

# Eutektikus szövetszerkezetek jellemzése automatikus számítógépi képelemzéssel

PhD Értekezés

**Bortnyik Kornél**



Tudományos vezető: Dr. Barkóczy Péter  
Egyetemi tanár

**Miskolci Egyetem**  
Műszaki Anyagtudományi Kar  
Fém-tani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet  
Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Miskolc  
2022

# Tartalomjegyzék

<b>1. Az anyagszerkezet és a képeinek előállítása</b>	<b>2</b>
1.1. Az eutektikus szerkezet . . . . .	2
1.2. Az eutektikum kristályosodása . . . . .	3
1.3. Az eutektikumok morfológiája . . . . .	6
1.3.1. Az <i>Al-Si</i> ötvözetrendszer . . . . .	6
1.3.2. Az <i>Al-Ni</i> és az <i>Al-Cu</i> ötvözetrendszer . . . . .	6
1.3.3. Az öntöttvas . . . . .	8
1.3.4. Egyéb eutektikumok . . . . .	9
1.4. A képalkotó eszközök . . . . .	9
1.4.1. Az optikai mikroszkóp . . . . .	9
1.4.2. A pásztázó elektronmikroszkóp . . . . .	11
1.5. A képek érzékelése és kezelése . . . . .	12
1.5.1. Sztereológiai alapfogalmak . . . . .	16
1.5.2. A klasszikus számítógépi képelemzés és alakjellemzés . . . . .	17
<b>2. A sejtautomata</b>	<b>20</b>
2.1. A sejtautomaták osztályozása . . . . .	21
2.2. Egyszerű kétdimenziós sejtautomaták . . . . .	22
2.2.1. A Game of Life automata . . . . .	22
2.2.2. A Game of Life automata alkalmazása a számítógépi képelemzésben . . . . .	22
2.2.3. A HPP szabály . . . . .	23
2.2.4. A HPP szabály alkalmazása . . . . .	25
2.3. Sejtautomaták a klasszikus számítógépi képelemzésben . . . . .	26
2.4. Célkitűzés . . . . .	27
<b>3. Az automatikus számítógépi képelemzés</b>	<b>29</b>
3.1. A képek előkészítése . . . . .	29
3.1.1. Az egyenlőtlen megvilágítás automatikus korrigálása . . . . .	30
3.1.2. A képek automatikus szegmentálása . . . . .	32
3.1.3. A háttér megkülönböztetése az objektumoktól . . . . .	33
3.2. A mérő sejtautomaták . . . . .	35
<b>4. Az adatbányászat</b>	<b>36</b>
4.1. A csoportelemzés . . . . .	37
4.1.1. A <i>K-means</i> eljárás . . . . .	37
4.1.2. Hierarchikus csoportelemzés . . . . .	39

---

4.2. Az osztályozó algoritmusok . . . . .	39
4.2.1. A tartóvektor-gép . . . . .	40
<b>5. Anyagok és módszerek</b>	<b>42</b>
5.1. Az anyagok . . . . .	42
5.1.1. Az <i>Al-Cu</i> eutektikumok . . . . .	42
5.1.2. Az <i>Al-Ni</i> eutektikumok . . . . .	42
5.1.3. Az öntöttvasak . . . . .	43
5.1.4. Az <i>Al-Si</i> eutektikumok . . . . .	43
5.2. A mérést végző algoritmusok . . . . .	45
5.2.1. Az egyedi objektumokat jellemző algoritmus . . . . .	45
5.2.2. Az objektumcsoportok közötti jellemzőket mérő algoritmus . . . . .	48
5.2.3. Az automatikus számítógépi képelemzés megvalósítása . . . . .	48
<b>6. Eredmények</b>	<b>51</b>
6.1. A különböző jellemzők . . . . .	51
6.1.1. Az alakfelismerés . . . . .	51
6.1.2. Az objektumok területének és kerületének a mérése . . . . .	66
6.1.3. Az objektumok elrendeződésének jellemzése . . . . .	70
6.2. Az automata alkalmazása a gyakorlati képelemzésben . . . . .	79
<b>7. Új tudományos eredmények</b>	<b>81</b>

## Jelölések jegyzéke

<i>jelölés:</i>	<i>mértékegység:</i>	<i>megnevezés:</i>
$T$	$^{\circ}C$	olvadék hőmérséklete
$T_L$	$^{\circ}C$	ötvözet likvidusz hőmérséklete
$G_{\alpha}$	$J/mol$	az $\alpha$ fázis <i>Gibbs</i> energiája
$G_L$	$J/mol$	az olvadék <i>Gibbs</i> energiája
$\Delta G_v$	$J/mol$	az olvadék <i>Gibbs</i> energiájának változása
$P$	<i>pixel</i>	az objektumok kerülete
$A$	<i>pixel</i>	az objektumok területe
$H(r)$	–	adott $r$ sugarú kör belsejében lévő objektumok egységnyi területre eső darabszáma, viszonyítva az átlagos darabszámhoz
$N_{ra}$	–	a körbe eső objektumok száma
$N_a$	–	az összes objektum szám
$KOV(X, Y)$	–	$X$ és $Y$ valószínűségi változók kovarianciája
$E$	–	várható érték
$\overline{B}$	–	bináris kép
$\vec{h}$	<i>pixel</i>	a kovariancia meghatározásakor használt vektor, amely a bináris kép esetleges periodicitását mutatja
$M_i$	–	<i>Voronoi</i> mozaik $i$ -edik tartománya
$m_i$	–	<i>Voronoi</i> mozaik $i$ -edik tartományának egyes pontjai
$p_i$	–	tetszőleges $i$ -edik mozaik pontjának a koordinátája
$d$	<i>pixel</i>	szemcseátmérő, vagy távolság
$\vec{q}$	–	egyik tetszőleges pont koordinátája
$\vec{p}$	–	másik tetszőleges pont koordinátája
$R$	–	az <i>RGB</i> színtérben a vörös szín intenzitás-értéke
$G$	–	az <i>RGB</i> színtérben a zöld szín intenzitás-értéke
$B$	–	az <i>RGB</i> színtérben a kék szín intenzitás-értéke
$v_1$	–	színtér koordináta
$v_2$	–	színtér koordináta
$v_3$	–	színtér koordináta
$D_r$	–	színtér együttható
$D_g$	–	színtér együttható
$D_c$	–	színtér együttható
$Cr$	–	az <i>YCC</i> színtérben a pixel Chroma1 értéke
$Cb$	–	az <i>YCC</i> színtérben a pixel Chroma2 értéke
$Y$	–	az <i>YCC</i> színtérben a pixel intenzitásértéke
$A_r$	–	az adott színtér sajátos konstansa
$A_g$	–	az adott színtér sajátos konstansa
$A_b$	–	az adott színtér sajátos konstansa
$N_x$	–	vízszintes képpontok darabszáma
$N_y$	–	függőleges képpontok darabszáma
$P_g$	–	a vizsgált objektum növekedésének valószínűségi változója
$\Phi$	$T$	mágneses térerősség
$Z$	–	az elem rendszáma

*jelölés: mértékegység: megnevezés:*

$t$	–	sejtautomata időlépés
$E_p$	–	pár-kölcsönhatások energiája
$s_{ij}$	–	$i, j$ koordinátájú sejt
$b$	–	alrácshoz tartozást jelentő bináris állapot
$O$	–	a vizsgált pixel eredmény intenzitás értéke
$I$	–	a vizsgált pixel szomszédainak eredeti intenzitás értéke
$K$	–	a konvolúciós kernel
$PA_{ij}$	–	a vizsgált pixel intenzitás-értéke
$A$	–	konstans
$C$	–	Az SVM költségfüggvénye
$\varepsilon$	–	Az SVM regressziós vesztesége

# Bevezetés

A számítástechnika fejlődése több területen változást hozott életünkbe. A *Neumann-elven* működő számítógépek a mindennapjaink részévé váltak. A nap, mint nap használt szoftverekben is megjelentek a fejlett képfeldolgozó algoritmusok, ilyenek pl.: az arcfelismerés, az ún. OCR, azaz az optikai karakterfelismerés, amely lehetővé teszi a fényképezett szövegnek a szöveggént való értelmezését a számítógép számára. Az orvostudományban elterjedten használják a mintafelismerő algoritmusokat a szövetképek számítógépi képelemzésénél. A nagy-felbontású és gyors képalkotó eszközök megjelenése lehetővé tették a számítógépi látás megalkotását, ahol a számítógépek feldolgozzák az érzékelt képet, és ennek hatására beavatkoznak a megfigyelt folyamatokba. Az anyagmérnöki gyakorlatban a metallográfiai vizsgálatok során találkozhatunk a számítógépi képelemzéssel. Egyik klasszikus eljárása az anyagminősítésnek a metallográfiai vizsgálat, melynek során a fémek mikroszerkezetét vizsgáljuk optikai mikroszkóp segítségével. Az anyagok mikroszerkezete jelentősen befolyásolja a tulajdonságaikat. Ezért vált a mikroszerkezet vizsgálat az anyagminősítési eljárások hatékony eszközévé. A mikroszerkezet vizsgálata során sokféle kérdés merülhet fel: Milyen fázisok láthatóak a képen? Mekkora a területhányaduk? Milyen az alakjuk? Milyen az eloszlásuk a szerkezetben? stb. Ezekre a kérdésekre régebben az etalonképekkel történő összehasonlítás alapján, és/vagy egyszerű mérések elvégzésével adtak választ. Azonban ezekhez a mérésekhez, ill. az összehasonlításhoz gyakorlott szakemberekre volt szükség és a kiértékelés eredménye nagyban függött szakképesítésétől és tapasztalatától. A napjaink értékelését végző számítógépi képelemző rendszerek alkalmazása ezeket a problémákat nagyrészt kiküszöböli, de még mindig szükséges az informatikai és metallográfiai tudással egyszerre rendelkező szakemberek alkalmazása a képek megfelelő kiértékeléséhez. A kiértékelést végző személynek ismernie kell a számítógépi képelemzés lépéseit, lehetőségeit és a kapott eredményeket tudni kell értelmezni.

Az ipari forradalmak történetében napjainkban újabb fordulóponthoz érkeztünk. Az előző a számítógépek és az automatizálás megjelenése volt, a mostani az okos gyárak megjelenése. Az okos eszközök azt jelentik, hogy az alkalmazott algoritmusokban már mesterséges intelligencia is dolgozik, továbbá az eszközök képesek a környezetükkel is kommunikálni, azaz az emberi beavatkozás kiszorul.

# 1. fejezet

## Az anyagszerkezet és a képeinek előállítása

### 1.1. Az eutektikus szerkezet

Az eutektikum szó görög eredetű, könnyen olvadót jelent. Az eutektikus fémötvözetek olyan két vagy többalkotós rendszerek, amelyekben a fémötvözet olvadáspontja kisebb az azt alkotó fémek olvadáspontjánál. Ez és egyéb kedvező tulajdonságai miatt terjedt el az öntészeti használata. A színfémekénél kisebb olvadáspont és a jó formakitöltő képesség miatt főleg az öntészeti alkalmazásoknál előny. Egy másik hasznos tulajdonsága az eutektikumoknak az, hogy a színfém mechanikai tulajdonságait az ötvözővel jelentősen lehet befolyásolni, és emiatt már nem csak gyártástechnológiai előnyt jelent az alkalmazásuk. Az eutektikumoknak a mikroszerkezete többféle lehet. Irreguláris eutektikumról akkor beszélünk, ha az egyik fázis hajlamos az atomosan sík felület kialakítására. Atomosan sík felülettel történő növekedés azt jelenti, hogy mindig alacsony Miller-indexű kristálylap alakul ki ép, betöltött formában, s határolja a kristályt. Az atomosan nem sík növekedés során a szilárd — olvadék fázishatár alakját nem a kristálytani viszonyok, hanem a kristályosodás körülményei befolyásolják. Ilyenkor az atomok beépülése a szilárd fázisba gyors. Irreguláris eutektikummal rendelkezik sokféle ötvözet, mint az *Al-Si* vagy az öntöttvas. Egészen kicsi atomosan sík térfogat százalék esetén az atomosan nem sík fázis körbenövi az atomosan sík fázist, így az oldalágak kialakulása vagy akár az ikersíkképződés is kizárt. Ebben az esetben irreguláris lemezes szerkezet alakul ki. Nem sokkal több atomosan sík fázis térfogat esetén már irreguláris „flake” szerkezet alakul ki. Tovább növelve az atomosan sík fázis térfogatát a körbenövés lehetősége egyre csökken. Az eutektikum morfológiája lehet szferoidos, göbszerű, gömbös, vagy nem göbszerű. A nem göbszerű szerkezetek közé sorolható a rudas, tűs, ill. a lemezes eutektikumok. A reguláris eutektikumok esetében a morfológia térfogatarány függő. Ha a kisebb mennyiségben jelenlévő összetevő térfogataránya kisebb, mint 28% akkor rudas szerkezetű eutektikum fog képződni, ha nagyobb, mint 28% akkor lemezes szerkezetű. [2][3][11]

