

Lézersugaras technológiák II.

Buza, Gábor

Lézersugaras technológiák II.

írta Buza, Gábor

Publication date 2012

Szerzői jog © 2012 Buza Gábor



Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujszechenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



HAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Kézirat lezárva: 2012. január 31.

Készült a TAMOP-4.1.2.A/2-10/1 pályázati projekt keretében

A kiadásért felel a(z): Edutus Főiskola

Felelős szerkesztő: Edutus Főiskola

Műszaki szerkesztő: Eduweb Multimédia Zrt.

Terjedelem: 29 oldal

Tartalom

1. Lézersugaras felületmódosítások	1
2. Edzés	8
1. A lézersugaras edzés során lejátszódó anyagszerkezet-változások	8
2. A lézersugaras edzés termikus viszonyai	15
3. A lézersugaras edzés technikája	18
3. Felrakóhegesztés és ráolvasztás	25
1. A felrakóhegesztés és a ráolvasztás technikája	25
2. A ráolvasztás eredményét befolyásoló főbb tényezők	31
4. Felületötvöztetés	46
1. Lézersugaras felületötvöztetés in-situ vegyületképződéssel	47
2. Lézersugaras felületötvöztetés és cementáló hőkezelés	50
3. Különleges ötvöztetések előállítása	53
5. Diszpergálás	58
1. A fázisidegen szemcsék kristályfront általi kitolása az olvadékból	59
2. A kikényszerített szemcsebeépülés feltétele	60
6. Bevonatolás	64
7. A szublimációs technológiák	66
1. A szublimációs technológiák szerepe a lézersugaras technológiák között	66
2. A szublimációs anyageltávolítás alapjai	67
2.1. Anyageltávolítás lézerimpulzusokkal	67
2.2. A lézersugaras anyageltávolítás termikus folyamatai	69
2.3. Ultrarövid lézersugár-impulzus hatása	70
2.4. A lézersugárral indukált plazma	71
2.5. Lézersugár által indukált lökéshullám	74
8. A lézersugaras szublimálás és fűrés alkalmazásai	78
A. Fogalomtár	80
Irodalom	82
9. Önenellenőrző feladatok	83
1. Önenellenőrző feladatok	83

1. fejezet - Lézersugaras felületmódosítások

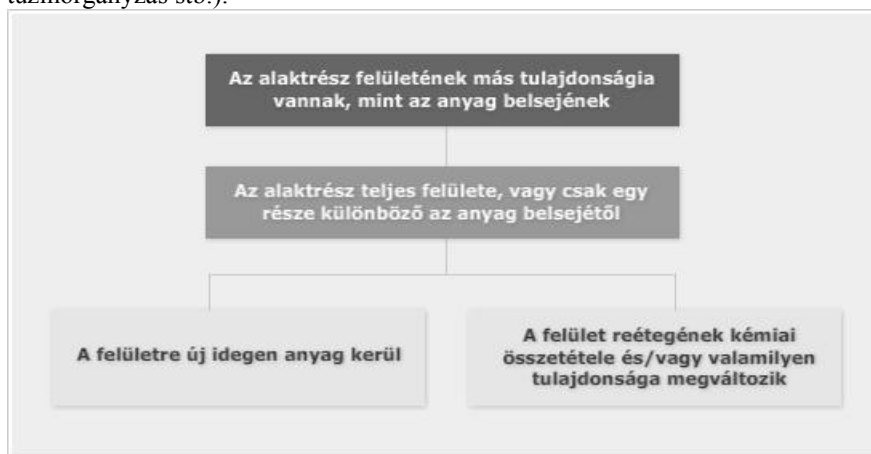
Az emberek régóta tudják, hogy a tárgyak belsejének és felszínének anyaga nem kell, hogy azonos legyen. Kezdetben, amikor még kőeszközöket és agyagedényeket használtak, a mázbevonat volt divatban. Más eszközök tekintetében még nem gondoltak hasonló megoldásokra, ill. hiányzott a megfelelő technológiájuk.

Az égetett agyagedények mázas bevonása a használati tulajdonságok javításán túl esztétikai élményt is jelentett. A vaskorszakban már kezdetben, viszonylag hamar rájöttek arra, hogy a kardok felületének módosítása ugrásszerűen javítja az él tartósságát. Ennek érdekében az izzó kardot élő állatokba, azok vérébe, egyes vélemények szerint rabszolgákba szúrták, mert azt feltételezték, hogy az ő erejük száll át a kardba, attól lesz a harcok során tartósabb. Valójában csak karbonatomokat diffundáltattak a felületi rétegekbe. Ezt a beavatkozási célt ma cementálásnak nevezzük, és sokkal humánusabban csináljuk, mert tudjuk és értjük, mi történik az anyaggal, az anyagban, a technológiai folyamat alatt.

Az arany dísz tárgyakat kezdetben tömör fémről készítették, mert ez a hatalom és a gazdagság jelképe is volt. Aki azonban nem volt elegendően gazdag, de a hatalom nagyságának szimbolizálásához szüksége volt a megfelelő darabok bemutatására, az aranybevonatú tárgyakat készíttetett. Ehhez persze technológiai ismeretekre, tudásra volt szükség. Eleinte az aranyat, ami nagyon jól alakítható, vékony lemezekké kovácsolták, és ezzel borították az aranyat láttatni szándékozott tárgyakat. Az idő múlásával a hatalom és a vagyon aprózódott, és nagyon sok ember szeretett volna gazdagnak látszani. Újabb technikákat találtak ki a látvány olcsó demonstrálására. Az új technikákhoz kevesebb arany is elegendő volt. Már a római korban is készíttettek aranyfűstlemez, akkor a vastagsága kb. 3mm volt. A XIV. században már tudtak 1mm vastagságút is csinálni. Manapság a látható fény hullámhosszúságának ötöde az elérhető vastagság, ami 0,1mm körül van, vagyis a mai aranyfűstlemez néhányszor száz atomsor vastagságú. Az aranyfűst a ráeső fényben megtartja arany színét, de fehér fény felé tartva, kékeszöld fény szűrődik át rajta.

Napjainkban a használati tárgyak felületét többnyire valamilyen használati tulajdonság, esetleg esztétikai élmény javítása érdekében módosítják. Ez a használati tulajdonság leggyakrabban a korrózióállóság, a kopásállóság vagy a keménység növelése. A cél elérése érdekében alkalmazott technikáknak két fő iránya van. Az egyik szerint a tárgy felületén egy új bevonatot hoznak létre, a másik szerint pedig a tárgy anyagának tulajdonságait változtatják meg, a felszín közeli rétegben (1.1. ábra).

A tulajdonságváltoztatás kiterjedhet a tárgy teljes felületére vagy annak csak egy részére. A megváltoztatott tulajdonságú réteg vagy a bevonat vastagsága az alapanyag kémiai összetételétől és az alkalmazott technológiától függően nagyságrendileg az 1mm-től az 1 mm-ig terjed. A technológiák lehetnek „hidegek” (galvanizálás, görgőzés, sörétezés, kémiai reakció stb.) és „melegek” (pl. kéregedzés, cementálás, tűzi horganyzás stb.).



1.1. ábra

Természetes, hogy a lézersugár tulajdonságainak megismerését követően keresték azokat a lehetőségeket, amik a régi felületmódosító technológiák alternatívái lehetnek, illetve korábban nem létező lehetőségeket kínálnak.

Az ipar a lehetőségek közül csak azokat az új technológiákat fogadta és fogadja be, alkalmazza, amik a korábbiaknál olcsóbb és/vagy valamilyen szempont(ok)ból jobb, kedvezőbb eredményt biztosítanak. Ilyen megfontolások alapján a lézersugár kiváló eszköz. Már a lézersugaras anyagmegmunkáló technológiák fejlesztésének hajnalán szállóige volt, hogy a lézersugár olyan új szerszám, ami keresi alkalmazási területeit. Mára oda jutottunk, hogy a számtalan alkalmazást alig győzzük számba venni, rendezni, rendszerezni. Az eredményes technológiák részleteinek kutatása ráadásul gyakran új technológiák születéséhez vezetnek. Ez azt jelenti, hogy nem tekinthető véglegesnek a lézersugaras felületmódosító technológiák napjainkban összeállított felsorolása. A most közismerteket azonban az áttekinthetőség érdekében szükséges rendszerezni. A rendszerezés egy lehetséges módját mutatja az 1.2. ábra.



1.2. ábra

A halmazállapot-változás nélküli technológiák

Edzés

A lézersugaras edzés technológiáját csaknem kizárólag az edzhető acélminőségű alkatrészek esetén alkalmazzák. Gyakorlatilag olyan ötvözetekről van szó, amelyek összetételük alapján a hőkezelési repedés veszélye nélkül képesek a martenzites típusú fázisátalakulásra (egyszerű esetben a martenzit képződésére). Ez többnyire a 0,3–2,0% C-tartalmú ötvözeteket jelenti.

A technológia lényege szerint a lézersugárral az alkatrész felületének egy rétegét úgy kell gyorsan felhevíteni, hogy ne képződjön olvadék, de lejátszódjon a vas kristályszerkezetének átalakulása, az ausztenitesedés (a vas kristályszerkezete szobahőmérsékleten térben középpontos kockarács, megfelelően nagy hőmérsékleten pedig felületen középpontos kockarács, amit ausztenitnek neveznek).

A hevítés sebességének kellően gyorsnak kell lennie ahhoz, hogy a felizzott anyagréssz hővezetéssel a lehető legkisebb mértékben melegítse a többi anyagrésszt, mert a lézersugár tovahaladását követően a hidegen maradt anyagnak kell gyorsan lehűtenie az ausztenites állapotú anyagot. A gyors hűtés során, az ötvöző atomok miatt a vasatomok nem tudják visszanyerni eredeti elrendeződésüket, ezért egy új szövetelem képződik, a martenzit. Egy meghatározott kémiai összetételű acélnak ez a legkeményebb szöveteleme.

Az acél hőmérséklet-változásának azt a folyamatát, ezt a hőkezelési technológiát, aminek eredményeként martenzit keletkezik, edzésnek nevezik. Ehhez, a hagyományos technológiák esetén, a hevítés (ausztenitesítés) után valamilyen hűtőközzel (víz, olaj, sófürdő, víz stb.) érik el a kívánt sebességű, a martenzit szövetelem képződését eredményező hűtési sebességet. A lézersugaras edzés során nem alkalmaznak hűtőközeget, mert a lézersugárral nem hevített anyagnak kell visszahűtenie a felhevítettet. Ezt a jelenséget nevezik önedzésnek, ami a lézersugaras edzés egyik jellegzetessége. A lézersugaras hevítés tehát legyen elég lassú ahhoz, hogy a hővezetés következtében a kívánt vastagságú réteg ausztenitessé válhasson, de legyen kellően gyors, hogy az ausztenitessé vált réteg alatt „hideg” maradjon a darab, hiszen ennek kell majd az izzó részt gyorsan lehűtenie.

Mint látjuk, egyensúlyt kell találni a lézersugaras energiaközlés intenzitása és időtartama, valamint az anyag termikus tulajdonságai (hővezető képesség, hőkapacitás) között.

Felületszilárdítás

A technológia alapját az a fémfizikai ismeret adja, hogy a fémek kristályos szerkezetének hibái (a rácshibák) befolyásolják annak mechanikai tulajdonságait. Tudjuk továbbá, hogy a fémek képlékeny alakváltozása az atomsíkok egymáson történő elcsúszásának mechanizmusán keresztül valósul meg. Az atomsíkok elcsúszása a vonal menti rácshibák – idegen szóval a diszlokációk – keletkezésével és vándorlásával jár együtt. A térfogategységben lévő diszlokációs vonalak összes hosszúsága meghatározza, hogy az adott anyag milyen alakváltozó képességgel rendelkezik. A fémek ezen tulajdonsága a keménységgel van szoros kapcsolatban. A képlékeny alakítás során az alakváltozó képesség folyamatosan csökken, amit legegyszerűbben a keménység növekedésén keresztül követhetünk nyomon. Ezt a régen ismert jelenséget alakítási felkeményedésnek nevezik.

A fémekben rácshibát, így diszlokációt többféleképpen létre lehet hozni. A lézersugaras felületszilárdítás esetén ezt lökéshullám segítségével tehetjük. A nagy teljesítménysűrűségű ($>10^8 \text{ W/cm}^2$) lézersugár energiája, mint tudjuk, elnyelődik a fémes anyag vékony rétegében ($\sim 10^{-9} \text{ m}$), de az idő rövidsége miatt hővezetéssel nem képes az elnyelt energiát az anyag belseje felé elvezetni. Ennek az a következménye, hogy az anyag szublimál (a folyékony halmazállapot kihagyásával, szilárdból gőzállapotba jut), illetve plazmaállapotba kerül. Az anyag térfogata ennek során, a másodperc tört része alatt, több nagyságrenddel megnő. A rövid impulzusidejű lézersugár plazmafelvillanást, ennek eredményeként erős lökéshullámot indukál. A láthatatlan lézersugár hatása tehát a plazma rekombinálódása során keletkező fénye miatt látható, a lökéshullám miatt pedig hallható lesz. A lökéshullám a darab felületéről indul a levegő felé (ezt halljuk), és a hatás-ellenhatás eredményeként az anyag felé (ezt használjuk ki). Ez utóbbi, a nagy kinetikus energiája következtében képes a kristályos szerkezetben hibát, többek között diszlokációt létrehozni, amit a keménység növekedéseként fogunk detektálni. Minden lézerimpulzus egy-egy lökéshullámot hoz létre az anyagban, így az anyag impulzusról impulzusra keményedik. (A jelenségek hasonlóságát fedezhetjük fel a kapa és a kasza élének apró kalapácsütésekkel történő felkeményítése és a lézersugaras felületszilárdítás között.)

Érdemes megjegyezni, hogy ennek a technológiának részleteit firtató kutatások eredményeként született egy új, lézersugaras, képlékeny alakítási technológia. Ennek lényege, hogy a lökéshullám egy vékony lemez egyik felületéről indul, miközben a lemezt ellenkező irányban alakítja, mert egy apró behorpadást hoz létre. Az impulzusok tervszerű egymásutánisága következtében a lemez a kívánt alakot veszi fel.

Halmazállapot-változással, de kémiai összetétel változásával nem járó technológiák

Elpárolgotatás

Az elpárolgotatás – másképpen szublimálás – technológiája akkor vált lehetővé, amikor a megmunkálandó anyag felületére olyan nagy teljesítménysűrűségű impulzust tudtak juttatni, hogy a az anyag megolvadás nélkül el tudott párologni. A termikus viszonyok részletes ismerete nélkül is belátható, hogy a lézerimpulzusoknak nagyon rövid idejűeknek kell lenni, hogy az elpárolgott anyag gőze szabadon el tudjon távozni a munkadarab felületéről, különben a távozó több ezer fokos (a vas forráspontja 2861°C) fémgőz sugárzással olyan sok energiát sugároz vissza a munkadarab felületére, hogy az akár meg is olvadhat. Speciális anyagok esetén (pl. szilícium) a munkadarab a termikus eredetű feszültség következtében el is repedhet. Az elpárolgotatásos megmunkálás során a megolvadás kerülendő, még akkor is, ha teljesen nem tudjuk kizárni.

Az elpárolgotatásos technológiák során törvényszerű, hogy fémgőzökön kívül plazma is keletkezik. Mérések szerint a plazma hőmérséklete $10\,000$ és $100\,000 \text{ K}$ közöttire tehető. Annak ellenére, hogy az elpárolgotatásos technológia ilyen extrém viszonyok között zajlik, mégis az első ipari alkalmazások közé tartozik. Az első sugárforrások ugyanis impulzusüzemű szilárdtest-lézerek voltak, amelyekkel pl. a mechanikai módszerekkel nagyon nehezen megmunkálható gyémántot fűrták, hogy nagy teljesítményű húzóköveket tudjanak csinálni a nagyon kis átmérőjű huzalok gyártásához. (A világ első lézersugárforrása is szilárdtest-impulzuslézer volt.)

Az elpárolgotatásos technológia fő képviselője a lézersugaras fúrás, különös tekintettel a kis átmérőjű furatokra. A mikro és nanotechnológia térhódítása azonban korábban elképzelhetetlenül kis méretű alakos alkatrészek elkészítését is igényli, amihez ez a technológia kifejezetten alkalmas. Ezt a technológiát idegen nyelven „laserablation” néven ismerik.

Lézersugaras marás

A lézersugaras marás kifejezés alatt jelenleg még két technológiát lehet érteni. Az egyiket lézersugárral támogatott mechanikai marásnak, általánosabb értelemben forgácsolásnak kellene nevezni, mert a lézersugár csak támogatja, segíti a hagyományos marási technológiát azzal, hogy a marószerszám (forgácsolószerszám)

előtt haladva felhevíti az anyagot, miáltal annak lecsökken forgácsolási ellenállása, így jelentősen megnő a forgácsolási teljesítmény. Így lehet pl. Si₃N₄ (szilícium-nitrid) kerámiát hatékonyan forgácsolni. A másikra nincs megfelelő és a szakmai körökben elfogadott kifejezés, mert nem hasonlítható egyetlen korábbi technológiához sem. Most erről lesz szó.

A technológiát különösen vas alapú ötvözetek esetén lehet előnyösen alkalmazni, természetesen az ötvözet keménységétől független sikerességgel, vagyis edzett anyagoknál is. A technológia szerint a lézersugárral megfelelő geometriájú tócsát kell olvasztani oxigén munkagáz alkalmazása mellett. A vas olvadt állapotban jelentős mennyiségű oxigént képes felvenni, atomos állapotában oldani. Az olvadék az oxigén koncentrációjától függően egy- vagy kétfázisúvá válik. Az egyik fázist fémeknek, a másikat salaknak nevezik. A salakfázis lehűlve wüstitet (FeO) alkot, ami a vasnak egy rideg oxidfázisa. A hűlés során ez szétrepedezik és a felpattog. A helyén üreg marad. A haladó lézersugár segítségével úgy lehet a munkadarab felületéből anyagot eltávolítani, mintha azt egy marószerszámmal tennénk.

Ezt a technológiát idegen nyelven „Laser Beam Melt Ablation” néven is ismerik. Gyors és nagy hatékonyságú anyageltávolító technológia. Rétegről rétegre haladva tetszőleges alakú és kiterjedésű üreg hozható létre úgy, hogy a forgácsoló szerszám, a fény közben nem kopik. A megmunkálás pontossága a fókuszolt méretétől függ.

Átolvasztás

A lézersugaras átolvasztás során a munkadarab felületének egy kívánt vastagságú (0,1–1,5mm) rétegét megolvasztják, majd a lézersugaras edzéshez hasonlóan, a munkadarab hőkapacitását kihasználva, az olvadék magától fog gyorsan lehűlni. A gyors hűlés következtében többnyire megváltozik a réteg fázis- és szövetszerkezete, de minden esetben megváltozik a szemcseszerkezete. A szemcsézete a korábbihoz képest finomodik, ami már önmagában is a mechanikai tulajdonságok javulását eredményezi. A fázis és szövetszerkezet változásának iránya a homogenizálódás felé mutat. A korábban heterogén fázis- és szövetszerkezet (ferrit, perlit, cementit, bainit, grafit, martenzit) megváltozik, csökkenhet a fázisok és a szövetelemek száma.

Az átolvasztás egyik fő jellemzője, a szemcsefinomodás azért következik be akkor is, ha a lézersugaras megolvasztáson és a gyors kristályosodáson kívül más nem történik az anyaggal (vagyis nincs előtte semmilyen, a felület összetételét módosító technológia), mert az olvadék gyors hűlése sok kristálycsíra képződését eredményezi. A térfogategységben születő kristálycsírák száma több, mint amennyi a hagyományos technológiák során keletkezik, aminek eredményeként az olvadék kristályosodása egyszerre sok pontból indul, ezért csak apró szemcsék tudnak kifejlődni. Ezt a technológiát akkor érdemes alkalmazni, amikor a felületi réteg szemcseszerkezetének finomítása azt a tulajdonságváltozást eredményezi a réteg és a mag között, ami az alkatrész funkciója szempontjából kívánatos, nekünk előnyös.

Az átolvasztásnak egyéb céljai is lehetnek. Alkalmas például arra, hogy a munkadarab felszíni rétegébe vagy a munkadarab felületére juttatott, az alapanyagétól eltérő összetételű anyagot összeolvassza, homogenizálja. Ebben az esetben is a lézersugaras technológiák egymást átfedő határterületére jutunk. Mint majd látjuk, a bevonatolás és a ráolvasztás esetenként sem különíthető el egyértelműen az átolvasztástól.

Halmazállapot és kémiai összetétel változásával járó technológiák

Felrakóhegesztés

A felrakóhegesztés egy építkezős technológia. A technológia célja és eredményeként a munkadarab mérete megnő. Rendkívül elterjedt technológia. A két legnagyobb és leggyakoribb alkalmazási területe a szerszámjavítás és a generatív (felépítő) gyors prototípusgyártás. Alapesetben a technológia során alkalmazott hozaganyag kémiai összetétele az alapanyagával (munkadarabéval) egyező, de attól eltérő is lehet.

A technológia szerint, a munkadarab felületén lézersugárral megolvasztott tócsába huzal vagy por formájában juttatják a hozaganyagot. A hozaganyag mennyisége többnyire nagyobb a megolvasztott alapanyagénál, vagyis a munkadarab tömege jelentősen gyarapszik. Különösen a gyors prototípusgyártás esetén előnyös, ha a lézersugár a vívőgázzal (többnyire argon), vagyis a szállított porárammal koncentrikusan jut a tócsához (1.3. ábra).



1.3. ábra Forrás: TRUMPF GmbH + Co. KG

Amennyiben a munkadarab felületére egy rétegben hordtuk föl az új anyagot, akkor bevonatot képeztünk, aminek kémiai összetétele nem feltétlenül egyezik az alapanyaggal. Erősen ötvözött anyagú bevonatot főleg a kopásnak erősen kitett alkatrészek kopófelületén hoznak létre.

A műanyag fröccsöntő szerszámok meghibásodott részeinek javítására előszeretettel használják ezt a technológiát. A csorbult vagy kopott részt ugyanis célzottan tudják pótolni. Az azonos célú hagyományos technológiákhoz képest a lézersugarasnak az az előnye, hogy a munkadarabot lényegesen kisebb hőterhelés éri, és a beavatkozás területe tágabb határok között változtatható (kisebb méretű csorba kisebb kiterjedésű felrakással javítható). A hozaganyag ezekben az esetekben jellemzően huzal.

Mivel a huzalos hozaganyagról cseppekben válik le az olvadék, ezért a tócsa anyagtartalmának növekedése csak impulzusszerű lehet. Ennek az az eredménye, hogy a felrakóhegesztés sávszélessége és vastagsága hullámzó lesz. Ha vékony és keskeny felrakást szeretnénk csinálni, a poradagolás technikája célravezetőbb.

A poradagolásos felrakóhegesztésből fejlődött ki a gyors prototípusgyártásnak az a módszere, amelyben a felrakásokat tervszerűen egymás fölé helyezik. Ahhoz hasonlóan építik fel az alkatrészt, ahogyan a gyerekek a vízparton a csöpögtetett homokvárat építik.

Ráolvasztás

A lézersugaras ráolvasztás során az alapanyagtól elérő összetételű, kohéziós kötésű bevonatot hoznak létre az alapanyagon. Az alapanyag a lézersugár hatására kis mértékben megolvad, keveredik a bevonat anyagával. A bevonat anyagát az egy lépéses technológia során huzal vagy por formájában adagolják a lézersugárral létrehozott tócsába. A kétlépéses technológia esetén a bevonat anyagát a lézersugaras kezelést megelőzően kell az alapanyag felületére felhordani termikus (plazmaszórás, lángszórás) vagy hideg (ragasztóanyaggal elkevert por) technológiával. Az alapanyag felkeveredésének mértéke 5–20%. Egyedi esetekben az 5%-nál kisebb felkeveredési mérték is elérhető. Ez az a jellegzetesség, ami alapján ezt a technológiát meg lehet különböztetni a felrakóhegesztéstől. Ott nem cél az alapanyag felkeveredésének minimalizálása, itt igen.

A ráolvasztás technológiája mint precíziós rétegeképítő technológia terjedt el. Leggyakoribb alkalmazási területei a szerszámgyártás, a légiközlekedés és az autóipar. Az alapanyagra ráolvasztott réteg vastagsága egyenletes, akár egy nagyságrendet is átfoghat (0,1–3 mm), precízen változtatható. Gyakori, hogy a gyors prototípusgyártás egyik módszere során (MLT: Matal Laminated Tooling) az alakos acéllemezek egymásra helyezésével és rögzítésével létrehozott alkatrészek kopásnak kitett részeit ráolvasztással megerősítik. Ezekben az esetekben a rétegvastagság 0,3–0,5 mm. Gyakori hozaganyag a Stellit márkanevű, Co-bázisú ötvözetek valamelyike.

A technológia megvalósításához nincs szükség jó sugárminőségű lézersugárra. Jó hatékonysággal és gazdaságosan alkalmazhatók a tömbösített diódlézerek. Ennek mind beszerzési, mind üzemeltetési költségei kisebbek a többi sugárforráshoz képest, ráadásul kicsi a helyigénye is. A CO₂-lézersugárhoz képest hullámhossza lényegesen kisebb, így jó abszorpciós viszonyokat teremt. A ráolvasztás termelékenységének növelése a lézer-hibrid technológiákkal lehetséges.

Felületötvözés

A felrakóhegesztés, a diszpergálás és a felületötvözés rokon technológiák. A lézersugár mindegyik esetben megolvasztja a munkadarab felületének egy részét, és a létrejött tócsába hozaganyagot kell juttatni. A hozaganyag összetétele nem egyezik meg az alapanyaggal. A diszpergálás esetén a hozaganyag mindig szemcsés, por formájú, és nem kell, hogy az olvadékban folyékony halmazállapotúvá váljon (olvadjon vagy oldódjon). A felrakóhegesztés és az ötvözés esetén a hozaganyag lehet huzal vagy por, és maradéktalanul folyékony halmazállapotba kell kerülnie. A két technológia között nem is lehet éles határt húzni, mert egyiknél sincs megszabva, hogy a munkadarab anyaga milyen mértékben van jelen a létrehozott rétegben. Amennyiben a hozaganyag kémiai összetétele mégis megegyezik a munkadarabéval, akkor egyértelmű, mert csak felrakóhegesztésről lehet szó, függetlenül attól, hogy a létrehozott tócsába mennyi hozaganyagot juttattunk.

A munkadarabétól idegen összetételű hozaganyaggal végzett technológia lehet ötvözés, ráolvasztás és felrakóhegesztés is. Csak a hozaganyag és az alapanyag aránya alapján lehet különbséget tenni. Ha kevés a hozaganyag, akkor ötvözés. Ha sok, akkor attól függően, hogy az alapanyag felkeveredése kedvezőtlen vagy sem, lehet ráolvasztás vagy felrakóhegesztés.

Az ötvözés fogalmából azonban az következik, hogy az adalékanyag (hozaganyag, ötvözőanyag) maradéktalanul feloldódik az alapanyag olvadékában és egyenletesen eloszlik. Az ötvözés alapvető célja ugyanis az anyag kémiai összetételének céltudatos megváltoztatása, valamely tulajdonság vagy tulajdonságok

felhasználás szempontjából kedvező irányú megváltoztatása érdekében. A lézersugaras felületötvöztetés esetén nincs szükség olyan koncentrált poráramra, mint például a gyors prototípusgyártás esetén.



1.4. ábra Forrás: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik

Külön kell említést tenni arról a lézersugaras felületötvöztetési lehetőségről, amikor az ötvözőanyag gáz-halmazállapotú. Leggyakrabban a CO_2 -t, a N_2 -t és a NO_2 -t alkalmazzák ilyen céllal (ötvöztetés karbonnal és nitrogénnel). Ezeknek az ötvöztetéseknek többnyire a kopásállóság és a korrózióállóság növelése a célja. Az alkalmazások tekintetében mindezek közül kiemelkedik a titán és ötvözteteinek ötvöztetése nitrogénnel.

A halmazállapot-változással járó lézersugaras technológiákkal módosított vagy létrehozott felületek a lézersugár haladási irányára merőlegesen minden esetben hullámosak. Ez a felületi feszültségre visszavezethető fizikai jelenség következménye, mértékét nem lehet nullára csökkenteni. A hullámosság periódushossza az egyes megmunkálási sávok (nyomvonalak) tengelyvonalai közötti távolságnak felel meg.



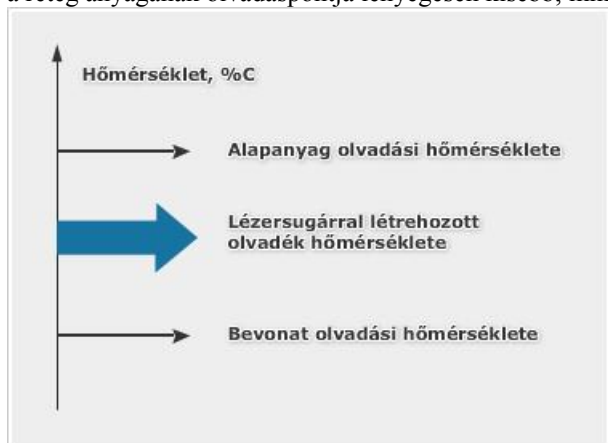
1.5. ábra Forrás: TRUMPF GmbH + Co. KG

Diszpergálás

A lézersugaras technológiák között diszpergálás alatt azt értjük, hogy az A anyagban lehetőleg egyenletesen elosztott, apró szemcsézetű B anyag van. A technológia során a lézersugár tócsát olvaszt a munkadarab felületének anyagából (hasonlóan, mint pl. a ráolvasztásnál, csak általában mélyebbet), amibe a B hozaganyagot juttatják. Ebben az esetben a hozaganyag nem olvad meg, mint a ráolvasztás során, legalábbis nem teljes mértékben. A hozaganyag többnyire por formájú. A diszpergálás alapesetében a munkadarab lézersugárral kezelt felületi rétege csak annyiban különbözik az alapanyagtól, hogy a rétegben sok apró, idegen részecske, szemcse van. Mivel az idegen részecskék sűrűsége többnyire eltérő az olvadéktól, ezért a kiüledés vagy a felúszás elkerülése érdekében az olvadéknak gyorsan meg kell dermednie, pontosabban fémek lévén kristályosodnia. A leggyakoribb diszperziós fázisok a fém-oxidok, -karbidok és -nitridek. Minél nagyobb az olvadékba juttatott porszemcsék mérete, annál kisebb a valószínűsége annak, hogy felolvadjon vagy gravitációsan elkülönüljön. A fém-oxidok (többnyire TiO_2 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2) esetében a felolvasztás és feloldódás veszélye kifejezetten kicsi. A vegyületfázisok túlhevítése azonban esetenként termikus disszociációhoz, a vegyület felbomlásához vezethet.

Bevonatolás

A bevonatolás a felrakóhegesztés és a ráolvasztás rokon technológiája. Sajátossága, hogy az alapanyag még részben sem olvad meg, mégis kohéziós kapcsolat van a réteg és az alapanyag között. Ezt úgy lehet elérni, hogy a réteg anyagának olvadáspontja lényegesen kisebb, mint az alapanyagé.



1.6. ábra

Az alapanyag többnyire ötvöztelen vagy gyengén ötvözött acél, a bevonat pedig a felület kívánt tulajdonságát biztosító, többkomponensű ötvöztet. Az alkalmazási céltól függő összetételű ötvöztet csoportok vannak. Ilyenek például a

- kopásálló ötvözetek csoportja: Cr-Ni-B-Si,
- hő- és kopásálló ötvözetek csoportja: 45–70% Co-tartalmú ötvözetek,
- korrozív közegnek ellenálló kötőréteg-ötvözetek csoportja: Ni-Cr- és Ni-Cr-Al-ötvözetek,
- korrozív közegnek ellenálló ötvözetek csoportja: Cr-Ni-Mo-Si-C-Fe,
- koptató igénybevételnek kitett ötvözetek csoportja: WC-Co,
- korrózió-, hő- és kopásálló ötvözetek csoportja: WC-Ni,
- vizes közegben is korrózió- és kopásálló ötvözetek csoportja: WC-Co-C,
- jó siklási tulajdonságú, de korrózió- és kopásálló ötvözetek csoportja: Cr-Mo-Si-Co.

Ezeknek az ötvözeteknek a porát a lézersugaras bevonatolás alternatívájaként lángszórással, nagy sebességű lángszórással és plazmaszórással (termikus szórások) is szokás a munkadarabok felületére felhordani. A termikus szórások esetén a munkadarab felületét szemceszórással (korund vagy kvarc) elő kell készíteni, a lézer esetében nem. Különösen a kemény, kopásálló bevonatok alá kötőréteget kell felhordani, a lézer esetében nem. A termikus szórással felhordott rétegek mindig porózusak (a lángszórás esetén a legnagyobb, a plazmaszórás esetén a legkisebb a porozitás), lézer esetében nem. A termikus szórások esetén az alapanyag és a réteg között legfeljebb „pontokban” van kohéziós kötés, a lézersugaras bevonatolásnál a teljes érintkező felületen. A költségeket tekintve a berendezés ára miatt a lézersugaras technológia a legdrágább, ezt követi a plazmaszórás, a nagy sebességű lángszórás és végül a legolcsóbb a lángszórás technológiája.

Üvegesítés

Az üvegesítést az átolvasztás egy lehetséges változatának lehet tekinteni. A technológia fő elemeit illetően azonosságról is beszélhetünk, hiszen gyors lézersugaras olvasztásból és szintén gyors hűlésből áll. Célját tekintve viszont az olvadék hűlésének olyan gyorsnak kell lennie, hogy a fémekre jellemző kristályosodás ne vagy csak részben tudjon lejátszódni. A hűlés eredménye tehát részben vagy teljesen amorf, más szóhasználatlaltal üveges szerkezetű (az atomok nem rendeződtek a kristályos szerkezetnek megfelelő 3D-s elrendezésbe).

Az üveges szerkezet az azonos kémiai összetételű kristályosétól lényegesen különböző mechanikai, fizikai, valamint kémiai tulajdonságokat eredményez. Az úgynevezett üvegfémek kutatása az utóbbi évtizedek nagy érdeklődésre számot tartó területe. Kezdetben csak nagyon vékony szalagok (vastagságuk kisebb, mint 0,1 mm) formájában tudtak fémüvegeket előállítani, mert csak így tudták biztosítani az üvegtépződéshez szükséges 10^4 – 10^6 K/s hűlési sebességet. Napjainkban a tömbi amorf ötvözetek létrehozásával kísérleteznek, ami több mm vastag darabok esetén is amorf szerkezetet eredményez. A nagy hűlési sebesség ezek esetében is szükséges, de már a 10^2 – 10^4 K/s is elegendő. Az amorf szerkezetű réteget úgy is létre lehet hozni, hogy az olvasztás során a tócsába ötvözőanyagot juttatnak, aminek következtében az ötvözet üvegesedési hajlama megnő, vagyis csökken az a kritikus hűlési sebesség, ami már amorf állapotot eredményez.

Az 1.2. ábrán felsorolt technológiák alkalmazási gyakorisága nem egyforma. Vannak gyakran, széles körben alkalmazottak, elterjedtek, és vannak, amelyeket jelenleg csak ritkán, speciális esetekben vesznek igénybe. A továbbiakban az elterjedtek részletesebb kifejtéséről lesz szó.

2. fejezet - Edzés

A lézersugárral általában 0,1–25mm széles sávokat lehet egyszerre edzeni. Az edzett kéreg mélysége az alapanyag kémiai összetételétől és a lézersugaras technológia paramétereitől függ. Az elérhető mélység maximuma 2mm körül van, ami a műszaki gyakorlat szempontjából csaknem minden esetben elegendő. A hagyományos kéregedző technológiák is ilyen maximális edzési mélységet eredményeznek, ott legfeljebb a kis edzési mélység esetén vannak bizonytalanságok.

Melyek a lézersugaras edzés előnyei?

- Nagyon kicsi az edzési vetemedés veszélye.
- Gyakori, hogy közvetlenül a forgácsoló művelet után alkalmazható, akár a forgácsoló (eszterga, marógép stb.) szerszámgépbe befogott darabon.
- Gyors és érintésmentes.
- Nem szükséges hűtő- (edző-) közeg.
- Tiszta technológia.
- Az alapanyag összetételéből adódó legnagyobb keménységet is el lehet vele érni.
- Alkalmas arra, hogy az alkatrésznek csak kívánt részeit kezelje.
- A nehezen hozzáférhető helyek is edzhetők (ahova hűtőközeg nem jutna be kellő intenzitással).
- Az alkatrész kívánt helyein, ill. az alkatrész felületére merőlegesen könnyű a megfelelő keménység, ill. keménységfelfutás biztosítása.
- Könnyű automatikus gyártósorba integrálni.

1. A lézersugaras edzés során lejátszódó anyagszerkezet-változások

Lézersugárral azok a vas alapú ötvözetek edzhetők, amelyekben a hőmérséklet-változás hatására reverzibilis kristályszerkezet-átalakulások játszódnak le. A vas – mint vegyelem – szobahőmérsékleten térben középpontos kockarácsú (magyar rövidítése: tkk; angol rövidítése bcc=body centered cubic; fázis- és szövettani neve ferrit vagy α -ferrit), kristályos szerkezettel rendelkezik. Ezt az állapotát 912°C-ig megtartja. 912°C-on allotróp átalakulással felületen középpontos kockarácsúvá válik (magyar rövidítése: fkk; angol rövidítése fcc=face centered cubic; fázis- és szövettani neve ausztenit, g-ferrit vagy g-vas). Ez a kristályszerkezet 1394°C-ig stabil. Efőltt, egy ismételt allotróp átalakulást követően, megint térben középpontos kockarácsúvá válik (magyar rövidítése: tkk; angol rövidítése bcc=body centered cubic; fázis és szövettani neve d-ferrit), amely szerkezetét az 1538°C-os olvadáspontjáig megtartja.

Ezek a kristályszerkezet, illetve fázisátalakulási hőmérsékletek egyéb vegyelemek jelenlétében jelentős mértékben megváltoznak, ráadásul az átalakulások nem egy meghatározott hőmérsékleten játszódnak le, hanem egy-egy hőmérséklet-tartományban, amelynek nagysága az ötvözőelemek milyenségétől és mennyiségétől függ.

Az alapján, hogy a vas melletti elemek az ötvözet tulajdonságait az alkalmazás szempontjából kedvezően vagy hátrányosan befolyásolják, soroljuk azokat az ötvözők vagy a szennyezők közé. Az ötvözők és a szennyezők a nyersvas- és az azt követő acélgyártás során kerülnek az ötvözetbe. Azokat az elemeket, amelyek akkor is jelen vannak az ötvözetben, ha az acélgyártás során ezeket nem ötvöztük az anyagba, kísérőelemeknek nevezzük. Ezek jelenléte geológiai (a bányászott, majd dúsított vasércel együtt kerülnek a nagyolvasztóba) és gyártástechnológiai (redukció, oxidáció, dezoxidálás) okok miatt vannak jelen. Kísérőelemek pl. a szilícium és a mangán, ami a vasércel együtt jut a nagyolvasztóba (vaskohóba), illetve a karbon (közbeszédben szén), ami szintén a nagyolvasztóból származik, mert ott kokszt a redukáló- és a fűtőanyag.

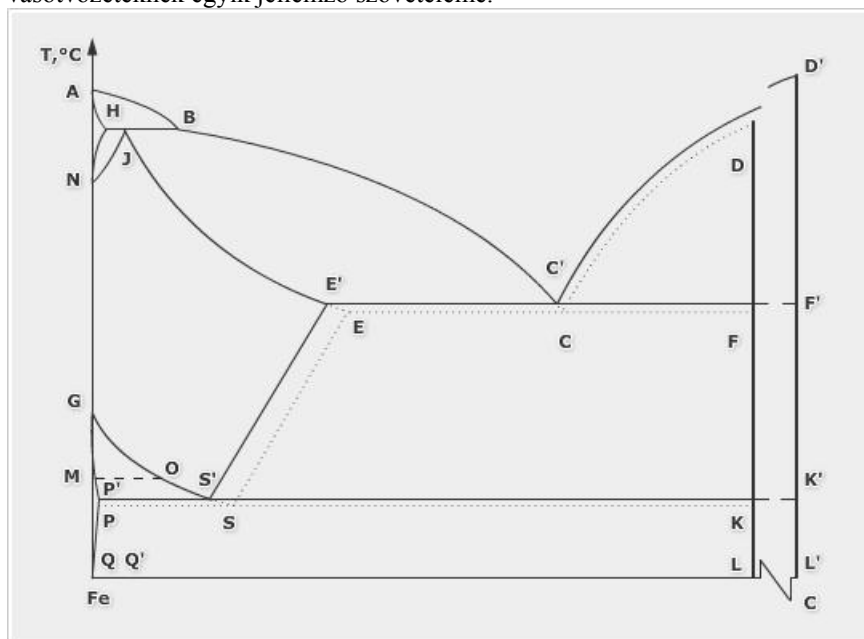
A vas legfontosabb kísérő- és egyben ötvözőeleme a karbon. A vason kívül más vegyelemet is tartalmazó anyagok nagy részét acélnek nevezzük (nagy karbontartalom esetén más elnevezések is vannak, pl. öntöttvas, nyersvas, tempervas). A karbon kisebb-nagyobb mennyiségben minden vasötvözetben jelen van. A karbontartalom növekedésével az acél 912°C-os $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulásának hőmérséklete csökken, az 1394°C-os $\gamma \rightarrow \delta$ fázisátalakulása pedig növekszik. A fázisátalakulás hőmérséklete mind a két esetben hőmérséklet-tartománnyá húzódik szét. Ezt a változást a vas-karbon egyensúlyi fázisdiagram mutatja (2.1.1. ábra).

Az acélok egyik különleges tulajdonsága, hogy a vas két kristálytani módosulata (tkk és fkk) lényegesen eltérő mértékben képes karbonatomokat a rácsszerkezetébe fogadni, vele szilárd oldatot képezni, vagyis oldatban tartani. Az α -ferrit maximális karbonoldó képessége 0,022% (P pont, 727°C), az ausztenit 2,11% (E pont, 1148°C). A vas karbonoldó képessége hőmérsékletfüggő. Amennyiben az ötvözetben több karbon van, mint amennyit a vas kristályrácsa az adott hőmérsékleten képes befogadni, a többlet idegen fázisként lesz jelen az ötvözetben. Attól függően, hogy a többletet tartalmazó fázis az Fe_3C vegyület (szöveti neve: cementit) vagy a tiszta karbon egyik lehetséges fázisa, a grafit, nevezzük a fázisdiagramot metastabilnak vagy stabilnak.

