	Nb=7,0	65	9	2	3	600	20
17.	1,0–1,5	-	25–30	4,0–6,0	-	40	5	7	9	700	145
18.	1,5–2,0	-	25–30	8,0–10	-	50	6	6	8	700	145
19.	2,0–2,5	-	25–30	12–15	-	55	7	6	7	700	140
20.	2,2–2,6	-	30–35	17–23	-	60	8	5	6	750	140
21.	0,9–1,1	-	30–35	8,0–10	Si=1; B=1	40	5	6	8	700	45
22.	0,4–0,6	-	13–16	-	Si=4, B=4	60	7	4	7	700	40
23.	70–80 % WC + 20–30% Fe					70	10	1	3	300	90
24.	70–80 % WC + 20–30% Ni					70	10	3	4	400	110
25.	0,7–1,2	12–13	-	-	-	(220)	5	8	1	200	3
26.	0,8–1,1	14–16	-	-	Ni=3	(250)	6	8	1	200	4
27.	0,4–0,7	15–20	20–24	-	-	(250)	5	9	5	250	6
28.	0,1–0,2	5,0–7,0	17–19	-	Ni=8–10	(200)	4	10	10	300	7

* A 10 a legjobb, az 1 a legrosszabb. ** Ha 1 kg OK 48.00 hazai elektróda árát vesszük egységnek.

A különféle kopásfajtákkal szemben ellenálló hozaganyag kiválasztásához a 4.19. táblázat ad segítséget. Az 1–13. sorszámú hozaganyagok tulajdonságai a 7. sorszámú kivételével hőkezeléssel változtathatók.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

- Az 1–6. sorszámú hegesztőanyagok sínekhez, görgőkhöz, futó- és lánckerekhez, kapcsolótárcsákhoz stb. ajánlhatók. A hegesztési sorrend a hegesztési eljárástól függően a **4.61. ábrán** látható. Az egymással kapcsolódó felületek közül a könnyebben cserélhető 30–40 HV-vel legyen lágyabb.
- A 7. sorszámú, 29/9 típusú ausztenites acél hozaganyagokat külön ki kell emelni. Ezek varrata csak kb. 200 HV keménységű. Az alapanyag összetételétől függő előmelegítési hőmérséklet szükséges. Fogaskerek hiányzó fogainak pótlására, prés és sorjázószerszámok stb. javítására használják. Szívósak, nehezen megmunkálhatók, ütésre, nagy felületi nyomásra keményednek.
- A 8–9. sorszámú hegesztőanyagok lánctalpak, vezetőgörgők stb. felületének védelmére alkalmasak, azaz olyan helyekre, ahol az egymással érintkező felületek közé homok, föld, ásványi anyag stb. kerülhet.
- A 10–11. sorszámú hozaganyagok téglá- és cserépipari prések, bányászati fúrószerszámok stb. felületének védelmére alkalmasak.
- A 12–13. sorszámú, erősen ötvözött hozaganyagokat földmegmunkáló, kőzetdaraboló, szénfejtő stb. szerszámokhoz használják (**4.62. ábra**).
- A 14–16. sorszámú vasalapú keményötvözetek (Fe = 55–65%) rendkívül ridegek, csak egyetlen varratsor készíthető velük, a második sor már repedne, sőt hőkezeléssel nem lágyíthatók. A hegesztési sorrend célszerű megválasztásával el kell érni, hogy a munkadarabok vetemedése hegesztés után a megengedhető határon belül maradjon, mert utólagos egyengetés közben a varrat reped. Az alapanyag összetételétől függetlenül 400–600 °C-os előmelegítéssel érhető el repedésmentes varrat. Ennek elmaradása esetén a varrat számos hajszálrepedést tartalmaz. Ez csak olyan alkatrészekben engedhető meg, amelyeknek az alapanyaga és a hőhatásövezete annyira szívós (HB~300), hogy a repedést elszigeteli, és az esetleges törés balesetet nem okozhat (pl. ekevasak, földmegmunkáló szerszámok, érc- és ásványbányászati őrlőművek álló részei, cement-, téglá- és kerámiaipari prések és keverőlapátok élei). A varrat szívósságát fokozza, ha az alapanyagra egy vagy két sor párnaréteget készítenek 29/9-es hozaganyaggal, és csak ezután rakják fel a vasalapú, keményötvözetű varratot, amely alapján véve krómmal erősen ötvözött rideg, fehér öntöttvas.
- A 17–20. sorszámú hozaganyagok kobaltalapú keményötvözetek (Co = 45–60%), hegesztésükkor 200–400 °C előmelegítés ajánlott. Belső égésű motorok és kompresszorok szeleptányérjain a szelepülékkel érintkező felület felrakására, továbbá szelepülékekhez, gőzt, gázt, vizet és korróziós termékeket szállító csővezetékek elzáró szerelvényeinek tömítőfelületéhez használják.



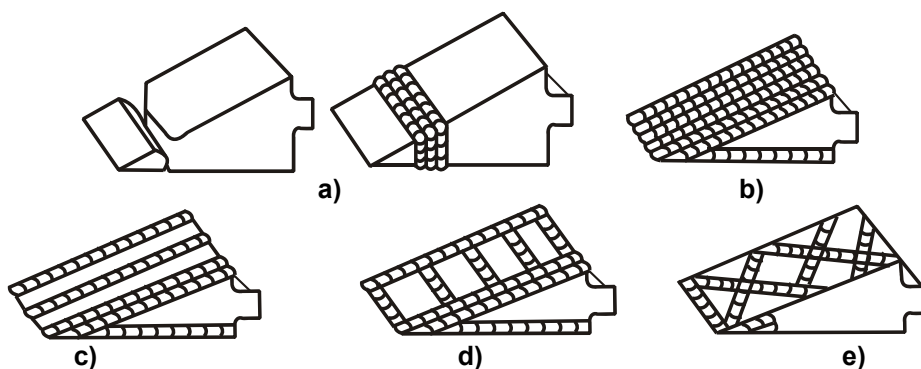
4.61. ábra

Darukerék és darusín felrakó hegesztése

a) bevont elektródás kézi ívhegesztéssel végzett felrakás és hegesztési sorrendje; b) felrakó hegesztés porbeles huzallal; c) sín felrakó hegesztése bevont elektródás kézi ívhegesztéssel; d) felrakó hegesztés porbeles huzallal
(a számok és a nyilak a hegesztés sorrendjét és irányát jelzik)

- A 21–22. sorszámú hozaganyagok nikkelalapú keményötvözetek (Ni = 60–80%), felhasználási területük a kobaltalapúakéhoz hasonló.
- A 23–24. sorszámú hozaganyagok WC- és Fe-, illetve Ni-por keverékének szinterelésével készülnek. Bevonat nélkül AVI- és gázhegesztésre alkalmas pálcák vagy bevonatos elektródák alakjában kerülnek forgalomba. Gázhegesztéshez 1 mm átmérőjű nikkelhuzalra műanyag foglalatú, WC-port tartalmazó bevonatos, kb. 1 m hosszú pálcákat is forgalmaznak. Ez utóbbit és az AVI-pálcát olyan módon hegesztve, hogy közben az alapanyag felülete éppen hogy megolvadjon, szívós alapszövetbe ágyazódott WC-szemcsékben dús varrat keletkezik. Ha az alapanyag nem kíván előmelegítést, akkor 65–70 HRC keménységű varrat készíthető előmelegítés nélkül. Huzalhúzó dobok, kötélvezető tárcsák, közetmegmunkáló szerszámok stb. élettartama je-

lentősen növelhető velük. A WC-port vékony Fe-, illetve Ni- vagy Co-lemezből készült, 300–400 mm hosszú csövecskébe töltik. Így készülnek a hasonló célú csőpálcák gázhegesztéshez és AVI-eljáráshoz, valamint a vékony bevonatos csőelektrodák kézi ívhegesztéshez. Elhasználódott keményfém lapkákat néhány mm szemcseméretűre aprítva és rézbe ágyazva mélybányászati koronafúrók, havariafúrók felrakására szolgáló gázhegesztőpálcák készíthetők.



4.62. ábra

Kotrókörök felrakóhegesztése

a) ötvözetlen vagy közepesen ötvözött acélöntvényhez kovácsolt darab hozzáhegesztése célszerű; b) ötvözetlen vagy közepesen ötvözött alapanyag felrakása durvaköves, illetve; c) puha talajban folyó munkához; d) és e) kemény ötvözetű varratokkal végzett felrakás

- A 25–28. sorszámú hozaganyagok hegesztés után lágyak, ezért homokban, földben (abrazív kopás esetén) hamar elkopnak. Csak olyan alkatrészek felrakó hegesztésére alkalmasak, amelyek nagy felületi nyomást viselnek el, vagy igen nagy üté igénybevétel alatt állnak.
- A 25–26. sorszámú hozaganyagok csak a 12–14% Mn-tartalmú (pl. AöMn 12) ún. Haedfield-öntvényekhez (érc- és ásványbányászati törő- és őrlőpofák őrlőhengerek, vasúti csúcsbetétek, lánctalpcsapok stb.) használhatók. Előmelegíteni nem szabad, a varratot a lehető leggyorsabban kell hűteni. Az alapanyagot ezért célszerű vízzel telt edénybe helyezni olyan módon, hogy csak a hegesztésre előkészített felület álljon ki. A varratot 40–60 mm hosszú lépésekben kell hegeszteni, és azonnal, még vörösen izzó állapotban erőteljes kalapálással nyújtani. Az újabb lépés hegesztéséhez csak azután szabad hozzáfogni, miután az előző kézmelegre hűlt.
- A 27. sorszámú hozaganyag alkalmazásakor sem használnak előmelegítést, bár a varrat lassúbb hűlés közben sem veszíti el szívósságát. Ezek, valamint a 28. sorszámú hegesztőanyagok bármilyen összetételű acél alapanyagon kielégítő eredményt adnak. Nagy teljesítményű hegesztési eljárásokhoz feltétlenül ilyen összetételű hozaganyagot kell választani. Vezetőkerékek, nagy terhelésű görgők, darusínek stb. javítására, felrakó hegesztésére alkalmasak.

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

A felrakó hegesztési, illetve a termikus szóró eljárások főbb jellemzői a **4.20. táblázat**ban találhatók, a **4.21. táblázat** pedig útmutatást ad a felrakó hegesztési eljárás kiválasztásához.

4.20. táblázat. A felrakó hegesztési, és termikus szóró eljárások fő jellemzői

Eljárás	Hozag- anyag	Leolva- dási sebes- ség, kg/h	Elérhető kemény- ség, HV	A felra- kás egyenle- tessége, mm	A beol- vás mérté- ke, %	A felra- kás vastag- sága, mm	A mun- ka- darab mérete	Megjegyzés
Gázhe- gesztés	Pálca	0,81–1	300–400 (800)	0,5–2,0	2–20	1–3	kicsi	Nem gépesít- hető, a be- rendezés olcsó
Ívhegesz- tés bevont elektródá- val	Elektróda	1,0–3,0	250–800	1,0–2,0	20–35	2–4	tetszés szerinti	Nem gépesít- hető, a be- rendezés olcsó
AVI- hegesztés	Pálca	2,5–3,5	200–600	0,5–1,5	2–20	1–3	kicsi vagy vékony élek	Gyakran előmelegítés szükséges
AFI- hegesztés	Tömör vagy porbeles huzal	1,0–10,0	200–600	0,5–1,5	10–30	2–4	tetszés szerinti	Közepes költség, jól gépesíthető
CO ₂ - védőgázos ívhegesz- tés	Tömör huzal. Védelmet igénylő vagy önvédő porbeles huzal	1,7–8,0 1,7–8,0	170–400 200–700	0,5–1,5 0,5–1,5	10–60 10–60	1–3 1–3	tetszés szerinti	Közepes költség, alak- os darabok- hoz is
Fedett ív hegesztés	Tömör vagy porbeles huzal vagy szalag	5–20 5–20 10–40	250–500 200–700 250–400	0,5–2,0 0,5–2,0 0,5–1,0	30–50 20–40 5–10	2–5 2–5 2–5	tetszés szerinti	Közepes költség, jól gépesíthető
Plazma- hegesztés	Por	3–15	350–650	0,1–1,0	5–20	0,5–1,5	tetszés szerinti	Költséges berendezés
Termikus szórás utókeze- léssel	Por	1–5	200–400	0,5	0,1–2	0,5–2	kicsi	Közepes költség, ne- mesített és edzett alkat- részekhez nem javasolt
Termikus szórás utókezelés nélkül	Huzal, por	2,0–14,0	280–600	0,5–1,0	0,0–0,1	0,1–1,0	tetszés szerinti	Beruházási költség kicsi, tapadó-nyíró szilárdság < 100 MPa

4. Anyagfelvitellel járó felületkezelések

4.21. táblázat. Ajánlás felrakó hegesztési eljárás kiválasztásához, a felrakott réteg anyagminőségétől függően

Anyagminőség a 4.19. táblázat szerint	Láng	Bevontelektrodás	AVI	AFI	CO ₂ -védőgáz		Fedett ívű			Plazma	Termikus szórás, ha utóhevítés	
					tö- mör	por- be- les	tömör huzal	por- be- les	tö- mör		van	nincs
					huzal			szalag- elektroda				
1.	1	1	4	4	1	1	1	1	1	4	4	4
2.,3.,4.,5.,6.	2	1	4	4	1	1	1	1	2	4	1	1
7.,28.	2	1	2	2	5	1	2	5	5	4	5	2
8.,9.,10.	3	1	2	5	3	1	1	1	5	1	1	1
11.,12.,13.	5	1	1	5	5	1	5	5	5	1	3	3
14.,15.,16.	5	1	5	5	5	1	5	5	5	4	5	2
17.,18.,19.,20.,21.,22.	1	1	1	5	5	1	5	5	5	1	1	1
23.,24.	1	1	1	5	5	5	5	1	5	1	1	1
25.,26.,27.	5	1	5	5	5	1	5	5	5	5	5	5

1. alkalmas; 2. ritkán kerül rá sor, nem szokásos, de megoldható;
3. az átlagosnál több szakértelmet kíván; 4. túl drága e célra, ha lehet, más eljárást célszerű választani;
5. nem ajánlott vagy nem elvégezhető

5. Duplex felületkezelések

Az acélok anyagszerkezet-módosulásai, illetve az azokat kiváltó technológiai hatások kapcsán a „duplex” jelző többféle értelemben fordul elő, de „közös nevezőként” felmerül valamilyen hőkezelés, termokémiai kezelés, felületkezelés alkalmazása és/vagy a nitrogén mint ötvöző jelenléte, bevitete.

5.1. Duplex anyagszerkezet-módosulások

Auszténitesítő izzításkor alumínium és/vagy vanádium mellett nitrogént is tartalmazó, ún. finomszemcsés acélok szövetében kb. 950 °C-on, a többi nitridképzővel (Ti, Zr, Nb) ötvözött acélokban pedig kb. 1050 °C-on a finom auszténitzemcsék környezetében igen nagyok is megjelennek, s egy kb. 50 °C-os hőmérséklet-tartományban egymás mellett találjuk azokat. Az anyag ilyen jellegű mikroszkópi képét duplex szövetnek nevezik. Ezen átmeneti állapotot – a szemcsehatárokat „rögzítő” nitridkiválások felbomlása miatt – szemcsedurvulás követi, és a szemcse-nagyság eléri, sőt meghaladja a nitridképzőket nem tartalmazó, ún. normálszemcsés acélokét.

A duálfázisú vagy duplex szerkezeti acélok a HSLA (High Strength Low Alloy) acélok jobb képlékenységi (duktilitási) jellemzőkkel rendelkező válfaját képviselik. Mikroszerkezetük két fázisból, ferritből és martenzitből áll. A kedvezőbb képlékenység a ferrites, a növelt szilárdság a martenzites fázisnak köszönhető, így ezek megfelelő részarányával az eredő tulajdonságok célszerűen befolyásolhatók, de a mechanikai jellemzőkre hatással van a fázisok morfológiája (alakja), a szemcse-méret, a martenzites fázis eloszlásának egyenletessége, illetve „térköze”, valamint a ferrites fázis méreteloszlása és tisztasága is. Ilyen duálfázisú szövet előállítása pl. interkritikus (A_1 és A_3 átalakulási hőmérsékletek közötti) hevítést, majd azt követő gyors hűtést magában foglaló hőkezeléssel történhet. A hőkezelés kombinálható alakítással is, azaz termomechanikus kezelés végezhető az acélon.

A kétfázisú vagy duplex korrózióálló acélok jellemzői: a ferrit és az auszténit kb. egyenlő részaránya a szövetszerkezetben, a viszonylag nagy szilárdság (az auszténites acélok folyáshatárának kétszerese) és a kiváló feszültségkorrózió-állóság elsősorban kloridos közegben. E duplex ötvözetek általában több krómot (22–27,5%) és kevesebb nikkelt (4–6,5%) tartalmaznak, mint a hagyományos 18/8-as acélok. Molibdén (1,5–3%) hozzáötvözése javítja a korrózióállóságot, sőt egyes ötvözetek 0,08–0,35% nitrogént is tartalmaznak, ami auszténitképzőként ferrit–auszténit egyensúlyt hoz létre. Ez a módosított összetétel jó pitting- és általános korrózióállóságot biztosít ipari környezetben, de hegeszthetőségi problémákat vet fel. Ezek közé tartozik, hogy a hegyanyag gyors megdermedésével – különösen kis hőbeviteli hegesztésnél – együtt járó túlzott ferrittartalom kedvezőtlenül

befolyásolja a korrózióállóságot és a szívósságot. A probléma orvoslása szabályozott hőbevitel és nikkellel túltöltvözött hegesztőanyag alkalmazása révén lehetséges.

5.2. Duplex termokémiai kezelések

A duplex termokémiai kezelés a cementálást és a nitridálást kombináló eljárás, ami a cementált (majd edzett, illetve megeresztett) felület nitridálását jelenti. Ehhez az acélnak 500–550 °C-on stabil cementites-karbidos szerkezettel, azaz kellő megeresztésállósággal és megfelelő mennyiségű nitridképző-tartalommal kell rendelkeznie. Az ilyen kezelés célja lehet a berágódással, hegedéssel (adhéziós kopással), felpattogzással, pittingesedéssel (fáradásos kopással), továbbá az üzemszerű viszonyok között rövid időtartamra nem kizárható kenés nélküli súrlódással szembeni károsodásállóság javítása.

A technológia kivitelezése során a kb. 925 °C-os, 10–12 órás gázcementálást megelőző „előoxidációt” (950 °C/30 perc/levegő) is alkalmaznak, melynek eredményeként az oxid–fém határfelületen oxidpenetráció megy végbe, és az így képződő határfelületi háló elősegíti a karbon diffúzióját. Ez az előkezelés célszerű a króm és a szilícium képződhető oxidrétegének karbonabszorpciót gátló hatása „ellen” is. A cementálást, az edzést és a kb. 540–550 °C-os megeresztést követően a gáz- vagy a plazmanitridálás 500–520 °C-os hőmérsékleten végezhető. A rétegroncso-lódás elkerülése érdekében fontos, hogy a rétegvastagság a Herz-féle nyírófeszültség maximumának felülettől mért távolságához igazodjon. A duplex termokémiai kezelés a kifáradási élettartamot is növeli, ugyanis a fáradási jelenségeket akadályozó felületi nyomófeszültségek (σ_{ny}) kedvezőbb eloszlást mutatnak (σ_{ny} nitridált $\approx$ 550–600 MPa, míg σ_{ny} cementált $\approx$ 250–300 MPa).

A duplex termokémiai kezelések egy másik változatánál a cementálást alacsony hőmérsékletű nitridálással kombinálják. Így a megeresztés 425 °C-on, majd az azt követő plazmanitridálás 400 °C-on (pl. 25% N₂ + 75% H₂ atmoszférában, 60 órán át) végezhető. Ennek előnye abban van, hogy bizonyos acélok így magasabb törési szívósságot mutatnak, ugyanis éppen az 500–600 °C-os megeresztési hőmérsékletek eredményezik a K_{IC} minimumát, míg 425 °C-on ennél lényegesen nagyobb (akár kétszeres) értékei mérhetők. A megeresztési ridegedés elkerülése érdekében tehát egyes acéloknál 500 °C alatt célszerű tartani az edzés utáni termikus folyamatok hőmérsékletét.

5.3. Duplex felületkezelések

A duplex felületkezelések két egymást követően végrehajtott felületkezelést kombináló, anyagok, illetve belőlük készülő termékek károsodásállóságának javítása érdekében alkalmazható technológiák. Az **5.1. ábra** – a kombinálható eljárásokat

5. Duplex felületkezelések

rendszerelve – a már említett duplex termokémiai kezelést is magában foglalóan tartalmazza a duplex felületkezeléseket. Az X-szel jelölt változatok előnytelenek, illetve nem értelmezhetők, a ?-lel jelöltek elvileg elképzelhetők, míg az 0-val jelöltek a gyakorlatban (kísérletileg, iparilag) már kipróbált, illetve publikált lehetőségeket takarnak. Ez utóbbiak közül kiemelhetők azok, amelyek valamilyen termokémiai elő- vagy utókezelést foglalnak magukban.

Az egyik eljárásnál termokémiai kezelés (pl. plazmanitridálás vagy gázcementálás) után igen kemény, de rideg, keramikus jellegű (pl. TiN, TiCN, TiAlN, CrN stb.) tribológiai réteget képező PVD vagy CVD alkalmazására kerül sor.

Egy másik eljárás során a felületi réteg gyors dermedését – mikroszerkezetének finomodását, nem egyensúlyi átalakulásait – kiváltó elektronsugaras, illetve lézeres felületi átolvasztást vagy felületötvöztetést nitridálás követi.

A termikus (láng-, plazma-) szórás és a (plazma-, gáz-, gázoxi-) nitridálás (illetve gáznitrocementálás) javítóiparban is jól használható kombinációja lehetővé teszi olyan bevonatok készítését, amelyek nagyobb ellenállást tanúsítanak komplex terhelési (feszültségi) viszonyok esetén. A korrózió-, kopás- és hőálló, illetve elektromosan vezető vagy éppen szigetelő réteget eredményező termikus szórás mind a kezelendő, mind a felszórando anyagok tekintetében széles alkalmazási kört fog át, és az előállítható réteg vastagsága is tág intervallumban – néhány mikrométertől több milliméterig – változhat. A nitridálás viszonylag alacsony költségű és hőmérsékletű eljárás, mely a kopás- és a korrózióállóság javítása mellett a felületi feszültségállapotot is kedvezőbbé teszi, növelve a fáradással szembeni ellenállást.

A nitridálást (vagy nitrocementálást) követően elvégzett ionimplantáció hatása is elsősorban a felületi feszültségállapot még kedvezőbb megváltoztatását célozza.

Egy további eljárásnál a kopásállóság fokozása végett a normalizált vagy nemerített alapanyagon 570 °C-os, 4–8 órás, gázkezelés (pl. 56,3% NH₃; 34–41% H₂; 1,3–2,0% CO₂) nitrocementálást, majd azt követően CO₂-lézerrel – megfelelő teljesítmény, előtolási sebesség és defókus beállításával – felületedzést végeznek.

Egy újabb eljárás során a lézeres felületedzést nitridálással kombinálják a tribológiai igénybevételekkel szembeni élettartam-növekedés elérése, illetve a Herz-feszültség okozta fáradásos kopás csökkentése érdekében.

Ez utóbbi eljárás egyik alkalmazhatósági kérdése az lehet, hogy milyen előnyökkel jár egy kétlépcsős, ezért minden bizonnyal többletköltséggel járó kezelés, mint külön-külön a lézeres felületedzés vagy a nitridálás valamelyik változatának alkalmazása. További kérdésként felmerül, hogy ha duplex felületkezelést alkalmazunk, akkor melyik sorrendet válasszuk: nitridálás majd lézeres edzés vagy lézeres edzés és azt követő nitridálás? Újabb kérdésként vetődhet fel: milyen az így kapott felületi réteg termikus stabilitása (megegyeztetésállósága).

5. Duplex felületkezelések

1.kezelés \ 2. kezelés			összetételhagyó				összetételváltóztató												
			fel. olv. nélküli		fel. olvasztó		felületolvasztás nélküli										fel. olvasztó		
			felületszilárdítás	felületedzés	felületi átolvasztás	felületolvasztó hegesztés	védőbevonatolás	termikus szorás	plattírozás	PVD	CVD	ionimplantáció	passziválás	cementálás	nitrocementálás	nitridálás	felületi ráolvasztás	felületötvöztetés	felrakó hegesztés
összetételhagyó	fel. olv. nélküli	felületszilárdítás (ütöttekkel, szerszámmal, lökeshullámokkal)	X	X	X	X	?	X	X	?	X	0	?	X	X	X	X	X	X
összetételváltóztató	fel. olvasztó	felületedzés (indukciósan, elektronsugárral, lézerrel)	X	X	X	X	?	X	X	X	X	0	?	X	X	0	X	X	X
		átolvasztó hegesztés (gáz, AWI- vagy plazmahegesztéssel)	X	?	X	X	?	?	X	?	?	?	?	?	?	0	X	X	X
összetételváltóztató	felületolvasztás nélküli	fémleválasztás (külső áramforrás nélkül, galvanizálás)	X	X	?	X	0	X	X	X	X	0	?	X	X	X	X	X	X
		termikus szorás (lánggal, ívvel, plazmával, lézerrel, robbantással)	X	X	0	?	X	0	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X
		plattírozás (alakítószerszámmal, dörzshatással, robbantással)	?	?	X	X	?	X	?	X	X	?	?	X	?	?	0	X	X
		PVD (hagyományosan, plazma- vagy lézererősítéssel)	X	X	X	X	X	X	X	?	?	?	X	X	X	X	X	X	X
		CVD (hagyományosan, plazma- vagy lézererősítéssel)	X	X	X	X	X	X	X	0	?	?	X	X	X	X	X	X	X
		ionimplantáció (lánggal, plazmával, lézerrel)	?	?	X	X	?	X	X	X	X	?	?	?	?	?	X	X	X
		passziválás (kémiai vagy anódos oxidálás, vegyület-réteg-képzés)	X	X	X	X	0	?	X	0	0	?	?	X	X	X	X	X	X
		termokémiai kezelés: cementálás	X	0	X	X	?	X	X	0	0	?	?	X	X	0	X	X	X
		termokémiai kezelés: nitrocementálás	X	0	X	X	?	X	X	0	0	0	?	X	X	X	X	X	X
		termokémiai kezelés: nitridálás	X	0	X	X	?	?	X	0	0	0	?	X	X	X	X	X	X
		felületi ráolvasztás (lánggal, plazmával, lézerrel)	X	X	?	X	X	X	X	X	X	X	?	X	X	?	X	X	X
	fel. olvasztó	felületötvöztetés (elektronsugárral, lézerrel)	0	0	X	X	?	X	X	0	X	?	?	?	?	0	X	X	X
		felrakó hegesztés (gáz- vagy ívhegesztéssel)	0	0	X	X	?	X	X	X	X	?	?	?	?	?	X	X	X

5.1. ábra
Kombinálható eljárások rendszere

5.3.1. Lézeres felületedzés és nitridálás kombinálása

Válasszuk alkalmazási példaként a 40 CrMnMo7 jelű, nitridálható „műanyag-megmunkáló szerszámacélt” (ötvözött melegalakító szerszámacélt). Javasolt felhasználási területe szerint közepes és nagyméretű műanyagfröccsöntő szerszámok anyaga, műanyag- és fémfröccsöntő szerszámok keretanyaga, továbbá az általános gépépítés különböző szerkezeti elemeinek is anyaga. Felhasználási előnyeként fogalmazhatók meg: a javított forgácsolhatósági jellemzők, a kiváló polírozhatóság és fotomarathatóság, valamint az igen jó szívósság. Kémiai összetétele: 0,37% C, 0,29% Si, 1,50% Mn, 1,88% Cr, 0,17% Mo, 0,39% Ni a többi Fe. Edzése 840–860 °C-ról olajban, 860–880 °C-ról levegőn történhet, amely utáni megeresztés hatására kb. 300 °C-ig kevésbé, felette intenzívebben csökken az acél (meleg)kopásállósággal, illetve megeresztésállósággal összefüggő keménysége. Szilárdsága nemesített szállítási állapotban kb. 1000 MPa, keménysége kb. 300 HB. Szükség esetén feszültségmentesítő hőkezelését 650 °C-on, 2 órás hőtartással, majd kemencében történő hűtéssel ajánlott végezni. Indokolt esetben argonvédőgázos volfrámelektrodás ívhegesztő eljárással, rövid és kalapáccsal azonnal nyújtott varratszakaszokkal végezhető javító hegesztés rajta. Nagyobb kiterjedésű és mélységű javító hegesztése csak lágyított állapotában lehetséges.

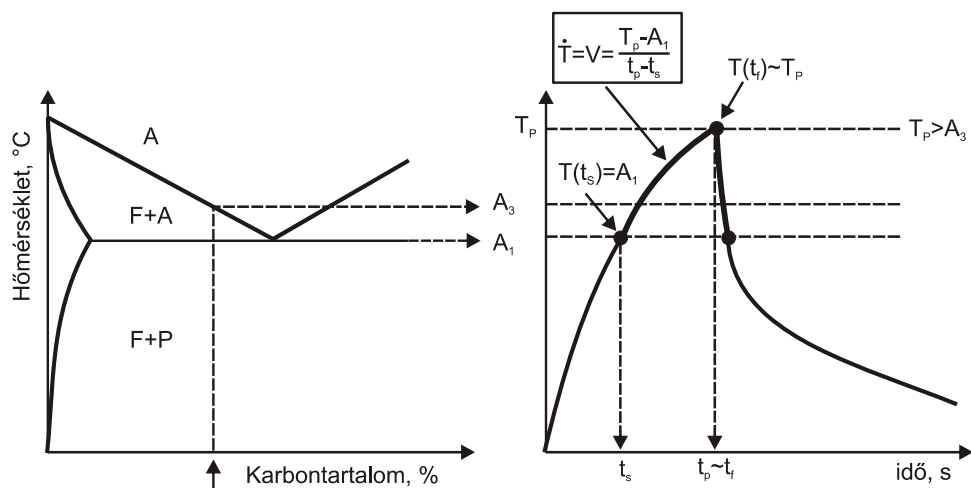
A munkadarabok „Graphite 33” abszorpciónövelő bevonattal ellátott oldalfelületein a következő lézertechnológiai paraméterekkel valósult meg a felületedzés: a felületi fókuszfoltméret $d_f = 7,2$ mm; a sugárrezgetés frekvenciája $f_s = 100$ Hz, illetve amplitúdója $A_s = 10,5$ mm, míg jelalakja Δ ; a P lézerteljesítmény 1250, 1850, 2500 és 3150 W; a munkadarabok v_r relatív (lézersugárhoz viszonyított) sebessége 400, 600, 800. E két utóbbi paraméterből származtatható $q = P/v_r$ fajlagos hőbevitel (vonalenergia) 126 és 187,5 J/mm között változott.

Mivel felületedzéskor a kéreg igen gyorsan hevül fel az ausztenitesítési hőmérsékletre, illetve nagyon gyorsan hűl le arról, gyakorlatilag nincs hagyományos értelemben vett hőtartás. A karbidok mind teljesebb oldódása – ami termikusan aktívált diffúzióval megvalósuló időigényes folyamat – érdekében akár 200–300 °C-kal az A_3 fölé kell hevíteni a kérget, hogy a gyors hőciklus (5.2. ábra) A_1 , illetve A_3 hőmérsékletek feletti szakaszának időintervalluma hosszabb legyen. Az alkalmazandó maximális vagy csúcshőmérséklet kisebb lehet, ha az acél nemesített állapotú, azaz a karbidok finom mérettel, diszperz eloszlásban vannak jelen a kiinduló szövetszerkezetben. A felületi réteg felhevítését követő azonnali és rendkívül gyors, saját hővezetésén alapuló „önhűtés” nagy keménységű martenzites szerkezetet eredményez. Felületi edzéskor a kéreg és a mag kémiai összetétele megegyezik, ezért a maradó strukturális feszültségek kisebbek, mint az ötvözőbevitellel járó termokémiai kezelések után. Továbbá a hőbevitel erősen koncentrált, így a termikus feszültségek és az azokból adódható maradó alakváltozások is kisebbek.

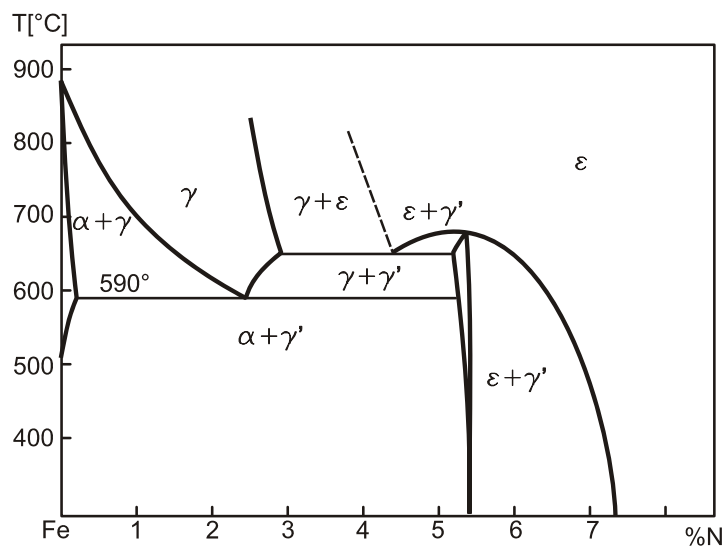
Plazmanitridáló berendezésben végzett termokémiai kezelés paraméterei a következők: vákuumlétrehozás időtartama 9,9 óra; vákuumtér nyomása 0,62 mbar = 62 Pa; maximális feszültség 900 V; maximális áramerősség 40 A; gázösszetétel (plazmaalkotók) 25% N_2 + 75% H_2 ; gáznyomás (plazmaalkotók) 5 mbar = 500 Pa;

5. Duplex felületkezelések

felhevítés sebessége 500 °C/óra; felhevítés időtartama 1,15 óra; hőtartás hőmérséklete: 520 °C; hőtartás időtartama 20 óra.



5.2. ábra
Felületedzés termikus ciklusa

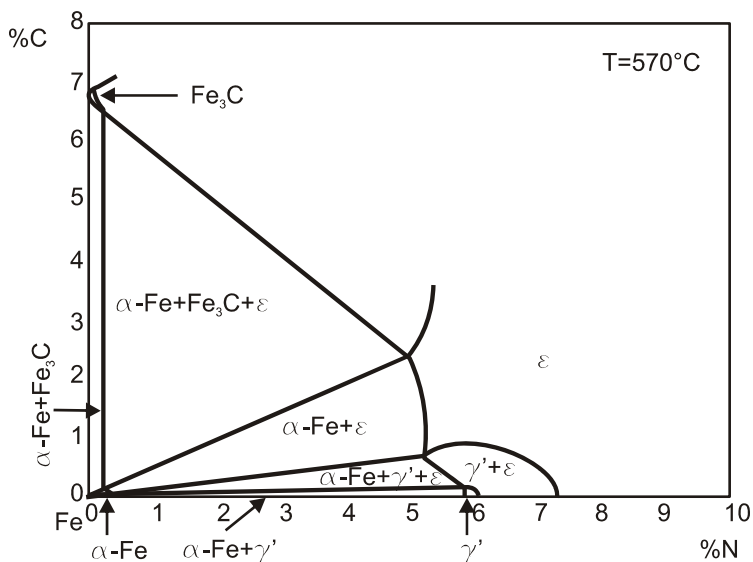


5.3. ábra
Fe-N kétfázisú állapotára

5. Duplex felületkezelések

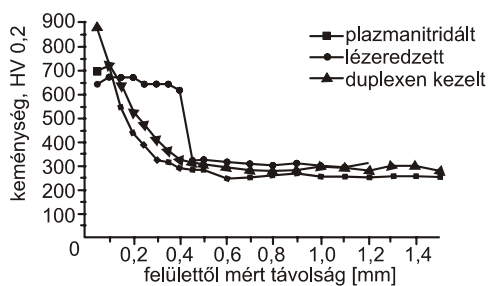
A Fe-N kétalkotós (5.3. ábra), illetve a Fe-N-C háromalkotós állapotábra (5.4. ábra) szerinti eutektoidos hőmérséklet (590 °C) alatt, nitrogénleadó közegben (pl. NH_3+H_2 vagy N_2+H_2 gázkeverékben) végzett termokémiai kezelés során kialakult kéregben kívülről befelé haladva 11–7% nitrogéntartalmú ε -fázis (Fe_{2-3}N , $\text{Fe}_{2-3}[\text{N},\text{C}]$), kb. 5,5% N-tartalmú $\gamma' = \text{Fe}_4\text{N}$ vegyület, illetve más keményebb ötvözőnitrid (pl. CrN , Cr_2N , $\text{Cr}_7[\text{C},\text{N}]_3$, $\text{Mo}, \text{Cr}_2[\text{C},\text{N}]$), majd 0,1%-nál kisebb N-koncentrációjú (a N-t intersztíciósan oldott formában tartalmazó) α -fázis fordulhat elő.

Az ilyen szerkezetű kéregben számottevő átalakulás nem megy végbe, csupán a γ' szegregál a ferritből.

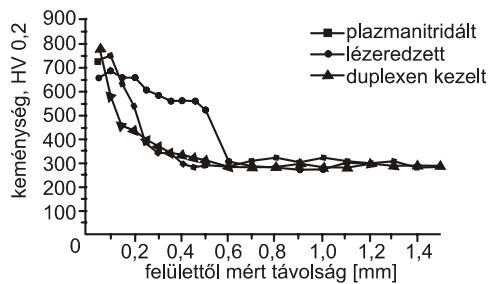


5.4. ábra
Fe-N-C háromalkotós állapotábra

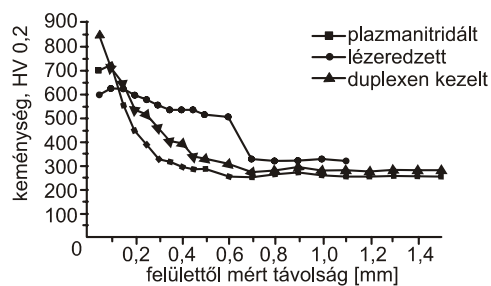
Az 5.5. ábra diagramsorozata azokat a keménységeloszlási görbéket mutatja, amelyeket a lézeres felületedzés és az azt követő nitridálás eredményezett. Az egyes diagramokon szerepelnek külön a felületedzés, illetve külön a nitridálás utáni keménységeloszlási görbék is. Látható, hogy a megnövelt keménységű kéreg vastagsága az azonos hőbevitelű ($q \approx 187 \text{ J/mm}$) lézeredzéseket követő plazma-nitridálás hatására ugyan csökkent, de a keménységmaximum mindkét "szimplex"



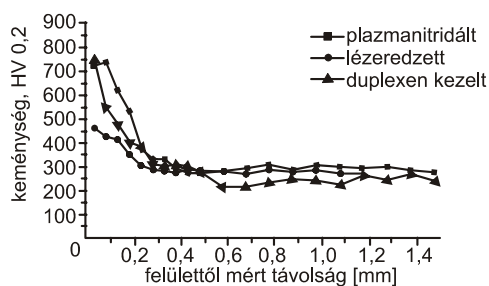
lézeredzés: 1250W / 400 mm/min → 187,5 J/mm



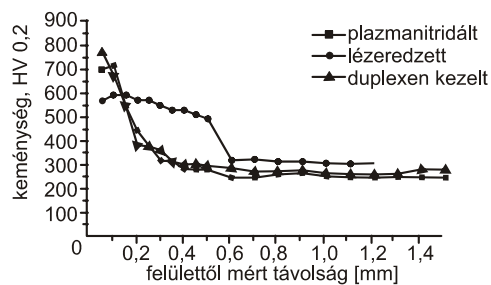
lézeredzés: 3150W / 1000 mm/min → 189 J/mm



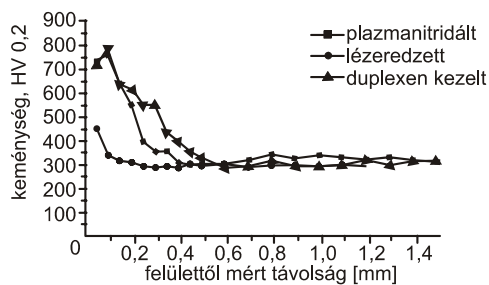
lézeredzés: 1850W / 600 mm/min → 185 J/mm



lézeredzés: 3150W / 1200 mm/min → 157,5 J/mm



lézeredzés: 2500W / 800 mm/min → 187,5 J/mm



lézeredzés: 3150W / 1500 mm/min → 126 J/mm

5.5. ábra

Duplex felületkezelés: lézeres felületedzés és az azt követő nitridálás eredményezte keményséeloszlási görbék

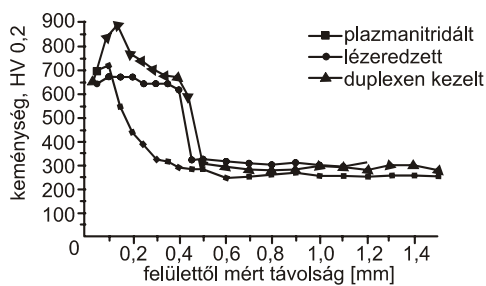
5. Duplex felületkezelések

eljárásához képest növekedett. A duplexen kezelt növelt keménységű kéreg vastagsága egy keskeny „támasztó” zónával nagyobb, mint a plazmanitridálté. A lézerezés hőbevitelének kb. 30, illetve 60 J/mm-rel való csökkentése (187 helyett 157, illetve 126 J/mm-re) igen kedvezőtlen keménységprofil eredményezett, ami után a plazmanitridálás elvégzése lényeges javulást hozott.

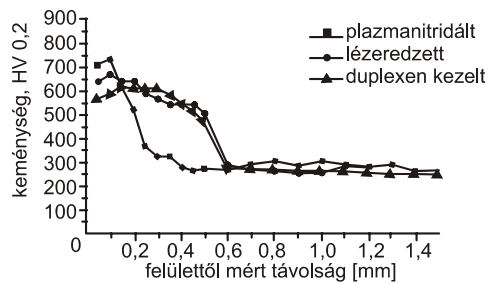
Mivel az 500 °C-os hőmérsékletű és 10 óra időtartamú plazmanitridálás a lézeres felületedzést követte, a kezelt zónák termikus stabilitása (megeresztés-állósága) is minősíthető, ugyanis az elvégzett nitridálás egy hosszú időtartamú megeresztésnek is felfogható. A kialakult keménységprofil kedvező termikus stabilitásról tanúskodik, hiszen a felületedzett állapottal összevetve közvetlenül a felszín alatt keménységnövekedés tapasztalható, és csak mélyebben van megeresztő hatás, ami az edzett kéregben számottevő, míg a nemesített alapanyagban elhanyagolható mértékű. Természetesen az üzemszerűen megengedhető maximális hőmérséklet nem lehet nagyobb, mint a legutolsó – esetünkben a nitridáló – hőkezelés hőmérséklete.

Az **5.6. ábrán** szereplő diagramok azokra a duplex felületkezelésekre vonatkoznak, amelyeknél a nitridálást nem megelőzi, hanem követi a lézeres felületedzés. Az egyes diagramokon – összehasonlítás céljából – szintén szerepelnek a csak lézerezett, illetve a csak plazmanitridált felületek keménységgörbéi is. A duplex kezelés szembetűnő eredménye – elsősorban az azonos fajlagos hőbevitelű ($q \approx 187$ J/mm) technológiáknál – a magas keménységű zóna megnövekedett mélysége, ami meghaladja mind a lézerezés, mind a plazmanitridálás utánit. Például edzhetőségi határértéknek tekinthető 550 HV keménységszintnél mérhető zónanövekmény mintegy 0,3–0,5 mm, ami az eredeti (plazmanitridált) 0,15–0,25 mm kéregmélységnek 200%-a. A felületközeli 0,1–0,2 mm-es zónában a keménység ugyan visszaesett, de az adott esetben szükségessé válható (lehetőségében adott) utánmunkálás ezt eltávolítva nagyobb keménységű réteget „hoz” felszínre. Az azonos hőbevitelre vonatkozó görbéket összevetve egyfajta kvázioptimumnak tűnik a $P = 1850$ W és a $v_r = 600$ mm/min lézerparaméterekkel készített réteg, de a 2500 W, illetve 800 mm/min lézerparaméterű is kedvező képet mutat. A lézerezés fajlagos hőbevitelének csökkentésével ($187 \rightarrow 157 \rightarrow 126$ J/mm) – elsősorban a kezelés sebességének növelése miatt – a lézerezett, illetve a duplexen kezelt kéreg nem kívánatos keménység- és vastagságcsökkenése jár együtt.

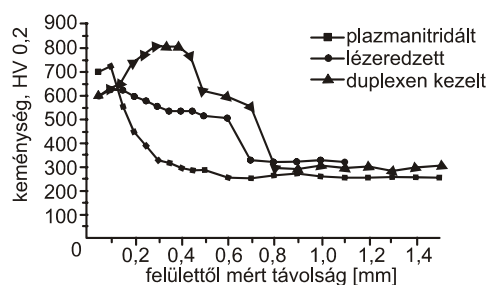
Az eredmények alapján a következő megállapítások tehetők. A duplex felületkezelés egyik kalkulálható előnye a gyorsabb kezelés lehetősége, ugyanis a felhasználás szempontjából szükséges eleendően nagy kéregvastagság elérése pusztán csak nitridálás alkalmazásával igen hosszú diffúziós időtartamot igényelne. A másik várható előny, hogy a csak felületedzett állapothoz képest a nitridálás „hozzáadása” a kéreg kedvezőbb termikus stabilitását eredményez(het)i.



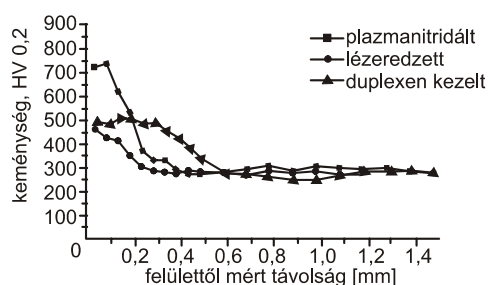
lézerezés: 1250W / 400 mm/min → 187,5 J/mm



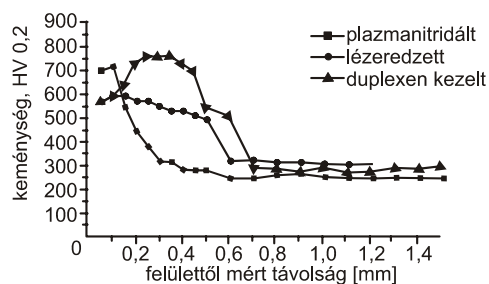
lézerezés: 3150W / 1000 mm/min → 189 J/mm



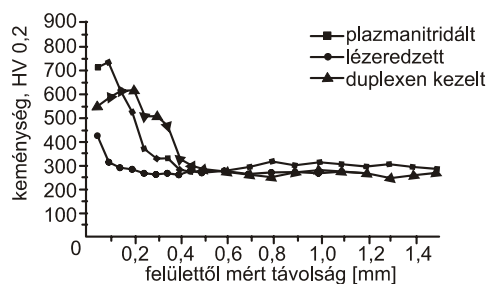
lézerezés: 1850W / 600 mm/min → 185 J/mm



lézerezés: 3150W / 1200 mm/min → 157,5 J/mm



lézerezés: 2500W / 800 mm/min → 187,5 J/mm



lézerezés: 3150W / 1500 mm/min → 126 J/mm

5.6. ábra

Duplex felületkezelés: nitridálás, majd az ezt követő lézeres felületedzés eredményezte keménységeloszlási görbék

5. Duplex felületkezelések

Ha a lézeres edzést a nitridálás előtt alkalmazzuk, akkor a már felületedzett zóna hosszabb időtartamú megeresztés alá kerül, miközben a nitrogén diffúziója zajlik. Ebben az esetben – megfelelő technológiai paraméterek mellett – a kemény kéreg vastagsága némileg csökken, viszont termikus stabilitása a nagyobb keménységmaximum révén javul, illetve a csak nitridált kéregéhez képest egy növelt keménységű támasztó rétegnövekmény is észlelhető. Ez a duplex felületkezelés egy olyan „karbonitridálás”, mely az acél kiválasztásával „meghatározott” karbontartalomra történik. A nitridálás hőmérsékletét jól kell illeszteni az acél alapanyaghoz.