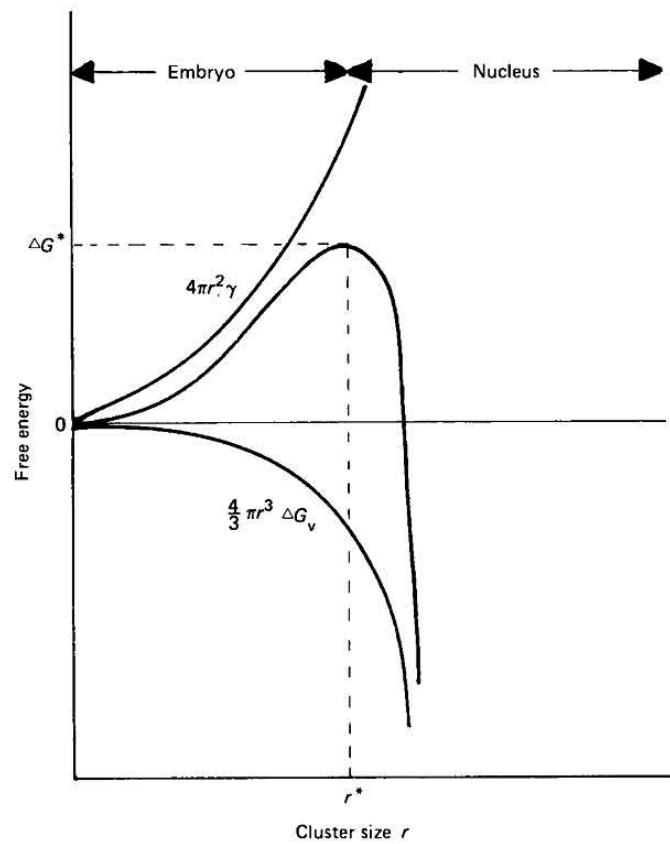
## 1.2. Az eutektikum kristályosodása

Ha az ötvözet eutektikus összetételű, akkor ez esetben a szilárd állapotban megtalálható szövetelem csak eutektikum lesz. Megszilárdulás közben a rendszerben kristályosodás történik. A kristályosodás a csíráképződéssel indul. A csíráképződés akkor indul el ha az olvadék hőmérséklete  $T < T_L$  és így  $G_\alpha < G_L$ . A határfelület energiája csökkenti a szilárd – olvadék állapot szabad entalpia különbségét. Ez a különbség a hajtóerő. A csíráképződés elindul, ha a kritikus csírámérettől nagyobb csírák tudnak képződni. Az embriók (olyan atomok csoportja amelyek azonos szerkezetet vesznek fel, mint a szilárd fázis) keletkezése amelyekből a csíra képződik szignifikáns határfelület növekedést von maga után. A teljes határfelületi szabad entalpia ebből eredő növekedését figyelembe kell venni annak eldöntésekor, hogy az átalakulás a rendszer összes szabad energiájának csökkenésével megy végbe. Az embrió képződését kísérő szabad entalpia-változás a  $T$  és  $T_e$  alatti hőmérséklet különbség, a két fázis térfogati szabad entalpiájának változása,  $\Delta G$ , és az új folyadék-szilárd anyag kialakulásához szükséges határfelületi szabad entalpia közötti különbség. Az  $r$  sugarú gömb alakú embrió esetében ez a változást a 1.1 összefüggés írja le.

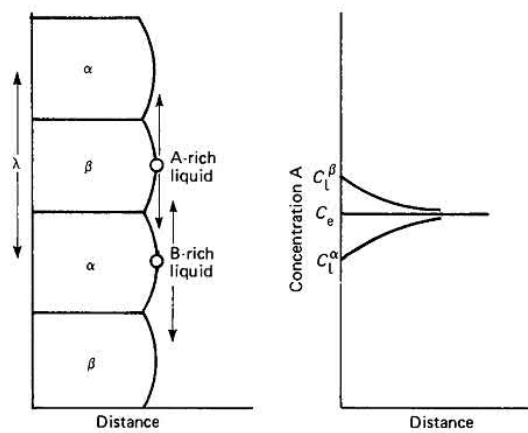
$$\Delta G = 4\pi r^2 \gamma - \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v \quad (1.1)$$

Ez igaz mind a két fázisra, hogy melyik fázis csírája fog képződni attól függ, hogy melyiknek van szüksége kisebb mértékű túlhűlésre. A csíráképződést a csíranövekedés követi. Ha a csíra ötvözőben szegény, akkor körülötte lévő olvadék az ötvözőben dúsul. A dúsult olvadék túlhűlése a koncentrációnak megfelelően megnő, és az eutektikum másik fázisa csírákat képez. Ezzel, hogy a nagyobb koncentrációjú fázis csírákat képez, az olvadék koncentrációja a környezetében lecsökken, így az első fázis tud újra csírákat képezni. Majd a képződött csírák együtt nőnek. A folyamat az 1.2 ábrán látható. A növekedés iránya merőleges az olvadék - szilárd határfelületre. A növekedés sebessége a szilárd - olvadék határfelület előtt végbemenő diffúzió sebességétől függ. Az eddig leírt kristályosodási folyamat a reguláris eutektikumokra vonatkozik. Azonban léteznek nem reguláris szerkezetű eutektikumok is. Ezek lehetnek elfajult eutektikumok, vagy irreguláris eutektikumok. Az irreguláris eutektikum akkor alakul ki, ha az egyik fázis csak a rá jellemző kristálytani síkokban tud növekedni. Ilyen pl. az *Al-Si* ötvözetben a *Si*. Síkfrontos kristályosodás esetén a szilárd koncentrációja kisebb mint, az olvadéké, egy adott hőmérsékleten. Ezért a kristályosodó front előtt az olvadék ötvözőben feldúsul. Minden egyes pontban az adott olvadék koncentrációjához meg lehet határozni az oda tartozó likvidusz hőmérsékleteket. Ha az olvadékban a kristályosodó front előtt kialakuló hőmérsékletprofil olyan, hogy az adott hőmérséklet alatt vannak mindig ezek a likvidusz hőmérsékletek, akkor síkfrontos kristályosodás megy végbe. Ha a hűtés olyan erős, hogy a hőmérsékletek az eutektikus hőmérséklet alá csökken akkor, a síkfrontos kristályosodás felborul, és elfajult eutektikum keletkezik. A másik eset, amikor az elfajult eutektikum kialakul az az eutektikus cella határa, ahol az olvadék ötvözőben dúsul. Ez látható a 1.3 ábrán. [2][4]

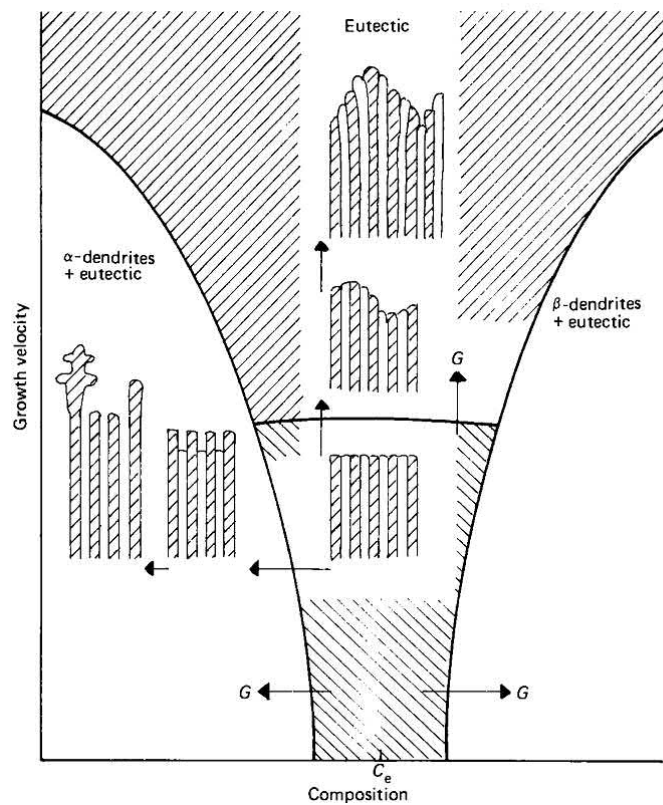






1.1. ábra: A kritikus csíraméret szabad-entalpia függése. [2]



1.2. ábra: Az eutektikum növekedése. [2]



1.3. ábra: A normál ötvözetnek a növekedési sebessége. Síkfrontos a kristályosodás a  területen, a  területen sejtes határfelületű eutektikus növekedés megy végbe. A függőleges struktúra változás mutatja be a két fázis instabilitását; a vízszintes változás az egyfázisú instabilitást. A  $G$  nyilak mutatják a határfelület mozgását a hőmérséklet-gradiens növekedésének függvényében.[2]

