

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Monotektikus felületi rétegek létrehozása lézersugaras felületkezeléssel

PhD értekezés

Svéda Mária
okleveles anyagmérnök

Tudományos témavezető

Dr. Roósz András

MTA levelező tagja

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Anyagtudományi Intézet
MTA-ME Anyagtudományi Kutatócsoport
Miskolc
2007

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Jelmagyarázat.....	4
BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS.....	5
1. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ.....	7
1.1. Siklócsapágyak szerkezete.....	7
1.1.1. Siklócsapágyak felhasználás szerinti felosztása.....	8
1.1.2. Siklócsapágyak anyagai.....	9
1.1.2.1. Csapágybélés ötvözetek.....	9
1.1.2.2. Csapágypersely ötvözetek.....	10
1.1.2.3. Különleges csapágyak.....	11
1.2. Monotektikus ötvözet rendszerek.....	11
1.2.1. Egyensúlyi folyamatok.....	11
1.2.2. Nemegyensúlyi folyamatok.....	13
1.2.4. Al-Pb egyensúlyi fázisdiagram.....	14
1.2.4. Al-Bi egyensúlyi fázisdiagram.....	15
1.3. Monotektikus ötvözetek előállítási módszerei.....	16
1.3.1. Porkohászati eljárás.....	16
1.3.2. Szalagöntés-Strip Casting.....	16
1.3.3. Folyamatos síköntés – Plannar Flow Casting.....	17
1.3.4. Rheocasting.....	18
1.3.5. Porszórás.....	18
1.3.6. Mikrogravitációs körülmények közötti előállítás.....	19
1.4. Lézersugaras felületkezelési módszerek.....	20
1.4.1. Lézersugár és alkalmazásai.....	20
1.4.2. Lézersugaras felületkezelés.....	21
1.4.3. Lézersugaras felületolvasztás jellemzői.....	24
1.4.3.1. A kialakult lézer tócsa geometriája.....	24
1.4.3.2. A kristályosodás jellemző paraméterei.....	25
2. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK.....	27
2.1. Alapanyagok jellemzése.....	27
2.2. Felületkezelési eljárások.....	28
3. ELVÉGZETT MÉRÉSEK.....	33
3.1. Metallográfia vizsgálatok.....	33
3.1.1. Fénymikroszkópos vizsgálatok.....	33
3.1.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok.....	34
3.2. Kvantitatív vizsgálatok.....	35

3.2.1. Cella méret és szekunder dendritág távolság mérése	35
3.2.2. Ötvöző tartalom meghatározása	35
3.3. Tribológiai vizsgálatok.....	36
4. KISÉRLETI EREDMÉNYEK KIÉRTÉLESE.....	38
4.1. Makroszerkezet.....	38
4.1.1. Al-7Si-10Bi monotektikus ötvözet vizsgálatának eredményei	38
4.1.2. Al-7Si-10Pb monotektikus ötvözet vizsgálatának eredményei	43
4.1.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb monotektikus ötvözet vizsgálatának eredményei.....	45
4.2. Mikroszerkezet.....	50
4.2.1. Alapszövetek jellemzése	50
4.2.1.1. Az Al-7Si alapszövet jellemzése	50
4.2.1.2. Az Al-4Cu-1.5Mg alapszövet jellemzése.....	51
4.2.2. A lézersugaras felületkezelési kísérletek termikus jellemzése	52
4.2.2.1. A meghatározás módszerei.....	52
4.2.2.1.1. Paraméterek meghatározása modellekből	52
4.2.2.1.2. Paraméterek meghatározása mért értékek alapján	53
4.2.2.2. Kristályosodási paraméterek meghatározásának módszere saját kísérleteknél.....	55
4.2.2.3. Eredmények	58
4.2.2.3.1. Al-7Si-10Bi ötvözet	58
4.2.2.3.2. Al-7Si-10Pb ötvözet	64
4.2.2.3.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet.....	68
4.2.3. A kristályosodott ötvözetek szövetszerkezete	74
4.2.3.1. A kristályosodott Al-7Si-10Bi i ötvözet szövetszerkezetének jellemzése.....	74
4.2.3.2. A kristályosodott Al-7Si-10Pb ötvözet szövetszerkezetének jellemzése	76
4.2.3.2. A kristályosodott Al-4Cu-1.5Mg-20 Pb ötvözet kristályosodásának jellemzése	77
4.2.4. Ötvöző tartalom eloszlása.....	81
4.2.4.1 Bi eloszlása az Al-7Si-10Bi ötvözetben	81
4.2.4.2. Pb eloszlása az Al-7Si-10Pb ötvözetben	84
4.2.4.3. Pb eloszlása Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözetben.....	87
ÖSSZEFOGLALÁS.....	97
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	99
Felhasznált irodalom.....	103
M E L L É K L E T.....	105

Jelmagyarázat

Jelölés	Megnevezés
A_0, A_1, A_2	- konstans
CO_2	- Széndioxid lézer
D	-ötvözött zóna mélysége [mm]
G_l	- látszólagos hőmérséklet gradiens [K/m]
G_v	- valódi hőmérséklet gradiens [K/m]
N	- átolvasztott zónák sorszáma
Nd:YAG	- Neodímmal ötvözött Yttrium-Alumínium-Gránát lézer
P	- lézersugár teljesítménye [kW]
Sz	-ötvözött zóna szélessége [mm]
T_c	- szételegyedési görbe maximális hőmérséklete
T_E	- eutektikus hőmérséklet
T_{im}	- szételegyedési hőmérséklet
T_M	- monotektikus hőmérséklet
T_R	- szobahőmérséklet
n	- kitevő
v	- kristályosodási sebesség [mm/s]
v_b	- pásztázási lézernyaláb sebessége/ előtolási sebesség [mm/min; mm/s]
W_{Bi}	- bizmut tömegszázaléka [%]
W_{Pb}	- ólom tömegszázaléka [%]
X_{Pb}	- mért ólom térfogat %-a
$\dot{T}$	- lehűlési sebesség [K/s]
θ	- a v és v_b által bezárt szög
λ_1	- cella méret (μm)
λ_2	- szekunder dendritág távolság (μm)
ρ_{Al}	-alumínium sűrűsége, 2,70 g/cm ³
ρ_{Bi}	- bizmut sűrűsége, 9,80 g/cm ³
ρ_{Pb}	- ólom sűrűsége, 11,34 g/cm ³

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

A siklócsapágys egyike a legrégebben és leggyakrabban alkalmazott gépalkatrészeknek. Az elmúlt évek során a siklócsapágys nagy fejlődésen mentek át, terhelhetőségük, igénybevételük fokozatosan növekedett, hiszen a motorok gyors fejlődése megköveteli a változásokat.

A csapágys túlnyomó részét belsőégésű motorokba építik be. A motorok teljesítményének növelésénél az a cél, hogy jó termikus- és mechanikai hatásfokot érjenek el. Egy csapágys két legfontosabb funkciója az erő felvétele és a relatív mozgás által keletkező súrlódási erő minimalizálása, a munkafelületen fellépő kis súrlódási tényezőn keresztül. Az igénybevétel összetettsége miatt egy siklócsapágys sok esetben többretegű és a rétegeknek gyakran ellentétes tulajdonságokkal kell rendelkeznie.

Megkülönböztünk egyrétegű és többretegű csapágysakat. Az egyrétegű csapágysak leggyakoribb példája ólom-bronz anyagú csapágysak, ez esetben a csapágyspersely és a bélésanyag azonos.

A többretegű csapágys áll csapágysházból, amely a mechanikai terhelést felveszi és a bélésanyagból, amelyek a jó siklási tulajdonságokat biztosítja. Ezeknek a szerkezetük: acélszéze, nikkelréteg és ólombronz bélésfém vagy ónalapú csapágysfém. Ezekben az esetekben a rétegeket egymáshoz adhéziós erők kötik.

A többretegű csapágysak úgy is készíthetők, hogy a persely felületébe a persely anyagával monotektikus rendszert képző ötvözt jutattunk, amelynek az elkülönült cseppjei szilárd kenőanyagként szolgálnak. Ez az ötvözt többségében ólom. Az ólom a használatos szerkezeti anyagokkal monotektikus rendszert alkot.

Az ötvözetek széles skáláján a monotektikus ötvözetek egy speciális csoportot képviselnek.

A monotektikus ötvözetek előállítása történhet porkohászati úton, porszórással, szalagöntéssel (strip casting), folyamatos síkontéssel (plannar flow casting), rheocasting (öntészeti módszer, amikor az ötvözt likvidusz és szolidusz hőmérséklete közötti állapotáról történik az öntés) eljárással és lézersugaras felületkezelési technikával.

Amennyiben az ötvözetet lézersugaras felületkezelési technológiát felhasználva készítik el, az extrém gyors hűlési körülmények miatt még speciálisabb tulajdonságok érhetők el.

A monotektikus ötvözetek előállításának klasszikus módja - homogén olvadék előállítása, majd annak kristályosítása - azért ütközik nehézségekbe, mert megszilárdulás előtt az olvadék két különböző sűrűségű olvadékra válik szét. A gravitáció hatására a nagyobb sűrűségű olvadék fázis cseppjei lefelé mozdulnak, így megszilárdulás után az ötvözet összetétele makroszkopikus méretekben különbözni fog.

A lézersugaras felületkezeléssel előállított monotektikus ötvözeteknél nagy sebességgel történik a kristályosodás, ennek következtében a két különböző sűrűségű olvadék nem válik szét és olyan szerkezet alakul ki, ahol finom lágy kiválások találhatók közel egyenletes eloszlással a mátrixban, amelyek szilárd kenőanyagként szolgálnak. A lézersugaras ötvözés lényege, hogy a darab teljes tömegének tulajdonságait változatlanul hagyva csak a felületi réteg tulajdonságait változtatjuk meg.

Nagy előnye ezzel a technológiával előállított csapágyaknak, hogy a csúszófelület és a támasztóréteg között fémes kapcsolat van.

Mindezek alapján a munkám során kitűzött célom az volt, hogy:

- létrehozzak a nagy szilárdságú mátrix felületén homogén, finom, egyenletes eloszlású alumínium-ólom ötvözetet siklócsapágy anyagok számára, lézersugaras felületkezelési technikával,*
- tanulmányozzam a monotektikus ötvözeteket és a szövetszerkezetet kvantitatívan jellemezzem,*
- a létrejött felületi réteg geometriai adatai, valamint a siklási tulajdonsága és a lézersugaras felületkezelési technika paraméterei között kapcsolatot határozzak meg.*

1. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

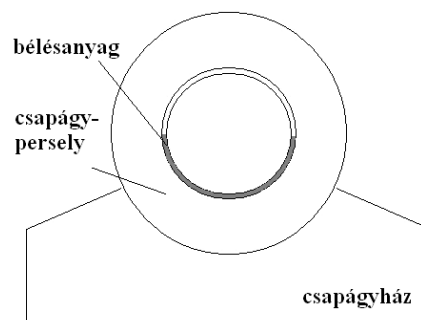
1.1. Siklócsapágyak szerkezete

A siklócsapágyak tervezésénél nagyon fontos a csapágy szerkezeti kialakítása. A siklócsapágy főbb részei: a csapágyház és a csapágypersely (osztott vagy osztatlan kivitelben) és ha szükség van rá, akkor csapágybélés, amit külön visznek fel a csapágypersely felületére. A csapágy szerkezet megtámasztására szolgáló talp szerkezete szerint megkülönböztetünk álló, függő és fali csapágyakat is. Siklócsapágyaknál a tengely nem közvetlenül a gépben kialakított furatban, hanem a több részből álló csapágyban fordul el. A tengelyt vagy oldalról –tengelyirányban- vagy felülről –sugárirányban- szerelhetjük. Sugárirányú szerelés mindig osztott csapágyat igényel, ellenben tengelyirányú szereléskor a csapágy lehet zárt kivitelű.

A csapágyak súrlódási viszonyait a csapágyperselyek és a bélések anyaga döntően befolyásolja.

A siklócsapágy főbb részei:

- *csapágyház* osztott vagy osztatlan kivitelben,
- *csapágypersely* osztott vagy osztatlan kivitelben
- *csapágybélés*- amelyet külön visznek fel a csapágypersely felületére, ha szükség van rá.



1. ábra Siklócsapágy sematikus ábrája

Egy jó csapágyanyag elősegíti, hogy az optimális súrlódási állapot alakuljon ki a csapágyban. Ennek a megválasztásánál figyelembe kell venni a következő szempontokat [1]:

- *jó siklási tulajdonságok*, a csapágy anyagának jó siklási tulajdonságokkal kell rendelkeznie,
- *beágyazó képesség*, a kopás során leváló kemény anyagrészeknek be kell ágyazódnia a csapágyfémbe, hogy a siklófelületet meg ne sértsék,
- *jó alakíthatóság*, a csapágy pontatlan megmunkálásából, kenési hibáiból adódóan a csapágypersely szélein élnyomás keletkezhet,

- *jó hővezetőképesség*, a csapágy üzembiztonsága szempontjából fontos,
- *szilárdsági követelmények*, a csapágy anyagát nagy nyomás éri, így követelmény a nagy nyomószilárdság,
- *korrozóval szembeni ellenállás*, a csapágyötvözetet a körülvevő környezetből korrozós hatások érik, ezért korrozóállónak kell lennie,
- *technológiai tulajdonságok*, a csapágyötvözetnél fontos a jó önthetőség, és hogy a csapágypersely jól kötődjön a csapágybéléshez, jól megmunkálható legyen és a siklófelület megfelelő simasággal rendelkezzen.



2. ábra Gyakorlatban használt siklócsapágyak [2,3]

1.1.1. Siklócsapágyak felhasználás szerinti felosztása

A csapágyra ható terhelés iránya szerint megkülönböztetünk; -hordozó vagy radiális csapágyakat (pl. hengeres-, kuposcsapágy), -támasztó vagy axiális csapágyakat (pl. harangcsapágy, Michell-csapágy), és hordozó és támasztó csapágyakat. Csoportosíthatjuk a siklócsapágyakat a súrlódási, illetve kenési állapota szerint is. Ilyenkor beszélhetünk száraz súrlódással, illetve kenés nélkül, vegyes súrlódással és folyadéksúrlódással működő siklócsapágyakról.[4]

Mechanikai megvalósítás szempontjából:

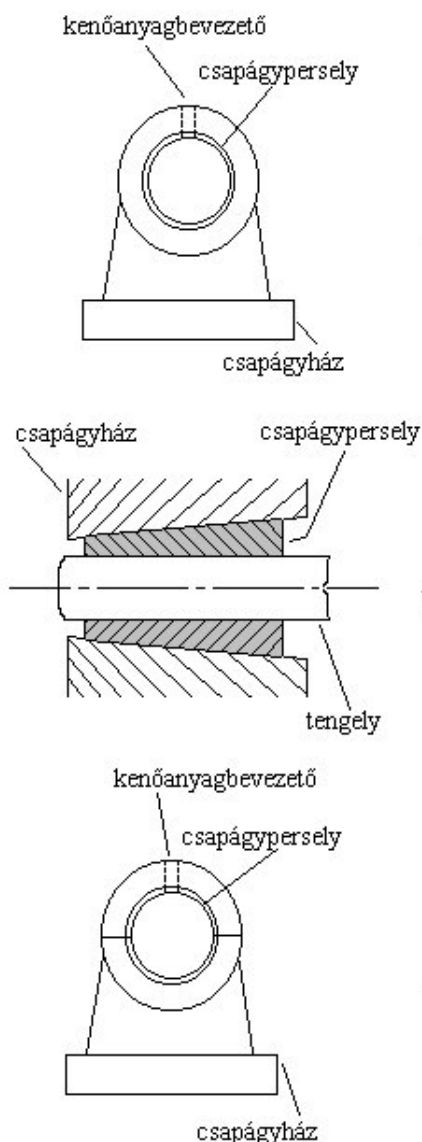
a) Szemcsapágy:(3.a. ábra)

Egyszerű kivitelű osztatlan csapágy. Kisebb igénybevételű esetekben persely nélkül is alkalmazzák, ilyenkor a csapágyház öntöttvas anyaga szerepel perselyanyagként. Ha nagy fordulatszámú helyen akarják alkalmazni, akkor bronzpersellyel használják. A kenést a felső furaton keresztül zsirzószelence vagy zsirzóprés segítségével oldják meg.

b) Kúpos furatú csapágyak: (3.b. ábra)

Pontos futású és kis hézagú csapágyaknál olyan megoldást kell használni, hogy legyen lehetőség a csapágyhézag állítására.

Ilyenkor a csapágy házát kúpos furattal készítik, amelyben a behasított persely tengelyirányban állítható.



Gyakran alkalmazzák szerszámgépek futáspontos főorsóin, hogy a kopás során megnőtt csapágyhézagot megfelelően lehessen csökkenteni.

a)

c) Osztott csapágyak: (3.c. ábra)

Siklócsapágyak jellemzője, hogy a csapágyház és a csapágypersely két darabból áll. Az osztás síkja a terhelés irányára merőleges. Előnyük, hogy a tengelycsapot a nyitott csapágyba lehet fektetni, illetve hántolással be lehet illeszteni. Bélésnélküli persely alkalmazása esetén a persely anyaga a terhelés nagyságától függően öntöttvas vagy bronz. Alkalmazzák azonban ezeket a csapágyakat fehérfémbélés perselyanyaggal is. Általában belsőégésű motorok csapágiai, vasúti kocsi csapágiai.

c)

3. ábra Siklócsapágy fajták [5]

1.1.2.Siklócsapágyak anyagai

1.1.2.1. Csapágybélés ötvözetek

Ónalapú fehérfémek

A legrégebben használt csapágybélés ötvözet. Összetételét tekintve 80-90 t% ón, 5-10 t% réz, 5-10 t% ólom. A nagy óntartalmú csapágyfémek helyett kis óntartalmú és ónmentes ólomötvözeteket is használnak. Csapágybélésként használják, acélból, öntöttvasból vagy

könnyűféméből készült perselyek kiöntésére. Ehhez a csoporthoz kapcsolódnak a cink csapágyötvözetek is. Pontos vegyi összetételét az MSZ 7130:1987 szabvány rögzíti.

Csapágyfém típus: Csf-80, Csf-83, Csf- 88

Ólombronzok

Réz-ólm ötvözetek, amely 75-80 t% réz, 15-20 t% ólm és néhány százalék mangán-, szilícium-, ezüst-, alumíniumötvözővel. Különleges ólombronzokban ón, cink szerepel még ötvözőként. Az ólombronz anyagok acélköpenyes kivitelben csapágybélként kerülnek felhasználásra. Dinamikus csapágyterhelésnél nagyobb igénybevételt bírnak, mint a fehérfémek. Az ólombronzok az óntartalmú fehérfémek helyettesítésére szolgálnak, azonban az alakíthatósági tulajdonságaik rosszabbak. A felületük pontos megmunkálást igényel. Pontos vegyi összetételét az MSZ EN 1982:1999 szabvány rögzíti.[4,6]

Csapágyfém típus: CuPb20Sn 3

1.1.2.2 .Csapágypersely ötvözetek

Alumíniumbronzok

Réz és alumínium olyan az ötvözei, melyben néhány százalék vas, mangán, nikkel található. Összetételüket tekintve: 20-30 t% ónt, 1 t% rezet és különböző mennyiségű alumíniumot tartalmaznak. Csapágyperselyként kerülnek felhasználásra. Ezek az anyagok igen nagy szakítószilárdsággal és kellő szívóssággal rendelkeznek, alkalmasak nagy terhelésű siklócsapágyaknak. Jól önthetőek és alakíthatóak, azonban öntés után hőkezeln kell. Pontos vegyi összetételét az MSZ 711-1:1992 szabvány rögzíti.[4,5]

Ónbronzok

Legrégebben alkalmazott csapágyanyagok. Összetételük szerint 80-90 t% rezet, 5-20 t% ónt tartalmaznak. A vörös ötvözetek néhány százalék cinket és ólmot is tartalmaznak. Csapágyperselyként kerülnek felhasználásra. Jó siklási tulajdonságokkal rendelkeznek, nagy szilárdságuk és keménységük miatt nagy felületi terhelés viselésére alkalmasak. Jól önthetőek, jól megmunkálhatóak, nagy korrózióállóságúak. A vörös ötvözetek az ónbronzoknál jobban önthetőek, korrózióállóságuk is nagyobb, így gyakran alkalmazzák csőarmatúrák készítésére is. Pontos vegyi összetételét az MSZ EN 1982:1999 szabvány rögzíti.

Csapágyfém típus: ÖBz 20, Öbz 14, Vöt 10

Öntöttvas

Alárendelt helyeken csapágyperselyként kerülnek felhasználásra. Jobb a nagyszilárdságú, finom grafiteloszlású perlites öntöttvas.

Siklási és szükségfutási tulajdonságai gyengék, élnyomásra érzékenyek, gondos kialakítást és jó kenést kívánnak. [5]

Csapágyfém típus: Öv.26 és Öv.18

1.1.2.3. Különleges csapágyak

Fémporból gyártott csapágyak

Csapágyperselyként kerülnek felhasználásra. Fémporból sajtolással és diffúziós izzítással előállított csapágyak szivacsos szerkezetűek és olajjal telíthető „önkenő” csapágyak készíthetők. Jó siklási tulajdonságokkal rendelkeznek, azonban a túlzott felmelegedéstől óvni kell. [3,5]

Műanyagok

Fémcsapágyak helyettesítésére különösen kis siklási sebességnél ma már kiterjedten alkalmaznak műanyagokat. A hőre keményedő műanyagok közül legelterjedtebb a fenol- és kerozingyanta alapanyagú, különböző vázanyaggal fenoplasztok, a hőre lágyuló műanyagok közül pedig a poliamidok. Jól alkalmazhatóak kis siklási sebességnél és nagy nyomások esetén, pl. hengerművek csapágyainál. Kis hajlítósilárdsága és hővezetőképessége miatt a műanyag perselyeket mindig acélhüvelybe kell elhelyezni.[6]

Csapágyfém típus: ZX-100, ZX-530, ZT-4

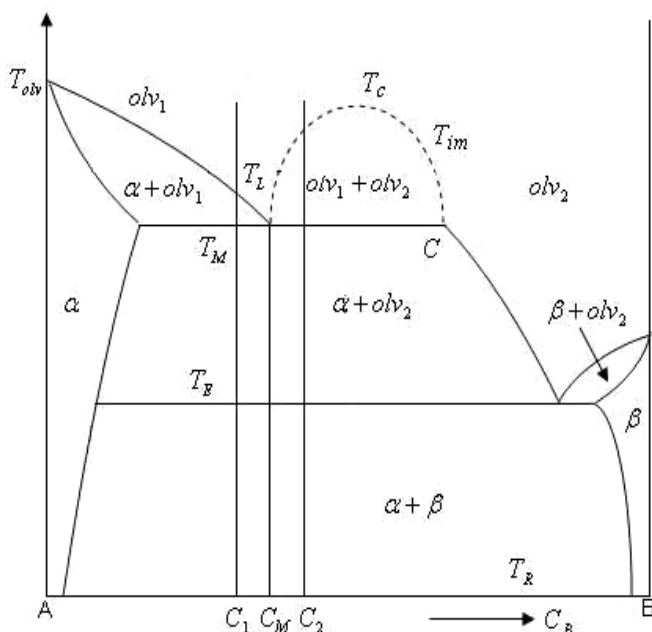
1.2. Monotektikus ötvözet rendszerek

1.2.1. Egyensúlyi folyamatok

A monotektikus ötvözeteknek az a jellegzetessége, hogy az A és a B elem nem oldja korlátlanul egymást olvadék állapotban sem, bizonyos hőmérséklet alatt, olvadék állapotban két olvadék fázis jelenik meg, azaz olvadék1 és az olvadék2 nagyon különböző koncentrációval és sűrűséggel rendelkeznek.

A 4. ábra egy sematikus monotektikus egyensúlyi fázisdiagramot ábrázol, ahol a T_{im} a szétválási hőmérséklet, a T_c a szételegyedési görbe maximális hőmérséklete, a T_M a monotektikus hőmérséklet, T_E eutektikus- és T_R a szobahőmérséklet.

A monotektikus ötvözetek lehetnek hipo-, hiper- és monotektikusak. A *hipomonotektikus* ötvözetekben először szilárd oldat kezd el kristályosodni, majd az olvadék összetétele eléri a monotektikus összetételt és α szilárd oldatból és olvadékcseppekből álló monotektikum



keletkezik utána az olvadékból α és β fázist tartalmazó eutektikum keletkezik.

A *hipermonotektikus* ötvözetekben, a lehűlés során először a homogén olvadék két különböző összetételű olvadékkra való szétválása történik, majd az olvadékból α szilárd oldat kristályosodik utána az olvadékból α és β fázist tartalmazó eutektikum keletkezik.

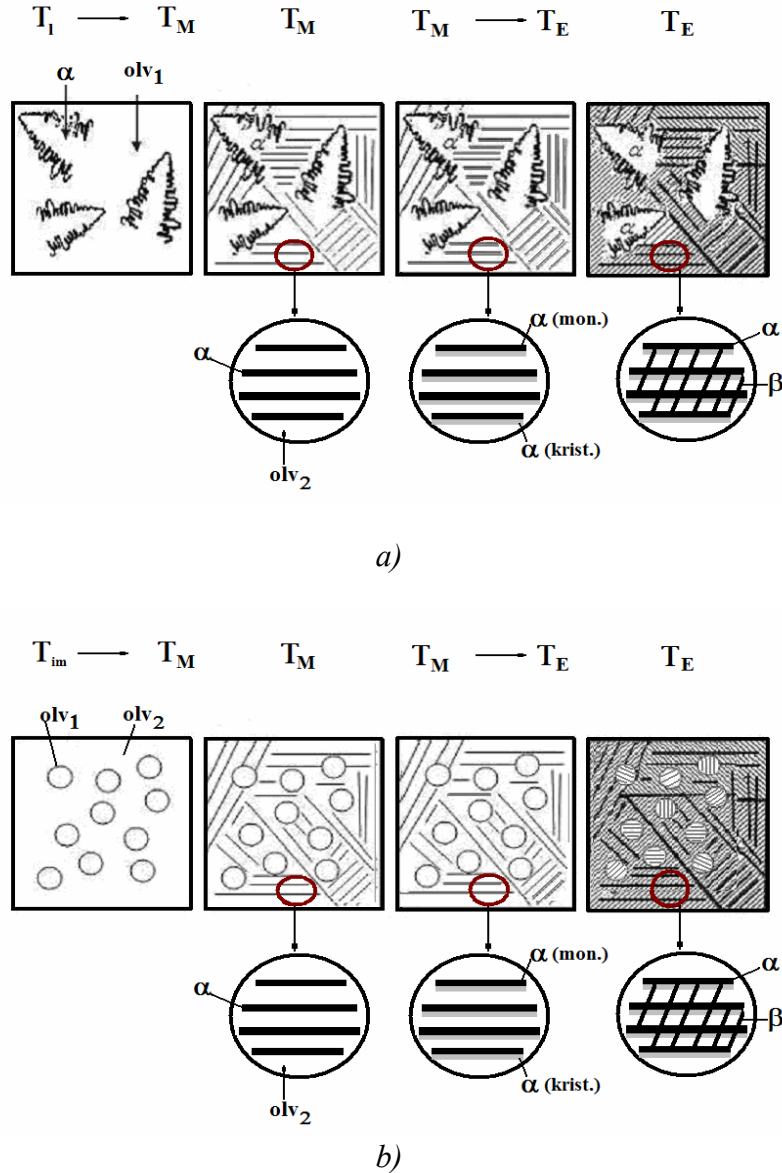
4. ábra Monotektikus fázisdiagram sematikus ábrája

C_1 ötvözet kristályosodása (5.a. ábra)

- $T_I \rightarrow T_M: olv_1 \rightarrow \alpha$ szilárd oldat kristályosodik.
- $T_M: olv_1 \rightarrow (\alpha + olv_2)$ monotektikum keletkezik.
- $T_M \rightarrow T_E: olv_2 \rightarrow \alpha$ szilárd oldat kristályosodik.
- $T_E: olv_2 \rightarrow (\alpha + \beta)$ eutektikum kristályosodik.
- $T_E \rightarrow T_R: \alpha \rightarrow \beta$ szilárd oldat válik ki.

C_2 ötvözet kristályosodása (5.b. ábra)

- $T_{im} \rightarrow T_M: olv_1 \rightarrow olv_2$; a két különböző olvadék elkülönülése zajlik.
- $T_M: olv_1 \rightarrow (\alpha + olv_2)$ monotektikum keletkezik.
- $T_M \rightarrow T_E: olv_2 \rightarrow \alpha$ szilárd oldat kristályosodik.
- $T_E: olv_2 \rightarrow (\alpha + \beta)$ eutektikum kristályosodik.
- $T_E \rightarrow T_R: \alpha \leftrightarrow \beta$ szilárd oldat válik ki.

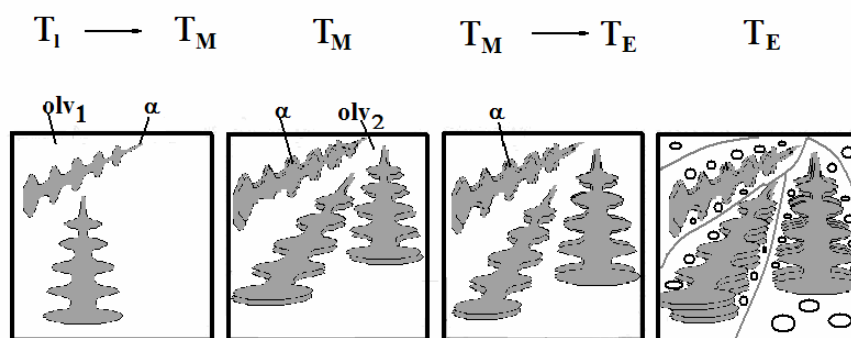


5. ábra Monotektikus ötvözetek egyensúlyi kristályosodása a) C1 ötvözet, b) C2 ötvözet

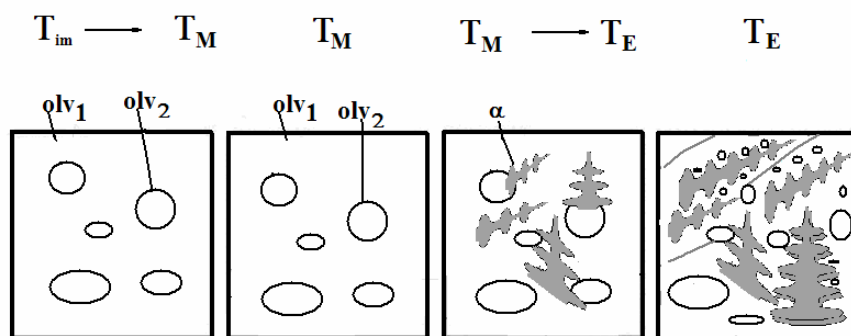
1.2.2. Nemegyensúlyi folyamatok

A C1 ötvözet esetében a nemegyensúlyi kristályosodás ugyanúgy az α szilárd oldat megjelenésével kezdődik, mint egyensúlyban. A monotektikus hőmérsékleten (T_M) a monotektikum α szilárd oldat része rákristályosodik az α szilárd oldat dendritekre. A monotektikus hőmérséklettől (T_M) az eutektikus hőmérsékletig (T_E) α szilárd oldat kristályosodása folytatódik, nőnek, vastagodnak α szilárd oldat dendritjei. Az eutektikus hőmérsékleten (T_E) az eutektikum α szilárd oldat fázisa tovább növeli a α szilárd oldat dendritjeit, a dendritek között szín ólom cseppek jelennek meg (6.a.ábra).

A C2 ötvözet esetében a szétválás hőmérséklettől (T_{im}) a monotektikus hőmérsékletig (T_M) megtörténik a két olvadékra való szétválás. A monotektikus hőmérsékleten (T_M) a nagy hűlési sebesség miatt nem keletkezik α szilárd oldat csíra, így a monotektikus reakció sem megy végbe. A monotektikus hőmérséklet alatt jelentős túlhűléssel megjelennek az α szilárd oldat dendritok vagy cellák, melyek egészen az eutektikus hőmérsékletig (T_E) növekednek. Az eutektikus hőmérsékleten az eutektikum α fázisa rákristályosodik a α szilárd oldat dendritokra és a dendritágak között megjelennek az Pb cseppek. (6.b. ábra)



a)



b)

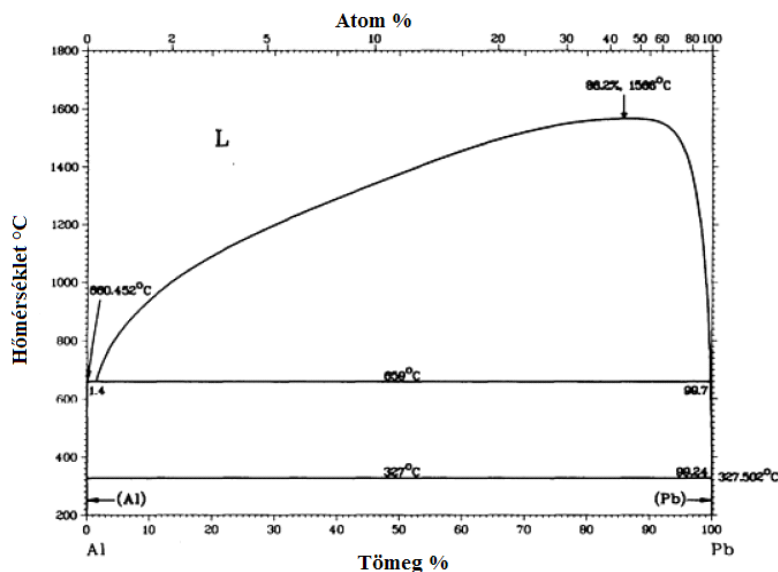
6. ábra Monotektikus ötvözetek nemegyensúlyi kristályosodása

a) C1 ötvözet, b) C2 ötvözet

1.2.4. Al-Pb egyensúlyi fázisdiagram

Az Al-Pb monotektikus ötvözet egyensúlyi fázisdiagramját szemlélteti a 7. ábra. A szétválási görbe maximális hőmérséklete 1566 °C 86,2 t% Pb. A monotektikus összetétel 1.4 t% Pb, a monotektikus hőmérséklet 659 °C. Az olvadék2 koncentrációja a

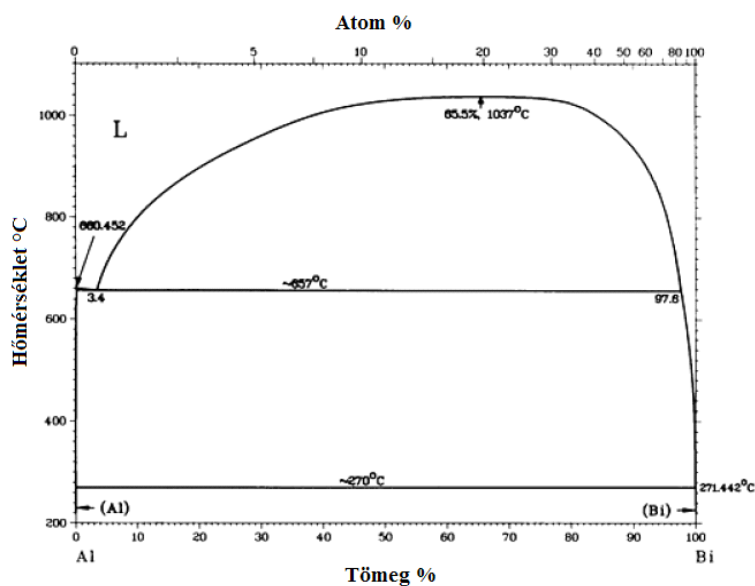
monotektikus hőmérsékleten 99.24 t%. Az eutektikus hőmérséklet 327 °C, és az eutektikum 99.7 t% Pb tartalmaz.



7. ábra Al-Pb egyensúlyi fázisdiagram [7]

1.2.4. Al-Bi egyensúlyi fázisdiagram

A 8. ábra mutatja be az Al-Bi monotektikus ötvözet egyensúlyi fázisdiagramját. A szétválási görbe maximális hőmérséklete 1037 °C 65,5 t% Bi. A monotektikus összetétel 3.4 t% Pb, a monotektikus hőmérséklet 657 °C. Az olvadási koncentrációja a monotektikus hőmérsékleten 97.8 t%. Az eutektikus hőmérséklet 270 °C, és az eutektikum gyakorlatilag szin Bi-ot tartalmaz.



8. ábra Al-Bi egyensúlyi fázisdiagram [7]

1.3. Monotektikus ötvözetek előállítási módszerei¹

A monotektikus ötvözetek előállításának fő célja, hogy homogén egyenletes összetételű és szerkezetű anyagot hozzunk létre. Az öntés klasszikus formája azért ütközik nehézségekbe, mert megszilárdulás előtt az olvadékból való elkülönülés során a nagyobb sűrűségű olvadék fázis lefelé mozdul el.

Így a megszilárdult ötvözetnek az összetétele makroszkópos méretben is különbözni fog a hely függvényében.

1.3.1. Porkohászati eljárás

A monotektikus ötvözetek egyik előállítási lehetősége a porkohászat, amellyel számos kutató foglalkozik [18]. Az eljárás során az előírt összetételű ötvözet porait összekeverik, majd sajtolással állítják elő az előírt összetételű mintadarabokat. Hawe és társai [21] Al-Pb monotektikus ötvözeteket állítottak elő, porkohászati úton azért, hogy drágább Al-Sn ötvözeteket helyettesítsék a közép- és felsőkategóriájú motoroknál. A 71,2Al- 18,6Pb- 8,8Si-1,4In összetételű ötvözetet, Al11Si és Pb-7In összetételű porlasztott porból izosztikus kompaktálással állították elő, 850 MPa nyomáson. Zhu és társai [22] 99,9 % tisztaságú Al és 60 µm átmérőjű Pb poraiból indultak ki, Ar atmoszférában keverték, majd hideg sajtolással 350 MPa nyomás és különböző szinterelési hőmérséklet és idő mellett 5×10^{-3} Pa vákuumban állították elő a darabjaikat. Megállapították, hogy a porkohászati úton előállított Al alapú monotektikus ötvözetek legalább olyan jó tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a szalagöntéssel-Strip Casting-gal előállított darabok.

A porkohászati eljárás előnye, hogy nagyobb méretű és vastagságú darabok készülhetnek. A költségek sokkal kisebbek.

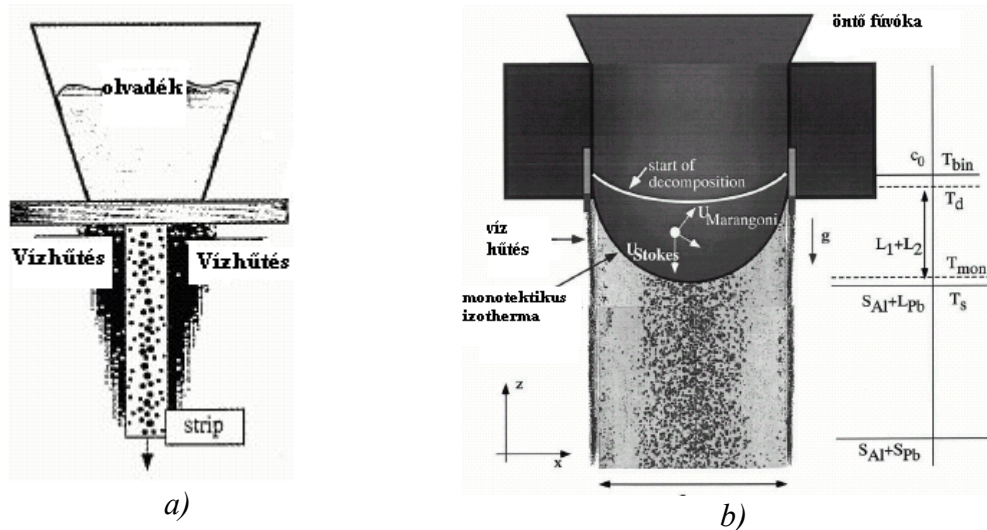
1.3.2. Szalagöntés-Strip Casting

Számos kutató [8,13,15,16,23,25] szerint a Strip Casting eljárás bizonyult alkalmasnak a monotektikus ötvözetek előállítására. Az eljárás elve, hogy a homogén olvadék állapotba hevített olvadékból gyors hűtéssel alakul ki a kívánt ötvözet. Az olvadékot függőlegesen egy erős hűtőhatású, mozgó réz korongra öntik.

¹ A disszertációmban előfordul, hogy olyan idegen kifejezéseket kell használnom, amelyek magyar megfelelője nem ismert vagy nem elterjedt, illetve félreértésekhez vezethetne a nem megfelelő fordítás miatt.

Ilyenkor a szalag mozgásiránya megegyezik a nagyobb sűrűségű olvadék cseppek nehézségi erő okozta mozgásának az irányával. Nagy lehűlési és kristályosodási sebesség mellett az olvadék-szilárd fázishatáron olyan nagy hőmérséklet gradiens, G alakul ki, hogy a kritikus hőmérséklet tartományban nagyon kevés ideig tartózkodik az ötvözet.

A 9. ábra a Strip Casting eljárást mutatja. Ennél az eljárásnál a geometria igen fontos szempont, nem lehet alkalmazni siklócsapágyak felületénél.

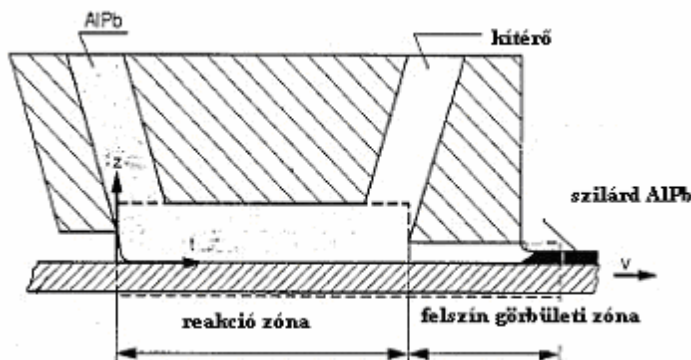


9. ábra a Strip Casting

a) sematikus ábrája [23]; b) kialakult hőmérséklet és sebesség viszonyok [25]

1.3.3. Folyamatos síkontás – Plannar Flow Casting

Berrenger [26] nevéhez fűződik a Plannar Flow Casting (10. ábra). Ezzel az eljárással, úgy lehet egyenletes eloszlású szalagot előállítani, hogy a homogén állapotra hevített olvadékot

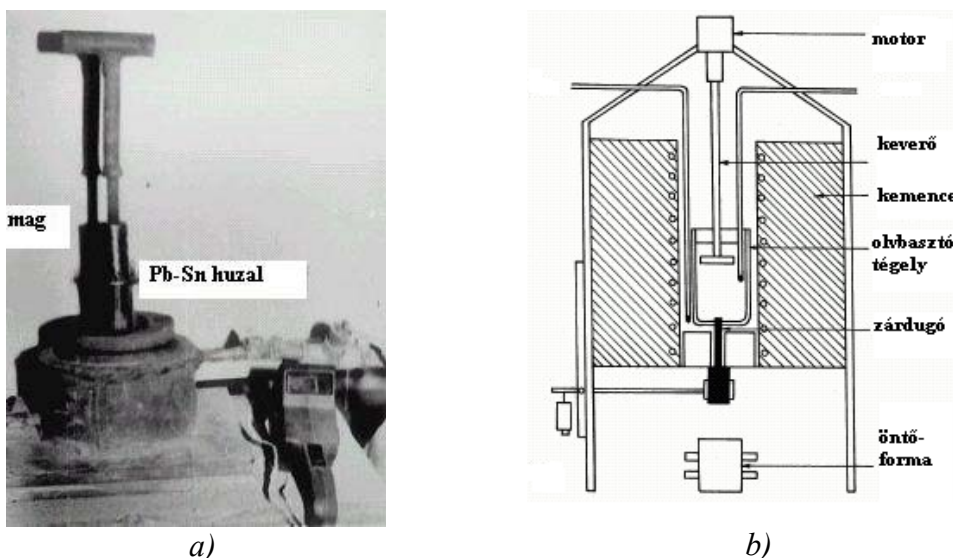


10. ábra Plannar Flow Casting sematikus ábrája [26]

gyorsan mozgó, hideg, jó hővezetőképességű felületre „lövik” pl. forgó rézhenger, illetve acél felületére öntik, amelyről a megszilárdult anyag leválik. Az így kialakult vékony szalag siklócsapágy felületek kialakítására alkalmatlan.

1.3.4. Rheocasting

Az eljárás elve, hogy az olvadékot homogén olvadék állapotra hevítik, állandó kevergetés mellett természetesen hagyják hűlni, majd ömledék állapotban (likvidusz és szolidusz közötti hőmérsékletről) öntik a formába, így hoznak létre monotektikus ötvözetből egyenletes monotektikus részecskéket tartalmazó szövetet hipomonotektikus ötvözetek esetében.[27] A 11. ábra a rheocast öntést szemlélteti.

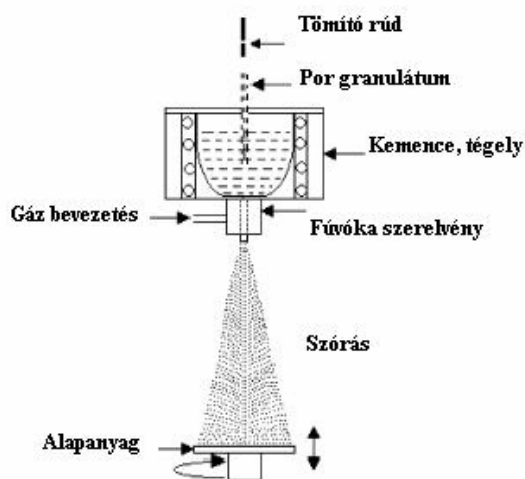


11. ábra Rheocast öntés

a) készült Pb-Sn huzal [28]; b) Rheocast öntés sematikus ábrája [28]

1.3.5. Porszórás

A szemcséket homogén olvadék állapotra hevítik és vivő gáz (nitrogén, argon) segítségével az ötvözendő felületre viszik fel az egyenletes eloszlású monotektikus felületi réteget. Az eljárás során az alapanyag és a monotektikus réteg közötti kötést a kicsi adhézios erő biztosítja.[30] A 12. ábra porszórás sematikus ábráját mutatja be.