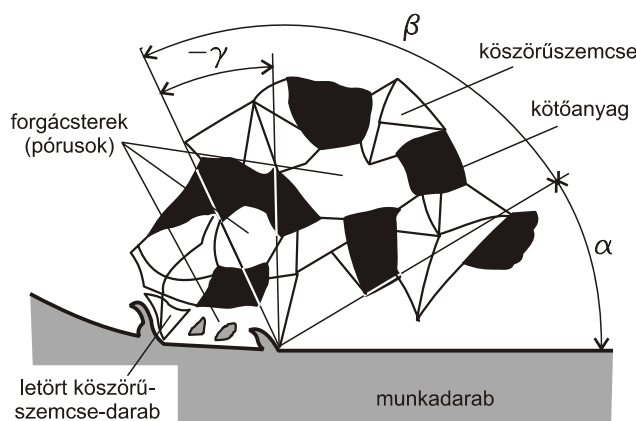
Ha a lézeres edzést a nitridálás után alkalmazzuk, akkor egy olyan konstans karbontartalom-átlag mellett „nitrocementálást” végzünk, ami a diffúziós réteg mélységét, azaz a kemény kéreg vastagságát növeli, lehetővé téve egy esetleges utánmunkálást is. A növelt nitrogénkoncentrációnak köszönhetően a diffúziós rétegben nagyobb keménységértékek érhetők el, bár a maradék ausztenit előfordulási valószínűsége is nagyobb lehet. A megnövekedett keménység a karbonnak és a nitrogénnek a martenzitképződésre gyakorolt összetett (eredő) hatásával hozható kapcsolatba, ugyanis mindkét ötvöző intersztíciós helyzetekben fordul elő, így a martenzit tetragonálisitását (torzultságát) együttesen nagyobb mértékben növelik. Mivel a nitridált réteg már jelen van a felületben, a felületedzés termikus ciklusát, illetve hőbevitelét (kezelési sebességét) úgy kell beállítani, hogy a hőmérséklet viszonylag alacsony értéken maradjon, csökkentve a nitrogén rekombinációja és diffúziója következtében felléphető rétegfelbomlás esélyét. A nitridálás „hozzáadása” a lézeres felületedzéshez feltehetően a korrózióállóságot és a (nagy ciklusú) kifaradással szembeni ellenállást is kedvezően befolyásolja.

Ha nincs szükség utólagos felületi (abrazív) megmunkálásra, viszont a lehető legnagyobb felszíni keménységre kell törekedni, akkor a duplex felületkezelésen belül először a lézeredzést, majd azt követően a plazmanitridálást célszerű végezni. Ha a növelt keménységű kéreg nagyobb mélysége mellett utómegmunkálási (vagy egy esetleges „bejáratási”) ráhagyás válik indokolttá, akkor előnyösebb a lézeredzést a plazmanitridálás után végezni. Természetesen mindkét esetben ügyelni kell a lézeredzés fajlagos hőbevitelének megfelelőségére, bár úgy tűnik, hogy a lézeredzés + plazmanitridálás kombináció végeredménye kevésbé érzékeny a hőbevitel értékének megválasztására, mint a plazmanitridálás + lézeredzés sorrendű duplex felületkezelése.

6. Egyéb felületi technológiák

6.1. Abrázív felületi megmunkálás

Az abrazív megmunkálás szabálytalan szerszámélekkel megvalósuló forgácsolást jelent. A szabálytalan szerszámélek geometriailag határozatlan alakú szemcsék (6.1. ábra), amelyek kemény keramikus anyagúak, és a munkadarabról nagy sebességgel választanak le anyagot. Kemény (pl. hőkezelt), nehezen forgácsolható anyagok is jól megmunkálhatók és az elérhető felületi minőség (érdesség) igen jó, így elsősorban befejező műveletként alkalmazzák.



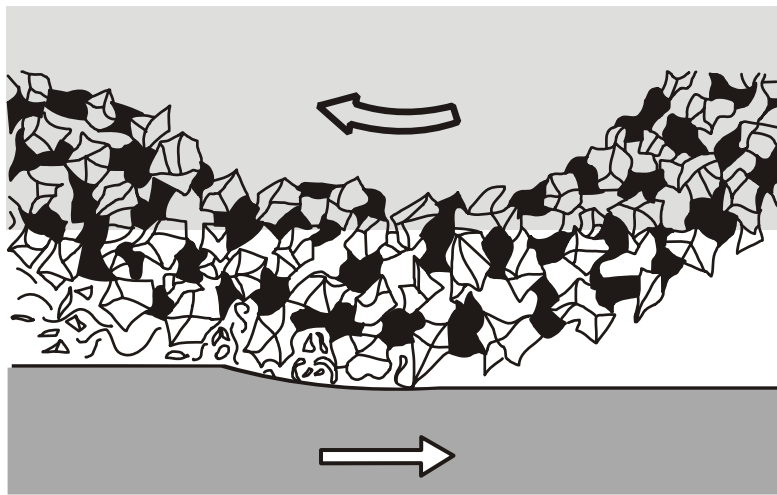
6.1. ábra

Szabálytalan szerszámélek mint geometriailag határozatlan alakú szemcsék

A 6.1. ábrán jelölt szögek értelmezése a következő:

- a β jelű ékszög az ékszerű szerszám hátlapja és homloklapja által bezárt szög, ami tulajdonképpen a szerszámélet alkotja;
- az α jelű hátszög a szerszámék hátlapja és a forgácsolt felület érintősíkja (forgácsolás síkja) által bezárt szög, aminek súrlódáscsökkentő szerepe is van;
- a γ jelű homlokszög a szerszámék homloklapja és az alapsík (forgácsoló mozgás irányára merőleges sík) által bezárt szög, ami a forgácskeletkezés és -lefutás körülményeit, illetve jellegét jelentősen befolyásolja. Amennyiben a homlokszöget a szerszámél elfedi, akkor negatív előjelű, és ilyenkor a leválasztott anyagmennyiség kisebb, mert a szerszámél hántolja, kaparja a munkadarabot. Más esetben pozitív előjelű a homlokszög, és a szerszámél vágással, metszéssel választja le a forgácsot.

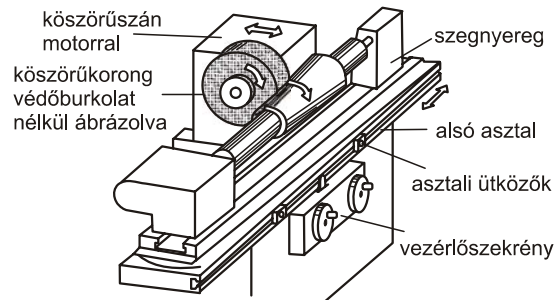
Az abrazív (koptató) megmunkálás elnevezés arra utal, hogy a szemcsék karcoló hatással választanak le gyakran csak mikroszkopikus méretű forgácslemezeket (**6.2. ábra**). A karcolást egyidejűleg igen sok szemcse végzi, és a forgácsolási sebesség is elég nagy, ezért kielégítő termelékenység érhető el. Az abrazív megmunkálás – mint szabálytalan sokélű szerszámmal végzett forgácsolás – történhet kötött vagy szabad állapotban lévő szemcsékkel. Ha a szemcsék kötött állapotban vannak – merev alakos szerszámba foglalva –, akkor köszörülésről és dörzscsiszolásról beszélünk. Ha az abrazív szemcsék szabad (kötetlen) állapotban kerülnek kölcsönhatásba a munkadarab felületével, akkor tükrösítésről van szó.



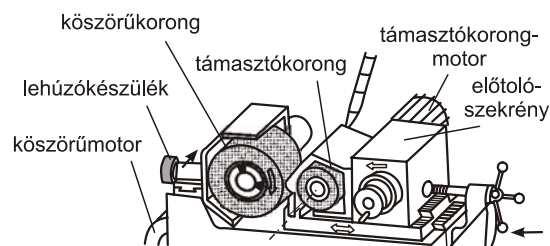
6.2. ábra

Forgácslemek leválasztása abrazív megmunkáláskor

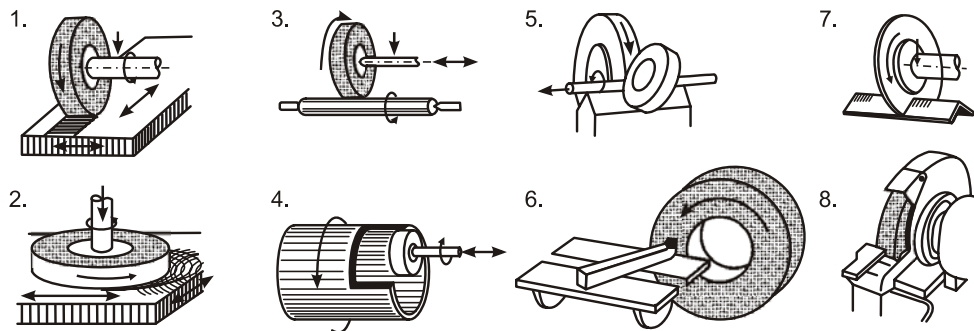
A köszörülés (**6.3. ábra**) szerszáma a tárcsa-, henger-, tányér-, fazék stb. alakú köszörűkorong, ami forgásfelület alakú munkafelülettel rendelkezik. A köszörűkorong megmunkálás közben forgó főmozgást végez, és a forgácsolási sebesség megegyezik a korong kerületi sebességével. A megmunkálandó felület jellege és elhelyezkedése, valamint a szerszámgép típusa alapján megkülönböztethető körkösörülés, azaz palást- és furatkösörülés és síkkösörülés. Csúcsok közötti palástkösörülésnél a munkadarabot a gépasztalra szerelt csúcsok közé fogják, majd tengelye körül forgatják, miközben a korongot és a munkadarabot egymáshoz viszonyítva axiális vagy radiális irányban elmozdítják. Csúcs nélküli palástkösörülésnél a munkadarab egy támasztólécen felfeküdve a köszörű- és egy továbbítókorong között helyezkedik el, miközben a fellépő dörzshatás forgását – bizonyos beállításban axiális haladó mozgását is – eredményezi. A furatkösörülésnél a vezetőléceket két görgő helyettesíti, melyek közül az egyik támasztó-, a másik szorító-görgő. Síkkösörülés esetén a munkadarabot általában mágnesasztalon rögzítik, és a korong palástjával vagy homloksíkjával köszörülnek.



csúcsok közötti palástkőszőrülés



csúcs nélküli palástkőszőrülés

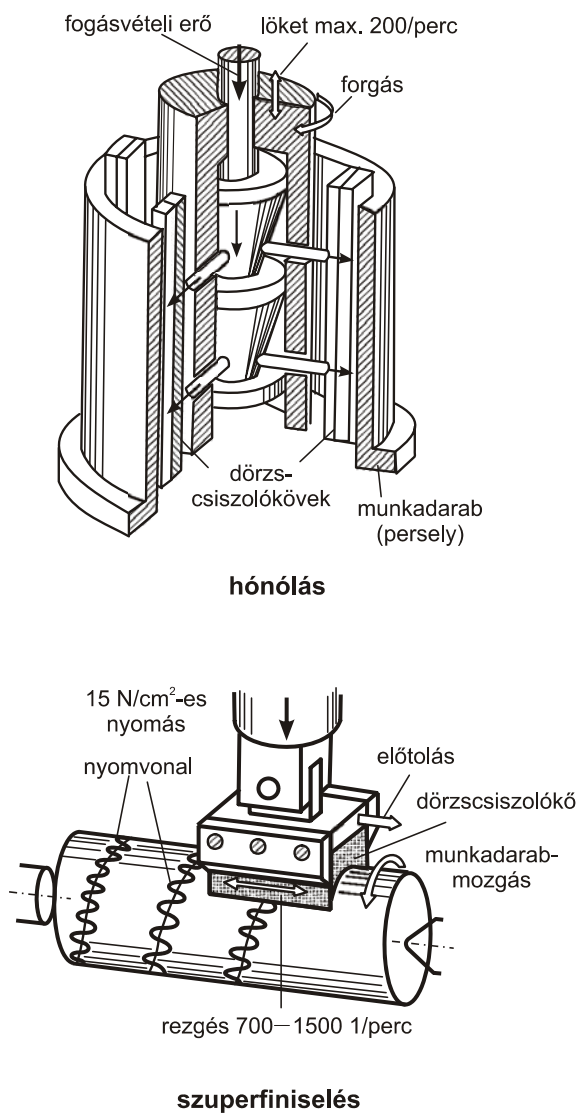


1. síkkőszőrülés a korong palástfelületével
2. síkkőszőrülés a korong homlokfelületével
3. csúcsok közötti palástkőszőrülés
4. furatkőszőrülés

5. csúcs nélküli palástkőszőrülés
6. szerszámkőszőrülés
7. vágókőszőrülés
8. nagyoló kőszőrülés

6.3. ábra
Kőszőrülés

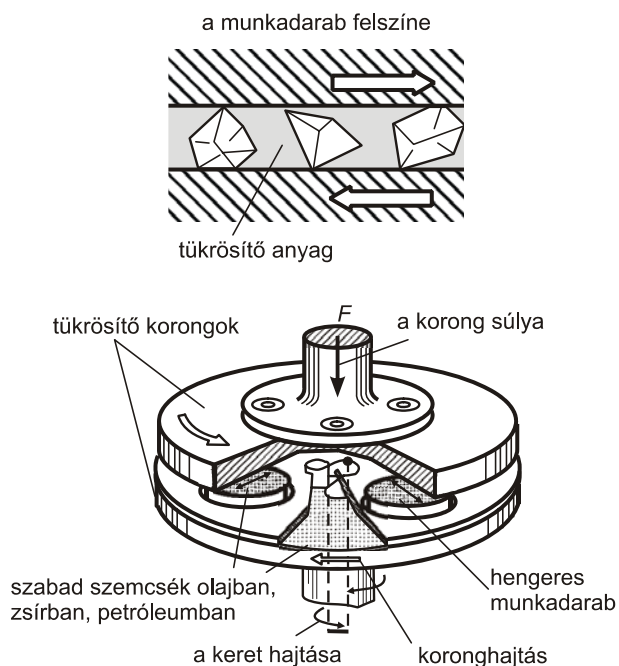
A dörzscsiszolás (6.4. ábra) két változata a hosszú löketű hónolás belső felületeken (pl. belsőégésű motorok hengereiben) és a rövid löketű szuperfiniselés külső felületeken. A köszörüléshez képest a forgácsolási sebesség 50–100-szor, a felületi nyomás 5–10-szer kisebb, viszont az egyidejűleg forgácsoló szemcsék száma 10–100-szor nagyobb.



6.4. ábra
Dörzscsiszolás

Ezek következtében a hőmérséklet erősen csökken, a termikus és mechanikai deformáció mérséklődik, továbbá jelentősen javul a felületi minőség. A hasáb alakú szerszám(ok) forgó és alternáló axiális mozgást végez(nek) úgy, hogy a szemcsék löketenkénti pályái eltérnek, keresztezik egymást, és egy kuszált felületi karckép alakul ki. Ehhez a fordulat- és a löketszámot úgy kell megválasztani, hogy relatív prímszámok legyenek, így egy-egy szemcse mindig új pályán fog haladni.

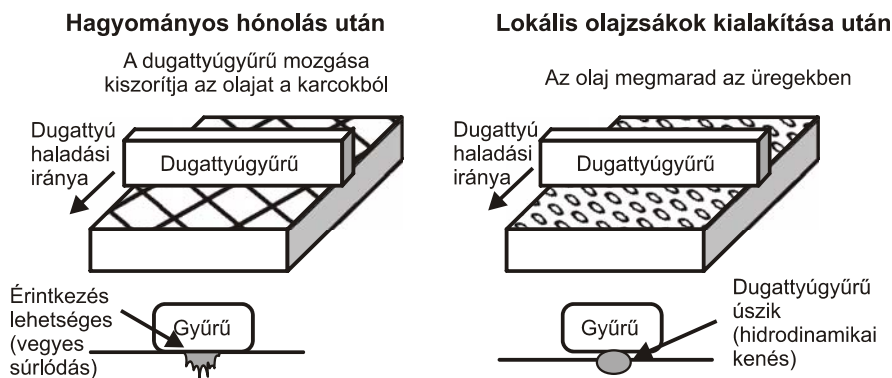
A tükrösítéskor (6.5. ábra) a szabad szemcséket folyadékkal (olaj, petróleum stb.) összekeverik, majd a munkadarab és az azt közelítő felületű szerszám közé juttatják. A szerszám vagy a munkadarab mozgatása révén a felülettel kölcsönhatásba kerülő mozgó szemcsék a érdességcsúcsokból mikroszkopikus méretű forgácsokat választanak le, illetve azokat képlékeny alakítással „belesimítják” az érdességárkokba.



6.5. ábra
Tükrösítés

6.2. Lézeres hónolás

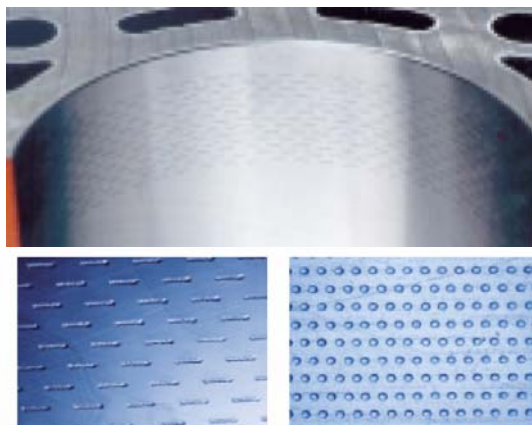
Hagyományos hónolással az olaj hengerfelületen való megtapadását segítik, de a keletkezett karcok nem előnyösek a kenés szempontjából, mert a dugattyú mozgása során a gyűrű kiszorítja az olajat a karcokból.



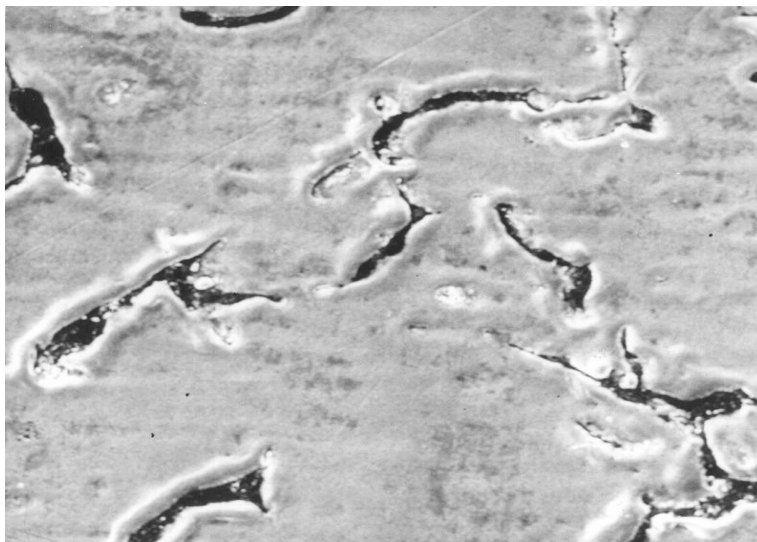
6.6. ábra
Hagyományos és lézeres hónolás összehasonlítása

Ezért a hónolási karcok helyett olajmegtartó olajzsákokat (zsebeket) alakítanak ki a felületen (**6.6. ábra**), aminek megvalósítására legalkalmasabb módszer a lézersugaras kezelés. Az eljárás egyik lehetősége szabályos geometriai alakzatok, mint pl.:

- a felső holtpont közelében elhelyezkedő olajtároló terek;
- az egész hengerfalra kiterjedő szabályos alakú olajzsákok kialakítása (**6.7. ábra**).



6.7. ábra
Lézeresen hónolt hengerfelületek

**6.8. ábra**

Grafit kiégetésén alapuló kezelés eredménye

Másik lehetőség olajterek létrehozása a felületi mikroszerkezet lézeres módosításával, a grafít kiégetésével (**6.8. ábra**).

Ez utóbbihoz tartozó lézeres technológia:

- futófelület-besugárzás EXCIMER-lézerrel:
 - hullámhossz 308 nm (UV)
 - frekvencia 300 Hz
 - impulzusidő 25 ns
- lézersugár tulajdonságai:
 - szélesség 3,4 mm
 - magasság 6,5 mm
 - intenzitás 25 mJ/mm²
 - 4-szeres besugárzás
- hengerfelület kezelése:
 - motorblokk forgatása
 - lézerfej tengelyirányú mozgatása
 - besugárzott területek átlapolódása
- anyagleválasztás (elgőzölgtetés):
 - grafitlamellák kinyitása
 - grafitkiégés és a mikronyomáskamrák (olajzsákok) kialakulása
- fémes felület megolvasztása kb. 1 µm mélyen, aminek hatására:
 - a felület tükrösödik,
 - nanokristallinos szövetszerkezet alakul ki a hirtelen megszilárdulástól (szemcse nagyság 2–300 nm).

6. Egyéb felületi technológiák

Előny, hogy az olajtároló zsákok magából a mikroszerkezetből jönnek létre, és a fémes felület keménysége jelentősen megnő. A lézeres kezelés előnyösen befolyásolja a felületek tribológiai viselkedését.

6.3. Nyomtatott huzalozású elektronikai áramköri lapok gyártása

A nyomtatott huzalozású áramköri lapok az elektronikai alkatrészek elektromos összekapcsolására és egyben hordozására valók, de sokszor a szerelés, vizsgálat és szerviz számára is tartalmaznak különféle információkat. A huzalozás kialakítható a különféle szigetelőanyagok egyik vagy mindkét oldalán. Az utóbbi esetben a két oldalt legtöbbször átfémezett furatok kötik össze. A huzalozással ellátott szigetelők összepréselésével elérhető, hogy a vezetékek több rétegben helyezkedjenek el egymás fölött. A nyomtatott huzalozású áramköri lapok lehetnek merevek és hajlékonyak. E két csoporton belül a rétegek száma alapján tovább is bonthatók. A merev nyomtatott huzalozású lapok jellemzője, hogy a szigetelőréteg nem hajlítható.

Legegyszerűbbek az egyoldalas lapok, amelyeken a huzalozás a szigetelőanyag egyik oldalán helyezkedik el. Alkalmazási területük pl. az ipari elektronika, háztartási gépek automatikája. A kétoldalas nyomtatott huzalozású lapokon a huzalozást a lapok mindkét oldalán kialakítják. A két oldal elektromos összekötését átfémezett furatokkal oldják meg. A többrétegű nyomtatott huzalozású lapok úgy készülnek, hogy az egyes rétegeket a huzalozás kialakítása után összesajtolják, majd elkészítik a felületi huzalozást és az átmenőfuratokat. Így ez a típus belső vezetékeket, esetenként belső furatokat is tartalmaz. Alkalmazásuk a berendezések méretcsökkentésének egyik lehetősége.

A hajlékony nyomtatott huzalozású lapok jellemzője a vékony, hajlítható szigetelőréteg. Készíthetők egy- és kétoldalas, valamint többrétegű kivitelben. Rendszerint ott alkalmazzák, ahol merev lapok elhelyezésére nincs lehetőség. Szalagkábel helyettesítésére is alkalmas. A nyomtatott huzalozású lapok rajzolatfinomság (vezetőség és szigetelőköz szélességi mérete) alapján is osztályozhatók finom, normál és durva kategóriákba.

A nyomtatott huzalozású lapok gyártásában a következő alapeljárásokat alkalmazzák:

- szubtraktív,
- féladditív,
- additív és
- fotoadditív.

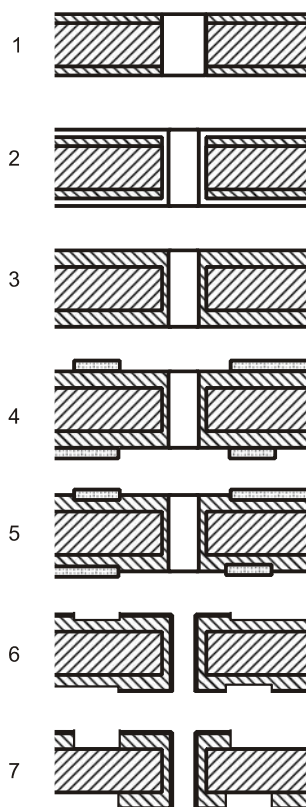
Az egyes eljárások alapanyagai eltérőek, de a szigetelőhordozó szerkezeti anyagai megegyeznek. A hordozó két fő szerkezeti anyaga a vázanyag és a kötőanyag. A merev nyomtatott huzalozású lapok alapanyagaiban leggyakrabban a következő párosításokban fordulnak elő:

- rétegelt papír vázanyag és fenolgyanta kötőanyag,

- rétegelt papír vázanyag és epoxigyanta kötőanyag,
- üvegszövet vázanyag és epoxigyanta kötőanyag,
- üvegszövet vázanyag és teflon kötőanyag.

A hajlékony nyomtatott huzalozású lapok szigetelőanyagai hajlítható, esetenként hőálló műanyag (poliészter-, poliimid-) fóliák. A szigetelőrétegek vastagsága változó.

A szubtraktív eljárás szigetelőanyagát elektrolitréz fólia fedi (általában 10; 17,5; 35; 70 μm vastagságban), amelyet ragasztással rögzítenek a hordozó egyik vagy mindkét oldalán. A féladditív és additív eljárások alapanyaga bontatlan szigetelőlemez, amelynek felületén tapadásfokozó réteget alakítanak ki. A fotoadditív eljárás alapanyaga speciális fotoérzékeny szigetelőlemez.



6.9. ábra

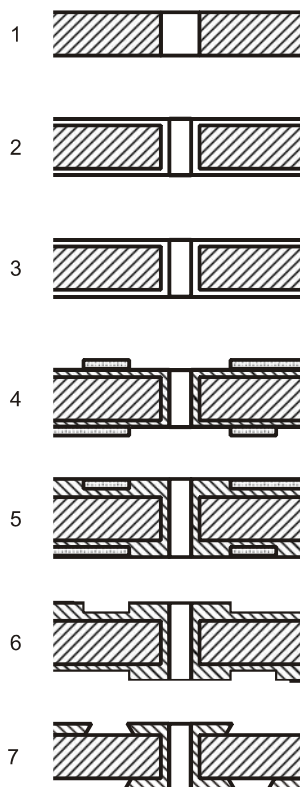
Szubtraktív eljárás

1. fúrás; 2. aktiválás; 3. panelgalvanizálás; 4. maszkolás;
5. rajzolatgalvanizálás; 6. maszkeltávolítás; 7. maratás

6. Egyéb felületi technológiák

Szubtraktív eljárás

Az átfémezett furatokat nem tartalmazó nyomtatott huzalozású lapok gyártásában a kifűrt alapanyagra pozitív maratásmaszkot készítenek, és a fölösleges rezet maratással eltávolítják. A furatfémezett nyomtatott huzalozású lapok gyártásában a kifűrt alapanyagra leggyakrabban kémiai, illetve kémiai és galvanikus úton rezet választanak le. Ezt követően negatív maszkot készítenek, majd a lapok rajzolatát galvanizálják. A negatív maszk eltávolítása után a fölösleges rezet maratással szüntetik meg. Az előállítás folyamatát a **6.9. ábra** szemlélteti.



6.10 ábra

Féladditív eljárás

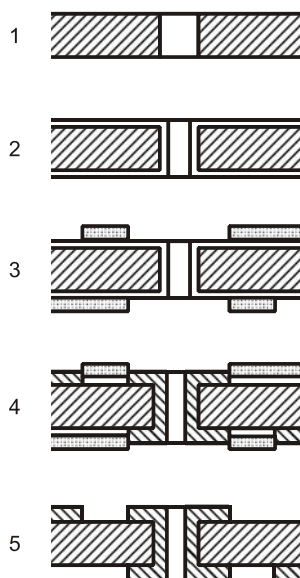
1. fűrés; 2. aktiválás; 3. panelgalvanizálás; 4. maszkolás;
5. rajzolatgalvanizálás; 6. maszkeltávolítás; 7. maratás

Féladditív eljárás

A borítatlan szigetelőre a fúrás után kémiai vagy kémiai és galvanikus módon rézet választanak le. Negatív maszk készítése után a rajzolatot galvanizálják. A maratás maratómaszk nélkül is elvégezhető. Ez esetben a furatok és a rajzolat rézzel borítottak. Az eljárás főbb lépései a **6.10. ábrán** láthatók.

Additív eljárás

A borítatlan szigetelőlemezre a fúrás és a negatív maszk elkészítése után a rajzolatot kémiai rezezással készítik el. Az eljárást a **6.11. ábra** szemlélteti.



6.11. ábra
Additív eljárás

1. fúrás; 2. aktiválás; 3. maszkolás; 4. fémleválasztás; 5. maszkeltávolítás

Fotoadditív eljárás

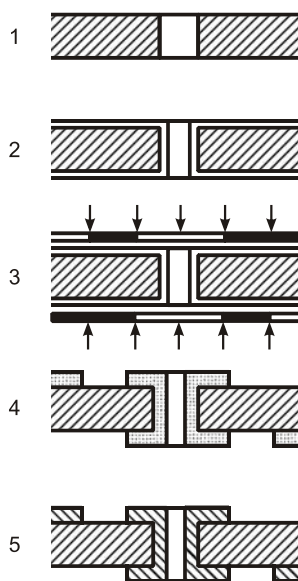
A fotoérzékeny szigetelőlemez lehetővé teszi, hogy a gyártásban a maszkkészítés és maratás elmaradjon. A rajzolat megvilágításával aktiválják az alapanyagban levő katalizátort. A vezetékeket kémiai rezezással alakítják ki. Az eljárás lépései a **6.12. ábrán** láthatók.

Az ismertetett eljárások egymástól igen eltérő és sok esetben igen nagy számú műveletből álló

6. Egyéb felületi technológiák

- mechanikai,
- kémiai és galván-,
- fototechnikai és szitanyomási

technológiákból épülnek fel. Az alapeljárások közül a szubtraktív eljárást alkalmazzák legszélesebb körben, annak ellenére, hogy az additív és fotoadditív eljárások látszólag egyszerűbbek. Ennek oka elsősorban az, hogy kémiai úton vastag ($25\ \mu\text{m}$) és egyben kielégítő minőségű rézbevonat leválasztása nem egyértelműen megoldott. A művelet időigényes, az elektrolitok költségesek.



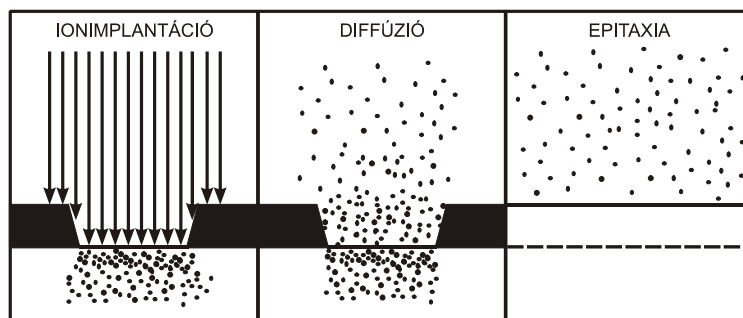
6.12. ábra

Fotoadditív eljárás

1. fúrás; 2. aktiválás; 3. megvilágítás; 4. előhívás; 5. fémleválasztás

6.4. Félvezető alapú elektronikai alkatrészek előállítása

A szilícium a szilícium-dioxidban (SiO_2) és a szilikátokban fordul elő. A szilícium-dioxid tisztasági fokától és kristályformájától függően lehet homok, kvarc, hegyikristály, kova- vagy tűzkő, féldrága- vagy drágakő (pl. achát, jáspis, opál, ónix). A szilíciumot rendszerint a szilícium-dioxidnak szénnel, magnéziummal vagy alumíniummal végzett redukciójából nyerik. Nagy tisztaságú szilícium állítható elő triklórszilán, azaz sziliko-kloroform (SiHCl_3) hidrogén-atmoszférában, $1200\ ^\circ\text{C}$ -on végzett termikus bontásával, majd zónás olvasztással.



6.13/a. ábra

Félvezető alapú elektronikai alkatrészek előállítása

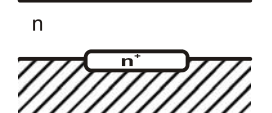
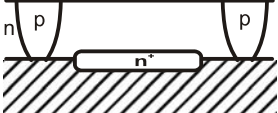
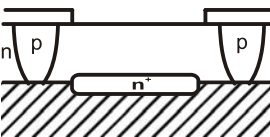
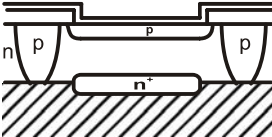
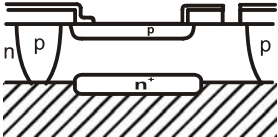
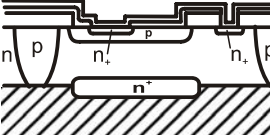
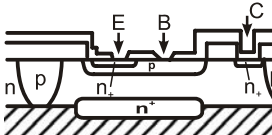
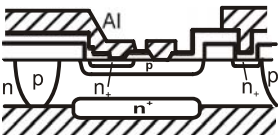
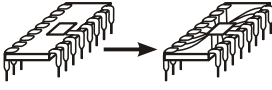
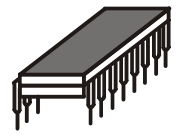
A félvezető eszközök fő részei a pn-átmenetek, azaz egykristályon belül p és n típusú – egymással közvetlenül érintkező – réteget tartalmaznak. A diódák egy, a tranzisztorok kettő, a tirisztorok három-négy, az integrált áramkörök nagyon sok pn-átmenetet tartalmaznak. Ilyen pn-átmenetek készítésének eljárásai – a planártechnológia alapvető műveletei – a következők lehetnek (**6.13/a. ábra**):

- az ötvözés során három vagy öt vegyértékű elemet („akceptort” vagy „donort”) visznek be pl. ionimplantációval;
- a diffúzió során a szilíciumlapkára felviszik a diffúziós anyagot, ami a 700–1300 °C hőmérséklet-intervallum meghatározott értékén adott idő alatt a kívánt mélységbe diffundál; pl. egy npn tranzisztor elkészítéséhez két diffúzióra van szükség: először bórdiffúzióval p-réteget, majd foszforral n-réteget állítanak elő.
- az epitaxiális rétegnövesztés során szilárd Si-egykristály alapra gőzfázisból más szennyezésű réteget növesztenek úgy, hogy a kialakuló réteg szerkezete az alappal azonos legyen; pl. 1000 °C körüli hőmérsékleten szilícium-tetrakloridot (SiCl_4) és vele együtt arzén-trikloridot (AsCl_3) redukálnak hidrogénnel: $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{SiCl}_2 + 2\text{HCl} \Rightarrow \text{SiCl}_2 \rightarrow \text{Si} + \text{SiCl}_4$, illetve $2\text{AsCl}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{As} + 6\text{HCl}$. Az így keletkezett elemi Si és As tovább építi a Si-egykristályt. Ha az alap p-típusú, akkor az arzénnal szennyezett 10–15 μm -es réteg pn-átmenetet képez.

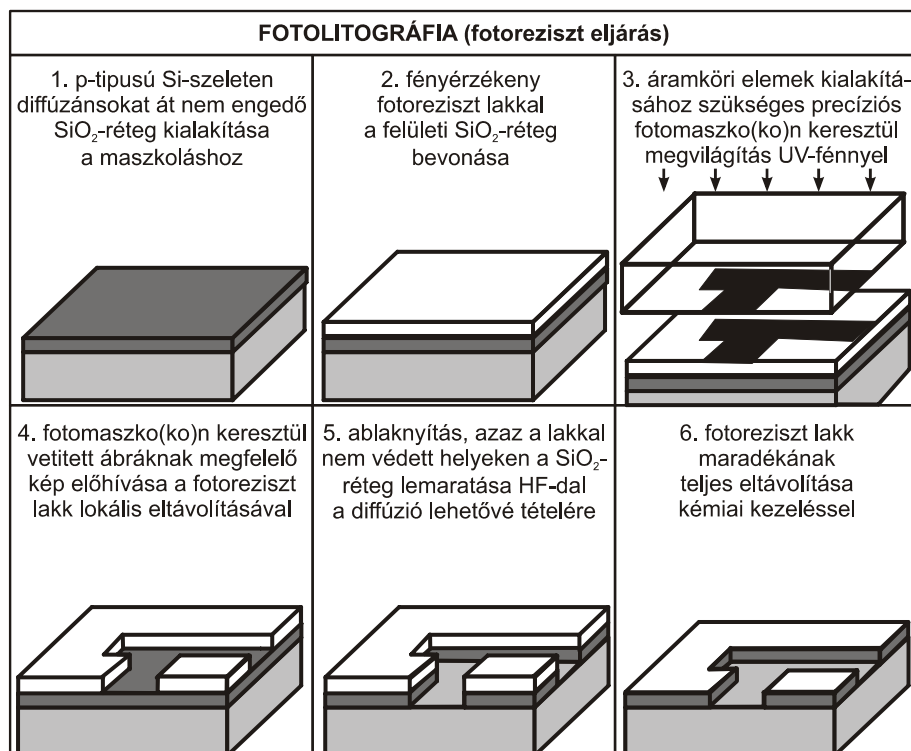
A Si-alapú integrált áramkörök (IC = Integrated Circuit) gyártásakor (**6.13/b. ábra**) p típusú Si-szeleteken néhány ezer Å vastag SiO_2 réteget hoznak létre. A SiO_2 segítségével valósítható meg a maszkolás, mivel az a diffúziót megakadályozza.

Fotoreziszt technikával (**6.13/c. ábra**) a kívánt helyeken az oxidot megvédi, viszont a diffúzióra kijelölt helyeken hidrogén-fluoridos maratással eltávolítják, „ablakot” nyitnak rajta. As-diffúzió után kb. 10 μm vastag epitaxiális n-réteget hoznak létre és ebből szigetelő bórdiffúzióval (p típusú) alakítják ki a kollektorrétegeket. A kollektor alatt általában egy foszfordiffúziós – erősen szennyezett n^+ – réteg helyezkedik el. A bázist és az ellenállást egyidejűleg alakítják ki bórdiffúzióval. Az emitter- és a kollektorkontaktus erősen szennyezett n^+ réteg.

6. Egyéb felületi technológiák

<p>1. 0,2–0,3 mm vastag, 30–100 mm átmérőjű, p-típusú Si-szeletek készítése és alapos kémiai tisztítása</p> 	<p>2. oxidálás vízgőzzel és oxigénnel 1000–1200°C-on, néhány ezer Å vastag SiO₂-réteg kialakítására</p> 	<p>3. fotoreziszt eljárással ablaknyitás a SiO₂-rétegben a rejtett réteg-diffúzió helyein</p> 
<p>4. As-diffúzió erősen szennyezett n+ rejtett réteg kialakítására</p> 	<p>5. kb. 10 μm vastag n-típusú epitaxiális réteg növesztésére a tranzistorok kollektoraihoz</p> 	<p>6. p-típusú szigetelő B-diffúzió, oxidréteg keletkezésével</p> 
<p>7. fotoreziszt eljárással ablaknyitás az oxidrétegben a tranzistorok bázisai és az ellenállások helyén</p> 	<p>8. p-típusú B-diffúzió a tranzistorok bázisaihoz oxidréteg keletkezésével</p> 	<p>9. fotoreziszt eljárással ablaknyitás az újabb oxidrétegben a tranzistorok emitter és kollektorkontaktusai helyén</p> 
<p>10. p-diffúzió erősen adalékolt n+ kollektor- és emitterkontaktusok kialakítására</p> 	<p>11. fotoreziszt művelettel ablaknyitás a pn-átmenetet eredményező Al-kontaktusok helyén</p> 	<p>12. vákuumban Al-réteggel bevonás, majd fotoreziszt eljárással (maratással) vezetőhálózat kialakítása</p> 
<p>13. Si-szeletek szétválasztása áramköri egységekre</p> 	<p>14. szerelőszalagra forrasztás és Au-huzalos bekötések</p> 	<p>15. fröccssajtolással műanyag házba tokozás</p> 

6.13/b. ábra
Félvezető alapú elektronikai alkatrészek előállítása



6.13/c. ábra

Félvezető alapú elektronikai alkatrészek előállítása

Az oxidált felületen fut az Al-vezetőhálózat, mely csak az emitter (E), a bázis (B), a kollektor (C) és az ellenállás végpontjain érintkezik a félvezetővel, a többi részen a SiO_2 -réteg szigetel. A szeleteket elemekre (chipekre) szétválasztják, szerelőszalagra forrasztják, és 25 μm -es aranyhuzallal kötéseket létesítenek az elemek és a kivezető lábak között. Pl. fröccssajtolással műanyag házat készítenek, a lábakat behajlítják és ónozzák.

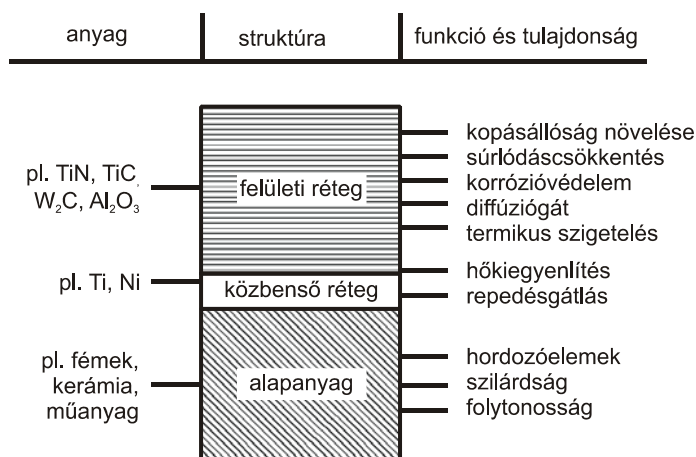
6.5. Bevonatos kompozitok készítése

Bevonatos kompozitokat kopásálló, hőálló, korrózióálló, elektromos-, illetve hőszigetelő vagy dekoratív (meghatározott színű, fényű, avagy fényvisszaverő) felületi réteggel ellátott anyagok képezik (6.14. ábra).

A bevonatos kompozitoknál (6.1. táblázat) az alapanyag a teherhordozó, a bevonat a mátrixanyag károsodással szembeni ellenállását javítja, hiszen a legtöbb tönkremeneteli folyamat a felületről indul ki. Fémmátrixú kompozitok közül közismertek a teflonnal (PTFE) bevont konyhai edények és a borotvapengék. Az ipar-

6. Egyéb felületi technológiák

ban főleg síkló felületek bevonására, nagyobb hőmérsékleten korrózióálló védőréteggént alkalmazzák a teflont. PVC-bevonattal ellátott acélhuzalból légköri korrózió-
 ónak tovább ellenálló kerítésfonatot, míg hasonló bevonatú alumínium- vagy réz-
 huzalból szigetelt elektromos kábelt készítenek. Cinkbevonattal korrózió ellen vé-
 dett lemezeket és csöveket készítenek. Dekoratív és korrózióálló krómozott
 fémalkatrészekből különféle szerelvényeket gyártanak. Acél és öntöttvas edények
 felületét zománcozással teszik ellenállóbbá és esztétikusabbá. Polimermátrixú
 kompozitok közé tartoznak pl. a műanyagfólia bevonatú bútorlap, faforgácslap,
 illetve azok a bioanyag-mátrixú kompozitok, amelyeket környezeti hatásokkal
 szemben bevonatolással védenek. A kerámiamátrixú kompozitok jellegzetes példá-
 ja a szintén kerámiabázisú mázakkal ellátott kerámiaacsempe, -padlólap vagy -
 edény, melyek felülete a fellép(het)ő koptató hatásoknak sokkal jobban ellenáll.



6.14. ábra
 Bevonatos kompozitok összetevőinek funkciói

A bevonatos kompozitok egy része az ún. gradiens anyagok közé tartozik. Ez azt jelenti, hogy mikroszerkezetük és/vagy összetételük megtervezett, ennek révén fokozatos változásokat tartalmazó darabok (pl. gázturbinalapátok és azok többrétegű hőálló bevonata) gyártására alkalmasak, a várható üzemelés helyileg változó követelményeinek megfelelően.

Korszerű alternatívái a bevonatalkotóknak az ún. kvázikristályos szerkezetű anyagok. A kvázikristály hosszú távú rendezettséget mutat, de aperiodikus szerkezettel rendelkezik, azaz a bázisismétlődési távolság változó. Összetételüket tekintve a kvázikristályos anyagok intermetallikus fázisokból (pl. Al₆₅Cu₂₀Fe₁₅, Al₉₃Mn₅Ce₂) állnak, melyek plazmaszórt bevonatként nagy keménységűek, kis súrlódási együtthatójúak, mérsékelt hővezetőképességűek, oxidációval és korrózióval szemben jó ellenállást tanúsítanak.

6.1. táblázat. Példák bevonatos kompozitokra

összetétel jelleg	Alapmátrix	+ bevonatanyag (vagy burkolóanyag)	= kompozit összetett anyag (vagy termék)
Polimermátrixú kompozitok	pozdorjalap	fafurnér lemez	bútorlap
	faforgácslap	műanyag fólia	bútorlap
	textil	PVC	textilalapú műbőr
Fémhátrixú kompozitok	Al, Cu	PVC	elektromos kábel
	acél, öntöttvas	zománc(üveg)	zománczott edény
	acél	TiO ₂ , CaO stb.	bevonatos hegesztőelektroda
Kerámiamátrixú kompozitok	TiO ₂ , CaO stb.	acél	porbeles hegesztőelektroda
	kristályos oxidkerámia	üvegkerámia	mázás cserépedény és csempe, illetve padlólap
	kerámialapka	gyémánt, TiN (CVD-vel)	forgácsolószerszám-lapka

A légi közlekedés járműveinek – gazdaságossági és környezetvédelmi szempontok motiválta – hatásfoknövelése legeredményesebben a turbinák belépő hőmérsékletének növelésével érhető el. Tehát a turbinák első fokozataival szemben követelmény a nagy melegsílárdság, oxidáció- és korrózióállóság. Ezen követelmények kielégítéséhez – a lapátok anyagának és hűtéstechnikájának javítása mellett – különleges bevonatokat (gradiensanyagokat) is alkalmaznak. Pl. a Ni-alapú szuperötvözet felületére először Ni-Cr-Al-Y ötvözetből oxidációálló tapadóréteg kerül, ami biztosítja a ZrO₂-Y₂O₃ kerámia fedőbevonat jó kötését.

6.6. Fémszínezés

A fémszínező eljárásokkal a fémek és fémbevonatok színét lehet módosítani vagy megváltoztatni. Célja legtöbb esetben a díszítő kikészítés. Az eljárások között kémiai és elektrokémiai módszerek ismeretesek. Fontos az alapfém kifogástalan előkészítése. Azonos színt csak az azonos állapotú alapanyagokon lehet előállítani. Azonos összetétel esetén is más a réteg színe öntvényenél és fémbevonatnál. A fémszínezést általában mártó eljárással végzik, amit alapos folyó vizes, iontalanított meleg vizes öblítés, végül szárítás követ. A díszítőhatás növelésére rongykorongos fényesítést is alkalmazhatnak. A szín védelme céljából a munkadarabokat szintelen lakkréteggel vonják be.

Vas és ötvözeinek színezése

Gyakori eljárás a futtatási szín kialakítása acélfelületen. Ötvözetlen acéloknál ez a következő hőmérsékleten következik be:

- világossárga, 225 °C;

6. Egyéb felületi technológiák

- sárga, 235 °C;
- sárgásbarna, 245 °C;
- barnától vörösesbarnáig, 258 °C;
- bíborvörös, 270 °C;
- barnásvörös, 280 °C;
- kék, 295 °C;
- sötétkék, 315 °C.

A feketítő oldatok a korrózióvédelmet is szolgálják. Saválló acélokon fekete szín állítható elő a következő összetételű oldatban: kénsav 1 l + nátrium-dikromát 13 g/l 18–25 °C-on, a kezelési idő 5–10 perc.

Réz és ötvözeinek színezése

A leggyakrabban alkalmazott fém és fémbevonat, amelyet színezni szoktak. 5–10 g/l kénmájoldat (kálium-poliszulfidok) szobahőmérsékleten vagy 60–70 °C-on néhány perc alatt színez. A szín először vörösesbarna, aztán barna és 4–5 perc után kékesfekete. Szobahőmérsékleten érhető el a barnásfekete szín, ha 1 l vízben 10 g kénmájat és 10 g ammónium-kloridot oldanak, és a munkadarabokat belemártják. A hőmérséklet növelésével a színezés folyamata gyorsítható. Mélyfekete színű lesz a rézfelület, ha 100 °C-ra melegített 50 g/l nátrium-hidroxid oldathoz 10 g porított dikálium-peroxo-diszulfátot adnak, és kb. 5 perc időtartamra a színezni kívánt munkadarabokat belemártják. A sárgarézt színezésére a leggyakrabban használt oldatösszetétel: 1 l 25%-os ammónium-hidroxid oldat, amelyben 200 g diréz-dikarbonát-dihidroxid (bázisos réz-karbonát) van. Az oldat hőmérséklete 30–40 °C. A fémfelületen fekete vagy kékesfekete szín képződik. Az egyenletes szín eléréséhez bizonyos cinkmennyiség oldatba jutása előnyös.

Alumínium és ötvözeinek színezése

Az anódos oxidréteg színezhetősége, valamint a színes oxidréteg előállításának lehetősége csökkentette az alumínium hagyományos régi színezését. Barnásfekete szín állítható elő olyan oldatban, amely 1 l vízben 10 g kálium-permanganátot, 25 g réz(II)-nitrátot és 4 cm³ tömény salétromsavat tartalmaz. A színezés hőmérséklete 80–100 °C. 5 perc után világosbarna, 30 perc múlva pedig már fekete lesz az alumíniumfelület. Szintén fekete szín előállítására alkalmas a következő oldat 82 °C hőmérsékleten: 15 g/l ammónium-[tetraoxo-molibdenát(VI)] + 30 g/l ammónium-klorid + 8 g/l bórsav + 8 g/l kálium-nitrát.

