

BITAY ENIKŐ

LÉZERES FELÜLETKEZELÉS ÉS MODELLEZÉS

A szerkezeti anyagok és az anyagtechnológiák fejlesztése a legutóbbi időkben is az eddigi elméleti és gyakorlati ismeretekre alapozva, de jobbra próbálkozással történt. A nem túl távoli jövő feladata olyan eljárások (szimulációs technikák) kidolgozása, amelyekkel képesek leszünk valamely anyag szerkezetét (ezáltal a kívánt tulajdonságát is) egy technológiai eljárás paramétereinek beállításával (pl. lézeres felületkezelésnél) meghatározni, anélkül hogy nagy volumenű és költséges kísérleteket végeznénk. Jelen kötet, amely a korszerű lézeres felületkezelési technológia elméleti és gyakorlati oldalát s ennek szimulációs technikáját, komplex matematikáját mutatja be, ehhez kíván hozzájárulni.

LÉZERES FELÜLETKEZELÉS ÉS MODELLEZÉS

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS FÜZETEK



ISBN 973-8231-66-3
ISBN 978-973-8231-66-5

ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET

BITAY ENIKŐ

LÉZERES FELÜLETKEZELÉS ÉS MODELLEZÉS

A kutatást támogatta:

Az MTA–OM, DOMUS HUNGARICA SCIENTIARIUM ET ARTIUM

MTA – Arany János Közalapítvány

MTA Határon Túli Magyar Tudományos Kutatásért Program

BITAY ENIKŐ

LÉZERES FELÜLETKEZELÉS ÉS MODELLEZÉS



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2007

Lektor: Kocsisné dr. Baán Mária PhD

ETO: 669.18
621.795.04
621.375.8

ISBN 973-8231-66-3
ISBN 978-973-8231-66-5

© Bitay Enikő 2007

Kiadja: Az Erdélyi Múzeum-Egyesület
Felelős kiadó: Sipos Gábor

Olvasószerkesztő: Kerekes György
Borítóterv: Könczey Elemér

Nyomdai munkálatok: TIPOHOLDING RT., Kolozsvár

Tartalom

1. Bevezető	09
1.1. Előzmények	09
1.2. Célkitűzések	10
1.3. A kutatás partnerei	10
2. Lézeres felülettechnológiák elméleti háttere	12
2.1. Bevezető	12
2.2. Lézertechnológiák az anyagmegmunkálásban	13
2.3. Felületmódosító technológiák szerepe	17
2.4. Célorientált felületmódosítás	19
2.5. Hagyományos felületkezelési eljárások	21
2.5.1. Felületi edzések	21
2.5.2. Termokémiai felületkezelések	21
2.6. Korszerű felületkezelési eljárások	22
2.6.1. Rétegleválasztás	22
2.6.1.1. Fizikai gőzfázisú leválasztás (PVD)	22
2.6.1.2. Kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD)	24
2.6.1.3. Felületszórás	24
2.6.2. Felületmódosítás	25
2.6.2.1. Ionsugaras módszerek	25
2.6.2.2. Plazmás felületmódosítás	25
2.6.2.3. Lézersugaras felületmódosítás	25
2.7. Nagy energiasűrűségű megmunkálások	26
2.7.1. Nagy energiasűrűségű felületkezelések hatása acélokra	26
2.7.2. Nagy energiasűrűségű technológiák paraméter-összefüggései	28
2.8. Lézeres felületkezelések	33
2.8.1. Lézeres felületkezelések általános jellemzői	33
2.8.2. A lézernyaláb jellemzése	33
2.8.3. A kezelendő felület jellemzése	37
2.8.4. A lézeres felületkezelések osztályozása	37
2.8.5. A lézeres felületkezelési eljárások paraméterei	42
2.8.6. A lézeres felületkezelési technológiák paramétertartományai	45
2.9. Lézeres felületedzés (laser hardening)	46
2.9.1. Az abszorpció szerepe lézeres felületedzés során	53
2.10. Lézeres felületátolvasztás (laser remelting)	55
2.10.1. Az átolvasztott réteg geometriája	55
2.10.2. A megolvadt zóna jellemzése	56
2.10.3. A kialakult réteggeometria szabályozása	57
2.10.4. A kialakult réteg szerkezete és tulajdonsága	58
2.11. Lézeres felületötvöztetés és bevonatolás	59

2.12. Összefoglalás	62
3. Betétedzésű acél lézeres felületkezelése	63
3.1. Bevezető	63
3.2. Átalakulások, hőmérsékletövezetek a lézeresen átolvasztott C15 minőségű acélban	63
3.2.1. Átalakulások hevítéskor	66
3.2.2. Átalakulások lehűléskor	68
3.2.2.1. Kristályosodás	68
3.2.2.2. Fázisátalakulások szilárd állapotban	71
3.3. A C15-ös acél lézeresen átolvasztott felületi rétege keresztmetszetének vizsgálata (egyedi sávok)	75
3.3.1. A lézeresen átolvasztott réteg geometriai paraméterei	75
3.3.2. A lézeresen átolvasztott réteg keménységének vizsgálata	80
3.4. Átlapolt sávok hőmérsékletövezetei	84
3.5. Összefoglalás, következtetések	87
4. Lézeres felületkezelés matematikai modellezésének megközelítései	88
4.1. Bevezetés	88
4.2. A véges differenciák módszerének alkalmazása lézeres hőkezelés esetén	88
4.3. A véges elemek módszerének alkalmazása lézeres felületátolvasztás esetén	91
4.3.1. Matematikai modellezés	93
4.3.2. Az olvadás matematikai modellezése	96
4.3.2.1. Stefan-probléma	96
4.3.2.2. Az entalpiaprobléma	98
4.3.3. Numerikus megoldás	100
4.3.3.1. A Stefan-probléma diszkretizálása	100
4.3.4. Alkalmos kezdeti feltétel keresése	106
4.3.5. Az entalpiaprobléma diszkretizálása	108
4.3.6. Kétdimenziós kiterjesztés	111
4.3.7. Eredmények és következtetések	113
4.4. Összefoglalás	115
5. A lézeres felületátolvasztás modellezése	116
5.1. Bevezető	116
5.2. Végeselem-analízis – VEA (FEA – Finit Element Analysis)	116
5.3. A SYSWELD+ programcsomag	119
5.3.1. A SYSWELD+ program megformázási módja	122
5.3.1.1. A fémek átalakulásának modellezése	122
5.3.1.2. Szemcseméret számítása	125
5.3.1.3. A hőmérséklet-eloszlás meghatározása	125
5.4. A modellezés szakaszai	127
5.4.1. A feladat meghatározása	127
5.4.2. A próbadarab geometriai modellezése	128
5.4.3. A hőátadás modellezése	128
5.4.4. A fémtani adatok modellezése	129

5.4.5. Számítási lépések	130
5.5. A lézeres felületolvasztás modellezésének eredményei	130
5.6. A lézeres felületolvasztás modellezésének következtetései	140
5.6.1. A kísérleti és a szimulációs adatok összehasonlítása	140
5.7. Mellékletek	142
6. Lézeresen kezelt felületi réteg vastagságának elemzése/modellezése	149
6.1. Bevezető	149
6.2. Kísérleti tapasztalatok, mérési eredmények, következtetések	149
6.2.1. Lézeres felületkezelés által létrejött felületi réteg vastagságának elemzése	149
6.2.2. A felületi réteg vastagságának mérési eredményei (C15-ös acél TaC-dal való lézeres felületötvöztetése esetén)	150
6.2.3. Az egyenlőtlen felületi réteg megelőzésének vizsgálata	152
6.3. Modellezés	153
6.4. Összegzés	155
Irodalom	156
Laser surface treatment and its modelling (Summary)	163
Contents	164
Laser-Oberflächenbehandlung und Modellieren (Zusammenfassung)	167
Inhalt	168
Tratamente de suprafață cu laser și modelarea proceselor (Rezumat)	171
Cuprins	172

1. Bevezető

A szerkezeti anyagok és az anyagtechnológiák fejlesztése a legutóbbi időkben is az eddigi elméleti és gyakorlati ismeretekre alapozva, de jobbra próbálkozással történt. A jövő anyagait és technológiáit azonban bizonyosan nem lehetséges ezzel a módszerrel kifejleszteni. A nem túl távoli jövő feladata olyan eljárások (szimulációs technikák) kidolgozása, amelyekkel képesek leszünk valamely anyag szerkezetét (ezáltal a kívánt tulajdonságát is) egy technológiai eljárás paramétereinek beállításával (pl. lézeres felületkezelésnél) meghatározni, anélkül hogy nagy volumenű és költséges kísérleteket végeznénk.

1.1. Előzmények

Az anyag szövetszerkezete és ezzel tulajdonságai is jelentősen megváltoztathatók különböző felületkezelési technológiákkal. Az egyik legkorszerűbb eljárás a lézeres felületkezelés.

Korszerű kutatásokat nem lehet végezni megfelelő infrastruktúra nélkül. Mégis az elmúlt években ezen a területen a közös pályázati lehetőségek, a magyarországi partnerek kutatáshoz szükséges berendezéseinek használhatósága, a tudományterületen nagy tapasztalattal, tudással rendelkező személyek (oktatók, kutatók) közreműködésével lehetővé vált az itthoni (romániai) kutatómunka előrehaladása.

A lézeres felületkezelés hatásának tanulmányozása – mely az elmúlt években tudományos kutatómunkámat képezte – előzménye az ebben a kötetben bemutatott kutatási eredményeknek, de az ezt megelőző időszakban végzett kísérletsorozatok és mérések eredményei szintén alapul szolgáltak a lézeres felületkezelés modellezéséhez.

A Miskolci Egyetem Mechanika Technológiai Tanszékével, Fémteni Tanszékével, az MTA Miskolci Anyagtudományi Intézetével, valamint a Budapesti Műszaki Főiskola Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézetével és a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány, Anyagtudományi és Technológiai Intézet munkaközösségével többévi együttműködési kapcsolat lehetővé tette, hogy e területen kutatásokat folytathassak.

A hazai műszaki berendezések hiánya miatt nálunk csak elméleti kutatások végezhetők e fontos területen, viszont a számítógépes modellezés, szimuláció alkalmazása lehetőséget biztosít itthon végzett kutatásokra, kísérleti eredmények előrejelzésére.

1.2. Célkitűzések

Fő célkitűzésem a lézeres felületkezelés számítógépes modellezéséhez és szimulációjához szükséges anyagtudományi és matematikai ismeretek rendszerezése, majd ezen ismeretanyag birtokában szimulációs programok elkészítése, értékelése.

A hőkezelési/felületkezelési eljárásokat napjainkban is széles körben alkalmazzák az ötvözetek fizikai, mechanikai és technológiai tulajdonságainak célszerű befolyásolására, tervszerű megváltoztatására. Erre irányultak jelen kötetben összefoglalt vizsgálódásaim is: olyan modelleket és perdikciós algoritmusokat elemezni, amelyek segítségével a termikus mezőben végbemenő anyagszerkezetmódosulások kielégítő pontossággal leírhatók. Konkrétabban a lézeres felületkezelés technológiai paramétereinek oly módon való megválasztásával foglalkozom, hogy a felületi rétegben várható tulajdonságokat a gyakorlati igényeket kielégítő pontossággal lehessen előre jelezni.

Ezáltal jelentős költséget és időt lehet megtakarítani a kísérleti próbálkozások és az ehhez szükséges mérések kiiktatásával.

1.3. A kutatás partnerei

Jelen kötet – a kutatási eredmények bemutatásával – nem jöhetett volna létre, ha önzetlen, segítőkész és kellő szakértelemmel rendelkező oktatókkal, kutatókkal nem konzultálhatok, nem működhetek együtt.

Tiszteletem és hálámat fejezem ki Roósz András akadémikusnak, mentoromnak, a Miskolci Egyetem professzorának, az MTA Miskolci Anyagtudományi Kutatóintézet igazgatójának, hogy bevezetett egy korszerű technológia rejtélyeibe; az általa vezetett kutatásokban is részt vehettem, tudást, kutatási módszert és tapasztalatot szerezhettem, a PhD-disszertációm kísérleti, mérési és kiértékelési részeit az ő irányítása alatt végezhettem, s együttműködésünk eredményei számos közös publikációban megtalálhatók. Ugyanakkor köszönöm Búza Gábornak, a BAYATI Intézet igazgatóhelyettesének, hogy lehetőséget biztosított a kísérletek szakszerű elvégzésére, illetve ezek anyagi támogatására.

Köszönetem fejezem ki a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék tanszékvezetőjének, dr. Tisza Miklós egyetemi tanárnak, aki a kutatási terveimet annak idején messzemenően támogatta, megvalósításához felajánlotta a tanszéken levő számítástechnikai infrastruktúra használhatását, illetve a hasonló jellegű tanszéki kutatásban való beilleszkedést is lehetővé tette. Szakmai tanácsadóként Kocsisné dr. Baán Mária egyetemi docens érdemel kitüntetett köszönetet, akinek a lézeres felülettechnológiákról írt oktatási segédlete az elvi alapok tekintetében jelentett hasznos kiindulási forrásanyagot. A modellezés területén a közös kutatásokat 1998-ban kezdtük, Reza Rowshan – jelenleg a ME Mechanikai Technológiai Tanszékének tanársegéde – diplomatervének és a saját PhD-disszertációmnak a

kontrollmérései és modellezési feladatai jól kiegészítették egymást. Együttműködésünk folyamatosságát számos közös publikáció jelzi.

S végül, de nem utolsósorban köszönetem fejezem ki dr. Réti Tamás egyetemi tanárnak (Budapesti Műszaki Főiskola, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet), aki a lézeres modellezés elméleti, matematikai alapjaihoz nyújtott értékes segítséget, valamint Kuzsella László tanszéki mérnöknek (Miskolci Egyetem) és Bagyinszki Gyula főiskolai tanárnak (Budapesti Műszaki Főiskola, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet), akik a szakirodalom gyűjtésében, fordításában, elemzésében és a szakmai tanácsadásban vállaltak szerepet. A velük való közös munkánkat is számos publikáció jelzi, s egyes eredményeit ezen kötet is tartalmazza. Úgyszintén köszönöm Szilágyi Júlia rendszermérnöknek, egykori munkatársamnak, hogy az ábrák megrajzolásában segédkezett.

2. Lézeres felülettechnológiák elméleti háttere

2.1. Bevezető

Mintegy 50 évvel ezelőtt a lézer felfedezése új távlatokat nyitott számos tudományágban. Az első évtizedben elsősorban laboratóriumi körülmények között kezdődött meg a lehetséges alkalmazások feltérképezése. A második évtized már hozott jó néhány vitathatatlan eredményt a mérés technikától egészen a távérzékelésig, míg a harmadik évtizedben a lézer az ipari eszközök rangjára emelkedett. Azóta alkalmazása egyértelműen nagy perspektívát jelent, a kiépült és a fejlesztés alatt álló technológiai háttér révén a tömeggyártásban való alkalmazás is gazdaságossá válik.

A lézer szó az angol **L**ASER (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – fényerősítés kényszerített fénykibocsátás útján) betűszóból származik. A szó egy eszközcsalád működési elvét jelenti, de használják magára a berendezésre is megnevezésként.

Sokfajta lézer létezik. Ezek egymástól a fizikai méret, a teljesítmény, a sugárzás hullámhossza, az előállítási költségek tekintetében lényegesen különböznek egymástól [Bor, 2003].

A lézeres megmunkáló rendszerek megjelenésükkel az iparban teljesen új alkalmazási teret nyitottak. Jelenleg a lézertechnika alkalmazása a gazdasági és privát élet valamennyi területét lefedi. A távközlésben lézervezérelt üvegszálak technológiát alkalmaznak az adatok leolvasásánál, a lapolvasók (szkennerek) felépítésénél, a CD-lejátszóknál, a távvezérléseknél stb. Mindezen alkalmazásoknál a lézer alacsony teljesítményt igényel az anyagmegmunkáláshoz használt lézerekkel szemben.

A **2.1. ábra** a lézeralkalmazásokat vázolja, különböző területeken (mérés technika, gyártástechnológia, közlekedés, képzés és szórakozás, kereskedelem és ipar, gyógyászat, kommunikáció, valamint energetika és környezetvédelem) való felhasználásuk szerint nyolc csoportba rendezve. Ugyanakkor az ábrán fel vannak tüntetve a különböző alkalmazásoknál használt lézertípusok is (CO₂, YAG, EXCIMER, Ar-ion, HeNe, Dióda).



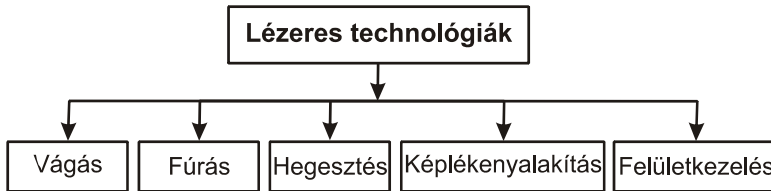
2.1. ábra
Lézeralkalmazások [Sexton, 2002]

2.2. Lézertechnológiák az anyagmegmunkálásban

A lézerek alkalmazásának lehetőségei nemcsak a napi életvitelben, hanem az anyagmegmunkálásokban is igen széles körűek. A fő megmunkálási módok szinte mindegyike megoldható lézeres technológia alkalmazásával. A költségek nagysága ellenére sok esetben az teszi gazdaságossá, hogy az adott gyártási folyamat más technológiával nem, illetve nem olyan pontossággal valósítható meg, vagy nem érdemes olyan kis darabszámnál azt alkalmazni. A 2.2. ábrán láthatóak a lé-

2. Lézeres felülettechnológiák elméleti háttére

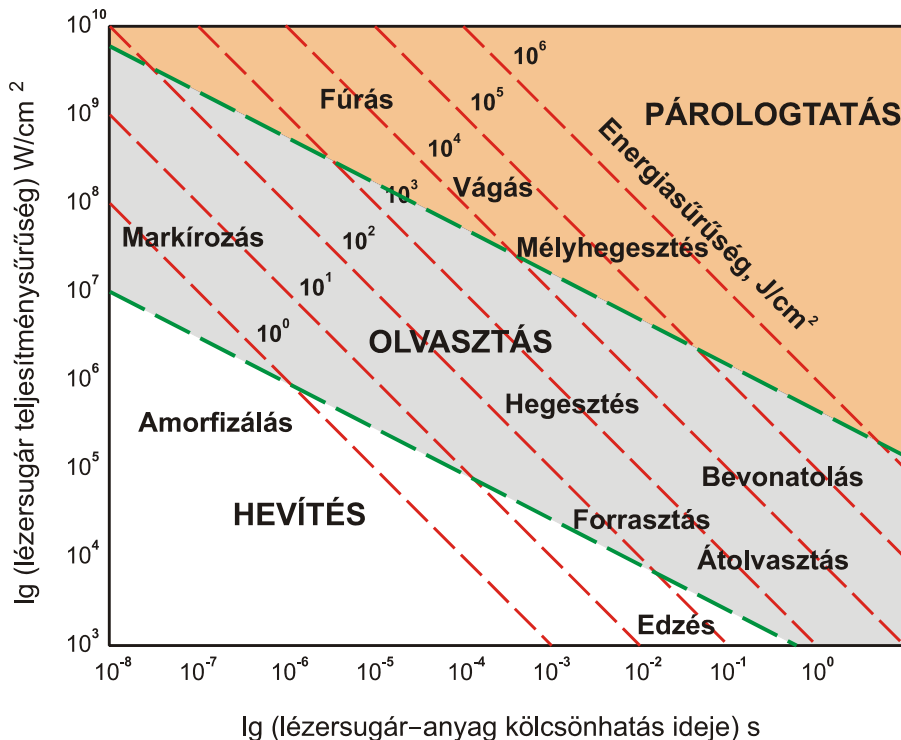
zeres anyagtechnológiák legfontosabb felhasználási területei, közöttük legelterjedtebbnek a vágás, a hegesztés és a felületkezelés tekinthető, melyek igen nagy energiasűrűséget igényelnek.



2.2. ábra

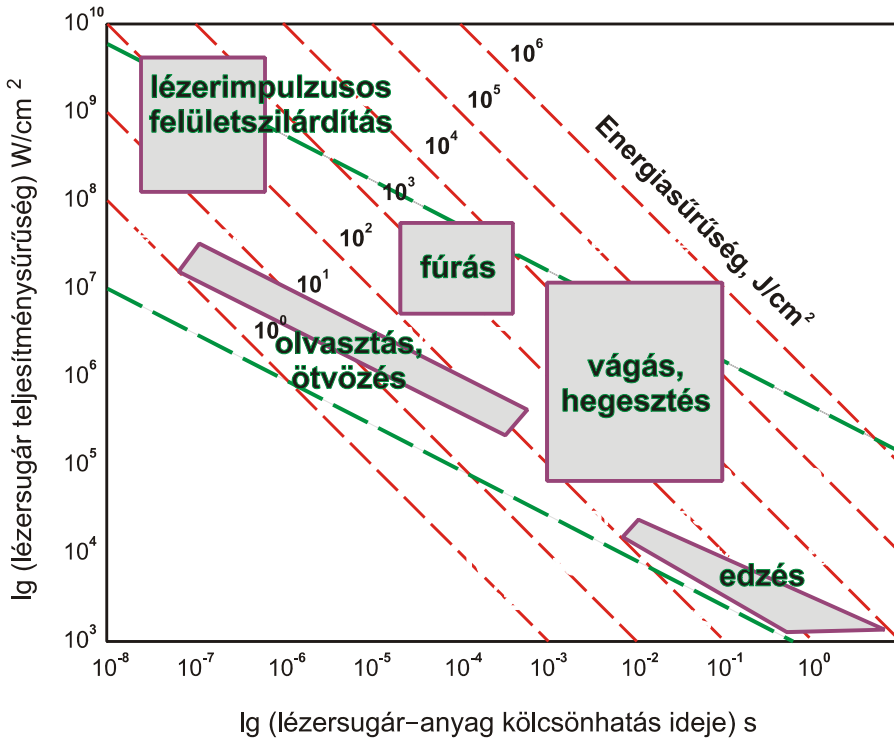
Fontosabb lézeres anyagmegmunkálási technológiák

A **2.3.a–b. ábrán** láthatóak a hatásidőtartam és a teljesítménysűrűség függvényében a főbb alkalmazások, feltüntetve a jellegzetes energiasűrűség-tartományokat is.



2.3.a. ábra

A lézeres anyagtechnológiák alkalmazásának paramétertartományai
[Steen, 1998; Grum, 2002; Búza, 2006]



2.3.b. ábra

A lézeres anyagtechnológiák alkalmazásának paramétertartományai
[Krause, 1992; Parsons, 1985; Grum, 2002]

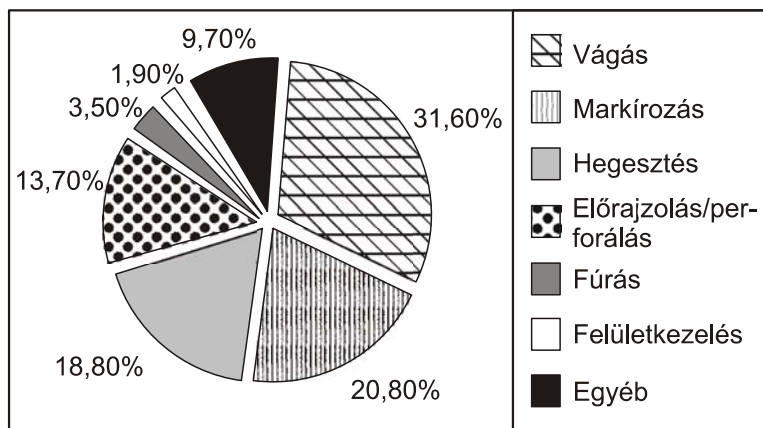
A lézerek ipari alkalmazásán belül az egyes technológiai eljárások részarányát a **2.4. ábra** szemlélteti.

Az egyes technológiai eljárások alkalmazhatósága a kezelendő anyag típusától, összetételétől is függ.

A lézertechnológiák a berendezések nagy beruházási költségei ellenére is számos gazdaságossági és műszaki előnyt nyújtanak [Baán, 1996]:

- jelentősen nő a termelékenység;
- csökken az anyag- és a feldolgozási veszteség, minimális a hulladék;
- bonyolult geometria, nehezen hozzáférhető felületek esetén is alkalmazhatók;
- utólagos megmunkálást nem igényelnek;
- automatizált gyártósorba integrálhatók;
- megbízható online minőségellenőrzés;
- rugalmasan kihasználható perifériák.

A berendezések jobb kihasználását teszi lehetővé, hogy az optikai eszközökkel irányítható lézersugárforrás egyidejűleg több munkaállomást is képes kiszolgálni.



2.4. ábra

A különböző lézertechnológiák ipari alkalmazásainak részaránya a világon
[Belforte–Levitt, 1994]

Az ipari megmunkáló rendszerek terjedését és a különböző típusok szerinti megoszlását jól szemlélteti a **2.1. táblázat**.

2000-ben több mint 25 000 lézeres anyagmegmunkáló berendezést adtak el a világon, ami az összes nem lézerdióda eladások 19%-a. Az árat tekintve 1,3 milliárd dollárnál is többet költöttek ezekre, ami a piaci részesedés kb. 60%-a.

2.1. táblázat. Ipari lézereladások 2000-ben

	Ipari megmunkáló lézerrendszerek	m \$	db	1 db ára \$
1.	CO ₂ -lézer (átáramoltatásos)	453	3 625	124 966
2.	Lámpa gerjesztésű szilárdtest lézer	354	5 368	65 946
3.	Excimer lézer	353	1 030	342 718
4.	CO ₂ -lézer (zárt rendszerű)	76	7 895	9 626
5.	LD gerjesztésű szilárdtest lézer	60	2 079	28 860
6.	He-Cd-lézer	10	1 700	5 882

[Laser Focus World, 2001]

Az eladott darabszámot összegezve 11 500 db CO₂-lézer, 7400 db szilárdtest-lézer kelt el anyagmegmunkálás céljára, viszont az árat tekintve előkelő helyen áll az excimer lézer.

2.3. Felületmódosító technológiák szerepe

A műszaki felülettudomány – surface engineering – az elmúlt két évtizedben rendkívül dinamikus fejlődésen ment keresztül s vált új, interdiszciplináris tudományterületté [Baán, 1996].

A felületek ki- és átalakításai és ezáltal tulajdonságváltozásai rendkívül fontos szerepet töltenek be a gyakorlatban.

Ha egy alkatrész felületén csak ott hozzuk létre az elvárt tulajdonságokat, ahol éppen szükséges, jelentősen csökkenthetjük a költségeket, főleg ha ebben az esetben az alkatrészhez olcsóbb alapanyag is használható.

Ezért vált a felületkezelő technológia egyre fontosabb tudományterületté, s ezáltal az optimális technológiák kidolgozására irányuló kutatások is kiszélesedtek, ezek jelentős részét a végbemenő folyamatok modellezései és szimulációi teszik ki.

Az anyagi rendszerek felületük közvetítésével állnak kapcsolatban környezetükkel. Az anyagok funkcionális és szerkezeti tulajdonságait, az alkatrészek, gépek, berendezések élettartamát nagymértékben felületi jellemzőik határozzák meg.

A legtöbb károsodási folyamat, ami egy gyártmány vagy alkatrész meghibásodásához vezet, a felületen jelentkezik, ilyenek például a kopás, a korrózió vagy a kifáradás (nagy ciklusszámú Wöhler-féle fáradás). A felületeknek összetett és speciális tulajdonságokkal kell rendelkezniük, mint a kis súrlódási tényező, a korrózió- és kopásállóság vagy az esztétikus külső.

Bizonyos esetekben nem lenne elegendő pusztán az anyag felületét bevonni annak érdekében, hogy terhelhetőségét, élettartamát meg tudjuk növelni, hanem megfelelő rétegvastagságban kell tulajdonságait – pl. szilárdságát – módosítani. A tulajdonságok javítását az anyagszerkezet mechanikai hatására vagy hő hatására bekövetkező módosításával érjük el, más esetekben a kémiai összetétel megváltoztatása is szükséges [Lyndon, 1990].

A szerkezeti anyagok felületállapota tehát nagy fontossággal bír, hiszen a felület mechanikai terhelésen túl különféle környezeti hatásoknak is ki van téve. A fémmegmunkáló szerszámoknál alapvető igény a felület nagy kopásállósága, a turbinalapátok felületének például egyidejűleg kell hő-, korrózió- és erózióállónak lennie, a csapágyanyagok pedig alacsony súrlódási együtthatójú és önkenő felületet igényelnek.

Mind az új anyagok kidolgozásánál, mind a hagyományos anyagok tulajdonságainak adott célú optimalizálásánál a fizikai, kémiai, mechanikai és technológiai tulajdonságok együttes ismeretére van szükség. Mindezekhez elengedhetetlen az anyagok felületének részletes, gyakran atomi szintű megismerése. Így fejlődött ki a felület tudatos módosítására hivatott ipari gyakorlat és az azt megalapozó, a felület megismerésére, illetve átalakítására szakosodó, a fizikától, a kémiától és az anyagtudománytól is egyre jobban elkülönülő, de az előbbieket integráló műszaki felülettudomány, közismert angol nevén a surface engineering [Bertóti, 1997].

A felületkezelési eljárásokat a **2.5. ábra** szemlélteti [Bagyinszki, 2004; Bagyinszki–Bitay, 2006].

FELÜLETKEZELÉSEK (A)		
Anyagszerkezet-változtatással, de kémiai összetétel megváltoztatása nélkül	Felületszilárdítás	Felületszórás Felületgörgőzés Felületkalapálás Felülethengerlés Felületvasalás Robbantásos felületszilárdítás Lézerimpulzusos felületszilárdítás
	Felületedzés	Bemártó edzés Láingedzés Indukciós edzés Plazmás edzés Elektronsugaras edzés Lézeres edzés
	Felületi átolvasztás	Lézerrel Elektronsugárral Plazmával

2.5.a. ábra

A felületkezelési eljárások felosztása (anyagszerkezet-változtatással)

FELÜLETKEZELÉSEK (B)			
Kémiai összetételének és szerkezetének változtatásával	A kezelendő felület olvadása nélkül	Védőbevonatolás	Felragasztás
			Festés
			Zománcozás
			Kémiai fémleválasztás
			Galvanizálás
		Termikus szórás	Lángszórás
			Ívcszórás
			Plazmaszórás
			Lézerszórás
			Robbantásos szórás
		Plattírozás	Húzásos plattírozás
			Folytatásos plattírozás
			Hengerléses plattírozás
			Robbantásos plattírozás
			Dörzsplattírozás
		Fizikai gőzfázisú bevonás	Vákuumgőzölés
			Katódporlasztás
			Ionsugaras bevonatolás
			Ionsugaras leválasztás
		Kémiai gőzfázisú bevonás	Hagyományos CVD
			Plazma CVD
			Porlasztásos bevonás
			Reaktív gőzölgötetés

Kémiai összetételének és szerkezetének változtatása- val	A kezelendő felület olvadása nélkül	Passziválás	Ionimplantáció Kémiai oxidálás Anódos oxidálás Vegyültréteg kialakítása Fémszínezés
		Termokémiai kezelés (Ötvöződúsítás)	Szilárd közegben Sóolvadékban Gázközegben
		Felületi ráolvasztás	Bemártással Kemencében Lánggal Plazmával Elektronsugárral Lézerrel
	A kezelendő felület olvadásával	Felületötvözés	Lézerrel Elektronsugárral Plazmával
		Felrakó hegesztés	Volfrámelektrodás semleges védőgázos ívhegesztéssel Fogyóelektrodás semleges vagy aktív védőgázos ívhegesztéssel Salakhegesztéssel Szikrahegesztéssel Gázhegesztéssel

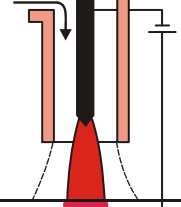
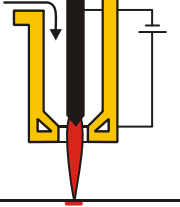
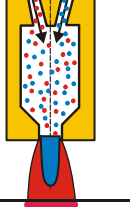
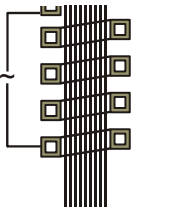
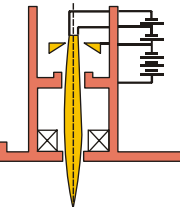
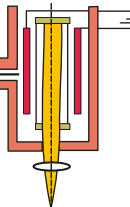
2.5.b. ábra

A felületkezelési eljárások felosztása (kémiai összetétel változtatással)

A **2.6. ábra** jellegzetes technológiai hőforrásokat mutat be, melyeket a felületkezeléseken kívül vágásnál és/vagy hegesztésnél is alkalmaznak.

2.4. Célorientált felületmódosítás

A célorientált felületmódosítási eljárások olyan tulajdonságok kialakítására irányulnak, melyekkel a tömbanyagok eredetileg nem rendelkeznek. A felület módosításakor vagy felületi bevonat létrehozásakor igen kis hozzáadott anyagmennyiséggel és/vagy anyagszerkezet-módosítással merőben új tulajdonságok hozhatók létre, melyekkel az anyagok, alkatrészek, eszközök hasznos élettartama növelhető, bizonyos esetekben megsokszorozható. Ezért tekintik a felületmódosító eljárásokat anyagtakarékos és gazdaságos tevékenységnek. Különleges tulajdonságokat eredményez az a lehetőség, hogy tömbi állapotban nem létező, nem egyensúlyi összetételű és szerkezetű (pl. amorf) felületi rétegek is létrehozhatók.

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

2.6. ábra

Technológiai hőforrások elve [Bagyinszki–Bitay, 2005]

Gyakorlatilag nincs akadálya egymással nem elegyedő alkotók összeépítésének sem. Az anyagi rendszerek tekintetében is igen széles a skála, melyben első sorban a fémek, fénoxidok, -nitridek és -karbidok, továbbá polimerek és kombinációik említhetők.

A szerkezeti anyagok, alkatrészek felületmódosítása döntően a mechanikai tulajdonságok javítását és ezáltal a hasznos élettartam növelését célozza. Általában a keménység, illetve a szilárdság, a kopásállóság (terhelést hordozó mozgó alkatrészeknél), az adhézió (kompozitok fázishatárain, bevonatok és a szubsztrát határfelületén), a kifáradással szembeni ellenállás fokozása, javítása az elérendő cél.

A felületmódosítás a funkcionális anyagok esetében olyan új fizikai vagy kémiai tulajdonságok kialakítására irányul, mely az anyagokat vagy a belőlük készített kompozitokat (társított anyagokat) valamilyen, nemcsak mechanikai, hanem más fizikai (termikus, elektromos, mágneses, optikai, akusztikai) jellemzőjükkel összefüggő funkciók ellátására teszik alkalmassá.

Ilyenek lehetnek a következők:

- korrózióállóság (fémek, nemfémes anyagok);
- különleges elektromos tulajdonságok (félvezető eszközök);

- optikai tulajdonságok (szűrők, antireflexiós bevonatok);
- dekoratív tulajdonságok.

2.5. Hagyományos felületkezelési eljárások

A hagyományos felületkezelési eljárásokat Bertóti Imre és Szombatfalvy Árpád írásai alapján mutatjuk be röviden [Bertóti, 2003; Szombatfalvy, 1985].

2.5.1. Felületi edzések

Felületi edzés során az edzhető acél felületi rétegét igen intenzív, gyors melegítéssel ausztenitesítjük, majd gyorsan hűtjük, rendszerint kihasználva a kezelt darab saját hőelvonó képességét. A gyors hűtés hatására az ausztenitesített felületi réteg edződik, kemény martenzites szövetű lesz, míg a fel nem melegedett mag a felületi edzést megelőző hőkezeléssel (nemesítéssel) beállított szövetszerkezetnek megfelelően szívós marad. A hevítés hőforrásától függően lángedzés, indukciós (nagyfrekvenciás) edzés, lézeres és elektronsugaras edzés különböztethető meg. Mind-egyik felületi edzésmód, de különösen az indukciós és a lézeres edzés nagyon termelékeny.

Az **indukciós felületi edzés** célja gépelemek vagy szerszámok felületi keménységének és ezáltal kopásállóságának, továbbá kifáradási határának növelése. Az acél felületi rétegének igen nagy sebességű felhevítése jellemzi az eljárást. A hevítés hatásos módja, hogy a bevezetett energia magában a munkadarabban alakul át hővé. A keresztmetszet mentén egyenlőtlen felhevítés nagyfrekvenciás árammal érhető el. Az áram frekvenciájának növekedésével a kéreg áramsűrűsége egyre inkább meghaladja a mag áramsűrűségét (skinhatás – az áram behatolási mélysége függ a frekvenciától). A felületi edzéshez használatos áram frekvenciája 0,01–5 MHz, amivel elérhető, hogy a felhevített kéreg vastagsága akár 1 mm alatti is lehet. A felületi edzéskor tehát nem közvetlenül a darabba vezetik be az elektromos áramot, hanem induktorral nagyfrekvenciás váltakozó mágneses mezőt hoznak létre, az ebben elhelyezett, elektromosan vezető anyagú munkadarabban örvényáram indukálódik, amely az elektromos ellenállásán hővé alakul.

2.5.2. Termokémiai felületkezelések

A felületi kéreg vegyi összetételének célszerű változtatásával a munkadarab valamely igénybevétellel szembeni ellenállása javítható. A felületötvöző hőkezelés során a munkadarabot olyan szilárd, folyékony vagy gáznemű közegbe helyezik, amely nagy koncentrációban tartalmazza az ötvözőelemet. A közeg és a munkadarab felülete közötti nagy ötvözőtartalom-különbség hatására a felületen adszorbeálódott ötvözőelem bediffundál a kéregbe. A diffúzió feltételei javulnak a hőmérséklet növelésével, de ennek határt szab egyrészt a felület oxidációja, másrészt a

mag hőkezeléssel elért kedvező tulajdonságainak romlása, szemcseméretének eldurvulása.

A felületi réteg szilárdságának növelését célozza a karbon diffúziójával végzett cementálás, a nitrogénötvöztést eredményező nitridálás, valamint a bört a felületi rétegbe juttató boridálás.

A legszélesebb körben alkalmazott felületötvöző hőkezelés a **cementálás**, amelynek során a kis karbontartalmú, ausztenites állapotúra hevített acél kérgébe karbon diffundál. A szilárd, folyékony vagy gáznemű cementáló közegből a karbon az acél felületén adszorbeálódik, ha a réteg karbonoldó képessége nagyobb, mint a tényleges karbontartalma. A karbonban feldúsult, vékony felületi rétegből a karbon a koncentrációkülönbség hatására egyre mélyebbre is diffundál. Ezt követően a cementált darabot megedzik. A cementálást és az ezt követő edzést együttesen alkalmazó hőkezelés a betétedzés.

Az A_1 hőmérséklet alatt (ferrites állapotban) végzett **nitridálás**kor a már nemesített állapotú acél vékony felületi rétegébe nitrogén, karbonitridálásakor ezzel egyidejűleg karbon is diffundál. A nitrogén a vassal és/vagy az acél egyes ötvözőivel nitridvegyületeket alkot. A nitrideket, karbidokat és karbonitrideket tartalmazó kéreg kemény, az acél ötvözőinek függvényében HV 250–1200 keménységű. A nagy keménységnek köszönhetően a felület kopásálló, kifáradással szembeni ellenállása jó, sőt a nitridált kéreg a korrózióval szemben is ellenállóbb. A nitridált kéregnek nemcsak a fehér rétege, de a vegyületfázisa alatt a diffúziós zóna is fokozza a terhelhetőséget.

Az A_3 hőmérséklet felett (ausztenites állapotban) végzett **boridálás** során bört leadó szilárd, folyékony vagy gáznemű közegből a bór az acél kérgébe diffundál. A boridálás hőmérsékletét alulról a bórleadó közeg bomlási hőmérséklete, felülről az acél szemcsedurvulási hőmérséklete korlátozza. A folyadék közeget, bóraxfürdőt alkalmazó boridálásakor gyakran elektrolízissel is gyorsítják a bór diffúzióját. A boridált felület is vegyültretegből és diffúziós zónából áll.

A fentiekben ismertetett felületkezelési eljárásoknak vannak korszerűsített – plazmás, vákuumos – eljárásváltozatai is.

2.6. Korszerű felületkezelési eljárások

A korszerű felületkezelési eljárásokat Bertóti Imre kötetében [Bertóti, 2003] szakszerűen rendszerezte, ezen leírás rövid változatát a következőkben mutatjuk be.

2.6.1. Rétegleválasztás

2.6.1.1. Fizikai gőzfázisú leválasztás (PVD)

A **fizikai gőzfázisú leválasztás** (PVD, Physical Vapor Deposition) során a szilárd forrásanyagot párologtatással vagy porlasztással alkotóira bontva gőztérbe viszik, és leválasztják a bevonni kívánt munkadarabra (szubsztrátra).

A PVD-módszerek közül a vákuumpárolgatás (vákuumgőzölés) a legelterjedtebb rétegnövesztési módszer. A forrásanyagot vákuumtérben olyan hőmérsékletre melegítik, melyen annak gőznyomása eléri a kb. 10^{-2} mbar-t. A forrás kívánt hőmérsékletét ellenállásfűtéssel vagy elektronsugaras fűtéssel állítják be. Az előbbi esetben W (Mo, Ta) szárlól, az utóbbiban alkalmasan választott anyagú tégelyből párologtatnak. A vákuumtérben keletkezett, nagy szabad úthosszal rendelkező részecskék (atomok vagy klaszterek) a szubsztrát (hordozó) felületére csapódnak, és ott kondenzálódnak. A módszer egykomponensű rendszerek, pl. fémrétegek növesztésére alkalmazható előnyösen. Többalkotós bevonóanyagok, pl. oxidok, halogenidek, vegyületek felvezetők rétegeinek előállítására, a rétegösszetétel reprodukálására kevésbé alkalmas.

Új lézersugaras energiaközlés, az ún. **lézerablációs párologtatás** (laser ablation PVD, LAPVD), amelyenél a forrást nagy energiasűrűségű lézerimpulzussal pillanatszerűen elpárologtatják, és az gyakorlatilag változatlan összetétellel megy át a rétegbe. Így kedvezően növeszthetők pl. sokalkotós, nagy hőmérsékletű szupravezető rétegek stb.

A vákuumpárolgatott rétegek szerkezetüket tekintve döntően polikristályosak. Igen tiszta körülmények és fűtött hordozó esetén azonban egykristályos, a hordozóval azonos orientációjú, ún. epitaxiás rétegek is növeszthetők. A **molekulasugaras epitaxiás rétegnövesztés** (MBE) a vákuumpárolgatás viszonylag új, pontosan szabályozott, számítógéppel vezérelt módszere, amellyel reprodukálható módon növeszthetők atomsoronként változó összetételű rétegek. Mindehhez elengedhetetlen a „környezet” tisztasága, ezért a növesztő berendezés ún. háttérnyomását 10^{-10} mbar körüli értékre kell csökkenteni. Ez különleges szerkezeti anyagokból felépített, turbomolekuláris, titánion- vagy krioszivattyúkkal ellátott, hűtött falú rendszerekben érhető el.

Porlasztásos módszerek közös jellemzője az, hogy a szilárd halmazállapotú forrásanyagot (target) általában inert gázionokkal, leggyakrabban Ar⁺ ionokkal bombázzák, amelyeket kisnyomású, ún. hideg-plazmából nyernek. A targetanyagok leporlasztott atomjai – a vákuumtérben át – a hordozó (szubsztrát) felületére jutva építik fel a réteget. Különböző nitridek, pl. TiN, Si₃N₄ rétegeinek előállítása céljából, Ar-N₂ gázelegy felhasználásával ún. reaktív porlasztást alkalmaznak. TiN-réteg növesztése esetén döntően az Ar⁺ végzi a Ti porlasztását, és a hordozó felületére jutó Ti reagál a plazmában ionizált, gerjesztett vagy atomos állapotú nitrogénnel.

Porlasztással leválasztottak pl. nagy törésmutatójú, kopásálló, a hordozón jól tapadó CeO₂, TiO₂ és ZrO₂ optikai bevonatokat is, magnetronos porlasztással pedig tömör, optikai multirétegeket.

Az **ionos bevonatolás** során valamilyen munkagázzal, pl. argonnal vagy nitridek növesztésekor nitrogénnel, DC-plazmát hoznak létre. A forrásanyag gőzét termikus vagy elektronsugaras párologtatással, ionporlasztással stb. ebbe a plazmatérbe juttatják, amelynek egy hányada ott szintén ionizálódik. A bevonásra szánt munkadarabot negatív potenciálra kapcsolva – a katódtér közelében létrejövő feszültségesés hatására – a pozitív ionok a felületbe csapódnak és abba behatolnak.

Az **ionsugárral aktivált leválasztás** (IBAD) során a szubsztrátumot a réteg növekedése közben ionokkal bombázzák. Ez a módszer abban különbözik az előbb ismertetett ionos bevonatolástól, hogy a rétegnövesztést segítő nagy energiájú ionok nem plazmából származnak, hanem egy (vagy több) szabályozott áramú ionforrásból. Ezáltal a réteget építő egyetlen atomra vagy molekulára jutó ionenergia pontosan beállítható.

2.6.1.2. Kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD)

A **kémiai gőzfázisú leválasztásos módszerek** (CVD, Chemical Vapor Deposition) alkalmazása során illékony, gőzfázisba, illetve gázfázisba vitt anyagokból valamilyen kémiai reakcióval választják le a hordozó felületére a rétegépítő anyagot.

A **termikus CVD** során a hordozót fűtik, a gázokat a gáztérben lejátszódó reakciók elkerülése céljából általában hidegen tartják. A fűtést gyakran RF (rádiófrekvenciás) hevítéssel oldják meg. Célszerű a leválasztást viszonylag nagy gázáramlási sebességgel végezni annak érdekében, hogy a diffúziós határréteg vékony legyen, és így gyorsan pótlódjon a felületen reakcióba vitt anyag. Ugyanakkor célszerű a lamináris gázáramlási tartományban maradni.

A **plazmával aktivált kémiai gőzfázisú leválasztási módszerek** során a reakciót kis nyomású (nem egyensúlyi) plazmával aktiválják.

A **lézersugárral aktivált vagy elősegített kémiai gőzfázisú leválasztás** (laser assisted CVD) során a rétegépítő (fém, kerámia, félvezető, szupravezető) anyag prekursorát lézersugárral bontják. A prekursorok általában illékony hidridek, halogenidek, karbonilok, alkilok, alkoholátok és más vegyületek, illetve gyakran ezek elegyei. A bomlási folyamat pirolitikus vagy fotolitikus lehet.

2.6.1.3. Felületszórás

A **termikus szórás** (thermal spray) nem gázfázisból történő leválasztási módszer. Az elnevezés egy módszercsaládot jelöl, amelynek tagjaira az jellemző, hogy az anyag (fém, kerámia, fém–kerámia, azaz ún. cermet anyagok, egyes polimerek) porszemcséit az olvadáspont közelébe vagy afölé hevítik, valamilyen módon felgyorsítják, és a megolvadt cseppeket vagy a majdnem megolvadt szemcséket a bevonandó felületre irányítják. Ütközéskor ezek foltokban elterülnek, átlapolódnak, és bevonatot alkotnak. A termikus szórás történhet láng-, ív-, plazma- vagy lézer hőforrás alkalmazásával.

A **lángszórás** fémes és nemfémes anyagok felületi réteggel való bevonására használható. A szórásra használt anyagot (mely lehet huzal, por) az acetilén-oxigén-láng megolvasztja, majd az sűrített levegővel vagy más gázzal az előkészített munkadarab felületére sodródik. A felszóró réteg állhat pl. horganyból, alumíniumból, rézből vagy krómnikkel acélból. Az acetilén-oxigén-láng nagy hőmérséklete lehetővé teszi azt is, hogy a nagy olvadáspontú anyagok (mint pl. a molibdén) is szórhatók legyenek. A lánggal szóró rétegek a technika valamennyi területén jól beváltak, pl. kopásvédő vagy korrózióvédő rétegekként gépelemek javításához.

2.6.2. Felületmódosítás

2.6.2.1. Ionsugaras módszerek

Az ionsugaras felületmódosítás jellegzetességei, hogy nagy a felületi rétegben deponált energiasűrűség, és lehetőség van nagy térbeli felbontású kezelésekre mind mélységben, mind oldalirányban. A kezeléseket nagy vákuumú berendezésben, célszerűen nagy ionáramú, elektronütközéses vagy plazmás ionforrással végzik, leggyakrabban nemesgáz (Ar⁺) ionokat alkalmazva.

Ionimplantáció esetén a gyorsított ionok kölcsönhatása szilárd anyagokkal nagyon összetett, több elemi lépésből álló folyamat. A kölcsönhatás során fellépő főbb primer folyamatok a következők: behatolás, ütközés, atomelmozdulás, hibahelyek (vakanciák) és gyökök képződése, részecske-visszaverődés, rezgési és elektrongerjesztések, ionok és szabad elektronok képződése stb. Az ezt követő ún. relaxációs szakaszban olyan folyamatok játszódnak le, mint pl. részecske-emisszió, atomkeverés, diffúzió, szegregáció, amorfizálódás, kristályosodás, fázisátalakulás és különféle kémiai reakciók.

2.6.2.2. Plazmás felületmódosítás

A plazmás felületmódosítás széles körben alkalmazott eljárás, amelynek során a plazmában keletkező pozitív és negatív ionok, gyökök, gerjesztett részecskék, elektronok, fotonok kerülnek a szilárdtestek felületével kölcsönhatásba.

2.6.2.3. Lézersugaras felületmódosítás

A **lézeres felületedzés** (laser surface hardening) során az anyag felületét lézerrel kezelik olyan módon, hogy az ne olvadjon meg, ugyanakkor a hőhatásra a vasötvözetek felületi rétegében ausztenites, majd edző hatású hűlés következtében martenzites szerkezet alakuljon ki. Ennek hatására megnő a felületi réteg kopásállósága, és csökken a kifáradási hajlama.

A **lézeres felületi átolvasztás** (laser remelting) során lézerrel megolvasztják az anyag felületi rétegét, amely ezt követően gyorsan lehűlve újra megszilárdul. Eközben az összetétel nem változik, viszont a felületi réteg szerkezete igen, pl. fém esetén amorf (üvegfém) vagy mikrokristályos felületi fázis képződhet, ami javíthatja a felületkopás- vagy korrózióállóságát, vagy csökkentheti a kifáradási hajlamát [Bitay, 2001].

A **lézeres felületi ötvöztés** (laser surface alloying) során a célszerűen megválasztott összetételű porral vagy vékonyréteggel fedett szubsztrátot kezelik. Ennek hatására megolvad a por (vagy vékonyréteg), valamint a szubsztrát felületi rétege is, ötvöztetréteg képződését eredményezve [Bitay, 1999; Bitay–Roósz, 1999]. A felületi ötvöztetréteg előnyös, a tömbi anyagtól eltérő fizikai, kémiai, illetve mechanikai tulajdonságokkal rendelkezhet.

A **lézeres felületi ráolvasztás** vagy felrakás (laser surface cladding) hasonlít a lézeres felületi ötvözésre. A különbség az, hogy a szubsztrát nem vagy csak kevésbé olvad meg, hogy ne hígítsa a kialakuló – termikusan a szórthoz képest tömörebb (pórusmentesebb) – bevonatot.