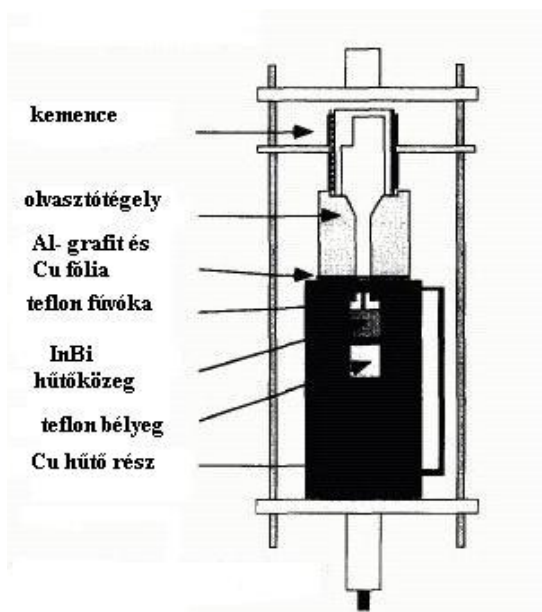


12. ábra Porszórás sematikus ábrája [30]

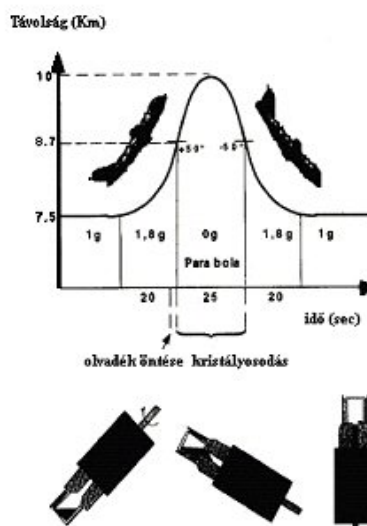
1.3.6. Mikrogravitációs körülmények közötti előállítás

Monotektikus ötvözeteket kristályosították a Földön normál körülmények között és parabolikus repülés során mikrogravitációs körülmények mellett [31].

Egy kapszulát készítettek, amely a 13. ábra látható és a parabolikus repülés során (14. ábra) mikrogravitációs körülmények között hoztak létre Al-Pb monotektikus ötvözetet.

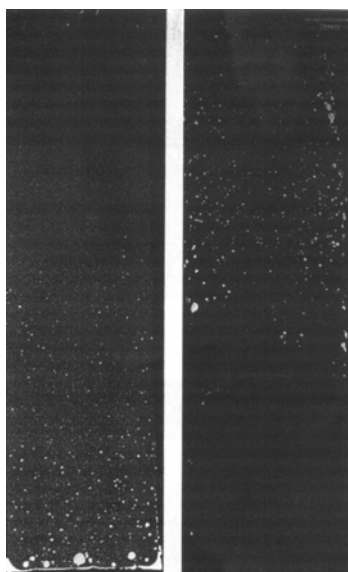


13. ábra Kapszula sematikus ábrája [32]



14. ábra Parabólikus repülés sematikus ábrája [32]

Különbség a kétféle módon előállított darab között, hogy a földön öntött darabnál a nagy cseppek felhalmozódtak a minta a hűtött oldalán, és az ólomcseppekben hiányos terület a



minta tetején alakult ki. Ennek az oka, hogy a kristályosodás során földi körülmények között a cseppek a minta alja felé vándorolnak a Stokes mozgás miatt. A kísérletek azt mutatják, hogy kb. 5 másodperc szükséges ahhoz, hogy a cseppek elérjék a minta alját, összekapcsolódjanak és felépítsenek egy nagyobb cseppet. Ezek a cseppek a dendritágak között helyezkednek el. A kristályosodási irány ellentétes a cseppek mozgási irányával.

15. ábra Földi (bal oldali kép) és mikrogravitációs (jobb oldali kép) körülmények között létrejött monotektikus darabok

Azoknál a mintáknál, amelyek mikrogravitációs körülmények között jöttek létre, a kristályosodási orientáció megegyezik a csepp mozgási orientációjával. Ha a cseppek

elérnek egy kritikus méretet, úgynevezett „faló cseppenként” viselkednek, a kisebb méretű cseppeket magukba olvasztják, illetve a Marangoni mozgással a kristályosodási frontból az egyfázisú terület felé vándorolnak [31].

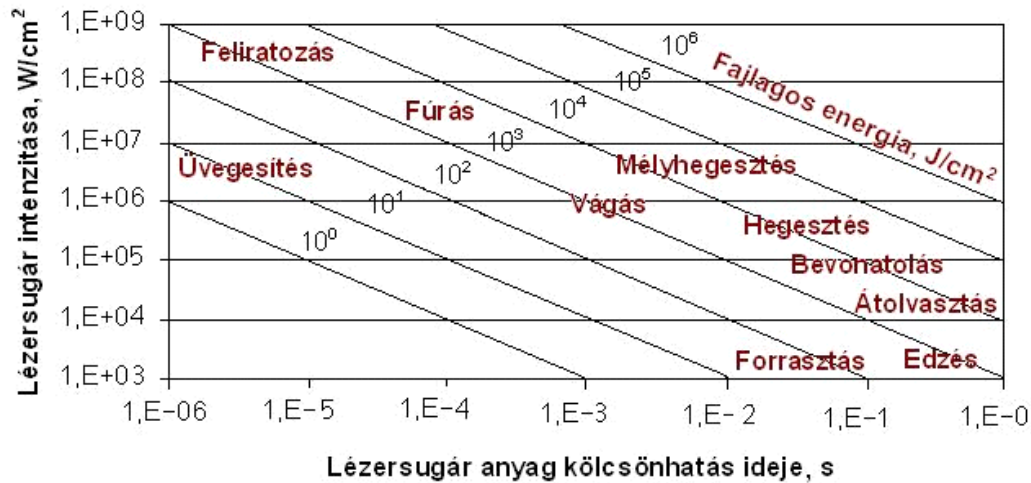
Az előbb említett eljárások közül egyik sem biztosítja megfelelően, hogy homogén, egyenletes eloszlású, kis méretű fázisokat tartalmazó monotektikus felületi réteg alakuljon ki, továbbá a hordozóréteg és a monotektikus réteg ne különüljön el és megfelelő fémes kötés alakuljon ki, illetve bármilyen geometriájú felületen létrehozható legyen a monotektikus réteg.

A fent említett követelményeket kielégítő előállítási módszer a lézersugaras felületkezelés, amikor a monotektikus ötvözetet homogén olvadék állapotra hevítjük, gyors hűtéssel kristályosítjuk és finom, egyenletes eloszlású jó siklási tulajdonságokat mutató monotektikus felületi réteget alakítunk ki és a létrejött réteget fémes kötéssel az alapanyaghoz kötjük.

1.4. Lézersugaras felületkezelési módszerek

1.4.1. Lézersugár és alkalmazásai

A lézersugár egy különleges elektromágneses sugárzás. A kifejezés eredete az angol betűszó (*LASER= Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), melynek jelentése “stimulált sugárzással való fényerősítés”. A LASER fizikája leírja az atomok, molekulák energiaszintjeit, valamint az energiaszintekben létrejövő változásokat. A lézer felfedezését, az első működő rubinlézer létrehozását követően más anyagokról is kiderült, hogy úgynevezett lézerátmenetre képesek. A lézersugár és sugárforrás jellemzésére két nagyon fontos adat szolgál: a fény hullámhosszúsága és a sugárnyaláb energiája. A lézerek hullámhossza a vele való megmunkálás szempontjából meghatározó lehet, mert a sugárzás hullámhosszúsága annak számos tulajdonságát meghatározza, pl. a különböző anyagok a hullámhossz függvényében különböző mértékben képesek az energiát elnyelni, abszorbeálni. A hullámhosszúság önmagában nem szab meg minden alkalmazási tulajdonságot, hiszen az anyagok, felületére, vagy belsejébe jutó sugárzás teljesítménysűrűsége, folyamatos vagy impulzus jellege a kölcsönhatás eredményét lényegesen befolyásolja.



16. ábra A lézersugaras felületkezelési technológiák alkalmazásának tartományai [33]

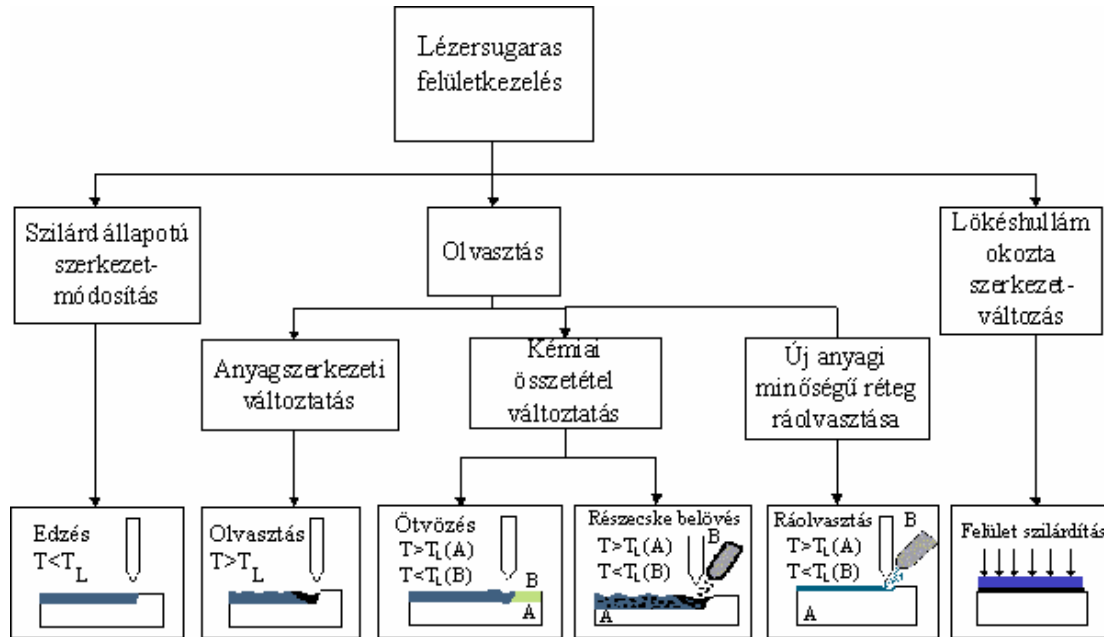
Figyelembe kell venni a lézer sugárforrásának a teljesítményét és a lézernyaláb fókuszálhatóságát, a kölcsönhatási idő és az alkalmazott energiasűrűség kapcsolatát (16. ábra)

A lézersugaras technológia a többi eljáráshoz képest ugyan költséges technológia, de számos gazdasági és műszaki előnye teszi pótolhatatlanná. Előnyei közé sorolható, hogy gyors megmunkálást tesz lehetővé, bonyolult geometriájú, nehezen hozzáférhető felületek esetén is alkalmazható, nem igényel utólagos megmunkálást, nincs szerszámkopás, stb.

1.4.2. Lézersugaras felületkezelés

A lézersugár alkalmazásának egyik fontos területe a lézersugaras felületkezelés, amit többféleképpen lehet csoportosítani. Az első felosztása Gnanamuthu [35] nevéhez fűződik, aki a lézersugaras felületkezelést három nagy csoportra osztotta: melegítés, olvasztás és robbantás.

A lézersugaras felületkezelések csoportosításánál figyelembe azt is kell venni, hogy az anyagi tulajdonságok megváltozását milyen módon érhetjük el. Az alapanyag szerkezetének változása során pl. kémia összetétel változása megtörténik-e, úgynevezett „termokémiai” eljárás során vagy nem. Fontos, hogy a lézersugár hatására a felület hőmérséklete eléri, illetve meghaladja-e az olvadáspontot. Ezek alapján a lézersugaras felületkezelési eljárás egyik csoportosítási lehetőségét mutatja be a 17. ábra. [35]



17. ábra Lézeres felületkezelés csoportosítása [35, 36]

Lézersugaras edzés

A felületi edzés egy meghatározott típusú és teljesítményű lézersugaras hőbevitel - relatíve alacsony sugárintenzitású ($<10^4 \text{ W/cm}^2$) kezelés – mellett, alapvetően az alkatrész hővezető képessége által szabályozható. A hőbevitelt az abszorpciós viszonyok megfelelő megváltoztatásával befolyásolhatjuk, a hőelvezetést a geometriai viszonyok is irányíthatják. Fémtani szempontból hasonló eredmények érhetők el, mind láng-, indukciós és elektronsugaras edzéssel. [36]

Lézersugaras felületátolvasztás

Az átolvasztás az edzéshez viszonyítva nagyobb sugárintenzitású ($>10^4 \text{ W/cm}^2$) kezelés, a felületen a hőmérséklet eléri a likvidusz hőmérsékletet, így a felületen egy vékony olvadt réteg keletkezik. A gyors hűlés miatt a kristályosodott szerkezet finomabb, mint az eredeti, gyakran metastabil fázisok is keletkezhetnek.

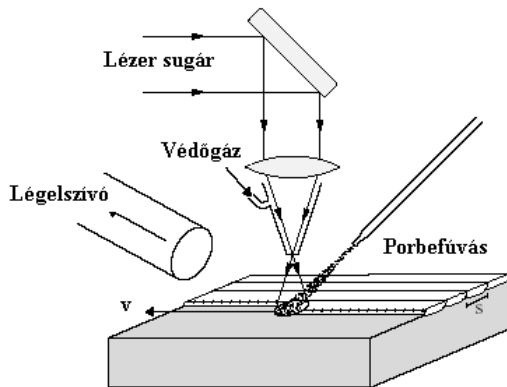
Lézersugaras felületötvöztetés

Ötvöztetésnél a lézernyaláb nagy energiájának hatására az alapanyag felső rétege megolvad és a hozzáadott ötvöző-, adalékanyag a nagy hőmérséklet gradiense és az ehhez kapcsolódó áramlások miatt gyorsan feloldódik. A diffúzióknak is lehet kis hatása, de az szinte elenyészik a keveredéshez képest. Az így létrejött olvadék ötvözetként kristályosodik.

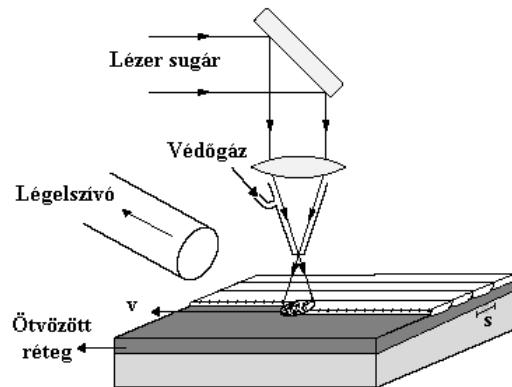
Az ötvöző anyagok bevitele különböző módon történhet:

- *Egylépéses eljárás* (18. ábra) amikor a réteg megfelelő összetételét biztosító adalékanyagot, az olvasztás során kell a lézersugárral megolvasztott tócsába juttatni, pl. pórszórással, huzaladagolással.
- *Kétlépéses eljárás* (19. ábra) az ötvözet felületére a lézersugaras kezelés előtt viszik fel az adalékanyagot, pl. galvanizálással, préseléssel, ragasztással, majd az alapanyagot és a felületi réteget összeolvasztják.

Lézeres ötvözésnél az ötvöző anyag, függetlenül attól, hogy kisebb vagy nagyobb az olvadáspontja az alapanyagénál, az olvadékban részlegesen vagy teljes mértékben feloldódik. Általában az ötvözők nagyrészt oldatban maradnak, mivel a kristályosodás nagyon gyorsan játszódik le. A gyors hűlési viszonyok miatt az ötvözők mennyiségétől és milyenségétől függően változatos felületi rétegek állíthatók elő, speciális tulajdonságokkal.



18. ábra Egylépéses eljárás [50]



19. ábra Kétlépéses eljárás [50]

Lézersugaras bevonatolás

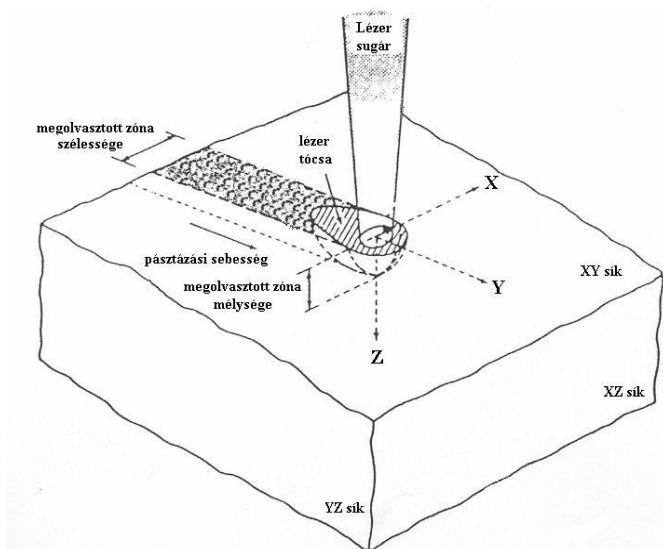
A bevonatolás a kisebb olvadáspontú adalékanyag felületre való felvitelét jelenti a lézersugaras kezelés során. A hőciklust úgy szabályozzák, hogy kicsi legyen a keveredés az adalékanyag és az alapanyag között. A felvitt réteg és az alapanyag között (10-20 μm) méretű diffúziós zóna alakul ki. Az eljárás előnye, hogy 1 mm-nél vékonyabb rétegek is felvihetők. Az ilyen gyors kristályosodással kialakult különleges szerkezetnek köszönhető a nagy keménység, a jó kopás és korrózióállóság. Itt elsősorban Co- és Ni- alapú ötvöző rétegek használata a szokásos. Ez a technológia célját tekintve hasonló a termikus szóráshoz és a felrakó hegesztéshez. [38]

Robbantásos keményítés

Alapelve, hogy a nagy lökéshullámok érik az anyagot, ami nagy alakváltozást hoz létre a fém felületén. A nagy alakváltozási sebesség lehetővé teszi a fizikai tulajdonságok javulását. Ezt szilárd (statikus) lézernél nagy energia impulzus használatával érhetjük el. Az anyagnak egy vékony felületi rétege a lézersugárral való érintkezés hatására azonnal elpárolog és a gyorsan terjedő gőz egy lökéshullámot hoz létre. [38]

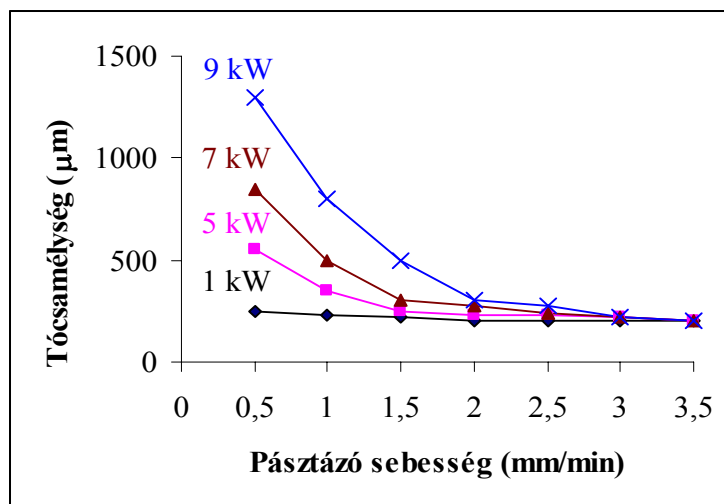
1.4.3. Lézersugaras felületolvasztás jellemzői

1.4.3.1. A kialakult lézer tócsa geometriája



A kialakuló lézertócsa geometriája a 20. ábrán látható, amelynek jellemző adatai a szélessége és mélysége. A lézertócsa mélysége és szélessége függ az alkalmazott teljesítménytől, a pásztázási sebességtől és a darab abszorpciós képességétől.

20. ábra A megolvasztott tócsa alakja a lézeres kezelés állandósult szakaszában [40]



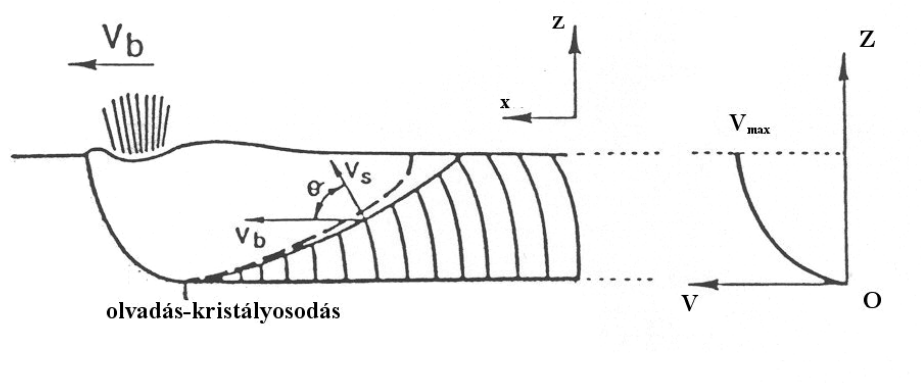
21. ábra Pásztázási sebesség és az átoltvasztott réteg vastagságának kapcsolata [41]

Müller és társai szerint lézeres átolvasztásnál a lézersugár teljesítménye és a pásztázási sebesség között a 21. ábra szerinti kapcsolat áll fenn, Al-Fe ötvözetek esetén [41]. A többi anyagéhoz képest az Al és ötvözetek reflektáló képessége nagy, de ez csökkenthető különböző anyagok felvitelével (pl. grafitos bevonás) és így az átolvasztási mélységet növelhetjük.

1.4.3.2. A kristályosodás jellemző paraméterei

Lézersugaras felületkezelés során gyors hűlésnél kialakult szerkezetet befolyásoló jellemző paraméterek:

- Lehűlési sebesség, $\dot{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$
- Lézersugár teljesítménysűrűsége; $LT = \frac{P}{A}$, ahol P- a lézersugár teljesítménye, A- az érintett terület nagysága
- Hőmérsékletgradiens, a pásztázási sebesség és a teljesítménysűrűség függvényében; $G = \frac{dT}{dX} = f(V, T)$
- A kristályosodási front haladási sebessége, a pásztázási sebesség függvénye; $v = f(v_b)$.



22. ábra A pásztázási sebesség és a kristályosodási front kapcsolata [40]

A kristályosodási front sebessége a lézersugaras felületkezelésnél meghatározható, ha az olvadt tócsát a kezelés során állandósult állapotban vizsgáljuk, amikor a lézernyaláb és az olvadék szilárd határfelület távolsága már nem változik, és a sebességük a lézernyaláb mozgási irányában egyenlő. [40]

A szilárd/olvadék határ mozgási iránya ilyen nagy hőmérséklet gradiensnél párhuzamos a hőelvonás irányával, azaz merőleges a likvidusz izotermájára. A front haladási iránya és a nyaláb mozgási iránya által bezárt szög θ -val van jelölve. A határ sebessége a nyaláb mozgási irányában megegyezik a nyaláb sebességével, a front sebessége adott mélységben az alábbi összefüggés szerint számítható:

$$v = v_b \cdot \cos \Theta(z) \quad (1)$$

ahol: v - a front haladási sebessége,
 v_b - a pásztázási lézernyaláb sebessége,
 θ - a v és v_b által bezárt szög
 z - távolság a megolvadt zóna aljától.

Az 1. egyenletből következik, hogy a tócsa legalsó pontján, ahol a megolvadást felváltja a kristályosodás, a hőelvonás, s így a front mozgási iránya merőleges a lézersugár mozgási irányára ($\theta=90^\circ$), a front mozgási sebessége nulla.

Az olvadék fázisban felfelé haladva a θ értéke csökken, s így a front mozgási sebessége nő. A front mozgási sebességének a változását az olvadék zóna mélységének függvényében a 22. ábra mutatja be.

A maximális sebesség az olvadék zóna tetején található. Ennek a nagyságrendje a sugármozgás sebességének a nagyságrendjével megegyezik, ha $\theta=0^\circ$, $\cos \theta= 1$.

A θ szög értékét a sugármozgással párhuzamos hosszszelvényen a szerkezet vizsgálatával lehet meghatározni.

2. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Alapanyagok jellemzése

A kísérleteimhez alumínium ötvözeteket használtam. (1. táblázat) Az alumínium tulajdonságai ötvözéssel széles határok között változtathatók. A legtöbb alumínium ötvözet az Al és az öt leggyakoribb ötvözőfém (Cu, Mg, Zn, Si, és Mg) két- vagy többalkotós ötvöze. A sokféle alumíniumötvözetet a feldolgozás szerint is szokás megkülönböztetni, így beszélhetünk alakítható és öntészeti ötvözetekről. Metallográfiai jellegzetességüktől függően besorolhatjuk őket, nemesíthető és nem nemesíthető alumínium ötvözetek közé.

A hipoeutektikus Al-Si ötvözetet gyakran alkalmazzák különféle gépalkatrészek, például: motorblokkok, sebességváltók és siklócsapágyak anyagaként. Ezeket az ötvözeteket használat közben szobahőmérséklettől eltérő hőmérsékleten veszik igénybe, pl. a robbanómotorok 200 °C-nál magasabb hőmérsékleten üzemelnek. Így fontos szerepet kapnak a mechanikai tulajdonságok. A nagyobb hőmérséklet hatására az alumínium ötvözetek szilárdsága csökken, képlékenysége és ütőmunkája nő. A hőmérséklet csökkenésével a szilárdsági jellemzők növekednek, a képlékenység és az ütőmunka kis mértékben változik, szilárd oldatos ötvözeteknél nő, nemesített illetve heterogén szerkezetű ötvözetek esetében, pedig csökken. Az alumínium ötvözetek kifáradási határa hőfok növekedésével csökken. Magasabb hőmérsékleten a fáradás mellett már kúszás is jelentkezik.

A szilícium, mint az Al egyik legjelentősebb ötvözője csökkenti a hőtágulási együtthatót, a fajsúlyt és javítja az öntési tulajdonságokat. Az alakítható Al ötvözetekben mindig jelen levő Fe lecsökkenti a Si oldhatóságát. A Mg és Cu ötvözéssel a szilárdság javítható, azonban az önthetőséget rontja, mert nő a viszkozitás. A Cu ötvöző növeli a sűrűséget, de csökkenti a hővezető képességet. Az ólom a kopásállóság szempontjából kedvező.

Az alapanyag biztosítja a csapágy számára a megfelelő szilárdságot, míg a felületbe bevitt Pb részecske feladata a kopásállóság növelése, illetve a siklási tulajdonságok javítása. A Pb tartalom befolyásolja a súrlódási együtthatót és a kopásállóságot.

Az ólom a szilíciummal és az alumíniummal is monotektikus rendszert alkot, így kiváló modellötvözet a monotektikus ötvözet rendszerek tanulmányozására.

1. táblázat Kísérleteim alapanyagának kémiai összetétele²

	Si [t%]	Fe [t%]	Cu [t%]	Zn [t%]	Mg [t%]	Mn [t%]
Al-7Si	7,22	0,62	0,09	0,013	0,01	0,25
Al-4Cu-1.5Mg	1,37	0,62	3,95	0,005	1,5	0,25

2.2. Felületkezelési eljárások

A kísérletek során az egylépéses és a kétlépéses felületkezelési technológiát alkalmaztam.

- Az egylépéses (por befúvós) technológiánál (18. ábra) a lézersugár által megolvasztott rétegbe Ar vivőgázzal, 40-60 µm átmérőjű Bi szemcséket fújtunk, különböző lézerteljesítménnyel (2; 2,5; 3; 3,5 kW) és különböző előtolási sebességek (300; 600; 900 mm/min) mellett. A lézeres kezelés során 5 lézeres nyomot készítettünk 50%-os átfedéssel, a lézersugár nyalábon belüli energia eloszlása TEM₀₁ módusú. A mintadarabokat grafitral vontuk be az alumínium ötvözetek kis abszorpciója miatt. Megkíséreltük az ólom szemcsék befűzését is, azonban nem jártunk sikerrel, mert az ólom szemcsék összetapadta és nem lehetett Ar vivőgáz segítségével sem kifűjni.
- A kétlépéses technológiánál (bevonat beolvasztás) (19. ábra) az Al-Si hipoeutektikus ötvözet felületére kb. 0,1 mm vastagságú ólomréteget vittünk fel galvanizálással, majd különböző lézerteljesítménnyel (2; 2,5; 3; 3,5 kW) és különböző előtolási sebességek (300, 600, 900 mm/min) mellett összeolvasztottuk. A lézeres felületátolvasztás során a felülettől 20 mm-re 45°-ban 6 mm átmérőjű csövön bevezetett 15 l/perc mennyiségű argon védőgázt alkalmaztunk. A lézersugár folt átmérője a darab felületén 2 mm volt. A lézeres kezelés során 8 lézeres nyomot készítettünk 50%-os átfedéssel.
- Az egylépéses technológiánál (huzaladagolásos) kis és nagy lézer teljesítményű kísérletsorozatot különböztettem meg. A kis lézersugár teljesítményű kísérletsorozat (1-8 próbadarabok) során csak a lézersugár teljesítményét változtattuk 1,5-2,04 kW között. A nagy lézersugár teljesítményű kísérleteknél (9-20 próbadarabok) a 2 és 2,4 kW lézersugár teljesítménynél a lézersugár mozgási sebességét változtattuk 1500-1800-2100 mm/perc között. A lézeres kezelés során 8 felrakott zóna készült 50%-os átfedéssel. A lézersugár minősége 12 mm*mrad volt.

² **Megjegyzés**

Kísérlet sorozataimhoz összehasonlító vizsgálat céljára használtam továbbá Al-4Cu-1.5Mg-20Sn ötvözetet is.

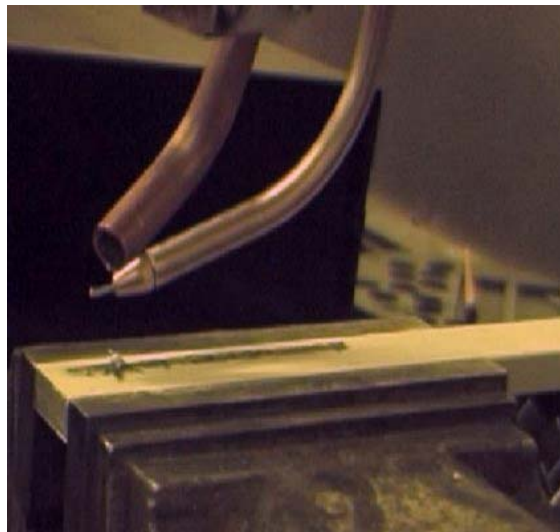
A huzaladagolásos technológiánál az 1 mm átmérőjű Al-Pb huzal készítése a következő módszerrel történt:

- (i) nagy tisztaságú (99.99 t%) Al csőbe (külső átmérő: 10 mm, belső átmérő: 4,5 mm) nagy tisztaságú (99.99 t%) Pb port töltöttünk,
- (ii) az Pb porral megtöltött Al csövet hengerléssel és húzással 1 mm átmérőjűvé alakítottuk.

A huzal átlagos összetétele: 52 t% Pb és 48 t% Al.



23. ábra CO₂ lézer a BAYATI-ban



24. ábra Nd:YAG lézeres huzaladagolás a BAYATI-ban

A monotektikus felületi rétegek kialakítása a Bay Zoltán Anyagtudományi és Anyagtechnológiai Intézet 5 kW teljesítményű, CO₂ lézerberendezésével és a 2.7 kW teljesítményű Nd:YAG lézerberendezésével történtek. (23. ábra és 24. ábra).

Alapanyagok

Egyik alapötvözetnek az Al7Si ötvözetet használtam, mert az ilyen ötvözetek jól önthetőek, nagy szilárdsággal rendelkeznek és gyakran készítenek belőle különféle gépkatrészeket. Ezeket feldaraboltam, majd KMM5 típusú kemencében 800 °C-on megolvastottam és 60x20x130 mm méretű darabbá öntöttem.

A leöntött darabokat 15 mm x 20 mm x 130 mm méretűre daraboltam. A próbadarabok lézersugárral kezelt felülete 15x130 mm volt.

A másik alapötvözet Al-4Cu-1.5Si-0.5Mg ötvözet préstuskó darabjaként állt rendelkezésemre, amelynek átmérője 55 mm volt. 15 mm vastag tárcsákra daraboltam. A

lézersugárral kezelt körfelület: $\varnothing_{\text{külső}}$ 45 mm, $\varnothing_{\text{belső}}$ 28mm volt. A mintadarabok kezelendő felületét P400-as csiszolópapírral csiszoltam. Az alumíniumötvözet kis abszorpciója miatt a lézersugaras felületkezelés előtt a próbadarabokat Flux 4 Mg (DIN 8511:F-LH1) folyatószerrel vontuk be.

A 2. táblázat az összes kísérlet paramétereit tartalmazza. Meg kell említenem, hogy minden kísérletből párhuzamos próbadarabok készültek, azonban ezek jelölésére már nem tértem ki külön.

2. táblázat Lézeres felületkezelési kísérletek

Alapanyag	Ötvöző anyag	Lézeres felületkezelési eljárás	Lézeres felületkezelési paraméterek		Próbadarab jele	Megjegyzés	Elvégzett vizsgálatok
			Lézer teljesítmény [kW]	Előtolási sebesség [mm/min]			
Al7Si	Bizmut	Lézeres felületkezelés CO ₂ lézerrel Egylépéses technika	2; 2,5; 3; 3,5	300	I-1, I-2, I-3, I-4	-Bizmut szemcsék Ø 40-60 µm -Gázáram 15l/perc (Argon) -Fúvóka Ø 6 mm -Lézersugár folt Ø 2 mm. -5 átolvasztott zónát készült 50 % -os átfedéssel.	-Metallográfiai vizsgálatok (Fénymikroszkóp, -SEM, EDS -Képelemző berendezéssel végzett vizsgálatok -Keménységmérés
			2; 2,5; 3; 3,5	600	I-5, I-6, I-7, I-8		
			2; 2,5; 3; 3,5	900	I-9, I-10, I-11, I-12		
Al7Si	Ólom	Lézeres felületkezelés CO ₂ lézerrel Kétlépéses technika	2; 2,5; 3; 3,5	300	II-1, II-2, II-3, II-4	-Az eljárás előtt a próbadarabok felületére elektrolitikusan 0,1 mm vastagságú ólomréteget választottam le. -Gázáram 15l/perc (Argon) -Fúvóka Ø 6 mm -Lézersugár folt Ø 2 mm. -8 átolvasztott zónát készült 50 % -os átfedéssel.	-Metallográfiai vizsgálatok (Fénymikroszkóp, -SEM, EDS - Képelemző berendezéssel végzett vizsgálatok -Keménységmérés
			2; 2,5; 3; 3,5	600	II-5, II-6, II-7, II-8		
			2; 2,5; 3; 3,5	900	II-9, II-10, II-11, II-12		
Al7Si	Ólom	Lézeres felületkezelés CO ₂ lézerrel Kétlépéses technika	2; 2,5; 3; 3,5	300	III-1, III-2, III-3, III-4	-Gázáram 22 l/perc (Argon) -Fúvóka Ø 10 mm -Lézersugár folt Ø 2 mm -8 átolvasztott zóna készült 50%-os átfedéssel.	-Metallográfiai vizsgálatok (Fénymikroszkóp, -SEM, EDS - Képelemző berendezéssel végzett vizsgálatok -Keménységmérés -Tribológiai vizsgálatok
			2; 2,5; 3; 3,5	600	III-5, III-6, III-7, III-8		
			2; 2,5; 3; 3,5	900	III-9, III-10, III-11, III-12		

Alapanyag	Ötvöző anyag	Lézeres felületkezelési eljárás	Lézeres felületkezelési paraméterek		Próbadarab jele	Megjegyzés	Elvégzett vizsgálatok
			Lézer teljesítmény [kW]	Lézersugár mozgási sebessége [mm/perc]			
Al-4Cu-1.5Mg	Ólom	Lézeres felületkezelés YAG lézerrel (huzaladagolással) Egylépéses technika	1,50	1800	V-1, V-2	-Huzalsebesség 3,6 m/perc -Gázáram 22 l/perc (Argon) -Fűvóka Ø 10 mm -Lézersugár folt Ø 2 mm -8 átolvasztott zóna készült 50%-os átfedéssel.	-Metallográfiai vizsgálatok (Fénymikroszkóp, -SEM, EDS - Képelemző berendezéssel végzett vizsgálatok -Keménységmérés -Tribológiai vizsgálatok (Pin on Disk) -Röntgendiffrakciós mérés
			1,65	1800	V-3, V-4		
			1,85	1800	V-5, V-6		
			2,04	1800	V-7, V-8		
			2,04	1500	VI-9, VI-10	-Huzalsebesség 3,6 m/perc -Gázáram 22 l/perc (Argon) -Fűvóka Ø 10 mm -Lézersugár folt Ø 2 mm -8 átolvasztott zóna készült 50%-os átfedéssel.	-Metallográfiai vizsgálatok (Fénymikroszkóp, -SEM, EDS -Képelemző berendezéssel végzett vizsgálatok -Keménységmérés -Tribológiai vizsgálatok (Pin on Disk) -Röntgendiffrakciós mérés
			2,41	1500	VI-11, VI-12		
			2,04	1800	VI-13, VI-14		
			2,41	1800	VI-15, VI-16		
			2,04	2100	VI-17, VI-18		
			2,41	2100	VI-19, VI-20		

3. ELVÉGZETT MÉRÉSEK

3.1. Metallográfia vizsgálatok

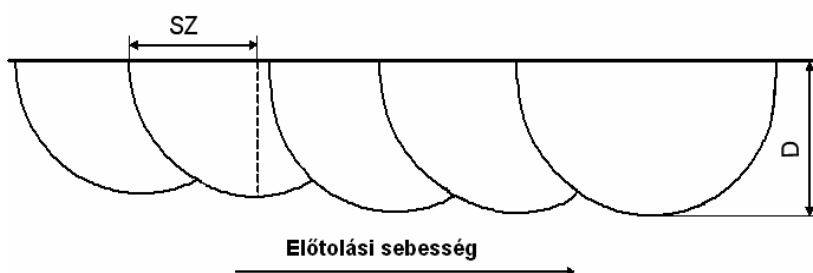
A kialakított monotektikus felületi rétegeket az átolvasztott sávokra merőlegesen elvágtam, majd vezető műgyantába való beágyazás után csiszoltam, políroztam és 0,5 % HF (hidrogén- fluoridban) marattam.

Az így kialakított monotektikus felületi rétegek megismerésére metallográfiai és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat alkalmaztam.

3.1.1. Fénymikroszkópos vizsgálatok

A fénymikroszkópos vizsgálatoknál a nyom méretének változását vizsgáltam a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség függvényében.

A megolvasztott zóna geometriájára jellemző adatokat (szélesség-Sz, mélység-D) Neophot 2 típusú fénymikroszkópon 100 X nagyítás során, a homályos üveglapra kivetített képen milliméterosztású mérőléccel mértem. Minden próbadarabon minden zóna legmélyebb pontját (D) és az azon áthaladó szimmetria vonalat jelöltem ki, majd ennek felhasználásával a tócsa fél-szélességét (SZ) mértem meg az átlapolódások miatt.

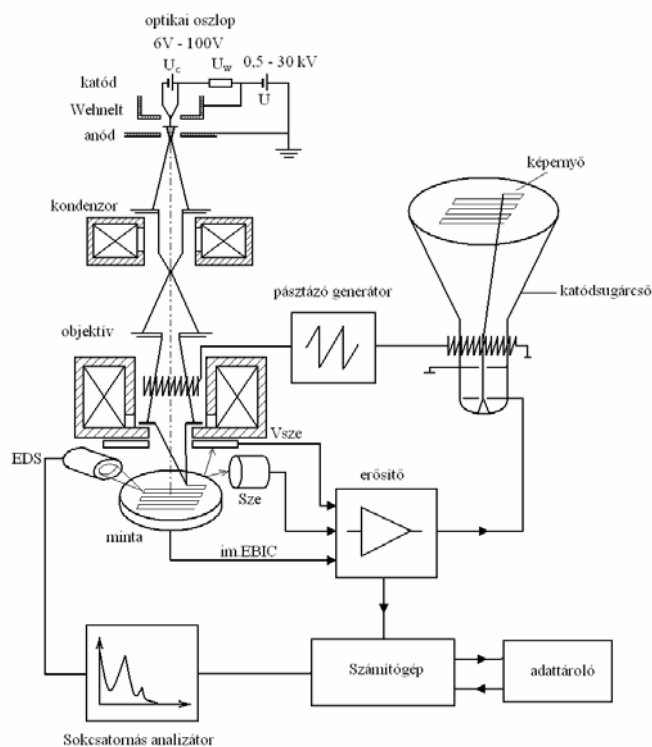


25. ábra Monotektikus felületi réteg sematikus ábrája

Fénymikroszkópos és Quantimet Image 500 Workstation képelemző berendezés segítségével meghatároztam az utolsó ötvözött zóna területét. A szélesség és mélység adatokból nem lehetett egyértelműen meghatározni az ötvözött zónák területét, így képelemző berendezés segítségével megállapítottam az Al-7Si-10Bi minták 5. zónájának a területét. Az eredményeket az 1. melléklet tartalmazza.

3.1.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok

A pásztázó elektronmikroszkóp (PEM) az elérhető nagy felbontás és mélységélesség miatt az anyagtudomány széles területén alkalmazható. A 26.ábrán a pásztázó elektronmikroszkóp elvi vázlata látható. A katódból, Wehnelt-hengerből és az anódból álló elektronágyúban létrehozott elektronsugarakat mágneses lencsékkel 50-100 Å átmérőjűre fókuszálják és eltérítő tekercsek segítségével négyszög alakban, végigpásztázzák a vákuumban lévő minta felületét. Hasonló frekvenciával mozgatják a katódsugárcső elektronsugarát. A tárgy elektronsugár kölcsönhatás következtében létrejövő jeleket elektromos jellé alakítás és erősítés után a katódsugár intenzitásának szabályozására használják fel. A kép jellegét a minta egyes pontjaival történt kölcsönhatás mértéke szabályozza. A pásztázó elektronmikroszkóp a tárgy anyagában létrejövő határok detektálásával ad képet a felületről. Amikor primer elektronnyalábbal bombázzuk a tárgyat, akkor az anyagba behatoló elektronok rugalmas és rugalmatlan ütközések sorozatát szenvedik el. Az ütközés hatására a következő jelek keletkeznek: szekunder elektronok, visszaszórt elektronok, abszorbeált elektronok, karakterisztikus röntgensugárzás, Auger elektronok [42].



26. ábra Pásztázó elektronmikroszkóp felépítése [42]

Vizsgálataimat a Fémteni- és Képlékenyalakítástani Tanszéken működő AMRAY 1830I típusú pásztázó elektronmikroszkóppal végeztem. A berendezés EDAX típusú mikroszondával van kiegészítve, amely 5 (B) - 92 (U) rendszámú elemek vizsgálatát teszi lehetővé. Az ólom és a bizmut eloszlására és mennyiségére vonatkozó vizsgálatokhoz a hátraszórt elektronokkal készített képeket használtam fel.

A visszaszórt elektronmikroszkópos képeken a kisebb rendszámú elemek, pl. Al(13), Si(14) sötétnek a nagy rendszámú elemek, pl. Pb(82), Bi(83) világos és jól elkülönült cseppeknek látszanak. A vizsgálat körülményei: 25 kV gyorsítófeszültség, 4 A lencseáram és 24 mm próbatávolság.

3.2. Kvantitatív vizsgálatok

3.2.1. Cella méret és szekunder dendritág távolság mérése

A cella méretet és a szekunder dendritág távolságot Quantimet Image 500 Workstation képelemző berendezés segítségével határoztam meg. A próbadarabok 3., 5. és a 8. zónájában lemértem a cellák, illetve a dendritág csoportok méretét. A primer dendrittörzshöz minél közelebb és a szekunder dendritágak tengelyére merőlegesen végeztem el a mérést. A próbadarabok felületét végigpásztázva, egy próbadarabon belül a mélység függvényében (az ötvözött zóna és az alapanyag határától 0,2; 0,4; 0,8 mm távolságban) az első, a harmadik és ötödik ötvözött zónában határoztam meg a szekunder dendritág távolságot.

A mérési eredményeket a 2 *melléklet* mutatja be.

3.2.2. Ötvöző tartalom meghatározása

A pásztázó elektronmikroszkópos képeken a Quantimet Image 500 Workstation képelemző berendezés segítségével meghatároztam az ólom, illetve a bizmut cseppek térfogat %-át. Minden Al-7Si-10Bi darabnak a 3. és az 5. zónájáról, illetve Al-7Si-10Pb és Al-4Cu-1.5Mg-20Pb darabnak az 5. illetve 8. ötvözött zónájáról, a zóna felső-, középső és alsó részéből nagyobb nagyítású képeket készítettem, hogy a képelemző berendezéssel történt vizsgálatok során megfelelően tudjam detektálni az ólom részecskéket.

A képek felvételét követően a szürkeképeken világos ólom részecskéket detektáltam a Leica QWin szoftver segítségével. E lépést következett a mérés, amely először a látótér átlagos adatai alapján történt. Ebben az esetben a látótér egészére jellemző adatokat határoztam meg [43].

Így a képelemző berendezés segítségével könnyen meghatározható az Pb térfogatszázaléka, amely a sűrűségek figyelembe vételével tömegszázalékká alakítható. Az átszámításhoz a következő képletet használtam:

$$W_{Pb} = \frac{x\rho_{Pb}}{x\rho_{Pb} + (100 - x)\rho_{Al}} \cdot 100 \quad (2)$$

Ahol: x: Pb mért térfogat %

W_{Pb} : tömeg %

ρ_{Pb} : ólom sűrűsége, 11,35 g/cm³

ρ_{Al} : alumínium sűrűsége, 2,70 g/cm³

Az ólom részecskék jellemzését megbízhatóan a pásztázó elektronmikroszkópon a visszaszórt elektronokkal alkotott képeken elvégzett képelemző berendezéssel történt vizsgálatok segítségével lehetett megállapítani. A mérési eredményeket az 1. *melléklet* tartalmazza.

3.3. Tribológiai vizsgálatok

Pin-on-disk rendszerű tribométeres vizsgálat esetén az állandó szögsebességgel forgó korong alakú mintadarabra merőlegesen, a korong forgástengelyétől adott távolságban (r), és erővel (F_1) nyomjuk bele az ellenanyagot. A távolságot és a normálirányú terhelést a mérés megkezdése előtt lehet beállítani, ami a mérés során állandó. Az ellenanyag koronggal érintkező geometriája lehet sík, vagy gömbszerű.