Az acélok esetében – egyensúlyi körülmények között – a vas fázisai (α és γ) mellett többnyire az Fe_3C -vegyület, a cementit van jelen. (A grafit leggyakrabban az öntöttvasokban fordulhat elő.) A cementit az acélokban két esetben keletkezhet, ha eltekintünk a lézersugaras edzés szempontjából elhanyagolható jelentőségű tercier cementit képződésétől:

- Amikor a nagy karbontartalmú ausztenit hűlése során már nem képes oldatban tartani olyan sok karbont, mint korábban, a többlet cementit formájában válik ki belőle. Ezt a cementitet szekunder cementitnek nevezik. Ilyen eset a 0,77%-nál (vagy ötvözetek esetén ezzel egyenértékűnél) több karbont tartalmazó acéloknál, általában a szerszámacélokban fordulhat elő.

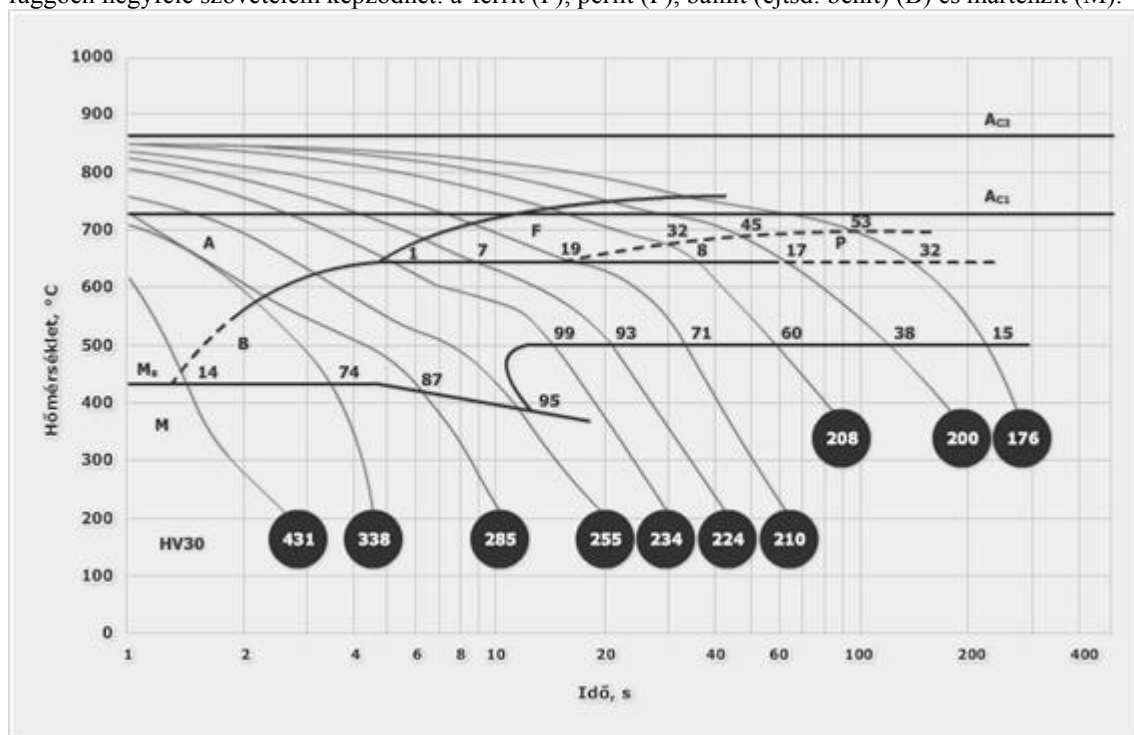
- A kisebb karbontartalmú acélokban akkor keletkezik cementitfázis, amikor az ausztenit termodinamikai stabilitása a hűlése következtében megszűnik (P pont, 727°C) és két fázisra bomlik, α -ferritre és cementitre. Az ausztenitnek ezt a két fázisból álló bomlástermékét nevezik perlitnek, ami az acélok és általában a vasötvözeteknek egyik jellemző szöveteleme.



2.1.1. ábra

A karbont is tartalmazó ausztenit könnyen túlűthető, ami azt jelenti, hogy a 2.1.1. ábra szerinti G-O-S-E vonal alatt is képes oldatban tartani a karbont. Ez termodinamikai szempontból természetesen nem egyensúlyi állapot. Az acélok nem egyensúlyi viszonyok közötti viselkedését a fázisátalakulási diagramok mutatják. Ezeket alakjuk miatt C-görbéknek is nevezik. Jellemzőjük, hogy minden diagram csak egy meghatározott összetételű acélra (pontosabban egy meghatározott ausztenites állapotra) vonatkozik, tehát a fázis- és szövetelem-változásokat csak a hőmérséklet és az idő függvényében olvashatjuk le a diagramból. Két típusa van: az izotermás és a folyamatos hűtésre vonatkozó. A gyakorlati hőkezelések szempontjából az utóbbinak van nagyobb jelentősége. A 2.1.2. ábrán látható, folyamatos hűtésre vonatkozó fázisátalakulási diagram a C: 0,16%; Si: 0,3%; Mn: 0,58%;

Mo: 1,29% összetételű acél nem egyensúlyi átalakulásait mutatja. A diagram szerint, a hűlés sebességétől függően négyféle szövetelem képződhet: a-ferrit (F), perlit (P), bainit (ejtsd: bénit) (B) és martenzit (M).



2.1.2. ábra

Annak ellenére, hogy a 2.1.2. ábrán látható diagram nevében is szerepel, hogy az acél hűtése során lejátszódó folyamatokat ábrázolja, mégis jelölve van rajta két olyan hőmérséklet, amit hevítés során kell meghatározni, az A_{c1} és az A_{c3} . Ez a két határhőmérséklet az acél hevítés hatására ausztenites szövetszerkezetűvé válásának kezdő és befejező hőmérséklete. Ezt az A_{c3} hőmérséklet fölé hevítési folyamatot, szakkifejezéssel élve hőkezelési műveletet, ausztenitesítésnek nevezik.

Az eltérő hűlési sebességeket a balról jobbra és lefelé tartó vonalak (lehűlési görbék) mutatják. A görbék végén lévő körökbe írt számok keménységi mérőszámok, amiket HV30 (Vickers) keménységméréssel mértek azokon a darabokon, amelyek a vonatkozó görbe szerinti sebességgel hűltek az ausztenitesítés hőmérsékletéről szobahőmérsékletre. A példaként bemutatott fázisátalakulási diagram szerint a hűlési sebesség növelésével az acél keménysége monoton nő. A legnagyobb keménység akkor adódik, amikor az ausztenites állapotú darabot vízben hűtik. Ekkor többnyire martenzit szövetelem képződik (a mi esetünkben, a 431HV30 keménységet eredményező hűlési sebesség esetén, az acél a martenzit mellett 14% bainitet is tartalmaz).

Az edzés célja, hogy az acél legkeményebb szövetelemét, a martenzitet létrehozzuk. Martenzit azonban csak ausztenitből keletkezhet. Ennek az az oka, hogy az ausztenit fkk-kristályszerkezetű, egyenletesen elosztva elhelyezkedő karbonatomok nem férnek el az a-ferrit tkk-rácsában. Egyensúlyi vagy ahhoz közeli körülmények között (lassú hűtés) a karbonatomok a $\gamma \rightarrow \alpha$ fázisátalakulás során a szemcsehatárra vándorolva új fázist (Fe_3C cementit) alkotnak. A szemcsehatárra vándorlásnak, szakkifejezéssel élve a diffúziós folyamatnak, időigénye van. Gyors hűlés esetén azonban nincs elegendő idő a karbonatomok vándorlására, ezért a kristályszerkezet átalakulásakor „bennrekednek” az új kristályszerkezetben, és erősen eltorzítják azt. A martenzit tehát egy olyan tkk a-ferrit kristályokból álló szövetelem, amiben az oldhatósági határnál lényegesen több karbonatom van. Ezek a rácsot torzító karbonatomok eredményezik a martenzit, vagyis az edzett acél nagy keménységét.

Mindezek alapján az edzésnek, vagyis a martenzit képződésének három feltétele van (mind a három feltételnek teljesülnie kell!):

1. A hűtés megkezdése előtt ausztenites szövetszerkezet.
2. Az ausztenit megfelelő összetétele (kellő mennyiségben legyen az ausztenitben oldva olyan anyag, amit az a-ferrit tkk-kristályszerkezet nem tud oldatban tartani; ez általában a karbont jelenti).

3. Kellően nagy hűtési sebesség, hogy az idegen elemeknek (általában a karbonnak) a vas $g \rightarrow a$ fázisátalakulása során ne legyen ideje a diffúzióra. Ezt kritikus hűlési sebességnek nevezik.

Mivel ezek anyagtudományi jellegű megállapítások, ezért a technológiától függetlenek, vagyis ebben a tekintetben a hagyományos és a lézersugaras edzés között nem lehet különbség. Az edzési technológia folyamata mind a két esetben három részre bontható:

A. Ausztenitesítési hőmérsékletre hevítés

B. Hőntartás

C. Kritikus vagy annál nagyobb hűtési sebesség

Vegyük sorra ezeket a részfolyamatokat, és vizsgáljuk meg, milyen egyezések és különbségek fedezhetők fel a hagyományos és a lézersugaras edzés összehasonlításakor!

A. *Ausztenitesítési hőmérsékletre hevítés*

A lézersugárral történő ausztenitesítés jellegzetessége, hogy a hevítéshez szükséges energiát elektromágneses sugárzás formájában közöljük az anyaggal, ami a munkadarab lézersugárral megvilágított felületén, néhány nanométer mélységben nyelődik el. A mélyebben fekvő részek melegezése csak hővezetés útján valósulhat meg. Az energiaközlés intenzitása nem lehet független a munkadarab anyagának hővezető képességétől és hőkapacitásától (valamint az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulás energiaigényétől, mivel a fázisátalakulásnak le kell játszódnia). A hevítés során a munkadarab felszíne még részelegesen sem olvadhat meg, vagyis a hevítés során nem szabad az ötvözet szolidusz hőmérsékletét elérni (a Fe-C fázisdiagram szerint az A-H-J-E-F vonalat).

A lézersugaras ausztenitesítéskor alkalmazható lézersugár-intenzitás tehát a következőktől függ:

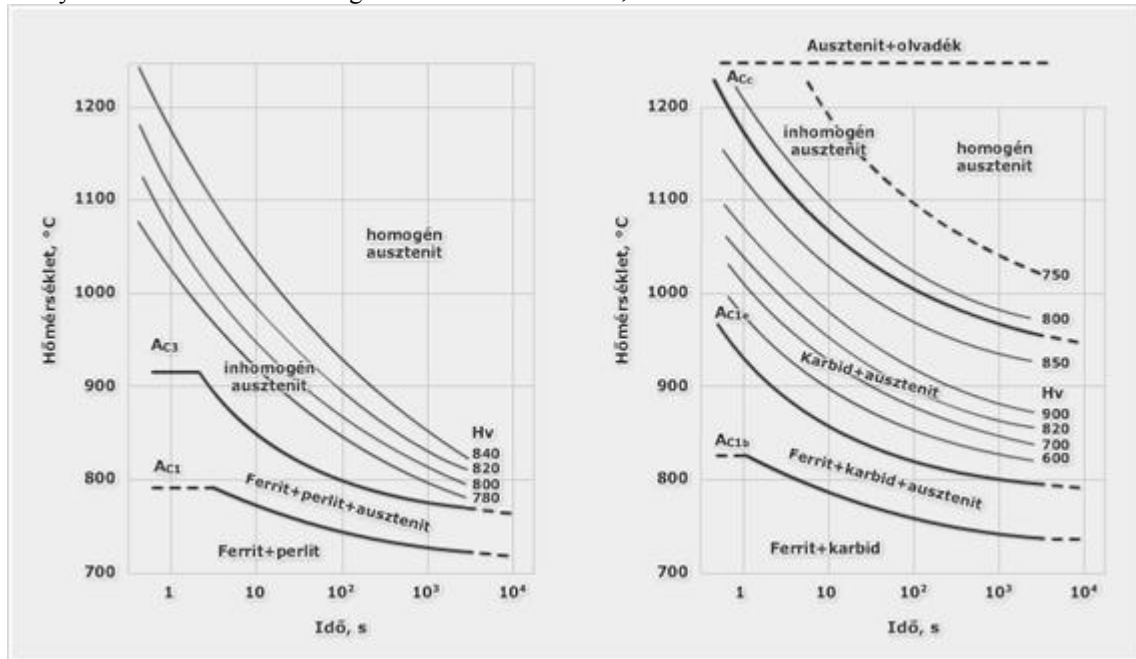
- Az acél összetételétől, ami meghatározza az anyag
- hővezető képességét,
- hőkapacitását,
- fázisátalakulási energiaigényét,
- ausztenitesedési hőmérsékletét (A_{c3} vagy A_{cm}),
- szolidusz hőmérsékletét.
- Az edzett réteg kívánt vastagságától.
- A munkadarab geometriai adottságaitól.

A lézersugaras edzés sajátossága, hogy a munkadarab felületi hőmérséklete lényegesen nagyobb, mint a hagyományos edzési eljárások esetén. Ennek az az oka, hogy a mélyebben fekvő részek gyors felhevítéséhez szükséges hőfluxus nagysága a hőmérséklet-különbséggel arányos. A hagyományos edzési technológiák esetén – az átfolyó áramos és az indukciós edzéstől eltekintve – a hevítés sebessége lassabb, mert a munkadarab felületén keresztül történő energiaátadás intenzitása kicsi. Ennek az a következménye, hogy a felszín közelében már ausztenitesedett anyagrészben megkezdődik a mechanikai tulajdonságokra kedvezőtlenül ható szemcsedurvulási folyamat. A hagyományos edzési hőmérséklet viszont (az a hőmérséklet, amelyről a munkadarab gyors hűtését kezdik, vagyis az ausztenitesítési hőmérséklet) a G-O-S vonal fölött (Fe-C fázisdiagram) 20–50°C.

B. *Hőntartás*

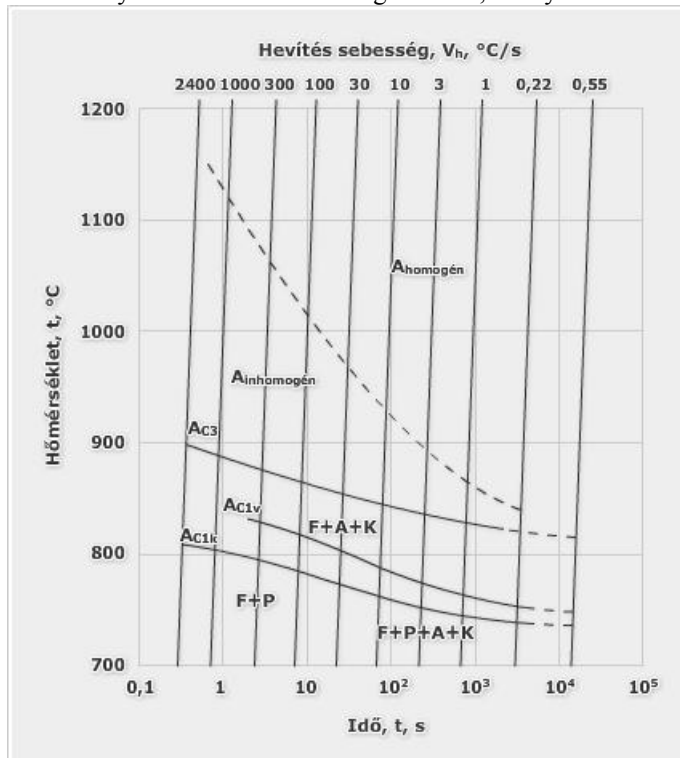
Tudjuk, hogy a fázisátalakulásoknak időigényük van, így az ausztenitesedésnek is. Az acélok esetében a különböző összetételű acéltípusok ausztenitesedését diagramok mutatják. Ezek segítségével meg lehet határozni az ausztenitesítési hőmérséklet és idő együttes hatását a folyamat eredményére. Egyes diagramokon feltüntetik az ausztenitesítést követő gyors (kritikus vagy annál gyorsabb) hűtéssel (edzéssel) elérhető keménységet is (2.1.3. ábra). Az ausztenitből a gyors hűtés hatására keletkező martenzit keménysége elsősorban az ausztenit kémiai összetételétől függ. A hosszabb ausztenitesítési idő és a nagyobb hőmérséklet a karbidok egyre teljesebb oldódását eredményezi, ami az ausztenit $\rightarrow$ martenzit fázisátalakuláskor bekövetkező kristályrácstorzulás

mértékét növeli. A kristályrács torzulása a keménység növekedésében is megmutatkozik. Az acéloknak nemcsak a vasnak (Fe_3C), hanem más ötvözőelemeknek is lehetnek karbidjai (pl.: Cr, Mo, V, Mn, W, Ni, Co stb.), amelyeknek az oldódási sebessége az ausztenitben kisebb, mint a cementitnek.



2.1.3. ábra Forrás: <https://moodle.duf.hu>

Vannak olyan auszteniteseési diagramok is, amelyeken a felhevítés sebességét is feltüntetik (2.1.4. ábra).



2.1.4. ábra Forrás: <http://www.csukas.sulinet.hu>

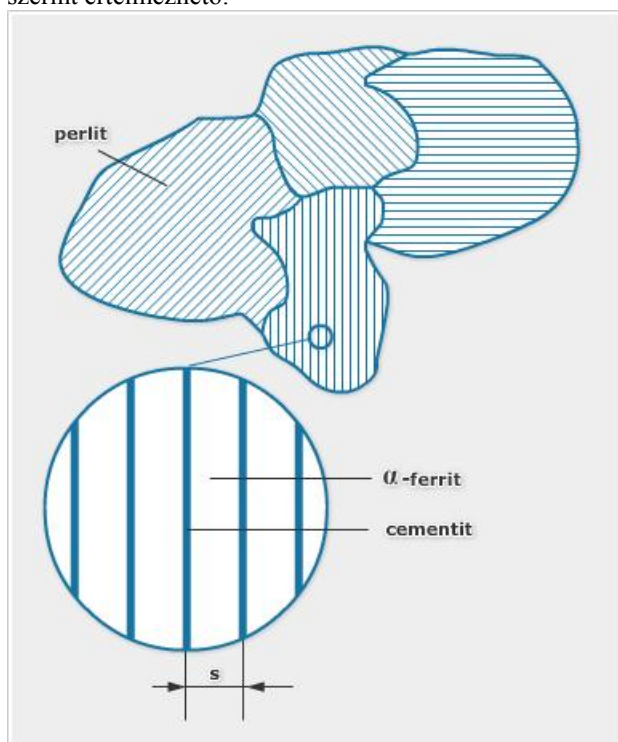
Az erősen ötvözött (pl. a 100Cr6) acélminőségek esetén a hosszú ideig tartó vagy nagy hőmérsékletű ausztenítés során olyan sok ötvözőanyag oldódhat az ausztenitben, hogy a gyors hűlés során, a szobahőmérsékletre hűlve, nem tud befejeződni a $\gamma \rightarrow \alpha$ fázisátalakulás, sok átalakulatlan ausztenit marad. Mivel

az ausztenit keménysége lényegesen kisebb, mint a mertenzité, ezért az ausztenit ötvözőtartalmának növekedésével – egy határ fölött – már nem nő, hanem csökken az edzett réteg keménysége.

A lézersugaras edzés során az ötvözőelemek ausztenitben oldódásának időszükségletére tehát nagy figyelemmel kell lenni, hiszen a hevítési idő a hagyományos technológiákéhoz képest lényegesen rövidebb. Ez a hevítési hőmérséklet növelésével kompenzálható (a diffúzió sebessége a hőmérséklettel exponenciálisan növekszik), de az exponenciális összefüggés következtében könnyen túlkompenzálható, ami szemcsedurvuláshoz vezethet.

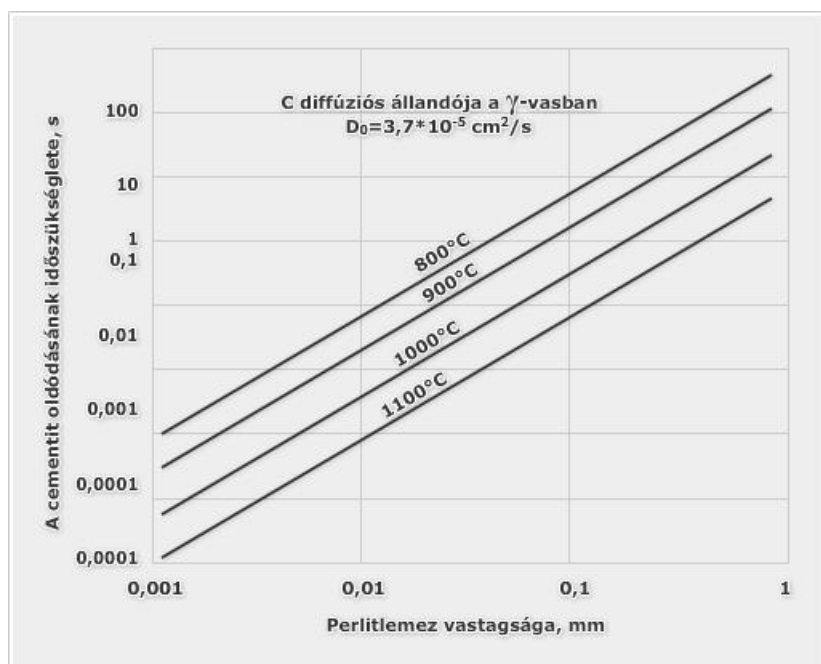
Az idő és a hőmérséklet mellett a kiinduló szövetszerkezet finomsága is befolyásolja az ausztenitesedés dinamikáját. Minél durvább szemcseszerkezetű az acél kiinduló állapota, annál nagyobb távolságra kell az ötvözőelemeknek diffundálnia ahhoz, hogy a homogén ausztenites állapotot el lehessen érni. Ennek bemutatására vizsgáljuk az acélok egy jellegzetes szövetelemének, a lemezes perlitnek az ausztenitesedését.

A perlit finomságát jól jellemzi az egymás mellett periodikusan ismétlődő a-ferrit- és cementitlemezek vastagsága (2.1.5. ábra). A kétkomponensű Fe-C-ötvözetekben a perlit karbontartalma 0,77% (S pont). Ismerve a perlitet alkotó fázisok karbontartalmát, számítható, hogy milyen vastag a cementit- és az a-ferritlemezek vastagságaránya. A perlitlemez valódi vastagsága, más szóhasználattal a lemezes perlit finomsága, az ábra szerint értelmezhető.



2.1.5. ábra

Egy egyszerűsített modellszámítás érdekében tételezzük fel, hogy az A_{c1} hőmérséklet fölé hevített perlit a-ferritje ausztenitté alakult, aminek lényegesen nagyobb a karbonoldó képessége, mint az a-ferrité, amiből allotróp átalakulással keletkezett. Ebben az ausztenitben kell feloldódnia a cementitnek, majd a karbontartalomnak benne kiegyenlítődnie. Tekintsünk most el az $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulás időigényétől, és vizsgáljuk csak a karbontartalom kiegyenlítődésének időigényét a lemezek felületére merőleges irányban! A számítások elméleti alapját a Fick-egyenletek adják. Eredményül a 2.1.6. ábrán látható diagramot kapjuk. A diagram alapján látszik, hogy a perlit finomságának változásával a perlit ausztenitesedésének időigénye nagyságrendekkel változhat.



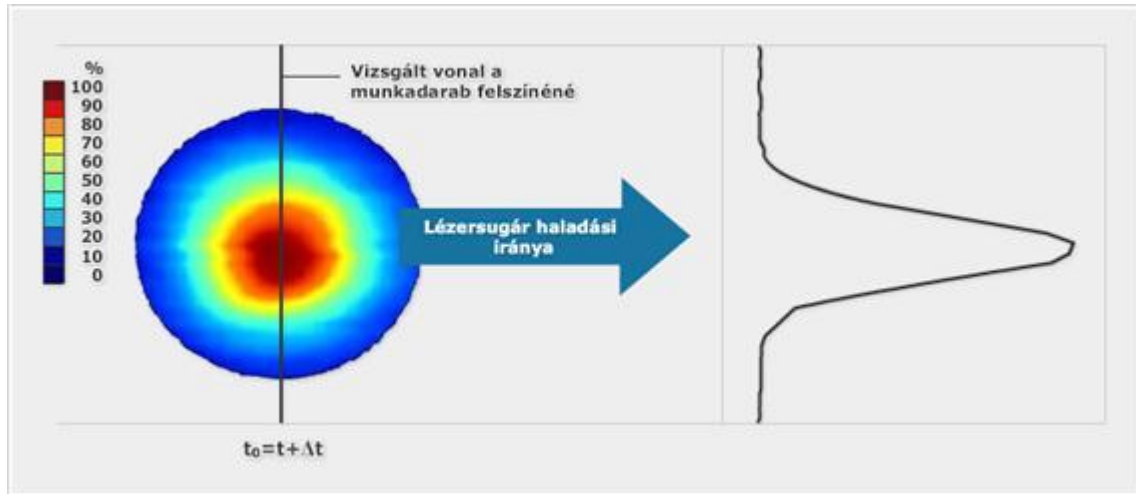
2.1.6. ábra

Az ausztenit teljes homogenizálódása a valóságban a 2.1.6. ábráról leolvashatónál lényegesen hosszabb időt vesz igénybe. A perlitnek ugyanis csak ideális, egyensúlyi körülmények között 0,77% a karbontartalma, és hasonlatos a szerkezete az ábrán láthatóhoz. A gyakorlatban egy munkadarabon belül is változhat a perlitlemezek vastagsága, de még a perlit karbontartalma is a képződésekor érvényesült hűlési sebességkülönbségek és az ötvözők esetleges kémiai inhomogenitása következtében. Az ötvözőelemek karbidjainak oldódása csak tovább növeli a teljes homogenizálás időigényét, mert a nem vasatomoknak lényegesen nagyobb távolságot kell a diffúzió mechanizmusával megtenniük, ugyanis karbidjaik messzebb vannak egymástól, mint a perlitben a cementitlemezek. Az egyes ötvözőelemek diffúziós sebességét – az egyébként azonos körülmények között – a diffúziós állandóik határozzák meg.

A lézersugaras edzés során a hőtartási időt másképpen kell értékelnünk, mint a hagyományos edzés ausztenitesítési folyamatában. Egy hagyományos, egyszerű esetben, az edzendő darabot be kell helyezni egy kemencébe, aminek hőmérséklete be van állítva az előírt (előre meghatározott) értékre. A munkadarabot a kemencével együtt is fel lehet fűteni, de be lehet helyezni a már felfűtött kemencébe is. (Ez a két lehetőség nem feltétlenül szabadon választható!) Számos paramétértől függ, hogy a kemence hőmérséklet-kijelzője szerint mikor van a rendszer az ausztenitesítési hőmérsékleten. Mivel a kijelző a hőmérsékletmérő (pl. termoelem) mérési pontjának hőmérsékletét jelzi és nem a munkadarabét, ráadásul a felfűtés során bizonyosan van a darabon belül is hőmérséklet-különbség, szükségszerű, hogy a kijelzett (mért) hőmérséklet nem a munkadarab minden pontjának hőmérséklete, még csak az átlaghőmérsékletének sem tekinthető. Időre van szükség, hogy a hőmérséklet-különbségek a munkadarabban kiegyenlítődjenek, és a hőmérséklet-kijelzőnek megfelelő értéket felvegye. Eerre szolgál a hőtartási idő.

Ezzel szemben a lézersugaras edzés során a lézersugár egyenletes sebességgel halad a munkadarab felületén. Az ausztenitesítés során a lézersugár foltja egyszer halad végig a munkadarab felületének egy pontján.

Példaként legyen egy Gauss-közi, vagyis majdnem ideális intenzitáseloszlású lézersugárnyalábunk, ami halad a munkadarab sík felületén. A sugárnyaláb a munkadarab felületén egy jól definiálható nagyságú és alakú foltot világít meg. A munkadarab felületén képzeletben válasszunk ki a lézersugár haladási irányára merőlegesen egy keskeny sávot. Ezen a keskeny sávon fog a lézersugár foltja áthaladni (2.1.7. ábra). Kezdetben csak a folt széle éri a vizsgált területet, ahol a lézersugár intenzitása még kicsi. A lézersugár továbbhaladásával egyre nő a vizsgált sávot érő lézersugár intenzitása és a sáv megvilágított szakaszának nagysága. A növekedés addig tart, amíg a megvilágított folt közepe el nem éri a sávot. Ettől a pillanattól a lézersugár intenzitásának folyamatos a csökkenése, aminek dinamikája a növekedésével azonos, de ellentétes értelmű.



2.1.7. ábra

Legtöbb energiát a vizsgált sávnak az a része kap, amelyen a lézersugár foltjának közepe haladt át. Ennek mindkét oldalán monoton csökken a munkadarabra jutott energia nagysága. A leírt folyamatban kell megtörténnie az acél ausztenitesedésének, vagyis a felhevítésnek és a hőtartásnak.

2. A lézersugaras edzés termikus viszonyai

A hagyományos és a lézersugaras edzés termikus viszonyainak összehasonlításából eddig azt láthattuk, hogy csak a termikus folyamatok végeredményében van egyezés, hiszen minden esetben az ausztenites állapot elérése a cél. Szembeötlő azonban a különbség a felhevítés és – amint azt látni fogjuk – a lehűlés megvalósulásában.

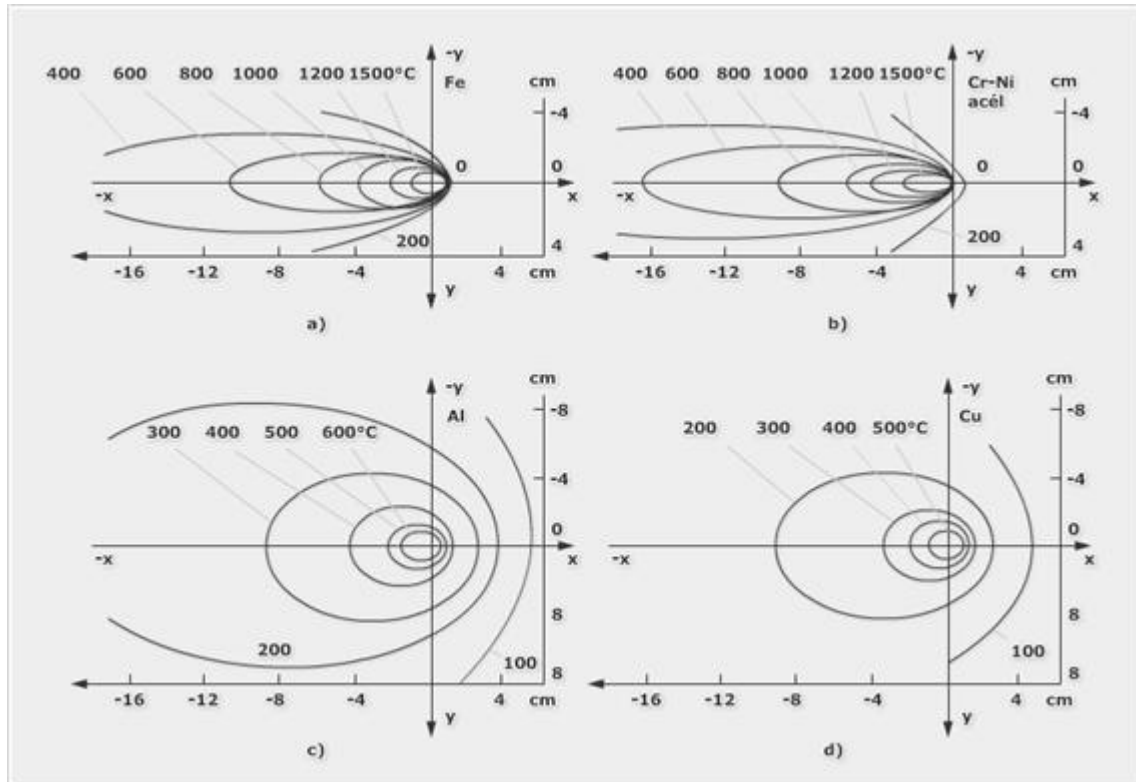
A különbség gyökere a hőközlés módjában van, aminek két lényeges vonatkozása van:

- Míg a hagyományos edzési technológiák esetén a hőközlés a munkadarab nagy felületére (gyakran a teljes felületére), addig a lézersugaras esetben csak kis területére kiterjedő.
- A lézersugaras edzés során a munkadarab felületét lényegesen nagyobb intenzitású (teljesítménysűrűségű) energia éri, mint a hagyományos edzési technológiák esetén.

Ezek következménye, hogy a lézersugaras edzés során a munkadarab felületén és a munkadarabban helyről helyre eltérő, de jellemzően nagy termikus gradiens alakul ki. A létrehozható termikus gradiens nagysága a paraméterek két csoportjától függ:

- A lézersugár jellemzői (teljesítmény, teljesítménysűrűség, intenzitáseloszlás, hullámhosszúság).
- A munkadarab jellemzői (abszorpció, hővezető képesség, hőkapacitás, geometriai jellemzők).

A két paramétercsoport legnagyobb hatású tagjai a teljesítménysűrűség és a hővezető képesség, amelyek a termikus gradiens szempontjából egymás ellen hatnak. A nagyobb teljesítménysűrűség és a kisebb hővezető képesség a termikus gradiens növekedésének irányában hat. Példa erre a 2.2.1. ábrán látható ábraszorozat, amin négy különböző anyagban kialakuló hőmérséklet-eloszlás látható. A hőbevitel minden más jellemzője megegyezik (2.2.1. ábra).



2.2.1. ábra Forrás: <http://www.csukas.sulinet.hu>

Az izotermák közötti különbségek csak az anyagminőségek jellemzői közötti különbségekből fakadnak. Amint látjuk, az X irányban haladó, kör keresztmetszetű lézersugár a négy anyagot nem volt képes azonos hőmérsékletre hevíteni. A különbségek kialakulásának egyik oka, hogy a négy anyagnak nem azonos az abszorpciós képessége, a réz a legrosszabb. A másik ok, hogy a réznek a legjobb hővezető képessége, ezért abban lett a legkisebb a termikus gradiens.

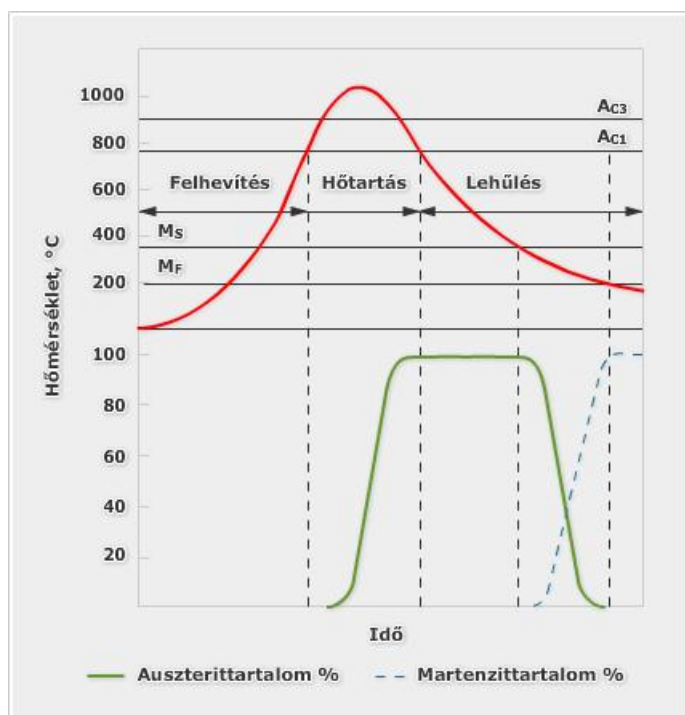
A 2.2.1. ábrán látható izotermák egy-egy meghatározott abszorpciós tényező esetében alakulnak ki. Az abszorpciós viszonyok megváltoztatásának lehetőségeiről a *Lézersugaras technológiák I.* című jegyzet 1.4. fejezetében olvashatnak.

Az acélok lézersugaras edzése szempontjából az a lényeges, hogy a lézersugár a haladása során milyen széles területet képes ausztenitesíteni, illetve a tovahaladó lézersugár nyomában a vizsgált pont mennyi idő alatt hűl az M_s hőmérsékletre. Egy általános esetet szemléltet a 2.2.2. ábra.



2.2.2. ábra

A 2.2.3. ábra a munkadarab felületének egy kicsiny térfogatrészén áthaladó lézersugár hatására bekövetkező hőmérséklet-változást, valamint a térfogatrész ausztenit- és martenzittartalmának változását mutatja az idő függvényében. Az ausztenitesedés akkor kezdődhet el, amikor a térfogatrész hőmérséklete az A_{C1} -nél nagyobbá válik. Befejeződni valójában majd akkor fog, amikor az ausztenitesedési diagram szerinti feltételek is teljesültek. A munkadarab felületén a lézersugárfoltnak olyan nagynak kell lennie, és olyan lassan kell haladnia, hogy az ausztenitesedés a vizsgált térfogatrészben valóban be is fejeződjön.



2.2.3. ábra

A munkadarabnak csak az része edződhet, amelyik a lézersugaras hevítés hatására ausztenites állapotba került. Az edzhető acélminőségek (megfelelő kémiai összetétel) esetén ebben a térfogatrészben a mertenzit képződésének két feltétele már teljesült (ausztenites kiinduló állapot, megfelelő kémiai összetétel). A harmadik szükséges feltétel, hogy az adott térfogatrész kellően nagy sebességgel hűljön (kritikusnál nagyobb hűlési sebesség). Ezt a hagyományos edzési technológiák esetében valamilyen hűtőközeg segítségével érik el. Ilyen hűtőközeg lehet a víz, az olaj, vagy ezek valamilyen adalékanyaggal módosított változata. A hűtőközegek hűtési erélyességét (összetételét) mindig az acél kémiai összetételéhez kell igazítani. Ennek oka az alkatrész vetemedésének és repedésének veszélye.

A hagyományos edzésnél lejátszódó hűlési folyamatól lényegesen különbözik a lézersugaras edzésé. A lézersugaras edzés során nem alkalmaznak hűtőközeget. Az ausztenites állapotú anyagrész kellően gyors hűlését a munkadarab hőkapacitása és hővezető képessége teszi lehetővé. A 2.1.7. ábrán láthattuk, hogy a lézersugar haladási irányából nézve, a munkadarab felületén nagyon nagy termikus gradiensek alakulnak ki a lézertolt környezetében. Ugyanilyen nagy termikus gradiens van az anyag belseje felé is. Ha megszűnik a felszín lézersugaras hevítése, a termikus gradiens hatására a hőtartalom a munkadarab belseje felé távozik, a hőmérséklet kiegyenlítődik. (Azt mondani, hogy az alkatrész hideg része elszívja a hőt a meleg területről, termodinamikai szempontból helytelen fogalmazás és helytelen szemlélet!)

Hasonlítsuk össze a hagyományos és a lézersugaras edzés hűlési szakaszát!

1. Látnunk kell, hogy a hűléshez a hagyományos esetben a hűtőközeg hőkapacitására van szükség, a lézersugaras esetben pedig a munkadarabéra.
2. A hőterjedés irányát tekintve ellentétes a folyamat, mert a hagyományos esetben a hőmennyiség a munkadarab felszíne felé, a lézersugaras esetben a munkadarab belseje felé halad.
3. Nagy jelentősége van annak is, hogy az ausztenites állapotú anyagrész és a hűlést biztosító közeg (víz, olaj, levegő) között a hagyományos esetben fázishatár(ok) van(nak), a lézersugaras esetben nincs.

Az utóbbi két szempontot érdemes részletesebben is megvizsgálni.

Ad 2. Ha a hőterjedés iránya az anyag belseje felé mutat (lézersugaras eset), akkor ennek az lesz a következménye, hogy az ausztenit martenzitté alakulása az anyag belsejében kezdődik, és a fázisátalakulási front a felszín felé halad. A hagyományos esetben pont fordítva, a felületen indul és befelé halad. Tudjuk, hogy az ausztenit martenzitté alakulása térfogat-növekedéssel jár. Hagyományos esetben a térfogat-növekedés a

felületen kezdődik és halad a mélyebben fekvő rétegek felé. Ennek következtében, az átalakulás során kezdetben nyomófeszültség jön létre a felületen. Később, amikor a mélyebben fekvő részek alakulnak át, ennek mértéke folyamatosan csökken, végül átválthat húzófeszültségbe, ami szélső esetben a jól ismert repedéshez is vezethet (edzési repedés). A lézersugaras edzés esetén az utoljára átalakuló rész a munkadarab felületén, annak közelében van, így a felszín mindig nyomófeszültség alatt van, ami a repedési hajlamot erősen csökkenti.

Ad 3. A hagyományos edzés során az izzó munkadarabot mártjuk az edzőközzel telt kádba. Attól függetlenül, hogy az edzőközzel víz vagy olaj alapú, az izzó tárgy felületén a közeg egy része gőzzé/gázzá válik. Az izzó, ausztenites állapotú anyag hűlése tehát csak úgy valósulhat meg, hogy a hő először a gőz-/gázközegbe, majd onnan a folyékony halmazállapotú hűtőközegbe jut, ahol áramlás révén továbbítódik. Az izzó darabban lévő hőmennyiségnek tehát két fázishatáron kell átlépnie: acél→gőz/gáz és gőz/gáz→folyadék. Mind a kettő korlátozza a hőtranszport intenzitását. Mindeközben az alkatrész belseje felől a felszín felé kell a hőmennyiségnek jutnia, ami csak hővezetéssel történhet. Ebben a folyamatban a „szűk keresztmetszet”, vagyis a hőtranszportfolyamat legkisebb intenzitású része, a munkadarab→hűtőközeg kapcsolatban van (az acélok hővezető képessége ennél nagyobb intenzitást tesz lehetővé). A lézersugaras edzés esetén csak a hővezetésnek van szerepe a hűlés során. Ennek sebességét pedig csak a termikus gradiens nagysága befolyásolja. A hőforrás és a hőnyelő között tehát nincs közbeiktatott szereplő. Ennek az a következménye, hogy a lézersugaras edzés során nagyobb hűlési sebesség érhető el, mint a hagyományos esetekben. Ez azt eredményezi, hogy sok olyan acélminőség is edzhetővé válik, amelyek a hagyományos technológiákkal nem edzhetőek, mert a C-görbék bénites orrpontjai nagyon kis időknél vannak, vagyis a bénítképződést csak úgy lehet elkerülni, ha nagyon gyorsan hűtjük az auszenitet. Olyan gyorsan, ahogyan hűtőközzel nem lehet.