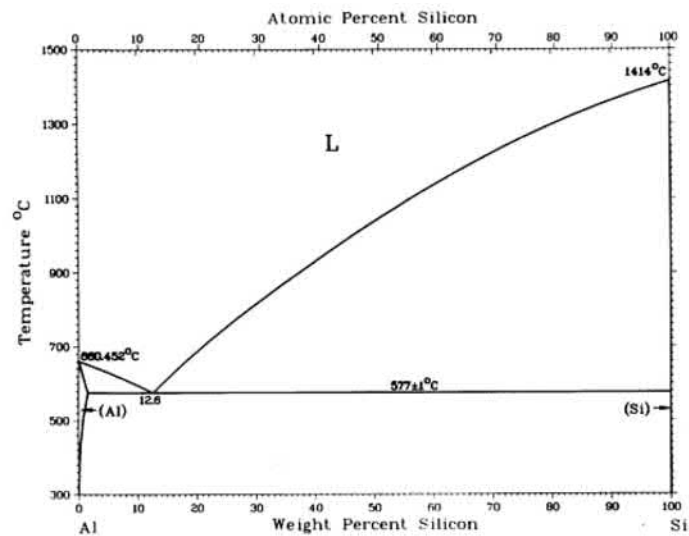
## 1.3. Az eutektikumok morfológiája

### 1.3.1. Az *Al-Si* ötvözetrendszer

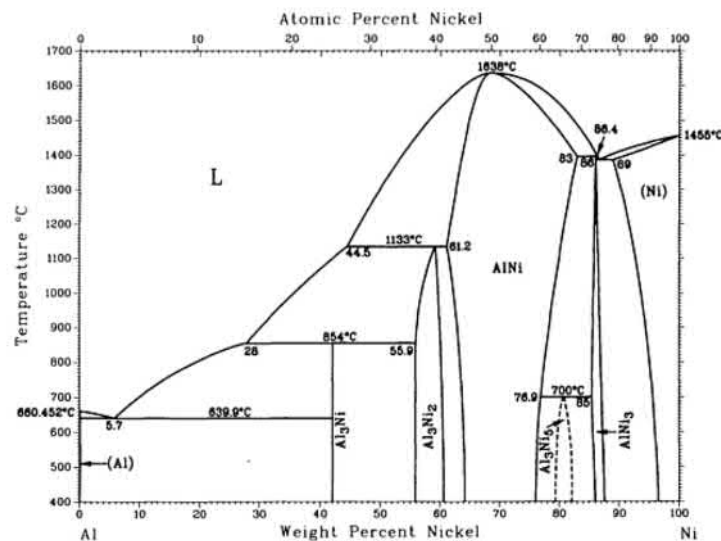
Az *Al-Si* ötvözetek napjainkban nagyon elterjedtek. Felhasználása főleg a járműiparban terjedt el. Legfőbb előnyük a kicsi sűrűségük, a könnyű önthetőségük, melynek köszönhetően bonyolult és komplex alakú, valamint vékony falú öntvényeket lehet előállítani. Napjainkban az autóipar részéről folyamatosan növekszik az igény a könnyű, de nagy szilárdságú alkatrészek iránt. Ilyenek például a motorblokk, hengerfej, nyomatékváltó ház. Az alkatrészekre szigorú minőségi követelmények vonatkoznak. Az öntvény minőségét és tulajdonságait a mikroszerkezete határozza meg. Ilyen jellemző a dendritág távolság hipoeutektikus esetben, az eutektikus *Si* módosítottságának foka, valamint a mikroporozitások és porozitások mennyisége. Ezen tulajdonságok optimalizálásával a mechanikai tulajdonságok javítása megvalósítható. Az *Al-Si* ötvözetek az ötvöző mennyiségétől függően lehetnek hipoeutektikusak (5–10% *Si* tartalom), eutektikusak (11–13% *Si* tartalom), vagy hipereutektikusak (14–20%). Az *Al-Si* rendszer egy kétalkotós rendszer, mely eutektikummal és korlátozott oldhatósággal rendelkezik. A szilícium oldhatósága az alumíniumban 1,65% az eutektikus hőmérsékleten. A hipoeutektikus alumínium-szilícium ötvözet megszilárdulása során, először primer alumínium keletkezik és növekszik dendritesen, vagy szilícium fázis jön létre és kezd növekedni. Elérve az eutektikus pontot, az *Al-Si* eutektikum kristályosodik és növekedik egészen a kristályosodás végéig. Az eutektikus reakció 577 °C-on megy végbe, ahol az eutektikus pontban a *Si* 12,6%. Szobahőmérsékleten a hipoeutektikus ötvözetek lágy, alakítható alumíniumot és kemény, rideg szilíciumot tartalmaznak. A hipereutektikus ötvözetek durva primer szilíciumot, valamint eutektikus szilícium fázist tartalmaznak. A legfontosabb *Al-Si* ötvözetek hipoeutektikus típusúak. Ezekben a *Si* mennyisége 5–10% között változik. A tipikus *Al-Si* ötvözeteknek két fontos mikroszerkezeti eleme a primer alumínium és az eutektikum. [18] A mechanikai tulajdonságok javítására különböző módszereket dolgoztak ki. A dendrites szerkezet finomítását a hűtési sebesség megfelelő megválasztásával, szemcsefinomító anyagok hozzáadásával, valamint forgó mágneses térben történő kristályosítással érik el. Az eutektikus *Si* kialakulásának érdekében módosító anyagokat adnak az ötvözethez, amelyek egyike a *Sr*. A stroncium hatására a nagy kiterjedésű lapok formájában kialakuló *Si* jóval apróbb, a gömbhöz közelítő morfológia kialakítására törekszik. Az *Al-Si* ötvözetek felhasználhatósága sokszor az eutektikus *Si* módosítottságának fokától függ. A módosítás az egyik legelterjedtebb eljárás, amit az *Al-Si* ötvözeteken végrehajtanak. A hozzáadott anyagok a *Na, Sb, Sr*. A *Si* morfológiája megváltozik és gömbszerű lesz. Ennek következtében a mechanikai tulajdonságai az ötvözetnek megváltoznak. A nem módosított ötvözetekben az eutektikus szilícium lemezes szerkezetű, míg a módosítottakban gömbszerű. A módosítás során az eutektikus szerkezet finomabbá válik, a *Si* gömbszerűbb lesz. A lemezes *Si* feszültséggyűjtő hely, és könnyen törést okozhat, a gömbszerű *Si* miatt így nagyobb lesz szakítószilárdság, a nyúlás, és jobb lesz az alakíthatóság. [19] [20] [6]

### 1.3.2. Az *Al-Ni* és az *Al-Cu* ötvözetrendszer

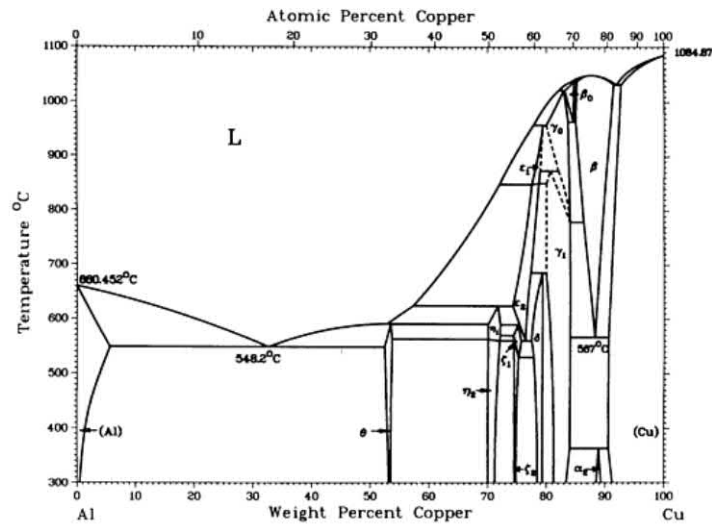
Az *Al-Ni* ötvözetrendszer a kutatók soraiban népszerű modellanyag. A kristályosodás folyamatára ható jelenségeket vizsgálják. Ilyen például a gravitáció, mágneses tér,

1.4. ábra: Az  $Al-Si$  ötvözet fázisdiagramja. [14]

stb. Az anyag mikroszerkezetéből sok információ nyerhető annak kristályosodásáról. Kutatásomban az  $Al-Ni$  ötvözetrendszer eutektikus tartományát vizsgálom. Ebben az esetben  $Al$  mátrixban  $Al_3Ni$  rudas eutektikum képződik. [98] [99]

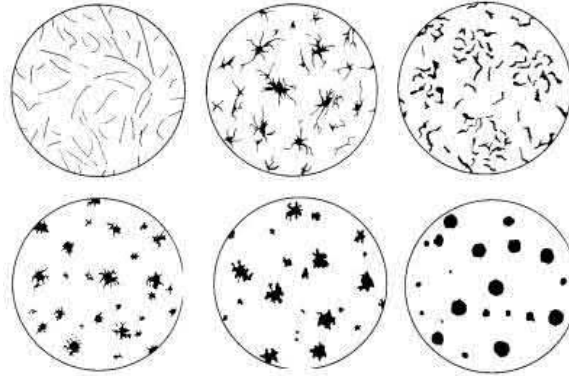
1.5. ábra: Az  $Al-Ni$  ötvözet fázisdiagramja. [14]

Az  $Al-Cu$  ötvözetek közül az eutektikus összetételűt (32,5%  $Cu$ ) hasonlóan az  $Al-Ni$ -hez modellanyagként használatos. Az eutektikum egyik fázisa a  $CuAl_2$ . A hipo-eutektikus ötvözetek nemesíthető  $Al$  ötvözetek. A KGST korszakban nagy mennyiségben használták a járműgyártásban. Mára a jelentősége csökkent a drága réz miatt. [100] [101]

1.6. ábra: Az *Al-Cu* ötvözet fázisdiagramja. [14]

### 1.3.3. Az öntöttvas

Az öntöttvas a vasötvözeteknek olyan fajtája, amelyeknek a kristályosodása közben eutektikum keletkezik. A karbon stabil grafit, vagy metastabil  $Fe_3C$  formájában jelenik meg a vasötvözetekben. A vasötvözeteknek két fő csoportja van, a fehértöretű, vagy a szürkötöretű. Az eutektikumának két alaptípusa létezik, az egyik ausztenit – grafit fázisokból áll, a másik ausztenit –  $Fe_3C$  fázisokból képződő ledeburit. A fémes mátrix típusai ferrites, ferrit - perlites, perlites, ausztenites, martenzites, bainites lehet. A grafitos vasakban a grafit morfológiája lehet lemezes, kompakt/vermikuláris, gömb vagy temperszén. Az öntöttvasak széles szövetszerkezeti skálával rendelkeznek, amelyek változatos tulajdonságokat eredményeznek. Sok jó tulajdonsága miatt az öntöttvas az egyik leggyakoribb öntött anyag. Az öntöttvasak közül a leggyakrabban használt a lemezgrafitos öntöttvas. Kedvező tulajdonságai a jó hővezető képessége, a rezgés-csillapító képessége, a korrózióállósága. Jól megmunkálható, mert a benne található grafitlemezek kenik a forgácsoló szerszámot. Hátránya ugyanakkor, hogy nem szívós, nincs mérhető nyúlása és a szilárdsága is kicsi. Felhasználási területei: járműipar, mezőgazdasági gépipar, építőipari berendezések, bányai gépek, szivattyúk, fűtőtestek, stb. A gömbgrafitos öntöttvasat olyan szerkezeti elemeknél használják, ahol a szilárdsági és szívóssági követelmények mellett még a könnyű alakíthatóság és az alacsony előállítási költség is feltétel. Fő alkalmazási területei a járműipar és a mezőgazdasági gépipar. A kompakt grafit tulajdonságai a lemezgrafit és a gömbgrafit tulajdonságai között képez átmenetet. A grafit fázis atomosan sík módon kristályosodik. Az ausztenit – grafit eutektikumban a grafit háromféle alakban kristályosodhat. A grafit morfológiájának kialakulásában sok tényező játszik szerepet pl.: hűtési sebesség, kémiai összetétel, hőmérséklet/növekedési sebesség hányados. A lemez grafit szerteágazó egykristály sok rácshibával, amelyek az őket körülvevő ausztenitben egymással összekapcsolódnak. A lemezek hosszának öt fajta eloszlási típusa különböztethető meg, ez fontos információval szolgál az öntvény dermedésével kapcsolatban. Ezekről a típusokról az öntöttvas szövetszerkezetét jellemző szabványokban ábrák találhatóak. A gömbgrafit a lemezes



1.7. ábra: A grafitalakok etalon képei. [89]

grafittól eltérően polikristályos. A gömbszöveg kialakulásának és növekedésének magyarázatára sokféle elmélet létezik. A grafit morfológiájának meghatározására etalonképeket használnak. A szabványban meghatározott etalonsorozatot mutatja a(z) 1.7 ábra. [89] [11]

### 1.3.4. Egyéb eutektikumok

Az előző pontokban felsorolt ötvözeteken túl létezik még sokfajta eutektikus szövetszerkezetű anyag. Ilyenek például a forraszanyagok. Azonban a dolgozatomban lefedem a tipikus morfológiákat, igyekeztem olyan anyagokat választani, amelyeket nagy mennyiségben minősítenek.

## 1.4. A képalkotó eszközök

### 1.4.1. Az optikai mikroszkóp

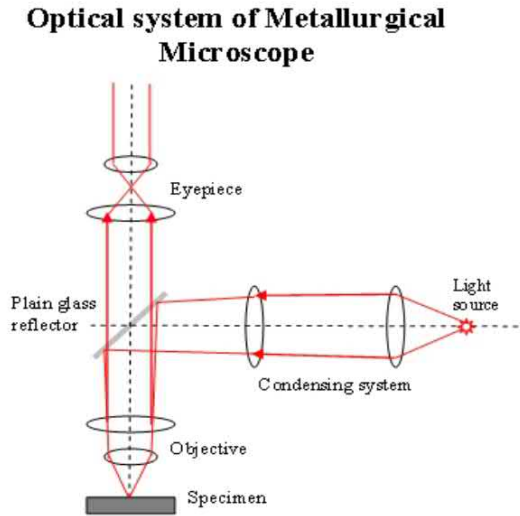
Az optikai mikroszkóp napjainkban a legelterjedtebb képalkotó eszköz a metallográfiai laboratóriumokban. Nagyítása  $50\times$ -tól  $1000\times$ -ig terjed. Az optikai mikroszkóp működése a következő: A fényforrásból a fény lencséken keresztül a planparallel üveglemezen keresztül újabb lencsékre érkezik, majd onnan a minta felületére. A minta felületéről visszaverődve a lencséken át majd a parallel üveglemezen keresztül át újabb lencséken keresztül a fény a vizsgáló szemébe és/vagy a képérzékelő félvezetőre érkezik. Az optikai mikroszkóp elvi működése a(z) 1.8 ábrán látható.

A vizsgált mintáim szempontjából a világos látótér a legfontosabb. Polírozás esetén (maratás nélkül) az öntöttvasban csak a grafit vizsgálható. Ebben az esetben világosnak látszik a mintának az a felülete, amely sík maradt a maratás után. Az öntöttvas mintán a vasat polírozás után is fényesnek látjuk. Azért látszik világosnak, mert arról a felületről szabályosan tud visszaverődni a fény. A mart területeken a fény szóródik, csak kis része tud visszajutni a lencsék felé, ezért azok a részek a mintának sötétben látszanak. Az eutektikumban általánosságban az egyik fázis mindig sötétebben látszik, mint a másik. A modern mikroszkópokban digitális kamera rögzíti a képeket.