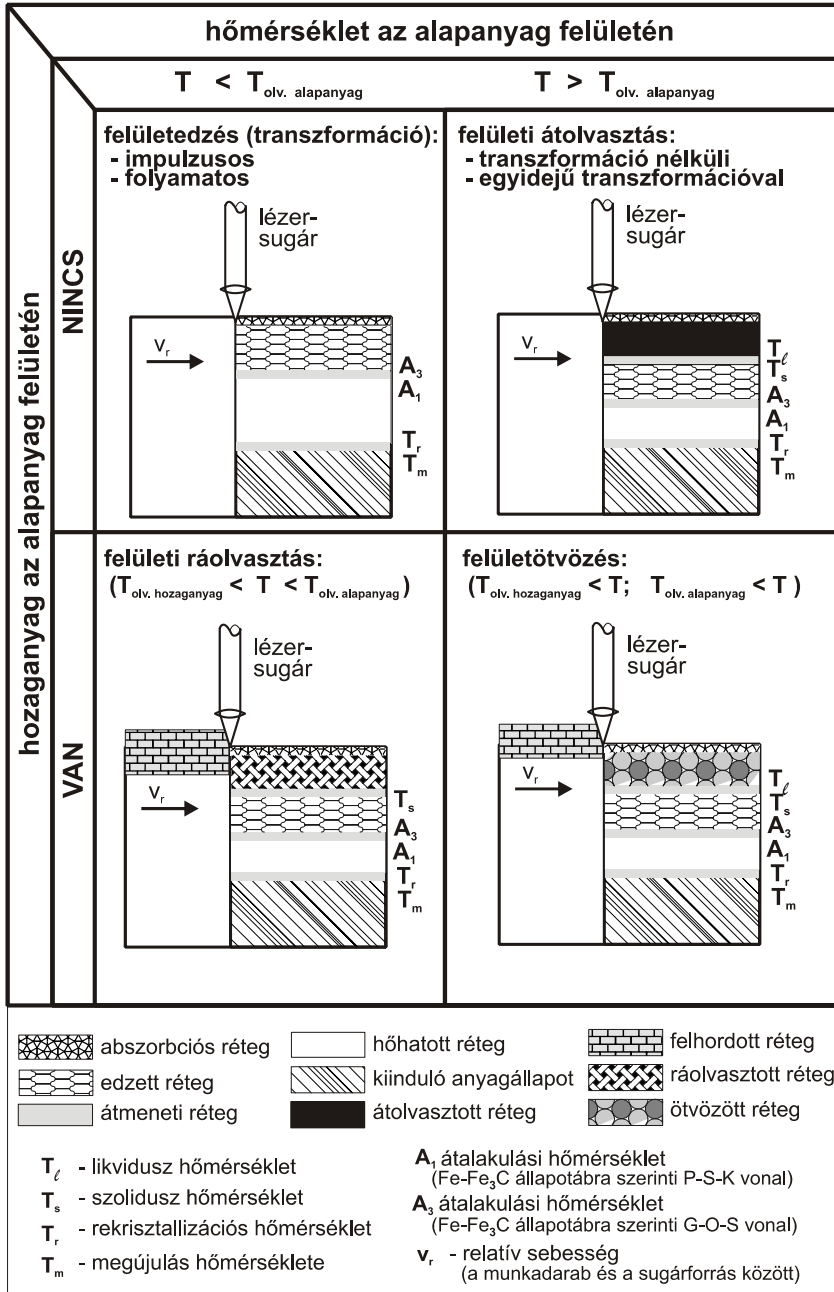
2.7. Nagy energiasűrűségű megmunkálások

A nagy energiasűrűségű megmunkálások (megmunkáló eljárások) családjába (s itt nem csak a lézeres technikát emelném ki) sok minden belefoglalható, így:

- a felületi rétegfelvitelt biztosító termikus (láng-, elektromos ív-, plazma-, lézer-, robbantásos) szórás;
- az alakadási (alakítási) célú, nagy sebességű szerszámos, nyomáshullámos (robbantásos, elektrohidraulikus, mágneses, ultrahangos) megmunkálás; a lézeres termikus hajlítás, egyengetés és forgácsolás, továbbá az integrált lézeres-mechanikus forgácsoló megmunkálás szerszámcseréléssel;
- funkcionális (nem csak geometriai) prototípusok gyors előállítására (rapid prototyping) hivatott lézerlitográfia, szelektív lézeres szinterelés és közvetlen lézeres gyártás;
- a felületi réteget átalakító
 - plazmás, elektronsugaras, lézeres szilárdságnövelő, edző, átolvasztó, ráolvasztó, ötvöző eljárások (beleértve a különféle célú megmunkáló hengerek felületérdesítését, illetve -texturálását is),
 - ionimplantáció,
 - indukciós és ellenállásos gyors hőkezelés;
- az anyagegyesítő vagy anyagszétválasztó (plazma-, elektronsugaras, lézeres) hegesztés, illetve vágás és a nagy sebességű vízsugaras vágás, hozzáértve:
 - az olcsó és gyors alakítószerszám-előállítási módszert, mely lézerrel lemezből kivágott szerszám-„szeletek” egymásra építését jelenti;
 - lézeres hegesztés és vágás, illetve képlékeny alakítás kombinált alkalmazásával végzett prototípusgyártást, sőt szériagyártást (pl. összehabott autókarosszéria-lemezrészecskék gyártása és megmunkálása);
- továbbá az üvegfémek (fémüvegek) előállítására alkalmas gyorsdermesztő módszerek.

2.7.1. Nagy energiasűrűségű felületkezelések hatása acélokra

A **2.7. ábra** a nagy energiasűrűségű felülettechnológiák acélra vonatkozó hatásait szemlélteti.



2.7. ábra
Lézeres felülettechnológiák és hatásuk (acélok esetében)

2.7.2. Nagy energiasűrűségű technológiák paraméter-összefüggései

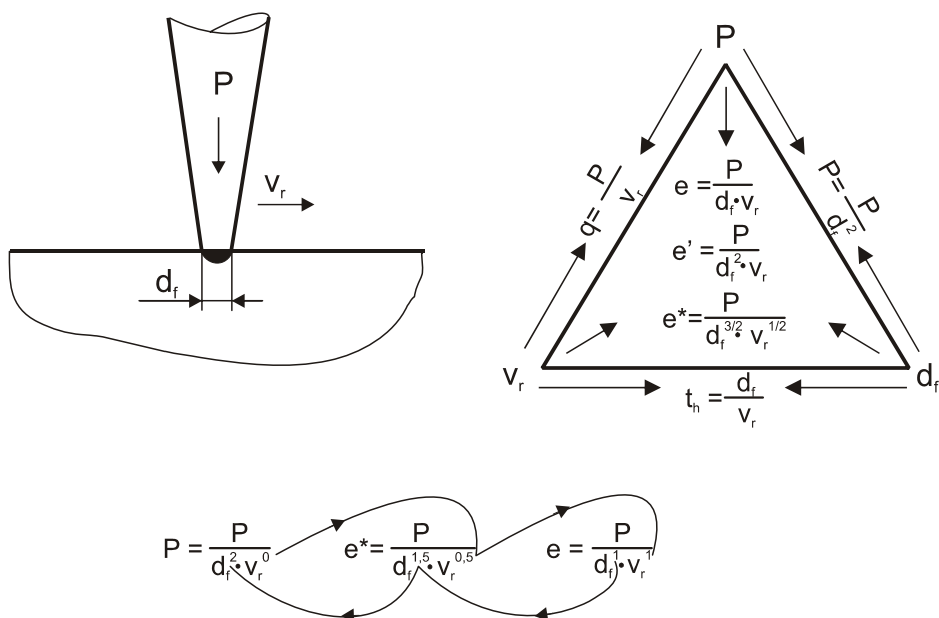
Nagy energiasűrűségről (nagy teljesítménysűrűségről) akkor beszélünk, ha a fajlagos teljesítmény- (energia-) bevitel meghaladja a $10^2 \text{ W/mm}^2 = 10^4 \text{ W/cm}^2 = 10^8 \text{ W/m}^2$ -es értéket. A **2.2. táblázat** összehasonlítja néhány ilyen hőforrással végzett hevítés jellegzetes adatait. Az említett határérték azonban nem különíti el jól és egyértelműen a hagyományos, illetve az általában nagy energiasűrűségűként emlegetett hőforrásokat, eljárásokat. Talán ez indokolhatta, hogy bevezették az ultra (vagy extrém) nagy energiasűrűség fogalmát is, mely már ténylegesen csak a plazmás, de főképp az elektronsugaras és a lézeres eljárásokat jellemezheti, ami számszerűsítve a $10^4 \text{ W/mm}^2 = 10^6 \text{ W/cm}^2 = 10^{10} \text{ W/m}^2$ -es érték – sugárfókuszolás útján történő – megvalósíthatóságát jelenti [Bagyinszki – Bitay, 2005].

2.2. táblázat. Hőforrások technológiai jellemzői [Bagyinszki – Bitay, 2005]

jellemzők hevítési módok		teljesítménysűrűség [W/mm ²]	hatásidőtartam [s]	jellemző felületkezelési rétegmélység [mm]	hőforrás hőmérséklet [°C]
a	ellenáll. imp. hev.	10^1 – 10^3	0,01–0,2	0,2–1,0	-
	indukciós hevítés	10^0 – $2 \cdot 10^2$	0,1–5,0	0,5–2,5	-
	munkadarabban ind. impulzus hev.	10^1 – $3 \cdot 10^2$	0,001–0,5	0,05–0,5	-
a	lánghevítés*	10^1 – $5 \cdot 10^2$	0,1–2,0	0,5–3,0	3 000–3 200
	elektr. ívhevítés**	$5 \cdot 10^0$ – $2 \cdot 10^2$	0,1–1,0	0,1–2,0	4 000–5 000
hőforrásban	plazmahevítés***	$5 \cdot 10^0$ – 10^3 ($5 \cdot 10^0$ – 10^6)	0,01–0,1	0,01–1,0 ⁺	10 000–20 000
hőfejlődés	elektronsug. hev.	10^1 – 10^7	0,001–0,1	0,01–0,5 ⁺	-
hőforrás–mdb.	lézeres hevítés	10^1 – 10^7	0,001–0,1	0,01–0,5 ⁺	-
kölcsönhatáskor	léz. impulzus hev.	10^2 – 10^8	0,001–0,1	0,01–0,5 ⁺	-

* C₂H₂+O₂ láng; **AWI ív; ***Ar-plazma

⁺ olvasztáskor ennél több is lehet



2.8. ábra

Nagy energiasűrűségű technológiák paraméterösszefüggései [Bagyinszki–Bitay, 2005]

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

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

A **2.8. ábrán** látható technológiai paraméter-háromszögből adódnak az elektronsugaras és a lézeres megmunkálások fő energetikai, illetve energiasűrűségi jellemzői:

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

$$p = \frac{P}{v_r} \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (2.1)$$

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

$$p = \frac{P}{Y \cdot d_f^2} = \frac{P}{Y \cdot d_f^2 \cdot v_r^0} \quad \left[\frac{W}{mm^2} \right] \quad (2.2)$$

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

$$t_h = \frac{d_f}{v_r} \quad [s] \quad (2.3)$$

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

$$e = p \cdot t_h = \frac{P}{Y \cdot d_f \cdot v_r} = \frac{P}{Y \cdot d_f^1 \cdot v_r^1} \quad \left[\frac{J}{mm^2} \right] \quad (2.4)$$

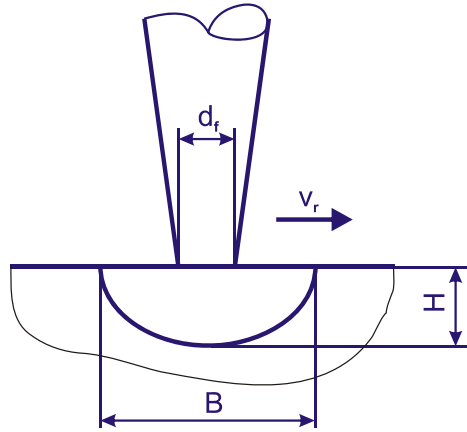
- a teljesítménysűrűség (p) és relatív sebesség (v_r) hányadosa vagy másképpen a teljesítmény (P) és a fókuszfoltméret négyzete (d_f^2) – relatív sebesség (v_r) szorzat hányadosa, ami térfogati energiasűrűségnek vagy fajlagos volumetrikus energiabevitelnek tekinthető a mértékegysége alapján:

$$e' = \frac{p}{v_r} = \frac{P}{Y \cdot d_f^2 \cdot v_r} = \frac{P}{Y \cdot d_f^2 \cdot v_r^1} \quad \left[\frac{J}{mm^3} \right] \quad (2.5)$$

Ez utóbbi kettő jobban kifejezi a technológia „hatását”, mivel mindhárom fő paramétert együttesen figyelembe veszi, sőt megadható az energiasűrűségnek egyfajta „súlyozott” értéke (**2.8. ábra** alsó része) is, amelyben a fókuszfoltméret (d_f) és a relatív sebesség (v_r) hatása kitevőiken keresztül korrigálva, súlyozva szerepel:

$$e^* = p \cdot \sqrt{t_h} \cdot Y = \frac{P}{d_f \cdot \sqrt{d_f \cdot v_r}} = \frac{P}{d_f^{3/2} \cdot v_r^{1/2}} = \frac{P}{d_f^{1,5} \cdot v_r^{0,5}} \quad \left[\frac{J}{mm^2 \sqrt{s}} \right] \quad (2.6)$$

[Bagyinszki–Bitay, 2005]



2.9. ábra
Lézeres felületi átolvasztásréteg geometriája

Egy melegalakító szerszámacél lézeres felületi átolvasztása kapcsán az olvadási rétegszélesség (B , lásd a **2.9. ábrát**) – felületi fókuszolt méret (d_f) arányszámának (B/d_f) fenti technológiai paraméterformuláktól való függését – az elvégzett lineáris regressziós analízisek eredményei szerint – vizsgálva a súlyozott energia-sűrűség adott legjobb ($R = 0,97776$) korrelációt. Ennek megfelelő számítási képletként az alábbi adódott:

$$\frac{B}{d_f} = 0,581 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot e^* \quad \Rightarrow \quad B = d_f (0,581 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot e^*) \quad (2.7)$$

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

$$H = 0,146 + 0,16 \cdot B \quad [mm] \quad (2.8)$$

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

$$A_{olv} \approx 0,72 \cdot H \cdot B \quad [mm^2] \quad (2.9)$$

Ennek és a relatív sebességnek az ismeretében számítható az időegység alatt átolvasztott anyagterfogat:

$$V_{olv} = A_{olv} \cdot v_r \approx 0,72 \cdot H \cdot B \cdot v_r \left[\frac{mm^3}{s} \right] \quad (2.10)$$

Ebből pedig – az L [J/mm^3] olvadáshő pontos értékének ismeretében – kalkulálható az átolvasztás teljesítményszükséglete:

$$P_{olv} = V_{olv} \cdot L \approx 0,72 \cdot H \cdot B \cdot v_r \cdot L \quad [W] \quad (2.11)$$

Adott anyagminőség és adott sugárteljesítmény esetén a kezelt anyagréteg alakját elsősorban a teljesítménysűrűség és azon belül is a teljesítményeloszlás szabja meg.

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

- a munkadarab anyagminősége (összetétele) és annak tulajdonságai, különös tekintettel a hőfizikai jellemzőkre (hővezetési tényező, fajhő, sűrűség, hőmérsékletvezetési tényező, olvadási hőmérséklet, olvadáshő);
- a munkadarab jellemző méretei és alakjaitól függő sajátosságai, illetve esetlegesen alkalmazandó előmelegítési hőmérséklete;
- a megmunkálás eredményével szemben támasztott követelmények: réteggeometria, rétegmélység és annak eloszlása;
- az alkalmazandó védőgáz összetétele, illetve áramlási sebessége;
- a lézerberendezés „gépállandói”: módusszerkezet (pl. TEM₀₀), működési hullámhossz (a gyakorlatban elterjedt CO₂-lézereknél a 10,6 μm az infravörös, Nd:YAG-, illetve Nd:üveg-lézereknél az 1,06 μm a közeli infravörös tartományba esik, s ez utóbbit a fémek jobban abszorbeálják), polarizáció (lineáris vagy cirkuláris).

A lézeres anyagmegmunkálás tehát sok, időnként változó paramétertől függ. Még ha az anyagminőségi jellemzők és munkadarabok méretei abszolút állandóak is – amit az ipari gyakorlatban nehéz biztosítani –, a folyamatparaméterek változása bekövetkezik a hosszabb megmunkálási időszakok alatt. Ennek következtében mindig állandó minőség csak korlátozott körülmények (feltételek) mellett szavatolható. Ennek okai lehetnek pl.:

- az optikai rendszerben mechanikailag és termikusan okozott változások,
- az optikai elemek szennyezettsége és előregedése,
- a működő (működtető) gázt továbbító csőfej kiégése vagy szennyezettsége,
- a rögzítőelemek kopása, eltérései,
- kedvezőtlen hatások az elektromos ellenőrző rendszerben stb.

Továbbá az intenzív lézertény és az anyag kölcsönhatása fizikai értelemben dinamikus folyamat, amelynek a sugárzás-visszaverődés következtében „feedback”

(visszatáplálás) történhet a lézerrezonátorba, melynek eredménye a lézerfényintenzitás-eloszlás ingadozása is lehet.

Az ipari gyakorlatban leggyakrabban a $10,6\ \mu\text{m}$ hullámhosszú CO_2 ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$) és a $1,06\ \mu\text{m}$ hullámhosszúságú Nd:YAG ($\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) lézereket használják, mivel az ezek által kibocsátott fény az infravörös tartományba esik, s ezt a megmunkálható anyagok többsége jól abszorbeálja.

2.8. Lézeres felületkezelések

2.8.1. Lézeres felületkezelések általános jellemzői

A felületkezelés lényege, hogy a munkadarab közel teljes tömegének tulajdonságait változtatlanul hagyva, a felületi jellemzőket – s azok rétegmélység szerinti változását – az igénybevétel szempontjából szükséges, legoptimálisabb tulajdonság-kombináció elérésével módosítsuk.

Célkitűzései általában a felület szilárdságának, teherviselő képességének fokozása, kedvezőbb súrlódási viszonyok kialakítása és a kopásállóság javítása, a maradó feszültségek optimalizálásával a kifáradással szembeni ellenállás fokozása, a korrózióállóság növelése.

A lézer alkalmazása teljes tömegű tulajdonságmódosító technológiaként nem lenne hatékony, ugyanakkor ideális lehetőséget kínál rendkívül változatos, nagy pontosságú és termelékenységgű, jól szabályozott felületkezelési eljárások megvalósítására [Baán, 1996].

A lézeral alkalmazások egyik fő területe a lézeres felületkezelés, mely a hagyományos hőkezelő üzem edzési technológiájához képest drága, de van olyan eset, amikor a lézeres hőkezelés az olcsóbb, illetve nincs is más megoldás. Ilyen helyzetet számolhatunk nagyon karcsú vagy nagyméretű alkatrészeken hőkezelése esetén. Ezekben az esetekben a hőkezelési vetemedés veszélye áll fenn, mert a bevitt hőmennyiség belső feszültséget eredményez a munkadarabban. A lézerrel csak azt a felületi részt kell felhevíteni, amelyiknek pl. az edzése szükséges, és nem az egész munkadarabot, mint a hagyományos technológiák esetén. A lézerrel csak annyi hőt kell bevinni, amennyi egy vékony felületi rétegben az anyag szerkezetének megváltoztatásához (fázisátalakulás, olvadás, ötvöztetés) szükséges a tulajdonságok megváltoztatása érdekében.

2.8.2. A lézernyaláb jellemzése

A lézersugárzást alkotó fotonok a kezelt felületről részben visszaverődnek, részben elnyelődnek, miközben energiájukat a megmunkálandó anyag atomjainak, illetve molekuláinak rezonancia-frekvenciájukon történő gerjesztéssel adják át. A fotonok behatolási mélysége igen csekély, így a jelentős mélyhatást a koncentrált energia hővezetés útján történő terjedése okozza. Természetesen a kezelés közvetlen helyétől távolodva a felhevült részek a külső környezet felé hőt adnak le. Ha a lézer-

sugár intenzitása elegendően nagy, és a mozgási sebesség nem túl gyors, akkor a lézersugár közepén a munkadarab bizonyos vastagságában fémgőz keletkezik, és gőzzel telített csatorna alakul ki. Ebben a gőzcsatornában a sugárteljesítmény jelentős része, akár a plazmaképződés miatt akár a Fresnel-mechanizmusnak megfelelően a csatorna falán kialakuló abszorpció miatt, és a többszörös visszaverődés folytán – amely a gőzcsatornát mint egy fekete testet működteti – elnyelődik.

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

Az indukált emissziós folyamattal keltett elektromágneses tér bizonyos megengedett konfigurációk (módusok) felvételére kényszerül, a peremfeltételeknek (cső-átmérő, tükröablak, rezonátorerősítés, lézeranyag-inhomogenitás, pumpálóteljesítmény) megfelelően. Mivel az ideálistól eltérően általában több átmenetből keletkezik a lézerfény – beleértve az egynél több axiális hullámból keletkező longitudinális, illetve a különböző keresztmetszeti intenzitáseloszlású transzverzális (TEM) módusokat –, így kisugározva bizonyos kitüntetett eloszlásokban lép ki, egyszerűbb vagy bonyolultabb alakzatokat felvéve. A módusszerkezet osztályozása a terjedési irányra merőleges síkban látható kimeneti eloszlásképen alapul. A Transzverzális Elektromágneses (TEM) módusszám jelölése (indexelése) e síkban lévő két merőleges tengelyen található zérushelyek számával történik, azaz a módusszámok eggyel kisebbek, mint a „fényes” zónák számai. A legegyszerűbb, jól fókuszolható, Gauss-energiaeloszlású TEM₀₀-módus, illetve -sugár instabil rezonátorral továbbformálható a még jobb fókuszolhatóság érdekében.

A lézernyaláb intenzitásprofilja

A transzverzális módus a kilépő nyaláb intenzitás-profilját írja le.

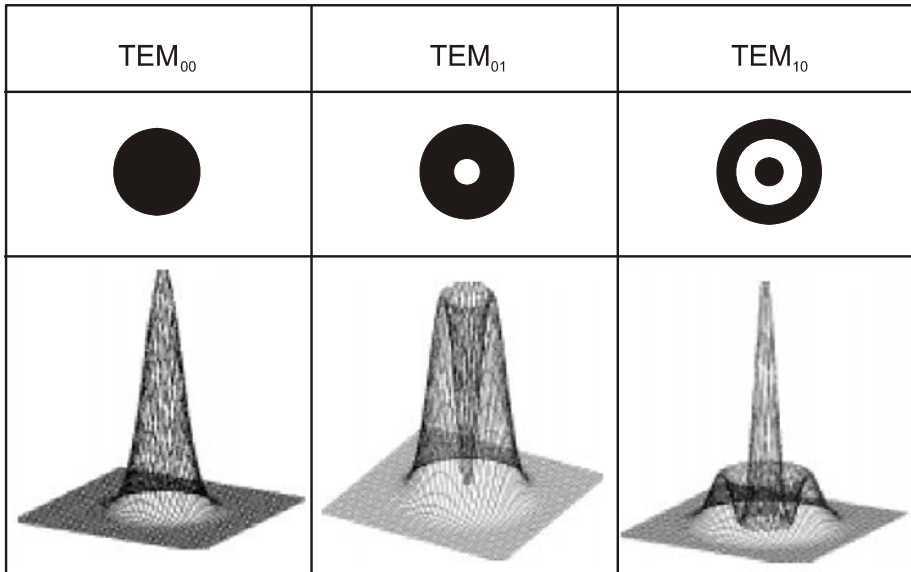
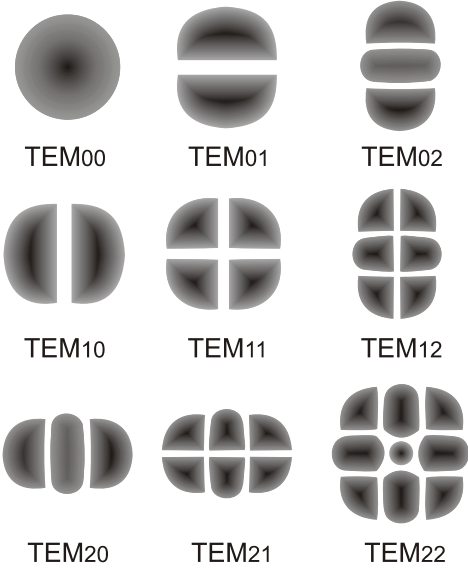
Az intenzitásprofil függ:

- a rezonátor hosszától,
- a felépítésétől,
- a sugárzott hullámhosszától,
- a tükör kiképzésétől.

Az ideális profil az un. TEM_{00} transzverzális módus.

Körszimmetrikus, Gauss-eloszlás-hoz hasonló alakú:

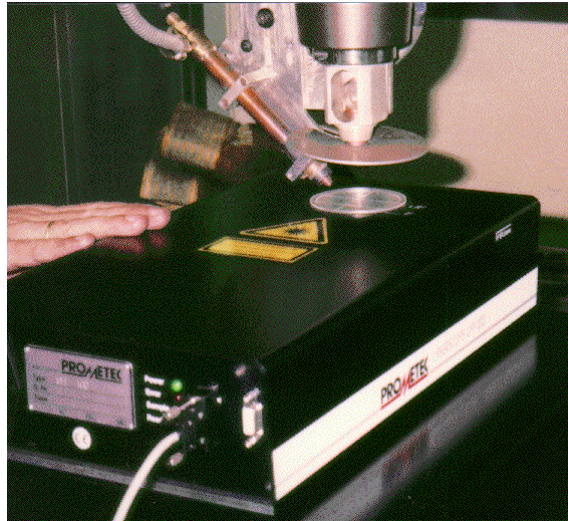
- Gauss-nyalábok,
- diffrakciókorlátos rendszerek.



2.10. ábra

A lézernyaláb intenzitásprofilja [Kovács, 2006; Schneider, 1998]

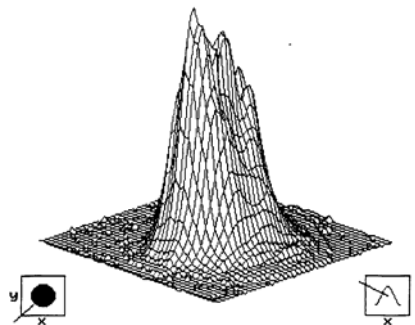
A minőségi lézeres megmunkáláshoz elengedhetetlen a megfelelő energia-eloszlású (módusú) lézersugár biztosítása, illetve ennek folyamatos ellenőrzése. Ezt egy akkreditált lézersugár-diagnosztikai laboratórium végzi LaserSCOP nevű berendezéssel (**2.11. ábra**), mely lényegében a lézernyaláb-intenzitás (eloszlásának) mérésére alkalmas.



2.11. ábra

LaserSCOP – lézerintenzitást mérő berendezés [Bitay-Doktori értekezés, 2002]

Így lemérhető adott paraméterek esetén (fűvófej típus, fókusztávolság stb.) a lézernyaláb energiaeloszlása (**2.12. ábra**).



2.12. ábra

Lézernyaláb-intenzitás-eloszlás [Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A lézersugár mint monokromatikus (egyszínű) elektromágneses energianyaláb igen jól és pusztán optikai eszközökkel terelhető tetszőleges megmunkálási helyre. A jó fókuszolhatóság, illetve a nagy teljesítménysűrűség érdekében ugyan nincs szükség vákuumra, de bizonyos anyagok, ötvözetek nagy megmunkálási tisztaságot igényelnek, ezért az atmoszférikus (védőgáz) mellett részleges vákuumú vagy nagyvákuumú eljárásváltozatokat is alkalmaznak. Az anyagmegmunkálási alkalmazások mellett jelentős hányadot képviselnek az egyéb területek is (gyógyászat, nyomtatás-másolás, szórakoztatóipar, méréstechnika stb.). A lézeres kezelés viszonylag kis hatásfoka ellenére az egyik legflexibilisebb eljárás.

2.8.3. A kezelendő felület jellemzése

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

2.8.4. A lézeres felületkezelések osztályozása

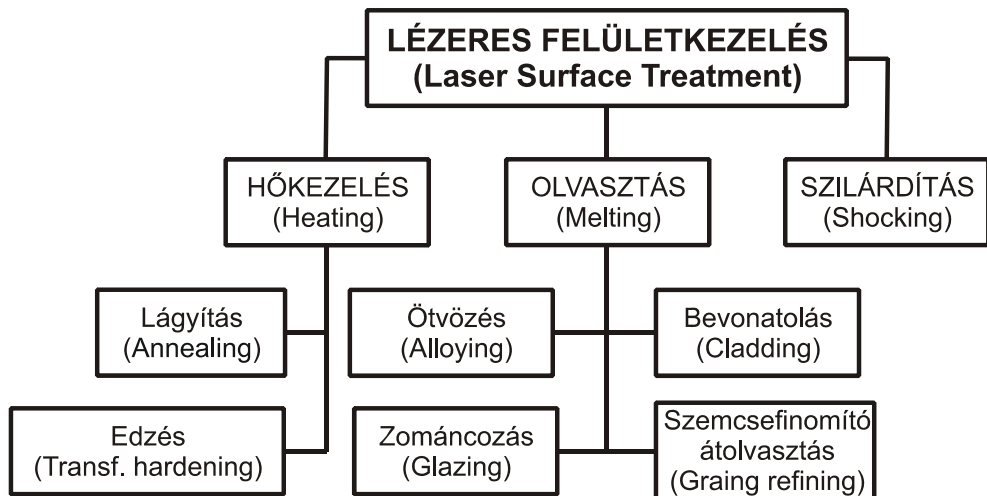
A lézeres felületkezelés első osztályozása Gnanamuthu nevéhez fűződik. Ő 1979-ben három fő csoportra osztotta a lézeres felületkezeléseket (**2.13. ábra**). Ez a három ágra való felosztás az alapja az eddig megjelent változatoknak:

- hevítés (heating), hőkezelés;
- olvasztás (melting);
- szilárdítás (shocking).

A szakirodalomban számos osztályozás található. A leggyakoribb csoportosítás alapelve azon alapszik, hogy a nagy energiasűrűségű lézernyaláb hatására a felület hőmérséklete eléri, illetve meghaladja-e az olvadáspontot, vagy az alatt marad.

A **2.14. ábra** az elméletileg leginkább megalapozottnak tekinthető csoportosítási lehetőséget mutatják be. Két főcsoportot képez aszerint, hogy a hő hatására bekövetkező módosítás csak a szerkezet átalakítását jelenti-e (Thermal Treatment), vagy a kémiai összetételt is szándékosan módosítjuk (Thermochemical Treatments). Az első csoporton belül az olvadáspont alatti hőkezelések esetében lézeres edzésről (transformation hardening), olvadáspontot meghaladó kezelések esetén lézeres átolvasztásról (remelting) beszélünk. A kémiai összetételt is megváltoztató kezelések mindig olvadáspontot meghaladó, vagyis átolvasztást is magukban foglaló eljárások. Jelen esetben a megkülönböztetés aszerint történik, hogy a külső forrásból történő anyagbevitel célja a felület ötvözése (alloying) – va-

gyis a kívánt tulajdonságú réteget az alapanyag és a bevitt anyag keveredésével, a felület ötvözésével állítjuk elő –, vagy arra törekszünk, hogy a bevitt anyag az alapanyaggal nem vagy csak kis mértékben keveredjék, s az új réteget mintegy ráolvasztjuk a szubsztrátra (cladding).



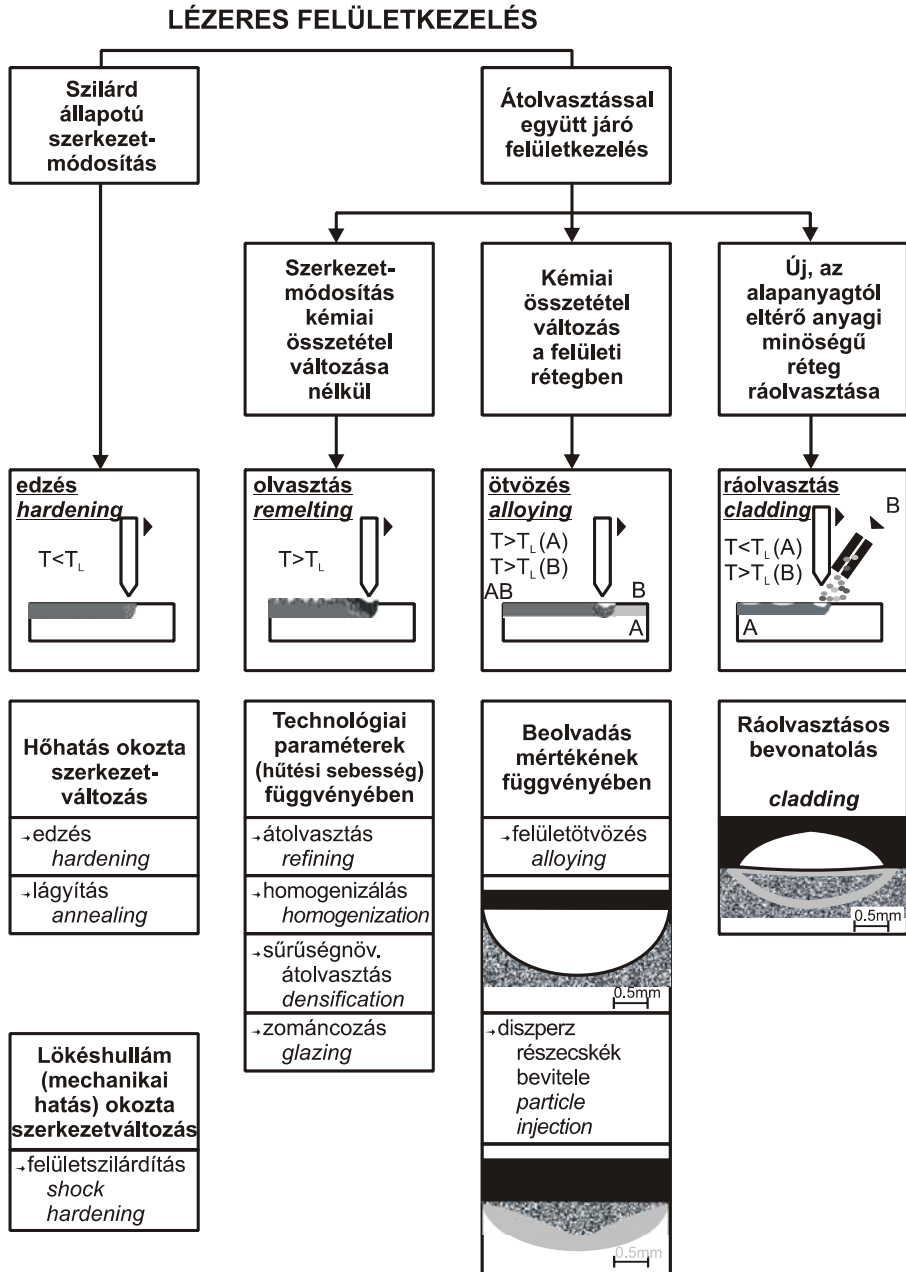
2.13. ábra

A lézeres felületkezelés egy lehetséges osztályozása [Gnanamuthu, 1980]

Mivel ezeknek a technológiáknak nincs igazán kiforrott magyar terminológiájuk, az eljárások ismertetése során angol elnevezéseiket is megjegyzem zárójelben.

A szerkezetmódosító eljárások közül az olvadáspont alatti hőkezelések esetében **lézeres felületedzésről** (*transformation hardening*) akkor beszélünk, ha vas-ötvözetek martenzites átalakulásának a felületi rétegre való korlátozásáról van szó. A lokális edzés egyik lehetőségének s mint ilyen a lángedzéssel és az indukciós edzéssel rokon eljárásnak tekinthető. Amennyiben a szerkezetváltozás nem allotróp átalakulást jelent, hanem a kristályhibák számának és elrendeződésének változtatásáról van szó, **felületszilárdításról** (*shock hardening*) beszélünk. Ebben az esetben egy hidegalakítási keményedéshez hasonló hatásmechanizmust érhetünk el lézerimpulzusokkal keltett nagy energiájú lökéshullámok mechanikai hatása révén.

A szerkezetmódosító eljárások másik csoportjában, az olvadáspontot meghaladó kezelések esetén **lézeres átolvasztásról** (*remelting*) beszélünk. Ezen belül a tulajdonságok módosulását különböző hatásmechanizmusok révén érhetjük el: bizonyos esetekben a kedvezőbb tulajdonságok a gyors hűtés hatására létrejött finom szerkezetnek köszönhetőek, ilyenkor **szerkezetfinomító átolvasztás** (*microstructure refinement*) történik, más esetekben döntően a felületi réteg homogenizációja bizonyul kedvezőnek, ekkor **homogenizáló átolvasztásról** (*homogenisation*) van szó.



2.14. ábra

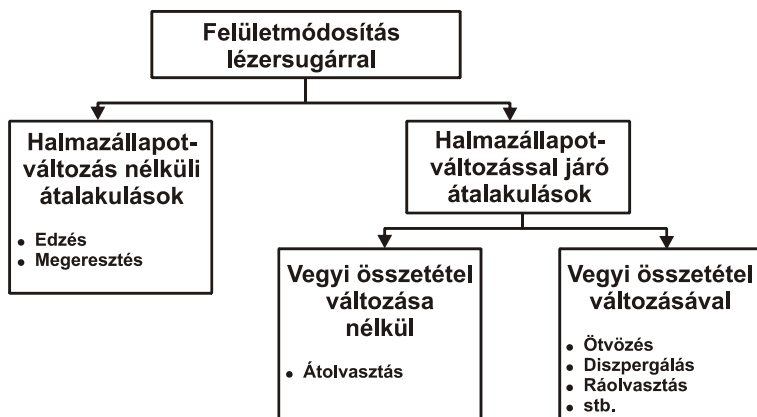
A lézeres felületkezelések osztályozása [Bergmann, 1994; Baán, 1996]

A **zománcozás** (*glazing*) során a rendkívül nagy hűtési sebesség hatására a felületen amorf réteg, azaz üvegfém keletkezik. További lehetőség a porózus felületi réteg tömörítése, sűrűségének növelése, azaz **sűrűségnövelő átolvasztás** (*densification*).

A kémiai összetételt is megváltoztató kezelések mindig olvadáspontot meghaladó, vagyis átolvasztást is magukban foglaló eljárások. Itt a további megkülönböztetés aszerint történik, hogy a külső forrásból történő anyagbevitel célja **felületötvözés** (*alloying*), vagyis a kívánt tulajdonságú réteget az alapanyag és a bevitt anyag keveredésével, a felület ötvözésével állítjuk elő, vagy arra törekszünk, hogy a bevitt anyag az alapanyaggal nem vagy csak kis mértékben keveredjék, s az új réteget mintegy ráolvasztjuk a szubsztrátra. A **ráolvasztás** (*cladding*) tehát lényegében már nem is felületmódosító, hanem bevonatoló eljárásnak tekintendő. A felületötvözés egyik speciális csoportjának is tekinthető eljárást, a **diszperz részecskék bevitelét** (*particle injection*) az utóbbi időkben több szakember célszerűnek látja megkülönböztetni, ebben az esetben az ötvözőadalek teljes beolvadása nélkül történik a felületi tulajdonságok módosítása, a finom eloszlású idegen fázisok szilárdságnövelő hatásának (diszperziós keményítés) hasznosításával [Baán, 1996].

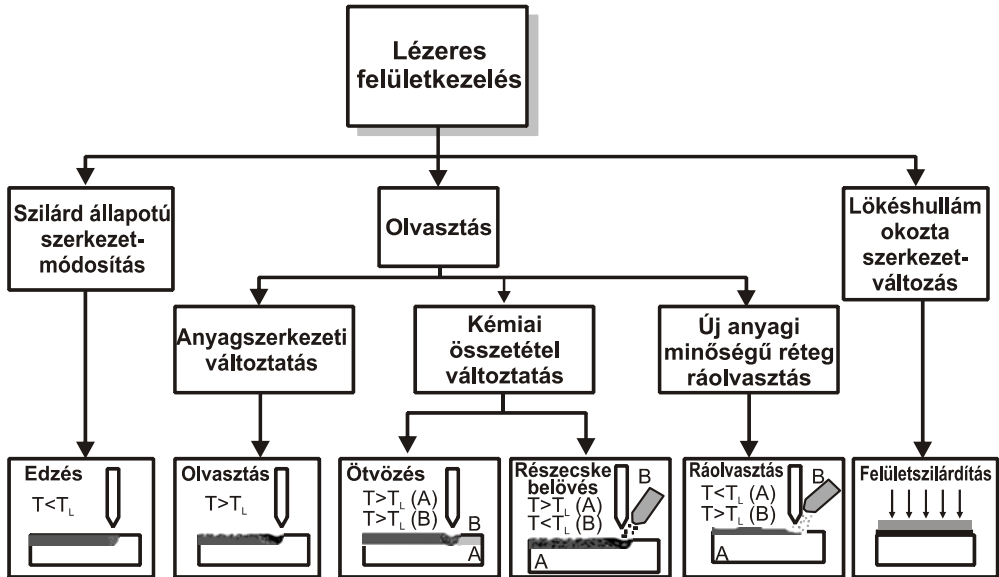
A lézersugaras felületmódosítás halmazállapot-változás nélkül/változással járó átalakulások szerinti csoportosítását a **2.15. ábra** szemlélteti.

Egy másik csoportosítási lehetőséget mutat be a **2.16. ábra** – melyhez a **2.14. ábra** szolgált alapjául, s eltekint a nem jellemző felületi technológiáktól –, megkülönböztetve a külső forrásból bevitt anyag és az alapanyag keveredésének azt a speciális esetét, amikor az ötvözőanyag részben oldódik, részben viszont diszperz második fázisként, oldatlanul visszamarad az átolvasztott felületi rétegben (*particle injection*).



2.15. ábra

Lézeres felületmódosítás osztályozása [Búza, 2006]



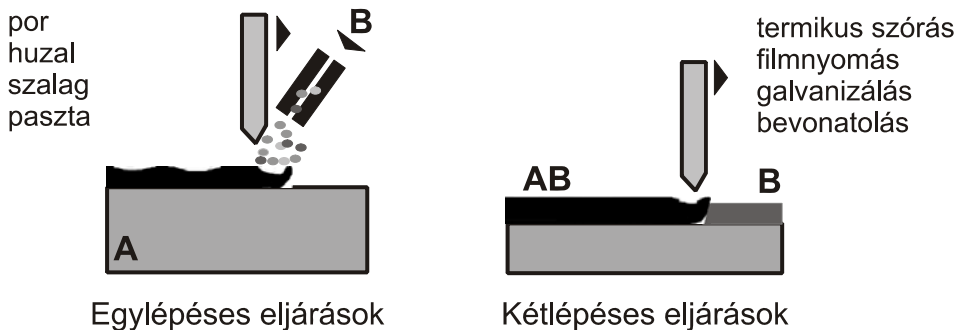
2.16. ábra

A lézeres felületkezelések osztályozása [Bitay, 1998; Rowshan, 1998; Lugscheider, 1992]

S végül a technológiai lépések száma szerinti osztályozást szemléltetjük a 2.17. ábrával, az ötvözés és cladding példáján keresztül.

A felületötvözés, illetve ráolvasztás technológiái – ahol a kémiai összetétel is változik – tovább csoportosíthatók egylépéses, illetve kétlépéses eljárásokra.

Ötvözőadalék bevitelének lehetőségei



2.17. ábra

A kémiai összetételváltozással járó lézeres felületkezelések osztályozása, egy- és kétlépéses ötvözés/ráolvasztás elvi vázlata [Bergmann, 1998]

Az eljárások csoportosítása aszerint történik, hogy az ötvöző-, illetve bevonat-anyagot közvetlenül a lézeres kezelés során juttatjuk-e be az olvadékba (por, huzal, szalag vagy paszta formájában), vagy előzetesen egy más technikával – például termikus szórás, plattírozás – bevonatoljuk a munkadarabot, s azt követően a lézer hőhatásával be- vagy ráolvasztjuk a felületre.

2.8.5. A lézeres felületkezelési eljárások paraméterei

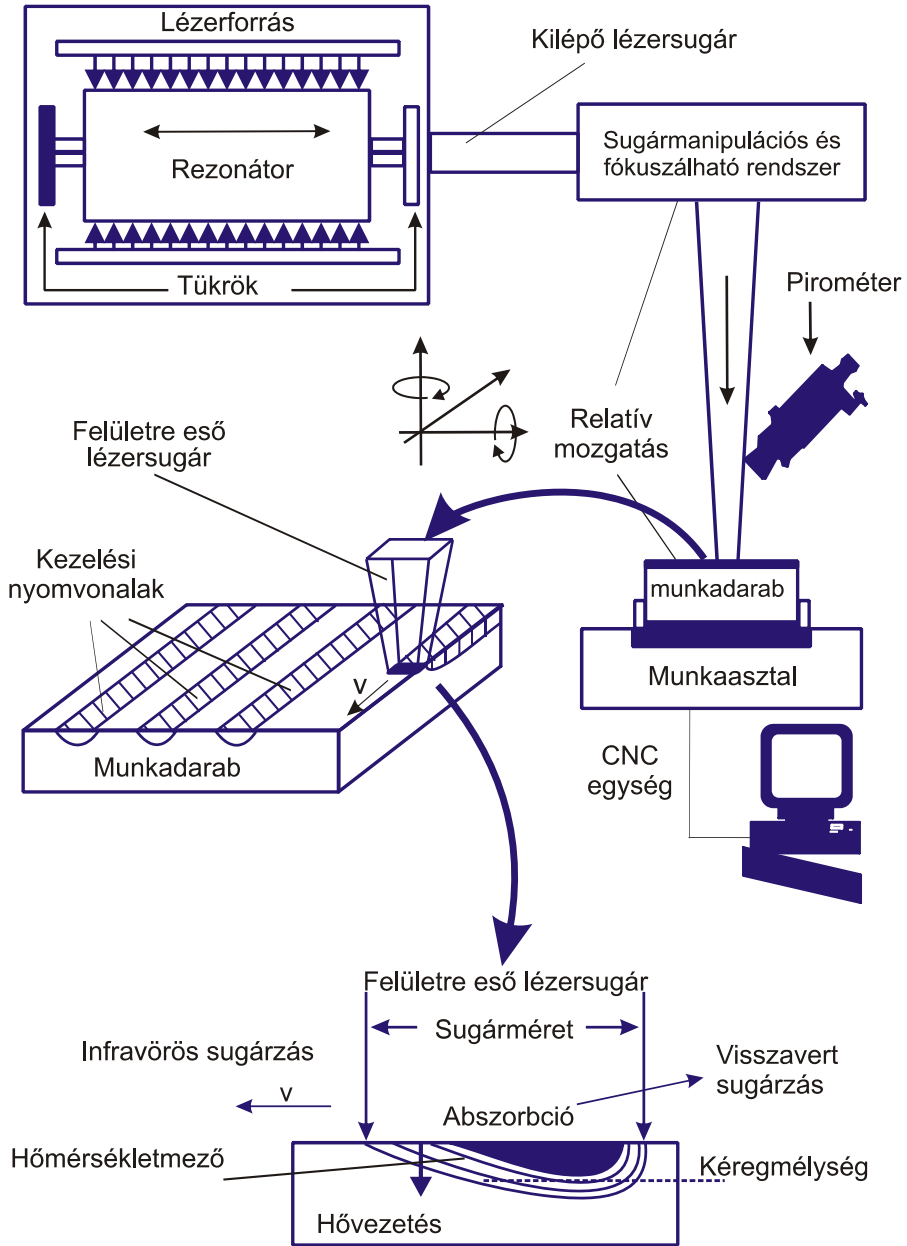
A nagy energiasűrűségű lézersugár és az anyag kölcsönhatását, így az ennek következtében létrehozott/módosított tulajdonságokat alapvetően a következő *technológiai* paraméterek határozzák meg:

- lézerteljesítmény;
- hullámhossz;
- sugárnyaláb alakja;
- sugárnyaláb mérete (átmérő);
- a besugárzott területen belüli intenzitáseloszlás jellege;
- pásztázási (előtolási) sebesség.

Az anyagban bekövetkező változások anyagi minőségtől függő paraméterei:

- abszorpciós képesség (lásd. a **2.8.3. alfejezetben** leírtakat);
- hővezető képesség;
- sűrűség;
- fajhő;
- fázisátalakulások hőmérséklete;
- átalakulásokat kísérő latens hő.

A rendkívül gyors lejátszódású és nagy hőmérsékletű folyamatok során létrejött hőmérséklet-eloszlás kísérleti meghatározása meglehetősen nehéz feladat, különösen nagy jelentőséggel bírnak ezért a folyamatok modellezésére irányuló törekvések [Ion, 1994].



2.18. ábra

Lézeres felületkezelő rendszerek vázlatos felépítése [Bergmann, 1994]

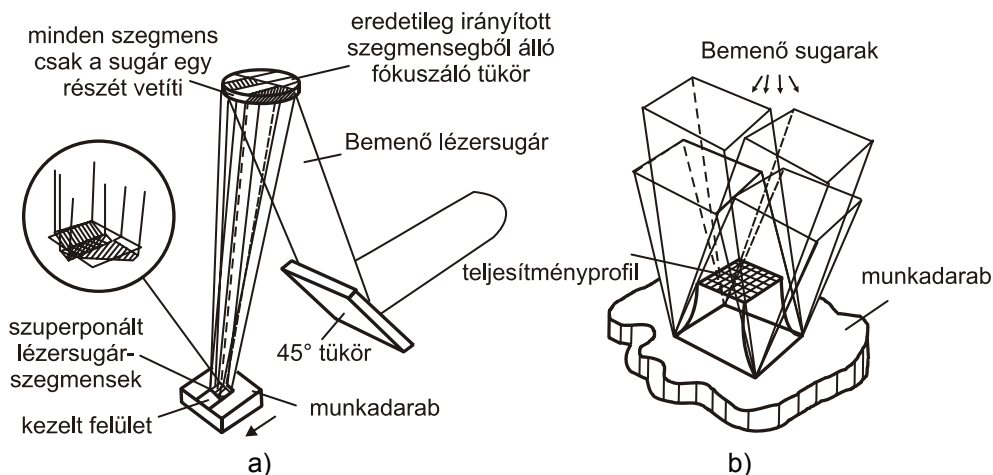
A lézeres felületkezelések optimális megvalósításához bonyolult szabályozási feladatokat kell megvalósítani. A felületkezelő rendszerek egyes elemeit mutatja be vázlatosan a **2.18. ábra**.

A lézer sugárforrás rezonátorában keletkezett koherens sugarat optikai átviteli eszközök (tükrök, száohtika) segítségével irányítjuk a kezelendő felületre. Egy átlagos kimenő sugárteljesítményből kiindulva a szükséges teljesítménysűrűség és intenzitáseloszlás a besugárzott területen belül úgy érhető el, hogy fókuszáló és/vagy sugáralak-formáló eszközöket – lencsákat, tükröket, pásztázó egységeket vagy sugárintegrátorokat – alkalmazunk [Baán, 1996].

Az „élesen” (pontoszerűen) fókuszált sugár alkalmazása nem célszerű, részben azért, mert túl keskeny lesz a kezelt nyomvonal, részben pedig azért, mert a felület túlhevítését (pl. edzésnél megolvadást) el kell kerülni. A besugárzott terület növe-
lése céljából ezért defókuszált (foltzerű) sugarat alkalmazunk.

Sugármanipulációs lehetőségeket mutat be a **2.19. és 2.20. ábra**.

Szilárd állapotban végzett kezelésekhez általában a négyzetes vagy négyszög-
letes sugárforma ajánlott, átoltasztáshoz gyakran vonalszerű sugárformát alkalmaznak. Ráoltasztásos eljárásnál célszerű minél nagyobb méretű olvadéktócsát létrehozni, hogy lehetőség legyen az adalékanyagoknak közvetlenül az olvadéktó-
nába való bejuttatására.