A lézersugaras edzés termikus viszonyait áttekintve meg kell állapítanunk, hogy mind a felhevítés, mind a hűlés körülményeiben lényeges eltérések vannak a hagyományos edzéshez képest.

3. A lézersugaras edzés technikája

Vegyük számba, hogy milyen technikai feltételek szükségesek az acélok lézersugaras edzéséhez. Alapvető feltétel, hogy a munkadarab edzendő felületére egyenes vonal mentén rá lehessen látni. Ez – a hagyományos edzés körülményeihez képest – lehet előny és hátrány is. Például előny, ha a zsákfurat vagy a nüt alját, oldalát kell edzeni, hátrány, ha egy nem látható felületet. Általában igaz, hogy a lézersugaras edzés technológiáját akkor érdemes alkalmazni, amikor a munkadarab felületének csak egy részét kell edzeni. A tömbi edzés esetén, amikor az alkatrész egész tömegét edzeni kell, a hagyományos technológiák többnyire gazdaságosabbak.

További feltételek:

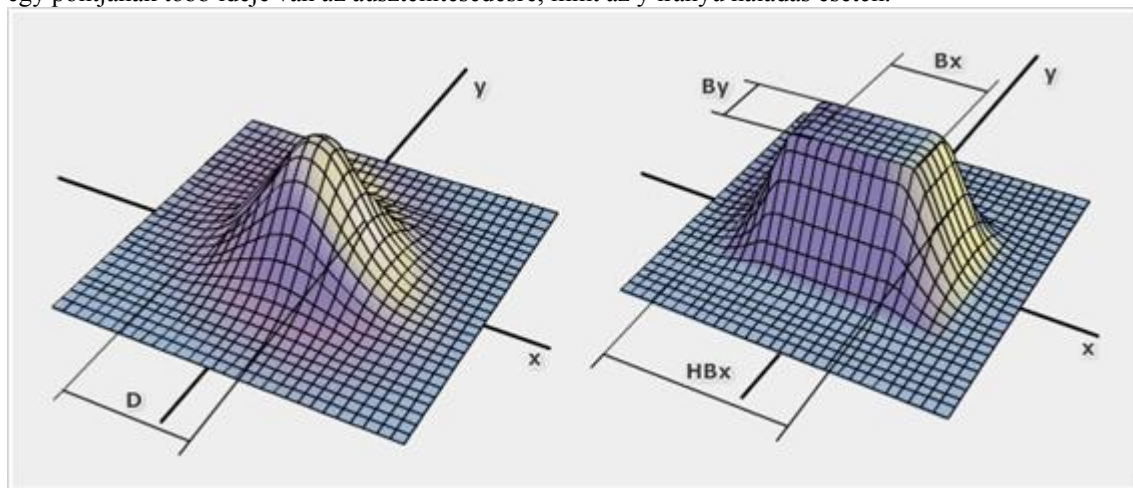
- kellően nagy lézersugár-teljesítmény,
- folyamatos vagy hatásában annak tekinthető üzemmódú lézersugár,
- megfelelő intenzitáseloszlás.

Ad 1. A lézersugár teljesítménye alapvetően befolyásolja az időegység alatt edzhető felület nagyságát. A nagyobb lézersugár-teljesítménnyel gyorsabban lehet edzeni. Ez két értelemben is értendő: hamarabb el lehet érni az ausztenitesedési hőmérsékletet, és időegység alatt nagyobb felületet lehet edzeni. A kis teljesítmény azzal a veszéllyel is jár, hogy nem alakul ki az a kellően nagy termikus gradiens, ami a kívánt (elérendő) hűlési sebességhez szükséges. Az alkatrész edzendő felületének geometriája is befolyásolja a szükséges teljesítmény nagyságát. Legnagyobb teljesítményre akkor van szükség, ha nagy összefüggő felületet kell edzeni. Kevesebb is elegendő, ha csak néhány mm széles sávot kell edzeni. A kis terjedésű, pontszerű foltok edzéséhez kell a legkisebb teljesítmény. Kiterjedt felületek edzéséhez több (>1) kW fényteliességűre van szükség. Keskeny sávok edzéséhez a néhány száz watt is elegendő.

Ad 2. A lézersugaras edzés ideális termikus viszonyait csak folyamatos üzemmódú (cw: Continuous Wave Mode), vagy hatásában annak tekinthető lézersugárral lehet megvalósítani. Az impulzus üzemmód esetén a szünetidőben a felületen abszorbeált energiának utánpótlás nélkül van módja az anyag belseje felé távozni, ami a hőmérséklet-kiegyenlítés, vagyis a termikus gradiens csökkenésének irányában hat. Ez pedig csökkenti az edzéshez szükséges hűlési sebességet.

Ad 3. A lézersugárforrásokból általában olyan intenzitáseloszlású lézersugár lép ki, ami az optikai tengelyre nézve forgásszimmetrikus. Felületek lézersugaras edzése szempontjából az ideális Gauss-eloszlás a legkedvezőtlenebb. Ebben az esetben ugyanis a munkadarab felületét, a lézersugárral megvilágított folt közepét

könnyen túlhevíthetjük, rossz esetben megolvashatjuk, miközben az ausztenitesedett folt mérete kicsi marad. Edzés szempontjából kedvezőbb a magasabb rendű sugármódus (TEM_{01} , TEM_{01}^* stb.), vagy a multimódusú (összetett módusú) lézernyaláb. Kifejezetten előnyös, ha a lézernyaláb belüli intenzitáseloszlás nem forgásszimmetrikus. A diódlézer-tömbökből kilépő lézersugár például kiválóan alkalmas lézersugaras edzésre. A 2.3.1. ábrán bemutatott jobb oldali intenzitáseloszlás esetén, a körülményekhez igazodóan választhatunk, hogy a lézersugár x vagy y irányban haladjon a munkadarab felületén. Az x irányú haladás esetén a munkadarab egy pontjának több ideje van az ausztenitesedésre, mint az y irányú haladás esetén.



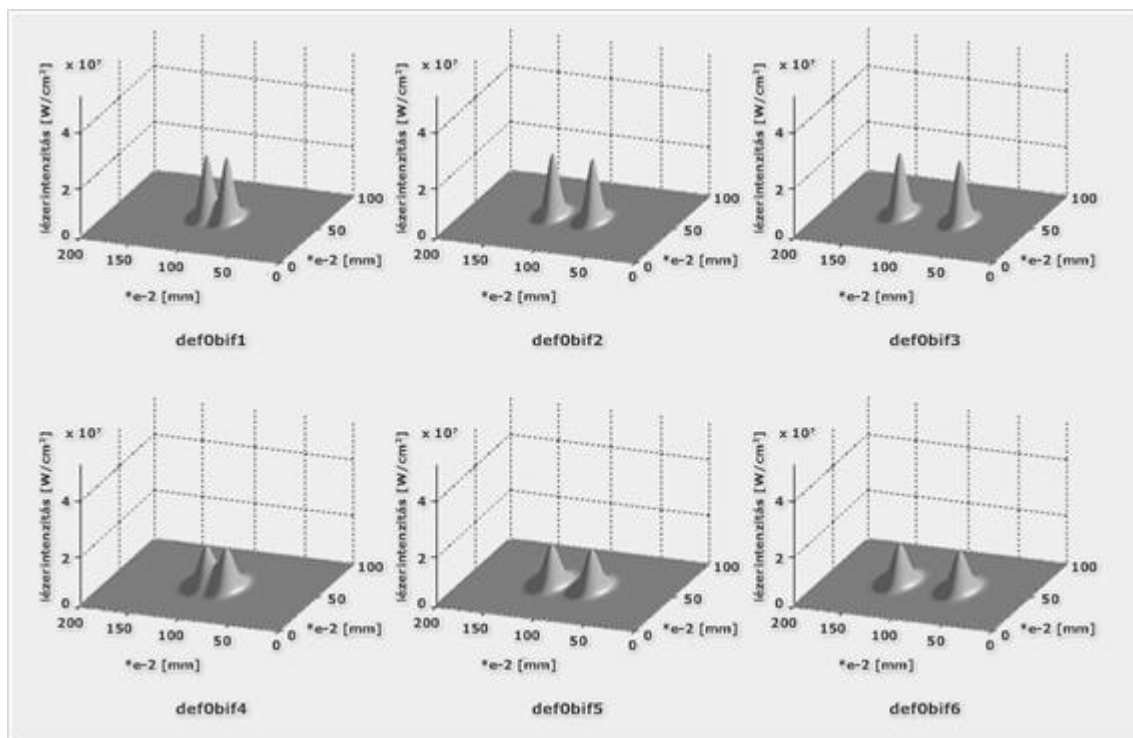
2.3.1. ábra

Az előző gondolatokat áttekintve és összefoglalva megállapíthatjuk, hogy kellően nagy cw lézersugár-teljesítmény esetén akkor tudunk hatékonyan és jó minőségi eredménnyel edzeni, ha a lézersugár minőségét szándékosan elrontjuk, teljesítményét nem egy pontra koncentrálnuk, hanem lehetőleg egyenletesen „szétkenjük” a munkadarab alkalmasan megválasztott nagyságú felületén. Ezt úgy érhetjük el, hogy a lézersugár útját a rezonátor és a munkadarab közötti szakaszon módosítjuk. Vegyük sorra, milyen lehetőségeink vannak!

Defókuszt: A munkadarab felületének részleges megolvadását elkerülhetjük, ha a szükséges teljesítménysűrűség érdekében a fókuszált lézersugár fókusza nem a munkadarab felületén van (defókuszhelyzet). Praktikus okokból általában a pozitív defókuszt alkalmazzuk (a lézersugár fókusza munkadarabon kívül van), mert ekkor a munkadarab és lencse közötti nagyobb távolság miatt az esetleg felrepülő szikrák által a lencse felülete kevésbé veszélyeztetett. Sík felület edzése esetén mindenképpen a pozitív defókuszt javasolt. Térbeli felület edzésekor a nagy munkadarab tárgy távolság miatt geometriai problémák adódhatnak (a munkadarab méretéhez képest nincs a lézerfejnek elegendően nagy mozgástere). Ekkor kényszerűségből a negatív defókuszt (a lézersugár virtuális fókusza a munkadarabban van) kell választani. Tisztában kell azonban azzal lennünk, hogy a defókusszal – jellegét tekintve – nem változik meg lényegesen a lézersugár nyaláb belüli intenzitáseloszlása. Ez azt jelenti, hogy ha a fókuszban a fókuszfolt közepén van a legnagyobb intenzitású pont, akkor a defókuszfoltban is.

Bifókuszt: Megfelelő optikai elemek alkalmazásával mód van arra, hogy a lézersugárforrásból kilépő nyalábot kettéosztjuk, és ezt a két nyalábot fókuszáljuk a munkadarab felületére. Ezt az optikai helyzetet nevezzük bifókusznak. A bifókusz mértékét a két fókuszfolt optikai középpontja közötti távolságként értelmezzük.

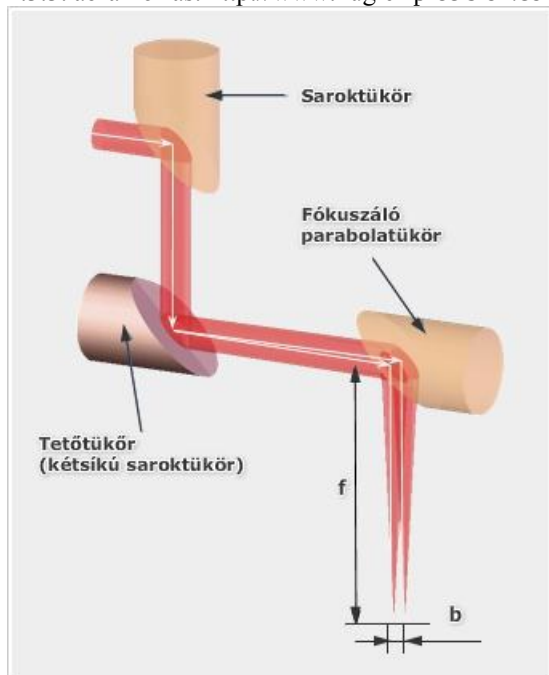
A nyaláb kettéosztásának következtében a munkadarab felületén tehát két, egymás mellett lévő fókuszfolt jön létre, amit természetesen defókuszhelyzetbe is hozhatunk. Ennek az az előnye és értelme, hogy a lézersugár energiáját nagyobb területre osztjuk el, csökkentve a túlmelegedés (megolvadás) veszélyét. Néhány lehetséges intenzitáseloszlási helyzetet szemléltet a 2.3.2. ábrasorozat.



2.3.2. ábra

A bifókusz létrehozására több technikai megoldás is van. Ezeket két csoportba lehet rendezni. Az egyik szerint a bifókusz mértéke állandó, a másik szerint változtatható.

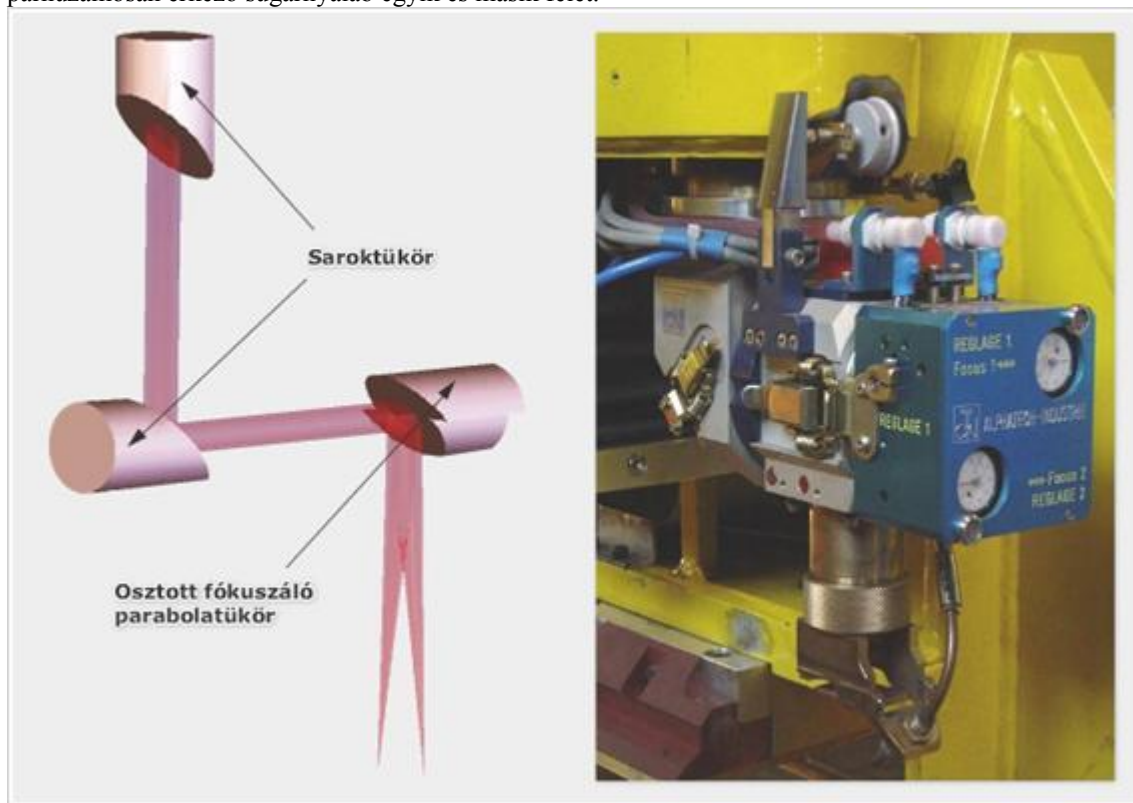
Az állandó bifókusz esetén először a fókuszálatlan sugárnyalábot osztják ketté egy olyan saroktükörrel, aminek két síkja van, amelyek egymással szöget zárnak be. Ezt, a tükör jellege miatt, tetőtükörnek is nevezik (2.3.3. ábra). A kettéosztott nyalábot egy parabolatükör fókuszálja (2.3.4. ábra).

2.3.3. ábra Forrás: <http://www.kugler-precision.com>

2.3.4. ábra

A bifokálitás (b) mértékét elvileg lehet változtatni, ha a tetőtükör és a parabolatükör közötti távolságot változtatjuk. Ezt az elvi lehetőséget ritkán használják ki, mert a tükrök mozgatása során nehéz tartani az optikai egytengelyűséget. Az eltérés az ideális egytengelyű állapottól nehezen kezelhető fókuszvándorlást eredményez a munkadarab felületéhez képest.

A változtatható bifókusz esetén a fókuszáló parabolatükör áll két részből. A két félpárola egymáshoz képest elcsúsztatható (2.3.5. ábra). Az egymáshoz képest elcsúsztatott két parabolafél két különböző helyre fókuszálja a párhuzamosan érkező sugárnyaláb egyik és másik felét.



2.3.5. ábra

Ebben az esetben különösen fontos a sugárvezetés optikai egytengelyűsége. A sugárnyaláb optikai tengelyének kis kitérése a parabolatükör osztási vonalától ugyanis azt eredményezi, hogy a két fókuszolt teljesítménye nem lesz egyforma. Az ilyen irányú érzékenység annál nagyobb, minél inkább ideális (Gauss) a lézernyaláb intenzitáseloszlása.

Integrátor, facettált (több síkból álló) és egyéb speciális tükrök: Tömegtermelés esetén érdemes speciális tükröket készíteni, amik a fókuszálatlan sugárnyaláb és a munkadarab jellegzetességeit egyaránt figyelembe veszik. Ilyen eset lehet a csövek belső felületének, a szerszámgépek prizmájának, a vágóéleknek stb. edzése (2.3.6. ábra).

A speciális tükrök egyik része arra alkalmas, hogy a körszimmetrikus lézersugarat vonalszerűvé vagy négyszögletessé tegye (pl. 2.3.1. ábra), a másik része pedig arra, hogy a munkadarab geometriájához illessze (pl. csövek belsejének edzése). Egy integrátor-saroktükör a képe látható a 2.3.6. ábrán. Az ilyen speciális tükröket számítógéppel vezérelt, gyémánt forgácsolószerszámú nano- v. mikromegmunkáló szerszámgépekkel készítik. A forgácsolt felületnek optikai pontosságúnak és felületi minőségűnek kell lennie.



2.3.6. ábra Forrás: Kugler

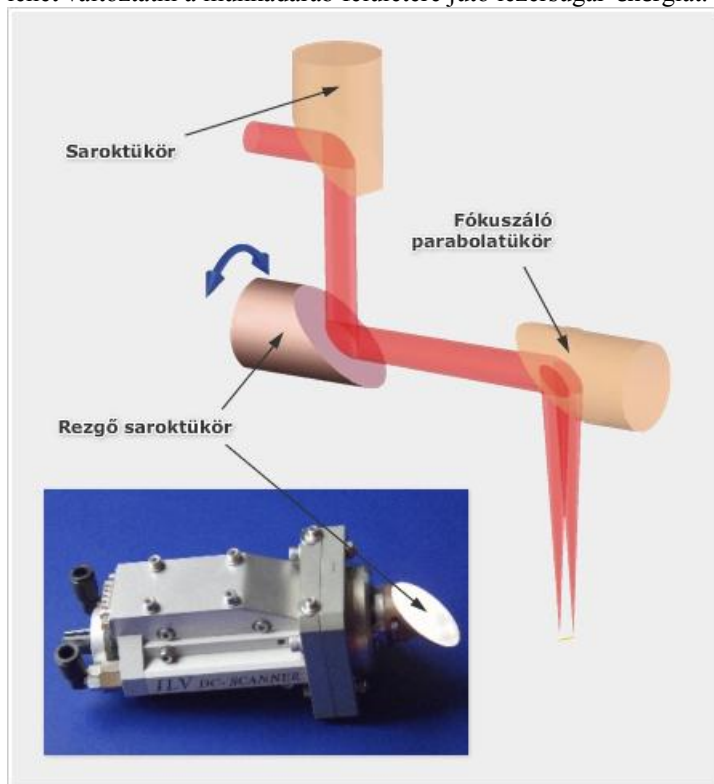
Virtuális vonalfókusz: Az előzőekhez képest lényegesen nagyobb szabadsági fokot eredményez a virtuális vonalfókusz alkalmazása. A virtuális vonalfókusz alkalmazásának lényege, hogy a munkadarab felületén – a lézerfej haladási irányára merőleges irányban – nagy sebességgel mozgatjuk (rezgetjük) a lézernyaláb

fókuszoltját. Ennek az az eredménye, hogy a munkadarab felületén a rezgés amplitúdójának megfelelő hosszúságban, egy vonalszerű foltban izzik, vagyis ausztenitesedik az acél (2.3.7. ábra).

A lézersugár rezgése többnyire síktükörrel (saroktükörrel) történik, ami a fókuszáló lencse (vagy tükörlencse → parabolatükör) előtt és után is lehet, de attól legfeljebb néhány cm-re. (Az előtte vagy utána helyzetet a lézersugár haladási iránya szempontjából kell értelmezni.) A tükröt többnyire egy galvomotor tengelyére szerelik úgy, hogy a tükör billegő mozgást végezzen. A galvomotor elektromos vezérlésével lehet a billegés szögtartományát, végeredményben a virtuális vonalfókusz hosszúságát változtatni. Természetesen a fókuszáló elemet is lehet rezgetni, de ez ritkább megoldás.

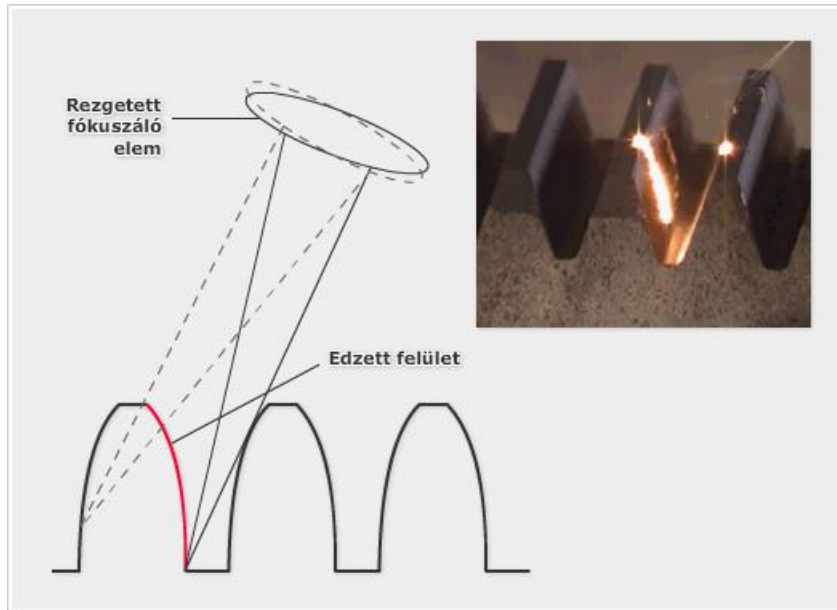
A galvomotorra jutó jel alakja lehet szinuszos, de attól eltérő is. Ennek azért van jelentősége, mert a tükör kitérítésszerű függvénye határozza meg, hogy a virtuális fókuszvonal mentén hogyan változik a munkadarab felületére jutó energia. A szinuszos jellegű kitérés nem eredményez egyenletes energiaeloszlást a vonal mentén. A rezgés ideális frekvenciája a munkadarab termikus jellemzőitől, a lézersugárforrás paramétereitől és a geometriai optika adottságaitól függ. 10mm-nél hosszabb vonalfókusz esetén legalább 100Hz-es rezgési frekvenciára van szükség, különben a vonal mentén lüktetővé válik a hőmérséklet-változás.

A virtuális vonalfókusz lehetőségeit akkor tudjuk igazán kihasználni, ha a lézersugár teljesítményét a sugáreltérítés helyzetéhez illesztetten modulálni lehet. Ilyen lehetőség esetén a fókuszvonal mentén szabadon lehet változtatni a munkadarab felületére jutó lézersugár-energiát.



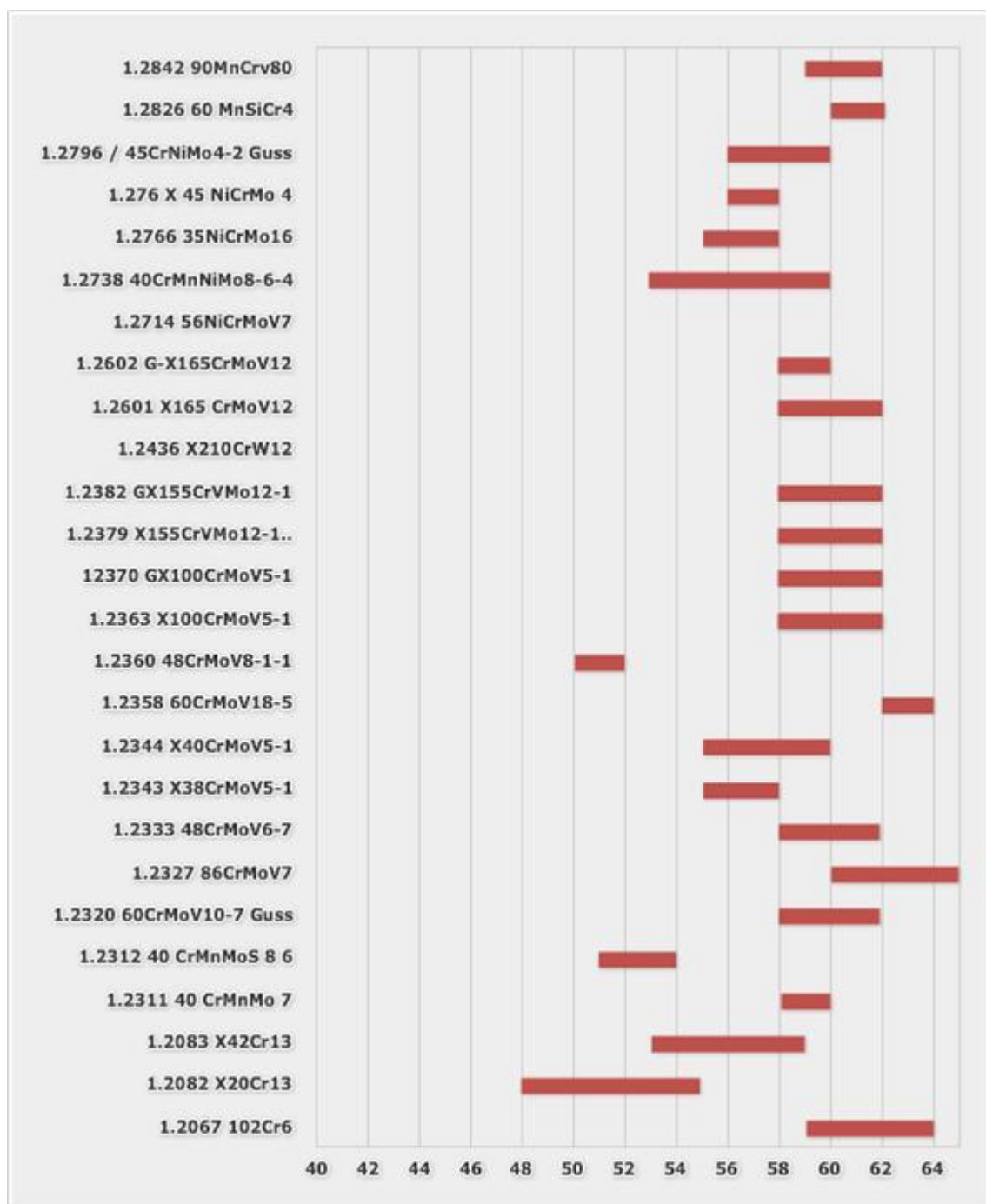
2.3.7. ábra

Vannak olyan esetek, amikor a virtuális vonalfókuszú lézersugár teljesítményrezgésének meghatározó szerepe van. Legyen erre példánk egy fogasléc, aminek fogfelületeit kell edzeni. (A hagyományos edzés azért nem javasolt, mert a hosszú, karcsú fogasléc vetemedésének nagy a veszélye, ill. egyedi darabról van szó.) A 2.3.8. ábra szemlélteti a geometriai adottságokat. Célunk, hogy a lézersugár a lehető legnagyobb szög alatt érje a fog felületét. Sajnos, a sugárrezgés során – a szögeltérés függvényében – a fogfelületen jelentős mértékben változik a lézersugárfolt nagysága, ennek következtében a sugárintenzitás is. Ha nem tudnánk változtatni és összehangolni a sugáreltérítés sebességét és a lézersugár teljesítményét, a fog felületét nem tudnánk egyenletes sebességgel hevíteni.



2.3.8. ábra Forrás: BAY-ATI, Budapest

Végül legyen egy összefoglalás arról, hogy az egyes acélminőségek esetén milyen felületi, ill. rétegkeménység érhető el a lézersugaras edzések technológiáival (2.3.9. ábra).



2.3.9. ábra Forrás: <http://www.alotec.de>

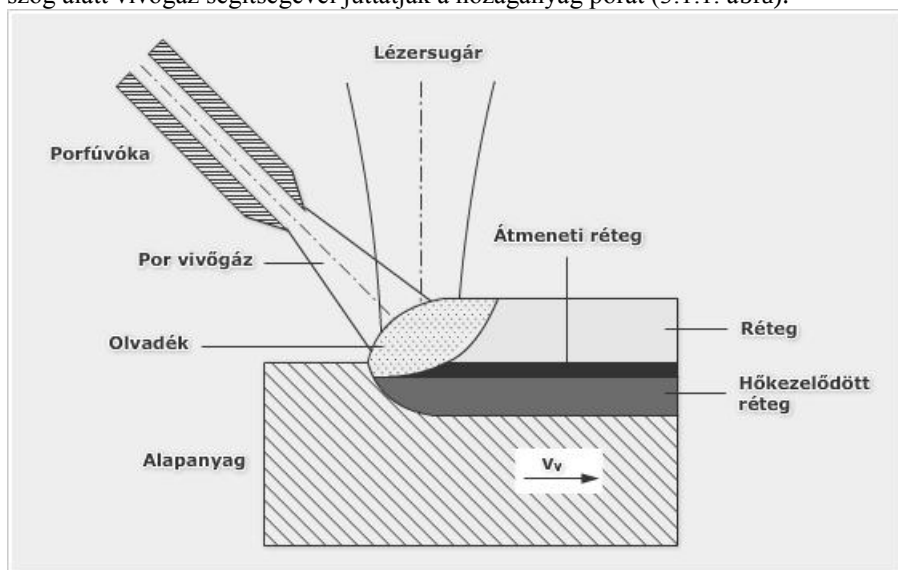
3. fejezet - Felrakóhegesztés és ráolvasztás

A felrakóhegesztés és a ráolvasztás technológiájában közös, hogy a munkadarab anyagát részben meg kell olvasztani, hogy a rákerülő új anyaggal biztosan kialakuljon a kohéziós kapcsolat. Különbség a két technológia között, hogy a ráolvasztás esetén – amennyire csak lehet – kerülni kell az alapanyag felkeveredését a réteg anyagába. A felkeveredés elkerülésének oka általában az, hogy a munkadarab anyaga, annak fő komponense rontja a réteg valamilyen tulajdonságát. Ilyen eset pl. az acél munkadarab felületén létrehozott kobaltbázisú ötvözetből álló réteg. Egyes kobaltbázisú ötvözetek rendkívül kopásállóak, de az ötvözet Fe-tartalmának növekedésével rohamosan csökken ez a jó tulajdonsága.

Egy alkatrész lézersugaras felrakóhegesztési vagy ráolvasztási technológiájának kidolgozásához, ill. megítéléséhez anyagtudományi és lézertechnikai ismeretekre egyaránt szükség van. Az anyagtudományiakra azért, hogy a két anyag (alapanyag és rétegeképző anyag) komponenseinek lehetséges kölcsönhatásait és azok következményeit ismerjük (már a tervezéskor tudnunk kell, mi fog történni, ha a két anyagot összeolvasztjuk), a lézertechnikaiakra pedig azért, hogy a megvalósíthatóság lehetőségeit lássuk, és azok közül kiválasszuk a körülmények szerinti optimálisat. A szükséges anyagtudományi ismeretek részletes áttekintése ennek a tananyagnak nem tárgya, de esetenként ebben a fejezetben is hivatkozni fogunk rájuk, ahogyan az edzés esetén is tettük.

1. A felrakóhegesztés és a ráolvasztás technikája

Az egylépéses felrakóhegesztési és ráolvasztási technológia alapesete (ahogyan a szemléltető ábrákon többnyire bemutatják), amikor a munkadarab felületére merőlegesen érkezik a lézersugár, ami a munkadarab felületén fókusz- vagy defókusz helyzetben van. A lézersugár 0,5...5mm átmérőjű olvadátkócsát hoz létre, amibe oldaltól, szög alatt vívógáz segítségével juttatják a hozaganyag porát (3.1.1. ábra).



3.1.1. ábra

A 3.1.1. ábrán már az – egyébként rövid idő, ill. megtett út után kialakuló – állandósult helyzet látható. A lézersugár által megolvasztott tócsa felszíne nem vízszintes, keresztmetszete már nem féllencse alakú. A gömbölyű kitüremkedés felszínét az olvadék fajlagos határfelületi energiája (felületi feszültsége) szabályozza.

Az olvadék térfogatát több tényező is befolyásolja, ezek közül a legfontosabbak:

- a lézersugár foltmérete a munkadarab felületén,
- a lézersugár teljesítménye és a nyalábon belüli intenzitáseloszlása,

- az alapanyag és a hozaganyag kémiai összetétele,
- a por hozaganyag intenzitása és intenzitáseloszlása a tócsa felszínén,
- a lézersugár és a munkadarab közötti relatív sebesség (előtolás sebessége).

Vegyük tudomásul, hogy a 3.1.1. ábra poráramot, ill. annak kúpszerű alakját ábrázoló része többnyire idealizmus, vagy tekintsük a szemléltetés és magyarázás érdekében elkövetett egyszerűsítésnek. A valóságban az olvadék kiterjedése kisebb, mint a porkúp mérete a tócsánál. Ezt azért szükséges megjegyezni, mert tudnunk kell, hogy a vivőgázzal adagolt pornak csak egy része hasznosul. A többi a tócsa körüli részre érkezik.

Annak érdekében, hogy tudjuk, mi történik a folyamat során, érdemes magunkat egy porszemcse helyébe képzelni. Mi történik és történhet vele?

– A porszemcse, kilépve a fúvókából, közel olyan sebességgel halad, mint a vivőgáz, ami többnyire argon. Jellemző haladási sebessége 5...50 mm/s. Ennél több azért nem lehet, mert akkor a por-gáz áram elfújja a tócsát. A szemcse, a rá jellemző méret, sűrűség és sebesség következtében egyedi kinetikus energiával rendelkezik, ami ráadásul számítható nagyságú.

– Van olyan szemcse, amelyik repülése közben hosszabb–rövidebb ideig a lézernyalámban halad. Ennek során, fizikai okokból, melegedni fog. Egyszerűsített számítások és valós mérések szerint, a technológia kimenete szempontjából ennek mértéke a vas, ill. vascsoport fémek és ötvözetek esetén azonban többnyire nem számottevő. A felmelegedés mértékét egyébként túl sok paraméter befolyásolja ahhoz, hogy pontos számításokat érdemes lenne végezni.

– Lesz olyan szemcse, amelyik a tócsa felületét éri. Mi történhet vele? Elmerül, vagy sem? Ez attól függ, hogy

- milyen szög alatt érkezik a felületre (a tócsa felszíne nem sík!), és gondoljunk a lapos szögben dobott kavics pattogó mozgására a víz felszínén;
- mekkora a szemcse kinetikus energiája;
- mekkora a sűrűségkülönbség a szemcse és az olvadék között;
- mekkora az olvadék viszkozitása;
- az olvadék nedvesíti-e a szemcse anyagát (mekkora a nedvesítési peremszög);
- van-e elegendő idő az elmerülésre, mielőtt az olvadék szilárd halmazállapotúvá válik.

Az elmerülés körülményeinek részletesebb leírásával a lézersugaras felületötvözéssel foglalkozó fejezetben találkozhatnak.

– Külön kell említeni a szemcsék alakját, ami a gyártástechnológiájuk következtében lehet különböző. Az olvadékból porlasztással készülő porok szemcséi gömb vagy gömbszerű alakúak. A nagy olvadáspontú anyagok porait aprítással állítják elő, különösen akkor, ha ridegek és ezért könnyen apríthatók. Ezek szögletesek, esetenként laposak. Egyes porok úgynevezett kevert porok, ami eredményezheti azt, hogy gömbszerű és lapos szemcsék egyaránt vannak a poráramban. A porok adagolhatósága szempontjából fontos tulajdonságok:

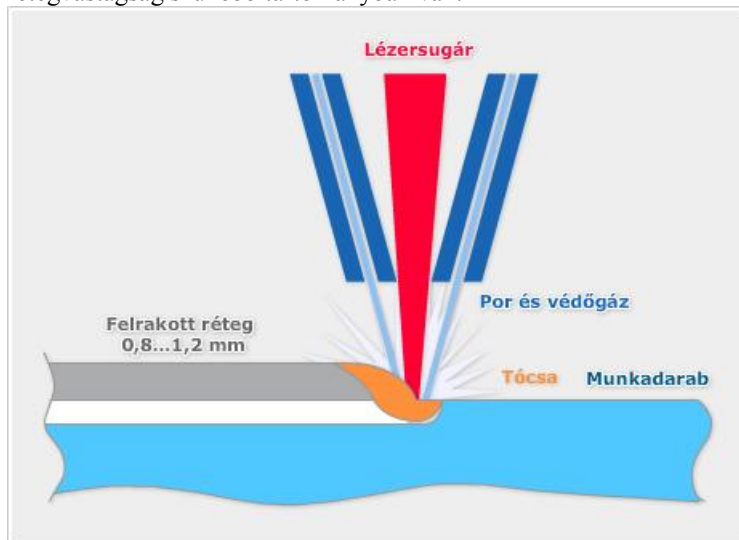
- *Nedvesedési hajlam.* Vannak anyagok, amik pora hajlamos a levegő nedvességét a felületén megkötni, amittől tapadóssá válik. A tapadós porok rosszul adagolhatók, használat előtt ki kell szárítani (szárítókemence, 120...150°C).
- *Szemcseméret,* amit kétféleképpen lehet megadni. Az egyik a szemcse valódi mérete, amit mm-ben adnak meg. Csak olyan porokat forgalmaznak, amelyekre két határértéket adnak meg: a porban található legkisebb és legnagyobb szemcse méretét. A másik a mesh vagy szítaszám, ami a szita „sűrűségével” arányos szám (inchenként a fonalak vagy csomópontok száma). Ebben az esetben is két számot adnak meg: a kisebb szám azt jelenti, hogy az olyan mesh értékű szítán fennakadó szemcse, a nagyobb pedig, hogy az olyan mesh értékű szítán áteső szemcse nincs benne. A szemcseméret és a mesh számértékei fordított arányosságú kapcsolatban vannak: nagy szemcseméret, kis mesh érték.
- *Rézsűszög.* A sík lapra folyamatosan öntött por mekkora talpszögű kúpot formáz. Minél folyósabb a por, annál kisebb kúpot alkot. Száraz poroknál ez jellemzi a szemcsék alakját is.

– A tócsában elmerülő szemcsék döntő többsége megolvad, ettől elvileg folyamatosan nő a tócsa térfogata. Gyakorlatilag azért nem nő, mert a folyamat során a lézersugár, ami az olvadt állapot fenntartásáért felelős, folyamatosan halad a munkadarab felületéhez képest, vagyis folyamatosan az olvadék kristályosodása is. A technológiai folyamat állandósult állapotában időegység alatt annyi szemcse merül el a tócsában, mint amennyi olvadék kristályosodik. Az olvadék térfogata tehát attól függ, hogy egy szemcse becsapódásától a kristályosodásáig tartó idő alatt mennyi további szemcse jutott az olvadékba.

– Lesz olyan szemcse, amelyik túl későn érkezik az olvadék felszínére ahhoz, hogy abban teljesen elmerüljön és maradéktalanul megolvadjon, ill. feloldódjon a tócsa olvadékában. Ezek a szemcsék vagy az olvadékban találhatók meg, részlegesen megolvadva, vagy az olvadék felületéből részben kiállva. Ez úgy értendő, hogy a lézersugaras technológia végrehajtása után, a szoba-hőmérsékletűre hűlt anyag, vagyis a réteg belsejében és felületén is találhatók részben megolvadt szemcsék. A réteg felületére tapadt szemcsék mennyiségét a termikus viszonyok változtatásával lehet befolyásolni: a lézersugár teljesítményének növelésével például csökkenteni. Ebben nagy szerepe van azonban a szemcsék olvadási hőmérsékletének, pontosabban a szolidusz és likvidusz hőmérsékletnek, ill. az ezek közötti különbségnek.

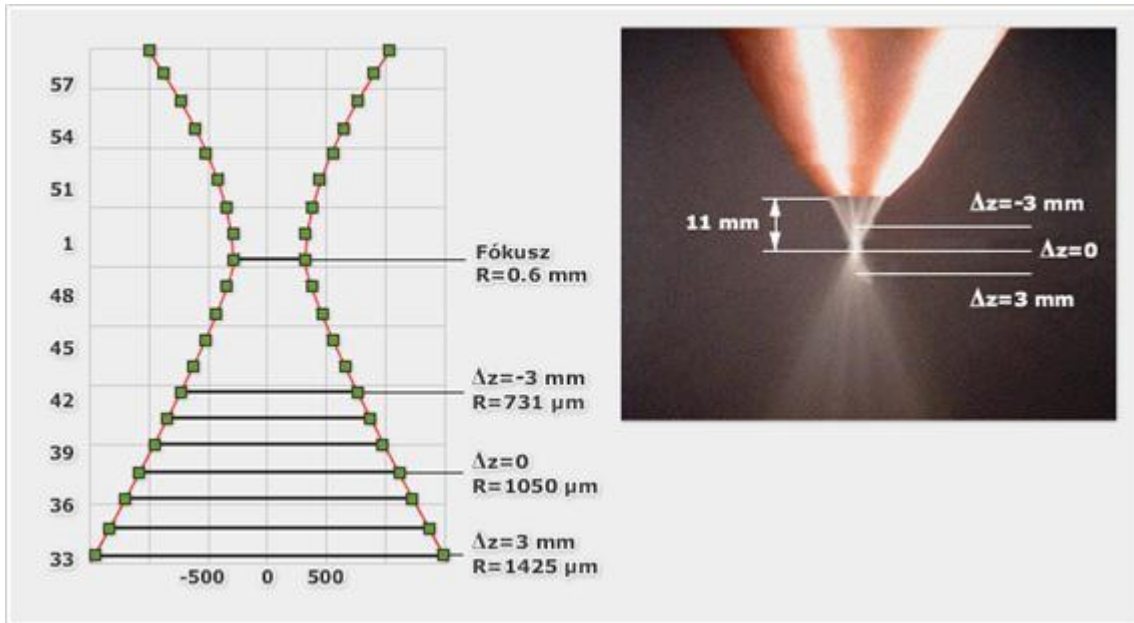
– A szemcsék egy része úgy lép ki a porfűvókából, hogy nem válik a lézersugárral létrehozott réteg részévé. Ezeket a szemcséket a technológiai porvesztéshez kell számolni. Mivel az itt alkalmazott fémporok drágák, törekedni kell a veszteség csökkentésére. A veszteség csökkentését sok technológiai paraméter megváltoztatásával el lehet érni, de mindig vizsgáljuk meg, hogy a megváltoztatott paraméternek milyen egyéb hatása van a technológia eredményére!