Az optikai mikroszkóp képalkotási hibái lehetnek a következők, ha a felvételeket digitális kamerával készítjük:

- Véletlen zaj
- Állandó minta
- Átviteli zaj
- Egyenlőtlen háttérvilágítás

A kamera véletlen hibája a szenzorok felépítéséből adódik. Erre a hibára jellemző, hogy a képen az egyes pixelek korrelálatlanul a valós intenzitás érték alatt vagy fölött érzékelnek. Ezek a fluktuációk az időben változnak. A zaj úgy csökkenthető, hogy ugyanarról a területről több képet készítünk és a képeket átlagoljuk. Az állandó minta vagy más néven „forró pixelek” jellemzője, hogy egy adott pixel a szenzorban mindig az aktuális intenzitás érték fölött detektál. Ez főleg akkor fordul elő, ha hosszú idejű expozíciót használunk a kép készítéséhez. A hiba úgy küszöbölhető ki, hogy készítünk egy felvételt sötét látóterben is és ezt a képet kivonjuk a világos látóterű képből. Az átviteli zaj Fourier-szűréssel csökkenthető. A fényforrásnak az optikai tengelyben kell lennie, és a lencsék fókuszában kell lennie. Ha a lencse fókuszhibás, és mivel a fényforrás nem pontszerű ez a hiba kisebb-nagyobb mértékben mindig fennáll. A mikroszkópokban a megvilágítás fénye véges vastagságú lencséken keresztül jut el a kamerába. A hibára jellemző a képen az intenzitás maximum, ami mindig a lencse közepén helyezkedik el. Általában a mikroszkópok digitális kamerái nem az optikai tengelyen helyezkednek el, ezért tapasztalhatjuk azt, hogy a digitális képen az intenzitás-maximum nem a kép közepén található. A legtöbb mikroszkóp gyári szoftvere alkalmas-e hiba korrigálására, azonban ehhez egy polírozott mintáról készült képre van szükség, ami alapján a mikroszkóp szoftvere elvégzi a szükséges átalakításokat a képen. Ez a posteriori háttérkorrekció. A(z) 5.3 ábrán láthatóak az optikai mikroszkóppal készült felvételek. [92] [27] [26]



1.8. ábra: Az optikai mikroszkóp működésének elve.  
[90]

### 1.4.2. A pásztázó elektronmikroszkóp

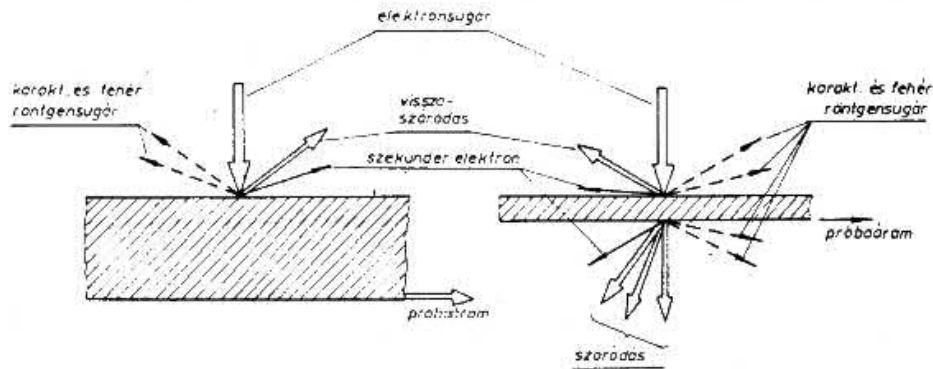
A másik elterjedt képalkotó eszköz az anyagvizsgálat területén a pásztázó elektronmikroszkóp, vagy *SEM* (*Scanning Electron Microscope*). Az optikai mikroszkóptól eltérően itt nem a fotonok segítségével készül a kép, hanem elektronok felhasználásával. A mintát egy vákuumkamrába kell helyezni, mivel az elektronokat a levegő molekuláival való ütközésének következtében nem lehetne képalkotásra használni. Az elektronforrásból — ami általában wolfram katód — az elektronok mágneses lencséken keresztül a mintára érkeznak, majd a mintával történő kölcsönhatásukat felhasználva különböző információk nyerhetők a mintáról. Ilyenek a következők:

- Szekunder elektronok (*SE*).
- Visszaszórt elektronok (*BSE*).

Ezek láthatóak a(z) 1.9 ábrán.

A szekunder elektronok nagyon közel vannak a minta felületéhez, ezért a *SE* módszerével nagyobb nagy felbontású képeket készíthet egy mintafelületről, és az 1 nm-nél kisebb részletekről lehet képet készíteni. A visszaszórt elektronok (*BSE*) olyan elektronok, amelyek rugalmas szórással visszaverődnek a mintából. A mintában lévő mélyebb részekből származnak, következésképpen a *BSE*-képek felbontása kisebb, mint az *SE* képeken. Azonban a *BSE*-t gyakran használják az analitikus *SEM*-ben, a karakterisztikus röntgensugárzás spektrumaival együtt, mert a *BSE* jel intenzitása szorosan kapcsolódik a minta rendszámához (*Z*). Nagyobb rendszámú elemekről a visszaszórt elektronok mennyisége is nagyobb, ezért ezek az elemek világosabban látszódnak a képeken. A *BSE*-képek tájékoztatást nyújtanak a minta különböző elemeinek eloszlásáról. Karakterisztikus röntgensugarak akkor kerülnek kibocsátásra, amikor az elektronsugár eltávolítja a belső héj elektronját a mintából, és ezáltal egy magasabb energiájú elektron tölt be a héjból és felszabadítja az energiát. Ezek a karakterisztikus röntgensugarakat használják az elemek azonosítására és a mintában lévő elemek mennyiségének mérésére. A nagyon keskeny elektronsugárnak köszönhetően a *SEM* mikroszkópi képek nagy





1.9. ábra: Az elektronok és az anyag kölcsönhatásai.

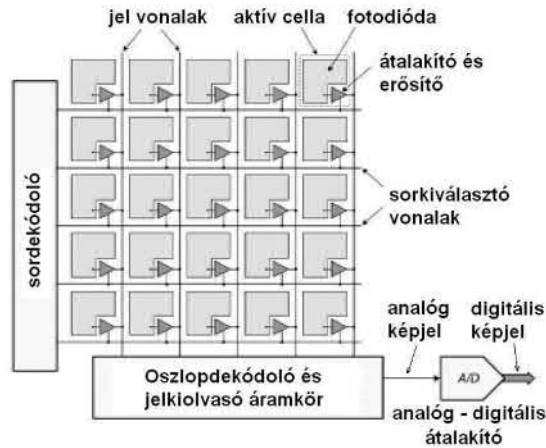
[91]

kiterjedésű mélységélességgel rendelkeznek, ami egy jellemző háromdimenziós megjelenést eredményez, amely egy minta felszíni szerkezetének megértéséhez hasznos. A nagyítás mértéke kb.  $10\times$ -től több mint  $500.000\times$ -esig terjed. A(z) 5.2 c) ábrán látható pásztázó elektronmikroszkóppal készült kép. Az eutektikumok esetében az egyik fázis kevesebbet, a másik pedig többet tartalmaz a nehezebb elemből, elemekből. Ezért a *SEM* képeken az egyik fázis világosnak, míg a másik fázis sötétnek látszik. [91][93]

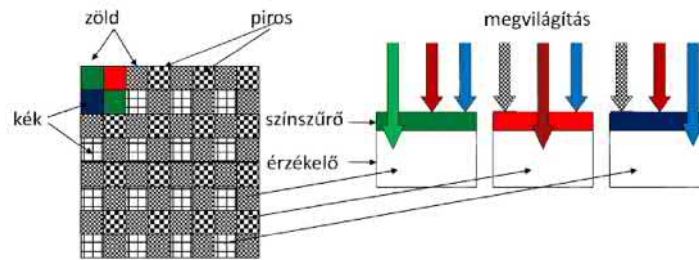
## 1.5. A képek érzékelése és kezelése

Ahhoz, hogy a szövetsképeket számítógép segítségével feldolgozni, mérni tudjuk, egy olyan eszközre van szükség, amely a képet digitalizálja. Ez az eszköz a kamera része, mely lehet CCD (**C**harge-**C**oupled **D**evice) vagy CMOS (**C**omplementary **M**etal **O**xide **S**emiconductor) fényérzékelő integrált áramkör. A CCD és a CMOS közötti legfőbb különbség a gyártástechnológiájukból adódik. A CMOS érzékelőkben minden képponthoz elhelyezhető egy foton - feszültség átalakító, így ez az eszköz sor- és oszlopcímzéssel rendelkezik, azaz az érzékelő minden képpontja címezhető. A CCD esetében viszont az elemi érzékelők értékei sorosan kerülnek kiolvasásra, így a pixelek címezése is bonyolult. A soros kiolvasás azt jelenti, hogy csak a sor végén érzékelhető a képpontok töltése, így az egyes töltéseket el kell juttatni a sor végére.

A CCD-k előnye a nagyobb érzékenyséjük a CMOS-szal szemben, hátrányuk viszont a jelentős fogyasztás, ami melegedést okoz, az pedig zaj növekedést. A CMOS hátránya a rosszabb jelterjedési sebesség, és hogy a kiolvasás ideje alatt is megvilágítás érheti az érzékelőt, ami a képet rontja. Ezért a CMOS érzékelőkhöz mechanikus blendét célszerű alkalmazni, míg CCD esetében ez elektronikusan megoldható. A CMOS érzékelőkben a fény érzékelését fotodiódák végzik. A fotodiódában gerjesztett töltéseket egy kondenzátor segítségével alakítják feszültséggé. Minél több fényt kap a fotodióda, annál több töltésmennyiség keletkezik, így annál jobban töltődik fel a kondenzátor. Az aktív érzékelőcella fotodiódán kívül egy kondenzátoros töltés/feszültség átalakítót és feszültségerősítőt is tartalmaz. A CMOS felépítése a 1.10 ábrán látható. A cellaerősítők kimenetei oszloponként közös jelvonalakra csatlakoznak. A sorkiválasztó vonal az erősítő kimenetét engedélyezi vagy letiltja. A sorkiválasztó vonalakat az oszlopdekódoló

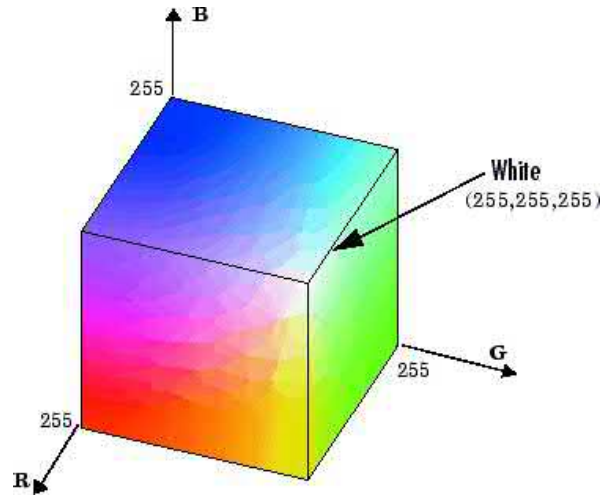


1.10. ábra: A CMOS képérzékelő felépítése. [47]



1.11. ábra: A Bayer-szűrő. [47]

áramkör hajtja meg, és az érzékelő mátrix sorai közül csak egyet engedélyez egyidejűleg. Az oszlopdekódoló és a jelkiolvasó áramkör a kiválasztott sorban lévő cellák feszültségét egyenként olvassa ki. Az így kapott analóg jelet az analóg/digitális átalakítás után már számítógéppel fel lehet dolgozni. Az érzékelő fotodiódái a fény színét nem, csak az erősségét képesek érzékelni. Ezért a színeket szétválogatva külön-külön kell érzékelni, amelyet a végén digitálisan egy képponttá kell alakítani. A színes érzékelők működése többféle eljárás alapján alapulhat. Egy ilyen megoldás, hogy pixelenként van vörös ( $R$ ), zöld ( $G$ ), kék ( $B$ ) színre érzékeny elem. Az ilyen szűrőket kétféleképpen helyezhetik el. Síkban mozaik-szerűen — (*Bayer-szűrő*) 1.11 ábra —, vagy egymás alá rétegesen. Az első megoldás egyszerűbb, de sok hátránya van. Ezek: kisebb valódi pixelszám, ezáltal a képelesség romlik, és a *Moire-effektus*. A CCD esetében csak szoftveresen lehet a képfeldolgozást megvalósítani a sorfolytonos kiolvasás miatt, azonban a CMOS érzékelő használatakor lehetőség van ezt hardveresen is megoldani, így gyorsabbá válhat a képelemzés folyamata. Egy másik megoldás a színes képek rögzítésére, hogy alapszínenként külön-külön képérzékelőt használnak, ennek hátránya, hogy drága. A színes képekben a színinformációt különböző színrendszerekben lehet megadni. Az egyik leggyakrabban használatos színrendszer az RGB színrendszer. Három alapszínből épül fel ezek a piros (700nm), a kék (546.1nm), és a zöld (435.8nm). Ezekből a színekből vannak kikeverve a képen látható színek. Az RGB színrendszer a legszemléletesebb módon