A mérések a THT-S-AX-0000 típusú tribométerrel száraz körülmények között történtek. A berendezésben a súrlódási erőt (F_s) két elmozdulás-mérő segítségével határozzuk meg, amely az adatgyűjtési frekvenciától függően folyamatosan regisztrálható.

Így az F_1 erőnek és az állandó terhelésből származó erőnek az arányából következtettünk a súrlódási együttható értékére. (3. egyenlet).

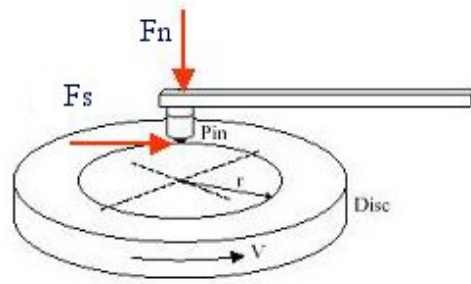
$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (3)$$

A vizsgálatainak paraméterek: 25 °C hőmérséklet, Cr6 jelű 6 mm átmérőjű krómmal ötvöztött acél golyó ellenanyag, 2 N terhelőerő, 10 cm/s sebesség és 2500 m koptatási út volt.

A koptatott felületeket pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam azért, hogy a felületi rétegek károsodását meghatározzam. [46]



27. ábra THT-S-AX-0000 típusú tribométer



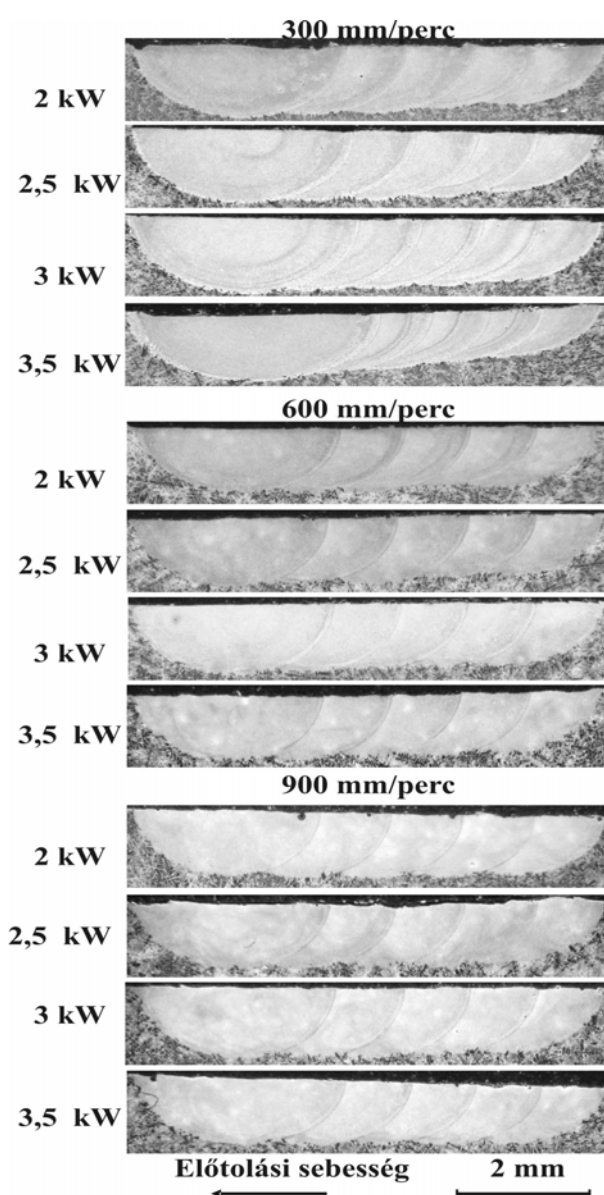
28. ábra Pin-on disk típusú tribométer sematikus ábrája

4. KISÉRLETI EREDMÉNYEK KIÉRTÉLESE

4.1. Makroszerkezet

4.1.1. Al-7Si-10Bi monotektikus ötvözet vizsgálatának eredményei

A 2.2. *Felületkezelési eljárások* című fejezetben részletesen leírt módon készült Al7Si10Bi monotektikus ötvözetet szemlélteti a 29. ábra. Az ábra bemutatja az ötvözött rétegek geometriai jellemzőit (mélységi és a szélességi változását).

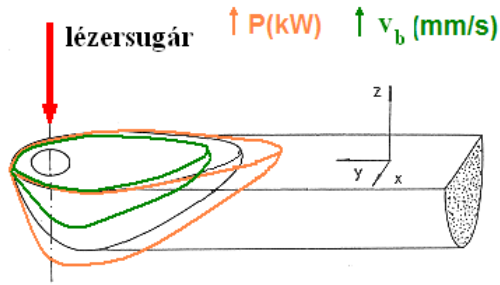


Jól látható, hogy a lézertócsa mélysége és szélessége függ az alkalmazott teljesítménytől, a pásztázási sebességtől.

Az ötvözött rétegek geometriai jellemzésénél a következőket állapítottam meg. A teljesítmény növelésével a zónamélység növekedett. Ez azzal magyarázható, hogy ugyanakkora felületre nagyobb energiát juttatva, nagyobb mélységben olvad meg az alapfém (30. ábra). Az előtolási sebesség növelésével a zónamélység csökken, mivel a kezelési idő csökkenésével csökken az időegység alatt bejuttatott energia, amely kisebb zónamélységet eredményez. Az előtolási sebességgel tehát fordított arányban van a zónamélység.

29. ábra Al7Si710Bi monotektikus ötvözet felületi rétege

Az ötvözött zónák mélysége és a szélessége a zónaszám növekedésével növekszik. Ez a jelenség a hő halmozódás eredménye. Az először megolvasztott és még le nem hűlt zóna



egy részét a következő zóna átolvasztásával újra olvasztjuk, amelynek eredményeként a következő zóna szélessége és mélysége is nagyobb lesz. A 30. ábra a lézersugár, a teljesítmény és az előtolási sebesség kapcsolatát szemlélteti.

30. ábra A lézersugár, a teljesítmény és az előtolási sebesség kapcsolata

Az ötvözött zónák mélységének matematikai leírása

Az előzőekben (4.1.1 fejezetben) leírt fizikai jelenség egyszerű matematikai egyenlettel (4. egyenlet) leírható az ötvözött zónák mélysége, az alkalmazott teljesítmény és az ötvözött zónák száma és az előtolási sebesség függvényében. Az egyenletben szereplő állandók értéke csak a vizsgálati körülmények azonossága esetén érvényes (próbadarab anyaga, geometriája, lézersugár jellemzői, védőgáz áram, felület abszorpciós képessége, környezeti hőelvonás, átlapolódás mértéke.)

$$D = [A_0 + A_1(N-1)] \cdot \left[A_2 \left(\frac{P}{v_b} - A_3 \right) \right]^n \quad (4)$$

D: ötvözött zóna mélysége (mm)

A_0, A_1, A_2, A_3 : konstansok

P: teljesítmény (kW)

N: átolvasztott zónák száma

v_b : előtolási sebesség (mm/perc)

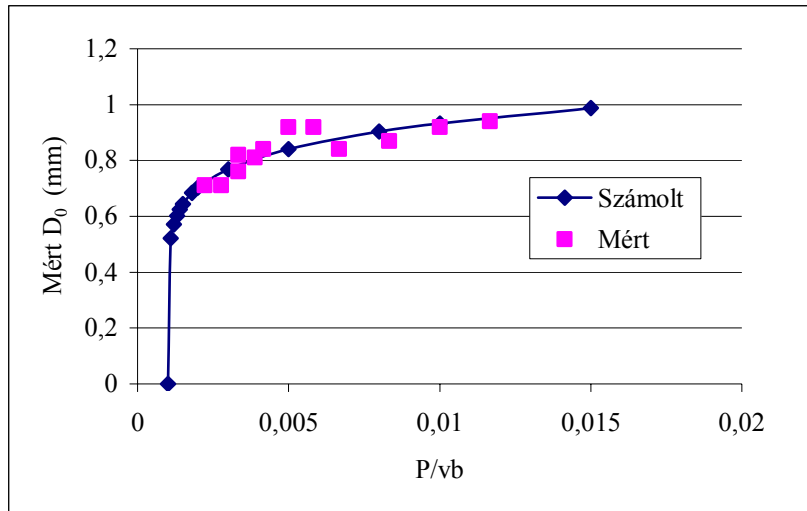
N: átolvasztott zónák száma

n: kitevő

Az A_1 konstans tartalmazza az átlapolódás hatását, természetesen más átlapolódásnál más A_1 értéket kapok. Az A_3 a P/v_b hányadosnak az a minimális értéke, amely az olvadék megjelenéséhez szükséges.

Ha $N=1$, azaz az első átolvasztott zóna esetében a mélység (D_0):

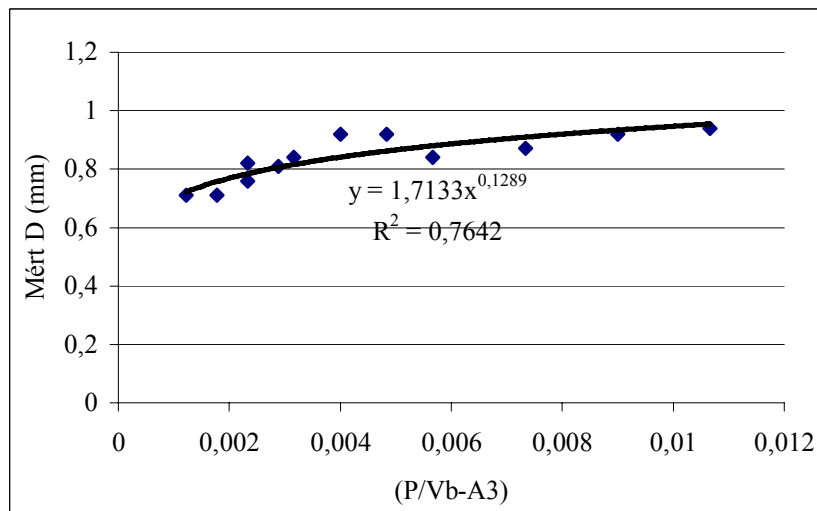
$$D_o = A_0 \cdot \left[A_2 \left(\frac{P}{v_b} - A_3 \right) \right]^n \quad (5)$$



31. ábra Az első sáv mélysége a P/v_b függvényében

Továbbiakban feltételeztem, hogy $A_2=1$, és a 31. ábra alapján megbecsültem A_3 értékét ($A_3=0,001$). Ez utóbbi, azt jelenti, hogy 300 mm/perc előtolási sebességnél 0,3 kW, 600mm/perc előtolási sebességnél 0,6 kW és 900 mm/perc előtolási sebességnél 0,9 kW, teljesítmény szüksége a tócsa megjelenéséhez. Meg kell jegyezni, hogy ennek az értéknek a kis mértékű változása lényegében nem módosítja a görbe jellegét.

Ezután következő lépésben ábrázoltam a mért mélység értékeket a $\frac{P}{v_v} - A_3$ függvényében, amelyet a 32. ábra szemléltet.



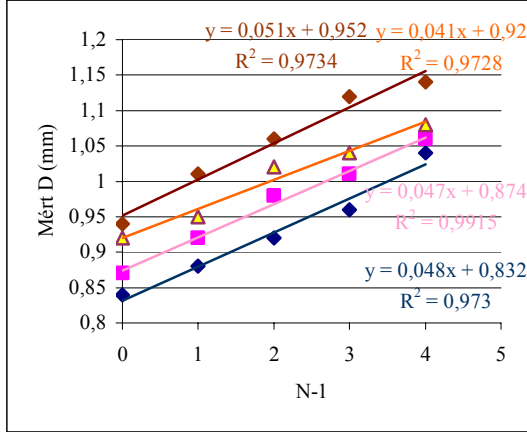
32. ábra A mért mélység értékeket a $\frac{P}{v_v} - A_3$ függvényében

Regresszió segítségével meghatároztam az n , A_0 értékeit, amelyet a 3. Táblázat tartalmaz.

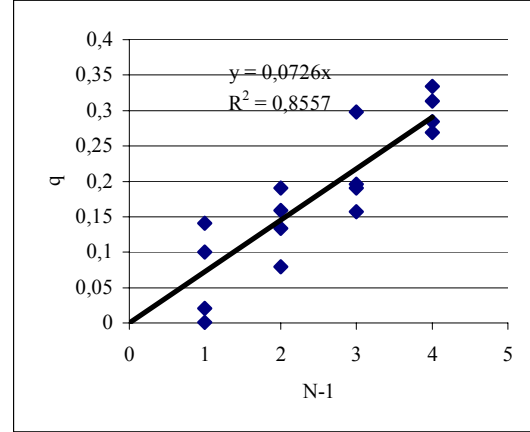
Állandó P/v_b érték esetén a mélység:

$$\left[A_2 \left(\frac{P}{v_b} - A_3 \right) \right]^n = b \quad \text{így,} \quad D = [A_0 + A_1(N-1)] \cdot b \quad (6)$$

A 6. egyenlet helyesen írja le a zónák sorszámának a függvényében a zónák mélységét, amelyet a 33. ábra szemléltet.



33. ábra Mért D érték az N-1 függvényében



34. ábra Az N-1 a q függvényében

A 34. ábrán jelölt q az alábbi egyenlet értékeinek felel meg:

$$A_1 \cdot (N-1) = \frac{D}{\left(\frac{P}{v_b} - A_3 \right)^n} - A_0 = q \quad (7)$$

Ezekből az adatokból meghatároztam az A_1 értékét. A 3. táblázat mutatja be a konstans értékeket.

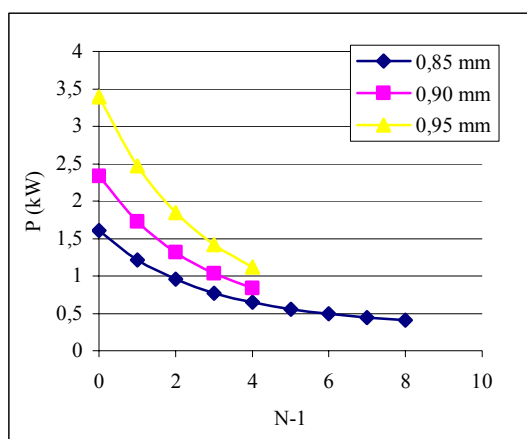
3. Táblázat Al7Si10Bi ötvözet konstansai

Ötvözet	n	A_0	A_1	A_2	A_3
Al7Si10Bi	0,1289	1,7313	0,0726	1	0,001

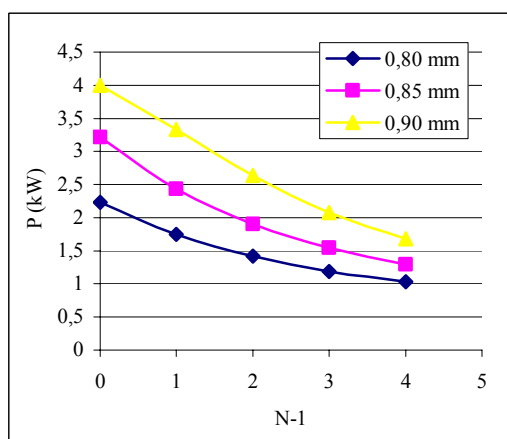
A teljesítmény változásával szabályozhatjuk az átolvasztott/ötvözött térfogatrészt (tócsa geometria) és elérhető, hogy állandó vastagságú réteg jöjjön létre. Adott vastagságú réteg kialakításához szükséges teljesítmény megadható a 4. egyenletből:

$$P = v_b \cdot \left[\frac{\left(\frac{D}{A_0 + A_1(N-1)} \right)^{1/n}}{A_2} + A_3 \right] \quad (8)$$

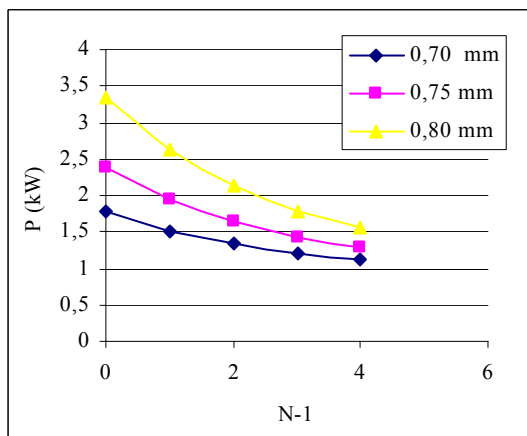
A 35. ábra szemlélteti az adott mélységű zóna előállításához szükséges teljesítményt. Az ábrákról leolvasható, hogy a 300 mm/perc darabok esetén a teljesítményszükséglet 0,3 kW-hoz, 600 mm/perc darabok esetén a 0,6 kW-hoz és 900 mm/perc darabok esetén a 0,9 kW-hoz tart nagy N érték ($N > 20$) esetében, és $N=1$ esetében sem éri el a CO₂ lézerberendezés maximális teljesítményét (5,5 kW).



a)



b)



c)

35. ábra Adott mélységű zóna előállításához szükséges teljesítmény;

a) 300 mm/perc,

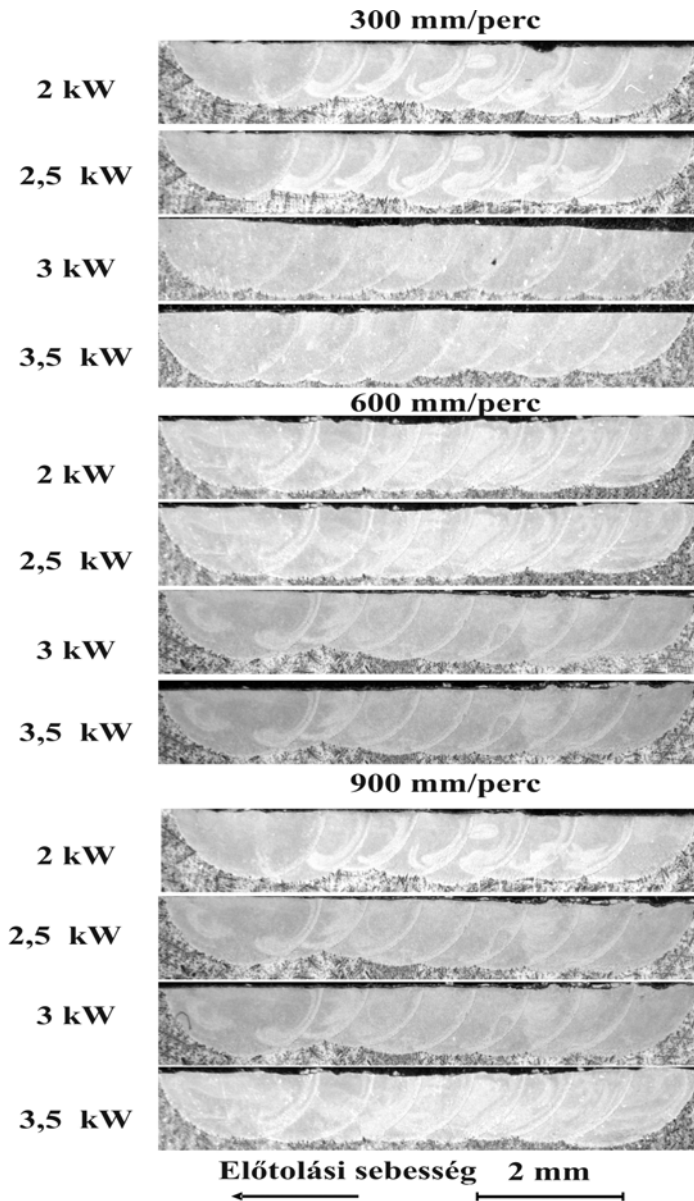
b) 600 mm/perc,

c) 900 mm/perc

A fentebb bemutatott módszer adott technológia paraméterek mellett a konstansok meghatározásával alkalmazható más eljárásoknál is, ahogy az a következő fejezetben a kétlépéses technológia esetében és az egy lépéses huzaladagolós technológiánál ismertetek.

A számolás részleteit a 2. melléklet tartalmazza.

4.1.2. Al-7Si-10Pb monotektikus ötvözet vizsgálatának eredményei



A 36. ábra a 2.2. *Felületkezelési eljárások* című fejezetben bemutatott lézersugaras felületkezelési technikák közül a kétlépéses felületötvözéssel gyártott Al-7Si-10Pb monotektikus ötvözet felületi rétegét mutatja be.

Az Al-7Si-10Bi ötvözethez hasonlóan az alkalmazott teljesítménytől, a pásztázási sebességtől függ az ötvözött zónák mélysége és szélessége.

A zónák mélysége csökken az előtolási sebesség növelésével.

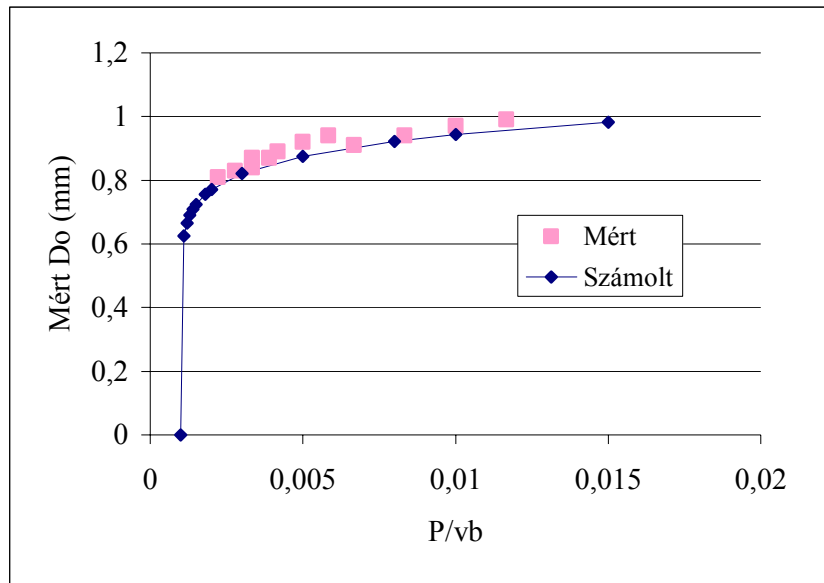
36. ábra Al7Si10Pb monotektikus ötvözet felületi rétege

Az előző fejezetben leírt módon meghatároztam az n , A_0 , A_1 , A_2 és A_3 értékeket a kétlépéses technológiával készült Al-7Si-10Pb ötvözet esetében.

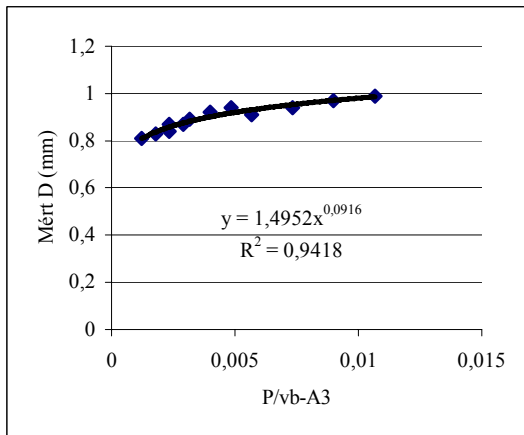
A 37. ábra mutatja be az első sáv mélységét a P/v_b hányados függvényében.

A mért mélység értékeket a $\frac{P}{v_v} - A_3$ függvényében szemlélteti a 38. ábra. A zónák

sorszámát a q függvényében mutatja be a 39. ábra. A 4. táblázat mutatja be a konstans értékeket.

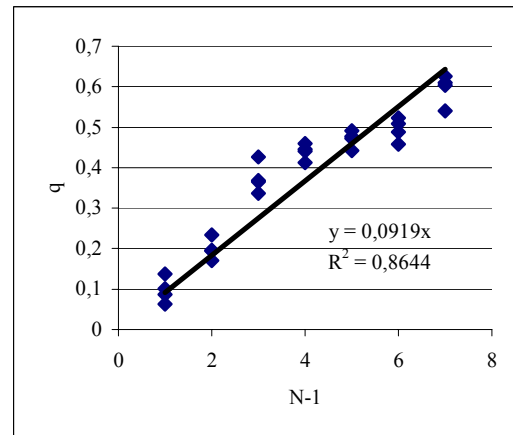


37. ábra Az első sáv mélysége a P/v_b függvényében



38. ábra A mért mélység értéket

$a \frac{P}{v_v} - A_3$ függvényében



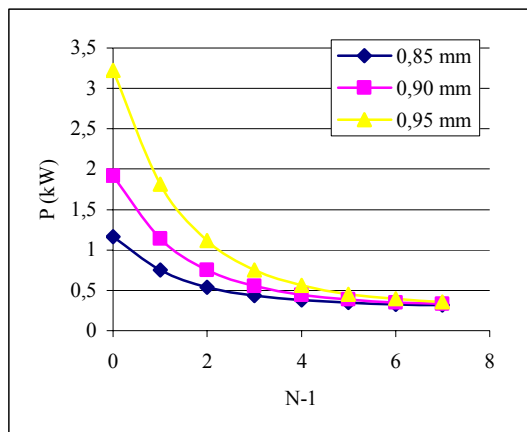
39. ábra Az $N-1$ a q függvényében

4. Táblázat Al7Si10Pb ötvözet konstansai

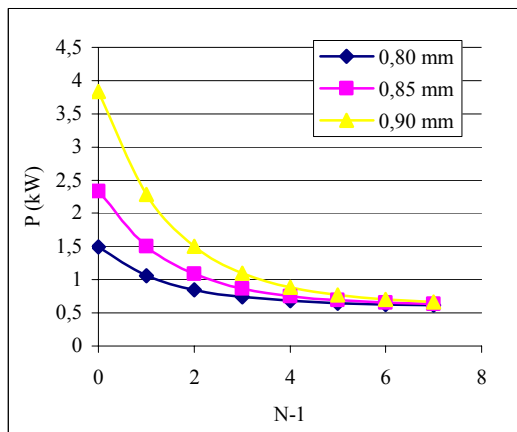
Ötvözet	n	A_0	A_1	A_2	A_3
Al7Si10Pb	0,0916	1,452	0,092	1	0,001

A 40. ábra mutatja be az adott mélységű zóna előállításához szükséges teljesítményt. Hasonlóan az Al7Si10Bi mintához, az ábráról leolvasható, hogy a 300 mm/perc darabok esetén a teljesítményszükséglet 0,3 kW-hoz, 600 mm/perc darabok esetén a 0,6 kW-hoz és

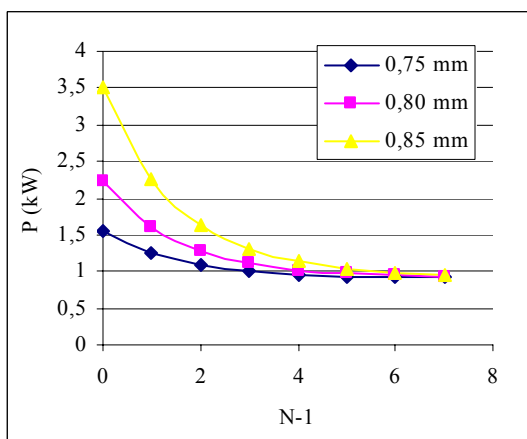
900 mm/perc darabok esetén a 0,9 kW-hoz tart nagy N érték ($N > 20$) esetében, és $N=1$ esetében sem éri el a CO₂ lézerberendezés maximális teljesítményét (5,5 kW).



a)



b)



40. ábra Adott mélységű zóna előállításához szükséges teljesítmény;

a) 300 mm/perc,

b) 600 mm/perc,

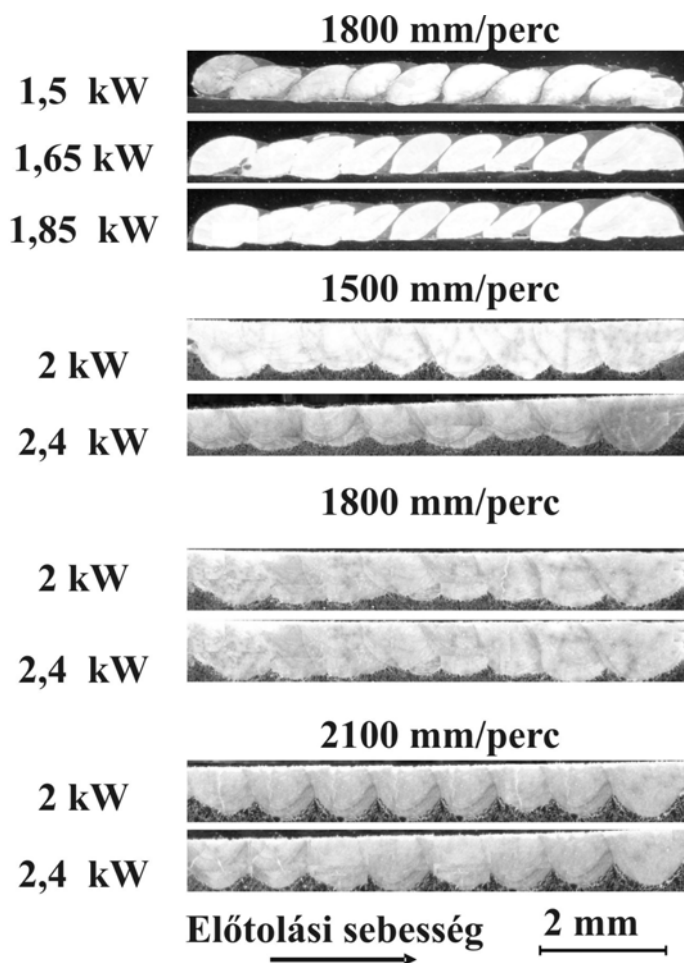
c) 900 mm/perc

4.1.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb monotektikus ötvözet vizsgálatának eredményei

A felületkezelési technikák közül az egylépéses –huzaladagolós–lézersugaras felületötvözéssel a 2.2. Felületkezelési eljárások című fejezetben leírtak szerint készült Al-4Cu-1.5Mg-20Pb monotektikus ötvözet felületi rétegét mutatja be a 41. ábra.

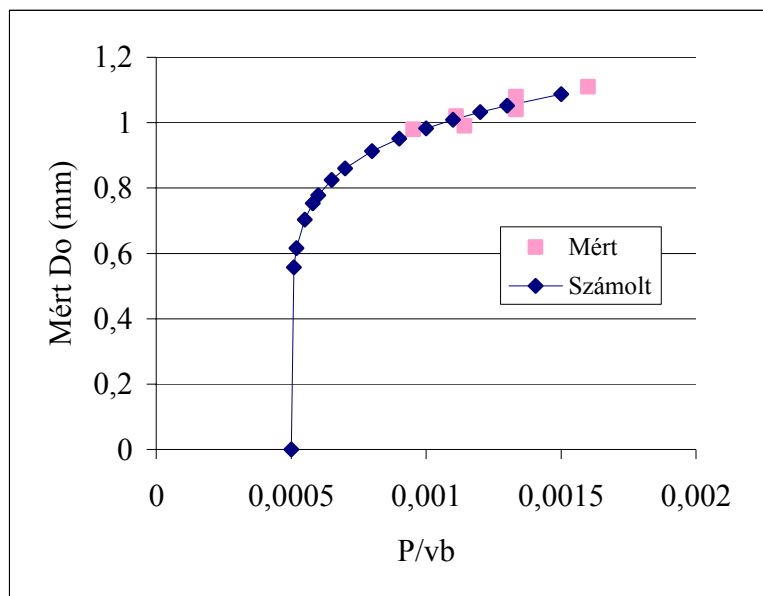
A kis lézersugár teljesítményű kísérleteknél -a Nd:YAG lézer esetén- az ólom bevitele a felületi rétegbe nem sikerült, mert az ólom szépen körbevette a huzalt és nem alakult ki fémes kötés az alapanyag és a bevonat között, mert a réteg kézzel eltávolítható volt.

A 4.1.1. fejezetben leírt módon meghatároztam az n , A_0 , A_1 , A_2 és A_3 értékeket az egylépéses huzaladagolós technológiával készült Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet esetében.



A 42. ábra mutatja be az első sáv mélységét a P/v_b hányados függvényében. A 42. ábra alapján megbecsültem A_3 értékét ($A_3=0,0005$). Ez utóbbi azt jelenti, hogy a 1500 mm/perc darabok esetén 0,75 kW, 1800 mm/perc darabok esetén a 0,90 kW és 2100 mm/perc darabok esetén a 1,05 kW az teljesítmény szükséges a tócsa megjelenéséhez.

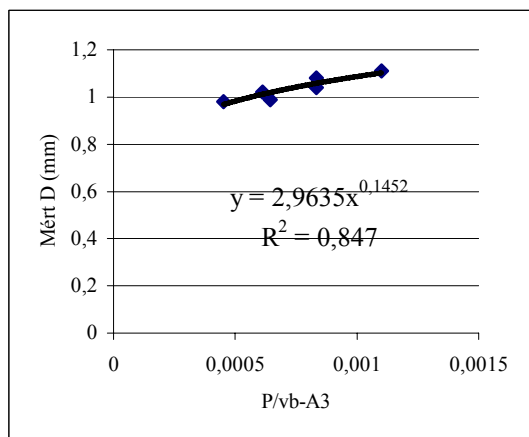
41. ábra Al-4Cu-1.5Mg-20Pb monotektikus ötvözetek felületi rétegei



42. ábra az első sáv mélységét a P/v_b hányados függvényében

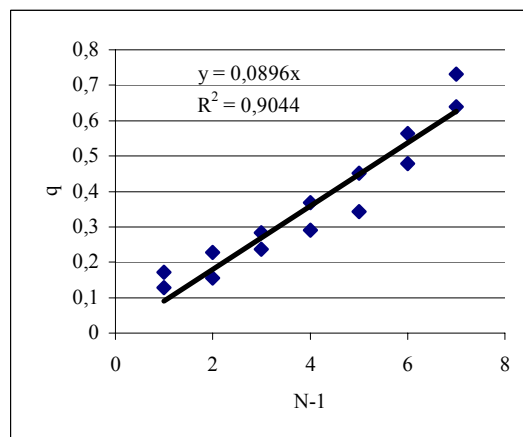
A mért mélység értékeket a $\frac{P}{v_v} - A_3$ függvényében szemlélteti a 43. ábra.

A zónák sorszámát a q függvényében mutatja be a 44. ábra. A 5. táblázat mutatja be a konstans értékeket.



43. ábra A mért mélység értéket

a $\frac{P}{v_v} - A_3$ függvényében

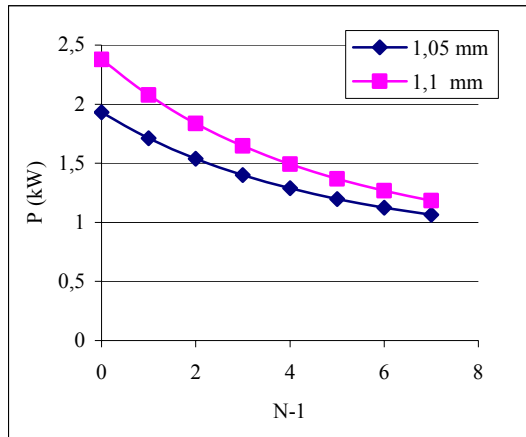


44. ábra Az N-1 a q függvényében

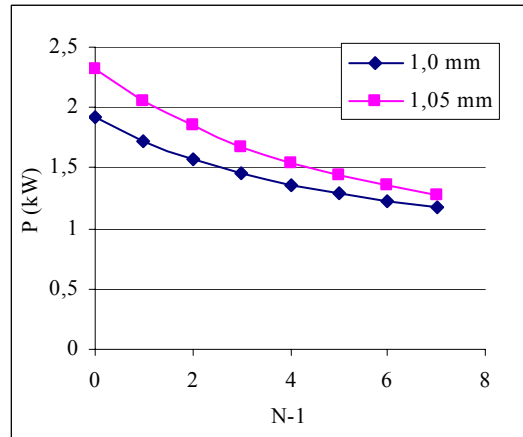
5. Táblázat Al4Cu1.5Mg20Pb konstansai

Ötvözet	n	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃
Al4Cu1.5Mg20Pb	0,145	2,963	0,089	1	0,0005

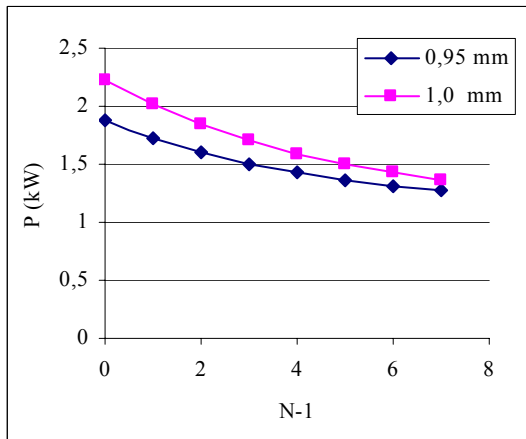
A 45. ábra mutatja be az adott mélységű zóna előállításához szükséges teljesítményt. Az ábrákról leolvasható, hogy a 1500 mm/perc darabok esetén a teljesítményszükséglet 0,75 kW-hoz, 1800 mm/perc darabok esetén a 0,90 kW-hoz és 2100 mm/perc darabok esetén a 1,05 kW-hoz tart nagy N érték (N>20) esetében, és N=1 esetében sem éri el a Nd:YAG lézerberendezés maximális teljesítményét. (2,7 kW)



a)



b)



c)

45. ábra Adott mélységű zóna előállításához szükséges teljesítmény;

a) 1500 mm/perc,

b) 1800/mm/perc,

c) 2100 mm/perc

Az ötvözött zónák geometriai vizsgálati eredményei alapján megállapítható, hogy:

1. A teljesítmény növekedésével a zónamélység növekedett, amely azzal magyarázható, hogy ugyanakkora felületre nagyobb energiát juttatva nagyobb mélységben olvad meg a felület.
2. Az előtolási sebesség növekedésével a zónamélység csökken, mivel a kezelési idő csökkenése kisebb zónamélységet eredményez.
3. Az átolvadott zóna keresztmetszete a teljesítmény növekedésével kisebb mértékben nő, következésképpen a teljesítmény kisebb része a tócsa növekedésére, a nagyobb része a tócsa túlhevítésére fordítódott.
4. Meghatároztam, hogy az ötvözött zónák mélysége az alkalmazott teljesítmény, ötvözött zónák számának és az előtolási sebesség függvényében leírható:

$$D = [A_0 + A_1(N-1)] \cdot \left[A_2 \left(\frac{P}{v_b} - A_3 \right) \right]^n.$$

5. Állandó vastagságú réteget lehet létrehozni, a teljesítmény megváltoztatásával, amelyet az alábbi képlettel lehet kiszámítani:

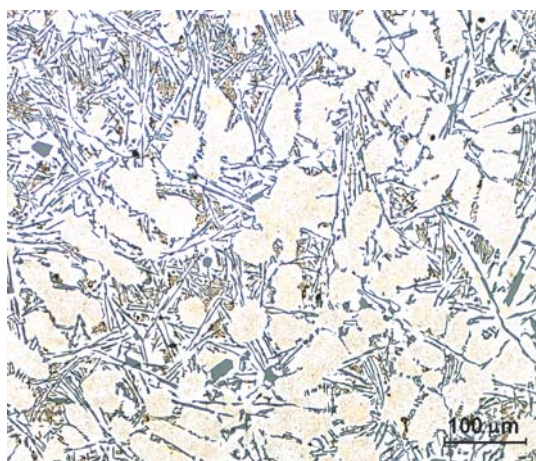
$$P = v_b \cdot \left[\frac{\left(\frac{D}{A_0 + A_1(N-1)} \right)^{1/n}}{A_2} + A_3 \right].$$

4.2. Mikroszerkezet

4.2.1. Alapszövetek jellemzése

4.2.1.1. Az Al-7Si alapszövet jellemzése

Az egyik alapötvözet Al-7Si ötvözet volt (46. ábra). Az Al-Si eutektikum az irreguláris eutektikumok csoportjába tartozik. Az eutektikum két fázisa nem rendezetten növekszik. Az Al-ban a Si fázis részecskéi úgy helyezkednek el, ahogy a csíráképződéskor a csírák véletlenszerűen képződtek. A Si fázis határoló felülete facettált, azaz atomosan sík. Ezért a mikroszkópi csiszolaton a Si részecskék túlnyomóan egyenes vonallal határoltak. Természetesen a Si kristályok közötti átlagos távolságot ugyanúgy, mint a reguláris eutektikumnál a növekedés feltételei szabályozzák, azaz az átlagos távolság ennél az eutektikumnál is számolható a $\lambda^2 v = K$ egyenlet alapján, ahol a λ -a részecskék közötti távolság, v - szilárd fázis növekedési sebessége.

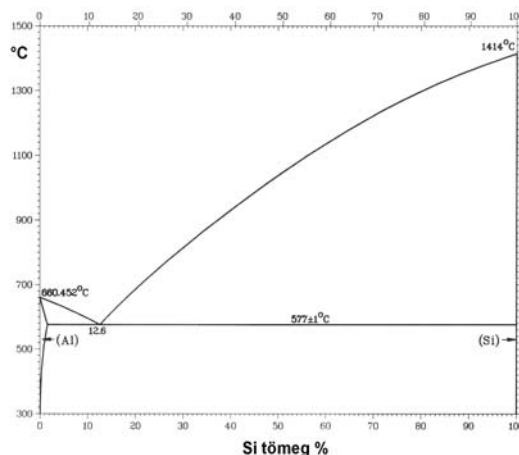


Az öntészeti Al-Si ötvözetet szinte mindig finomítják, „nemesítik” nátrium vagy stroncium adagolásával. Ezáltal az eutektikum finomabb szerkezetű lesz, a Si fázis részecskéi kisebbek, gömbszerűek lesznek az eutektikumban.

46. ábra Al-7Si alapszöve

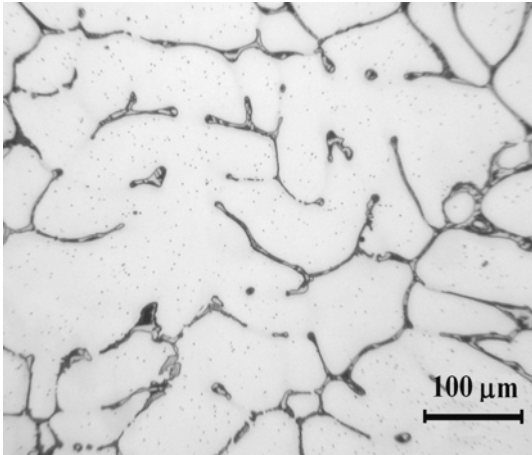
Az 47. ábra Al-Si egyensúlyi fázisdiagramot mutatja be. A kísérleteim során használt egyik alapötvözet Al-7Si ötvözet kiinduló állapotának a szövetét megvizsgálva azt lehet megállapítani, hogy primer Al szilárd oldatot és Al-Si eutektikumot tartalmaz.

47. ábra Al-Si egyensúlyi fázisdiagram [53]



A kristályosodás folyamata a primer alumínium dendritek keletkezésével indul meg. Az alapszövetben a primer Al dendritek mellett, Al-Si eutektikum keletkezett.

4.2.1.2. Az Al-4Cu-1.5Mg alapszövet jellemzése

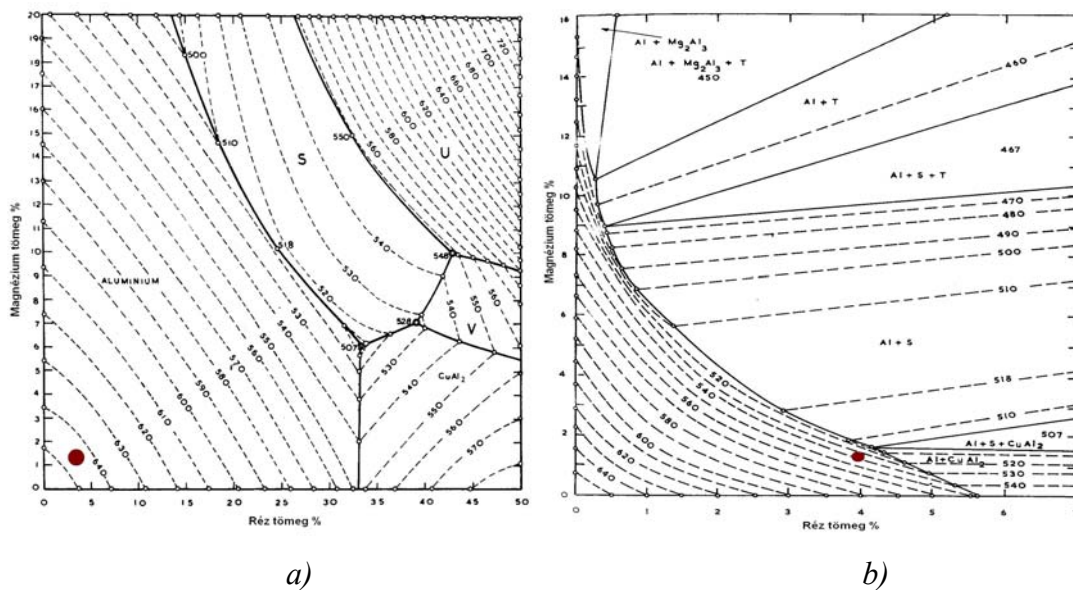


A másik alapötvözet Al-4CuM-1.5Mg ötvözet. Az Al-4Cu1.5-Mg ötvözetek a nagyon fontos Al ötvözetek közé tartozik, 3-5 % Cu és 0,5-1,5 % Mg tartalommal rúddá, lemezzé feldolgozva *duralumín* néven nagy szilárdságú könnyűfém ötvözet, sokféle szerkezetnek a szerkezeti anyaga.

48. ábra Al-4Cu-1.5Mg ötvözet alapszöveve

Az Al-4CuM-1.5Mg ötvözet szövetszerkezetét szemlélteti az 48.ábra. Az ötvözet kristályosodása nagyon összetett, mivel mind a három binér rendszerben vannak vegyületek (Al_2Cu , Mg_2Al_3) ezeken kívül még a háromalkotós vegyületek képződésére is sor kerül. (pl. CuMgAl_2 , CuMg_4Al_6). A gyakorlati, aránylag kis Cu és Mg tartalmú AlCuMg ötvözetben Al_2Cu , Mg_2Al_3 és CuMgAl_2 , vegyületek jelenhetnek meg.

Az Al-4Cu-1.5Mg ötvözet kristályosodása az Al alapú szilárd oldat dendritjeinek a képződésével kezdődik, ezután $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ eutektikuma kristályosodik. A kristályosodási folyamat pedig a ternér eutektikus hőmérsékleten ér véget $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu} + \text{S}$ (Al_2CuMg) ternér eutektikummal. A likvidusz és szolidusz felületet mutatja be az 49. ábra.