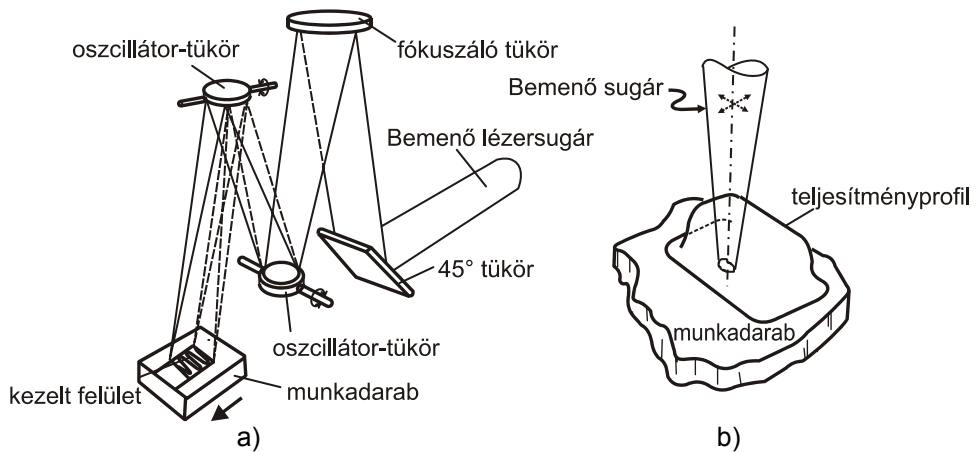


2.19. ábra

Sugármanipulációs módszer integrátoroptika segítségével

a) az integrátoroptika vázlatos felépítése [Trafford];

b) a kapottenergia-eloszlás jellege [Bonello]



2.20. ábra

Sugármanipulációs módszer oszcillátoroptika segítségével

a) az oszcillátoroptika vázlatos felépítése [Trafford];

b) a kapottenergia-eloszlás jellege [Bonello]

A megfelelő intenzitáseloszlás kialakításának egyik lehetősége az úgynevezett kaleidoszkóp alkalmazása [Ishide, 1992].

A sugárnyaláb és a munkadarab relatív mozgását többnyire CNC-vezérlésű asztal segítségével valósítják meg. A munkadarab mozgatására szolgáló rendszer megtervezésénél, kiválasztásánál figyelembe kell venni a munkadarab geometriáját, a kezelendő felület bonyolultságát, a megkívánt pontosságot, az eljárás sebességét, a mozgatandó darab tömegét. A gazdaságossági szempontok mérlegelésekor természetesen a gyártás volumene is jelentős tényező.

2.8.6. A lézeres felületkezelési technológiák paramétertartományai

Az egyes felületkezelési eljárások tipikus paramétertartományait és hatásmechanizmusát foglalja össze az **2.3. táblázat** [Bakondi, 1989], illetve a korábban már bemutatott **2.3.a. és b. ábra**.

2.3. táblázat. Lézeres felületkezelések paramétertartományai

Felületkezelések	Lézer- teljesítmény (Wmm ⁻²)	Lézerkezelés időtartama (sec)	Elért hatás	Megjegyzés
Felületszilárdítás	10	(20-40)×10 ⁻⁹	felülettömörödés, alakítási kemé- nyedés	a hatást lö- keshullám hozza létre
Felületi átolvasz- tás	10 ² –10 ⁵	10 ⁻⁷ –10 ⁻²	fémvegyületek, zárványok oldása, szemcsefinomítás, esetleg amorf felü- let	a hűlési se- besség nagy
Felületi ráolvasz- tás	10 ⁵ –10 ⁶	(2–15)×10 ⁻⁷	felszórt réteg átol- vasztása, tömörí- tése	
Felületötvöztetés	10 ⁶	(2–15)×10 ⁻⁶	a munkadarab felületére felvitt ötvözőanyagoknak alapanyaggal való összeolvasztása	
Felületedzés	10–10 ³	0,001 ⁻¹	a felület szövet- szerkezetének átalakítása (edzés)	a felület hűlé- si sebessége: 10 ⁵ Ks ⁻¹

2.9. Lézeres felületedzés (laser hardening)

A vasalapú ötvözetek lézeres edzése ausztenitesítést és önedződést jelent a kezelt rétegben. Lézeres kezelésen a gyors hevítést értjük, mely rövid idejű ausztenitesítést eredményez. Az ausztenitesedés mértéke meghatározza az edződés mértékét is a gyors hűlés során. A gyors hevítés növeli az átalakulási hőmérsékleteket, megközelítőleg 100–150 °C-kal. A₃ hőmérséklet felett rövid idejű a hőkezelés, így a karbidoldódás, a homogenizálódás mértéke is ennek az időnek a függvénye. Hagyományos edzési eljárásnál a kiinduló szerkezetnek nincs jelentősége, ezzel szemben lézeres edzésnél a kiinduló szerkezetnek – inhomogenitások, durva karbidok, perlit finomsága – nagy jelentősége van, mivel homogenizálódásra, oldódásra kevés idő marad [Teleszki, 1998].

Az olvasztás nélküli edzéssel (fázisátalakulással vagy martenzites átalakulással) operáló technológiák a szerkezeti acélok területén terjedtek el. A létrehozott edzett rétegek mélysége néhány tizedmilliméterig terjed. Elsősorban gépkocsialkatrészek felületedzését végzik ilyen módon, a nagyfrekvenciás indukciós edzést vagy – ha a követelmények megengedik – a cementálás és edzést helyettesítve. A bonyolult alakú felületek szilárdságának növelésére is jól beváltak ezek a szilárd halmazállapotú felületkezelések. A lézeres edzés lehetséges, pontosabban célszerű alkalma-

zásait a következőkben foglalták össze: nagyméretű alkatrészek, amelyeknek csak néhány kritikus pontjában szükséges a szilárdságnövelés; nagy kiterjedésű felületek rasztermintás kezelése; kisméretű alkatrészek, melyek lokálisan és torzulásmentesen más módszerrel nem kezelhetők.

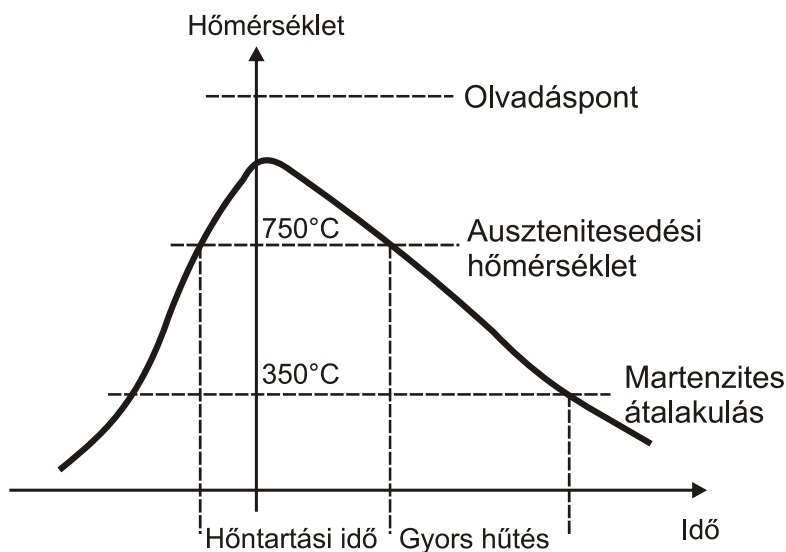
A felületi edzés csak akkor lehet gazdaságos lézerrel, ha azt más, hagyományos módszerekkel nem vagy csak káros kompromisszumok árán lehet megvalósítani. Figyelembe kell venni azt is, hogy a lézersugár célszerűen formált, de geometriailag jól meghatározott foltja vándorol a kezelendő felszínen, tehát összefüggő homogén hőkezelt réteg többnyire nem érhető el. Az alkatrész szempontjából ez előny is lehet ott, ahol a hagyományos eljárás nem tudott szelektív, azaz csak az érintkező sávokra kiterjedő kezelést biztosítani, elkerülve pl. a sarkok beedződését. Az egymás mellett futó, lézerrel edzett sávok között lehetnek valamilyen mértékben megeresztődött részek. Megfelelő tükrökkel vagy tükrözéssel lehet elérni azt, hogy a hőkezelés egy széles sáv vagy gyűrű stb. alakú felületen egyszerre történjék meg. A kis hőbevitel a munkadarab vetemedési veszélyét csökkenti. A lézeres felületi edzés – egy meghatározott ciklusú és teljesítményű hőbevitel mellett – alapvetően az alkatrész anyagának hővezető képessége által szabályozott. A hőbevitelt a befolyásolható abszorpció segíti, a hőelvezetést pedig a geometriai viszonyok is befolyásolják.

A rendkívül gyors hevítés következtében a kritikus átalakulási hőmérsékletek eltolódnak, a fázisátalakulást szenvedő anyag mennyisége megváltozik. Igen nagy számú, elnyúlt alakú ausztenitcsíra keletkezik, a túlhevítés ellenére sincs szemcsedurvulás. A réteg hőmérsékletének növelésével megnő a diffúzió sebessége, ezért a kezelési idő rövidülhet, impulzuskezelés is lehetséges. A nagyobb diffúziós sebesség növeli a szilárd oldat ötvöztartalmát, ami nagyobb melegsilárdságot, jobb megeresztésállóságot eredményezhet.

Nagyobb teljesítményekkel történő lézeres kezelésekhöz hűtött vörösréz parabolatükröt kell használni, mivel a Zn-Se-lencsék károsodásának veszélye ilyenkor fennáll. Vonalszerű kezelésnél a lézersugár intenzitása a kimenő teljesítmény szabályozásával vagy defókuszálással változtatható. A defókuszálás következtében a gyújtófolt kiterjed, ugyanakkor a teljesítménysűrűség drasztikusan lecsökken. Ahhoz, hogy nagyobb felületet ugyanolyan mélyen lehessen kezelni, szegmensekből álló parabolatükröt kell alkalmazni. A tükrör minden egyes szegmense egy-egy sávot képez le a fókuszfoltra, ezek szuperponálásával relatíve egyenletes intenzitáseloszlás nyerhető a fókuszfoltban, s várhatóan a kezelési mélység is egyenletes(ebb) lesz. Ilyen tükrörrel defókuszálva a sugár nagyobb felületű négy-szöget fog besugározni, illetve azonos folyamatsebesség mellett az egy pontra jutó behatás ideje meghosszabbodik. Egyes lézergyártók konkrét munkadarabprofilhoz igazodó intenzitáseloszlású tükröket is készítenek. Ha a lefedett terület a felületkezelési folyamathoz nem elegendő, akkor több egymással párhuzamos, egymást átfedő pályát kell elkészíteni. Kis teljesítménytartományú lézerek esetében a szükséges teljesítménysűrűséghez nagyon kicsi fókuszfoltméret tartozik, és ezáltal időegység alatt sokkal kisebb felületrész kezelhető (kisebb a termelékenysége), mint a nagy teljesítményű lézerekkel, nem beszélve az elérhető rétegvastagságról.

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

A lézeres felületedzés természetesen csak edzhető összetételű vasötvözetek felületszilárdítására alkalmas. A lézersugárral történő edzés során jelentkező folyamatok közül az egyik legalapvetőbb a hőátadás. Ennélfogva az alapanyag felülete a lézersugárból optikai energiát nyel el, és ezáltal nő a hőmérséklete, míg a munkadarab anyagának döntő tömege alacsony hőmérsékletű marad. Ez a hőátadási folyamat befolyásolja a hőmérséklet-eloszlást, a fázisátalakulási mélységet, végső soron a kezelt réteg minőségét. A kristályszerkezet kétszeri változása a másodperc tört része alatt következik be. Hőciklusának elvi vázlatát a **2.21. ábra** szemlélteti.



2.21. ábra
Lézeres felületedzés hőciklusa [Baán, 1996]

A lézersugárral történő edzés növelt kopásállóságú réteget eredményez a kívánt alaptulajdonságokkal rendelkező munkadarab felületén, és bizonyos körü-

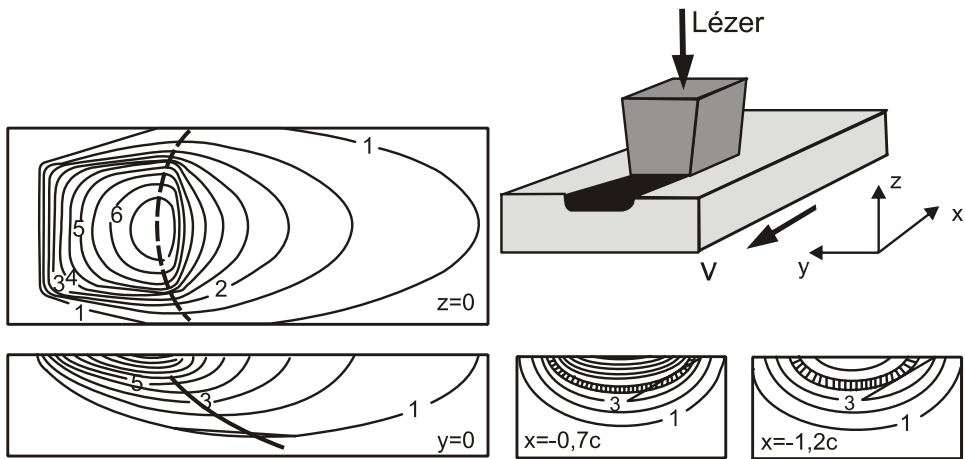
mények között növeli a kifáradással szembeni ellenállást a felületben létrehozott nyomófeszültségek következtében.

A lézeres felületedzés során a technológiai paramétereket úgy célszerű megválasztani, hogy a megfelelő rétegvastagság a felületi réteg túlhevítése, megolvadása nélkül jöjjön létre. A hagyományos felületedzési eljárásokhoz viszonyított gyors hevítés és rövid hőtartási idő következtében a korábbi gyártási-hőkezelési periódusokban létrejött vegyületfázisok oldódása nem vagy nem kellő mértékben megy végbe. Ebből a szempontból különösen a karbontartalmú fázisok oldódására kell figyelmet fordítani. Amennyiben a karbon nehezen oldódó formában (pl. stabil ötvözőkarbidokban) van jelen, számolni kell azzal, hogy az oldódás nem vagy csak részben megy végbe. Ez bizonyos esetekben kedvezőtlen lehet, mert a martenzit keménysége alapvetően a rácsot torzító – tehát a kiinduláskor az ausztenitben oldott állapotban jelen lévő – karbon mennyiségétől függ. A korlátozott oldódás miatt így – az ausztenitben oldott kisebb C-tartalom következtében – elmarad a várt keménységnövekedés. Más esetekben viszont előnyös lehet, ha a karbontartalmú fázis nem oldódik, mint pl. a perlit-grafitos öntöttvasak felületedzése során, ahol a grafit változatlan marad a martenzitesre edzett mátrixban, s kedvező súrlódási-kopási viszonyokat eredményez.

A hagyományos felületedzési eljárásokhoz viszonyított lényeges különbség, hogy a martenzites átalakuláshoz szükséges, a kritikus hűlési sebességnél nagyobb hűtési sebesség külső edzőközeg alkalmazása nélkül, a munkadarab belső, hideg tömege által előidézett hőelvonás eredményeként biztosítható, általában 10^3 – 10^5 K/s nagyságrendbe esik. Az önedződés egyik feltétele természetesen a kéreg és a belső tömeg megfelelő mennyiségi aránya: ennek megfelelően az edzett kéreg mélysége nem lehet nagyobb pl. egy tengely átmérőjének 10%-ánál.

Lézeres felületedzés esetén a rétegvastagság szokásosan 0,05–1,5 mm közötti, a felületi keménység a rendkívül nagy hűtési sebesség következtében kialakult finom szerkezetnek köszönhetően meghaladja az adott acélminőségekre jellemző, hagyományos eljárásokkal edzett kéreg keménységét.

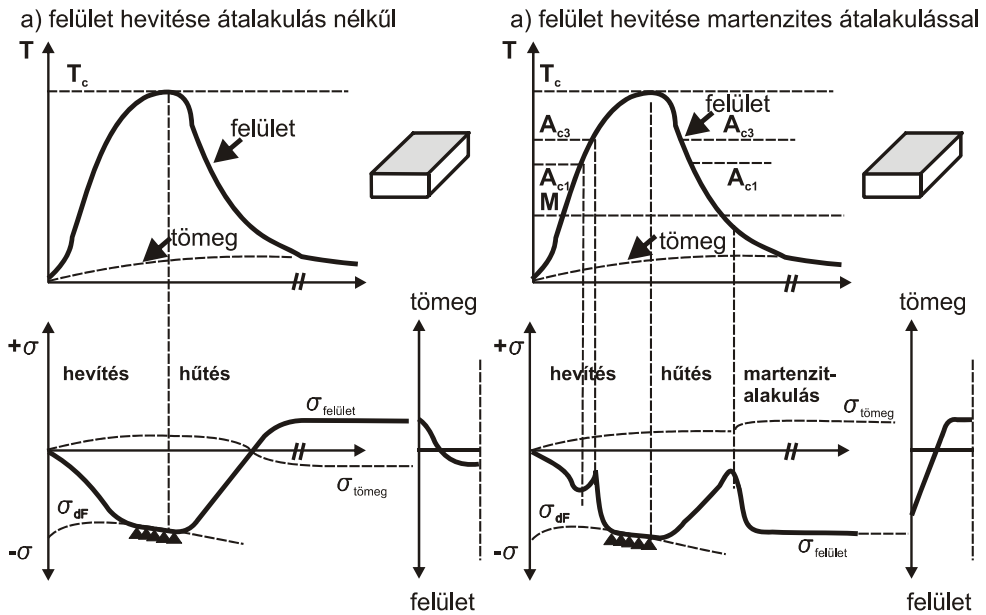
A hőciklus természetesen a kezelt nyomvonal különböző pontjain, illetve mélységében más és más, emiatt heterogén szövetet kapunk (**2.22. ábra**). A várható tulajdonságok prognosztizálása, tervezése, illetve megfelelő reprodukálhatósággal való biztosítása azért is okoz nehézségeket, mert a hőmérséklet-eloszlás kísérleti meghatározása komoly mérés technikai akadályokba ütközik, a folyamatok modellezése a változók nagy száma és hőmérsékletfüggése miatt szintén meglehetősen bonyolult. Edzésnél a legkedvezőbb eredményeket négyzetes besugárzási területtel lehet biztosítani. Nagyobb felületek lézeres edzésénél a szomszédos nyomvonalak menti kezelések hőhatásai az edzett martenzit megeresztődését, kilágylását okozhatják. A pásztázási sebesség, illetve a nyomvonalak távolságának megválasztásakor mindezekre tekintettel kell lennünk [Baán, 1996].



2.22. ábra

Hőmérséklet-eloszlás lézeres felületedzésnél [Bergmann, 1994]

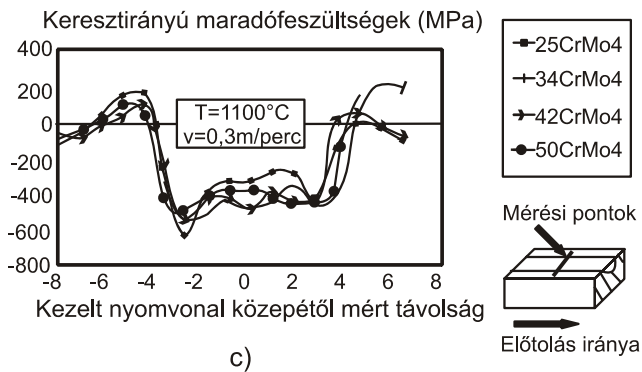
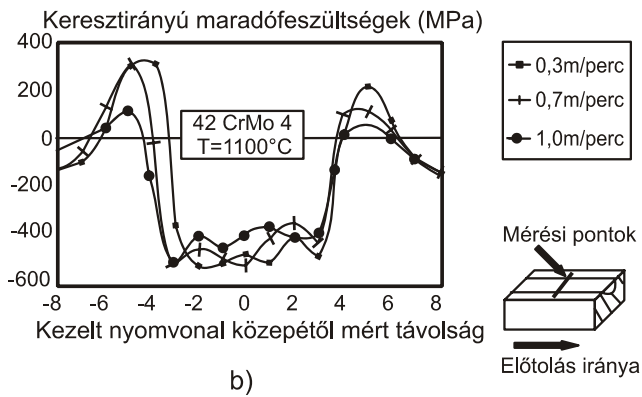
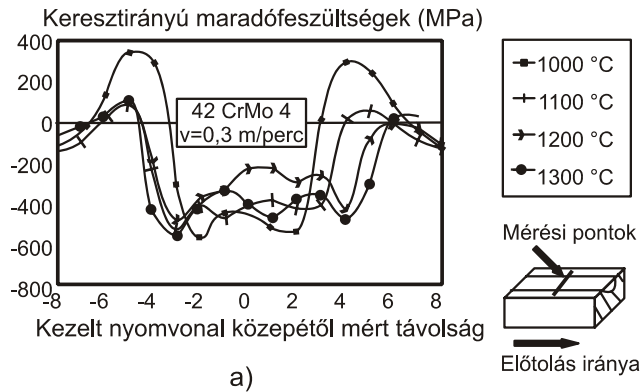
Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás, a hőtágulást és fázisátalakulásokat kísérő térfogatváltozások vetemedést és maradó feszültségek keletkezését okozhatják. A **2.23. ábra** egy átalakulás nélküli és egy martenzitesen átalakuló ötvözet esetére szemlélteti a feszültségek időbeli változását, a felület lézeres hevítési folyamatában kialakuló hőmérséklet-változással szinkronban. Átalakulás nélküli esetben – a nagy hőmérséklet-gradiens következményeként – a felületben kismértékű alakváltozás következik be, a lehűlt darabban pedig a felületen húzófeszültség marad vissza. A martenzites átalakulással járó térfogat-növekedés kompenzálja a hőmérséklet-különbség hatására létrejött feszültségeket, a kezelés végén nyomófeszültség marad a felületi rétegben, ami a kifáradással szembeni ellenállás szempontjából igen kedvező [Bergmann, 1994; Baán, 1996].



2.23. ábra

A hőmérséklet és a feszültségek változása,
maradófeszültségek kialakulása a felület lézeres hevítése esetén.
a) átalakulás nélküli esetben, b) martenzites átalakulás esetén [Bergmann, 1994]

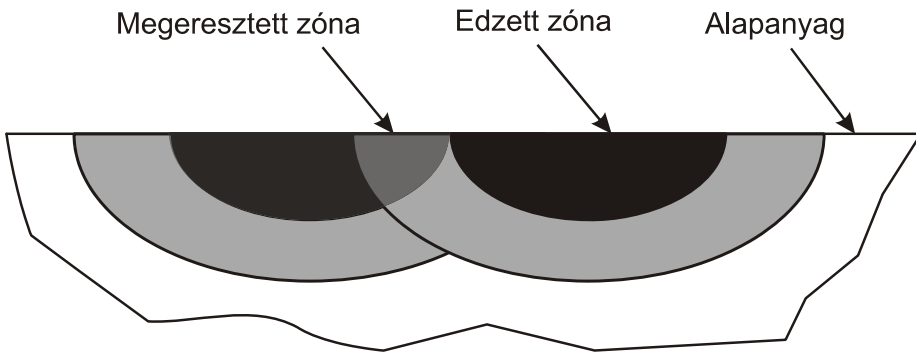
Ha nem a teljes felszínen eddük a felületi réteget, hanem csak egyes nyomvonalak mentén, vizsgálnunk kell az edzett nyomvonal keresztmetszetében is a maradófeszültség-viszonyokat. Mérési eredmények arra a megállapításra vezettek, hogy az edzett réteg mellett, a hőhatásövezetben húzófeszültségek ébrednek. A keresztmetszetben ébredő maradófeszültség-eloszlást vizsgálva megállapították, hogy az edzett rétegben kialakuló nyomófeszültség értéke nem függ jelentősen az eljárási paraméterektől, ugyanakkor a nyomvonal mentén ébredő húzófeszültségek nagysága az eljárás hőmérsékletének és a pásztázási sebességnek a függvényében jelentősen változik (2.24 ábra). [Bergmann, 1994; Baán, 1996].



2.24. ábra

Maradó feszültségek eloszlása az edzett sáv keresztmetszetében, a hőmérséklet (a), a pásztázási sebesség (b) és az acél kémiai összetétele (c) függvényében [Bergmann, 1994]

Átlapolott nyomvonalak (**2.24 ábra**) esetén a sávok között jelentős húzófeszültségek ébrednek. Ezek káros hatása elkerülhető, ha a szomszédos sávok kezelése olyan gyors egymásutánban történik (pl. tengelyek forgás közbeni axiális irányú előtolása vagy kellően nagy fordulatszám esetén), hogy az újrahevítés még a martenzites átalakulást megelőzően jön létre. A lézeres hőkezelés alkalmazása során bizonyos esetekben nem is a keménységnövelésen van a hangsúly, hanem a felületi feszültségállapot olyan megváltoztatásán, amely például a kifáradási határ növekedését biztosítja.



2.25. ábra

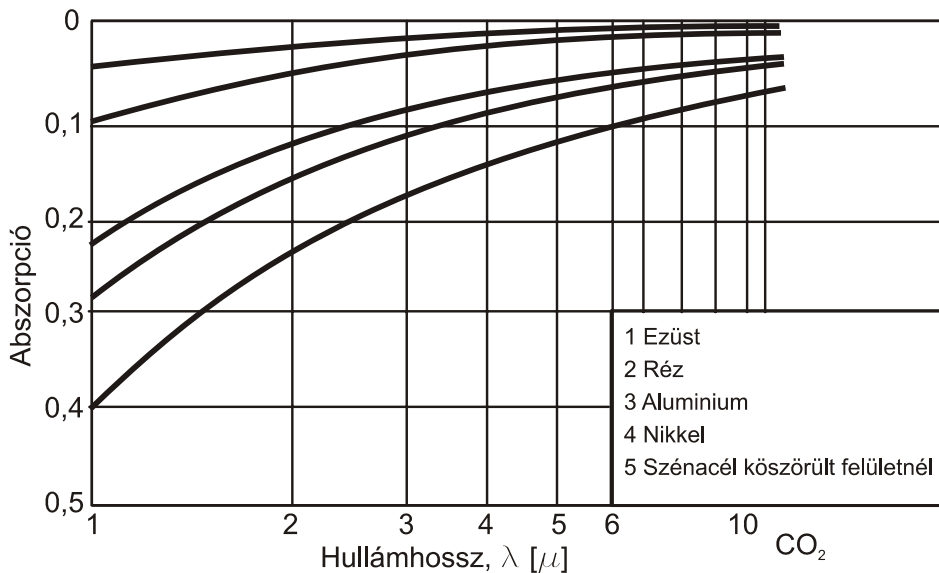
Átlapolódó nyomvonalak egymásra hatása

A kialakuló maradófeszültség-eloszlás vizsgálata a felületkezelt munkadarab felhasználói tulajdonságainak helyes megítélése szempontjából igen nagy jelentőséggel bír. Az alkalmazott eljárás paramétereinek és geometriájának megfelelő megválasztása révén törekednünk kell nemcsak a szükséges nagy felületi keménység és kopásállóság, de ugyanakkor a minél kedvezőbb maradófeszültség-eloszlás kialakítására is.

A lézeres felületkezelés lehetőségének vizsgálata során figyelembe kell vennünk a munkadarab geometriáját, a kezelni kívánt felület helyzetét, nagyságát és a későbbi felhasználói igényeket is.

2.9.1. Az abszorpció szerepe lézeres felületedzés során

Valamennyi, szilárd állapotban végzett lézeres felületkezelés esetén alapvető problémaként jelentkezik a fémek infravörös tartományra vonatkozó alacsony abszorpciós képessége. Az anyagok elnyelőképessége az anyagi minőség mellett a sugárzás hullámhosszától is függ (**2.26. ábra**).



2.26. ábra

Anyagok abszorptivitása a hullámhossz függvényében [Turner, 1991]

Olvadékalapot esetén ez a probléma kevésbé jelentkezik, mivel ott más abszorpciós mechanizmusok érvényesül(het)nek. Szilárd állapotú lézeres felületkezeléseknél az abszorpció fokozása érdekében az alábbi lehetőségek hasznosíthatók [Turner, 1991]:

- Abszorbens bevonatok alkalmazása – félvezetők és szigetelőanyagok (pl. Mg- és Zn-foszfát, Mo- és Fe-szulfid, grafit, fekete festékek, fémoxidok), amelyek a CO_2 -lézersugarat legalább 90%-ban elnyelik. A bevonatokat por, spray vagy lakk formájában, illetve kémiai úton vihetjük fel a felületre.
- Polarizált fénysugár alkalmazása azon a megfigyelésen alapszik, hogy a lineárisan polarizált lézernyaláb beesési szöge függvényében abszorpciós maximum van. A maximális abszorpciót biztosító szöget Brewster-szögnek nevezzük, CO_2 -lézer esetén ez 85° -nál tapasztalható.
- Rövid ideig ható plazma alkalmazásával szintén növelhető az abszorpció mértéke.

Az egyik legelterjedtebb a grafit spray, mely fekete elnyelő réteget képez a fém felületén, de homokszórással durvított felület, illetve fehér színű bevonat (titán-dioxid) is alkalmazható a kívánt hatás elérésére. A TiO_2 -bevonatnak az az előnye, hogy nem izzik fel, és így pirométerrel mérhető az anyag felülete, nincs zavaró tényező. Az alkalmazott bevonat típusa, vastagsága azonban befolyásolja az edzett réteg méretét.

A fentiek mellett további lehetőséget kínál az a megfigyelés, hogy az abszorpció megnő, ha a felületi érdesség az alkalmazott hullámhossztartományba esik. Ha a felületi érdesség nagyobb a hullámhossznál, a többszörös visszaverődés következtében még inkább fokozódik az elnyelődés mértéke. Homokszórással kezelt felület abszorpciója általában nagyobb 60%-nál, köszörült felületé kisebb, mint 10%. Marással, fúrással, esztergálással megmunkált felületek abszorpciója 20–50% között mozog.

Az abszorpciós képesség tehát az egyik legfontosabb paraméter, amely közvetlenül befolyásolja az edzési eljárást. Sok kísérlet folyt az abszorpciós képesség meghatározására, de nehéz pontosan meghatározni, mert sok optikai tényezőtől függ, mint pl. a felületi érdesség, besugárzási szög és szín.

Az abszorpciós képesség mérésére három eljárás lehetséges:

1. Az egyik az optikai mérés, mely során a teljes lézersugár-energiából kivonják a munkadarab felületén mért energiát.
2. Egy másik eljárás során különböző abszorpciós értékekre kiszámolt numerikus módszerekkel hasonlítják össze a próbatest kísérletbeli hőváltozását, és így a kísérlet során kikövetkeztethető az abszorpciós tényező értéke. Ez a modell feltételezi, hogy a numerikus modell pontosan működjön, de ennek megvalósítása nagyon nehéz feladat. A kapcsolódó kutatások csak álló helyzetre vonatkoznak, mozgásra nem.
3. A harmadik, legszéleskörűbben alkalmazott módszer a munkadarabban elnyelt és a visszasugárzott energia hányadosából számol.

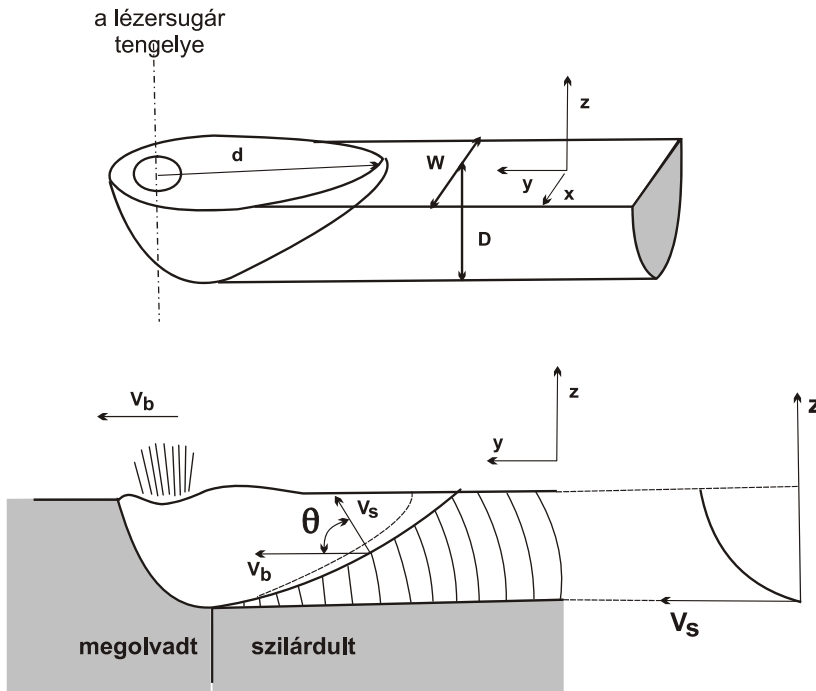
Számos kísérletet végeztek különböző paraméterbeállításokkal, változtatva az előtolási sebességet, a teljesítményt és a bevonat vastagságát. Arra a következtetésre jutottak, hogy 200 mm/min előtolásnál folyamatosan nő az edzett réteg mélysége, vagyis nő az abszorpció, de 700 mm/min előtolásnál már romlik 30–40 μm vastagság után. Általánosan tehát kimondható, hogy 10–40 μm között van az optimális bevonatvastagság. 500 mm/perc alatt 20–40 μm , míg gyorsabb előtolási sebességnél 10–30 μm lehet ideális. A fényes fémfelületre felvitt vékony bevonat sokkal nagyobb javulást eredményez az abszorpcióban, mint a további rétegek felhordása [Who–Cho, 1998, 1999].

2.10. Lézeres felületátolvasztás (laser remelting)

2.10.1. Az átolvasztott réteg geometriája

A lézeres felületátolvasztás során a felületre bocsátott nagy energia hatására a felület egy vékony rétege megolvad. A megolvadt réteg alatt a hővezetés követke-

tében hőhatásövezet alakul ki. A lézeresen megolvasztott tócsa alakjának két jellemző adata a szélesség és mélység (**2.27. ábra**).



2.27. ábra

Az átolvasztott tócsa geometriája [Germaud, 1990; Bitay–Roósz, 1998]

2.10.2. A megolvadt zóna jellemzése

A megolvadt tócsa térfogata néhány mm^3 . A tócsa mélysége függ a lézersugár teljesítményétől, a pásztázási sebességtől, a sugárátmérőtől, valamint az anyag fényelnyelő (abszorpciós) képességétől és a hőelvonásától, röviden szólva az egységnyi idő alatt az egységnyi térfogatban felhalmozódó energiától. A gyors dermedés (10^4 – 10^6 K/s) következtében a felületi réteg tulajdonságai megváltoznak. A hűlési sebességet adott sugárparaméterek esetén az olvadáktócsa alatti alapszám hődiffúziós tényezője és a hőmérséklet-gradiens határozza meg [Roósz, 1993; Bitay–Roósz, 1998; Bitay–Roósz, 2004].

A felületi olvasztások akkor képesek az olvadt zónában gyors dermedést és hűtést biztosítani, ha az olvadék körül elegendően nagy hőmérséklet-gradiens alakul ki. A teljesítménysűrűség a rétegsáv alakján, mélység/szélesség arányán keresztül befolyásolja a lehűlési sebességet és az olvadáktócsa létidejét. Ez nemcsak a ré-

tegsáv szövetszerkezetét határozza meg, hanem azokat az időtartamokat is, amelyek alatt a kezelt zóna egy-egy kritikus hőmérséklet-tartományon keresztüljut. Mérsékelt energiasűrűség és a lézersugár nem túl gyors mozgása esetén a munkadarab a felülettől kiindulva felmelegszik, és a hővezetés gömbfelülethez közel álló izotermákat hoz létre. Ennek megfelelően a hagyományos ömlesztő hegesztések varrataihoz hasonló alakot kapunk, azaz egy rétegsáv mélysége nem vagy alig lesz nagyobb a szélességénél. Ha az energiasűrűséget növeljük – a sugarat kisebb foltra fókuszáljuk, és/vagy a teljesítményt fokozzuk –, a behatolási mélység jobban nő, mint a szélesség, így relatíve keskeny ömledék-, illetve réteg-zóna és hőhatásövezet jön létre (mélyhegesztési effektus). A munkadarabbal közölt teljesítmény és a relatív sebesség (fajlagos hőbevitel) variálásával a kezelt sáv szélessége befolyásolható.

2.10.3. A kialakult réteggeometria szabályozása

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

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

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

A nagy hűlési sebesség a rétegszerkezetre lehet hasznos, de káros is. A keskeny rétegsávoknál megfigyelhető nagy hőmérséklet-gradiens ugyanis nagy feszültséggradiens kialakulására vezethet, ami a repedésveszélyt növeli. Viszont

ez az övezet olyan kicsi, hogy a repedésveszély az esetek többségében nem realizálódik folytonossági hiányokban. Az anyag összetételétől, rugalmassági és képlékenységű tulajdonságaitól függ, hogy a két hatás közül melyik a jelentősebb, ezért nincs általános érvényű szabály az optimális olvasztott sávalakra és ezen keresztül az olyan kezelési adatokra, amelyek teljesen hibátlan réteget garantálnak.

2.10.4. A kialakult réteg szerkezete és tulajdonsága

A dermedés közbeni hűlési sebesség növelése a túlűtés következtében hat a kritikus – azaz stabilizáló – szilárd csírák méretére. Minél nagyobb a hűlési sebesség, illetve a túlűtés, annál kisebb a dermedő szerkezet jellemző mérete (szemcseméret, dendritméret). A bonyolult, többfázisú anyagi rendszerek – tipikusan a szerszámacélok – gyors dermedésénél a dermedés közbeni hűlési sebességet a szekunder dendritágak szélességi méreteiből is szokás meghatározni. A szekunder dendritágak szélessége (d) és a dermedés közbeni hűlés sebessége ($\dot{T}$) közötti kapcsolatot a mindenkor anyagi tulajdonságai határozzák meg a $d \cdot \dot{T}^a = b$ összefüggés szerint, ahol a és b az anyagtól függő állandók. Ezzel visszavezették a bonyolult dermedési folyamatok eredményének jellemzését egy egyszerű metallográfiai vizsgálatra és a dermedés közbeni hűlési sebesség mérésére.

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

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

Vasalapú ötvözeteknél az előzőeken túlmenően:

- a karbidok oldódása az erősen túlhevített olvadékban az ömledék rövid létezési idejének ellenére végbemegy;

- a karbidok oldódását az erős karbidképző ötvözők befolyásolják, így ezek nagyobb oldódási szintje mellett a karbon oldódási szintje is nagyobb (a durva karbidok eltűnnek);
- az ötvözetlen acéloktól és az öntöttvasaktól eltérően az ötvözött (szer-szám)acélokból a megnövekedett oldott karbontartalom ellenére a martenzit rácsstorzultságában anomália van, a c/a értéke csökken, ami a visszamaradó ausztenit és a δ -ferrit mennyiségének növekedésével, továbbá a karbonatomok energetikailag kedvezőbb, de nem egyenletes eloszlásával magyarázható;
- a nagyobb oldott ötvözőtartalom miatt csökken az M_s hőmérséklet;
- a finom szemcseméret, a kis szemcsékben létrejövő igen finom tűs martenzit és a kialakuló diszperz mikrokiválások a szilárdság, illetve a keménység jelentős növekedését idézik elő;
- a finom szemcseméret miatt nem tudnak kialakulni nagyméretű inkoherens kiválások, amelyek bizonyos esetekben a szívósság növekedését is eredményezhetik;
- erőteljesebb kiválásos keményedés, ezáltal nagyobb melegszilárdság, illetve melegkeménység érhető el megeresztéskor;
- az erőteljesebb interstíciós oldódás, a nagyobb diszlokációsűrűség, a martenzites átalakulás és a kiválásos keményedés egyfajta „eredőjeként” ún. szuperkeménység érhető el;
- öntöttvas termékek felületi rétegében stabilis grafit helyett metastabilis vas-karbid precipitátumok hozhatók létre kopásállóbb ledeburitba foglalva (helyettesíthető az AWI felolvasztó hegesztés).

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

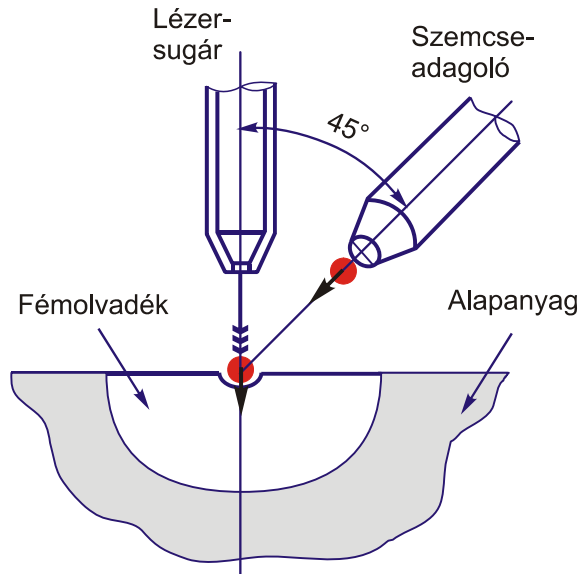
A következő fejezetben részletesen elemezzük egy C15-ös acélon végzett lézeres felületátolvasztás folyamatait, valamint bemutatjuk a létrejött felületi réteg jellemző adatait.

2.11. Lézeres felületötvözés és bevonatolás

A lézeres edzéssel ellentétben ötvözés során megolvasztjuk az anyagot. A lézer termikus energiájával megvalósítható a fémek vagy kerámiaporok elegyítése is egy darab felületén. Az eljárás során a lézernyalábot egyidejűleg követi a fúvóka, hogy a bevonat összeolvadjon és összekeveredjen a szubsztrátanyag külső részével.

Amikor ötvözzük az alkatrész felületét, a lézersugárral néhány köbmilliméteres olvadátkócsát, olvadékot hozunk létre a darab felületén, és ebbe a tócsába fűjük bele az ötvözőanyag porát [Bitay, 1999, Bitay–Roósz, 1999]. A lézer segítségével

néhány milliméteres rétegvastagságot tudunk ötvözni a felület kívánt részén. Sok esetben olyan ötvözetet is készíthetünk, amelyen a hagyományos kohászati technológiákkal nem állítható elő.

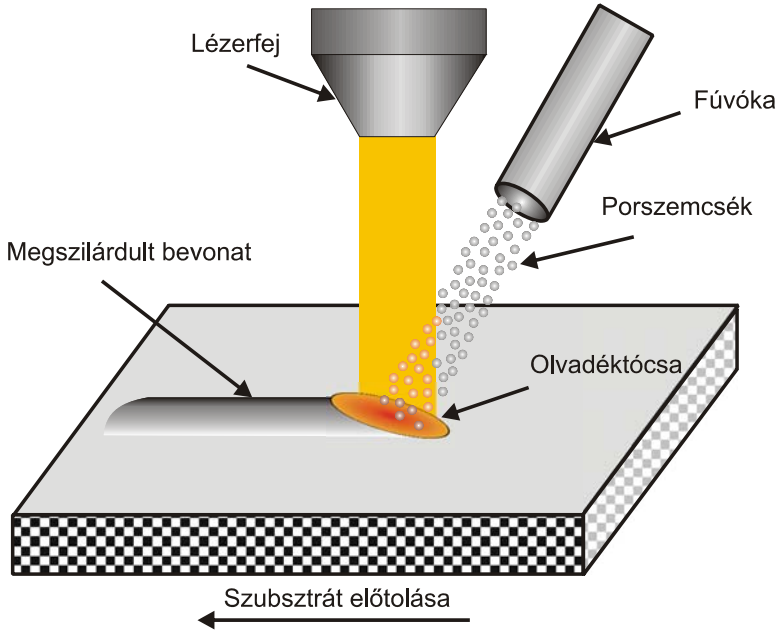


2.28. ábra

Lézeres ötvözés szemcsebevitellel (diszpergálás) [Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A felületötvözéshez hasonló eljárás a felületre való ráolvasztás. A két eljárás között az jelenti az alapvető különbséget, hogy az ötvözés esetén az alapanyag megolvadt zónájában elkeveredő adalékanyaggal érjük el a célt, míg a ráolvasztás esetében az alapanyag megolvadása és keveredése az adalékkal igen kis mértékű lehet. A lézernek az előnye, hogy koncentráltan csak annyi energiát viszünk be a megmunkálandó darabba, amennyi az elérendő célhoz feltétlenül szükséges [Kurt, 1996].

A bevonatolás (cladding) az alapanyagénál kisebb olvadáspontú adalékanyaggal történik. A lézeres kezelés során a hőciklust úgy szabályozzák, hogy kicsi legyen a keveredés az adalékanyag és az alapanyag között. Elsősorban Co- és Ni-alapú ötvözőrétegeket alakítanak ki.

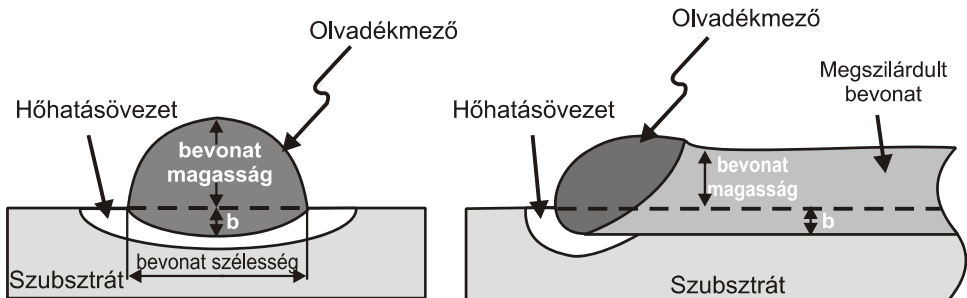


2.29. ábra

Lézeres bevonatolás [Iravani-Tabrizipour, 2007]

A bevonatolás előnye, hogy kisebb a keveredés az alapanyag és az adalékanyag között, így 1 mm-nél vékonyabb rétegek is felvihetők. Repedésre érzékeny anyagok esetén előnyös, hogy itt nem szükséges előmelegíteni [Parsons, 1985; Rozsnoki, 1994].

A felületkezelések modellezésével (például az optimális technológiai paraméterek meghatározása végett) számos tanulmány foglalkozik, melyekben a matematikai modellektől a számítógépes szimulációig található leírás.



2.30. ábra

Lézeres bevonatolás geometriája [Iravani-Tabrizipour, 2007]

A lézeres bevonatolás modellezéseként Mehrdad Iravani-Tabrizipour disszertációjában a bevonatolás valósidejű szimulációját mutatja be [Iravani-Tabrizipour, 2007]. A **2.30. ábra** a lézeres bevonatolás geometriai adatait tartalmazza, melyeket a szerző matematikai modellezésnél (leírásnál) használt.

2.12. Összefoglalás

Jelen fejezet a teljeség igénye nélkül átfogó képet kívánt nyújtani a felületkezelésekről, a felületmódosító technológiák szerepéről (hagyományos és körszerű eljárásokról), konkrétan a lézeres felületkezelésről: történeti háttéréről, osztályozásáról, a technológiai paramétereiről, a kialakult réteg szerkezetéről, tulajdonságairól, s bemutatja a szakirodalomban található ezzel kapcsolatos kutatások eredményeit is.

Mindezen elméleti háttér a további fejezeteket alapozza meg; ezek már a kutatásom konkrét eredményeit is bemutatják, elemzik, s végül a szimulációs technikák matematikai és modellezési területére is elvezetik az olvasót.

3. Betétedzésű acél lézeres felületkezelése

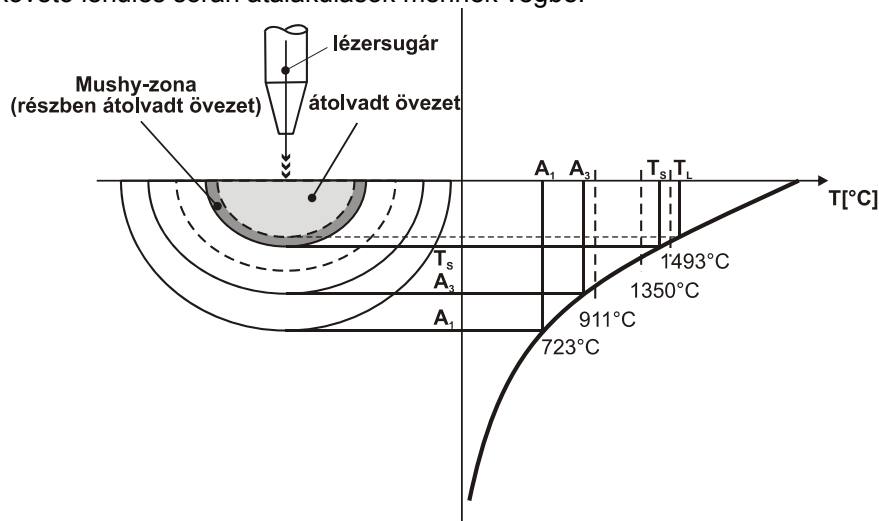
3.1. Bevezető

Jelen fejezet a lézeres felületátolvasztás folyamatait (átalakulások, hőhatások, szövetszerkezeti változások) elemzi, CO₂-lézerrel átolvasztott C15 minőségű acél-próbák felületi rétegének, illetve a keletkezett rétegek geometriai adatait is értékeli. A lézeres kísérleteket, melyek egyedi (átlapolatlan) sáv előállítására és vizsgálatára irányultak, a következő technológiai paraméterekkel végeztük: alkalmazott sugárteljesítmény: 1, 2, 3, illetve 5 kW; az előtolási sebesség: 300, 500, 700 mm/perc. A lézeres kezelésre egy TRUMF gyártmányú, TLC105 típusú CO₂-lézer alkalmazásával a budapesti Bay Zoltán Anyagtudományi Intézet (BAYATI) laboratóriumában került sor. A kísérletek kiértékelését a Miskolci Egyetem Anyagtudományi Intézet laboratóriumában végeztük.

Ezen kísérleti eredmények kiindulási pontot képeznek a szimulációs modell kialakításához.

3.2. Átalakulások, hőmérsékletövezetek a lézeresen átolvasztott C15 minőségű acélban

A megolvadt tócsa alatt a hőhatásövezetben mind a felmelegedés, mind pedig az azt követő lehűlés során átalakulások mennek végbe.

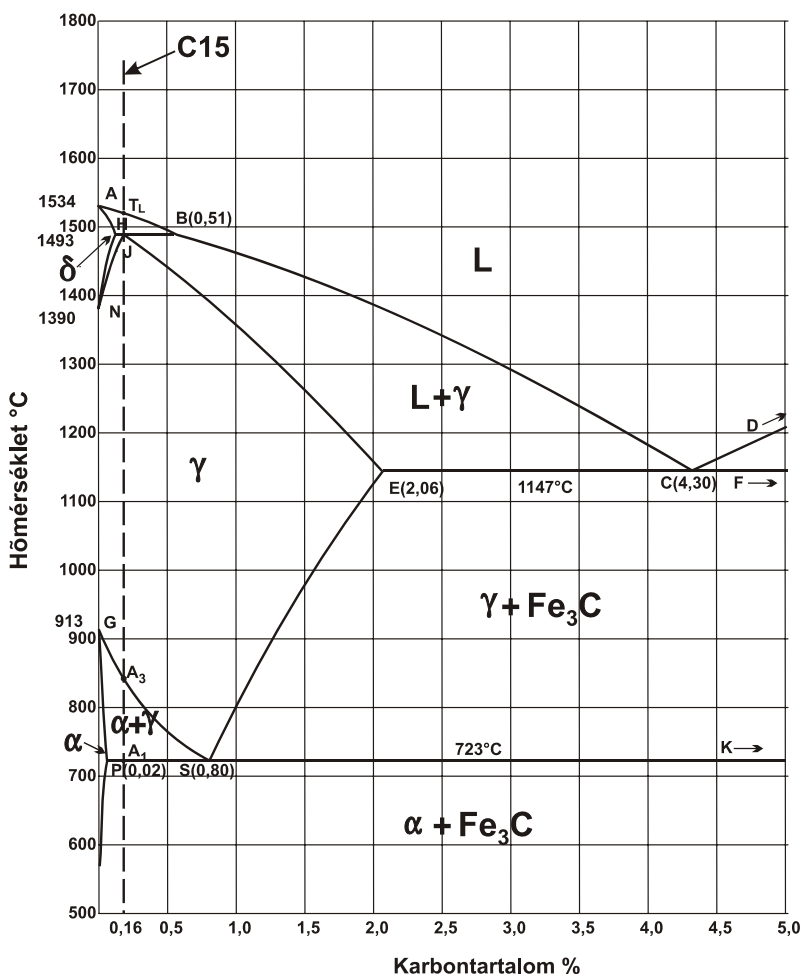


3.1. ábra

Lézeresen átolvasztott sáv hőmérséklet-eloszlása [Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A **3.1. ábrán** a lézersugár környezetében kialakult jellegzetes hőmérsékleti tartományokat mutatom be. A tócsa középvezetében kialakuló hőmérséklet-eloszlás az ábra jobb oldalán látható.