1.12. ábra: A színekocka. [48]

egy színekockában ábrázolható, —(1.12 ábra)—, ahol a kocka sarokpontjain szerepel a három színekomponens. Az origóban található a fekete szín — itt mind a három színekomponens intenzitásértéke nulla – a fehér pedig a mindhárom színekomponens maximális intenzitásértékénél. A három független színekomponensből így az összes szín kikeverhető a komponensek intenzitás értékeinek változtatásával. A színes képek tárolása is így működik. Mindegyik képpont színinformációja 3, vagy 4 byte-on tárolódik. Mindkét esetben egy-egy byte tartalmazza egy-egy színekomponens intenzitás értékét, azaz az intenzitás felbontása leggyakrabban 0–255 közötti tartományban egész értékekkel történik. A 32 bites képek esetén a negyedik byte az ún. áttetszőséget ( $A$ ) definiálja. A modern ablakkezelő rendszerek képesek kezelni a képpontok áttetszőségét, mintha a kép egy üveglapra lenne nyomtatva. A képek a memóriában az adott képpontok színekomponens értékeivel sorfolytonosan tárolódnak. Egy képpont színértékei a kép bal felső sarkából indulva a kép méreteinek ismeretében érhető el. A képnek ez a tárolási formája a tömörítetlen tárolás. A kép méretének növekedésével így a memóriaigény is növekszik. Egy másik színrendszer az YCC, amely a képek tömörített formában való tárolását is lehetővé teszi. Végtelen számú színtér definiálása lehetséges a számítógépi képfeldolgozásban, azonban a legtöbbször használt színrendszer az RGB. Sok ilyen színteret az  $R$ ,  $G$ ,  $B$  lineáris függvények alkalmazásával hozunk létre. Így például egy  $v_1$ ,  $v_2$  és  $v_3$  koordinátákon alapuló színtér a következőképpen írható:

$$\begin{aligned} v_1 &= Ar_1 \cdot R + Ag_1 \cdot G + Ab_1 \cdot B \\ v_2 &= Ar_2 \cdot R + Ag_2 \cdot G + Ab_2 \cdot B \\ v_3 &= Ar_3 \cdot R + Ag_3 \cdot G + Ab_3 \cdot B \end{aligned} \quad (1.2)$$

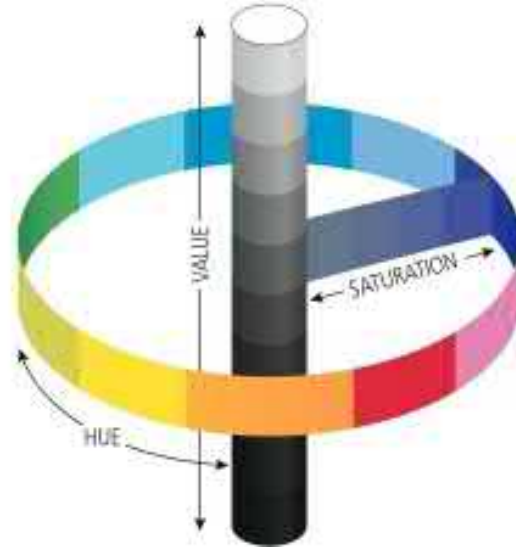
Hasonlóképpen bármely ilyen rendszerhez lineáris függvények használhatóak az RGB térbe való visszatranszformáláshoz. A  $D_r$ ,  $D_g$ ,  $D_c$  együtthatók a fenti egyenletek  $R$ ,  $G$ ,  $B$  megoldásával oldhatók meg. Például:

$$\begin{aligned} R &= Dr_1 \cdot v_1 + Dg_1 \cdot v_2 + Db_1 \cdot v_3 \\ G &= Dr_2 \cdot v_1 + Dg_2 \cdot v_2 + Db_2 \cdot v_3 \\ B &= Dr_3 \cdot v_1 + Dg_3 \cdot v_2 + Db_3 \cdot v_3 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Az emberi látás sokkal kevésbé dinamikus tartománnyal rendelkezik a szín térbeli változásához képest, mint a fényességhez, más szóval jobban érzékeljük a részletek fényességében bekövetkező változásokat, mint a kis színváltozásokat. Így ahelyett, hogy az RGB-t használnánk, hatékonyabban tudunk kódolni a fényssűrűséget egy csatornán és a színinformációkat két másik csatornán. A két színcsatornát kisebb sáv szélességgel kódoljuk, amelyre számos módszer létezik. Elsősorban a pontosság csökkentésével, a térbeli felbontást csökkentve. Mivel a zöld dominál a luminancia-csatornában, érdemes a másik két színcsatornát a megvilágított vörösre és kékre kivonni. Az ilyen fényssűrűséget, vörös színt és kék színrendszereket általában  $Y$ ,  $Cr$  és  $Cb$ -nek nevezzük. Az alábbiakban ezeket általában úgy említik, hogy YCbCr, vagy egyszerűen YCC-ként. Az RGB-ből YCC-re történő konvertáláshoz a következő mátrix műveletet alkalmaznak (megfelelő gamma-korrekciónak alkalmazása után). Figyeljük meg, hogy a  $Cr$  értéknél jelentős részt a piros tesz ki, és a  $Cb$ -értéknél a kék jelentős. A Chroma1 és a Chroma2 közötti kiegyensúlyozatlan skálakülönbség a *Kodak* szerint a valóságos jelenetek tipikus eloszlását követi.

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B \\ Cr &= 0,701 \cdot R - 0,587 \cdot G - 0,114 \cdot B \\ Cb &= -0,299 \cdot R - 0,587 \cdot G + 0,886 \cdot B \end{aligned} \quad (1.4)$$

Mivel a számítógépben véges mennyiségű memória található emiatt szükséges a képeket feldolgozás előtt vagy után a háttértárolón tömörített formában tárolni. A tömörített képtárolás két alapvető módját különböztetik meg; a veszteséges és a veszteségmentes tömörítő eljárásokra. A veszteségmentes tömörítés módszert alkalmazva csökken a képfájl mérete, és az eredeti kép a tömörített tárolásból visszaállítható. A veszteséges tömörítő eljárásokkal, jóval kisebb fájl méretek állíthatóak elő, ugyanakkor már a kép a tömörítést megelőző eredeti formájába már nem állítható vissza. További tulajdonsága a veszteséges tömörítő eljárásoknak, hogy a tömörítés fokának növekedésével a fájl méret jelentősen csökken, azonban az eredeti kép is jobban különbözik a tömörítettől. Ezért a számítógépi képelemzés alkalmazásánál ügyelni kell a kép helyes tömörítésének a módjára, hogy az információvesztést elkerüljük. Figyelembe véve az emberi látás „preferenciáját” a fényssűrűség információihoz, az YCC színtér segítségével kép tömörítési rendszert készíthetünk. Tekintsünk egy RGB képet  $Nx$  számú vízszintes képponttal és  $Ny$  számú függőleges képponttal. Ha minden pixelt egy byte-ból reprezentálunk, akkor a képméret byte-ban  $Nx \times Ny \times 3$ . A kép YCC-térben való tárolás esetében az  $Y$  fényssávcsatorna egy byte-ként tárolódik minden egyes képpontnál, de a két színtartományt csak az egyes  $4 \times 4$  méretű blokkok tárolják. A kapott kép 1/3-a az eredeti képnek. Másképpen ahelyett, hogy pixelenként átlagosan 3 byte-ot (24 bitet) használnánk, csak 9 bit / képpontot használunk. A számítógépi képelemzés során a használt kamera legtöbbször színes képet ad, de a színes képek feleslegesen sok információt tartalmaznak. Elegendő a fekete-fehér televíziózásban használt színek intenzitását megjelenítő szürke képek használata. A színek intenzitásának megértéséhez a HSI színrendszert kell megismerni, 1.13 ábra. A HSI is három független számadattal írja le a színeket. Ezek a színárnyalat (**H**ue), telítettség (**S**aturation), és az intenzitás (**I**ntensity). A szürke képen az egyes képpontokhoz ennek a szürke színskálának az elemeit rendeljük 0–255 közötti egész értékek között, 8 bites kép esetén. [41] [42] [43] [44] [45] [46] [50] [47]



1.13. ábra: A HSI színrendszer szemléltetése. [49]

### 1.5.1. Sztereológiai alapfogalmak

A sztereológia tudománya a geometriai összefüggéseket vizsgálja a háromdimenziós szerkezet és annak kétdimenziós metszete között. A háromdimenziós szerkezet tulajdonságait két csoportra oszthatjuk, topológiai és méret jellemzőkre. A méret jellemzők közül a területarányt, kerületet. Abban az esetben, ha az anyagokat felépítő és részecskék és szemcsék azonos méretűek a tér különböző irányában, akkor izotróp szövetszerkezetű elemekről beszélünk. Ezzel szemben az anizotrópiát mutató részecske vagy szemcse eltérő méretű a tér egyes irányában. Ilyenek például a tű formájú részecskék, amelyek a tér egyik irányában nyújtottak, vagy a lemez alakú szemcsék, amelyek kétirányú anizotrópiát mutatnak. Akkor irányított vagy orientált szövetszerkezet, ha az anizotróp szemcsék szimmetriatengelyei a térben nem véletlenszerűen foglalnak helyet, hanem egy adott tengely mentén elrendeződnek. A nem véletlenszerű elrendeződés másik módja a helyi rendezettség vagy részecskecsoportosulás, de ebben az esetben nincs orientációs tengely. Az eutektikus szerkezetek gyakran orientáltak vagy csoportosultak, a fázisok morfológiájától és a kristályosodás körülményeitől függően.

A számítógépi képelemzésben a metrika kérdése fontos. Ha adott két pont egy síkban és meg akarjuk határozni a közöttük lévő legrövidebb távolságot, akkor a folytonos világban az euklideszi megoldás nyilvánvaló. Az euklideszi távolság egyértelmű.

$$d(\vec{p}, \vec{q}) = d(\vec{q}, \vec{p}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad (1.5)$$

Azonban a számítógépi képelemzésben egy diszkrét világban dolgozunk, amelynek alapegysége a pixel. Így itt lehet értelmezni az ún. „city block távolság”, vagy „Manhattan távolság” fogalmát. A 1.6 összefüggés „city block távolságot” írja le.

$$d_1(\vec{p}, \vec{q}) = \|\vec{p} - \vec{q}\|_1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i| \quad (1.6)$$

A „city block távolság” egyik tulajdonsága az, hogy nem egyértelmű, azonban ha mindig a cél felé teszünk egy-egy lépést, akkor a különböző utak hossza egyforma. Továbbá ennek használatával nem fordulhat elő, hogy két képpont közötti távolság nem egész értékre adódik. [21] [22] [23] [24] [25]

### 1.5.2. A klasszikus számítógépi képelemzés és alakjellemzés

A klasszikus számítógépi képelemzés folyamata:

1. A képek rögzítése.
2. A képek feldolgozása, lényeges információk kiemelése.
3. A képelemzés során, a képeken látható vizsgálni kívánt jellegzetességeket vagy objektumok megkülönböztetése, háttértől való elválasztása.
4. A bináris képek átalakítása.
5. Mérés végrehajtása.
6. Mérési eredmények előállítása.
7. Eredmények értékelése.

A bináris képen kétféle mérést hajthatunk végre: látótér átlagadatainak mérése, az objektumok egyedi jellemzőinek mérése. A mérés során, a képen egy mérőkeretet hozunk létre, mindent mérünk, ami a mérőkereten belül van. A képelemzés során minden adatot (a kalibráció előtt) képpontokban adunk meg. A képpont mind a lineáris méretnek, mind a területnek az alapegysége.

Objektumok méréséhez az objektumot azonosítani kell, ez a címkézés. Az objektumok jellemzőinek mérésekor azokat az objektumokat vesszük figyelembe, amelyeknek egy megkülönböztetett pontja (FCP, feature count point) a mérőkereten belülré esik. Az *FCP* kijelölése nem egyértelmű, választás kérdése. Ilyen pont lehet pl.:

- A legelső leginkább jobbra lévő pont.
- Súlypont: Az objektum által reprezentált síkidom súlypontja.
- Geometriai középpont: Az objektum köré rajzolt legkisebb területű téglalap geometriai középpontja.