49. ábra Al-Cu-Mg egyensúlyi ternér diagram [53]

a) likvidusz felület b) szolidusz felület

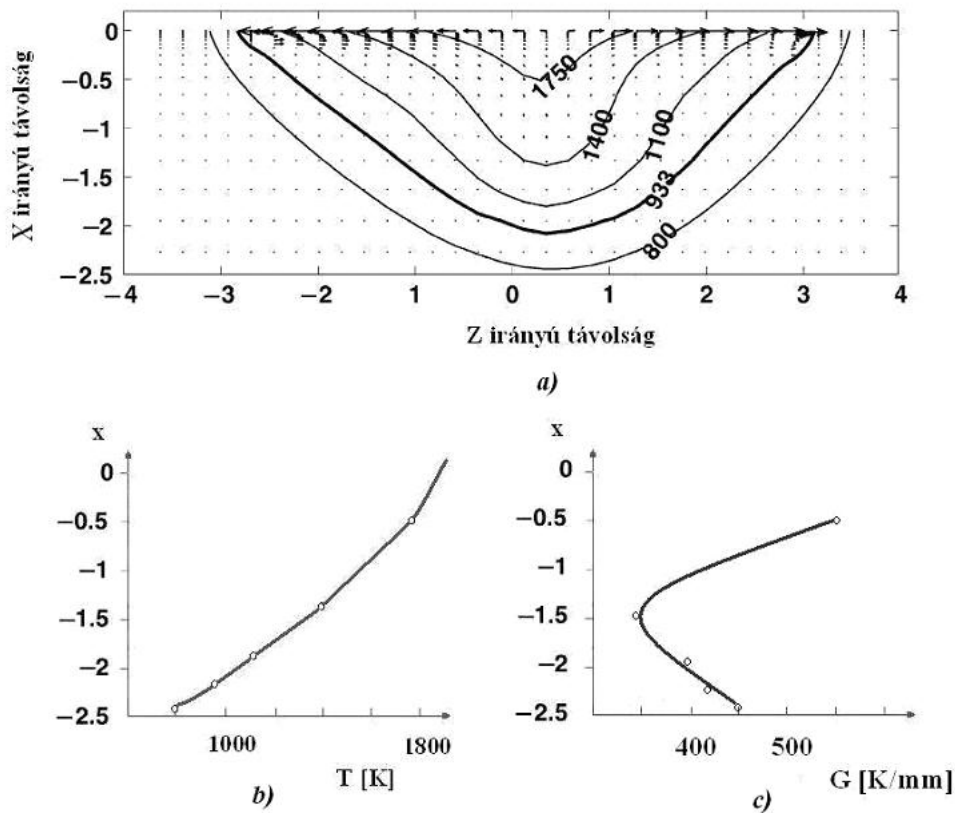
4.2.2. A lézersugaras felületkezelési kísérletek termikus jellemzése

4.2.2.1 A meghatározás módszerei

A kristályosodás jellemző paraméterei a lehülési sebesség ($\dot{T}$, K/s) a hőmérséklet gradiens (G , K/mm) és kristályosodási front sebessége (v , mm/s). A paraméterek meghatározása hőtechnikai modellek és mérések segítségével történik.

4.2.2.1.1. Paraméterek meghatározása modellekből

Számos kutató dolgozott ki számítási eljárást a hőmérséklet eloszlás meghatározására, amelyből kiszámíthatók a kristályosodási paraméterek ($\dot{T}$, G és v) [54] Phanikumar és társai [55] lézersugaras felületkezeléssel létrehozott Al-Bi hipermonotektikus ötvözetek mikroszerkezetét vizsgálták, és modellezték a zónán belüli hőmérséklet eloszlást. A szerzők által a modellből kapott keresztmetszeti hőmérséklet eloszlást mutatja be a 50. ábra. Ezt felhasználva meghatároztam a hőmérséklet eloszlást a zóna közepén (50.b ábra), majd ennek a függvénynek a differencia hányadosával a hőmérséklet gradienst a zóna mélységének függvényében (50.c ábra).



50. ábra Zónán belüli hőmérséklet eloszlás [55]

Az ábra alapján elmondható, hogy az átolvasztott zóna alján a hőmérséklet gradiens ~ 450 K/mm, a szinalumínium olvadáspontjánál (933,2 K) ~ 400 K/mm, az ötvözött zóna közepén a legkisebb (~ 350 K/mm), innen kezdve a hőmérséklet gradiens a darab felszíne felé jelentősen nő, a felület közelében eléri az 550 K/mm-t. Megjegyzendő, hogy a szilárd/olvadék front nem ebben az irányban halad, a kristályosodásnál kialakuló dendrites (cellás) szerkezet paramétereit a frontra merőleges hőmérséklet gradiens határozza meg

4.2.2.1.2. Paraméterek meghatározása mért értékek alapján

1) Lehülési sebesség ($\dot{T}$) meghatározása

Közvetlen mérésekből a lehülési sebesség nem határozható meg. A szerkezeti paraméterek és a lehülési sebesség kapcsolatából meghatározható a lehülési sebesség a következőkben részletezettek szerint.

Szekunder dendritág távolság (λ_2) alapján

A lézersugaras felületátolvasztás/ötvözési kísérletek többségében dendrites szerkezet alakul ki. A szekunder dendritág távolságból meg lehet határozni a lehülési sebességet az alábbi egyenletek alapján. A szekunder dendritág távolság és a helyi megszilárdulási idő közötti kapcsolat [62]:

$$\lambda_2 = k \cdot t_o^n \quad (9)$$

ahol, k - és n konstans, t_o -helyi megszilárdulási idő.

Irányított kristályosodásnál:

$$t_o = \left(\frac{\Delta T}{G \cdot v} \right), \quad \text{és} \quad \Delta T = T_l - T_s^* \quad (10)$$

ahol, ΔT -a kristályosodási hőmérséklet köz, T_l -a likvidusz hőmérséklet, T_s^* -a nem egyensúlyi szolidusz hőmérséklet.

A 10. egyenletet visszahelyettesítjük a 9. egyenletbe, és a $\Delta T = T_l - T_s^*$ -t bevonjuk a k_1 konstans értékebe:

$$\lambda_2 = k \cdot \left(\frac{T_l - T_s^*}{G \cdot v} \right)^n = k_1 \cdot (G \cdot v)^{-n}. \quad (11)$$

A lehülési sebesség ($\dot{T}$) kifejezhető a hőmérséklet gradienssel (G) és a kristályosodási front sebességgel (v): $\dot{T} = G \cdot v$.

Így:

$$\lambda_2 = k_1 \cdot \dot{T}^{-n}, \quad \text{és} \quad \dot{T} = \left(\frac{k_1}{\lambda_2} \right)^{1/n} \quad (12)$$

Cella méret (λ_1) alapján

A lézersugaras felületátolvasztásnál/ötvözésnél gyakran cellás szerkezet alakul ki. Ez esetben, az előzőekben bemutatott összefüggés nem használható, viszont a lehülési sebességet meg lehet határozni a cellaméret ismeretében is [63]:

$$\lambda_1 = k_2 \cdot G^{-r} \cdot v^{-q} \quad (13)$$

ahol, k_2 , r és az q - állandó.

Feltételezve, hogy $r=q$, [64]

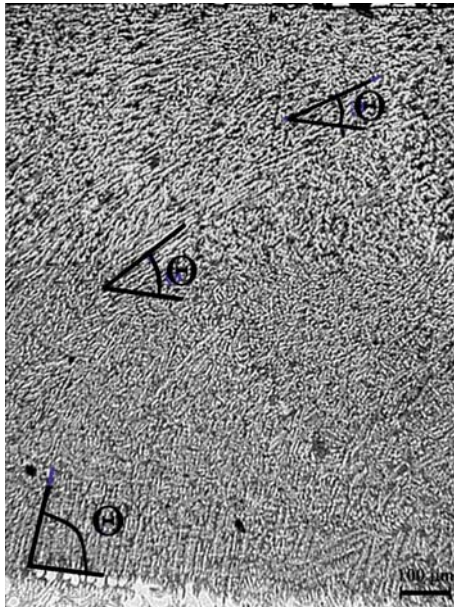
$$\lambda_1 = k_2 \cdot (G \cdot v)^{-r} \quad (14)$$

Felhasználva ismét, hogy $\dot{T} = G \cdot v$,

$$\lambda_1 = k_2 \cdot \dot{T}^{-r}, \quad \text{és} \quad \dot{T} = \left(\frac{k_2}{\lambda_1} \right)^{1/r} \quad (15)$$

2) Kristályosodási front sebességének (v) meghatározása

Esetek többségében az irodalom a kristályosodási front sebességét azonosnak veszi az előtolási sebességgel. Ez azonban nem felel meg a valóságnak, mint ahogy a 22. ábra is mutatja. A front mozgási sebessége folyamatosan változik az 1. egyenlet szerint a mélység függvényében.



A hosszcsiszolaton (51. ábra) látható a dendritek növekedési iránya, és meghatározható a Θ szög a mélység függvényében, és így meghatározható a tényleges kristályosodási sebesség.

51. ábra I-1 minta (2kW, 5 mm/s) hosszcsiszolata

3) Hőmérséklet gradiens meghatározása

A hőmérséklet gradiens közvetlen meghatározása méréseknél nehézségekbe ütközik, a tócsa kis mérete miatt.

Az egyik mérési lehetőség, hogy mérik a felület hőmérsékletét. Az átolvadt zóna alja hőmérsékletének az egyensúlyi szolidusz hőmérsékletet fogadják el. A két hőmérséklet különbséget elosztva a tócsa mélységével egy közelítő (átlagos) hőmérséklet gradiens kapható.

Egy másik meghatározási módszer, hogy a lehülési sebesség ismeretében látszólagos hőmérséklet gradiens (G_l) határozható meg az alábbi egyenlet segítségével: $G_l = \frac{\dot{T}}{v_b}$, ahol a v_b -az előtolási sebesség.

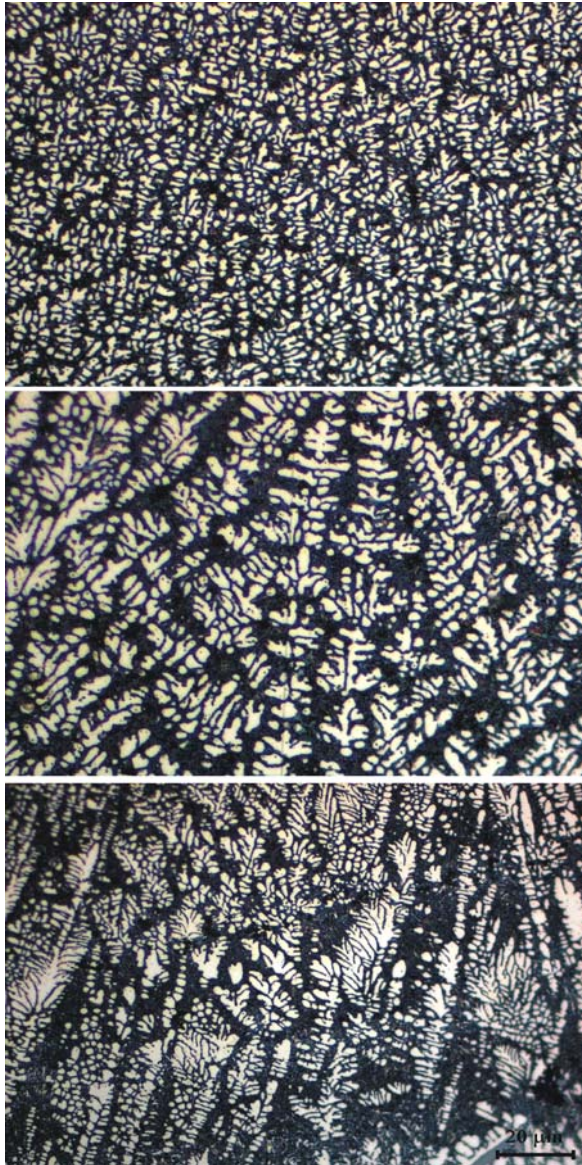
A kristályosodási front sebesség (v) értékének a változása ismeretében meghatározható a kristályosodási frontra merőleges valódi hőmérséklet gradiens (G_v) a mélység függvényében az alábbi összefüggés alapján: $G_v = \frac{\dot{T}}{v_b \cdot \cos \Theta(z)}$.

4.2.2.2. Kristályosodási paraméterek meghatározásának módszere saját kísérleteknél

A szerkezeti paraméterek és a lehülési sebesség közötti kapcsolat (függvény) mérésből vagy szimulációból származhat. A függvény kristályosítási kísérletekkel csak viszonylag kis lehülési sebességnél (maximum néhány 100 K/s) határozható meg. Nagy lehülési sebességek esetében azt az eljárást követik, hogy a szimulációval kapott eredményeket kis lehülési sebességeknél mért értékekkel ellenőrzik (validálják) és az így ellenőrzött szimuláció felhasználásával meghatározzák a függvényt nagy lehülési sebességek esetére.

Az általam használt függvényt a Fémtani Tanszéken kidolgozott szimuláció eredményeire támaszkodva határoztam meg [66]. A szimuláció figyelembe veszi a nagy lehülési sebességeknél jelentős mértékű dendritcsúcs túlhűléseket, az eutektikum túlhűlését, a diffúziót a szilárd fázisban (az olvadékban a diffúzió végtelen gyorsnak van feltételezve), valamint a szekunder dendritágak durvulását a kristályosodás során. A szimulációt számos, a Tanszéken végzett és irodalomból származó kísérlettel igazolták. A szimuláció segítségével meghatározható a G és v paraméterek (ily módon a lehülési sebesség) függvényében a primer és szekunder dendritág távolság dendrites kristályosodás és a cellatávolság cellás kristályosodás esetében.

A számításokat kétalkotós Al7Si és Al4Cu ötvözetek esetén végeztük el. Az ólom tartalom természetesen befolyásolja a szerkezetet, de a különbség valószínűleg nem jelentős.



A számításokhoz az irodalom alapján kiválasztottuk azokat a G és v értékeket, melyek a felületötvözésnél a kristályosodás során kialakulhattak.

A v értéke az elmélet szerint nulla és v_b között a G 10^2 - 10^4 K/mm között változhat.

Az Al-7Si ötvözet lézersugarasan ötvözött felületi rétegénél dendrites szerkezet alakul ki, amelyet a 52. ábra mutat be. Az ábra szemlélteti 0,2 mm, 0,4 mm és 0,8 mm távolságban a dendrites szerkezetet. A szekunder dendritág távolságok jól mérhetőek.

A modell alapján számolt eredményeket a 2. melléklet mutatja be.

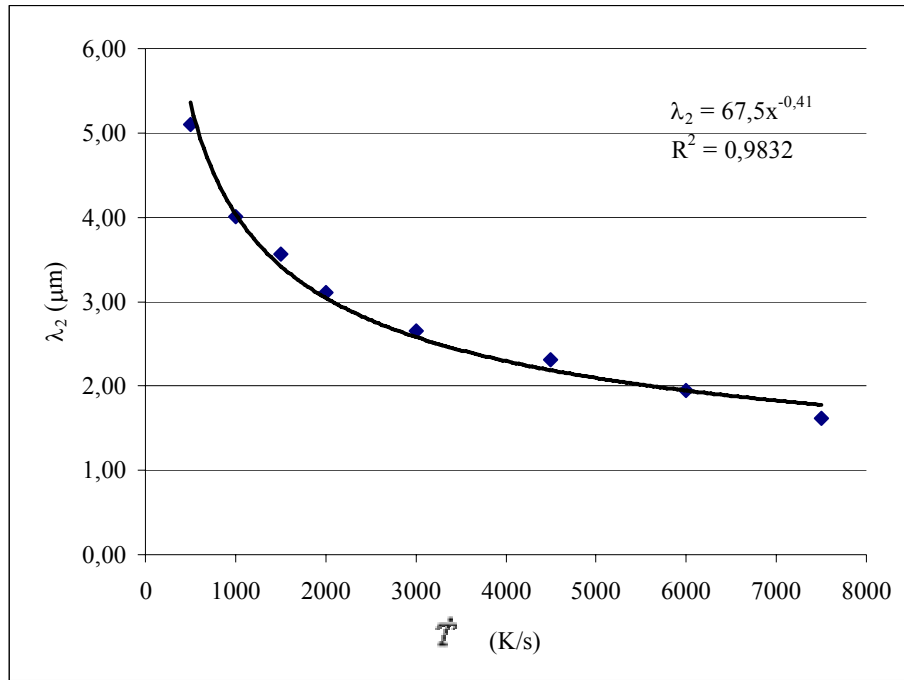
A λ_2 és $\dot{T}$ összefüggést regresszió segítségével határoztam meg.

$$\lambda_2 = 67,5 \cdot \dot{T}^{-0,41} \quad (16)$$

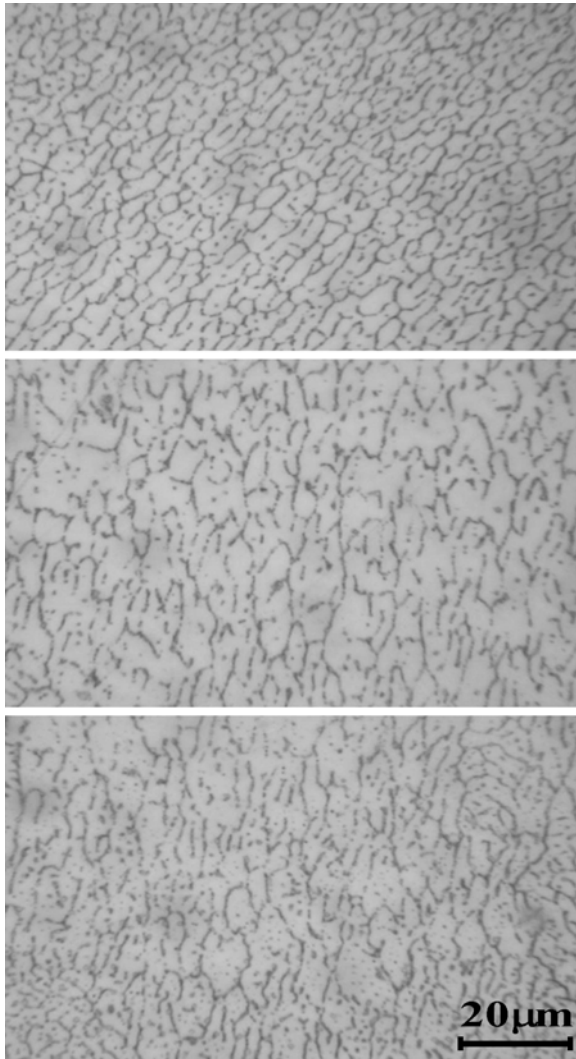
52. ábra Az II-1(2kW,300 mm/perc) minta ötvözött zónájának szövetszerkezete

Az elmélet szerint - amely a túlhűléseket nem veszik figyelembe [67] - a kitevő értéke 0,33. A túlhűléseket is figyelembe véve a kitevő értéke 0,25 és 0,5 között változhat [68].

A modellből származó szekunder dendritág (λ_2) távolság és a lehűlési sebesség ($\dot{T}$) kapcsolatát mutatja be a 53. ábra. A kiváló illeszkedést a korrelációs tényező értéke mutatja ($R^2=0,9832$).



53. ábra A modellből származó szekunder dendritág távolság és a lehülési sebesség kapcsolata



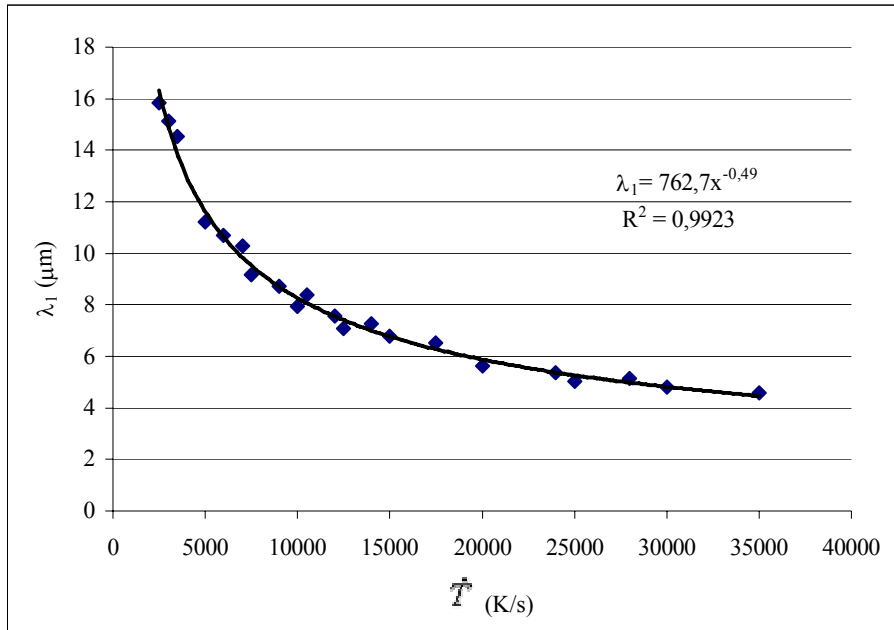
A 54. ábra szemlélteti az Al-4Cu-1.5 Mg ötvözet lézersugarasan ötvözött felületi rétegében kialakult cellás szerkezetet. Az ábra szemlélteti 0,2 mm, 0,4 mm és 0,8 mm távolságban a cellás szerkezetet. Az előzőekben részletesen leírt módszerrel határoztam meg a termikus paramétereket. A modell alapján a cella távolságok is kiszámíthatóak, az eredményeket a 2. melléklet tartalmazza.

A λ_1 és $\dot{T}$ összefüggést regresszió segítségével határoztam meg.

$$\lambda_1 = 762,7\dot{T}^{-0,49} \quad (17)$$

54. ábra Az VI-1(2kW,2100 mm/perc) minta ötvözött zónájának szövet-szerkezete

A 55. ábra mutatja be a modellből származó cella méret (λ_1) és a lehülési sebesség ($\dot{T}$) kapcsolatát. A korrelációs tényező értéke ($R=0,9923$) kitűnő illeszkedést mutat.



55. ábra A modellből származó cella méret és a lehülési sebesség kapcsolata

4.2.2.3. Eredmények

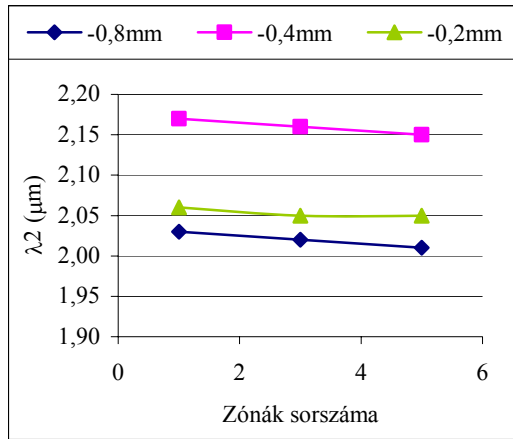
4.2.2.3.1. Al-7Si-10Bi ötvözet

Lehülési sebesség meghatározása

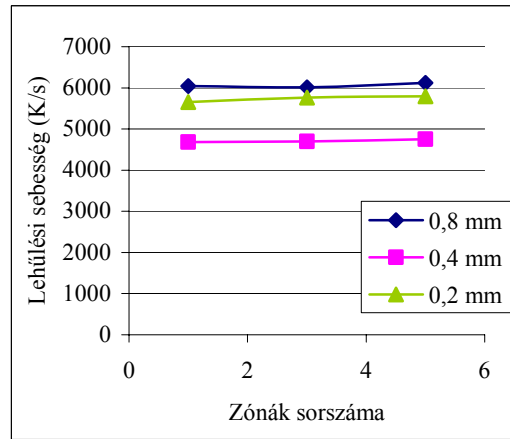
Egy mintán belül a zónák sorszámanak függvényében a szekunder dendritág távolságot (λ_2) 56.a. ábra és a lehülési sebesség ($\dot{T} = G \cdot v$) változását a 56.b. ábra mutatja be. A többi minta eredményeit a 2. melléklet tartalmazza. A lehülési sebességet az irodalomnak megfelelően K/s-ban számoltam.

Megállapítható, hogy a zónák sorszámanak a függvényében kis mértékben csökken a λ_2 és a lehülési sebesség érték kis mértékben nő. Ez a változás mértéke a mérés hibáin belül van. Következésképpen gyakorlati szempontból a lehülési sebesség lényegesen nem változik.

A 57.a. ábra a λ_2 a 57.b. ábra a $\dot{T}$ egy zónán belüli változását mutatja be a zóna aljától mért távolság függvényében az összes minta esetén. A zóna alján és a tetején azonos λ_2 távolságokat mértem, a zóna közepén valamivel nagyobb λ_2 , amely annak a következménye, hogy a $\dot{T}$ a zóna közepén kisebb. A zónák teteje és alja gyorsabban hűlt a nagy mértékű hőelvonás miatt.

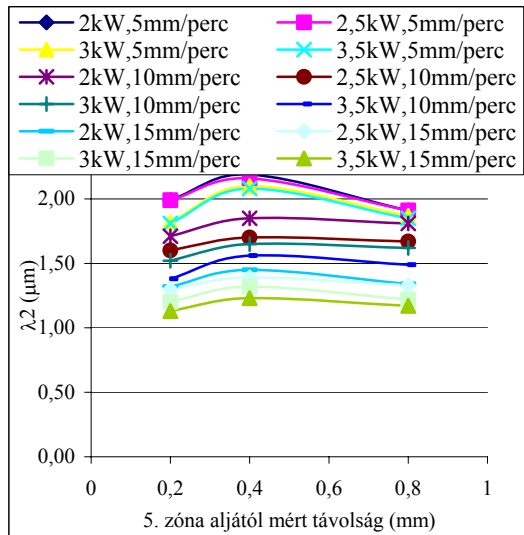


a)

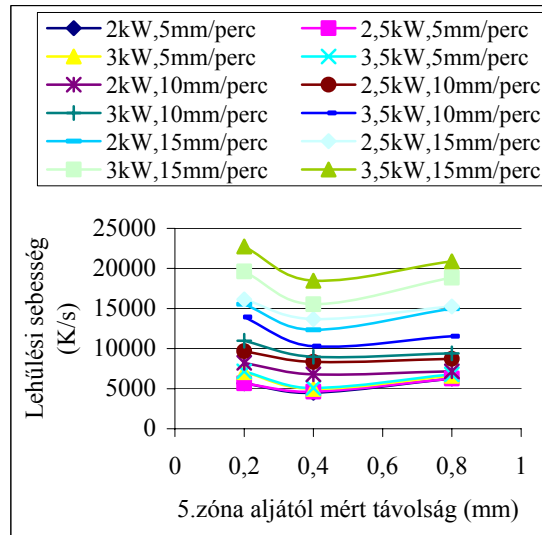


b)

56. ábra Az I-1 (2kW, 300 mm/perc) minta 1,3 és 5 zónáiban a szekunder dendritág távolság és a lehülési sebesség kapcsolata



a)

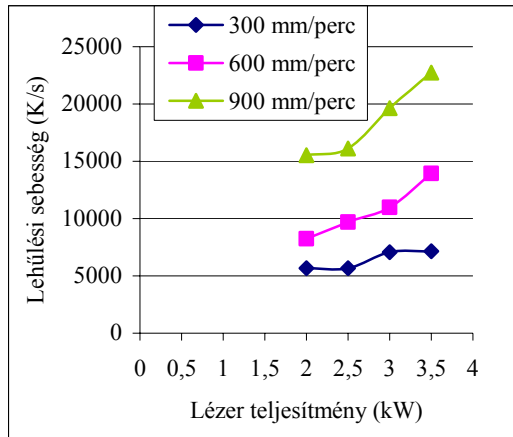


b)

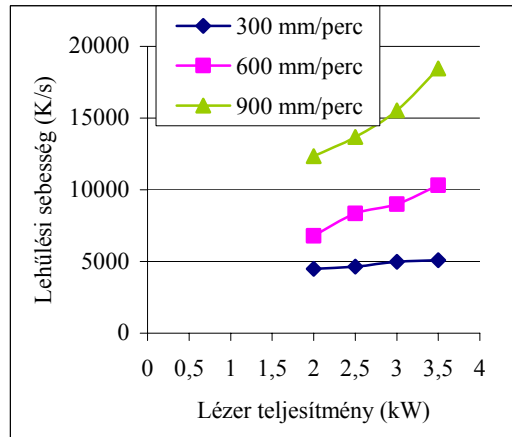
57. ábra A-7Si10Bi mintánál a szekunder dendritág távolság és a lehülési sebesség az 5. zóna aljától mért távolság függvényében

A 58. ábra a lehülési sebesség kapcsolatát mutatja be, a lézer teljesítmény, az előtolási sebesség függvényében. (A távolságot, három részre osztottam az ötvözött zóna és az alapanyag határától 0,2; 0,4 és 0,8 mm távolságban!)

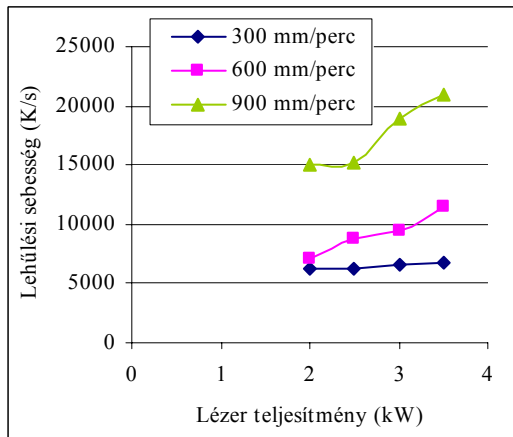
Az ábrákból meghatározható, hogy a sebesség növekedésével azonos teljesítmény esetén a lehülési sebesség jelentősen megnő. Például a zóna közepén (0,4 mm) 600 mm/perc előtolási sebességnél a lehülési sebesség értéke $4,4 \cdot 10^3$ K/s-ról $1,3 \cdot 10^4$ K/s-re nő. Kis előtolási sebességeknél (300 mm/perc) a teljesítmény növelés hatására kis mértékben nő, de a sebesség növelésével egyre nagyobb mértékben nő a lehülési sebesség.



a)



b)



c)

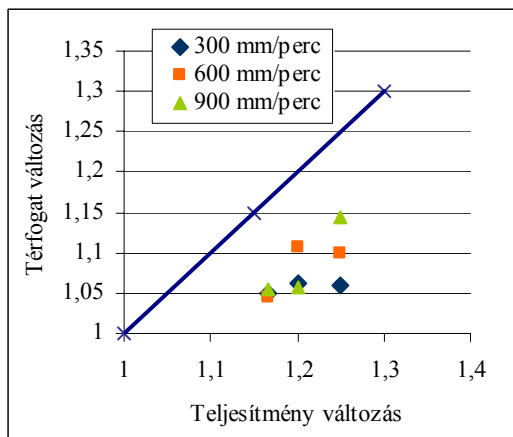
58. ábra A lehűlés sebessége és a lézersugár teljesítményének kapcsolata az előtolási sebesség függvényében

a) 0,2 mm távolságban

b) 0,4 mm távolságban

c) 0,8 mm távolságban

A teljesítmény növekedésével a lehűlési sebesség nő, a sebesség növekedésével ez a hatás



59. ábra Al-7Si-10Bi minták teljesítmény- és a térfogatváltozása

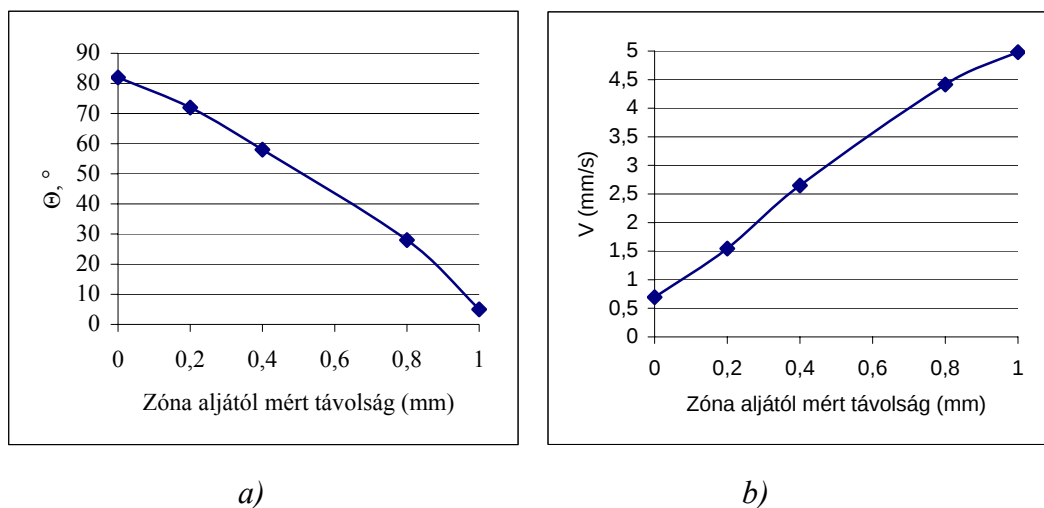
Tehát a teljesítmény kisebb része a tócsa méretének növekedésére, a nagyobb része a tócsa felmelegedésére fordítódott. Nagyobb teljesítmény hatására a tócsa hőmérséklete emelkedik, valószínűleg nagyobb a hőmérséklet gradiens, ezáltal az időegység alatt elvont hő mennyisége is. Mindezek mellett nagyobb felületen a tócsa nagyobb hőt ad le. E két

hatás együttes eredménye, hogy a teljesítmény növekedésével a kísérleteimnél használt paraméterek mellett nő a lehűlési sebesség.

Kristályosodási front sebességének a meghatározása

Jól mérhető volt a kristályosodási front alakja több kísérlet esetén is, így meg tudtam határozni a zóna aljától mért távolság függvényében a Θ szöget (51.ábra). Az eredményeket a 2. melléklet tartalmazza. Az eredményekből kiszámítottam az átlagos Θ szög értéket.

Az átlagos Θ szög változását mutatja be 60.a. ábra a zóna aljától mért távolság függvényében. A 60.b. ábra mutatja be a kristályosodási front sebességének a változását a zóna aljától mért távolság függvényében.



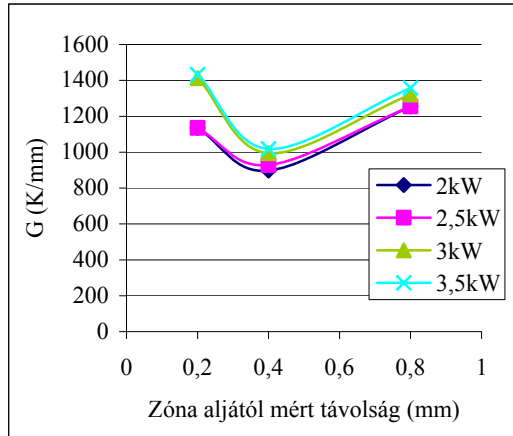
60. ábra A Θ és a v kapcsolata a zóna aljától mért távolság függvényében

Látszólagos hőmérséklet gradiens meghatározása

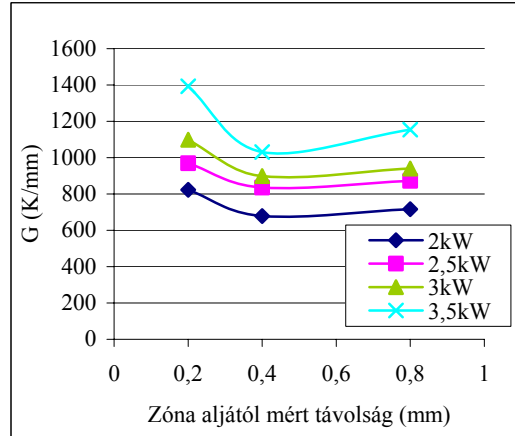
A látszólagos hőmérséklet gradiens értékét $G_l = \frac{\dot{T}}{v_b}$ képlet alapján határoztam meg. A

61. ábra a látszólagos hőmérséklet gradiens és zónán belüli mélység kapcsolatát mutatja be a lézerteljesítmény függvényében.

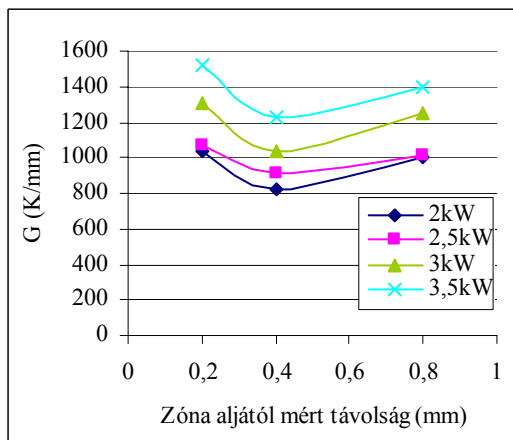
Megállapítható, hogy a zóna alján (0,2 mm) és a zóna tetején (0,8mm) nagyobb a látszólagos hőmérséklet gradiens, mint a zóna közepén (0,4mm). A teljesítmény növekedésével nő a G_l érték.



a)



b)



c)

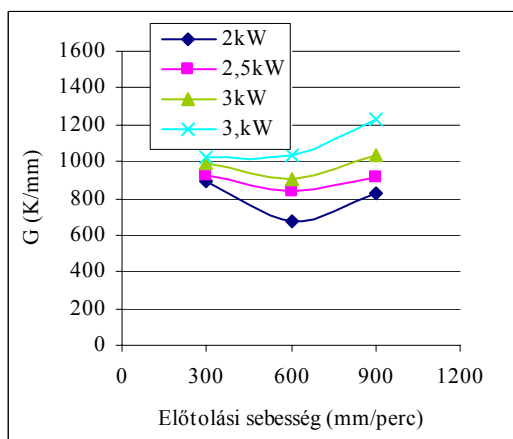
61. ábra A látszólagos hőmérséklet gradiens és a zóna aljától mért távolság kapcsolata a lézer teljesítmény függvényében

a) 300 mm/perc

b) 600 mm/perc

c) 900 mm/perc

A 62. ábra a látszólagos hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítményének a kapcsolatát mutatja be az előtolási sebesség függvényében a zóna közepén (0,4 mm távolságban).



62. ábra A látszólagos hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolata az előtolási sebesség függvényében (0,4 mm távolságban)

Azonos előtolási sebesség esetén a lézer teljesítményének a növekedésével a látszólagos hőmérséklet gradiens nő. Az előtolási sebesség növekedésével a látszólagos hőmérséklet gradiens előbb nő, majd csökken.

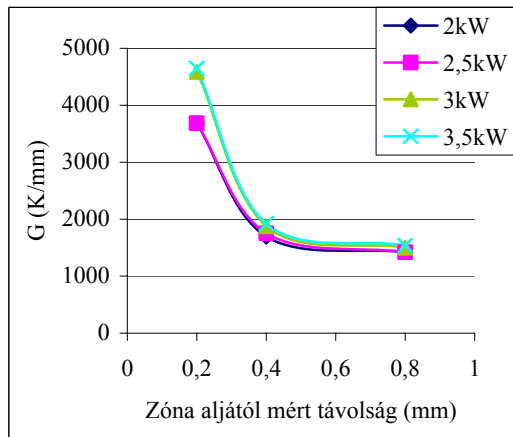
Valódi hőmérséklet gradiens meghatározása

A valódi hőmérséklet gradiens (G_v) a zónán belüli mélység függvényében -kristályosodási front sebesség (v) ismeretében - a módszereknél már említett összefüggés alapján

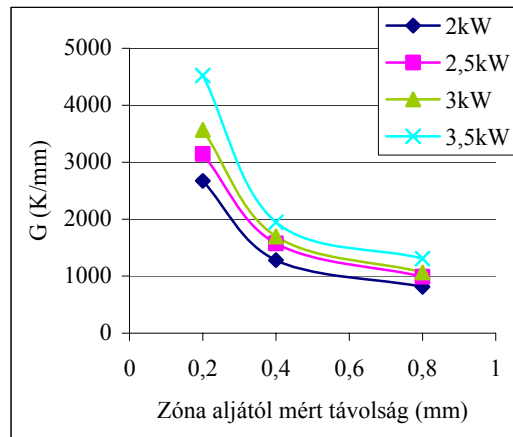
$$\text{határoztam meg: } G_v = \frac{\dot{T}}{v_b \cdot \cos \Theta(z)}.$$

A valódi hőmérséklet gradiens változását szemlélteti a zóna aljától mért távolság függvényében a 63. ábra.

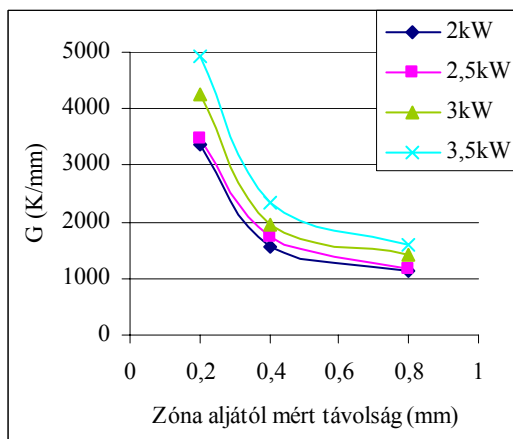
Megállapítható, hogy a G_v értéke a zóna alján (0,2 mm zóna aljától mért távolságban) a legnagyobb, majd fokozatosan csökken a zóna teteje felé. 0,4-0,8 mm mélységben közel azonos értéket mutat. A csökkenés az aljától a közepéig igen jelentős, míg a közepétől a tetejéig már csak kis mértékű.



a)



b)



c)

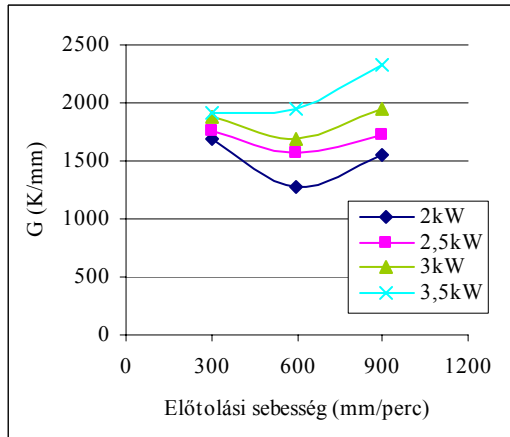
63. ábra A valódi hőmérséklet gradiens és a Zóna aljától mért távolság kapcsolata a lézer teljesítmény függvényében

a) 300 mm/perc

b) 600 mm/perc

c) 900 mm/perc

A 64. ábra a valódi hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítményének a kapcsolatát mutatja be az előtolási sebesség függvényében a zóna közepén (0,4 mm távolságban).



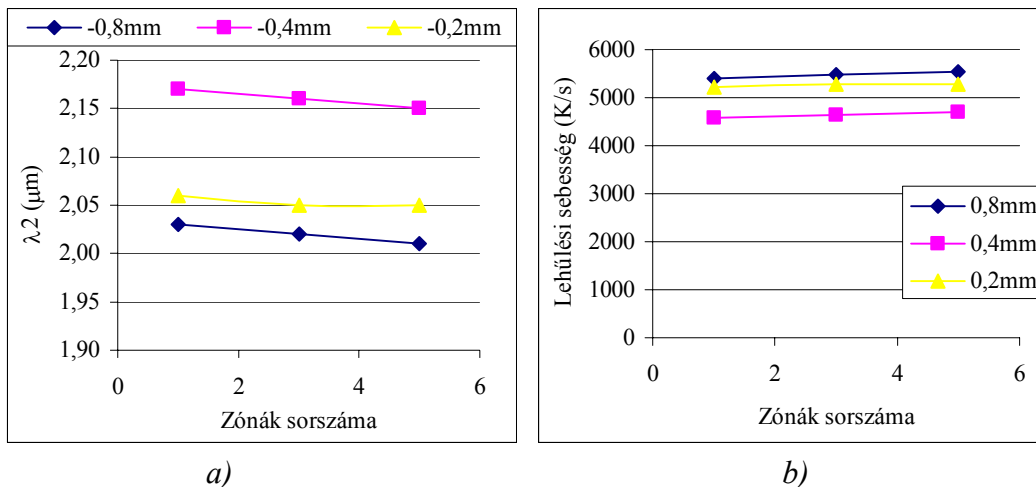
64. ábra A valódi hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolata az előtolási sebesség függvényében (0,4 mm távolságban)

4.2.2.3.2. Al-7Si-10Pb ötvözet

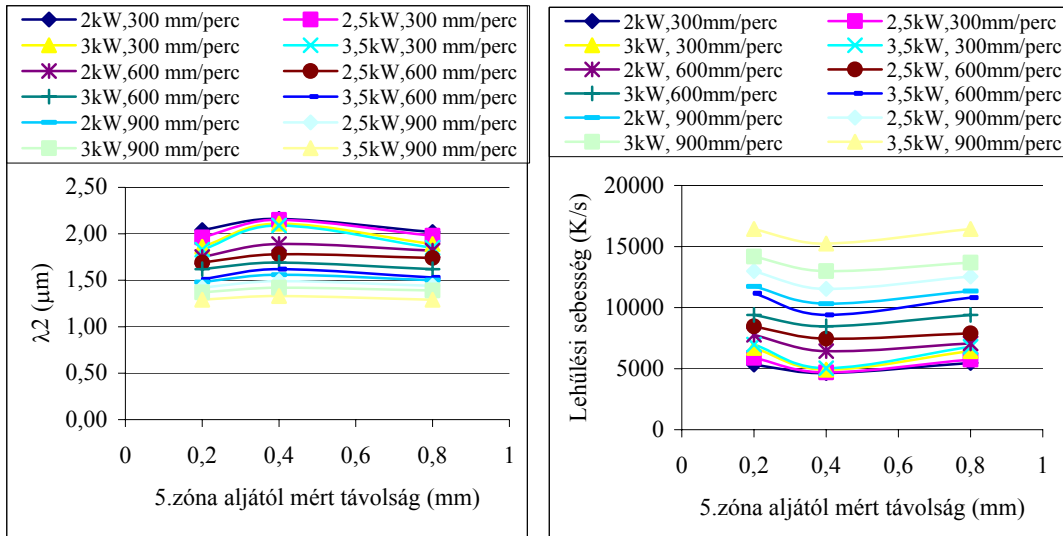
Lehűlési sebesség meghatározása

A 65.a. ábra mutatja be, hogy egy mintán belül a zónák sorszáma függvényében a szekunder dendritág távolság (λ_2) és 65.b. ábra a lehűlési sebesség ($\dot{T}$) változását. Megállapítható, hasonlóan az Al-7Si-10Bi ötvözethez a zónák sorszáma a függvényében kis mértékben csökken a λ_2 és a $\dot{T}$ érték kis mértékben nő. Ez a mérési hibán belüli változási érték. Így gyakorlati szempontból a lehűlési sebesség lényegesen nem változik. A 2 melléklet mutatja be a többi minta eredményeit.