A lézersugárhoz képest az oldalirányú porbefűvés alternatívája a koaxiális (3.1.2. ábra). A megoldás előnye, hogy ezzel kisebb sáv szélesség, precízebb poradagolás valósítható meg, hátránya viszont, hogy a létrehozható rétegvastagság szűkebb tartományban van.



3.1.2. ábra Forrás: www.reitze.de

A koaxiális poradagolás jellegzetessége a kúppalást jellegű poráram (3.1.3. ábra). Ezen belül van a szintén kúp alakú lézersugárnyaláb. A két nyaláb kausztikája (az eloszlások burkolófelülete) hasonlít egymásra, de a tengelyre merőleges síkokban az eloszlások nagyon különbözőek. A két kúp csúcshöge nem lehet egyenlő nagyságú, a poráramé lényegesen nagyobb, mint a lézeré. A két csúcspontot egymáshoz képest el kell tudni mozdítani, mert csak így lehet különböző szélességű sávokat létrehozni.



3.1.3. ábra Forrás: Int J of Mach Tools a Manuf; V47, P555-561

A körszimmetrikus intenzitáseloszlású lézersugár foltátmérője a munkadarab felületén megszabja a felrakóhegesztés és a ráolvasztás sávszélességét. Gyakori eset, hogy a lehetséges sávszélesség kicsi a kezelendő felülethez képest. Ekkor több sávot kell egymás mellé létrehozni, megfelelő nagyságú átfedéssel (az átfedés mértékét a sávszélesség %-ában szokás megadni, nagysága 10 és 50 között lehet).

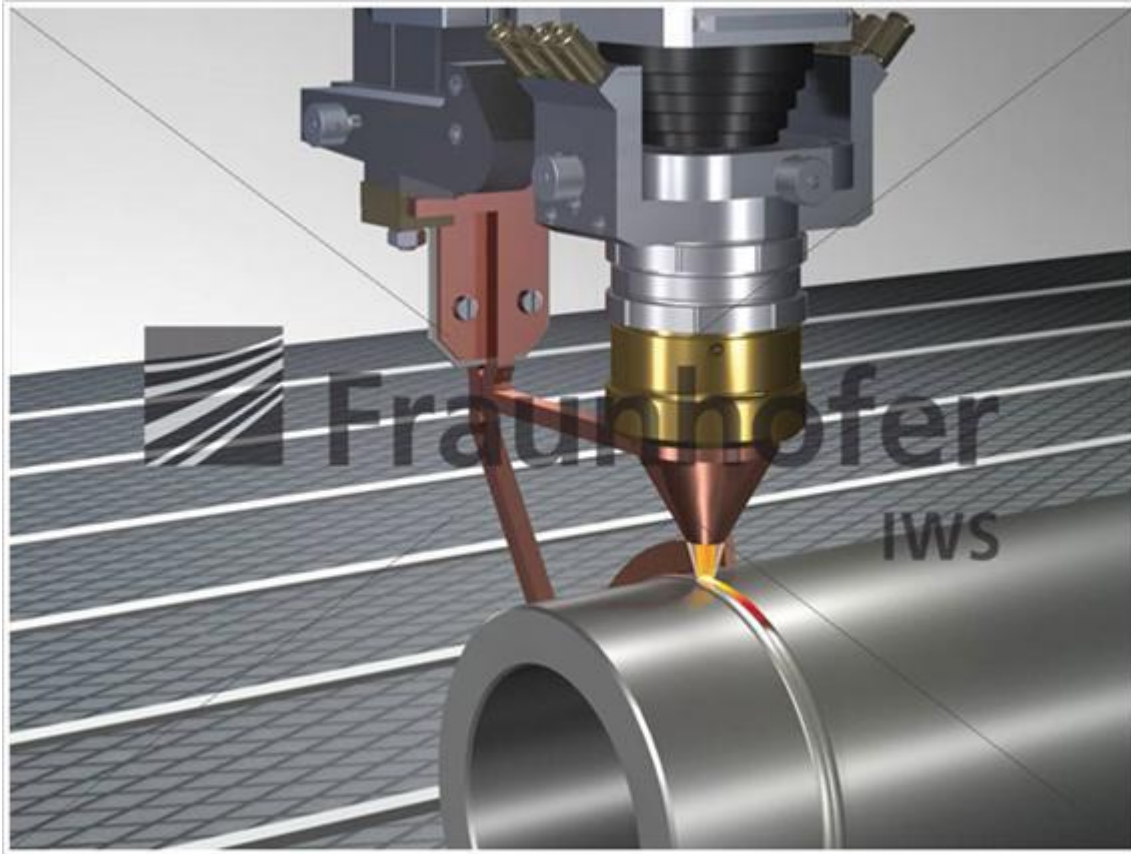
Termelékenyebb a technológia, ha a lézersugár egy tovahaladása során szélesebb sávot lehet létrehozni. Ekkor már nem kedvező a körszimmetrikus poráram, szükség van az intenzitás eloszlásának vonalszerűvé, téglalap alakúvá alakítására. Erre mutat egy lehetséges megoldást a 3.1.4. ábra.



3.1.4. ábra Forrás: Fraunhofer Institut für Werkstoff und Strahltechnik

A felrakóhegesztés és ráolvasztás technológiáját gyakran olyan acélminőségből készült munkadarabon kell végrehajtani, amelyek hajlamosak az edzési repedésre. (Legyünk abban biztosak, hogy a létrehozott réteg alatt az alapanyag a technológiai paraméterektől és az acél minőségétől függő vastagságú rétegben edződni fog!) A repedési hajlam csökkentése érdekében a munkadarabot a lézersugaras megmunkálás előtt elő kell melegíteni. Az előmelegítés hőmérséklete alapvetően attól függ, hogy a lézersugaras megmunkálás (jelen esetben a felrakóhegesztés és ráolvasztás) után a munkadarab kap-e, és ha igen, milyen max. hőmérsékletű hőkezelést. Ha igen, akkor az előmelegítés hőmérséklete nem haladhatja meg ezt a maximumot. Ha nem, akkor az előmelegítés hőmérsékletének az acélalapanyag megeresztési hőmérséklete alatt kell maradnia. Legalább annyival kell a megeresztési hőmérséklet alatt maradnia, hogy a lézersugaras kezelés során se lépjük azt át.

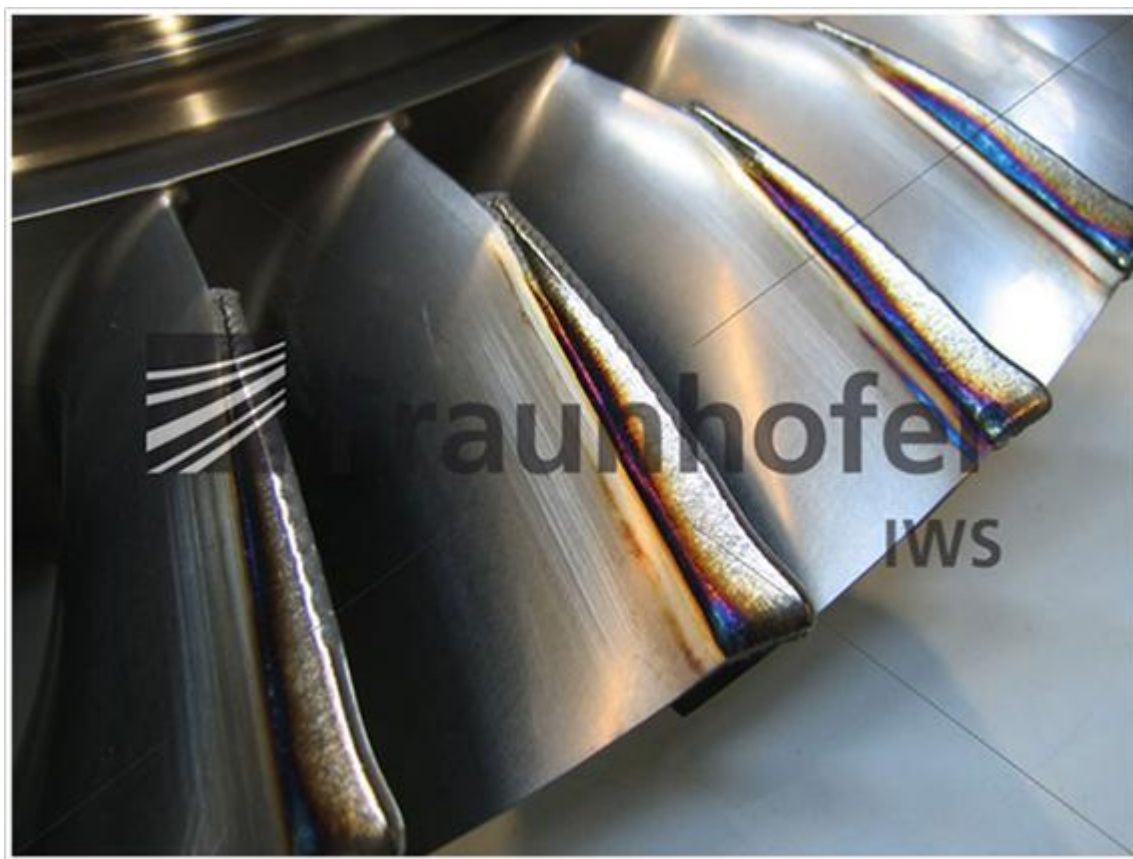
Időt és energiát lehet megtakarítani, ha a repedésveszély elkerülésére az előmelegítést a lézersugaras megmunkálással azonos műveletben végzik. Erre fizikai és gazdasági okokból az indukciós hevítés a legalkalmasabb. Hengeres munkadarabok lézersugaras felrakóhegesztésére és ráolvasztására mutat ilyen példát a 3.1.5. ábra. Az íves kialakítású induktor a lézersugaras megmunkálás előtt egy negyed fordulat idejéig melegíti a munkadarab megfelelő részét. Ennek a megoldásnak több előnye is van. Nem kell az egész munkadarabot felhevíteni, nem kell a meleg munkadarabot mozgatni és rögzíteni, a technológia során nem hűl vissza a munkadarab, szabályozni lehet az előmelegítés mértékét. De van egy hátránya is: minden geometriához új induktort kell tervezni és készíteni.



3.1.5. ábra Forrás: Fraunhofer Institut für Werkstoff und Strahltechnik

A felrakóhegesztés és ráolvasztás technológiáját többnyire nagy értékű munkadarabok, szerszámok esetén alkalmazzák gyártási és/vagy javítási technológiaként. A technológia költségessége miatt a munkadaraboknak csak azt a részét kezelik lézersugárral, amelyekre a tönkremenetelt eredményező igénybevétel a legerősebben hat. Javítás esetén a meghibásodás helye természetesen adott. Vannak olyan alkatrészek, amikre olyan nagymértékű a károsító hatás, hogy a gyártás során megerősített rész is tönkremegy. Az alkatrész (munkadarab) ára azonban indokolja a javítást és az újbóli javítást...

A turbinák lapátjai, lapátkoszorúai az anyaguk és a nagyon kis mérettűrésű bonyolult geometriájuk miatt nagyon drágák. Legjobban igénybevett részük a lapátok belépőélei. Vannak olyan alkalmazások, amikhez a lapátok élet már a gyártás során megerősítik (3.1.6. ábra).

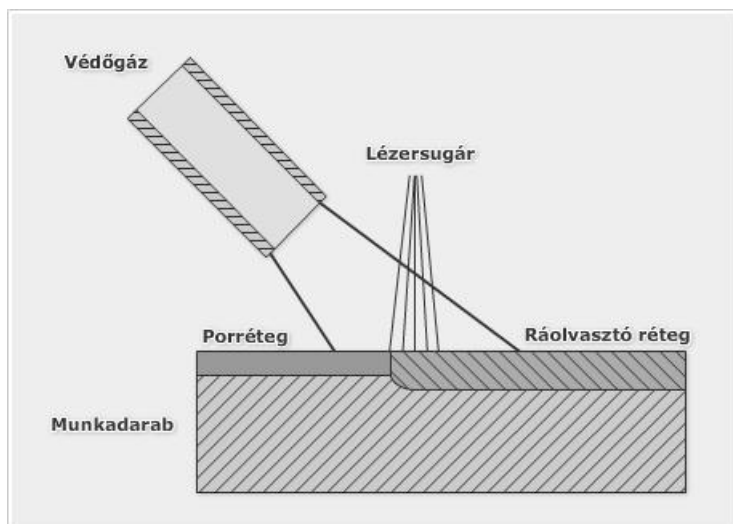


3.1.6. ábra Forrás: Fraunhofer Institut für Werkstoff und Strahltechnik

Különösen a lézersugaras ráolvasztás esetén nehéz a lézersugár és a poradagolás paramétereit olyan egyensúlyban tartani, hogy a megfelelő vastagságú réteg létrejöjjön, és az alapanyag felkeveredése minimális legyen. A nehézség nagyobb részét a poradagolás precíz kézben tarthatósága jelenti. A problémát meg lehet kerülni, ha a réteg anyagát a kívánt mennyiségben (vastagságban) a lézersugaras kezelés előtt juttatjuk a munkadarab felületére.

A réteg anyagát fel lehet hordani hideg és meleg technológiával egyaránt. Hideg technológia lehet a ragasztóanyaggal kevert por felhordása vagy a galvanizálás. Meleg technológiák a termikus szórások, mint például a lángporszórás, lánghuzalszórás, ill. ezek plazmasugaras változatai. Természetesen a lehetséges technológiák köre ennél nagyobb, de ezek a leggyakoribbak. A réteg felhordása után mód van a rétegvastagság kalibrálására, a fölösleges anyagmennyiség eltávolítása révén.

A réteg anyagának előzetes felhordását követően lehet a kohéziós kötést létrehozni lézersugár segítségével (3.1.7. ábra). Ennek során a réteg anyagát maradéktalanul meg kell olvasztani.



3.1.7. ábra

2. A ráolvasztás eredményét befolyásoló főbb tényezők

A felrakóhegesztési és a ráolvasztási technológia közötti lényeges különbség, hogy a ráolvasztás esetén a lehetőségekhez mérten kerülni szeretnénk az alapanyag felkeveredését a rétegbe. Ennek alapját a lézersugár jellemzőinek (teljesítmény, energiasűrűség, irányítottság stb.) precíz kézben tarthatósága adja. A lézersugaras ráolvasztási technológia ennek ellenére a nehezebben megvalósíthatók közé tartozik. A feladat összetettségét egy tanulságos példán keresztül lehet a leghamarabb megérteni.

Legyen a feladat egy hőálló acélminőségű rúd felszínén hő és kopásálló réteg létrehozása, sikló tömítés céljából (pl. gőszabályozó szelep szára a gőzturbinában). Az alkatrész anyaga X22CrMoV121 jelű melegszilárd acél. Összetétele:

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Nb
mín.	0,18	0,10	0,30	-	-	11,0	0,30	0,80	0,25	-	-
max.	0,24	0,50	0,80	0,035	0,035	12,5	0,80	1,20	0,35	0,60	0,05

3.2.1. ábra

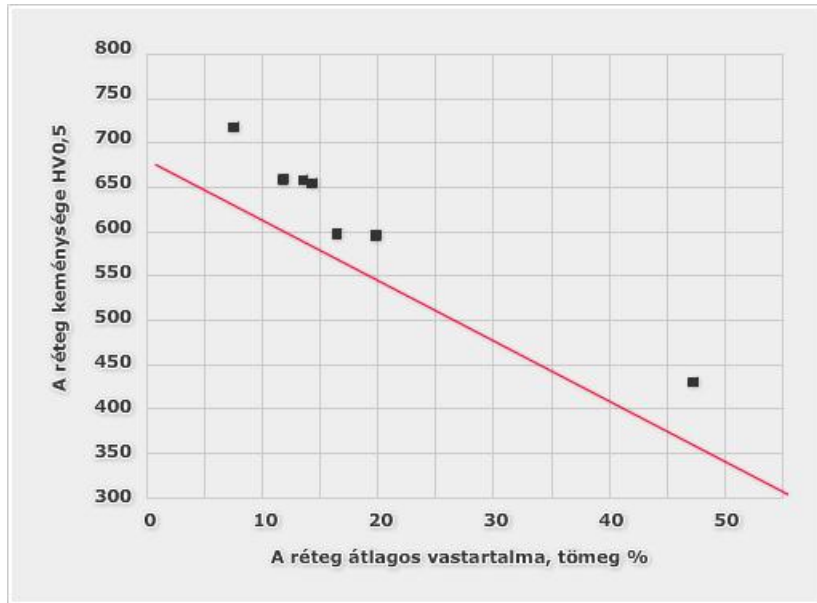
Az alkatrész hőkezeltségi állapotát tekintve nemesített: 900 °C-ról edzve, 300 °C-on megeresztve. Megeresztés utáni keménysége: 330...340 HV10.

A réteg anyaga kobaltbázisú ötvözet, fantázianeve Stellite6, összetétele:

Wt [%]	C	Cr	W	Si	Ni	Fe	Mn	Mo	B	Co
Stellite 6	1,17	28,3	4,1	1,5	2,1	2,1	0,33	<0,05	<0,01	maradék

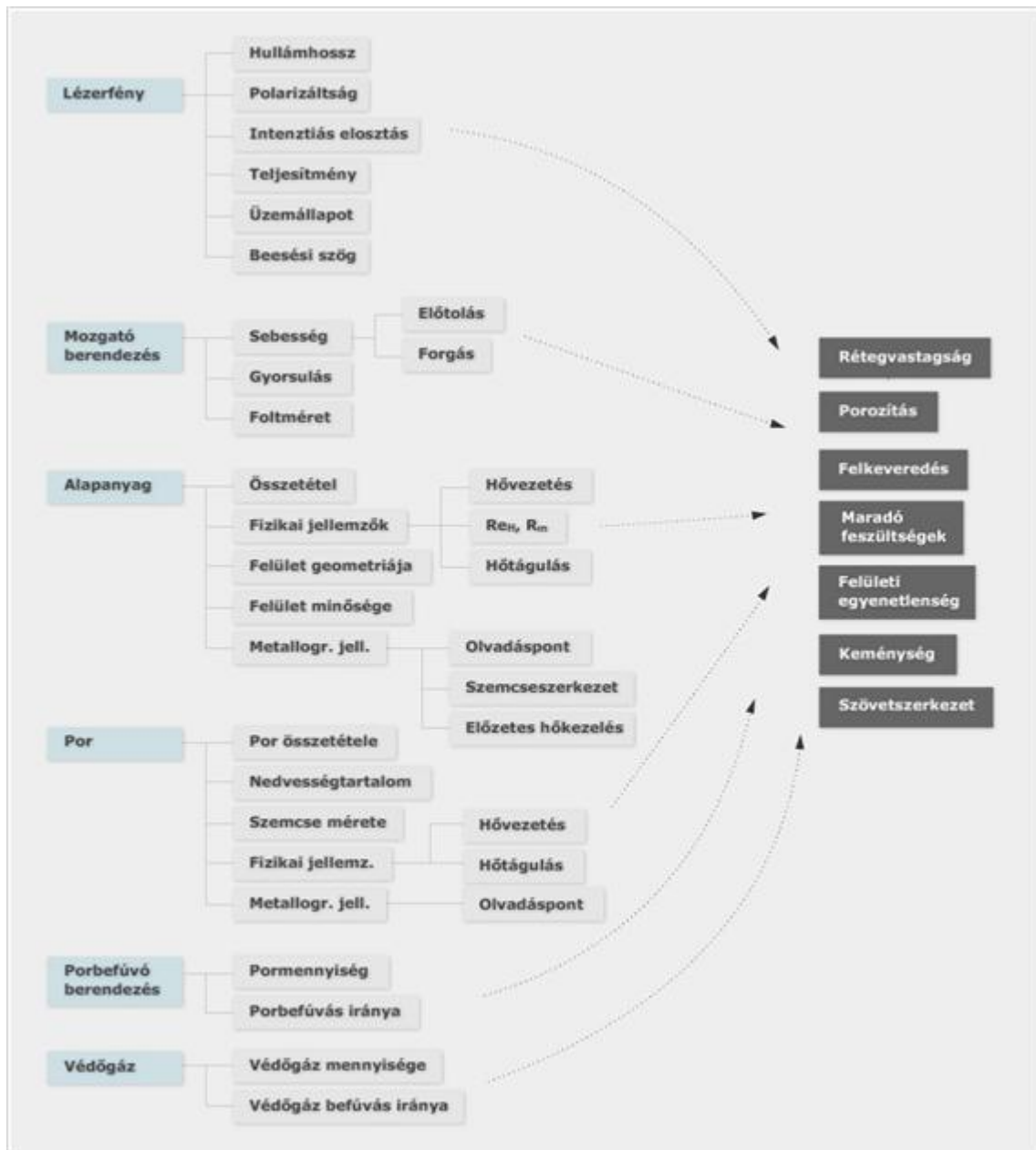
3.2.2. ábra

A feladat nehézsége abban áll, hogy az alapanyag vastartalmának felkeveredése a réteg anyagába a keménység és a kopásállóság csökkenését vonja maga után. A Stellite6-ötvözetben a vas csak szennyező elemként van jelen. A Stellite6 keménysége 650...750HV, ami a vastartalom növekedésével akár 400...450HV-re is csökkenhet.

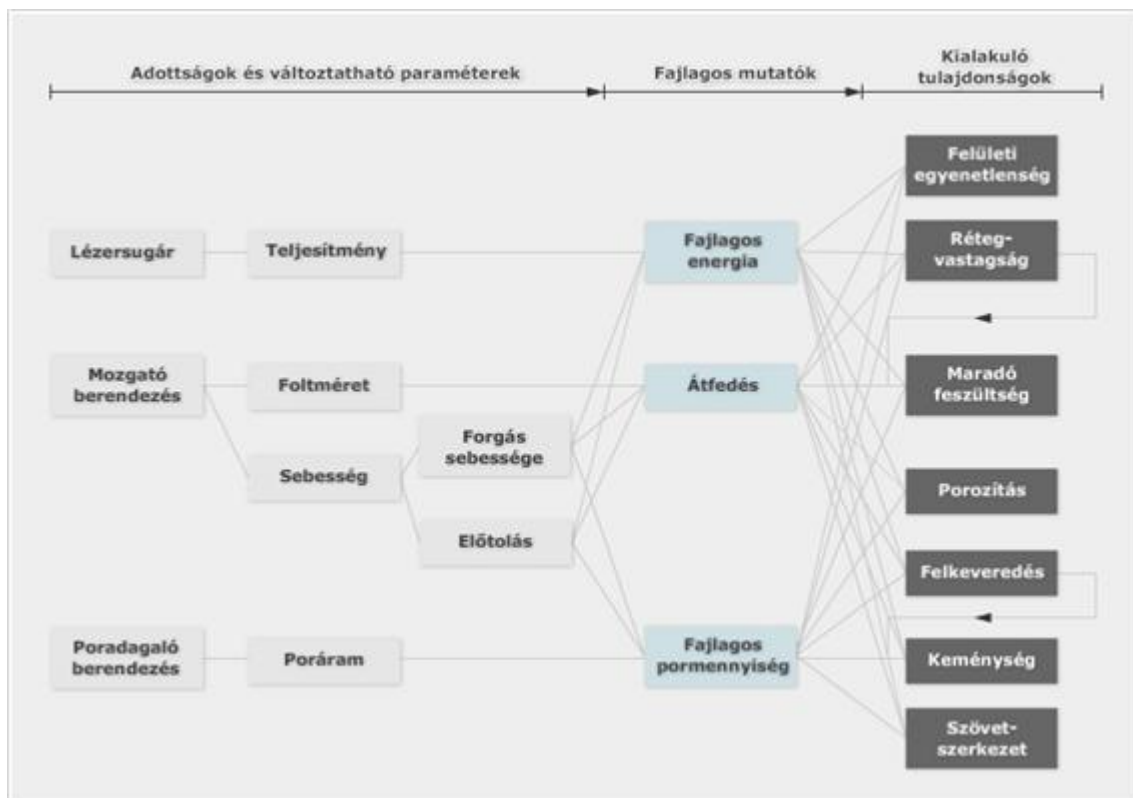


3.2.3. ábra

A feladat megismerése után tekintsük át, hogy a réteg egyes tulajdonságaira minek van hatása. Erről egy áttekintő képet kaphatunk a 3.2.4. ábra alapján. Az ábra már ránézésre is riasztó, pedig a teljesség igénye nélkül készült. Állítsunk össze egy kevésbé részleteset, ami csak a legfontosabb jellemzőket tartalmazza (3.2.5. ábra).



3.2.4. ábra



3.2.5. ábra

Ezt a szűkített kört már érdemes röviden elemezni. A végeredményt befolyásoló paraméterek vizsgálatakor figyelembe kell venni, hogy vannak olyan „bemenő” jellemzők, amelyek nem változtathatók, mert azok az alkalmazott berendezés vagy anyag tulajdonságai, adottságai. A változtatható paraméterek fajlagos jellemzőket eredményeznek, amelyek között a 3.2.5. ábrán látható összefüggések, hatások érvényesülnek.

Az egységnyi felületre jutó teljesítményt teljesítménysűrűségnek nevezzük, általában W/cm^2 mértékegységben adjuk meg. A teljesítménysűrűség meghatározásakor az időegység alatt az adott energiájú lézersugár által „megvilágított” folt nagyságát vesszük figyelembe. Az adat meghatározásakor nem vagyunk tekintettel sem az abszorpció nagyságára, sem a sugárnyalábon belüli energiaeloszlásra. Igaz viszont, hogy az adott teljesítményű lézersugár energiájával kell a munkadarab felületének egy részét és a Stellite6-por egészét megolvasztani. A fajlagos energia fogalmát az alábbi egyenlet szerint definiálhatjuk:

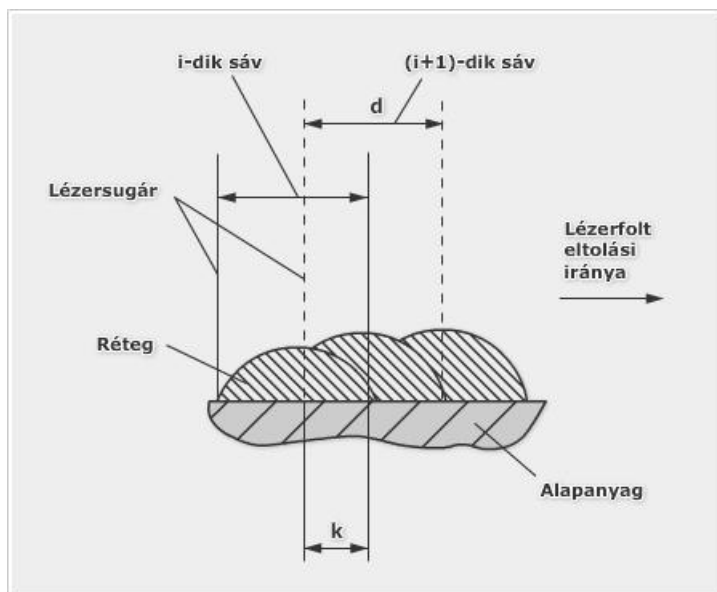
$$E = \frac{P \cdot 60}{v \cdot b} \left[\frac{W \cdot s}{mm^2} \right]$$

ahol P: a lézersugár teljesítménye [W],

v: a lézerfolt haladási sebessége [mm/perc],

b: a folt haladási irányra merőleges szélessége [mm].

Átfedés vagy átlapolódás alatt a Stellite6-réteg egymás után létrehozott sávjainak részleges egymásra fedését értjük. Ennek a jelenségnek az értelmezését a 3.2.6. ábra segíti. Az átlapolódás elvileg 0...100% között változhat. A 0%-os átlapolódás azt jelenti, hogy a két sáv legfeljebb érintkezik egymással, de különálló sávokat alkotnak, vagyis az új sáv középvonala legalább sáv szélességnyi távolságra van az előzőétől. 100%-os átfedés esetén a két sáv teljesen egymás fölött helyezkedik el.

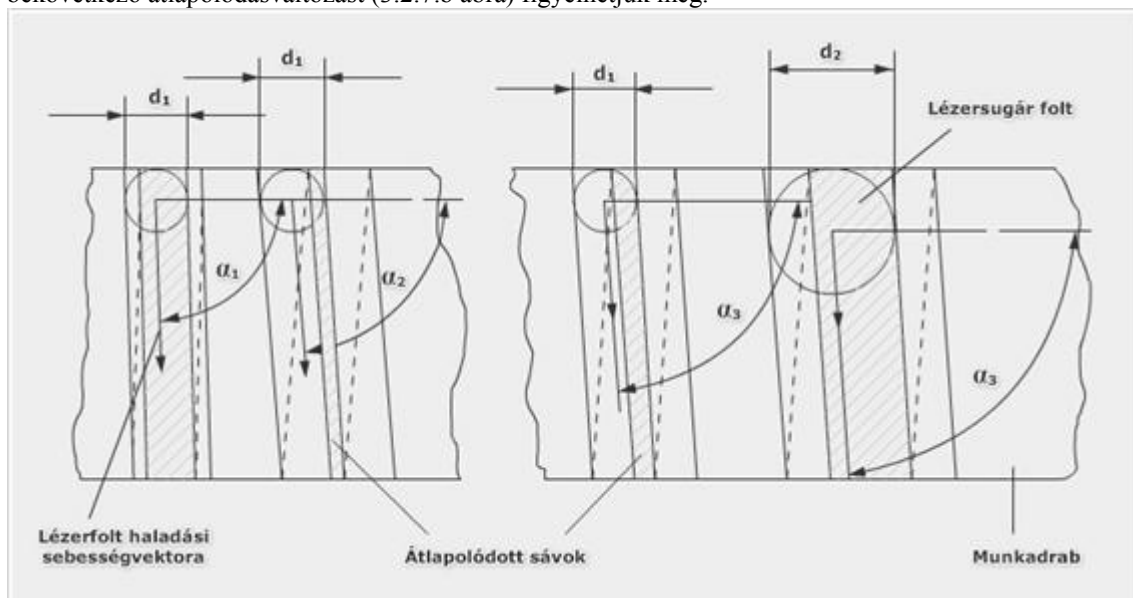


3.2.6. ábra

Az átlapolódás mértéke számszerűen is megadható:

$$A = \frac{k}{d} \cdot 100 \quad [\%]$$

A hengerpalástra felrakott réteg átlapolódását két tényező befolyásolja. A lézerfolt mérete (egy réteg sávszélessége) és a folt haladási sebességvektorának iránya. Ezek együttes hatását szemlélteti a 3.2.7. ábra, ahol hengersizmetrikus munkadarab esetében először állandó lézerfoltátmérőnél a sebességvektor irányának megváltozásából adódó (3.2.7.a ábra), majd állandó sebességvektor-iránynál a foltátmérő-változásból bekövetkező átlapolódásváltozást (3.2.7.b ábra) figyelhetjük meg.



3.2.7. ábra

A lézersugár foltátmérője a munkadarab felületén nagymértékben befolyásolja a kialakuló sáv szélességét. A sávszélesség több rétegjellemzőre, első közelítésben a réteg felületi egyenlőtlenségére, illetve a technológiához szükséges időre van nagy hatással. Minél nagyobb az átlapolódás, annál egyenletesebb réteg alakul ki, ami az utólagos megmunkálás költségeit csökkenti. A sávszélesség növelése azonban olyan kedvezőtlen hatásokat is eredményezhet, mint az alapanyag felkeveredésének fokozódása, a felületi feszültség és a gravitáció hatásának

növekedése, a tócsa hőtartalmának növekedéséből fakadó nagyobb hőterhelés az alkatrészen. A növekvő tócsafelszín növekvő oxidációs veszélyt jelent, a lézersugáron belül uralkodó teljesítménysűrűség-különbségek hatása pedig fokozottan érvényesül, a Marangoni-effektus (fajlagos határfelületi energia anyagtranszport útján történő kiegyenlítődése érdekében kialakuló áramlás) hatása növekszik stb.

A ráolvasztásos technológia tervezésekor nem szabad szem elől veszítenünk azt sem, hogy a réteg milyen tulajdonságaira számíthatunk. Nem elegendő ugyanis a réteget létrehozni, annak tulajdonságai az elvárásainknak kell, hogy megfeleljenek. Ezek között a legfontosabbak a metallográfiai szövetszerkezet, a rétegvastagság, a porozitás, a felkeveredés, a maradó feszültségek, a felületi egyenlőtlenség és a keménység.

Szövetszerkezet

A kobalt alapú keményötvözetek jellemző összetétele: 1...5,5% C, 25...35% Cr és 5...20% W. Ezek az ötvözetkomponensek együtt a keménység és a kopásállóság növekedését szolgálják, mert a króm és a volfrám is erős karbidképző. Az ötvözetben a karbidok mennyiségének növekedése a réteg keménységének növekedését eredményezi.

A kobalt mint a Stellite6-ötvözet fő komponense, egyensúlyi körülmények között, 1300°C-on több, mint 1% korbont képes szilárd oldatban tartani. Hűlés során az oldóképessége rohamosan csökken, és a karbon grafit formájában válik ki. A lézersugaras ráolvasztást követő viszonylag gyors hűtésekor nem érvényesülnek az egyensúlyi feltételek, ezért az oldóképesség csökkenése miatt nem grafit, hanem a Co_2C , illetve Co_3C típusú kobalt-karbidok válhatnak ki.

A karbonnak azonban nagyobb a vegyrokonsága a krómhoz, mint a kobaltnak, ezért a Cr-tartalmú Co-C ötvözetekben elsősorban króm-karbidok képződnek, így csak a felesleg maradhat meg grafitként. Növekvő Cr-tartalom tehát egyre több kötött korbont (karbidot) jelent.

Ebben az ötvözetben a grafitképződés megakadályozására egy másik karbidképző ötvöző, a volfrám a legalkalmasabb. A W-ötvöző az M_7C_3 típusú karbidokban lesz jelen (M = metall), ami legfeljebb 8% volfrámot képes oldani. A főleg maradó volfrám M_6C típusú, konkrétan $(\text{Co}_{3,5}\text{W}_{2,5}\text{Cr}_{0,5})\text{C}$ karbidokba kerül. Mint látjuk, ebben az esetben a kobalt már nem grafit, hanem karbidképző szerepet játszik. A volfrám további előnye, hogy javítja az ötvözet hőállóságát.

Az előbb említett karbidok majdnem tiszta Co-mátrixba ágyazódnak. Ettől ez az ötvözet szívós és kopásálló, mert a karbidokhoz képest lágy mátrixba ágyazott kemény szemcsékből áll.

A kobalt alapú keményötvözet nagy mennyiségben tartalmaz króm- és wolfram-karbidokat, emiatt szobahőmérsékleten rendkívül kopásálló, de viszonylag rideg is: keménysége 50...55 HRC. A mátrix az ideális szívósságát jellemzően 300°C fölötti hőmérsékleten éri el. Ez a mi szempontunkból azért jó, mert a gőzturbinák gőzének hőmérséklete 300°C fölötti.

A hőmérséklet növelésével a mátrix anyagának lágyulása miatt a keménysége valamelyest csökken, de még 700°C -on is 30...40 HRC, s mivel összetételénél fogva még korrózióálló is, belsőégésű motorok szívó- és kipufogószelepeinek, illetve szeleplékeinek felrakóhegesztésére is egyedülállóan alkalmas.

A komplex karbidok felbomlása, oldódása a mátrixban csak kis krómtartalomnál lehetséges. 10% Cr-tartalom felett már nem észlelhető. A kobalt alapú keményötvözetek tehát hőkezeléssel nem vagy csupán elhanyagolható mértékben lágyíthatók. Előnyös megfogalmazásban ez azt jelenti, hogy a több száz fokos melegítés során a kopásálló karbidok mennyisége nem csökken.

A ~4% W + ~25,3% Cr-tartalmú keményötvözetekben megjelenő világos dendritágak, illetve a hegesztéskor jelentkező világos nagy szemcsék – amelyek elhelyezkedése csak néhol emlékeztet dendritre – a leghamarabb kristályosodó lágy, kobalt-szilárdoldat. A dendritágak között az alacsonyabb hőmérsékleten dermedő eutektikum jellegzetes képe figyelhető meg. A wolfram többsége a szilárdoldatban van oldva, az eutektikumban megjelenő karbidok teljes egészükben M_7C_3 típusúak. Jellemző, hogy az ötvözet C-tartalmának növekedésével az eutektikumban megjelenő karbidok tömege nő, s ezért a szilárd oldatban lévő króm mennyisége csökken.

A 4...5%-nál több W-ot tartalmazó ötvözetekben dermedéskor az eutektikumban a króm-karbid mellett nagy W-tartalmú M_6C típusú karbidok is megjelennek. A legalább 1,6...1,8% C-tartalmú ötvözetekben már hatszögletű, hosszú, primer króm-karbid tűk kiválásával indul meg a dermedés. Ennek következtében ezek az ötvözetek az előzőkhöz képest ridegebbek, hipereutektikus szövetszerkezetűek.

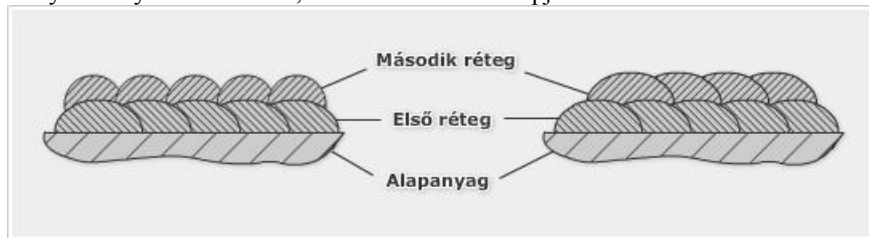
A bevonat korróziós ellenállása salétrom-, ecet-, foszfor- és krómsavakban kitűnő, sósavval szemben kb. úgy viselkedik, mint a korrózióálló acél. Reveállóságuk 900...1000 °C-ig megfelelő.

Rétegvastagság

A repedésmentesen felvihető réteg vastagsága a pár tized mm-től az 1 mm körüli értékig terjed. Láng- és plazmaporszórással 1...2 mm a reális vastagság.

Az előre meghatározott (tervezett) vastagság nem azonnal, az első sávtól kezdve alakul ki, mivel az első sáv után következő sávok már részben egymásra kerülnek. Az átlapolódás mértékétől függő távolságon belül a réteg vastagsága folyamatosan nő, majd állandósul. Ez a jelenség ott okozhat problémát, ahol a réteg egy megadott ponttól kell, hogy kezdődjön adott vastagsággal. Ilyenkor célszerűbb kis ráhagyással kezdeni a felrakást, amit később le kell/lehet munkálni.

Ha a stellitréteget két lépésben visszük föl, a kialakuló réteg vastagsága függ az alsó és a felső rétegek eltolás irányú elhelyezkedésétől is, amit a 3.2.8. ábra alapján lehet érzékelni.



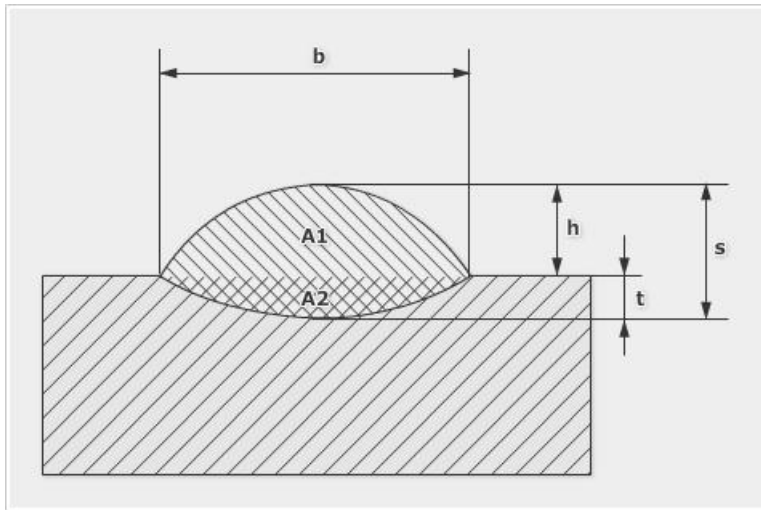
3.2.8. ábra

Abban az esetben, ha a rétegek azonos pozícióban helyezkednek el, vagyis a második réteg nyomvonala pont az alsó fölé kerül, akkor a rétegvastagság nagyobb lesz, viszont a felületi egyenetlenség is nő, és ez az utólagos megmunkálás költségeit is fölöslegesen megnöveli. (A mondatban azért van az „is”, mert az utómunkálás során nagyobb mennyiségű, drága ötvözetet dobunk ki.) Ha az egymás fölötti két réteg kb. 50%-ban fedi egymást, akkor az elérhető rétegvastagság csökken, de a felület egyenletesebb lesz.

Felkeveredés

Azoknál a hagyományos technológiájú felrakóhegesztéseknél, ahol a felrakott réteg anyaga korrózió- vagy kopásállóság miatt különbözik az alapanyagtól, nagy jelentősége van az úgynevezett felkeveredés jelenségének. A réteg felrakásakor bizonyos mennyiségű alapanyag ugyanis megolvad és belekeveredik a Stellite6-rétegbe. Ezt azért kell „szükséges rosszként” megítélnünk, mert rossz irányban változtatja meg a réteg vegyi összetételét, ugyanakkor elengedhetetlenül fontos a kohéziós kapcsolat létrehozásához, ami a réteg szilárd, biztos kötéséhez szükséges.