Ha az objektum FCP-je a mérőkereten belül van, de maga az objektum nincs benne teljesen ettől függetlenül a teljes objektumot figyelembe vesszük. Egy alakjellemző nem elég az alak leírására, mert ha pl. a körszerűség értéke eltér 1-től csak azt tudjuk, hogy nem kör, hogy többet tudjunk más számok is kellenek. Előre megadott alakok szerint döntő fával határozható meg az objektum alakosztálya. Az objektumok körszerűsége:  $\frac{P^2}{4 \cdot \pi \cdot A}$  Értéke 1 esetén az objektum kör. A további vizsgálható jellemzők a topológiai jellemzők. Az objektumok közötti távolságot többféle módon definiálhatjuk. Lehetséges például a legközelebbi kontúrponatok távolsága, vagy pl.: tetszőleges FCP-k távolsága. Metallográfiában, főleg a minősítésben ezt szeretjük, mert két azonos fázis közötti anyagvastagságot adja meg, ami a másik fázis. Amennyiben a tetszőleges FCP-unk a

súlypont akkor a konkáv objektumok felvetnek egy problémát, mégpedig azt, hogy a súlypontjuk nem minden esetben esik a síkidomra belülré. Az objektumok csoportosulásának kimutatására, és a csoportosulás jellemzésére többféle módszer adott.

Az elrendeződés vagy az elrendeződés mértékének a jellemzésére többféle módszer létezik. Ezek kiválasztása ugyanúgy nem egyértelmű, mint pl. a FCP kiválasztása. A négyzetes cellák sűrűségfüggvénye olyan módszer, amely képes kimutatni az objektumok csoportosulásának tényét. Ennek alkalmazásakor a szövetképet felosztjuk négyzetes cellákra és megszámloljuk az objektumokat minden egyes cellában. Rendezett objektum-eloszlás esetén nagyjából egyforma az objektumok száma minden egyes cellában. Míg ha csoportosulás van, akkor vannak olyan cellák, amelyekben nulla az objektumok száma, vannak olyanok, amelyekben kevés és vannak olyanok, amelyekben nagyszámú objektum található. A módszer legnagyobb problémája a megfelelő méretű cella meghatározása. Nem véletlenszerű eloszlás esetén az eredmény jelentősen függ a cellák méretétől. Ha túl kicsi a cella mérete, akkor objektum mentes területeket detektál, hamis csoportosulásokat feltételezve, ha túl nagy, akkor minden cellában talál objektumokat és nem kimutatható a csoportosulás. Sokan foglalkoztak az optimális méret meghatározásával, amely körülbelül az objektumok átlagos méretének a kétszerese.

A párcorrelációs függvény vagy másképpen a radiális eloszlásfüggvény létrehozásakor  $r$  sugarú körlapokat helyezünk minden egyes részecske középpontjába, és megszámloljuk a körlap belsejébe eső objektumokat. A függvény definíciója:

$$H(r) = \frac{N_{ra}}{N_a} \quad (1.7)$$

A radiális eloszlásfüggvény alakját az objektum-csoportosulás jelentősen befolyásolja. Amikor az objektumok eloszlása véletlenszerű, akkor a függvény értéke 1. Részecske-csoportosulások előfordulásakor jellegzetes csúcs jelenik meg, hiszen az objektumok előfordulásának valószínűsége az átlaghoz képest megnő.

A kovariancia a matematikai statisztikában használt fogalom, amely két valószínűségi változó  $(X, Y)$  közötti összefüggést ír le. A változók közötti kapcsolat abban nyilvánul meg, hogy az egyik változó növekedése vagy csökkenése együtt jár a másik változó hasonló értelmű módosulásával. A kovariancia pozitív, ha a valószínűségi változók együtt mozognak negatív, ha ellentétesen. A kovariancia a következőképpen definiálható:

$$KOV(X, Y) = E \{ [X - E(X)] [Y - E(Y)] \} \quad (1.8)$$

A zárt halmazok eloszlásának jellemzésére szintén használható a kovariancia. Ha a szövetszerkezetről készült mikroszkópi képet bináris halmaznak tekintjük, úgy könnyen értelmezhető a kovariancia. Legyen a szövetkép bináris halmaza:  $\overline{\overline{B}}$ . Ha a képpont a háttérhez tartozik az értéke 0, ha objektumhoz akkor az értéke 1. Toljuk el a  $\overline{\overline{B}}$  halmazt  $\vec{h}$  translációs vektorral. Az eredeti halmaz ( $\overline{\overline{B}}$ ) és az eltolt halmaz ( $\overline{\overline{B}} + \vec{h}$ ) metszetének segítségével a kovarianciához  $KOV(\overline{\overline{B}} + \vec{h})$  jutunk:

$$KOV(\overline{\overline{B}}, \vec{h}) = E \left\{ Mes \left[ (\overline{\overline{B}}) \cap (\overline{\overline{B}} + \vec{h}) \right] \right\} \quad (1.9)$$

A kovariancia azt jelzi, hogy a  $\vec{h}$  vektor irányában van-e valamilyen periodicitása, vagy anizotrópiája a bináris halmaznak. A kovariancia hatékony eszköz a különböző egy-

másba rétegzett szövetszerkezeti elemek közötti kapcsolat kifejtésére. A függvény a következő esetekre használható:

- Pontok vagy részecskék csoportosulásának jellemzésére.
- Olyan szövetszerkezet leírására, amelyben különböző méreteloszlású részecskék együttesen vannak jelen.
- Periodikusság vagy pszeudo-periodikusság kimutatására.
- Anizotrópia jellemzésére. De csak akkor, ha az (anizotróp) objektumok orientáltak, és a szövetszerkezetben textúra figyelhető meg. Nem alkalmas a kovariancia az individuális részecskék vagy szemcsék anizotrópiájának jellemzésére.

A hatósugár szerinti vázszerkezet (SKIZ) arról ad tájékoztatást, hogy nyolc szomszéd kapcsolatot feltételezve melyik képpontok vannak az adott objektumhoz legközelebb, azaz mely képpontok vannak az adott objektum hatósugarában. A transzformáció során a szegmentált objektumokat címkézzük, majd addig dilatáljuk a bináris képpel együtt az objektum képet, amíg minden egyes képpontról el nem dőlt, hogy melyik objektumhoz tartozik. Ez a művelet egy determinisztikus sejtautomata. Ha megkeressük az így kapott objektum képen az objektumok határát (ahol a vizsgált képpont környezetében eltérő címkéjű képpont található), akkor kirajzolódik elénk a hatósugár szerinti vázszerkezet. Ez a szerkezet azonban még nem alkalmas mérésre, mert a képkerethez közeli objektumok területe eltorzult, hiszen a képkereten túl nem ismerjük a szomszédos objektumokat. Ezért kiszűrjük az objektumképből azokat a területeket, amelyek a képkerethez érnek. Ha ez nagy információ veszteséget jelent (kevés objektum van a képen), akkor a címkézést kell úgy elvégeznünk, hogy nem szűrjük ki az objektum képből azokat az objektumokat, amelyek a képkerethez érnek. Így elvégezve a SKIZ transzformációt, ezeknek a képkerethez érő objektumoknak a ható területét szűrjük majd ki, így minden objektum hatósugár szerinti területe benne marad az objektum képen. A mozaik művelet lényege, hogy a vizsgálni kívánt szövetszerkezeti objektumok súlypontjai köré olyan síkbeli sokszögeket rajzolunk, amelyekhez tartozó pontok mindegyike közelebb van ehhez a ponthoz, mint bármelyik más szövetszerkezeti objektum súlypontjához. Az így létrehozott sokszögek (cellák) egyrészt igen jól jellemzik az objektumok eloszlását, másrészt az anyagok szövetszerkezetének matematikai alapokon történő szimulálására is alkalmasak. Az anyagtudományi gyakorlatban széleskörűen használatos a *Voronoi-mozaik*. Ez a sík olyan felosztását jelenti, amikor a kiinduló  $p_i$  pontokat véletlen Poisson-folyamatnak megfelelően választjuk ki. Ezután minden egyes  $p_i$  ponthoz hozzárendelünk egy  $M_i$  tartományt (mozaikot), amelynek minden egyes pontja ( $m_i$ ) az illető  $p_i$  ponthoz van a legközelebb:

$$M_i = \{m_i : d(m_i, p_i) < d(m_i, p_{j \neq i})\} \quad (1.10)$$

Az így létrejött konvex sokszögek a síkot hézagmentesen és nem periodikusan töltik ki. Az ilyen mozaikok az anyagi szerkezetek szimulálása mellett a részecske-eloszlás jellemezésére is képesek. [21] [22] [23] [24] [25]

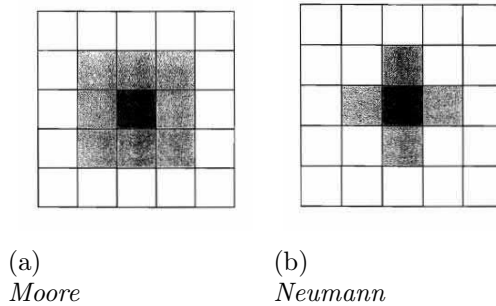


## 2. fejezet

# A sejtautomata

A sejtautomata egy időben és térben diszkrét modellezési módszer, amit az 1940-es években fejlesztett ki Neumann János és Stanisław Ulam. A sejtautomata egy szabályos sejtrácsból áll, minden egyes sejt minden szempontból azonos, és véges számú állapotuk lehet. A rács véges számú dimenziójú lehet. Minden egyes sejtnak meghatározott számú szomszédja van, és e szomszédságon keresztül kapcsolatban vannak egymással. A sejtautomata modellezés másik fontos jellemzője a diszkrét időlépések. A modell rendelkezik egy kezdeti állapottal, ez azt jelenti, hogy  $t = 0$  időpillanatban minden egyes sejtnak meg van határozva az állapota. Az automata futása során minden időlépésben minden sejt állapotát ismerni kell. Az automata nem kerülhet olyan helyzetbe, hogy a futása során nem tudja meghatározni bármelyik sejtjének az állapotát. Ez az állapot  $t = t + 1$  időlépésben az átmeneti feltételeknek megfelelően megváltozik. Ezek az átmeneti feltételek rendszerint matematikai függvények. Az átmeneti feltétel tartalmazza a szomszédokra vonatkozó információkat is. Az átmeneti feltételek a szimuláció futása során nem változnak, minden sejtre azonosak, és a teljes rácsra érvényes. Kivételek léteznek, ilyenek a sztochasztikus sejtautomata és az aszinkron sejtautomata. A sejtautomatát mint modellezési módszert számos tudományterület használja így pl.: számítástudomány, fizika, mikroszerkezet modellezés, kriptográfia, áramlástan, biológia stb. A sejtautomata kétdimenziós megvalósításának egy lehetséges módja egy négyzetrács, amely végtelen kiterjedésű. A végtelen kiterjedést a határfeltételek megfelelő definíciója biztosítja.