Cink és ötvözeinek színezése

Csak a fekete színű réteg ad megfelelő tapadást a cink felületén. Ilyen összetétel: réz(II)-szulfát – víz (1/5) 45 g/l + kálium-klorid 45 g/l. Az oldat hidegen használható. 30 g/l ammónium-[tetraoxo-molibdenát(VI)] + 47 cm³/l tömény ammónium-hidroxid oldatában szobahőmérsékleten szintén fekete színű felület alakítható ki.

Egyéb fémek színezése

Nikkel feketére színezhető szobahőmérsékleten, ha az oldat összetétele a következő: 1 l vízben 0,5 g kálium-tiocianát + 5 cm³ tömény kénsav + 25 cm³ hidrogén-peroxid. A pH = 1,2 kell legyen, a kezelési idő 15 perc. Ónfelületet feketére lehet színezni 5 térfogatszázalékos tömény salétromsavból készült oldatban, amely 3 g/l réz(II)-szulfát – víz (1/5)-et is tartalmaz. Ez az oldat cinkötvözetek antikulására is használható. A kadmium felülete feketére színezhető 60 g/l kálium-klorát és 35–40 g/l réz(II)-nitrátot tartalmazó oldatban. Ezüstöt 0,3–3%-os ammónium-poliszulfid oldatban, szobahőmérsékleten lehet feketére színezni.

6.7. Átmeneti korrózióvédelem

Az átmeneti korrózióvédelem fémfelületek szállítás, tárolás, állásidő alatti, illetve műveletek közötti ideiglenes védelme. Főleg kohászati féltermékek, fémalkatrészek, gépek, készülékek, berendezések és műszerek korrózióvédelmére alkalmazzák. A védelem időtartama a védőanyag fajtájától és a tárolás jellegétől (zárt, fedett, szabadtéri) függően igen széles tartományban mozog (1–2 hónaptól több évig terjedhet).

Az átmeneti korrózióvédelem a következő esetekben lehet indokolt:

- ha a védendő tárgy félkész termék (pl. rúd, cső, lemez, idomvas), és más telephelyen dolgozzák fel tovább;
- ha állandó korrózióvédő bevonat (pl. festék, műanyag) a további feldolgozást zavarja;
- ha az egyes munkafázisok között is védeni kell a termékeket; a rövid ideig tartó védelmet a megmunkáláshoz használt hűtő-kenő emulziók biztosítják;
- ha berendezések, alkatrészek, műszerek hosszabb ideig tartó szállítása agresszív körülmények között (pl. tengeri szállítás) történik, de különösen, ha a megérkezés után még hosszabb tárolásra is számítani kell;
- ha gépek, berendezések időszakos üzemszünetében, pl. a mezőgazdaságban, az árvízvédelemben, a tűzoltóságnál, a honvédelemben és a közlekedésben az időszakosan működtetett gépeket, járműveket a korróziós szempontból legártalmasabb időszakokban részben szabadban vagy fedett téren tárolják.

Az átmeneti védőanyagokat két nagy csoportba sorolják: átmeneti védőbevonatot képező anyagok és csomagolóanyagok, illetve csomagban ható védőanyagok. Az átmeneti védőbevonatot képező anyagok lehetnek:

- védőolajok,
- védőzsírok,
- védőviaszok,
- bitumenalapú védőanyagok,
- védőlakkok,
- védőemulziók,
- fémpigmenttartalmú védőanyagok,

6. Egyéb felületi technológiák

- primerek.

A csomagolóanyagok és csomagban ható védőanyagok lehetnek:

- csomagolópapírok és -fóliák,
- inhibitorok és páracsökkentők.

Az átmeneti anyag felhordása előtt a felületet elő kell készíteni. Az előkészítés a felületi szennyezettség jellegétől függően zsírtalanításból, oxidmentesítésből és szárításból állhat. A megfelelően zsírtalanított és oxidmentesített felületet szárítani kell, mert még a vízkiszorító adalékot tartalmazó védőanyagok is csak igen enyhén nedves felületre hordhatók fel. A szárítás legegyszerűbb módja a felület lefűtatása nagynyomású levegővel, esetleg meleg levegővel vagy túlhevített gőzzel. De végbemeget a vízmentesítés ún. vízkiszorító folyadékokkal is, amelyeknek fő alkotója egy nagy lobbanáspontú, szénhidrogén-alapú oldószer, legfontosabb adaléka pedig valamilyen vízkiszorító anyag. A vízkiszorító folyadékba mártott felületekről a víz kiszorul, részben vagy egészen cseppek alakjában leválik, és a tartály aljára ülepedik. A tartályból kiemelt darab a levegőn megszárad.

Az átmeneti korrózióvédő anyagok felhordásának több módszere ismert, ezek:

- ecsetelés,
- bemerítés,
- szórás.

Az ecsettel való felhordás a festéshez hasonló. Előnye, hogy nincs szükség költséges berendezésre, hátránya, hogy gazdaságtalan módszer, és a kialakított bevonat rétegvastagsága nem egyenletes. Alkalmazása főleg a szórással felhordott bevonatok kiegészítő védelmére ajánlítható. Javasolható még a nehezen hozzáférhető helyeken, erősen tagolt felületek átmeneti védőanyaggal való ellátására is.

A bemerítéssel való védőanyag-felhordás biztonságos és kényelmes módszer, de a felhordott védőanyag jellege erősen befolyásolja a műveletet. Aránylag legegyszerűbb az olajok felhordása, mert a fürdő hőmérsékletével a kialakított réteg vastagsága befolyásolható. Oldószeres készítmények felvitelénél figyelembe kell venni a tűz- és egészségvédelmi előírásokat. A zsírok felvitelénél két dologra kell ügyelni. A bemerítés hőmérséklete kb. 30 °C-kal legyen a zsír cseppenéspontja felett, de mivel nagy hőmérsékleten a zsírok megsötétednek, tanácsos ezt a felhordási módszert csak közepes cseppenéspontú védőanyagokra alkalmazni. A másik fontos szempont, hogy az ún. irreverzibilis zsírokat nem lehet bemerítéssel felhordani, mert ezek melegítéskor irreverzibilisen szétválnak. Viasz- és bitumen-alapú készítményeket általában nem hordanak fel bemerítéssel. A módszer előnye, hogy tagolt felületek is bevonhatók a védőanyaggal; hátránya, hogy nagyobb darabok védelme ezzel a módszerrel nehézkes.

A leghatékonyabb és legtermékenyebb felhordási módszer a szórás, amely nagy felületek sorozatos bevonására is alkalmas, de megfelelő nyomólevegő és elektromos csatlakozás szükséges ehhez a technológiához. Természetesen itt is figyelembe kell venni az eljárás korlátait, nevezetesen, hogy az irreverzibilis zsírok ilyen módon nem hordhatók fel, a reverzibilis félszilárd anyagok is csak olvadt állapotban, melegen.

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

7.1. Vizuális vizsgálatok

A **7.1. ábra** bemutatja a vizuális – azaz szemmel érzékelhető eredményt produkáló – vizsgálatok egy általános folyamatábráját, pontosabban alapvető szempontjainak rendszerét. Mivel szemünk felbontóképessége korlátozott, már a makroszerkezet vizsgálatához is szükségessé válhat valamilyen optikai nagyítóeszköz igénybevétele.

A vizsgálati feladat tanulmányozása valamilyen konkrét termék (anyag, konstrukció) gyártásához (technológia) kötődő minőségellenőrzés megtervezésekor jut érvényre, amikor meg kell határozni, hogy a gyártás mely szakaszai után (milyen termékállapotban), a termékek mely rész(let)ein és mekkora hányadán (milyen terjedelemben), a lehetséges módszerek és eszközök melyikével (milyen hozzáférhetőséggel) indokolt, illetve célszerű vizsgálatokat végezni. Az is előfordulhat, hogy nemcsak gyártásban lévő, hanem már használatban (üzemeltetés alatt) álló vagy éppen tönkrement (pl. kárt, illetve balesetet okozó) termék értékelése az ilyen vizsgálatok célja.

Mindegyik esetben szükségessé válik – a vizsgálat szakszerű kivitelezését, megbízható kiértékelését szolgáló – elégséges szintű (de csak feltétlenül szükséges mértékű) felületelőkészítés, -tisztítás. Továbbá – vizuális vizsgálatokról lévén szó – különösen fontos a megfigyelési feltételek optimális biztosítása, ami nemcsak megfelelő erősségű és egyenletességű fényforrást, hanem káprázatmentes (a szem hunyorítását és könnyezését nem kiváltó) és kontrasztot (árnyalatkülönbségeket) adó megvilágítást is jelent. A kontraszt adódhat jelentős színeltérésekből (színkontraszt) vagy számottevő fény-árnyék különbségekből (intenzitáskontraszt). Ugyancsak fontos a felhasználandó optikai és mérőeszközök megfelelő előkészítése (épségének és teljességének ellenőrzése), kipróbálása (működőképességének ellenőrzése), valamint etalontesztje (a rá vonatkozó pontosság megletének ellenőrzése), röviden: minőségképességének biztosítása.

Az ilyen szemrevételezéses vizsgálatok első feladata – aminek tulajdonképpen meg kell előznie a makrogeometria vizsgálatát – az anyag, illetve a termék rendelkezésre álló dokumentumok, információk szerinti azonosítása, azaz annak megállapítása, hogy azt vizsgál(hat)juk-e, amit szándékoztunk. Ugyancsak ezen vizsgálatok kezdetekor kell kiszűrni az olyan „durva” (nem korrigálható alak- és mérethelességi) eltéréseket, amelyek funkcionális alkalmatlanságot jelentenek. Az ilyen korai selejtkiválogatással megtakarítható a már feleslegesen el nem végzett további vizsgálatok idő-, anyag- és munkavonzata.

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

vizsgálati feladat tanulmányozása
(termék: anyag, konstrukció, technológia)

minőségellenőrzés megtervezése
(termékállapot, terjedelem, hozzáférhetőség)

felületelőkészítés
(olaj, zsír, rozsdá, reve, por, salak, festék eltávolítása)

optimális megfigyelési feltételek biztosítása:
megfelelő erősségű, egyenletességű, káprázatmentes,
kontrasztadó megvilágítás;
optikai és mérőeszközök előkészítése, ellenőrzése
(teljesség, működőképesség, pontosság)

termékazonosítás

alak- és mérethelyesség ellenőrzése

felületvizsgálat:
felületi érdességvizsgálat
(etanollokkal, műszerrel)
felületálapot vizsgálata
(optikai *folydékbephatolásos, mágnesezhető*
poros, örvényáramos módszerekkel)

felület(közel)i hibák felderítése
(hely, orientáció, fajta, jellemző méret, gyakoriság)

vizsgálati eredmények rögzítése
(adatok, vázlatok, fényképek, videofelvételek)

vizsgálati eredmények (ki)értékelése

termékmegfelelőség megítélése

további vizsgálat szükségességének mérlegelése
(megismétlés, térfogati vizsgálatok elvégzése:
ultrahangos, radiográfiai módszerekkel)

vizsgálati eredmények dokumentálása

vizsgálati jegyzőkönyvek elkészítése

7.1. ábra

Vizuális és optikai vizsgálatok folyamata

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

Az alak és a jellemző méretek vizsgálata szabad szemmel és a mérés technika (metrológia) eszközeivel (**7.2. ábra**) történhet:

- az alakvizsgálat főbb eszközei: az egyenességet ellenőrző élvonalzó, a profilosságot ellenőrző alaksablonok és alakidomszerek, határidomszerek;
- a méretvizsgálat főbb eszközei: mérőszalag, mérőléc, mérővonalzó, tolómérők, mikrométerek, mérőkörzők, mérőlupe, méretidomszerek, hézagmérők, mérőhasábok, idomtestek, etalonok;
- az alak- és méretvizsgálat jellegzetes eszközei: mérőórák (mérőállvánnyal), szögmérők, szögidomszerek, projektorok (profilkivetítők), mérőmikroszkópok.

(Az idomszerekkel egy adott konkrét geometriai jellemző, illetve annak egy meghatározott tűréshatáron belülisége ellenőrizhető egyszerűen, gyorsan, főként tömeggyártáskor.)

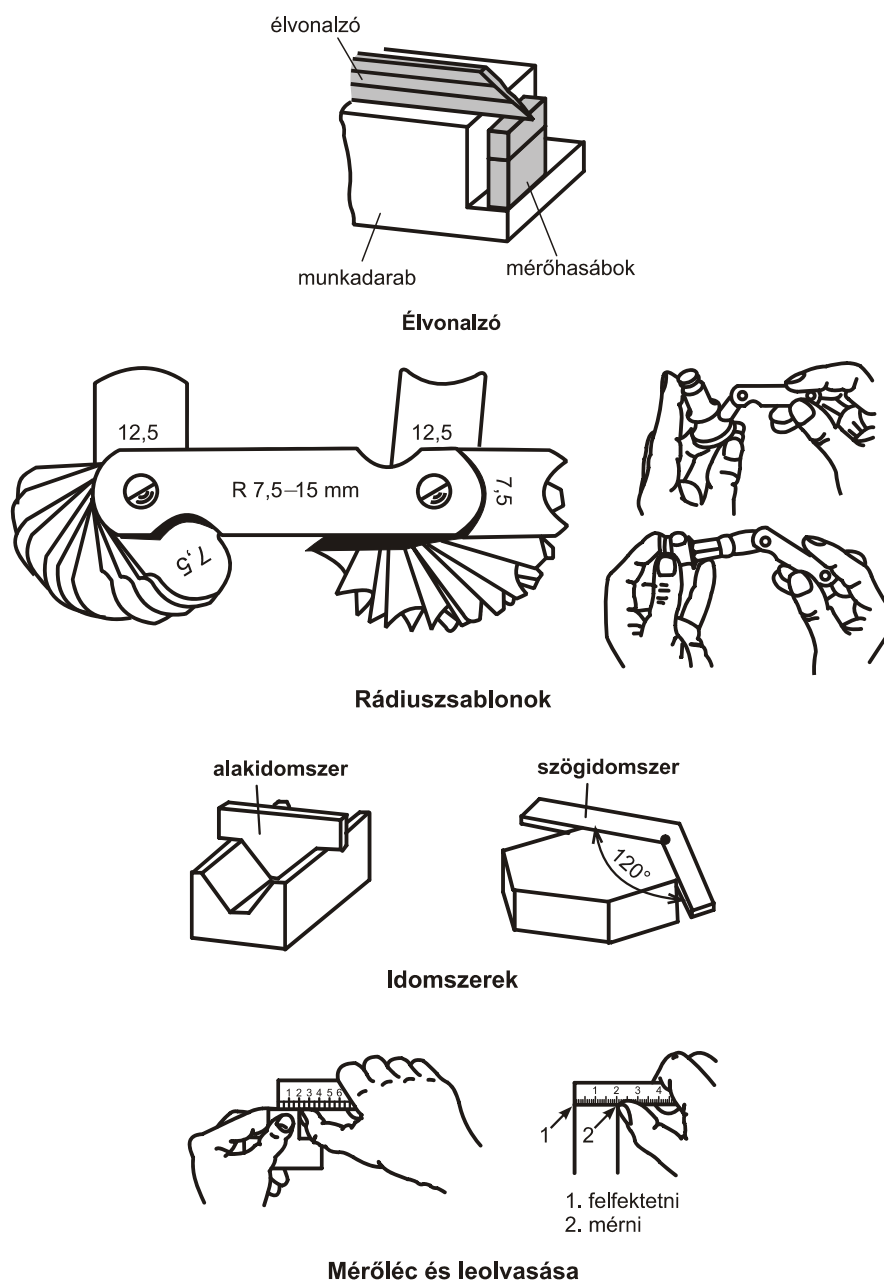
A felületvizsgálat – melynek néhány eszköze szintén a **7.2. ábrán** látható – célja lehet a felületállapot (elváltozások, hiányosságok, bevonat, esztétika) és a felületi érdesség vizsgálata:

- a felületállapot vizsgálata történhet tükrökkel, kézi nagyítóval, lupéval, illetve mikroszkóppal (külső felületeken); endoszkóppal, fiberszkóppal, videoszkóppal (belső felületeken); továbbá a **7.2. alfejezetben** szereplő roncsolásmentes vizsgálatokkal: folyadékbehatolós, mágnesezhető poros és örvényáramos eljárással;
- felületi érdességvizsgálat végezhető összehasonlítással és objektív méréssel:
 - az első esetben a felületet etalonokkal (a különböző érdességi osztályoknak megfelelő felületmintákkal) hasonlítják össze szemrevételezés, illetve körömmel való karcolás útján. Ez magában hordozza a szubjektív hibák (tévedések) lehetőségét és ezáltal a vizsgálat kisebb megbízhatóságát;
 - a másik esetben az érdesség tényleges mérését lehetővé tevő, objektív információkat szolgáltatató (finommechanikai, optikai, elektronikus, pneumatikus) műszerek alkalmazásával végzik a vizsgálatot. Gyakori megoldás, hogy egy nagy keménységű, precíziósan kialakított, kúpos tapintócsúcs a kijelölt alaphosszon végigtapogatja a felületet, és kirajzolja az érdességprofil, illetve azt kiértékelve megadja R_a és R_z számértékét (lásd a **2.1.2. alfejezetben**).

Az anyagok mechanikai terhelhetőségét (különösen húzó, hajlító és csavaró igénybevétel esetén) és károsodásállóságát jelentősen is befolyásol(hat)ó felületi, illetve felületközeli anyaghibák veszélyességének megítéléséhez szükséges:

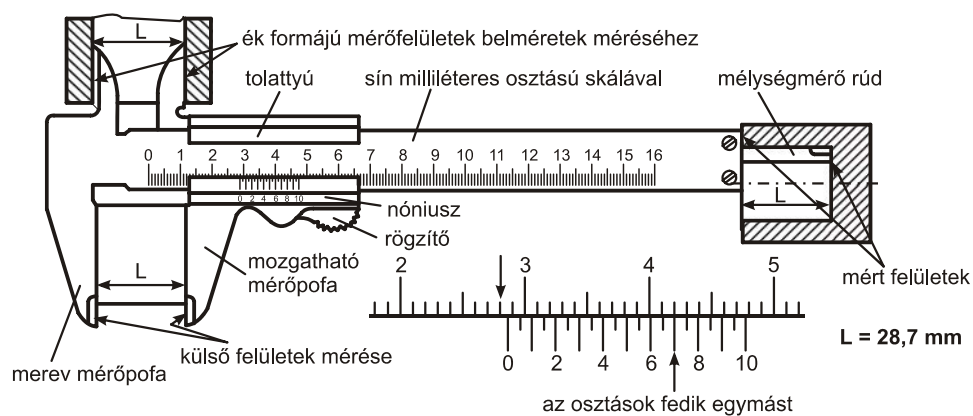
- a hiba helyének pontos behatárolása,
- a hiba orientációjának – a várható terhelés irányához képesti helyzetének – tisztázása,
- a hiba fajtájának (karcolás, repedés, kötésihiány, üreg, zárvány, pórus stb.) azonosítása,
- a hiba jellemző méretének meghatározása,
- a hiba térbeli és időbeli gyakoriságának (hely és idő szerinti előfordulása statisztikai jellegének) megállapítása.

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

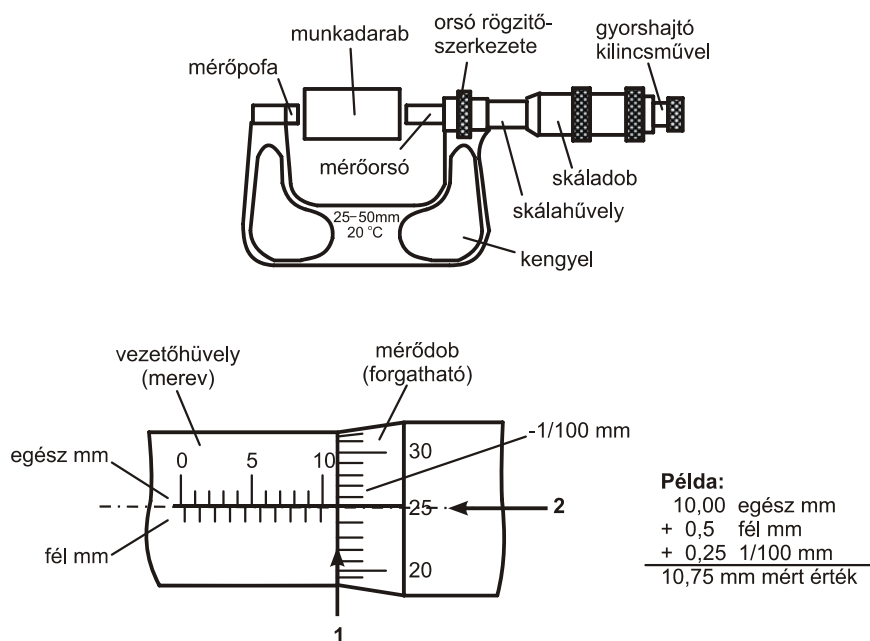


7.2. ábra (I.)

Vizuális és optikai vizsgálatok eszközei



Tolómérő és leolvasása

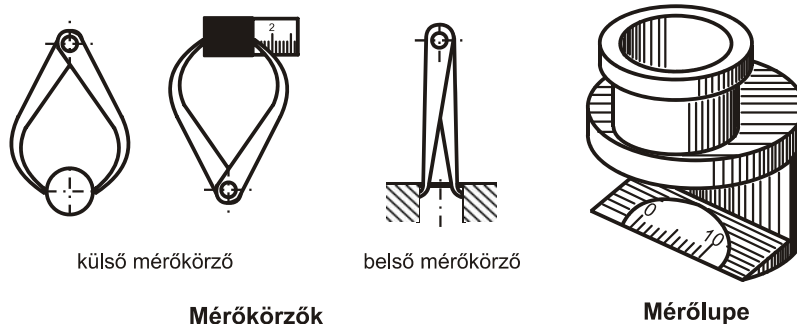
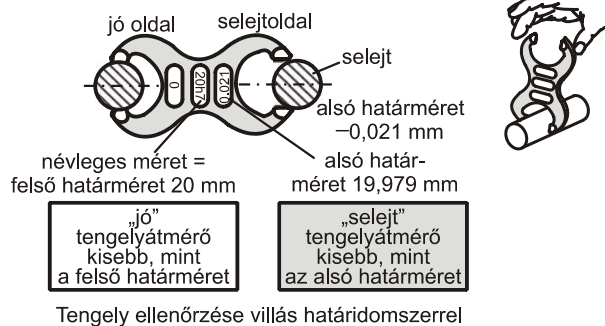
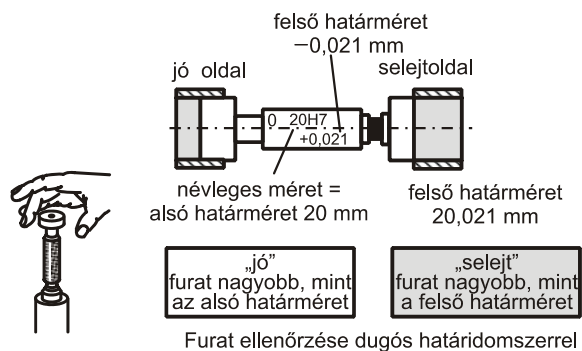


Mikrométer és leolvasása

7.2. ábra (II.)

Vizuális és optikai vizsgálatok eszközei

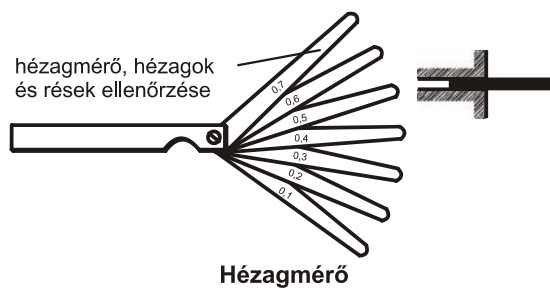
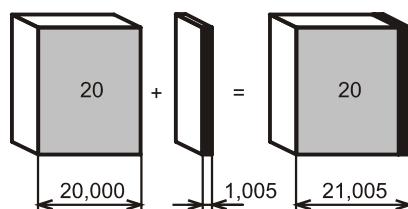
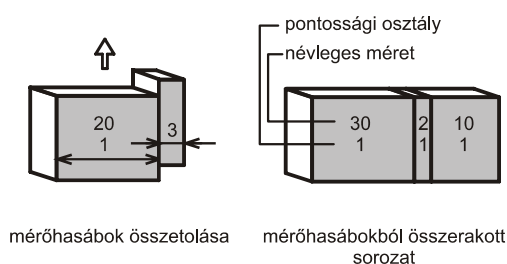
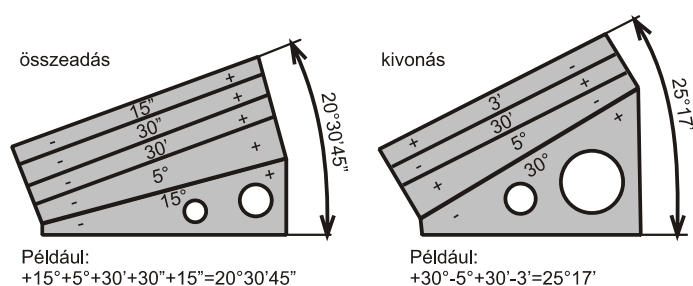
7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



Méretidomszerek

7.2. ábra (III.)

Vizuális és optikai vizsgálatok eszközei

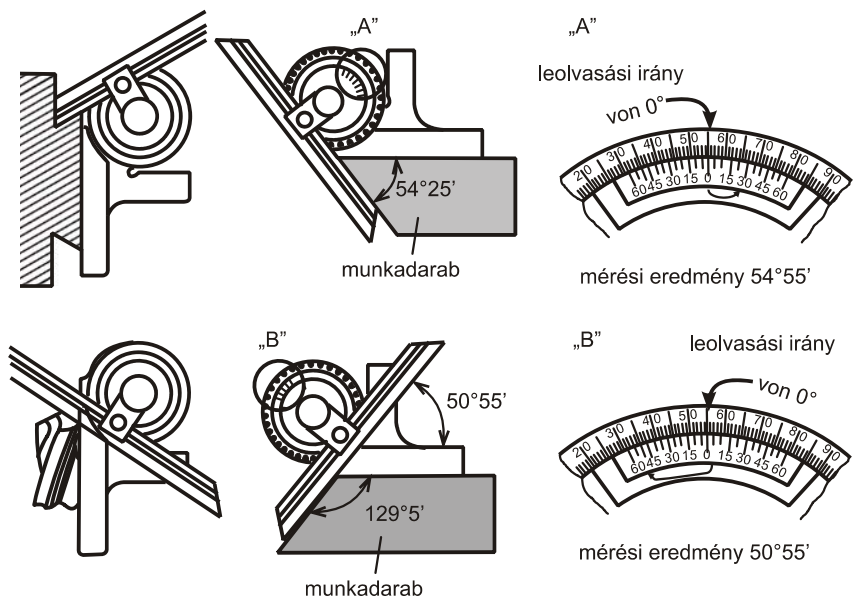


Szögmérőhasábok

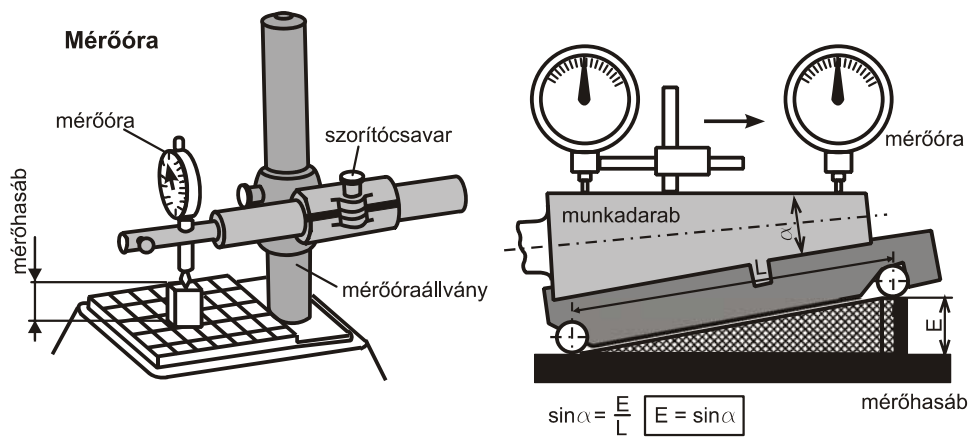
7.2. ábra (IV.)

Vizuális és optikai vizsgálatok eszközei

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

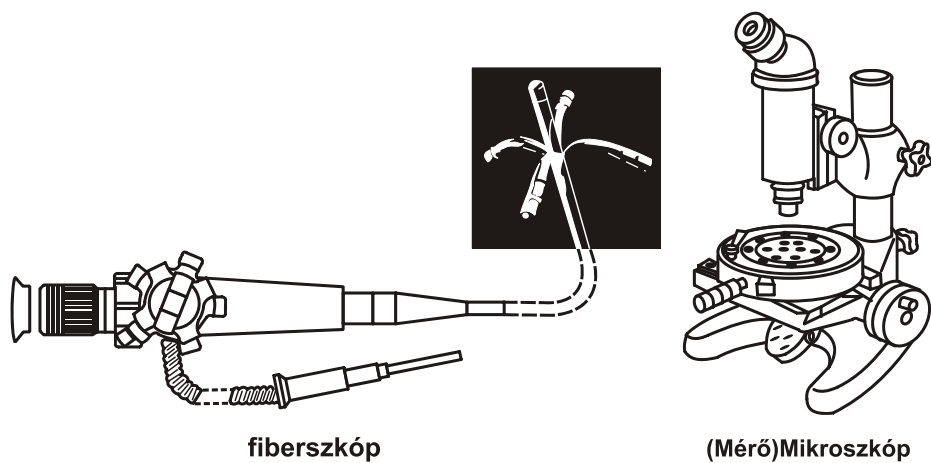
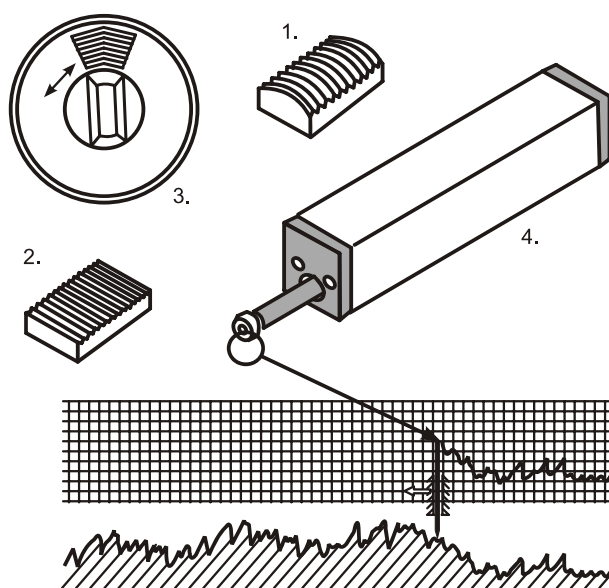


Egyetemes szögmérő leolvasása



A munkadarab hajlásszögének ellenőrzése szinuszvonalzóval és mérőórával

7.2. ábra (V.)
Vizuális és optikai vizsgálatok eszközei



1. fémetalon hengeres felületekhez
2. fémetalon sík felületekhez
3. fémbevonatú műanyag etalonsorozat
4. érdességmérő műszer

Érdességmérők

7.2. ábra (VI.)

Vizuális és optikai vizsgálatok eszközei

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A vizsgálati eredmények rögzítése számszerű és szöveges adatok feljegyzése, illetve rajzi vázlatok készítése mellett történhet analóg vagy digitális fényképezőgép (fotó), számítógép (adatbázis), videokamera (mozgóképfelvétel) igénybevételével.

A vizsgálati eredmények értékelése többféle megállapításhoz vezethet.

- a termék megfelelő;
- a termék nem megfelelő, ebben az esetben javítható vagy nem javítható se-lejtről beszélhetünk (a selejtváltás után a szükséges vizsgálatokat újra el kell végezni!);
- bizonyos vizsgálat eredménye nem egyértelmű, ezért azt meg kell ismételni;
- az elvégzett vizsgálatok eredményei egyértelműek, de mérési korlátaik miatt nem adnak szükséges mélységű információt, ezért további (pl. az anyagterfo-gatot is elemző) vizsgálatok (ultrahangos, radiográfiai) szükségesek.

Amennyiben valamelyik vizsgálati módszer segédanyag felületre vitelét tette szükségessé, akkor a segédanyag maradványait el kell távolítani. A vizsgálati ered-mények dokumentálása a vonatkozó formai és tartalmi követelményeket kielégítő jegyzőkönyvben történik, amit a vizsgálatért felelős személyeknek aláírásukkal hitelesíteniük, majd megfelelő körülmények között archiválniuk kell.

7.2. Roncsolásmentes vizsgálatok

Ahogy arra már utalás történt, ezek alkalmazhatók a vizuális felületvizsgálatok-hoz is. Fő alkalmazási céljuk azonban az anyagoknak, illetve anyagfelületeknek makroszerkezeti folytonosságát (kontinuitását) megszakító folytonossági hiányok felderítése, különös tekintettel a hibákra. Általában azok a folytonossági hiányok tekintendők hibának, amelyek jellemző mérete meghaladja a megengedett határér-téket. Mivel a hibák megtalálása és veszélyességük megítélése a cél, ezért ezeket a vizsgálatokat hibakereső vagy más szóval defektoszkópiai (hibamegjelentő) eljá-rásoknak is nevezik.

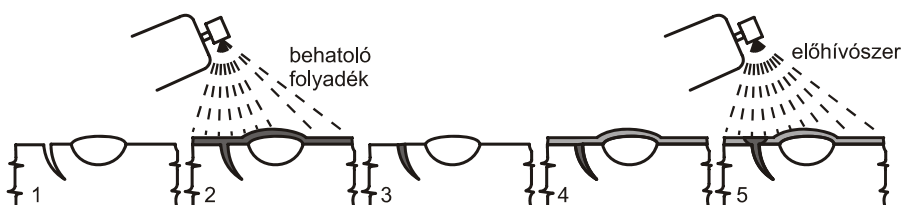
A vizsgálati feladat tehát kettős:

- egyrészt a folytonossági hiány jelenlétének kimutatása, helyzetének (orientá-ciójának), alakjának, gyakoriságának, jellemző méreteinek meghatározása;
- másrészt a kimutatott folytonossági hiány értékelése abból a szempontból, hogy jelenléte és várható hatása az anyag felhasználása, illetve a termék ren-deltetésszerű használata szempontjából megengedhető-e vagy sem, azaz hi-bának minősül-e.

A fontosabb roncsolásmentes vizsgálati eljárások között kiemelt jelentősége van a **7.1. alfejezetben** ismertetett szemrevételezésnek, azaz a vizuális vizsgálat-nak, amely kis eszközigénye és viszonylagos gyorsasága révén széles körben al-kalmazható, illetve alkalmazandó, de megfelelő szakértelem ennél sem nélkülöz-hető. A következőkben ismertetendő további vizsgálatok elsősorban a szemmel nem vagy nem jól (nem megbízhatóan) észlelhető folytonossági hiányok kimutatá-sát célozzák. Ezekben a módszerekben közös, hogy a megfigyelt és értékelt

jel(zés) külső forrásból származik, azaz a felhasznált eszközök állítják elő, általában a vizsgálandó anyag, illetve gyártmány statikus, rendszerint még terheletlen (nem üzembe helyezett) állapotában.

Folyadékbehatolási vizsgálatnál (7.3. ábra) az alaposan megtisztított (1), 50 °C-nál nem melegebb, száraz és nem nedvszívó anyagfelületre felvitt élénk színű vagy UV fényben fluoreszkáló, higfolyós (penetráló, behatoló) jelzőfolyadék kapilláris hatás révén a felületre nyíló repedésekbe, üregekbe beszívódik (2). Néhány perc várakozási idő elteltével, a felületen feleslegben maradt (folytonossági hiányokba nem beszívódott) jelzőfolyadék eltávolítása (3) után nagy nedvszívóképességű (higroszkópos) és kontrasztot adó „előhívót” visznek egyenletesen vékony rétegben a felületre (4). Ez az előhívó a korábban beszívódott jelzőfolyadékot a felületre nyíló folytonossági hiányokból kiszívja, ezáltal azok megfelelő erősségű és egyenletes megvilágításban, a szélesebb folyadéknyom révén már jól láthatóvá válnak (5).



7.3. ábra

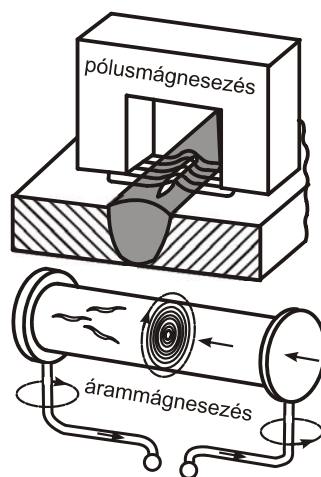
Hibakimutatás folyadékbehatolási vizsgálattal

Mágnesezhető-poros vizsgálat (7.4. ábra) során a vizsgálandó ferromágneses (pl. vas-, kobalt- vagy nikkelalapú) anyagot vagy annak egy részét két elektróda (pólus) között telítettségig (túltelítésként) felmágnesezik, miközben finomszemcsés mágnesezhető porral vagy annak hordozófolyadékkal képezett szuszpenziójával a felületet bevonják. A felületi, illetve a felület alatti folytonossági hiányokat kitöltő levegő, gáz vagy szilárd zárvány mágnesezhetősége sokkal (kb. ezerszer) rosszabb a vizsgált anyagéhoz képest, ezért az addig közel párhuzamos mágneses erővonalak ezeken a helyeken (nagy mágneses ellenállásuk miatt) nem tudnak átjutni, hanem megkerülve azokat ún. szórt fluxust hoznak létre. E szórt mágneses mező helyén a mágnesezhető por rendeződése, illetve helyi sűrűsödése jön létre, és ezáltal a folytonossági hiányok (elsősorban a repedések) helye láthatóvá válik.

A repedések kimutathatósága akkor a legjobb, ha síkjuk (közel) merőleges az erővonalakra, ezért a vizsgálatot több, de legalább két egymásra merőleges irányban vagy kétféle eljárással – egymáshoz képest merőleges erővonalakat produkáló pólus-, illetve árammágnesezéssel – célszerű elvégezni. Ha a vizsgálat folytán az anyagban keletkezett remanens (visszamaradó) mágnesesség nem engedhető meg, gondoskodni kell a demagnetizálásról. Hamis indikációt (hibajelzést) adhat felületi karc, durva érdesség, sőt diamágneses keményforrasztás is a ferromágneses darabok kötésében. A hibajelek regisztrálhatók leírással, vázlattal, fényképfelvétel-

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

lel, átlátszó tapadófóliával vagy lakkal, videofelvétellel stb. Nem mágnesezhető bevonat rétegvastagság-mérése is megoldható mágneses indukciós módszerrel.

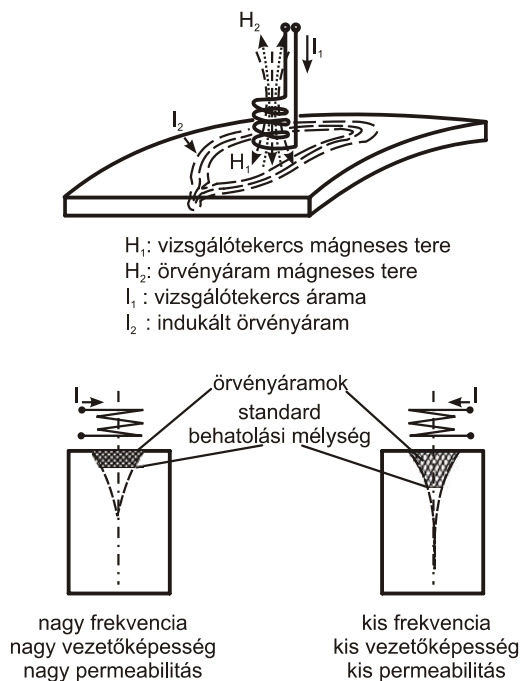


7.4. ábra

Mágnesezhető-poros vizsgálatok

Örvényáramos vizsgálatnál (7.5. ábra) az elektromosan vezető anyag felett egy nagyfrekvenciájú váltóárammal táplált tekercset (szondát) vezetnek végig állandó távolságban. A tekercs a munkadarab felületére merőleges irányú primer mágneses tere (H_1) hoz létre, ami az anyagban ún. örvényáramokat (I_2) indukál, melyek saját mágneses tere (H_2) visszahat a tekercs áramára (I_1), mint egy transzformátor szekunder árama a primerre. Minél nagyobb a keletkező örvényáram, illetve annak primerrel ellentétes mágneses tere, annál nagyobb az indukáló tekercs áramfelvétele. Ha a tekercs folytonossági hiány (repedés) fölé ér, nem tud kialakulni nagy örvényáram, így a vizsgáló tekercsben sem folyik erős áram. A tekercshez kapcsolt műszer ezt a változást érzékelve mutatójának kitérésével (továbbá a készülékbe épített hang- és/vagy fényforrás [pl. LED] jelzésével is) mutatja a felületi vagy felület alatti folytonossági hiány helyét.

Az örvényáram, illetve az általa létrehozott mágneses tér nemcsak folytonossági hiányokra, hanem összetételi, anyagszerkezeti, hőkezelési, keménységi stb. változásokra is reagál, azaz még festékbevonat alatt is kimutatja az ilyen jellegű különbségeket. Azt, hogy az örvényáramok milyen felülettől mért mélységig képesek folytonossági hiányokat, illetve anyagbeli eltéréseket kimutatni, a vizsgált anyag elektromos és mágneses tulajdonságai (vezetőképesség, permeabilitás), illetve a vizsgálati frekvencia határozzák meg. Lehetőség van továbbá elektromosan szigetelő bevonat vastagságának, illetve egyenletességének mérésére is, ha azt elektromosan vezető anyagon hozták létre.



7.5. ábra
Örvényáramos vizsgálat elve és eszköze

7.3. Fénymikroszkópi vizsgálatok

E vizsgálatok jellemzője, hogy az anyagfelületeket, illetve az adott anyagból készült próbatest maratlan (mikrorepedések, zárványok megfigyeléséhez) vagy maratott (fázisok, szemcsehatárok, réteghatárok megfigyeléséhez) csiszolatát (polírozott, megfelelő kémiai szerrel kezelt síkmetszetét) nagyobb nagyításban, optikai eszköz segítségével vizsgáljuk.

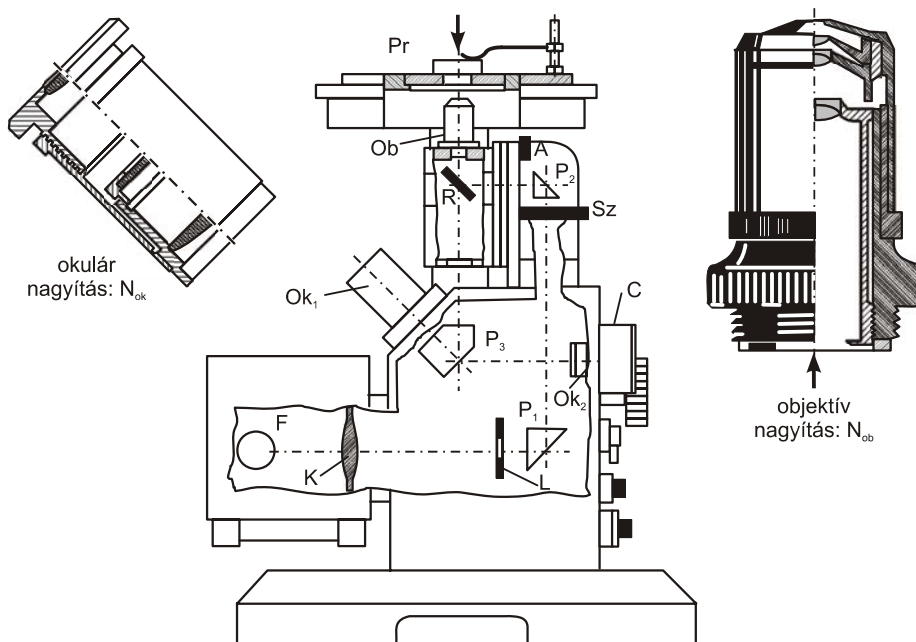
Minőségi (kvalitatív) vizsgálatokkal a fázisok, szövetelemek jelenlétének vagy hiányának, jellegének, alakjának, eloszlásának, orientációjának megfigyelése a cél. Mennyiségi (kvantitatív) vizsgálatok során valamilyen mérőszámot határoznak meg az egyes fázisok, illetve szövetelemek kiterjedésére, arányára vonatkozóan.

Gyakran alkalmazott módszer a képösszehasonlító eljárás, azaz általában százszoros nagyítású mikroszkópi képet összehasonlítanak előkészítve rendelkezésre álló (pl. szabványos) etalonkép-sorozattal vagy jellegzetes mikroszerkezeti képeket tartalmazó fotósorozattal. Ezek alapján megbecsülhető, hogy a mikroszkópi látvány a képsorozat melyik tagjához hasonlít legjobban, és az ahhoz tartozó kvalitatív és/vagy kvantitatív adatokkal jellemezhető a kérdéses mikroszerkezet.

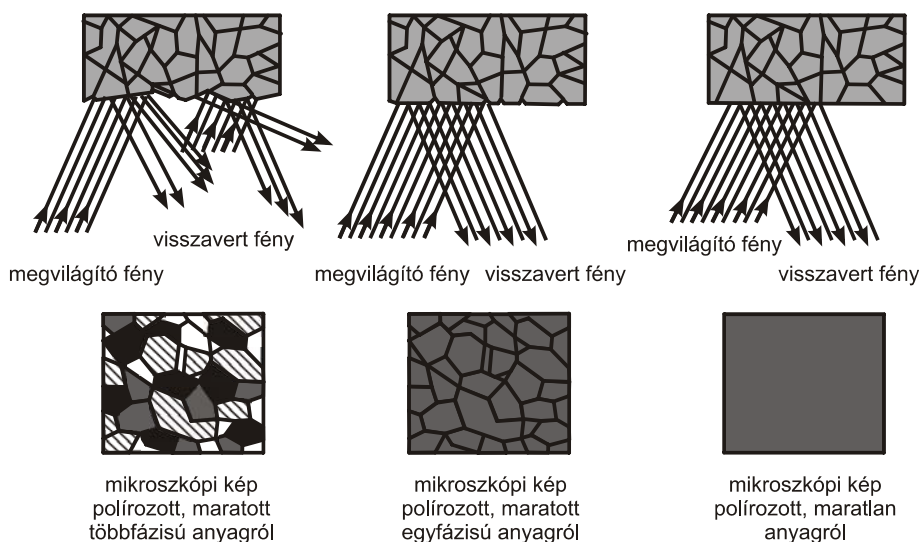
7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A mikroszkópi vizsgálatokhoz tehát a vizsgálandó anyagból mintát kell kimunkálni és azt megfelelően elő kell készíteni, ami pl. üzemelő szerkezetek alkatrészei állapotának nyomon követésekor nem járható út. Az ún. replikavizsgálattal roncsolásmentesen lehet tanulmányozni nem megbontható alkatrészek anyagait. Az anyagfelületről – a helyszínen elvégzett finompolírozás, és maratás után – pl. egy képlékeny műanyag fólia segítségével lenyomatokat vesznek és a továbbiakban ezeket vizsgálják optikai fénymikroszkóppal és/vagy pásztázó elektronmikroszkóppal. A replikaminta – jellegénél fogva – a valós „domborzati viszonyok” fordítottját mutatja, így pl. a szemcsehatár menti üregek a minta síkjából „kifelé állnak”.

Legelterjedtebb vizsgálóeszköz a fémek (és más átvilágíthatatlan anyagok) mikroszerkezetének tanulmányozására kifejlesztett fémmikroszkóp, melynek elterjedt változatát az **7.6/a. ábra** vázlata mutatja. A pontszerű fényforrás (F) által kibocsátott széttartó fénysugarak a kondenzátorlencsé(ke)n (K) párhuzamosodnak, illetve összetartóvá válnak, majd a látótér-fényrekeszen (L) keresztül egy prizma (P_1) jutnak, amely 90° -os eltérítés után az esetlegesen alkalmazható színszűrőkön (Sz) át újabb 90° -ban eltérítő prizma (P_2) vetíti azokat. Ezután a fénysugarak áthaladnak az apertúra-fényrekeszen (A) és a részben tükröző, részben áteresztő illuminátor (R) közvetítésével (azon eltérülve) az objektíven (Ob) keresztül a próbatest (Pr) csiszolatát megvilágítják.



7.6/a. ábra
Fémmikroszkóp felépítése és képalkotása

**7.6/b. ábra**

Fém-mikroszkóp felépítése és képalkotása

A csiszolatról a cserélhető objektívbe (Ob) visszaverődő képalkotó sugaraknak (7.6/b. ábra) az illuminátoron (R) áthaladó része újabb eltérítő (penta)prizmán (P_3) át a cserélhető okulárba (Ok_1), illetve a vizsgáló személy szemlencséjébe jut. Lehetőség van fényképfelvétel készítésére is a P_3 prizma megfelelő helyzetbe való forgatásával. Ilyen módon az illuminátor felől érkező képalkotó fénysugarak a fotó-okuláron (Ok_2) keresztül a C jelű toldathoz csatlakoztatható fényképezőgépbe jutnak. A látótérfényrekesz (L) szűkítésével elérhető, hogy a csiszolatnak csak a mikroszkóp látóterébe „férő” része kapjon megvilágítást, és így a képminőséget rontó külső reflexiók jelentősen csökkenthetők.