A λ_2 (66.a. ábra) és a $\dot{T}$ érték (66.b. ábra) egy zónán belüli változását mutatja be a 66. ábra a távolság függvényében az összes minta esetében. A zóna alján és a tetején azonos λ_2 távolságokat mértem, a zóna közepén valamivel nagyobb a λ_2 , amely abban mutatkozik meg, hogy a $\dot{T}$ zóna közepén kisebb.



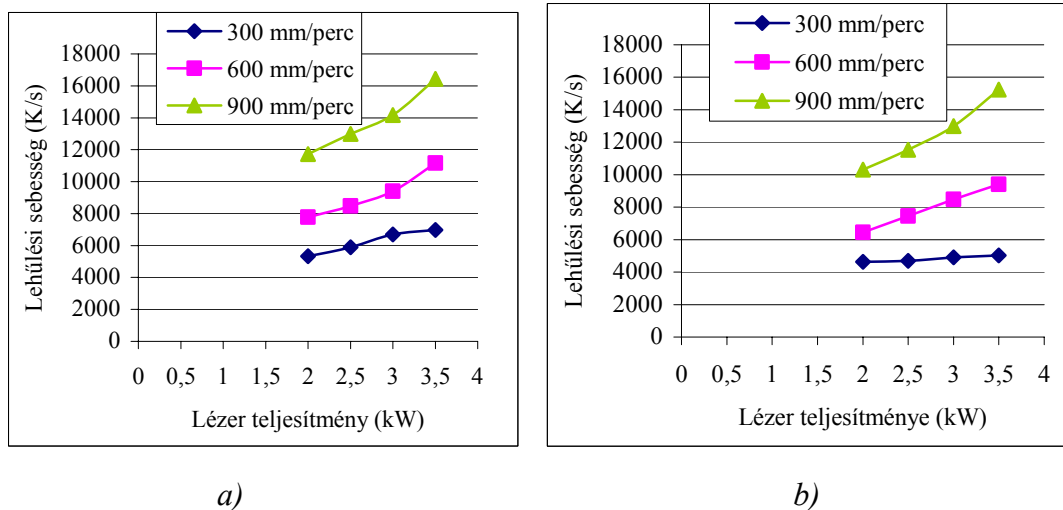
65. ábra Az II-1 (2kW, 300 mm/perc) minta 1,3 és 5 zónáiban a szekunder dendritág távolság és a lehűlési sebesség kapcsolata



a)

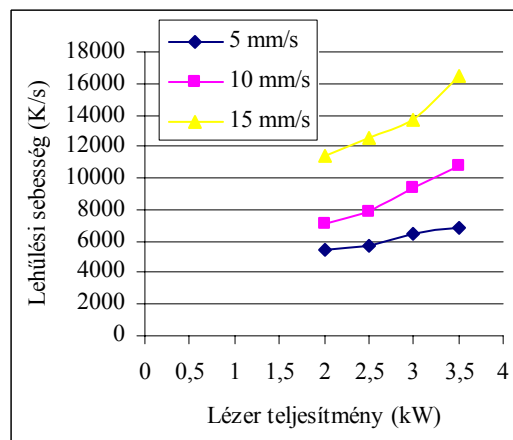
b)

66. ábra A-7Si10Pb mintáknál a szekunder dendritág távolság és a lehülési sebesség az 5. zóna aljától mért távolság függvényében



a)

b)



c)

67. ábra A lehülés sebessége és a lézersugár teljesítményének kapcsolata az előtolási sebesség függvényében

a) 0,2 mm távolságban

b) 0,4 mm távolságban

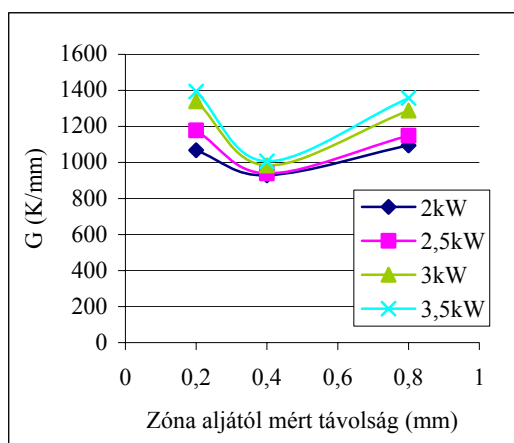
c) 0,8 mm távolságban

A lehülési sebesség, a lézer teljesítmény, az előtolási sebesség és a zónán belüli távolság kapcsolatát mutatja be a 67. ábra.

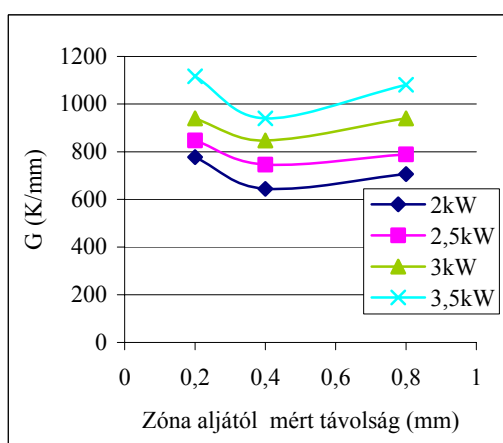
A lehülési sebesség nőtt a teljesítmény növekedése hatására a kis előtolási sebességeknél (300 mm/perc). Egyre nagyobb lett a lehülési sebesség az előtolási sebesség növelésével. A $\dot{T}$ érték is növekedett a teljesítmény növekedésével nagy előtolási sebességnél (900 mm/perc). Megállapítható, hogy a sebesség növekedésével azonos teljesítmény esetén a lehülési sebesség jelentősen megnő. Például a zóna közepén (0,4 mm) 600 mm/perc előtolási sebességnél a lehülési sebesség értéke $4,6 \cdot 10^3$ K/s-ról $1,0 \cdot 10^4$ K/s-re nő.

Látszólagos hőmérséklet gradiens

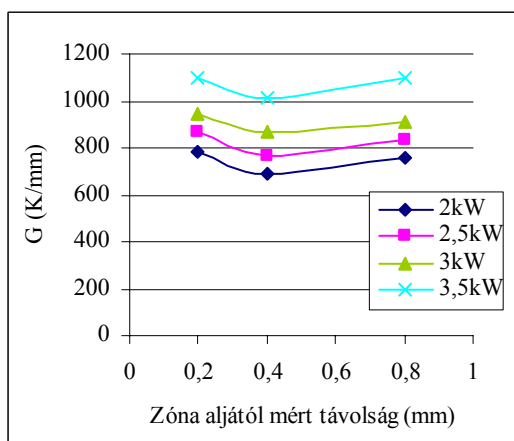
Az Al-7Si-10Bi ötvözethez hasonlóan meghatároztam a látszólagos hőmérséklet gradiens értéket. A látszólagos hőmérséklet gradiens és zónától mért távolság kapcsolatát mutatja be a lézerteljesítmény függvényében a 68. ábra.



a)



b)



c)

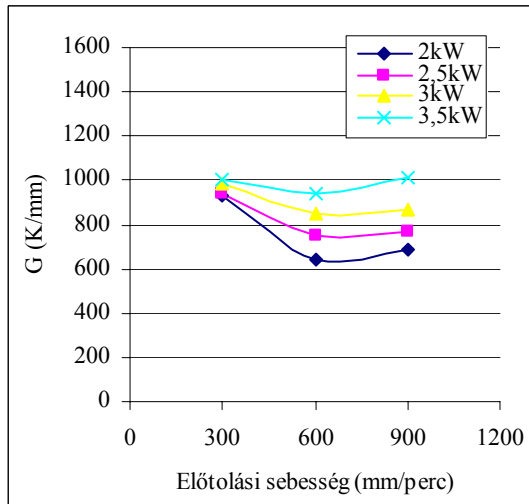
68. ábra A hőmérséklet gradiens és a zóna aljától mért távolság kapcsolata a lézer teljesítmény függvényében

a) 300 mm/perc

b) 600 mm/perc

c) 900 mm/perc

Megállapítható, hogy nagyobb a látszólagos hőmérséklet gradiens zóna alján (0,2 mm) és a zóna tetején (0,8 mm), mint a zóna közepén (0,4 mm). A G_1 érték nőtt a teljesítmény növekedésével.



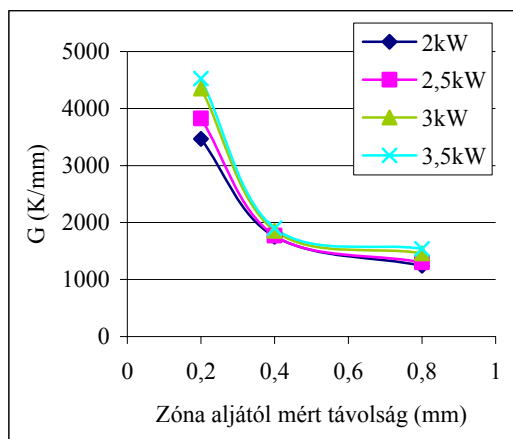
A látszólagos hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolatát az előtolási sebesség függvényében mutatja be 69. ábra. Hasonlóan az Al-7Si-10Bi ötvözethez, azonos előtolási sebesség esetén a lézer teljesítményének a növekedésével a látszólagos hőmérséklet gradiens nő. Az előtolási sebesség növekedésével a látszólagos hőmérséklet gradiens előbb csökken, majd nő.

69. ábra A látszólagos hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolata az előtolási sebesség függvényében (0,4 mm távolságban)

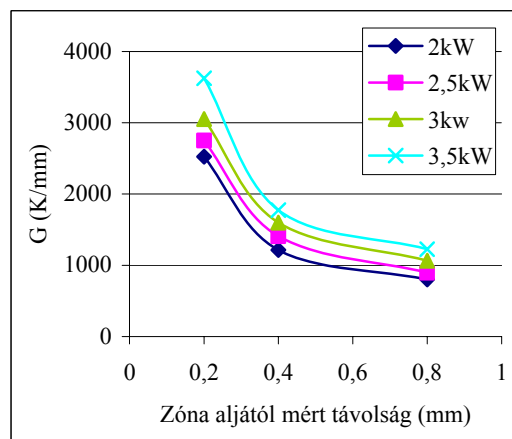
Valódi hőmérséklet gradiens meghatározása

Az előző fejezetben leírt módon meghatároztam Al-7Si-10Pb ötvözetnek is a valódi hőmérséklet gradiens értékét, a 70. ábra mutatja be az eredményeket.

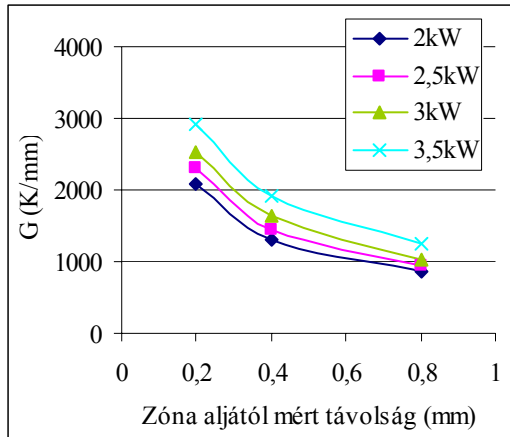
Megállapítható, hogy a zóna alján (0,2 mm) a legnagyobb a valódi hőmérséklet gradiens, ahol a legnagyobb a hőelvonás, illetve a zóna közepén (0,4 mm) és alján (0,8 mm) fokozatosan csökken.



a)



b)



c)

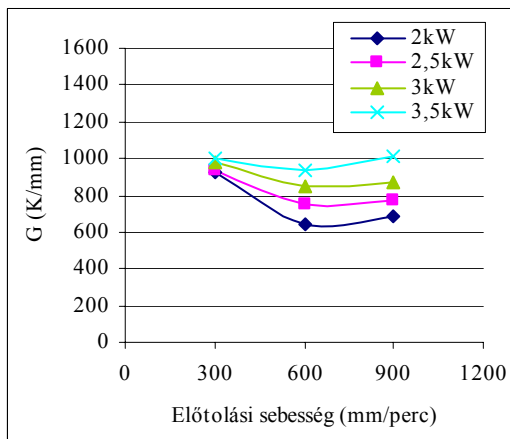
70. ábra A valódi hőmérséklet gradiens és a zóna aljától mért távolság kapcsolata a lézer teljesítmény függvényében

a) 300 mm/perc

b) 600 mm/perc

c) 900 mm/perc

A 71. ábra a valódi hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítményének a kapcsolatát mutatja be az előtolási sebesség függvényében a zóna közepén (0,4 mm távolságban).



Az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény hatása a valódi hőmérséklet gradiensre azonos, mint a látszólagos hőmérséklet gradiens esetén.

71. ábra A valódi hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolata az előtolási sebesség függvényében (0,4 mm távolságban)

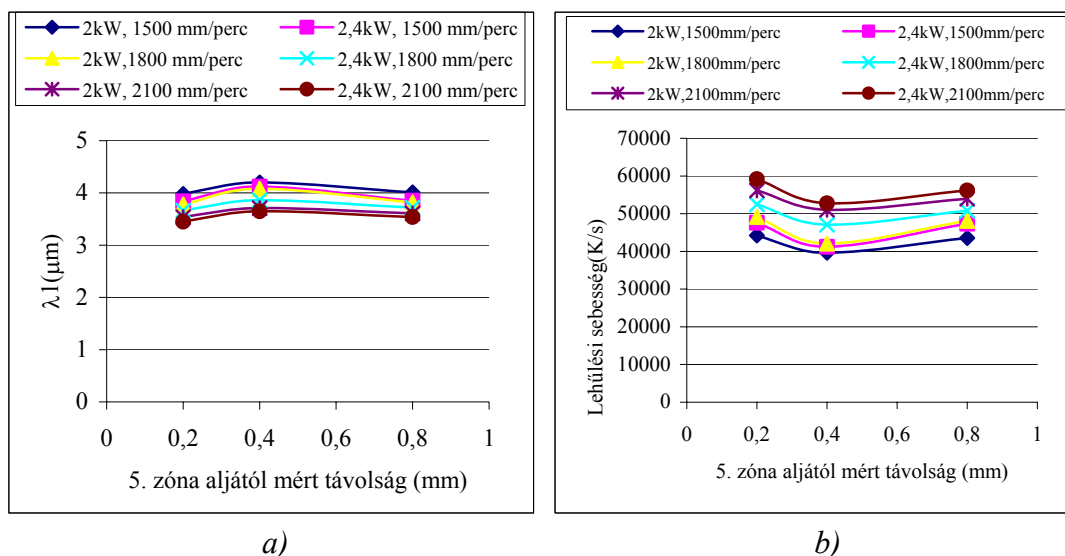
4.2.2.1.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet

Lehülési sebesség meghatározása

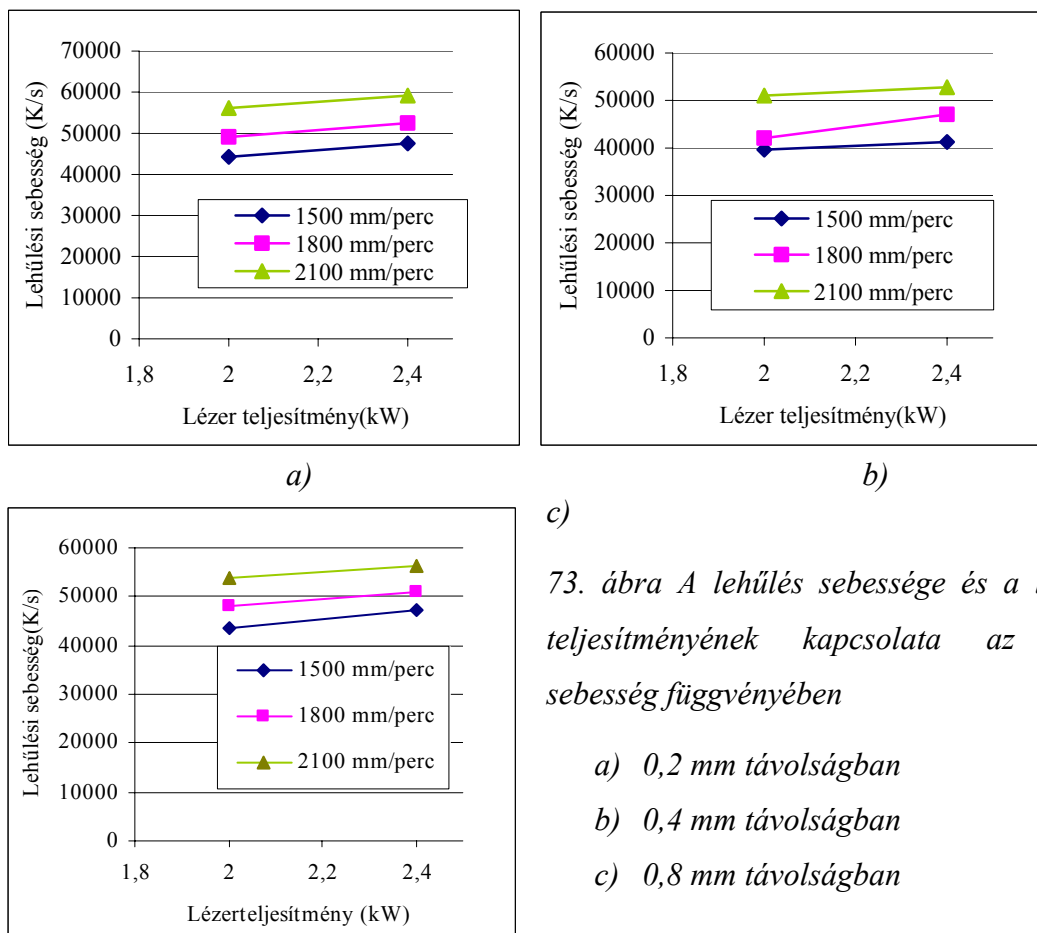
Egy zónán belüli cella méret (λ_1) -72.a. ábra- és a lehülési sebesség ($\dot{T}$) -72.b. ábra- változását mutatja be a zónán belüli mélység függvényében az összes minta esetén. A zóna alján (0,2 mm) és a tetején (0,8 mm) azonos λ_1 távolságokat mértem, a zóna közepén (0,4 mm) egy kevéssel nagyobb a λ_1 amely azt eredményezi, hogy a $\dot{T}$ érték a zóna közepén kisebb.

A lehülés sebesség és lézer teljesítményének a kapcsolatát az előtolási sebesség függvényében mutatja be a 73.ábra. A 1800 mm/perc robotmozgatási sebességeknél a lehülési sebesség nőtt a teljesítmény növelése hatására. Nőtt a lehülési sebesség a sebesség

növelésével. A 2100 mm/perc előtolási sebességnél a $\dot{T}$ érték is növekedett a teljesítmény növekedésével.



72. ábra Al-4Cu-1.5Mg-20Pb mintáknál a cella méret és a lehülési sebesség az 5. zóna aljától mért távolság függvényében

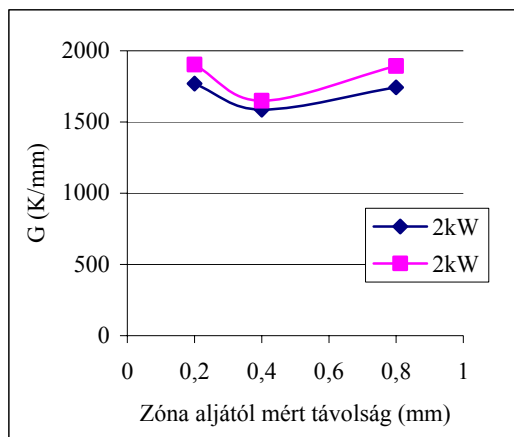


73. ábra A lehülés sebessége és a lézersugár teljesítményének kapcsolata az előtolási sebesség függvényében

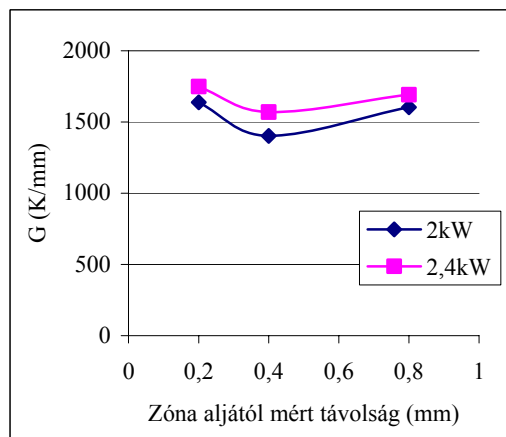
- a) 0,2 mm távolságban
- b) 0,4 mm távolságban
- c) 0,8 mm távolságban

Látszólagos hőmérséklet gradiens meghatározása

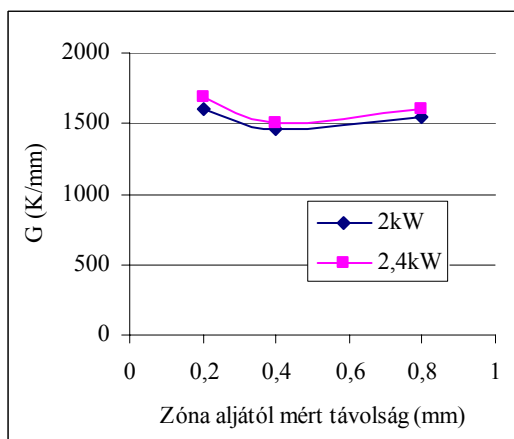
A látszólagos hőmérséklet gradiens és a zóna aljától mért távolság kapcsolatát a lézer teljesítmény függvényében szemlélteti a 74. ábra.



a)



b)



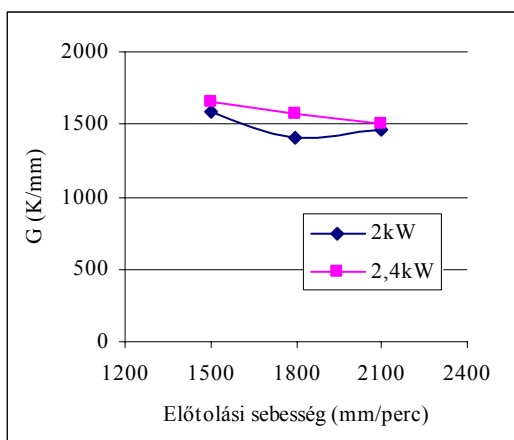
c)

74. ábra A látszólagos hőmérséklet gradiens és a zóna aljától mért távolság kapcsolata a lézer teljesítmény függvényében

a) 1500 mm/perc

b) 1800 mm/perc

c) 2100 mm/perc



75. ábra A látszólagos hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolata az előtolási sebesség függvényében (0,4 mm távolságban)

Megállapítható, hogy a látszólagos hőmérséklet gradiens érték nőtt a lézer teljesítményének a növekedésével. A 0,2 mm és 0,8 mm zóna aljától mért távolságban közel azonos a 0,4 mm távolságban -a zóna közepén- kisebb a G_1 .

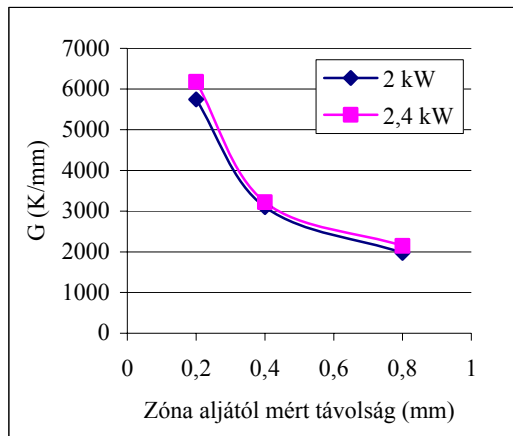
A 75. ábra mutatja be a látszólagos hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolatát az előtolási sebesség függvényében.

Hasonlóan az Al-7Si-10Bi ötvözethez, azonos előtolási sebesség esetén a lézer teljesítményének a növekedésével a látszólagos hőmérséklet gradiens nő.

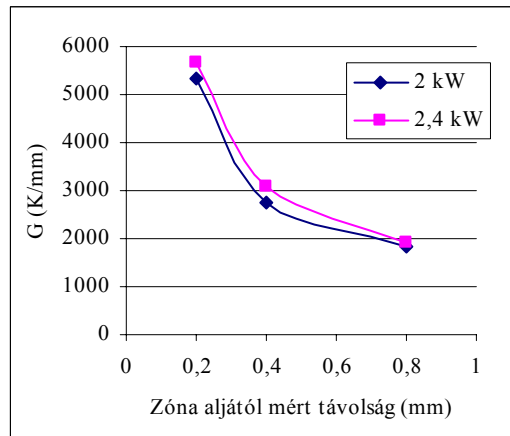
Az előtolási sebesség (lézersugár mozgási sebesség) növekedésével a látszólagos hőmérséklet gradiens fokozatosan csökken.

Valódi hőmérséklet gradiens meghatározása

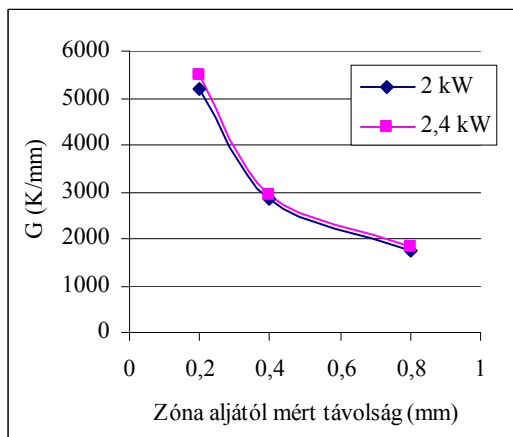
Az Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözetnél a szerkezetből nem lehetett a θ szöget meghatározni. Feltételezve, hogy a lézeres felületkezelési paraméterek hasonlóak, így a zónán belüli mélység függvényében a θ szög hasonlít. Következésképpen az Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet valódi hőmérséklet gradiens értékét az előző fejezetben leírt módon, az Al-7Si-10Bi ötvözet átlag adatainak a felhasználásával határoztam meg. Megállapítható, hogy a valódi hőmérséklet gradiens a zóna alján (0,2 mm) a legnagyobb, majd fokozatosan csökken a zónán belül. (76. ábra)



a)



b)



c)

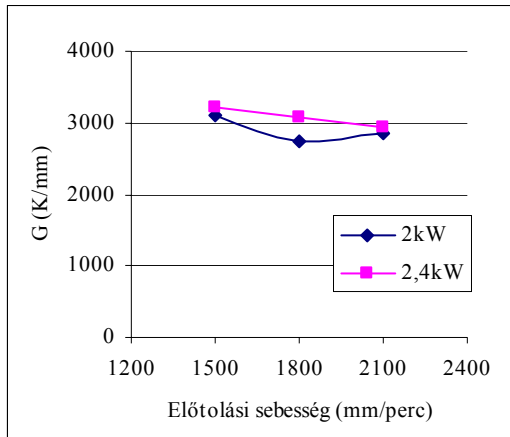
76. ábra A valódi hőmérséklet gradiens és a zóna aljától mért távolság kapcsolata a lézer teljesítmény függvényében

a) 1500 mm/perc

b) 1800 mm/perc

c) 2100 mm/perc

A 77. ábra a valódi hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítményének a kapcsolatát mutatja be az előtolási sebesség függvényében a zóna közepén (0,4 mm távolságban).



Az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény hatása a valós hőmérséklet gradiensre azonos, mint a látszólagos hőmérséklet gradiens esetén

77. ábra A valódi hőmérséklet gradiens és a lézer teljesítmény kapcsolata az előtolási sebesség függvényében (0,4 mm távolságban)

Az ötvözt zónák termikus vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy:

1. A szerkezet paramétereiből -cella méret (λ_1) és a szekunder dendritág távolság (λ_2)- egy kísérletileg igazolt összefüggés alapján meghatározható a lehülési sebesség értéke.

Megállapítottam, hogy:

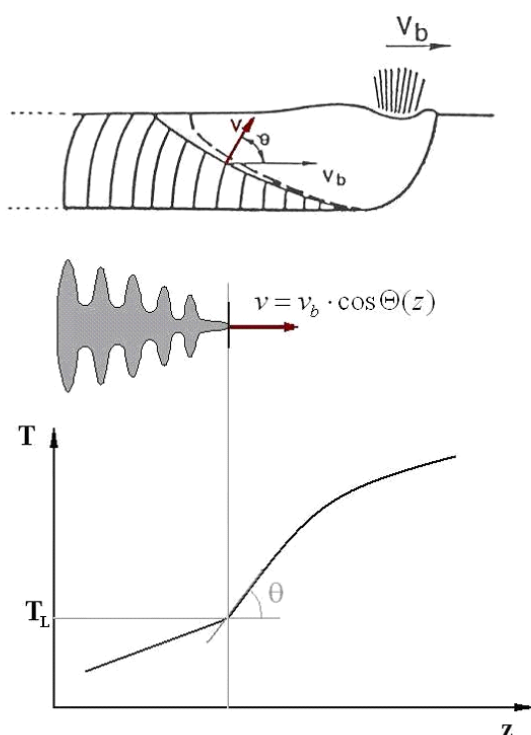
- (i) a lehülési sebesség a zóna azonos pontján a zóna sorszámától gyakorlatilag független,
- (ii) a lehülési sebesség az előtolási sebesség növekedésével jelentősen (10^3 K/s-ról 10^4 K/s-ra), kis előtolási sebességnél (300 mm/perc) kis mértékben, a sebesség növekedésével egyre nagyobb mértékben nő,
- (iii) a lézer teljesítményének a növekedésével a lehülési sebesség nő, a sebesség növekedésével ez a hatás egyre erősebb.

2. A lehülési sebesség és az előtolási sebesség (lézersugár mozgási sebesség) ismeretében kiszámítható az irodalomból ismert látszólagos hőmérséklet gradiens.

Megállapítottam, hogy:

- (i) a látszólagos hőmérséklet gradiens egy zónán belül minimumos függvény szerint változik, a zóna közepén a legkisebb ($6 \cdot 10^2$ K/mm), az irodalmi adatokkal megegyezően [55],
- (ii) a zóna sorszámának függvényében gyakorlatilag állandó.

3. Meghatároztam a kristályosodási front mozgási sebességének a változását a zóna mélységének függvényében, ennek ismeretében ki tudtam számolni a valóságos hőmérséklet gradienst.
- (i) egy zónán belül a valódi hőmérséklet gradiens a zóna alján a legnagyobb, a zóna közepéig jelentősen, onnan kezdve a zóna tetejéig csak kis mértékben csökken. Ellentétben a 50. ábra alapján tett megállapítással, a valós hőmérséklet gradiens a zóna tetején a legkisebb (78. ábra).
 - (ii) Az egymást követő zónákban a zóna azonos helyén a gradiens állandó. A zóna méretének a növekedése nem befolyásolja a hőmérséklet gradienst és a kristályosodási front sebességét.

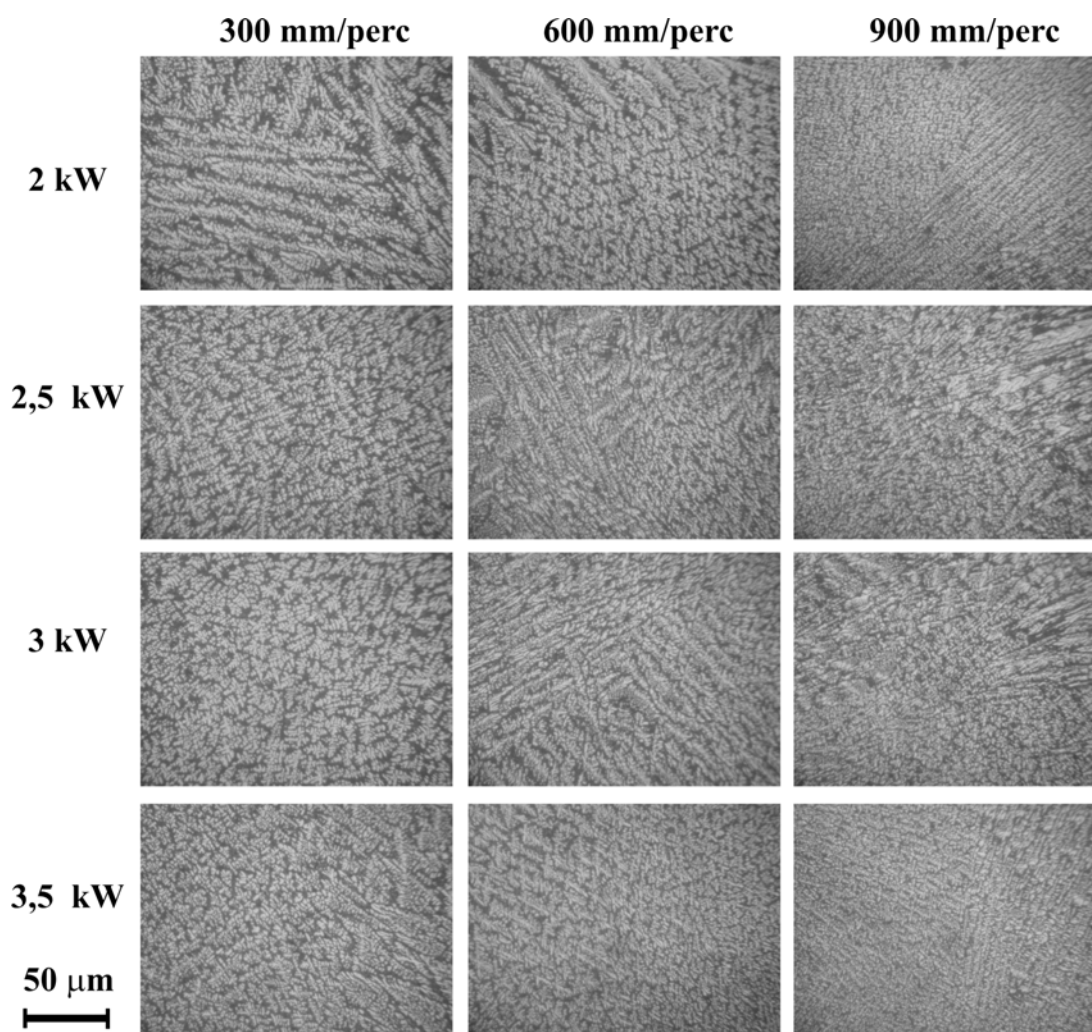


78. ábra A hőmérséklet eloszlás a kristályosodási front környezetében

4.2.3. A kristályosodott ötvözetek szövetszerkezete

4.2.3.1. A kristályosodott Al-7Si-10Bi i ötvözet szövetszerkezetének jellemzése

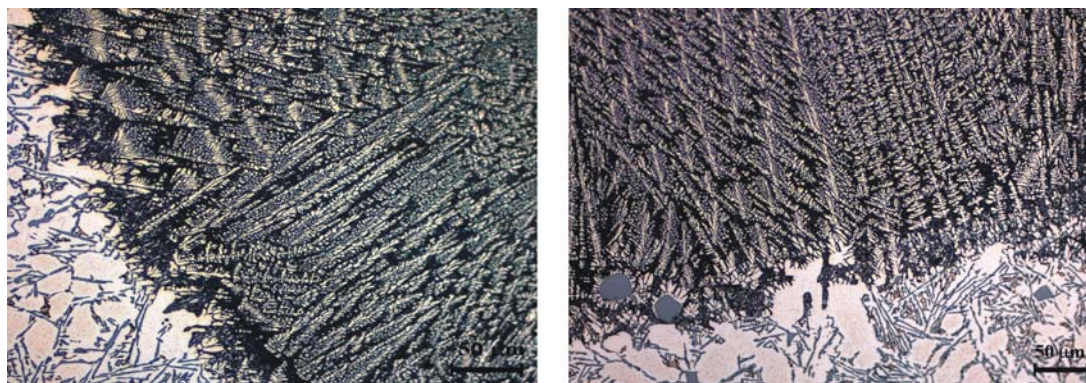
Az 79. ábra az Al-7Si-10Bi monotektikus ötvözetek 5 (utoljára létrehozott) zónájának az alapanyag felé eső széléről készült. Jól látszik, hogy változik a dendrites szerkezet az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény hatására. Finomabb szerkezet alakul ki az előtolási sebesség és a teljesítmény növekedésére.



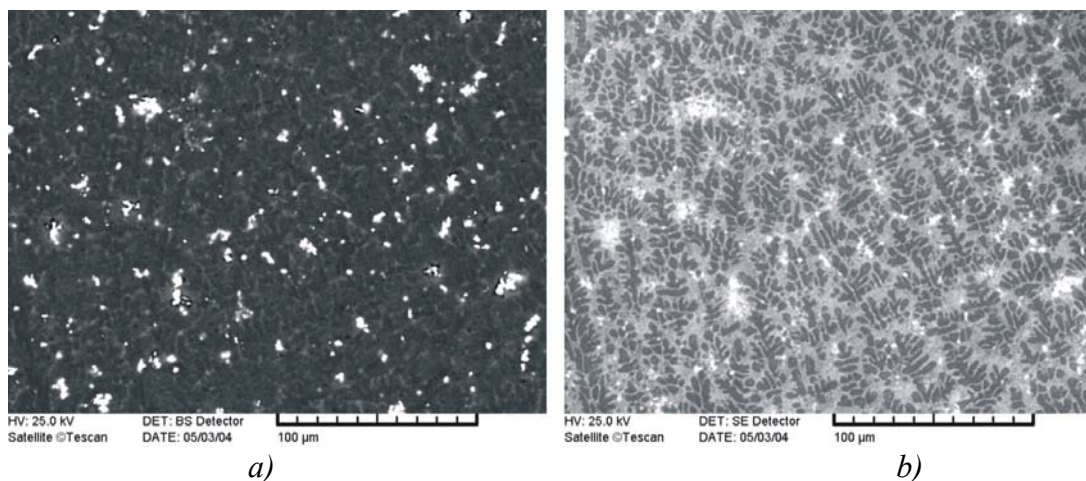
79. ábra Al-7Si-10Bi ötvözetek szövetszerkezetei

Megfigyelhető, hogy az alapanyag és az átolvasztott zóna közötti részben az α szilárd oldat csíráképzőként viselkedik, az alapanyag nagyobb durva α szilárd oldat dendritekből kezdtek el nőni a finomabb α szilárd oldat dendritek. (80. ábra) Ez is azt mutatja, hogy ezáltal a kezelt felületi réteg és az alapanyag kötése teljesen fémes, minden másféle eljárásnál erősebb kötést biztosítva. (80. ábra)

A 81. ábra ugyanazon területnek a hátraszórt elektronokkal alkotott (81.a. ábra) illetve szekunder elektronokkal (81.b. ábra) alkotott képét szemlélteti. Az ábrákon látszik, hogy egyes Bi részecskék „felhőkké” álltak össze, illetve a nagyon apró Bi részecskék a dendritek között helyezkednek el. A Bi részecskék méretét a következő fejezetbe részletezzük.



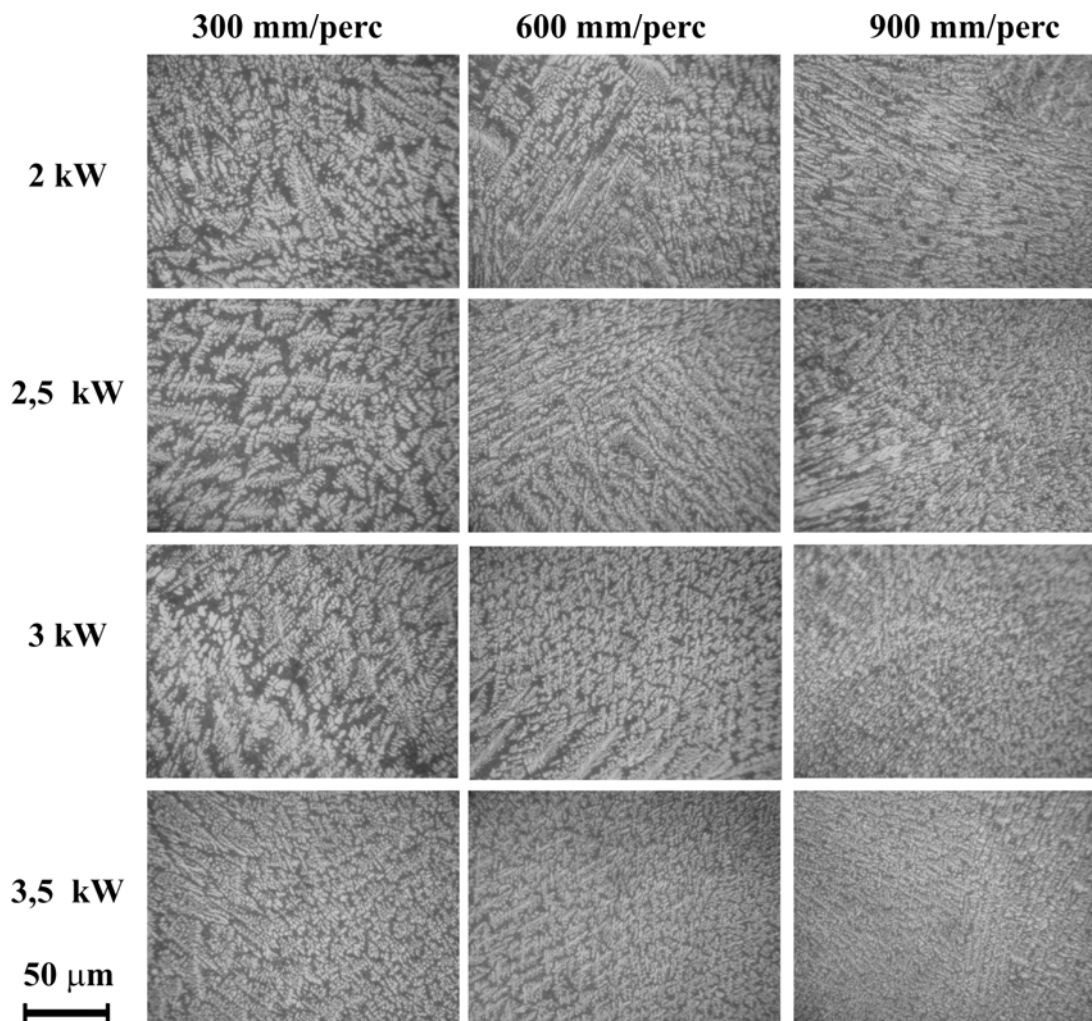
80. ábra Az alapanyag csíráképző hatása



81. ábra Bi részecskék elhelyezkedése, a) BSE PEM b) SE PEM

4.2.3.2. A kristályosodott Al-7Si-10Pb ötvözet szövetszerkezetének jellemzése

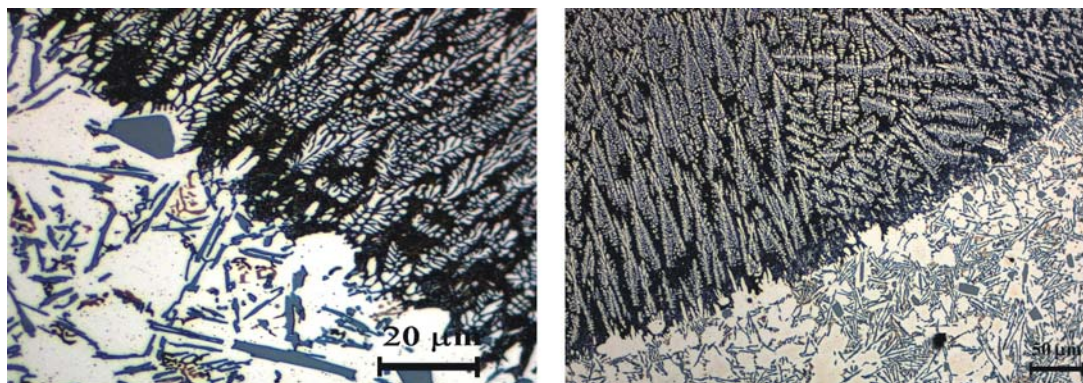
Az Al-7Si-10Pb monotektikus ötvözetek 8 (utoljára létrehozott) zónájának az alapanyag felé eső széléről készült a 82. ábra. A dendrites szerkezet az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény növekedésére a szerkezet finomodik, hasonlóan a Bi mintákhoz.



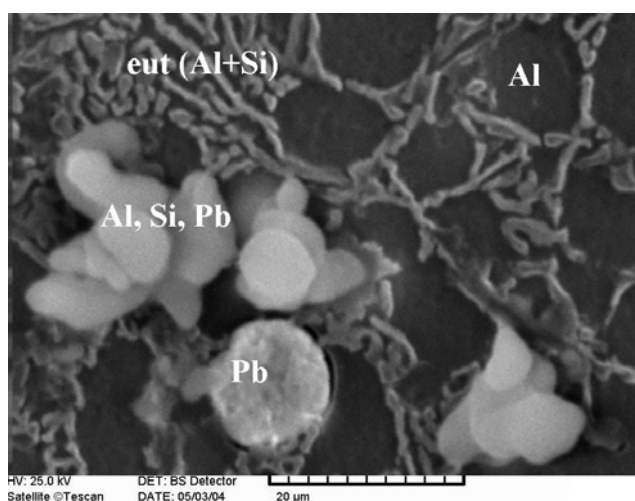
82. ábra Al-7Si-10Pb ötvözetek szövetszerkezetei

Az ötvözött rész sokkal finomabb szerkezetű, mint az alapszövet. Az alapszövet α szilárd oldat dendritjeiből kezdtek el nőni a finomabb α szilárd oldat dendritek (83. ábra). Ez is azt mutatja - hasonlóan a Bi mintákhoz -, hogy ezáltal a kezelt felületi réteg és az alapanyag kötése teljesen fémes, minden másféle eljárásnál erősebb kötést biztosítva.

A 84. ábra mutatja be az Pb cseppek elhelyezkedését és méretét. A Pb cseppek elhelyezkedését és méretét a következő fejezetben részletezek.