A mikroszerkezetről mikroszkóppal és digitális kamerával készült szövetképek rendszerint kétdimenziósak, ezért a továbbiakban csak a 2D sejtautomatáról ejtek szót. Az anyagtudományban és a számítógépi képelemzésben célszerű a négyzetrácsot választani több okból: a monitorokon a megjelenő kép pixelekből áll – így egy pixel megfeleltethető a sejtautomata univerzumban egy cellának – amelyek négyzetek, így vizuálisan megjeleníteni a sejtautomata működését könnyű; a képeket a memóriában tömb formájában tárolják a programok, a négyzetráccsal egyszerű dolgozni. A végtelen kiterjedést véges méretű rácson megadni többféle módon lehet. Egyik megoldás, hogy a határon lévő sejtek értéke konstans. Egy másik megoldás, hogy a határon lévő sejteknek máshogy adjuk meg a szomszédságot, míg egy harmadik megoldás, hogy a határon lévő sejteknek más átmeneti feltételeket adunk. A következő lépés az átmeneti feltételek megadása, majd a kezdőállapot megadása. Minden négyzet a rácspan egy sejt. A sejt szomszédság megadására több mód is létezik. Ilyen pl.: *Moore-szomszédság*, vagy *Neumann-szomszédság*. Ezek láthatóak a 2.1 ábrán. [33] [29]



2.1. ábra: A (a) *Moore-féle* és (b) *Neumann-féle* szomszédságok. [29]

## 2.1. A sejtautomaták osztályozása

A sejtautomatákat működésük szerint több csoportba lehet osztani. Ha a sejtek állapotának vizsgálata szisztematikusan történik, pl. sorról sorra, akkor szinkron működésű automatáról beszélünk. Ha a sejtek kiválasztása véletlenszerűen történik – így előfordulhat, hogy egy-egy sejt kimarad, míg egyes sejtek többször sorra kerülnek – akkor aszinkron automatáról beszélünk. Az aszinkron szabályokat újraoszthatjuk, ilyen a reverzibilis automata. Másik az irreverzibilis, amely esetben az automata egy sejtre csak egyszer alkalmazza az állapotváltozási szabályokat. Az aszinkron automaták között is kétfélet lehet megkülönböztetni. Egyik esetében az automatában előre rögzítve van egy véletlenszerű szekvencia, és mindig ezt járja be az automata az állapotváltozási szabályokkal. A másik esetben minden lépésben véletlen folyamat dönt arról, hogy melyik sejtet vizsgálja meg. Az állapotváltási szabályok szerint is lehet csoportosítani az automatákat. Egy speciális sejtautomata a totális sejtautomata. Ezen sejtautomaták esetében a sejtek állapotát egész számok adják. Az új állapotot jelentő új számot a sejt állapotát reprezentáló régi számokból és a sejt szomszédjainak állapotát reprezentáló számokból aritmetikai műveletek útján határozzák meg. A determinisztikus szabályrendszerű automaták esetében már logikai műveletek is szerepet játszanak az új állapot meghatározásakor. Az állapotváltozási szabályok által meghatározott állapotváltás minden esetben bekövetkezik. Stephen Wolfram a *New Kind of Science* című könyvében a kétállapotú determinisztikus sejtautomatákat négy fő csoportra osztja.

1. Majdnem az összes kezdő minta gyorsan stabillá válik, az összes véletlenszerű kezdő minta eltűnik.
2. Majdnem az összes kezdő minta gyorsan stabillá vagy oszcilláló mintává változik. A véletlenszerű alakzatok közül eltűnik néhány, és néhány megmarad. Lokális változások a kezdő mintában lokálisak maradnak.
3. Majdnem az összes kezdő minta pseudo-véletlenszerű mintákba vagy káoszba megy át. Minden stabil alakzatot eltüntet az azt körülvevő zaj. Lokális változások a kezdő mintában a végtelenségig terjednek.
4. Majdnem az összes kezdő minta átmegy olyan komplex alakzatokba, amelyek érdekesen viselkednek, és ezek az alakzatok hosszú ciklusok után is életben maradnak. A 2. osztályú stabil vagy oszcilláló alakzatok létrejöhetnek, de hogy sta-

billá váljanak, ahhoz sok időlépés kell, még akkor is, ha a kiinduló minta relatív egyszerű volt. A lokális változások a mintázatban elterjedhetnek a végtelenségig.

Ezzel szemben a sztochasztikus szabályrendszerű automaták esetében az állapotváltási szabályok által előírt állapotváltás nem mindig valósul meg, hanem ennek bekövetkezése egy valószínűségi folyamat eredménye. [32]

## 2.2. Egyszerű kétdimenziós sejtautomaták

Stephen Wolfram az elemi egydimenziós sejtautomatákat vizsgálva, csoportosította őket a lehetséges sejtautomata szabályrendszer alapján, azonban a kétdimenziós esetben ez már nem egyszerű feladat. Ezek az automaták komplex viselkedésre is alkalmasak, így akár az anyagtudományi alkalmazásokban is szerepet kaphatnak. A komplex viselkedésű kétdimenziós automatából bemutatok párat.

### 2.2.1. A Game of Life automata

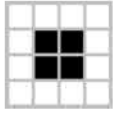
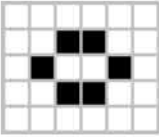
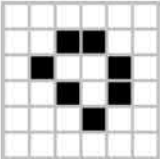
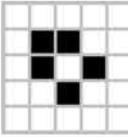
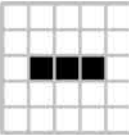
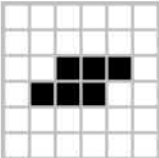
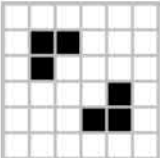
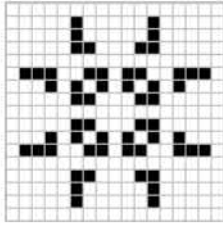
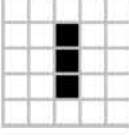
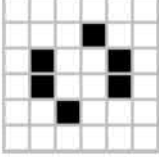
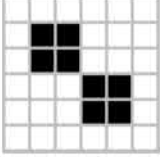
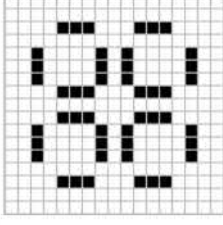
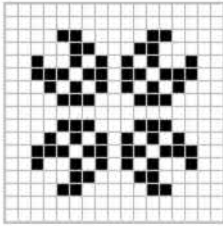
Az 1970-es években John Horton Conway a Neumann János által kidolgozott módszert igyekezett a lehető legegyszerűbbre módosítani. Az általa megalkotott *The Game of Life* nevű kétállapotú kétdimenziós sejtautomata, hamar ismertségre és népszerűsége talált. A sejtekhez két állapot van rendelve, élő vagy halott. Négy egyszerű szabályt alkalmazott a sejt nyolc szomszédjára. Ezek a következők:

- ha egy élő sejtnek kettőnél kevesebb élő szomszédja van, akkor a sejt meghal
- ha háromnál több élő szomszédja van, akkor a sejt meghal
- ha egy halott sejtnek pontosan három szomszédja van, akkor a sejt életre kel
- máskülönben, az összes többi sejt az eredeti állapotát megőrzi

Az életjáték működése során különböző minták jöttek létre. Ezek a minták olyan elnevezéseket kaptak, mint például „oszillátor”, „űrhajó”, „ágyú”, vagy „csendélet”. Conway úgy gondolta, hogy a minták növekedése véges, azaz véges az élő sejtek száma. Később azonban bizonyítást nyert, hogy létrehozható olyan élő alakzat, amely ismétlődően kibocsát magából egy mozgó mintát. Ez nyomot hagy maga után és a „Gospelgun” nevet adták neki.

### 2.2.2. A Game of Life automata alkalmazása a számítógépi képelemzésben

Az életjáték sejtautomatát három különböző morfológiájú képen futtattam le. A három kép:  $Al-Al_3Ni$  rudas eutektikum a rudak szegmentálva,  $Al-Cu$  lemezes eutektikum minden második lemez szegmentálva, és  $Al-Si$  eutektikum ahol pedig az eutektikumot szegmentáltam. Az eredményeken látható, hogy az életjátéokra jellemző stabil alakzatok megjelentek. A program futása során különböző számú időlépés után csak stabil és oszcilláló alakzatok maradtak. A végére kialakuló stabil állapotokon látható, hogy mind a három anyagnak jellegzetes alakzat eloszlást produkált. Erre a felhasználási módra az

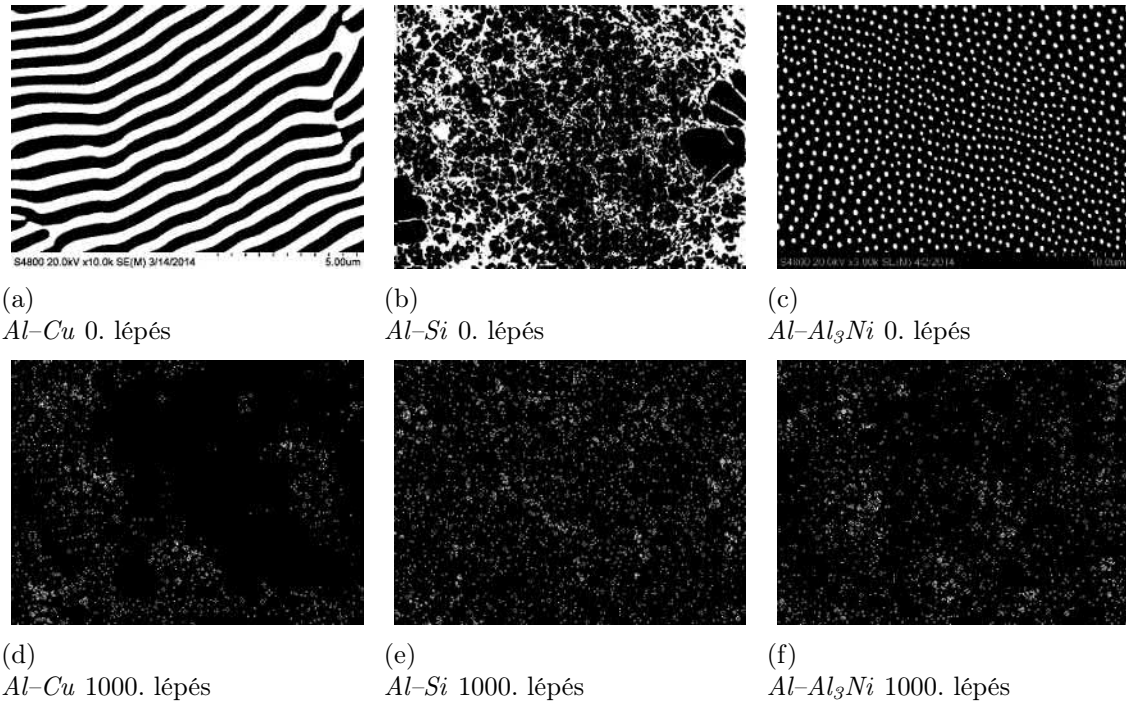
			
stabil alakzatok			
			
			
n/a	n/a	n/a	
oszcilláló alakzatok			

2.2. ábra: A Game of Life automata alakzatai [29]

életjátékszerű automaták közül csak ez az egy használható erre az elemzésre, mert a többi vagy kaotikus képed ad, vagy növekvő populációkat. Ebben az esetben a megmaradó populációk elemzéséből lehetséges eldönteni, hogy mi volt a képen. Azonban ez a módszer visszavezet a klasszikus képelemzési problémákra, így ennek a használatát elvetem.

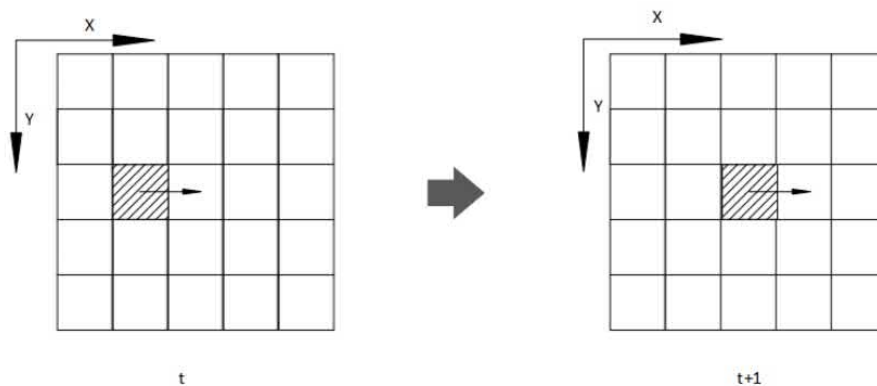
### 2.2.3. A HPP szabály

Ahhoz, hogy a képelemzésben általam használt HPP sejtautomata működése érthetőbb legyen, tegyünk egy kis kitekintést a diffúzió dinamikai anyagtudományi sejtautomatákra. Ezt a típusú sejtautomatát főleg diffúzió és áramlások szimulációjára használják. Az atomok mozgását a fémcs rácson diffúzióknak nevezzük. A diffúzió bármely alapmechanizmusát tekintve látható, hogy az atomok nem mozdulhatnak el bármely

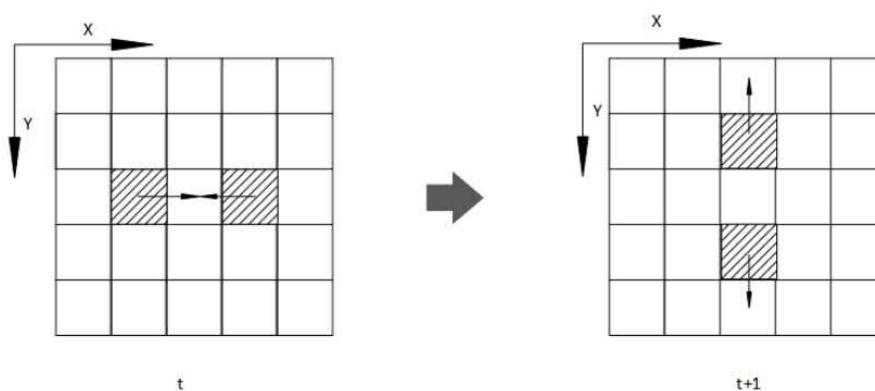


2.3. ábra: A szövetszerkezetek, amelyeken az életjáték automatát futtattam.