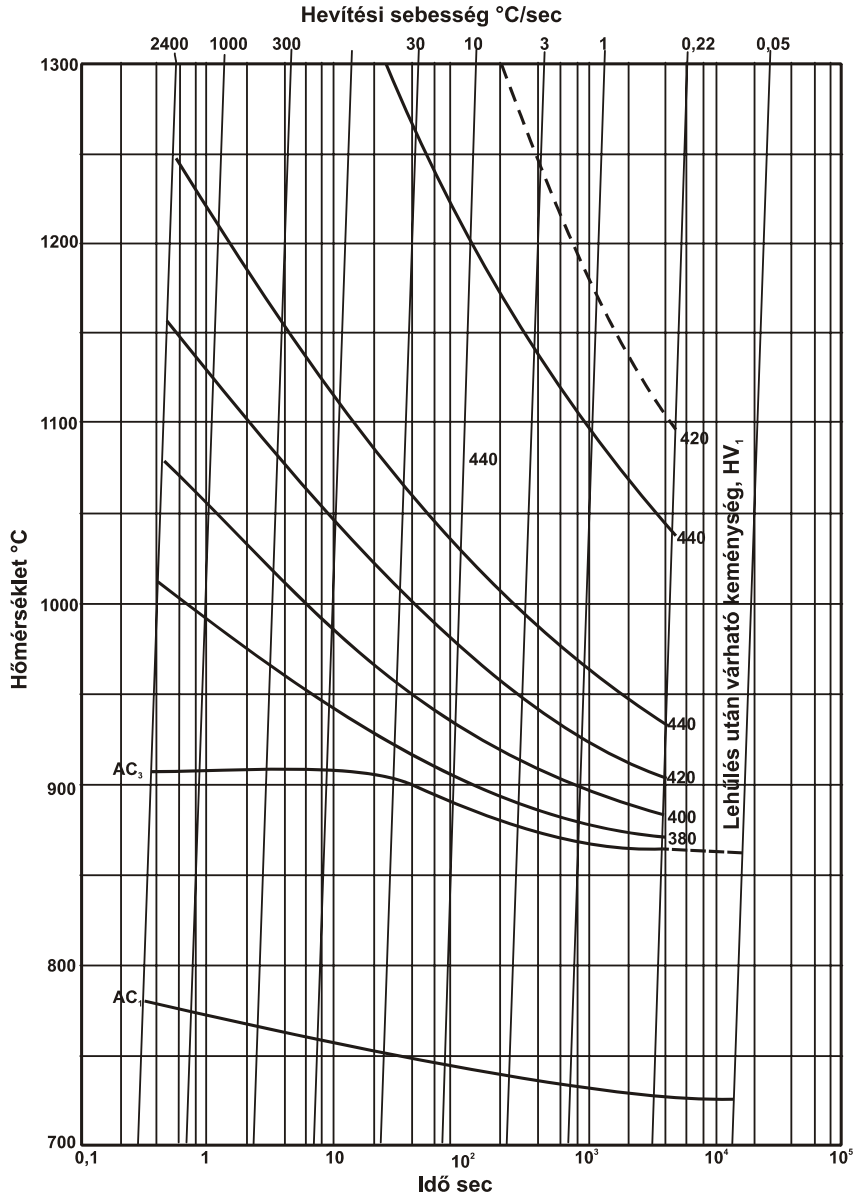
A végbemenő átalakulások jellege, valamint egyensúlyi hőmérsékletei a vizsgált ötvöztelen acél esetében a Fe-Fe₃C diagramról olvashatók le (**3.2. ábra**). Az egyensúlyi diagram azonban csak igen lassú hőmérséklet-változásokra érvényes. Nagyon gyors hevítéskor vagy hűtéskor az átalakulási folyamatoknak a kezdő, illetve véghőmérséklete megváltozik (hevítéskor a folyamatok az egyensúlyinál nagyobb, hűtéskor pedig annál kisebb hőmérsékleten kezdődnek meg és mennek végbe) [Bitay-PhD értekezés, 2002].



3.2. ábra

Fe-Fe₃C diagram a vizsgált acél (0,16% C) összetételével

Ezt a változást is tükrözik a folyamatos hevítésre vonatkozó ausztenitesítési diagramok, illetve a folyamatos hűtésre vonatkozó ausztenítátalakulási diagramok (3.3. és 3.10 ábra).



3.3. ábra

C15 acél folyamatos hevítésre érvényes ausztenit-átalakulási diagramja [Olrich, 1972]

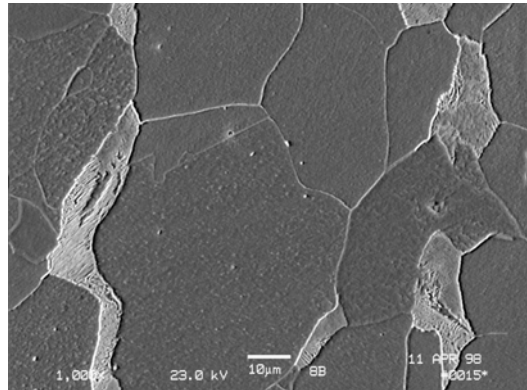
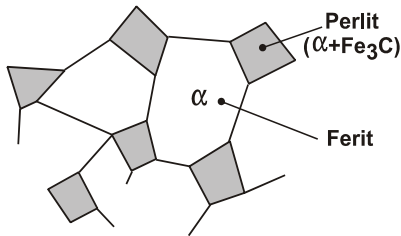
Az adott hevítési sebesség, illetve maximális hőmérséklet utáni hűtés által eredményezett keménység HV_1 .

Az acél felületi hőmérséklete jelentősen meghaladja a likvidusz hőmérsékletet, ami felett csak olvadék, míg a likvidusz és szolidusz közötti tartományban az olvadék és szilárd fázis együttesen van jelen (Mushy-zóna).

Mindezek alatt a hőhatásövezet helyezkedik el, mely az A_1 – A_3 , A_3 – T_S átalakulásoknak megfelelő izotermákkal jellemezhető. A kezelt rétegekben fénymikroszkópi vizsgálattal ezek az övezetek ugyan nem különíthetők el, az átalakulások szempontjából viszont fontos ezeket külön tárgyalni.

3.2.1. Átalakulások hevítéskor

A C15 minőségű acél szövete egyensúlyi hűtést követően szobahőmérsékleten ferrit-perlites, megközelítőleg 80% a ferrit, a többi perlit (**3.4. ábra**).



$N = 1000\times$

3.4. ábra

Az C15 acél kiindulási szerkezete (ferrit-perlit) sematikus ábrán és scanning elektronmikroszkópos felvételen

Az A_1 hőmérséklet ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$) alatt a szerkezet lényegesen nem változik.

Az A_1 – A_3 hőmérsékletek közötti (723°C – 850°C) zónában a perlit ausztenitté való átalakulása elkezdődik, ez az eutektoidos cementit fokozatos oldódásával és az ausztenit karbonnal való dúsulásával történik.

Az A_3 és $T = 911^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletek közötti zónában a ferrit csak úgy tud ausztenitessé válni, ha C-t vesz fel (az át nem alakult ferrit karbontartalma igen kicsi, ezért lehet a szénvasra jellemző átalakulási hőmérséklettel, $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ -al számolni). A perlitben megtörténik az α -Fe ausztenitté (γ -Fe) való átalakulása, a cementit egy része feloldódik. A karbon a ferrit irányába diffundál (Fe_3C oldódik), ebből követke-

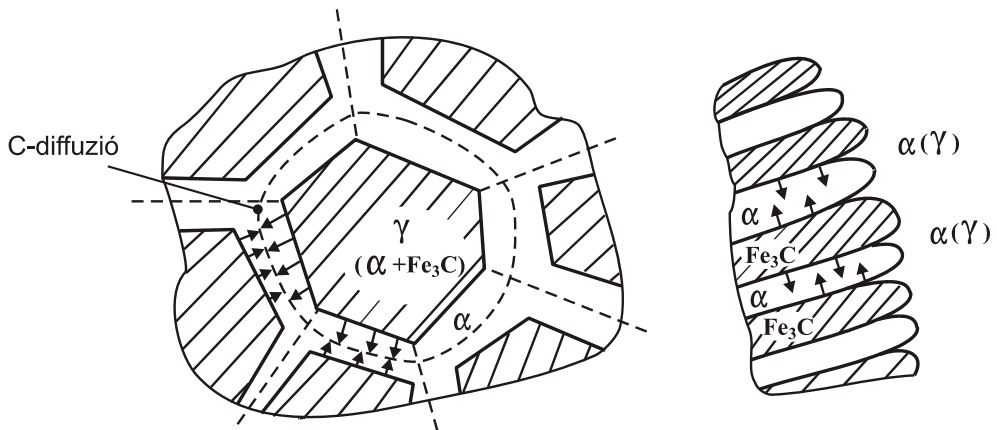
zik, hogy nő a γ (ausztenit) mérete (ebben található a maradék karbon). Ebben a hőmérséklettartományban – ha elég hosszú idő áll rendelkezésünkre – az ausztenitesedés teljesen végbemehet [Bitay-Doktori értekezés, 2002].

A $T = 911^\circ\text{C}$ és T_S hőmérsékletek közötti zónában a ferrit ausztenitesedik, anélkül hogy korbont kellene oldania, azaz az ausztenitesedésben nincs szükség diffúzióra.

Végbemenő átalakulások a $T_{911}-T_S$ között:

- proeutektoidos $\alpha \rightarrow \gamma$ – diffúzió nélkül, valószínűleg kooperatív atommozgással végbemenő átalakulás;
- perlit α fázisa $\rightarrow \gamma$ – diffúzió nélkül;
- perlit Fe_3C fázisa $\rightarrow$ részben feloldódik.

A perlit Fe_3C tartalma részben feloldódik, a karbon elkezd kifelé diffundálni a volt proeutektoidos ferritbe (3.5. ábra).



3.5. ábra

Az C15 acél kiindulási szerkezetének (ferrit-perlit) átalakulása hevítéskor

Az 1493°C hőmérséklettől az ausztenit felbomlik δ -ferritre és olvadékra, a kristályos fázis folyamatosan oldódik, ahogy közeledünk a $T_L \sim 1530^\circ\text{C}$ hőmérséklethez.

Megjegyzendő, hogy az A_1 és A_3 kritikus pontok abszolút értékei magasabb hőmérsékleti zónába tolódnak el a felmelegítés sebességének növelésével.

3.2.2. Átalakulások lehűléskor

3.2.2.1. Kristályosodás

A megolvadt rész kristályosodása dendritesen történik, melynek sebességét alapvetően az olvadékokban levő hőmérsékletgradiens és a túlhűtési viszonyok határozzák meg.

A kristályosodási folyamat az ötvözetlen C15 minőségű acél esetében még gyors hűtés esetén is közel egyensúlyi feltételek között zajlik. Ennek oka, hogy a karbon diffúziója – a szakirodalom szerint is – olyan gyors, hogy a lézeres felületkezelés viszonyai között is ki tud alakulni a közel egyensúlyi helyzet. Ennek megfelelően a következő mechanizmusok valósulnak meg [Bitay-Referat, 1998; Bitay-Doktori értekezés, 2002]:

- **1530 °C és 1493 °C hőmérséklet között** δ -ferrit dendritek kristályosodnak és növekednek az olvadékokban, mely folyamatosan karbonban dúsul. A peritektikus hőmérséklet elérésekor a 0,1% C-tartalmú ferrit és 0,51% C-tartalmú olvadék között termodinamikai egyensúly alakul ki.
- **1493 °C hőmérsékletnél** peritektikus reakció jön létre, mely felhasználja a teljes olvadékot és az összes szilárd fázist (85% olvadék, 15% δ -ferrit), és ausztenitkristályok jönnek létre 0,16% átlagos karbon tartalommal.

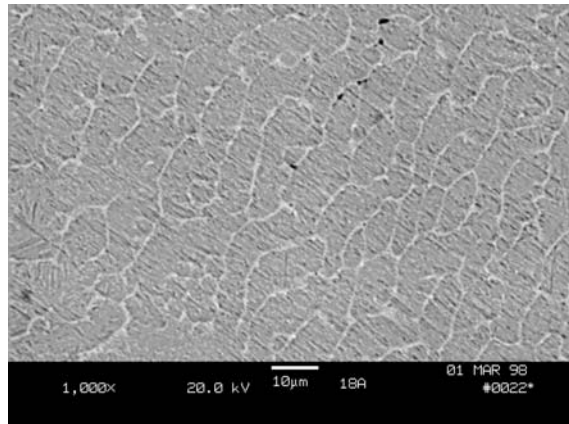
Ez a peritektikus reakció egyes szakírok szerint [Grum, 1996; García-Alonso, 1997; Ariely, 1991; Germaud, 1990; Gasser, 1992; Bloyce, 1992] a vékony rétegekben a nagy lehűlési sebesség miatt elmaradhat, mivel diffúzió által vezérelt.

Függetlenül attól, hogy a kristályosodás milyen módon valósul meg, valószínű, hogy a létrejövő szerkezet 1493 °C hőmérséklet körül tisztán ausztenites.

A dendrites kristályok mérete az átolvasztott rétegben (**3.6. és 3.9. ábra**) a dermedés sebességétől és a túlhűlés mértékétől függ.

Azoknál az ötvözeteknél, amelyeknél alacsony az ötvöző-, illetve a szénttartalom (mint ebben az esetben is), a dendrit határ csak speciális kémiai maratással észlelhető (például pikrálapú marószert használataival).

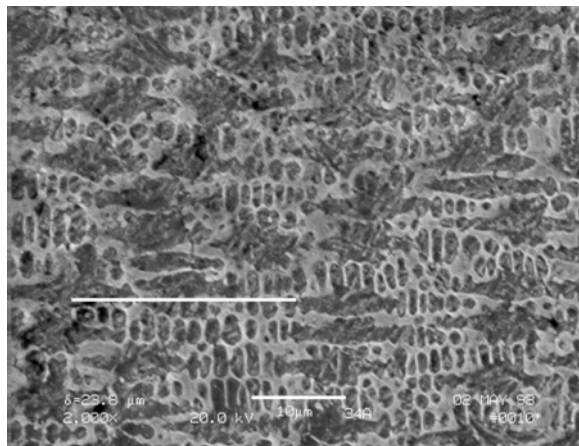
A kialakult dendritben a karbon tartalom megfelel az átlagos összetételnek, lévén, hogy a karbon gyorsan diffundál, így a karbonkoncentráció-eloszlás lényegében nem befolyásolja az átalakulást.



3.6. ábra

Lézeresen átolvasztott ($P = 3\text{ kW}$, $v = 700\text{ mm/perc}$) C15 acél szövetének scanning elektronmikroszkópos felvétele: az alsó réteg szerkezete a felülettől 0,8 mm mélységben

A hűlési sebesség meghatározásához a szekunder dendritág távolságát mértük, ez a gyakorlatban is jól bevált módszer (lásd a **2.10.4. alfejezetben**).



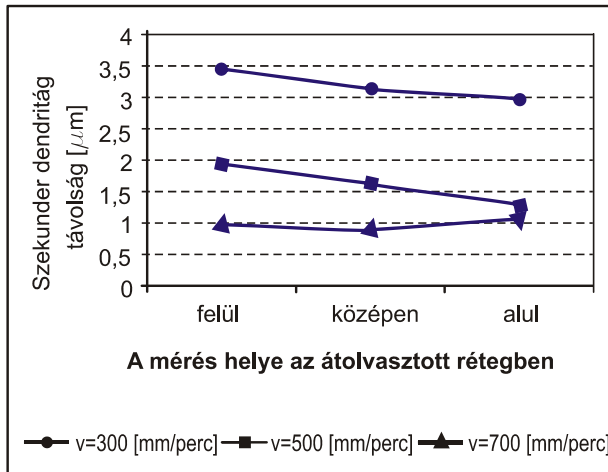
$N = 2000x$

3.7. ábra

Lézeresen átolvasztott C15 acél ($P=3\text{ kW}$, $v=500\text{ mm/perc}$)
(a felső réteg szerkezete) [Bitay-Referat, 1998; Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A legnagyobb hűlési sebességet a kristályosodásnál a lézernyaláb legnagyobb pásztázósebességénél észleltünk (700 mm/perc , **3.8. ábra**). Mint ismeretes, a szekunderdendritág-távolság fordítottan arányos a kristályosodás hűlési sebességével.

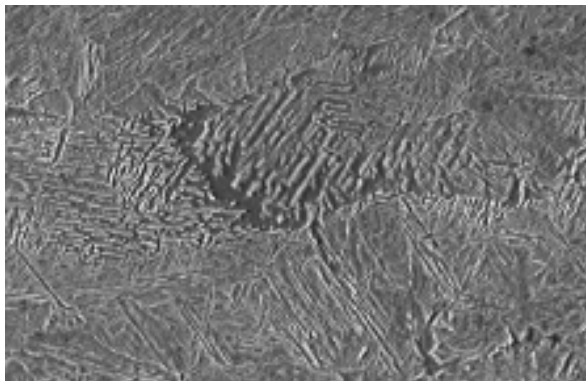
Tekintve, hogy az átolvasztott réteg vastagsága nagyon kicsi (~ 1 mm), a lehűlési sebesség eltérése az átolvasztott réteg felső, illetve alsó része között nem jelentős.



3.8. ábra

A lézernyaláb pásztázósebességének hatása a szekunderdendritág-távolságra, a megolvadt zóna különböző rétegmélységében (fölső/középen/alul), $P = 3\text{kW}$ [Bitay-Referat, 1998; Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A hűlési sebesség általában nő a megolvadt tócsán belül a felülettől mért távolság függvényében (3.8 ábra), kivéve azt az esetet, mikor a lézernyaláb pásztázósebessége nagy ($v = 700$ mm/perc).



$N = 1500x$

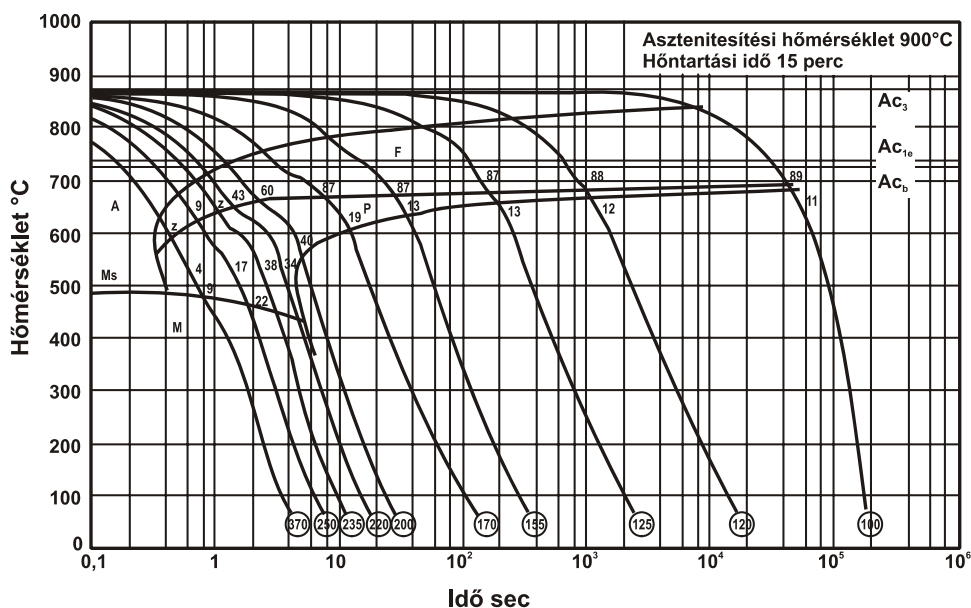
3.9. ábra

Mikrolunker a lézeresen átolvasztott zóna közepén ($P = 3\text{kW}$, $v = 500$ mm/perc) (martenzit és bénit mátrix) [Bitay-Referat, 1998; Doktori értekezés, 2002]

Ez utóbbi speciális esetben a létrejött átolvadrt réteg jóval kisebb, ennek következtében az olvadék és a szilárd alapanyag határán a hűlési sebesség nagyobb lesz, mint a tócsa közepén. Ilyenkor a kristályosodás nagy valószínűséggel a megolvasztott zóna közepében fejeződik be, ami porozítások és mikrolunkerek képződéséhez vezethet (3.9. ábra).

3.2.2.2. Fázisátalakulások szilárd állapotban

Az ausztenit átalakulása C15 acélban megegyezik a hipoeutektoidos acélokra jellemző átalakulási folyamatokkal.



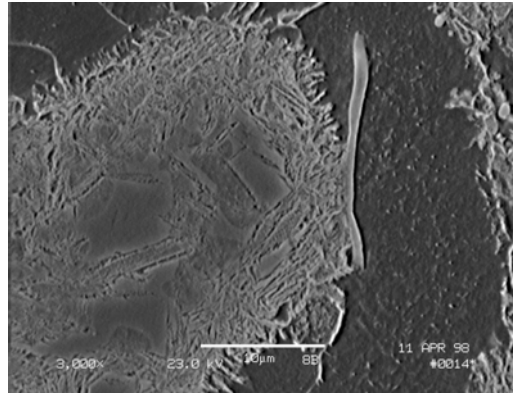
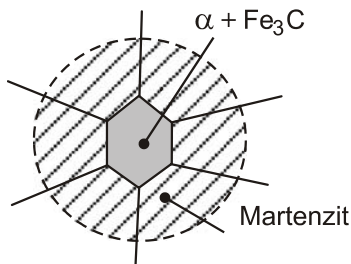
3.10 ábra

C15 acél folyamatos hűtésre érvényes ausztenitátalakulási diagramja [Olrich, 1972]

A lézeres felületkezelés során a hűlés olyan gyors, hogy nagy valószínűséggel martenzit és bénit keletkezik. Erre a megállapításra jutunk, ha megvizsgáljuk a C15 acél folyamatos hűtésre érvényes ausztenitátalakulási diagramját.

A 3.10. ábrán feltüntetett folyamatos átalakulási diagramból megállapítható, hogy az átlagos hűlési sebességtől függően a C15 acél szövetszerkezete többnyire heterogén jellegű: metastabil szövetelemekből (martenzitból, bénitból, valamint ferritből és perlitből) áll. Ezek az átalakulások végbemennek a lézeresen átolvasztott acélréteg kristályosodásakor keletkezett ausztenitben, mind a megolvasztott zónában, mind pedig a hőhatásövezetben.

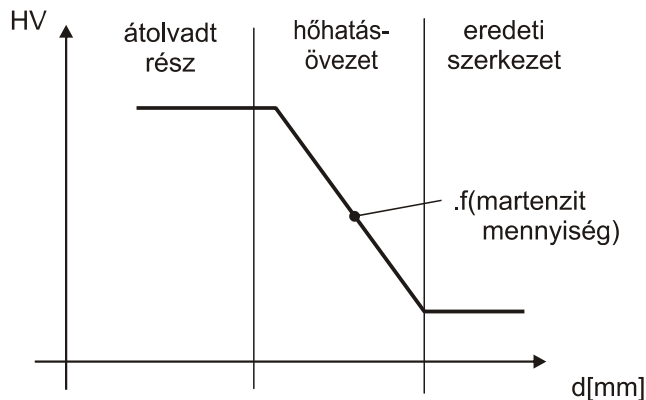
A hőhatásövezet a felmelegítés után vagy tisztán ausztenitből, vagy ausztenit és ferrit keverékéből áll, ez a rétegben elért csúcshőmérséklettől függ. A lézeresen kezelt acél felületén a nagy hűlési sebesség következtében az ausztenitből döntően martenzit (esetleg kisebb mennyiségben bénit) keletkezik [Bitay-Referat, 1998; Bitay-Doktori értekezés, 2002].



3.11. ábra

Martenzit keletkezése a hőhatásövezetben, sematikus ábrán és scanning elektronmikroszkópos felvételen [Bitay-Tanulmány, 1998]

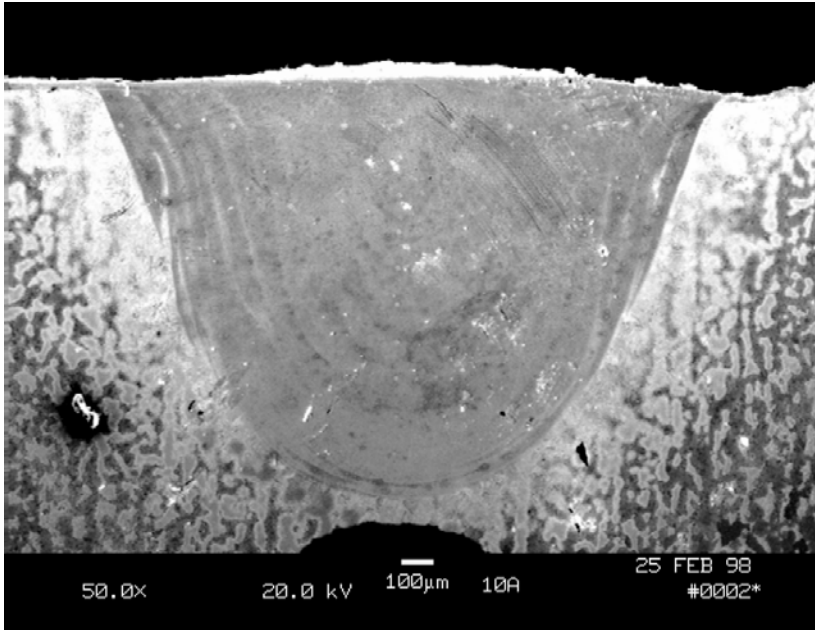
A martenzit és bénit keverékének keménysége egyrészt a kettő arányától, másrészt az ausztenitből képződött martenzit karbontartalmától függ. Minél nagyobb az ausztenit karbontartalma, annál nagyobb a martenzites rácstorzulása és ennek eredményeképpen a keménysége is [Ion, 1992].



3.12. ábra

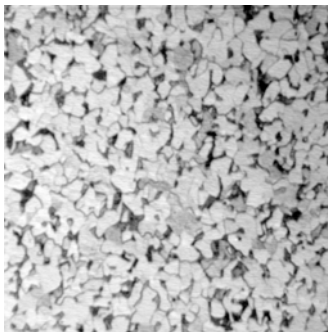
A keménység eloszlása a lézeresen átolvasztott felülettől mért távolság függvényében [Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A lézeresen átolvasztott felületi réteg szövetszerkezete nem homogén, makro- és mikroszerkezete a felülettől mért távolság függvényében folyamatosan változik, ezt a megállapítást illusztrálják a **3.13.–3.16. ábrák**on látható mikroszkópos szövetképek [Bitay-Referat, 1998; Doktori értekezés, 2002].

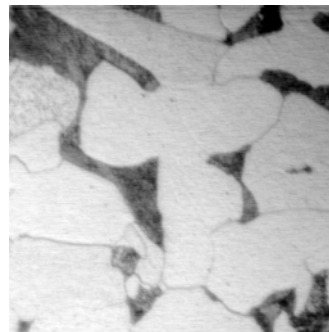


3.13. ábra

Lézeresen átolvasztott C15 acél makroszerkezete (egyedi sáv)
[Bitay-Referat, 1998; Bitay-Doktori értekezés, 2002]



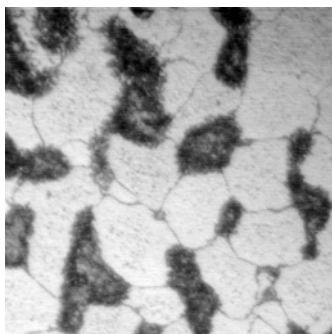
$N = 50x$



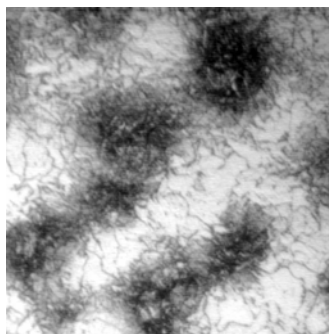
$N = 1000x$

3.14. ábra

Normalizált C15 acél szerkezete



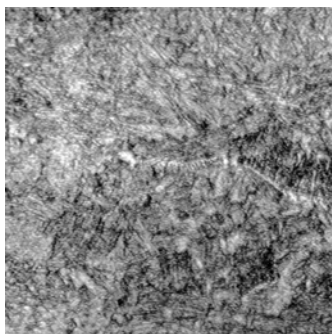
$N = 800x$



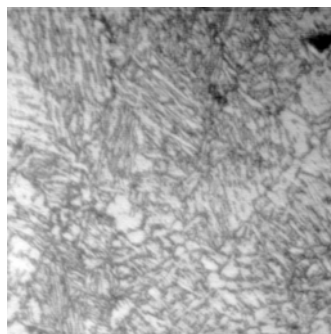
$N = 800x$

3.15. ábra

A hőhatásövezet szerkezete, A_1 – A_3 hőmérséklet között



$N = 50x$



$N = 100x$

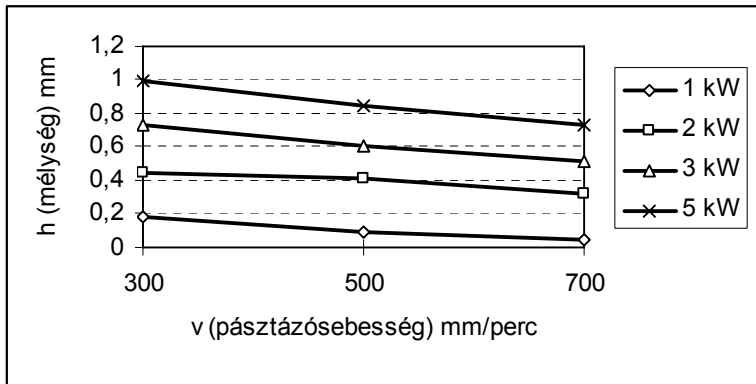
3.16. ábra

Az átolvasztott zóna szerkezete

3.3. A C15-ös acél lézeresen átolvasztott felületi rétege keresztmetszetének vizsgálata (egyedi sávok)

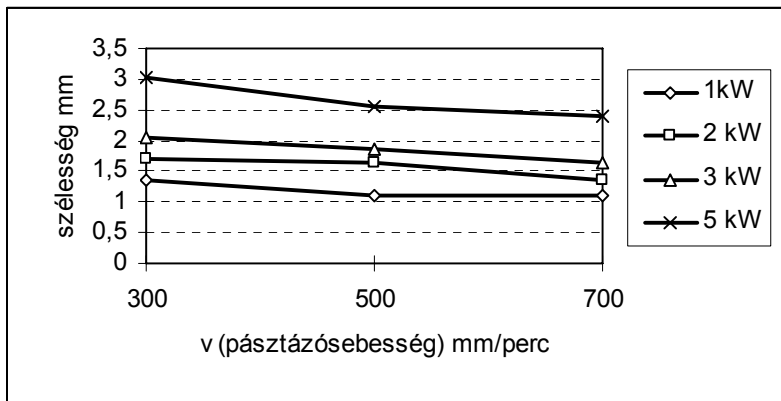
3.3.1. A lézeresen átolvasztott réteg geometriai paraméterei

A lézeresen átolvasztott felületi réteg keresztmetszetét vizsgálva lemértük az egyedi sávok szélességét, mélységét. A különböző sugárteljesítmények mellett a pásztázósebesség függvényében a sáv mélységének változását a **3.17. ábra**, illetve szélességének változását a **3.18. ábra** szemlélteti.



3.17. ábra

A kezelt réteg mélysége a pásztázósebesség függvényében [Bitay–Roósz, 1998]



3.18. ábra

A kezelt réteg szélessége a pásztázósebesség függvényében [Bitay–Rowshan, 1998; Bitay–Referat, 1998; Rowshan, 1998]

A különböző teljesítményű lézersugárral és pásztázósebességgel átolvasztott próbatestek keresztmetszetében készített mikroszkópos szövetképeket a **3.19.–3.21. ábrák** [Bitay–Rowshan, 1998; Bitay-Referat, 1998, Rowshan, 1998] szemléltetik.

A keresztmetszetek többségében jól megkülönböztethető három zóna:

1. megolvadt, majd kristályosodott zóna, melyben a csúcshőmérséklet meghaladta az olvadási hőmérsékletet, $T_{\max} > T_{\text{op}}$;
2. teljesen ausztenitesedett zóna, melyben a nagy hűlési sebesség eredményeképpen metastabil szerkezet jött létre, $A_{C3} < T_{\max} < T_{\text{sz}}$;
3. részlegesen ausztenitesedett zóna, melyben vegyes szerkezetek jöttek létre, $A_{C1} < T_{\max} < A_{C3}$.

A lézeresen átolvasztott felületi zónák vastagságát nem lehetett 0,001 mm pontossággal meghatározni még a keménységmérések ($HV_{0,3}$) alapján sem. Mindezek mellett a hozzávetőleges értékek elfogathatóak és elégségesek ahhoz, hogy levonjuk az alábbi következtetéseket:

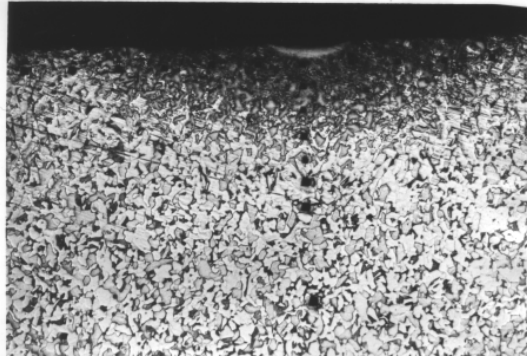
- a felületkezelt zónák vastagsága és szélessége is függ a lézersugár teljesítményétől és a pásztázósebességtől;
- a lézersugár teljesítményének növelésével és a pásztázósebesség csökkenésével a kezelt réteg vastagsága növekedik;
- a lézeresen kezelt sávok szélességére is érvényesek a fenti megállapítások, de értékben sokkal kisebb változást eredményeznek.

A kezelt felületi rétegek elemzése után megállapítható, hogy az 1 kW-os lézersugár-teljesítmény esetében csak kis pásztázósebességgel (300 mm/perc) lehetett elérni azt, hogy elegendő hőhatást kapjunk a felület megolvasztásához. Azokban az esetekben, ahol a pásztázósebesség nagyobb volt (500, illetve 700 mm/perc), a maximális hőmérséklet az olvadási pontot nem érte el, a réteg keménysége a szilárd állapotban való átalakulásokkal magyarázható [Bitay–Rowshan, 1998; Bitay-Referat, 1998, Rowshan, 1998].

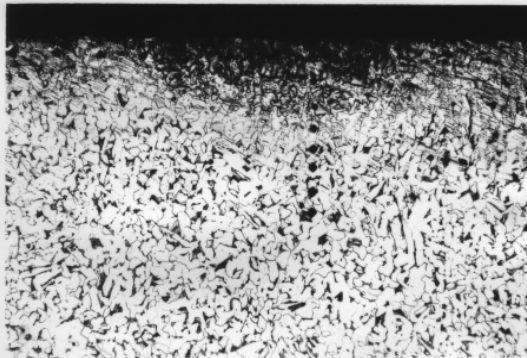
3.1. tábla. A lézeresen átolvasztott próbadarabok zónáinak vastagsága

A lézernyaláb teljesítménye	A pásztázósebesség	A zónák vastagsága – a kritikus hőmérsékleti tartományokban		
		$T > T_L$	$T > A_{C3}$	$T > A_{C1}$
[kW]	[mm/perc]	[mm]	[mm]	[mm]
1	300	0,05	0,22	0,54
	500	0	0,15	0,43
	700	0	0,15	0,46
2	300	0,65	0,8	1,06
	500	0,53	0,68	0,86
	700	0,46	0,52	0,66
3	300	0,68	0,9	1,25
	500	0,68	0,72	1,08
	700	0,5	0,61	0,85

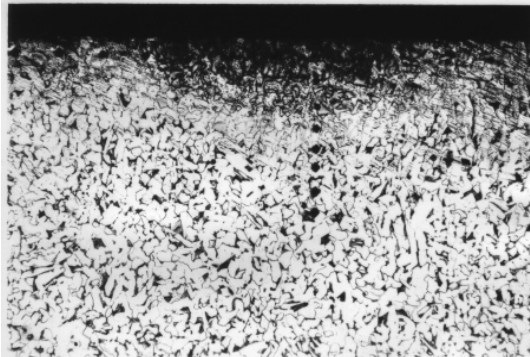
pásztázó-
sebesség:
 $v = 300 \text{ mm/perc}$



$v = 500 \text{ mm/perc}$



$v = 700 \text{ mm/perc}$



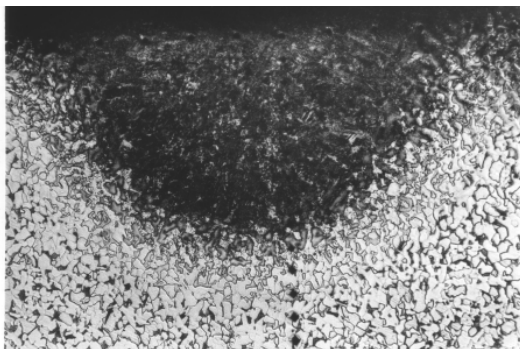
Nital 5%

$N=100\times$

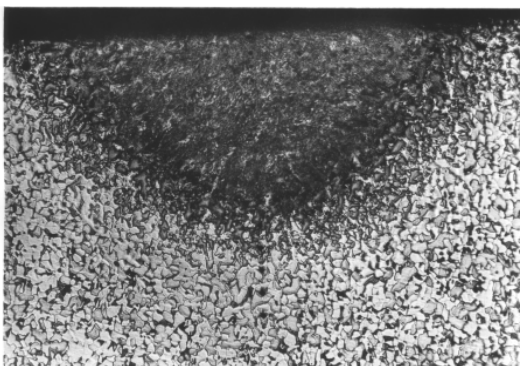
3.19. ábra

Lézeresen átolvasztott C15-ös acélpróba keresztmetszetének mikroszkópos szövetszerkezeti felvétele (a lézersugár teljesítménye: $P = 1 \text{ kW}$)

pásztázó-
sebesség:
 $v = 300 \text{ mm/perc}$



$v = 500 \text{ mm/perc}$



$v = 700 \text{ mm/perc}$



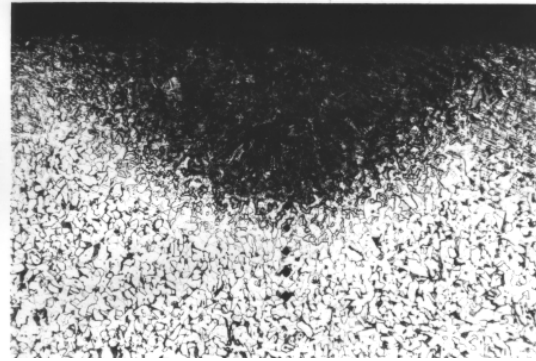
Nital 5%

$N=100\times$

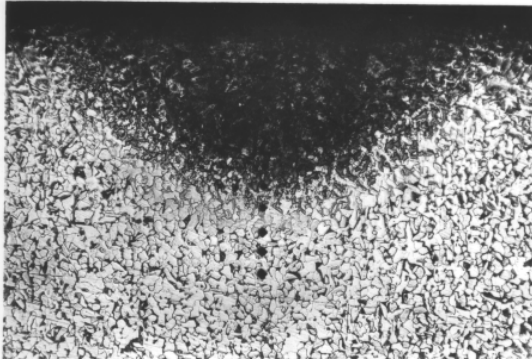
3.20. ábra

Lézeresen átolvasztott C15-ös acélpróba keresztmetszetének mikroszkópos szövészerkezeti felvétele (a lézersugár teljesítménye: $P = 2\text{kW}$)

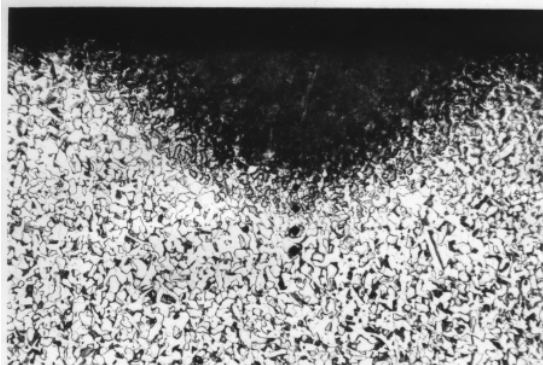
pásztázó-
sebesség:
 $v = 300 \text{ mm/perc}$



$v = 500 \text{ mm/perc}$



$v = 700 \text{ mm/perc}$



Nital 5%

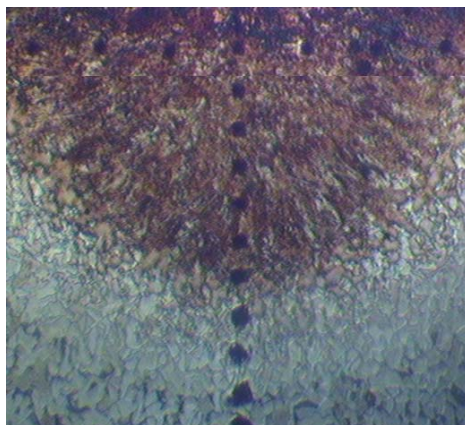
$N=100\times$

3.21. ábra

Lézeresen átolvasztott C15-ös acélpróba keresztmetszetének mikroszkópos szövetszerkezeti felvétele (a lézersugár teljesítménye: $P = 3\text{kW}$)

3.3.2. A lézeresen átolvasztott réteg keménységének vizsgálata

A lézeresen kezelt próbadarabokon keménységmérést végeztünk, mind a felülettel párhuzamosan (0,15 mm mélységben), mind a felületre merőlegesen az átolvasztott sáv középvonalában (a mérések léptéke 0,20 mm volt) [Bitay–Roósz, 2004]. A **3.22. ábra** jól szemlélteti az átolvasztott felületi rétegben kialakult három övezetet (átolvadt övezet, hőhatásövezet, eredeti szerkezet), ugyanakkor a keménységmérések nyomvonalai is láthatóak a fénymikroszkóppal készített keresztmetszeti felvételen.



Nital 5%

N=40x

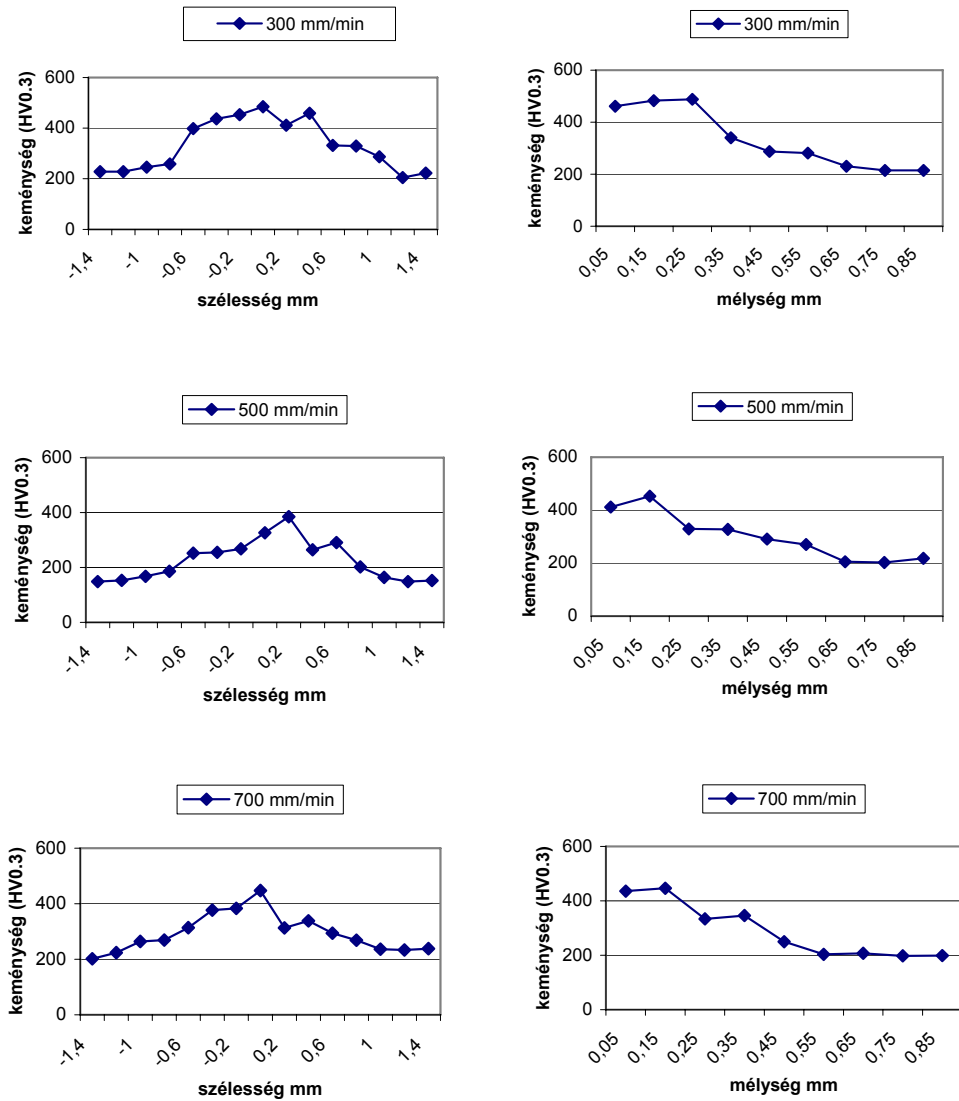
3.22. ábra

Keménységmérés szemléltetése egy átolvasztott réteg (egyedi sáv) keresztmetszetében (a lézersugár teljesítménye 1 kW) [Bitay–Roósz, 1998]

A keménységmérés eredményeit az átolvasztott sáv szélességében és mélységében, különböző pásztázósebesség és lézersugár-teljesítmény mellett a **3.23.–3.25. ábrák** tükrözik [Bitay–Rowshan, 1998; Bitay–Referat, 1998, Rowshan, 1998].

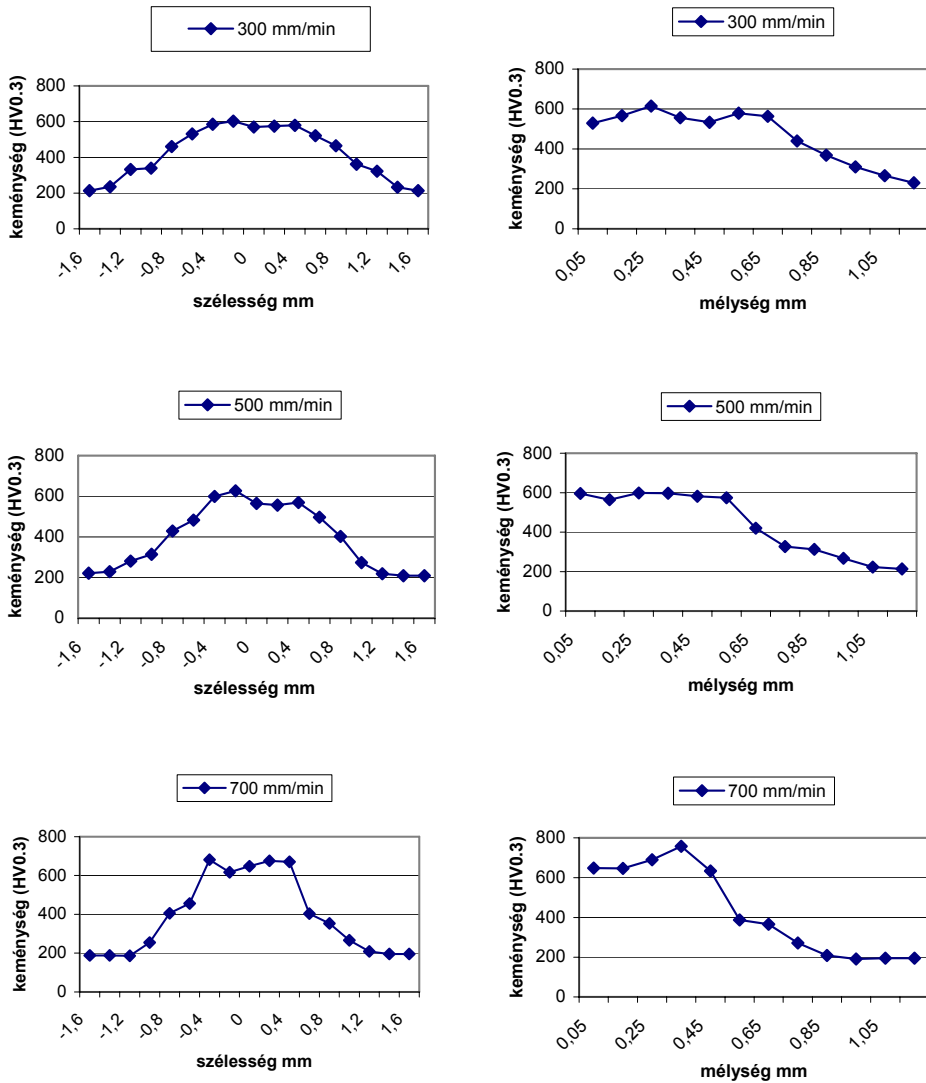
Ezen mérési eredmények következtetései igazolták az elvégzett metallográfiai vizsgálatok eredményeit. A következő ábrákon bemutatott keménységeloszlási görbéket elemezve megállapítható:

- az átolvasztás hatására a felületi réteg keménysége nagymértékben megnőtt (a kiinduló szerkezet keménysége $\sim 200 \text{ HV}_{0.3}$ volt, az átolvasztott rétegé 400 és $700 \text{ HV}_{0.3}$ között változott);
- a lézersugár teljesítményének növelésével a keménység-eloszlási görbék növekvő értékeket mutatnak mind mélységben, mind szélességben;
- a pásztázósebesség növekedésével a keménység is növekedett, hiszen a gyors lehűlés kedvezően hat a nagy mennyiségű martenzit kialakulására;
- a keménységeloszlás – a megolvadt sáv mélységben és szélességben is – a pásztázósebesség növelésével egy keskenyebb kristályosodott zónát mutat, meredekebben változó keménységértékekkel.