Az apertúra-fényrekesz (A) az optikai tengellyel nagyobb szöget bezáró, lencsehibák érvényesülését elősegítő fénysugarakat szűri ki, befolyásolva az objektív felbontóképességét (d) is, ami az alábbi formulával számítható:

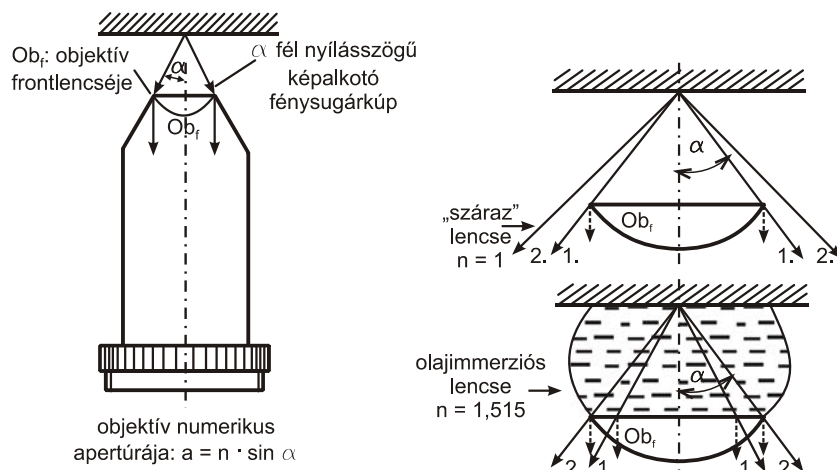
$$d = \frac{\lambda}{a} = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}, \quad (7.1)$$

ahol:

- λ a tárgyat megvilágító fény színét meghatározó – színszűrővel változtatható – hullámhossz;
- a az objektív numerikus apertúrája (fénygyűjtő képessége);
- n az objektív frontlencséje (a próbatesthez legközelebbi optikai eleme: Ob_1) és a próbatest közötti közeg törésmutatója (levegő: $n = 1$; víz: $n = 1,333$; cédrusolaj: $n = 1,515$, monobróm-naftalin: $1,658$);

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

- α a csiszolat optikai tengelyen lévő pontjából az objektív frontlencséjébe (Ob_f) még belépő (marginális) és a képalkotásban részt vevő fénysugárkúp – apertúra-fényrekesssel befolyásolható – fél nyílásszöge (7.7. ábra).



7.7. ábra

Mikroszkópi objektív felbontóképességének értelmezése

A felbontóképesség az objektív jellemzője, az okulár az objektív alkotta képet csak nagyítja, újabb részletek feltárása és a felbontóképesség befolyásolása nélkül. A mikroszerkezet vizsgálatára általánosan alkalmazott fénymikroszkópoknál az elvileg elérhető legjobb felbontóképesség a látható fény hullámhossztartománya legkisebb, képalkotásra még felhasználható értékének – a kékesibolya fény hullámhosszána – fele, azaz kb. 220 nm ($= 0,22 \mu\text{m} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$).

A mikroszkóp összes nagyítása (N_0) az objektív és az okulár saját nagyításának szorzata:

$$N_0 = N_{ob} \cdot N_{ok} . \quad (7.2)$$

Az okulár nagyítását csak addig érdemes növelni, amíg a kép jól értékelhetővé válik, azaz a további – életlenedéssel járó – üres nagyítást el kell kerülni. A mikroszkóp hasznos (újabb részleteket feltáró) nagyítását (kb. max. 1500–2000) az objektív felbontóképességének javításával célszerű növelni. A hasznos nagyítás ajánlott tartománya az objektív „a” numerikus apertúrájával kifejezve:

$$N_{üres} > N_{hasznos} = (500-1000) \cdot a \geq N_0 . \quad (7.3)$$

Az okulár is, de főként az objektív nem egyetlen lencséből, hanem több, megfelelően összeépített lencsetagból áll, az egyes lencsék hibáinak (szferikus és kromatikus aberráció, képmezőhajlás, képtorzítás) korrigálása céljából. A szferikus

aberráció esetén a lencse szélén haladó fénysugarak más fókuszban egyesülnek, mint a középvonalához közelebbiek, míg kromatikus aberrációnál a különböző színű fénysugarak egyesülnek más-más fókuszban. A képmezőhajlásnál az optikai tengelyre merőleges felület nem mint sík, hanem mint görbe felület képeződik le, így a teljes kép nem lesz egyszerre éles.

7.4. Elektronmikroszkópi vizsgálatok

Az elektronmikroszkóp a látható fénynél lényegesen rövidebb hullámhosszúságú, mágneses vagy elektrosztatikus elven irányítható, formálható, $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg tömegű, $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C töltésű elektronokból álló sugárral alkot képet, melynek hullámhossza:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{m_e \cdot e}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{gy}}} = \sqrt{\frac{1,5}{U_{gy}}} \text{ [nm]}, \quad (7.4)$$

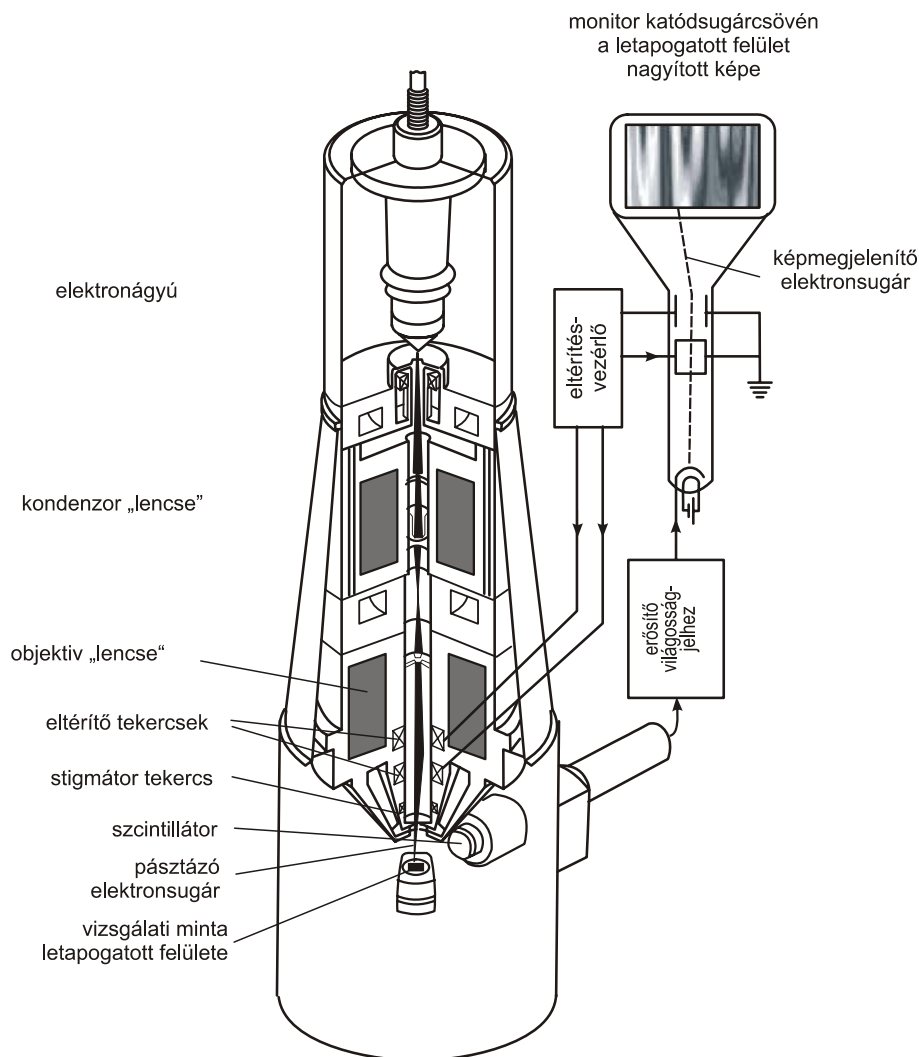
ha az elektronokat a vizsgálandó felületre gyorsító feszültséget (U_{gy}) [V]-ban vesszük számításba ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ [Js] a Planck-féle állandó). Ilyen módon a szokásos 40–100 kV közötti gyorsítófeszültségekkel 0,006–0,004 nm hullámhossz adódik, de a mágneses vagy elektrosztatikus „lencséknek” csekély a numerikus apertúrájuk ($a \approx 0,02$), ezért a felbontóképesség a vártnál rosszabb ($d \approx 0,2$ – $0,3$ nm), de még így is kb. 1000-szer jobb a fénymikroszkópénál.

Elterjedt és szilárd fizikai anyagok vizsgálatára széles körűen alkalmazható a pásztázó elektronmikroszkóp (SEM = scanning electron microscope), melynek felépítését a **7.8. ábra** szemlélteti. A sugárforrás egy elektronágyú, amelynek vákuumterében a fűtött izzó volfrám (vagy lantán-hexaborid) katódból kilépő elektronok az 5–50 kV gyorsítófeszültség hatására az anód, illetve azon keresztül az anyagminta felé gyorsulnak. Az így előállított elektronsugár-nyalábot a két elektromágneses „lencse” annyira összehúzza (fókuszolja), hogy a ferdén (30 – 60° -os szögben) elhelyezett mintán csak egy kb. $2,5$ – 10 nm kiterjedésű „foltot világít” meg. A stigmátor nevű tekercs korrigálja az elektronoptikai lencsék képhibáit.

A pici sugárfolttal – a második lencsében elhelyezett eltérítőtekercsek révén – soronként és pontonként végig lehet pásztázni a minta felületét. A beeső elektronok hatására a minta éppen „megvilágított” pontjáról többek között visszavert és szekunder (a mintából származó) elektronok, valamint röntgensugarak lépnek ki. A kilépő szekunder elektronokat mintegy 10 kV-os feszültség egy érzékelőre, a szcintillátorra vonzza, amelyen minden beeső elektron apró felvillanást okoz. Ezeket a fényjeleket száloptikás fényvezető továbbítja a sokszorozó fotocellára (fotomultiplierre). A felerősített jelek egy monitor katódsugárcsővére kerülnek, amelynek képmegjelenítő elektronsugara az anyagfelületet vizsgáló elektronsugárral szinkronban pásztáz (térül el), s így kialakul a képernyőn a letapogatott minta képe, hiszen a beeső elektronok hatására az anyagminta különböző pontjai külön-

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

bőző mennyiségű szekunder elektront bocsátanak ki, így a monitoron különböző világosságjelet eredményeznek. Elektromosságot nem vezető mintákat vizsgálat előtt vékony vezető réteggel kell bevonni (pl. katódporlasztásos aranyozással vagy karbongőzőléssel).



7.8. ábra

Pásztázó elektronmikroszkóp felépítése és képalkotása

A kép kontrasztossága, fényereje, élessége és a kívánt nagyítás elektronikusan szabályozható. Az elérhető mélységélesség nagyon jó, kisebb nagyításoknál akár

Az összetétel fejezi ki, hogy az anyag a periódusos rendszer (7.9. ábra) mely elemeit tartalmazza, illetve milyen vegyületekből áll, és ezek az elemek, illetve vegyületek milyen koncentrációban vannak jelen. Az előbbi minőségi mutató, ez utóbbi pedig mennyiségi információ. Meghatározásukhoz minőségi (kvalitatív) és mennyiségi (kvantitatív) analízisre van szükség, mely kémiai, illetve fizikai elveken alapuló vizsgálatokat jelent.

7.9. ábra
A kémiai elemek periódusos rendszere

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A mennyiségi adatok az anyagösszetevők tömeghányadát jelölik, így rendszert tömegtörtként vagy tömeg- (vagy súly-) százalékban ($1\% = 10^{-2}$), illetve ezrelékben ($1\text{‰} = 10^{-3}$), esetenként atomszázalékban határozhatók meg. A nagyon kis mennyiségek, koncentrációk kifejezésére a „part” = rész és a „per” szavak, valamint a szám nevéből származó kifejezést is alkalmazzák: ppm (parts per million = 10^{-6}), azaz milliomodrész, vagyis $100\%/10^6 = 0,0001\%$. Felületkezelésnél fontos lehet az anyag valamely jellemző irány (pl. felülettől befelé) menti összetétel-változásának ismerete is; az ehhez tartozó vizsgálattechnológiát a számítógépek és mikroszondák, illetve nagy teljesítményű méréskiértékelő módszerek alkalmazása jellemzi.

Az összetétel, illetve annak meghatározása szempontjából különbséget lehet tenni a szerves anyagok (bioanyagok, műanyagok) és a szervetlen anyagok (fémek, kerámiák) között, ugyanis az előbbieket zömmel kisebb rendszámú, míg az utóbbiak inkább a nagyobb rendszámú elemekből épülnek fel. Ez az alkalmazható vizsgálattechnika kimutatási képességével, mérési érzékenységevel is összefügg, mivel egyes módszerek a kisebb rendszámú elemek tartományában nem vagy csak pontatlanul adnak információt. Ismeretlen anyag esetében a kémiai összetétel elemzése anyagazonosításra, anyagcsoportba sorolásra is szolgál.

Szerves szerkezeti anyagok esetében azonosításra elsősorban infravörös fény abszorpcióján (előzetesen molekulák fényterjesztésén) alapuló spektrometriát alkalmaznak. A molekulafajtákra vonatkozóan a legtöbb információt az alkotó atomok tömegét pontosan meghatározó tömegspektrométerrel lehet szerezni. Polimer molekulák nagysága és molekulatömeg-eloszlása a szétválasztó kromatográfia segítségével határozható meg. A kis mennyiségben jelen lévő alkotórészeket (pl. a műanyagok különböző adalékait) az alapanyagból eltávolítják, majd azokat elválasztják egymástól, és mennyiségüket a fajlagos fluoreszcencia, a törésmutató vagy a fényabszorpció segítségével határozzák meg. A mágneses magrezonancia (NMR) vizsgálatok a kémiai összetétel meghatározása mellett alkalmasak a polimer molekulák finomszerkezetének (pl. elágazások, kopolimerek alkotó egységei, egymáshoz viszonyított elhelyezkedése) minőségi és mennyiségi analízisére.

Szervetlen szerkezeti anyagok analízisének klasszikus módszere a nedves-kémiai elemzés, melynek során vegyszerekkel (pl. erős savakkal) reagáltatják az anyagmintát, minek során színreakció, csapadékképződés vagy gázfejlődés következik be. A mérni kívánt ötvözőkhöz, illetve szennyezőkhöz igazodva kiválasztott marató anyag az összetevő elemeket sóoldattá alakítja, melyhez más oldott sókat vagy nátronlúgot kevernek. Az egy- vagy kétlépéses átalakulás oldhatatlan csapadékot képez, mely egyértelműen utal a kiindulási anyagokra. A tömeganalízishez a csapadékot leszűrik, megszárítják és mérik.

A szilárd anyagok fény-, illetve röntgensugárzással (elektromágneses sugárzással), elektronokkal, illetve ionokkal (részecskesugárzással) való vizsgálata megadja annak lehetőségét, hogy e primer sugárnyalábok segítségével az atomi tartományokban is információkat nyerjünk az anyagokról. Az ehhez szükséges magas színvonalú vizsgálati technika lényegében az elektronika és a vákuumtechnika nagyarányú fejlődésének köszönhető.

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A vizsgálati eljárások általában a gerjesztő sugárzás és a vizsgálandó anyagminta közötti kölcsönhatáson alapulnak, amely lehet rugalmas vagy rugalmatlan. Rugalmas kölcsönhatás esetén elsősorban a beeső sugárzás iránya változik meg (szóródás, elhajlás), ezen alapulnak a mikroszkópi és a diffrakciós vizsgálatok. A rugalmatlan (kvantummechanikai alapon értelmezhető) kölcsönhatások az esetek többségében – megfelelő gerjesztési folyamat révén – a vizsgálati anyagminta atomjainak elektronhéjaiból származó részecske-, illetve elektromágneses sugárzáshoz (emisszióhoz) vezetnek.

Az emittált (kibocsátott) sugárzás hullámhossz- és/vagy energiaeioszlásának, valamint a gerjesztő sugárzás által elszenvedett energiaveszteségnek a mérése is szolgáltat információkat. Azt, hogy a röntgensugárzás, illetve az elektronok vagy az ionok segítségével milyen jellegű információkat kaphatunk a vizsgált anyagról, lényegében a primer sugárzás és a besugárzott szilárd anyag közötti kölcsönhatás intenzitása és behatolási mélysége adja meg. Az intenzitás a röntgensugárzástól az elektronsugárzáson keresztül az ionsugárzás felé növekszik, viszont a behatolási mélység ellentétesen változik, azaz röntgensugárzással „térfogati”, az ionokkal „felületi” vizsgálatok végezhetőek. A vizsgálatok által érintett anyagtartomány nagyságát a primer sugárnyaláb fókuszolásának lehetősége szabja meg. Az elérhető sugárnyaláb-átmérő elektronok esetén néhány tízed nm, ionok esetén 1 μm -es, röntgen esetén 10 μm -es nagyságrendű.

A keletkező szekunder sugárzás spektrális, vagyis hullámhossz szerinti szétválasztása az anyagban lévő atom- vagy ionfajtákról tájékoztat, míg az egy elemfajtából emittált, ún. karakterisztikus sugárzás intenzitásának méréséből ennek az elemnek az anyagbeli tömeghányadára következtetünk.

A spektroszkópia fényforrások (pl. lánggal vagy szikrakisüléssel elgőzöltögtetett anyag) színeképének elemzésén (7.10. ábra) alapuló optikai módszer, az anyagalkotó elemek azonosítására, illetve az anyagösszetétel-meghatározására, elektromágneses vagy részecskesugárzással való kölcsönhatás révén.

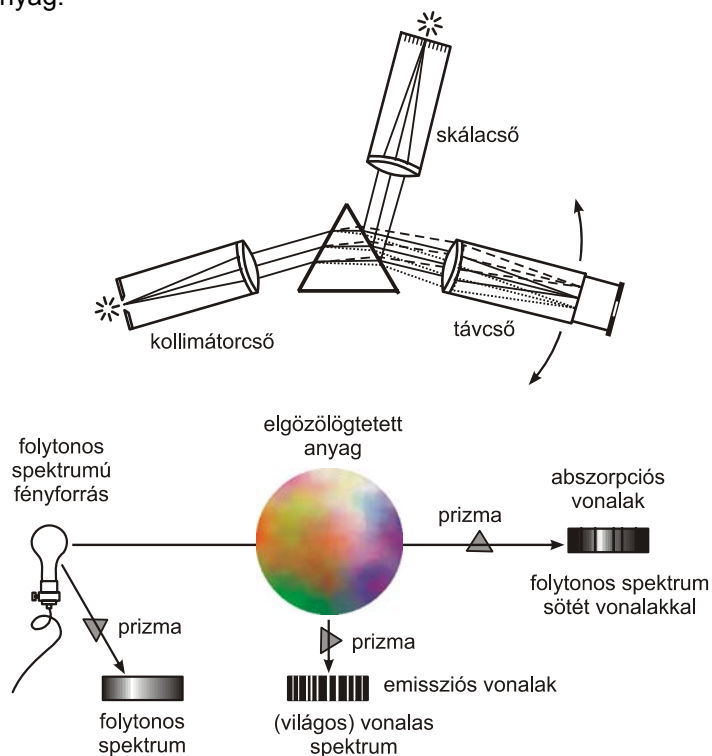
Tehát a fizikai színeképelemző módszerek elve az, hogy nagy hőmérsékletű gázoknak, gőzöknek nem folyamatos, hanem összetételükre jellemző, vonalas színeképük van, azaz minden gerjesztett elem a rá jellemző hullámhosszakon sugároz, mégpedig jelenlétének arányától függő intenzitással. A színeképelemzés gyakorlata szerint a vizsgált szilárd anyagot (pl. szikrakisüléssel, elektromos ívvel gerjesztve) elgőzöltögtetik, majd a gőz fényét prizmaival színeire bontják, és a színeképben megjelenő vonalak hullámhosszai (eloszlása) alapján minőségi, a sugárzás intenzitása alapján mennyiségi információkat határoznak meg.

A szilárd anyagok tulajdonságainak átfogóbb jellemzése érdekében kombinált eljárások, illetve ezeknek megfelelő berendezések kialakítása célszerű, amit gyakran gazdasági szempontok is indokolnak. Ilyen készülékre legjellemzőbb példa a pásztázó elektronmikroszkóp és az elektronsugaras mikroanalizátor kombinációja.

Vannak esetek, amikor nincs mód (eszközhiány, illetve a vizsgálatok költség- és időigényessége miatt) vagy szükség pontos összetétel-meghatározáson alapuló anyagazonosításra. Ilyenkor szóba jöhetnek olyan egyszerű és gyors eljárások, amelyekkel az „ismeretlen” anyag tulajdonságaira, majd azokból az anyag fajtájára

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

következtethetünk. Sok esetben a szín (fény, csillogás), metszet- vagy töretfelületi kép (makroszerkezeti zárványosság, pórusosság), karcolhatóság (keménység), hajlíthatóság (képlékenység), mágnesezhetőség (ferromágnesesség) vagy vegyi anyagokkal szembeni viselkedés (vegyszerállóság) „árulkodik” arról, hogy mi a kérdéses anyag.



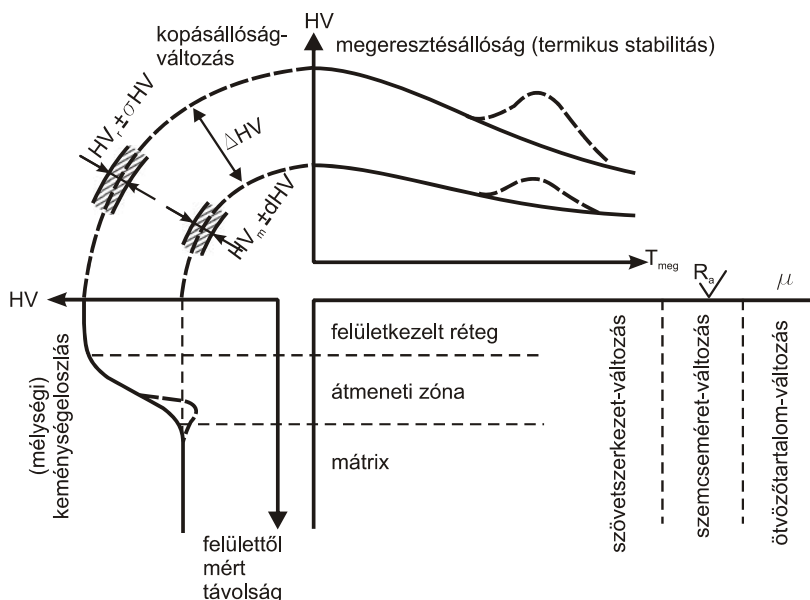
7.10. ábra

A fizikai színeképelemzés elve és információtartalma

Ezen vizsgálódások kiegészíthetők más egyszerű és kis eszközigényű tájékoztató vizsgálatokkal. Például a műanyagok azonosításánál jó szolgálatot tesz a lángban végzett égetési, illetve a kémcsőben végzett hevítési próba, esetleg az oldószeres próba. A fémek – elsősorban az acélok – esetében megfelelő kerületi sebességű köszörűkoronggal végzett szikrapróba is szolgálhat közelítő anyagazonosító módszerként. A forgó köszörűkoronghoz szorított acél szikraképe (a szikrák alakja, mérete, száma, színe) alapján besorolható az acél egy jellemző összetétel-kategóriájába.

7.6. Keménységmérés

Mivel a felületkezelte rétegek relatíve vékonyak, és a hordozó (mátrix-) anyagtól „nem függetlenek”, az előírható és főként az egyszerűen vizsgálható, ellenőrizhető rétegjellemzők köre meglehetősen szűk. A mikro- (és makro-) keménységmérés biztosította adatok megfelelő relációban igen jól jellemzik a réteg és annak közvetlen anyagi környezete használhatóságát, károsodással szembeni ellenállását. Keménységmérésen alapuló rétegminősítési sémát mutat a **7.11. ábra**. Látható, hogy amennyiben mélységirányú keménységeloszlást mérünk, a mintadarabon lehet makro- és mikroszerkezeti (így rétegeometriai) vizsgálatokat is végezni.



7.11. ábra

Felületkezelés keménység alapú rétegminősítési sémája

A gyakorlatban bevált keménységmérő módszerek három jellegzetes csoportba sorolhatók:

- szűrő (statikus) keménységmérés: a vizsgálandó anyagnál jóval keményebb, ún. szűrőszerszámot nyomnak alkalmasan megválasztott terhelőerővel az anyagba, és a létrejövő lenyomat területéből vagy a benyomódás mélységéből származtatják a keménységi értéket;
- ejtő (dinamikus) keménységmérés: a vizsgálandó anyagra ejtett mérőtest visszapattanási magasságából határozható meg a rugalmas ütközés elnyelt energiájával összefüggő keménységi mérőszám;

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

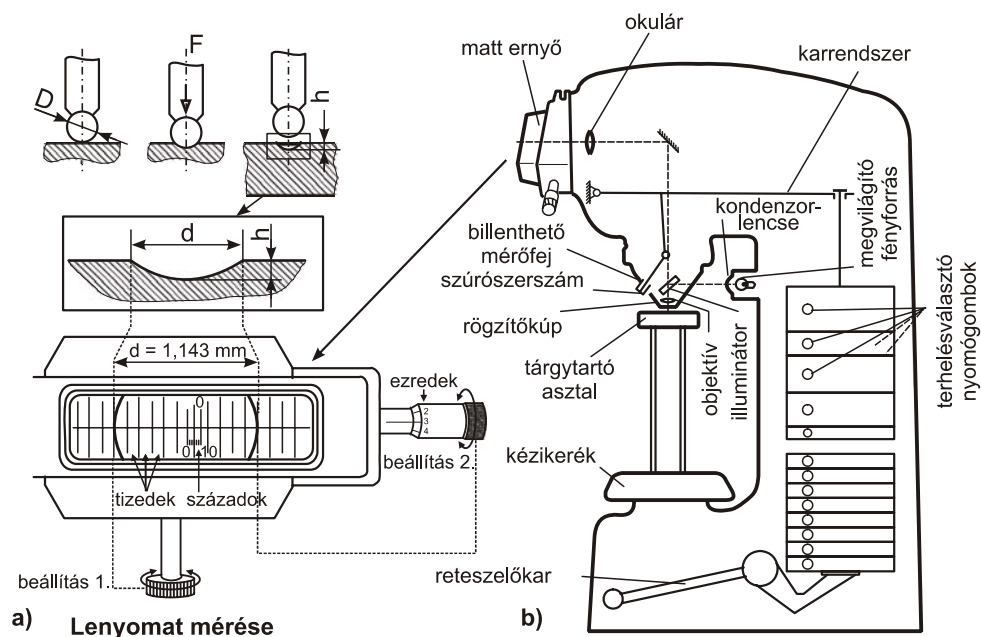
- rezgő keménységmérés: a vizsgálandó anyagra szorított rezgőfej rezgésben tartásához szükséges energia méréséből fejezhető ki az anyag rezgésoscilláló-képességével (rugalmatlanságának mértékével) összefüggő keménységadat.

Legjelentősebbek a szűrő módszerek (Brinell, Vickers, Rockwell), melyek anyyra elterjedtek, hogy az újabb típusú, hordozható, elektronikát is alkalmazó (ezért gyakran más alapelvű) mérőberendezéseket is ezekre skálázzák.

Brinell-módszer esetén egy edzett, polírozott acélgolyót nyomnak meghatározott ideig a vizsgálandó anyagfelületbe, és a keménységet (Hardness) a terhelés és a létrejött gömbsüveg-lenyomat felületének hányadosa adja:

$$HB = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h} = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} \right)} = \frac{2 \cdot F}{D \cdot \pi \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (7.5)$$

ahol F a terhelőerő, D a golyóátmérő, h a benyomódás mélysége, d a lenyomat átmérője (7.12/a. ábra). A 7.12/b. ábra példaként egy hagyományos keménységmérőgépet szemléltet, melynek beépített mikroszkópja a benyomódási mélység helyett a d lenyomatátmérő mérését teszi lehetővé ezred milliméteres pontossággal.



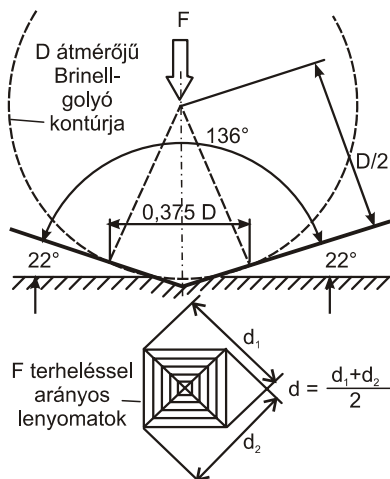
7.12. ábra
Brinell-keménységmérés

7. Felületkezelte rétegek vizsgálata, minősítése

Mivel a terhelés és a lenyomat felülete egymással nem arányos, a szűrőszerszámot és a terhelés nagyságát szabványosítani kellett. A 850 HV-nél nagyobb keménységű golyó a mérendő anyag vastagságától függően 10 (6 mm vastagság felett); 5 (6 és 3 mm között); 2,5, 2 vagy 1 (3 mm alatt) mm átmérőjű lehet. A vizsgálandó anyag várható keménységéhez igazodva a terhelés értéke $1 \cdot D^2$ (pl. ón, ólom esetében), $2,5 \cdot D^2$ (pl. ón-antimon, ólom-antimon ötvözetek, azaz csapágyfémek esetében), $5 \cdot D^2$ (pl. Al- és Cu-ötvözetek esetében), $10 \cdot D^2$ (pl. Cu- és Ni-ötvözetek esetében) vagy $30 \cdot D^2$ (pl. vasötvözetek esetében) lehet, amit kg-ban kell érteni, ha a golyóátmérőt mm-ben helyettesítjük.

A módszer 450 HB-nél kisebb keménységek mérésére alkalmazható a golyó deformálódása (így a mérés pontatlanná válása) nélkül. A terhelés ideje anyagtól függően: 15 s (vasötvözeteknél), 30 s (Cu- és Ni-ötvözeteknél), 120 s (Al- és Zn-ötvözeteknél) vagy akár 180 s (Pb- és Sn-ötvözeteknél). Speciális igényű (pl. meleg állapotban történő) keménységmeghatározás esetén gyorsacél- (500 °C-ig) vagy keménységmólyó (850 °C-ig) használható. Szintén keménységmólyó alkalmazásával a mérési tartomány kiterjeszthető 650 HBW-ig. A hagyományos és köztudatba „berögzült” kp/mm² mértékegységű keménységértékeket a SI bevezetésével nem változtatták meg (nem szorozták meg "g"-vel), hanem azokat mértékegység nélküli számként kell kezelni (pl. HB 350, HBW 550).

Vickers-módszernél a szűrőszerszám 136°-os csúcshozó négyzet alapú gyémántgúla, mellyel a létrehozott lenyomat felülete már arányosnak tekinthető a terhelés nagyságával (7.13. ábra), tehát szabadon megválasztható.



7.13. ábra

Vickers-keménységmérés szűrőszerszám-geometriája

Lehetőség van mikroszkópon egyes fázisok ún. mikrokeménységének mérésére grammos terhelésekkel, vékony rétegek, illetve munkadarabok helyi keménységének meghatározására 1 kg-nál kisebb terhelésekkel, az általában szokásos 10

7. Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

és 30 kg értékű (illetve ezeknél nagyobb) terheléssel végzett normál keménység-mérés mellett. Mivel a gyémánt a legkeményebb ismert anyag, univerzálisan minden anyag keménysége mérhető vele. A keménység definíciója:

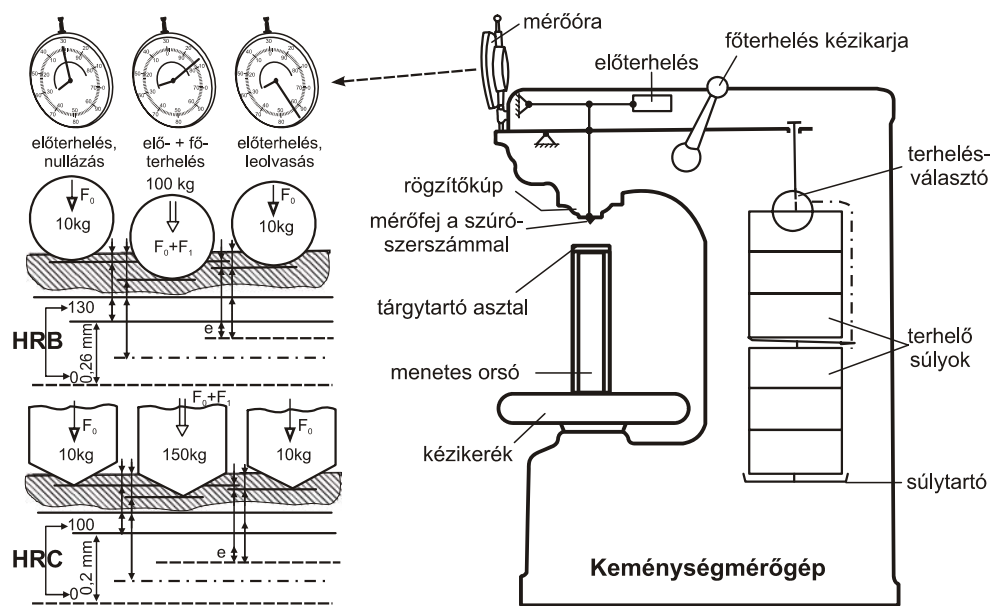
$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sin 68^\circ} \quad (7.6)$$

ahol F a terhelőerő, S a lenyomat felülete, $d = (d_1 + d_2)/2$ pl. a **7.12/b. ábrán** látható gép mikroszkopjával mért lenyomatátlók számtani közepe.

Rockwell-módszernél többféle szűrőszerszám, illetve terhelés alkalmazható, és a keménység a maradó benyomódás mélységéből származtatható:

- HRB keménység 1/16 coll átmérőjű, 850 HV-nál nagyobb keménységű acélgolyóval mérhető 10 kg elő- és 90 kg főterhelés mellett. A 0,002 mm-es (ún. Rockwell-) egységekben mért – főterhelés hatására létrejött – maradó benyomódás (e) alapján a keménység:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0,002} \quad (7.7)$$



7.14. ábra
Rockwell-keménységmérés

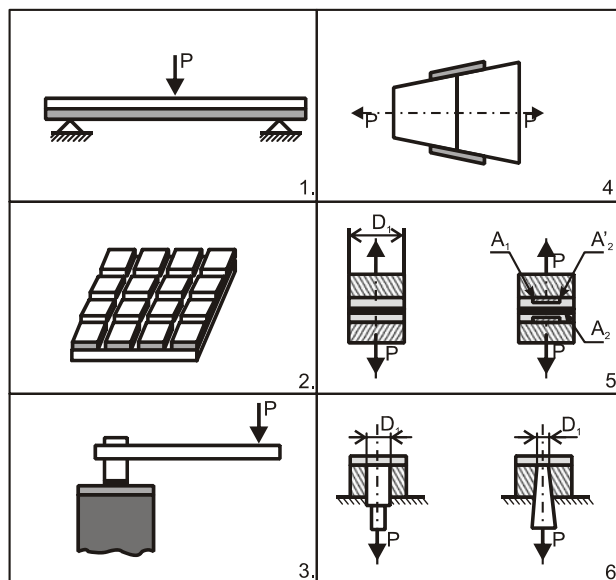
- HRC keménység 120°-os csúcshögű gyémántkúppal mérhető, 10 kg elő- és 140 kg főterhelés mellett. A keménység az előzőhöz hasonló formulával határozható meg:

$$HRC = 100 - \frac{e}{0,002} \quad (7.8)$$

Sem a HRB-, sem a HRC-keménységmérésnél nincs szükség számolásra, a készülékbe épített mérőóraszerű műszer a műveletet „automatikusan” elvégzi (7.14. ábra). A gyors, de kisebb pontosságú HRB-, illetve HRC-módszer a lassúbb (felületelőkészítést, hagyományos gépeken lenyomatmérést is igénylő), de pontosabb HB-, illetve HV-módszer helyettesítésére szolgál, elsősorban gyártásközi (pl. hőkezelést, felületkezelést követő) minősítő vizsgálatoknál.

7.7. Tapadási szilárdság vizsgálata

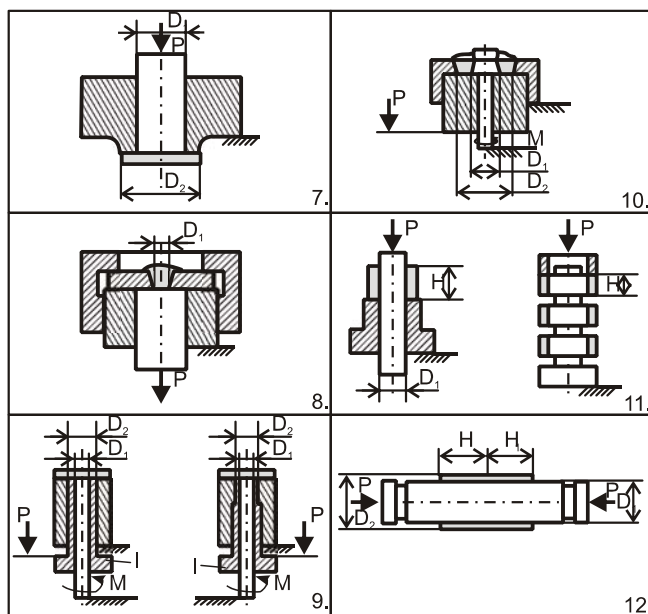
Anyagfelvitellel járó, bevonatokat kialakító felületkezelési eljárások után a kialakított bevonatok alapanyaggal való adhéziós kapcsolatát is lehet értékelni, amelyhez tapadási szilárdság-méréseket célszerű végezni. A tapadási szilárdság vizsgálatának néhány lehetséges elrendezését mutatja a 7.15. ábra, különböző próbatest-kialakításokkal.



7.15. ábra (I.)

Felületi bevonatok tapadási szilárdságának vizsgálata

7. Felületkezelte rétegek vizsgálata, minősítése



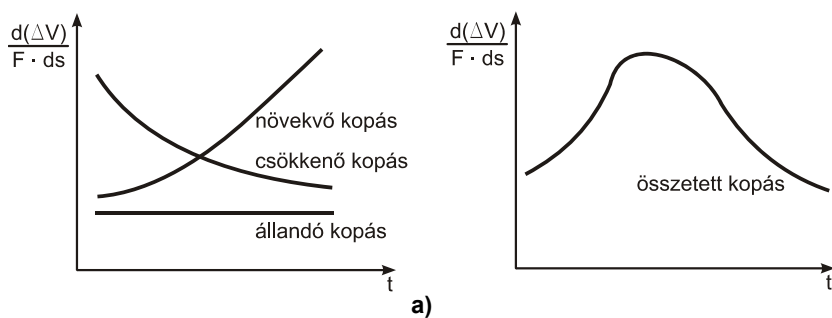
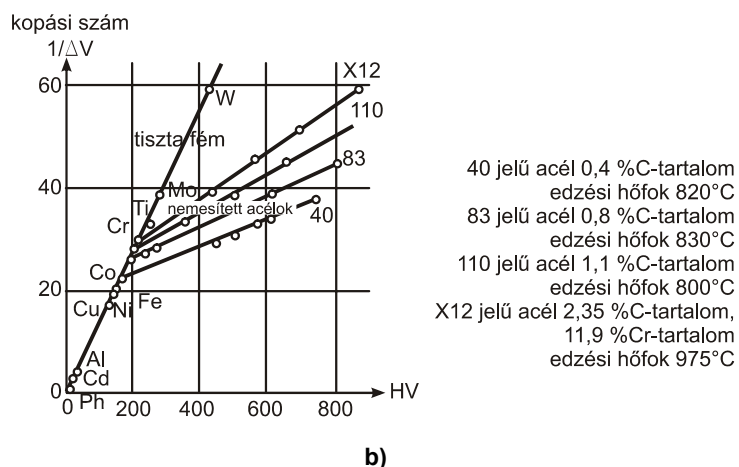
7.15. ábra (II.)

Felületi bevonatok tapadási szilárdságának vizsgálata

7.8. Kopásállósági vizsgálatok

Az anyagfelületek kopásállósága az ún. Archard-féle kopásállandóval ($K_A = \Delta V / [A \cdot s \cdot p]$) is jellemezhető, ahol ΔV a térfogatveszteség „A” felületen, „s” csúszási úton, „p” felületi nyomás hatására. Beszélhetünk degresszív (csökkenő) kopásról, ha az idő (út) függvényében a kopadék fajlagos mennyisége csökken (ez jellemző a „bejáratásra”); lineáris (állandó) kopásról; progresszív (növekvő) kopásról, ha a kopadék mennyisége intenzíven növekszik (ami általában „berágódáshoz” vezet), és összetett kopásról (7.16/a. ábra). Normálisnak akkor tekinthető a helyzet, ha kezdetben degresszív vagy lineáris jellegű a kopás, mely tartósan lineáris-ként folytatódik. A túlzott progresszív kopást el kell kerülni, hiszen azt még továbbfokozhatja a már lekopott anyagrészek roncsoló hatása is.

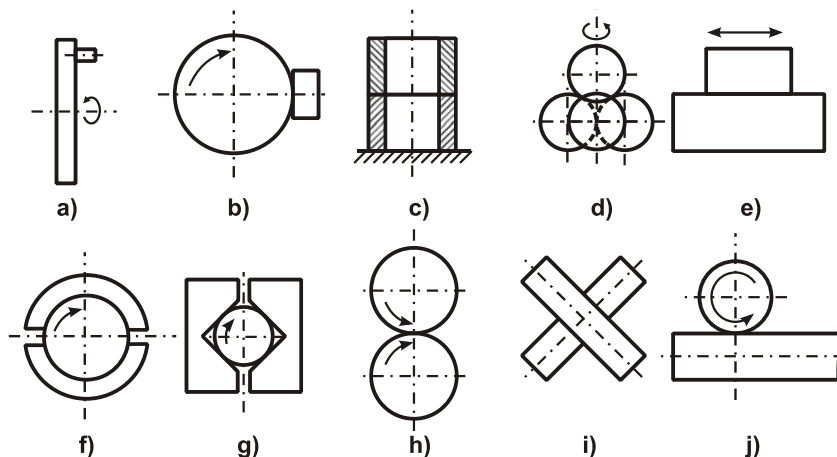
Ha az anyagok kopásállóságát kívánjuk összehasonlítani, akkor ezt megtehetjük az egyszerűen kivitelezhető keménységmérésből származó adatokkal is. Ez elsősorban szerszámok anyagainál szokásos eljárás. Ha a kopási folyamat időbeni lefolyásának ismerete is fontossá válik, akkor a koptatóvizsgálatokból származtatható térfogatveszteségi mérőszám (ΔV [mm³]) vagy ennek reciproka a kopási szám (kopási szilárdság) ezt jól jellemzi. Egyébként ez utóbbi és a keménység függvénykapcsolata lineárisnak tekinthető (7.16/b. ábra).



7.16. ábra
Kopási folyamat jellemzői

Koptatóvizsgálatokat (7.17. ábra) változatos geometriájú súrlódó elempárokkal, koptatógépen végeznek adott csúszási sebesség (v) és fajlagos felületi terhelés (p) mellett, meghatározott csúszási út (s) viszonylatában. A valós helyzetet modellezve választható meg a közbenső anyag fajtája és mérete. Bizonyos csúszási útszakaszok (pl. $s = 3, 6, 10, 15$ és 20 ezer méter) után méret-, érdesség-, térfogat-, tömeg-, illetve hőmérsékletmérést lehet beiktatni. Ezen mérések adatai – különböző súrlódó elempárokkal, illetve közbenső anyagokkal elvégzett vizsgálatok után – elsősorban összehasonlításra alkalmasak, melyek alapján kiválasztható a legkisebb kopást eredményező beállítás.

7. Felületkezelte rétegek vizsgálata, minősítése



- a) tárcsa–rúd; b) tárcsa–hasáb; c) két körgyűrű; d) négy golyó; e) hasáb–hasáb;
f) henger–persely; g) henger–prizma; h) két tárcsa; i) keresztezett hasábok;
j) keresztezett hengerek mint súrlódó elemek alkalmazásával

7.17. ábra

Koptatóvizsgálatok elvi lehetőségei

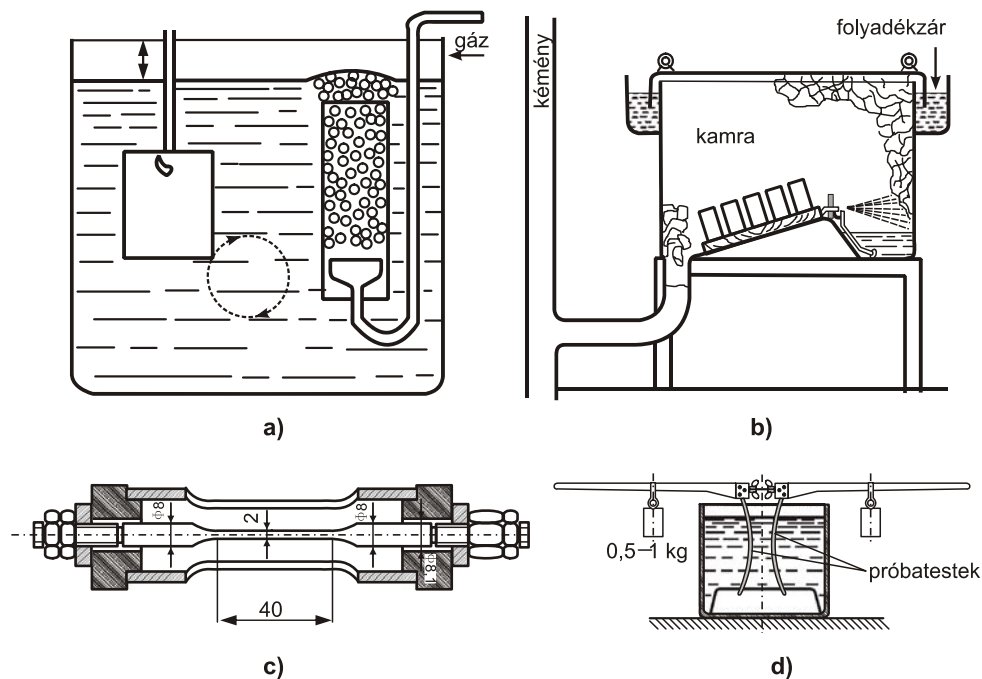
7.9. Korrózióállósági vizsgálatok

A korrózió intenzitása, illetve sebessége a kopáshoz hasonlóan állandósult, növekvő vagy csökkenő lehet, amit befolyásol a koncentráció, a hőmérséklet, a nyomás, a statikus vagy változó mechanikai és hőfeszültség, az elektromos áram („kóboráram”), tribológiai hatás stb. is. Léggöri (atmoszferikus) vizsgálat során az anyaglemezeket és az összehasonlítás céljából különféle védőbevonattal ellátott lemezeket állványra helyezik, déli irányba forgatva, 45°-ban megdöntve. E hosszú idejű vizsgálat során a korrózióállóság megítélésére kezdetben sűrűbb, később ritkuló értékeléseket végeznek, ami kiterjed a lemezek felületének elszíneződésére, rozsdásodásának jellegére, a korróziós termékek fajtájára, az esetleg keletkező bemaródások mélységére, továbbá mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonság-változásokra.

Folyadékban végzett vizsgálat (7.18/a. ábra) során – a próbatesteket folyamatosan mozgatva – a folyadék hőmérsékletét, koncentrációját és a relatív mozgás sebességét állandó értéken kell tartani. Mivel a folyadék gáztartalma erősen befolyásolja a korróziót, azt megfelelő módon szabályozni kell. Sópermet-vizsgálat (7.18/b. ábra) során a légmentesen lezárt kamrába beállított próbalemezek a bepermetezett oldat páráinak korróziós hatása alatt állnak. Ezen gyorsított vizsgálatok értékelésére a próbalemezek tömegváltozása (m^2 -enként és óránként) vagy méretváltozása (évenkénti vastagságcsökkenése) szolgál. Bemártó vizsgálatnál a

próbatest egy része merül folyadékba, ugyanis a folyadék felszínén a korrózió hatékonyabb, mint a belsejében. Értékelésnél külön minősíthető az állandóan folyadék alatt, felváltva folyadékban és levegőn és az állandóan levegőn lévő próbatest-rész.