83. ábra Az alapanyag csíráképző hatása



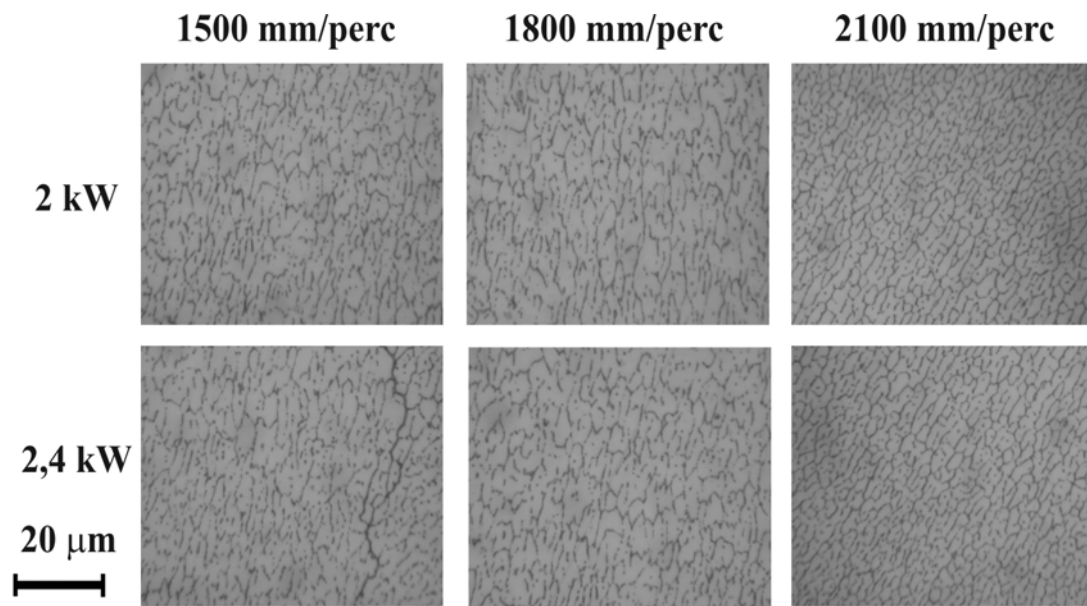
84. ábra $Al_7Si_{10}Pb$ szövetszerkezete, PEM, BSE kép

4.2.3.2. A kristályosodott Al-4Cu-1.5Mg-20 Pb ötvözet kristályosodásának jellemzése

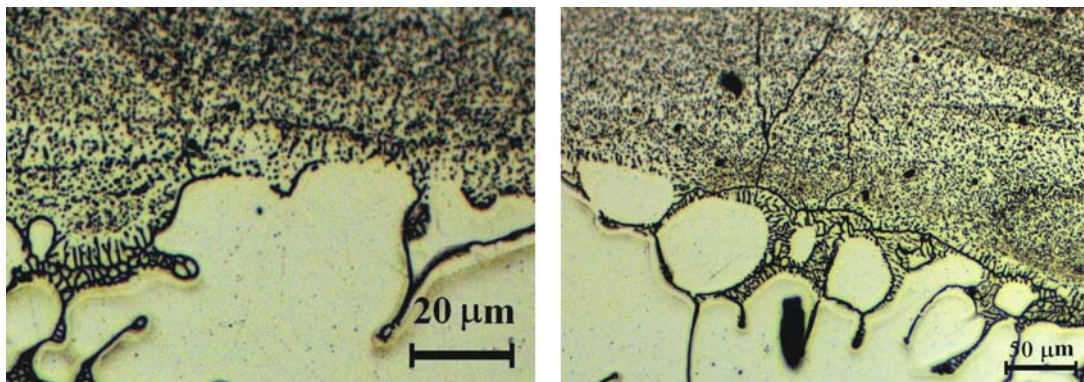
A 85.ábra mutatja be a cellás szerkezet változását az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény hatására, Al-4Cu-1.5Mg-20 Pb monotektikus ötvözeteknél. A cellás szerkezet finomodik, az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény növekedésének hatására.

Az 86. ábra az ötvözött zóna és az alapanyag kapcsolatát illetve az ötvözött zóna szerkezetét szemlélteti. Jól látszik, hogy az alapanyag és az ötvözött réteg között egy úgynevezett átmeneti rész található. Az ötvözött zónában ólomcseppek találhatók, amelyeket mikroszondás illetve röntgendiffrakciós módszerekkel azonosítottam.

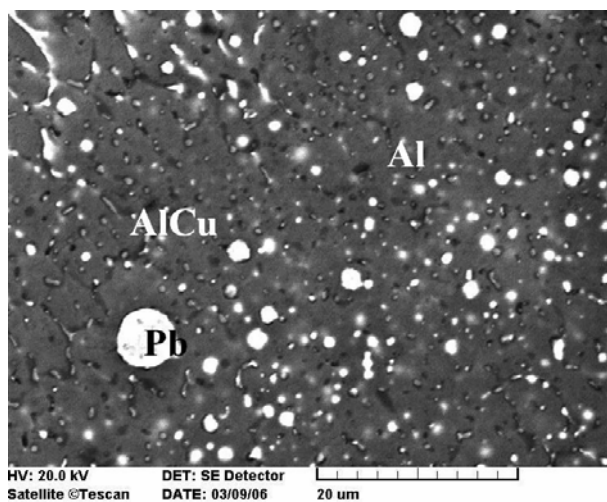
A monotektikus felületi rétegben megtalálható fázisok, vegyületek: a felületi rétegben szín Pb és α szilárd oldat fázisok mellett Al_2Cu és $Al_{12}Mg_{17}$ vegyületfázisok is találhatók (87. ábra). A 88. ábra az alapanyag és az ötvözött zóna között kialakult átmeneti réteget mutatja be.



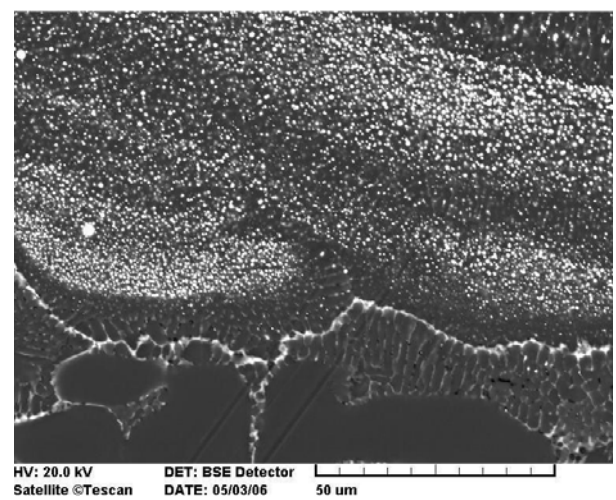
85. ábra Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözetek szövetszerkezetei



86. ábra Az ötvözött zóna és az alapanyag határa

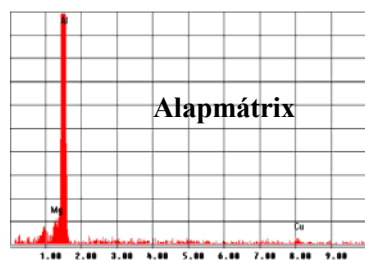
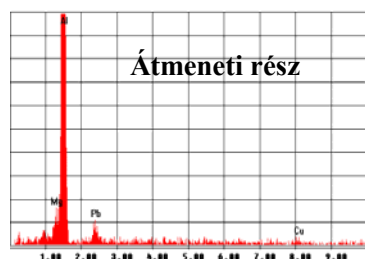
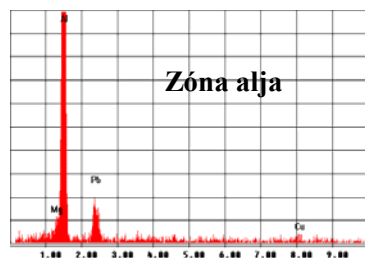
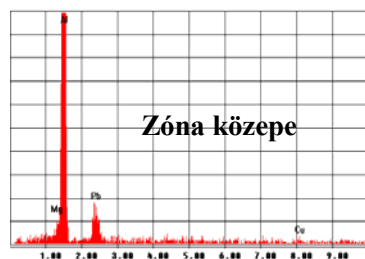
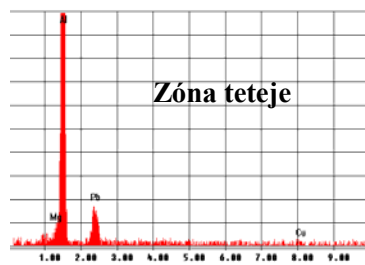
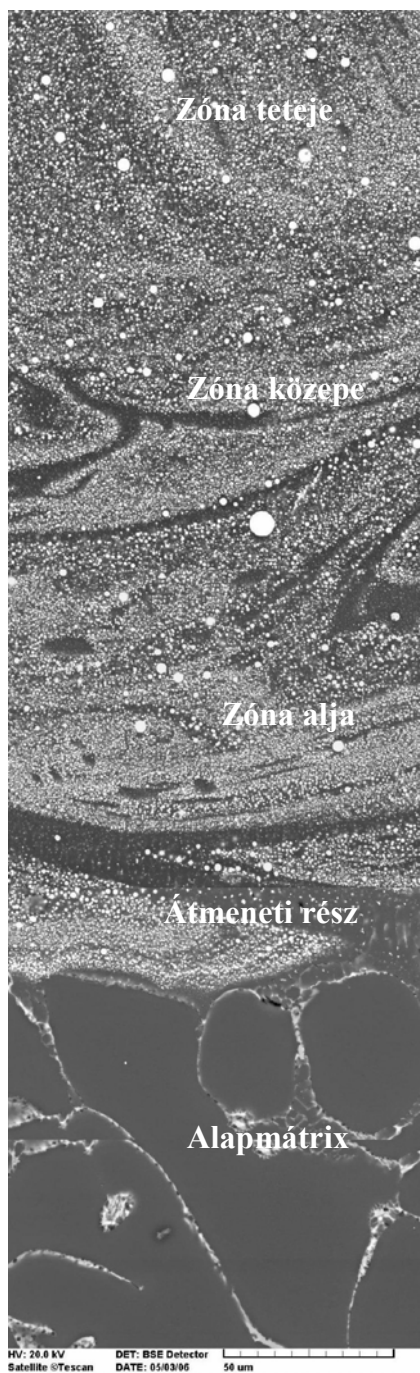


87. ábra Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet fázisai,
PEM, SE kép



88. ábra Az alapanyag és az ötvözött
zóna között kialakult átmenet

Annak megállapítására, hogy a lézersugaras kezelés során bevonatot vagy ötvözetet hoztam-e létre a teljes zónában mikroszondás vizsgálattal elemzéseket végeztem. Az



alapszövetben 4 % réz található, így a réz jelenléte illetve hiánya eldöntheti, hogy bevonat vagy ötvözet jön létre. Ha bevonat jön létre, akkor egy átmeneti rétegtől eltekintve a lézersugarasan kezelt zónában réz nem található. Az ötvözet esetében a teljes felületi réteg tartalmaz rézet. A terület elemzések azt mutatták, hogy bár csökkenő mértékben, de a teljes lézersugarasan kezelt zónában kimutatható volt a réz jelenléte, amely azt jelenti, hogy lézers felületötvöztetés történt. (89. ábra)

Az EDS elemzések eredményét a 2. melléklet mutatja be.

89. ábra Ólom szemcsék eloszlása a zóna különböző részeiben EDS elemzéssel

Az ötvözött zónák szövetszerkezeti vizsgálatai alapján megállapítható, hogy:

1. a lézer teljesítmény és az előtolási sebesség növekedésének a hatására finomabb szerkezet alakul ki.
2. a darab felületén kialakuló monotektikus réteg és a munkadarab között fémes kötés jön létre azáltal, hogy a részlegesen megolvadt anyag kristályai szerepelnek csíráképzőként az ötvözött réteg kristályosodásakor,
3. a felületi réteg ötvözése történhet a megolvasztott felületi rétegbe bevitt ötvözővel egy lépésben (gázárammal Bi részecskéket, huzaladagolással Pb), vagy az ötvöző anyagnak a felületre bármely technikával történő előzetes felvitelével (Pb galvanizálásával), tehát két lépésben.

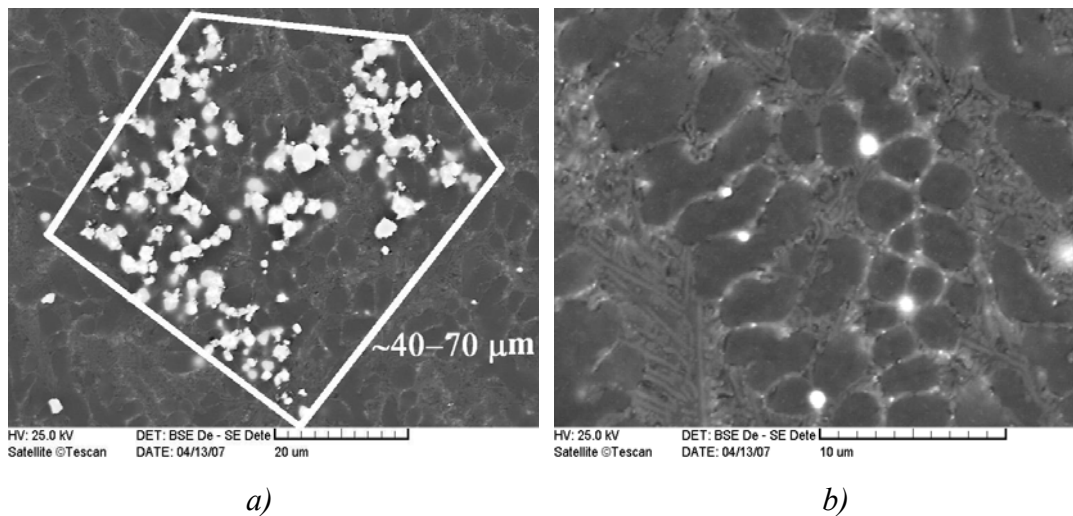
4.2.4. Ötvöző tartalom eloszlása

4.2.4.1 Bi eloszlása az Al-7Si-10Bi ötvözetben

A bizmut az alumíniumban és ötvözeteiben, szilárd állapotban gyakorlatilag nem oldódik valamint a bizmut sem oldja az alumíniumot.

A Bi részecskék bejutnak az olvadékba, az olvadék hőmérsékletén megolvadnak és az áramlás hatására az olvadékban lévő Bi nagyobbik része egyenletesen eloszlik. Egyes Bi részecskék ugyan megolvadnak és az áramlás az olvadt Bi egy részét elviszi, egy része azonban azon a helyen marad „felhők” formájában, ahol a Bi részecske megolvadt, helyi makrodúsulást okozva. (90. a. ábra) Ezen „felhők” területe közelítőleg megegyezik a Bi szemcsék méretével.

A lehűlés során az olvadékból először viszonylag nagy Bi tartalmú cseppek jelentek meg 1-3 μm közötti mérettartományban. Ezt követően α szilárd oldat kristályosodott dendritesen. A kristályosodás végén a nagyon finom eloszlású Bi-ot ($\sim 1 \mu\text{m}$ kisebb) tartalmazó Al-Si eutektikum keletkezett. (90.b. ábra) Hasonlóan az 1.2.2. fejezetben leírtakhoz.



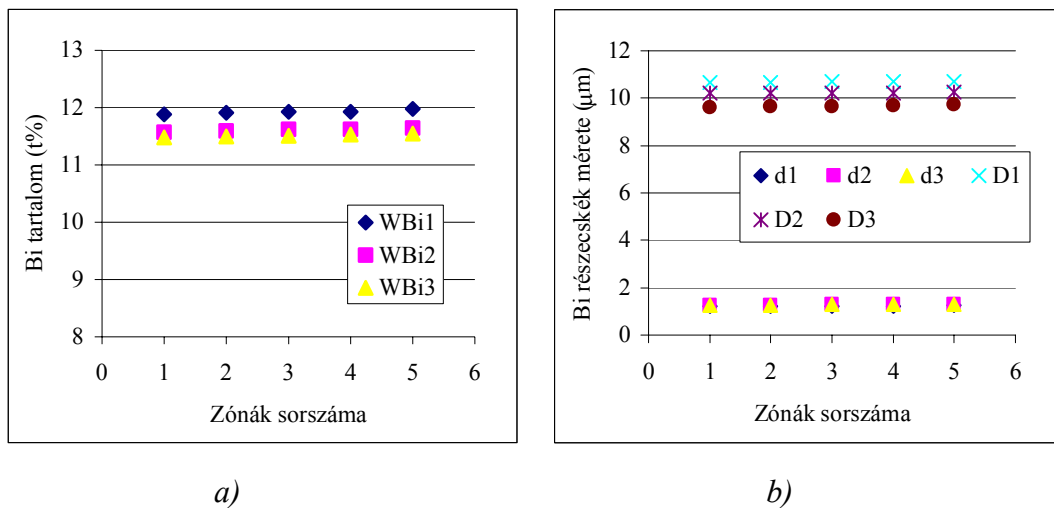
90. ábra Bi részecskék elhelyezkedése

A bizmut térfogathányadát és a részecskék méret szerinti eloszlását megbízhatóan a pásztázó elektronmikroszkóp visszaszórt elektronjaival alkotott képeken képelemző berendezéssel elvégzett vizsgálatok segítségével lehetett jellemezni. A mért bizmut térfogathányadát a 2. egyenlet segítségével tömeghányaddá számoltam át. Az ötvözött zónát három részre osztottam - hasonlóan az előző fejezetben leírtakhoz - az aljától 0,2 mm, 0,4 mm és 0,8 mm távolságban határoztam meg a Bi részecskék mennyiségét és

eloszlását. A 0,2 mm, 0,4 mm és 0,8 mm távolságban mért tömeghányadot WBi3, WBi2 és WBi1, a részecskék méretét $\varnothing d3$, $\varnothing d2$, $\varnothing d1$ és a „felhők” befoglaló területét $\varnothing D3$, $\varnothing D2$ és $\varnothing D1$ jelöltem.

A részecskék kis mérete miatt 3000x nagyításban határoztam meg a részecskék mennyiségét, méretét, mert így meg lehet állapítani a kis méretű részecskéket (1-1,4 μm), illetve a „felhők”-be összeállt Bi részecskék méretét is. A kisebb méretű Bi cseppekből „felhők”-be összeállt nagyobb átmérőjű $D \sim 10 \mu\text{m}$ méretű bizmut cseppeket egy objektumnak érzékelt a képelemező berendezés. Ebben a nagyításban az egészen kicsi 1 μm alatti Bi részecskéket nem lehet megmérni képelemező berendezéssel a rendkívül kis mérete miatt. Ez a méréseim során rendszeres bár kis hibát okozott.

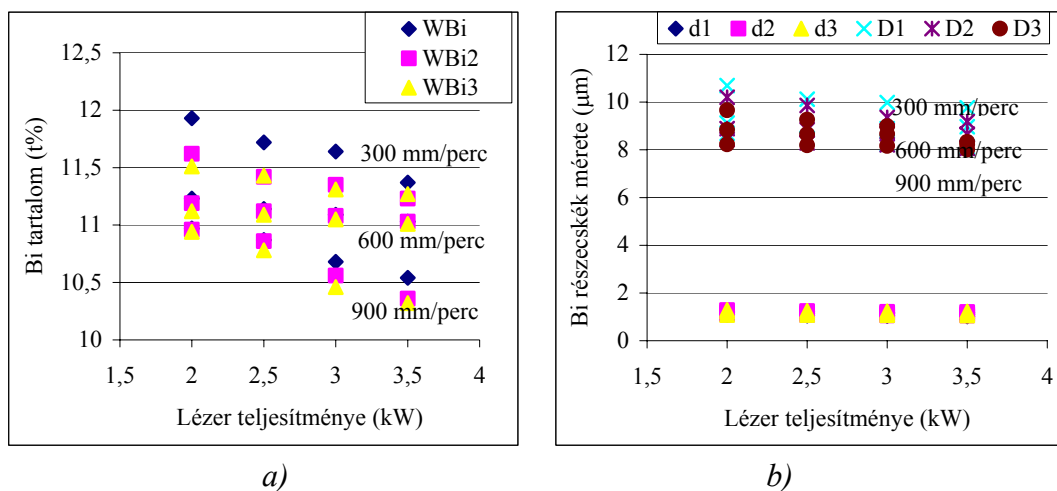
A Bi mennyiségének a változását mutatja be a 91. ábra egy mintán belül. Megfigyelhető, hogy a zónák sorszámának függvényében a Bi tartalom (91.a. ábra) gyakorlatilag nem változik ($\sim 11,5 \text{ t\%}$). Az ötvözött zónák tetején a Bi tartalom minimálisan több ($\sim 0,2 \text{ \%}$) ez azonban a mérési hiba határon belül található. A 91.b. ábra a Bi részecskék átlagos méretének a változását szemlélteti egy mintán belül. A szétválás során keletkezett Bi részecskék átlagos átmérője $d \sim 1,2 \mu\text{m}$ közötti, a zónák sorszámától függetlenül. A „felhők” átlagos mérete 10 μm körül van, függetlenül a zónák sorszámától.



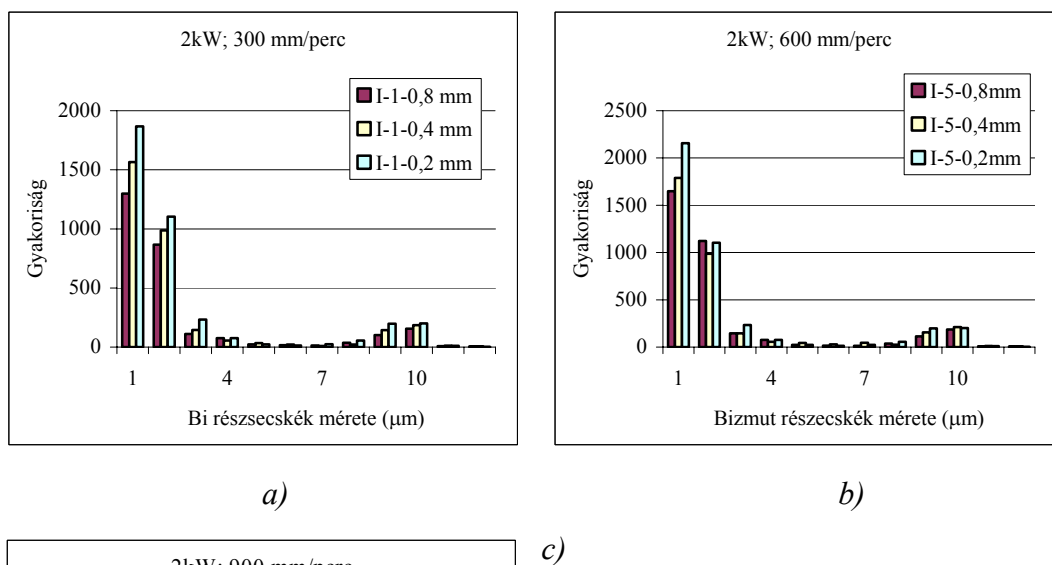
91. ábra Al-7Si-10Bi felületi rétegekben lévő Bi részecskék mennyiségének és méretének a változása egy mintán belül (2 kW, 300 mm/perc)

A 92.a. ábra a Bi tartalomnak a változását mutatja be az összes minta esetében. Adott sebesség esetén a teljesítmény növekedésével csökken a koncentráció, mert a beolvadt térfogat nő és az időegység alatt bevitt Bi mennyisége állandó. Az előtolási sebesség

növekedésével egy adott teljesítménynél a Bi koncentráció csökken. A sebesség növekedésével lecsökken az átolvadt térfogat, amely a Bi koncentráció növekedését okozná, de ezzel egy időben lecsökken az az időtartalom, amely idő alatt a tócsába befűjtük a bizmutot, ennek eredményeként csökken a Bi koncentráció. A két ellentétes hatás következtében a Bi koncentráció csökken.



92. ábra Al-7Si-10Bi felületi rétegekben lévő Bi részecskék mennyiségének és méretének a változása az összes minta esetén



c)

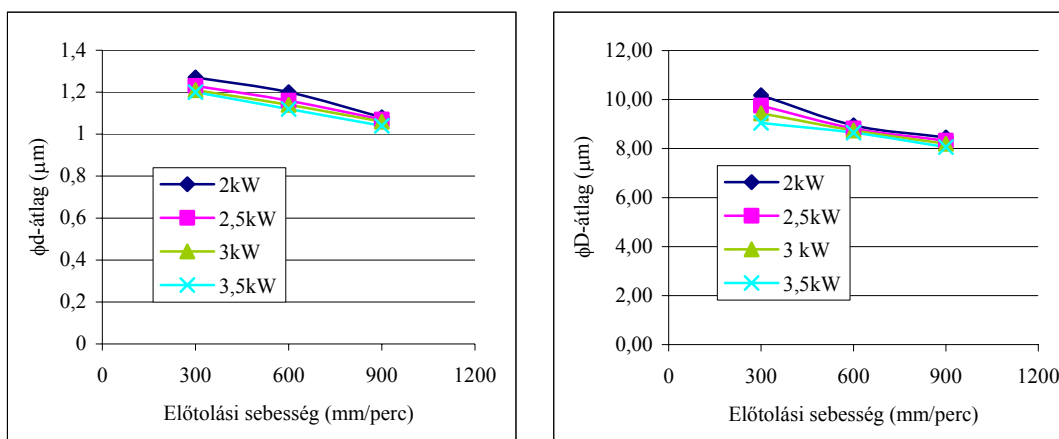
93. ábra Bi részecskék méret szerinti eloszlása

a) 2kW, 300 mm/perc

b) 2kW, 600 mm/perc

c) 2kW, 900 mm/perc

A 93. ábra a Bi részecskék méret szerinti eloszlását mutatja be adott teljesítménynél. A Bi részecskék eloszlása mindegyiknél bimodális volt. A kis méreteknél lévő csúcs mutatja a homogén olvadékból való kiválás eredményét. A nagy méreteknél látható csúcs a „felhők” méretét szemlélteti. Az előtolási sebesség növekedésével nőtt a Bi részecskék száma. A zónán belüli mélység függvényében a lehülési sebesség nőtt a részecskék mérete csökkent. A 91.b. ábra a Bi részecskék méretének változását mutatja be az összes minta esetében. A 94. ábra a jobb kiértékelhetőség miatt a Bi részecskék átlagos méretének változását mutatja be. A kis Bi részecskék mérete csökken az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény hatására, amelyet a lehülési sebesség magyaráz, mert a lehülési sebesség növekedésével az olvadék cseppek növekedésére kevesebb idő áll rendelkezésre. A nagyobb méretű „felhők” mérete is csökken az előtolási sebesség hatására. Az olvadék áramlásának (marangóni áramlás) erősödése okozza ezen „felhők” méretének a csökkenését.



94. ábra Al-7Si-10Bi felületi rétegekben lévő Bi részecskék méretének a változása az előtolási sebesség függvényében

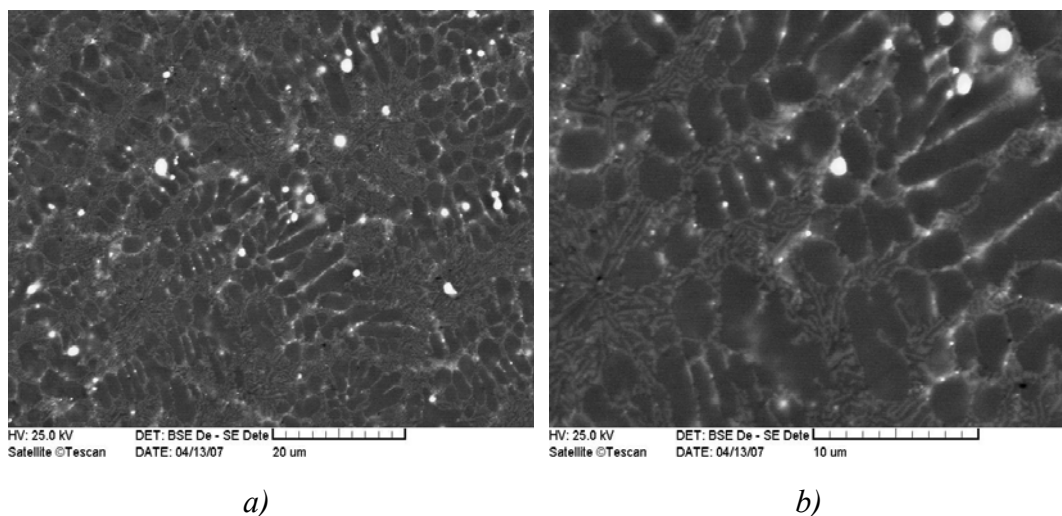
4.2.4.2. Pb eloszlása az Al-7Si-10Pb ötvözetben

Az ólom az ötvözött felületi rétegben a bizmuthoz hasonlóan szín ólom formájában jelenik meg, mert szilárd állapotban gyakorlatilag nem oldódik az ólom az alumíniumban és az ólom sem oldja az alumíniumot.

A lézeres átoltvasztásnál a felületen lévő ólom illetve az alatta lévő hordozó anyag megolvad és az olvadékban az ólom nagyobb részt feloldódik, egyenletesen eloszlik. A felületen a lézersugár megolvasztja az Pb azon részét is, ahol az alapanyag nem olvad meg és az itt megolvadt Pb apró cseppekbe összeáll. A lézersugár tovább haladásával ezek a cseppek beolvadnak, de a technológiát bizonytalanná teszi.

A lehűlés során - hasonlóan a Bi mintákhoz - olvadékból a szétválás miatt először $\sim 3 \mu\text{m}$ mérettartományú Pb tartalmú cseppek jelentek meg (95.a. ábra). Ezt követően α szilárd oldat kristályosodott dendritesen. A kristályosodás végén a nagyon finom eloszlású Pb-ot ($\sim 1 \mu\text{m}$ kisebb) tartalmazó Al-Si eutektikum keletkezett (95.b. ábra). Hasonlóan az 1.2.2. fejezetben leírtakhoz.

A dendritágak között elhelyezkedő $1 \mu\text{m}$ alatti ólom cseppeket (95.b. ábra) nem lehet megmérni képelemző berendezéssel rendkívül kis mérete miatt. Ezek rendkívül kis mennyisége - hasonlóan a Bi mintákhoz - a méréseim során rendszeres bár kis mértékű hibát okozott.

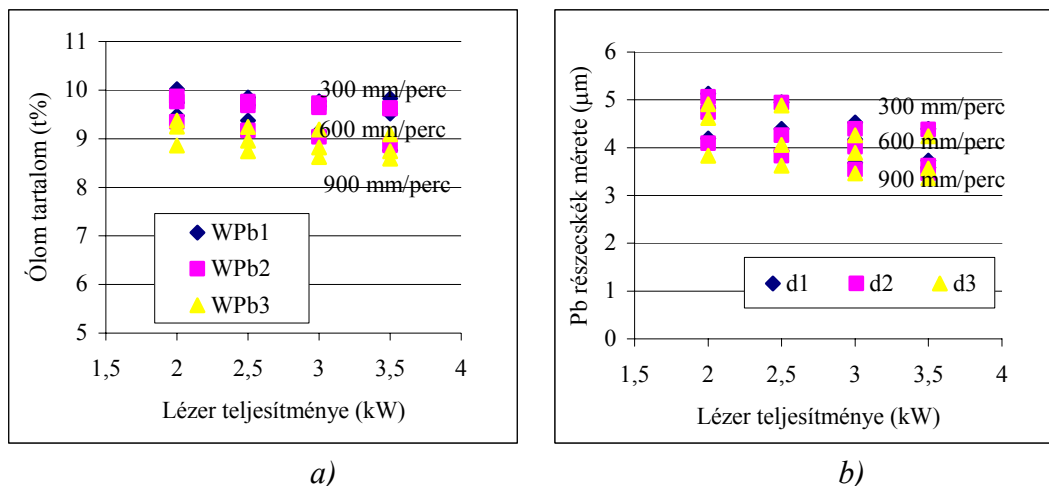


95. ábra Pb részecskék elhelyezkedése

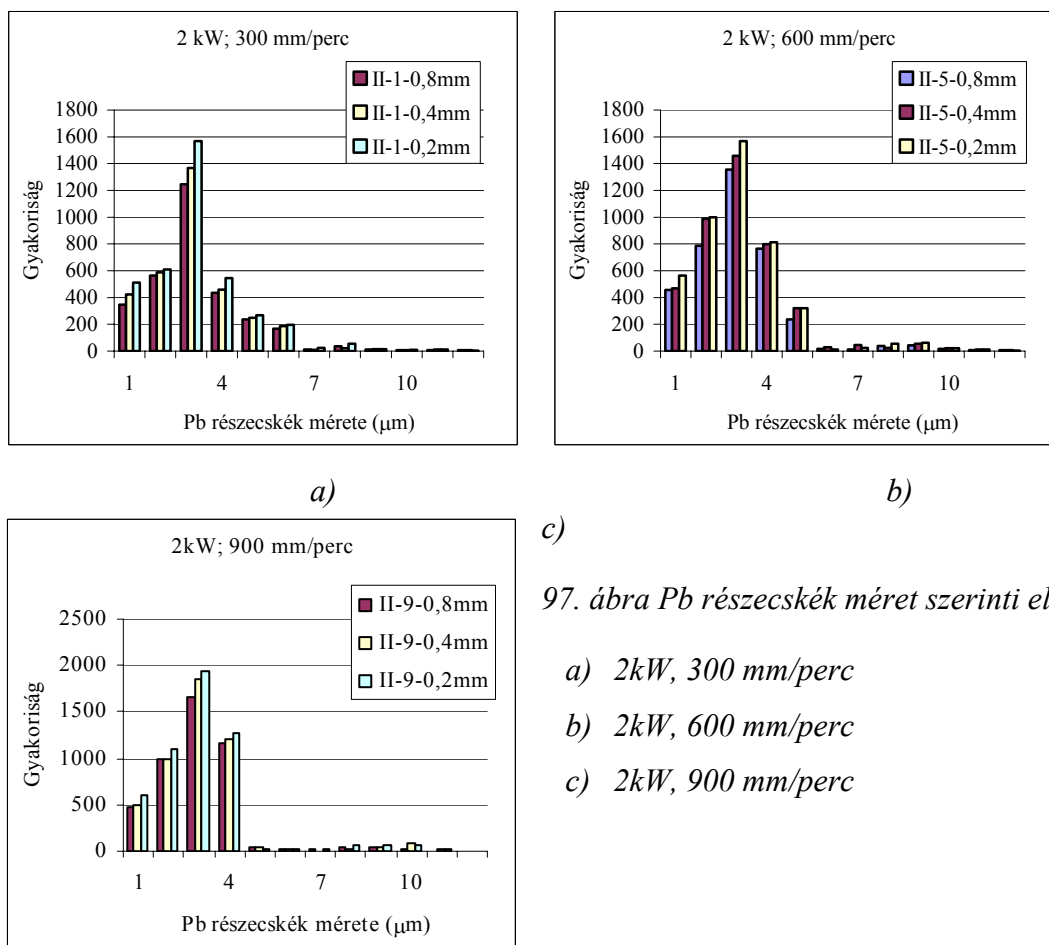
A 96.a. ábra mutatja be az összes minta esetében az Pb tartalom változását. Az Pb koncentráció a teljesítmény növekedés hatására minden esetben csökken, mert azonos mennyiségű ötvöző tartalom kerül a nagyobb átolvadttér fogatba. Az Pb koncentráció csökken az előtolási sebesség növekedésével is egy adott teljesítménynél. A sebesség csökkenése az alapanyag átolvadttér fogata nagyobb mértékben nő, mint a beolvasztott Pb térfogata. Az átolvasztott zóna mélysége és szélessége is megnő, míg a beolvasztott ólomnak csak a szélessége nő kisebb mértékben. Ennek eredményeképpen csökken az Pb koncentráció.

A Pb részecskék méretének a változását mutatja be 96.b. ábra az összes mintán belül. A kis méretű ólom cseppek, $d \sim 3\text{-}5 \mu\text{m}$ közötti Pb részecskék mérete csökken, az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény hatására. Ez lehűlési sebességgel kapcsolatos, mert a lehűlési sebesség növekedésének hatására kevesebb idő van az olvadék cseppek növekedésére (koagulálására).

A 97. ábra az Pb cseppek eloszlását mutatja be adott teljesítménynél. Az ólom cseppek eloszlása minden mintánál normál volt. A kis méreteknél lévő csúcs mutatja a homogén olvadékból való kiválás eredményét. Az előtolási sebesség növekedésével nőtt az Pb cseppek száma. A zónán belüli mélység függvényében a lehűlési sebesség nőtt a cseppek mérete csökkent.

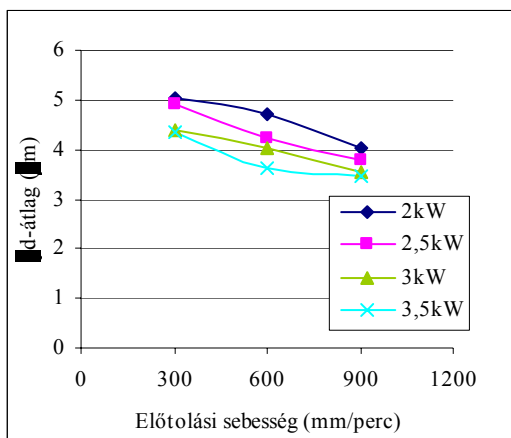


96. ábra Al-7Si-10Pb felületi rétegekben lévő Pb részecskék mennyiségének és méretének a változása az összes minta esetén



97. ábra Pb részecskék méret szerinti eloszlása

- a) 2kW, 300 mm/perc
- b) 2kW, 600 mm/perc
- c) 2kW, 900 mm/perc



Az előtolási sebesség és a lézer teljesítmény hatására kis Pb részecskék mérete csökken, amelyet a lehülési sebesség magyaráz, mert a lehülési sebesség növekedésével az olvadék cseppek növekedésére kevesebb idő áll rendelkezésre, hasonlóan a Bi mintákhoz.

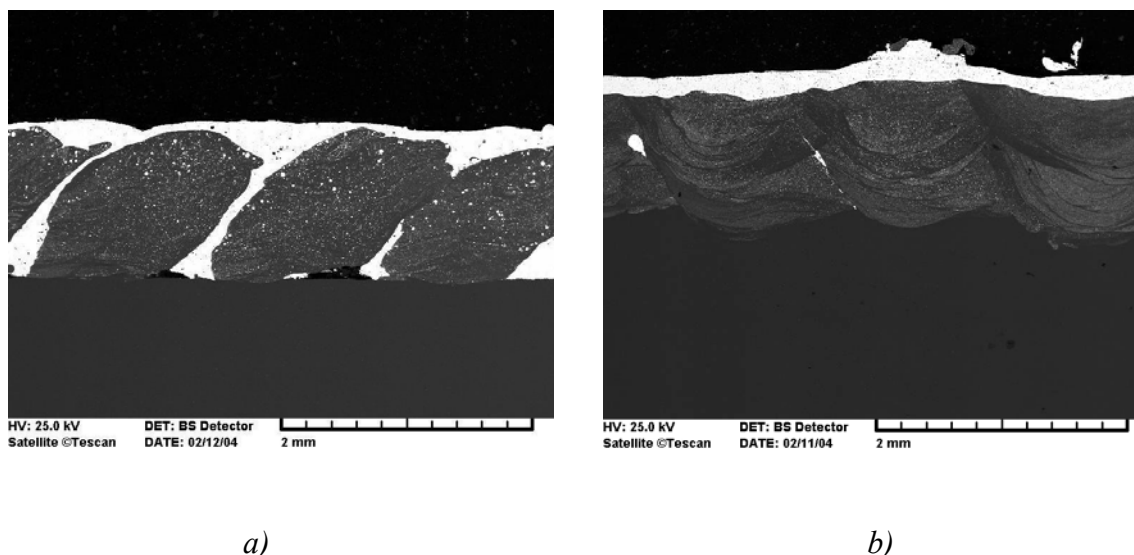
98. ábra Al-7Si-10Pb felületi rétegekben lévő Pb részecskék méretének a változása az előtolási sebesség függvényében

4.2.4.3. Pb eloszlása Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözetben

A Nd:YAG lézerrel, huzaladagolással készült ólommal ötvözött mintadarabok kiértékelését mutatom be a következőkben.

A kis lézer teljesítménnyel (1,5-2,04 kW), huzaladagolással készült próbadarabok keresztcsiszolatát mutatja be a 99. ábra. Az ábrán látható, hogy az alapanyag nem (99.a. ábra), illetve csak kis mértékben olvadt meg. Az ólom a réteg felületén illetve az egyes sávok között is megtalálható. A teljesítmény növekedésével a sávok közötti ólom mennyisége fokozatosan csökkent. A nagyobb teljesítménynél (2 kW) már jelentősebb mennyiségű alapanyag is beolvadt (99.b. ábra), azonban az ötvözött zóna felületét ebben az esetben is vékony rétegben ólom fedte. Megmértük az ötvözött zónán kívül, illetve a zóna felületén elhelyezkedő vékony ólom réteg térfogathányadát kvantitatív módszerrel. A mért ólom térfogathányadát a 2. egyenlet segítségével tömeghányaddá számoltam át. A teljes tömegnek a 40 %-át tette ki a kívül elhelyezkedő Pb (M_{Pb}), az ötvözött zónában lévő Pb (T_{Pb}) 18 t% volt. Az átlagos ólom tartalmat (m) az alábbi képlet segítségével $m = M_{Pb} + (1 - M_{Pb}) \cdot T_{Pb}$ határoztam meg. A réteg átlagos Pb tartalma 52 t%, amely megfelelt a lézers felületkezelés során alkalmazott huzal összetételének. Ez is azt mutatja, hogy nem felületi ötvöztetés történt, hanem bevonat jött létre.

A nagyobb sűrűségű Pb olvadéknak az ötvözött zóna felszínén való elhelyezkedése a határfelületi jelenségekkel magyarázható. [44]

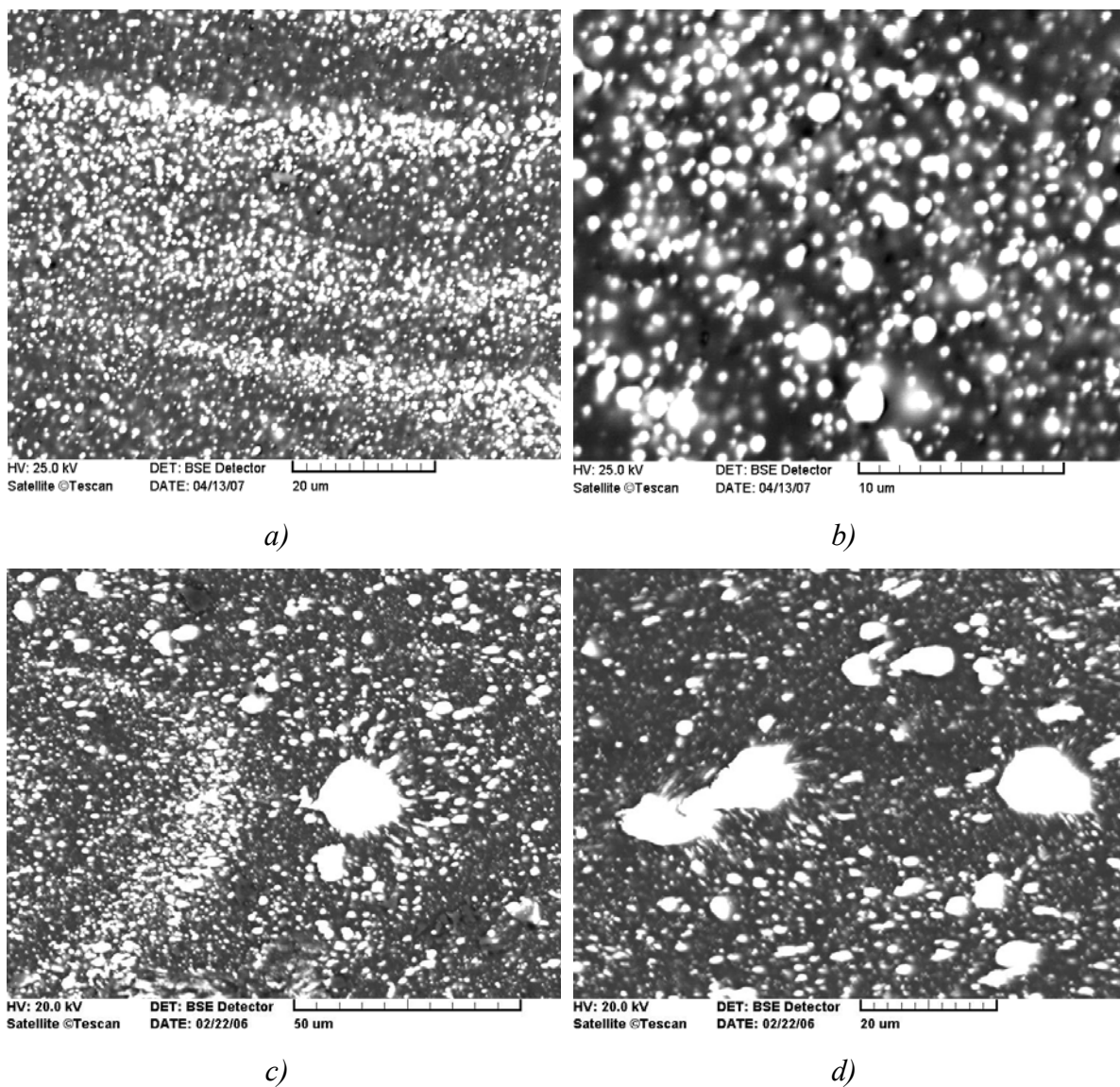


99. ábra Kis lézer teljesítménnyel készült Al-4Cu-1.5Mg-20Pb mintadarabok;

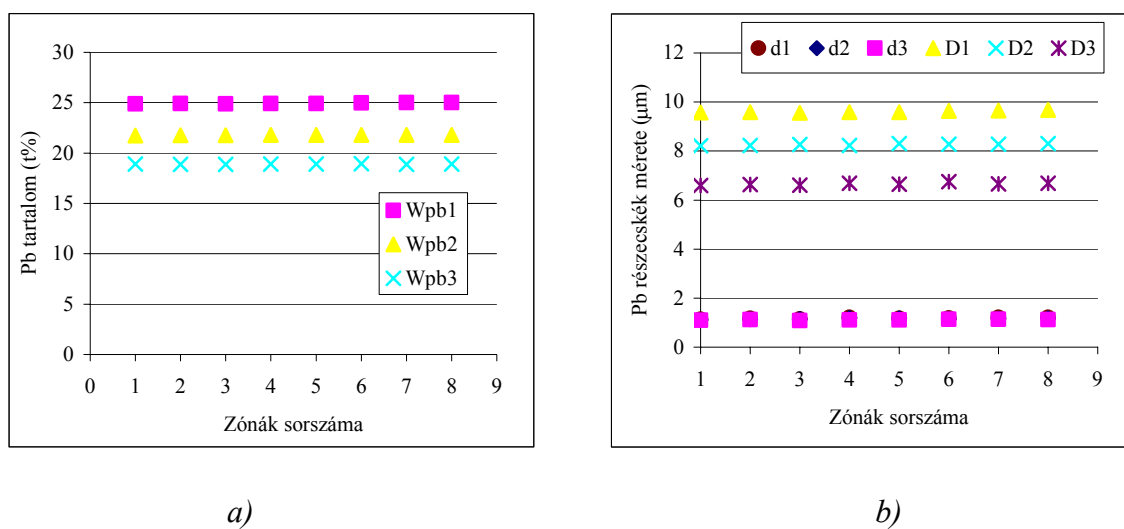
a) 1,5 kW teljesítmény b) 2,04 kW teljesítmény

A nagyobb lézer teljesítményű huzaladagolással készült próbadaraboknál az alapanyag jelentős része megolvadt, összeolvadt az alapanyaggal, az ólom cseppek bejutnak az olvadékba és az Pb nagyobbik része egyenletesen eloszlott (100.a. ábra). Az ólom (kis lézer teljesítménynél) kis része a felületen maradt, vékony réteg formájában. A réteg a teljesítmény növekedésével csökkent. Egyes nagyobb méretű olvadt Pb cseppek egyben maradnak, nem oldódnak be az Al olvadékba helyi makrodúsulást okozva (100.c és 100.b. ábra), hasonlóan a Bi próbadarabokhoz.