A felkeveredésnek számszerűsíthető mértéke van: a varrat alapanyagba behatoló területének (A_2) és a teljes varrat keresztmetszetének ($A_1 + A_2$) hányadosa százalékban kifejezve, ami a 3.2.9. ábra alapján értelmezhető. Az ábra szerint a réteg teljes magassága s , a méretnövekedés mértéke h , az alapanyagból megolvadt rész vastagsága t , a ráolvasztott sáv szélessége pedig b .



3.2.9. ábra

A felkeveredés a megolvadt alapanyag és a Stellite6-por olvadékának folyékony fázisban, egymásban való oldódásaként jön létre. Minél nagyobb mennyiségben olvad meg az alapanyag, annál nagyobb mértékű a felkeveredés. Hatása a Stellite6-ötvözet esetén elsősorban a réteg keménységének csökkenésében, illetve a korrózióállóság romlásában jelentkezik. Ezért a technológia során cél, hogy minél kevesebb alapanyag olvadjon meg a rétegeképzés során. Ez megköveteli, hogy ne lépjük túl azt a minimálisan szükséges fajlagos energiamennyiséget, ami az adott mennyiségű portömegáram szemcséinek biztonságos megolvasztásához szükséges.

Hagyományos felrakóhegesztésnél a felkeveredés mértéke 25...30% körül van, a lézersugaras ráolvasztásos technológiával ez az érték 5...15%-os tartományban tartható.

Porozitás

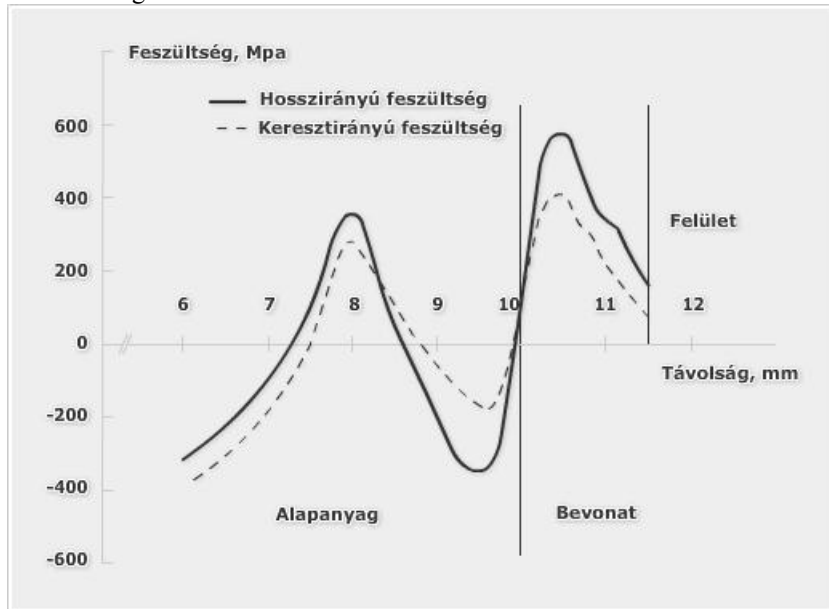
A rétegben a porozitás kialakulásának két közvetlen oka is lehet. Az egyik, ha a porszemcsék nem olvadnak meg eléggé, és így nem tud kialakulni összefüggő réteg. A mikroszkópi felvételeken ez kis, jellemzően *nem gömb* alakú lyukak csoportjaként jelentkezik. A másik ok az olvadékban képződő gázbuborékokra vezethető vissza, amik nem tudnak a felszínre úszni, az olvadékból eltávozni. Ezek a lyukak jellemzően *gömb* alakúak. A réteg tulajdonságaira azért káros mind a két eset, mert ezzel lerontják a réteg mechanikai tulajdonságait, és nem lehet a felület megmunkálása után sima, tömíthető felszínt biztosítani.

Ha el akarjuk kerülni a porozitást, először derítsük ki, mi okozza. A legegyszerűbb eset, ha a szemcsék nem olvadtak meg kellő mértékben, mert ekkor elegendő a fajlagos hőközlés mértékét növelni és/vagy az adagolt por mennyiségét csökkenteni. A fajlagos energia növelése a lézerfolt haladási sebességének csökkentésével, a foltméret csökkentésével vagy a lézersugár teljesítményének növelésével egyaránt lehetséges. A portömegáram csökkentése adott fajlagos energia esetén is jó megoldás lehet, viszont ebben az esetben csökken a réteg vastagsága, ha csak nem növeljük a porhasznosulás mértékét, pl. a befűvás szögének megváltoztatásával, ami a koaxiális esetben persze nem lehetséges. A porozitás mértéke csökken az átlapolódás növelésével is, hiszen az előző sávra bizonyos százalékban felvitt következő sáv olvasztása során az alsó újra felmelegszik, részben meg is olvad, ami segíti a porozitás csökkenését. Porózus, lyukacsos lehet a réteg a nem egyenletes szemcseméret következtében is. A kereskedelmi forgalomba csak egyenletes minőségű porok kerülnek, ezért ilyen probléma leginkább különböző beszerzési forrásból származó, hasonló porok összekeverésénél adódhat.

Gömb alakú gázhólyagok vagy pórusok esetén több közvetett ok is felelős lehet a hiba kialakulásáért. Ilyen többek közt a por tapadt nedvességtartalma vagy a szennyezettség. A por nedvességtartalmától „könnyű” megszabadulni, elegendő a por kiszáritása. A szennyezettség forrását megtalálni esetenként nehéz, mert sokszor szabad szemmel nem fedezhető fel. A legtöbb gondot a szerves vegyületek maradéka(i) jelenti(k). A munkadarabnak például nemcsak a lézersugárral kezelt felületének kell teljesen zsírtalannak lennie, hanem az egész darabnak. Ennek az az oka, hogy a lézersugaras kezelés során a munkadarab többnyire felhevül, a higfolyóssá váló szerves anyag pedig nagyon jól nedvesíti a tárgy felületét, észrevétlenül jut messzire. Az ilyen jellegű hibák felfedése, kiküszöbölése nagyobb körültekintést igényel.

Maradó feszültség

A bevonat maradó feszültsége az eltérő hőtágulási együtthatókból és a kezelés során kialakuló nagy termikus gradiensből adódik. A réteg olvadt állapotban az alapanyag felületén összefüggő, szilárd halmazállapotú bevonatot képez, ami jó kohéziós kapcsolatban van az alapanyaggal. A bevonat hőmérséklet-csökkenésének mértéke és hőtágulása nagyobb, mint az alapanyagé, így az nyomja az alapanyagot, ami visszahat a rétegre, és abban húzófeszültséget indukál. Az alapanyagban a felületénél kialakult nyomófeszültség mélyebbre haladva csökken, majd előjelet vált, és húzófeszültségbe megy át. Elérve egy maximumértéket újra csökkenni kezd, majd előjelváltás után ismét nyomófeszültség alakul ki. A feszültség alakulása a 3.2.10. ábrán látható, ami sík felületen végzett kísérletre vonatkozik.



3.2.10. ábra

A repedésképződés szempontjából a húzófeszültség abszolút értéke a meghatározó. A maradó belső feszültségek csökkentésére a lézersugaras megmunkálás után feszültségmentesítő hőkezelést alkalmaznak.

Keménység

A Stellite6 hipoeutektoidos Co-Cr-W-C ötvözet szövetszerkezetét γ -Co dendrites mátrixba foglalt M_7C_3 típusú karbidok alkotják. Elsősorban a karbidok mennyisége és eloszlása határozza meg az ötvözet keménységét. A karbidok átlagos mennyisége ~12%. A karbidokban az M főként króm, de kobalt és volfrám is megtalálható benne. A karbidok hexagonális szoros illeszkedésű kristályszerkezettel kristályosodnak.

A lézersugaras rétegeképzés általában nagyobb keménységet eredményez, mint amekkora a hagyományos felrakóhegesztéskor adódik. Ez a jelenség a lézersugaras technológiára jellemző nagy hűlési sebességnek és az ennek hatására létrejövő igen finom dendrites szövetszerkezetnek tulajdonítható. Az irodalomkutatás során fellelt ausztenites és martenzites acélokon végzett kísérletek alapján azt a következtetést vonták le, hogy az alapanyag vegyi összetételétől kevésbé függ a rétegben kialakuló keménység.

A keménységvizsgálatot két területre kell kiterjeszteni. Egyrészt az alapanyagban bekövetkező keménységváltozásra, másrészt a réteg keménységének alakulására.

Az alapanyagot vizsgálva megfigyelhető, hogy az eljárás során létrejövő gyors hűtés következtében az alapanyagban, közvetlenül a réteg alatt, edzésből származó keménységnövekedés lép fel. Ez az úgynevezett hőhatásövezetben figyelhető meg, amelyre elterjedt a HAZ elnevezés (Heat Affected Zone). A hőhatásövezet vastagsága függ a technológia paramétereitől. Átlagos mélysége 0,5...1 mm körül van, megközelíti a 600...700 HV keménységet, de erősen függ az alapanyag acélminőségétől. A réteget alkotó sávok átfedésének növelésével – a megeresztődés miatt – ez a keménység csökken, amit a következő sáv felvitele során bevitt hő okoz. A fokozatos felmelegedés hatására viszont növekszik a hőérintett zóna vastagsága.

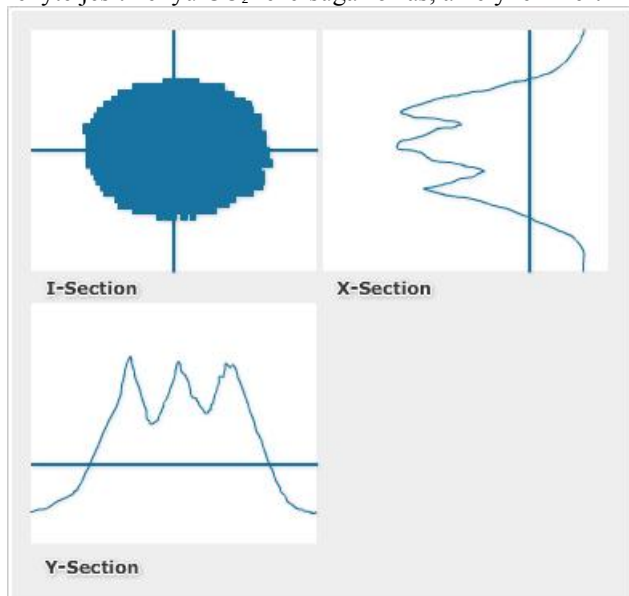
A Stellite6-réteg keménysége általában 600...700 HV, de függ az átfedés mértékétől, a folyamat során létrejövő felkeveredéstől és a fokozatos felmelegedéstől. A felmelegedés a hosszú időn keresztül bevitt energia miatt

következik be (nagy kiterjedésű felületi réteg létrehozása), amennyiben az alapanyag nem tudja kellő mértékben elvezetni a bevitt hőt, mert a bevitt hőmennyiséghez képest kicsi a darab hőkapacitása.

Az átfedés növelése itt is, mint az alapanyag esetében, kis keménységcsökkenést okoz. A felkeveredés növekedésével a réteg keménysége a megnövekedett vastartalom miatt lecsökken, akár 450...480 HV körüli értékre is.

A technológia kidolgozása

Eddig tartott a lézersugaras ráolvasztással kapcsolatos elméleti megfontolások vázlatos áttekintése, egy hőálló acélminőség és a Stellite6 kobaltbázisú ötvözet mint a réteg anyaga vonatkozásában. Most tekintsük át, milyen eredményeket érhetünk el a valóságban! Legyen a technológia alapját jelentő lézerberendezés egy 5kW fénytjeljesítményű CO₂-lézersugárforrás, amelynek mért intenzitáseloszlását a 3.2.11. ábra mutatja.



3.2.11. ábra

A technológia kidolgozása azzal kezdődik, hogy néhány előkísérlettel ki kell választani a nagyjából megfelelő paramétereket. Ebben segít az előző oldalakon leírt elméleti megfontolások sora. Második lépésként ki kell választani azokat a változtatható paramétereket, amelyeket érdemesnek tartunk arra, hogy hatásukat vizsgáljuk a réteg tulajdonságaira. Ezek kiválasztásában is az elméleti megfontolások segítenek.

Esetünkben a változtatásra kijelölt paraméterek legyenek:

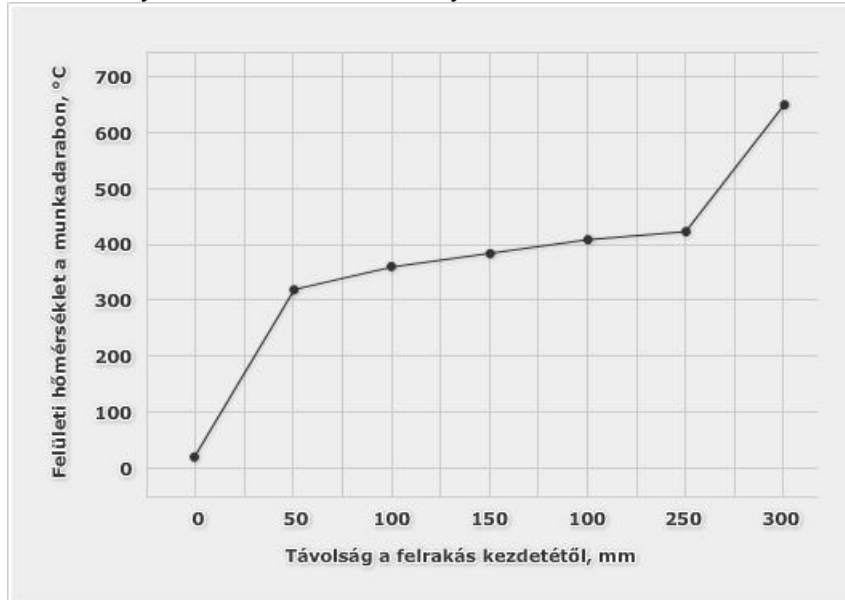
- rétegszám,
- teljesítmény [W],
- teljesítménysűrűség [W/cm²],
- fajlagos energia [J/mm²],
- fordulatszám [1/min],
- előtolás [mm/ford],
- foltátmérő [mm],
- átlapolódás [%],
- pormennyiség [g/perc],
- por vivőgáz Ar [l/perc],

- fűvóka [mm].

A kísérletsorozat során az X22CrMoV121 jelű melegszilárd acélból készítsünk olyan hosszúságú, 40mm átmérőjű rudat, hogy a forgató berendezés tokmányába fogása után a lézerfej a palástján legalább 300mm hosszúságban hozzáférjen!

Hőmérsékleti viszonyok

Elsőként vizsgáljuk meg, hogy a ráolvasztás során milyen mértékben nő a rúd hőmérséklete a lézersugaras kezelés környezetében! A mérés eredménye a 3.2.12. ábrán látható.

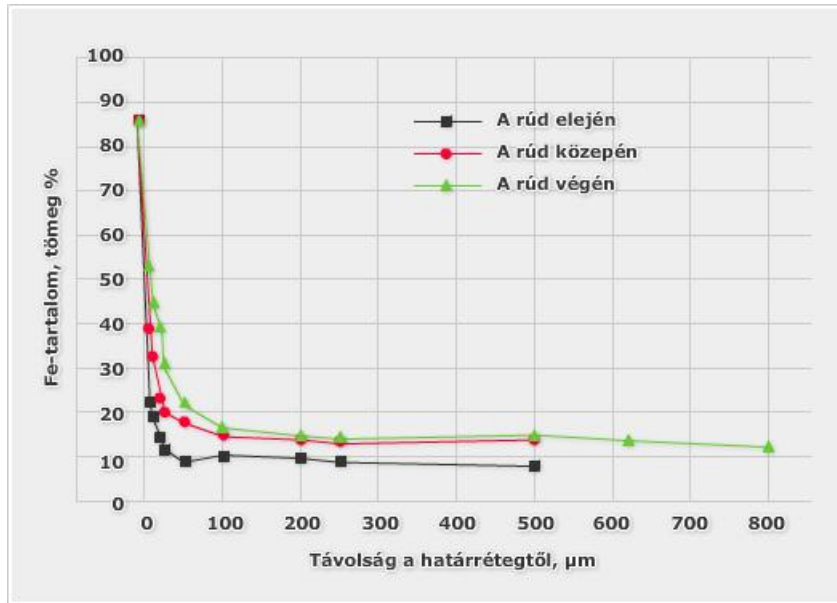


3.2.12. ábra

Az első 50 mm hosszúságú szakasz után a rúd hőmérséklete 320 °C körüli értéket ért el. A rúd hőmérséklete azonban nem nő tovább ilyen ütemben a felvitt réteg hosszának függvényében, hanem 400...450 °C hőmérsékletéhez közelít. Feltehetően hosszabb szakasz lézersugaras kezelése esetén sem következne be további jelentős hőmérséklet-növekedés. A diagramon látható, hogy a rúd hőmérséklete a végéhez közelítő kezelés során hirtelen megnőtt, kb. 650 °C-ra, aminek a hőtorlódás az oka. Erre a jelenségre a valós munkadarab kezelése során figyelemmel kell lenni, hiszen tudjuk, hogy ez a réteg vastartalmának növekedéséhez vezet, ami a keménység csökkenését eredményezi.

A vas felkeveredése

A felkeveredés mértékéről akkor kaphatunk pontos képet, ha a réteg Fe-tartalmát megmérjük az alapanyag és a réteg határától mért távolság függvényében. Ezt viszonylag gyorsan megtehetjük, pl. egy energia diszperz elemzőrendszerrel felszerelt pásztázó elektronmikroszkóp segítségével (SEM+EDX = Scanning ElektronMikroszkóp + Energy Dispersive X-ray spectroscopy). Ez manapság már rutinvizsgálatnak számít. Az eredmény a 3.2.13. ábrán látható.



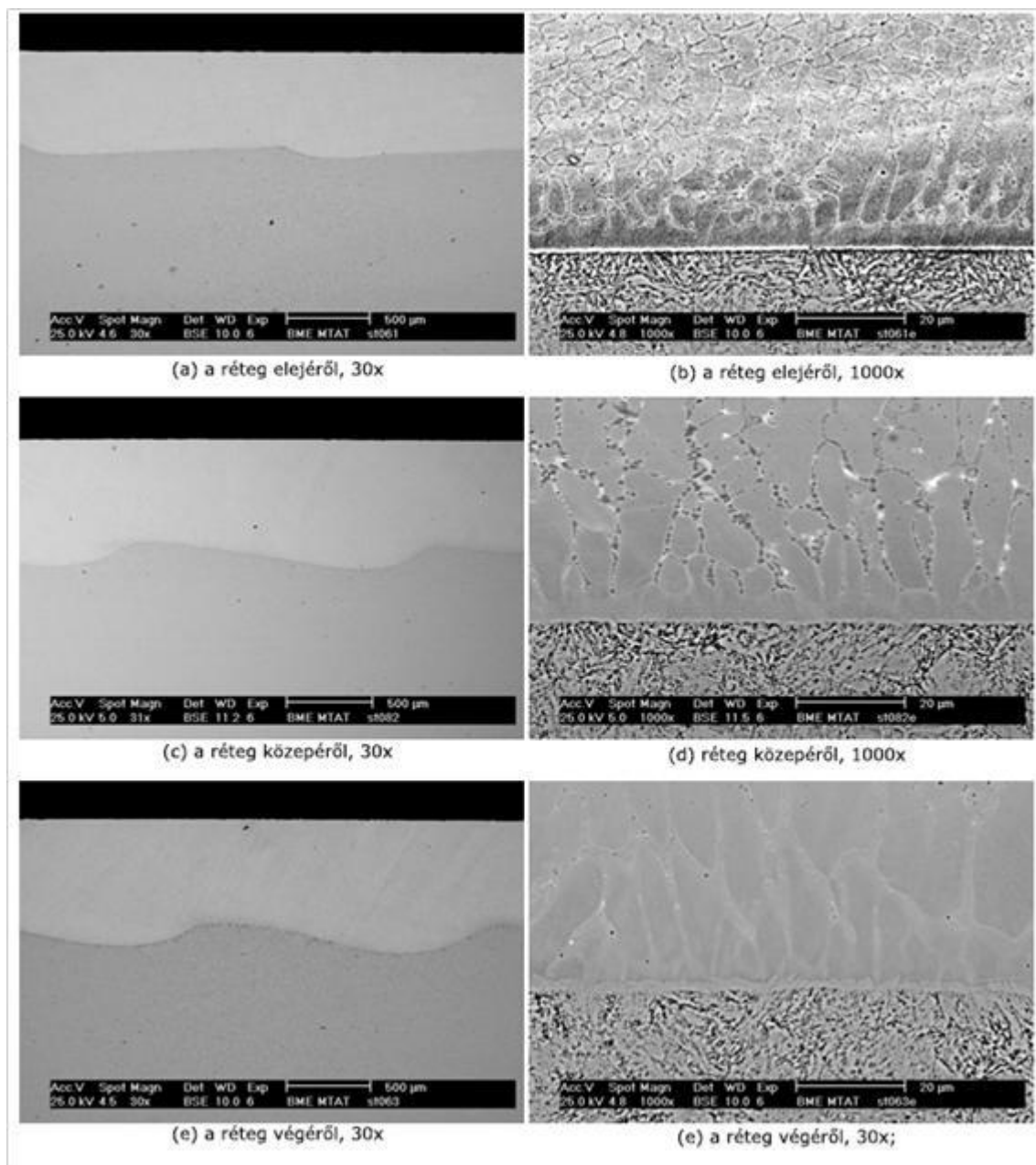
3.2.13. ábra

A mérési adatok alapján látható, hogy jelentős felkeveredés nem következett be. A 300mm-es szakasz kezdetén, amikor a rúd anyaga még hideg volt, alig keveredett be vas a rétegbe. Ahogyan melegedett, egyre több vas oldódott be a rétegbe.

Szövetszerkezet

A vas felkeveredésének és a hőmérsékleti viszonyok változásának hatását a metallográfiai vizsgálatok segítségével lehet láthatóvá tenni. Ennek egy korszerű módszere a SEM-vizsgálat. Ennek segítségével a különböző rendszámú elemek dúsulásáról is képet alkothatunk. A nagyobb rendszámú elemekben dúsabb képrészletek ugyanis világosak, a kisebbek pedig sötétebbek.

A mintákról készült SEM-felvételek a 3.2.14. ábrán láthatók. A bal oldali makrofelvételeken a réteg alakja, ill. porozitása, a jobb oldaliakon a réteg mikroszerkezete látható. A 300mm hosszúságú réteg elejéből kivett minta metszetéről készült felvételen, az ábra (a) részén megfigyelhető, hogy a bevonat és az alapanyag közti határ viszonylag egyenes. Ez alátámasztja a felkeveredéssel kapcsolatos méréseket, miszerint az alapanyagból kevés keveredett be a rétegbe. A (c) és az (e) ábrarészleten már jól látható, hogy növekvő alapanyag-hőmérséklet miatt már hullámosabb a határfelület. Ezek a mélyebb „hullámok” az alapanyagba hatolnak be és nagyobb mértékű felkeveredést okoznak. A felvételeken nem lehet felfedezni jelentős porozitást, noha néhol feltűnik egy-egy kisebb, mikrométer körüli méretű. Ezek alakjuk alapján valószínűleg kisebb méretű gázzárványok, amelyek nem befolyásolják a réteg szilárdságát. Amennyiben ezek a zárványok a felszínen találhatók, úgy a réteg tömítő képességére rossz hatásuk van.



3.2.14. ábra

A (b) ábrarészleten a darab elejéből kivett minta rétegének mikroszerkezete látható. Jól felfedezhető az igen finom dendrites szerkezet, ami bizonyos hűlési feltételek mellett a Stellit6-ötvözet dermedési sajátossága. A finom szerkezet a nagy hűlési sebességre utal, hiszen a közel szobahőmérsékletű alapanyagnak jelentős a hőelvonó képessége, és így az olvadákréteg kristályosodása nagy hőmérséklet-gradiens mellett történik. Az alapanyag hőmérsékletének növekedésével természetesen ez a hőmérséklet-gradiens csökken. Az ábra (d) és (f) részén ez látszik is az egyre durvuló szemcsészetű szövetszerkezeten. A (d) jelű ábrán még felfedezhető a dendrites szerkezet, de már 10 mm körüli szekunder dendritág távolsággal, szemben a (b) ábrán látható szövet 4...5 mm körüli távolsággal. Az (f) jelű ábrán már nem is lehet fellelni a szekunder dendritágakat, a szövet nagyon durva, inkább oszlopos jellegű krisztalitokból áll.

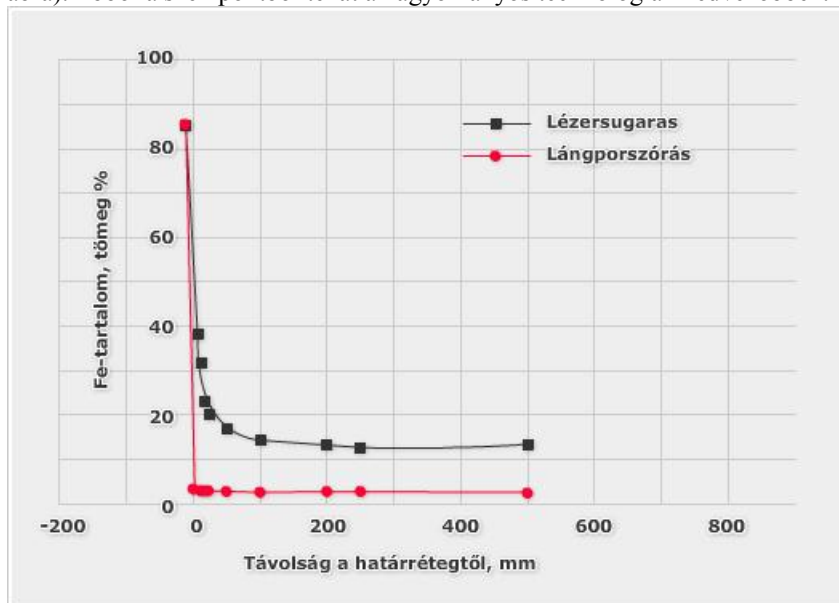
A vizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy megfelelő technológiai paraméterekkel a lézersugaras stellitezési technológiával nagyobb, egybefüggő felületet is létre lehet hozni. Ha jól választjuk meg a paramétereket, az alapanyag már az első néhány 10 mm-en felmelegszik 300 °C körüli hőmérsékletre, és a továbbiakban nem növekszik jelentősen, max. 400...450 °C-ig, így az alapanyag hőmérséklete a technológia szempontjából elfogadhatóan szűk tartományban marad, vagyis a lézersugaras eljárással egyenletes minőségű réteget lehet létrehozni. Amennyiben az alapanyag hőmérséklete mégis jelentősen növekedne (600...650 °C), a

rétegtulajdonságok (vastartalom, keménység) még akkor is a műszaki szempontok szerint elvárt határértékeken belül maradnának.

Alternatív technológiák

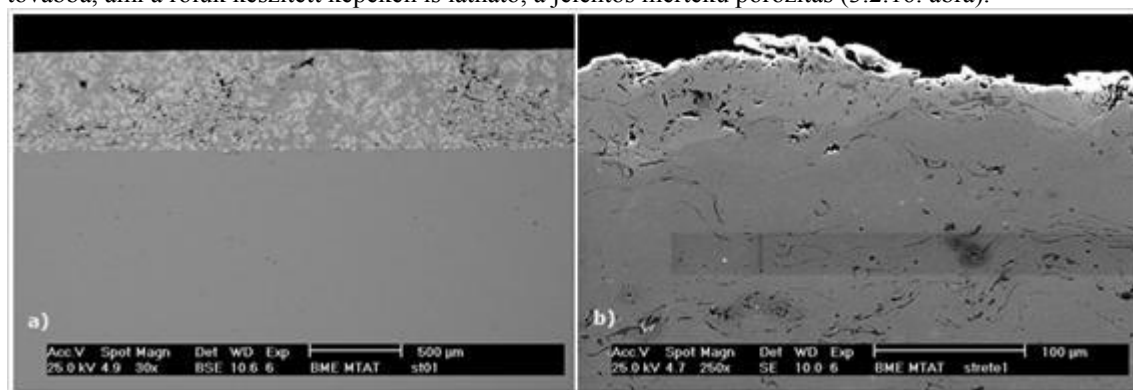
A lézersugaras ráolvasztás szempontjából hagyományos, alternatív technológiák a lángporszórás és a plazmaporszórás. A fűgyóelektródás ívhegesztést nem tekinthetjük alternatívának, mert abban az esetben a felkeveredés mértéke túl van a megengedett határon. Vizsgáljuk meg, milyen jellegzetességei vannak az alternatív technológiáknak.

Abban bizonyosak lehetünk, hogy a hagyományos technológiák esetén a vas felkeveredése a rétegbe a lézersugaras technológia esetéhez képest elhanyagolható mértékű. Ezt mérési adatok is alátámasztják (3.2.15. ábra). Ebből a szempontból tehát a hagyományos technológiák kedvezőbbek.



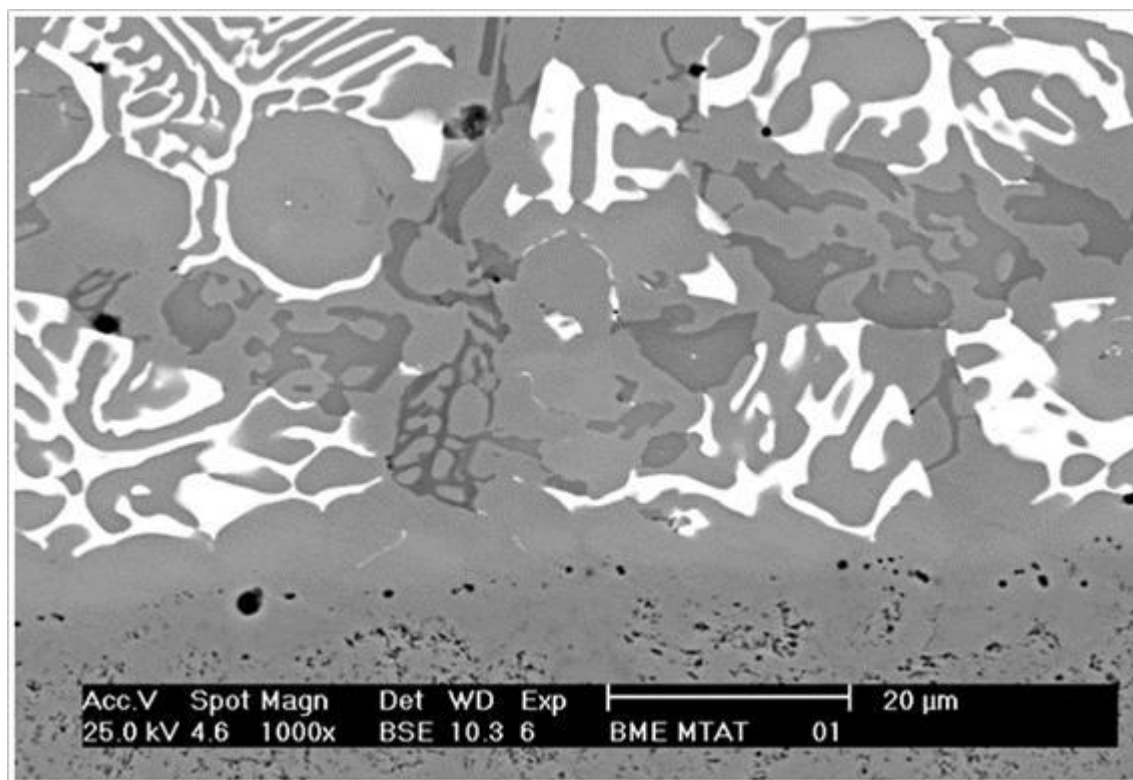
3.2.15. ábra

Viszont csaknem minden más szempontból kedvezőtlenebbek a hagyományos technológiák. A vas felkeveredésének elmaradása ugyanis annak köszönhető, hogy az alapanyag és a réteg között nincs vagy csak elhanyagolható mértékű a kohéziós kapcsolat. Ez azt eredményezi, hogy a réteg könnyen leválhat a munkadarabról, mert kicsi a kötési szilárdság. A hagyományos technológiákkal létrehozott rétegekre jellemző továbbá, ami a róluk készített képeken is látható, a jelentős mértékű porozitás (3.2.16. ábra).



3.2.16. ábra

Különösen a lángporszórással felvitt réteg mikroszkópi képén látható jól, hogy a réteg anyaga lassan hűlt, mert az egyes fázisok (eltérő árnyalatú, tehát eltérő összetételű képrészletek) határozottan különváltak (3.2.17. ábra), amihez több időre volt szükség, mint amennyi a lézersugaras technológia során rendelkezésre áll. Ebből következik, hogy a lángporszórás során nagyobb a munkadarab hőterhelése, mint a lézersugaras technológia esetén.



3.2.17. ábra

Az alkatrészszel szemben támasztott követelményeket értékelve (gőzturbina szelepszár) legfontosabb jellemzők a réteg kötési erőssége az alapanyaghoz, a porozitás, a keménység és a felkeveredés, amik a réteg alapvető funkcióját meghatározzák. A rétegvastagság és a felületi egyenetlenség legfeljebb az utólagos megmunkálás költségeit határozzák meg. Az eltérés a szövetszerkezetben nem okoz akkora különbséget a kialakuló tulajdonságokban, mint a többi jellemző, így az értékelés során ez kisebb súllyal esik latba.

A réteggépző technológiák során a rétegben és az alapanyagban keletkezett belső feszültségek maximális értékei a hagyományos technológiák esetében kisebbek, ami a kisebb termikus gradiensből, valamint a réteg és az alapanyag között kialakuló kapcsolat jellegéből is adódik. A lézersugárral felvitt réteg esetében a feszültségmező az alapanyagban bonyolultabb lefolyású, többször is előjelet vált, azonban 2...3 mm után, mind a hagyományos, mind a lézersugaras esetén közel azonos szintre csökken. A kialakult feszültségértékek a réteggépzés utáni, mindig elvégzendő feszültségmentesítő hőkezeléssel tovább csökkenthetők.

A műszaki szempontú összehasonlítás eredménye alapján a lézersugaras stellítezés a jellemzők majdnem mindegyikében jobb a hagyományos technológiájú réteggépzéseknél. A technológia alkalmazásáról azonban csak akkor szabad dönteni, ha a technológia költségeit is elemeztük. Hibás eredményre vezet azonban az elemzés, ha csak a technológia költségeit vesszük figyelembe. Értékelni kell a járulékos költségeket, mint pl. az előkészítés és az utólagos megmunkálás költségeit. Nem szabad megelégedezni a technológia biztonságáról, vagyis a várható selejt százalékról (nincs hibamentes gyártás!). Ennek függvényében értékelni kell a selejt javíthatóságát és a javítás költségeit is. Lényeges szempont a termék várható élettartama, az alkalmazott technológia függvényében (a vásárlót többnyire ez is érdekli!). Ennek kapcsán, egy gőzturbina esetében, azt is meg kell fontolni, hogy a turbina leállítása a meghibásodott alkatrész miatt mekkora költséggel jár. A példánkban szereplő alkatrész esetében kifejezett előny, ha a mi munkadarabunk állapotát elegendő akkor megvizsgálni, amikor a turbinát úgyis le kell állítani, mert más alkatrészek várható élettartama a darabunkénál rövidebb. Egy jó mérnök nemcsak műszaki, de gazdasági szakember is kell, hogy legyen.

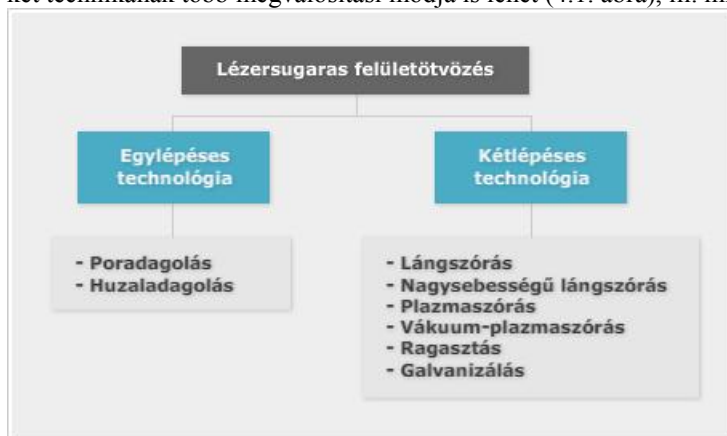
4. fejezet - Felületötvözés

A lézersugaras felületötvözések közös jellemzője, hogy a kezelés a munkadaraboknak csak egy részére terjed ki. Célját illetően sokféle lehet:

- keménység növelése,
- kopásállóság növelése,
- kémiai hatással szembeni ellenálló képesség növelése,
- hőállóság növelése,
- korróziós hatással szembeni ellenállás növelése,
- siklási tulajdonság megváltoztatása,
- optikai tulajdonság megváltoztatása.

Az ötvözőanyag (hozaganyag) megválasztása metallurgiai és fémfizikai alapokon történik. A lézersugaras felületötvözés tervezésekor azonban figyelemmel kell lenni arra a lézersugaras megmunkálásokra általában jellemző körülményre, hogy az ötvözet hűlése gyorsabb lesz, mint amilyen sebességgel azokat az anyagokat létrehozták, amelyeknek tulajdonságai ismertek. Ez egyaránt jelent hátrányt és előnyt. Hátrány, hogy a régi szakirodalmi ismeretek sok esetben csak tájékoztató jellegűek lehetnek. Előny viszont, hogy olyan ötvözetek is létrehozhatók, amilyenek a hagyományos metallurgiai technológiákkal nem. Lelkesen értelmezve a gondolatokat, a lézersugár segítségével eddig ismeretlen tulajdonságú anyagokat is létre lehet hozni.

A lézersugaras felületötvözés technikája lehet egy- vagy kétlépéses. Ez azt jelenti, hogy az ötvözőanyag a lézersugaras kezelés során vagy korábban, egy másik technológiai művelet során kerül a munkadarabra. Mind a két technikának több megvalósítási módja is lehet (4.1. ábra), ill. mind a kettőnek vannak előnyei és hátrányai.



4.1. ábra

	Egylépéses technikák	Kétlépéses technikák
Előny	Gyors megvalósulás Olcsóbb, mint a kétlépéses technika	Az ötvözőanyag mennyisége pontosan beállítható, akár a hely függvényeként is
Hátrányok	Nehéz az ötvözöttség mértékét pontosan szabályozni A lézerfej kialakítása bonyolult Nem lehet minden ötvözet esetén szabadon választani a két adagolási mód között	Legalább két technológiai berendezésre van szükség Nem lehet minden ötvözés esetén szabadon választani a lehetőségek közül Az előzetesen felhordott réteg kötési szilárdsága a munkadarabon gyakran kicsi Az előzetesen felhordott réteg hőtágulási együtthatója többnyire erősen különbözik az alapanyagétól Ragasztás esetén gázképződés veszélye

4.2. ábra

A gép- és járműipar területén a lézersugaras felületötvözés célja elsősorban a keménység és a kopásállóság növelése, általában acélból, de egyre gyakrabban alumínium- és magnéziumötvözetből készült alkatrészek felületén. A lézersugaras felületötvözés akkor juthat szerephez, ha a hőkezelés és a mechanikai kezelés már nem elegendő a kívánt tulajdonságok eléréséhez. A lézersugaras felületötvözés során az ilyen jellegű tulajdonságok javításának két útja lehet.

– Olyan ötvözőt (ötvözőket) juttatnak az alkatrész felületi rétegébe, amely(ek) a réteg valamely fázisában vagy fázisaiban oldott állapotba kerülnek, vagyis beépülnek a kristályrácsba (szubsztitúciós, vagy interszticiós szilárd oldatok). A kristályrács ennek hatására torzul, aminek következménye az anyag mechanikai jellemzőinek megváltozása.

– A fémek más vegyelemekkel (másik fémmel, félfémmel, nemfémes anyaggal) is képesek vegyületeket alkotni, amelyek a fémes mártixba ágyazódva változtatják meg a réteg anyagát. A fém komponensű vegyületfázisok között számos olyan van, amelyiknek nemcsak a termodinamikai stabilitása nagy, de egyes tulajdonságai a fémes anyagokénál lényegesen jobbak. Ilyen célból hagyományosan a karbidokat (fémeknek karbonnal alkotott vegyületeit) alkalmazzák (a klasszikus, évezredek óta alkalmazott karbid a cementit: Fe_3C). Újabban a nitridek, a boridok és az oxidok céltudatos létrehozásával javítják az ötvözetek mechanikai tulajdonságait.

A vegyületfázisok keménységi sorrendjében vezető helyen van a TiC (3200HV). Ez azért kedvező, mert termodinamikai stabilitás szempontjából is vezető helyen áll. Hagyományos metallurgiai módszerekkel azonban nehéz olyan ötvözetet létrehozni, amiben jelentős mennyiségben van úgy jelen, hogy az eloszlása egyenletes és az ötvözet mechanikai tulajdonságait javítja.

Lézersugaras technológia segítségével sem egyszerű a megfelelő tulajdonságú, nagy TiC-tartalmú ötvözetet létrehozni, mert a kedvező hatáshoz 10 μm -nél kisebb szemcseméretű TiC-ok egyenletes eloszlására van szükség. Ilyen apró szemcséket azonban az olvadékba juttatni kinetikai és termodinamikai okokból nehéz. Tovább nehezíti a helyzetet, hogy az acélban nagyon nehezen oldódik, megolvadni pedig csak 3100°C fölött fog. Hasonló a helyzet a nióbium és a tantál karbidjaival.

Ilyen esetekben a feladatot kerülő úton lehet megoldani. Az acél olvadékába a karbidvegyületek komponenseit kell oldatba vinni, ahol a komponensek atomjai „találkoznak”, létrejön a vegyület szilárd oldata. A keletkező vegyületfázis rögtön szilárd halmazállapotú lesz, mert olvadáspontja lényegesen nagyobb, mint az acéolvadék hőmérséklete. Ezt a technikát in-situ vegyületképződésnek nevezik, mert a vegyületfázis a lézersugárral megolvasztott töcsában keletkezik. Ennek egy általánosabb, de a nemzetközi szóhasználatban elterjedtebb megnevezése az LMI (Laser Melt Injektion), aminek magyar nyelvre fordítása csak zavart okozna.