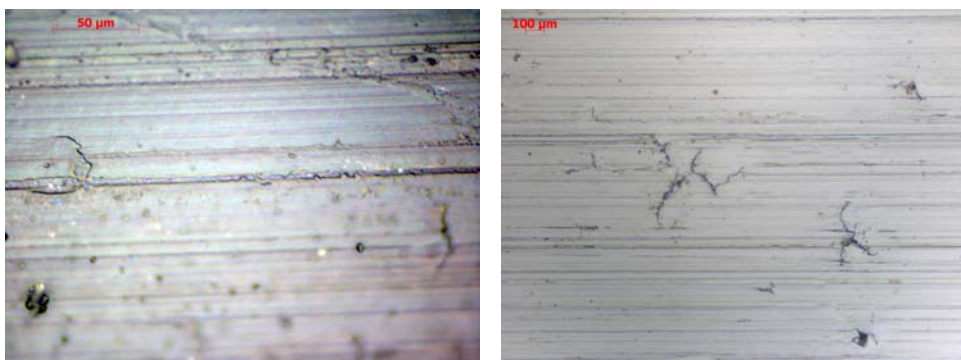
A szemcsehatár menti (interkristallin) korrózióra való hajlam vizsgálatához a próbatesteket olyan oldatban (pl. kénsav + réz-szulfát) főzik, ami azok anyagában a korróziót rövid idő alatt (10–72 óra) előidézi. Az értékelés mikroszkópi és szakítóvizsgálatokkal történik. Feszültségkorróziós érzékenység vizsgálatakor különböző mértékig előfeszített próbatesteket (7.18/c. ábra) korrodáltatnak (7.18/d. ábra). Gyorsabb a vizsgálat, ha a próbatesteket erős hatású oldatban (pl. kalcium-nitrát + ammónium-nitrát) főzik is. Az idő függvényében bekövetkező károsodás, repedésmélyülés értékét adják meg, mivel főként a szemcsehatárokon mindenütt megindul a korrózió, és a feszültséggel arányosan halad az anyag belseje felé.



7.18. ábra
Korróziós vizsgálatok

Felület optikai mikroszkópos vizsgálata

A vizsgálat a felület megbontása nélkül végezhető. Optikai mikroszkóppal elérhető 1000-szeres nagyítás alkalmas lehet a felület minősítésére, bizonyos hibák detektálására. Amennyiben a munkadarab felülete nem sík, a hagyományos mikroszkóppal csak szűk tartományban lehet éles képet kapni. Ezt korrigálja a topológiai felvétel technika, mely több, különböző élességű képből rak össze egyetlen térbeli éles képet (**7.45. ábra**).

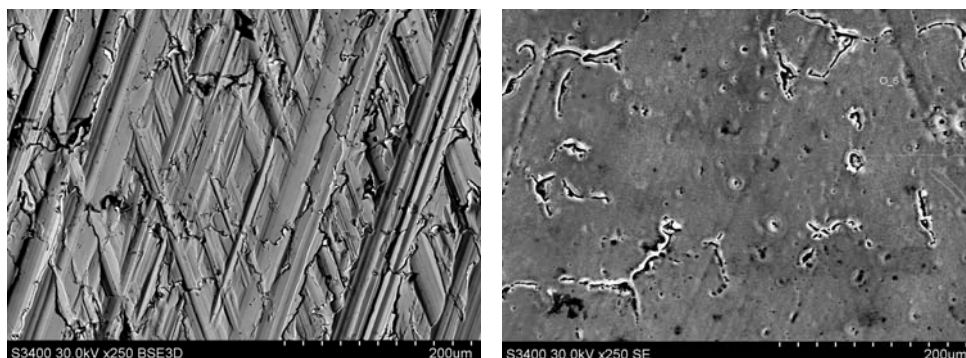


7.45. ábra
Felület topológiája
(Czinege – Csizmazia 2007)

Hengerfelület pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata

Egy pásztázó elektronmikroszkóp felbontása maximum 3 nm, nagyítása eléri a 30.000-szeres értéket. A kép „térhatású”, nagy a mélységélessége, ezért jól mutatja a felületi domborulatokat. A mikroszkóphoz csatlakoztatott elektron-diszperziós elemző (EDS) pedig alkalmas arra, hogy kiválasztott elem pontszerű, vonalmenti és felületi koncentráció-eloszlását bemutassa. A **7.46. ábrán** gömbgrafitos öntöttvas motorblokk hónolt és lézerkezelte hengerfelületének felvétele látható.

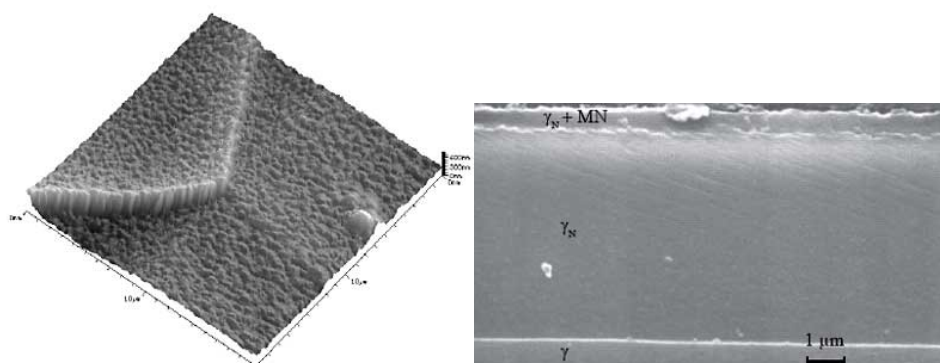
Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



7.46. ábra

Gömbgrafitos öntöttvas motorblokk hönölt és lézerkezelt hengerfelülete
(Czinege – Csizmazia 2007)

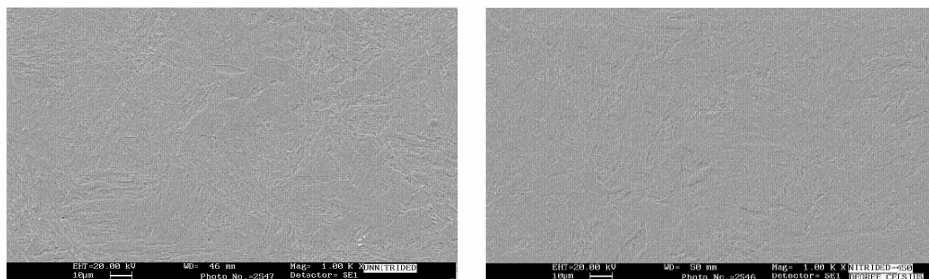
A **7.47. ábrán** nitridált réteg szerkezete, a **7.48. ábrán** felület ion-nitridálás előtti és utáni képe látható pásztázó elektronmikroszkópi vizsgálat révén.



7.47. ábra

Nitridált réteg szerkezete
(Czinege – Csizmazia 2007)

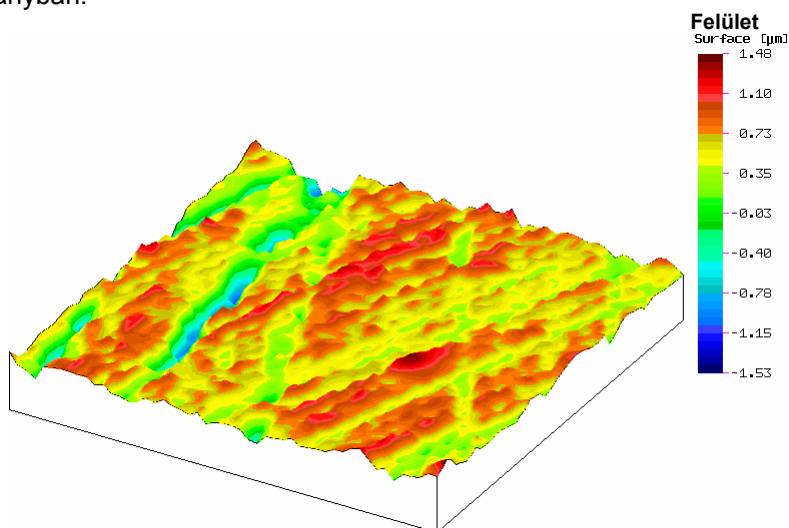
Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



7.48. ábra
Felület ion-nitridálás előtti és után
(Czinege – Csizmazia 2007)

Felületi érdesség mérése

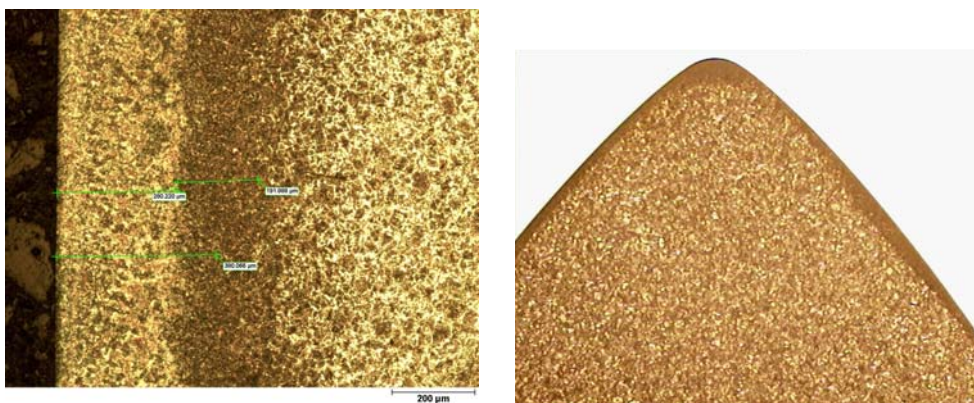
Leképezés történhet lézersugárral is, nem klasszikus „látás” funkció révén. A felületi érdességmérők új generációjának felbontása 10 nm Z irányban, az X–Y irányú lépésköz 0,5 μm -tól kezdődik. Lehetséges teljes körű 3D megjelenítés, a hagyományos vonal menti analízis kiterjesztése 2D-re, anizotrópia paraméterek megadása. A **7.49. ábrán** hónolással megmunkált hengerfelület leképezése látható, melyen a színek a magasság eloszlást mutatják $-1,5 - +1,5 \mu\text{m}$ tartományban.



7.49. ábra
Hónolással megmunkált hengerfelület leképezése
(Czinege – Csizmazia 2007)

Szövetszerkezet, rétegvastagság mikroszkópos vizsgálata

A felületre merőleges csiszolaton a felületi rétegek szerkezete tanulmányozható. Egyes rétegek maratás nélkül is láthatók, de a legtöbb esetben maratással lehet előhívni a mikroszerkezeti képet. A digitális képen alkalmas szoftverrel különféle mérések is elvégezhetők. A mikroszkópi vizsgálatra előkészített csiszolaton elvégezhető a mikrokeménység-mérés is. A **7.50. ábrán** cementált kéreg szerkezete és lemezgrafitos öntöttvas vezérműtengely elektronsugaras edzésekor keletkezett kéreg szerkezete látható.



7.50. ábra

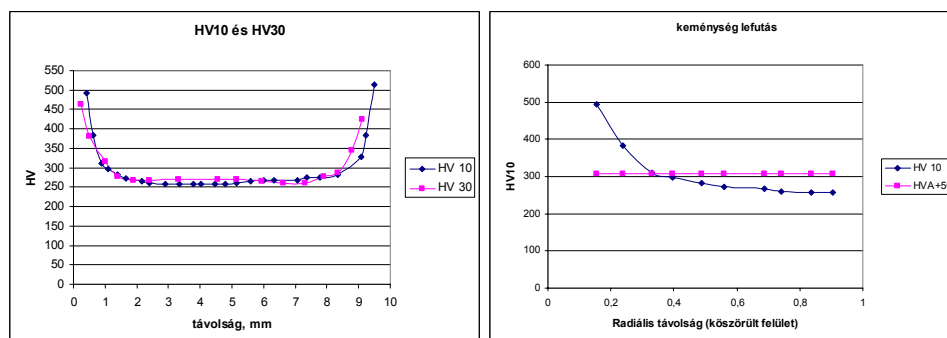
Cementált és elektronsugárral edzett kéreg szerkezete
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Keménységmérés felületre merőleges metszeten

A mérés mikrokeménységmérővel végezhető, általában HV 0,3 értékek meghatározásával. A gépek képesek automatikus, előre programozott léptetésre, a szűrőszerszám benyomására és digitális optikai úton az átlók meghatározására, ebből a keménység kiértékelésére és diagram rajzolására. A **7.51. ábrán** nitridált kéreg szerkezete látható keménységmérési nyomokkal, továbbá az eredményül kapott keménységfutam-görbe.

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A lelapolt felületen végzett HV10 és HV30 mérések eredményei jó egyezést mutatnak. A HV10 mérésből kiértékelt radiális távolság (mélység) és a keménység kapcsolata hasonló, mint a csiszolaton közvetlenül mért keménységlefutás. A réteg mérete az ismert definíció szerint 0,335 mm (7.53. ábra). Az eljárás előnye, hogy viszonylag kevés megmunkálást igényel, és a mérés hagyományos Vickers-gépen is elvégezhető.



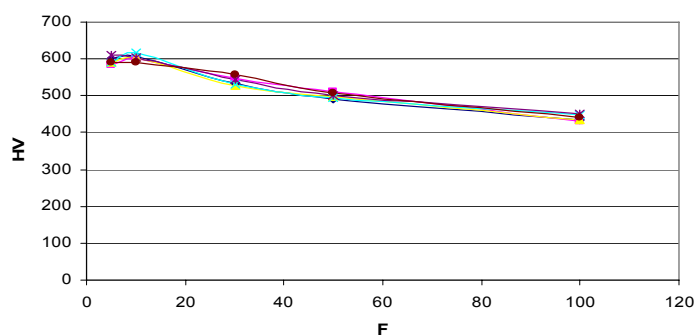
7.53. ábra

Lelapolt felületen mért keménységlefutás

(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Nitridált felület Vickers-keménységmérése változó terheléssel

A homogén anyagon végzett HV keménységmérés független a terhelőerőtől. Ha a kéreg keménysége a mélység függvényében változó, akkor a különböző erővel mért keménységek is eltérőek lesznek.



7.54. ábra

Különböző terhelőerőkkel mért Vickers-keménységek

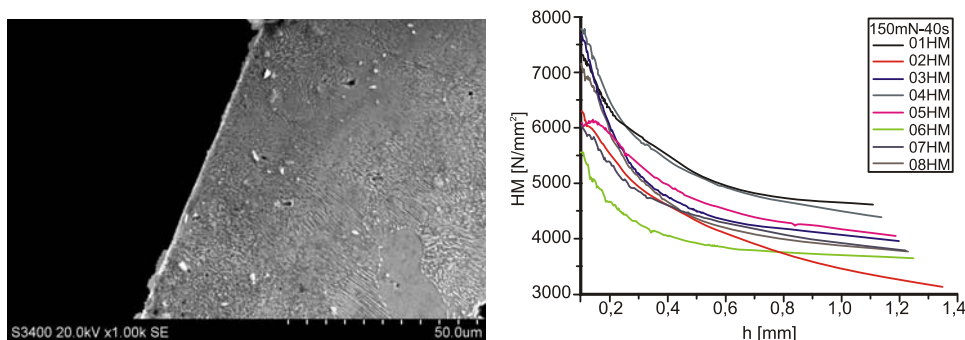
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

A **7.54. ábra** 5, 10, 30, 50 és 100 kg terheléssel elvégzett Vickers-keménység-mérések eredményeit mutatja. A görbék lefutása igazolja, hogy a nagyobb terhelésnél kisebb „látszólagos” keménység adódik, mert a réteg keménység-eloszlása inhomogén.

Ebből a mérésből tapasztalati összefüggéseket lehet levezetni pl. arra vonatkozóan, hogy kétféle terheléssel mért keménység és a kéregvastagság között milyen összefüggés van (nitridált, cementált kérégek esetében alkalmazzák).

Felületi nano-keménységmérés

A normál és mikro tartományú méréseken kívül alkalmazható nano-keménységmérés erőtartománya 100–1000 mN. Ezzel néhány tized mikron távolságra lehet lenyomatokat elhelyezni a rétegben. A **7.55. ábra** bal oldali részén lézerrel kezelt hengerfelület pásztázó elektronmikroszkópos felvétele szerepel, melyen látható a kb. 1 μm vastagságú nanokristályos réteg. Ennek keménységeloszlását az ábra jobb oldali része mutatja. A felületi keménység 6–8000 HM, de a mérés szórása viszonylag nagy a technika finomsága miatt.

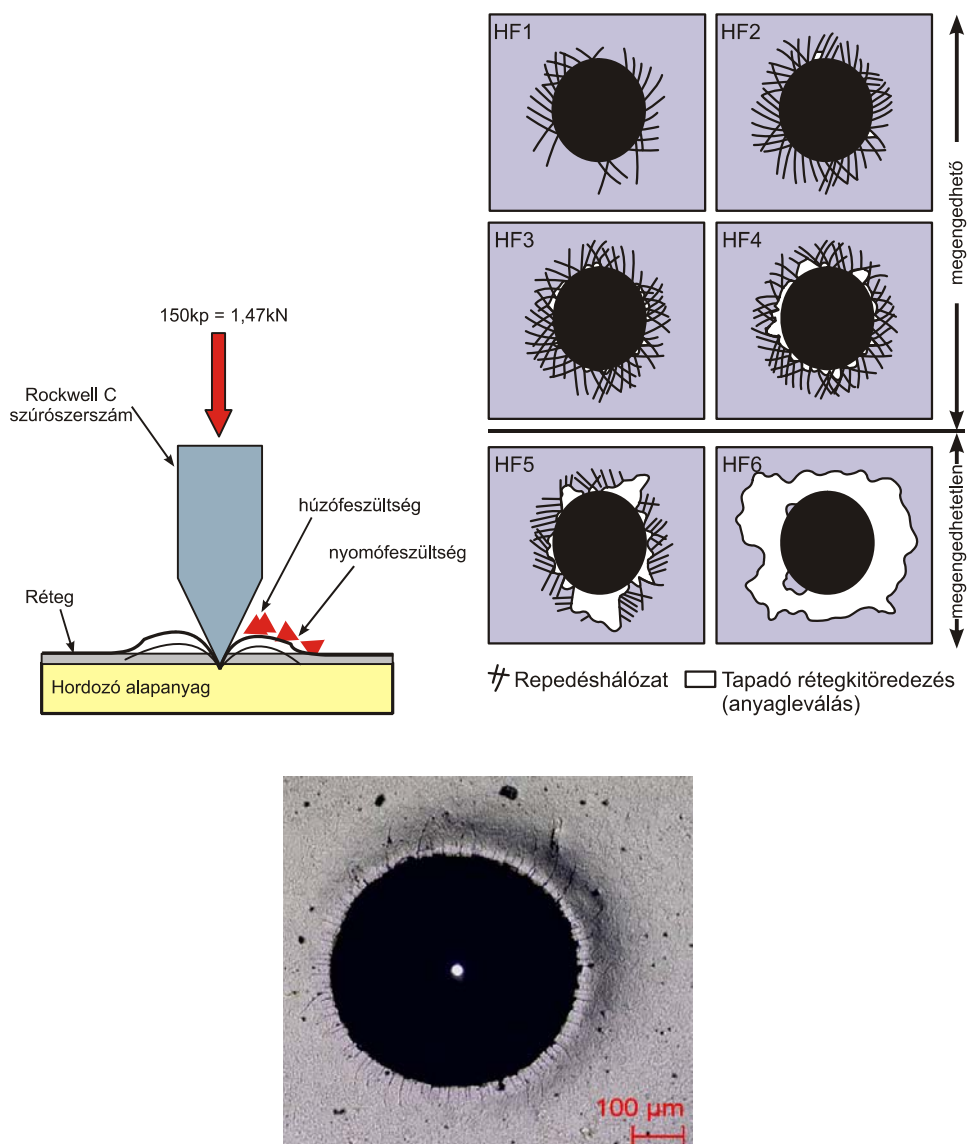


7.55. ábra

Lézerrel kezelt hengerfelület és annak keménységeloszlása
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Keménységlenyomat elemzése

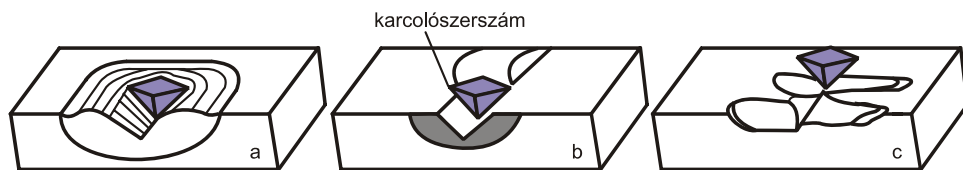
A keménységlenyomat körül kialakuló repedésháló mutatja a réteg ridegségét. A **7.56. ábrán** látható vizsgálat, illetve annak eredménye kvalitatív értékelésre alkalmas.



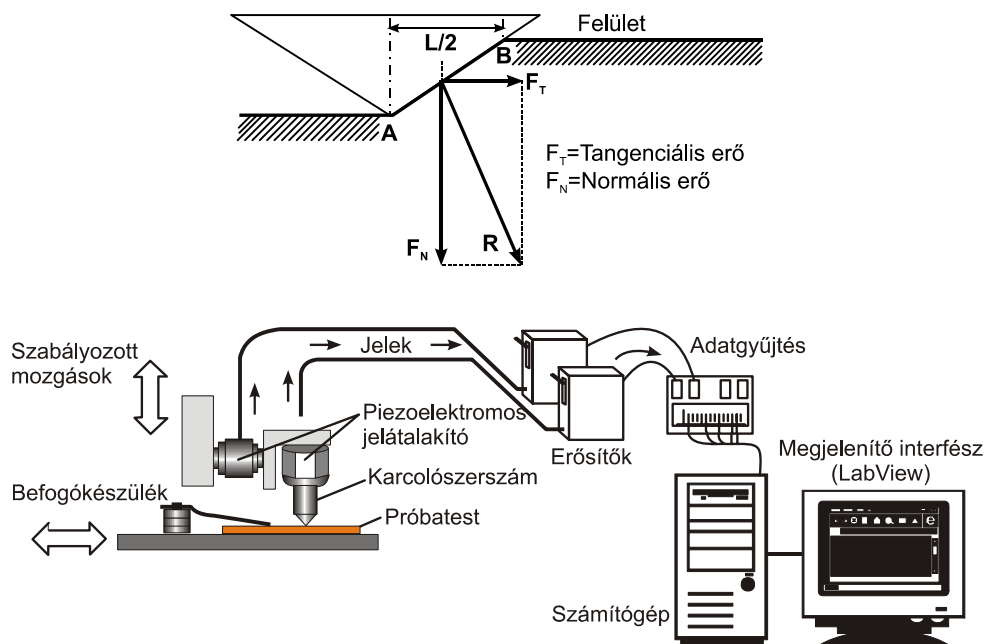
7.56. ábra
Keménységlenyomat körül kialakuló repedésháló
(Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig)

Karcteszt

Ha egy felületet kemény szerszámmal megkarcolunk, a karc jellege jól mutatja a felület tulajdonságait. A képlékeny anyagban maradó alakváltozás (szántás) tapasztalható. A kemény anyag forgácsolódik, a rideg kéreg töredezik. A jelenség azzal válik mérhetővé, hogy regisztrálják az erőkomponenseket. A normál erő (F_N) néhány tízed N-től 100 N-ig terjedhet. A 7.57. ábrán látható mérés munkadarabbal együtt kezelt próbatesten történik

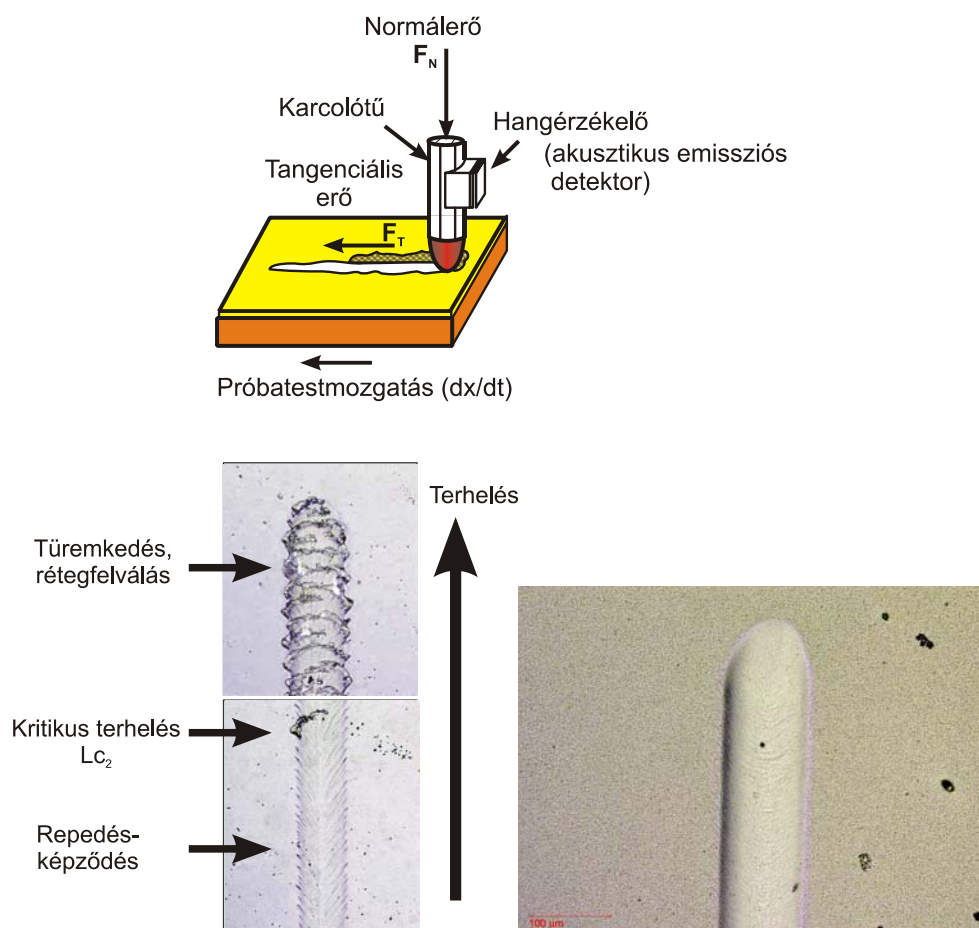


Anyagvesztés mechanizmusai: (a) mikroszántás, (b) mikrovágás, (c) mikrorepszés



7.57. ábra (I.)

Karcteszt elve és a karcok alakja
(Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig)



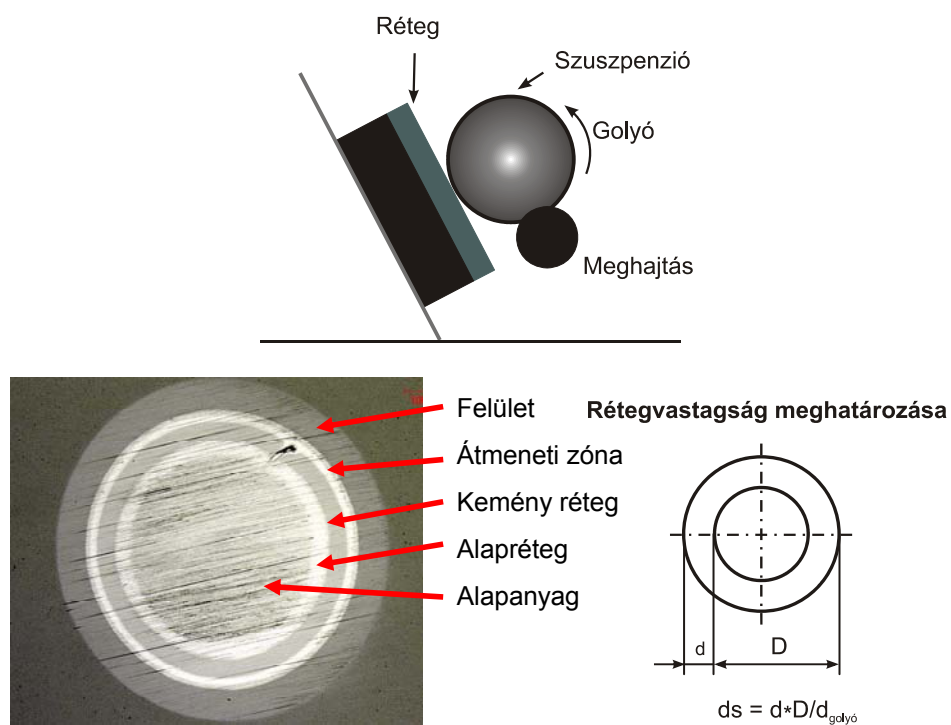
7.57. ábra (II.)

Karceszt elve és a karcok alakja

(Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig)

Kopásvizsgálat

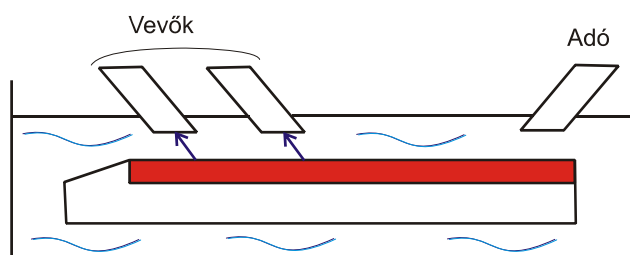
A vizsgálandó felületet egy keményfém golyó koptatja adott tribológiai feltételek között. A kopási nyom gömbsüveg alakú, rajta láthatók a bevonatrétegek (7.58. ábra). A geometriai viszonyokból a réteg mélységét ki lehet számítani. Ezzel a vizsgálattal különböző anyagok és rétegek kopásállósága is összehasonlítható.



7.58. ábra
Kopásvizsgálat és a kopási nyom geometriai viszonyai

Nitridált réteg mérése ultrahangvizsgálattal

A módszer ultrahang hullámokat kelt a nitridált zónában, a terjedési sebesség regisztrálása érdekében. Mivel a nitridálás felületi kezelés, az eljárás felületi hullámokat használ (7.59. ábra).

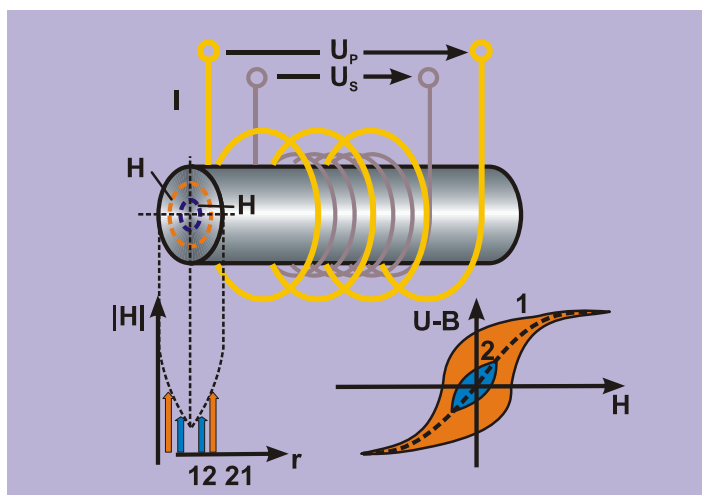


7.59. ábra
Ultrahangvizsgálat felületi hullámokkal
(ULTRA RS)

A nitridált réteg kémiai összetétele különbözik az alapanyagétól. A hullámok terjedési sebessége erősen függ azon anyag szerkezetétől és összetételétől, amelyben terjednek. Ez a sebesség nagyon eltérő az alapanyagban és a nitridált zónában. A sebességváltozás megjelenése detektálhatóvá teszi a kéregvastagságot.

Kéregvastagság mérése örvényárammal

Mérési elv lehet magnetoinduktív (7.60. ábra) vagy örvényáramú (Eddy-current 7.61. ábra). Mindkét eljárás felületi repedések és rétegek vizsgálatára, cementált, illetve nitridált kérégek vastagságának kimutatására alkalmas.

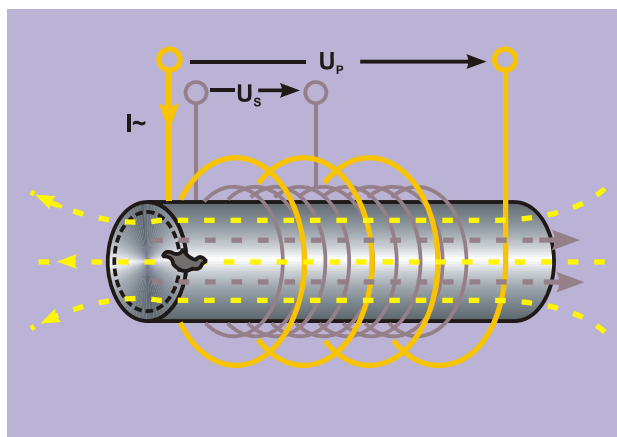


7.60. ábra
Magnetoinduktív mérési elv
(Förstner Group)

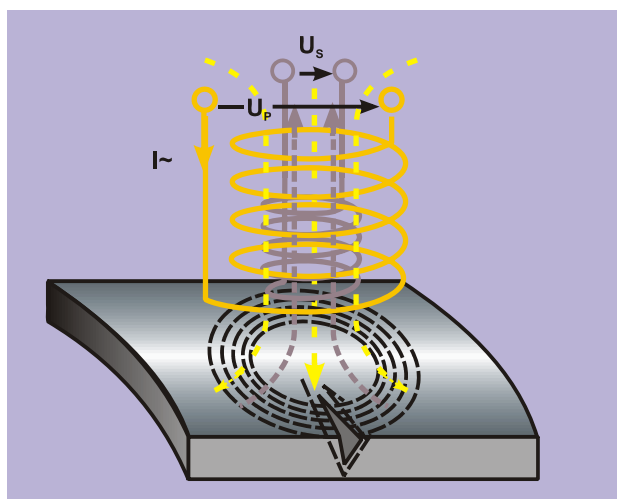
A magnetoinduktív módszerrel lehetséges a mag és a felület vizsgálata szelektíven, a frekvencia változtatása révén. A gerjesztés történhet egy elkülönülő vagy több frekvenciával (sorosan vagy szimultán) a vizsgálati feladattól függetlenül.

A módszerrel szokásosan néhány Hz-től kb. 1000 Hz-ig terjedő sáv fogható át nem korlátozott tekercsekkel.

Általában technológiai anyagjellemzők meghatározására szolgál, úgymint szemcseszerkezet, keménység, edződési mélység és rétegvastagság.



a)



b)

7.61. ábra
Örvényáramos mérési elv
(Förstner Group)

Az örvényáramos módszer szokásos frekvenciatartománya 10 MHz-ig terjed, különböző tekercsekkel, melyek révén általában felületi hibák vizsgálhatók. Félkész gyártmányok, mint huzalok, rudak, csövek vizsgálhatók olyan lokális hibák szempontjából, mint repedések, lyukak a tekercs határkeresztmetszetében.

A hibák a félkész gyártmányok és alkatrészek felületének pásztázásával tárhatók fel.

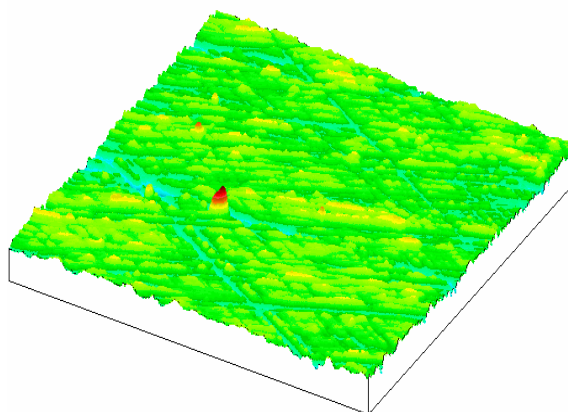
Hengerfelület hónolásának vizsgálata

A hónolt felületeket többféle módszerrel vizsgálták annak érdekében, hogy összehasonlíthassák az egyes ellenőrzési módszereket a pontosság, a megbízhatóság és a reprodukálhatóság szempontjából.

Az alkalmazott módszerek a következők:

- felületek vizsgálata felületi érdesség mérésével;
- felületek vizsgálata és minősítése gyártó előírásai szerint;
- acetát fóliával készített replikák vizsgálata;
- felületre merőleges metszetek mikroszkópos vizsgálata;
- felületek vizsgálata „SILFLO” replika alapján;
- felületek elektronmikroszkópos vizsgálata.

A felületi érdesség komplex vizsgálatát olyan berendezéssel végezték, melynek felbontóképessége z irányban lézeres letapogatással 10 nm. Az x és y irányú lépésköz minimális értéke 0,5 μm , a letapogatható felület nagysága tetszőleges. A berendezés rendelkezik saját kiértékelő rendszerrel, de lehetőség van az x-y-z koordináta mérési eredményeinek fájlba való kiíratására és az adatokon végzett értékelésre is. A berendezés néhány jellegzetes felvételét a **7.62. ábra** mutatja.



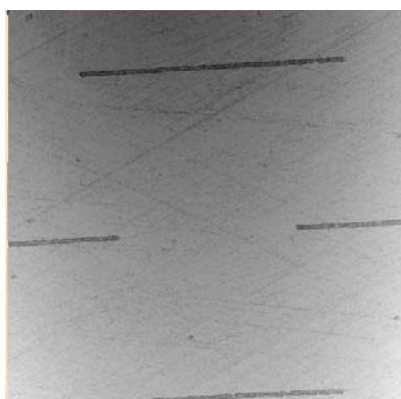
a)

7.62. ábra (I.)

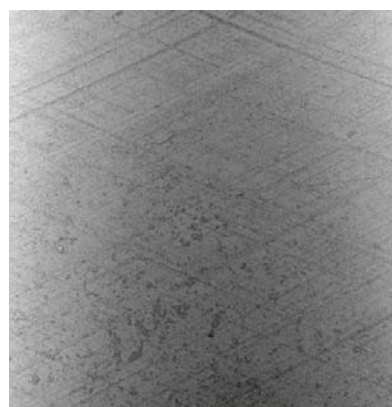
Érdességmérés: a lézerhónolt felület 3D-ben (a); a lézerhónolt felület makroszkópos felvétele (b); a hagyományosan hónolt henger makroszkópos felülete (c)
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

A bemutatott háromdimenziós mérés sok információt szolgáltat a hónolt felületről, mert általa különböző irányokban kiértékelhetők a hagyományos érdességi paraméterek (R_a , R_z stb.). Emellett meghatározhatók felületi paraméterek (S_a , S_z stb.) és egyéb jellemzők is (pl. a karcok szöge, csúcs sugara

és rádiusza stb.). A lézersugárral való letapogatás további előnye a tűs letapogatáshoz képest az, hogy itt a mért felület nem karcolódik, és a letapogatás nem a felület és a tű rádiusz burkológörbéjét mutatja, hanem jobban közelíti a pontos alakot.



b)

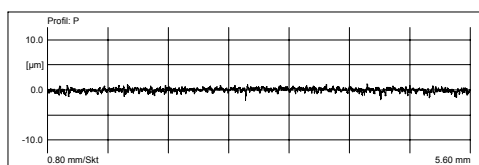


c)

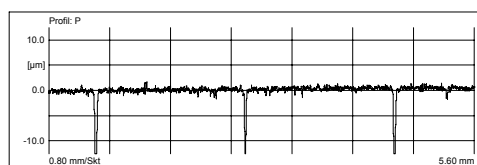
7.62. ábra (II.)

Érdességmérés: a lézerhónolt felület 3D-ben (a); a lézerhónolt felület makroszkópos felvétele (b); a hagyományosan hónolt henger makroszkópos felülete (c)
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

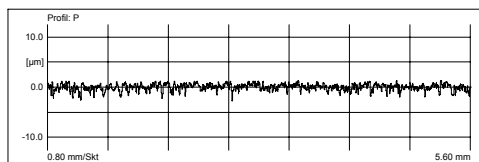
A 7.63. ábra néhány jellegzetes profilfelvételt mutat.



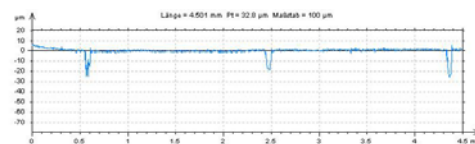
Lézeresen kezelt alaphónolás



Olajcsákok (Mahr)



Hagyományosan hónolt



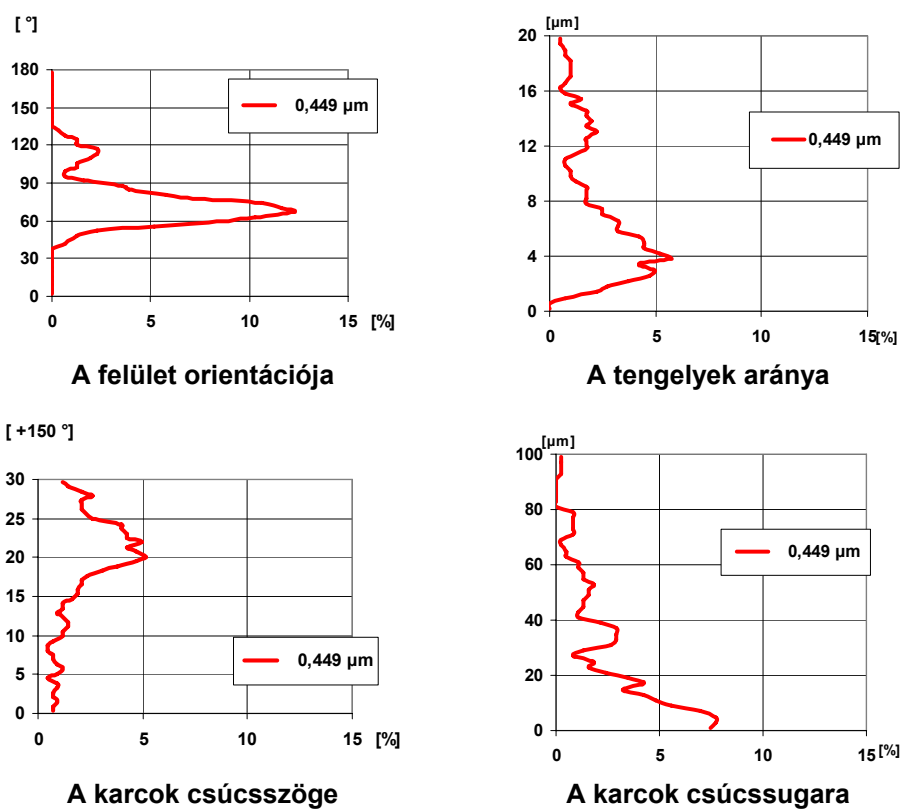
Olajcsákok (Talysurf)

7.63. ábra

Jellegzetes érdességprofil-felvételek
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A karcok orientációjára és egyéb jellemzőire vonatkozó diagramok (7.64. ábra) információt adnak a hónolási szögére (ennek tűrése 45° – 60° , illetve 65°) és egyéb karcparaméterekre. A felületorientáció két jellegzetes szögértéke 117° , illetve 66° , tehát a hónolási szög 51° , amely az előírt tűrésmező közepe felé helyezkedik el. A karc tengelyek arányának leggyakoribb értéke $4\text{ }\mu\text{m}$, a karcok csúcshöngsége 170° -nál a legnagyobb gyakoriságú. Ezek az eredmények lézeresen kezelt hengerekre vonatkoznak.

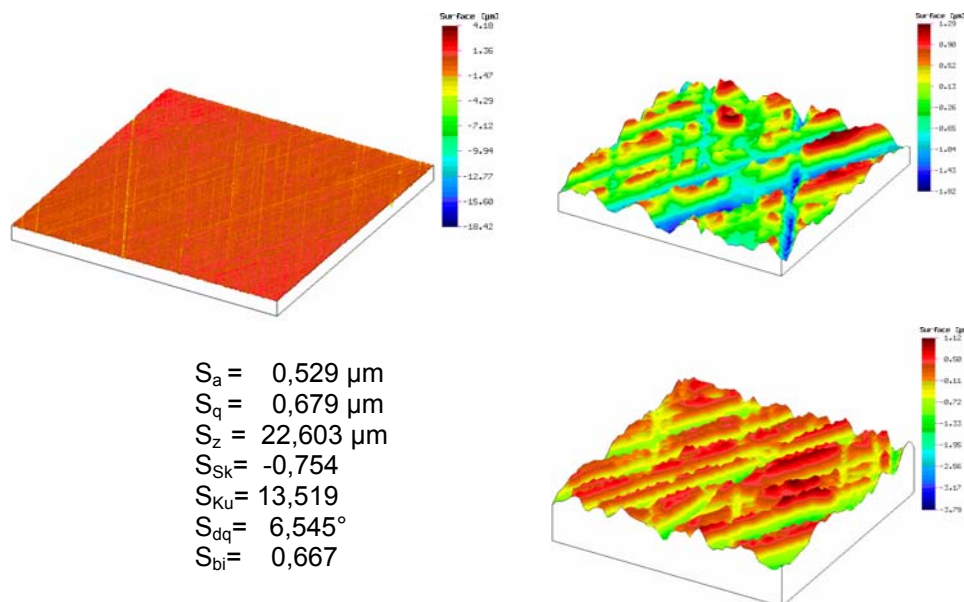


7.64. ábra

Karcok jellemzőire vonatkozó diagramok
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Néhány felületi paramétert (a mérőszámokkal és képekkel együtt) a 7.65. ábra mutatja hagyományosan hónolt felületről.

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



7.65. ábra

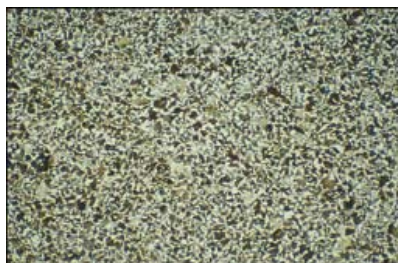
Hagyományosan hónolt felületek paraméterei
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

A felületi paraméterek nem hozhatók közvetlen kapcsolatba a vonal menti mérés eredményeivel, de egy hónolt felületet, ahol két karrendszer is van, jobban jellemeznék.

A gyártó előírásainak megfelelően a hengerfelületeket acetátfilm segítségével, illetve a hónolt felületre merőlegesen készített csiszolatokkal, mikroszkópon vizsgálták. A megtisztított, hónolt felületre acetont vittek fel, majd az acetátfilmet kézzel rászorították. Az aceton feloldja a film felületét, és az a nyomás hatására rögzíti a hónolt felületet. A replikának a vizsgálattal átellenes oldalára tükröt helyezve, fémmikroszkópon végezték a vizsgálatokat. Az acetátfóliáról, valamint a csiszolatról készült felvételeket egymás mellé helyezték.

Korszerűbbnek tekinthető eljárás a polimer alapú replikaanyagok (pl. RepliSet) használata. A két polimerkomponenst használat előtt egy speciális keverő-szármagban egyesítik, és úgy viszik a felületre. Ott megszilárdul, és kb. 0,1 mikron felbontással adja vissza a felület 3D-s másolatát pl. mikroszkópi tanulmányozás vagy precíz mérések elvégzése céljára. Míg a mintavétel üzemi viszonyok között történik, a vizsgálatok laborkörülmények között végezhetők. A 7.66. ábra mutat példákat ezen roncsolásmentes vizsgálatot (NDT = Non-Destructive Test) lehetővé tevő módszer képalkotására.

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



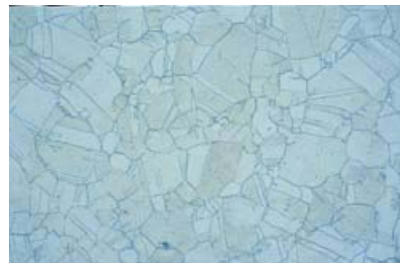
Közepes C-tartalmú acél 3%-os Nitállal maratva, 100-szoros nagyításban



Replika



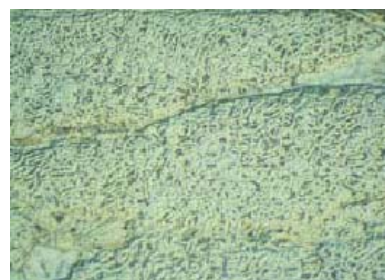
Vörösréz réz-kloriddal és ammóniával maratva 100-szoros nagyításban



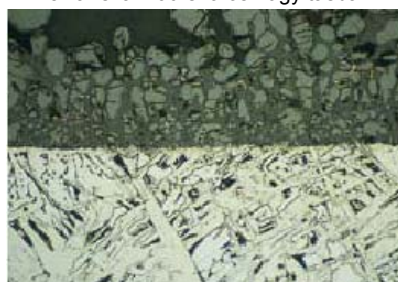
Replika



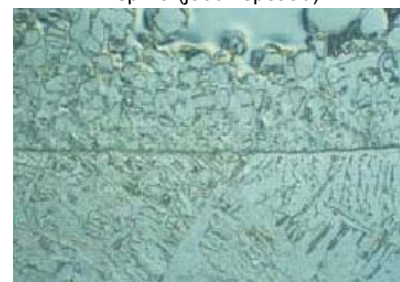
Kevlár szál 200-szoros nagyításban



Replika (jobb képet ad)



Túlhevített acél korróziós réteggel, 3%-os Nitállal maratva, 100-szoros nagyításban

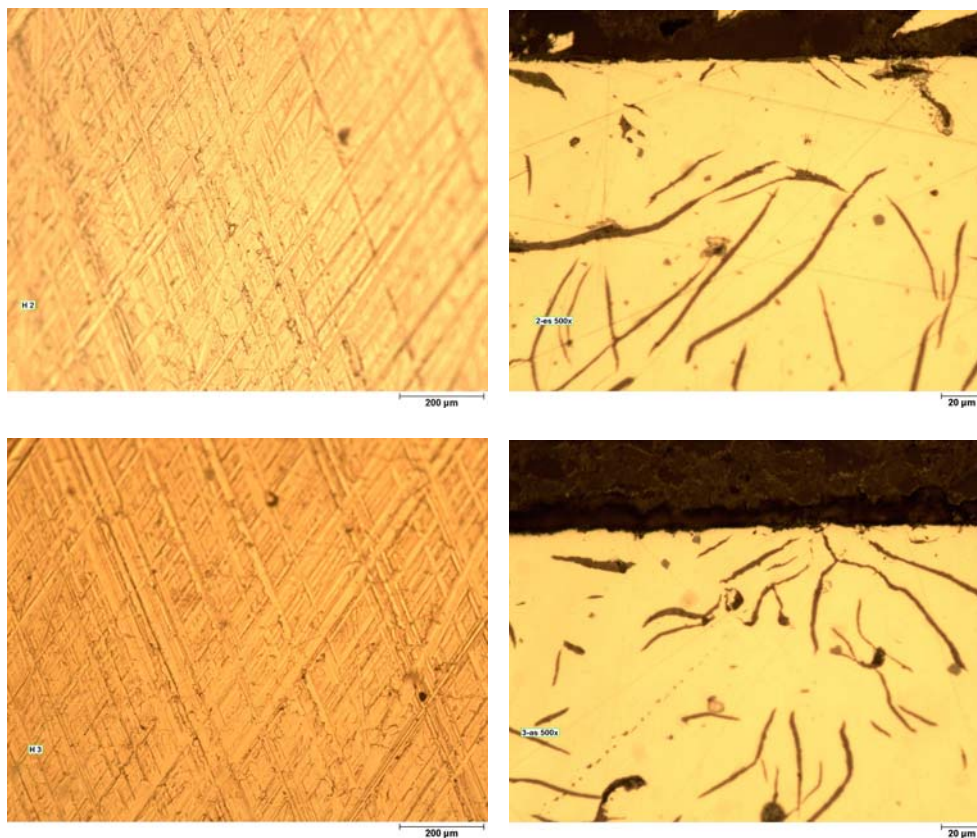


Replika

7.66. ábra
Eredeti kép és replikakép összehasonlítása
(RepliSet, Struers)

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A hagyományosan hőnolt darabokról készített felvételeket mutatja a **7.67. ábra**.