A lehűlés során az olvadékból szétválás során először nagy Pb tartalmú cseppek jeletnek meg, majd cellásan α szilárd oldat kristályosodott. A kristályosodás végén α szilárd oldat és Al_2Cu eutektikuma keletkezett, amely kis méretű Pb - ot is tartalmaz (100.b. ábra). Hasonlóan az 1.2.2. fejezetben leírtakhoz. A nagyobb méretű ólom cseppek, amelyek mozogtak az olvadékban, az átolvadt zónában magukhoz gyűjtötték a kisebb méretű részecskéket és koaguáltak (100.c. és 100.d. ábra).



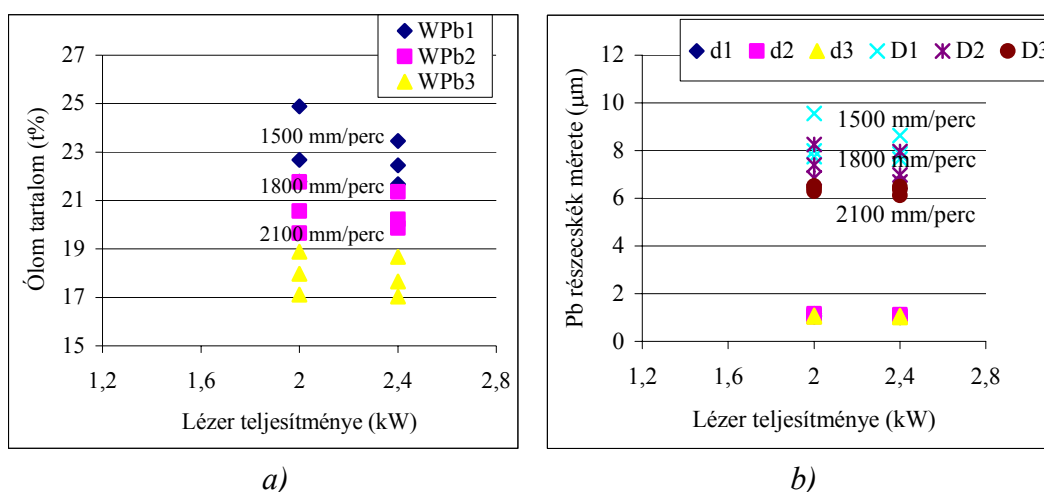
100. ábra Ólom részecskék elhelyezkedése



101. ábra $Al_4Cu_{1.5}Mg-20Pb$ felületi rétegekben lévő Pb részecskék mennyiségének és méretének a változása egy mintán belül (2 kW, 1500 mm/perc)

Az Pb mennyiségének a változását mutatja be a 101. ábra egy mintán belül. Megfigyelhető, hogy a zónák sorszámának függvényében a Pb tartalom (101.a. ábra) gyakorlatilag nem változik a zónák tetején ~25 t% a zónák közepén a ~21 t% és a zónák alján 19 t%. A 101.b. ábra a Pb részecskék átlagos méretének a változását szemlélteti egy mintán belül. A szétválás során keletkezett Pb részecskék átlagos átmérője $d \sim 1,2 \mu\text{m}$ közötti, a zónák sorszámától függetlenül.

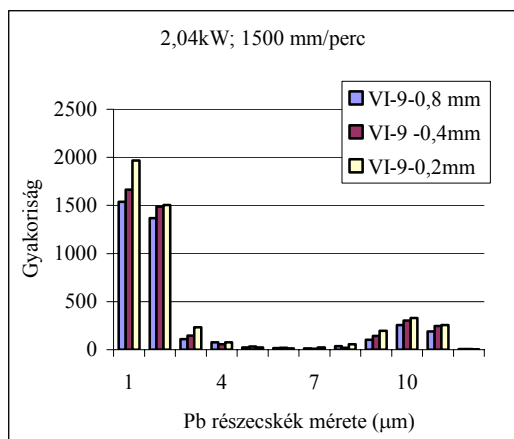
A 102.a. ábra az Pb tartalomnak a változását mutatja be az összes minta esetében. Minden mintadarab esetében az ólom koncentrációja csökkent a mélység függvényében: a felülethez közel több, a közepén valamivel kevesebb, és az alján még kevesebb volt. Csökken a koncentráció a teljesítmény növekedésével adott sebesség esetén, mert a beolvadt térfogat nő és az időegység alatt bevitt Pb mennyisége állandó. Az előtolási sebesség növekedésével egy adott teljesítménynél a Pb koncentráció csökken. A sebesség növekedésével lecsökken az átolvadt térfogat, amely a Pb koncentráció növekedését okozná, de ezzel egy időben lecsökken az az időtartalom, amely idő alatt a tócsába bejutott az Pb, ennek eredményeként csökken a Pb koncentráció. A két ellentétes hatás következtében a Pb koncentráció csökken, hasonlóan a Bi mintákhoz.



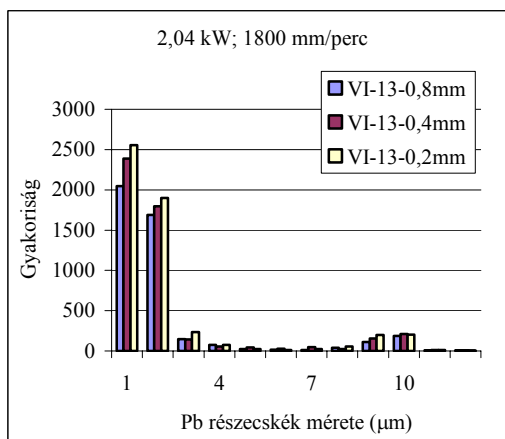
102. ábra AlCuMg-Pb felületi rétegekben lévő Pb részecskék méretének és tartalmának változása

A 102.b. ábra az Pb cseppek méretének a változását mutatja be az összes minta esetében. Kétféle mérettartományú ólom részecskék különböztethetők meg ötvözött zónában: $d \sim 1,0 \mu\text{m}$ közötti átlagos átmérőjű részecskék, amelyek a szétválás során keletkeztek, illetve a nagyobb átmérőjű $D \sim 7-10 \mu\text{m}$ méretű ólomcseppek, amelyek egybe maradtak és nem oldódtak be az Al olvadékba.

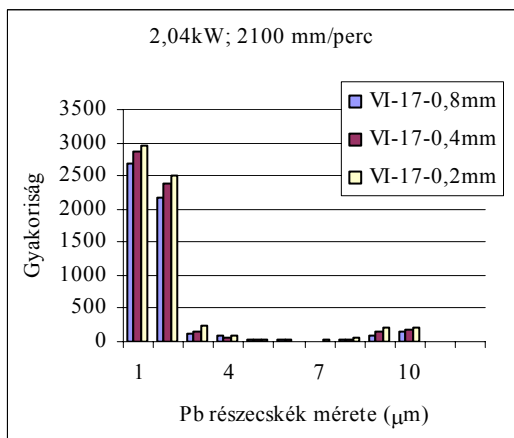
Adott lézer teljesítménynél mutatja be a Pb cseppek eloszlását a 103. ábra. Az Pb cseppek eloszlása minden esetben binomiális volt. A kis méreteknél lévő csúcs szemlélteti a homogén olvadékból való kiválás eredményét. A nagy méreteknél található csúcs az egyben maradt Pb cseppek méretét szemlélteti. Az előtolási sebesség növekedésével nőtt az Pb cseppek száma. A zónán belüli mélység függvényében a lehülési sebesség nőtt a cseppek mérete csökken.



a)



b)



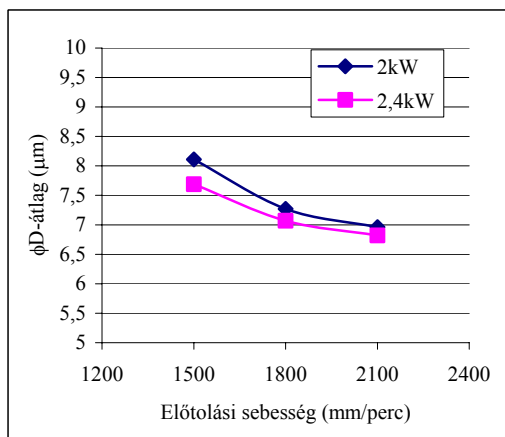
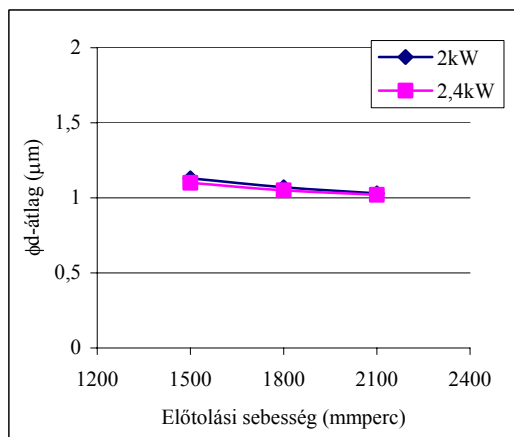
c)

103. ábra Ólom részecskék méret szerinti eloszlása

a) 2,04kW, 1500 mm/perc

b) 2,04kW, 1800 mm/perc

c) 2,04kW, 2100 mm/perc



104. ábra AlCuMg-Pb felületi rétegében lévő Pb méretének a változása

A 104. ábra a könnyebb kiértékelhetőség miatt Pb cseppek átlagos méretének változását mutatja be. A kis méretű Pb cseppek mérete csökken, a lézer teljesítmény és az előtolási sebesség hatására, amely a lehülési sebességgel van összefüggésben. A lehülési sebesség növekedésével az olvadék cseppek növekedésére kevesebb idő áll rendelkezésre. A nagyobb méretű Pb cseppek mérete is csökken az előtolási sebesség hatására, amelyet az olvadék áramlásának (marangóni áramlás) a növekedése okoz.

Az ötvözött zónák ólomeloszlásának vizsgálatai alapján megállapítható, hogy:

1. A porbefűvéssel és galvanizálással 10 t% Bi és Pb gyakorlatilag egyenletes eloszlással sikerült bevinni. Mindkét esetben a lézer teljesítmény és az előtolási sebesség növekedésével a Bi és Pb koncentráció csökkent.
2. Huzaladagolással az Pb egy része mindig a zónán kívül volt megtalálható, a teljesítmény növekedésével ez a mennyiség csökkent.
3. Huzaladagolásos technológiánál a felület Pb koncentrációja a lézer teljesítmény és az előtolási sebesség növekedésével egyaránt csökkent a mélység függvényében: a felülethez közel több, a közepén valamivel kevesebb, és az alján még kevesebb volt.
4. A gyors kristályosodás következményeként a nagyobb sűrűségű olvadék nem különül el a kisebb sűrűségű olvadék résztől, ezáltal a kristályosodás után a felületi réteg homogén lesz.
5. Nagyobb lehülési sebesség, nagyobb csíráképződési sebességet eredményez, ezáltal több szemcse keletkezett, amely az eloszlási görbék is mutatnak, az irodalommal összhangban [55].

4.4. Tribológia vizsgálatok eredményei

A tribológia vizsgálatok során Al-Cu-Mg-Sn, öntött Al-Si, lézeres felületkezeléssel létrehozott Al-7Si-10Pb és Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözetek siklási tulajdonságait határoztam meg. A vizsgálatokat pin on disk típusú berendezés segítségével végeztem el száraz vizsgálati körülmények között. A súrlódási együttható értékét a 3. egyenlet segítségével határoztam meg. A kapott eredményeket a 6. táblázat mutatja be.

6. táblázat A súrlódási együttható különféle anyagoknál

<i>Anyagfajta</i>	<i>Súrlódási együttható</i>
Al-Cu-Mg-Sn ötvözet	0,25
Öntött Al-Si ötvözet	0,62
Al-7Si-10Pb ötvözet (2kW, 300 mm/perc)	0,48
Al-7Si-10Pb ötvözet (2kW, 600 mm/perc)	0,50
Al-7Si-10Pb ötvözet (2kW, 900 mm/perc)	0,51
Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet (2kW, 1500 mm/perc)	0,21
Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet (2kW, 1500 mm/perc)	0,23
Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet (2kW, 1800 mm/perc)	0,23
Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet (2,4kW, 1800 mm/perc)	0,25
Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet (2,4kW, 2100 mm/perc)	0,26
Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet (2,4kW, 2100 mm/perc)	0,28

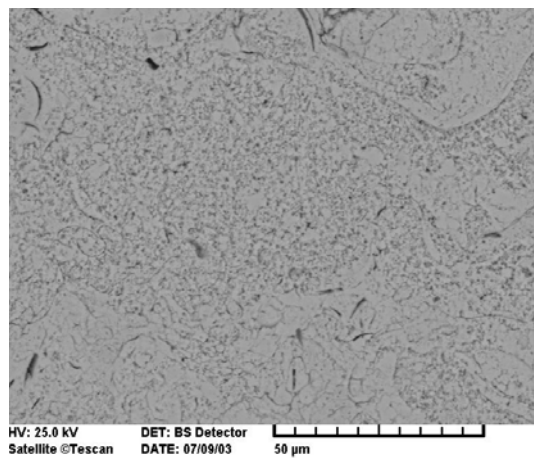
A súrlódási együttható értékeket összevetve a szakirodalomban talált [17] másféle technológiával készült Al10Pb, Al20Pb és AlCuMg-Sn siklócsapágyként használt súrlódási együtthatójával megállapítható, hogy a kapott értékek jó közelítéssel megegyeznek.

A lézeres felületkezeléssel előállított Al-7Si-10Pb, illetve Al-4Cu-1.5Mg-Pb monotektikus ötvözeteknél, a nagy lehűlési sebesség miatt olyan szerkezet alakult ki, amelyben finom lágy Pb kiválások találhatók melyek szilárd kenőanyagként szolgálnak (105.b.c. ábra). A gáziparban használt Al-Cu-Mg-Sn siklócsapágy ötvözetnél (105.a. ábra) a 95 tömeg% Sn tartalmú felületi réteg biztosítja a megfelelő siklási tulajdonságokat [46].

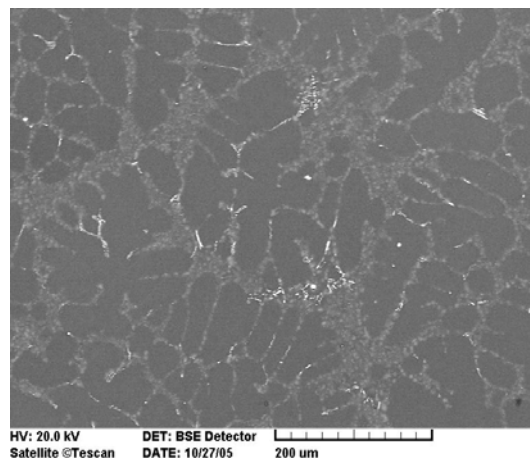
A 106. ábra az Al-7Si-10Pb és Al-Cu-Sn és Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet koptatott felületéről készült pásztázó elektronmikroszkópos képek. A kopás során a felületi réteg elkenődött.

A 107.a. ábra egy kisebb nagyítású kép (50x), ahol jól látszik a szilárd kenőanyagként szolgáló világos ólom cseppek. Ezek az ólomcseppek a kopás során elkenődnek így biztosítják a megfelelő siklási tulajdonságokat. A 107.b. ábra az elkenődött ólomcseppeket mutatja be nagyobb nagyításban (500x).

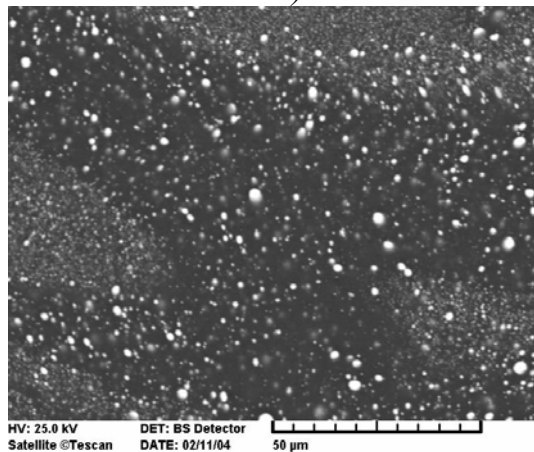
A 108. ábra szemlélteti a koptatott Al-Cu-Mg-Sn ötvözet felületét. Jól látszik, hogy adott koptatási út megtétele után (2500m) a felületi réteg felszakadozik.



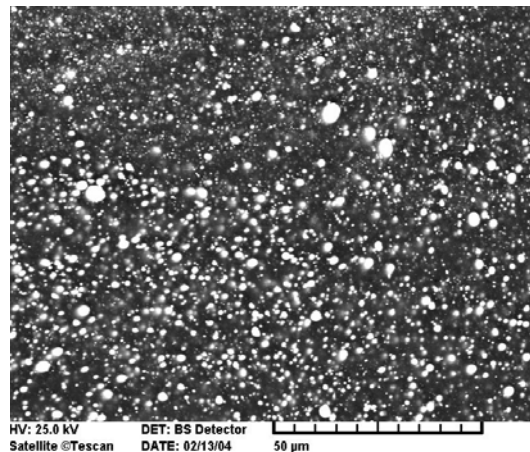
a)



b)



c)

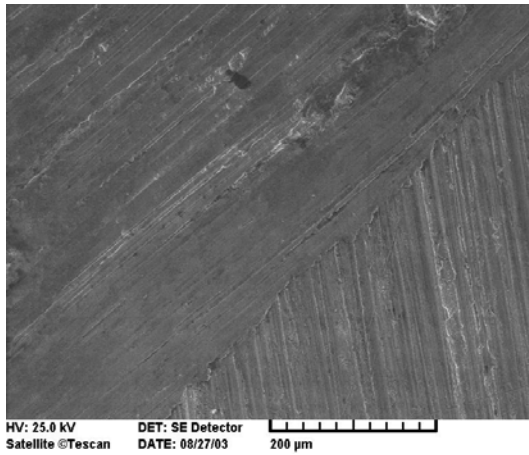


d)

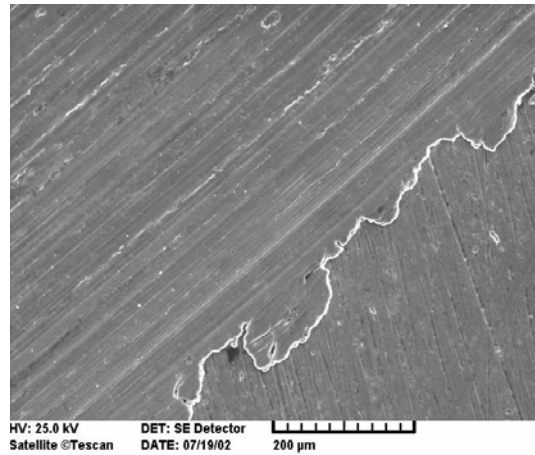
105. ábra Ötvözetek szerkezete a tribológiai vizsgálatok előtt

a) Al-Cu-Mg-Sn ötvözet, b) Al-7Si ötvözet;

c) Al-7Si-10Pb ötvözet d) Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet



a)



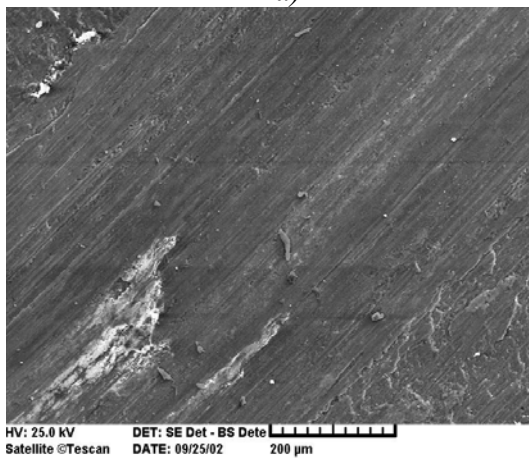
b)

106. ábra Koptatott ötvözetek felületi rétege

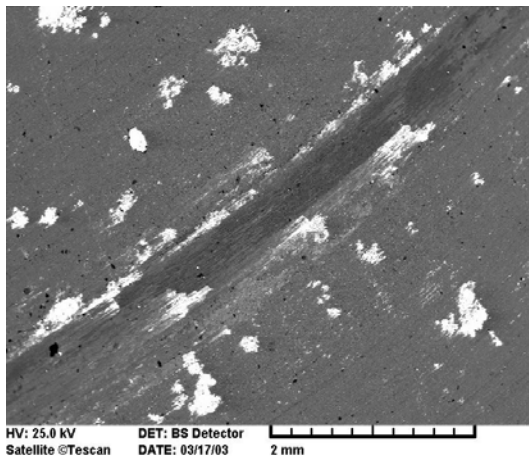
a) Al-Cu-Mg-Sn ötvözet,

b) Al-7Si-10Pb ötvözet

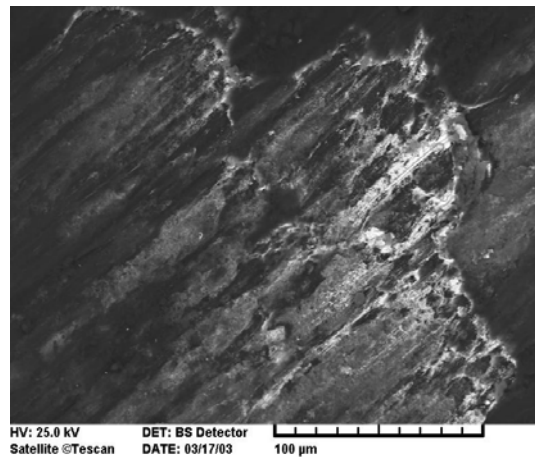
c) Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet



c)

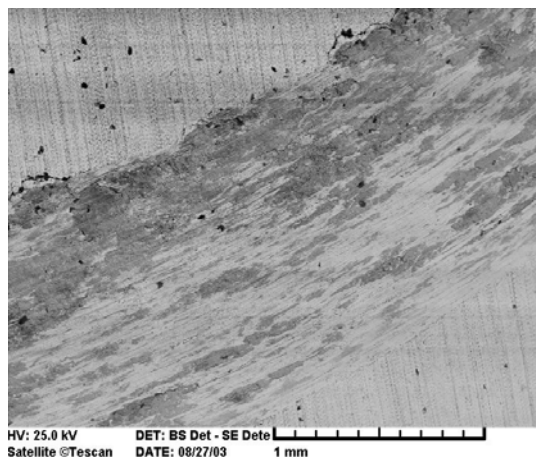


a)

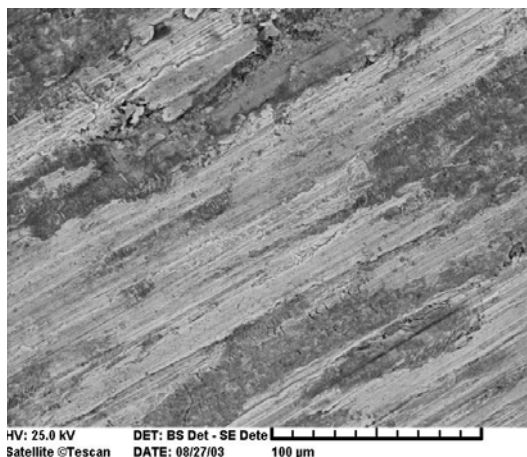


b)

107. ábra Koptatott Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet felületi rétege



a)



b)

108. ábra Koptatott Al-Cu-Mg-Sn ötvözet koptatott felületi rétege

Javaslat új technológiára:

- mindhárom technológiával létrehozható homogén eloszlású monotektikus réteg.
- porbefúvásással és bevonat beolvasztásával ~ 10 t% ötvöző fém (bizmut, ólom) tartalmat lehet bevinni,
- huzaladagolási technikával ~ 20 t% Pb tartalmú monotektikus ötvözet lehet létrehozni, amelynek siklási tulajdonságai megfelelő siklócsapágyak számára.

Javasolt technológia: egylépéses huzaladagolós technológia segítségével (2 kW, 1800 mm/perc) a 4.1 fejezetben leírt módon meghatározott geometria számítások elvégzése alapján állandó vastagságú réteget lehet létrehozni, amelynek siklási tulajdonságai megfelelő siklócsapágyak számára.

ÖSSZEFOGLALÁS

A siklócsapágys az elmúlt évek során folyamatos fejlődésen mentek át. A ma alkalmazott siklócsapágys leggyakoribb hordozó anyaga (csapágypersely): acél, ón-bronz és alumíniumbronz. Egyes típusoknál, pl. ón-bronz nincs külön szükség a siklást elősegítő bélésanyagra, mások esetében ~95 % ón tartalmú csapágybélés biztosítja a jó siklási tulajdonságokat. Ezek a siklócsapágy anyagok már a terhelhetőségi határukat elérték, így szükség van új siklócsapágy anyagok fejlesztésére.

Mindezek alapján a munkám során kitűzött célom az volt, hogy:

- létrehozzak a nagy szilárdságú mátrix felületén homogén, finom, egyenletes eloszlású alumínium-ólom ötvözetet siklócsapágy anyagok számára, lézersugaras felületkezelési technikával,*
- tanulmányozzam a monotektikus szerkezetet és a szövetszerkezetet kvantitatívan jellemezzem,*
- a létrejött felületi réteg geometriai adatai, valamint a siklási tulajdonsága és a lézersugaras felületkezelési technika paraméterei között kapcsolatot határozzak meg.*

Kísérleteket végeztem egylépéses és a kétlépéses felületkezelési technológiát alkalmazva. Az egyik típusú egylépéses (por befúvásos) technológiánál a lézersugár által megolvasztott rétegbe Ar vivógázzal Bi szemcséket fújtunk különböző lézerteljesítménnyel és előtolási sebességekkel. A másik egylépéses technológiánál lézersugár által megolvasztott rétegbe huzaladagolás segítségével Pb-ot vittünk be Al-4Cu-1.5Mg ötvözetbe, különböző lézerteljesítménnyel és előtolási sebességekkel. A kétlépéses technológiánál (bevonat beolvasztás) az Al-7Si ötvözet felületére kb. 0,1 mm vastagságú ólomréteget vittünk fel galvanizálással, majd különböző lézerteljesítménnyel és előtolási sebességekkel összeolvasztottuk.

Megvizsgáltam az átolvasztott/ötvözött zónák geometriai méretét (mélység). Megállapítottam, hogy a technológia paramétereiktől hogyan függ a zónák mérete. Ennek alapján javaslatot dolgoztam ki állandó vastagságú réteget létrehozására a teljesítmény folyamatos változtatása útján.

Vizsgáltam az ötvözött felületi réteg szerkezetét. A szerkezet paramétereit (szekunder dendritág távolság- λ_2 , cella méret- λ_1) az irodalomból ismert összefüggés alapján kapcsolatba hoztam a termikus paraméterekkel (lehűlési sebesség- $\dot{T}$, kristályosodási front

sebessége- v , hőmérséklet gradiens- G). Meghatároztam az irodalomból ismert látszólagos hőmérséklet gradienst (G_l) és a valódi hőmérséklet gradienst (G_v).

Megvizsgáltam az ötvözőfém (bizmut, ólom) mennyiségét és eloszlását az ötvözött rétegben a technológia paraméterek (ötvözött zónák sorszáma, előtolási sebesség, lézer teljesítmény) függvényében. Mindhárom technológia alkalmazása során, olyan szerkezet alakult ki, amelyben finom lágy ötvöző fém (bizmut, ólom) kiválások találhatók melyek szilárd kenőanyagként szolgálnak. Megállapítottam, hogy a 10 t% ötvözőfém (bizmut, ólom) tartalmat lehetett készíteni porbefűvósos és bevonat beolvasztásos technológiával CO_2 lézer segítségével. Huzaladagolásos technológiával 20 t% ólom tartalmú réteget hoztam létre Nd:YAG lézer alkalmazásával.

Megvizsgáltam a felületi réteg siklási tulajdonságait. Megállapítottam, hogy a felületi rétegbe átlagosan 20 t% mennyiségbe bevitt ólom megfelelő siklási tulajdonságokat biztosít siklócsapágyak részére.

Javaslatot tettem olyan technológia alkalmazására, amellyel a nagy szilárdságú alapanyag felületén homogén, finom, egyenletes eloszlású alumínium-ólom ötvözetet hoz létre siklócsapágy anyagok számára.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

I. Az ötvözött zónák geometriai vizsgálatának eredményei alapján:

1. Összefüggést állapítottam meg az ötvözött zónák mélysége (D) valamint az alkalmazott teljesítmény (P), ötvözött zónák sorszáma (N) és az előtolási sebesség (v_b) között:

$$D = [A_0 + A_1(N-1)] \cdot \left[A_2 \left(\frac{P}{v_b} - A_3 \right) \right]^n$$

Az A_0 , A_1 , , állandók értékét regresszióval határoztam meg, az $A_2=1$ és az A_3 értékét mérések alapján megbecsültem.

2. Kidolgoztam egy olyan módszert, amely biztosítja az állandó vastagságú réteg létrehozását, a teljesítmény folyamatos változtatásával, amely az alábbi egyenlet segítségével fejezhető ki:

$$P = v_b \cdot \left[\frac{\left(\frac{D}{A_0 + A_1(N-1)} \right)^{1/n}}{A_2} + A_3 \right]$$

II. Az irodalomból ismert szerkezeti paraméterek felhasználásával meghatároztam a lehülési sebességet, valamint a lehülési sebesség alapján a kristályosodódási front mozgási sebességét a tócsa mélységének a függvényében. Ezek felhasználásával kiszámítottam a látszólagos hőmérséklet gradienst (G_l) és a valódi hőmérséklet gradienst (G_v). Bebizonyítottam, hogy a valódi hőmérséklet gradiens (G_v) a tócsa aljától a tetejéig folyamatosan csökkent, szemben az irodalomból ismert látszólagos hőmérséklet gradienssel (G_l), amely a tócsa közepén minimumot mutat.

III. Egylépéses (por befúvásos) technológiával 10 t% bizmut tartalmú, kétlépéses (bevonat beolvasztás) technológiával 10 t% ólom tartalmú homogén felületi réteget hoztam létre. Különleges huzaladagolási technikával létrehoztam nagy Pb (~50 t%) tartalmú adalékanyagot, amely felhasználásával több mint 20 t% tartalmú felületi réteget alakítottam ki.

IV. Háromféle lézersugaras felületötvözási technikát felhasználva közel homogén monotektikus felületi réteget hoztam létre, amelyre az alábbiak a jellemzők:

1. a réteg az epitaxiális növekedése miatt fémes kapcsolatban van a nagy szilárdságú hordozó réteggel.
2. a rétegben a zónák sorszámától a koncentráció nem függ,
3. a rétegben mind a teljesítmény, mind az előtolási sebesség növekedésével csökken a koncentráció,
4. a réteg aljától a tetejéig a részecske átlagos mérete nő, összhangban azzal, hogy a lehülési sebesség a zóna aljától a tetejéig csökken.

V. Létrehoztam huzaladagolási technikával nagy szilárdságú alapötvözetben monotektikus ötvözet, amelynek siklási tulajdonsága megfelelő a siklócsapágyak számára.

Summary

Bearings went through continuous evolution during the last years. The most frequent bearer material of the bearings was: steel, Sn-bronze and Al-bronze. In case of some types, e.g. Sn-bronze, there is no need liner of bearing to help slide. In other cases the pillow containing $\sim 95\%$ Sn assures good sliding properties. However these bearing materials have already reached their load ability limit, so need arose to develop new bearing materials.

Taking into account the above things, the aim of my work was to:

- *establish homogeneous, fine, uniformly distributed aluminium – lead alloy and bismuth for bearings on the surface of a high strength material by laser surface treatment technique;*
- *studying the monotectic structure, to make quantitative characterisation of the structure;*
- *find relations between the geometric data of the solidified surface layer, its sliding properties and the parameters of the laser surface treatment technique.*

Experiments were performed by applying the one-step and two-step surface treatment. In case of the one-step techniques (powder blow in) Bi grains were blown into the laser melted surface with Ar with different laser power and laser scan speeds. In case of the other one-step technique Pb was added into the laser melted surface of Al-4Cu-1,5Mg alloy by wire feeding with different laser powers and laser scan speeds. In case of the two-step method (coat melting) lead layer of $\sim 0,1$ mm thick was made on the surface of Al-7Si alloy by galvanization, then they were melted with different laser powers and laser scan speeds.

The depths of the melted/alloyed zones were examined. It was stated, how the size of the zones depends on the technological parameters. Proposal was worked out to establish a layer with constant thickness by continuous changing of the laser power.

Structure of the alloyed surface layer was examined. By the relationships of the literature connections were found between the structure parameters (secondary dendrite arm spacing – λ_2 , cell size – λ_1) and thermal parameters (cooling rate – $\dot{T}_L$, solidification front rate – v , temperature gradient – G). Apparent temperature gradient (G_S) and real temperature gradient (G_R) were determined.

Quantity and distribution of the alloying elements (Bi, Pb) were examined in the layer as a function of the technologic parameters (number of alloyed zones, laser scan speeds, laser power). Applying these three technologies a fine, soft alloy metal precipitates are found and those functional as a solid grease. It was stated that a layer of 10w% (Bi, Pb) could be produced by powder blowing and coat melting techniques by CO₂ laser. A layer of 20 w% Pb content was produce by the wire adding method by applying Nd: YAG laser.

Sliding properties of the surface layers were examined. It was stated that the min. additional app. 20 w% Pb needs to suitable sliding properties.

New technology with a new material alloy was developed to produce fine, homogenous, fine, uniformly distributed aluminium – lead alloy on the surface of bearings.

Felhasznált irodalom

- [1] ASM Handbook Volume 18 *Friction, Lubrication and Wear Technology* 1992.
- [2] U. Ozsarac, F. Findik, M. Durman: *Materials and Design* 28 (2007) pp. 345-350
- [3] Adalet Zeren: *Materials and Design* xxx (2007) xxx-xxx (article in press)
- [4] Dr. Valasek István, *Tribológiai kézikönyv*, Budapest 1996.
- [5] Szabaczky Károly és Szobota György: *Gépelemek II/1.*, Budapest, 1977
- [6] K. Imado, A. Miur, Y. Kido: *Tribology International* 40 (2007) pp. 390-396
- [7] Massalski, Th.B. ed.: *Binari Alloy Phase Diagrams*, Vol. 1., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1986
- [8] G.Chadwick, Br. *J. Appl. Phys.*, 1965,16, p.1095
- [9] R. N. Grugel, T. Lograsso, A. Hellawell; *Metall. Trans A.* 15, 1984, p.119
- [10] H. Cui, J. Guo, Y. Su et al.: *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 16 (2006) pp.783-790
- [11] J. W. Chan; *Metall. Trans A.* 10, 1979, p.119
- [12] J. D. Livingstone and H. E. Cline; *Trans. Metall. Soc. AIME*, 245 (1969) p.351
- [13] B. Vinet, C. Potard, *J.Crystal Growth*, 61, 1983
- [14] A. Kamio, H. Tezuka, S. Kumai, S. Sueda, T. Takahashi: *J. Japan Inst. Metals*, 49, 8 (1985) pp. 677-683
- [15] A. Kamio, S. Kumai, H. Tezuka; *Mat. Sci. Eng. A* 145 (1991) pp.105-121
- [16] L. Ratke: *Materials Science and Engineering, R15*, 1995, pp. 26-347
- [17] M. Zhu et al.: *Wear*, 9198 (2002) pp. 726-732
- [18] M. L. MacKay; *Met. Progr.* 111 (1977) p.32
- [19] K. Nishiyama et al: *Japan Soc. Power Metall.* (1993) p. 645
- [20] D. P. Howe, A. A. Torrance, J. D. Wialliams; *Mat. Sci Tech.* Vol.7 (1991) pp. 330-333
- [21] M. Zhu et. al; *Wear*, 242 (2000) pp. 47-53
- [22] S. Mohan, V. Agarwala, S. Ray; *Mater. Trans. JIM* 33 (1992) p. 1057
- [23] L. Ratke, S. Diefenbach; *Materials Science and Engineering.* Vol. R15 (1995)
- [24] S. K. Srivastava, S. Mohan, V. Agarwala, R. C. Agarwala; *Metall. Mater. Trans. A* 25A (1994) pp. 851-856
- [25] J. Z. Zhao, S. Drees, L. Ratke; *Mat. Sci. Eng. A* 282 (2000) pp. 263-265
- [26] T. Berrenger, P. R. Sahm; *Z. Metallk.* 87 (1996) 3 p. 188
- [27] R. Gray, S. Mohan, V. Agarwala, R.C. Agarwala; *Z. Metallk.* 84 (1993) p. 723
- [28] S. Mohan, V. Agarwala, S. Ray; *Mater. Trans. JIM* 33 (1992) pp. 1055-1057
- [29] V. Agarwala et al.; *Mat. Sci. Eng. A* 327 (2002) pp. 186-202
- [30] G.B. Rudrakshi, et al: *Mat. Sci. Eng. A* 383 (2004) pp. 30-38
- [31] L. Ratke: *Mat. Sci Eng. A* 203 (1995) pp. 399-407
- [32] L. Ratke; *Adv. Space Res.* Vol 16. (1995) pp. 895-899
- [33] Buza Gábor: *Természettudományi Közlöny* 128. 1997. 517-520 old.
- [34] W.M. Steen: *Laser Materials Processing*, 2nd Edition, Springer, 1998
- [35] D. S. Gnanatmanu: *Laser Surface Treatment*, Prof. Conf. Washington D.S. ASM, 1979, p.177.
- [36] Kocsiné dr. Baán Mária: *Lézeres felületkezelések*, kézirat 1999
- [37] Buza Gábor-Kálazi Zoltán: *Bányászati és Kohászati Lapok*, Kohászat 128. 1995. szept. 361-365 old

- [38] Johan Meijer: *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) pp. 2–17
- [39] A.P. Mackwooda, R.C. Crafer: *Optics & Laser Technology* 37 (2005) pp. 99–115
- [40] H. Pearson, H. C. Man: *Laser und optoelektronik* 3/1985. Springer-Verlag, pp. 330-343
- [41] D. Müller, J. Domes und R. W. Bergmann: *HTM B47*. 1992/2 pp. 123-130
- [42] Pozsgai Imre: *A pásztázó elektronmikroszkópia*, Bp. 1994. 1-15 old.
- [43] Gácsi Z. et al.: *Sztereológia és képelemzés, Egyetemi Tankönyv*, 2001. 135-38 old.
- [44] Kaptay Gy.: Fémolvadék széterülésének feltétele fémolvadékon monotektikus rendszerekben, *Privát közlés*
- [45] G. Kaptay: *Materials Science Forum* Vols. 537-538 (2007) pp. 527-532
- [46] M. Svéda, A. Roósz, G. Buza, L. Kuzsella: *Materials Science Forum* Vols. 473-474 (2005) pp. 471-476
- [47] G. Woo, H. S. Cho: *Proc Inst Mechanical Engineers* Vol 213 Part B, 1999
- [48] M. Svéda, A. Roósz, G. Buza: *Materials Science Forum* Vols. 508-509 (2006) pp. 527-532
- [49] Svéda Mária, Roósz András, Buza Gábor: *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka VIII*, (2003) pp. 293-297
- [50] Svéda Mária, Roósz András, Buza Gábor: *A Miskolci Egyetem Közleményei, Anyag és Kohómérnöki Tudományok*, Miskolc, 30. kötet (2002) pp. 55-61
- [51] J. An et al.: *Tribology International* 36 (2003) pp. 25-34
- [52] J. An, et al.: *Mat. Characterization* 47 (2001) pp. 291-297
- [53] Equilibrium Department of Millennium Alloy Systems Published – The Aluminum Development Association, London, 1961
- [54] S. Sarkar, P. Mohan Raj, S. Chakraborty et al.: *Journal of Materials Science* 38 (2003) pp. 155-164
- [55] G. Phanikumar, P. Dutta, R. Galun, K. Chattopadhyay, *Materials Science and Engineering A* 371 (2004) pp. 91-102
- [56] J. Gröbner, D. Mirkovic, R. Schmid-Fetzer: *Acta Materialia* 53 (2005) pp. 3271-3280
- [57] H. Yasuda, I. Ohnaka, S. Fujimoto et al.: *Scripta Materialia* 54 (2006) pp. 527-532
- [58] L. Ratke, A. Müller: *Scripta Materialia* 54 (2006) pp. 1217-1220
- [59] Yu-jiang Xie, Mao-cai Wang: *Applied Surface Science*, (2007) accepted manuscript
- [60] B. L. Mordike: *Laser Surface Treatment*, DGM Informationsgesellschaft mbH, Verlag, 1992, pp. 229-234
- [61] L. Ratke, A. Müller: *Scripta Materialia*, 54 (2006) pp. 1217-1220
- [62] R. N. Grugel: *Materials Characterization* 28, 1992, pp. 213-219.
- [63] D. Bouchard, J. S. Kiraldy: *Metallurgical and Materials Transaction B*, 1997, 28B, pp. 651-663
- [64] J. D. Hunt: *Solidification and Casting of Metals*, The Met. Soc., London, 1979. p. 1
- [65] R. Trivedi: *Metallurgical Transaction* 15A (1984) p. 977.
- [66] Kuti I, Roósz A: *Materials Science Forum*, 329-330 (2000) pp. 49-55.
- [67] B. A. Richardson, D. H. Kirkwood: *Solidification and Cast of Metals*, 1977, pp. 44-52
- [68] S. C. Huang, M. E. Glicksman: *Acta Metall.*, 29, 1981, pp. 701-715

M E L L É K L E T

M E L L É K L E T

T A R T A L O M J E G Y Z É K E

1. Mérési eredmények.....	107
2. Számolások	114
2.1. Al-7Si-10Bi ötvözet	114
2.1.1. Al-7Si-10Bi mélysége.....	114
2.1.2. Al-7Si-10Bi ötvözetnél q érték meghatározása	114
2.1.3. Al-7Si-10Bi ötvözet állandó vastagságú réteg létrehozásához szükséges teljesítmény	114
2.1.4. A modellből kapott termikus eredmények Al-7Si ötvözetre	116
2.1.5. Al-7Si-10Bi szekunder dendritág távolság, lehülési sebesség, látszólagos hőmérséklet gradiens, valódi hőmérséklet gradiens	117
2.1.6. Al-7Si-10Bi szekunder dendritág távolság, θ szög, tényleges sebesség ...	118
2.2. Al-7Si-10Pb ötvözet	119
2.2.1. Al-7Si-10Pb mélység	119
2.2.2. Al-7Si-10Pb ötvözetnél q érték meghatározása	119
2.2.3. Al-7Si-10Pb ötvözet állandó vastagságú réteg létrehozásához szükséges teljesítmény	120
2.2.4. Al-7Si-10Pb szekunder dendritág távolság, lehülési sebesség, látszólagos hőmérséklet gradiens, valódi hőmérséklet gradiens	122
2.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet	123
2.3.1. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb mélység.....	123
2.3.2. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözetnél q érték meghatározása.....	123
2.3.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet állandó vastagságú réteg létrehozásához szükséges teljesítmény	123
2.3.4. A modellből kapott termikus eredmények Al-4Cu ötvözetre	124
2.3.5. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb cella méret, lehülési sebesség, látszólagos hőmérséklet gradiens, valódi hőmérséklet gradiens	127
2.3.6. EDS elemzés	127
3. Alumínium galvanizálása	128