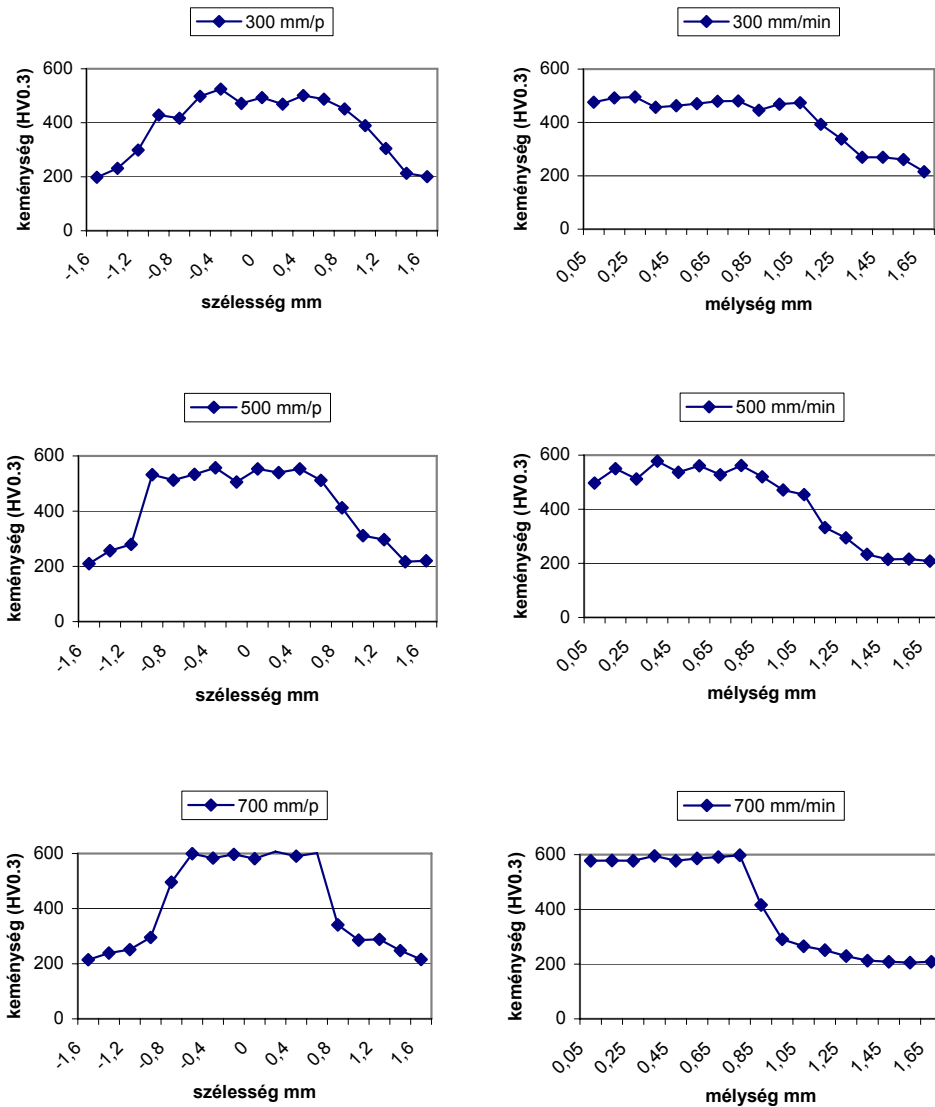
3.23. ábra

Keménységeloszlás az átolvasztott sáv szélességében, mélységében különböző pásztázósebesség mellett (a lézersugár teljesítménye 1 kW)



3.24. ábra

Keményséeloszlás az átolvasztott sáv szélességében, mélységében különböző pásztázósebesség mellett (a lézersugár teljesítménye 2 kW)

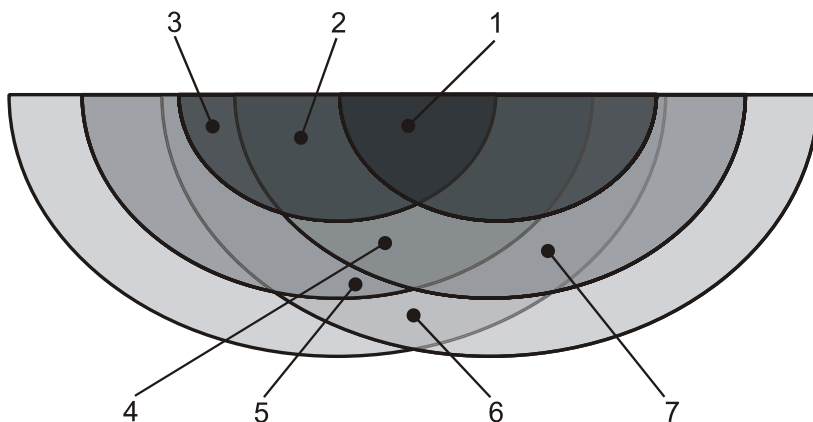


3.25. ábra

Keménységeloszlás az átolvasztott sáv szélességében, mélységében különböző pásztázósebesség mellett (a lézersugár teljesítménye 3 kW)

3.4. Átlapoló sávok hőmérsékletövezetei

A lézeres felületi átolvasztáskor a kezelést több sáv kialakításával végzik, s hogy egyenletes legyen a rétegeképzés, a sávokat átlapolják. Ezáltal az átolvadé, illetve a hőhatásövezetek is átlapolódnak, s az átalakulási folyamatok is sokkal bonyolultabbá válnak [Bitay-Tanulmány, 1998].



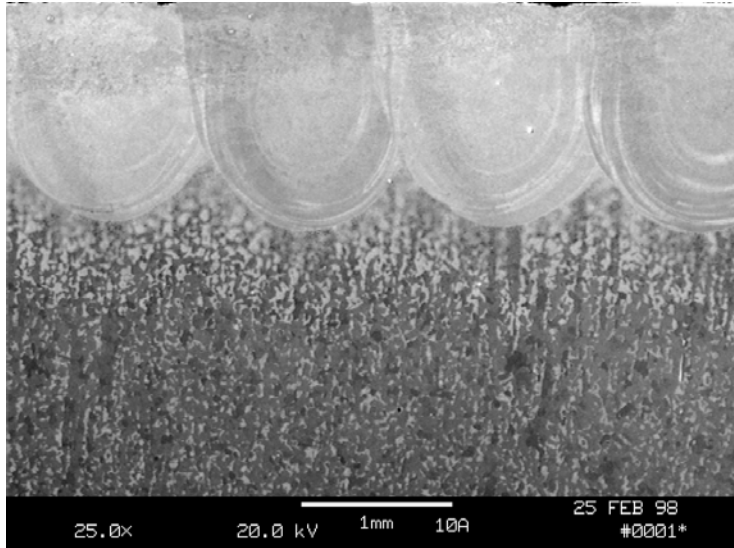
3.26. ábra

Lézeresen átolvasztott, átlapoló sávok hőmérsékletövezetei
[Bitay-Referat, 1998, Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A **3.26. ábrán** két sáv átlapolódása látható. Az egyes zónákban a következő folyamatok mennek végbe [Bitay-Tanulmány, 1998]:

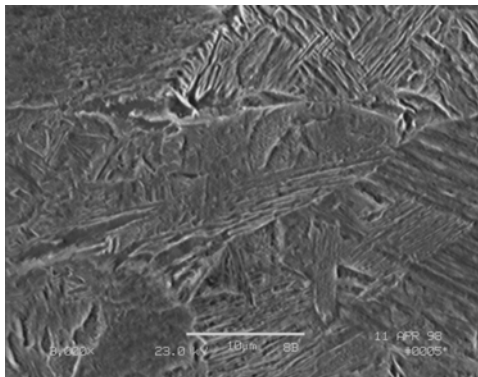
1. kétszeresen átolvasztott zóna;
2. a korábban átolvasztott zóna újra ausztenitisedik és edződik a második nyomvonal kezelése során;
3. a korábban átolvasztott zóna a második kezelés során az A_1 – A_3 hőmérsékletközbe kerül, így megeresztődés következik be, illetve megkezdődik a torzult α rácsból a C kiválása;
4. kétszeresen ausztenitisedett és edződött zóna;
5. az első nyomvonal kezelésekor edződött zónában a második nyomvonal kezelésekor részleges ausztenitisedés megy végbe, a martenzitszigetek mérete kissé nő, C diffundál a ferritbe, ennek következtében nő az ausztenitisedett terület;
6. az első kezelés vegyes – félmartenzites – szövet jött létre, mely ismét részlegesen ausztenitisedik és edződik;
7. az első nyomvonal kezelésekor a ferrit nem tudott ausztenitisedni, a második nyomvonal kezelésekor viszont egyre nagyobb rész fog ausztenitisedni, lényegében hasonló a helyzet, mint a 4-es zónában, csak kevesebb martenzit keletkezik (ferrit és nagyobb területű martenzit lesz).

A lézeres átolvasztás eredményeként a sáv mélységében haladva a szerkezet nem egyenletes. Az acélpróba (keresztirányú csiszolat) makro- és mikroszerkezetét különböző rétegekben a következő ábrák szemléltetik, a **3.26.** sematikus **ábra** jelöléseinek megfelelő zónákban [Bitay-Tanulmány, 1998]:

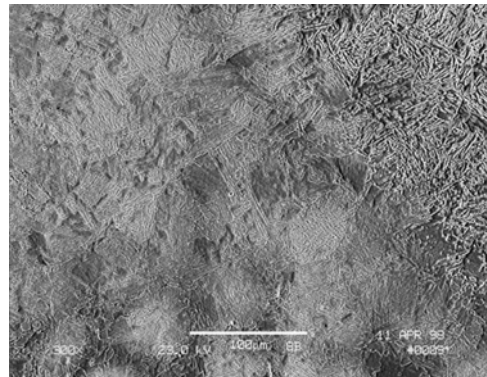


3.27. ábra

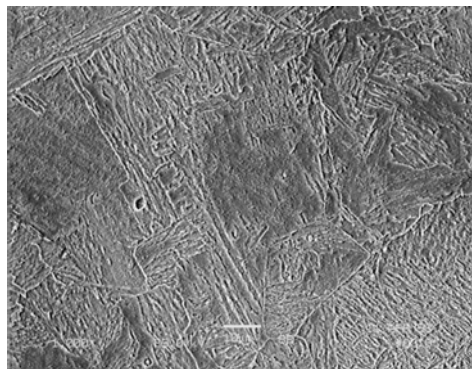
Lézeresen átolvasztott, átlapolt sávok hőmérsékletövezetei



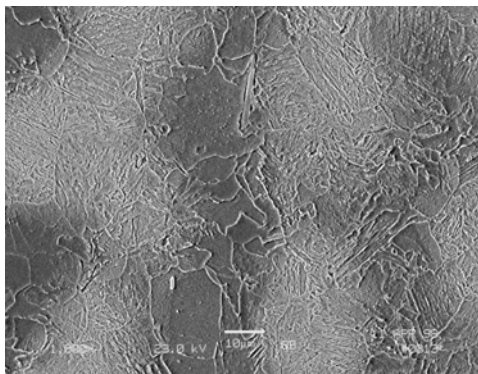
3.28. ábra
1. zóna



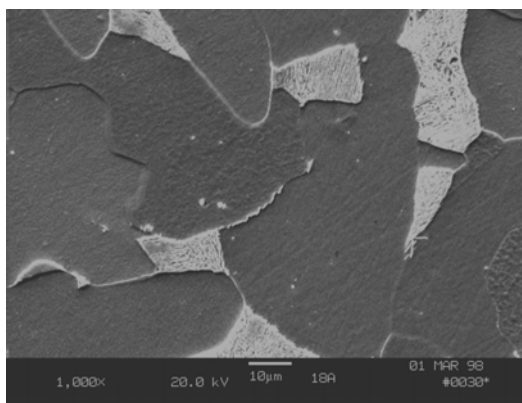
3.29. ábra
4. zóna



3.30. ábra
5. és 7. zóna



3.31. ábra
6. zóna



3.32. ábra
Alapszövet

3.5. Összefoglalás, következtetések

A lézeres felületkezelésen alapuló vizsgálatok legfontosabb eredményei az alábbiakban összegezhetők [Bitay–Rowshan, 1998; Bitay-Referat, 1998; Rowshan, 1998; Bitay-Doktori értekezés, 2002; Bitay–Roósz, 2004]:

A lézeres felületkezelés eredményeként a C15 acél felületi átolvasztását követően egy viszonylag vékony felületi rétegben metastabil fázisok (döntően martenzit és csekély mennyiségű bénit) keletkeznek. E meglehetősen kemény réteg vastagsága 3 kW sugárteljesítmény és 700 mm/perc pásztázási sebesség alkalmazásakor eléri az 1 mm-t, 3 kW sugárteljesítmény és 300 mm/perc pásztázási sebesség alkalmazásakor pedig az 1,6 mm-t.

A metallográfiai vizsgálatok igazolták, hogy a technológiai paraméterek döntő módon befolyásolják az átolvasztott, illetve hőkezelt réteg mélységét és szélességét. A lézersugár teljesítményének növelésével növekszik a rétegvastagság, a pásztázási sebesség növelésével csökken. A mérési sorozat eredményei alapul szolgálhatnak az optimális paraméterek kiválasztásához.

A kísérletek tapasztalata, hogy azonos sugárteljesítménynél az előtolási sebesség 300-ról 700 mm/perc-re történő változtatása egyenletesebb rétegvastagságot biztosít.

A lézeres felületátolvasztás esetében a kialakult hűlési sebesség hatása jól becsülhető a szekunderdendritág-távolság mérésén keresztül.

Az átolvasztás hatására a felületi réteg keménysége nagymértékben megnőtt, a kiinduló szerkezet keménysége $\sim 200 \text{ HV}_{0,3}$ volt, az átolvasztott rétegé 400 és 700 $\text{HV}_{0,3}$ között változott.

Az átolvasztott réteg maximális keménységét az alkalmazott lézersugár legmagasabb teljesítmény értékénél (300 kW), illetve a maximális pásztázósebességnél (700 mm/perc) érte el.

A metallográfiai vizsgálatok igazolják a nem egyensúlyi hevítési és hűtési körülmények hatására végbemenő átalakulási folyamatok jellegére vonatkozó elméleti megfontolásainkat.

4. Lézeres felületkezelés matematikai modellezésének megközelítései

4.1. Bevezetés

A matematikai modellezés a számítógépek és szoftverek robbanásszerű fejlődése óta egyre fontosabb szerepet játszik a különböző folyamatok megértésében, leírásában és a folyamat lefolyásának, illetve kimenetének a becslésében. Ez a fejlődés különösen jelentős a természettudományok és a mérnöki tudományok területén.

A matematikai modellek számítástechnikai alkalmazásakor alapvetően két módszer merül fel, a véges elemek (VEM) és a véges differenciák (VDM) módszere.

A matematikai modellezés az 1940-es években indult első nagy fejlődésének, mikor a sugárhajtású repülőgépek megjelenésével egy sor olyan probléma jelent meg, amelyek a hagyományos analitikai módszerekkel nem voltak megoldhatók, és a megoldást kereső kutatások végül a matematikai modellezés elméletének kidolgozásához vezettek [Harold, 1976].

A következőkben a két módszer lézeres hőkezeléskor való alkalmazására láthatunk egy-egy példát.

4.2. A véges differenciák módszerének alkalmazása lézeres hőkezelés esetén

Az alfejezet Noé Cheung – Maria Aparecida Pinto – Maria Clara Filippini Ierardi – Amauri Garcia *Mathematical Modeling and Experimental Analysis of the Hardened Zone in Laser Treatment of a 1045 AISI Steel* című tanulmánya alapján készült.

A lézeres hőkezelés során az anyagban lejátszódó folyamatok megértésének egyik feltétele a lézersugár hatására az anyagban kialakult hőmérséklet-eloszlás számítása. A hőmérséklet-eloszlás elméleti számításakor számos körülményt figyelembe kell venni. Ilyen például a lézernyaláb intenzitása, a kezelt anyag abszorpciós képessége, az anyagban hőmérséklet-változás hatására lejátszódó folyamatok és a hővezetési tényező hőmérsékletfüggése [Cheung, 2004].

A továbbiakban a következő feltételezéseket vesszük alapul:

- a lézernyaláb Gauss-féle lézersugárnyalábnak tekinthető (Gauss-féle fókuszált lézersugárnyaláb: tengelyszimmetrikus lézernyaláb);
- az anyag homogén;
- az anyag fizikai tulajdonságai függenek a hőmérséklettől;
- az anyag végtelen kiterjedésű.

A hővezetési tényező időfüggése a következő összefüggéssel fejezhető ki [Holman, 1972]:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.1)$$

ahol

ρ : sűrűség, $\frac{kg}{m^3}$

c : fajhő, $\frac{J}{kg \cdot K}$

k : hővezetési tényező, $\frac{W}{m \cdot K}$

T : hőmérséklet, K

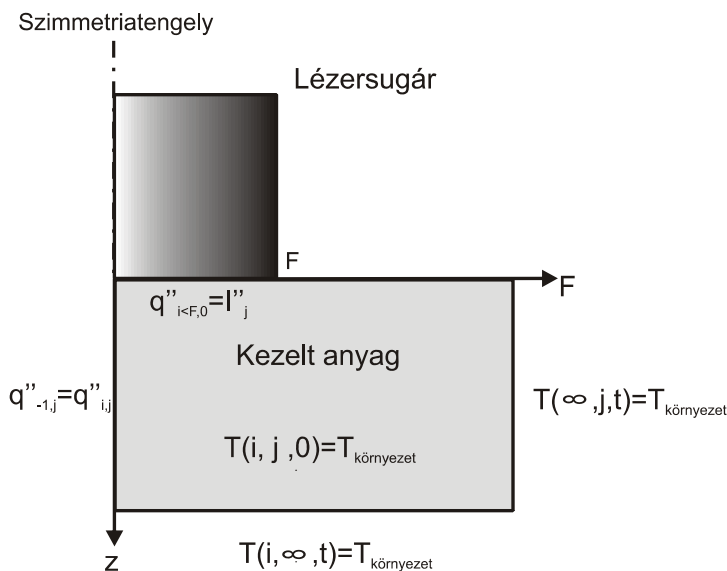
t : idő, s

r, z : a hengerkoordináta-rendszer koordinátái, m

ϕ : irányszög, rad

$\dot{q}$: az egységnyi térfogatban elnyelt hőmennyiség, $\frac{W}{m^3}$

A 4.1 ábra a modellhez alkalmazott peremfeltételeket szemlélteti.



4.1. ábra

A peremfeltételek sematikus ábrázolása [Cheung, 2004]

Mivel a hővezetési tényező független az irányszögtől, és a mikroszerkezet fázisátalakulásaiból eredő entalpiaváltozás elhanyagolható, az (4.1)-es egyenletet a következő egyszerűsített formában lehet kifejezni:

$$k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} . \quad (4.2)$$

Továbbá a szimmetriaviszonyok miatt a hőáram (q'') jobbról balra, illetve balról jobbra megegyezik, vagyis felírható a következő egyenlőség:

$$q''_{-1,j} = q''_{1,j} , \quad (4.3)$$

ahol -1 és 1 alsó index a szimmetriatengelytől való sugárirányú, a j alsó index a z tengely irányú helyzetet jelöli.

A végtelennek tekintett anyag $z =$ végtelen helyén az anyag hőmérséklete megegyezik a környezeti hőmérséklettel, vagyis felírható a következő összefüggés.

$$T(i, \infty, t) = T(\infty, j, t) = T_{\text{környezet}} , \quad (4.4)$$

ahol

i : a sugárirányban vett helyzet,

$T_{\text{környezet}}$: a környezet hőmérséklete.

Az anyag felszínén, vagyis $z = 0$ helyen a lézersugárzásból elnyelt energia hővezetéssel jut az anyag belsejébe, mely a következő egyenletből származtatható:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{i,0} = I'' , \quad (4.5)$$

ahol I'' : az időegység alatt egységnyi felületen elnyelt hőmennyiség (W/m^2).

A (4.2)-es egyenletben megfogalmazott hővezetési problémát a hozzá tartozó peremfeltételekkel explicit véges differenciák módszerével meg lehet oldani. A hővezetési egyenletben szereplő, nem állandósult állapotú (időtől függő) tagok állandókkal helyettesíthetők, konstansnak tekinthetők. A véges differenciák módszerénél szereplő tagok pedig Taylor-sorból vagy a szomszédos elemekre felírt egyszerű hőmérlegből származtathatók.

$$T_{i,j}^{n+1} = \frac{\Delta t}{\rho_{i,j} \cdot c_{i,j}} \left[\frac{ke_{i-1,j} \cdot (r_{i,j} - 0,5 \cdot \Delta r) (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + ke_{i+1,j} \cdot (r_{i,j} + 0,5 \cdot \Delta r) (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \dots}{r_{i,j} \cdot \Delta r^2} \dots + ke_{i,j+1} \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta z^2} + ke_{i,j-1} \frac{T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta z^2} \right], \quad (4.6)$$

ahol T^n és T^{n+1} két, egymást Δt végtelen kis időintervallum (infinitézimális) idővel követő időpillanatban a hőmérséklet, Δz és Δr a z és az r tengelyen vett infinitézimális közök, ke : az ekvivalens hővezetési tényező, két szomszédos pont közötti hővezetési tényező.

Egy példán szemlélítve, a $ke_{i+1,j}$ jelölés az (i,j) és $(i+1,j)$ pontok közötti hővezetési tényezőt jelenti, vagyis a következő egyenlet írható fel:

$$ke_{i+1,j} = \frac{2 \cdot k_{i,j} \cdot k_{i+1,j}}{k_{i,j} + k_{i+1,j}}. \quad (4.7)$$

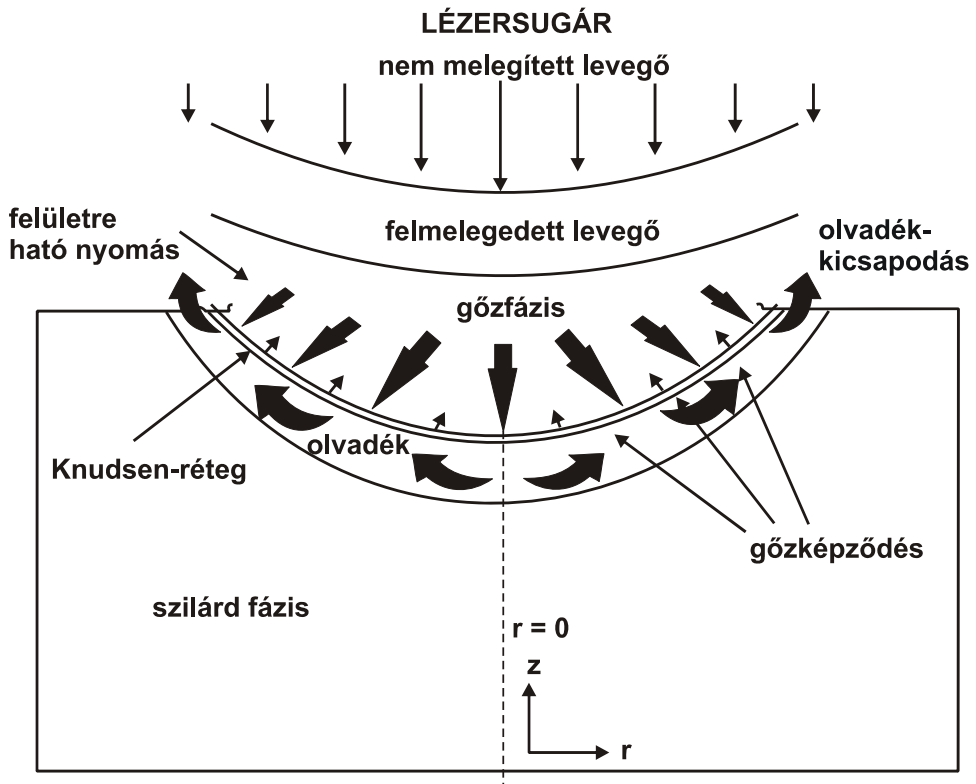
A bemutatott egyenletek véges differenciák módszerével való leképezését alkalmazva a lézersugárral megvilágított felület alatti rétegben a hőmérséklet-eloszlás számíthatóvá válik, és lehetőség nyílik a lehűlési sebesség számítására is, amiből megállapítható az átedződött martenzites réteg vastagsága [Gergely, 1987].

4.3. A véges elemek módszerének alkalmazása lézeres felületátolvasztás esetén

J. C. J. Verhoeven *Modelling Laser Induced Melting* című tanulmánya és Ph.D disszertációja alapján.

A véges elemes modellezés nagyon jól használható parciális differenciálegyenletek megoldásakor, és mozgó határfelületek esetén is jól alkalmazható. A parciális differenciálegyenletek végeelem-módszerrel numerikusan megoldhatók. A VEM azért is megfelel, mivel összetett peremfeltételek is definiálhatók benne. Lézeres felületátolvasztás esetén a feladat egydimenzióssá egyszerűsíthető, mely aztán könnyen általánosítható két- vagy háromdimenzióssá [Verhoeven, 2003].

Bármely folyamat modellezéséhez először a folyamatot alkotó fizikai részfolyamatok megértése szükséges. A **4.2. ábrán** a lézeres felületátolvasztás sematikus ábrázolása látható [Ganesh, 1997].



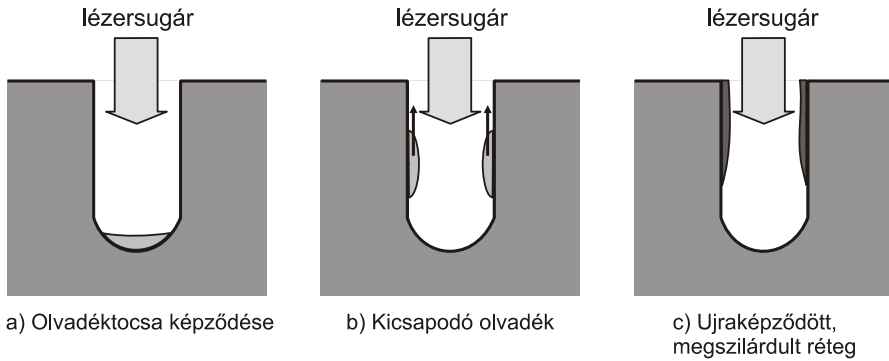
4.2. ábra

Lézeres felületátolvasztás sematikus ábrázolása [Ganesh, 1997]

A lézeres felületátolvasztás folyamatát alapvetően három részfolyamatra bonthatjuk. Az olvadt anyag fontos szerepet játszik a folyamatban, ezért a modellben mindenképpen szerepelnie kell az olvadék viselkedésének is.

A céltárgy felületén a lézernyaláb energiájából abszorbeálódott energia hatására először egy vékony olvadékréteg keletkezik. Majd az olvadt réteg hőmérséklete lassan eléri a párolgási hőmérsékletet: ezt tekinthetjük az átolvasztás második fázisának. A harmadik fázisban az elpárolgó fém visszalökődési nyomást gyakorol az olvadékokra, ennek hatására az olvadék nekinyomódik az olvadékfürdő aljának, és az olvadékfürdő oldalán felfutva kifröcsköl a felszínen.

Az átolvasztás ezen három fázisát a **4.3. ábra** mutatja [Verhoeven, 2004].



4.3. ábra

A lézerrel kezelt felület megolvadása

Viszonylag egyszerű modellel is jól számítható a lézersugár által az első fázisban megolvasztott rész nagysága. Leírásához elegendő egy egyszerű egydimenziós modell alkalmazása, mely aztán egy kétdimenziós modell segítségével igazolható.

A harmadik fázisban visszafröcskölődő és megszilárduló olvadékhányad számítása már jóval bonyolultabb.

A lézerrel átolvasztott réteg nagyságát általánosan Stefan-problémaként emlegetik J. Stefan után, aki a jéghegyek keletkezéséről írt híres cikket még 1891-ben.

Az átolvadtt felületréteg vastagságának (mélységének) számításáról számos cikk található a szakirodalomban. A most bemutatásra kerülő módszernél a Stefan által felvetett, entalpia oldaláról való megközelítés kerül előtérbe, különös figyelmet fordítva a lézeres felületátolvasztás által megkövetelt kezdeti feltételek pontosításának.

4.3.1. Matematikai modellezés

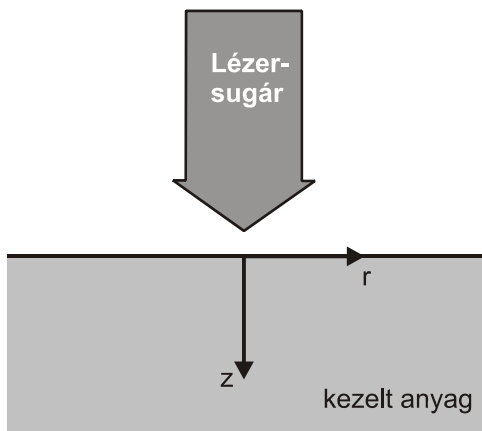
A felületátolvasztáshoz Gauss-féle fókuszált lézersugárnyalábot alkalmaznak leggyakrabban, mely tengelyszimmetrikus lézernyalábnak tekinthető. A folyamat során a sugárirányú diffúzió elhanyagolható.

Vegyünk egy tengelyszimmetrikus koordináta-rendszert, a $z = 0$ sík az anyag felülete (lásd **4.4. ábra**).

Az átolvasztott anyag ρ sűrűsége, c fajhője és k hővezetési tényezője állandónak tekintendő.

Az anyagban lévő T hőmérséklet-eloszlás egy hengerszimmetrikus koordináta-rendszer segítségével írható le a következő egyenlet segítségével:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} . \quad (4.8)$$



4.4. ábra

Az alkalmazott geometriai modell

A lézernyalábban az energiasűrűség nem egyenletes, sugárirányban változik, és függ az időtől, vagyis a lézernyaláb intenzitására felírható a következő összefüggés: $I_{\text{ref}} = I(r, t)$.

A kezelt munkadarab felületének $z = 0$ rétegében a lézersugárból elnyelt energia (I) a következő összefüggéssel határozható meg:

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = -I \quad (4.9)$$

4.1. táblázat. Lézeres felületátolvasztás esetén az anyag és lézernyaláb jellemzésére használt fizikai mennyiségek jelölései és mértékegységei.

	Elnevezés	Jelölés	Mértékegység
Az anyagra jellemző fizikai paraméterek	sűrűség	ρ	kg m^{-3}
	latens hő	L_f	J kg^{-1}
	hővezetési tényező	k	W (m K)^{-1}
	fajhő	c	J (kg K)^{-1}
	olvadáspont	T_m	K
	forráspont	T_v	K
A lézerre jellemző fizikai paraméterek	lézernyaláb energiája	I_{ref}	W m^{-2}
	a lézernyaláb átmérőjének változása	w_0	m

A **4.1. táblázat**ban ismertetett mennyiségek segítségével a következő dimenzió nélküli mennyiségek definiálhatók:

$$z := \frac{k (T_v - T_m)}{l_{ref}} \bar{z} \quad (4.10)$$

$$r := w_0 \bar{r} \quad (4.11)$$

$$t := \frac{\rho c k (T_v - T_m)^2}{l_{ref}^2} \bar{t} \quad (4.12)$$

$$T := T_m + (T_v - T_m) \bar{T} . \quad (4.13)$$

A z irányban vett dimenzió nélküli távolság (mélység) a peremfeltételként megadott (4.9)-es egyenletből származik.

A (4.12)-es egyenletben szereplő dimenzió nélküli idő az (4.8)-as egyenletben megfogalmazott peremfeltételből eredeztethető.

A (4.8)-as és (4.9)-es egyenletben megfogalmazott peremfeltételekből a következő egyenlet származtatható:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \varepsilon \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2} . \quad (4.14)$$

4.2. táblázat. A lézeres felületátolvasztáskor jellemző dimenzió nélküli mennyiségek és értékeik

Jelölés	Képlet	Jellemző érték
ε	$\frac{k^2 (T_v - T_m)^2}{\omega_0^2 l_{ref}^2}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$
T_a	$\frac{(T_a - T_m)}{(T_v - T_m)}$	$-0,4$
λ_f	$\frac{L_f}{c (T_v - T_m)}$	$0,25$

Lézeres felületátolvasztáskor, mint ahogyan a **4.2. táblázat**ban is látható, az ε jóval kisebb, mint egy. Ebből valójában az következik, amit a peremfeltételek között már korábban feltüntettünk, hogy a sugárirányú diffúziótól eltekinthetünk, és a

probléma egydimenzióssá egyszerűsödik. Ezt az állítást később kétdimenziós számításokkal is igazoljuk.

Az anyag megolvasztásához többletenergia szükséges, ezt nevezzük latens hőnek és L_f -fel jelöljük. A latens energia tipikus értéke az **4.1. táblázat**ban megtalálható.

4.3.2. Az olvadás matematikai modellezése

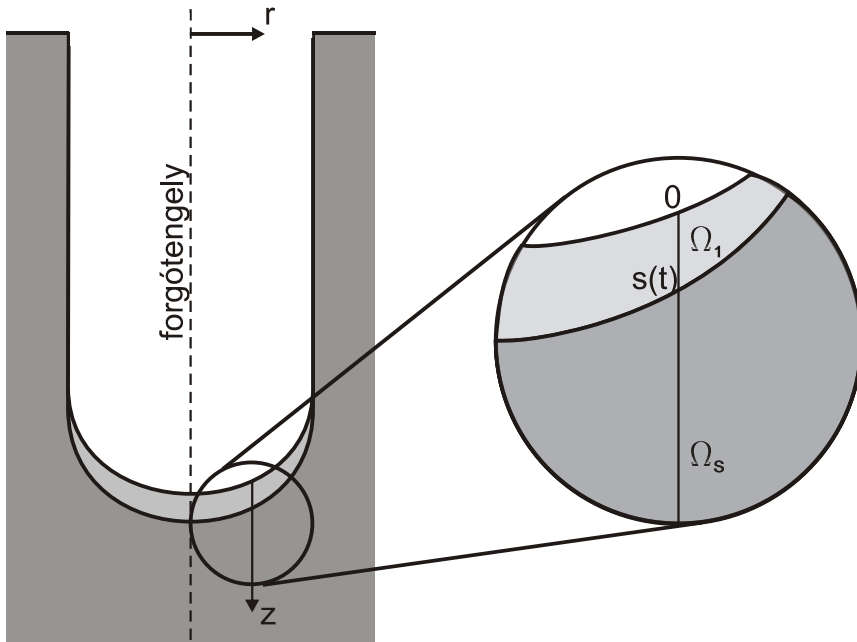
Ebben a fejezetben az olvasztás modellezésének kétféle módszerét mutatjuk be.

Mint ahogyan az előző fejezetben is láthattuk, a sugárirányú diffúzió lézeres felületátolvasztáskor elhanyagolható. Tehát a továbbiakban is egydimenziós modellt alkalmazunk.

4.3.2.1. Stefan-probléma

Legyen $s(t)$ a szilárd–olvadék határfelület helyzete t időpillanatban. Jelölje Ω_l az olvadék, Ω_s a szilárd fázis területét. Ebben az esetben az $\Omega_l : s(t) > z \geq 0$ és $\Omega_s : s(t) < z < \infty$.

A **4.5. ábrán** láthatóak a jelölések.



4.5. ábra

A hengersizmetrikus olvadéktócsa geometriája lézeres felületátolvasztás esetén

A hőmérséklet-eloszlás mindkét (a szilárd és az olvadék) fázisban egyaránt azonos összefüggéssel írható le.

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}, \quad (4.15)$$

ahol az i index a szilárd fázisnak megfelelő s indexet és a folyadékfázisnak megfelelő l indexet helyettesíti.

A szilárd anyag felületén a $z = 0$ helyen felírható a következő összefüggés:

$$\frac{\partial T_l}{\partial z} = -\frac{l}{l_{ref}}, \quad l = l(r, t), \quad z = 0. \quad (4.16)$$

Az anyag megolvasztásához, a fázisátalakuláshoz többletenergíát kell bevinni. Amit dimenzió nélküli formában a következőképpen definiálhatunk.

A szilárd–olvadék fázishatáron lejátszódó fázisátalakulást kísérő hőelnyelést és hőfelszabadulást a következő összefüggésekkel írhatjuk le:

Megszilárdulás:

$$-\frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z \downarrow s}$$

Olvasdás:

$$\frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z \uparrow s}$$

ebből a két összefüggésből született meg a Stefan-összefüggés, melyet a következőképpen írhatunk fel:

$$\frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z \uparrow s} - \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z \downarrow s} = -\lambda_f \frac{ds}{dt}, \quad z = s(t). \quad (4.17)$$

A hőmérsékletet azonosnak tekintve mindenhol

$$T_s = T_l = 0, \quad z = s(t), \quad (4.18)$$

és az anyagot végtelennek feltételezve leírhatjuk, hogy

$$T_s \rightarrow T_a, \quad z \rightarrow \infty, \quad (4.19)$$

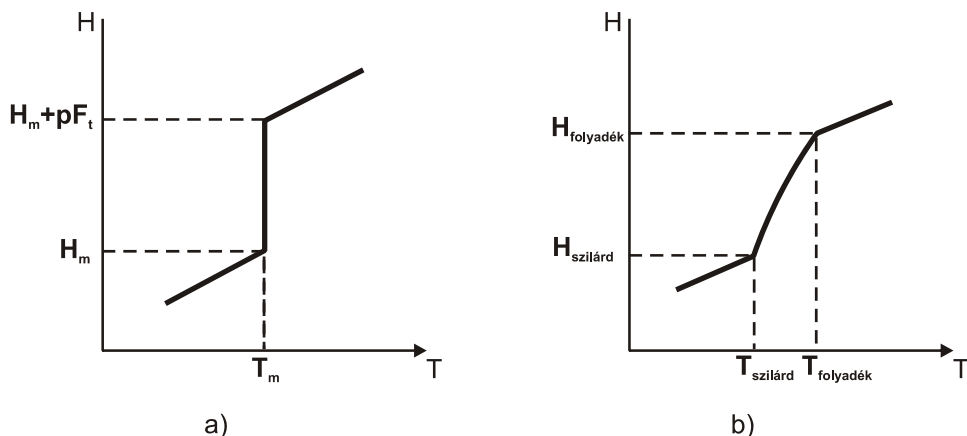
ahol a T_a a környezet hőmérsékletét jelöli.

$$T(z, 0) = T_0(z) = 0, \quad z = s(t). \quad (4.20)$$

4.3.2.2. Az entalpiaprobléma

Az entalpia, H a rendszerben ténylegesen felszabaduló vagy elnyelődő és a latens hőmennyiség összessége. A folyadékfázisból leadott és az onnan felszabaduló hőmennyiséget a $\rho c T$ képlettel számíthatjuk, míg a tömegegységre vonatkoztatott latens hőmennyiséget L_f -fel jelölhetjük.

A következő ábrán két különböző anyag szilárd–folyadék fázisátalakulásának hőmérséklet-entalpia görbéjét figyelhetjük meg. A **4.6.a. ábrán** a határozott olvadáspontú anyag (általában a „tisztá” anyagok), míg a **4.6.b. ábrán** olyan anyagok fázisátalakulása figyelhető meg, amelyek nem rendelkeznek határozott olvadásponttal, szilárd–olvadék fázisátalakulásuk hőmérséklet-tartományban történik meg (ilyenek az amorf térfogathányaddal rendelkező anyagok és az ötvözetek).



4.6. ábra

A hőmérséklet és az entalpia közötti kapcsolat a) határozott olvadásponttal rendelkező anyagon; b) határozott olvadásponttal nem rendelkező, hőmérsékletközben megolvadó anyagok esetében

A megszilárdulás végső hőmérsékletét (az olvadás kezdő hőmérsékletét), vagyis a szolidusz hőmérsékletet T_s -sel, míg az olvadás befejező hőmérsékletét (a megszilárdulás kezdő hőmérsékletét), vagyis a likvidusz hőmérsékletet T_l -lel jelölik.

A szilárd–olvadék fázisátalakulás hőmérséklettartományát Mushy-tartománynak nevezzük [Czibere, 1998].

A határozott olvadásponttal rendelkező anyagok esetében az anyag entalpiáját az olvadás megkezdése előtt az olvadásponton a következő összefüggéssel fejezhetjük ki:

$$H_m = \rho c T_m . \quad (4.21)$$

A hőmérsékletközben olvadó anyagok esetében az entalpia a szolidusz hőmérsékleten

$$H_S = \rho c T_S . \quad (4.22)$$

Az anyag entalpiája a forrásponton, H_V a következő képlettel fejezhető ki:

$$H_V = \rho c T_V + \rho L_f . \quad (4.23)$$

A továbbiakban bevezetünk néhány dimenzió nélküli mennyiséget.

Dimenzió nélküli entalpia

Határozott olvadásponttal rendelkező anyagok esetében a dimenzió nélküli entalpia:

$$H = H_m + (H_V - H_m) \bar{H} . \quad (4.24)$$

Hőmérsékletközben olvadó anyagok esetében a dimenzió nélküli entalpia:

$$H = H_S + (H_V - H_S) \bar{H} . \quad (4.25)$$

Továbbá vezessünk be két konstans, D_1 dimenzió nélküli hőmérsékletet állandó hőmérsékleten megszilárduló és D_2 hőmérsékletközben megszilárduló anyagok esetében.

$$D_1 := \frac{\rho c (T_V - T_m)}{H_V - H_m} \quad (4.26a)$$

$$D_2 := \frac{\rho c (T_V - T_S)}{H_V - H_S} . \quad (4.26b)$$

Ezen két dimenzió nélküli konstans D_1 , D_2 és a dimenzió nélküli entalpia közötti kapcsolatot az állandó hőmérsékleten és hőmérsékletközben megszilárduló anyagok esetében a következő két egyenlet mutatja be:

$$H(T) = \begin{cases} D_1 T, & T < 0 \\ [0, D_1 \lambda_f], & T = 0 \\ D_1 T + D_1 \lambda_f, & T > 0 \end{cases} \quad (4.27)$$

$$H(T) = \begin{cases} D_2 T, & T \leq 0 \\ \left[D_2 T, D_1 \lambda_f \frac{T}{T_l} \right], & 0 \leq T \leq T_l \\ D_2 T + D_2 \lambda_f, & T \geq T_l \end{cases} \quad (4.28)$$

Mint ahogyan az előzőekben láthattuk, a lézeres felületátolvasztás egydimenziós problémára egyszerűsíthető. Az anyag belsejében a hőmérsékletet és az entalpiát a következő dimenzió nélküli egyenlettel lehet leírni:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad z > 0. \quad (4.29)$$

Határozott olvadásponttal rendelkező anyagok esetében D helyére D_1 -et, hőmérsékletközben megolvadó anyagok esetében D_2 -t kell helyettesíteni a képletbe.

A kezdeti és a peremfeltételek megegyeznek az előzőekben ismertetettekkel, vagyis az anyag felületén elnyelt energia a következő képlettel jellemezhető:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{I}{I_{ref}} \quad z = 0. \quad (4.30)$$

Az anyagot végtelennek feltételezve leírhatjuk, hogy

$$T \rightarrow T_a \quad z \rightarrow \infty, \quad (4.31)$$

ahol a T_a a környezet hőmérsékletét jelöli.

$$T(z, 0) = T_0(z). \quad (4.32)$$

Továbbá, hogy a lézeres felületátolvasztás kezdeti pillanatában ($t = 0$ időpillanatban) ismert a hőmérséklet:

$$T = T_0 \quad t = 0. \quad (4.33)$$

4. 3. 3. Numerikus megoldás

4.3.3.1. A Stefan-probléma diszkretizálása

A véges elemes modellezés nagyon jól használható parciális differenciálegyenletek megoldásakor, és mozgó határfelületek esetén is jól alkalmazható.

Az egyik módszer a mozgó határfelület problémájának kezelésére, hogy a mozgó határt az idő függvényében részterületekre osztjuk.

A másik módszer, ha a mozgó határnak megfelelően változtatjuk a hálófelosztást. Ez a módszer azonban nem alkalmazható, ha a kezdeti időpillanatban nincs olvadékfázis.

A módszer megoldásának lépései a következők:

1. Galerkin-formula felírása.
2. A véges elemes háló létrehozása, vagyis a differenciálhányadosnak a differenciáhányadossal való helyettesítése (diszkretizálás):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

3. A kezdeti értékfeladat megoldása alkalmasan választott kezdeti feltételekkel.

A probléma megoldása azzal kezdődik, hogy a z tengely irányában definiáljuk a szilárd–olvadék fázishatárt, mely fázishatáron igazak lesznek a következő peremfeltételek:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_l}{\partial t} &= \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} & 0 < z < s(t) \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} &= \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} & s(t) < z < z_b \\ \frac{\partial T_l}{\partial z} &= -\frac{I}{I_{ref}} & z = 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

ahol, $z = z_b$ a $t = 0$ időpillanatban az (x, y) sík helyzetét jelöli. A folyamat során a határfelületet $z = s(t)$ függvénnyel írjuk le, azaz a határfelület az idő függvényében bármilyen tetszőleges felület lehet.

Egy $0 \leq z < z_b$ tartományon a $z = s(t)$ függvényt két részre osztja.

A $z = 0$ síkon (azaz az anyag felszínén) a következő peremfeltétel teljesül:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{I}{I_{ref}} \quad z = 0. \quad (4.35a)$$

A $z = z_b$ síkon (a munkadarab alján) a $T_s = T_a$ fog érvényesülni.

Az olvadék fázisban a következő parciális differenciálegyenlet írható fel:

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \quad 0 \leq z < s(t). \quad (4.35b)$$

A szilárd fázisban a következő parciális differenciálegyenlet írható fel:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad s(t) \leq z < z_b. \quad (4.35c)$$

A $z = s(t)$ függvénnyel megadott szilárd–olvadék határfelületen az alábbi peremfeltétel teljesül:

$$T_l = T_s = 0, \quad \left. \frac{\partial T_l}{\partial z} \right|_{z \uparrow s} - \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z \downarrow s} = -\lambda_f \frac{ds}{dt}, \quad z = s(t). \quad (4.35d)$$

Ha a T_l kielégíti a (4.35b) egyenletet, akkor az alábbi egyenletnek is teljesülnie kell [Bagyinszki–Felde–Réti, 1999a; Bagyinszki–Felde–Réti, 1999b]:

$$\int_0^s \left\{ \frac{\partial T_l}{\partial t} - \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right\} v(z, t) dz = 0, \quad (4.36a)$$

ahol $v(z, t)$ egy célszerűen megválasztott súlyfüggvény.

Hasonlóképpen, ha a T_s kielégíti az (4.35b) egyenletet, akkor az alábbi egyenletnek is teljesülnie kell:

$$\int_s^{z_b} \left\{ \frac{\partial T_s}{\partial t} - \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right\} w(z, t) dz = 0 \quad (4.36b)$$

ahol $w(z, t)$ szintén egy célszerűen megválasztott súlyfüggvény.

A $v(z, t)$ és $w(z, t)$ súlyfüggvények elégítsék ki a következő egyenleteket: $v(s, t) = w(s, t) = w(z_b, t) = 0$ minden egyes időpillanatban. Ekkor az integrálás tartományonként végrehajtható, és a (4.34a) egyenletben megadott peremfeltétel segítségével a (4.36)-os egyenletek a következőképpen írhatók fel:

$$\int_0^s \left\{ \frac{\partial T_l}{\partial t} v(z, t) + \frac{\partial T_l}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \right\} dz = \frac{I}{I_{ref}} v(0, t) \quad (4.37a)$$

és

$$\int_s^{z_b} \left\{ \frac{\partial T_s}{\partial t} w(z, t) - \frac{\partial T_s}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right\} dz = 0. \quad (4.37b)$$

A (4.28a; 4.36a) és a (4.28b; 4.36b) egyenleteket Galerkin-eljárásként említjük. A Galerkin-eljárás egyike azon megoldási módszereknek, melyeket súlyozott differenciák módszereinek nevezünk. A Galerkin-eljárás megoldásával közelítőleg megkapjuk a $z = s(t)$ határfelületet és a hőmérséklet-eloszlást.

Ezután áttérhetünk a diszkretizációra.

Tetszőleges t időpillanatban az olvadéktartományt ($0 \leq z \leq s(t)$) felosztjuk N és hasonlóképpen a szilárd fázis tartományát ($s(t) \leq z \leq z_b$) M darab résztartományra.

Ezután az olvadék tartományban található minden csomópontra felírhatók a következő (bázisfüggvényeket tartalmazó) egyenletek:

$$z_{l,j} = jh_l, \quad j = 0, \dots, N, \quad h_l = h_l(t) = \frac{s(t)}{N}. \quad (4.38)$$

Hasonlóképpen a szilárd fázis minden csomópontjában felírhatók a következő egyenletek:

$$z_{s,j} = s(t) + jh_s, \quad j = 0, \dots, M, \quad h_s = h_s(t) = \frac{z_b - s(t)}{M}. \quad (4.39)$$

Ezek után megkonstruáljuk az általános kalapfüggvényeket, $\varphi_{l,j}(z, t)$ -t az olvadék fázisban és $\varphi_{s,j}(z, t)$ -t a szilárd fázisban.

Megjegyezzük azonban, hogy a végeelem-módszereknél használt bázisfüggvényekkel ellentétben ezek a bázisfüggvények függnek az időtől, azaz:

$$\frac{dz_{l,j}}{dt} = \frac{ds}{dt} + j \frac{dh_l}{dt} = \frac{j}{N} \frac{ds}{dt} \quad (4.40)$$

$$\frac{dz_{s,j}}{dt} = \frac{ds}{dt} + j \frac{dh_s}{dt} = \frac{M-j}{M} \frac{ds}{dt}. \quad (4.41)$$

A közelítő megoldást a következő alakban keressük:

$$T_{h_s}(z, t) = \sum_{j=0}^M T_{s,j}(t) \varphi_{s,j}(z, t) \quad T_{h_l}(z, t) = \sum_{j=0}^N T_{l,j}(t) \varphi_{l,j}(z, t). \quad (4.42)$$

Legyen

$$T_{l,N}(t) \equiv 0, \quad T_{s,0}(t) \equiv 0, \quad T_{s,M}(t) \equiv T_a \quad (4.43)$$

és közelítsük $T_{hl}(z, t)$ és a $T_{hs}(z, t)$ függvényeket úgy, hogy kielégítsék a felületen és a $z = z_b$ helyen a Dirichlet-féle peremfeltételeket. A számítás elvégzéséhez meg kell kapnunk a $T_{l,j}(t)$ (ahol $j = 0, 1, \dots, N-1$) és a $T_{s,j}(t)$ (ahol $j = 1, 2, \dots, M-1$) időtől függő tagjait.

Behelyettesítve ezeket a közelítéseket a Garlekin-eljárás T_l és T_s tagjaiba megkapjuk a $v(z, t)$ és $w(z, t)$ függvényeket a kalapfüggvényekhez.

Az eredményeket a következőképpen írhatjuk fel mátrixos alakban:

$$M_l \frac{dT_l}{dt} + N_l T_l = b_l \quad (4.44a)$$

$$M_s \frac{dT_s}{dt} + N_s T_s = b_s, \quad (4.44b)$$

ahol

$$\begin{aligned} T_l &= (T_{l,i})^T, \quad M_l = (M_{l,ij})^T, \quad N_l = (N_{l,ij})^T, \quad b_l = (b_l \ 0 \dots 0)^T, \\ T_s &= (T_{s,i})^T, \quad M_s = (M_{s,ij})^T, \quad N_s = (N_{s,ij})^T, \quad \text{és} \quad b_s = (b_{s,i})^T. \end{aligned} \quad (4.44c)$$

A mátrixok és vektorok nem zérus elemei a következők:

$$M_{l,00} = \frac{1}{2} h_l(t), \quad M_{l,ii} = h_l(t), \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (4.45a)$$

$$N_{l,i-1i} = -\frac{1}{6} \frac{3i-2}{N} \frac{ds}{dt} - \frac{1}{h_l(t)} \quad (4.45b)$$

$$N_{l,00} = \frac{1}{6N} \frac{ds}{dt} + \frac{1}{h_l(t)}, \quad N_{l,ii} = \frac{1}{3N} \frac{ds}{dt} + \frac{2}{h_l(t)}, \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (4.45c)$$

$$N_{l,i+1i} = \frac{1}{6} \frac{3i+2}{N} \frac{ds}{dt} - \frac{1}{h_l(t)} \quad (4.45d)$$

$$b_{l,0} = \frac{l}{l_{ref}} \quad (4.45e)$$

$$M_{s,ii} = h_s(t) \quad (4.45f)$$

$$N_{l,i-1i} = -\frac{1}{6} \frac{3M-3i+2}{M} \frac{ds}{dt} - \frac{1}{h_s(t)} \quad (4.45g)$$

$$N_{s,ii} = -\frac{1}{3M} \frac{ds}{dt} + \frac{2}{h_s(t)} \quad (4.45h)$$

$$N_{l,i+1i} = \frac{1}{6} \frac{3M-3i-2}{M} \frac{ds}{dt} - \frac{1}{h_s(t)} \quad (4.45i)$$

$$b_{s,M-1} = T_a \left(\frac{1}{3M} \frac{ds}{dt} + \frac{1}{h_s(t)} \right). \quad (4.45i)$$

Az M_l és M_s tagok összevonhatók, az összevonás nagyságrendileg nem befolyásolja az $O(h^2)$ hibát.

A Stefan-probléma peremfeltételei (4.35) az alábbi módon közelíthetők:

$$-\lambda_f \frac{ds}{dt} = \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} T_{l,j}(t) \frac{\partial \varphi_{l,j}}{\partial z} \Big|_{z \uparrow s} - \sum_{j=1}^{N-1} T_{s,j}(t) \frac{\partial \varphi_{s,j}}{\partial z} \Big|_{z \downarrow s} \right\}. \quad (4.46)$$

Figyelembe véve a kalapfüggvények tulajdonságait, a fenti (4.46)-es egyenlet a következőképpen egyszerűsödik:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{\lambda_f} \left\{ \frac{1}{h_l(t)} T_{l,N-1}(t) + \frac{1}{h_s(t)} T_{s,l}(t) \right\}. \quad (4.47)$$

A következőkben felvázoljuk az Euler-módszer alkalmazását $z = s(t)$ függvény (határfelület) és a θ -módszert a hőmérséklet eloszlás meghatározásához.

Tekintsük a hőmérséklet-eloszlást ($\mathbf{T}_l^k$, $\mathbf{T}_s^k$ mátrixokat) és a szilárd-olvadék fázishatárt ($\mathbf{s}^k$ vektort) a $t = t^k$ időpillanatban ismertnek. $t^k = k \Delta t$ -vel számítható, ahol Δt az időlépték.