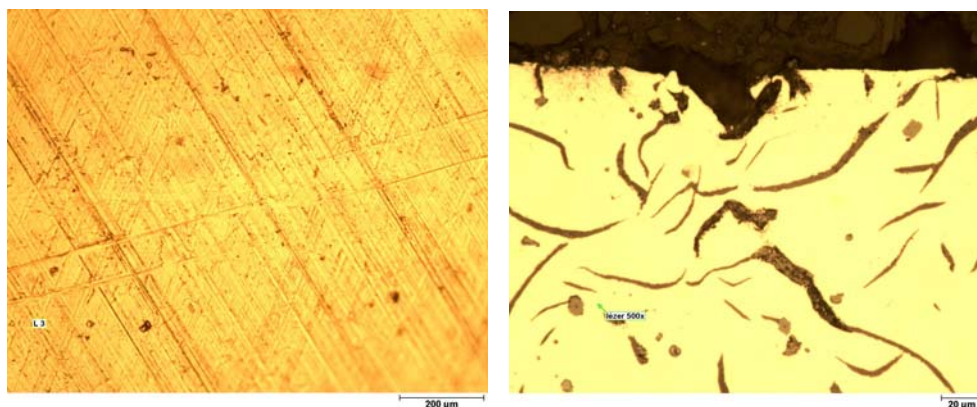


7.67. ábra

Hagyományosan hőnolt felületek
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

A lézerhőnolt darabról készültek a **7.68. ábra** felvételei.

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

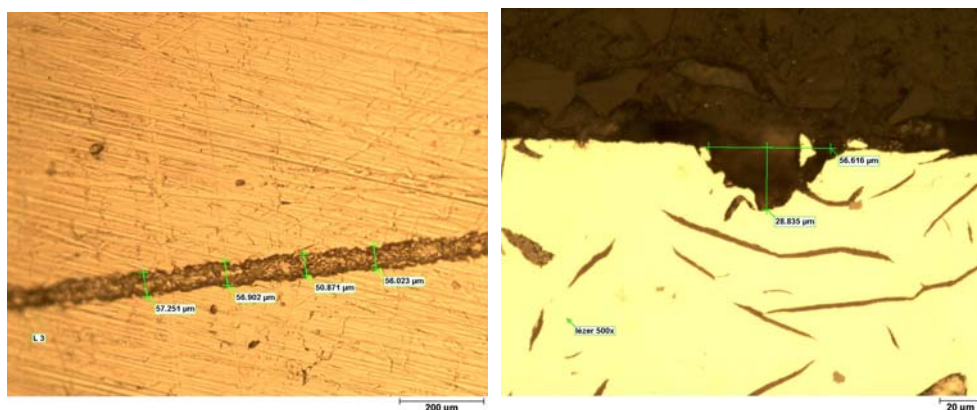


7.68. ábra

Lézerhónolt felület

(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

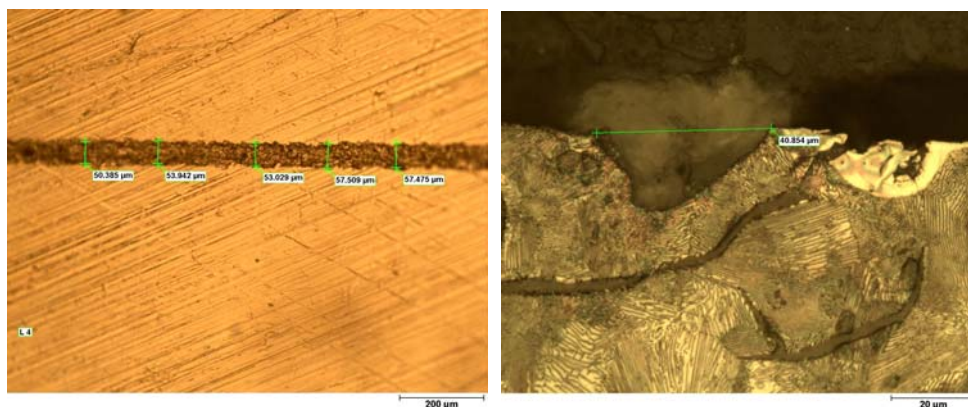
Az acetátfilm-replika és a csiszolat segítségével mérték a lézerrel kimunkált olajtáskák méretét is (7.69. ábra). A replikán és a mikroszkópon mérhető olajtáskaszélesség kb. 50 µm.



7.69. ábra (I.)

Lézerrel kimunkált olajtáskák mérete 100-szoros és 1000-szeres nagyításban
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

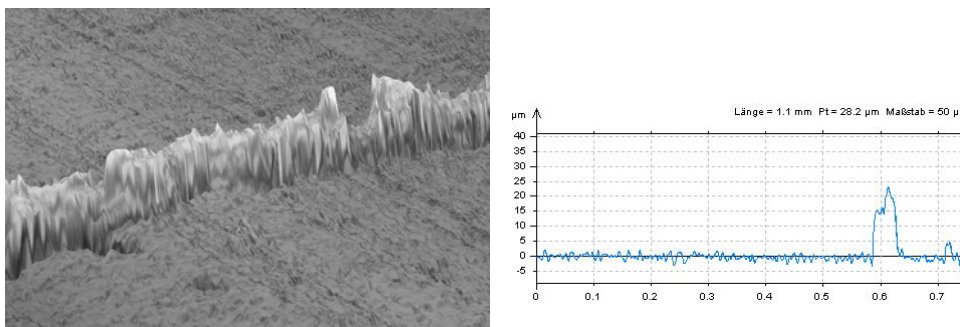
Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



7.69. ábra (II.)

Lézerrel kimunkált olajtáskák mérete 100-szoros és 1000-szeres nagyításban
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

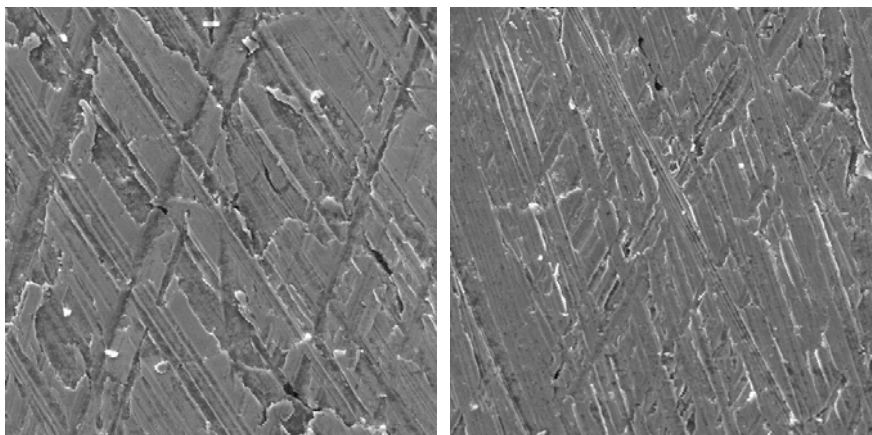
Egy erre a célra ajánlott replikaanyaggal végzett kísérlet során az olajzsákot és környezetét vizsgálták. A **7.70. ábrán** jól látszik az a kiemelkedés, amely az olajzsák negatívjának tekinthető, a jobb oldali diagram pedig a replikáról felvett profilt mutatja. A 15–20 µm mélységű horonyról viszonylag hű képet ad az anyag, és a hónolási barázdák is látszanak. További vizsgálatokkal lehet eldönteni, hogy melyik replikatechnika ad a tényleges felületen mért jellemzőkkel közel azonos értékeket. Az olajtáska mérete kb. 45–50 µm, így a mérés jó egyezést mutat az acetátfólián és a csiszolaton végzett méréssel.



7.70. ábra

A lézerrel kimunkált olajtáska, valamint a replikáról készített profil
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

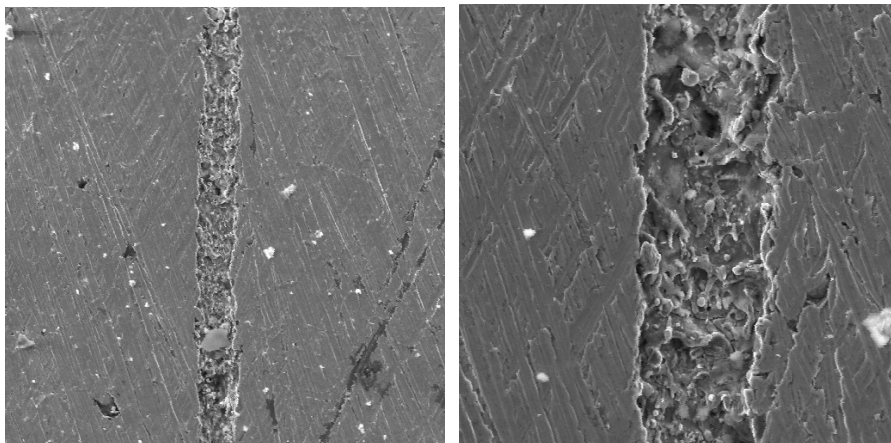
A **7.71. ábrán** a scanning elektronmikroszkópos vizsgálatok révén egymás mellett látható a hagyományos és a háromszor hónolt lézeres felületet 500-szoros nagyításban.



7.71. ábra

Scanning elektronmikroszkópos felvétel a hagyományos és a lézerhónolt felületről
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

A scanning elektronmikroszkóp nagy mélységélessége lehetővé teszi az olajtáska felületének vizsgálatát is. A **7.72. ábra** felvételein jól látható, hogy a lézerrel kialakított olajtáskák mélysége különböző. A **7.72/c. ábrán** az is megfigyelhető, hogy helyenként nem éri el az átlagos 20–25 μm értéket. A nagy hőmérsékletet előidéző lézersugár elpárologtatja a fémet, ami egyenetlen felületet eredményez. Ez az olaj megtapadása és az olajzsákban maradása szempontjából kedvező.



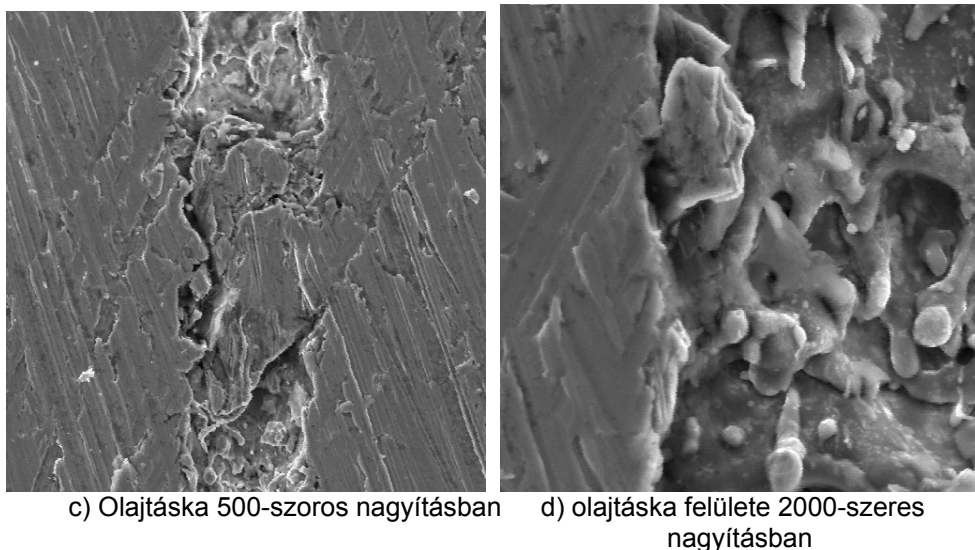
a) Olajtáska 150-szeres nagyításban

b) Olajtáska 500-szoros nagyításban

7.72. ábra (I.)

Olajtáska vizsgált felülete

(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

**7.72. ábra (II.)**

Olajtáska vizsgált felülete

(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Felületi feszültség- és alakváltozás-mérés

Esetenként szükségessé válhat anyagfelületekben visszamaradó, különböző eredetű (termikus, fázisátalakulás és/vagy kristályrács hibák okozta) feszültségek kimutatása. Ennek néhány módszere a következő:

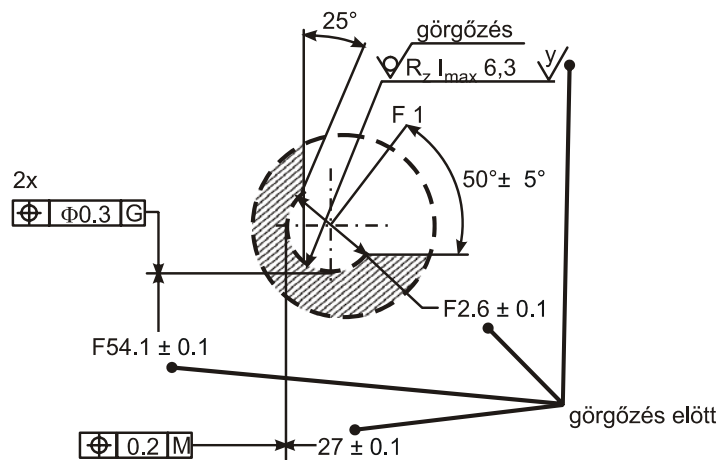
- repedőlakkos módszer: jól tapadó, de rideg lakk felvitele után képződő repedéskép alapján a feszültségcsúcsok helyének kimutatása;
- nyúlásmérő bélyeges módszer: felragasztott ellenálláshuzalok elektromos ellenállás-változásának mérése alapján a felületi alakváltozás meghatározása, majd abból a feszültségek számítása;
- röntgendiffrakciós módszer: röntgensugarak kristályos szerkezetű anyagrészek kristályrácsáról való visszaverődési képe torzulásának mértéke alapján a maradó feszültségek kimutatása;
- árnyékoptikás módszer: tükrösített sík felület torzulásának kimutatása ráeső fénynyaláb eltérítéséből;
- Moire-módszer: anyagfelületre felvitt sávrendszer torzulása torzítatlan sávrendszerrel interferáltatva másodlagos sávrendszert eredményez, ami alapján a deformációk kimutathatók;
- holografikus interferometria: terheletlen és terhelt munkadarab hologramjának szuszpenziója alapján a deformációk kimutatása.

7.10. Esettanulmányok, különleges vizsgálati módszerek

Főtengely görgőzött felületeinek vizsgálata

A görgőzés a felület kifáradással szembeni ellenállásának növelésére szolgál. A görgő a felület közelében lévő anyagot deformálja. Mint ismeretes, a képlékeny hidegalakítás felkeményedéssel jár, tehát a görgőzés hatására a felületközeli anyagrész keménysége megnő. További előnye a technológiának, hogy a felületközeli anyagrészben nyomófeszültségek maradnak vissza, ami javítja a kifáradással szembeni ellenállást.

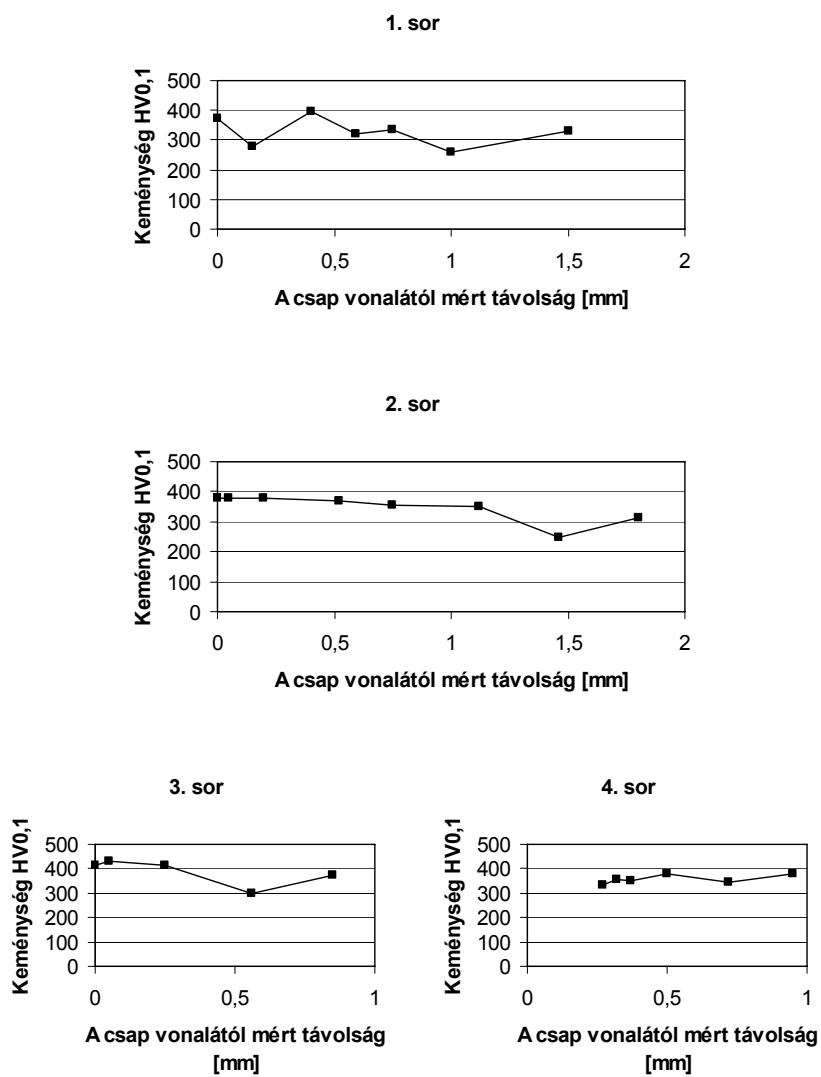
A görgőzött felület vizsgálatának célja a felkeményített réteg vastagságának és keménységének meghatározása. A felkeményedett réteg jellemzőinek meghatározására a Vickers-keménységmérés alkalmas, melyhez a **7.19. ábrán** látható helyről történt a mintavétel, majd beágyazás, csiszolás és polírozás következett. A méréseket kisterhelésű Vickers-keménységmérő gépen végezték. A görgőzés hatására deformálódott réteg vastagsága általában kisebb, mint 1 mm, ezért a keménységmérést kis terheléssel $F = 0,1$ kg, azaz 0,981 N terheléssel végezték.



7.19. ábra
A főtengely görgőzött része

A méréseket a csap vonalától mint 0 vonaltól indították, és több sorban végezték. Az első sort a válltól kb. 1 mm-re helyezték el, és a csap felé haladtak. A sorok távolsága kb. 0,5 mm volt. A keménységi értékeket a hely függvényében ábrázolták. A lököcsap görgőzött felületének keménységértékeit a csap vonalától mért távolság függvényében a **7.20. ábra** diagramsora mutatja be.

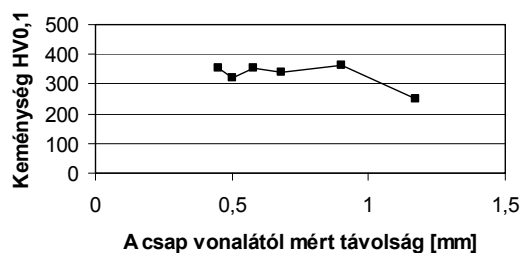
Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



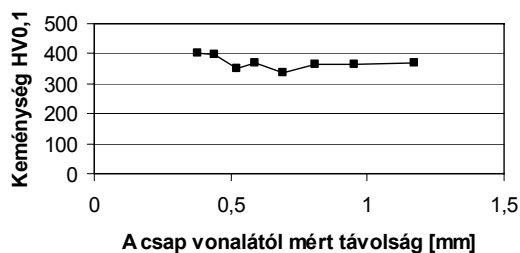
7.20. ábra (I.)
Görgőzött felület keménységmérési eredményei

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

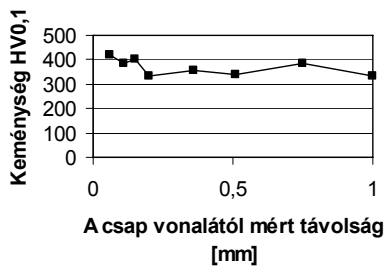
5. sor



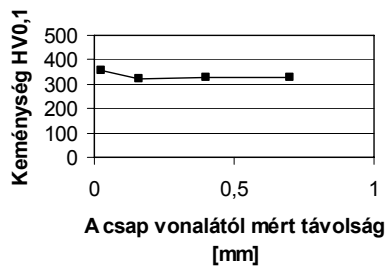
6. sor



7. sor



8. sor



7.20. ábra (II.)

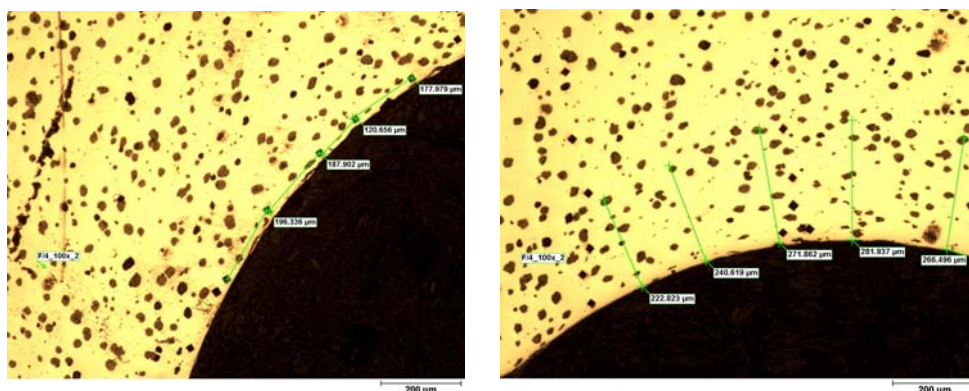
Görgőzött felület keménységmérési eredményei

Mint a diagramokon látható, a keménységi értékek erősen szórnak. A felülettől jelentős távolságban is mérhető 300 HV fölötti érték. A deformálódott zóna határának kirajzolása, nagyságának meghatározása tehát nem lehetséges a keménységértékek alapján. Ennek oka az, hogy a főtengely anyaga gömbgrafitos öntöttvas, amelynek mátrixa zömében perlit. A méréseket maratlan csiszolaton

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

végezték, a mérési helyek kijelölésénél törekedtek arra, hogy a mátrixba kerüljön a lenyomat. Azt azonban, hogy a lenyomat alatt grafit van, a csiszolaton nem lehet látni. Ebben az esetben jóval kisebb keménység mérhető. Továbbá a perlit keménysége a képződés körülményeitől, a lemezek méretétől, orientációjától függ, és ennek következtében szintén jelentős különbségek adódhatnak az egyes mérések között.

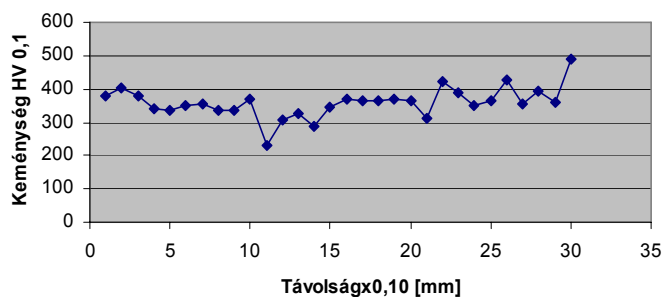
A felületközeleli réteg keménységét a görgőzött ív menti mérésekkel határozták meg. A mérések helye a **7.21. ábrán** látható.



7.21. ábra
Görgőzött ív menti keménységmérések helye

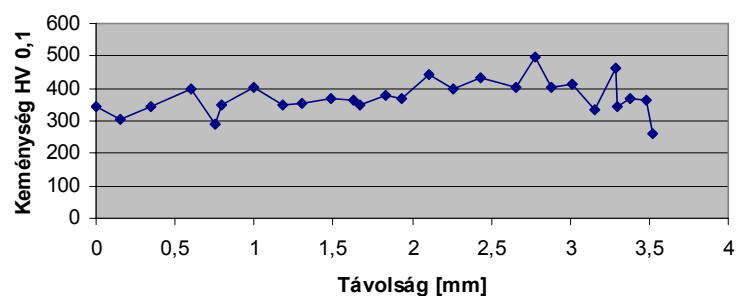
A mért értékek – a felület közvetlen közelében – minden darab esetében 310–430 HV_{0,1} között változtak (**7.22. ábra**), de az előzőekben leírtak miatt az értékek szórnak, bár a szórás mértéke kisebb, mint az előző esetben volt. A mérések alapján megállapítható, hogy a görgőzés hatására jelentősen nő a keménység.

Főcsap



7.22. ábra (I.)
Görgőzött ív menti keménységértékek

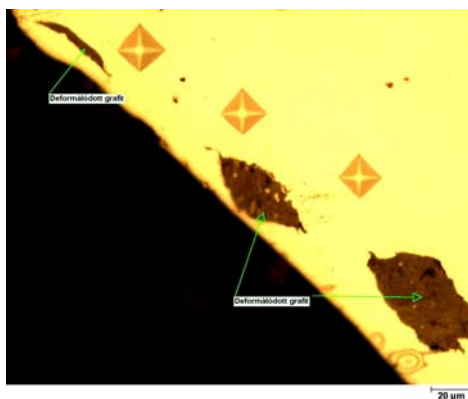
Az 50%-os erővel görgőzött felület az ív mentén



7.22. ábra (II.)

Görgőzött ív menti keménységértékek

A görgőzött darabok mikroszkópos vizsgálatánál megfigyelték, hogy az alakítás hatására a grafitgömbök deformálódnak, ellipszisszerű alakot vesznek fel, sőt a felület közvetlen közelében vonalszerű alakot is felvehetnek (**7.23. ábra**). A jelenség oka, hogy a grafitgömb ellenállása lényegesen kisebb, mint a mátrix perlites anyagának, így a grafitral teli „üreget” a görgő deformálni tudja. Ez a jelenség lehetővé teszi a deformálódott réteg vastagságának meghatározását.

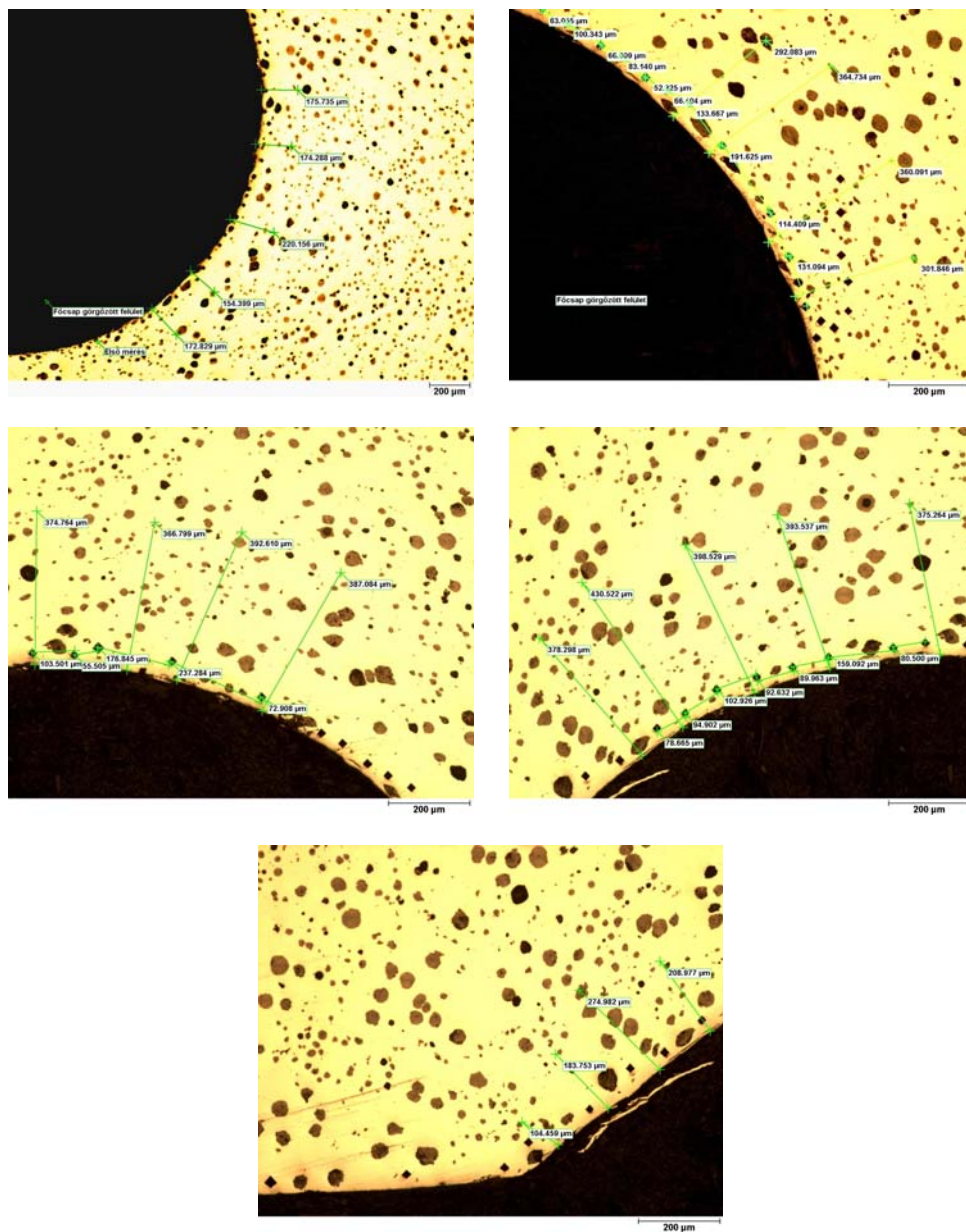


7.23. ábra

Deformálódott grafitgömbök a főcsapban

A **7.24. ábra** a görgőzött ív mentén készített felvételeket mutat. A deformálódott grafit révén végzett vizsgálatok alapján megállapították, hogy a főcsapon az alakított réteg vastagsága 350–400 μm.

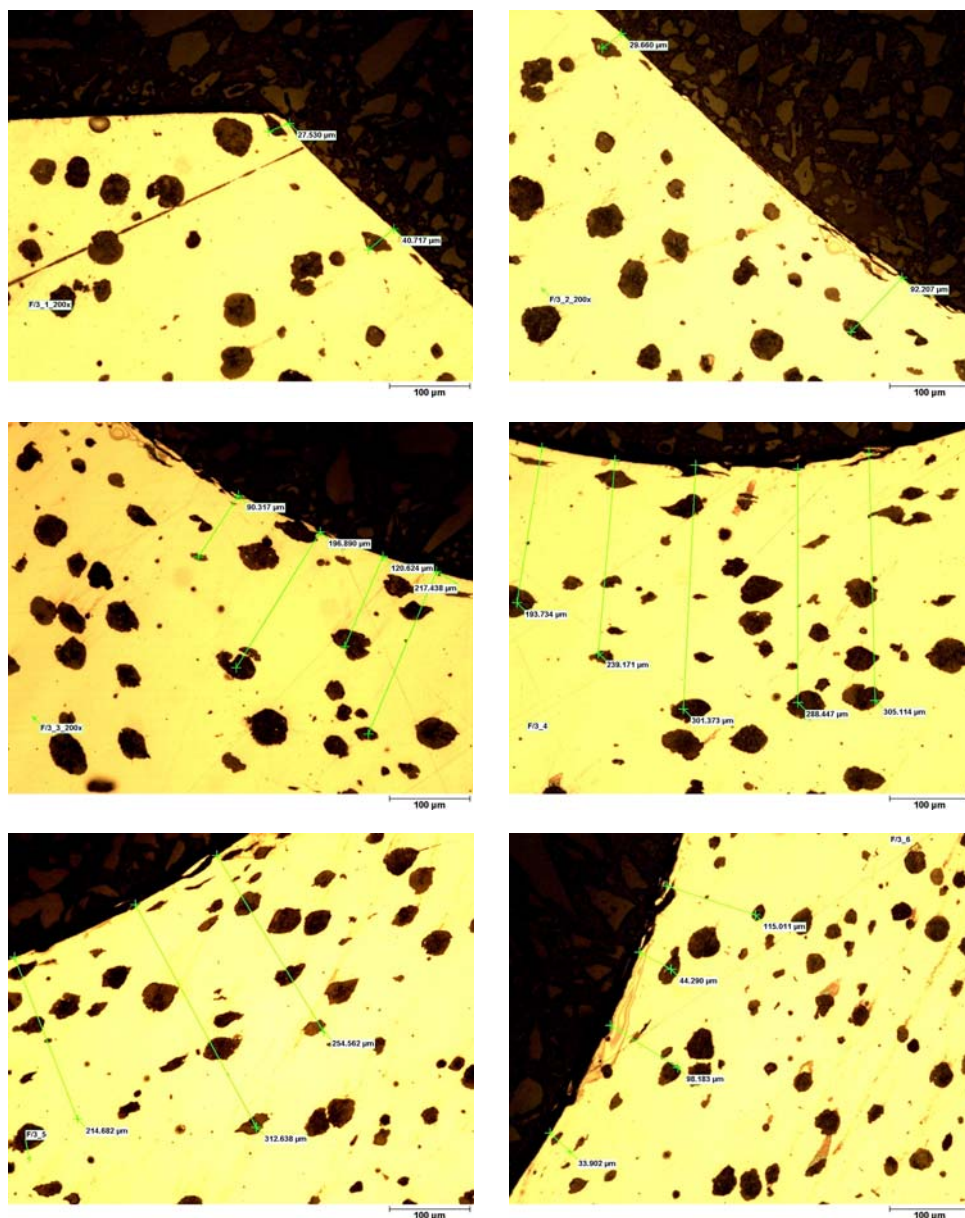
Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



7.24. ábra
Főcsap deformálódott rétegének vastagsága

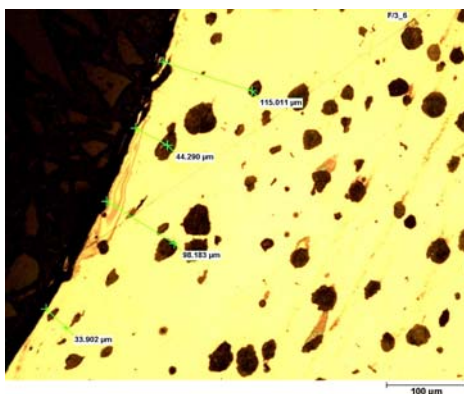
Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A további mérések alapján megállapították, hogy az alakított réteg vastagsága a görgőzött lökőcsap esetében 200–300 µm (7.25. ábra).



7.25. ábra (I.)
Főtengely-lökőcsap alakított rétegének vastagsága

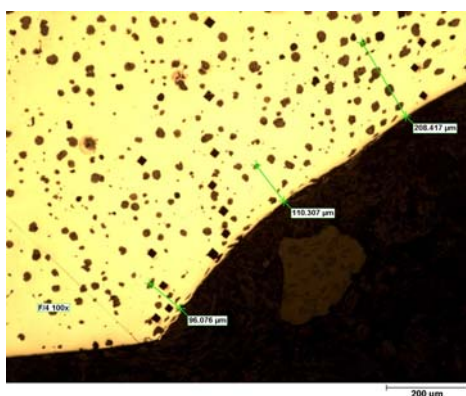
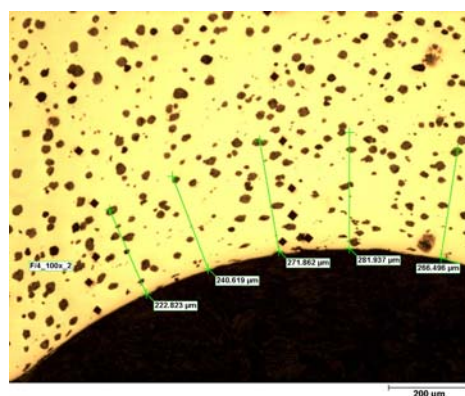
Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



7.25. ábra (II.)

Főtengely-lökőcsap alakított rétegének vastagsága

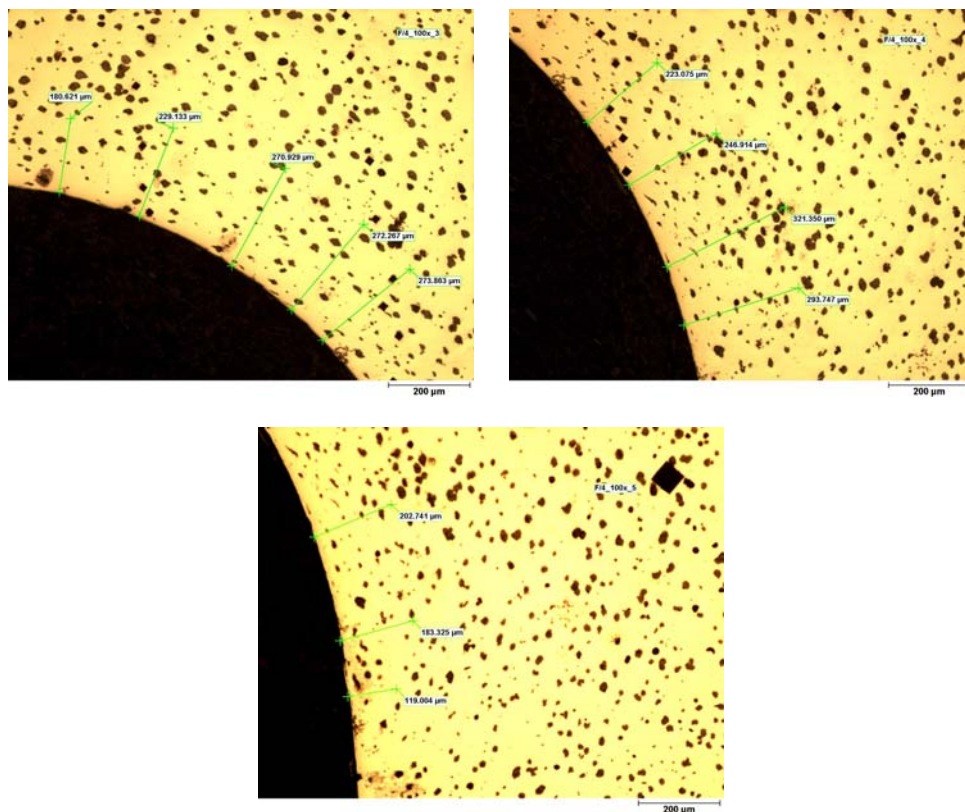
Az elvégzett mérések alapján azt is megállapították, hogy az alakított réteg vastagsága az 50%-os erővel görgőzött lökőcsap esetében 200–250 µm (7.26. ábra).



7.26. ábra (I.)

50%-os erővel görgőzött főtengely-lökőcsap alakított rétegének vastagsága

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése



7.26. ábra (II.)

50%-os erővel görgőzött főtengely-lökőcsap alakított rétegének vastagsága

A bemutatott vizsgálatok és mérési eredmények alapján a görgőzési technológia ellenőrzésére a következő javaslatot tették:

- A görgőzött részből készített maratlan csiszolaton, a felület közvetlen közelében végzett Vickers-keménységméréssel ellenőrizhető a felület felkeményedésének mértéke.
- A keménységi lenyomatok elhelyezésénél törekedni kell arra, hogy a lenyomat a mátrixba kerüljön, ezért automatikus mérési program nem használható.
- Több azonos feltétel mellett görgőzött darab mérése alapján megállapítható, hogy milyen keménységnövekedés a megfelelő. Megjegyzendő, hogy a mérések szerint a felület közelében a keménység 350–420 HV0,1, de ezt az intervallumot további mérésekkel finomítani kell.
- A csiszolaton az alakítás hatására deformálódott grafitgömbök alapján kijelölhetők azok a távolságok, amelyek a deformálódott réteg jellemző

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

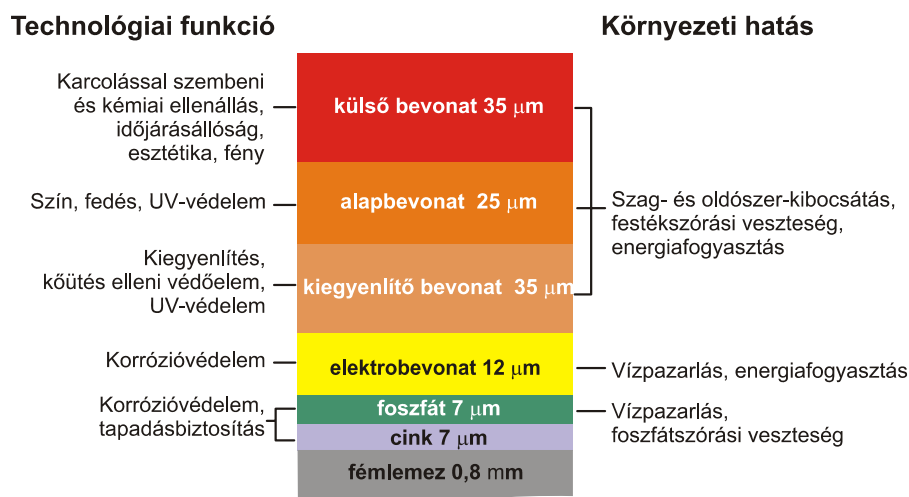
méretét jelentik. Ebben az esetben is több, azonos feltétel mellett görgőzött darab vizsgálata alapján célszerű pontosítani az értékeket.

A görgőzött felület elvégzett vizsgálatai alapján a következő összefoglaló megállapítások tehetők:

- A főtengely anyaga gömbgrafitos öntöttvas, a mátrix perlites, kevesebb mint 20% ferrittartalommal. A kezelt területen a felkeményedett rész méretének és alakjának meghatározása érdekében végzett HV0,1 kisterhelésű Vickers-keménységmérés nem bizonyult megfelelőnek. A lenyomatokat a mátrixban készítették, de a mérési eredmények nagy szórást mutattak. A szórás oka:
 - a vizsgált réteg alatti grafit;
 - a perlit képződési körülményei miatt kialakuló különböző lemezvastagság, ami eltérő keménységet jelent;
 - továbbá a mérési helyen esetlegesen elhelyezkedő ferrit.
- A maratlan csiszolatokon a felület közvetlen közelében (50 µm-en belül) végzett keménységmérés eredményei alapján keménységnövekedés mérhető, még több azonos feltétellel kezelt darab mérése alapján meghatározható. Ez a módszer alkalmas lehet a darabok ellenőrzésére.
- A görgőzés hatására a gömbgrafit úgy viselkedik, mint egy nagyon kis szilárdságú anyaggal kitöltött üreg, amely az alakítás hatására deformálódik. A deformáció különösen a felület közelében nagyon jelentős, a gömbök teljesen ellaposodnak. A grafit alakvizsgálata alapján jól kijelölhető a deformálódott, illetve felkeményedett réteg vastagsága.
- A görgőzés hatására kialakuló, a kifáradási tulajdonságok szempontjából kívánatos nyomófeszültségek megállapítására más módszerek is léteznek, ilyen pl. a röntgendiffrakció. Célszerű lehet a vizsgálatokat ezzel a módszerrel is elvégezni és az eredményeket összehasonlítani.

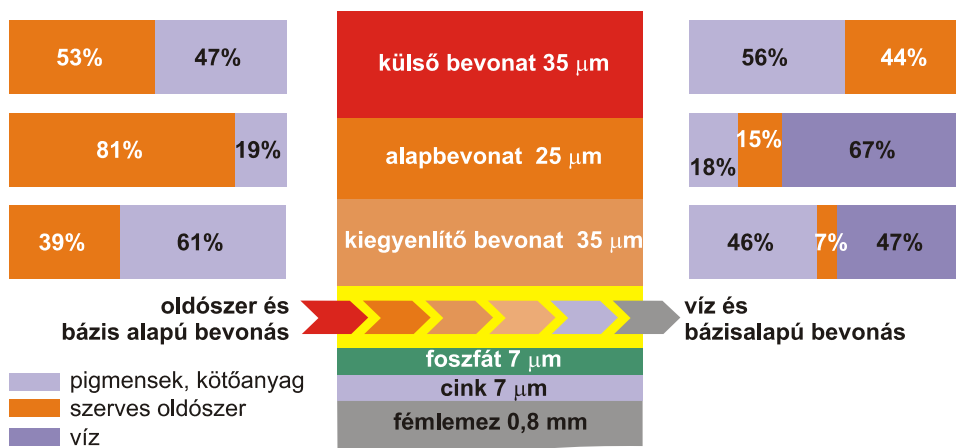
Gépjárműkarosszéria korrózió elleni védelme festékbevonat-rendszerrel

Festés során kikeményedő szerves bevonat(rendszer) alakítható ki gépjárművek karosszéria-elemeinek felületén. Az egyes rétegek pl. szórással juttathatók a védendő felületre. A **7.27. ábra** mutatja a bevonatrendszer felépítését autókarosszéria festésekor. A **7.28. ábra** azt érzékelteti, hogyan kombinálható a magas minőség alacsony emisszióval (környezetvédelmi szempontok figyelembevételével) és elérhető árral a gépkocsik festési technológiája során. A **7.29. ábra** a festőműhelyek emissziócsökkentésének lehetőségeit szemlélteti a technológiai folyamat során.



7.27. ábra

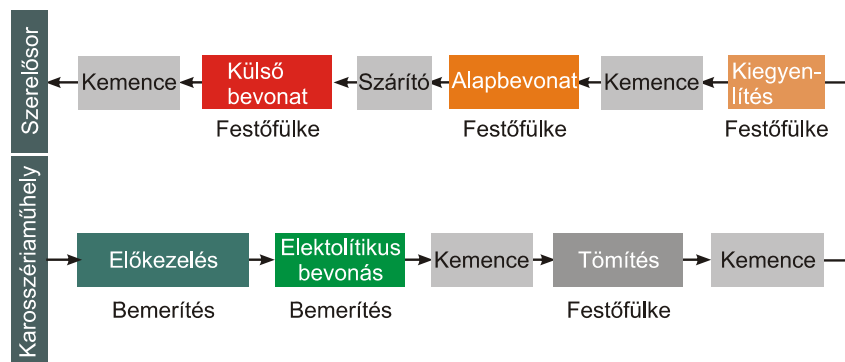
Bevonatrendszer autókarosszéria festésekor
(Volkswagen AG; Group Research, Environment and Workplace Safety)



7.28. ábra

Magas minőség kombinálása alacsony emisszióval és elérhető árral a gépkocsik festési technológiája során
(Volkswagen AG; Group Research, Environment and Workplace Safety)

Művelet sor a festőműhelyben



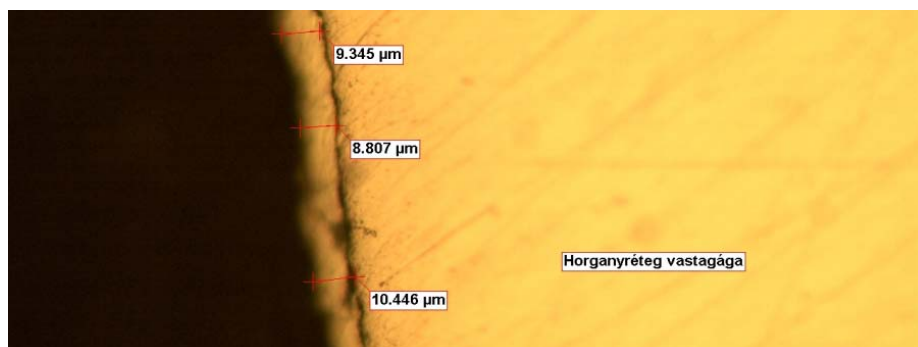
7.29. ábra

Festőműhelyek emissziócsökkentése technológiai folyamat során

Galvanikus és tűzi horganyzás

A horganyzás (cinkezés) acélalkatrészek, acélöntvények, acélszalagok és huzalok korrózióvédelmére szolgál. Mivel a cink elektronegatívabb, mint a vas, így amíg van bevonat, addig a védelem is fennáll. A díszíthatással is bíró cink a legolcsóbb galvanizálásra használható fém, melynek felületén szürkésfehér oxid és karbonát (fehérrzsd) képződik, lassítva a bevonat további korrózióját.