1. Mérési eredmények

7. táblázat Az ötvözött zónák geometriai adatai

Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Mélység (mm)								Szélesség (mm)								T (mm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
I-1	2	300	0,84	0,88	0,92	0,96	1,04	-	-	-	1,09	1,12	1,16	1,19	1,22	-	-	-	1,97
I-2	2,5	300	0,87	0,92	0,98	1,01	1,06	-	-	-	1,10	1,14	1,17	1,22	1,28	-	-	-	2,11
I-3	3	300	0,92	1,01	1,02	1,04	1,08	-	-	-	1,12	1,16	1,19	1,24	1,31	-	-	-	2,24
I-4	3,5	300	0,94	1,01	1,06	1,12	1,14	-	-	-	1,15	1,20	1,24	1,33	1,39	-	-	-	2,35
I-5	2	600	0,82	0,83	0,84	0,85	0,88	-	-	-	1,03	1,09	1,11	1,16	1,19	-	-	-	1,59
I-6	2,5	600	0,84	0,86	0,89	0,91	0,94	-	-	-	1,06	1,10	1,17	1,22	1,24	-	-	-	1,81
I-7	3	600	0,89	0,91	0,93	0,94	1,02	-	-	-	1,07	1,11	1,19	1,22	1,25	-	-	-	1,97
I-8	3,5	600	0,92	0,94	0,96	0,98	1,04	-	-	-	1,13	1,13	1,21	1,23	1,28	-	-	-	2,06
I-9	2	900	0,68	0,72	0,74	0,76	0,79	-	-	-	0,99	1,04	1,06	1,08	1,12	-	-	-	1,39
I-10	2,5	900	0,71	0,74	0,76	0,78	0,81	-	-	-	1,03	1,06	1,09	1,13	1,15	-	-	-	1,50
I-11	3	900	0,76	0,78	0,79	0,81	0,83	-	-	-	1,09	1,12	1,16	1,18	1,21	-	-	-	1,58
I-12	3,5	900	0,81	0,84	0,88	0,89	0,91	-	-	-	1,11	1,16	1,22	1,26	1,32	-	-	-	1,89
II-1	2	300	0,94	0,99	1,05	1,17	1,19	1,23	1,24	1,29	1,11	1,12	1,15	1,20	1,23	1,27	1,29	1,33	2,56
II-2	2,5	300	0,95	0,99	1,05	1,16	1,21	1,23	1,25	1,31	1,12	1,13	1,16	1,21	1,25	1,28	1,30	1,35	2,70
II-3	3	300	0,96	1,00	1,07	1,18	1,23	1,25	1,26	1,35	1,13	1,16	1,18	1,21	1,25	1,28	1,30	1,38	2,83
II-4	3,5	300	0,96	1,00	1,07	1,18	1,23	1,25	1,26	1,36	1,14	1,18	1,19	1,22	1,27	1,29	1,31	1,39	2,92
II-5	2	600	0,85	0,95	0,99	1,03	1,05	1,07	1,10	1,22	1,03	1,05	1,07	1,11	1,15	1,21	1,25	1,29	2,47
II-6	2,5	600	0,89	0,98	1,01	1,05	1,08	1,11	1,13	1,25	1,06	1,09	1,09	1,12	1,18	1,23	1,29	1,33	2,56
II-7	3	600	0,89	0,95	1,01	1,08	1,11	1,14	1,16	1,29	1,07	1,09	1,11	1,14	1,19	1,24	1,32	1,35	2,70
II-8	3,5	600	0,91	0,98	1,03	1,10	1,14	1,18	1,21	1,32	1,08	1,11	1,12	1,19	1,21	1,26	1,27	1,36	2,78
II-9	2	900	0,75	0,91	0,95	0,97	0,98	0,99	1,01	1,18	0,98	1,01	1,04	1,09	1,09	1,13	1,16	1,18	2,25
II-10	2,5	900	0,79	0,93	0,96	0,99	0,99	1,01	1,03	1,23	0,99	1,03	1,05	1,06	1,09	1,11	1,18	1,23	2,31
II-11	3	900	0,83	0,96	0,98	0,99	1,00	1,03	1,06	1,26	1,01	1,03	1,05	1,08	1,11	1,15	1,20	1,26	2,39
II-12	3,5	900	0,84	0,93	1,00	1,01	1,03	1,05	1,09	1,27	1,01	1,03	1,06	1,09	1,13	1,18	1,21	1,27	2,56
III-2	2	600	0,86	0,95	0,98	1,02	1,05	1,07	1,12	1,24	1,02	1,05	1,07	1,11	1,15	1,21	1,25	1,31	
III-6	2,5	600	0,89	0,98	1,01	1,05	1,08	1,11	1,13	1,26	1,05	1,09	1,09	1,12	1,18	1,23	1,29	1,34	
III-10	3	600	0,90	0,96	1,01	1,08	1,11	1,14	1,16	1,28	1,08	1,09	1,11	1,14	1,19	1,24	1,32	1,36	
III-14	3,5	600	0,91	0,99	1,03	1,10	1,14	1,18	1,21	1,33	1,09	1,11	1,12	1,19	1,21	1,26	1,27	1,39	

Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Mélység (mm)								Szélesség (mm)							
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
V-1	1,85	1800	1,01	1,03	1,05	1,08	1,12	1,15	1,18	1,22	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20	1,24
V-3	2,04	1800	1,02	1,04	1,07	1,10	1,15	1,18	1,21	1,23	1,11	1,12	1,13	1,16	1,18	1,19	1,20	1,25
V-5	2,22	1800	1,03	1,05	1,07	1,11	1,17	1,19	1,22	1,26	1,12	1,12	1,14	1,16	1,18	1,19	1,21	1,26
V-7	2,41	1800	1,04	1,07	1,09	1,13	1,18	1,21	1,24	1,28	1,13	1,13	1,14	1,16	1,19	1,20	1,21	1,26
VI-9	2,0	1500	1,08	1,12	1,14	1,16	1,19	1,22	1,26	1,32	1,17	1,19	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,31
VI-11	2,4	1500	1,11	1,15	1,16	1,19	1,21	1,23	1,28	1,34	1,19	1,21	1,23	1,25	1,27	1,28	1,29	1,32
VI-13	2,0	1800	1,02	1,04	1,08	1,11	1,15	1,18	1,21	1,25	1,11	1,12	1,14	1,15	1,18	1,19	1,20	1,25
VI-15	2,4	1800	1,04	1,07	1,10	1,14	1,19	1,21	1,24	1,27	1,13	1,13	1,14	1,16	1,19	1,20	1,21	1,26
VI-17	2,0	2100	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08	1,15	1,08	1,10	1,12	1,14	1,15	1,16	1,18	1,22
VI-19	2,4	2100	0,99	1,03	1,05	1,09	1,10	1,12	1,13	1,18	1,09	1,12	1,15	1,17	1,18	1,18	1,19	1,24

8. táblázat Elvégzett kísérletek kvantitatív elemzésének eredményei

Al-7Si-10Bi

I-I minta 2 kW, 300 mm/s

	Ød1 (µm)	Ød2 (µm)	Ød3 (µm)	ØD1 (µm)	ØD2 (µm)	ØD3 (µm)	W _{Bi1} [t%]	W _{Bi2} [t%]	W _{Bi3} [t%]
1.zóna	1,21	1,26	1,25	10,67	10,21	9,59	11,88	11,57	11,48
2.zóna	1,23	1,25	1,26	10,68	10,22	9,63	11,91	11,59	11,5
3.zóna	1,23	1,28	1,29	10,69	10,2	9,66	11,93	11,62	11,51
4.zóna	1,22	1,29	1,3	10,69	10,23	9,68	11,93	11,62	11,53
5.zóna	1,24	1,29	1,31	10,71	10,26	9,71	11,98	11,64	11,55
6.zóna	1,23	1,3	1,32	10,74	10,28	9,75	11,99	11,65	11,56
7.zóna	1,25	1,32	1,32	10,75	10,28	9,76	12,01	11,67	11,59
8.zóna	1,25	1,31	1,32	10,78	10,31	9,79	12,02	11,69	11,61

Al-7Si-10Bi

3.ötvözött zóna													
Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Ød1 [µm]	Ød2 [µm]	Ød3 [µm]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	W _{Bi1} [t%]	W _{Bi2} [t%]	W _{Bi3} [t%]	Ø d-átlag [µm]	ØD-átlag [µm]
I-1	2	300	1,23	1,28	1,29	10,69	10,2	9,66	11,93	11,62	11,51	1,27	10,18
I-2	2,5	300	1,21	1,24	1,25	10,12	9,86	9,26	11,72	11,42	11,43	1,23	9,75
I-3	3	300	1,18	1,21	1,23	9,98	9,36	8,99	11,64	11,35	11,31	1,21	9,44
I-4	3,5	300	1,17	1,20	1,22	9,76	9,18	8,22	11,37	11,23	11,27	1,20	9,05
I-5	2	600	1,19	1,19	1,21	9,12	8,89	8,84	11,23	11,19	11,12	1,20	8,95
I-6	2,5	600	1,15	1,16	1,17	8,98	8,84	8,65	11,14	11,12	11,09	1,16	8,82
I-7	3	600	1,14	1,14	1,15	8,89	8,67	8,66	11,09	11,08	11,05	1,14	8,74
I-8	3,5	600	1,11	1,12	1,13	8,97	8,65	8,33	11,03	11,03	11,01	1,12	8,65
I-9	2	900	1,08	1,09	1,08	8,69	8,43	8,23	10,97	10,96	10,94	1,08	8,45
I-10	2,5	900	1,05	1,07	1,08	8,48	8,29	8,19	10,87	10,86	10,78	1,07	8,32
I-11	3	900	1,04	1,06	1,07	8,23	8,21	8,16	10,68	10,56	10,46	1,06	8,20
I-12	3,5	900	1,02	1,05	1,06	8,12	8,06	8,01	10,54	10,36	10,32	1,04	8,06

5.ötvözött zóna													
Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Ød1 [µm]	Ød2 [µm]	Ød3 [µm]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	W _{Bi1} [t%]	W _{Bi2} [t%]	W _{Bi3} [t%]	Ød-átlag [µm]	ØD-átlag [µm]
I-1	2	300	1,24	1,29	1,31	10,71	10,26	9,71	11,98	11,64	11,55	1,28	10,23
I-2	2,5	300	1,24	1,26	1,28	10,32	9,96	9,26	11,72	11,42	11,43	1,26	9,85
I-3	3	300	1,22	1,25	1,28	10,12	9,46	8,99	11,64	11,35	11,31	1,25	9,52
I-4	3,5	300	1,21	1,24	1,25	9,89	9,24	8,22	11,37	11,23	11,27	1,23	9,12
I-5	2	600	1,2	1,24	1,22	9,54	8,96	8,84	11,23	11,19	11,12	1,22	9,11
I-6	2,5	600	1,19	1,22	1,23	9,33	8,84	8,65	11,14	11,12	11,09	1,21	8,94
I-7	3	600	1,17	1,19	1,2	9,19	8,68	8,66	11,09	11,08	11,05	1,19	8,84
I-8	3,5	600	1,15	1,17	1,19	9,02	8,61	8,33	11,03	11,03	11,01	1,17	8,65
I-9	2	900	1,16	1,16	1,18	8,98	8,48	8,23	10,97	10,96	10,94	1,17	8,56
I-10	2,5	900	1,14	1,16	1,17	8,67	8,34	8,19	10,87	10,86	10,78	1,16	8,40
I-11	3	900	1,11	1,14	1,13	8,45	8,27	8,16	10,68	10,56	10,46	1,13	8,29
I-12	3,5	900	1,08	1,12	1,11	8,33	8,16	8,01	10,54	10,36	10,32	1,10	8,17

Al-7Si-10Pb

3. ötvözött zóna									
Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	W _{Pb1} [t%]	W _{Pb2} [t%]	W _{Pb3} [t%]	Ød-átlag (µm)
II-1	2	300	5,13	5,06	4,91	10,02	9,87	9,37	5,03
II-2	2,5	300	4,95	4,94	4,88	9,85	9,76	9,24	4,92
II-3	3	300	4,53	4,39	4,26	9,77	9,73	9,19	4,39
II-4	3,5	300	4,39	4,38	4,24	9,83	9,63	9,09	4,34

II-5	2	600	4,83	4,74	4,62	9,74	9,76	9,25	4,73
II-6	2,5	600	4,39	4,26	4,06	9,69	9,68	8,96	4,24
II-7	3	600	4,17	4,02	3,89	9,67	9,64	8,82	4,03
II-8	3,5	600	3,73	3,62	3,56	9,52	9,62	8,74	3,64
II-9	2	900	4,19	4,09	3,83	9,47	9,35	8,86	4,04
II-10	2,5	900	3,93	3,83	3,62	9,37	9,17	8,74	3,79
II-11	3	900	3,68	3,54	3,46	9,14	9,04	8,62	3,56
II-12	3,5	900	3,58	3,46	3,36	8,76	8,86	8,59	3,47

5. ötvöztött zóna									
Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V [mm/s]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	W_{Pb1} [t%]	W_{Pb2} [t%]	W_{Pb3} [t%]	Ød-átlag (µm)
II-1	2	300	5,33	5,26	5,11	10,27	10,12	9,62	5,23
II-2	2,5	300	5,15	5,14	5,08	10,12	10,01	9,49	5,12
II-3	3	300	4,73	4,59	4,46	10,02	9,98	9,44	4,59
II-4	3,5	300	4,59	4,58	4,44	10,08	9,88	9,34	4,54
II-5	2	600	5,03	4,94	4,82	9,99	10,01	9,52	4,93
II-6	2,5	600	4,59	4,46	4,26	9,94	9,93	9,21	4,44
II-7	3	600	4,37	4,22	4,09	9,92	9,89	9,07	4,23
II-8	3,5	600	3,93	3,82	3,76	9,77	9,87	8,99	3,84
II-9	2	900	4,39	4,29	4,03	9,72	9,61	9,11	4,24
II-10	2,5	900	4,13	4,03	3,82	9,62	9,42	8,99	3,99
II-11	3	900	3,88	3,74	3,66	9,39	9,29	8,87	3,76
II-12	3,5	900	3,78	3,66	3,56	9,01	9,11	8,84	3,67

Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Ød1 [µm]	Ød2 [µm]	Ød3 [µm]	WPb1 [t%]	WPb2 [t%]	WPb3 [t%]	Súrlódási együttható
III-1	2	600	8,31	5,32	3,64	10,67	8,86	7,22	0,46
III-2	2,5	600	8,23	4,87	3,56	9,36	7,56	6,21	0,48
III-3	3	600	8,12	4,36	3,44	8,95	7,36	5,86	0,50
III-4	3,5	600	8,06	4,22	3,02	7,02	6,75	5,25	0,51

Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Ød1 [µm]	Ød2 [µm]	Ød3 [µm]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	WPb1 [t%]	WPb2 [t%]	WPb3 [t%]
V-1	1,50	1800	0,83	0,79	0,78	8,64	7,56	5,48	19,68	10,98	10,68
V-3	1,65	1800	0,79	0,76	0,75	8,02	7,37	5,36	16,36	11,96	10,89
V-5	1,85	1800	0,75	0,73	0,72	7,89	6,86	5,28	14,48	13,64	12,36
V-7	2,04	1800	0,71	0,69	0,69	7,89	6,61	5,11	11,26	10,29	10,01

Al-4Cu-1.5Mg-20Pb

3.ötvözött zóna														
Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Ød1 [µm]	Ød2 [µm]	Ød3 [µm]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	WPb1 [t%]	WPb2 [t%]	WPb3 [t%]	Súrlódási együttható	Ød-átlag (µm)	ØD-átlag (µm)
VI-9	2	1500	1,05	0,95	0,81	9,56	8,26	6,51	24,89	21,76	18,89	0,21	0,94	8,11
VI-11	2,4	1500	1,02	0,81	0,71	8,63	7,96	6,48	23,46	21,36	18,68	0,23	0,85	7,69
VI-13	2	1800	0,83	0,75	0,69	7,98	7,39	6,43	22,68	20,56	17,98	0,23	0,76	7,27
VI-15	2,4	1800	0,79	0,69	0,65	7,86	6,98	6,36	22,46	20,22	17,65	0,25	0,71	7,07
VI-17	2	2100	0,71	0,66	0,61	7,74	6,85	6,29	21,78	19,65	17,12	0,26	0,66	6,96
VI-19	2,4	2100	0,64	0,61	0,58	7,65	6,69	6,12	21,68	19,86	17,03	0,27	0,61	6,82

5.ötvözött zóna														
Próba- darab jele	Lézer teljesítmény [kW]	V _b [mm/min]	Ød1 [µm]	Ød2 [µm]	Ød3 [µm]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	WPb1 [t%]	WPb2 [t%]	WPb3 [t%]	Súrlódási együttható	Ød-átlag (µm)	ØD-átlag (µm)
VI-9	2	1500	1,06	0,99	0,84	9,59	8,31	6,54	24,92	21,79	18,92	0,19	0,96	8,15
VI-11	2,4	1500	1,05	0,85	0,74	8,66	7,99	6,51	23,49	21,39	18,72	0,20	0,88	7,72
VI-13	2	1800	0,86	0,79	0,72	8,01	7,44	6,46	22,71	20,59	18,01	0,21	0,79	7,30
VI-15	2,4	1800	0,82	0,74	0,68	7,89	7,03	6,39	22,49	20,25	17,68	0,23	0,75	7,10
VI-17	2	2100	0,74	0,71	0,64	7,77	6,89	6,32	21,81	19,68	17,14	0,25	0,70	6,99
VI-19	2,4	2100	0,68	0,64	0,61	7,68	6,72	6,15	21,72	19,89	17,05	0,27	0,64	6,85

Al-4Cu-1.5Mg-20Pb
VI-9 minta 2 kW 1500 mm/perc

	Ød1 [µm]	Ød2 [µm]	Ød3 [µm]	ØD1 [µm]	ØD2 [µm]	ØD3 [µm]	W _{Pb1} [t%]	W _{Pb2} [t%]	W _{Pb3} [t%]
1.zóna	1,14	1,11	1,1	9,57	8,21	6,59	24,88	21,74	18,91
2.zóna	1,17	1,14	1,12	9,58	8,22	6,63	24,91	21,77	18,89
3.zóna	1,15	1,15	1,09	9,56	8,26	6,61	24,89	21,76	18,89
4.zóna	1,22	1,19	1,11	9,59	8,23	6,68	24,93	21,79	18,92
5.zóna	1,17	1,17	1,11	9,59	8,31	6,64	24,92	21,79	18,92
6.zóna	1,19	1,15	1,13	9,64	8,28	6,75	24,99	21,81	18,93
7.zóna	1,21	1,16	1,14	9,65	8,28	6,66	25,01	21,79	18,89
8.zóna	1,21	1,18	1,12	9,68	8,31	6,69	25,02	21,81	18,92

2. Számolások

2.1. Al-7Si-10Bi ötvözet

2.1.1. Al-7Si-10Bi mélysége

kW	v _b	P/Vb	D ₀	(P/vb-0,001)
2	300	0,006667	0,84	0,005667
2,5	300	0,008333	0,87	0,007333
3	300	0,010101	0,92	0,009100
3,5	300	0,011667	0,94	0,010667
2	600	0,003333	0,82	0,002333
2,5	600	0,004167	0,84	0,003167
3	600	0,005000	0,92	0,004121
3,5	600	0,005833	0,92	0,004833
2	900	0,002222	0,71	0,001222
2,5	900	0,002778	0,71	0,001778
3	900	0,003333	0,76	0,002333
3,5	900	0,003889	0,81	0,002889

2.1.2. Al-7Si-10Bi ötvözetnél q érték meghatározása

Mért D	kW	N-1	v	q
0,88	2	1	300	0,006767
0,92	2	2	300	0,00686
0,96	2	3	300	0,006945
1,04	2	4	300	0,008637
0,87	2,5	0	300	0,008095
0,92	2,5	1	300	0,00859
0,98	2,5	2	300	0,009481
1,01	2,5	3	300	0,009042
1,06	2,5	4	300	0,009444
0,92	3	0	300	0,010476
1,01	3	1	300	0,012691
1,02	3	2	300	0,011228
1,04	3	3	300	0,010301
1,08	3	4	300	0,010252
0,94	3,5	0	300	0,011429
1,01	3,5	1	300	0,012691
1,06	3,5	2	300	0,012976
1,12	3,5	3	300	0,013658
1,14	3,5	4	300	0,012673

2.1.3. Al-7Si-10Bi ötvözet állandó vastagságú réteg létrehozásához szükséges teljesítmény

Mélység	N-1	V _b	P
0,85	0	300	1,606406
0,85	1	300	1,216839
0,85	2	300	0,953464
0,85	3	300	0,772392

0,85	4	300	0,645973
0,85	5	300	0,55645
0,85	6	300	0,492219
0,85	7	300	0,445571
0,85	8	300	0,411309
0,9	0	300	2,335441
0,9	1	300	1,728477
0,9	2	300	1,318127
0,9	3	300	1,036008
0,9	4	300	0,839041
0,9	5	300	0,69956
0,9	6	300	0,599485
0,9	7	300	0,526807
0,9	8	300	0,473425
0,9	4	300	0,839041
0,8	0	600	2,232487
0,8	1	600	1,745683
0,8	2	600	1,416569
0,8	3	600	1,190302
0,8	4	600	1,032328
0,85	0	600	3,212813
0,85	1	600	2,433678
0,85	2	600	1,906928
0,85	3	600	1,544784
0,85	4	600	1,291945
0,9	0	600	3,920882
0,9	1	600	3,456953
0,9	2	600	2,636254
0,9	3	600	2,072017
0,9	4	600	1,678082
0,9	200	600	0,6
0,7	0	900	1,769045
0,7	1	900	1,509898
0,7	2	900	1,334696
0,7	3	900	1,214244
0,7	4	900	1,130147
0,75	0	900	2,38421
0,75	1	900	1,941622
0,75	2	900	1,642401
0,75	3	900	1,436685
0,75	4	900	1,29306
0,8	0	900	3,34873
0,8	1	900	2,618524
0,8	2	900	2,124854
0,8	3	900	1,785453
0,8	4	900	1,548492
0,8	200	900	0,9

2.1.4. A modellből kapott termikus eredmények Al-7Si ötvözetre

v (m/s)	G (K/m)	$\dot{T}$ (K/s)	λ_1 (μm)	λ_2 (μm)
0,005	100000	500	13,023	5,098
0,010	100000	1000	10,806	4,004
0,015	100000	1500	9,690	3,569
0,020	100000	2000	8,973	3,285
0,025	100000	2500	8,458	3,077
0,030	100000	3000	8,064	2,917
0,035	100000	3500	7,748	2,787
0,040	100000	4000	7,487	2,678
0,045	100000	4500	7,267	2,586
0,050	100000	5000	7,077	2,506
0,055	100000	5500	6,912	2,436
0,060	100000	6000	6,766	2,373
0,005	200000	1000	9,163	3,575
0,010	200000	2000	7,622	3,112
0,015	200000	3000	6,840	2,658
0,020	200000	4000	6,336	2,472
0,025	200000	5000	5,974	2,332
0,030	200000	6000	5,697	2,221
0,035	200000	7000	5,474	2,129
0,040	200000	8000	5,290	2,053
0,045	200000	9000	5,135	1,987
0,050	200000	10000	5,002	1,930
0,055	200000	11000	4,885	1,879
0,060	200000	12000	4,782	1,833
0,005	300000	1500	7,444	2,515
0,010	300000	3000	6,207	2,482
0,015	300000	4500	5,575	2,316
0,020	300000	6000	5,167	2,182
0,025	300000	7500	4,873	1,944
0,030	300000	9000	4,647	1,861
0,035	300000	10500	4,466	1,793
0,040	300000	12000	4,317	1,734
0,045	300000	13500	4,190	1,683
0,050	300000	15000	4,082	1,637
0,055	300000	16500	3,987	1,597
0,060	300000	18000	3,903	1,561
0,005	400000	2000	6,414	
0,010	400000	4000	5,361	1,975
0,015	400000	6000	4,819	1,945
0,020	400000	8000	4,469	1,870
0,025	400000	10000	4,215	1,799
0,030	400000	12000	4,021	1,735
0,035	400000	14000	3,865	1,568
0,040	400000	16000	3,736	1,522
0,045	400000	18000	3,627	1,481
0,050	400000	20000	3,533	1,445
0,055	400000	22000	3,451	1,412
0,060	400000	24000	3,378	1,383

2.1.5. Al-7Si-10Bi szekunder dendritág távolság, lehülési sebesség, látszólagos hőmérséklet gradiens, valódi hőmérséklet gradiens

	Szekunder dendrit ág távolság (□m)			G*v (K/s)		
	teteje-0,2mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm	teteje-0,2mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm
I-1 (2kW, 300 mm/perc)	1,99	2,19	1,91	5674,917	4486,893	6275,776
I-2 (2,5kW, 300 mm/perc)	1,99	2,16	1,91	5674,917	4641,291	6275,776
I-3 (3kW, 300 mm/perc)	1,82	2,10	1,87	7064,519	4973,330	6610,173
I-4 (3,5kW, 300 mm/perc)	1,81	2,08	1,85	7160,637	5091,443	6786,831
I-5 (2kW, 600 mm/perc)	1,71	1,85	1,81	8231,755	6786,831	7160,637
I-6 (2,5kW, 600 mm/perc)	1,60	1,70	1,67	9689,901	8351,032	8723,809
I-7 (3kW, 600 mm/perc)	1,52	1,65	1,62	10989,009	8985,462	9399,105
I-8 (3,5kW, 600 mm/perc)	1,38	1,56	1,49	13927,988	10310,712	11539,661
I-9 (2kW, 900 mm/perc)	1,32	1,45	1,34	15532,442	12336,180	14969,970
I-10 (2,5kW, 900 mm/perc)	1,30	1,39	1,33	16125,126	13683,498	15247,556
I-11 (3kW, 900 mm/perc)	1,20	1,32	1,22	19623,075	15532,442	18843,412
I-12 (3,5kW, 900 mm/perc)	1,13	1,23	1,17	22740,059	18469,865	20880,282

	G _l (K/mm)			G _r (K/mm)		
	teteje-0,2mm	teteje-0,2mm	teteje-0,2mm	teteje-0,2mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm
I-1 (2kW, 300 mm/perc)	1134,983	1134,983	1134,983	3685,011	1693,167	1423,078
I-2 (2,5kW, 300 mm/perc)	1134,983	1134,983	1134,983	3685,011	1751,431	1423,078
I-3 (3kW, 300 mm/perc)	1412,904	1412,904	1412,904	4587,35	1876,728	1498,905
I-4 (3,5kW, 300 mm/perc)	1432,127	1432,127	1432,127	4649,765	1921,299	1538,964
I-5 (2kW, 600 mm/perc)	823,175	823,175	823,175	2672,648	1280,534	811,863
I-6 (2,5kW, 600 mm/perc)	968,990	968,990	968,990	3146,072	1575,666	989,094
I-7 (3kW, 600 mm/perc)	1098,901	1098,901	1098,901	3567,86	1695,371	1065,658
I-8 (3,5kW, 600 mm/perc)	1392,799	1392,799	1392,799	4522,074	1945,417	1308,352
I-9 (2kW, 900 mm/perc)	1035,496	1035,496	1035,496	3362,001	1551,721	1131,517
I-10 (2,5kW, 900 mm/perc)	1075,008	1075,008	1075,008	3490,287	1721,195	1152,499
I-11 (3kW, 900 mm/perc)	1308,205	1308,205	1308,205	4247,419	1953,766	1424,294
I-12 (3,5kW, 900 mm/perc)	1516,004	1516,004	1516,004	4922,091	2323,254	1578,253

2.1.6. Al-7Si-10Bi szekunder dendritág távolság, θ szög, tényleges sebesség

Próbadarab jele				Átlag	
I-1	I-2	I-3	I-4	θ	V (mm/s)
80	83	83	84	82,00	0,70
71	72	72	74	71,67	1,55
56	58	60	60	58,00	2,65
28	27	27	29	27,33	4,41
4	5	5	5	4,67	4,98

Mélység (mm)	V (mm/s)					
	5	10	15	25	30	35
0	0,70	1,39	2,09	3,48	4,17	4,87
0,2	1,55	3,09	4,64	7,73	9,27	10,82
0,4	2,65	5,30	7,95	13,25	15,90	18,55
0,8	4,41	8,83	13,24	22,07	26,49	30,90
1	4,98	9,96	14,94	24,91	29,89	34,87

2.2. Al-7Si-10Pb ötvözet

2.2.1. Al-7Si-10Pb mélység

kW	v _b	P/Vb	D ₀	(P/vb-0,001)
2	300	0,006667	0,91	0,005667
2,5	300	0,008333	0,94	0,007333
3	300	0,010101	0,97	0,009000
3,5	300	0,011667	0,99	0,010667
2	600	0,003333	0,87	0,002333
2,5	600	0,004167	0,89	0,003167
3	600	0,005000	0,92	0,004010
3,5	600	0,005833	0,94	0,004833
2	900	0,002222	0,81	0,001222
2,5	900	0,002778	0,83	0,001778
3	900	0,003333	0,84	0,002333
3,5	900	0,003889	0,87	0,002889

2.2.2. Al-7Si-10Pb ötvözetnél q érték meghatározása

Mért D	kW	N-1	v	q
1,05	2	2	300	0,234493
1,17	2	3	300	0,427235
1,19	2	4	300	0,459358
1,21	2	5	300	0,491482
1,23	2	6	300	0,523606
1,24	2	7	300	0,539668
0,99	2,5	1	300	0,101008
1,05	2,5	2	300	0,195129
1,16	2,5	3	300	0,367686
1,21	2,5	4	300	0,44612
1,23	2,5	5	300	0,477494
1,25	2,5	6	300	0,508868
1,31	2,5	7	300	0,60299
1,00	3	1	300	0,087541
1,07	3	2	300	0,195309
1,18	3	3	300	0,364659
1,23	3	4	300	0,441636
1,25	3	5	300	0,472427
1,26	3	6	300	0,487822
1,35	3	7	300	0,626381
1,00	3,5	1	300	0,063767
1,07	3,5	2	300	0,169871
1,18	3,5	3	300	0,336606
1,23	3,5	4	300	0,412394
1,25	3,5	5	300	0,442709
1,26	3,5	6	300	0,457867
1,36	3,5	7	300	0,609444

2.2.3. Al-7Si-10Pb ötvözet állandó vastagságú réteg létrehozásához szükséges teljesítmény

Mélység	N-1	V _b	P
0,85	0	300	1,167743
0,85	1	300	0,750052
0,85	2	300	0,542277
0,85	3	300	0,434836
0,85	4	300	0,377315
0,85	5	300	0,345544
0,85	6	300	0,327494
0,85	7	300	0,316972
0,85	8	300	0,310692
0,9	0	300	1,919537
0,9	1	300	1,139967
0,9	2	300	0,752182
0,9	3	300	0,551654
0,9	4	300	0,444299
0,9	5	300	0,385003
0,9	6	300	0,351314
0,9	7	300	0,331675
0,9	8	300	0,319956
0,9	4	300	0,444299
0,95	0	300	3,222366
0,95	1	300	1,815676
0,95	2	300	1,115937
0,95	3	300	0,754096
0,95	4	300	0,56038
0,95	5	300	0,453384
0,95	6	300	0,392593
0,95	7	300	0,357156
0,95	8	300	0,33601
	200	300	0,3
0,8	0	600	1,495338
0,8	1	600	1,064364
0,8	2	600	0,849982
0,8	3	600	0,739124
0,8	4	600	0,679774
0,8	5	600	0,646993
0,8	6	600	0,628368
0,8	7	600	0,617511
0,8	8	600	0,611032
0,85	0	600	2,335486
0,85	1	600	1,500104
0,85	2	600	1,084555
0,85	3	600	0,869671
0,85	4	600	0,75463
0,85	5	600	0,691089
0,85	6	600	0,654988
0,85	7	600	0,633943
0,85	8	600	0,621385

0,85	4	600	0,75463
0,9	0	600	3,839074
0,9	1	600	2,279935
0,9	2	600	1,504363
0,9	3	600	1,103308
0,9	4	600	0,888599
0,9	5	600	0,770007
0,9	6	600	0,702628
0,9	7	600	0,663351
0,9	8	600	0,639912
	200	600	0,6
0,75	0	900	1,563878
0,75	1	900	1,244318
0,75	2	900	1,085357
0,75	3	900	1,003158
0,75	4	900	0,959151
0,75	5	900	0,934844
0,75	6	900	0,921034
0,75	7	900	0,912984
0,75	8	900	0,90818
0,8	0	900	2,243007
0,8	1	900	1,596546
0,8	2	900	1,274973
0,8	3	900	1,108685
0,8	4	900	1,019661
0,8	5	900	0,970489
0,8	6	900	0,942552
0,8	7	900	0,926267
0,8	8	900	0,916549
0,8	4	900	1,019661
0,85	0	900	3,503228
0,85	1	900	2,250156
0,85	2	900	1,626832
0,85	3	900	1,304507
0,85	4	900	1,131945
0,85	5	900	1,036633
0,85	6	900	0,982481
0,85	7	900	0,950915
0,85	8	900	0,932077
	200	900	0,9

2.2.4. Al-7Si-10Pb szekunder dendritág távolság, lehűlési sebesség, látszólagos hőmérséklet gradiens, valódi hőmérséklet gradiens

	Szekunder dendrit ág távolság (μm)			G^*v (K/s)		
	teteje-0,2 mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm	teteje-0,2mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm
II-1 (2kW, 300 mm/perc)	2,04	2,16	2,02	5339,808	4641,291	5470,419
II-2 (2,5kW, 300 mm/perc)	1,96	2,15	1,98	5890,343	4694,419	5745,475
II-3 (3kW, 300 mm/perc)	1,86	2,11	1,89	6697,682	4915,716	6439,920
II-4 (3,5kW, 300 mm/perc)	1,83	2,09	1,85	6970,208	5031,899	6786,831
II-5 (2kW, 600 mm/perc)	1,75	1,89	1,82	7777,889	6439,920	7064,519
II-6 (2,5kW, 600 mm/perc)	1,69	1,78	1,74	8472,756	7460,285	7887,988
II-7 (3kW, 600 mm/perc)	1,62	1,69	1,62	9399,105	8472,756	9399,105
II-8 (3,5kW, 600 mm/perc)	1,51	1,62	1,53	11168,369	9399,105	10813,677
II-9 (2kW, 900 mm/perc)	1,48	1,56	1,50	11731,846	10310,712	11351,879
II-10 (2,5kW, 900 mm/perc)	1,42	1,49	1,44	12985,275	11539,661	12547,366
II-11 (3kW, 900 mm/perc)	1,37	1,42	1,39	14178,671	12985,275	13683,498
II-12 (3,5kW, 900 mm/perc)	1,29	1,33	1,29	16433,455	15247,556	16433,455

	G_l (K/mm)			G_r (K/mm)		
	teteje-0,2 mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm	teteje-0,2mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm
II-1 (2kW, 300 mm/perc)	1067,962	928,258	1094,084	3685,011	1693,167	1423,078
II-2 (2,5kW, 300 mm/perc)	1178,069	938,883	1149,095	3685,011	1751,43	1423,078
II-3 (3kW, 300 mm/perc)	1339,536	983,143	1287,984	4587,351	1876,728	1498,905
II-4 (3,5kW, 300 mm/perc)	1394,042	1006,38	1357,366	4649,765	1921,299	1538,964
II-5 (2kW, 600 mm/perc)	777,788	643,992	706,451	2672,648	1280,534	811,8636
II-6 (2,5kW, 600 mm/perc)	847,276	746,028	788,7988	3146,072	1575,666	989,094
II-7 (3kW, 600 mm/perc)	939,910	847,275	939,9105	3567,861	1695,371	1065,658
II-8 (3,5kW, 600 mm/perc)	1116,837	939,910	1081,368	4522,074	1945,417	1308,352
II-9 (2kW, 900 mm/perc)	782,123	687,380	756,791	3362,001	1551,721	1131,517
II-10 (2,5kW, 900 mm/perc)	865,685	769,310	836,491	3490,287	1721,195	1152,499
II-11 (3kW, 900 mm/perc)	945,2448	865,685	912,233	4247,419	1953,766	1424,294
II-12 (3,5kW, 900 mm/perc)	1095,564	1016,504	1095,564	4922,091	2323,254	1578,253

2.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet

2.3.1. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb mélység

kW	v _b	D0	D0	P/v	D0	P/vb-0,0005
2	1500	1,08	1,08	0,001333	1,08	0,00083333
2,4	1500	1,11	1,11	0,0016	1,11	0,0011
2	1800	1,02	1,02	0,001111	1,02	0,00061111
2,4	1800	1,04	1,04	0,001333	1,04	0,00083333
2	2100	0,98	0,98	0,000952	0,98	0,00045238
2,4	2100	0,99	0,99	0,001143	0,99	0,00064286

2.3.2. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözetnél q érték meghatározása

Mért D	kW	N-1	V _b	q
1,12	2	1	1500	0,1720602
1,14	2	2	1500	0,2280523
1,16	2	3	1500	0,2840445
1,19	2	4	1500	0,3680327
1,22	2	5	1500	0,4520209
1,26	2	6	1500	0,5640052
1,32	2	7	1500	0,7319816
1,15	2,4	1	1500	0,1288427
1,16	2,4	2	1500	0,1557327
1,19	2,4	3	1500	0,2364025
1,21	2,4	4	1500	0,2901824
1,23	2,4	5	1500	0,3439622
1,28	2,4	6	1500	0,4784119
1,34	2,4	7	1500	0,6397515

2.3.3. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb ötvözet állandó vastagságú réteg létrehozásához szükséges teljesítmény

Mélység	N-1	vb	P
1,05	0	1500	1,932164
1,05	1	1500	1,712911
1,05	2	1500	1,538991
1,05	3	1500	1,400114
1,05	4	1500	1,288526
1,05	5	1500	1,198333
1,05	6	1500	1,125023
1,05	7	1500	1,06512
1,1	0	1500	2,378619
1,1	1	1500	2,076563
1,1	2	1500	1,83696
1,1	3	1500	1,645636
1,1	4	1500	1,491905
1,1	5	1500	1,36765
1,1	6	1500	1,266654
1,1	7	1500	1,184127

1	0	1800	1,913742
1	1	1800	1,725725
1	2	1800	1,576583
1	3	1800	1,457492
1	4	1800	1,361802
1	5	1800	1,284459
1	6	1800	1,221594
1	7	1800	1,170225
1,05	0	1800	2,318597
1,05	1	1800	2,055493
1,05	2	1800	1,846789
1,05	3	1800	1,680137
1,05	4	1800	1,546231
1,05	5	1800	1,437999
1,05	6	1800	1,350028
1,05	7	1800	1,278144
0,95	0	2100	1,880721
0,95	1	2100	1,726649
0,95	2	2100	1,604433
0,95	3	2100	1,506843
0,95	4	2100	1,428429
0,95	5	2100	1,365049
0,95	6	2100	1,313533
0,95	7	2100	1,271438
1	0	2100	2,232698
1	1	2100	2,013346
1	2	2100	1,839347
1	3	2100	1,700408
1	4	2100	1,588769
1	5	2100	1,498535
1	6	2100	1,425193
1	7	2100	1,365262

2.3.4. A modellből kapott termikus eredmények Al-4Cu ötvözetre

V (m/s)	G (K/m)	$\dot{T}$ (K/s)	λ_1 (μm)	λ_2 (μm)
0,005	100000	500	24,269	5,225
0,01	100000	1000	20,174	4,140
0,015	100000	1500	18,122	3,614
0,02	100000	2000	16,803	3,280
0,025	100000	2500	15,854	3,045
0,03	100000	3000	15,123	2,862
0,035	100000	3500	14,536	2,718
0,04	100000	4000	14,050	2,599
0,045	100000	4500	13,637	2,498
0,05	100000	5000	13,281	2,411
0,055	100000	5500	12,969	2,336
0,06	100000	6000	12,693	2,269
0,005	200000	1000	17,183	4,128
0,01	200000	2000	14,273	3,277
0,015	200000	3000	12,818	2,861
0,02	200000	4000	11,885	2,597

0,025	200000	5000	11,212	2,408
0,03	200000	6000	10,696	2,264
0,035	200000	7000	10,280	2,151
0,04	200000	8000	9,936	2,057
0,045	200000	9000	9,644	1,977
0,05	200000	10000	9,392	1,908
0,055	200000	11000	9,171	1,849
0,06	200000	12000	8,976	1,796
0,005	300000	1500	14,048	3,590
0,01	300000	3000	11,661	2,850
0,015	300000	4500	10,470	2,491
0,02	300000	6000	9,706	2,261
0,025	300000	7500	9,157	2,097
0,03	300000	9000	8,734	1,975
0,035	300000	10500	8,395	1,874
0,04	300000	12000	8,114	1,793
0,045	300000	13500	7,875	1,724
0,05	300000	15000	7,669	1,663
0,055	300000	16500	7,489	1,611
0,06	300000	18000	7,329	1,566
0,005	400000	2000	12,182	3,247
0,01	400000	4000	10,104	2,583
0,015	400000	6000	9,070	2,259
0,02	400000	8000	8,408	2,048
0,025	400000	10000	7,932	1,903
0,03	400000	12000	7,565	1,790
0,035	400000	14000	7,271	1,701
0,04	400000	16000	7,027	1,625
0,045	400000	18000	6,821	1,563
0,05	400000	20000	6,642	1,508
0,055	400000	22000	6,486	1,461
0,06	400000	24000	6,348	1,420
0,005	500000	2500	10,910	3,000
0,01	500000	5000	9,043	2,393
0,015	500000	7500	8,116	2,091
0,02	500000	10000	7,522	1,900
0,025	500000	12500	7,096	1,763
0,03	500000	15000	6,768	1,658
0,035	500000	17500	6,504	1,576
0,04	500000	20000	6,286	1,506
0,045	500000	22500	6,101	1,449
0,05	500000	25000	5,942	1,399
0,055	500000	27500	5,802	1,354
0,06	500000	30000	5,678	1,316
0,005	800000	4000	8,660	2,536
0,01	800000	8000	7,161	2,026
0,015	800000	12000	6,423	1,775
0,02	800000	16000	5,951	1,615
0,025	800000	20000	5,613	1,499
0,03	800000	24000	5,353	1,411
0,035	800000	28000	5,144	1,341
0,04	800000	32000	4,971	1,282

0,045	800000	36000	4,825	1,234
0,05	800000	40000	4,698	1,190
0,055	800000	44000	4,588	1,154
0,06	800000	48000	4,490	1,122
0,005	1000000	5000	7,767	2,527
0,01	1000000	10000	6,413	1,869
0,015	1000000	15000	5,749	1,640
0,02	1000000	20000	5,326	1,494
0,025	1000000	25000	5,022	1,389
0,03	1000000	30000	4,789	1,307
0,035	1000000	35000	4,602	1,241
0,04	1000000	40000	4,447	1,188
0,045	1000000	45000	4,316	1,141
0,05	1000000	50000	4,203	1,103
0,055	1000000	55000	4,104	1,068
0,06	1000000	60000	4,016	1,038

2.3.5. Al-4Cu-1.5Mg-20Pb cella méret, lehűlési sebesség, látszólagos hőmérséklet gradiens, valódi hőmérséklet gradiens

	Cella méret (mm)			G*v (K/s)		
	teteje-0,2 mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm	teteje-0,2 mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm
VI-1 (2kW, 1500 mm/perc)	3,98	4,20	4,01	44237,39	39648,749	43566,37
VI-2 (2,4kW, 1500 mm/perc)	3,84	4,12	3,85	47582,14	41231,529	47330,92
VI-3 (2kW, 1800 mm/perc)	3,78	4,08	3,82	49132,07	42058,483	48090,58
VI-4 (2,4kW, 600 mm/perc)	3,66	3,86	3,72	52466,57	47081,674	50758,51
VI-5 (2kW, 2100 mm/perc)	3,54	3,71	3,61	56150,17	51037,374	53956,28
VI-6 (2,4kW, 2100 mm/perc)	3,45	3,65	3,54	59171,90	52759,563	56150,17

	G _l (K/mm)			G _r (K/mm)		
	teteje-0,2 mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm	teteje-0,2mm	közepe-0,4 mm	alja-0,8 mm
VI-1 (2kW, 1500 mm/perc)	1769,50	1585,95	1742,65	5745,12	3097,56	1975,80
VI-2 (2,4kW, 1500 mm/perc)	1903,29	1649,26	1893,24	6179,50	3221,21	2146,53
VI-3 (2kW, 1800 mm/perc)	1637,74	1401,95	1603,02	5317,32	2738,18	1817,48
VI-4 (2,4kW, 600 mm/perc)	1748,89	1569,39	1691,95	5678,20	3065,21	1918,31
VI-5 (2kW, 2100 mm/perc)	1604,29	1458,21	1541,61	5208,74	2848,07	1747,85
VI-6 (2,4kW, 2100 mm/perc)	1690,63	1507,42	1604,29	5489,04	2944,17	1818,92

2.3.6. EDS elemzés

	Al	Cu	Mg	Pb
Alapanyag	94,57	3,96	1,47	0
Átmeneti rész	84,66	3,66	1,42	10,26
Zóna alja	77,27	3,66	1,42	17,65
Zóna közepe	75,01	2,56	1,44	20,99
Zóna teteje	72,41	1,89	1,36	24,34

3. Alumínium galvanizálása

Az alumínium anyagok felületkezelési eljárásainál az adott réteg megfelelő minőségben való kialakításának feltétele, hogy a kezelendő munkadarab tiszta legyen. Zsíros, szennyezett felületen ugyanis nem lehet a kívánt védőréteget kifogástalan és megfelelő védőhatással kialakítani. A védelem nélküli alumínium anyagoknál azok korrózióval szembeni jó ellenálló-képességét biztosító természetes oxidhártya is akadálya lehet a mesterséges védőréteg létrehozásának, azaz a tényleges felületvédelem előtt ezt is el kell távolítani.

Alumínium felületén elektrokémiai eljárással csak akkor választható le fémréteg, ha a természetes oxidréteget előbb eltávolítjuk és megakadályozzuk, hogy a galvánréteg leválasztása előtt újraképződjék. A másik nehézség az, hogy az alumínium felületén – negatív elektrodpotenciálja miatt – bármilyen galvánfürdőbe való bemártásakor laza szerkezetű rosszul tapadó fémréteg cementálódik, amely rontja az elektrokémiai galván fémréteg tapadását.

A műveletek sorrendje:

- előkészítés (mechanikai előkészítés, zsírtalanítás, oxidmentesítés)
- tapadást biztosító réteg kialakítása,
- galvanizálás.

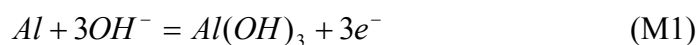
Az ólom galvanikus leválasztása során az volt a célom, hogy 100 µm vastagságú ólomréteget hozzak létre az alumínium ötvözet felületén.

Az általam használt lúgos cinkpác összetétele: 100 g/l ZnO 500 g/l NaOH.

Kezelési idő: 30 sec

Kezelési hőmérséklet: 20 °C.

Az alábbi reakciók játszódnak le:



A galvanizáláshoz szükséges idő:

$$t_{galv} = \frac{z \cdot F \cdot \rho_{Pb} \cdot S \cdot d}{I \cdot M} \quad (M3)$$

- ahol, z- 1 mól leválasztásához szükséges elektronok mólszáma
F- Faraday szám, 96500 Coulomb,
 ρ_{Pb} - ólom sűrűsége, 11,34 g/cm³,
S- bevonandó darab mérete, 31,25 cm³,
d- felvinni kívánt réteg vastagsága, 0,01 cm
I- áramerősség, 1,5 A
M- ólom moláris tömege (g/mol)

A minimális 100 µm vastagságú ólomréteget létrehozam a következő paramétereket választottam:

- galvanizálási idő 1000 sec,
- galvanizálás hőmérséklete: 25 °C,

a fürdő összetétele: 135 g Pb(SO₃NH₂)₂ (ólomszulfamát), 135 g HSO₃NH₂ (szulfaminsav) és 6 g zselatin.