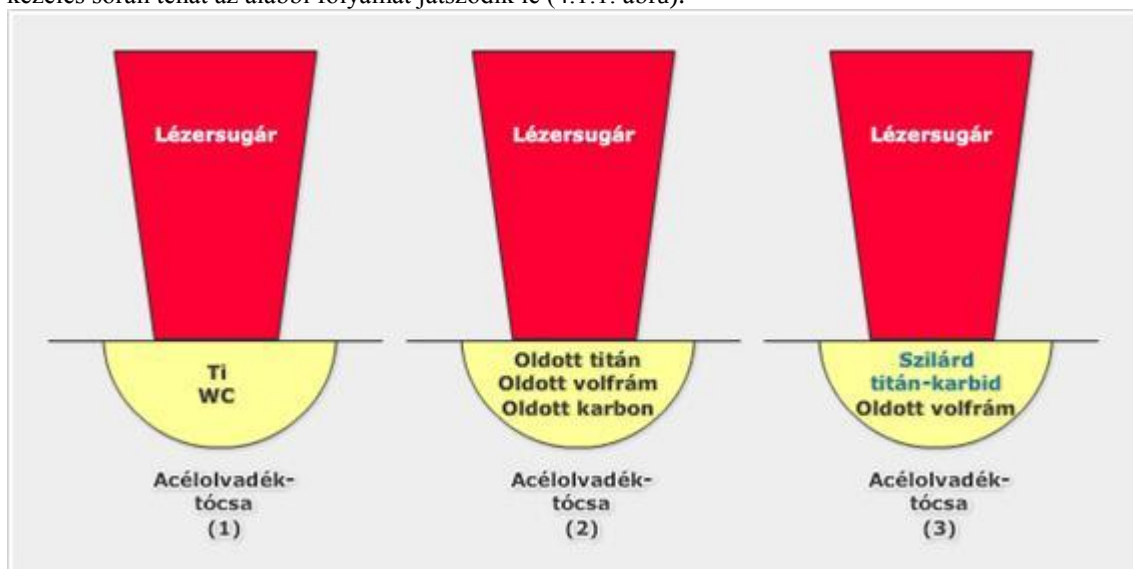
1. Lézersugaras felületötvözés in-situ vegyületképződéssel

Vizsgáljuk a lézersugaras felületötvözási technológiát egy gyakorlati példán keresztül! Tapasztalat, hogy az alumíniumnyomásos öntvénygyártás szerszámainak (fémblől készült öntőformák, amikbe nagy nyomással és

sebességgel „lövik” be az olvadékot) belső felülete helyenként lényegesen gyorsabban megy tönkre, mint a szerszámüreg más részei. A tönkremenetel két legfontosabb oka a termikus kifáradás (a vízjáratokkal hűtött „hideg” formafal hirtelen érintkezik a nagy hőmérsékletű alumíniumolvadékkal: hősokk) és az erózió, vagyis a gyorsan áramló fémolvadék koptató hatása. A mostoha körülmények között használt melegalakító szerszámokat ötvöztött acélból készítik, többnyire a K13 típusúból. Ennek hagyományos megjelölése: X40CrMoV5-1, más jelölési rendszerben: 1.2344. Jellemző vegyi összetétele: C%: 0,40, Si%: 1,00, Mn%: 0,40, Cr%: 5,20, Mo%: 1,30, V%: 1,00.

A szakirodalom tanulmányozása alapján tudható, hogy az ötvöztött szerszámacélok hasonló célú lézersugaras felületötvözésénél leggyakrabban volfrámot, krómot, vanádiumot és molibdént, valamint ezek karbidjait használják. A legkedvezőbb eredményt a volfrám, a vanádium, ill. karbidjaik felületi rétegbe vitele eredményezte, akár melegalakító, akár hidegalakító acélszerszámon.

Végezzünk kísérleteinket ezeknél erősebb karbidképző elemmel, a titánnal! A K13-as acél karbontartalma azonban túl kevés ahhoz, hogy kellő mennyiségű TiC keletkezhesen a lézersugárral létrehozott rétegben. A lézersugárral megolvasztott tócsába tehát további karbont kell juttatni. Kézenfekvő lenne pl. a grafitpor alkalmazása, de annak nedvesítési viszonyai, sűrűsége és oldódási sebessége az acélban nem jó. Válasszunk inkább egy olyan karbidot, ami termodinamikai szempontból a TiC-nál kevésbé stabil, és a fémkomponens javítja az acél használati tulajdonságait! Válasszuk ki a WC-ot, mert a volfrám a melegalakító szerszámacélok hősokkállóságát és meleg-szilárdságát egyaránt javítja. Ha WC-ot és Ti-t egyszerre juttatunk a lézersugárral megolvasztott tócsába, mind a kettő oldatba kerül. A WC valóban oldódik, mert az olvadáspontja 2870°C, tehát lényegesen (több mint 1000°C-kal) nagyobb, mint az acélé. Az acélolvadékba tehát a WC komponensei, a volfrám és a karbon kerül. A titán olvadási hőmérséklete 1668°C, tehát nincs messze az acélétól. A lézersugaras kezelés során tehát az alábbi folyamat játszódik le (4.1.1. ábra).



4.1.1. ábra

1. A lézersugárral megolvasztott tócsába adagolt volfrám-karbid és titánszemcsék elmerülnek, végül feloldódnak.
2. Az acél egyéb komponensein túl, a tócsában egyenletes eloszlásban jelenik meg a volfrám, a titán és az eddigiek mellé további karbon.
3. Az olvadékban lévő titán és karbonatomok TiC-vegyületet alkotnak. Ennek lényegesen nagyobb az olvadási hőmérséklete, mint az olvadéknak, ezért rögtön szilárd halmazállapotú lesz.
4. A tócsa hőmérséklete csökken, a folyékony halmazállapotú anyag kristályosodik.

A titán, az acélfürdőbe olvadása után, a fürdőből annyi karbont köt meg, amennyi a rendelkezésére áll. A képződő titán-karbid mennyiségét a volfrám-karbid adagolásának intenzívebbé tételével lehet növelni, hiszen a WC C-tartalmát a titán megköti. Az acélolvadékban visszamaradó elemi volfrám részben a maradék karbonnal és a vassal komplex karbidot képez, másrészt, ha már végképp nincs több szabad karbon az olvadékban, akkor beötvöződik az alfa-vasba, szubsztitúciós szilárdoldatot képezve.

A lézersugaras felületötvözés során a két port (WC és Ti) lehet külön-külön vagy kevert porként adagolni. Első közelítésben a WC- és a titánpor keverékének arányát érdemes sztöchiometrikusnak venni. Ezzel elérhetjük, hogy volfrám-karbid karbontartalmát teljesen meg tudja kötni a titán, de a mátrix nem szegényedik el karbonban, ami egyébként a mátrix szilárdsági jellemzőinek romlásához vezetne.

A volfrám-karbid porok gyakran kobaltot is tartalmaznak. A gyártóknak ezzel az a célja, hogy a port önálló réteggépzésre is lehessen használni. Ekkor azonban szükség van kobaltra, ami a kemény WC-szemcséket összeköti. A kobalt jelenléte esetünkben kifejezetten előnyös, mert a mátrixba beötvöződve fokozza a szívósságot. Mindezek figyelembevételével 100g (WC+12% Co) porhoz 21,5g titánport kell keverni. A porkeverék scanning elektronmikroszkópos képét a 4.1.2. ábrán láthatjuk. A felvételen a titánt a sötétebb árnyalatú gömböcskék mutatják, mert a titán rendszáma kisebb, mint a volfrámé. A 25–75 μm nagyságú WC+12 %Co szemcsék világos árnyalatúak, és látszik, hogy apróbb szemcsék halmazállapotából állnak.



4.1.2. ábra

A porkeveréket argon vivőgázzal érdemes a töcsába juttatni, mert az argon egyben védőgázként is működik.

Vizsgáljuk meg, mit tapasztalhatunk a lézersugaras felületötvözés eredményeként! A munkadarabról, ill. a rétegről készített metszeti csiszolaton, ha scanning elektronmikroszkóppal vizsgáljuk, azt látjuk, hogy az ötvözött réteg világosabb árnyalatú lett, mint az alapanyag, mert a rétegben jelentősen megnőtt a nagy rendszámú volfrám koncentrációja (4.1.3. ábra). A méretskála alapján látható, hogy a réteg vastagsága 0,7...0,8mm.



4.1.3. ábra

A réteg tulajdonságait jobban meg tudjuk becsülni, ha ismerjük mikroszerkezetét. A 4.1.3. ábrán látható réteg szerkezetét nagyobb nagyításban mutatja a 4.1.4. ábra. A képen az látható, hogy a néhány, „nagy” (1...3 μm) méretű világos szemcsét nagyon sok apró (<1 μm) veszi körül. A világos szemcsék bizonyára a vasnál nagyobb rendszámú elemekben dúsak. A lézersugaras felületötvözés hozaganyagában a vasnál lényegesen nagyobb rendszámú elem a volfrám. De hol van a titán? A titán karbonnal alkotott vegyületének a legnagyobb az olvadási hőmérséklete az ötvözetben, tehát annak önálló szemcséként kellene látszani, mert elsőként lett kristályos (szilárd).



4.1.4. ábra

Feltűnő, hogy a nagyobb, világos szemcse közepe sötét. Különösen jól látható ez a 4.1.4. ábra alján, középtől kissé balra. Érdemes egy hasonló részletet még nagyobb nagyításban is megvizsgálni (4.1.5. ábra)!



4.1.5. ábra

A 4.1.5. ábrán látható nagyobb világos szemcse mérete 1...1,3mm. A közepén 300...400nm nagyságú sötét folt van, ami bizonyosan kis rendszámú elem jelenlétére, ill. dúsulására utal. Ilyen elem az ötvözetünkben csak a titán lehet (rendszámok: Ti=22; Fe=26; Co=27; W=74). Már csak az a kérdés, miért és hogyan alakulhatott ki ilyen összetett szerkezetű szemcse. Miért nem alkot külön szemcsét a TiC és a WC?

Az biztos, hogy az olvadékban az első szilárd halmazállapotú, kristályos fázis a TiC volt. A bizonyosságunknak az az oka, hogy ennek a fázisnak a legnagyobb a kristályosodási hőmérséklete (>3100°C), jelentős túlhűlésre pedig nem hajlamos.

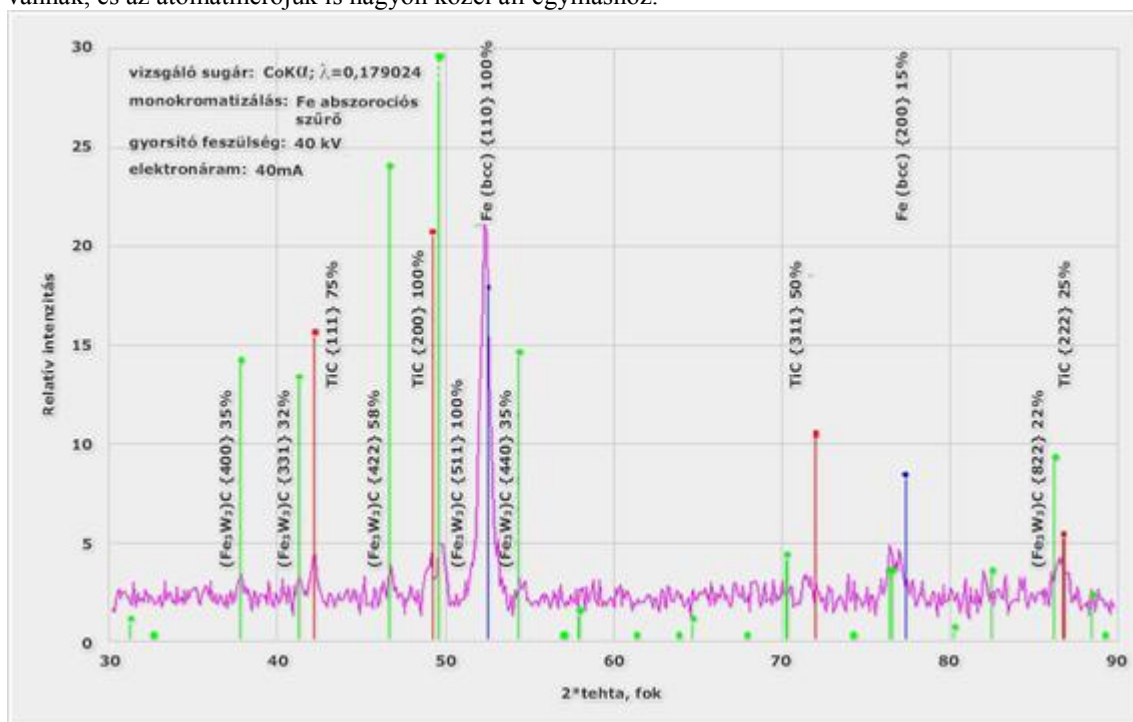
A TiC olyan intersztíciós vegyületfázis, ami felületen középpontos kockarácscsal kristályosodik. A karbonatomoknak egymásra merőleges három irányban két-két titánatom a szomszédja (oktaéderes intersztíciós vegyület). Ennek többek között az az oka, hogy a titán atomátmérőjének majdnem pontosan a fele a karboné (Ti $\approx$ 140pm; C $\approx$ 70pm).

A titán és a volfrám rendszáma közötti nagy különbség (22/74) miatt nagyon meglepő, hogy az atomátmérője – még ha csak egy kicsivel is – a titánnak nagyobb, mint a volfrámnak ($W \approx 135 \text{ pm}$). Egyébként mind a két kémiai elem az átmeneti fémek csoportjába tartozik, és a legkülső elektronhéjukon 2-2 elektron kering. Ezek és még néhány hasonlóság elegendő ahhoz, hogy az olvadéokban megszületett apró TiC-csíra a WC-nak kristályosodási kiinduló és növekedési helyként szolgáljon. Ráadásul ez nem azt jelenti, hogy a két karbidfázis között éles határ lenne, hanem azt, hogy a volfrám szubsztitúciósan épül be a TiC rácsába (a titán helyére volfrám kerül), mintegy folyamatos átmenetet biztosítva a TiC-ből a WC-ba úgy, hogy a TiC kristályrácsa épül tovább. A volfrám tehát tovább építette azt a karbid kristályrácsot, amit a titán kb. 300°C -kal nagyobb hőmérsékleten elkezdett.

A fémolvadékokban tehát először a titánban dús karbid kristályok jöttek létre, majd a hőmérséklet csökkenésével, ill. az olvadék titántartalmának csökkenésével egyre több volfrám épült rá az első kristályos szemcsékre. Mivel az olvadékokban túlnyomó többségben vannak a vasatomok, és a vas is karbidképző elem, ezért előbb-utóbb a vasatomok is bekapcsolódnak a karbidfázisok építésébe.

Ekkorra azonban már az olvadék hőmérséklete is jelentős mértékben csökkent, így a szemcséknek már nincs idejük nagyra nőni. A vas szerephez jutásával új karbidtípusok keletkeznek, tehát nem folytatódik a TiC-csíra építése. Az új karbidok M_6C típusúak, ahol M a mi esetünkben Fe és W.

Ezt a kristályosodási folyamatleírást támasztja alá a lézersugár segítségével felületötvözött minta röntgendiffrakciós vizsgálatának eredménye (4.1.6. ábra). A felvételen három kristályos fázist lehetett egyértelműen azonosítani: $\alpha\text{-Fe}$ (bcc), TiC és $(\text{Fe}_3\text{W}_3)\text{C}$. Ez megfelel elképzeléseinknek, hiszen a legnagyobb mennyiségben az $\alpha\text{-Fe}$ kristály van jelen, ami a réteg anyagának mátrixát adja. A TiC és a $(\text{Fe}_3\text{W}_3)\text{C}$ fázisok mennyiségi összehasonlításának becslését segíti, hogy a két fázis 100% relatív reflexiós intenzitású vonala, a $\{200\}$ és az $\{511\}$ nagyon közel vannak egymáshoz. A két reflexiós csúcs nagysága nagyon hasonló, vagyis a két fázis mennyisége is közel áll egymáshoz. A SEM felvételeken ez úgy látszik, hogy a sok apró $(\text{Fe}_3\text{W}_3)\text{C}$ szemcséhez képest lényegesen kevesebb, de nagyobb TiC-szemcse látható. Összességében a két fázis mennyisége közel azonos. Amit a röntgendiffrakciós vizsgálat alapján TiC-ként azonosítunk, arról persze tudjuk, TiC-kristályrács, de a Ti- és a W-atomok egyaránt megtalálhatók benne, mert szubsztitúciós helyzetben vannak, és az atomátmérőjük is nagyon közel áll egymáshoz.



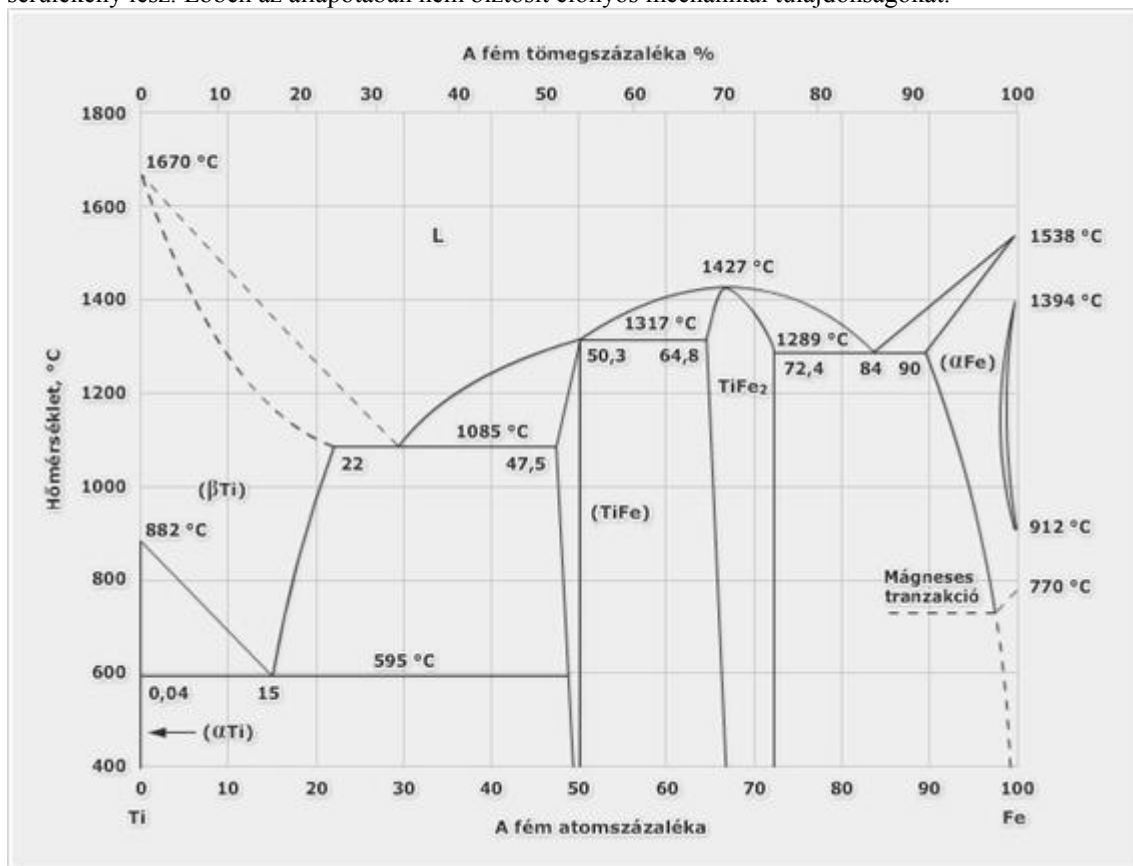
4.1.6. ábra

2. Lézersugaras felületötvözés és cementáló hőkezelés

Vannak olyan alkalmazási esetek, amikor a kiváló tulajdonságú (kemény, kopásálló, termodinamikai szempontból stabil stb.) TiC-fázis mellett nincs szükségünk a volfrám és vegyületfázisainak jelenlétére, viszont továbbra is szeretnénk, ha a TiC 10 μm -nél kisebb szemcsenagysággal épüljön be a fémes mátrixba. Most sem tehetjük meg, hogy TiC-szemcséket injektálunk a lézersugárral megolvastott tócsába, mert a kívánt TiC-szemcse mérete ehhez túl kicsi.

Hozzuk létre a TiC-szemcséket a rétegben két technológiai lépéssel!

1. Első lépésben lézersugár segítségével, csak titánnal ötvözzük az alkatrész felületi rétegét. Ekkor a titán megköti az ötvözött réteg teljes karbontartalmát. Az ötvöztetés mértékének megfelelő mennyiségű többlettitán az α -Fe kristályrácsába épül be szubsztitúciósan, vagy ha nagyon sok Ti van jelen az ötvöztetben (>10 atom%), akkor TiFe₂ intermetallikus vegyületfázis formájában is. A konkrét fázisviszonyokról a Fe-Ti kétkomponensű egyensúlyi fázisdiagram alapján tájékozódhatunk (4.2.1. ábra). Megjegyzendő, hogy az α -Fe-ban oldott titán egy része, az ötvöztet megfelelő hűlési sebessége esetén kiválik, és szintén TiFe₂ keletkezik, mert a hőmérséklet csökkenésével az α -Fe egyre kevesebb titánt képes oldatban tartani. A titánnal erősen ötvözött réteg rideg és sérülékeny lesz. Ebben az állapotában nem biztosít előnyös mechanikai tulajdonságokat.



4.2.1. ábra

2. Egy második technológiai műveletben a titánnal ötvözött rétegbe korbont kell juttatni, hogy TiC keletkezzen. Ennek egy klasszikus megvalósítási lehetősége az évszázadok óta ismert és azóta is elterjedten alkalmazott cementáló hőkezelés. A cementáló hőkezelést 600 °C fölötti hőmérsékleten, kellően nagy karbonaktivitású közegben (cementáló közeg) végzik. A hőkezelés során a munkadarab felületén keresztül karbonatomok diffundálnak a belseje felé. Útközben a karbon reakcióba lép a titánnal, vegyületfázist alkotnak. A karbon diffúziója során a titánnal ötvözött réteg ridegsége és keménysége csökken, viszont nő a TiC-fázis mennyisége, javul a szívóssága. Ha csak annyi korbont diffundáltunk a munkadarabba, amennyi a titánnal reakcióba lép, akkor a fémes mátrixnak nem lesz elegendő karbontartalma ahhoz, hogy edzhetővé váljon. A TiC-szemcsék mennyiségének növekedésével egy idő után már a réteg keménysége is nő, amit egy edzési művelettel tovább lehet fokozni.

Vizsgáljuk meg, milyen különbséget tapasztalhatunk a WC + Ti-ötvöztetés és a titánötvöztetés + cementálás eredménye között! A 4.2.2. ábra kis nagyítású felvételén, ami a réteg metszeti csiszolatáról készült, a kb. 10 mm szemcsenagyságú alapszövetben sok, egyenletesen elosztott apró fekete szemcse látható.



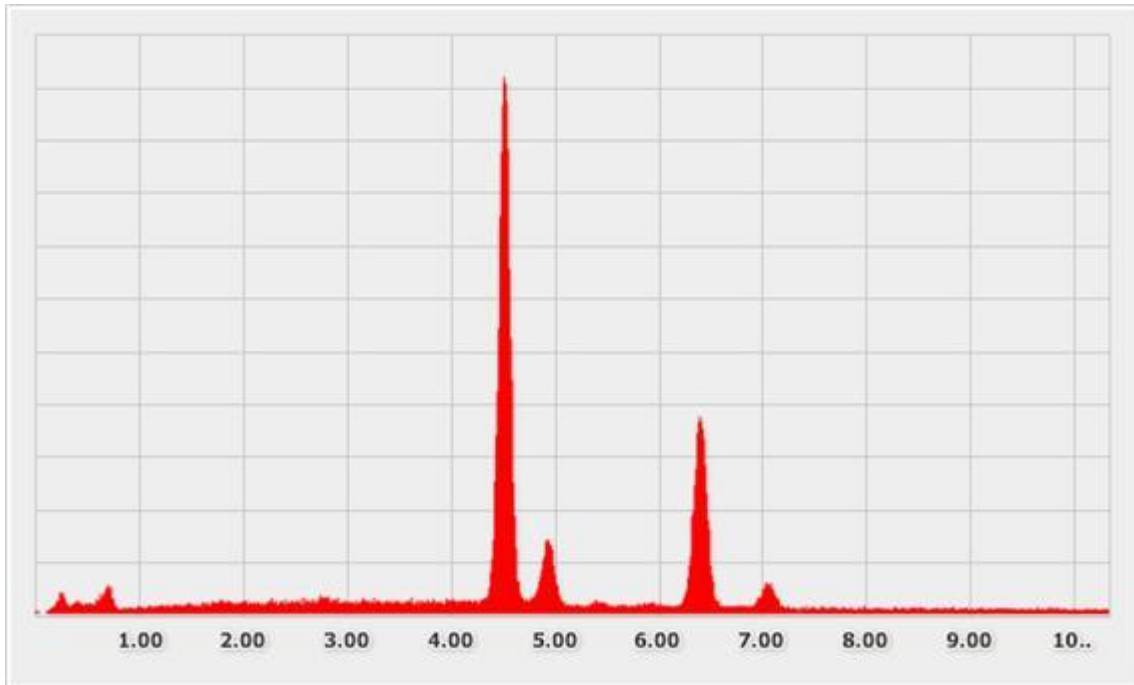
4.2.2. ábra

Ahhoz, hogy az apró fekete szemcséket megvizsgálhassuk, nagyobb nagyításra van szükség (4.2.3. ábra). A nagyobb nagyítású képen azt láthatjuk, hogy a sötét árnyalatú szemcséket most nem veszi körbe olyan világos udvar, mint amelyet a WC+Ti ötvöztetésű réteg esetén láthattunk (4.1.5. ábra). Amennyiben hihetünk a SEM-kép általában igaz szűrkeségi szint és a rendszám kapcsolatának, akkor meg is nyugodhatunk, mert a sötét szemcsék a titán dúsulását jelzik. A volfrámötvöztetés esetén látott nagyon világos, többnyire fehér képrészletek most hiányoznak, mert nincs kiugróan nagy rendszámú komponens az ötvöztetésben.

A titánról mint a kis rendszámú ötvöztetőről pedig elmondhatjuk, hogy 0,5...2mm nagyságú szemcsékben dúsult. Ismerve a minta előéletét, bizvást állíthatjuk, hogy az apró szemcséket TiC-vegyületfázis alkotja. A vegyületfázisnak legalább az egyik komponensének jelenlétéről könnyen meggyőződhetünk, ha az elektronmikroszkópban energiadiszperz elemzést végzünk. A 4.2.3. ábra közepén az 1-gyel jelölt szemcsé (valójában a karakter közvetlen környezetének) elemzett kémiai összetételét a 4.2.4. ábra spektruma szemlélteti.



4.2.3. ábra



4.2.4. ábra

A nagy szilárdságú, kopásálló réteg alkalmas például arra, hogy a forgácsolószerszám kopásnak leginkább kitett részét megerősítsük. Például az esztergakés éle is ilyen. Főlegesen azonban az egész esztergakést ebből a drága anyagból készíteni, hiszen csak a vágóél van nagy mechanikai igénybevételnek kitéve.

A felső ábrán jól látszik az esztergakés világosabb árnyalatú, ötvöztött felső rétege, a köszörült vágóél és annak csúcán a megkopott dolgozófelület. A megkopott dolgozófelületről készült nagyobb nagyítású felvételen pedig az látszik, hogy a világos árnyalatú (mert sok volfrám van benne) karbidszemcsék kiállnak az őket tartó mátrixból. A 2 µm-nél kisebb szemcséket tehát jól tartja a mátrix, nem peregnek ki könnyen, viszont apró forgácsoló szemcsékként viselkednek.



4.2.5. ábra

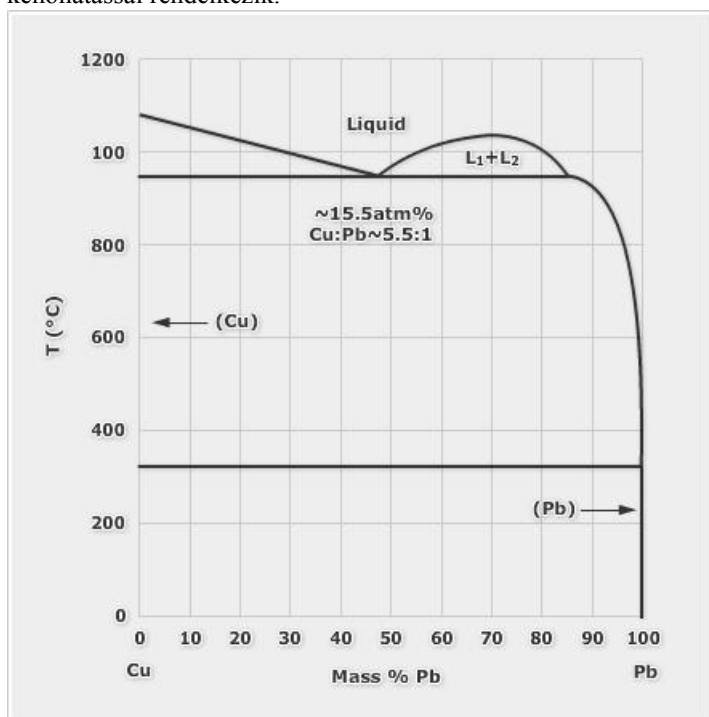


4.2.6. ábra

3. Különleges ötvözetek előállítása

A lézersugaras felületötvöztetés technológiájával olyan ötvözetek is előállíthatók, amilyenek a hagyományos metallurgiai módszerekkel nem vagy csak nagy nehézségek árán, költséges megoldásokkal. Gyakori, hogy a nehezen létrehozott ötvözetből az alkatrészt már nem is lehet kimunkálni, mert az ötvözet nem alakítható, forgácsolása pedig kifejezetten problémás.

Ragadjunk ki a nehezen létrehozható ötvözetek közül egy csoportot, a monotektikus ötvözetek csoportját. Ezekre az ötvözetekre jellemző, hogy az ötvözet komponensei olvadékok állapotban nem oldják egymást korlátlan mértékben. Ez azt jelenti, hogy bizonyos összetételek és hőmérsékletek esetén két olvadékból áll az ötvözet, az ötvözetet nem lehet homogenizálni. Régről ismert ilyen ötvözet az ólombronz siklócsapágyak anyaga. Ráadásul a réz az ólmot, ill. az ólom a rezet kristályos állapotban szinte egyáltalán nem képes oldani. Ezt mutatja a 4.3.1. ábrán látható Cu-Pb egyensúlyi fázisdiagram. Azért szeretnek ebből az ötvözetből siklócsapágyat gyártani, mert a réz jó hővezető képessége miatt hatékonyan képes a hőt elvezetni a súrlódás helyéről, az ólom pedig kiváló kenőhatással rendelkezik.



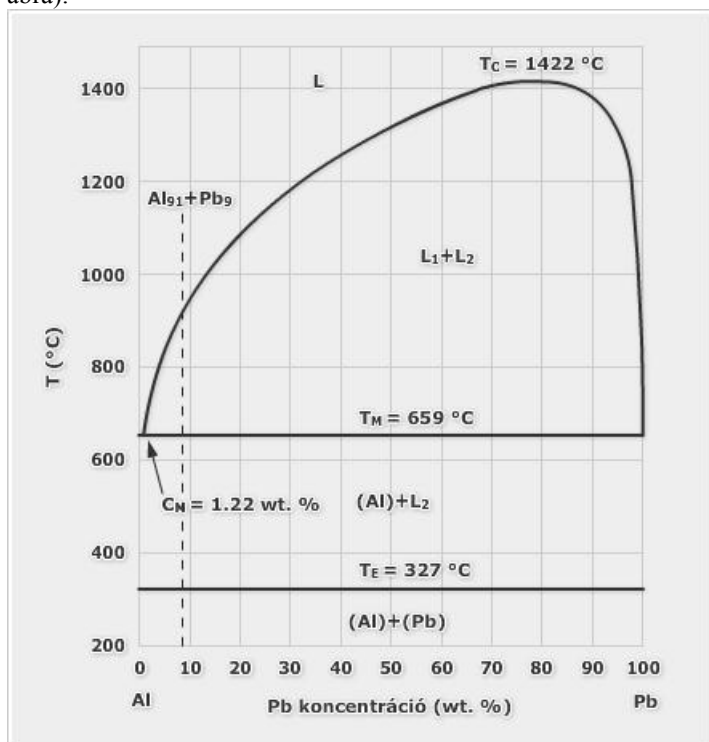
4.3.1. ábra

Ólombronz siklócsapágyakat azért volt „könnyű” csinálni régen is, mert a két fém sűrűsége nem különbözik nagyon egymástól (olvadék állapotban a réz: 8,02 g/cm³; az ólom 10,66 g/cm³). A kb. 30%-nyi különbség nem elegendő ahhoz, hogy a szételegyedés tartományában (L₁+L₂-vel jelzett terület a 4.3.1. ábrán) a két olvadék gravitációsan elkülönüljön egymástól. Ezért lehet jellemző az ólombronz siklócsapágyak szövetszerkezetére a réz mátrixba ágyazott „ólomcseppek” sokasága. Az „ólomcseppek” mérete elsősorban az ötvözet hűlési sebességétől függ. Minél gyorsabb a hűlés, annál apróbbak a „cseppek”.

Egy közép kategóriás, négyhengerű gépkocsi motorjában átlagosan 40 siklócsapágycsészé és -persely található. A járművek tömegcsökkentési igénye felveti a kérdést: nem lehetne a siklócsapágy-funkciót kisebb tömegű alkatrésszel megoldani? Az elvi lehetőség adott. Ha a rezet, aminek szoba-hőmérsékleti sűrűsége 8,96 g/cm³, lecseréljük a 2,7g/cm³ sűrűségű alumíniumra, az alkatrész tömege kevesebb, mint harmadára csökken. Amennyiben indokolt, az alumínium rézhez viszonyítottan gyengébb mechanikai terhelhetősége következtében szükség lehet az alkatrész egyes méreteinek növelésre. Ennek eredménye azonban bizonyosan nem lehet háromszoros térfogat-növekedés, vagyis az alumíniumból készült alkatrész tömege kisebb lesz, mint a rézből készülté.

Alumínium siklócsapágyat azonban nagyon nehéz készíteni. Ennek az az oka, hogy az alumínium és az ólom olvadáknak nagy a sűrűségkülönbsége (olvadék állapotban alumínium: 2,37 g/cm³; ólom 10,66 g/cm³). A kb. 4,5-szeres sűrűségkülönbség egy nagyon nagy szételegyedési tartománnyal (L¹+L²-vel jelzett terület) párosul.

Hasonlítsuk össze a Cu-Pb és az Al-Pb kétkomponensű ötvözet egyensúlyi fázisdiagramját (4.3.1. és 4.3.2. ábra).



4.3.2. ábra

A nagy szételegyedési tartomány és sűrűségkülönbség azt eredményezi, hogy folyékony halmazállapotban a két olvadék gyorsan különválnak és gravitációsan elkülönül: az ólomban dús olvadék lesüllyed az alumíniumolvadék alá. A probléma áthidalására hosszú ideje keresik a megoldást. Az egyik út szerint az alumínium és az ólom porát keverik össze, és porkohászati úton állítják elő az alkatrészt. A másik úton – az 1980-as években – úgy keresték a kísérleti megoldást, hogy a gravitációs hatást kívánták kizárni (elkerülendő a sűrűség szerinti elkülönülést), az ötvözetet a Szaljut-6 űrállomáson kristályosították. Valódi sikert egyik út sem hozott.

A 4.3.2. ábrán az látható, hogy 1422°C fölött a teljes ötvözetrendszerben csak egy olvadék van, vagyis az olvadékalapot homogén. Az ólom forráspontjáig még több mint 300°C hőmérséklet-tartalékunk van (az ólom forráspontja: 1749°C). Ha sikerül a kívánt mennyiségű ólmot az alumíniumolvadékba juttatni és a homogén állapotnak megfelelő hőmérsékletéről gondoskodni, már csak azt kell elérni, hogy az ötvözet teljes kristályosodásáig a keletkező két olvadékfázis gravitációsan ne különüljön el egymástól. A két komponens szétválását, a két komponensben dús olvadék képződését persze nem tudjuk megakadályozni, hiszen az atomi tulajdonságokon alapul, de a fázisok egyenletes diszperz eloszlását elérhetjük. Vigyázat! Nem elegendő a gravitációt, ill. a gravitációs hatást kiiktatni, mert a hűlés során az alumíniumolvadékban keletkező ólomcseppek koagulálnak (az apró ólomcseppek összeállnak és egyre nagyobb cseppekké egyesülnek). Ez a két olvadékfázis felületi feszültségviszonyából következik.

A finom diszperz ólomeloszláshoz a homogén olvadék nagyon gyors hűlésére van szükség. A lézersugaras anyagmegmunkálásoknak éppen ez az egyik jellegzetessége. Az olvadék gyors hűlésének lehetőségét az alumínium jó hővezető képessége támogatja.

Már „csak” a technikai megvalósíthatóságon kell elgondolkodnunk. Amint azt korábban többször tárgyaltuk, két út áll előttünk, az egy- és a kétlépéses technika.

A kétlépéses technikák közül a por felragasztása és a galvanizálás jöhet szóba. Sajnos mind a két esetben nagyon kicsi az adhéziós kötési ereje, ezért az előzetesen felvitt bevonat könnyen leválik az alumínium felületéről, megszűnik a hőátadás a bevonat és az alapanyag között. Ennek az lesz az eredménye, hogy az ólom gyorsan megolvad és az olvadék gömbbé ugrik össze az alumínium felszínén, mert azt nem nedvesíti. A ragasztós megoldásnál azonos eredményre jutunk, csak egy kicsit összetettebb úton, ami a ragasztó maradékának elgázosodásával kombinált.

Az egylépéses technika lehet por- és huzaladagolásos. Mind a két esetben arról kell gondoskodni, hogy az alumínium alapanyagot olvasszuk meg először, és abba adagoljuk az ólmot. A felületi feszültségviszonyok miatt még így is nehézségekkel kell számolnunk. A lézersugárral megolvasztott alumíniumtőcsába adagolt szilárd halmazállapotú ólom megolvadásához alig, beoldódásához azonban időre van szükség. Amíg a beoldódás nem következik be, addig az alumíniumolvadék tetején (!) fog úszni az ólomolvadék, ezért az nyeli el lézersugár energiáját. Mivel az ólom rossz hővezető, ezért túlmelegedhet, és könnyen elérheti a forráspontját, gőzállapotba kerülhet. Így az adagolt ólom kisebb-nagyobb részét elveszíthetjük. Ha a lézersugárral megolvasztott tőcsába ólomhuzalt nyomunk (ami az ólom lágsága miatt nem egyszerű), a jelenség nem lesz nagyon különböző.

A látszólagos nehézségek ellenére van megoldás. Készítsünk olyan kis átmérőjű hegesztőhuzalt, ami kívül alumínium, belül ólom! Az alumíniumköpenyes ólomhuzal a szilárdsága miatt könnyen adagolható (az ólomhuzalhoz képest mindenképpen), és a termikus viszonyok is kedvezően alakulnak, drasztikusan lecsökken (gyakorlatilag megszűnik) az ólom párolgása.

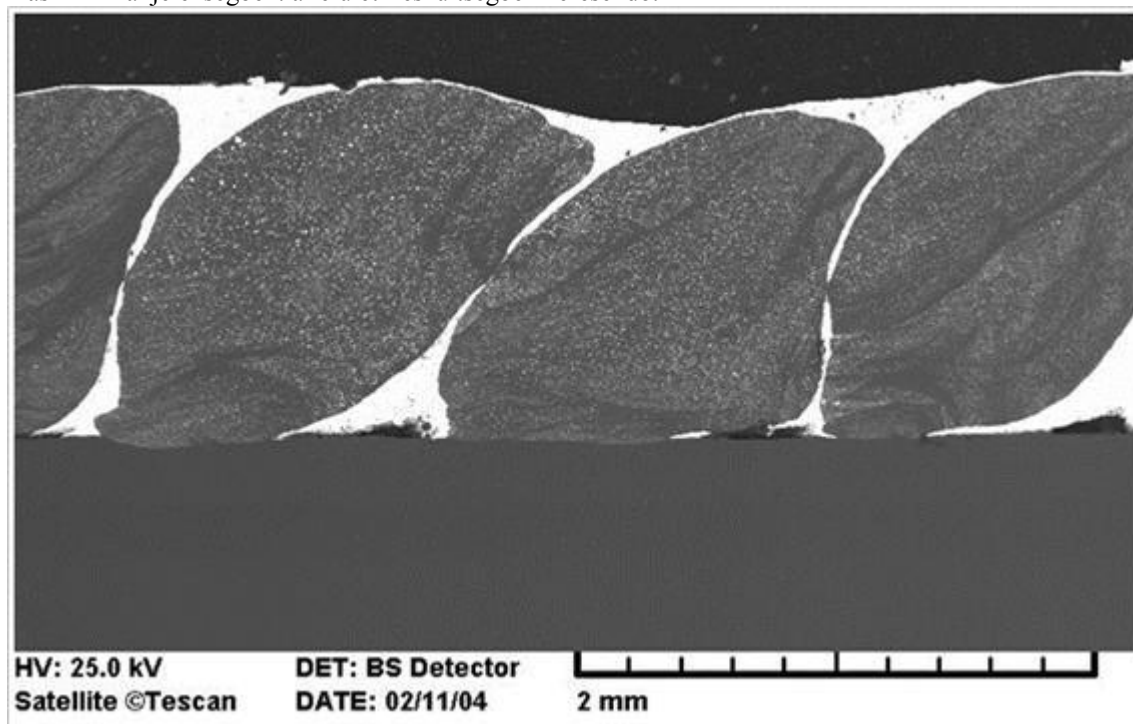
Vizsgáljuk meg, milyen eredményre juthatunk lézersugár segítségével, ha alumínium-ólom siklócsapágyat szeretnénk készíteni! Az eredmény attól függ, hogy a lézersugárral megolvasztott anyag átlagos kémiai összetétele és hőmérséklete által meghatározott pont az egyensúlyi fázisdiagramon a szételegyedés területén kívül vagy azon belül van.

Ötvözet a szételegyedés tartományán belül

Annak érdekében, hogy siklócsapágy készítésére alkalmas felületet kapjunk, több, egymás mellé kerülő sávra van szükség. Vizsgáljuk meg a réteg szerkezetét a lézersugár haladási irányára merőleges metszeti síkban (4.3.3. ábra)! A SEM-képalkotás eredményeként nagyon furcsa kép tárul elénk.