10–15% Ni vagy 0,2–0,3% Co bevitelével a korrózióállóság 3–4-szeresére növelhető, elsősorban kötőelemek horganyzásakor. A galvanikus horganyzáson kívül tűzi horganyzással is lehet bevonatot felvinni, így a két bevonattípus miatt mindig jelölni kell, melyik fajtáról van szó. Autóipari lemezek tűzi horganyzásakor 7–10 μm vastag bevonatot (7.30. ábra) készítenek, ami a lemezek mélyhúzásakor is a felületen marad.



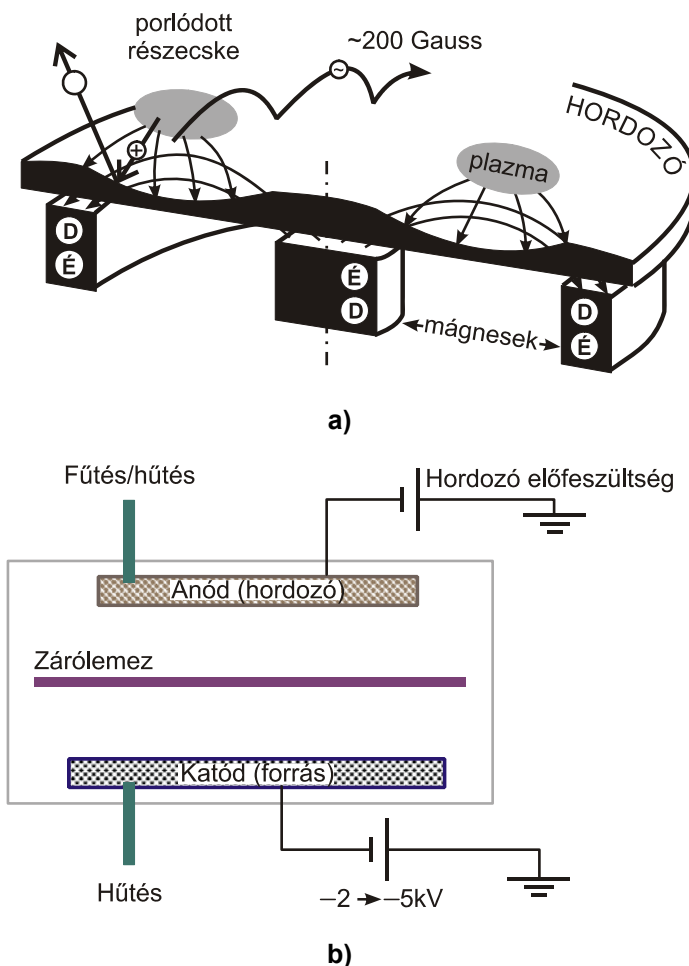
7.30. ábra

Horganyréteg vastagsága

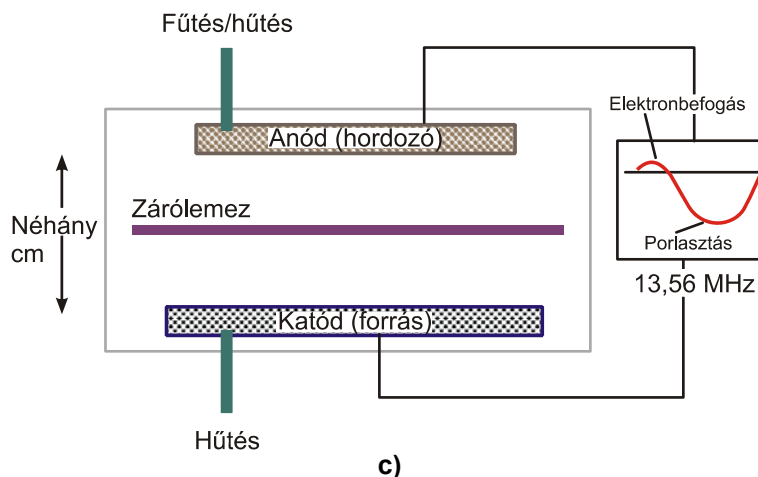
Gőzfázisú bevonatolások

A porlasztás módjától függően több eljárásváltozat alakult ki:

- Magnetronos (mágnesteres) porlasztás (7.31/a. ábra), kedvező rétegtulajdonságok elérésére.
- DC (egyenáramú, diódás) porlasztás (7.31/b. ábra), gyors, egyenletes rétegnövekedés, tömör réteg megvalósítására.
- Rádiófrekvenciás (RF) porlasztás (7.31/c. ábra), mely 50 kHz alatt változó elektródapolaritású DC porlasztásnak tekinthető, és nemvezető anyagok bevonására is alkalmas.



7.31. ábra
Porlasztási módok gőzfázisú bevonatolásnál



7.31. ábra

Porlasztási módok gőzfázisú bevonatolásnál

A rétegeképzési folyamat lépéseit a **7.32. ábra** szemlélteti, melyek a következők:

- forrásanyag gőzfázisba vitele;
- szabad részecskék transzportja a hordozóig;
- részecskék lecsapódása a hordozóra (adszorpció ↔ deszorpció);
- szemcsék kialakulása (nukleáció);
- felületi diffúzió, ami segíti szigetek és szemcsék kialakulását;
- szigetek egybeolvadása, mivel a részecskék a felületi energia minimalizálására törekszenek;
- réteg vastagodása (0,5 μm –1 mm).

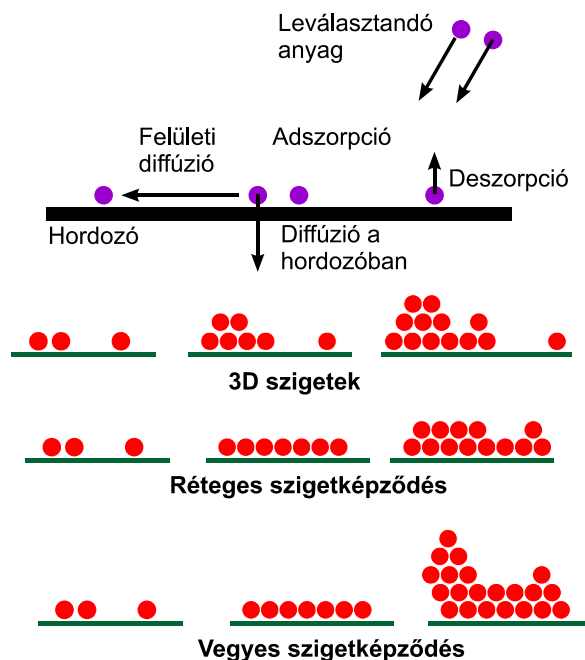
A gázáramlás csak meghatározott irányban történik a munkatérben, ezért a források megfelelő elhelyezésével és a munkadarabok forgatásával érhető el egyenletes bevonat!

Titánnitrid bevonat jellemzői:

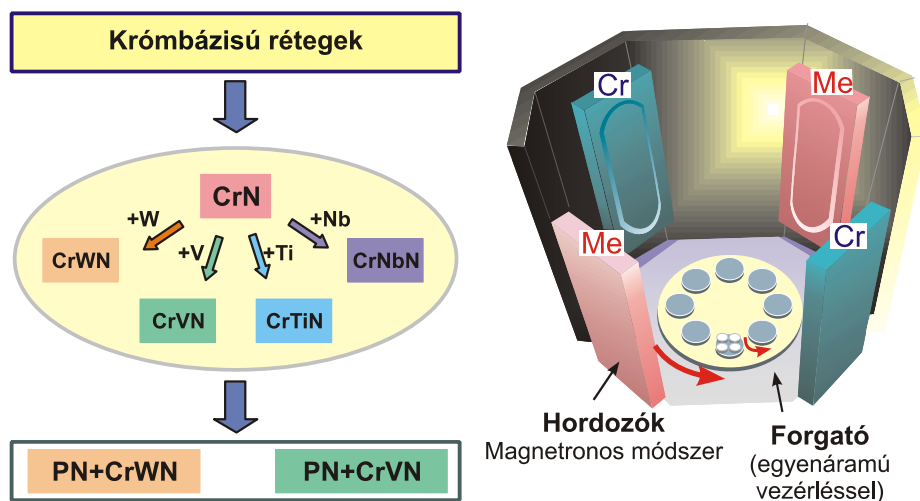
- nitrogéndús környezetben titánt elgőzöltetnek vagy porlasztanak;
- a titán a nitrogénnel titánnitridet alkot;
- a TiN az alacsony nyomású (2–10 Pa) térben elhelyezett tárgyak felületén lecsapódik;
- aranyárga színű bevonat képződik.

Krómnitrid bázisú bevonatok jellemzői (**7.33. ábra**):

- a CrN különböző fémekkel kombinálható, így jönnek létre a CrXN típusú bevonatok (CrWN, CrTiN, stb.);
- a bevonatoló kamrában forrásanyagként Cr és egyéb fém (Me) szubsztrátok vannak;
- forgó asztalon helyezkednek el a munkadarabok.



7.32. ábra
Rétegtékezési folyamat gőzfázisú bevonatolásnál



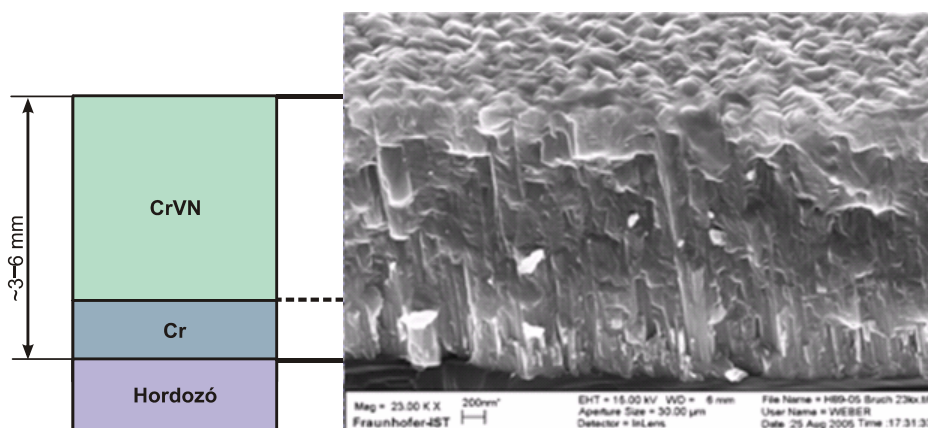
7.33. ábra
Krómnitrid bázisú bevonatok előállítás
(Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig)

A 7.1. táblázat néhány bevonattípus jellemzőit teszi összehasonlíthatóvá.

7.1. táblázat. Bevonatok jellemzői

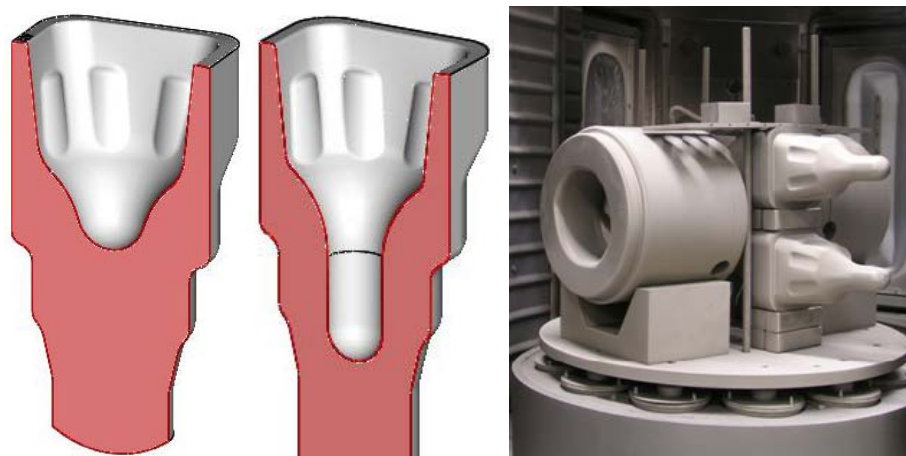
Bevonat anyaga	Mikrokeménység* (HV 0,05)	Súrlódási tényező* (acéllal szárazon)	Maximális alkalmazási hőmérséklet (°C)	Bevonat színe
TiN	2300	0,4	600	aransárga
AlCrN	3200	0,35	1100	kéesszürke
TiAlN+AlCrN - bázisú	3300	0,35–0,40	>1100	kéesszürke
TiCN	3000	0,4	400	kéesszürke
CrN+a-C:H:W	1000 / 1500	0,1–0,2	300	sötétszürke
WC/C (a-C:H:W)	1500 / 1000	0,1–0,2	300	sötétszürke
CrN	1750	0,5	700	ezüstösszürke
CrN	1750	0,5	700	ezüstösszürke

Kardáncsuklóház folytatását két lépcsőben végző folytatótuske esetében plazmanitridálást követően alakítják ki a Cr + CrVN bevonatot (7.34. ábra), amellyel jelentős élettartam-növekedést értek el egy járműipari cégnél.



7.34. ábra (I.)

Krómnitrid bázisú bevonatok előállítása alakító szerszámok felületén
(Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik, Braunschweig)

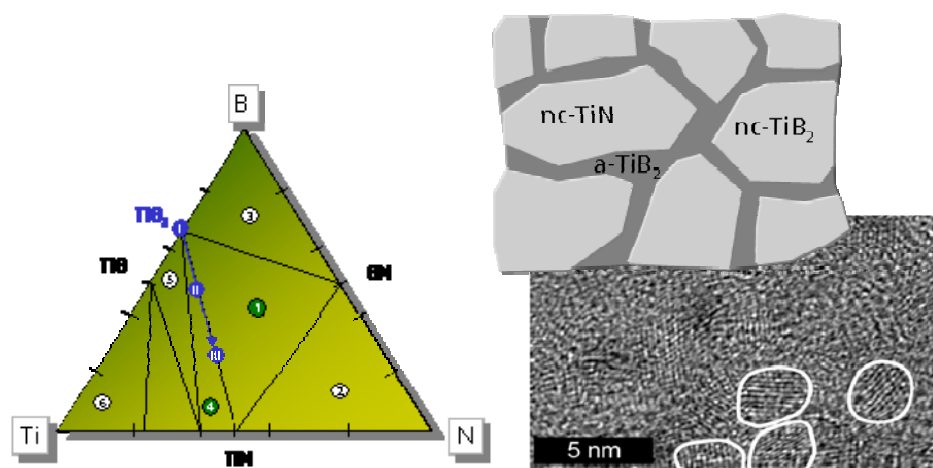


7.34. ábra (II.)

Krómnitrid bázisú bevonatok előállítás alakítószerszámok felületén
(Rába Futómű Kft)

A nano(kristályos)-bevonatok tovább javítják a PVD-bevonatok tulajdonságait. Például a Ti-B-N nanorétegek jellemzői:

- TiN, TiB rétegek (7.35. ábra),
- nagy termikus stabilitás,
- kémiai ellenállóképesség,
- tapadásgátló tulajdonság,
- 4200 HV0,05 keménység.



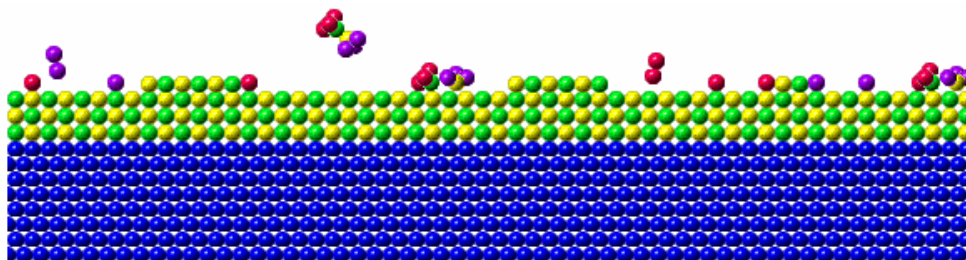
7.35. ábra

Ti-B-N nanoréteg jellemzői

Jellegzetes CVD-alkalmazások:

- védőbevonatok:
 - keményfém szerszámok (forgácsoláshoz),
 - hideg- és melegalakító szerszámok,
 - korróziós közegben működő gépelemek,
 - súrlódó párok;
- félvezető kristályok előállítása;
- integrált áramkörök, optoelektronikai alkatrészek, innovatív szenzorok;
- katalizátorok;
- finom fém- és kerámiaporok, nanotechnológiai alapanyagok.

A **7.36. ábra** a rétegképződés folyamatát szemlélteti.



7.36. ábra
CVD rétegépítési folyamata

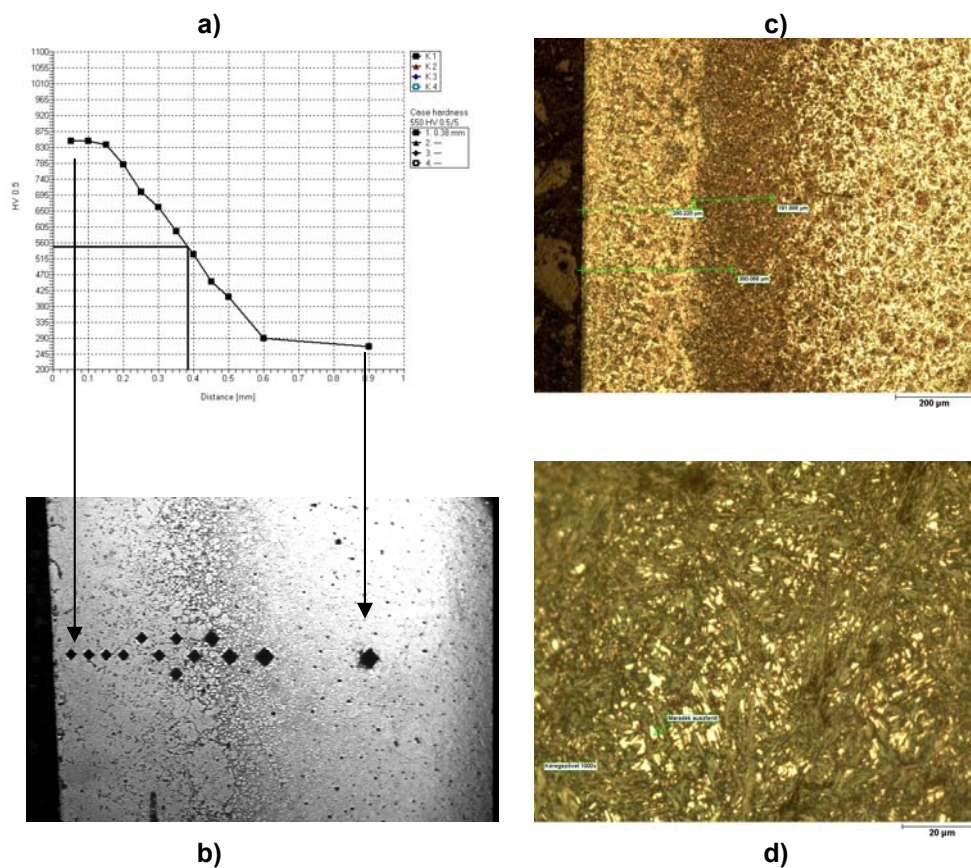
Cementált kéreg vizsgálata

C15 anyag cementált kérgére vonatkozóan:

- a **7.37/a. ábra** a keménységlefutást szemlélteti, ami szerint a kéregmélység 550 HV0,5-nél 0,38 mm;
- a **7.37/b. ábrán** a keménységmérési lenyomatok láthatók;
- a **7.37/c. ábra** a teljes kéreg szövetszerkezetét mutatja;
- a **7.37/a. ábrán** a mag szövetszerkezete figyelhető meg.

Következtetésként megállapítható, hogy a cementálási hőmérséklet túl magas volt, a kéregben kb. 20% maradék (reszt) ausztenit van, a mag szövete durva.

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

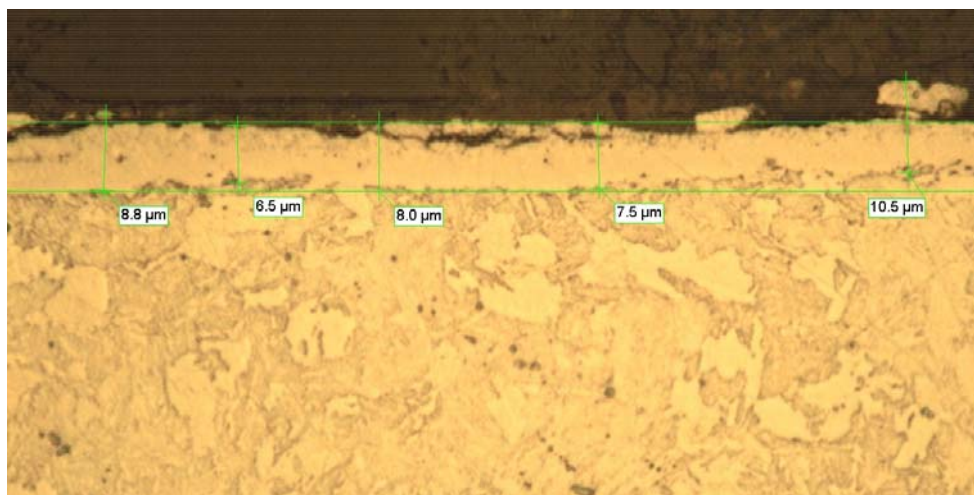


7.37. ábra
Cementált kéreg vizsgálata
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

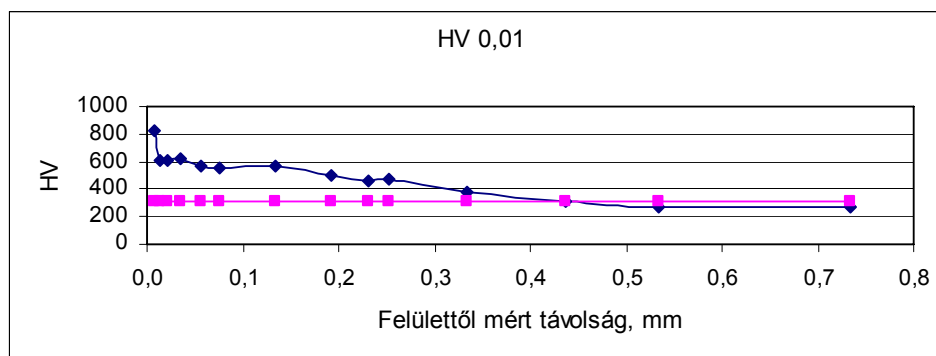
Nitridált kéreg vizsgálata

A **7.38/a. ábra** mutatja a nitridekben dús réteg és a diffúziós zóna szövetszerkezetét. A **7.38/b. ábrán** a keménységlefutás látható. HV0,01 méréssel a nitridekben dús réteg keménysége is mérhető (822 HV0,01). Definíció szerint a kéregvastagság az alapanyag-keménység + 50 HV-nél mért távolság (266+50 = 316 HV, $t = 0,44$ mm).

Felületkezelte rétegek vizsgálata, minősítése



a)



b)

7.38. ábra

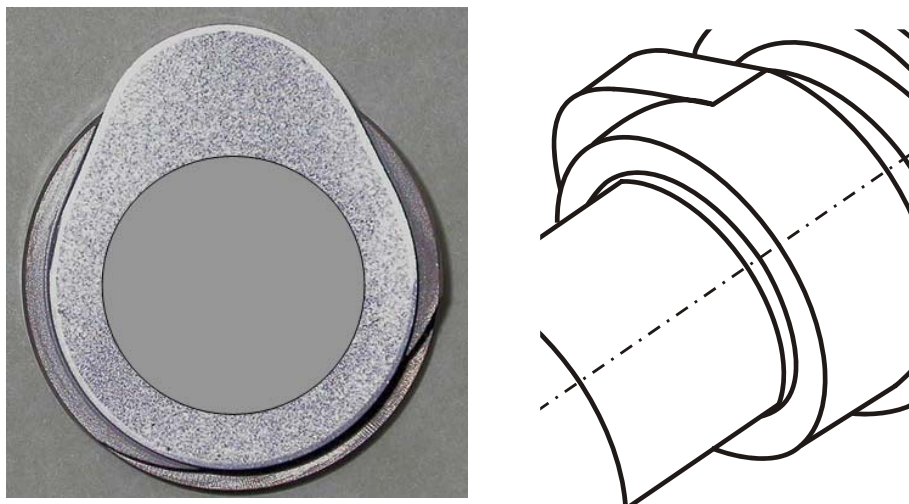
Nitridált kéreg vizsgálata

(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Vezérműtengely duplex felületkezelése

Az elektronsugaras (ES) edzésre szánt, előzetesen nemesített vezérműtengelyen (7.39. ábra) kezelés előtt a kérget nitridálták, azaz duplex felületkezelésre került sor. A lézersugárhoz hasonlóan az elektronsugár is jól alkalmazható felületi edzésre, vagyis a két hőforrás, illetve eljárás részben konkurens egymásnak. Az elektronsugaras felületedzés főbb technológiai sajátosságai:

- a munkadarabot vákuumkamrába kell helyezni;
- a sugárnyaláb intenzitása jól szabályozható, a felület pásztázható;
- tiszta, jól meghatározott technológiai körülmények hozhatók létre.

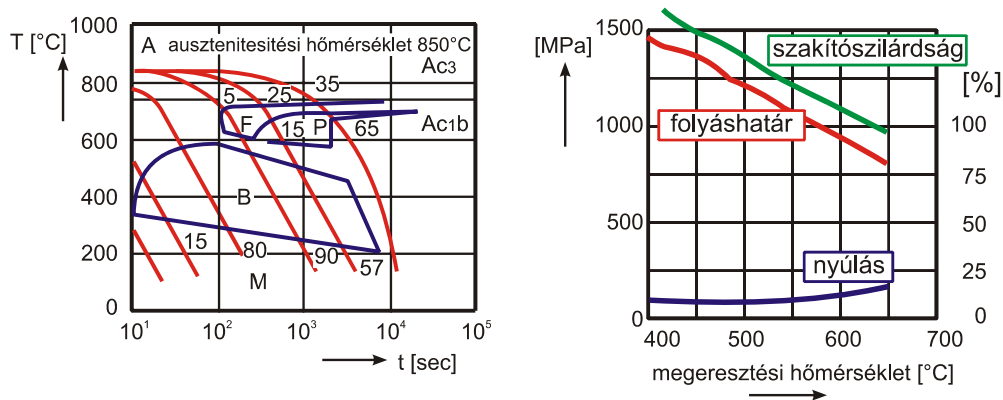


7.39. ábra

Kezelendő vezérműtengely

(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

A vezérműtengely alapanyaga 50CrV4 jelű nemesíthető szerkezeti acél, melynek összetétele a következő: C=0,50%; Si=0,25%; Mn=0,90%; Cr=1,1%; V=0,12%. Nemesítéskor a 850 °C-on végzett ausztenitesítést olajban hűtés követte (7.40. ábra), majd a megeresztés igény szerint, a megeresztési diagram alapján történt ~280 HB keménységre.

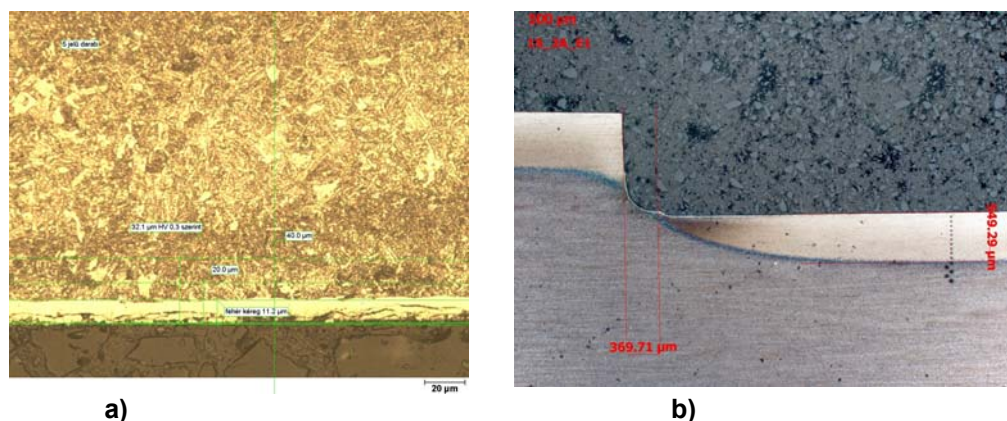


7.40. ábra

50CrV4 acél átalakulási és megeresztési diagramja

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

A gáznitridálást követően a keménység a felületen min. 500 HV_{0,3}, az alapanyag keménység + 50 HV értéknél mért kéreg vastagság 0,2 + 0,2 mm. A szövetszerkezet „fehér réteg”-ének vastagsága min. 8 µm (7.41/a. ábra).



a)

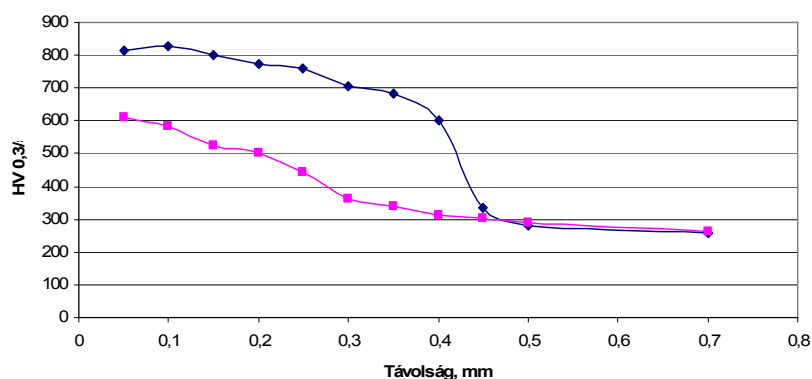
b)

7.41. ábra

Nitridált és elektronsugarasan edzett kéreg vastagsága
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Az elektronsugaras edzés a vezérlőbűtykökön történt, ahol a felületi keménység min. 650 HV₁₀; az adott keménységhez tartozó mélység és maratott csiszolaton meghatározható réteggeometria (7.41/b. ábra) az 550HV-re előírt mélység: $t(HV550) \geq 0,4$ mm.

A két kezelés együttes hatásának eredményét a 7.42. ábra mutatja. Az alsó görbe a nitridált kéreg keménységeloszlását, a felső görbe a nitridálás + ES edzés utáni keménységlefutást mutatja.



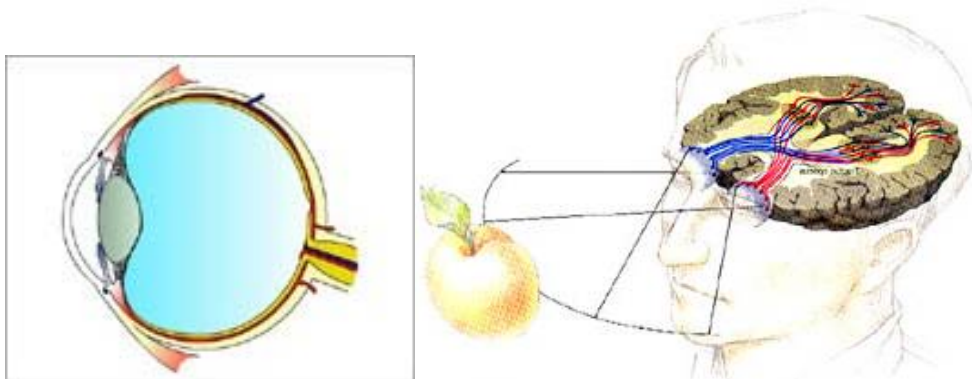
7.42. ábra

Nitridált és elektronsugarasan edzett kéreg keménység-eloszlása
(Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék)

Az ES edzés után a keménység 0,4 mm mélységben biztosan meghaladja az előírt 550 HV-t, a felületen pedig sokkal nagyobb, mint 650 HV.

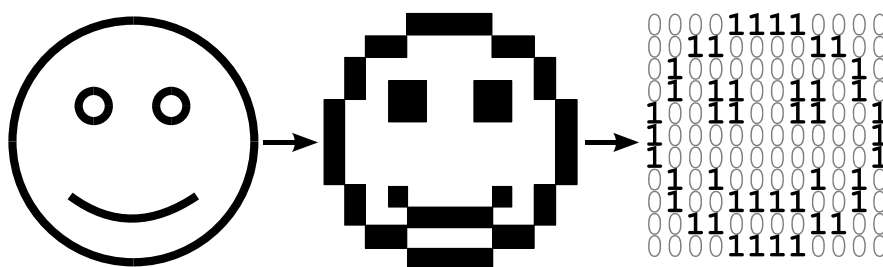
Optikai vizsgálatok és digitális képalkotás

A szemünk (7.43. ábra I.) a legfontosabb optikai vizsgáló „eszközünk”, de sajnos felbontóképessége behatárolt, bizonyos idő után elfárad, idősebb korban látásélessége romlik, illetve kortól függetlenül is megbetegedhet vagy fogyatékosná válhat (színtévesztés, farkasvakság, csőlátás stb.). Mindezekén túl a képi információt, illetve annak használhatóságát, megbízhatóságát az egyes ember szubjektuma is befolyásolja.



7.43. ábra (I.)
Az emberi szem és a látás
(Czinege – Csizmazia 2007)

A digitális képalkotás (7.43. ábra II.) objektív, fáradtságtól nem befolyásolt eredményt ad, és része a mesterséges intelligenciának.



7.43. ábra (II.)
Digitális képalkotás

Digitális felvétel létrehozása és értékelése:

- optikai leképezés;

Felületkezelt rétegek vizsgálata, minősítése

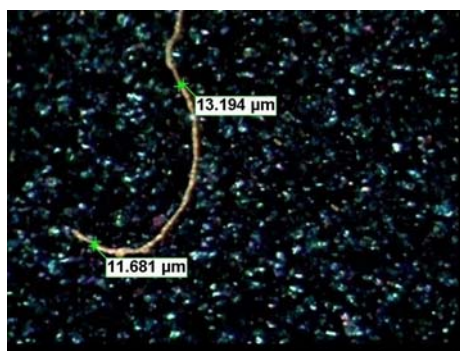
- digitalizálás CCD vagy CMOS chippel, ami több millió apró fényérzékeny cella együttese; ezek a cellák kizárólag fényerősséget képesek érzékelni, színeket nem;
- színek megjelenítése mikrolencsékkel és színszűrőkkel, mivel mindegyik cella csak az eléje helyezett színszűrőn áthaladó fény erősségét érzékeli, így az alapszínek kombinációja adja a színes képet;
- a képek minőségi jellemzőinek megadása: pixelek száma, színmélység (szürkeségi szintek);
- képfeldolgozás, mely a vizsgálandó objektumtól független, általánosan alkalmazható technika.

A képelemzés folyamata:

- a képek érzékelése és rögzítése;
- digitális előfeldolgozás, a lényegi információk kiemelése;
- a vizsgálni kívánt objektumok megkülönböztetése, kiemelése a háttérből;
- a képeken átalakítások, képelemzési műveletek elvégzése;
- célra orientált mérések (pl. területarány, alakjellemzők, méretek stb. meghatározása);
- az eredmények értelmezése.

Sztereomikroszkópos vizsgálat

A sztereomikroszkóp egy objektív és két szemlencse segítségével hoz létre térhatású képet, nagyítása 5–200-szoros határok közé esik. Segítségével felületi hibák, megmunkálási nyomok, töretek tanulmányozhatók. A digitális képen mérések is elvégezhetők. A **7.44. ábrán** lakkozott felület hibái (műanyag alapon) és fémgőzölt felületen észlelhető szennyeződés (műanyag alapon) láthatók.



[Szennyeződés, cérnaszál]



7.44. ábra

Sztereomikroszkópos felvételek
(Czinege – Csizmazia 2007)

Irodalom

1. Abboud, J. H. – Rawlings, R. D. – West, D. R. F.: *Functionally gradient layers of Ti-Al Based alloys produced by laser alloying and cladding*. Materials Science and Technology, 10. k. 5. sz. 1994. 414–419.
2. Aksoy, M. – Esin, A.: *Improving the mechanical properties of structural carbon steel by dual-phase heat treatment*. Journal of Materials Engineering, Vol. 10. 1988. 281–287.
3. Allan Sanderson: *Electron Beam Welding Enters Fourth Decade*. Welding Institute Bulletin, 1–2. 1990. 9–13.
4. Artinger István – Kator Lajos – Romvári Pál: *Fémek technológiája*. (Szerk. Gillemot László.) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
5. Artinger István – Korach Marcell – Naderi Habib: *Felületi réteg tulajdonságainak megváltoztatása elektronsugaras helyi átolvasztással*. Gép, XXXVII. évf. 5. sz. 1985. május. 176–179.
6. Artinger István – Korach Marcell – Pahomova, N. A.: *Szerkezeti és szerszámmanyagok kezelése nagy energiasűrűségű hőforrásokkal*. Gépgyártástechnológia, XXVI. évf. 10. sz. 1986. október, 453–460.
7. Artinger István – Korach Marcell: *Szerszámacélok helyi ötvöztetése*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 121. évf. 12. sz. 530–537.
8. Artinger István: *A fázisátalakulások és a tulajdonságok változása a nagy energiasűrűségű felületkezeléseknél*. Gépgyártástechnológia, XXVIII. évf. 7. sz. 1988. július. 327–332.
9. Artinger István: *Az anyagtudomány szerepe a szerszámok élettartamának növelésében*. Akadémiai doktori értekezés, BME MTAI, 1990.
10. Artinger István: *Szerszámacélok és hőkezelésük*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
11. Artinger István: *Szerszámmanyagok fejlesztésének tendenciái*. Gép, XLVII. évf. 1996. 10. sz. 7–8.
12. Artinger, I. – Korach, M. – Tarasowa, T.: *Local Alloying of Tool Steels*. 2nd International Seminar Surface Engineering With High Energy Beams – Science and Technology, Lisbon, September 25–27, 1989. 13.
13. Ashby, M. F. – Easterling, K. E.: *The transformation hardening of steel surfaces by laser beams I. Hypoeutectoid steels*. Acta Metall, Vol. 32. 1984. 1935–1948.
14. Ashby, M. F.: *Materials Selection in Mechanical Design*. Pergamon Press, Oxford, 1993.
15. Ashby, Michael F. – Jones, David R. H.: *Engineering Materials 1., An introduction to their Properties and Applications*. International Series on Materials Science and Technology, Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, 1993.
16. Bagyinszki Gyula – Artinger István: *Felületkezelési rétegek törésmechani-*

- kai jellemezhetősége*. IV. Országos Törésmechanikai Szeminárium, Miskolc–Lillafüred, 1991. április 10–12. 97–108.
17. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Felületkezelési eljárások több szempontú rendszerezése*. XIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2008.
 18. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Anyagtulajdonság- és technológiai paraméter-meghatározó módszerek értékelése*. XII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2007. 5–10.
 19. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Bevezetés az anyagtechnológiák informatikájába*. Műszaki Tudományos Füzetek. EME, Kolozsvár/Cluj, 2007.
 20. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő – Kovács Tünde: *Alakító szerszámacélok károsodásállóságának javítása felületkezeléssel*. XI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2006. 9–14.
 21. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Lézeres anyagtechnológiák energiasűrűségi jellemzői*. X. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2005. 75–80.
 22. Bagyinszki Gyula – Felde Imre – Réti Tamás: *Keménységbecslési eljárás acélok lézeres felületedzésének tervezéséhez*. Jubilee International Conference, Budapest, 1999. 235–240.
 23. Bagyinszki Gyula – Kovács Mihály: *Gépipari alapanyagok és félkész gyártmányok – Anyagismeret*. Nemzeti Tankönyvkiadó – Tankönyvmester Kiadó, Budapest, 2001.
 24. Bagyinszki Gyula – Kovács Mihály: *Gépipari alapanyagok és félkész gyártmányok – Gyártásismeret*. Nemzeti Tankönyvkiadó – Tankönyvmester Kiadó, Budapest, 2002.
 25. Bagyinszki Gyula – Kovács Tünde – Kálazi Zoltán – Tom Bell: *Acélok duplex felületedzése*. Gép, LII. évf. 9. sz. 2001. 16–22.
 26. Bagyinszki Gyula – Réti Tamás – Felde Imre: *Edzett acél felületi keménység-eloszlásának becslése*. Bányászati és Kohászati lapok, 1999. 2–3. sz. 78–80. 119–123.
 27. Bagyinszki Gyula – Réti Tamás – Kálazi Zoltán – Felde Imre – Yue Sun – Tom Bell: *Duplex surface treatment of a 40CrMnMo7 steel based on the combination of plasma nitriding and laser hardening*. 14th International Conference on Surface Modification Technologies, 11-13 September, Paris, 2000.
 28. Bagyinszki Gyula – Réti Tamás: *Felületi kéregkeménység becslése acél gyors ausztenítését és hűtését követően*. microCAD '98 Nemzetközi Számítástechnikai Tudományos Konferencia, C: Anyagtudomány és Technológia, Miskolc-Egyetemváros, 1998. február 25–26. 143–145.
 29. Bagyinszki Gyula: *Anyagismeret és minősítés*. (Főiskolai jegyzet) Bánki Donát Műszaki Főiskola, Budapest, 2004.
 30. Bagyinszki Gyula: *Elektronsugaras kezelés a szerszámacélok felületötvöztetésére*. (Electron beam treatment for surface alloying of tool steels). XIV.

- Kohászati Anyagvizsgáló Napok, Posztterek 7. Balatonaliga, 1991. május 7–9.
31. Bagyinszki Gyula: *Felületkezelés a gépészmérnök-képzésben*. XV. Hőkezelő Országos Konferencia, Dunaújváros, 1993. október 19–21. 102–105.
32. Bagyinszki Gyula: *Forgács nélküli anyagtechnológiák*. (Főiskolai jegyzet) Bánki Donát Műszaki Főiskola, Budapest, 1999; 3. átdolgozott kiadás: *Gyártásismeret és technológia*. Budapesti Műszaki Főiskola, Budapest, 2004.
33. Bagyinszki Gyula: *Lézerek alkalmazásának technológiai és biztonságtechnikai szempontjai*. XI. Nemzetközi és IV. GTE-MHTE-DVS Hegesztési Konferencia, Budapest, 2004. augusztus 23–26. 14–29.
34. Bagyinszki Gyula: *Nagy energiasűrűséggel kezelt felületi rétegek tulajdonságbecslése*. (Kandidátusi értekezés) BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Tanszék, 1997.
35. Bagyinszki Gyula: *Nagy energiasűrűségű hegesztési eljárással készített kötések hegeszthetőségének kérdései*. (Hegesztő szakmérnöki diplomaterv) BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Intézet, 1993.
36. Bagyinszki Gyula: *Szerszámanyagok és hőkezelésük*. XVI. Hőkezelő Országos Konferencia, Székesfehérvár, 1995. október 10–12. 32–35.
37. Bagyinszki Gyula: *Szerszámélet-tartam-tényezők a nagy energiasűrűségű felületkezelések tükrében*. XIV. Hőkezelő Országos Konferencia, Kecskemét, 1991. október 7–9. 235.
38. Bagyinszki, Gyula: *Wear Resistance Characterization of Surface Treatment Layers*. Eurotrib'93 – 6th International Congress on Tribology, Volume 3. Budapest, August 30 – September 2, 1993. 350–353.
39. Bakondi Károly – Bartos József – Buza Gábor – Győri József – Kiss Gyula – Takács János – Udvardi Tibor: *Fémek felületi tulajdonságainak átalakítása koncentrált energiájú eljárásokkal*. Gépgyártástechnológia, XXIX. évfolyam, 8. szám, 1989. augusztus, 340–346.
40. Bakondi Károly – Konczos Géza (szerk.): *Nagy energiasűrűséggel végzett megmunkálási eljárások*. MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest, 1990.
41. Baránszky-Jób Imre (szerk.): *Hegesztési kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
42. Bárczy Pál: *Anyagismeret*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
43. Barralis, J. – Maeder, G.: *Precis de métallurgie: élaboration, structures-propriétés et normalisation*. Afnor-Nathan, Paris, 1983.
44. Bauer Ferenc: *Hegesztési eljárások*. Egyetemi jegyzet. Szerkesztette és kiegészítette Bagyinszki Gyula; Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
45. Becker László – Trampus Péter: *Hőfáradás és a melegalakító szerszámok károsodása*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat 115. évfolyam, 3. szám, 107–112.
46. Bedford, G. M.: *Friction surfacing for wear applications*. Metals and Materials, 6. k. 11. sz. 1990. 702–705.

Irodalom

47. Bell, T. – Sun, Y.: *The principles and mathematical modelling of duplex plasma surface engineering systems of steels*. Proceedings of the 10th Congress of the IFHT, Brighton, 1-5 September 1996. IOM Communications Ltd. 1999. 313–335.
48. Bell, T.: *Surface engineering – past, present and future*. Surface Engineering, 6. 1990. 31–40.
49. Benkovics Ferenc: *A robbantásos plattírozás elméleti alapjai*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 124. évfolyam, 9. szám, 1991. szeptember hó 362–367.
50. Benninghof, H.: *Anwendungsvisionen neuer Werkstoffe. Werkstoffe für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts*. Technische Rundschau Transfer, 87. k. 39. sz. 1995. szept. 29. 36–39.
51. Béres Lajos – Komócsin Mihály: *Acélok, öntöttvasak javító- és felrakó-hegesztése*. Monteditio Kft, 1992.
52. Bergmann, H. W. – Damaschek, R.: *Laser Surface Heat Treatment of Tools*. "Laser Assisted Net Shape Engineering", Proceedings of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems – LANE'94 Erlangen, October 12–14., 1994. Vol. I. 279–294.
53. Bergmann, H. W. – Müller, D. – Endres, T. – Damaschek, R. – Domes, J. – Bransden, A. S.: *Industrial applications of surface treatments with high power lasers*. Proceedings of Second ASM Heat Treatment and Surface Engineering Conference in Europe, 1–3 June, Dortmund, 1993, Materials Science Forum, Vols. 163–165, Trans Tech Publications, 1994. 377–404.
54. Bertóti Imre – Marosi György – Tóth András (szerk.): *Műszaki felülettudomány és orvosbiológiai alkalmazásai*. B+V Lap- és Könyvkiadó, Budapest, 2003.
55. Bertóti Imre: *Felületvizsgálat röntgen-fotoelektron spektroszkópiával (XPS-ESCA)*. Doktori tanfolyami jegyzet, 1997.
56. Bitay Enikő: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Műszaki Tudományos Füzetek. EME, Kolozsvár/Cluj, 2007.
57. Bitay, Enikő: *Ceramic Particle Dispersion Analysis in Laser Surface Alloying*. Solidification and Gravity. IV. Materials Science Forum, published by Trans Tech Publications Ltd, CH-8707 Uetikon-Zürich, Switzerland, 2005. 295–300.
58. Bitay Enikő: *Tratament superficial cu laser al oțelurilor cu conținut redus de carbon*. Teză de doctorat, IPC-N, Kolozsvár/Cluj, 2002. (Doktori értekezés)
59. Bitay Enikő: *Lézeresen kezelt felületek kopásállóvizsgálata*. VI. FMTÜ, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2001. 111–118.
60. Bitay Enikő: *Kerámiaszemcsék diszpergálása lézeres felületötvöztetésnél*. IV. FMTÜ, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 1999. 169–172.
61. Bitay, Enikő – Roósz, András – Búza, Gábor: *CO₂ laser surface-alloying steel by dispersion of carbide-powders*. Solidification and Gravity III, Materials Science Forum, Miskolc–Lillafüred, Hungary, 1999.
62. Bitay, Enikő – Roósz, András: *Investigation of Phenomenon's Taking Place*

- in Laser Surface Alloying Steel of WC*. Solidification and Gravity IV. Materials Science Forum, published by Trans Tech Publications Ltd, CH-8707 Uetikon-Zürich, Switzerland, 2005. 301–306.
63. Bitay Enikő – Roósz András: *Acélfelület keménységének növelése lézeres felületátolvasztással*. III. FMTÜ, EME, Kolozsvár/Cluj, 1998. 253–256.
 64. Bitay Enikő – Roósz András: *Lézeres felületátolvasztás folyamatának elemzése*. IX. FMTÜ, EME, Kolozsvár/Cluj, 2004. 275–286.
 65. Bitay Enikő – Rowshan Reza: *Lézeres felületkezelés technológiai paramétereinek folyamatos változtatásának szimulációja*. MicroCAD 2005, Nemzetközi Tudományos Konferencia 2005. március 10–11. Miskolci Egyetem, L szekció, 2005. 7–12.
 66. Bloyce, A. - Sun. Y. – Li, X. Y.: *Duplex thermochemical processing of M50 Ni L for gear applications*. Heat treatment of Metals, 1999. 2. 37–41.
 67. Boving, H. J. – Hintermann, H. E. – Julia, C.: *Characterisation of CVD and PVD Coatings*. Materials of the 7th International Congress for Heat Treatment of Materials, Volume VI. Moscow, December 11–14, 1990. 63–73.
 68. Budinski, Kenneth: *Engineering materials: Properties and Selection*. Reston Publishing Company, Reston, 1979.
 69. Burista Ferenc – Nánai László – Vajtai Róbert – Hevesi Imre: *A lézeres hőkezelés fizikai alapjai*. Gépgyártástechnológia, XXIX. évf. 4. sz. 1989. április, 181–187.
 70. Búza Gábor – Kálazi Zoltán: *Jövőnk anyagai, technológiái*. Bányászati és Kohászati Lapok, Budapest, 1995. 128. sz. 361–365.
 71. Búza Gábor – Bakondi Károly – Kiss Gyula – Takács János: *A plazma por-szórás alapjai, lehetőségei*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 124. évf. 10. sz. 1991. október, 419–423; Gép, XLIII. évfolyam, 11–12. szám, 1991. november–december, 413–417.
 72. Búza Gábor – Kálazi Zoltán: *Új lehetőségek hazánkban a lézeres megmunkálás területén*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 128. évf. 9. sz. 1995. szeptember, 361–365.
 73. Búza Gábor – Takács János: *A lézertechnológiai kutatások eredményei*. I. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 127. évf. 3–4. sz. 1994. március–április, 153–157.
 74. Búza Gábor: *Lézersugaras felületötvöztetés*. ILAS – 3. Ipari Lézer Alkalmazási Szeminárium, Budapest, 2006.
 75. Connor, Leonard P. (ed.): *Welding Handbook*. Eight Edition – Volume 1, Welding Technology, American Welding Society, Miami, 1987.
 76. Costa, A. R. – Domingues, R. P. – Ibanez, R. A. P. – Vilar, R. M.: *Laser Surface Melting: a Microstructural Study*. Materials of the 7th International Congress for Heat Treatment of Materials, Moscow, December 11–14, 1990, Volume VI., p. 50–55.
 77. Csokán Pál: *Felületnemesítés fémbevonatokkal*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.