Ekkor a határfelület a s^{k+1} -dik lépésben a (4.48)-as egyenlet felhasználásával számítható:

$$s^{k+1} = s^k + \frac{\Delta t}{\lambda_f} \left\{ \frac{1}{h_l(t^k)} T_{l,N-1}^k + \frac{1}{h_s(t^k)} T_{s,1}^k \right\}. \quad (4.48)$$

A (4.38) és (4.39)-es egyenletekkel új hálót hozhatunk létre. A hőmérséklet-eloszlás a $t = t^{k+1}$ -ik időpillanatban a (4.44a) és (4.44b) egyenletek diszkretizálásával számolható.

$$\begin{aligned} \left(I + \theta \Delta t \left(M_l^{k+1} \right)^{-1} N_l^{k+1} \right) T_l^{k+1} &= \left(I - (1-\theta) \Delta t \left(M_l^k \right)^{-1} N_l^k \right) T_l^k \\ &+ \Delta t \left(\theta \left(M_l^{k+1} \right)^{-1} + (1-\theta) \left(M_l^k \right)^{-1} \right) b_l \end{aligned} \quad (4.49a)$$

és

$$\begin{aligned} \left(I + \theta \Delta t \left(M_s^{k+1} \right)^{-1} N_s^{k+1} \right) T_s^{k+1} &= \left(I - (1-\theta) \Delta t \left(M_s^k \right)^{-1} N_s^k \right) T_s^k \\ &+ \Delta t \left(\theta \left(M_s^{k+1} \right)^{-1} b_s^{k+1} + (1-\theta) \left(M_s^k \right)^{-1} b_s^k \right) \end{aligned} \quad (4.49b)$$

I jelöli az identitás- vagy egységmátrixot.

A felső indexek a lépésszámot jelölik.

$\theta = 1/2$ visszaadja a jól ismert Crank–Nicolson-egyenletet, melynek közelítési hibája $O(h^2)$.

4.3.4. Alkalmas kezdeti feltétel keresése

A fő probléma továbbra is az alkalmas kezdeti feltétel megtalálása.

Felmelegedés közben az olvadás előtti állapotban a hőmérséklet a következő összefüggéssel számítható:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad z > 0. \quad (4.50)$$

Az F -fel jelölt dimenzió nélküli energia a felületen a következőképpen számítható:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -F \quad z = 0. \quad (4.51)$$

A hőmérsékletet mindenhol azonosnak tekintve

$$T \rightarrow T_a, \quad z \rightarrow \infty \quad (4.52)$$

és az anyagot végtelennek feltételezve leírhatjuk, hogy

$$T = T_a, \quad t = 0. \quad (4.53)$$

A fenti (50–53) egyenleteket figyelembe véve a Laplace-transzformálttal kiszámított megoldást az alábbi összefüggés szolgáltatja:

$$T(z, t) = F \left\{ 2 \left(\frac{t}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{z^2}{4t} \right) - z \operatorname{erfc} \left(-\frac{z}{2t^{1/2}} \right) \right\} + T_a. \quad (4.54)$$

(Megjegyzés: erf a hibafüggvény és az erfc = 1–erf).

Ha elhanyagoljuk a latens hőt, az s szilárd–olvadék fázishatáron minden t időpillanatban a megoldást az alábbi egyenlet szolgáltatja:

$$\frac{I}{I_{ref}} \left\{ 2 \left(\frac{t}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{s^2}{4t} \right) - s \operatorname{erfc} \left(-\frac{s}{2t^{1/2}} \right) \right\} + T_a = 0. \quad (4.55)$$

A felületen a $z = 0$ helyen a felület megolvasztásához szükséges időt a következő egyenlettel számíthatjuk:

$$t_m = \frac{I_{ref}^2 T_a^2 \pi}{4I^2}. \quad (4.56)$$

Ez azt az időpillanatot jelöli, amikor a felület kezd megolvadni.

Szükség van a hőmérséklet-eloszláshoz kezdeti feltételre, melyet a (34) segítségével a Stefan-probléma peremfeltételeihez hasonlóan a következő összefüggéssel kaphatjuk:

$$z \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z \downarrow s} = \lambda_f \frac{ds}{dt} - \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z \uparrow s} \approx \lambda_f \frac{ds}{dt} - \frac{I}{I_{ref}}. \quad (4.57)$$

Kis s értékek esetén a következő összefüggés adódik:

$$T_{s,j}(\Delta T) = |T_a| \exp\left(-\frac{(z_{s,j}-s)^2 F^2}{T_a^2 \pi}\right) - F(z_{s,j}-s) \operatorname{erfc}\left(\frac{(z_{s,j}-s)F}{|T_a|\sqrt{\pi}}\right) + T_a. \quad (4.58)$$

$j = 1, \dots, M-1$

A kezdeti hőmérséklet-eloszlást a szilárd fázisban a $t = \Delta t$ időpillanatban a következőképpen kezeljük:

$$F = \frac{l}{l_{ref}} - \lambda_f \frac{ds}{dt}. \quad (4.59)$$

Mivel az $s(\Delta t)$ kicsi, a hőmérsékleteloszlás a $t = \Delta t$ időpillanatban lineárisnak tekinthető.

$$T_{l,j}(\Delta t) = \frac{l}{l_{ref}}(s - z_{l,j}), \quad j = 0, \dots, N-1. \quad (4.60)$$

Ez az egyenlet kielégíti a $z = 0$ és a $z = s$ helyen a peremfeltételeket.

Meg kell jegyezni azonban, hogy ez a közelítés viszont csupán **állandó energiájú lézernyalábok** esetében alkalmazható.

4.3.5. Az entalpiaprobléma diszkretizálása

Az egydimenzós entalpiamódszer diszkretizálása véges differenciák módszerével és az eredmény kiterjesztése két dimenzióra rendkívül bonyolult. A véges elemes-módszer viszont kezelhetővé teszi a problémát.

Az entalpiaprobléma megoldása hasonló lépésekben történik, mint a hőmérséklet-eloszlás és a fázishatár mozgásának számítása, vagyis:

1. Galerkin-formula felírása;
2. a véges elemes háló létrehozása, vagyis a differenciálhányados differenciáhányadossal történő helyettesítése (diszkretizálás);
3. a kezdeti értékeladat megoldása alkalmasan választott kezdeti feltételekkel.

A (4.29–4.33; 4.27–4.28) egyenletekben definiált differenciálegyenleteket és peremfeltételeket összevonva az alábbi egyenletet kapjuk (a megoldási és integrálási tartomány: $\Omega = (0, z_b)$):

$$\int_{\Omega} \frac{\partial H}{\partial t} v \, dz = D \frac{l}{l_{ref}} v(0) - D \int_{\Omega} \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \, dz. \quad (4.61)$$

A (4.27) és (4.28) egyenletekkel a hőmérséklet és az entalpia közötti összefüggés adható meg.

Megoldva a Galerkin-formulát megkapjuk a hőmérséklet- és entalpiaeloszlást, amelyekből a határfelület helyzetét empirikusan határozzuk meg.

Tetszőleges t időpillanatban a $0 \leq z \leq z_b$ tartományt felosztjuk N tartományra. A tartomány minden csomópontjához hozzárendelünk egy kalapfüggvényt, $\varphi_i(z)$.

A közelítő megoldást a következő alakban keressük:

$$\bar{H}(z, t) = \sum_{i=0}^N H_i(t) \varphi_i(z), \quad \bar{T}(z, t) = \sum_{i=0}^N T_i(t) \varphi_i(z). \quad (4.62)$$

Definiáljuk a $H_N(t) \equiv H\left(\bar{T}_a\right)$ és $T_N(t) \equiv \bar{T}_a$ függvényeket, melyek megadják a

környezeti feltételeket a $z = z_b$ helyen. A $H_i(t)$ és $T_i(t)$ függvényeket kiszámítva és visszahelyettesítve a (62) egyenletbe megkapjuk a következő egyenletet:

$$M \frac{dH}{dt} = D \cdot b - D \cdot N \cdot T, \quad (4.63)$$

ahol $\mathbf{H} = (H_0(t), \dots, H_{N-1}(t))^T$ entalpia- és a $\mathbf{T} = (T_0(t), \dots, T_{N-1}(t))^T$ hőmérsékletvektor.

A fenti egyenletben lévő mátrixok és vektorok elemeit a következő kifejezésekkel írhatjuk le:

$$M_{ij} = \int_0^{z_b} \varphi_i \varphi_j dz \quad i, j = 0, \dots, N-1 \quad (4.64a)$$

$$b_j = \frac{l}{l_{ref}} \varphi_j(0) - T_a \int_0^{z_b} \frac{d\varphi_N}{dz} \frac{d\varphi_j}{dz} dz \quad j = 0, \dots, N-1 \quad (4.64b)$$

$$N_{ij} = \int_0^{z_b} \frac{d\varphi_i}{dz} \frac{d\varphi_j}{dz} dz \quad i, j = 0, \dots, N-1. \quad (4.64c)$$

A kezdeti érték feladat, amelyben együtt kezeljük az entalpiát és a hőmérsékletet numerikusan megoldhatóvá válik.

Annak érdekében, hogy θ -módszerrel megoldhassuk a (4.63)-as egyenletet, azt az alábbi módon kell átalakítani:

$$M \frac{dH}{dt} = F(\mathbf{H}, t) := D(b(t)) - \mathbf{N}\mathbf{T}(\mathbf{H}). \quad (4.65)$$

Az entalpia és a hőmérséklet-eloszlás θ -módszerrel a következőképpen számítható a $t = t^{k+1}$ időpillanatban:

$$G(H^{k+1}) := M(H^{k+1} - H^k) - \Delta t (\theta F(H^{k+1}, t^{k+1}) + (1-\theta) F(H^k, t^k)) = 0. \quad (4.66)$$

A (4.27) és (4.28) egyenletben definiált entalpia- és hőmérséklet-függvények együtt számíthatók minden pontban és időpillanatban.

A $\theta = 0$ esetben a módszer a következőképpen egyszerűsíthető. A $t = t^{k+1}$ időpillanatban a entalpiaeloszlás az alábbi egyenlettel számítható:

$$M H^{k+1} = M H^k + \Delta t F(H^k, t^k). \quad (4.67)$$

Ezután a (4.27) és (4.28) függvények inverz függvényével kiszámíthatjuk a hőmérsékletet a következő egyenlettel:

$$T_i^{k+1} = T(H_i^{k+1}). \quad (4.68)$$

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy ez a diszkretáció lassan konvergál (sok lépés után) a közönséges Stefan-probléma megoldásához [Elliot, 1981].

A $\theta \neq 0$ esetben nem lineáris algebrai egyenletrendszer kapunk, amelyet Newton-módszerrel lehet megoldani [Jánossy, 1983]. Az $t = t^{k+1}$ időpillanatban vett iterációt az alábbi egyenletek adják meg:

$$\begin{aligned} H^{k+1,l} &= H^{k+1,l-1} - (\partial G(H^{k+1,l-1}))^{-1} G(H^{k+1,l-1}), \quad l = 1, 2, \dots \\ H^{k+1,0} &= H^k, \end{aligned} \quad (4.69)$$

ahol a $\partial G(H)$ mátrix a $G(H)$ mátrix Jacobi-mátrixa a következőképpen számítható:

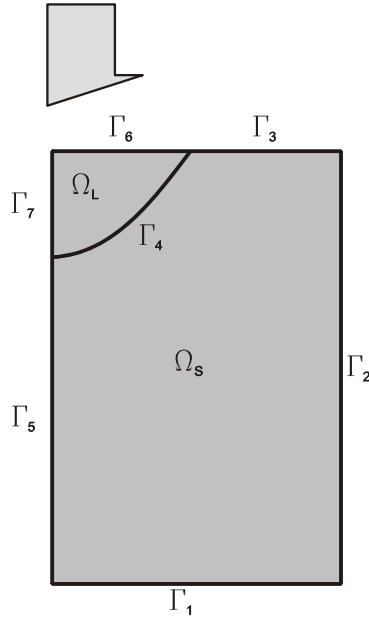
$$\partial G(H) = M + \Delta t \theta D N \frac{\partial T}{\partial H}(H). \quad (4.70)$$

A (4.70) egyenletben szereplő iterációt befejezzük, ha a Newton-módszer által garantált pontosságot elértük.

Az (4.66) egyenlet időléptékét a (4.54)-es egyenletből számítjuk, mint kezdeti megoldást.

4.3.6. Kétdimenziós kiterjesztés

A lézeres felületátolvasztás modellezésére különböző technikákat alkalmazva megállapítható, hogy a legfőbb probléma az egydimenziós megoldás kétdimenzióssá való kiterjesztése.



4.7. ábra

A Stefan-probléma geometriája

A jelenleg alkalmazott modell tengelyszimmetrikus megközelítést alkalmaz. A Stefan-probléma szemléltetése a **4.7. ábrában** található.

A differenciálegyenletet és a hozzá tartozó peremfeltételeket a következő egyenletek tartalmazzák:

$$\begin{aligned}
 \text{az } \Omega_L \text{ és } \Omega_S \text{ területen:} \quad & \rho c \frac{\partial T_i}{\partial t} = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T_i) \\
 \Gamma_1 \text{ és } \Gamma_2 \text{ területeken:} \quad & T_s = T_a \\
 \Gamma_3 \text{ területen:} \quad & k \frac{\partial T_s}{\partial n} = I(r, t) \\
 \Gamma_5 \text{ területen:} \quad & k \frac{\partial T_s}{\partial n} = 0
 \end{aligned} \tag{4.71}$$

$$\Gamma_6 \text{ területen: } k \frac{\partial T_l}{\partial n} = I(r, t)$$

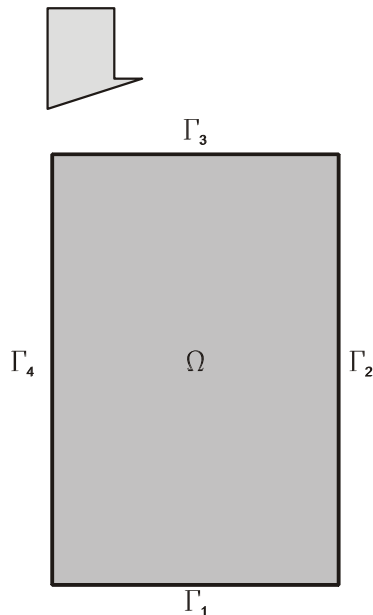
$$\Gamma_7 \text{ területen: } k \frac{\partial T_l}{\partial n} = 0$$

$$\Gamma_4 \text{ területen: } T_s = T_l = T_m, \quad k \left. \frac{\partial T_l}{\partial n} \right|_l = \rho L_f v_n.$$

A Γ_4 perem normálisa a szilárd fázis felé mutat. A határmozgás sebessége, v_n normálirányú. Ebben a tengelyszimmetrikus tartományban a Stefan-feltétel az alábbi egyenlettel írható fel, ha a Γ_4 perem helyzetét a $z = s(r, t)$ függvénnyel jelöljük:

$$\left[1 + \left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)^2 \right] \left[k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_s \right] = \rho L_f \frac{\partial s}{\partial t}. \quad (4.72)$$

Az entalpiamódszer geometriája a **4.8. ábrán** található.



4.8. ábra
Az entalpiamódszer geometriája

A differenciálegyenletet és a hozzá tartozó peremfeltételeket a következő egyenletek tartalmazzák:

$$\begin{aligned}
 \text{az } \Omega \text{ területen:} \quad & \frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) \\
 \Gamma_1 \text{ és } \Gamma_2 \text{ területeken:} \quad & T = T_a \\
 \Gamma_3 \text{ területen:} \quad & k \frac{\partial T}{\partial n} = I(r, t) \\
 \Gamma_4 \text{ területen:} \quad & k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\
 t = 0 \quad & T = T_0.
 \end{aligned} \tag{4.73}$$

A módszer az entalpia és hőmérséklet közötti kapcsolatot a (4.27) és (4.28) egyenletekkel definiálja.

A kétdimenziós Stefan-probléma numerikus megoldás nem lehetséges, mert a fázishatár megadása bonyolult. Azonban kétdimenziós megoldás az egydimenziós entalpiamódszer egyszerű numerikus kiterjesztése. Ez azért lényeges, mert az entalpiamódszerhez nem szükséges a szilárd–olvadék fázishatár helyzetének ismerete.

A kétdimenziós entalpiamódszer számszerű eredményei a következő fejezetben találhatók.

4.3.7. Eredmények és következtetések

Ebben a fejezetben a felületátolvasztásra kidolgozott véges elemes numerikus modelleket ismertettük.

A (4.47)-es egyenlet $O(\Delta t)$ hibája Δt -vel arányos, ezért az Euler-módszerek numerikus hibái is arányosak lesznek Δt -vel. Az Euler-módszer stabilitásáról különböző időléptékek alkalmazásával lehet meggyőződni.

Stabilitás

A hibák különféleképpen öröklődnek tovább a számítások során, függetlenül attól, hogy ezek a hibák miből származnak [Nieveergelt, 1977]. A numerikus módszerek hibája e hibák növekedési rátájától függ. Ha a kiindulási adatok megadásakor valamilyen kis hibát követünk el, de ez csak kis hibát eredményez a végeredményben, akkor a módszert stabilnak tekintjük. Ennek a módszernek a stabilitásán azt értjük, hogy egy kritikus érték (Δt) felett nem konvergál a Picard–Lindelöf-féle egzisztenciális és unicitási tételből következő megoldáshoz.

A Stefan-probléma $k+1$ -dik időléptéke (Δt^{k+1}) a következő egyenlettel fejezhető ki:

$$\Delta t^{k+1} = 0,4 \min \left((h_l(t_k))^2 \cdot (h_l(t_k))^2 \right). \quad (4.74)$$

A stabilitás feltétele a következő:

$$\Delta t \leq 0,5 h^2. \quad (4.75)$$

Ha a h_l kicsi, újra kell számolni a hőmérséklet-eloszlást. Ezért ha a stabilitás fontos, implicit módszert alkalmazunk. Mindazonáltal, mindkét módszer hibája az időléptékkel lineárisan, a távolságleptékkel négyzetesen arányos, és ezek a hibák összeadódnak, $O(\Delta t) + O(\Delta x)^2$.

Ha azonos időléptéket alkalmazunk, körülbelül azonos pontosság érhető el mindkét módszernél. Annak érdekében, hogy minél jobb közelítést érjünk el, a fröcskölés esetében az olvadék méretének és a kristályosodási modell számítása-sakor minél nagyobb pontosságra kell törekedni.

Továbbá, explicit módszernél, $\theta = 0$, (4.49a) és (4.49b) egyenletek egyszerűsödnek, a tömegmátrix összevonható ($\mathbf{M}$, $\mathbf{N}$), a $T_{l,s}^{k+1}$ mátrix pedig egységmátrixszá (I) egyszerűsödik.

Más szóval explicit módszernél nincs szükség az egyenletrendszer megoldására minden egyes időpillanatban, az más kérdés, hogy az explicit módszer nagyobb hibát eredményez.

Az implicit módszer megoldásánál n egyenletből álló tridiagonális mátrixot eredményező egyenletrendszert kell megoldani. Figyelembe véve az előnyöket és a hátrányokat az explicit módszer kevesebb számítást igényel, és ezért talán az alkalmazhatóságot tekintve eredményesebb. Mivel az entalpiamódszer alkalmazásakor a fázishatár helyzetének ismerete nem feltétlenül szükséges, kisebb időléptéket kell alkalmazni. Ezért a továbbiakban a következő időléptéket alkalmazzuk:

$$\Delta t = 0,4 h^2. \quad (4.76)$$

Ha nincs fázisátalakulás, az entalpiamódszer eredményei elfogadhatóbbak.

4.4. Összefoglalás

Az egydimenziós számítások eredményeit megerősítik a kétdimenziós számítások, tehát az egydimenziós modell megfelelő pontossággal megadja az olvadék méretét.

Két matematikai modellt mutattunk be a lézeres felületátolvasztásra. Az egyik a Stefan-problémát alkalmazó számítás, a másik az entalpiát veszi a számítások alapjául.

A Stefan-probléma alkalmazása számos nehézségbe ütközik. Az egyik, hogy a szilárd–olvadék fázishatár mozgásának következtében a tartományok változnak az időben. A másik nehézség, hogy a kezdeti feltételek megválasztása problémát okoz, míg az entalpiamódszer esetében ez nem jelent gondot.

A Stefan-probléma explicit megoldása azonos numerikus stabilitás mellett kisebb időléptéket igényel, mint az implicit megoldás.

Az entalpiamódszernél az időlépték nem változik az időben, és nincs szükség a szilárd és az olvadék fázis megkülönböztetésére. Ezért az időléptékre vonatkozó korlátozások nem annyira szigorúak. Mivel nincs szükség a szilárd és az olvadék fázis megkülönböztetésére, az entalpiamódszer másik előnye, hogy nincs szükség a szilárd–olvadék helyzetének számítására sem.

5. A lézeres felületátolvasztás modellezése

5.1. Bevezető

Figyelembe véve a számítástechnika egyre növekvő fejlődését és a tudományos szoftverek egyre nagyobb kínálatát, a numerikus szimulációk, melyek képesek bonyolult fizikai folyamatok leírására, mint a hegesztés, öntés, alakítás, hőkezelés, mindinkább elérhetőbbé és használhatóbbá válnak a kutatók és mérnökök számára [Bergheau, 1991; Bielak, 1998; Felde, 1998; Bagyinszki–Bitay, 2006].

A numerikus szimulációk olyan eszközöket kínálnak, melyek képesek elvégezni bonyolult hőtani, metallurgiai, mechanikai számításokat, részben helyettesítve a gyakorlatban alkalmazott közvetlen méréseket, melyek költségesek is, és nem használhatók pontos adatok bevitelére a tanulmányozott szerkezetbe.

A számítási modell megalkotásakor az a kíváncsi, hogy a modell minél jobban helyettesítse a valóságos testet, és a mechanikai vagy metallográfiai jellemzők jó közelítéssel meghatározhatók legyenek.

A modellezésnél mérlegelni kell:

- a környezeti hatásokat (a terhelés tér- és időbeli megoszlását, a hőhatást stb.),
- az anyag szerkezetét (rugalmas-nem rugalmas, homogén, izotóp stb.),
- a kialakuló elmozdulást, alakváltozást,
- a geometriai alakot (mivel helyettesíthető a test),
- a testek kölcsönhatását (érintkezést, szilárd test és folyadék által alkotott együttes rendszer vizsgálatát).

A számítógépek megjelenése és elterjedése kedvező irányban befolyásolta a modellezés nem könnyű feladatát. Egyre nagyobb és bonyolultabb modellek felállítására és megoldására nyílt lehetőség. A végelelem-módszerre épülő számítógépes programok segítségével olyan feladatokat is meg tudunk oldani, amelyeket analitikus úton nem lehetett. Igaz ugyan, hogy a pontos megoldást nem ismerjük előre, de vannak olyan eljárások, amelyekkel a számítás hibája előre becsülhető, s ezért egy megadott hibakorlát alá csökkenthető. Mindezt a számítógépi program végzi el [Bekmann, 1990].

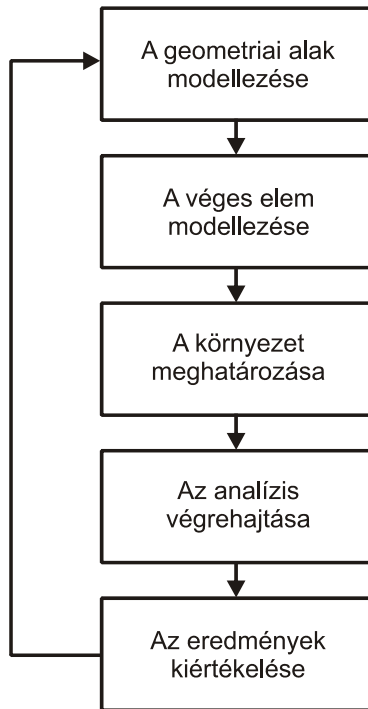
5.2. Végelelem-analízis – VEA (FEA – Finit Element Analysis)

A végelelem-analízis nem új eljárás, hiszen már az ötvenes években bevezetésre került, és azóta folyamatos fejlődésen ment keresztül. Jelenleg a VEA egy nagyon

komplex eszköz a sokrétű mérnöki feladatok megoldásához, több iparágban is alkalmazzák, a gyakorlatban és a tudományos kutatásban egyaránt.

Természetesen a felhasználhatósága nagyon sokrétű [Bekmann, 1990; Huétink, 1996, Bagyinszki–Bitay, 2006]. Az utóbbi tíz évben tapasztalt lényegesebb fejlődése a számítógépek, illetve a számítógéppel segített tervezés és gyártási technológiák rohamos fejlődésével magyarázható. A számítógépek kapacitásának növekedésével lehetségessé vált komplex számítást igénylő folyamatok elemzése, bonyolult és komplex feladatok megoldása [Pont 1991; Shen 1996].

Ezek a feladatok, amelyeket mindeddig megoldhatatlanok voltak, a végelelem-analízis segítségével számos területre kiterjeszthetők. A megoldások alapja lényegében a pre-, és postprocesszorokban van elrejtve, s az egyes programcsomagok kézikönyveinek leírásaiban fedhetők fel [Fagan, 1992].



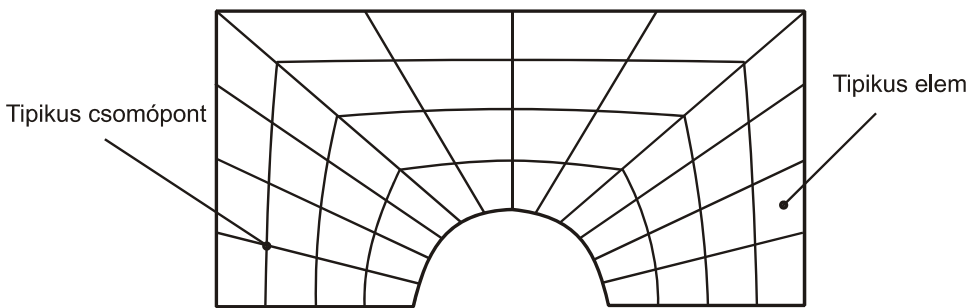
5.1. ábra

Egy végelelem-analízis moduljai (lépései)
[Bitay-Referat, 1998; Rowshan, 1998]

A végelelem-analízisben (VEA), mely egy elemző folyamat, először a geometriai modellt kell megalkotni a rajzszerkesztőben, ehhez hozzárendelünk (ráhúzunk) egy végelelem-modellt, mely három vagy négyszögű lapokból tevődik össze. A következő lépésben a médiumot kell meghatározni (a környezet leírását, mely köz-

vetve vagy közvetlenül befolyásolja a modell viselkedését az adott technológiai vizsgálati folyamatban). Végül a számítások és a kapott eredmények struktúráját lehet megjeleníteni a képernyőn. Amennyiben a számolt eredmény nem elfogadható, a szerkezet újraterveződik és elemződik mindaddig, míg egy elfogadható modellt nem kapunk (**5.1. ábra**) [MSC, 1996].

A végeelem-analízisben a struktúrát egy hálószerkezeti modell képezi. Ez a hálószerkezet csomópontokból és elemekből tevődik össze [Imre, 1983; Bagyinszki–Bitay, 2006]. Az így módon kialakított szerkezetet „mesh”-nek nevezünk (**5.2. ábra**). Ez a hálószerkezeti koncepció (mesh) lényegesen fontos alapfogalom a végeelem-analízisben. Az analízis minden lépésnél közrejátszik: a tulajdonságok modellezésénél, az anyag tulajdonságainak modellezésénél, a határ-, illetve peremfeltételek meghatározásánál, az eredmények megjelenítésénél. A megoldandó feladat függvényében ebben a fázisban egy típuselemet kell meghatározni. Az elem típusának meghatározása lényeges a strukturális viselkedés korrekt szimulációjához [Zienkiewicz, 1989].



5.2. ábra

Egy felület végeelem-felosztása (EF) [Bitay-Referat, 1998; Rowshan, 1998]

A probléma felosztása után minden elem esetére meghatározzuk a bázis-egyenletet, így áll össze egy egyenletrendszer. Egy típuselem-egyenlet általános formájának deriválása után már könnyen kiszámítható az egyenlet minden egyes hasonló elemre, mely a testen megtalálható.

A következő fázisban a csomópontok koordinátáit behelyettesítése az anyag tulajdonságaival, illetve meghatározzuk az elem terhelési feltételeit az általános kereten belül.

A véges elem (EF) egyenleteinek deriválására több lehetséges megoldás kínálkozik, leggyakrabban a rendszer potenciális energiájának minimalizálása révén történik. Ez a módszer többféleképpen megfogalmazható.

E módszer értelmében a potenciális energia (Π) egyenlő a test deformálási feszültség energiájával (Λ) mínusz a testre ható külső terhelés mechanikai munkája (W):

$$\Pi = \Lambda - W . \quad (5.1)$$

Egy elem differenciált térfogatára $d\Lambda$, a következőképpen fogalmazható meg:

$$d\Lambda = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} - \frac{1}{2} \{\varepsilon_0\}^T \{\sigma\}, \quad (5.2)$$

melyben

- $\{\varepsilon\}$ a teljes feszültségek vektora,
- $\{\varepsilon_0\}$ a kezdeti feszültség vektora, például egy differenciált hőmérséklettől $\varepsilon = \alpha \Delta T$ (ahol α a hőtágulási együttható, míg a ΔT a hőmérséklet-különbség) és
- $\{\sigma\}$ a feszültségek komponenseinek vektora.

A deformálási feszültség teljes (össz-) energiája egy véges elem esetében meghatározható az (5.2.) egyenlet térfogatként való integrálásával [Fagan, 1992]:

$$\Lambda = \int_V \frac{1}{2} (\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} - \{\varepsilon_0\}^T \{\sigma\}) dV. \quad (5.3)$$

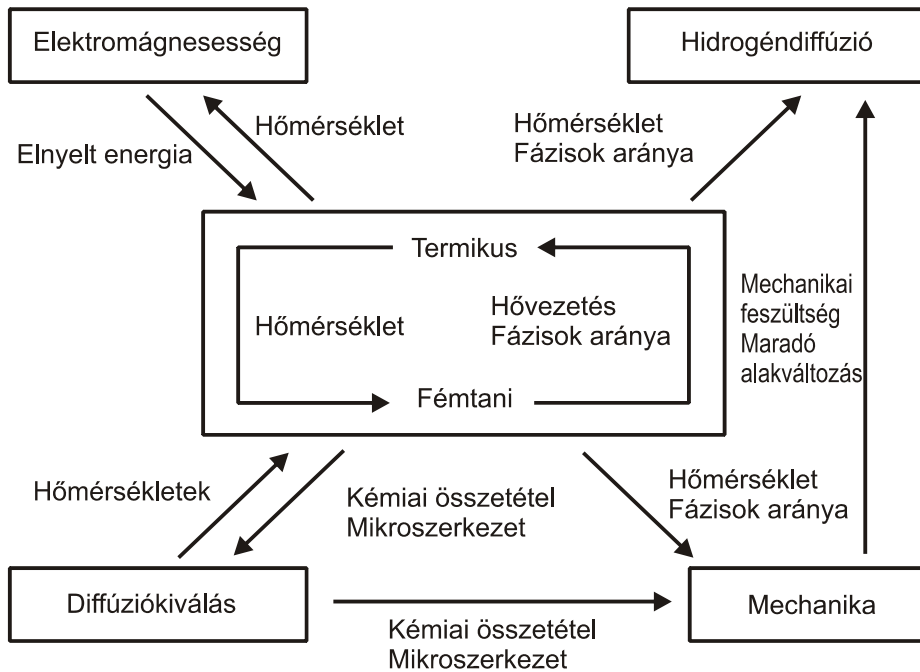
5.3. A SYSWELD+ programcsomag

A modellezést, mely egy egyedi sáv lézeres átolvasztását szimulálja egy betétben edzhető C15-ös acél felületén, a Systus nevű programcsomag Sysweld+ moduljával végeztük a Miskolci Egyetem Mechanika és Technológiai Tanszékén, ahol mindemellett más komoly végeselem-analízisre képes szoftvercsomagok is találhatók, mint a Pam-Stamp (lemezalakítás modellezéséhez), Auto Form, I-Deas (teljes tervezőrendszerek végeselem-analízissel).

Viszonylag kevés olyan program létezik, amely képes a fáziselemzés modellezésére. A Sysweld komplex végeselem-analízisre kifejlesztett modul (a Systus programrendszerben), mely képes mind mechanikai terhelések modellezésére, mind termikus folyamatok modellezésére (mint a hőmérséklet-eloszlás elemzése) [Sysweld-Home, 1997].

A SYSWELD+ programrész, mely a SYSTUS+ programcsomag moduljaként működik, többféle folyamat modellezésére alkalmas: képes meghatározni a maradó feszültséget és azokat a feszültségeket, melyek a hegesztési vagy hőkezelési folyamatoknál lépnek fel (edzés, indukciós edzés, felületiréteg-kezelések, illetve diffúziós kiválási folyamatok és a hidrogén diffúziója).

A programcsomag 5 különálló részt foglal magában. A számítások három egymást követő lépésben végződnek el mindegyik eredménye a következő lépés bemenő adataiként szolgálnak, és ezáltal lehet a következő ciklust megoldani. Tehát a megoldás struktúrája szekvenciális. A mechanikai feszültségek hatása a metalurgia átalakulásokra elhanyagolható. A számítások lehetnek két- vagy háromdimenziósak. Ezt a struktúrát grafikusan az **5.3. ábra** szemlélteti.



5.3. ábra

A SYSWELD+ programcsomag általános felépítése [Sysweld-Primer, 1997]

A SYSTUS két modulra épül:

- **Geometria/Meshing**, melyet a mechanikai struktúrák modellezésére használunk. Ez a rész elvégezhető egy CAD-rendszerben (számítógéppel segített tervezőrendszer) vagy CAD/CAM-rendszerben (számítógéppel segített tervező-, illetve gyártó rendszer), melyből egy interfész segítségével át lehet venni az adatokat.
- **Analízis**, ebben a részben több modulra osztjuk az analízist: a test véges elemekre való felosztása, az egyes elemekhez fizikai és numerikus tulajdonságok hozzárendelése (az anyag tulajdonsága, határfelületek meghatározása stb.), majd az elemzés végrehajtása.

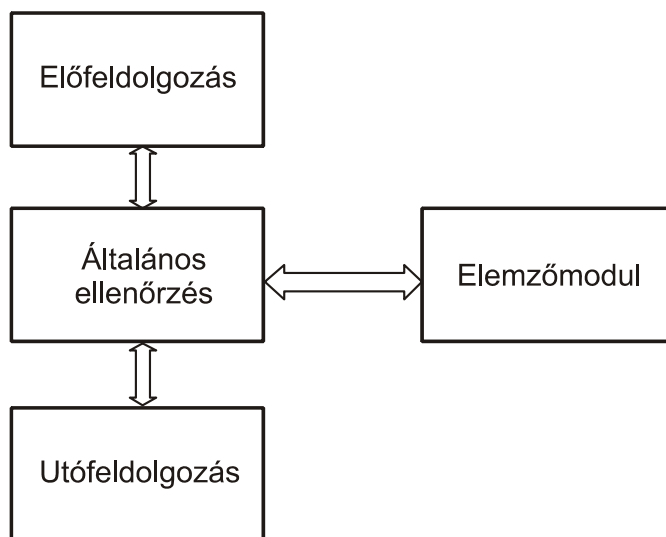
A SYSWELD+ programcsomag Geometria/Meshing modulja ugyanazokat a funkciókat tartalmazza, mint egy általános ilyen rendszer, viszont a második, analízises részében a SYSWELD+ saját speciális funkciókkal rendelkezik.

A Geometria/Meshing modul magában foglalja a geometriai objektumokat és a hálókat (meshed). A geometriai objektum megfelel az elemezni kívánt szerkezet matematikai modelljének. Ez az objektum entitásokból épül fel: pontokból, vonalakból, élekből, felületekből, térfogategységekből. Hasonlóképpen más vége-sele-manalízises programhoz a SYSTUS+ programban is egy szerkezet adott terhelésé-

nek az elemzésénél a geometriai objektum olyan objektummal helyettesítődik, mely egy sablon minta szerint elemi részecskékre és csomópontokra van felosztva.

A SYSTUS+ és a SYSWELD+ általános működésének leírását a **5.4. ábra** tartalmazza. A működési elv a következőképpen írható le:

- Egy fő ellenőrző modul megvizsgál minden egyes parancsot, és továbbküldi a megfelelő modulhoz végrehajtásra.
- Az elemzőmodul elvégzi a kért műveletet, és ezalatt képes értelmezni minden szükséges bemenő adatot.
- Mihelyt befejeződött a művelet, az elemzőmodul újra megteremti a kapcsolatot a monitor parancssorával, és akkor ez elkezd a következő parancs értelmezését.



5.4. ábra

A SYSTUS+ általános működési elve [Bitay-Referat, 1998; Rowshan, 1998]

Ez az eljárás ismétlődik a futtatás befejeződéséig, és az END paranccsal ér véget.

Következésképpen a SYSWELD+ futtatásához szükséges a következők biztosítása:

- a parancsok, melyek szükségesek az elvégzendő műveletek végrehajtásához;
- valamennyi adat, mely szükséges ezeknek a műveleteknek a végrehajtásához.

Ezeket az adatokat és parancsokat a felhasználó továbbítja a SYSWELD+ program felé egy meghatározott nyelv segítségével [Sysweld-Analysis, 1997].

5.3.1. A SYSWELD+ program megformázási módja

A számítási modell a nem lineáris SYSTUS+ modulra épül, a következőket véve figyelembe:

- A fémek átalakulásának számítása és a Gauss-pontban levő szemcsék nagysága, változóként pedig a hőmérsékletet és a fémek átalakulásának sajátosságait használván.
- A hővezetés egyenletének módosulása, figyelembe véve a latens/lappangó átalakulási hőt. A hőmérséklettel kapcsolatos sajátosságokat fázisfüggően is meg lehet állapítani.

5.3.1.1. A fémek átalakulásának modellezése

A fémtanból ismert alapelv, hogy az anyag tulajdonságait a szövetszerkezetét alkotó fázisok saját tulajdonságai, illetve ezen fázisok, szövetelemek mennyiségi arányai határozzák meg.

Számos matematikai modell létezik az anyag tulajdonságainak számítására, fázisaik, szövetelemeik mennyiségi arányainak (P_i) függvényében [Shen, 1996; Ion, 1984].

Az egyik lehetőség a SYSWELD+ program modellje, melynek fejlesztése a Johnson–Mehl–Avrami típusú kinetikus átalakulásokra támaszkodik.

Folyamatos hűlésre vonatkozó fázisátalakulási diagrammok, CCT segítségével jól jellemezhetők a fázisátalakulások.

A mechanikai feszültségek fázisátalakulásra gyakorolt hatását elhanyagoljuk, azonban a fázisátalakulásokból származó mechanikai feszültségeket figyelembe kell venni.

A hő hatására történő átalakulások modellezése

Általában a következő egyenlettel írható le:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{eq}(T) - P}{\tau(T)}; \quad (5.4)$$

ahol P az adott fázis mennyiségi hányada,

t az idő;

$P_{eq}(T)$ az adott hőmérsékleten érvényes egyensúlyfázis-arány és

$\tau(T)$ az átalakulási idő.

Például a (ferrit-perlit) $\rightarrow$ ausztenit esetében az egyenlet a következő:

$$\frac{dP}{dt} = f(T, P) \quad (5.5)$$

Egy adott T hőmérsékleten egy $P_{eq}(T)$ nagyság, mely megfelel az ausztenit egyensúlyi arányának az (5.6) pontban látható egyenlettel írható le:

$$f(T, P_{eq}(T)) = 0 \quad (5.6)$$

Az átalakulás modellezése hűtés esetén

Ausztenit $\rightarrow$ bénit vagy ferrit-perlit

Bizonyos esetekben a bénit CCT-diagramm ívén megjelenő sajátos alakja miatt jobb értékelést érhetünk el a következő egyenlettel:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{eq}(T) - P}{\tau(T)} f(\dot{T}) \quad (5.7)$$

Ausztenit $\rightarrow$ martenzit

Nagyon sok acél esetében a martenzit P fázismennyisége egyedül a hőmérséklettől függ, amely a Koistinen–Marburger-képlettel írható le:

$$P(T) = 1 - \exp(-b(M_s - T)), \quad \text{ha} \quad T < M_s \quad (5.8)$$

M_s a martenzites átalakulás kezdeti hőmérséklete.

A képlet SYSWELD+ programban való alkalmazásának két megközelítését mutatjuk be a következőkben [Ion 1992]:

- A b és M_s paraméterek direkt meghatározása által;
- Leblond-törvénnyel analóg módon.

$$P = 1 - \exp(-b(M_s - T)) \quad T < M_s \quad (5.9)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = -b \cdot \exp(-b(M_s - T)) \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (5.10)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\dot{T} b(1 - P). \quad (5.11)$$

Az (5.7) képlethez hasonlóan

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{eq} - P}{\tau} f(\dot{T}), \quad (5.12)$$

melyből ismert:

$$\begin{aligned}
 P_{eq} &= 1 \text{ és} \\
 \tau &= \frac{1}{b} \\
 f(\dot{T}) &= -\dot{T} \quad .
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Két fázis esetében a következő összefüggések írhatók fel:

1. fázis $\rightarrow$ 2. fázis

$$P_1 + P_2 = 1 \rightarrow \dot{P}_1 = -\dot{P}_2$$

Átalakulás 1 $\rightarrow$ 2

$$\dot{P}_1 = -\dot{P}_2 = -\frac{P_{2eq}^{12}(T) - P_2}{\tau^{12}(T)} = \frac{P_{2eq}^{12}(T)(P_1 + P_2) - P_2}{\tau^{12}(T)}, \tag{5.14}$$

$$\dot{P}_1 = -\dot{P}_2 = -\frac{P_{2eq}^{12}(T)}{\tau^{12}(T)} P_1 + \frac{1 - P_{2eq}^{12}(T)}{\tau^{12}(T)} P_2, \tag{5.15}$$

ha

$$K_{12}(T) = -\frac{P_{2eq}^{12}(T)}{\tau^{12}(T)}, \tag{5.16}$$

$$KP_{12}(T) = \frac{1 - P_{2eq}^{12}(T)}{\tau^{12}(T)}, \tag{5.17}$$

akkor

$$\dot{P}_1 = -K_{12}(T)P_1 + KP_{12}(T)P_2, \tag{5.18}$$

$$\dot{P}_2 = K_{12}(T)P_1 + KP_{12}(T)P_2. \tag{5.19}$$

Átalakulás 2 $\rightarrow$ 1

$$\dot{P}_1 = K_{21}(T)P_2 + KP_{21}(T)P_1, \tag{5.20}$$

$$\dot{P}_2 = -K_{21}(T)P_2 + KP_{21}(T)P_1, \tag{5.21}$$

tudva azt, hogy

$$K_{21}(T) = -\frac{P_{2eq}^{21}(T)}{\tau^{21}(T)}, \tag{5.22}$$

$$KP_{21}(T) = \frac{1 - P_{2eq}^{21}(T)}{\tau^{21}(T)}. \quad (5.23)$$

5.3.1.2. Szemcseméret számítása

A szemcseméret a kiinduló ausztenit szemnagyságától függ, és befolyásolja a hőmérsékletváltozás és az adott fázis aránya. Ez az összefüggés a következő képletekkel fejezhető ki [Sysweld-Analysis 1997]:

$$\dot{D}^a = C \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) - \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} D^a, \quad \text{ha} \quad \dot{\lambda} > 0 \quad \text{és} \quad (5.24)$$

$$\dot{D}^a = C \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \text{ha} \quad \dot{\lambda} \leq 0, \quad (5.25)$$

ahol

D a szemcsenagyság;

T az abszolút hőmérséklet;

a , C (mm^a/sec), Q (J/g.atom) általában pozitív állandók;

$a = 4$,

$C = 0,4948 \times 10^{14} \text{ mm}^4/\text{sec}$,

$Q/R = 63900$,

R gázállandó;

λ ausztenitmennyiség;

$\dot{\lambda}$ az átalakul ausztenit mennyiségének aránya.

5.3.1.3. A hőmérséklet-eloszlás meghatározása

A hőmérséklet-eloszlás számításának módosított egyenlete figyelembe veszi az átalakulás latens hőjét, vagyis a kristályosodás, illetve a szilárd állapotban lezajló fázisátalakulások során elnyelődő és felszabaduló hőmennyiségeket.

Ha

$L_{ij}(T)$: az $i \rightarrow j$ átalakulás latens hője (T hőmérsékleten);

A_{ij} : az i fázisból egységnyi idő alatt j fázissá alakult fázismennyiség.

Tehát:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - \sum_{i < j} L_{ij} \cdot A_{ij}. \quad (5.26)$$

A fajhő és a vezetőképesség a különböző fázisok mennyiségi arányának függvényében adható meg:

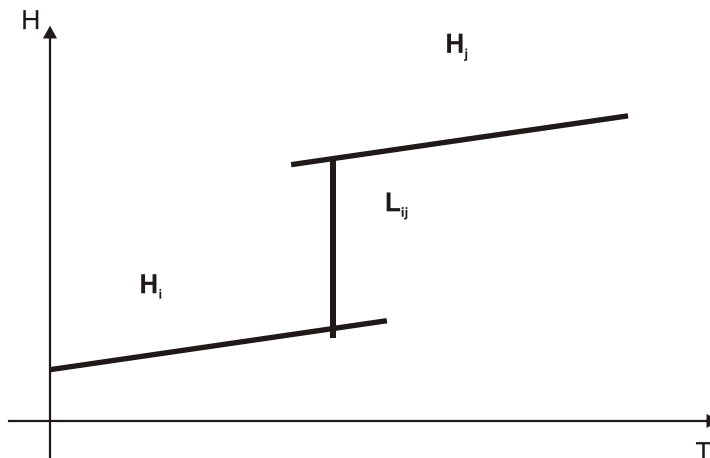
$$c = \sum_i P_i C_i , \quad (5.27)$$

$$\lambda = \sum_i p_i \lambda_i . \quad (5.28)$$

Az anyag fajhőjét és hővezetését – az anyagmérleg alapján – az egyes fázisok fajhőjének és hővezetésének fázisaránnyal súlyozott értékéből számíthatjuk ki:

$$C_i = \frac{dH_i}{dT} , \quad (5.29)$$

$$L_{ij} = H_j - H_i . \quad (5.30)$$



5.5. ábra

Az entalpia hőmérséklet szerinti változása

A SYSWELD+ program lehetőséget ad számos paraméter tág határok közti változtatására, ennek eredményeképpen sokféle folyamat és technológia modellezhető a segítségével.

A továbbiakban egy konkrét példával mutatjuk be a modellezés folyamatát.

A lezajlott szakaszok rövid leírása

Első szakasz:

- az anyag sajátosságainak/tulajdonságainak (esetünkben C15-ös betétben edzhető acél) a CCT-diagrammal történő bevitele;
- az elemzett darab geometriai modellezése;
- a geometriai modell felbontása, vagyis véges részekre történő bontása (a véges elem típusának megválasztásával);
- a határfeltételek megszabása (a darab felületeinek hőmérséklete).

Második szakasz:

- A lézersugár geometriai mozgásának és paramétereinek (előtolási sebesség, a sugárnyaláb teljesítménye) meghatározása, leírása egy FORTRAN nevű program segítségével.

Harmadik szakasz:

- A bevitt adatokat tartalmazó alkönyvtárak és a program első két szakaszának végbemenetele után a SYSWELD program létrehozza az eredményeket tartalmazó alkönyvtárakat, úgy, ahogy azt a felhasználó kérte.

Negyedik szakasz

- Az eredmények elemzése és a következtetések levonása.

Az utolsó szakasznak mindenképpen tartalmaznia kell a számokkal kifejezett eredmények validálási eljárását is. Ez a validálás analitikus vagy kísérleti modellezés útján történhet (a mi esetünkben kísérleti adatokkal), hogy a végén a kutatás gyakorlati következtetéseit is le lehessen vonni.

5.4. A modellezés szakaszai

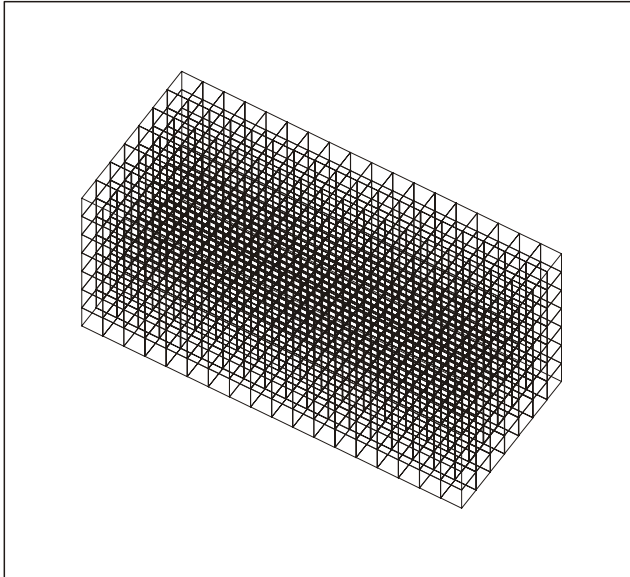
5.4.1. A feladat meghatározása

A modellezést megelőzően számos felületátolvasztást végeztünk különböző technológiai paraméterekkel (a lézersugár teljesítménye: 1 kW, 2 kW, 3 kW, az előtolási sebesség: 300, 500, 700 mm/perc) C15-ös betétben edzhető acélon. A modellezés célja az volt, hogy a kísérletben használt anyagminőség és azonos technológiai paraméterek mellett végzett modellezések számított eredményeit és a kísérletileg mért eredményeket összevethessük [Bitay-Referat, 1998; Rowshan, 1998].

5.4.2. A próbadarab geometriai modellezése

A modellezést a háromdimenziós mesh-rutin segítségével hajtottuk végre, melyet Automatic-Mesh-Rutinnak neveznek [Sysweld-Reference, 1997].

A darab modelljét a TMESH.DAT alkönyvtárban mentettük, ez az **5.7.1. mellékletben** látható. A munkadarab felosztását mesh formátumba az alábbi **5.6. ábra** szemlélteti.



5.6. ábra

A darab hálógenerálása [Bitay-Referat, 1998; Rowshan, 1998]

5.4.3. A hőátadás modellezése

Bevittük az összes adatot, amely a hőátadás és a metallurgiai számítások elvégzéséhez szükséges. Ezek a következők:

- hőtani jellemzők;
- határfeltételek (a hőforrás és a hőátadás együtthatója);
- fémtani adatok.

A figyelembe vett hőtani tulajdonságok a következők:

- hővezetés;
- fajhő és sűrűség;
- a lézernyaláb előtolási sebessége.

A három figyelembe vett határfeltétel a következő:

- a bevivő hőmérséklet;
- a hőátadási együttható;
- a lézernyaláb intenzitáseloszlása.

A bemeneti adatokat a THERM2.DAT alkönyvtár tartalmazza, mely az **5.7.2. melléklet**ben látható.

5.4.4. A fémtani adatok modellezése

A vizsgálandó anyag fémtani adatainak Sysweldbe történő bevitele érdekében (esetünkben C15-ös acél) egy METALLURGY.DAT nevű alkönyvtárat hozunk létre. A metallurgiai paramétereket a CCT-diagrammból vesszük ki, a C15-ös acél esetében kilenc különböző lehűlési görbe felhasználásával, melyet a **3.10. ábrán** láthatunk.

A metallurgiai fázisok a következők:

- 1. fázis – alapanyag;
- 2. fázis – ferrit;
- 3. fázis – perlit;
- 4. fázis – bénit;
- 5. fázis – martenzit;
- 6. fázis – ausztenit.

Az átalakulások a következők:

a) hevítésre

- ferrit+perlit → ausztenit.

b) hűtésre

- ausztenit → ferrit;
- ausztenit → perlit;
- ausztenit → bénit;
- ausztenit → martenzit.