A képen az alul lévő alumínium alapanyagra került sávok közül négy metszetét látjuk. A képen láthatók közül a jobb oldali került fel legkorábban, majd balra haladva a továbbiak. Egy sáv eredménye azonban összetett. Ránézésre, az egymásra dőlő, apró pöttyös kavicsok sorát „fehér iszap” borítja. Mi micsoda a valóságban? Az „egymásra dőlő, apró pöttyös kavicsok” a fázisdiagramon (4.3.2. ábra) L_1+L_2 -vel jelzett terület bal oldali olvadékának kristályosodása során keletkezett. Ennek tehát nagy az alumíniumtartalma. Az apró fehér pöttyök az ólomkiválások. A „kavicsokat” borító „fehér iszap” lesz a fázisdiagramon L_1+L_2 -vel jelzett terület jobb oldali olvadéka a kristályosodás után. Ez egy nagy ólomtartalmú anyag, benne kevés, apró szürke pöttyel, ami nem lehet más, mint az ólom olvadékból a hűlés során kikristályosodott alumínium.

De miért került az ólom az alumínium tetejére? Legyőztük a gravitációt? Természetesen nem. A magyarázat egy másik fizikai jelenségben: a felületi feszültségben keresendő.



4.3.3. ábra

A jelenség magyarázatának keresésekor fel kellett volna tűnni, hogy vékony rétegről van szó. Ilyen esetekben a jelenség oka nem a gravitáció, hanem a határfelületi energiák megfelelő kombinációja.

Vizsgáljuk meg, mi a termodinamikai hajtóereje annak, hogy egy fémolvadék vékony hártát képezzen egy másik fémolvadék felületén! Legyen most a két fémolvadék A és B. Kiindulásként vegyük az A–gőz(gáz) felületet, aminek felületi feszültsége legyen $\sigma_{A/g}$. A szétterülés utáni végállapotként pedig vegyük azt az esetet, amikor az A fémolvadékot vékony rétegben B fémolvadék fedi. Ekkor ugyanazon az alapterületen két, egymással párhuzamos határfelület is megjelenik, egyrészt az A/B határfelület, másrészt a B/g határfelület. A végállapot energiája tehát: $\sigma_{A/B} + \sigma_{B/g}$.

A szétterülést kísérő határfelületi energia változását, ahogyan a termodinamikában általában, a végállapot és a kiindulási állapot energiakülönbségeként definiáljuk: ($\sigma_{BazA-n} = B$ olvadék van az A olvadékon)

$$\Delta\sigma_{BazA-n} = \sigma_{A/B} + \sigma_{B/g} - \sigma_{A/g}$$

Ezzel az egyenlettel tehát a B olvadéknak az A felületén való szétterülését kísérő, egységnyi felületre jutó energiaváltozást írtuk le (J/m^2). Amennyiben ez negatív, a szétterülés spontán folyamat lesz, aminek termodinamikai hajtóereje a $Ds(\sigma_{BazA-n})$ mennyiség lesz. Ez minél negatívabb, annál nagyobb lesz a szétterülés hajtóereje, azaz annál gyorsabban fog (azonos egyéb tulajdonságok mellett) a B szétterülni A felületén. Amennyiben $Ds(\sigma_{BazA-n})$ értéke pozitív, B nem fog szétterülni A felületén, hanem lencse alakú csepp alakot vesz fel. Amennyiben B nagyobb sűrűségű, mint A, ez a B csepp lesüllyed az A fázis alá. Ennek azonban az a feltétele, hogy a B csepp mérete egy kritikus méretnél nagyobb legyen! Ha ez nem teljesül (azaz B mérete kisebb, mint a kritikus cseppméret), a B csepp a gravitációs hatás ellenére stabilan az A fázis tetején fog úszni. A kritikus cseppméret mm-es nagyságrendű.

Természetesen ez a logika megfordítva is vizsgálható: mi a feltétele annak, hogy az A olvadék szétterüljön a B olvadék felületén? Természetesen az, hogy a következő egyenlettel definiált $Ds(\sigma_{AaB-n})$ mennyiség legyen negatív értékű:

$$\Delta\sigma_{AaB-n} = \sigma_{A/B} + \sigma_{A/g} - \sigma_{B/g}$$

Lévé, hogy az egyenletekben szereplő mindhárom σ mennyiség pozitív, ezért egyszerre nem lehet negatív $Ds(\sigma_{BazA-n})$ és $Ds(\sigma_{AaB-n})$ értéke is. Tehát ha pl. B képes arra, hogy szétfolyjon A felületén, akkor A biztos nem képes arra, hogy szétfolyjon B felületén. Természetesen az is elképzelhető, hogy mind $Ds(\sigma_{BazA-n})$ mind $Ds(\sigma_{AaB-n})$ értéke pozitív, és ekkor egyik fémolvadék sem képes a másik felületén szétfolyjni.

Érdemes tudni, hogy egymással olvadék állapotban nem korlátlanul oldódó fém párosítás több is van. Ezek közül néhányat mutat be a 4.3.4-es táblázat, az olvadékok egymáson való szétterülésének megítélésére alkalmas, számított $\Delta\sigma$ -mennyiségekkel.

A fém	B fém	$\Delta\sigma_{BazA-n} \text{ mJ/m}^2$	$\Delta\sigma_{AaB-n} \text{ mJ/m}^2$
Al	Bi	-509	+617
Al	Cd	-374	+490
Al	In	-370	+435
Al	Pb	-367	+631

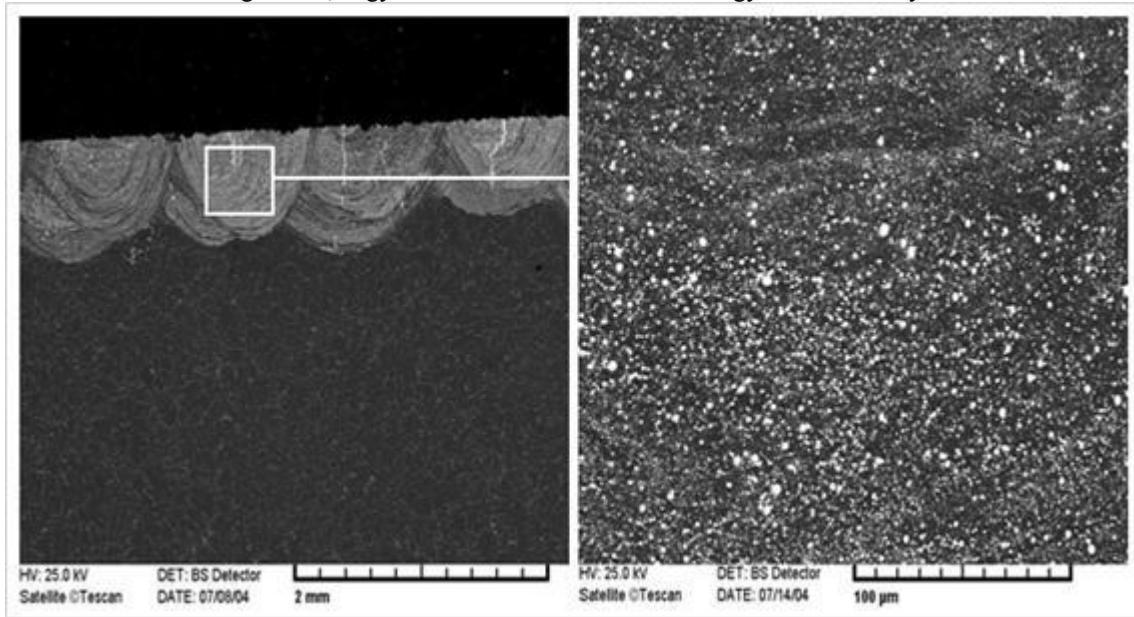
4.3.4. ábra

A táblázat adatai alapján valóban reális, hogy az ólomolvadék szétterül az alumíniumolvadék felületén. Vékony ólomhártya és kis méretű alumíniumcsepp (1 mm átmérő alatt) esetén a jelenségre a gravitációnak gyakorlatilag semmi hatása nem lesz.

A 4.3.3. ábrán látható szerkezetű réteg azonban semmiképpen nem tekinthető alkalmasnak sziklócsapágy működő felületének.

Ötvöztetés a szételegyedés tartományán kívül

Ahhoz, hogy a lézersugárral ötvözött réteg alkalmas legyen siklócsapágó készítésére, a 4.3.4. ábrán látható szerkezettel kell rendelkeznie. Ez a szövetszerkezet csak úgy jöhetett létre, hogy gyors hűlés megkezdődése előtt az olvadék homogén volt, vagyis az ötvözet kívül volt a szételegyedés tartományán.



4.3.5. ábra

A SEM-felvételen szürkének látszó alumíniummátrixban látható apró fehér pettyek jelzik, hogy olvadék állapotban – a termodinamika törvényeinek megfelelően – a szételegyedés megtörtént (különvált az alumíniumban és az ólomban dús fázis), de a gravitáció által irányított teljes elkülönülés, az ólom leülepedése az olvadék aljára nem következett be.

Már csak az a kérdés, hogy az alumínium siklósi tulajdonságait javítja-e a benne lévő, diszperz eloszlású ólom. Annak érdekében, hogy a siklócsapágónak kellő szilárdsága is legyen, válasszunk egy gyakran használt öntészeti Al-Si ötvözetet. Sűrűdési párjaként pedig válasszunk acélt, mert a gyakorlatban a siklócsapágóban forgó alkatrész csaknem minden esetben acélból készül. A lézersugárral ötvözött és ötvözetlen siklócsapágó sűrűdési együtthatójának mért értékét a 4.3.6. táblázat mutatja.

Anyagpárosítás	Sűrűdési együttható
Öntött Al-Si-ötvözet / acél	0,52
Öntött Al-Si-ötvözet + Pb / acél	0,28

4.3.6. ábra

5. fejezet - Diszpergálás

A lézersugaras felületmódosítás témakörében a diszpergálás azt jelenti, hogy a lézersugárral megolvasztott tócsába idegen anyag porát juttatjuk, ami nem vagy csak részben olvad meg, ill. oldódik az olvadékban. Ebből látszik, hogy a diszpergálás esetenként nagyon közeli kapcsolatban lehet a felületötvözéssel. Ilyen eset például a WC injektálása acélolvadékba, amiben a WC viszonylag lassan oldódik. Ennek az a következménye, hogy a munkadarab felületén gyorsan haladó lézersugárral létrehozott tócsa csak olyan rövid ideig maradhat folyékony halmazállapotú, hogy annyi idő alatt az injektált WC-szemcse ne tudjon teljes mértékben feloldódni. Ekkor a feloldódott WC ötvözőként, az oldatlan pedig diszperz anyagként van jelen a rétegben.

Az összefüggések és az egyes technológiák közötti kapcsolatok láttatása érdekében meg kell jegyezni, hogy a lézersugaras in-situ kompozitréteg létrehozása kezdetben a felületötvözés, végeredményében a diszpergálás területéhez tartozik. Az első fázisban ugyanis a kompozitréteg erősítő fázisának (fázisainak) a komponenseit kell oldatba vinni a lézersugárral megolvasztott tócsába, tehát felületötvözésről van szó. A tócsában vegyületfázis keletkezik, ami nem oldódik a tócsa anyagában, tehát idegen, szilárd halmazállapotú fázisként lesz jelen a kristályosodás során és végül a rétegben. Az eredményt tekintve tehát lézersugaras diszpergálásról van szó.

A lézersugaras diszpergálás technikai feltételei nagyon hasonlóak a felület ötvözéséhez, pontosabban annak poradagolósos technikájához. Inert vivő-gázáram segítségével kell arról gondoskodni, hogy a lézersugárral megolvasztott tócsába jussanak a réteg erősítő fázisának (fázisainak) porszemcséi.

A lézersugaras diszpergálás technológiáját többnyire acélokra, alumínium- és titánötvözetekre alkalmazzák. Az erősítő diszperz fázis leggyakrabban valamelyik fém karbidja, ritkábban boridja, esetleg oxidja. A lehetőségek gazdag tárházának bemutatására alkalmas az alábbi táblázat, ami egy, a teljesség igénye nélküli felsorolást mutat.

Mátrix	Bevitt szemcsék	Új fázisok	Fontosabb eredmények
Bármilyen fém	Karbidok, nitridek, boridok	-	Koptató felületi kompozit - szabadalom
304-es acél, Inconel X-750, Ti-6Al-4V, 5052-es Al-ötv. Al-bronz	TiC és WC	-	Sikeres felületi kompozit Előállítás úgy, hogy az integráns részét képezi az alpmátrixnak, köztük határfelület nem alakul ki
304-es acél	TiC 104–210 µm TiC 44–61 µm	-	Mikrokeménység 50%-al ↑ Mikrokeménység 70%-al ↑
Ti-6Al-4V, 304-es acél, 5052-es Al	TiC 74–88 µm	TiC precip, TiC precip, -	Mikrokeménység nőtt Mikrokeménység nőtt Mikrokeménység csökkent
5052-es Al	TiC 104–210 µm TiC 44 µm	- -	Kevésbé jó szerkezet Jobb szerkezet
5052 Al-ötv. Ti-6Al-4V	TiC, WC, (WC) ₇₅ (VC) ₂₅	- old.-precip.	Kopásállóság 30-szoros ↑ Kopásállóság 3,8-szoros ↑
Ti-6Al-4V 5052 Al-ötv.	TiC, WC 40–150 µm	old.-precip. -	Súrlódási tényező 1/2-ére ↓ Kopott térfogat 10–40-szer ↑
T1, M2 acélok	BN hexagonal	old.-precip.	Pórusmentes szerkezet
INCONEL625 Ni-ötvözet	WC, TiC, < 45 µm 45–75, 75–150 µm	Részleges oldódás	Repedések vizsgálata és minimalizálása
Ti-6Al-4V 6061 Al	TiC, WC 36 – 42 µm	-	Repedések megjelenésének vizsgálata nyomás hatására
Ti	B ₄ C, < 44 µm	TiC, TiB ₁₋₂	Jó adhézió
Ti	SiC, 150 µm	TiC, Ti ₅ Si ₃	Mikrokeménység 3-szoros ↑
szerszámacélok	MoC, WC	Mo ₆ C, W ₆ C	Mikrokeménység 30 %-os ↑
A-57G0.3 Al-ötvözet	SiC, 37 µm	kis mértékű oldódás	Mikrokeménység 4-szeres ↑ Kopásállóság 90-szeres ↑
AA6061 Al-ötvözet	SiC 105–150 µm Al + SiC-por	Al ₄ SiC ₄ , Al ₄ C ₃	Al + SiC-por jobb, mint SiC Kopásállóság ↑, ha repedés
INCONEL 625 Ni-ötvözet	WC, TiC	oldódás és precipitáció	A tengervíz korrózió elleni ellenállása csökkent (!?)
Al-Cu-Si	TiC, WC 20–40 µm	WC oldódik, W ₂ C, Al ₄ C ₃	TiC nem törte át az oxidhátyát WC áttörte
Armco vas	Ni ₂ B 100–150 µm	(Fe, Ni) ₂ B, Fe ₃ B	Mikrokeménység 5-szörös ↑ >0,5 mm rétegben repedések
Ti	SiC	Ti ₂ Si ₂ , TiC, Ti ₃ SiC ₂	Repedésérzékenység-vizsgálata
Al	SiC 80 µm SiC 40–80 µm SiC 80 µm	- Al ₄ C ₃ Al ₄ C ₃	Oxidhátya szerepe Repedésérzékenység-vizsgálat Kristályorientáció-vizsgálat
Ti-6Al-4V	SiC 50–90 µm	TiC, Ti ₅ Si ₃	Gradiens kompozitréteg
Ti-6Al-4V	WC 80 µm	W ₂ C, TiC	Kopásállóság 500-szoros ↑
5Al ₂ O ₃ -2MgO-2SiO ₂	TiC, WC, W	-	Hő- és elektromos vezetőréteg kerámiák felületén
M2 gyorsacél	WC 45–62,5 µm	FeWC, WC	Réteges kompozit, keménység ↑
Acél 30CrNiMo8	TiC 22–45 µm NbC 87–120 µm WC(Co) 11–63 µm	- - oldódás	TiC nem hatolt az olvadátkba Mikrokeménység 2-szeres ↑ Mikrokeménység 3-szoros ↑
Gömbgrafitos öntöttvas	Ti 45–75 µm	TiC-dendritok	Az első in-situ LMI kompozit

5.1. ábra

1. A fázisidegen szemcsék kristályfront általi kitolása az olvadékból

Ez az alfejezet Kaptay György MTA-i disszertációjának vonatkozó részére épül.

Az in-situ vegyületképződéssel járó felületötvöztetés és a diszpergálás során lényeges kérdés, hogy az olvadék fázisban keletkezett, vagy az olvadékba injektált szilárd fázis szemcséi be tudnak-e épülni a kristályosodó rétegbe. A laikus kérdés az lehet, hogy miért ne tudnának?

A

A beépülés valószínűségét legerősebben három tényező befolyásolja:

1. a kristályosodási front haladási sebessége;
2. a fázisok (olvadék, beépülésre váró szilárd szemcse, az olvadékból kristályosodó anyag) fajlagos határfelületi energiája (felületi feszültség viszonyok);
3. a beépülésre váró szemcse mérete.

A legkritikusabb helyzet a kedvezőtlen felületi feszültségviszonyok esetén várható, vagyis amikor a beépülésre váró szemcsét nem nedvesítik a partnerek. Vizsgáljuk ezért a szemcse beépülési viszonyait acél és Al_2O_3 anyagpárosítás tükrében, mint a leggyakoribb mátrix és legkritikusabb (rossz nedvesítés) esetére.

Definiálható egy kritikus frontsebesség. Ha a valós frontsebesség magasabb a kritikusnál, akkor a front magába építi a szemcsét, ellenkező esetben maga előtt fogja tolni, esetünkben a réteg felületére. A beépüléshez szükséges kritikus frontsebesség számítására alkalmas képlet:

$$v_{cr} = \frac{0,157}{\eta} \cdot \Delta\sigma^{2/3} \cdot \sigma_s^{1/3} \cdot \left(\frac{d}{R}\right)^{4/3}$$

ahol η az acéolvadék dinamikai viszkozitása (kb. 4 mPa·s), σ_s a szilárd és folyékony acél közötti határfelületi energia (= 0,27 J/m²), d az acéolvadék atomjának átmérője (0,25 nm), R a szemcse sugara, illetve:

$$\Delta\sigma \cong \sigma_{cg} - \sigma \cdot (0,08 + 1,22 \cdot \cos \Theta)$$

ahol σ_{cg} – az Al_2O_3 zárvány felületi energiája, ami kb. 0,95 J/m². Ekkor $\Delta\sigma = 2,0$ J/m².

Tételezzük fel, hogy a kialakuló szemcse (zárvány) csúcsának sugara 1 mikrométer. Akkor a v_{cr} egyenletből a kritikus sebesség: $6 \cdot 10^{-4}$ m/s = 0,6 mm/s. Tehát az acél kristályfront magába építi az Al_2O_3 szemcsét, ha annak sugara 1 mikrométernél nagyobb, és ha a front sebessége 0,6 mm/s-nál nagyobb.

A lézersugaras technológia jellemző paraméterei alapján tudjuk, hogy az átolvasztott réteg szokásos vastagsága kb. 1 mm, míg a kristályosodás ideje kb. 0,1–1 s között van. Ha ez igaz, akkor a valós átlagos frontsebesség kb. 1 és 10 mm/s között van. Érdemes arra figyelemmel lenni, hogy amennyiben a tócsa hőmérséklete lényegesen megnő, pl. 2500 K-re, akkor ez az érték változhat. Ez azt jelenti, hogy a legalább 1 mikron sugarú in-situ képződött, vagy a lézersugárral olvasztott acél tócsába injektált Al_2O_3 szemcséket a gyorsan haladó acél kristályosodási front nem fogja kitolni a felületre, míg a jelentősen kisebb túlhevítés esetén igen.

Lévén azonban, hogy a 0,6 mm/s kritikus sebesség és az 1–10 mm/s valós frontsebesség közeli értékek, az 1 mikrométeres méretűnél kisebb szemcséket a front valószínűleg ki fogja tolni a felületre.

2. A kikényszerített szemcsebeépülés feltétele

Most vizsgáljuk meg az előbb tárgyalt esetet azzal a különbséggel, hogy a szemcse gömb alakú, a kristályfront sík, és véges sebességgel közeledik az eredetileg mozdulatlan Al_2O_3 kerámiaszemcse felé. Amennyiben a $\Delta\sigma$ paraméter értéke negatív, akkor az előző esettel megegyezően a szemcse most is be fog épülni a kristályosodó anyagba. Ha azonban a $\Delta\sigma$ paraméter értéke pozitív, kis frontsebesség esetén a front saját mozgási sebességével egyező sebességre fogja gyorsítani a szemcsét, és azzal a sebességgel fogja tolni azt maga előtt.

A frontsebesség növelésével azonban a fémolvadékban mozgó szemcsére egyre nagyobb mértékű közegellenállás hat, ami a front felé kényszeríti a szemcsét. Egy ún. „kritikus frontsebesség” (v_{cr}) felett a szemcse olyan közel kerül a fronthoz, hogy ez a kristálynövekedés instabilitásához vezet, a sík kristályfront deformálódik, behorpad, körbeöleli a szemcsét, ami végül beépül a kristályba. Ezt a jelenséget nevezhetjük „kikényszerített szemcse-beépülésnek”.

Vizsgáljuk meg a folyamatot részleteiben! Mivel a spontán szemcseeltolás esetében a $\Delta\sigma$ -paraméter mindig pozitív értékű, a szemcse és a front között taszító jellegű határfelületi adhéziós erő alakul ki, ami nemcsak a szemcsét tolja el, hanem a frontot is. Ez a hatás oly módon érvényesül, hogy az r sugarú szemcse „mögött”

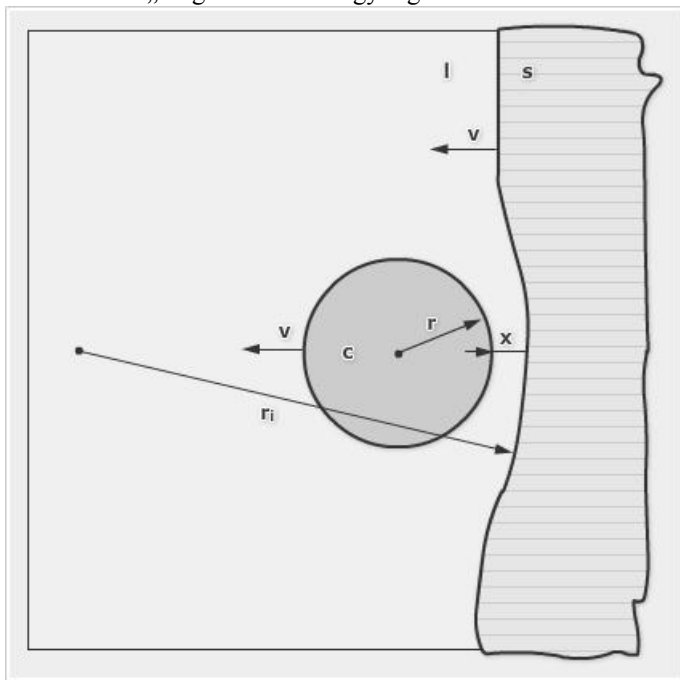
kialakul a „horpadás”, aminek sugarát jelöljük r_i -vel (5.2.1. ábra). Az ehhez viszonyított dimenziómentes szemcse sugarat jelöljük α -val ($\alpha \equiv r/r_i$). Erre a görbült szilárd/folyékony határfelületre egyrészt a görbület okozta határfelületi nyomás, másrészt a határfelületi adhéziós erő hat. Amennyiben csak a gömb alatti görbület egy kis részét vizsgáljuk, a gömb és a szilárd/folyadék határfelület közel párhuzamos lesz egymással. A

$$-\frac{2 \cdot \sigma_{\text{sl}}}{r} \cdot \alpha + 2 \cdot \Delta \sigma \cdot \frac{d^2}{(d+x)^3} = 0$$

egyenletből kifejezhető az x távolság és az α dimenziómentes görbület közötti összefüggés. Egyensúly esetén, amennyiben az egyszerűség kedvéért az $x \gg d$ feltételt használjuk:

$$x_{\text{egyens}} = \sqrt[3]{\frac{\Delta \sigma \cdot r \cdot d^2}{\sigma_{\text{sl}} \cdot \alpha_{\text{egyens}}}}$$

Az egyenletből következik, hogy α_{egyens} fordítottan arányos x_{egyens} köbével. Ez azt jelenti, hogy nagy szemcse és kristályosodási front x távolságai esetén α_{egyens} tart 0-hoz, vagyis a front gyakorlatilag sík marad. A szemcse és kristályosodási front távolságának csökkenésével azonban α_{egyens} értéke fokozatosan nőni fog, tehát a szemcse közeledtével „mögötte” a front egyre görbületesebb lesz.



5.2.1. ábra

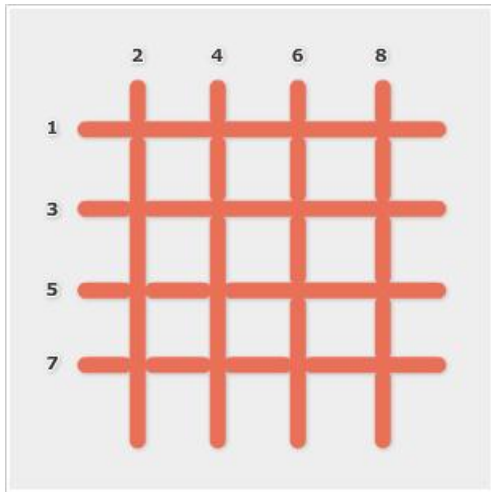
Most írjuk fel az r_i görbületi sugarú horpadásban ülő, r sugarú gömbre ható határfelületi adhéziós erő képletét:

$$F_{\sigma, x} = 2 \cdot \pi \cdot \Delta \sigma \cdot \frac{r \cdot r_i}{r_i - r} \cdot \left(\frac{d}{d+x} \right)^2$$

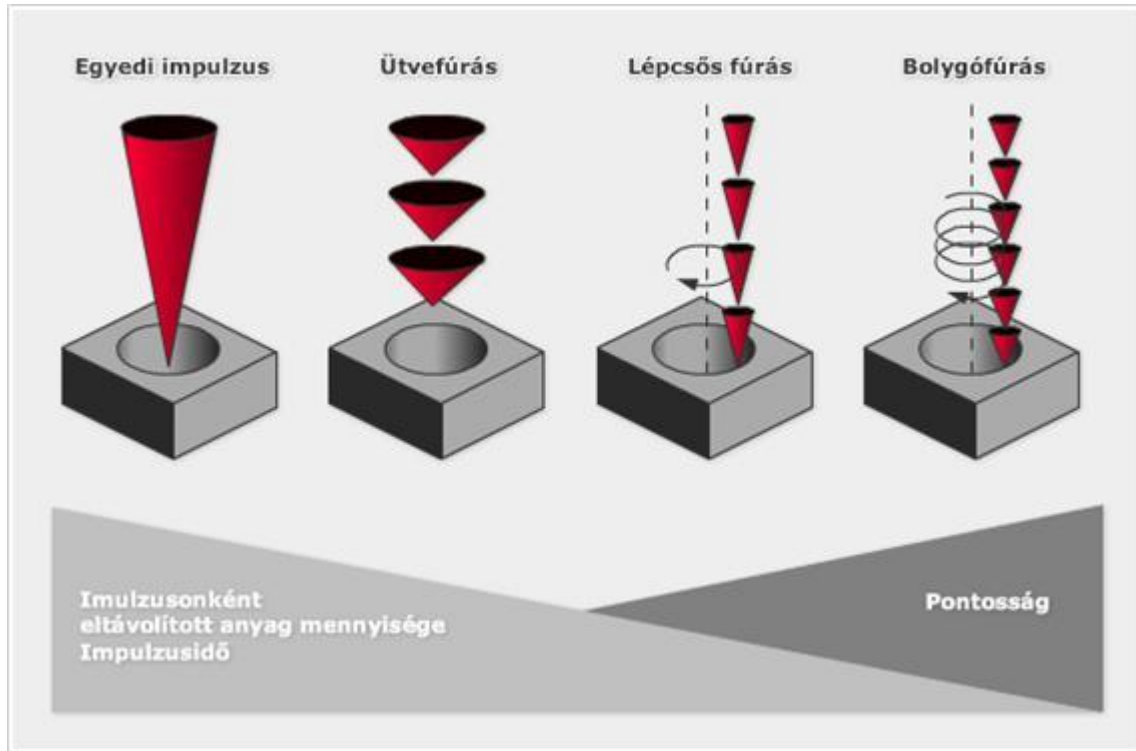
Írjuk újra ezt az egyenletet az $\alpha \equiv r/r_i$ paraméter segítségével, abban az egyszerű esetben, amikor teljesül az $x \gg d$ feltétel, vagyis a szemcse távol van a kristályosodási fronttól:

$$v_{\alpha} = 0,157 \cdot \frac{\Delta \sigma^{2/3} \cdot \sigma_{sl$$

6. fejezet - Bevonatolás

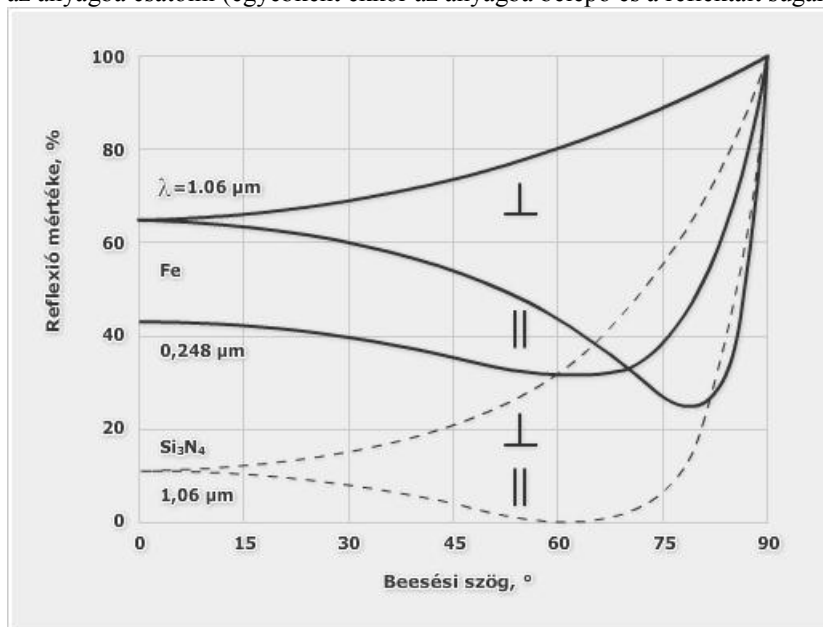


7. fejezet - A szublimációs technológiák



A fémek esetében, a látható tartományba eső hullámhosszúságokon, ill. annak környezetében (ultraibolya és infravörös) a kölcsönhatást a vezetési sávban lévő elektronok határozzák meg. Ezek felelősek a viszonylag nagy reflexióért – ami esetenként a 95%-ot is meghaladja – valamint a kis behatolási mélységért, ami néhányszor 10–100 nanométer. Az anyagba behatolt sugárzás (eltűnő, evanescens nyaláb) gyakorlatilag a felszín közvetlen közelében (a hullámhossz törtrésze mélységig) úgy polarizálja a vezetési sávban lévő elektronokat (a vezetési elektronokat), hogy azok egy – a beesővel közel megegyező intenzitású – ellentétes irányú (reflektált) hullámnak lesznek a forrásai. Csak az intenzitáskülönbség nyelődik el és alakul hővé. A jó elektromos vezető anyagok reflexiója ezért nagy, a rosszabb vezetőké pedig kisebb, tehát az abszorpciójuk nagyobb. A nem túl vékony – a fény hullámhosszánaál vastagabb fémrétegek esetén a transzmisszióval nem kell számolni, vagyis: $reflexió = (1 - abszorpció)$.

A 7.2.1.1. ábra mutatja, hogy a reflexió mértéke az elektromágneses sugárzás beesési szögének függvénye. A függés konkrét mértékét befolyásolja, hogy a sugárzás elektromos momentumának rezgési síkja milyen szöget zár be a darab felületével (polarizáció iránya). Merőleges beesés esetén az a sugárzás polarizáltságától függetlenül, de az anyag minőségétől függő reflexió mértéke közel 100% is lehet. A felületre merőleges polarizációs síkú sugárzás esetén a beesési szög csökkenésével monoton csökken a reflexió. Ha a polarizáció síkját 90°-kal elforgatjuk (párhuzamos polarizáció), akkor a reflexiónak a beesési szög függvényében egy minimuma lesz. A minimum helye és értéke anyag- és hullámhossz-függő. A minimumhoz tartozó beesési szöget Brewster-szögnek nevezik. Ez az a beesési szög, aminél a leghatékonyabban lehet a lézersugár energiáját az anyagba csatolni (egyébként ekkor az anyagba belépő és a reflektált sugár egymásra éppen merőleges).



7.2.1.1. ábra

A dielektrikumokra jellemző, hogy az elektronszerkezetükben a tiltott sáv széles, és a vezetési sávjuk szobahőmérsékleten praktikusán üres. Ezek az anyagok csak akkor tudnak fotonokat a fémekhez hasonlóan abszorbeálni, ha a fotonok energiája a tiltott sáv szélességénél nagyobb energiájú. Nagyságrendileg ez az ultraibolya sugárzást jelenti. A kerámiák, dielektrikumok tiszta állapotukban jellemzően átlátszóak, transzparenssek. A Brewster-szögnél a párhuzamos polarizációra vonatkozó reflexió nullára csökken. (Ez azt jelenti, hogy a dielektrikum kristályból készíthetünk polarizátort, ami a felé tartó random- vagy cirkulárpolarizált sugarat két, egymásra merőleges haladási irányú, párhuzamos [beeső] és merőleges polarizáltságú [reflektált] nyalábra osztja).

A műszaki kerámiák mégis megmunkálhatók látható, illetve infravörös lézersugárral. A lézer energiája elnyelődik az anyagban, aminek az az oka, hogy az egyes kerámiaszemcsék között elszennyeződött üvegfázis van, ami már elegendő mértékű abszorpciót biztosít. Esetenként a kerámia (ami valójában fémvegyület) az elnyelt energia hatására termikusan disszociál, ami a felületen fémes természetű bevonatot eredményezhet. Az abszorpció szempontjából ez már új helyzetet eredményez. Annak ellenére, hogy a dielektrikumok abszorpciós folyamata bonyolultabb, mint a fémes anyagoké, a lézersugaras ablációja mégis hatékonyabb. Ez azt is jelenti, hogy a fémek lézersugaras anyageltávolításához nagyobb teljesítménysűrűsége van szükség, mint a kerámiák

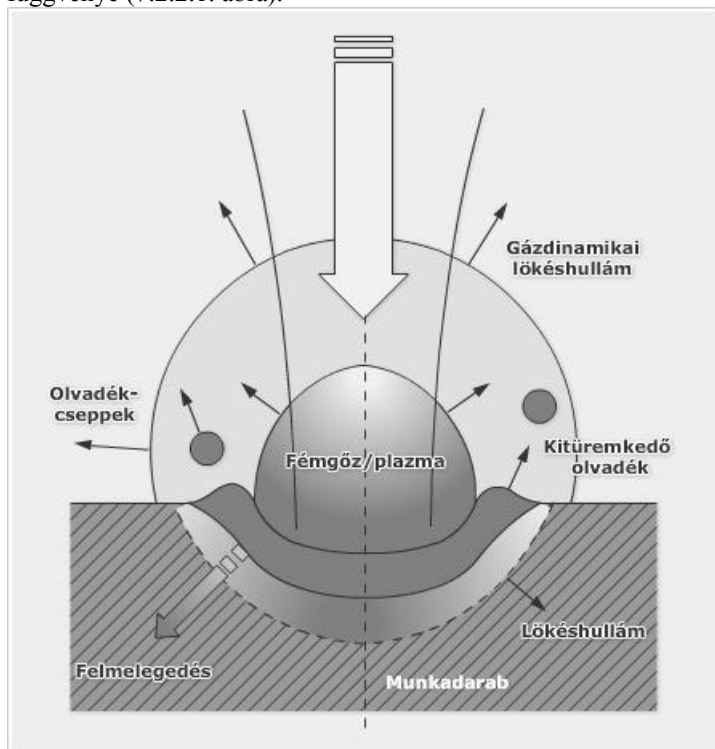
esetén. Ennek magyarázata a két anyagcsaládra jellemző hőtani tulajdonságok (hővezető képesség, fajhő, fázisváltozási hőeffektusok stb.) lényeges különbségében keresendő.

2.2. A lézersugaras anyageltávolítás termikus folyamatai

Az abszorbeált sugárzás az anyag felmelegedését eredményezi. A lézerimpulzus teljesítményének növelése kedvez az anyag gyorsabb felmelegedésének, a gyors megolvadásnak és párolgásnak. Az anyag kémiai és fizikai tulajdonságaitól függ, hogy a lézersugár teljesítménysűrűsége milyen fizikai folyamatok láncolatát eredményezi. A folyamatok dinamikája a kölcsönhatási időtől és a besugárzott felület nagyságától is függ.

A lézersugár hatására, a munkadarab felületén folyékony vagy szilárd állapotban lévő anyag elgőzölög, az anyag nagy energiájú atomjai távoznak. A folyamat közben az anyag térfogata hirtelen nagyon megnő, a munkadarab felületén keletkezett nagynyomású gőzfelhő tágulni kezd. A gőzképződést jellemző paraméterek nagysága a lézerimpulzus energiájától és időtartamától függenek. A gőz hőmérséklete több ezer Kelvin, terjedési sebessége pedig néhányszor 10km/s (hangsebesség: $\sim 0,33$ km/s). A gőz a gyors tágulása következtében gyorsan is hűl, újra kondenzálódik.

A hirtelen kialakuló nagy gőznyomás visszahat az olvadékra, aminek felszínén keletkezett. A nyomáshullám maximuma a néhány ezer bart is eléri. Ez a nyomás az olvadékot nagy sebességgel préseli a kialakuló kráter pereme felé. Ez növeli az anyageltávolítás hatékonyságát, viszont a kráter peremére kinyomott olvadék és az elrepült cseppek megdermedése rontja az összképet. A kráterben visszamaradó olvadék mennyisége úgy csökkenthető, ha a gőznyomás növekedésének sebességét és az elérhető maximum nagyságát növeljük. A lézersugaras anyageltávolítás során tehát az anyagot olvadék és gőz formájában távolítjuk el. Az, hogy a két halmazállapotú anyagmennyiségnek mi az aránya, az a lézersugár és az anyag tulajdonságainak egyaránt függvénye (7.2.2.1. ábra).



7.2.2.1. ábra

Amennyiben a technológiát az eltávolítandó anyag mennyiségére optimaljuk, akkor az olvadékképződés és -eltávolítás körülményeinek kedvező viszonyokat kell teremteni. Változatlan impulzusenergia esetén ilyenek például az impulzusidő és a foltméret növelése.

Az olvadékfilm fölött keletkező gőznyomás nemcsak az olvadékra, hanem az alatta lévő szilárd anyagra is hat, lökeshullámot kelt benne, ami a lézerfolttól sugárirányban távolodik az anyag belseje felé. A lökeshullámok periodikus ismétlődése rossz esetben az anyag károsodását eredményezi, jó esetben ezt céltudatosan figyelembe

vesszük, tervezzük (felületkeményítés, képlékeny alakítás). Repedésveszéllyel főleg rideg anyagok esetén kell számolni.

2.3. Ultrarövid lézersugár-impulzus hatása

A lézersugár abszorpciója a szilárd anyag elektronszerkezetének lokális gerjesztésével kezdődik és a foton-elektron kölcsönhatáson alapul. A gerjesztés egyik útja:

1. Az elektronok először magasabb energiájú állapotba kerülnek, és kilépnek az atommaghoz kötött állapotukból (a lokalizációjukból), az ún. vezetési sávba kerülnek (kvázi szabadok, helyesebben „nem lokalizáltak”). Ez – jelen tudásunk szerint – végtelenül rövid idő alatt történik. Az elektronok a térben más elektronokkal, az atomtörzsekkel ütköznek, így az elektronok energiája termalizálódik (Boltzmann-eloszlás), azaz hő formájában érzékelhető. Ez a termalizáció nagyságrendileg 100fs időt vesz igénybe.

2. Az anyagot alkotó atomok elektronjai fénnyel, vagyis lézersugárral közvetlenül nem gerjeszthetők. Viszont az egyes atomcsoportoknak vannak sajátos rezgési rezonanciafrekvenciái, illetve az egész kristálynak vannak kollektív rezonanciái (fononok), amelyeknek megfelelő transzverzális és a longitudinális hullámok terjednek az anyagban. Ezek jellemzően az infravörös sugárzás frekvenciatartományába esnek.

Ezek a különböző szabadsági fokok általában lazább vagy szorosabb kapcsolatban, csatolásban vannak egymással, és a külön-külön értelmezhető elektron-hőmérséklet, vibrációs (rezgési) hőmérséklet, fononhőmérséklet 100 femto-, néhány pikoszekundum alatt egysúlyba kerül, kiegyenlítődik. A jelenleg ismert adatok nagy szórást mutatnak. Vas esetében 0,5, alumíniuméban 5 ps, rézéban 50 ps időt tartanak szükségesnek. Ahogyan nő az atom rendszáma, vagyis az atommag tömege, egyre több időre van szükség az észrevehető mértékű melegedéshez. Az ipari gyakorlatban jelenleg alkalmazott lézerimpulzusok hossza többnyire ennél lényegesen nagyobb, így ezeknek az adatoknak a pontossága a folyamat értelmezése szempontjából nem játszik meghatározó szerepet. Az ultrarövid impulzusidejű lézerek esetén a relaxációs idő hosszúsága közel kerülhet az impulzus hosszúságához. Ebben az esetben persze az energiatranszport folyamatának részleteire nagyobb figyelmet kell fordítani.

Az energiatranszport folyamatát leírni szándékozó modellek nagy része csak az elektronokhoz és a kristályrácsához rendel különböző hőmérsékletet. Ennek a kéthőmérsékletes modellnek hátránya, hogy a részfolyamatokat nem képes figyelembe venni, így az ultrarövid impulzusok során lejátszódó folyamatok leírására csak korlátozott mértékben alkalmasak.