Irodalom

78. Czichos, H.: *Werkstofftechnik als Basis industrieller Produkte*. Stahl und Eisen, 114. k. 12. sz. 1994. dec. 15. 63–70.
79. Czichos, Horst és társai (szerk.): *Hütte: A mérnöki tudományok kézikönyve*. D fejezet: *Szerkezeti anyagok* (szerző Horst Czichos), Springer Hungarica Kiadó Kft., Budapest, 1993.
80. Czinege Imre – Csizmazia Ferencné: *Digitális optikai mérések az anyagvizsgálatban*. V. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia, Eger, 2007.
81. Davies, D. P.: *Duplex hardening: an advanced surface treatment technique combining nitriding and carburising*. Heat treatment of Metals, Vol. 18, 1991. 4. 97–104.
82. Dearnaley, G.: *Historical perspective of metal implantation*. Surface and Coating Technology, 65. k. 1–3. sz. 1994. júl. 1–6.
83. Domokos József: *Korszerű felületvédelmi rendszerek*. BME Mérnökto-vábbképző Intézet, Budapest, 1984.
84. Donțu, O.: *Tehnologii de prelucrare cu laser*. Ed. Tehnică, București, 1985.
85. Dorka Imre – Kreisz István: *Koncentrált energiák alkalmazása az anyagmegmunkálásban*. Gépgyártástechnológia, XXXVII. évf. 3. sz. 1997. március, 35–41.
86. Dutta Majumdar, J. – Ramesh Chandraa, B. – Galunb, R. – Mordikeb, B.L.– Mannaa, I.: *Laser composite surfacing of a magnesium alloy with silicon carbide*. Composites Science and Technology 63. 2003. 771–778.
87. Eagar, T. W.: *Electron Beam and Laser Beam Materials Processing in Japan*. Welding Journal, July 1986. 19–31.
88. Edward, Lyndon – Endean, Mark: *Materials in Action Series Manufacturing with Materials*. Open University, 1990.
89. Egami, A. – Koikawa, A. – Harada, K.: *Trends in cutting tool materials in Japan*. Metal Powder Report, 47. k. 4. sz. 1992. 34–38.
90. Elizavetin, M. A. – Szatel, E. A.: *Élettartamnövelés technológiai eljárásokkal*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1972.
91. Felde, I. – Kohlheb, R. – Búza, G. – Verő, B. – Réti, T.: *Microstructure and Hardness Prediction in Laser Heat-Treated Steels Using Computer Simulation*. Surface Modification Technologies XI (Edited by T. S. Sudarsham), The Institute of Materials, London, 1998.
92. Fóti Ernő: *Elektronotechnológiák*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
93. Frischherz, Adolf – Skop, Paul: *Fémtechnológia*. Alapismeretek 1. B + V Lap- és Könyvkiadó, Budapest, 1993.
94. Fritz, D. – Rudolph, L.: *Characterization of electron beams, the basis for future advancements*. Power Beam Technology, Sept. 1990. 47–59.
95. Gáti József – Horváth László – Kisfaludy Antal – Kovács Mihály – Réger Mihály – Tóth László: *Anyagtechnológia*. II. (Szerkesztette: Kisfaludy Antal), Bánki Donát Műszaki Főiskola, Budapest, 1994.
96. Gáti József (szerk.): *Hegesztési zsebkönyv*. COKOM Mérnökiroda Kft., Miskolc, 2003.

97. Geiger, Manfred – Hoffmann, Peter – Buza Gábor – Takács János: *A lézertechnika és a képlékenyalakítás kapcsolata*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 127. évf. 11–12. sz. 1994. november–december hó, 485–487.
98. Germaud, M. et al.: *The microstructure of rapidly solidified Al-Fe alloys subjected to laser surface treatment*. Acta Metall, 1990. Vol. 38. Nr. 12. 2587.
99. Ginsztler János – Takács János: *Új szerkezeti és szerszáanyagok és gyártási eljárásaik*. Gépgyártástechnológia, XXVIII. évf. 7. sz. 1988. július, 289–296.
100. Gnanamuthu, D. S.: *Laser Surface Treatment*. Optical Engineering, 19, 1980. 783–792.
101. Grange, R. A. – Hribal, C. R. – Porter, L. F.: *Hardness of Tempered Martensite in Carbon and Low-Alloy Steels*. Metallurgical Transactions A, Volume 8A, November 1977. 1775–1785.
102. Grasmе, D.: *Verschleissfeste Schichten auf Aluminium durch „Thermisches Spritzen“*. Schweizer Aluminium Rundschau, 39. k. 1. sz. 1989. 12–15.
103. Greenwald, L. E.: *United Technologies Research Center*. Report R 77-111321-1, 1977.
104. Grum, Janez: *Laser surface hardening*. Volum 2. Materials Science and Technology Series, University of Ljubljana, faculty for Mechanical Engineering, Ljubljana, 2002.
105. Gureyev, Dmitry – Mednikov, Sergey – Shuchostanov, Vladimir – Yamtchikov, Sergey: *Laser Temperature Effect on Surface Layer Characteristics of Tool Steels*. The 5th International Symposium of the Japan Welding Society, Tokyo, April 1990. 281–286.
106. Gyenis László: *A felületbevonó plazmaszórás eljárások virágkora napjainkban*. Hegesztéstechnika, III. évfolyam 3. szám, 1992/3. 47–51.
107. Gyenis László: *Korszerű felületvédelem nagy energiájú termikus szórással*. Gépgyártástechnológia, XXXII. évfolyam, 7–8. szám, 1992. július–augusztus, 341–343.
108. Hancock, J. R.: *Improving coating performance through steel surface treatment*, Materials Performance, 29. k. 8. sz. 1991. 35–41.
109. Hannig, F. C.: *Anyag és hegesztéstechnológia a szerszámgépgyártásban*. Hegesztéstechnika, VII. évf. 1996/4. 40–48.
110. Harmath József (szerk.): *Mérési gyakorlatok*. (Középiskolai tankönyv) – 3. fejezet: Anyagvizsgálati alpmérések (84–140), szerzők: Bagyinszki Gyula – Tóth László; KIT Képzőművészeti Kiadó és Nyomda Kft., Budapest, 1999.
111. Haskó Ferenc (szerk.): *Fémes anyagok védelme kopás ellen*, Ipari Technológiai Intézet, Budapest, 1988
112. Heine, B.: *Thermisch gespritzte Schichten*. Metall, 49. k. 1. sz. 1995. 51–57.

Irodalom

113. Hiroshi Maruo: *Recent Advances in Laser Material Processing in Japan*. The 5th International Symposium of the Japan Welding Society, Tokyo, April 1990. 233–238.
114. Hluchý, Miroslav és kollektívája: *Gépgyártástechnológia. Félkészgyártmányok. A megmunkálás alapjai*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.
115. Hornbogen, Erhard: *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik, Metallen*. Polymer- und Verbundwerkstoffen, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1991.
116. Ion, J. C. et al.: *Laser transformation hardening of low alloy hypoeutectoid steel*. Material Science and Technic, 1992. Vol. 8. 799.
117. John E. Harry: *Ipari lézerek és alkalmazásuk*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
118. Joundi, H.: *Reliable coatings via plasma arc spraying*. Advanced Materials and Processes, 134. k. 6. sz. 1988. dec. 41–44.
119. Katsamas, Anthony I. – Zervaki, Anna D. – Haidemenopoulos, Gregory N.: *Laser-beam surface transformation of hypoeutectoid Ck-60 steel*. Steel Research 68, No. 3. 1997. 119–124.
120. Kegel. K. (szerk.): *Villamos hőtechnikai kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
121. Keizoh Honda – Yoshinobu Makino – Yoshitaka Yuasa: *Application of High Power Laser Cladding with Powder Feeding System*. The 5th International Symposium of the Japan Welding Society, Tokyo, April 1990. 269–275.
122. Kisfaludy Antal – Réti Tamás – Tóth László: *Anyagtechnológia*. I. (Szerkesztette: Kisfaludy Antal), Bánki Donát Műszaki Főiskola, Budapest, 1994.
123. Kocsisné dr. Baán Mária: *Lézertechnológiák alkalmazása a műszaki felülettudomány terén*. Oktatási segédlet, Miskolc, 1996.
124. Komócsin Mihály: *Gépipari anyagismeret*. Cokom Kft., Miskolc, 1995.
125. Korach Marcell: *Elektronsugaras helyi olvasztás és hőkezelés hatása néhány szerszámacél tulajdonságaira*. Kandidátusi értekezés, BME MTAI, 1986.
126. Koster, William P.: *Machining*. Advanced Materials & Processes, 1/90, 67–68, 83–84.
127. Koszmacsev, I. G.: *Gépgyártástechnológia*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
128. Kovács Tünde: *Szerszámanyagok kopási tulajdonságainak vizsgálati lehetőségei golyó/sík elvű berendezéssel*. Gyártóeszközök – Szerszámok, szerszámgépek, Budapest, 2008/1. 52–55.
129. Kovács, T. – Dévényi, L.: *The effect of microstructure on the wear phenomena*. Material Science Forum, Vols. 537–538. Trans. Tech. Publications Switzerland, 2007. 397–404.
130. Kovács, T.: *Wear test method of metal surface*. Proceedings of Third Conference on Mechanical Engineering, Vol. I. 2002. 204–208.
131. Kozma Mihály: *Tribológia*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.

132. Kron, Petra Britt – Dahl, Winfried – Bleck, Wolfgang: *Characterization of laser-beam surface treated cold and hot working steels*. Steel Research 68 No. 4. 1997. 186–190.
133. Kuharev, B. Sz. – Lizák, J. – Mironovics, V. V.: *A termokémiai hőkezelésekkel kialakított védőbevonatok előállítása és gyakorlati alkalmazásuk*. Gépgyártástechnológia, XXXI. évf. 5. sz. 1991. május, 202–203.
134. Laufer Lídia – Haskó Ferenc: *Lézer ipari alkalmazásának lehetőségei*. Gépgyártástechnológia, XXIX. évf. 11. sz. 1989. november, 523–526.
135. Li, W.-B. – Easterling, K. E. – Ashby, M. F.: *Laser transformation hardening of steel – II. Hypereutectoid steels*. Acta Metall. Vol. 34, No. 8, 1986. 1533–1543.
136. Lizák József: *A termokémiai kezelések szerepe és helye a gépgyártásban*. Gépgyártástechnológia, XXXII. évf. 5–6. sz. 1992. május–június, 261–263.
137. Lugscheider, E. – Bolender, H. – Krappitz, H.: *Laser Cladding of Paste-bound Hardfacing Alloys*. Proceedings of Surface Modification Technologies, V. Int. Conference, 2-4 September, 1991, Birmingham, Ed. by T.S. Sudarshan, J.F. Braza, The Institute of Materials, London, 1992. 371–381.
138. Marton Árpád: *Áthúzórendszerű tűzi horganyzással előállított bevonatok vizsgálata*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat 126. évf. 10–11. sz. 1993. október–november hó, 364–368.
139. Masumoto, I. – Yamazaki, H. – Kimura, S. – Tongu, Y. – Nezaki, K. – Morishige, M. – Kutsina, M.: *A lézeres fémmegmunkálás kísérleti tanulmányozása*. 2. GTE/DVS Közös Konferencia – 11. GTE Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Budapest, 1992. június 15–18. 162–178.
140. Miskolczi Katalin – Laufer Lídia – Seegner Győző: *Ipari CO₂ lézer alkalmazások az Ipari Technológiai Intézetben*. Hegesztéstechnika, III. évf. 1. sz. 1992/1. 16–19.
141. Mordike, B. L.: *State of the art of surface engineering with high energy beams*. 2nd International Seminar Surface Engineering With High Energy Beams – Science and Technology, Lisbon, September 25-27, 1989. 13–25.
142. Mordike, B. L.: *Surface Hardening of Structural Parts*. "Laser Assisted Net Shape Engineering". Proceedings of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems – LANE'94 Erlangen, October 12-14. Vol. I. 1994. 227–242.
143. Nagy Ernő: *A laser*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
144. Németh Zoltán – Földváry László – Gaál István – Lefler János – Szőke Béla: *A termokémiai kezelések fizikai, kémiai alapjai, berendezései és mérő-, szabályzó rendszerei*. Gépgyártástechnológia, XXIV. évf. 5. sz. 1984. május, 203–212.
145. Nestler, M. C. – Spies, H.-J. – Hermann K.: *Production of duplex coatings through process combination thermal spraying/nitriding*. Proceedings of the 10th Congress of the IFHT, Brighton, 1-5 September 1996. IOM Communications Ltd 1999. 356–366.

Irodalom

146. Nichols, J. R. – Stephenson, D. J.: *High temperature coatings for gas turbines*. Metals and Materials, 7.k. 3. sz. 1991. 156–162.
147. Niebel, Benjamin W. – Draper, Alan B.– Wysk, Richard A.: *Modern Manufacturing Process Engineering*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1989.
148. Oestmann, Carsten – Adam, Volker: *Surface Hardening of Hot Working Steel by Electron Beam Processing* The 5th International Symposium of the Japan Welding Society, Tokyo, April 1990. 301–308.
149. Oldewurtel, A. – Eversberg, K. R.: *CVD-Beschichtung*. Härtereitechnische Mitteilungen, 44. k. 1. sz., 1989. jan/febr, 25–31.
150. Orgován László (főszerk.): *Felületvédelmi kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989.
151. Orlich, J. et al.: *Atlas zur Wärmebehandlung von Stähle*. Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, 1972.
152. Pálmai Zoltán – Dévényi Miklós – Szőnyi Gábor: *Szerszámanyagok*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1991.
153. Parsons, G.H. – Man, H.C.: *Laser Surface Engineering – an Overview in Surface Engineering*. Past-present-future, Springer Verlag, 3/1985, 1985. 330–343.
154. Pickard, A. C.: *Component lifing*. Materials Science and Technology, September 1987. Vol. 3. 743–749.
155. Pobol, I. L.: *Improvement of Properties of Metal and Alloy Parts by Electron-Beam Action*. Materials of the 7th International Congress for Heat Treatment of Materials, Volume VI. Moscow, December 11–14, 1990. 14–23.
156. Prohászka János (szerk.): *Anyagtechnológia*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1987.
157. Rábel György (szerk.): *Gépipari technológusok zsebkönyve*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
158. Réti, T. – Kovács, T.: *A Phenomenological Method for the prediction on damage Accumulation Process under Varying External Conditions*. Materials Science Forum, Vols. 414–415. Transtech Publication, Switzerland, 2003. 317–322.
159. Réti, Tamás – Bagyinszki, Gyula – Felde, Imre: *Modeling of Multiphase Austenite Decomposition during Quenching of Steels*. Achievements in the Mechanical and Materials Engineering, AMME '97, Miskolc-Tapolca, 1–3 December, 1997.
160. Réti, Tamás – Bagyinszki, Gyula – Felde, Imre: *Prediction of Steel Hardness after Rapid Austenitization and Quenching*. Achievements in the Mechanical and Materials Engineering, AMME '97, Miskolc-Tapolca, 1–3 December, 1997.
161. Réti, Tamás – Bagyinszki, Gyula: *Application of Generalized Time-Temperature Parameters for the Prediction of Rapid Austenitization Processes*. 11th Congress of the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering; 4th ASM Heat Treatment and Surface

- Engineering Conference in Europe, Florence, Italy, 19–21 October 1998. Proceeding – Vol. II. 293–300.
162. Réti, Tamás – Horváth, László – Bagyinszki, Gyula: *Prediction of Hardness Decrease Occuring during Non-isothermal Tempering*. 1st International Induction Heat Treating Symposium, Indianapolis, 16–18 September, 1997.
 163. Réti, Tamás – Bagyinszki, Gyula – Felde, Imre – Verő, Balázs – Bell, Tom: *Prediction of as Quenched Hardness after Rapid Austenitization and Cooling of Surface Hardened Steels*. Computational Materials Science 15, 1999. 101–112.
 164. Roberts, George A. – Cary, Robert A.: *Tool Steels*. 4th Edition. American Society for Metals, Ohio.
 165. Romvári Pál – Béres Lajos: *Hegesztőanyag kiválasztása kopásálló felületek felrakóhegesztéséhez*. Hegesztéstechnika, II. évf. 1. sz. 1991. 12–13.
 166. Roósz, A. – Rozsnoki, L. – Teleszky, I. – Uray, Gy. – Sólyom, J. – Gácsi, Z. – Kovács, Á. – Baán, M.: *Modification of hot working steel surface by laser treatment*. The 7th International Conf. on Surface Modification Technology, Niigata, Japan, 1993.
 167. Rowshan, R. – Kocsisné Baán, M.: *Thermal and metallurgical modelling of laser transformation hardened steel parts*. Materials Science Forum, Vols. 537–538. Trans Tech Publication Ltd. 2007. 599–606.
 168. Rozsnoki László: *A lézeres felületkezelés alkalmazásának távlatai. Jövőnk anyagai, technológiái*. Bányászati és Kohászati Lapok, Budapest, 1994. június.
 169. Russel, J. D. (ed.): *Power Beam Technology*. Woodhead Publishing Ltd, Abington Hall, 1991.
 170. Schneider, Marcel: *Laser cladding with powder effect of some machining parameters on clad properties*. Ph.D. Thesis University of Twente Enschede, Netherlands, 1998.
 171. Scholz, E.: *Felületbevonatok készítése porbeles szalagelektrodával, fedett ívű felrakóhegesztéssel*. Hegesztéstechnika, II. évf. 2. sz. 1991/2. 20–25.
 172. Schönwald, B. – Kuhn, J.: *Technologie-Management am Beispiel neuer Werkstoffe*. Technische Mitteilungen Krupp, 2. sz. nov. 1982. 55–68.
 173. Schuöcker, D.: *A nagyteljesítményű lézertechnika alapjai és alkalmazási területei az anyagmegmunkálásban*. Gép, XLII. évf. 9. sz. 1990. szeptember, 321–324.
 174. Schuöcker, Dieter: *A lézeres hegesztés technikája*. Gép XLII. évf. 11. sz. 1990. november, 401–405.
 175. Sebestyén Anita – Nagyné Halász Erzsébet – Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Felületmódosítási eljárások hatása acélok kopásállóságára*. XII. Fia-tal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár/Cluj, Műszaki Tudományos Füzetek – Erdélyi Múzeum-Egyesület kiadványa, 2007. 161–168.
 176. Sekar, J. A. – Kou, S. – Mehrabian, R.: *Metallurgical Transaction* 14A. 1983. 1169.
 177. Sexton, L.: *Laser cladding: Repairing and manufacturing metal parts and*

- tools. Optics and Photonics Technologies and Applications* (T. J. Glynn, ed.), vol. 4876. LaserAge Ltd., 2002.
178. Sinka Vilmos: *Az ionbeültetési felületi kezelés hatása egy titán-ötvözet kisciklusú fáradására*. Gép, XLI. évfolyam, 3. szám, 1990. március, 87–88.
 179. Smith, Fred A.: *Surface Modification*. Advanced Materials & Processes, 1/90. 61–62.
 180. Smith, H. M.: *Rhodium plating – a bright or dim future?* Metal Finishing, 87. 2. sz. 1989. 59–62.
 181. Smóling Kálmán: *Szerszámacélok kézikönyve*. Szabványkiadó, Budapest, 1985.
 182. Steen, W. M.: *Future Tendencies of Surface Engineering with High Energy Density Beams*. 2nd International Seminar Surface Engineering With High Energy Beams – Science and Technology, Lisbon, September 25–27, 1989. 11.
 183. Svéda, M. – Roósz, A. – Búza, G.: *Formation of Al-Si-Pb Monotectic Layer on Al-Si Alloy Surface by Laser Alloying*, Solidification and Gravity '04, Miskolc-Lillafüred, 2004. szeptember 6–10. Materials Science Forum Vols. 473–474, 2005. 527–532.
 184. Szakács György – Dévényi Miklós: *Keményfémek és szuperkemény anyagok alkalmazása*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
 185. Szigeti Ferenc: *Kopásvédelem NiCrBSi ötvözetekből keményforrasztással előállított felületi rétegekkel*. Hegesztéstechnika, V. évf. 1994/3. 33–36.
 186. Szombatfalvy Árpád (szerk.): *A hőkezelés technológiája*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
 187. Szunyogh László (főszerk.): *Hegesztés és rokon technológiák*. Kézikönyv. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007.
 188. Takács J. – Bakondi K. – Sklánitz A.: *Lézertechnika a korszerű gyártásban*. Gépgyártástechnológia, XXXII. évf. 11. sz. 1992. november, 470–471.
 189. Takács János – Buza Gábor: *A lézertechnológiai kutatások eredményei*. II. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 128. évf. 1. sz. 1995. január, 33–35.
 190. Tanju Celiker: *Gyors eljárások funkcionális prototípusok előállítására*. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 127. évf. 9. sz. 1994. szeptember, 388–390.
 191. Teleszki Ilona: *Lézeres felületkezelés*. Tanulmány, MTA Anyagtudományi Kutatócsoport, Miskolci Egyetem, Miskolc, 1996.
 192. Thomas, W. M.: *Solid phase cladding by friction surfacing*. Welding for the Process Industries, April 1988. 101–119.
 193. Tisza, M.: *Physical Metallurgy of Engineers*, ASM International Materials Park, Ohio and Freund Publishing House Ltd. London–Tel Aviv.
 194. Török Tamás: *A legújabb felületbevonó módszerekről*. Gép, XLV. évf. 6. sz. 1993. június, 9–15.
 195. Trafford, D. N. H. – Bell, T. – Megaw, J. H. P. C. – Bransden, A.S.: *Heat Treatment using a high-power laser*. Heat Treating, 1979. 32–38.
 196. Turner Gábor – Gazdag László: *Felületi edzés CO₂ lézerrel*. Korszerű

- technológiák, XXIV. évf. 2. (115.) 1991. 25–30.
197. Uchida, Y.: *Zinc coating developments in Japan*. Materials and Design, 12. 6. sz. 1991. dec. 331–337.
 198. Vadász Emil (szerk.): *TMK-zsebkönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
 199. Vadász Emil: *Gépalkatrészek gyártása és javítása műanyagbevonattal*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
 200. Valasek István: *Anyagok tribológiai tulajdonságai*. Gép, XLI. évf. 2. sz. 1989. február, 54–63.
 201. Valasek István: *Súrlódás és kopás*. Gép, XL. évf. 11. sz. 1988. november, 427–440.
 202. Veas, Georg – Spruzina, Walter: *Edzés nagyteljesítményű lézerrel*. Gép, XLII. évf. 9. sz. 1990. szeptember.
 203. Verő József – Káldor Mihály: *Vasötvözetek fémtana*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
 204. Walker, R. A.: *Duplex and high alloy stainless steels – corrosion resistance and weldability*. Materials Science and Technology, Vol. 4, 1988. 78–84.
 205. Weisheit, A. – Galun, R. – Haude, R.: *Laserrandschichtbehandlung von Aluminium- und Magnesiumwerkstoffen*. Metall, 48. 6. sz. 1994. 455–460.
 206. Wong, Y. C. – Doyle E. D. – Dearnley, P. A.: *In-situ duplex plasma treatments for hardened and tempered alloy steels and their performance in rolling and sliding wear*. Proceedings of the 10th Congress of the IFHT (Brighton, 1-5 September 1996), IOM Communications Ltd 1999. 367–381.
 207. Yoshiaki Arata (ed.): *Plasma*. Electron and Laser Beam Technology, American Society for Metals, Ohio, 1986.
 208. Zenker, Rolf: *Electron Beam Surface Modification – Result and Perspectives*. 2nd International Seminar Surface Engineering With High Energy Beams – Science and Technology, Lisbon, September 25–27, 1989. 53–67.; Materials of the 7th International Congress for Heat Treatment of Materials, Vol. VI. Moscow, December 11–14, 1990. 281–289.
 209. Zsolnai László: *Elektronsugaras hegesztés*. Hegesztéstechnika, VI. évf. 1995/3., 20–23.
 210. *Lézertechnikai célszám*. Korszerű Technológiák XXIV. 1991. 2.
 211. *** *Surface Engineering*. Volume 5. ASM International, The Materials Information Society, Materials Park, USA, 1994.

Irodalom

Surface engineering

Summary

Material and energy- saving more environmental friendly technologies have an increasingly important role in industrial practice. Machining, work load and special requirements have to be related to the product mass at the lowest acceptable volume. This concept is generally met by the surface engineering processes as these enhance the use of cheaper materials with better machinability where the surface damage may be prevented applying wear, corrosion, fatigue resistant surface layers. If no other specific requirements or norms have to be applied, these layers may also improve the surface aspect. Local, tailor-made surface properties may also be covered without a major modification of structure and properties of the substrate material.

The book gives an overview of the Surface Technologies, but it is not exhaustive. It focuses on applications in mechanical engineering. It presents not only the heat treatment procedures (surface hardening, thermo-mechanical and thermo-chemical treatments, PVD, CVD, surface remelting), but also on processes connected to deformation (surface solidification with cold deformation), fusion welding (surface remelting, surface alloying, remelting welding), physical-chemical processes (surface coating) and their combinations, known as Duplex process.

The book also presents the various forms of surface damage leading to specific treatments, covering also important characteristics of the material surfaces. Surface preparation methods are described as well as the material testing for assessing the quality of surface layers.

The aim of this book is to offer theoretical and practical knowledge for planning, designing and material selection for engineering components and structures, or tools. The book also offers information for production planning, maintenance and repair work, considering the dedicated education in mechanical engineering.

Contents

Introduction	9
1. Selecting surface treatments	11
1.1. Surface damage on tools and engineering components	11
1.1.1. Wear and relaxation	11
1.1.2. Corrosion and scaling	15
1.1.3. Mechanical and thermal fatigue	19
1.2. Role and system of surface treatment processes	23
1.2.1. Development trends in technology	23
1.2.2. Local modification of material structure	24
1.2.3. Classification of surface treatments	25
1.3. High energy heat sources	29
1.3.1. Laser	41
1.3.2. Electron beam	45
1.3.3. Plasma	47
2. Characteristics of material surfaces	50
2.1. Macro- and microstructure of the surface	50
2.1.1. Ideal and real surface, surface defects	50
2.1.2. Surface waviness and roughness	55
2.1.3. Optical and aesthetical characteristics of material surfaces	57
2.2. Surface preparation	59
2.2.1. Oxide and scale removal	62
2.2.2. Cleaning and degreasing	69
2.2.3. Other preparing operations	71
3. Surface treatments without material deposition	72
3.1. Surface hardening	72
3.1.1. Shot peening	74
3.1.2. Picking ball surface strengthening	76
3.1.3. Striker surface strengthening	80
3.1.4. Burnishing surface strengthening	81
3.1.5. Roller surface strengthening	85
3.1.6. Explosion surface strengthening	87
3.1.7. Laser pulse surface hardening	88
3.2. Surface hardening	88
3.2.1. Flame hardening	95
3.2.2. Induction hardening	101
3.2.3. Laser hardening	111
3.3. Surface remelting	114
3.4. Remelting welding	135

Contents

4. Surface treatments with added material	137
4.1. Protective coating.....	137
4.1.1. Bonding	137
4.1.2. Plastic coating	140
4.1.3. Painting, lacquering	141
4.1.4. Enamelling.....	144
4.1.5. Chemical precipitation	144
4.1.6. Electroplating.....	147
4.2. Thermal spraying.....	153
4.2.1. Flame spraying	156
4.2.2. Arc spraying.....	157
4.2.3. Plasma spraying	159
4.2.4. Explosion spraying	161
4.3. Cladding	162
4.3.1. Drawing cladding	162
4.3.2. Extrusion cladding	162
4.3.3. Rolling cladding	163
4.3.4. Friction cladding	164
4.3.5. Explosive cladding.....	165
4.4. Vapour depositions.....	167
4.4.1. PVD or physical vapour deposition	173
4.4.2. CVD or chemical vapour deposition	177
4.5. Ion implantation	181
4.6. Passivation	183
4.7. Thermochemical treatments of steels	186
4.7.1. Carburising	186
4.7.2. Nitriding	189
4.7.3. Nitrocarburizing and carbonitriding.....	195
4.7.4. Boriding and siliconising.....	196
4.7.5. Thermochemical treatments with metallic elements	197
4.8. Surface melting on	199
4.8.1. Hot-dip galvanizing.....	199
4.8.2. Finishing treatment of thermal sprayed layers	200
4.8.3. Melting on thick metallic layers.....	201
4.9. Surface alloying.....	202
4.10. Surface-layer welding.....	204
4.10.1. Surface-layer welding of tools	211
4.10.2. Production of economic tools	214
4.10.3. Wear-resistant surface-layer welding.....	217
5. Duplex surface treatments.....	224
5.1. Duplex modifications of material structure	224
5.2. Duplex thermo chemical treatments.....	225
5.3. Duplex surface treatments	225
5.3.1. Combination of laser surface hardening and nitriding.....	228

6. Other surface technologies	235
6.1. Abrasive surface machining	235
6.2. Laser honing	239
6.3. Production of printed electronic circuit <i>boards</i>	242
6.4. Production of semiconductor based electronic parts	246
6.5. Production of coated composites	249
6.6. Metal colouring	251
6.7. Temporary corrosion protection	253
7. Testing and assessing surface treated layers	255
7.1. Visual inspection	255
7.2. Non-destructive testing	264
7.3. Light microscopy	267
7.4. Electron microscopy	271
7.5. Chemical analysis	273
7.6. Hardness measurement	277
7.7. Bonding strenght testing	281
7.8. Wear resistance testing	282
7.9. Corrosion resistance testing	284
7.10. Case studies, special testing methods	286
Bibliography	333
Surface engineering (Summary)	347
Contents	348
Oberflächenbehandlung (Zusammenfassung)	351
Inhalt	352
Tratamente de suprafață (Rezumat)	355
Cuprins	356

Oberflächenbehandlung

Zusammenfassung

In der industriellen Praxis hat die Anwendung werkstoff- und energiesparende – und damit umweltfreundliche – fertigungsgestützte Technologien eine immer wichtigere Bedeutung. Diese Technologien beziehen sich auf das, nach den Bearbeitungsverfahren, Betriebsbeanspruchungen und speziellen Voraussetzungen nötige minimale Werkstückvolumen. Dieser Konzeption entsprechen im Allgemeinen die Oberflächenbehandlungsverfahren. Ohne andere Anforderungen oder Vorschriften können mit denen auf billige, einfach verarbeitbare, zähe Grundwerkstoffe (Grundkörper), die die Schadensbeständigkeit (Abrieb-, Anlassen-, Korrosion-, Zunder- und Ermüdungsbeständigkeit) verbessern, oft dekorative Oberflächenschichten hergestellt werden, die die Oberflächenbehandlungen können die Werkstücke den lokalen Beanspruchungen, Anforderungen angepasst werden, ohne dass eine größere Konstruktion- oder Eigenschaftsveränderung des Grundwerkstoffes (Grundkörper) nötig ist.

Das Buch gibt einen Überblick über die Oberflächentechnologien, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Sie konzentrieren sich auf die Anwendung im Maschinenbau. Es werden nicht nur die Wärmebehandlungsverfahren (Oberflächenhärtung, thermochemischen und thermomechanischen Behandlungen, PVD, CVD, Oberflächenschmelzen) behandelt, sondern auch Verfahren wie Verformung (Oberflächenverfestigungen mit Kaltverformung), Schmelzschweißen (Oberflächendurch und -umschmelzen, Oberflächenlegieren, Auftragschweißen), physikalisch-chemische (Oberflächenbeschichtungs-) Verfahren bzw. deren Kombinationen, die sog. Duplexverfahren.

Das Buch beschäftigt sich auch mit den verschiedenen Schadensformen, die zu einer Behandlung führen; mit einigen wichtigen Kennwerten von Werkstoffoberflächen, mit Verfahren der Flächeaufbereitung und mit Materialprüfungen zur Bestimmung der Schichtqualität.

Ziel des Buches ist, theoretische und praktische Kenntnisse zur Planung, zum Design und zur Werkstoffauswahl von Ersatzteilen, Konstruktionen und Werkzeugen zu geben. Das Buch bietet auch Informationen zur Technologieplanung von Herstellung und Reparatur, mit besonderer Hinsicht auf die Aufgaben in der Ingenieurausbildung im Maschinenbau.

Inhalt

Vorwort	9
1. Anwendungsmerkmale von Oberflächenbehandlung	11
1.1. Schadenstypen von Oberflächen der Maschinenelemente und Werkzeuge	11
1.1.1. Abrieb und Anlassabweichung	11
1.1.2. Korrosion und Verzunderung	15
1.1.3. Mechanische und thermische Ermüdung	19
1.2. Systeme und Aufgaben der Oberflächenbehandlungen	23
1.2.1. Trend von technologischen Entwicklung	23
1.2.2. Lokale Modifizierung der Werkstoffaufbau	24
1.2.3. Oberflächenbehandlungssysteme	25
1.3. Bedeutung der Wärmequelle mit hohen Energiedichten	29
1.3.1. Laser	41
1.3.2. Elektronenstrahl	45
1.3.3. Plasma	47
2. Kennzeichnung der behandelnden Werkstoffoberfläche	50
2.1. Makro- und mikrostruktur der Oberfläche	50
2.1.1. Ideale und reale Oberfläche, Oberflächenfehler	50
2.1.2. Oberflächenwelligkeit und Raurigkeit	55
2.1.3. Optische und ästhetische Werkstoffoberfläche	57
2.2. Oberflächenvorbereitung zur Behandlung	59
2.2.1. Freistellung von Oxid und Zunder	62
2.2.2. Freistellung von Fette und Öle	69
2.2.3. Andere Vorbereitungstätigkeiten	71
3. Oberflächenbehandlungen ohne Werkstoffauftrag	72
3.1. Oberflächenverfestigung	72
3.1.1. Oberflächenverfestigung durch Kugelstrahlen	72
3.1.2. Oberflächenverfestigung durch Schlagkörper	77
3.1.3. Oberflächenverfestigung durch Schlagbolzen	80
3.1.4. Oberflächenverfestigung durch Beschlag	81
3.1.5. Oberflächenverfestigung durch Rollieren	85
3.1.6. Oberflächenverfestigung durch Sprengen	87
3.1.7. Oberflächenverfestigung durch Laserimpuls	88
3.2. Oberflächenhärten	88
3.2.1. Flammhärten	95
3.2.2. Induktionshärten	101
3.2.3. Laserhärten	111

	Inhalt
3.3. Oberflächenumschmelzen	118
3.4. Aufschmelzschweissen	135
4. Oberflächenbehandlungen durch Werkstoffauftragung	137
4.1. Schutzbeschichtung	137
4.1.1. Aufkleben.....	137
4.1.2. Beschichtung mit Kunststoff	140
4.1.3. Farben, Lackieren.....	141
4.1.4. Emaillieren.....	144
4.1.5. Chemische Abscheidung.....	144
4.1.6. Galvanisieren.....	147
4.2. Thermisches Spritzen.....	153
4.2.1. Flamspritzen	156
4.2.2. Lichtbogenspritzen	157
4.2.3. Plasmaspritzen	159
4.2.4. Sprengspritzen	161
4.3. Plattieren	162
4.3.1. Plattieren durch Ziehen	162
4.3.2. Plattieren durch Fliesen	162
4.3.3. Plattieren durch Walzen	163
4.3.4. Reibplattieren	164
4.3.5. Sprengplattieren	165
4.4. Beschichten aus Dampfphase	167
4.4.1. PVD oder Physical Vapour Deposition.....	173
4.4.2. CVD oder Chemical Vapour Deposition	177
4.5. Ionenimplantieren.....	181
4.6. Passivieren	183
4.7. Thermochemische Behandlungen	186
4.7.1. Aufkohlen der Stähle	186
4.7.2. Nitrieren der Stähle.....	189
4.7.3. Carbonitrieren und Nitrocarburieren.....	195
4.7.4. Borieren und Silizieren der Stähle.....	196
4.7.5. Thermochemische Behandlung durch metallischen Elemente	197
4.8. Oberflächenansmelzen	199
4.8.1. Feuerschmelztauchen der Metalle	199
4.8.2. Nachbehandlung der thermischen Spritzschichten.....	200
4.8.3. Anschmelzen von dichten Metallschichten	201
4.9. Oberflächenlegieren	202
4.10. Auftragschweissen	204
4.10.1. Auftragschweissen von Werkzeugen	211
4.10.2. Herstellung der Sparwerkzeuge	214
4.10.3. Auftragen von Verschleisschichten	217
5. Duplex Oberflächenbehandlungen	224
5.1. Duplex Werkstoffbau-Modifizierung	224

5.2. Duplex termochemische Behandlungen	225
5.3. Duplex Oberflächenbehandlungen.....	225
5.3.1. Kombinieren von Laserhärten und Nitrieren.....	228
6. Andere Oberflächentechnologien	235
6.1. Abrasive Oberflächenbearbeitung.....	235
6.2. Laserhonen	239
6.3. Fertigung der gedruckten Leitplatten	242
6.4. Herstellung der elektronischen Teile in Basis Halbleiter	246
6.5. Herstellung von beschichteten Verbundwerkstoffe.....	249
6.6. Metallfarben.....	251
6.7. Zeitweilige Korrosionsschutz.....	253
7. Prüfung und Qualifizierung der behandelten Oberflächenschichten	255
7.1. Sichtprüfungen	255
7.2. Zerstörungsfreie Prüfungen	264
7.3. Lichtmikroskopische Prüfungen	267
7.4. Elektronmikroskopische Prüfungen.....	271
7.5. Chemische Analyse	273
7.6. Härtemessungen	277
7.7. Haftfestigkeitsprüfungen	281
7.8. Verschleißprüfungen.....	282
7.9. Korrosionsprüfungen	284
7.10. Fallstudie, extrem prüfungs-methode	286
Literatur	333
Surface engineering (Summary).....	347
Contents	348
Oberflächenbehandlung (Zusammenfassung)	351
Inhalt.....	352
Tratamente de suprafață (Rezumat).....	355
Cuprins	356

Tratamente de suprafață

Rezumat

Utilizarea în practica de producție industrială a tehnologiilor care implică un consum redus de materiale și energie, fiind astfel mai puțin vătămătoare pentru mediu, a căpătat în ultima perioadă o importanță tot mai mare. Aceste tehnologii au în vedere volumul minim necesar al pieselor, pentru ca, în funcție de metoda de prelucrare, acestea să corespundă condițiilor de lucru și condițiilor speciale. În acest concept se încadrează în general tehnologiile de tratare a suprafețelor. Fără alte condiții, se pot aplica pe materiale de bază ieftine sau ușor de prelucrat, straturi care să confere pieselor rezistență crescută (la frecare, coroziune sau oboseală) sau care să dea acestora un aspect decorativ, prin aplicarea tratamentelor de suprafață, piesele putând să răspundă solicitărilor locale sau putând fi adaptate acestora, fără modificări importante ale proprietăților sau construcției materialului de bază.

Cartea de față oferă o vedere de ansamblu asupra tehnologiilor de tratare a suprafețelor, fără a avea pretenția de a le aminti pe toate. Ca aplicații, punctul de greutate revine construcțiilor de mașini. Sunt amintite pe lângă procedeele de tratare termică (călirea suprafeței, tratamente termochimice și termomecanice, PVD, CVD, topirea suprafeței) și alte metode cum sunt deformarea (solidificarea suprafețelor cu deformare la rece), sudarea prin topire (topirea suprafeței, alierea suprafeței, încărcare prin sudare), metode fizico-chimice (acoperirea suprafețelor) precum și combinații ale acestora, așa numitele procedee duplex.

Cartea tratează și principalele forme de degradare a suprafețelor, motivând necesitatea unui tratament, de asemenea câteva caracteristici mai importante ale suprafețelor materialelor, procedeele de pregătire a lor și controlul materialelor pentru determinarea calității stratului.

Scopul acestei cărți este de a pune la dispoziția cititorilor cunoștințe teoretice și practice legate de planificarea, proiectarea și de alegerea materialelor pentru piese de schimb, construcții și scule. Cartea de față mai oferă și informații privind planificarea tehnologiilor de execuție și reparație, fiind de interes în procesul de formare a inginerilor specialiști în construcția de mașini.

Cuprins

Prefață	9
1. Aspecte legate de utilizarea tratamentelor de suprafață	11
1.1. Tipuri de deteriorare a suprafețelor organelor de mașini și a sculelor	11
1.1.1. Uzură și revenire (relaxație)	11
1.1.2. Coroziune și ardere	15
1.1.3. Oboseală mecanică și termică	19
1.2. Sisteme și rolul proceselor de tratare a suprafețelor	23
1.2.1. Tendințe de dezvoltare a tehnologiilor	23
1.2.2. Modificări locale ale structurii materialului	24
1.2.3. Sisteme de tratare a suprafețelor	25
1.3. Surse de căldură cu densitate ridicată de energie	29
1.3.1. Laser	41
1.3.2. Fascicul de electroni	45
1.3.3. Plasmă	47
2. Caracteristici ale suprafețelor materialelor care pot fi tratate	50
2.1. Macro și microstructura suprafeței	50
2.1.1. Suprafața ideală și reală, defecte de suprafață	50
2.1.2. Ondularea suprafeței și rugozitatea	55
2.1.3. Caracteristici optice și estetice ale suprafețelor materialelor	57
2.2. Pregătirea suprafețelor în vederea tratamentului	59
2.2.1. Îndepărtarea oxizilor și a arsurilor	62
2.2.2. Îndepărtarea grăsimilor și a uleiurilor	69
2.2.3. Alte operații pregătitoare	71
3. Tratamente de suprafață fără adaos de material	72
3.1. Durificarea suprafeței	72
3.1.1. Ecrusarea suprafeței cu bile	72
3.1.2. Ecrusarea suprafeței cu alicie	77
3.1.3. Ecrusarea suprafeței prin percuție	80
3.1.4. Durificarea suprafeței prin brunare	81
3.1.5. Ecrusarea suprafeței prin calandrare	85
3.1.6. Ecrusarea suprafeței prin explozie	87
3.1.7. Ecrusarea suprafeței prin impulsuri laser	88
3.2. Călirea suprafețelor	88
3.2.1. Călirea cu flacără	95
3.2.2. Călirea prin inducție	101
3.2.3. Călirea cu laser	111
3.3. Retopirea suprafețelor	114

3.4. Sudarea prin retopire	135
4. Tratamente de suprafață cu adaos de material.....	137
4.1. Acoperiri de protecție	137
4.1.1. Încleierea	137
4.1.2. Acoperiri cu mase plastice	140
4.1.3. Vopsirea	141
4.1.4. Emailarea	144
4.1.5. Depunere chimică.....	144
4.1.6. Galvanizare	147
4.2. Pulverizare termică	153
4.2.1. Pulverizare cu flacără	156
4.2.2. Pulverizare cu arc electric	157
4.2.3. Pulverizare cu plasmă	159
4.2.4. Pulverizare prin explozie	161
4.3. Placarea	162
4.3.1. Placarea prin tragere	162
4.3.2. Placarea prin extrudare	162
4.3.3. Placarea prin laminare	163
4.3.4. Placarea prin frecare	164
4.3.5. Placarea prin explozie	165
4.4. Depunere din vapori	167
4.4.1. PVD sau depunerea fizică din vapori	173
4.4.2. CVD sau depunerea chimică din vapori	177
4.5. Implantarea de ioni	181
4.6. Pasivarea	183
4.7. Tratamente termochimice	186
4.7.1. Carburarea oțelurilor	186
4.7.2. Nitrurarea oțelurilor	189
4.7.3. Carbonitrurarea și nitrocarburarea oțelurilor	195
4.7.4. Borurarea și silicizarea oțelurilor	196
4.7.5. Tratamente termochimice cu elemente metalice	197
4.8. Topirea suprafețelor	199
4.8.1. Acoperirea prin imersare în baia topită	199
4.8.2. Tratamente ulterioare ale straturilor pulverizate termic	200
4.8.3. Topirea în straturi metalice groase	201
4.9. Alierea suprafețelor	202
4.10. Încărcarea suprafețelor prin starturi de sudură	204
4.10.1. Încărcarea prin starturi de sudură în cazul sculelor	211
4.10.2. Producția de scule eficiente	214
4.10.3. Încărcarea cu straturi de sudură rezistente la uzură	217
5. Tratamente de suprafață de tip Duplex	224
5.1. Modificări Duplex ale structurii materialelor	224
5.2. Tratamente termochimice Duplex	225

5.3. Tratamente de suprafață de tip Duplex	225
5.3.1. Combinarea călirii superficiale cu laser cu nitrurarea	228
6. Alte tehnologii de tratare a suprafețelor	235
6.1. Prelucrarea abrazivă a suprafețelor	235
6.2. Honuirea cu laser	239
6.3. Producția de panouri cu circuite imprimate	242
6.4. Producția de piese electronice pe bază de semiconductori	246
6.5. Producția de materiale compozite pentru acoperiri	249
6.6. Vopsirea cu oxizi metalici	251
6.7. Protecție temporară la coroziune	253
7. Controlul și calitatea straturilor superficiale tratate	255
7.1. Controlul vizual.....	255
7.2. Controlul nedistructiv.....	264
7.3. Controlul cu ajutorul microscopului	267
7.4. Controlul cu ajutorul microscopului electronic.....	271
7.5. Analiza chimică	273
7.6. Măsurarea durității.....	277
7.7. Controlul rezistenței de aderență	281
7.8. Controlul rezistenței la uzură	282
7.9. Controlul rezistenței la coroziune.....	284
7.10. Studii de caz, metode speciale de control	286
Bibliografie	333
Surface engineering (Summary).....	347
Contents	348
Oberflächenbehandlung (Zusammenfassung)	351
Inhalt.....	352
Tratamente de suprafață (Rezumat).....	355
Cuprins	356

A sorozat eddig megjelent kötetei:

1. Jodál Endre: *Számítástechnika az ezredforduló küszöbén*. 1992. 35 oldal
2. Pálfalvi Attila: *Porkohászat*. 1993. 39 oldal
3. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Bevezetés az anyagtechnológiák informatikájába*. 2007. 213 oldal
4. Bitay Enikő: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. 2007. 174 oldal

Megjelenés előtt álló kötetek:

6. Forgó Zoltán: *Bevezetés a mechatronikába*.
7. Tolvaly - Roşca Ferenc: *A számítógépes tervezés alapjai. AutoLisp és Autodesk Inventor alapismeretek*.



Felületkezeléssel a károsodásállóság (kopás-, megeresztés-, korrózió-, reve- és fáradásállóság) javítását célzó felületi kérgék, rétegek hozhatók létre az egyébként – más követelmény vagy előírás hiányában – olcsóbb, könnyebben megmunkálható, szívósabb alapanyagon (munkadarabon). A helyi (lokális) igénybevételekhez, követelményekhez igazítható(k) a munkadarabok arra kijelölt tartománya(i), általában térfogatuk nagyobb hányadának jelentős szerkezet- és tulajdonságváltoztatása nélkül. A különböző elvű felületkezelő eljárások bemutatása mellett a könyv foglalkozik továbbá azokkal a károsodási formákkal, amelyek a kezelést indokolttá teszik, az anyagfelületek néhány fontos jellemzőjével, a felületelőkészítés módszereivel, valamint a rétegminősítést szolgáló anyagvizsgálatokkal is.

ISBN 978-973-8231-76-4