A CCT-diagrammban kijelölt kilenc lehűlési görbének a számszerű adatait az **5.7.3. melléklet** tartalmazza. Ezen számadatokat beillesztettük a fémtani modellbe ferrit, perlit, bénit és martenzit esetében is, lásd az **5.7.4.–5.7.7. mellékleteket**. A SYSWELD+ felhasználói kézikönyve részletesen tartalmazza a fémtani adatok bevitelének lehetőségeit [Sysweld-Analysis, 1997].

Végül létrehoztunk egy METALURGY.DAT állományt, lásd a **5.7.8. mellékletet** [Sysweld-Exemple, 1994].

5.4.5. Számítási lépések

Amennyiben az előző alfejezetekben részletezett lépéseket végrehajtottuk, elkezdhetjük a szimuláció számításait. Ez a THERM11.DAT állomány adatai felhasználásával történik, az állomány tartalma a **5.7.9-es mellékletben** látható [Sysweld-Exemple, 1994].

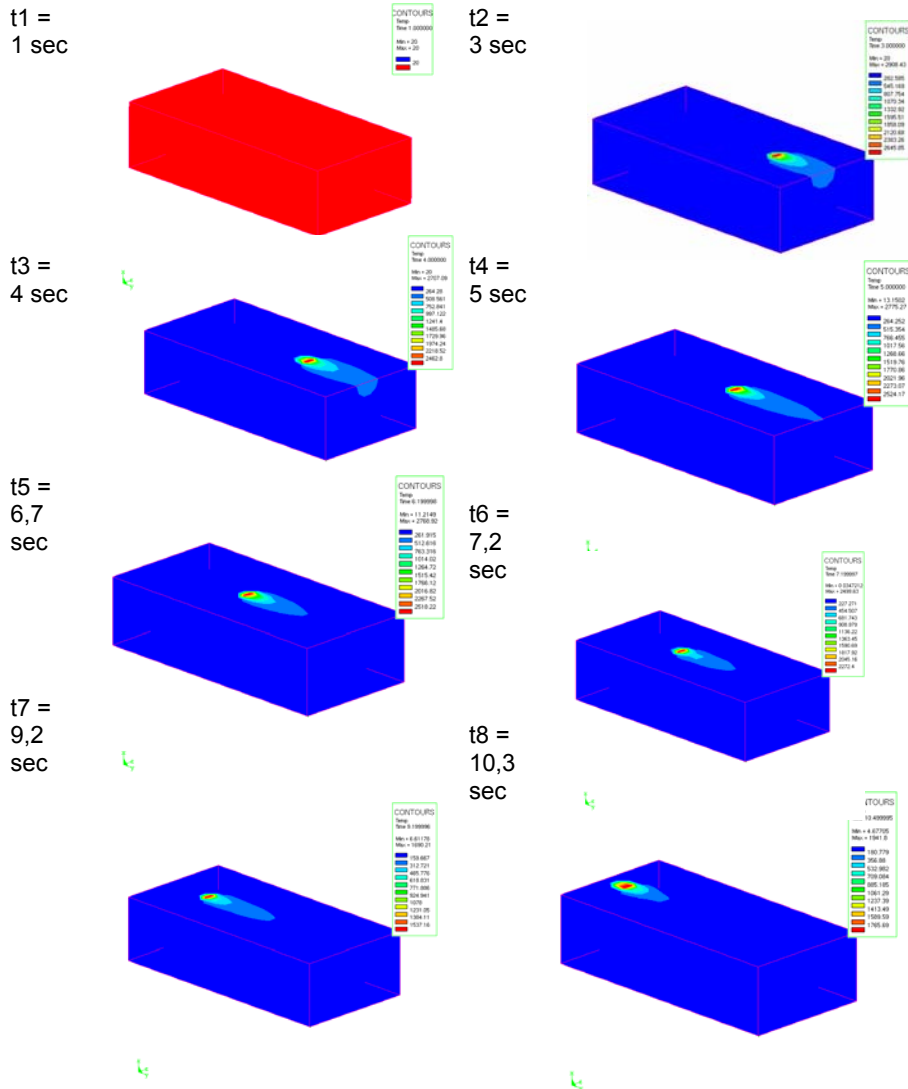
5.5. A lézeres felületolvasztás modellezésének eredményei

A kísérletek során alkalmazott 9 paraméter kombinációival végeztük el a folyamatok modellezését. A lézerrel történő felületkezelés (átolvasztás) folyamatának teljes időtartamára számítottuk a hőmérséklet-eloszlást, különböző időpontokban ábrázolva az eredményeket (**5.7. ábra**).

Annak érdekében, hogy mindhárom pásztázósebességnél azonos időpillanatban ábrázoljuk az aktuális hőmérséklet-eloszlást, s így összehasonlítható eredményekhez jussunk, a $t = 4$ sec adódott a legalkalmasabbnak.

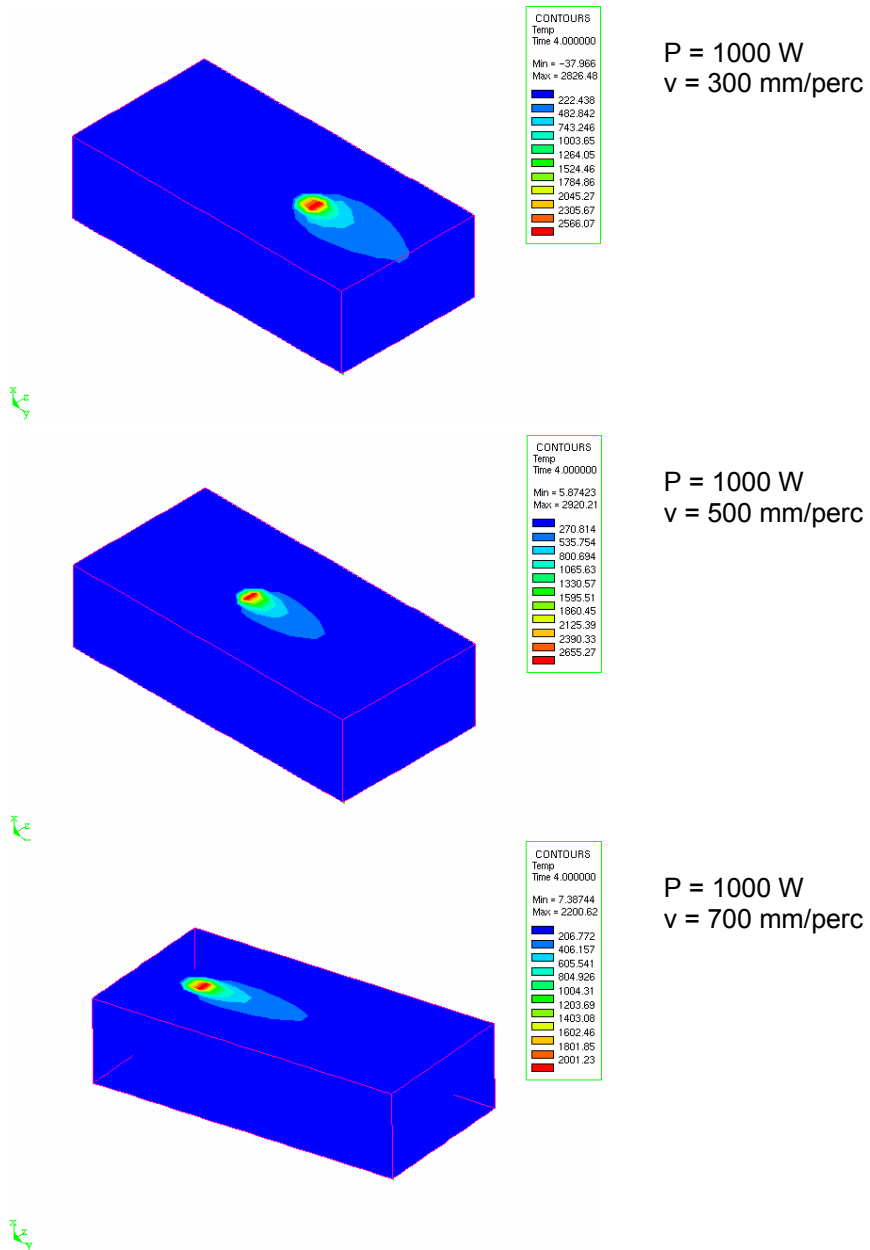
A következőkben bemutatjuk a folyamat szimulációjának néhány eredményét [Bitay-Referat 1998; Rowshan, 1998; Bitay–Rowshan 1998; Rowshan 1998; Bitay 2000; Bitay-Doktori értekezés 2002]:

- a hőmérséklet-eloszlás a darab felületén a lézernyaláb különböző pásztázósebességeinél és teljesítményénél (**5.8.–5.10. ábrák**);
- a hőmérséklet-eloszlás a modell különböző részeiben (**5.11. ábra**);
- a hőmérséklet-eloszlás a darab hosszanti keresztmetszetében, a lézernyaláb különböző pásztázósebességénél és teljesítményénél (**5.12.–5.14. ábra**);
- az ausztenit és a martenzit arányának megoszlása a felületi megolvasztott rétegben az olvasztási folyamat alatt, ha a lézer teljesítménye 1kW, pásztázósebessége pedig 500 mm/perc (**5.15. ábra**).



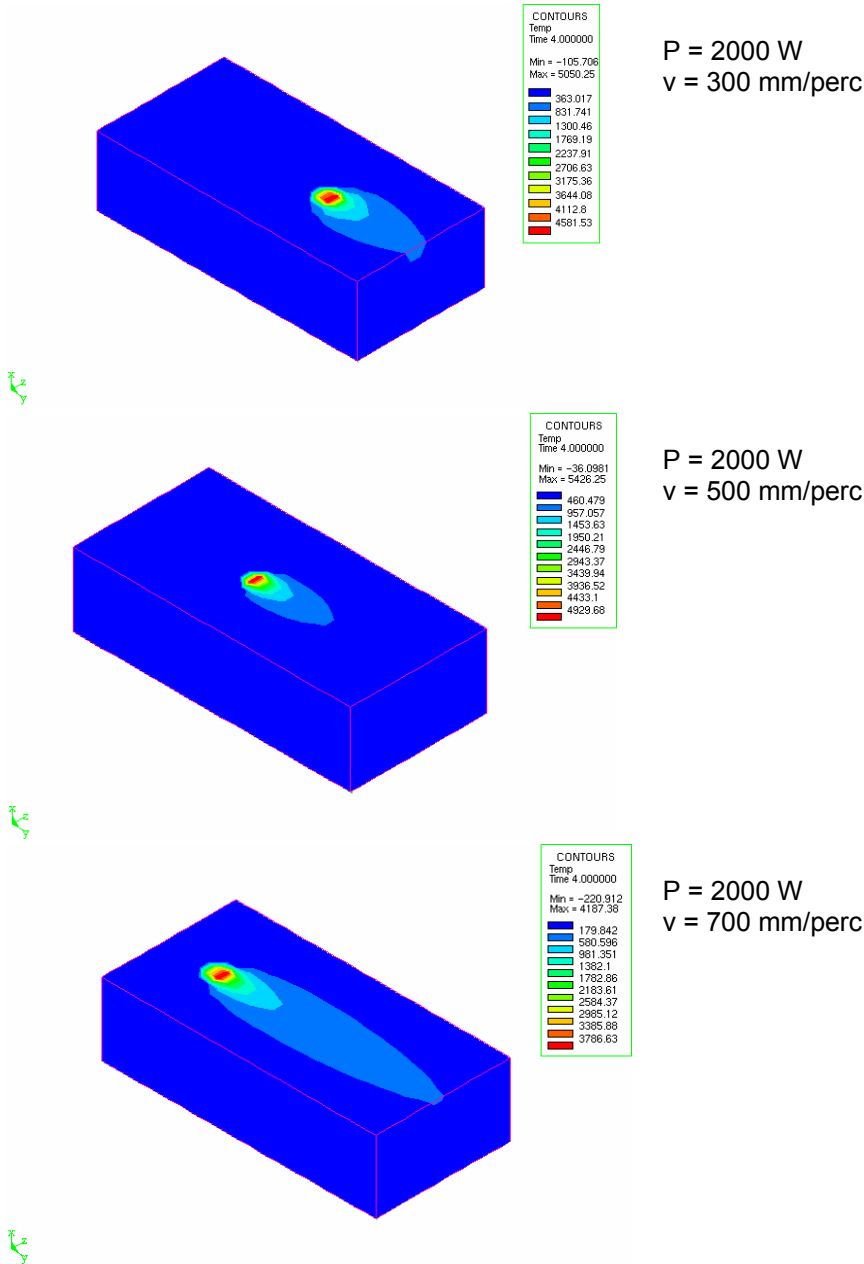
5.7. ábra

A hőmérséklet-eloszlás a lézeres felületátolvasztás különböző időpontjaiban
(a lézernyaláb teljesítménye 1kW, pásztázósebessége 300 mm/perc)



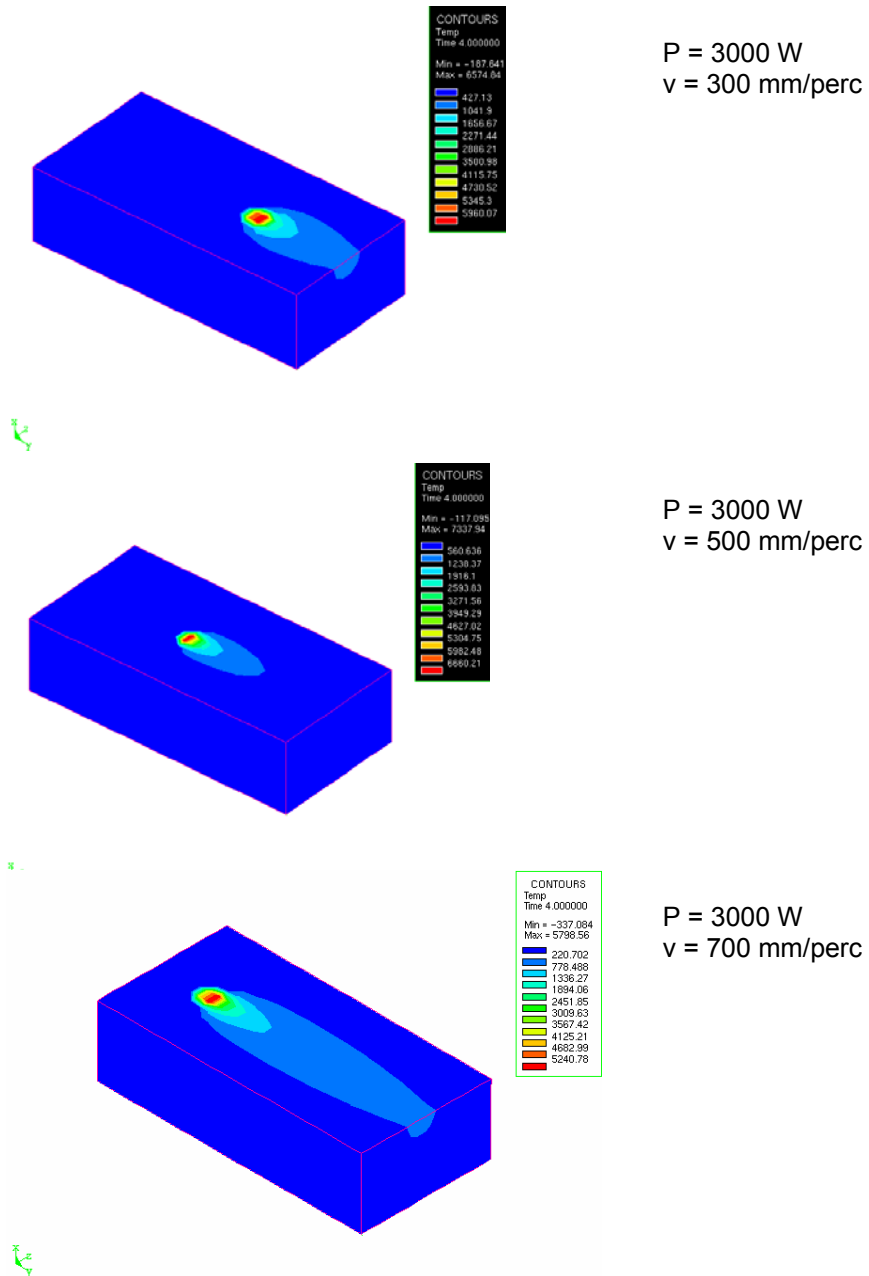
5.8. ábra

A hőmérséklet-eloszlás a darab felületén különböző pásztázósebességek és 1kW-os teljesítmény esetén, a $t = 4 \text{ sec}$ időpillanatban



5.9. ábra

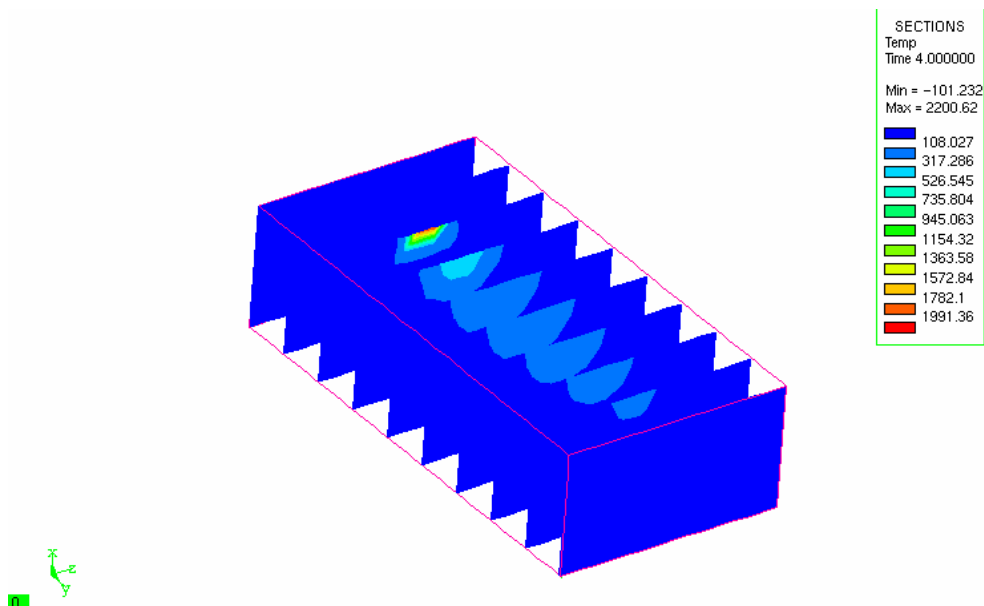
A hőmérséklet-eloszlás a darab felületén különböző pásztázósebességek és 2kW-os teljesítmény esetén, a $t = 4 \text{ sec}$ időpillanatban



5.10 ábra

A hőmérséklet-eloszlás a darab felületén különböző pásztázósebességek és 3kW-os teljesítmény esetén, a $t = 4 \text{ sec}$ időpillanatban

Az **5.11. ábra** olyan módon szemlélteti a hőeloszlást a modell különböző keresztmetszeteiben, hogy az összevethető legyen a kísérleti nyomvonalakról készített, szintén keresztmetszeti csiszolatok mikroszkópi felvételeivel. Ugyanakkor az ilyen ábrázolási módban nem határozható meg egyszerűen, hogy a hő által megolvasztott réteg mélysége hol lesz maximális.



5.11. ábra

A hőmérséklet-eloszlás a modell különböző keresztmetszeteiben

Ennek okán a jobb összehasonlítás érdekében célszerűbb a hosszanti keresztmetszetben és egy fix időpillanatban ábrázolni a hőmérséklet-eloszlást. Az **5.12.–5.14. ábrák** mutatják ezt a fajta metszetet, az olvasztási folyamat kezdetétől mért $t = 4$ sec időpontban, mind a 9 különböző technológiai paraméterkombinációra.

A hosszanti metszetben felvett szimulációs ábrák elemzése igazolta, hogy ez a fajta illusztráció alkalmas arra, hogy az adott időpontban elért maximális hőmérsékletet, illetve a megolvasztott felületi réteg maximális mélységét egyaránt meghatározzuk, s ez a két érték nem azonos keresztmetszetben jelentkezik.

Másrészt felismertük, hogy az eredményeket nem lehet összehasonlítani, ha a hőmérséklet-skála a szimuláció ideje alatt automatikusan módosul – a teljes hőmérséklet-intervallumot automatikusan azonos számú, nevezetesen 10 egyenlő lépésközi hőmérséklet-tartományra osztva, ahogy eddig eljártunk. Ehelyett rögzített hőmérséklet-skálát kell alkalmaznunk, melynek alsó értéke 200 °C , maximális értéke 2000 °C , léptéke pedig 200 °C volt.

$P = 1 \text{ kW}$
 $v = 300 \text{ mm/perc}$



$P = 1 \text{ kW}$
 $v = 500 \text{ mm/perc}$



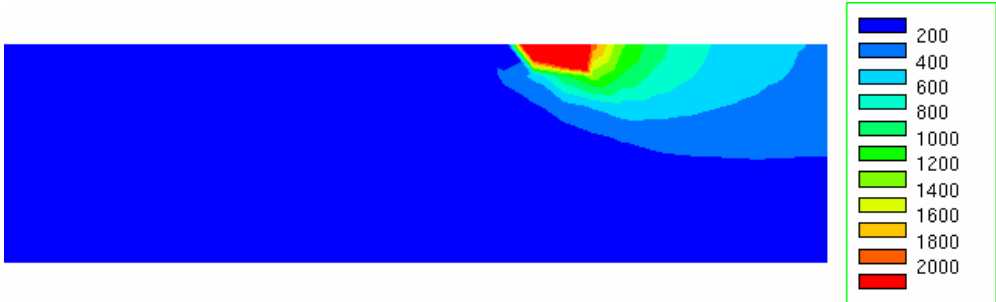
$P = 1 \text{ kW}$
 $v = 700 \text{ mm/perc}$



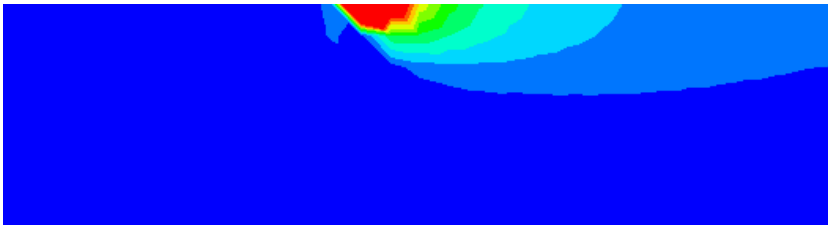
5.12. ábra

Hőmérséklet-eloszlás hosszanti keresztmetszetben a lézernyaláb különböző előtolási sebességénél, 1 kW-os teljesítmény esetében, a $t = 4 \text{ sec}$ időpillanatban

$P = 2 \text{ kW}$
 $v = 300 \text{ mm/perc}$



$P = 2 \text{ kW}$
 $v = 500 \text{ mm/perc}$



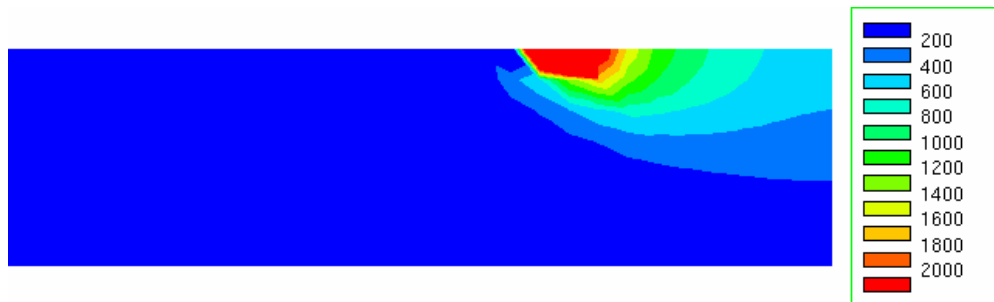
$P = 2 \text{ kW}$
 $v = 700 \text{ mm/perc}$



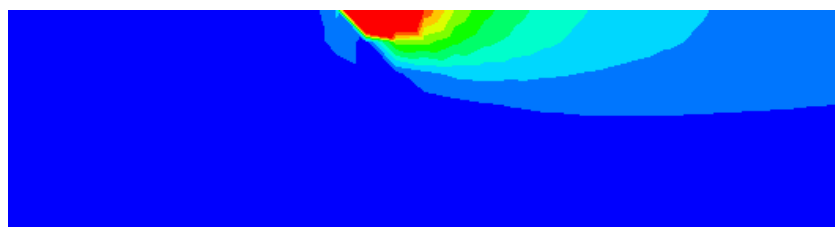
5.13. ábra

Hőmérséklet-eloszlás hosszanti keresztmetszetben a lézernyaláb különböző előtolási sebességénél, 2 kW-os teljesítmény esetében, a $t = 4 \text{ sec}$ időpillanatban

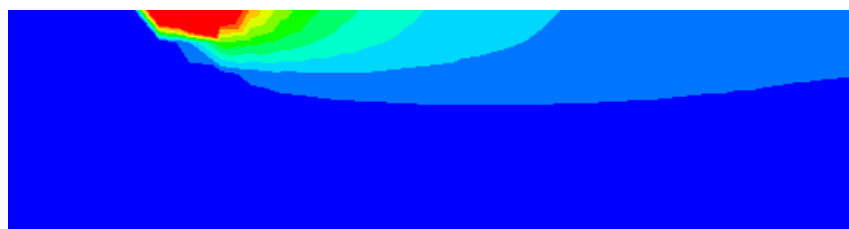
$P = 3 \text{ kW}$
 $v = 300 \text{ mm/perc}$



$P = 3 \text{ kW}$
 $v = 500 \text{ mm/perc}$



$P = 3 \text{ kW}$
 $v = 700 \text{ mm/perc}$



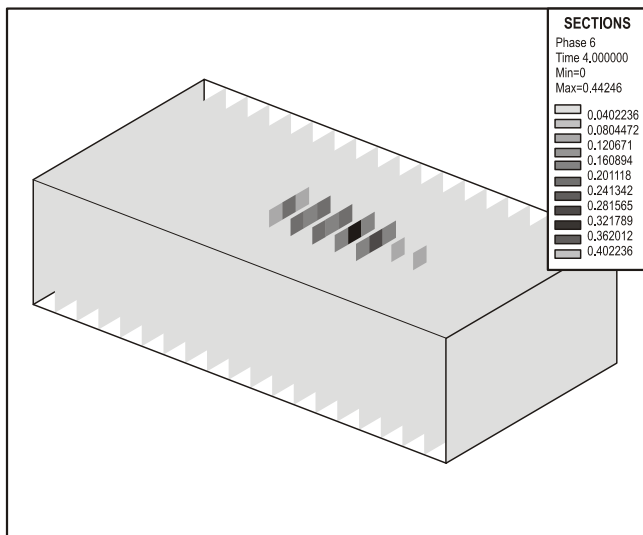
5.14. ábra

Hőmérséklet-eloszlás hosszanti keresztmetszetben a lézernyaláb különböző előtolási sebességénél, 3 kW-os teljesítmény esetében, a $t = 4 \text{ sec}$ időpillanatban

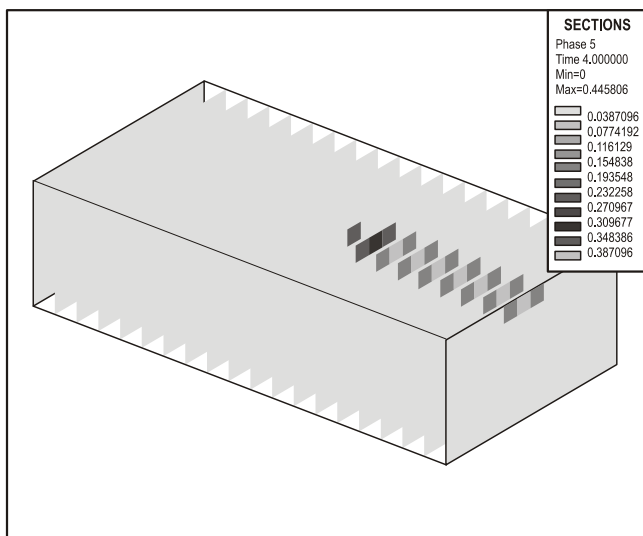
A szimuláció révén a hőmérséklet-eloszlás számításán túl meghatároztuk az ausztenit, illetve martenzit fázisok mennyiségi arányát a lézerrel kezelt felületi rétegben, különböző technológiai paramétereknél (lézernyaláb teljesítmény és pásztázósebesség).

Az **5.15. ábra** az ausztenit és martenzit fázisok mennyiségi arányát és eloszlását mutatja a lézeres felületolvasztás folyamán a $t = 4$ sec időpontban, amikor a lézernyaláb teljesítménye 1kW és pásztázósebessége 500 mm/perc volt.

AUSZTENIT



MARTENZIT



5.15. ábra

Az ausztenit és martenzit fázismennyisége és eloszlása a lézeres felületolvasztás folyamán ($t = 4$ sec időpontban, a lézernyaláb teljesítménye 1kW, pásztázósebessége 500 mm/perc)

5.6. A lézeres felületolvasztás modellezésének következtetései

A **3. fejezet**ben bemutattuk a C15-ös acél különböző paraméterekkel végzett lézeres felületkezelésének eredményeit, az **5. fejezet**ben pedig ennek számítógépes szimulációját. A **3.19–3.21. ábrák**on található, kilenc különböző paraméterkombinációval végzett felületkezelés keresztmetszeti csiszolatának mikroszkópos felvételei alapján megállapítható, hogy a lézer teljesítményének növelésével a kezelt réteg mélysége is növekszik, a pásztázás sebességének növelésével viszont csökken a kezelt sáv szélessége és mélysége.

A keménységmérés eredményeiből egyértelműen kiderül, hogy a pásztázás sebességének növelésével a mintadarab keménysége is növekszik. A kezelt rétegben a legnagyobb keménység a lézerrel kezelt sáv közepén tapasztalható.

A legnagyobb keménység elérése érdekében a lézer teljesítményének elegendőnek kell lennie az acél felületi rétegének megolvasztásához, s emellett a hevítési és lehűlési sebességnek is minél nagyobbnak kell lennie. Vizsgálataink során a legnagyobb keménységet 2 kW lézerteljesítmény mellett 700 mm/min pásztázási sebességgel értük el. Nagyobb teljesítménnyel végzett kezelés, 3 kW lézerteljesítmény mellett kisebb keménység volt tapasztalható, mint 2 kW esetében, ennek valószínűsíthető oka a kisebb hűlési sebesség.

A számítógépes szimuláció eredményeit a kísérleti vizsgálatok eredményeivel összevetve ellenőriztük. A kísérleti vizsgálatok során tapasztaltakkal megegyezően a számítások is azt az eredményt adták, hogy az alkalmazott lézer teljesítményének növelésével a felület hőmérséklete és az átolvadt felületi réteg mélysége is növekszik, a pásztázás sebességének növelésével pedig az átolvadt réteg mélysége csökken.

Az átolvadt réteg hőmérsékletét mérni és a kialakult hőmérsékletmezőt szabályozni rendkívül nehéz. Ezért a szimuláció során kiszámított hőmérséklet-eloszlást nem tudjuk mérési eredményekkel ellenőrizni. A számítások validálásához a felületkezelt nyomvonalak geometriai adatai – elsősorban mélysége – szolgálhat alappul.

5.6.1. A kísérleti és a szimulációs adatok összehasonlítása

A felületkezelt réteg mélységére vonatkozóan a számított és a mért eredmények kissé eltérnek egymástól. Mint ahogy az **5.16. ábrában** található oszlopdiagramon látható, a felületkezelt réteg mélységének szimulációval számított értéke kisebb, mint a vizsgálatok eredménye alapján mért mélység.

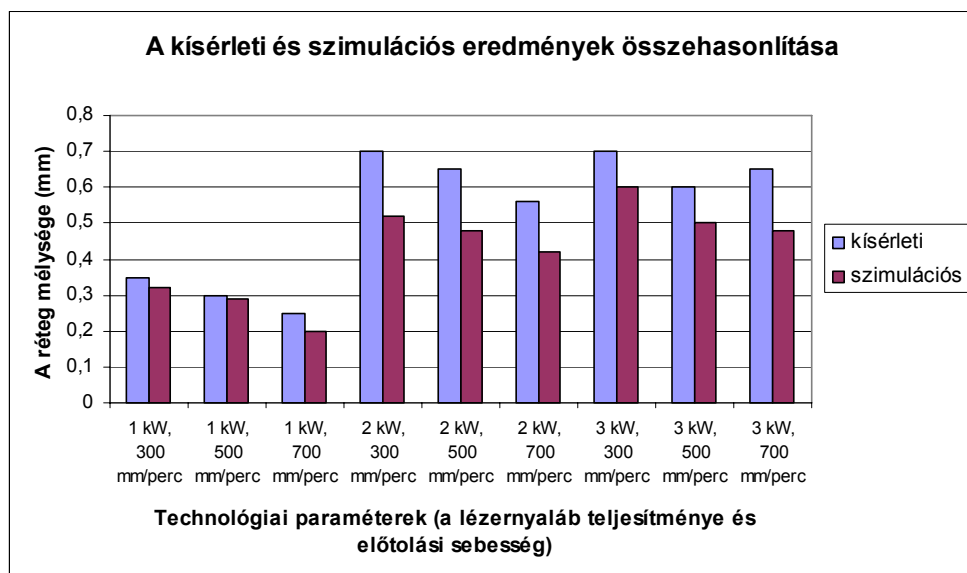
A mért és a számított értékek eltérésének okai a következők lehetnek.

- A lézersugárból a felületen elnyelődött energia arányáról, vagyis az abszorpció együtthatójáról kevés adat található az erre vonatkozó irodalomban. A számítások során az $A = 0,3$ értéket használtuk.

- A szimuláció során a lézernyaláb eloszlását trapéz alakúnak feltételeztük. A valóságban azonban a lézersugár energiája közel Gauss-eloszlású jelleget mutat. A jövőben a szimuláció pontosítása során a lézer eloszlásának pontosabb leírása szükséges annak érdekében, hogy a számított adatok jobban közelítsenek a mért értékekhez.

A szimulációs számítások és a vizsgálatok eredményei jó közelítéssel egyezést mutatnak. A kisebb eltérések a számítások által használt bemenő adatok pontatlanságát figyelembe véve igazolhatóak.

A számított és a mért értékek összehasonlítása azt mutatja, hogy a SYSWELD+ program alkalmas a felületi lézerkezelés szimulációjára. A kísérleti eredmények figyelembe vételével a bemenő adatok pontosítása révén a számítások eredményei jobban közelíthetnek a vizsgálatok eredményeihez. A lézeres felületkezelés során kialakult szövetszerkezet (fázisok és szemcseméret), továbbá a felület keménysége a SYSWELD+ programmal jól számítható.



5.16. ábra

A szimulációs és kísérleti adatok összehasonlítása [Bitay-Doktori értekezés, 2002]

A szimuláció eredményeinek segítségével és ezeknek a kísérleti adatoknak a validálásával a jövőben más anyagokkal kapcsolatban is végezhető hasonló szimuláció, és így mentesülünk majd a költséges kísérleti próbálkozásoktól.

5.7. Mellékletek

5.7.1. melléklet

```
TMESH.DAT
defi
t
option spatial
three-dimesional
nodes
1 / 0 0 0
2 / 15 0 0
3 / 15 -57 0
4 / 0 -57 0
5 / 0 -57 28
6 / 15 -57 28
7 / 15 0 28
8 / 0 0 28
elem
100 / 1 2 3 4 8 7 6 5
21000 / 1 2 3 4 type 2004
22000 / 4 3 6 5 type 2004
23000 / 8 7 6 5 type 2004
24000 / 1 2 7 8 type 2004
25000 / 1 8 5 4 type 2004
26000 / 2 7 6 3 type 2004
edge
1000 / 1 2 7
2000 / 2 3 28
3000 / 3 4 7
4000 / 1 4 28
5000 / 4 5 14
6000 / 1 8 14
7000 / 8 5 28
8000 / 7 6 28
9000 / 7 8 7
10000 / 5 6 7
11000 / 3 6 14
12000 / 2 7 14
verif
return
renumb
1 1000
return
save data 100
```

5.7.2. melléklet*THERM2.DAT*

search data 100

definition

heat transfer / metallurgy

option therm conv spatial meta

restart geom

mater prope

e 100 to 2843 / kx ky kz 0.03 c 0.005 ro 1 vy 5 mater 1

constraint

node line 2 3 / tt

node line 3000 10005 / tt

node line 3001 10004 / tt

node line 3002 10003 / tt

node line 3003 10002 / tt

node line 3004 10001 / tt

node line 3005 10000 / tt

node line 4 5 / tt

elem 21000 to 21195 23000 to 23195 24000 to 24097 / kt 1 vari 2

elem 25000 to 25391 26000 to 26391 / kt1 vari 2

loading

1

node line 2 3 / tt 20

node line 3000 10005 / tt 20

node line 3001 10004 / tt 20

node line 3002 10003 / tt 20

node line 3003 10002 / tt 20

node line 3004 10001 / tt 20

node line 3005 10000 / tt 20

node line 4 5 / tt 20

elem 21000 to 21195 23000 to 23195 24000 to 24097 / tt 20

elem 25000 to 25391 26000 to 26391 / tt 20

elem 26006 to 26384 step 14 / qr 184 vari -1

medium

translation / velo 5

table

1 / *fortran*

function f(x)

dimension x(5)

x1 = x(1)

x2 = x(2)

x3 = x(3)

```

t = x(4)
v = 5
ri = 0.71
re = 0.72
pc = 14
ps = v*t
ps = -ps
ps = ps+0.72
x1 = x1-pc
x2 = x2-ps
r = (x2*x2+x1*x1)^(0.5)
coef=1
if (r.gt.re) coef = 0
if (r.gt.ri) aa = r-re
if (r.gt.ri) bb = ri-re
if (r.gt.ri) aa = aa/bb
if (r.gt.ri) coef = coef*aa
f = coef
continue
return
end
2/  fortran
function f(t)
eps = 0.7
sig = 0.5678*-13
t0 = 20.
a = 0.
t0 = t0+273.15
t1 = t +273.15
a = t1*t1
b = t0*t0
c = a+b
d = t1+t0
d = d*c
d = d*eps
d = d*sig
f = d+0.000025
continue
return
end
return
medium
save data medi 101

```

5.7.3. melléklet

A ferrit átalakulás adatai

Hűlési görbe	Az átalakulás kezdete °C	Kezdeti idő s	Az átalakulás vége °C	Végső idő s	A hűlési sebesség °C/s	A létrejött fázis %
1	840	9900,728	710	41466,47	0,004	88
2	820	259,821	700	883,062	0,192	85
3	810	78,761	690	237,573	0,755	84
4	790	7,915	680	26,902	5,793	81
5	780	3,432	680	9,754	15,818	77
6	740	1,488	670	3,138	42,421	65
7	700	0,705	630	1,172	150,059	26
8	680	0,523	610	0,844	218,369	7
9	620	0,377	560	0,508	457,401	2

A perlit átalakulás adatai

Hűlési görbe	Az átalakulás kezdete °C	Kezdeti idő s	Az átalakulás vége °C	Végső idő s	A hűlési sebesség °C/s	A létrejött fázis %
1	710	41466,47	700	44016,429	0,003	12
2	700	883,062	670	995,01	0,267	15
3	690	237,573	670	267,69	0,664	16
4	680	26,902	650	33,151	4,800	19
5	680	9,754	620	13,543	15,832	23
6	670	3,233	570	5,873	35,000	38
7	630	1,172	540	2,194	88,101	33
8	610	0,844	530	1,282	182,707	14
9	560	0,508	520	0,626	338,670	3

A bajnit átalakulás adatai

Hűlési görbe	Az átalakulás kezdete °C	Kezdeti idő s	Az átalakulás vége °C	Végső idő s	A hűlési sebesség °C/s	A létrejött fázis %
7	540	2,194	460	2,785	135,240	17
8	530	1,282	470	1,580	201,438	21
9	520	0,626	480	0,749	325,612	8

A martenzit átalakulás adatai

Hűlési görbe	Az átalakulás kezdete °C	Kezdeti idő s	Az átalakulás vége °C	Végső idő s	A hűlési sebesség °C/s	A létrejött fázis %
7	470	2,785	0	0	0	0
8	470	1,580	0	0	0	0
9	480	0,749	0	0	0	0

5.7.4. melléklet

Ferrite adjustment for C15

PHASE
 CALCULATE
 Ferrite adjustment for C15
 VELOCITIES -0.0035,-0.023,-0.71,-5.296,-15.825,-40.152,-124.464,-200.84,-373.89
 FVELOCITIES 0.0022,0.011,0.32,2,5.5,7.8,5.6,2.2,1.3
 PROPORTION FT 1
 TAU 10
 TABLE
 1 / 1 690 1 830 0
 INITIAL TEMPERATURE 900
 690 STEP -5
 DRAW
 FORMAT
 Phases computation
 curve
 RETURN

5.7.5. melléklet

Pearlite adjustment for C15

PHASE
 CALCULATE
 Pearlite adjustment for C15
 VELOCITIES -0.0035,-0.023,-0.71,-5.296,-15.825,-40.152,-124.464,-200.84,-373.89
 FVELOCITIES 0.0019,0.016,0.5,4.9,17.5,75,220,130,50
 PROPORTION FT 2
 TAU 100
 TABLE
 2 / 1 640 1 690 0
 INITIAL TEMPERATURE 700
 640 STEP -5
 DRAW
 FORMAT

```
Pearlite adjustment dor StE355
LIMITS XMIN 700 XMAX 600 YMIN 0 YMAX 1
XHEADER temperature
YHEADER phase
curve
RETURN
```

5.7.6. melléklet

Bainitic adjustment for C15

```
PHASE
CALCULATE
  Bainitic adjustment for C15
VELOCITIES -124.464,-200.84,-373.89
FVELOCITIES 25,50,32
PROPORTION FT 3
TAU 50
TABLE
  3 / 1 420 1 520 0
INITIAL TEMPERATURE 600
  420 STEP -5
DRAW
FORMAT
  Bainitic adjustment for C16
LIMITS XMIN 400 XMAX 600 YMIN 0 YMAX 1
XHEADER temperature
YHEADER phase
CURVE
RETURN
```

5.7.7. melléklet

C15 CCT diagram

```
METALLURGY
CALCULATE
  C15 CCT diagram
FILE "METALLURGY.DAT"
MATERIAL 1
AUSTENITE 6
CCT VMIN -1000 VMAX -0.00100 CUTTING
10 LOGARITHM
INITIAL TEMPERATURE 900
  0 STEP -5
DRAW
ABSCISSA TIME SECONDS
PRECISION 0.01
DIAGRAM CYCLE
```

RETURN

5.7.8. melléklet

METALLURGY.DAT

MATERIAL 1 PHASE 6

REACTION

1 6 heating peq table 1 tau table 2
6 2 cooling peq table 3 tau table 9 ftable 4
6 3 cooling peq table 5 tau table 10 ftable 6
6 4 cooling peq table 7 tau table 11 ftable 8
6 5 cooling ms 420 km 0.011

TABLE

1/1 700 0 850 1
2/1 700 1 1000 0.2 1200 0.1
3/1 689 0 690 1 830 0
4/1 -311.111 1 -110.526 1.3 -64.864 3.5 -32.727 5.8
* -8.378 2.4 -2.912 1.05 -0.236 0.11 -0.0625 0.03 -0.00242 0.0018
5/1 639 0 640 1 690 0
6/1 -311.111 50 -110.526 90 -64.864 110 -32.727 58 -8.378 9
* -2.912 2.8 -0.236 0.2 -0.0625 0.05 -0.00242 0.0012
7/1 419 0 420 1 520 0
8/1 -0.236 0.025 -0.0625 0.014 -0.00242 0.00045
9/1 689 10 830 10
10/1 639 100 690 100
11/1 419 50 520 50
END

5.7.9. melléklet

THERM11.DAT

search data 101
medi
trans nonlinear static
behaviour metal 3
method direct non symme
algo iter 100
precision absol displa 0.01
init condi
e 100 to 2499 / p 1 0 0
n / tt 20
time init 0
3 / store 1
return
save data trans 102
end

6. Lézeresen kezelt felületi réteg vastagságának elemzése/modellezése

6.1. Bevezető

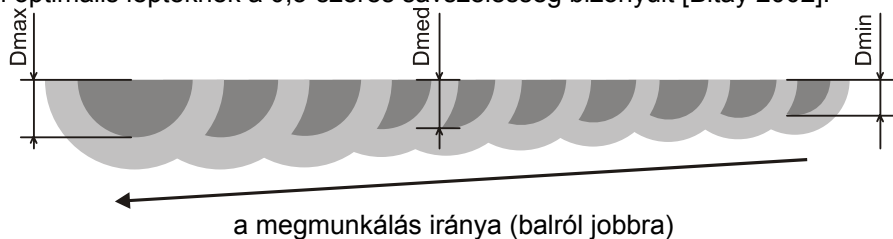
Több éven át végzett lézeres felületkezelési kísérletek során olyan jelenséget észleltünk, mely a felületkezelt réteg egyenlőtlenségét jelzi, s így természetesen kihat a felületi réteg tulajdonságaira is [Bitay 2002].

A lézeresen kezelt felületi réteg állandó vastagságának megtartása a felület teljes egészében csak úgy lehetséges, ha a kezelés során folyamatosan változtatjuk a technológiai paramétereket. Ezeknek az adott alapanyag és lézeres felületkezelési technológia esetén állandó felületi rétegvastagságot adó paramétereknek az elemzésével és szimulációs vizsgálatok során való meghatározásával foglalkozik az alábbi fejezet.

6.2. Kísérleti tapasztalatok, mérési eredmények, következtetések

6.2.1. Lézeres felületkezelés által létrejött felületi réteg vastagságának elemzése

A lézeres felületkezelésnél (legyen szó akár átolvasztásról vagy felületi ötvözésről) a lézernyaláb sávonként pásztázza a felületet, mely a sávok egymásra lapolása révén jön létre. Az egymásra lapolódás mértékét úgy határoztuk meg, hogy a kezelt réteg tulajdonságai ne változzanak a pásztázott csíkok között. A mi esetünkben optimális léptéknek a 0,5-szeres sáv szélesség bizonyult [Bitay 2002].



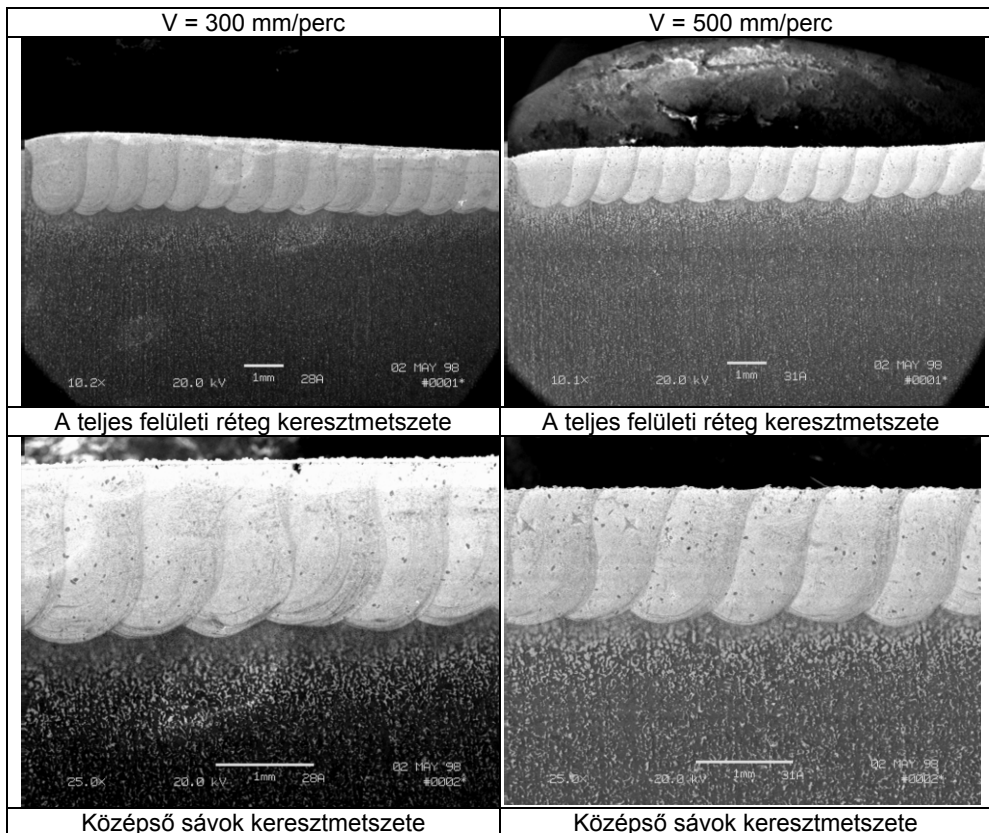
6.1. ábra

A lézeresen átolvasztott felületi réteg átlapoló sávjai keresztmetszetének vázlatos rajza [Bitay, 1998]

6. Lézeresen kezelt felületi réteg vastagságának elemzése/modellezése

Egy nagyobb felületi réteg pásztázásakor (15 sáv) azt tapasztaltuk, hogy a kezelt felületen a sávok vastagsága (mélysége) a megmunkálás során egyre mélyebb lett (lásd a **6.1.–6.3. ábrákat**). Ennek az a magyarázata, hogy míg az első sáv pásztázásakor az alapanyag szobahőmérsékletű, addig a kezelés során, az előző sáv pásztázása miatt a darab felmelegedik, s elérheti akár a 200 °C-t is [Bitay–Rowsan 1998]. Ennek következtében a kezelés előrehaladásával a sávok mélysége egyre nő. Ez a jelenség észlelhető többféle lézeres technológiai eljárás: felületi edzés, felületi átolvasztás, felületi ötvözés (karbidok diszpergálásával: WC, TaC, NbC) esetében is.

6.2.2. A felületi réteg vastagságának mérési eredményei (C15-ös acél TaC-dal való lézeres felületötvözése esetén)

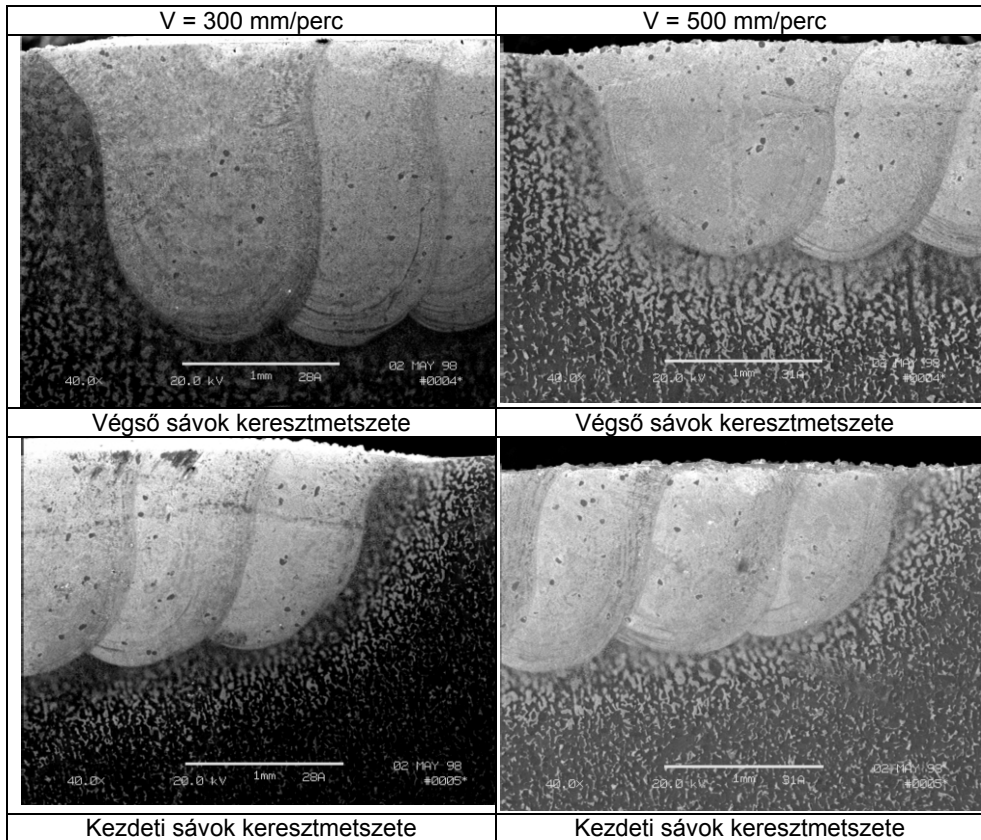


6.2. ábra

TaC-dal diszpergált lézeres felületátolvasztás próbadarabjai keresztmetszetének elektronmikroszkópos felvételei [Bitay, 1998] (lézernyaláb-teljesítmény: 3 kW, pásztázósebesség, $v = 300, 500$ mm/perc)

6. Lézeresen kezelt felületi réteg vastagságának elemzése/modellezése

Az előző példa egy C15-ös, betétben edzhető acél alapanyag felületi lézeres ötvözése során kialakult felületi réteg vastagságának változását szemlélteti. Az alkalmazott technológiai paraméterek: lézernyaláb-teljesítmény: 3 kW; pásztázósebesség: 300, illetve 500 mm/perc; 15 átlapolt sáv 15 mm hosszúságban; az ötvözőanyag TaC (az ötvözés diszpergálással történt, hozama: 3,25 g/perc).