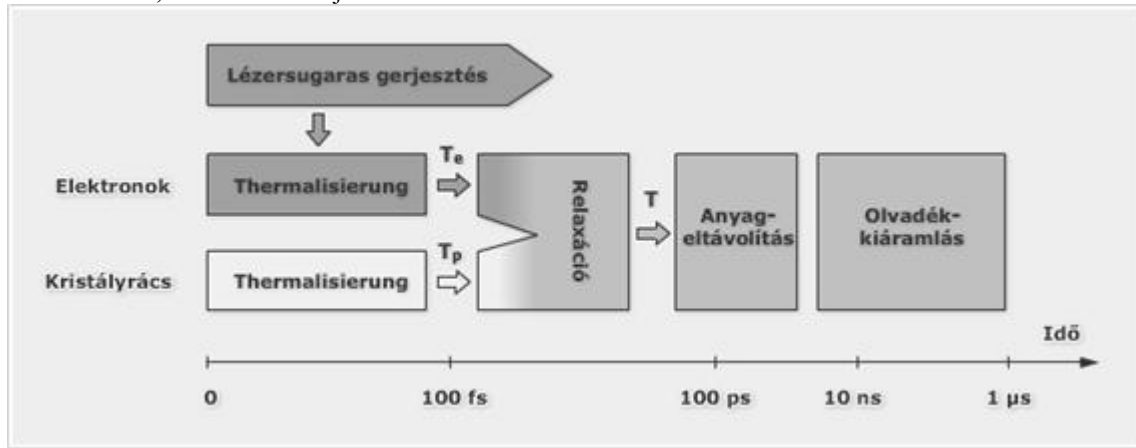
1. A vibrációs (rezgési) energia növekedése (a „hőmérséklet”) egy idő után eléri a kristályszerkezetet összetartó kötési energiát, és ha azt meghaladja, a kristály összeomlik, az anyag megolvad. A megolvadt anyagnak egészen más optikai tulajdonságai vannak (mind a látható fény-, mind az infravörös tartományban), mint az eredeti szilárd anyagnak. A további fényelnyelésért a különálló, de erősen kölcsönható egyedi molekulák, ionok, atomok felelősek. A fényt továbbra is az elektronfelhő vagy infravörös tartományban a molekulákat alkotó atomok közti rezgés (és most már – korlátozott tartományú – forgás, rotáció, libráció) nyeli el. Az elektronfelhő gerjesztése olyan szintre juthat, hogy már nem tartja össze a molekulát, az is szétesik (disszociál) atomjaira.

2. A folyadékállapot – adott nyomáson – bizonyos hőmérséklet felett gőz-, majd gáz-halmazállapottá válik. Ez nem egyszerre következik be, mivel a fény az anyag felületét éri, így a legfelső réteg gyorsan elpárolog. A szabad atom vagy molekula most megint az előzőektől egészen eltérő optikai jellemzőkkel rendelkezik. A részecskék közötti szoros kölcsönhatások elmaradása miatt egyre élesebb rezonanciák, szelektívebb abszorpciós vonalak jellemzik.

3. A mennyiben a fény frekvenciája elég nagy (UV), már egy fotonnyi energia is elegendő ahhoz, hogy az atom vagy molekula egy elektronját eltávolítsa, vagyis „ionizálja” a részecskét. Amint a gázatomok (molekulák) jelentős része ionizálódott, plazma alakul ki (negatív szabad elektronok és pozitív ionok keveréke), amit sokan „negyedik halmazállapotnak” neveznek. Nagy hőmérsékleten a semleges részecskék ütközése is elegendő az elektron leválásához, az ionizációhoz (a gyertya lángja is plazma). Nagyon nagy lézerintenzitásoknál az anyag részecskéi egyszerre több fotonnyi energiát képesek elnyelni (többfotonos gerjesztés, ionizáció). Még nagyobb fényintenzitásnál a fényhullám elektromos terében az elektronok közvetlenül felgyorsulhatnak, mint egy részecskegyorsítóban.

Mindezek a folyamatok sorban, egymás után mennek végbe a másodperc töredéke alatt, és a folyamat térbeli kiterjedése miatt gyakran egyszerre vannak jelen.

A teljes folyamat részleteinek egymásutánosságát szemlélteti a 7.2.3.1. ábra. Először a fény lép kölcsönhatásba a vezetési sávban lévő elektronokkal, a fény frekvenciájának ütemében „rázza” őket (indukált polarizáció). A lézerimpulzus ideje alatt folyik az elektronok „felmelegedése”, és az energiakülönbségek kiegyenlítődése, a termalizáció. Az elektronok gyakran ütköznek egymással, ezáltal energiataartalmuk átlagolódik. Az elektronok energiájának relaxációja a kristályráccsal való ütközéseik révén valósul meg. Ez a folyamat a korábban elmondottak miatt már lassabban zajlik, a lézerimpulzus végén többnyire még nem fejeződik be. A tényleges anyageltávolítás az impulzus befejeződése után kezdődik és még jobban elhúzódik. Először a szublimáció következik be, azt követően zajlik az olvadékeltávolítás.



7.2.3.1. ábra

Az elgőzölgés és a megolvadás a rács felmelegedését követően kezdődhet. Ezek volumenét – és ami még lényegesebb – az arányát jelentős mértékben befolyásolja a lézerimpulzus időtartama és teljesítménysűrűsége. Nagy teljesítménysűrűséggel elérhető, hogy a gőzképződéshez képest az olvadékképződés mértéke elhanyagolhatóvá váljon. Ugyanezt a hatást érhetjük el az impulzusidő csökkentésével. Egy impulzus hatására elinduló folyamat 7.2.3.1. ábra szerinti teljes befejeződéséhez legalább 100ps-nyi időre van szükség. Az impulzushosszúság és a lézersugár intenzitásának függvényében a teljes folyamat ideje a néhányszor 10 ns-ot is elérheti.

Mindezek alapján – az anyageltávolítás gazdaságosságát és reálisan elérhető minőségét is szemelőtt tartva – az 1–10 ps impulzusidejű lézersugarforrásokat tekinthetjük ideálisnak.

Kellően nagy teljesítménysűrűség esetén a transzparens anyagokra is alkalmazható az anyageltávolítás technológiája annak ellenére, hogy a fotonok energiája kisebb, mint a tiltott sávot jellemző energiakülönbség, továbbá kellő mennyiségű szennyeződés sincs az anyagban. Azért következhet be mégis a fotonok abszorpciója az anyagban, mert a nagy teljesítménysűrűség olyan nagy térerősséget eredményez, hogy az egyelektronkétfotonnyi energiát vesz fel egyidejűleg, (mintha egy UV-foton lenne). Ennek következtében elszaporodnak a vezetési sávba került elektronok, amik már a lézer hullámhosszán is képesek energiát abszorbeálni. Ezt a két- vagy több foton-elektron kölcsönhatási jelenséget nevezzük nemlineáris kölcsönhatásnak. Kiváltásához 100 MW/cm² teljesítménysűrűségre, rövidebb, mint 1 ns impulzusidőre és néhány mJ impulzusenergiára van szükség (pl. Q-kapcsolt YAG-lézer).

2.4. A lézersugárral indukált plazma

Tárgyalásunk során plazma alatt értsük azt a fizikai szempontból sokrészecskés halmazt, ami pozitív, negatív töltésű és semleges részecskékből áll, és – noha elektromos szempontból – összességében ugyan semleges, de a töltéshordozók egymás közötti és külső erőterrel létrejövő kölcsönhatásainak messzemenő következményei vannak, a részecskék, ionok, elektronok nem tekinthetők teljesen szabadnak. Szűkebb értelemben plazmának nevezzük a részben vagy teljesen ionizált gázokat. A lézersugaras technológiák során plazma képződhet a fémgőz, a fémgőz és a környezet gázának vagy csak a környezet gázának ionizálásával. A lézersugárzás-plazma kölcsönhatás, valamint a gázdinamikai folyamatok alapjaiban befolyásolják a lézersugaras szublimációs technológia folyamatait.

A plazma abszorpciója

A plazma számos módon gyakorol hatást a lézersugár terjedésére, mert reflektálhatja, abszorbeálhatja és törésmutatója következtében diszpergálhatja. A plazma ugyanis igen bonyolult kölcsönhatásban van a fotonokkal, az elektromágneses tér kvantumjaival. A hatások erőssége elsősorban a plazma hőmérsékletétől és a szabad elektronok sűrűségétől függ.

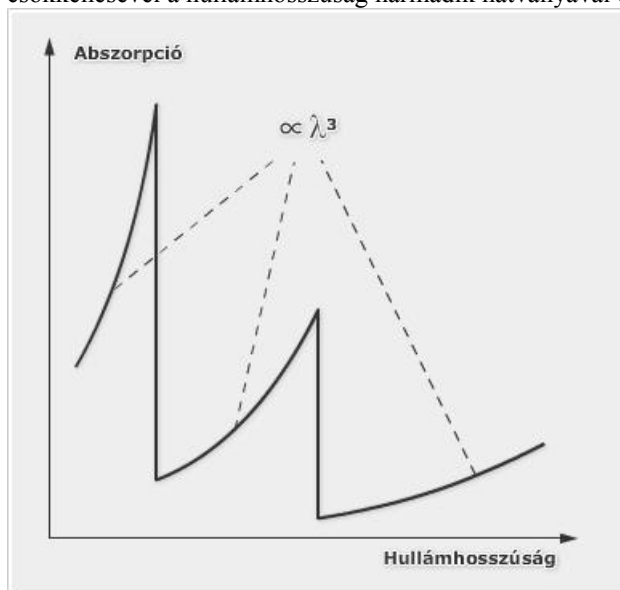
A lézersugaras technológia alkalmazása során ez a két meghatározó jelentőségű jellemző a lézersugár paramétereitől függ: hatásidő (impulzusidő), hullámhosszúság, teljesítménysűrűség, intenzitáseloszlás, foltméret.

A plazmaképződés folyamatának kiindulópontja a gázfázis elektronjainak kölcsönhatása az elektromágneses tér (lézertér) elektromos erőterével. Ez a kölcsönhatás váltja ki a plazmaképződést, a plazma melegedését, de a lézersugár extinkcióját (intenzitáscsökkenését) is. Ezért a lézersugár-plazma kölcsönhatásnak meghatározó szerepe van a lézersugaras anyagmegmunkálásokban.

A plazma lézersugár-abszorpciójának több elemi lépésből álló folyamata van, amelyek a plazma növekedéséhez és melegedéséhez vezetnek, végül is befolyásolják a plazma tulajdonságait. Vegyük sorra ezeket az elemi lépéseket!

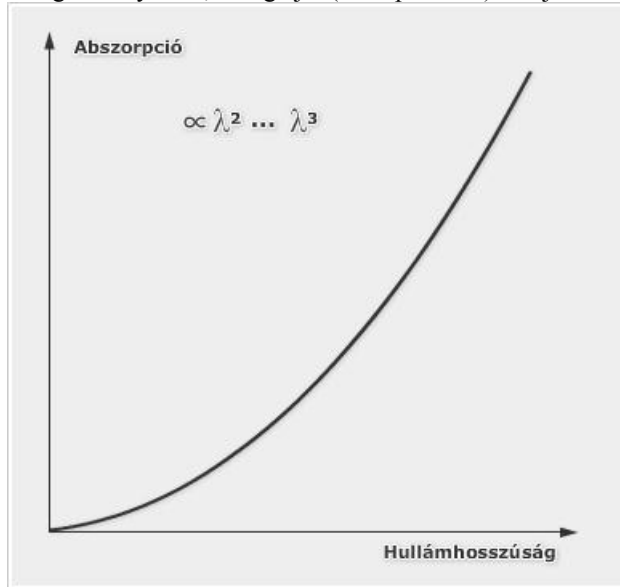
1. *Kötött elektronok abszorpciója.* Egy magányos (gáz-) atom elektronrendszere egyik állapotából egy másikba való átmenetéhez csak meghatározott energiájú fotonnal tud kölcsönhatásba lépni ($E = h \cdot \nu$). Tetszőleges hullámhosszúságú (energiájú) fotonok abszorpciója akkor következhet be, ha a részecske szempontjából a lehetséges energetikai végállapot nyitott. Ez az ionizáció, amihez általában UV hullámhosszúságú fényre van szükség. A lézeres gyakorlatban a hosszabb hullámhosszak (kisebb fotonenergia) miatt az anyagok ionizálásához több foton együttes energiájára van szükség (MPI: Multi-Photon-Ionisation). Az ionizációt úgy is felfoghatjuk, mintha a semleges és az ionizált (plazma-) állapot között virtuális energiaszintek lennének, amelyek élettartama nagyon rövid. Az élettartamok rövidsége miatt nagy fénysűrűségre van szükség, hogy az atom elektronrendszere az egyik virtuális energiaszintről hamar átlépessen a következőre (ahogyan a pizstrángok felküzdi magukat a zuhatagon). A folyamat neve a multifoton abszorpció (MPA: Multi-Photon-Absorption). Majd, ha az elektron energiája nagyobb, mint a kötési energia, az elektron kilép az atomból (MPI: Multi-Photon-Ionisation, többfotonos ionizáció). Természetesen megnő a többfotonos abszorpció, ionizáció valószínűsége, ha a foton abszorpciója nem virtuális, hanem létező (véges élettartamú) energiaszintek vannak közben.

A nagy intenzitással érkező lézertér energiájának elnyelése az elektronok kinetikus energiájának eloszlását jellemző Boltzmann-eloszlás eltolódását eredményezi az ionizált állapot felé. A fotoionizációs abszorpciók együtthatójának hullámhosszúság-függése tipikus fűrészfogjellet mutat. A hullámhosszúság csökkenésével, vagyis a fotonok energiájának növekedésével elérünk egy olyan határt, ahol a részecske két reális energiaszintje közötti átmenet egy foton abszorpciójával is bekövetkezhet. Az abszorpció ugrások között a hullámhosszúság csökkenésével a hullámhosszúság harmadik hatványával csökken az abszorpció mértéke (7.2.4.1. ábra).



7.2.4.1. ábra

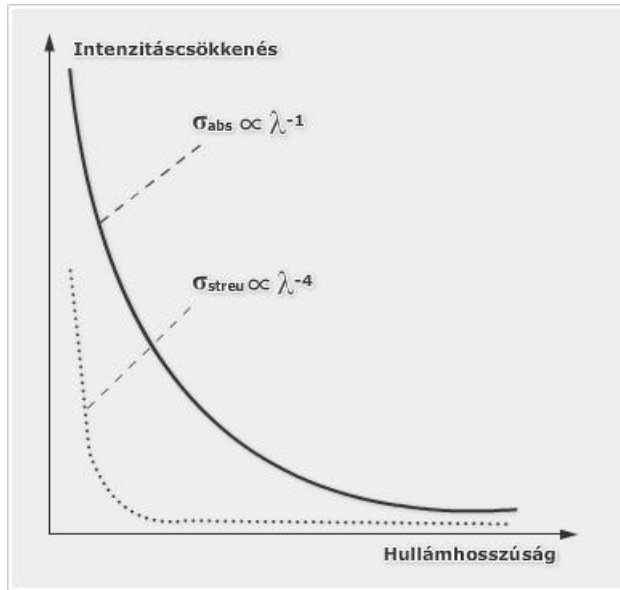
2. *Szabad elektronok abszorpciója.* A fizika törvényei szerint nem lehetséges, hogy egy foton átadja teljes energiáját egy szabad elektronnak (nem teljesülne egyidejűleg az impulzusmegmaradás és az energiamegmaradás törvénye). Ha a plazmában már kellően nagy számban vannak kvázi szabad elektronok, akkor a kölcsönhatásban megnő az inverz fékezési sugárzás szerepe, ez válik az abszorpció domináns szereplőjévé. A fény elektromos terében az elektron kinetikus energiája megnő, miközben kölcsönhat egy pozitív ionnal, az impulzusa és energiája egy részét átadja annak. A folyamat tehát hármas ütközésként szemlélhető: foton – elektron – nehéz pozitív részecske együttes kölcsönhatása. A folyamatban egy fotonnyi energia elenyészik, energiáját (és impulzusát) átadja az elektron-ion rendszernek.



7.2.4.2. ábra

Az inverz fékezési sugárzás mechanizmusával bekövetkező abszorpció mértéke a hullámhosszúsággal exponenciális kapcsolatban van. A „hideg” plazma esetén az összefüggés a hullámhosszúság harmadik, „meleg” plazma esetén a második hatványával mutat arányosságot. Ennek az az oka, hogy a hőmérséklet növekedtével a plazma emissziója egyre intenzívebbé válik.

3. *Mie-kölcsönhatás.* A Mie-kölcsönhatásban a fény hullámhosszánál kisebb méretű anyagcsomók, apró, folyékony vagy szilárd halmazállapotú részecskék (amelyek akár a plazmában is lehetnek) vesznek részt. Ezeket a szublimációs anyageltávolítás során az alapanyagról „leszakadó” gőz, vagy gőz-plazma közeg veti ki a munkadarabból, együtt alkotják az angolul „plum”-nak nevezett ablációs anyagfelhőt. A lézersugár útjába kerülve a lézersugár gyengülését eredményezik. A gyengítést közvetlenül kiváltó ok lehet szórás és abszorpció egyaránt. A hatáskeresztmetszet csökkenése az abszorpció esetén a hullámhosszúság reciprokéval ($1/\lambda$, Lorentz-vonalalak), a szórás esetén a hullámhosszúság negyedik hatványának reciprokéval ($1/\lambda^4$) arányos (7.2.4.3. ábra). Az, hogy a Mie-kölcsönhatás a plazma melegezésére milyen hatást gyakorol, még vizsgálják.



7.2.4.3. ábra

A lézersugár által indukált plazma dinamikája

A három, korábban felsorolt mechanizmus sosem lép fel egyedül. A valóságban ezek egymáshoz képest változó hatásereőséggel játszanak szerepet az abszorpció folyamatban. Az impulzuslézerek esetére különösen jellemző, hogy az egyes mechanizmusok dominanciája időfüggő, ráadásul egy lézersugár-impulzuson belül, még akkor is, ha az impulzus hosszúsága ns-os nagyságrendben van. Gyakori, hogy a plazma abszorpciójának indító mechanizmusa a gőzfázisban a kötött elektronok abszorpciójával indul, esetleg a Mie-kölcsönhatással kiegészítve. Ez az indító folyamat az első szabad elektronok megjelenéséig tart. Ebben a gyengén ionizált plazmában erősödik fel az inverz fékezési sugárzás mechanizmusával bekövetkező abszorpció. Az egyre nagyobb számban keletkező szabad elektronok kinetikus energiája is folyamatosan nő, ami a gőzatomokkal történő ütközéseket egyre gyakoribbá és nagyobb energiájúvá teszi.

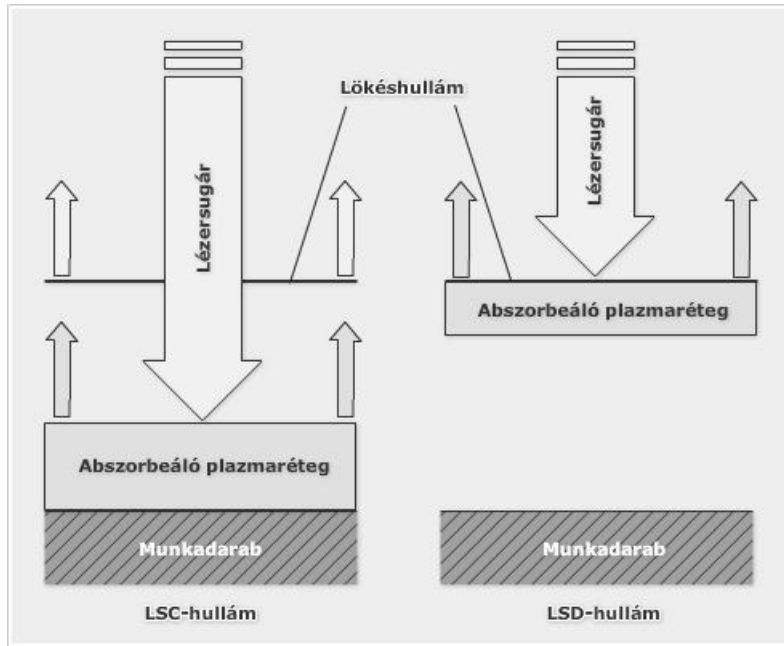
Az ütközéses ionizáció további szabad elektronok keletkezéséhez vezet. Az inverz fékezési sugárzás mechanizmusa egy idő után dominánssá válik, ami az ütközéses ionizáció mechanizmusával együtt, a szabad elektronok számának lavinaszerű szaporodását eredményezi (angol kifejezéssel: avalanche ionization). Ez a plazma dielektromos áttöréséhez vezet, aminek következtében a lézersugarat egyre nagyobb mértékben leárnyékolja az erősödő reflexió és abszorpció következtében. Egy kritikus szabadelektron-koncentráció elérésével a reflexió aránya eléri az egyet, a plazma teljesen leárnyékolja a lézersugarat, vagyis nem jut energia a munkadarab felületére.

2.5. Lézersugár által indukált lökeshullám

A nagy intenzitású lézerimpulzus hatására az anyag felületén nagyon rövid ideig, nagyon intenzív gőzfejlődés zajlik. A gőz gyors kitágulása az őt körülvevő gázatmoszféra felé egy hirtelen kialakuló lökeshullámot hoz abban létre, ami radiális irányban nagy sebességgel terjed. A lökeshullám erősségét (energiatartalmát) a gőzképződés intenzitása, annak tömegárama szabja meg. Ha a gőzképző réteget (Knudsen-réteg) a gőz hangsebességgel hagyja el, akkor a réteg és a lökeshullám között egy relatív hígult közeg alakul ki. A lézersugár által indukált lökeshullámot a szakirodalom LSA-nak nevezi (Laser Supported Absorption).

A lézersugár által indukált lökeshullám viselkedésével kapcsolatban két szemlélet létezik, ezek nevei kémiai reakciókat sejtetnek, pedig ilyen tekintetben semmi közük hozzá, csupán a jelenségek analógiája miatt kapták ezt az elnevezést. A kettő közötti lényeges különbség abban áll, hogy a hullámba hol történik az energiabecsatolás.

- **LSC** (Laser Supported Combustion): energiabecsatolás közvetlenül a munkadarab felületén.
- **LSD** (Laser Supported Detonation): az energia nagy része a hullám mögötti keskeny sávban abszorbeálódik, így a munkadarabot a további energiabecsatolás elől részben vagy egészen leárnyékolja.



7.2.5.1. ábra

Még a legutóbbi kutatások eredményei is azt sugallják, hogy a lézersugaras anyageltávolítás során mind a két mechanizmus érvényesül. Abban is egyetértés van, hogy a lökéshullám jellegét legerősebben a lézersugár hullámhosszája befolyásolja. Ennek gyönyörű, fotóval dokumentált kísérleti bizonyítéka látható a 7.2.5.2. ábrán. Az ábrán látható felvételt infravörös tartományú detektálással is kiegészítették, aminek eredményét a vázlaton tüntették fel.



7.2.5.2. ábra Forrás: BREITLING, D.; SCHITTENHELM, H.; BERGER, P.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: Shadowgraphic and interferometric investigations on Nd:YAG laser-induced vapor/plasma plumes for different processing wavelengths. Soc. for Optical Engineering, 2001, S. 534–538

A hullámhosszúság változtatásával változik a felhő alakja és a lézersugár-abszorpciós terület helye. A kisebb hullámhosszúság esetén a munkadarab felületéhez közeli középpontú, gömbszerű lökéshullám-terjedés figyelhető meg. Az infravörös tartományú detektálás a lézersugár energiaelnyelését, a legnagyobb hőmérsékletű részt a képzeletbeli gömb középpontjába teszi, és csak kismértékű abszorpciót mutat a lökéshullám mögötti részen. A hullámhosszúság növekedtével megváltozik az abszorpciós terület helye és a hőmérséklet-eloszlás, aminek következtében a felhő alakja is. Az abszorpció domináns területe folyamatosan eltolódik közvetlenül a lökéshullám frontja mögé. A felvételeket a felhőn belül mért elektronsűrűség vizsgálati eredményei is alátámasztották. A felhőben nagyságrendileg 10^{19} elektron van cm^3 -enként.

A 7.2.5.3. ábrán látható, hogy a lézersugár intenzitása is képes a gőzfelhő alakjának markáns megváltoztatására. Ez nem is meglepő, hiszen az intenzitás növekedtével a szabad elektronok száma is nő, ami a fotonok energiaelnyelését hatékonyabbá teszi, ezért a felhő hőmérséklete gyorsabban nő, ami a lökéshullám viselkedésére is kihat.



7.2.5.3. ábra

A lökéshullám képes a lézerimpulzus energiájának figyelemreméltó részét tartalmazni kinetikus energia formájában. A rövidebb hullámhosszúság esetén ugyan kevesebbet, de a hosszabbak esetén lényegesen többet (355nm-en ~7%, 532nm-en ~25%, 1064nm-en ~90%).

A gázatmoszféra dielektromos áttörése

A lézerimpulzussal indukált plazmák viselkedésének különleges esete a gázatmoszféra dielektromos áttörése. A jelenség akkor következhet be, ha a lézersugár intenzitása kellően nagy ahhoz, hogy a gázközegben lévő szabad

elektronokat kellő mértékben tudja gerjeszteni. A gerjesztett szabad elektronok és a gázrészecskék ütközése ionizációhoz kell, hogy vezessen. A lézersugárban keletkező új töltéshordozók az abszorpció mértékét folyamatosan növelik. A végső stádiumban egy lavinaeffektus következtében számuk ugrásszerűen megnő, a plazmán nem hatol át a lézersugár.

A folyamat beindulásának feltétele a kellő számú „indító elektron”, másképpen startelektron (lucky elektron). Ilyenek elvileg a kozmikus sugárzás következtében is lehetnek, de ezek száma messze nem elegendő a folyamat beindításához. Szükséges tehát, hogy a gázatmoszférában legyenek olyan szennyeződések, amiknek kicsi az ionizációs potenciálja. Ezek többnyire apró porszemcsék a levegőben, amik a munkadarab felszíne közelében vannak. Még nagyobb teljesítménysűrűségnél jelentőssé válik a többfotonos ionizáció, a nitrogén és az oxigén molekulákról elektronok szakadnak le, kialakul a plazma.

A gázatmoszféra dielektromos áttörése is plazmaállapotot és lökéshullámot eredményez, ami az árnyékfotózás technikájával is dokumentálható. A 7.2.5.4. ábrán +0,5mm-es defókuszhelyzetben (a lézersugár fókusza 0,5mm-rel a munkadarab felülete fölött) lévő lézerimpulzus hatása látható.



7.2.5.4. ábra

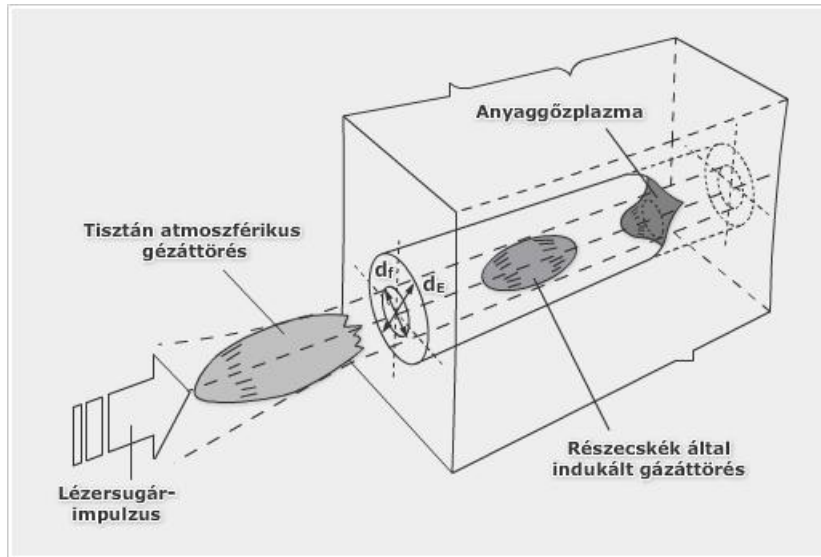
Néhány ns-mal a 12ns-os lézerimpulzus kezdetét követően, egy második lökéshullám kialakulása látható a munkadarab felülete fölött, a lézersugár fókuszának környezetében. A munkadarab felületétől induló és ez az új plazma egy idő után összeér, és a lézersugár tengelye mentén egy összefüggő szálát képez. Ennek az a következménye, hogy a lökéshullám terjedési iránya megváltozik, keresztirányban kezd haladni. A startelektron-elmélet helyességét igazolja, hogy a lézerimpulzusok között eltelt idő csökkenésével a két lökéshullám keletkezése (egy a darab felületétől, egy másik pedig a darab fölött, a sugár fókuszának helyén) egyre gyakoribbá, majd rendszeressé válik. A jelenséget néhány mm-es defókuszig lehet nyomon követni.

Plazmák kölcsönhatása a lézersugaras fűrés során

A nagy teljesítménysűrűségű lézersugár-impulzusok hatására keletkező plazmák és lökéshullámok kialakulásának két mechanizmusát, egyben helyét ismertük meg. A fűrés során egy következő, harmadik jelenséggel is számolnunk kell.

Az egymást követő impulzusok hatására a munkadarab felületén kráter alakul ki, majd furattá mélyül, amit jellemző méretei miatt kapillárisnak is nevezhetünk. A következő lézerimpulzus megérkezéséig tartó időben a munkadarab anyagából távozó részecskék nem feltétlenül tudják elhagyni a krátert, a kapillárist, és az sem biztos, hogy van elég idejük a kondenzálódásra. Ennek az az eredménye, hogy a részecskék jelenléte egy újabb áttöréshez vezet. A részecskék térfogategységre vonatkoztatott gyakorisága következtében ehhez már kisebb teljesítménysűrűség is elegendő, mint amekkorára a gázatmoszféra dielektromos áttöréséhez volt szükséges.

A plazma és a lökéshullám terjedése azt eredményezi, hogy az elpárologtatott anyag részecskéi a kapilláris geometriai viszonyai között távolodva valameddig eljutnak a párolgás helyétől, miközben a haladási irányuk a lézersugár optikai tengelyével egybeesik, velük szembe közeledik a következő lézerimpulzus. A lökéshullámban haladó részecskék jelentős számú startelektron keletkezéséhez nyújtanak kedvező körülményeket (7.2.5.5. ábra).



7.2.5.5. ábra

8. fejezet - A lézersugaras szublimálás és fúrás alkalmazásai

A lézersugaras fúrásnak akkor van előnye más technológiákkal szemben, ha

- a furat átmérője kicsi,
- a furat keresztmetszete nem kör,
- a furat hossza mentén a keresztmetszet nem egyenletes,
- az alapanyag nehezen forgácsolható (rideg, kemény),
- nagy a furat mélység/átmérő viszonya.

A kritériumok közül egyszerre több is érvényesülhet, de ezek közül az elsőnek van a legnagyobb jelentősége. 1mm-nél nagyobb átmérőjű (vagy egyenértékű átmérőjű) furatot ritkán készítenek lézersugaras szublimációs technológiával. Ennek fő okai, hogy ennél nagyobb keresztmetszet esetén más technológiák is versenyképesé válnak (határozott és határozatlan élű forgácsoló szerszámok, szikraforgácsolás stb.), ill. a szublimálással eltávolítandó anyagmennyiség növekedésével a műveleti idő, ennek következtében a költségek is jelentősen nőnek.

Vannak olyan alkatrészek, amik fúrása a hagyományos technológiákkal gazdaságosan nem oldható meg. Más megközelítésben: vannak olyan alkatrészek, amelyeket nem gyártanak, ha nem lenne gazdaságosan elérhető a lézersugaras fúrás technológiája. A következőkben ezekből mutatunk be néhány példát.

Tömeggyártott termék a dízelmotorok befecskendező fűvókái (7.3.1. ábra). Az üzemanyag égésének folyamatát jelentősen befolyásolja, hogy a robbanótérbe fecskendezett olaj mennyire apró cseppekre porlad, mennyire egyenletes a cseppek eloszlása a térben. Ezek nemcsak a motor hatásfokát, teljesítményét, de a károsanyag-kibocsátását is befolyásolják. Mindezek pedig a fűvóka apró furatainak geometriájától függenek.



7.3.1. ábra Forrás: <http://www.industrial-lasers.com>

Kisebbszámban készülnek és nem a kiskereskedelmi termékek közé tartoznak a gázturbinalapátok, de még mindig viszonylag sokat gyártanak belőlük. A lapátok hőterhelésének mérséklése érdekében – apró furatokon keresztül – hűtőlevegőt fűjnek be, ami „hideg” gázfilmet alkot a lapát körül. A kívánt jelenség kialakulása érdekében sok, apró, a felületre nem merőleges furatot kell létrehozni (7.3.2. ábra). A kedvező gázáramlási viszonyok érdekében a furatok keresztmetszete a felszíntől távolodva többnyire változó.



7.3.2. ábra Forrás: <http://www.drbohrer.com/>

A lézersugaras fúrásnak ezek a leggyakoribb ipari alkalmazásai. A szerénynek mondható alkalmazási kör valószínűleg csak annak következménye, hogy ezeken a területeken volt a legégetőbb szükség a műszaki probléma megoldására. Ebből következik, hogy a fúrásnak – általánosabb értelmezésben a lézersugaras szublimáltatásnak – idővel újabb alkalmazási területei válnak általánossá, amelyek a befecskendező fűvókák gyártásához képest még csak kísérleti stádiumban vannak. Ezt valószínűsíti a rövid és az ultrarövid impulzusú lézersugárforrások fejlődése, terjedése.

Egyes ipari termékcsoporthoz folyamatos méretcsökkenése a szublimációs technológiák iránti igényt egyértelműen növeli. Új igényként jelenik meg a szilícium-félvezetők lézersugaras megmunkálása (7.3.3. ábra). Teljesen új területnek számít a mikrométeres nagyságrendbe tartozó szabadgeometriák kialakítása, aminek speciális esetei is vannak, mint például a lézersugaras trimmelés. (A trimmelés technológiáját az elektromos ellenállások precíz, egyedi beállítási területén régóta alkalmazzák. Új alkalmazás viszont a szilícium alapú mikro-rugó-tömeg-aktuátor gyártás.)



7.3.3. ábra Forrás: <http://www.teschauer-laser.de>

A legelterjedtebben az egyimpulzusos fűrészt alkalmazzák. Ennek hátránya, hogy a fűrés mélysége erősen korlátozott. A lézersugaras ütevfűrés során azonban ugyanarra a helyre egymást követően több lézerimpulzus érkezik, aminek következtében a fűrés mélysége impulzusról impulzusra nő. Ehhez a megmunkáláshoz többnyire stabil rezonátort és kb. 0,1 mm fókuszátmérőjű lézersugarat használnak. A jó sugárminőség mellett a termelékenység érdekében a nagy ismétlési gyakoriság is kívánatos.

A lézersugaras ütevfűrés során az impulzusok csúcsteljesítménye az 50 kW-ot is meghaladhatja. A nagyobb ismétlési gyakoriság (impulzusfrekvencia) a sugárminőség romlását, a fókusz mélység csökkenését eredményezi, különösen a hagyományos rúdlézerek esetén, a rúd termikus terhelésének következtében. Ahogyan azt a korábbiak alapján tudhatjuk, az ismétlési gyakoriság növekedése nem feltétlenül eredményezi a fűrés teljesítmény arányos növekedését (plazmák kölcsönhatása).

Tény, hogy a lézersugaras megmunkálás reprodukálhatóságát és minőségét (7.3.4. ábra) alapvetően a munkadarab felületét érő lézersugár intenzitása, a nyaláb alakja, ill. kausztikája (energiaeloszlás a nyalábon belül) határozza meg. Mivel a fűrés konkrét műszaki feladatai különbözőek, ezért az egyes feladatok szempontjából ideális sugárforrások sem egyformák. Általános minőségi követelmény a rezonátorokkal szemben, hogy a termikus lencseeffektusra ne legyenek érzékenyek.



7.3.4. ábra

A. függelék - Fogalomtár

Lézersugaras felületmódosító technológiák

Csoportosítási lehetőségek: halmazállapot-változás nélküli, halmazállapot-változással járó, kémiai összetétel megváltozás nélküliek, kémiai összetétel megváltozásával járók.

Felsorolásuk: edzés, felületszilárdítás, elpárologtatás, lézersugaras marás, átolvasztás, felrakóhegesztés, ráolvasztás, felületötvöztetés, diszpergálás, bevonatolás.

Ausztentésedés

Az acélok $\alpha \rightarrow \gamma$ fázisátalakulással járó folyamata, aminek során a keletkező auszténitben idegen fázisok oldódnak, többnyire karbidok.

Martenzitképződés

Az auszténit kritikusnál nagyobb sebességű hűtése során keletkező szövetelem, aminek kémiai összetétele megegyezik az auszténitével, keménysége a kristályrács átalakulása és a diffúzió elmaradása miatt viszont lényegesen nagyobb.

Defókus

A fókuszált lézersugár fókuszfoltjának távolsága a munkadarab felszínétől. Értéke pozitív, ha a munkadarabon kívül van, negatív, ha munkadarabban van.

Bifókus

Kettéosztott, fókuszált lézersugár. A bifokális mértéke a két fókuszpont közötti távolság nagysága. Csak pozitív értéke van.

Virtuális vonalfókus

A fókuszált lézersugár útjába helyezett tükör gyors rezgetésével kialakuló látszólagos vonal.

Felrakóhegesztés és ráolvasztás

A felrakóhegesztés és a ráolvasztás technológiájában közös, hogy a munkadarab anyagát részben meg kell olvasztani, hogy a rákerülő új anyaggal biztosan kialakuljon a kohéziós kapcsolat. Különbség a két technológia között, hogy a ráolvasztás esetén – amennyire csak lehet – kerülni kell az alapanyag felkeveredését a réteg anyagába.

Koaxiális poradagolás

A lézersugaras technológia megvalósításához szükséges por adagolása (fúvása vivőgáz segítségével) a lézersugár optikai tengelyével párhuzamos tengelyű, képzeletbeli kúppalást mentén történik.

Kausztika

Burkolófelület, többnyire a fókuszált lézersugár haladási irányára merőleges síkokban mért intenzitáseloszlások burkoló felülete. Ennek segítségével lehet a fókusz pontos helyét és sugárminőségi jellemzőket meghatározni.

Átlapolódás

A lézersugárral a munkadarab felületén egymást követően létrehozott, egymással párhuzamos sávok közös része. Kifejezhető százalékos értéként és a sávok „haladási irányára” merőleges valódi távolsággal.

Egy- és kétlépéses technológia

A hozaganyag alkalmazásához kötött lézersugaras felületmódosító technológiák. Egylépéses esetben a hozaganyag adagolása a lézersugaras kezeléssel egy időben történik, a kétlépéses esetben a lézersugaras kezelést megelőzően.

In-situ vegyületképződés

A lézersugár segítségével létrehozott rétegben komponenseiből keletkezik (keletkeznek) az(ok) a vegyület(ek), amik a réteg különleges tulajdonságait eredményezik. (Pl. az olvadékból oldott titán és karbon reakciójának terméke nagy keménységű titán-karbid.)

Monotektikus ötvözetek

Azon ötvözetek csoportja, amelyeknek komponensei (alkotói) olvadék állapotban nem oldják egymást korlátlanul; a két fémolvadék elkülönül egymástól, többnyire gravitációsan szét is válnak.

Lézersugaras diszpergálás

Olyan lézersugaras felületmódosító technológia, aminek során a fémolvadékból nem vagy csak részben, lassan oldódó szilárd részecskék vannak egyenletes eloszlásban.

Kristályosodási front

Fémolvadékok kristályosodása során a folyékony és a szilárd halmazállapotú anyagot elválasztó határfelület.

Kikényszerített szemcsebeépülés

A kristályosodási front előtt, az olvadékból lévő, idegen, szilárd szemcse termodinamikai okok miatti beépülése a kristályosodott anyagrészbe.

Szublimáció

A szilárd halmazállapotú anyag gőz állapotba kerülése az olvadék (folyadék) fázis állapot kihagyásával.

Plazma

Nagy energiájú anyag állapot. Jellemzője, hogy a részecskék egyedi energiája olyan nagy, hogy pl. az elektronjaitól részben vagy egészen megfosztott pozitív töltésű atomok, ill. atommagok egy térben vannak a negatív töltésű delokalizált elektronokkal, mégsem tudják azokat az atommag körüli keringő pályára kényszeríteni, mert az elektronoknak ehhez túl nagy az energiája.

Inverz fékezési sugárzás

Foton – elektron – nehéz részecske hármass kölcsönhatás. A folyamatban a foton teljes energiáját átadja az elektronnak, ami az így szerzett impulzusát ütközés révén adja át a nehéz részecskének, vagyis az ionizált atomnak.

Mie-kölcsönhatás

A Mie-kölcsönhatás kiváltói apró, folyékony, de akár szilárd halmazállapotú részecskék. Ezeket a szublimációs anyageltávolítás során az alapanyagból leszakadó gőz vagy gőz-plazma közeg veti ki a munkadarabból. A lézersugár útjába kerülve a lézersugár gyengülését eredményezik.

Irodalom

Laser in Technik und Forschung. Herziger, G. és Weber, H..

Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung. Beyer, Eckhard, és Wissenbach.

Laseranwendungen an harten und weichen Oberflächen. Rubahn, Horst-Günter, Balzer, és Frank.

Lasertechnik für die Fertigung. Poprawe és Reinhart.

Fertigungsverfahren 3. König és Wilfried.

Laser-Surface Interactions for New Materials Production. Miotello, Antonio és Ossi, Paolo.

Laser Material Processing. Steen, Willim, M., és Mazumder, Jyotirmoy.

Laser-Assisted Fabrication of Materials. Majumdar, Jyotsna Dutta és Manna, Indranil.

The Theory of Laser Materials Processing. Dowden, John.

Laser Ablation and its Applications. Phipps, Claude.

Laser Drilling. Yilbas, Bekir Sami.

Lézeres felületkezelés és modellezés. Bitai, Enikő.

Határfelületi energiák, erők és jelenségek fizikai-kémiai modellezése a metallurgia és a fémes anyagmérnökség egyes területein. Kaptay, György.

Laser Precision Microfabrication. Koji, Sukioka, Michael, Meunier, és Albert, Piqué.

Bergmann, H.; Rebhan, U.; Stamm, U.: *Design and Technology of Excimer Lasers.* http://dx.doi.org/10.1007/3-540-26667-4_6.

H.; Stamm, U.: *Principles of Excimer Lasers* Bergmann. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-26667-4_5.

9. fejezet - Önellenőrző feladatok

1. Önellenőrző feladatok

Feladatok