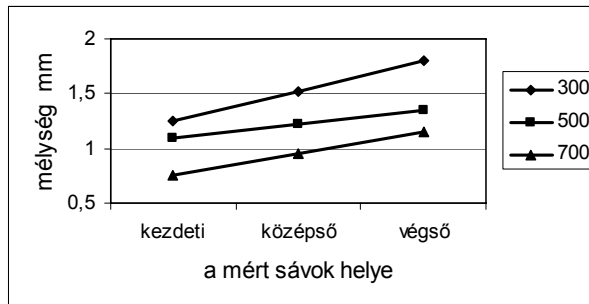


6.3. ábra

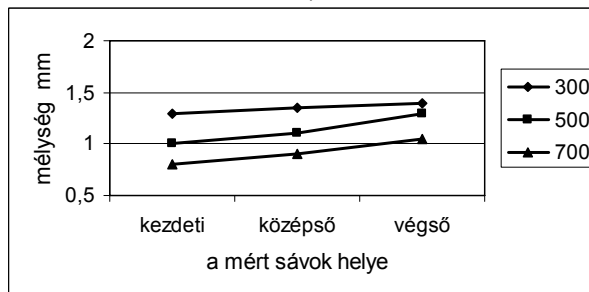
TaC-dal diszpergált lézeres felületátolvasztás próbadarabjai keresztmetszetének elektronmikroszkópos felvételei különböző szakaszokban [Bitay, 1998]
(lézernyaláb-teljesítmény: 3 kW, pásztázósebesség, $v = 300, 500$ mm/perc)

A megfigyelések és mérések alapján elmondható, hogy jelen esetben a felületi kezelés során a sávok mérete csak a mélységben változik (szélességben nem). Ennek a változásnak a mértékét a **6.4.a. ábrán** látható diagramm szemlélteti, melyen a lézeres felületátolvasztás és a TaC-dal való diszpergálás sávjainak mélységét adtuk meg, különböző szakaszokon mérve (kezdeti, középső, végső), illetve különböző pásztázósebességeket is figyelembe véve.

Ugyanezek az arányok voltak megfigyelhetők más technológiai paraméterek, illetve ötvözőanyagok esetében is (lásd **6.4.b. ábrát**, acél NbC-dal való ötvözése).



a)



b)

6.4. ábra

A lézeresen (a) TaC-dal [Bitay, 1998]; b) NbC-dal átolvasztott és ötvözött felületi réteg mélységének értéke a felületi kezelés különböző szakaszaiban, adott pásztázósebességnél (300, 500, 700 mm/perc)

6.2.3. Az egyenlőtlen felületi réteg megelőzésének vizsgálata

Ahhoz, hogy a kedvezőtlen felületi rétegvastagság-egyenlőtlenség kialakulását megelőzzük, a lézeres felületkezelés során a hőhatás szabályozását kell kézben tartanunk. Ehhez két technológiai paraméter áll rendelkezésünkre: a lézernyaláb teljesítménye, melynek növelésével nagyobb hőbevitel érhető el, valamint a lézernyaláb pásztázósebessége, melynek növelésével csökkenthető a hőbevitel.

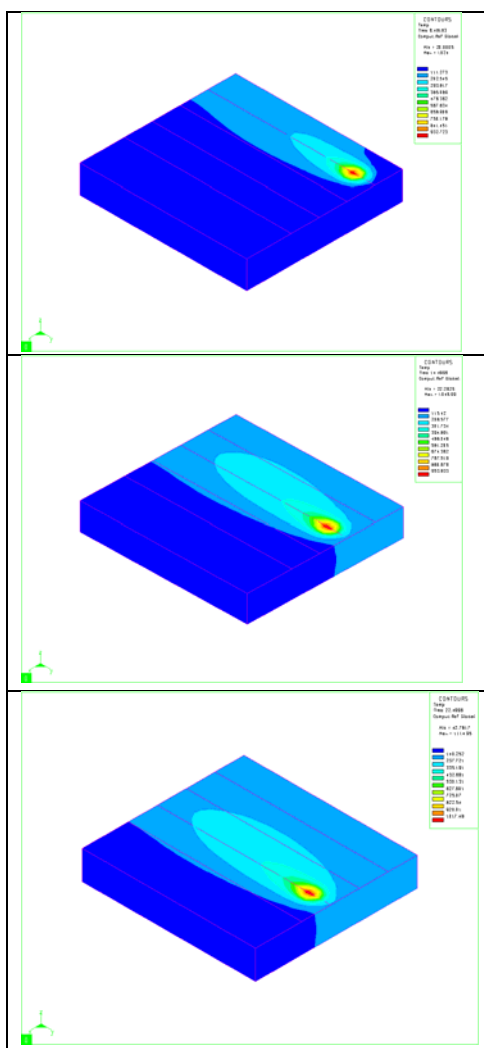
A kísérleti úton való optimális paramétermeghatározás igen költséges lenne, ezért szimulációs módszert alkalmazása lenne célszerű.

Mivel C45-ös anyagon elvégzett kísérletek és szimulációk során is tapasztalható volt a rétegvastagság egyenlőtlensége, és meghatározhatóak voltak azok a paraméterek, melyek korrekcióra szorultak, várható, hogy a technológiai paraméterek a C15-ös anyagra is meghatározhatóak.

6.3. Modellezés

A C45-ös acél lézeres felületkezelésének modellezését végeztük vége-selemes-módszerrel a SYSWELD software alkalmazásával.

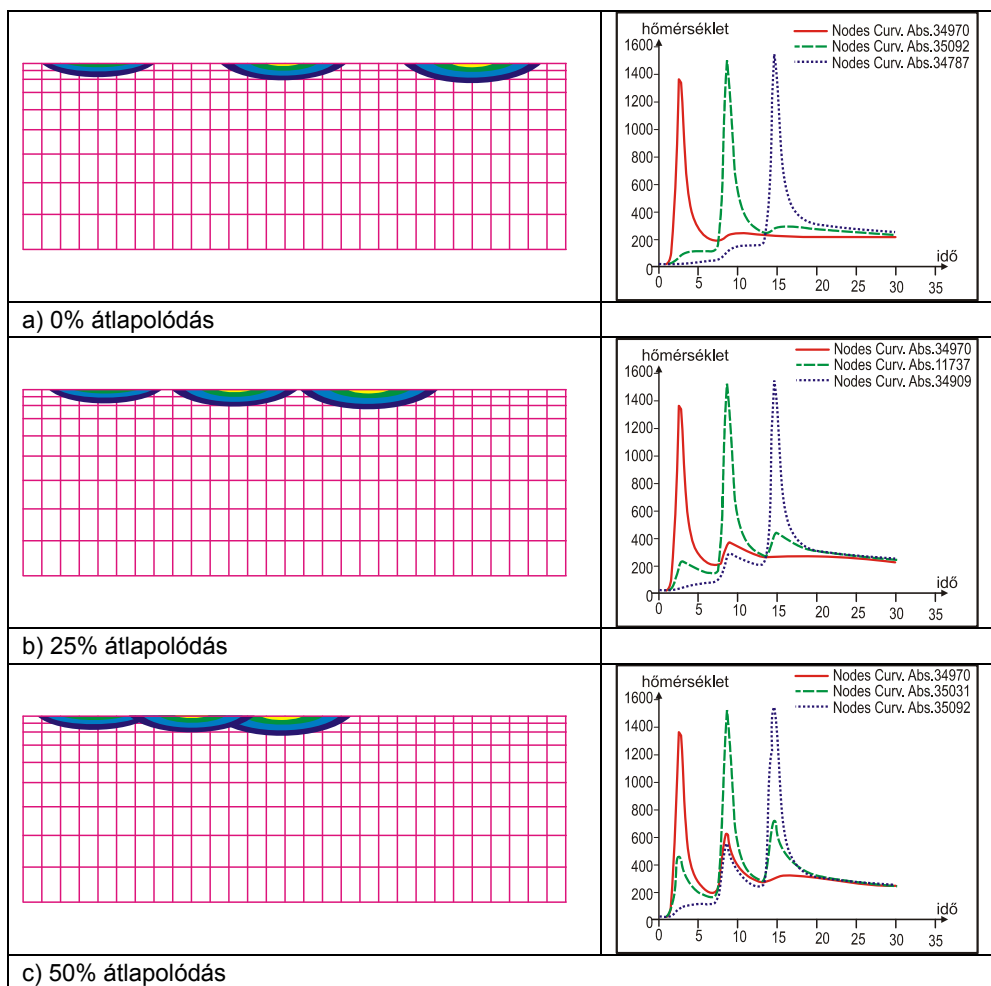
Az átlapolódás eljárásának modellezéséhez kijelöltünk három egymást követő lézersávot, ahogy azt az ábra mutatja, majd az átlapolódásos eljárást különböző átlapolódási távolságokkal modelleztük.



Egy, a lézernyaláb középpontja alatt elhelyezkedő, kiválasztott pont hőeloszlásának eredményeit az **6.5. ábra** illusztrálja.

A szimulációs eredmények felhasználásával egyenként megvizsgálhatjuk a sávok teljes hőmérséklet-eloszlását, és össze is hasonlíthatjuk őket. Ezen vizsgálatok eredménye megmutatja az előmelegítés során jelentkező maximális hőmérséklet-növekedést.

A **6.6. ábra** mutatja, hogy az előző sávok okozta előmelegedés miatt egyre nagyobb a hőmérséklet, és egyúttal nagyobb a hőhatászóna. A lézersávok közelsége fokozza ezt a hatást.



6.6. ábra

A három egymást követő sáv esetében vizsgált átlapolódás ábrái és azok hőmérséklet-idő görbéje [Bitay–Rowsan, 2005]

6.4. Összegzés

Megállapítottuk, hogy a lézeres felületkezelés során az egymás után átolvasztott rétegek tulajdonságaira nagymértékben hatással van az alapanyag előhevülése, amit a homogén rétegvastagság elérése miatt figyelembe kell venni. Ezt a jelenséget a kísérleti vizsgálatok (C15-ös acélon), valamint a szimulációs vizsgálatok (C45-ös acélon) egyaránt tapasztaltuk [Bitay–Rowsan 2005]. Az egyenletes felületi minőség létrehozásához tehát korrigálni kell a technológiai paramétereket (a lézernyaláb teljesítményét, melynek növelésével nagyobb hőbevitel érhető el, valamint a lézernyaláb pásztázósebességét, melynek növelésével csökkenthető a hőbevitel), s ezek értékét folyamatosan változtatni kell. A technológiai paraméterek folyamatos változtatásának meghatározásához, az optimalizáláshoz újabb modellezésre van szükség, s az így meghatározott értékeket kísérleti úton lehet majd validálni. Jelen fejezetben csupán szemléltetni kívántuk, hogy a lézeres technológiák szinte minden fázisában a jobb eredmények elérése végett mindig célszerű a modellezést alkalmazni, szimulációs megoldásokat találni ahhoz, hogy a költséges kísérletezgetést elkerüljük.

Irodalom

1. Anderson, Stephen: *Review and forecast of the laser markets*. Laser Focus World, 2001. January.
2. Ariely, S. – Shen, J. – Bamberger, M. – Dausiger F. – Hugel, H.: *Laser surface alloying of steel with TiC*. Surface and Coatings Technology, 1991. Nr.45. 403–408.
3. Ashby, M. F. – Easterling, K. E.: *The transformation hardening of steel surfaces by laser beams*. I. Hypo-eutectoid steels. Acta Metallurgica, 1984. 32. 1935–1948.
4. Ashby, Michael F. – Jones, David R. H.: *Engineering Materials 2., An introduction to Microstructures processing and Design*. International Series on Materials Science and Technology, Volume 39., Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, 1986.
5. Ashby, Michael F. – David R. H. Jones: *Engineering Materials 1., An introduction to their Properties and Applications*. International Series on Materials Science and Technology, Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, 1993.
6. Bagyinszki Gyula – Réti Tamás – Felde Imre: *Edzett acél felületi keménység-eloszlásának becslése*. Bányászati és Kohászati lapok, 1999. 2–3. szám. 78–80. 119–123.
7. Bagyinszki Gyula – Felde Imre – Réti Tamás: *Keménységbecslési eljárás acélok lézeres felületedzésének tervezéséhez*. Jubilee International Conference, Budapest, 1999. 235–240.
8. Bagyinszki Gyula – Réti Tamás – Kálazi Zoltán – Felde Imre – Yue Sun – Tom Bell: *Duplex surface treatment of a 40CrMnMo7 steel based on the combination of plasma nitriding and laser hardening*. 14th International Conference on Surface Modification Technologies, 11-13 September, Paris, 2000.
9. Bagyinszki Gyula: *Gyártásismeret és technológia*. Budapesti Műszaki Főiskola BGK, Budapest, 2004.
10. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Lézeres anyagtechnológiák energiasűrűségi jellemzői*. X. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2005. 75–80.
11. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő – Kovács Tünde: *Alakító szerszámacélok károsodásállóságának javítása felületkezeléssel*. XI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2006. 9–14.
12. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Anyagtulajdonság- és technológiai paraméter-meghatározó módszerek értékelése*. XII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2007. 5–10.
13. Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Bevezetés az anyagtechnológiák informatikájába*. Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2007.

14. Bakondi K. – Bartos J. – Búza G. – Györi J. – Kiss Gy. – Ta-kács J. – Udvardi T.: *Fémek felületi tulajdonságainak átalakítása koncentrált energiájú eljárásokkal*. Gépgyártástechnológia, 1989. XXIX. évf. 8. szám, 340–347.
15. Beckmann, L.H.J.F. – Huétink, J. – Geijselaers, H.J.M.: *Finit Element Analysis of Laser Transformation Hardening*. Proceedings ECO3, SPIE 1990. Vol. 1276 CO₂ Laser and Applications II. 426–436.
16. Belforte, D. – Levitt, M. (eds.): *Economic review & technology trends in The Industrial Laser Handbook*. Springer, 1994. 1–27.
17. Bergheau, J.M. – Pont, D. – Leblond, J.B.: *Three-dimensional simulation of a laser surface treatment through steady state computation in the heat source's comoving frame*. European Conference on New Advances in Computational Structural Mechanics, Giens, 1991. 321–328.
18. Bergmann, H.W. – Müller, D. – Endres, T. – Damascheck, R. – Domes, J. – Bransden, A.S.: *Industrial applications of surface treatments with high power lasers*. Proceedings of Second ASM Heat Treatment and Surface Engineering Conference in Europe, 1-3 June, Dortmund, 1993, Materials Science Forum, Vols. 163–165, Trans Tech Publications, 1994. 377–404.
19. Bertóti Imre: *Felületvizsgálat röntgen-fotoelektron spektroszkópiával (XPS-ESCA)*. Doktori tanfolyami jegyzet, 1997.
20. Bertóti Imre – Marosi György – Tóth András (szerk.): *Műszaki felülettudomány és orvosbiológiai alkalmazásai*. B+V Lap- és Könyvkiadó, Budapest, 2003.
21. Bielak R. – Benkő B.: *FEM simulation of laser beam cladding with experimental validation*, European Conference. Junior EUROMAT'98, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Lausanne. 1998.
22. Bitay Enikő – Orbán György: *Computation Model for Monitoring of Manufacturing Interference on Derived Surfaces*. International Conference, microCAD '98, Miskoc, 87–90, 1998.
23. Bitay Enikő – Roósz András: *Acélfelület keménységének növelése lézeres felületátolvasztással*. III. FMTÜ, EME, Kolozsvár/Cluj, 1998. 253–256.
24. Bitay Enikő: *Lézeres átolvasztás*. Tanulmány, kézirat, ME, 1998.
25. Bitay, Enikő – Rowshan, Reza: *Simulation of laser surface melting*. European Conference, Junior EUROMAT'98. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Lausanne, 1998.
26. Bitay, Enikő: *Influența unor compuși chimici asupra proprietăților oțelurilor și prelucrarea datelor cu ajutorul tehnicii de calcul*. Referat de Doctorat nr.3., IPC-N, Kolozsvár/Cluj, 1998.
27. Bitay Enikő: *Kerámiaszemcsék diszpergálása lézeres felületötvöznél*. IV. FMTÜ, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 1999. 169–172.
28. Bitay, Enikő – Roósz, András – Búza, Gábor: *CO₂ laser surface-alloying steel by dispersion of carbide-powders*. Solidification and Gravity III, Materials Science Forum, Miskolc-Lillafüred, Hungary, 1999.
29. Bitay Enikő: *Lézeres felületkezelés számítógépes szimulációja*. Jubileumi Tudományos Ülésszak, Kézirat, EME-MTA, Kolozsvár/Cluj, 2000.
30. Bitay Enikő: *Lézeresen kezelt felületek kopásállóvizsgálata*. VI. FMTÜ, Műszaki Tudományos Füzetek, EME, Kolozsvár/Cluj, 2001. 111–118.

31. Bitay Enikő: *Tratament superficial cu laser al oțelurilor cu conținut redus de carbon*. Teză de doctorat, IPC-N, Kolozsvár/Cluj, 2002. (Doktori értekezés)
32. Bitay E. – Roósz A.: *Lézeres felületátolvasztás folyamatának elemzése*. IX. FMTÜ, EME, Kolozsvár/Cluj, 2004. 275–286.
33. Bitay Enikő – Rowshan Reza: *Lézeres felületkezelés technológiai paramétereinek folyamatos változtatásának szimulációja*. MicroCAD 2005, Nemzetközi Tudományos Konferencia 2005. március 10–11. Miskolci Egyetem, L szekció, 2005. 7–12.
34. Bitay, Enikő – Roósz, András: *Investigation of Phenomenon's Taking Place in Laser Surface Alloying Steel of WC*. Solidification and Gravity IV, Materials Science Forum, published by Trans Tech Publications Ltd, CH-8707 Uetikon-Zürich, Switzerland, 2005. 301–306.
35. Bloyce A.: *Energy beam surface melting and alloying of tool steel*. PECO-HITEST Network III. Seminar, Proceedings ed. and publ. by AGH, Krakow, 1994. 110–126.
36. Bonello, L. – Howes, M.A.: *Some factors affecting the laser heat-treating process*, Heat Treating, 1981. 39–44.
37. Bor Zsolt: *A mindentudó fénysugár: a lézer*. ME, 2003. 02. 10., Budapest: <http://www.mindentudas.hu/bor/index.html>, 2003.
38. Búza G. – Kálazi Z.: *Jövők anyagai, technológiái*. Bányászati Kohászati Lapok, Budapest, 1995. 128. sz. 361–365.
39. Búza Gábor: *Lézersugaras felületötvözés*. ILAS – 3. Ipari Lézer Alkalmazási Szeminárium, ILAS, Budapest, 2006.
40. Cheung, Noé – Pinto, Maria Aparecida – Filippini Ierardi, Maria Clara – Garcia, Amauri: *Mathematical Modeling and Experimental Analysis of the Hardened Zone in Laser Treatment of a 1045 AISI Steel*. Materials Research, 2004. Vol. 7. No. 2. 349–354.
41. Cho, H.S. – Woo, H.G.: *Estimation of hardened layer dimensions in laser surface hardening processes with variations of coating thickness*. Surface and Coatings Technology, Vol. 102., 1998.
42. Czibere Tibor: *Vezetéses hőátvitel*. Miskolci Egyetemi Kiadó 1998.
43. Donțu, O.: *Tehnologii de prelucrare cu laser*. Ed. Tehnică, București, 1985.
44. Dutta Majumdara, J. – Ramesh Chandraa, B. – Galunb, R. – Mordikeb, B.L. – Mannaa, I.: *Laser composite surfacing of a magnesium alloy with silicon carbide*. Composites Science and Technology 63. 2003. 771–778.
45. Edward, Lyndon – Endean, Mark: *Materials in Action Series Manufacturing with Materials*. Open University, 1990.
46. Fagan, M.J.: *Finite Element Analysis*. Theory and Practice, Anglia. 1992. 1–4.
47. Felde, I. – Kohlheb, R. – Búza, G. – Verő, B. – Réti, T.: *Microstructure and Hardness Prediction in Laser Heat-Treated Steels Using Computer Simulation*. Surface Modification Technologies XI (Edited by T. S. Sudarsham), The Institute of Materials, London, 1998.
48. Felde, I. – Réti, T.: *Prediction of hardness on laser heat treated steels using computer simulation*. European Conference, Junior EUROMAT'98, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Lausanne. 1998.

49. Elliot, C.M. – Ockendon, J.R.: *Weak and Variational Methods for Moving Boundary Problems*. Research Notes in Mathematics, Pitman, 1981.
50. Ganesh, R. K. – Faghri, A. – Hahn, Y.: *A generalized thermal modeling for laser drilling process – I. Mathematical modeling and numerical methodology*. Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. Vol. 40. No. 14. 3351–3360.
51. García-Alonso, M.C. – Escudero, M.L. – López, V. – Macías, A.: *Characterization and Corrosion Behaviour of Laser Surface Alloyed Ni-Cr-W-Mo-Cu-C-B Coatings*. ISIJ International 1997. Vol.37. 161–168.
52. Gasser, E. – Kreutz, E. W. – Krönert, W. – Lohmann, K. – Wissenbach, K. – Zografou, C.: *Dispersion of hard particules in light alloys with CO₂ laser radiation (Surface of Aluminium)*. ECLAT, Göttingen, DGM Verlag, 1992. 651–653.
53. Gergely Márton – Konkoly Tibor: *Számítástechnika alkalmazása szerkezeti acélok és hőkezelési technológiák kiválasztásához*. Országos Műszaki Információs Központ és Könyvtár, Budapest, 1987.
54. Germaud, M. et al.: *The microstructure of rapidly solidified Al-Fe alloys subjected to laser surface treatment*. Acta Metall., 1990. Vol.38. Nr.12. 2587.
55. Gnanamuthu, D. S.: *Laser Surface Treatment*. Optical Engineering, 19, 1980. 783–792.
56. Gnanamuthu, D.S: 1976, US Patent no. 3952180.
57. Grum, J. – Šturm, J.: *Characteristics of laser surface melt-hardening and possibilities of optimizing process*. Proceeding of the Second International Conference on Quenching and the Control of Distortion, Cleveland, Ohio, 1996. 193–200.
58. Grum, Janez: *Laser surface hardening*. Volum 2. Materials Science and Technology Series, University of Ljubljana, faculty for Mechanical Engineering, Ljubljana, 2002.
59. Harold, C. Martin – Graham, F. Carey: *Introduction to Finite Element Analysis*. Mc Graw-Hill, Inc 1976.
60. Holman, J. P.: *Heat transfer*. Library of Congress Catalog Card Number: 78-16845207-029603-0, McGraw- Hill, Inc 1972.
61. Huétink, J. – Geijselaers, H. J. M.: *Finit Element Analysis of Transformation Hardening*. University of Twente, 1996.
62. Imre László: *Hőátvitel összetett szerkezetekben*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
63. Ion, J.C – Easterling, K.E. – Ashby, M.F.: *A Second Report on Diagrams of Microstructure and Hardness for Heat-Affected Zones in Welds*. Acta Metall. Vol.32, Nr. 11, Pergamon Press Ltd, Anglia, 1984. 1949–1962.
64. Ion, J.C. et al.: *Laser transformation hardening of low alloy hypoeutectoid steel*. Material Science and Tehnic, 1992. Vol.8. 799.
65. Ion, J.C.: *Modeling of laser material processing*. The Industrial Laser Handbook ed. by D. Belforte, M. Levitt, Springer, 1994. 39–47.
66. Iravani-Tabrizipour, Mehrdad: *Image-Based Feature Tracking Algorithms for Real-Time Clad Height Detection in Laser Cladding*. A thesis presented to the University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2007.

67. Ishide, T. – Mega, M. – Matsumo, O. – Ito, S. – Mitsuhashi, T.: *Kaleidoscope Beam Homogenizer for High Power CO₂ and YAG Laser*. Laser Treatment of Materials, ed. by B.L. Modike, DGM, 1992. 57–62.
68. Jánossy Lajos – Gnädig Péter – Tasnádi Péter: *Vektorszámítás, vektorok integrálása*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1983.
69. Kocsisné dr. Baán Mária: *Lézertechnológiák alkalmazása a műszaki felületudomány terén*. Oktatási segédlet, Miskolc, 1996.
70. Kovács Gábor: *Optomechatronika II. 6. Lézerek*. BME Mechatronika Optika, és Műszertechnika Tanszék, előadásanyag, 2006.
<http://www.fot.bme.hu/letoltes/OPTOMECHATRONIKA%20II/Optomechatronika2-Lezerek.pdf>
71. Krause, V. – Treusch, H.G. – Beyer, E. – Loosen, P.: *High Power Laser Diodes as a beam source for Materials Processing*. Laser Treatment of Materials, ed. B.L. Mordike, DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1992.
72. Kreyszig, Erwin: *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
73. Lugscheider, E. – Bolender, H. – Krappitz, H.: *Laser Cladding of Paste-bound Hardfacing Alloys*. Proceedings of Surface Modification Technologies V. Int. Conference, 2-4 September, 1991, Birmingham, ed. By T.s. Sudarshan, J.F. Braza, The Institute of Materials, 1992. 371–381.
74. Nieveergelt, J.– Farrar, J. C. – Reingold, E.M.: *Matematikai problémák megoldásának számítógépes módszerei*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
75. Orlich, J. et al.: *Atlas zur Wärmebehandlung von Stähle*. Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, 1972.
76. Páczelt István: *A végeselem módszer szerepe a gépészmérnök munkájában*. Gép XXXVIII. évfolyam, 1986. 7. szám, 254–257.
77. Palumbo, G. – Pinto, S. – Tricarico, L.: *Numerical finite element investigation on laser cladding treatment of ring geometries*. Journal of Materials Processing Technology 2004. No.155–156. 1443–1450.
78. Parsons, G.H. – Man, H.C.: *Laser Surface Engineering – an Overview in Surface Engineering*. Past-present-future, Spinger Verlag, 3/1985, 1985. 330–343.
79. Pont, D. – Bergheau, J.M. – Roelens, J.B.: *Numerical determination of residual stresses induced by surface treatments*. European Conference on New Advances in Computational Structural Mechanics, Giens, 1991. 321–328.
80. Rappaz, Michel – Bellet, Michel – Deville, Michel: *Traité des Matériaux*. 10. *Modélisation numérique en Science et Génie des Matériaux*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1998.
81. Réti, T. – Horváth, L. – Bagyinszki, Gy.: *Prediction of Hardness Decrease Occuring during Non-isothermal Tempering*. 1st International Induction Heat Treating Symposium, Indianapolis, 16-18 September, 1997.
82. Réti, T. – Bagyinszki, Gy. – Felde, I.: *Prediction of Steel Hardness after Rapid Austenitization and Quenching*. Achievements in the Mechanical and Materials Engineering, AMME '97, Miskolc-Tapolca, 1-3 December, 1997.

83. Réti Tamás – Bagyinszki Gyula – Felde Imre – Verő Balázs – Bell Tom: *Prediction of as Quenched Hardness after Rapid Austenitization and Cooling of Surface Hardened Steels*. Computational Materials Science 1999. 15. 101–112.
84. Réti, Tamás – Bitay, Enikő – Kosztolányi, Zsolt: *On the Trivalent Polyhedral Graphs with Positive Combinatorial Curvature*. Acta Politechnica Hungarica, Budapest, 2005, 19–37.
85. Réti, Tamás – Bitay, Enikő: *Prediction of Fulleren Stability Using Topological Descriptors*. Materials Science Forum, Trans Tech Publication, Switzerland, 2007. Vols. 537–538. 439–448.
86. Roósz, A. – Rozsnoki, L. – Teleszky, I. – Uray, Gy. – Sólyom, J. – Gács, Z. – Kovács, Á. – Baán, M.: *Modification of hot working steel surface by laser treatment*. The 7th International Conf. on Surface Modification Technology, Niigata, Japan, 1993.
87. Rozsnoki László: *A lézeres felületkezelés alkalmazásának távlatai*. Jövőnk anyagai, technológiái. Bányászati és Kohászati Lapok, Budapest, 1994. június.
88. Rowshan, Reza: *Laser Surface Treatment and its Modelling by FEM*. M.Sc. Thesis, Miskolc, 1998.
89. Schneider, Marcel: *Laser cladding with powder effect of some machining parameters on clad properties*. Ph.D. Thesis University of Twente, Enschede, Netherlands, 1998.
90. Sexton, L.: *Laser cladding: Repairing and manufacturing metal parts and tools*. Optics and Photonics Technologies and Applications (T. J. Glynn, ed.), vol. 4876. LaserAge Ltd., 2002.
91. Shen, Zhigang: *Characterisation and Modelling of Reaustenitisation in Steels*. Thesis, Department of Material Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 1996. 34–52.
92. Steen, William M.: *Laser Material Processing*. 2nd Edition, Springer, 1998.
93. Stern, Kurt H.: *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*. 1996.
94. Szombattfalvy Árpád: *A hőkezelés technológiája*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
95. Teleszki Ilona: *Lézeres felületkezelés*. Tanulmány, MTA Anyagtudományi Kutató-csoport, Miskolci Egyetem, Miskolc, 1996.
96. Trafford, D.N.H. – Bell, T. – Megaw, J.H.P.C. – Bransden, A.S.: *Heat Treatment using a high-power laser*. Heat Treating 1979, 32–38.
97. Turner Gábor – Gazdag László: *Felületi edzés CO₂ lézerrel*. Korszerű technológiák, XXIV. évf. 2. (115.) 1991. 25–30.
98. Verhoeven, J. C. J. – Jansen, J. K. M. – Mattheij, R. M. M.: *Modelling Laser Induced Melting*. Mathematical and Computer Modelling, 2003. Vol. 37. 419–437.
99. Verhoeven, Kees: *Modelling Laser Percussion Drilling*. PhD. dissertation Eindhoven University, 2004.

100. Woo, H. G. – Cho, H. S.: *Three dimensional temperature distribution in laser surface hardening processes*. Proc Instn Mechanical Engineers Vol. 213., 1999.
101. Wu, G. Q. – Huang, Z.: *Weldability and microstructure of laser-surface-remelted TiAl intermetallic alloy*. Materials Science and Engineering A345, 2003. 286–292.
102. Zienkiewicz, O.C. – Taylor, R.L.: *The Finite Element Method*. 1989. Ed.4. Vol.1–2. McGraw-Hill Book Co.
103. *** EQUIST GOLD ACÉLKALAUZ. Felhasználói kézikönyv, SACIT Acéltáncsádó Kft., Budapest, 2005.
104. *** *Heat Treating*. Volume 4., ASM International, The Materials Information Society, Materials Park, USA, 1991.
105. *** *Metals Handbook*. Ninth Edition. Volum 14, Forming and Forging, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.
106. *** MSC Home Page: *How Do I Know It's the Right Answer*. <http://www.macsch.com/tech/wp1.html>, 1996.
107. *** *Surface Engineering*. Volume 5., ASM International, The Materials Information Society, Materials Park, USA, 1994.
108. *** SYSTUS+ *Analysis Reference Manual*. Ed. Framsoft+CSI, Paris, 1997. I3–I10.
109. *** SYSTUS+ *Primer Manual*. Ed. Framsoft+CSI, Paris, 1997. 5–15.
110. *** SYSWELD+: *Laser surface treatment example*. Ed. Framsoft+CSI, Réf. LUSW94/5003/A, Paris, 1994. 2–54.
111. *** SYSWELD+ *Reference Manual*, Ed. Framsoft+CSI, Paris, 1997. 7–15.
112. *** SYSWELD+ Home Page: *The World's Leading for the simulation of welding and heat treatment*. ESI Group, <http://www.esi.fr/products/systus/sysweld/road.html>, 1998.

Laser surface treatment and its modelling

Summary

Often the development of the structural materials and the connected technologies is based on empirical experiences more than theoretical considerations.

In the near future it will be possible to specify the structure of the material with the technological parameters to reach the desired properties without expensive and tedious experiments.

In the first part of this book the theoretical background of the (laser) surface treatment is introduced and the experimental results of the laser surface treatment are analysed from the physical metallurgy point of view; the modelling of the same laser treatment is carried out and the results are compared. The mathematical base of the laser surface treatment is also introduced. Finally, in the last chapter an example is shown to proof the advantage and efficiency of the modelling in all phase of the laser surface treatment technology to reduce the cost, improve the properties of the product and avoid the expensive and numerous experiments.

Contents

1. Introduction	09
1.1. Previous work	09
1.2. Objective	10
1.3. Partners of the research	10
2. Theoretical background of the laser surface treatment technologies	12
2.1. Introduction	12
2.2. Laser technologies in industrial field	13
2.3. Importance of the surface treatment techniques	17
2.4. Specific surface treatment	19
2.5. Traditional surface treatment techniques	21
2.5.1. Surface quenching	21
2.5.2. Thermochemical treatments	21
2.6. Modern surface treatment technologies	22
2.6.1. Layer disjunction	22
2.6.1.1. Physical Vapor Deposition (PVD)	22
2.6.1.2. Chemical Vapor Deposition (CVD)	24
2.6.1.3. Surface scattering	24
2.6.2. Surface treatments	25
2.6.2.1. Ion beam techniques	25
2.6.2.2. Plasma induced surface treatment	25
2.6.2.3. Laser induced surface treatment	25
2.7. High power laser treatments	26
2.7.1. Effects of the high power surface treatment on steels	26
2.7.2. Correlation between the parameters of the high power techniques	28
2.8. Laser surface treatments	33
2.8.1. General characteristics of laser surface treatments	33
2.8.2. Characterisation of the laser beam	33
2.8.3. Characterisation of the material to be treated	37
2.8.4. Classification of the laser surface treatment	37
2.8.5. Parameters of the laser surface treatment techniques	42
2.8.6. Range of parameters in the case of the laser surface treatment techniques	45
2.9. Laser hardening	46
2.9.1. The role of absorption during the laser hardening	53
2.10. Laser remelting	55
2.10.1. Geometry of the remelted layers	55
2.10.2. Characterisation of the melted zone	56
2.10.3. Control of the geometry of the layer	57
2.10.4. Structure and property of the remelted layer	58
2.11. Laser alloying and coating	59

2.12. Conclusion	62
3. Laser treatment of the low carbon steel	63
3.1. Introduction	63
3.2. Transformation and thermal zones of laser remelted C15 steel	63
3.2.1. Transformation during heating	66
3.2.2. Transformation during cooling	68
3.2.2.1. Crystallisation	68
3.2.2.2. Phase transformation in solid state	71
3.3. Analysis of the cross section of the laser remelted C15 steel samples (individual lines)	75
3.3.1. Geometrical parameters of the laser remelted layer	75
3.3.2. Hardness analysis of the laser remelted layer	80
3.4. Temperature zones of the overlapped lines	84
3.5. Summary and conclusions	87
4. Mathematical approaches and modelling of the laser surface treatment	88
4.1. Introduction	88
4.2. Application of the finite differential methods in laser heat treatment	88
4.3. Application of the finite element methods in laser heat treatment	91
4.3.1. Mathematical modelling	93
4.3.2. Mathematical modelling of melting	96
4.3.2.1. Stefan-problem	96
4.3.2.2. Enthalpy-problem	98
4.3.3. Numerical solution	100
4.3.3.1. Discretisation of the Stefan-problem	100
4.3.4. Boundary conditions	106
4.3.5. Discretisation of the enthalpy-problem	108
4.3.6. Expansion two dimensions	111
4.3.7. Results and conclusions	113
4.4. Summary	115
5. Modelling of the laser remelting	116
5.1. Introduction	116
5.2. Finite element analysis (FEA)	116
5.3. A SYSWELD+ software	119
5.3.1. A SYSWELD+ Formulation	122
5.3.1.1. Modelling of the phase transformation of the metals	122
5.3.1.2. Calculation of the particle size	125
5.3.1.3. Determination of the temperature distribution	125
5.4. Stages of the modelling	127
5.4.1. Problem setting	127
5.4.2. Modelling of the geometry	128
5.4.3. Modelling of the heat transfer	128
5.4.4. Modelling of the physical metallurgy data	129
5.4.5. Computation stages	130
5.5. Results of the modelling of the laser remelting	130
5.6. Conclusion of the modelling of the laser remelting	140

5.6.1. Comparisation of the simulated and the measured results	140
5.7. Appendix	142
6. Analysis and modelling of the thichness of the laser treated layer	149
6.1. Introduction	149
6.2. Experimental results and conclusions	149
6.2.1. Analysis of the thichness of the laser treated layer	149
6.2.2. Experimental data of the layer thickness in laser TaC alloyed low carbon steel	150
6.2.3. Analysis how to avoid unequal surface layer	152
6.3. Modelling	153
6.4. Summary and Conclusions	155
Bibliografy	156
Laser surface treatment and its modelling (Summary)	163
Contents	164
Laser-Oberflächenbehandlung und Modellieren (Zusammenfassung)	167
Inhalt	168
Tratamente de suprafață cu laser și modelarea proceselor (Rezumat)	171
Cuprins	172

Laser-Oberflächenbehandlung und Modellieren

Zusammenfassung

Die Entwicklung der Strukturmaterialien und Materialtechnologien wurde in letzter Zeit auf Grund theoretischen und praktischen Kenntnisse versucht.

Die Stoffe und Technologien der Zukunft können aber durch diese Methode nicht entwickelt werden. Die Aufgabe der nahen Zukunft ist es, die Ausarbeitung von Verfahren (Simulationstechniken), durch denen die Struktur eines Materials (und dadurch auch die gewünschten Eigenschaften) bei Einstellung des Charakteristikums von einem Verfahren bestimmt werden kann, ohne Versuche mit großem Aufwand.

In dem ersten Teil des Bandes werden die theoretischen Hintergründe der Laser-Oberflächenbehandlung vorgestellt. Dann werden die experimentellen Ergebnisse des Autors (die Oberflächengüte auch) aus metallographischen Sicht analysiert. Folgend dies wird die Simulation (Modellieren) dargestellt, im Vergleich mit den experimentellen Ergebnisse. Die zu der Simulation der Laser-Oberflächenbehandlung nötigen mathematischen Modelle werden auch ausführlich interpretiert. Im letzten Kapitel wird durch ein Beispiel demonstriert, dass es sich das Modellieren, die Simulation in jeder Phase der Laser-Oberflächenbehandlung zum Zweck besseren Ergebnisse immer lohnt, damit die teuren Experimente vermieden werden können.

Inhalt

1. Einführung	09
1.1. Prämisse	09
1.2. Zielstellung	10
1.3. Forschungspartner	10
2. Theorie der Laser-Oberflächentechnologien	12
2.1. Einführung	12
2.2. Lasertechnologien in Materialbearbeitung	13
2.3. Die Rolle der Oberflächenänderungstechnologien	17
2.4. Zielorientierte Oberflächenänderung	19
2.5. Herkömmliche Oberflächenänderungstechnologien	21
2.5.1. Oberflächenhärtung	21
2.5.2. Thermochemische Oberflächenbehandlung	21
2.6. Moderne Oberflächenbehandlungstechnologien	22
2.6.1. Schichtabtragung	22
2.6.1.1. PVD	22
2.6.1.2. CVD	24
2.6.1.3. Oberflächenstreuung	24
2.6.2. Oberflächenänderung	25
2.6.2.1. Methode der Ionstrahlung	25
2.6.2.2. Oberflächenänderung durch Plasma	25
2.6.2.3. Oberflächenänderung durch Laserstrahlung	25
2.7. Bearbeitungen mit hoher Energiedichte	26
2.7.1. Die Wirkung der Oberflächenbehandlung mit hoher Energiedichte auf Stähle	26
2.7.2. Zusammenhang zwischen den Parameter der Technologien mit hoher Energiedichte	28
2.8. Laser-Oberflächenbehandlungen	33
2.8.1. Allgemeines über Laser-Oberflächenbehandlung	33
2.8.2. Charakteristika des Laserbündels	33
2.8.3. Charakteristika der Oberfläche	37
2.8.4. Klassifizierung der Laser-Oberflächenbehandlungen	37
2.8.5. Parameter der Laser-Oberflächenbehandlungstechnologien	42
2.8.6. Parameterbereiche der Laser-Oberflächenbehandlungstechnologien	45
2.9. Oberflächenhärtung durch Laser (laser hardening)	46
2.9.1. Die Rolle der Absorption bei der Laser-Oberflächenbehandlung	53
2.10. Laser-Oberflächenschmelzen (laser remelting)	55
2.10.1. Die Geometrie der geschmolzenen Schicht	55
2.10.2. Die Charakteristika des geschmolzenen Gebietes	56
2.10.3. Die Regeklung der entstandenen Schichtgeometrie	57

	Inhalt
2.10.4. Die Struktur und Eigenschaft der entstandenen Schicht	58
2.11. Oberflächenlegierung und Auflage durch Laser	59
2.12. Zusammenfassung	62
3. Laser-Oberflächenbehandlung von einsatzhärtertem Stahl	63
3.1. Einführung	63
3.2. Umwandlungen, Temperaturzonen in dem durch Laser geschmolzenen Stahl C15	63
3.2.1. Umwandlungen beim Aufwärmen	66
3.2.2. Umwandlungen bei der Abkühlung	68
3.2.2.1. Kristallisation	68
3.2.2.2. Phasenumwandlungen im festen Zustand	71
3.3. Die Untersuchung der Oberflächenschicht des durch Laser geschmolzenen C15 Stahls (bei eigenen Bereiche)	75
3.3.1. Die geometrischen Parameter der durch Laser geschmolzenen Schicht	75
3.3.2. Die Härteprüfung der durch Laser geschmolzenen Schicht	80
3.4. Temperaturzonen der überlappten Bereiche	84
3.5. Zusammenfassung, Schlußfolgerungen	87
4. Annäherungen des mathematischen Modellierens der Laser-Oberflächenbehandlung	88
4.1. Einführung	88
4.2. Die Anwendung der Finite Difference Method bei Wärmebehandlung durch Laser	88
4.3. Die Anwendung der Finite Element Method bei Oberflächenschmelzen durch Laser	91
4.3.1. Mathematisches Modellieren	93
4.3.2. Mathematisches Modellieren des Schmelzens	96
4.3.2.1. Stefan-Problem	96
4.3.2.2. Das Enthalpieproblem	98
4.3.3. Numerische Lösung	100
4.3.3.1. Diskretisierung des Stefan-Problems	100
4.3.4. Die Suche nach entsprechender Anfangsbedingung	106
4.3.5. Diskretisierung des Enthalpieproblems	108
4.3.6. Zweidimensionale Ausbreitung	111
4.3.7. Ergebnisse und Schlußfolgerungen	113
4.4. Zusammenfassung	115
5. Modellieren des Oberflächenschmelzen durch Laser	116
5.1. Einführung	116
5.2. Finit Element Analysis (FEA)	116
5.3. SYSWELD+ Programmpackung	119
5.3.1. Formatierungsmethode von SYSWELD+ Programm	122
5.3.1.1. Modellieren der Umwandlung der Metalle	122
5.3.1.2. Modellieren des Rechnens von Korngröße	125
5.3.1.3. Die Bestimmung der Temperaturverteilung	125
5.4. Die Abschnitte des Modellierens	127

5.4.1. Aufgabenstellung	127
5.4.2. Geometrisches Modellieren der Probe	128
5.4.3. Modellieren der Wärmeübertragung	128
5.4.4. Modellieren der metallischen Daten	129
5.4.5. Die Schritte der Berechnung	130
5.5. Die Ergebnisse des Oberflächenschmelzen durch Laser	130
5.6. Die Schlußfolgerungen des Oberflächenschmelzen durch Laser	140
5.6.1. Vergleich zwischen den Daten der Untersuchungen und Simulation	140
5.7. Anhänge	142
6. Analyse/Modellieren der Dicke der durch Laser behandelten Oberflächenschicht	149
6.1. Einführung	149
6.2. Experimentelle Erfahrungen, Ergebnisse, Schlußfolgerungen	149
6.2.1. Analyse der Dicke der durch Laser-Oberflächenbehandlung entstandenen Oberflächenschicht	149
6.2.2. Ergebnisse der Oberflächendicke (Stahl C15, Oberflächenlegierung durch Laser mit TaC)	150
6.2.3. Untersuchung der Verhütung von ungleichen Oberflächenschicht	152
6.3. Modellieren	153
6.4. Zusammenfassung	155
Literatur	156
Laser surface treatment and its modelling (Summary)	163
Contents	164
Laser-Oberflächenbehandlung und Modellieren (Zusammenfassung)	167
Inhalt	168
Tratamente de suprafață cu laser și modelarea proceselor (Rezumat)	171
Cuprins	172

Tratamente de suprafață cu laser și modelarea proceselor

Rezumat

Deseori, dezvoltarea materialelor structurale și a tehnologiilor de obținere a acestora se realizează în principal pe considerații teoretice verificate prin metode clasice experimentale.

În viitorul apropiat va fi posibilă elaborarea metodelor și tehnicilor de simulare prin care să se stabilească parametri tehnologici care asigură o anumită structură și proprietăți bine definite, fără cheltuieli ridicate sau experimente laborioase.

În prima parte a acestei cărți sunt prezentate bazele teoretice ale tratamentelor de suprafață cu laser. Urmează apoi o analiză din punct de vedere metalografic a rezultatelor. Experimentale, legate de calitatea suprafețelor. Sunt prezentate, de asemenea, bazele matematice ale tratării cu laser a suprafețelor. În continuare se trece la modelarea matematică a proceselor de topire și se compară rezultatele experimentale cu cele simulate prin modelare.

În ultimul capitol se realizează un studiu de caz, ce demonstrează că modelarea este avantajoasă în toate etapele unei tehnologii de tratare a suprafețelor cu laser, atât din punctul de vedere al evitării experimentelor costisitoare, cât și ca modalitate de îmbunătățire a proprietăților materialelor.

Cuprins

1. Introducere	09
1.1. Premizele cercetării	09
1.2. Obiective	10
1.3. Partenerii de cercetare	10
2. Fundamentarea teoretică a tehnologiilor de tratare a suprafețelor cu laser	12
2.1. Introducere	12
2.2. Tehnologii de prelucrare a materialelor cu laser	13
2.3. Importanța tehnicilor de tratare a suprafețelor cu laser	17
2.4. Tratamente specifice de suprafață	19
2.5. Tehnici tradiționale de tratare a suprafețelor	21
2.5.1. Călirea suprafețelor	21
2.5.2. Tratamente termochimice	21
2.6. Tehnologii moderne de tratare a suprafețelor	22
2.6.1. Separarea stratului	22
2.6.1.1. Metoda depunerii vaporilor metalici (PVD)	22
2.6.1.2. Metoda depunerii metalelor prin reacție chimică (CVD)	24
2.6.1.3. Acoperirea suprafețelor prin pulverizare	24
2.6.2. Tratamente de suprafață	25
2.6.2.1. Tehnici cu fascicul de ioni	25
2.6.2.2. Tratamente cu plasmă	25
2.6.2.3. Tratamente cu laser	25
2.7. Prelucrări folosind surse cu putere mare	26
2.7.1. Efectul tratamentelor cu putere mare la prelucrarea suprafețelor oțelurilor	26
2.7.2. Relațiile între parametrii tehnologiilor de prelucrare cu putere mare	28
2.8. Tratamente de suprafață cu laser	33
2.8.1. Caracteristicile generale ale tratamentelor cu laser	33
2.8.2. Caracterizarea fasciculului laser	33
2.8.3. Caracterizarea suprafeței ce urmează a fi tratată	37
2.8.4. Clasificarea tratamentelor cu fascicul laser	37
2.8.5. Parametrii procedurii de tratament cu fascicul laser	42
2.8.6. Domeniul parametrilor tehnologici de tratare a suprafețelor cu fascicul laser	45
2.9. Durificarea cu fascicul laser (laser hardening)	46
2.9.1. Rolul absorbției în timpul durificării cu fascicul laser	53
2.10. Retopirea cu fascicul laser (laser remelting)	55
2.10.1. Geometria straturilor retopite	55
2.10.2. Caracterizarea zonei topite	56
2.10.3. Controlul geometriei stratului	57
2.10.4. Structura și proprietățile stratului retopit	58

2.11. Alierea și acoperirea suprafețelor cu ajutorul fascicolului laser	59
2.12. Concluzii	62
3. Tratamentul cu laser al oțelului cu conținut scăzut de carbon	63
3.1. Introducere	63
3.2. Transformarea și zonele influențate termic în oțelul C15 retopit cu laser	63
3.2.1. Transformarea în timpul încălzirii	66
3.2.2. Transformarea în timpul răcirii	68
3.2.2.1. Cristalizarea	68
3.2.2.2. Transformările de fază în stare solidă	71
3.3. Analiza secțiunii transversale a probelor din oțel C15 retopit cu fascicul laser (benzi singulare)	75
3.3.1. Parametrii geometrici ai stratului retopit	75
3.3.2. Analiza durtății stratului retopit cu laser	80
3.4. Zonele de temperatură în liniile suprapuse	84
3.5. Rezumat și concluzii	87
4. Considerații matematice și modelarea tratamentelor de suprafață cu laser	88
4.1. Introducere	88
4.2. Aplicarea metodei diferenței finite la tratamentul termic cu laser	88
4.3. Aplicarea metodei elementului finit la tratamentul termic cu laser	91
4.3.1. Modelarea matematică	93
4.3.2. Modelarea matematică a topirii	96
4.3.2.1. Problema Stefan	96
4.3.2.2. Problema entalpiei	98
4.3.3. Soluția numerică	100
4.3.3.1. Discretizarea problemei Stefan	100
4.3.4. Stabilirea condițiilor limită	106
4.3.5. Discretizarea problemei de entalpie	108
4.3.6. Extinderea la condiții bidimensionale	111
4.3.7. Rezultate și concluzii	113
4.4. Rezumat	115
5. Modelarea retopirii cu laser a suprafeței	116
5.1. Introducere	116
5.2. Analiza elementului finit (FEA)	116
5.3. Programul SYSWELD+	119
5.3.1. Formarea programul SYSWELD+	122
5.3.1.1. Modelarea transformării de fază la metale	122
5.3.1.2. Calculul dimensiunii grăuntelui	125
5.3.1.3. Determinarea distribuției temperaturii	125
5.4. Etapele modelării	127
5.4.1. Descrierea temei	127
5.4.2. Modelarea geometriei probei	128
5.4.3. Modelarea transferului de căldură	128
5.4.4. Modelarea datelor metalurgice	129
5.4.5. Etapele calculului	130

5.5. Rezultatele modelării la retopirea cu laser	130
5.6. Concluzii	140
5.6.1. Compararea rezultatelor experimentale cu cele simulate	140
5.7. Anexe	142
6. Analiza și modelarea grosimii stratului tratat cu laser	149
6.1. Introducere	149
6.2. Rezultate experimentale și concluzii	149
6.2.1. Analiza grosimii stratului tratat cu laser	149
6.2.2. Rezultate experimentale ale grosimii stratului aliat cu TaC în oțelul cu conținut scăzut de carbon	150
6.2.3. Analiza modului de evitare a stratului cu grosime neuniformă	152
6.3. Modelare	153
6.4. Rezumat și concluzii	155
Bibliografie	156
Laser surface treatment and its modelling (Summary)	163
Contents	164
Laser-Oberflächenbehandlung und Modellieren (Zusammenfassung)	167
Inhalt	168
Tratamente de suprafață cu laser și modelarea proceselor (Rezumat)	171
Cuprins	172