irányban, hanem a kristályrács által megszabott irányokban történhet az atomi elmozdulás. Színelem rácsában az öndiffúzió esetében véletlenszerűen – véletlenszerű irányban mozognak az atomok. Hasonló a diffúzió jelensége szilárd oldatok esetében azzal a kivétellel, hogy az ötvöző atomok mozgását vizsgáljuk. A diffúzió vizsgálatának alapja, hogy az objektumok mozgását tudjuk vizsgálni az univerzumban. A sejtek rögzítettek, így nem mozoghatnak az univerzumban, a mozgás csak az állapotok változásán keresztül valósulhat meg. Az adott pozícióban éppen van, vagy nincs objektum, adja az állapotok diszkrét voltát. Mivel a diffúzió esetén adott a rácsparaméter, mint a mozgás alapegysége, a vizsgált térrész felosztásának is megadott a diszkrét felosztása. Olyan szabályrendszert kell találnunk, ahol a sejtek a szomszédaiknak kölcsönösen átadják az állapotukat. Erre a problémára klasszikus megoldások a Lattice gas dinamikák. Látható a nevükből is, hogy ezek a dinamikák leginkább gáz és folyadék halmazállapotú rendszerek szimulációjára alkalmasak, de szilárd fázisú diffúziós megoldások is találhatóak. Alapját tekintve a módszerek úgy épülnek fel, hogy 1 sejt/lépés sebességgel mozognak az azonos tömegű anyagrészek egy megadott irányban úgy, hogy a sejtek változtatják az állapotukat, amit translációs szabálynak nevezünk. Ha a translációs szabálynak megfelelően az anyagrészek ugyanarra a pozícióra kerülnek, akkor a *Lattice gas* dinamikának megfelelően ütközés következik be. A mozgó anyagrészek ütközésének kezelésében mutatkozik meg az eltérés az egyes modellek között. Az első ilyen modell a HPP modell, amely nevét fejlesztőiről Harry, Pomeau és de Pazzis kapta. Az automata kétdimenziós négyzetes rácson működik, és négy kitüntetett sebességvektor irányt definiált, akár csak a *Neumann-féle* szomszédságot tekintenénk. Ebből következően a részecskék észak (N), nyugat (W), dél (S) és kelet (E) irányban mozdulhatnak el. A részecskék mozgási iránya csak az ütközések során változik meg, amit ütközési szabálynak nevezünk. A HPP sejtautomata a számítógépi képelemzésben hasonlóan működik,



2.4. ábra: A HPP translációs szabály. [33]



2.5. ábra: A HPP ütközési szabály. [33]

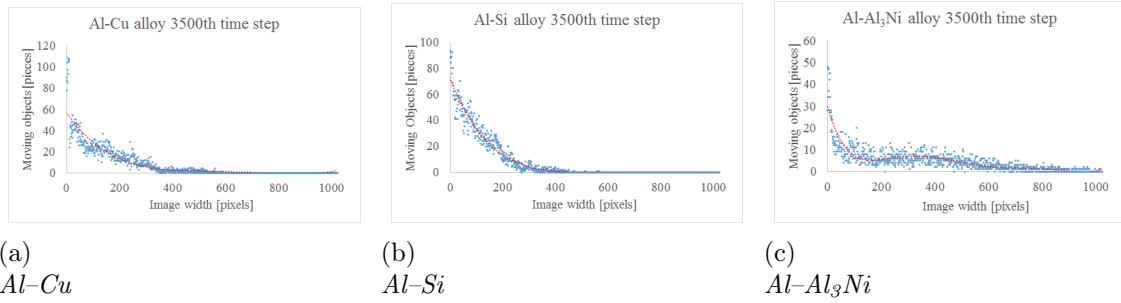
mint a diffúzió dinamika vizsgálatában. A diffúzió dinamikai vizsgálatokban az univerzum kétállapotú. Az eutektikumok szövetepein futtatva a sejtautomatát a következő feltételek, és szabályok adottak:

- HPP translációs szabály.
- HPP ütközési szabály.
- A detektált objektumok nem részei az univerzumnak.
- Az univerzum nem periodikus (olyan, mintha detektált objektum lenne a szélső pixelsor).

Amiatt, hogy a detektált objektumok és a kép szélső pixelsora nem része az univerzumnak az ütközési szabály ugyanúgy érvényes a mozgó részecskékre, mintha egymással ütköznének.

#### 2.2.4. A HPP szabály alkalmazása

A HPP szabály alkalmazásával elemeztem  $Al-Cu$ ,  $Al-Al_3Ni$ , és  $Al-Si$  eutektikumokat. Minden esetben a mozgó objektumok a képek bal szélé felől haladtak jobbra. A mozgó objektumok kiindulás helye a kép első tíz oszlopa. A sejtautomatát a szerkezetek



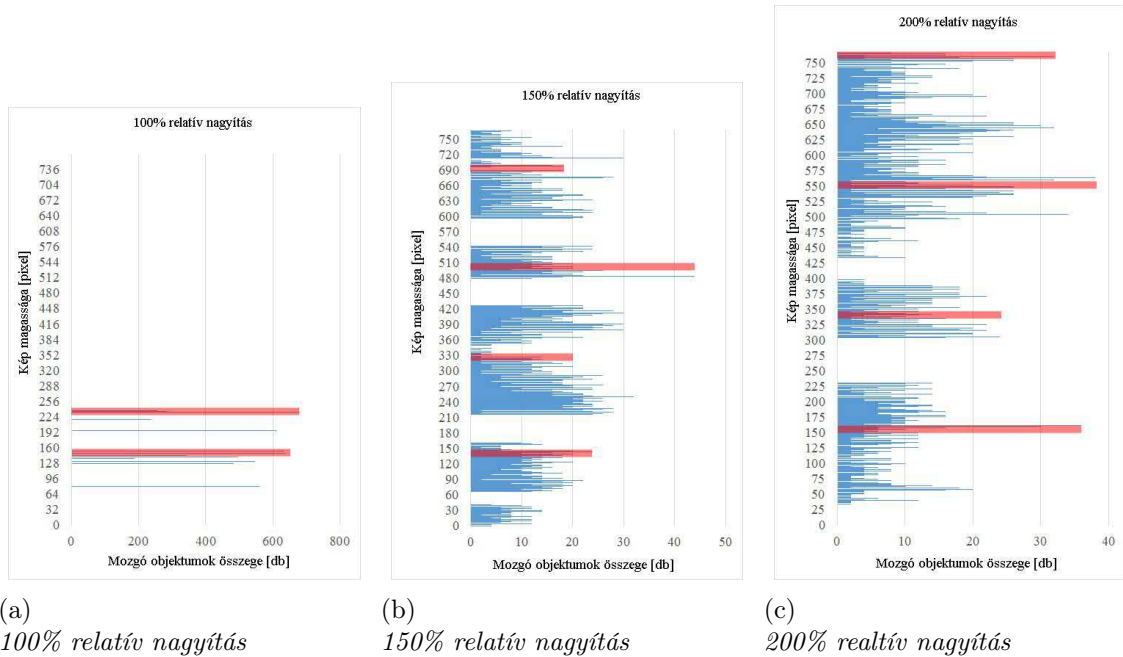
2.6. ábra: A mozgó objektumok eloszlása a 3500. lépésben. [102]

felismerésére használtam. A mozgó objektumok száma minden sejtautomata lépésben, a kép minden oszlopában regisztrálva lett, ez látható a(z) 2.6 ábrán. A rudas szerkezetű eutektikumok kivételével mindegyik képből — az *Al-Al<sub>3</sub>Ni* képekből készült a második mérési sorozathoz egy 150% és egy 200% relatív nagyítású sorozat is — egy  $1024 \times 768$  pixel nagyságú képet vágtam ki, így biztosítottam azt, hogy a nagyítás ne változzon. Mindegyik képen két jellemzőt mértem. Az egyik mért adat sejtautomata időlépésenként a mozgó objektumok száma a kép minden egyes oszlopában. A másik mért adat a kép utolsó oszlopában soronként a mozgó objektumok számának összege a 3500. időlépésben, ez látható a(z) 2.7 ábrán. Minden mérés a 3500. sejtautomata lépésig futott. A mozgó objektumok a kép bal széléről indultak, és a számuk  $10 \times 768$  db. A szerkezeteknek megfelelően a mozgó objektumok száma jellegzetes csökkenést mutat a kép jobb széle felé. Ez a vizsgált szerkezetekre egyedileg jellemző. Azonban ennek a mérési módszernek a hátránya az, hogy a sejtautomata futása hosszú időt vesz igénybe — 3500 időlépés *Intel Core i7-4712 MQ* processzoron kb. 3 óra/kép — így jelenlegi formájában nem alkalmas a klasszikus képelemző módszerek kiváltására. Azonban alkalmas lehet, ha saját sejtautomata hardveren futna. [102]

## 2.3. Sejtautomaták a klasszikus számítógépi képelemzésben

A képelemzésben alkalmazott konvolúciós műveletek totális sejtautomaták. A digitális szürkeárnyaltos kép felfogható, mint egy négyzetes geometriájú sejtekből álló univerzum. A sejtek a képpontok. A kép méretével megegyezik az univerzum mérete. A sejtek állapotai 8 bites kép esetén a 0–255 tartományú egész számok közül lehetnek. A kezdeti konfiguráció maga az eredeti kép. A konvolúciós transzformáció működése során rendre végighalad a képpontokon, és minden képponthez hozzárendel egy  $3 \times 3$  nagyságú képpont mátrix súlyozott számtani átlagát. A súlyokat ugyancsak  $3 \times 3$  elemű ún. kernel mátrix tartalmazza. A kernel mátrix elemei a kép teljes terjedelmén állandóak maradnak. A kernel geometriája *Moore-szomszédságot* ad meg. A képpont szomszédságának mátrixához és a kernel mátrixhoz, a képek analógiájára rögzítsünk egy lokális koordináta rendszert. Így a konvolúciós transzformáció egy képpontra a következő összefüggéssel adható meg:

$$O = \frac{1}{9} \sum_{f'=1}^3 \sum_{i'=1}^3 K(i'j')I(i'j') \quad (2.1)$$



2.7. ábra: A kép utolsó oszlopában megjelent mozgó objektumok számának összege. [102]

ahol:  $O$  az eredmény intenzitás érték,  $I$  a vizsgált képpont szomszédjainak eredeti intenzitás értéke,  $K$  a konvolúciós kernel. Mivel a konvolúciós kernel a kép teljes terjedelmében állandó, így a konvolúciós transzformáció a kernel megadásával egyértelműen leírható. A konvolúciós transzformációkat leggyakrabban élek keresésére, a kép élesítésére és zajszűrésre alkalmazzuk. A zajszűrés esetében a kernel minden eleme 1 értékű. A szürke kép morfológiai transzformációk determinisztikus sejtautomaták. Az automata felépítése a képből ugyanúgy történik, mint az előző esetben. Ennél a transzformációnál is a *Moore-szomszédság* a használatos. Az állapotok szintén 0–255 tartományba esnek. Ha a képpontot reprezentáló sejt esetében az állapotát helyettesítjük a szomszéd képpontok szürke árnyalatának maximumával, akkor a szürke képek eróziós műveletét kapjuk. Hasonlóan a szürke kép morfológiai transzformációkhoz, a bináris morfológiai transzformációk is determinisztikus sejtautomaták. Azonban ebben az esetben az automata csak kétállapotú. A transzformáció egyszeri végrehajtása minden esetben egy sejtautomata lépésnek felel meg. Napjainkban a sztochasztikus sejtautomatát a számítógépi képelemzésben még nem használják. [33] [29] [30] [31] [32] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40]

## 2.4. Célkitűzés

Amint az olvasható ebben a fejezetben, sok képelemző eljárásban megtalálható a sejtautomata. Ezek a módszerek beváltak, tulajdonságaik jól ismertek, azonban sokféle sejtautomatákat használnak jelenleg. Egy olyan univerzális sejtautomata, amely kiváltaná a jelenleg használatban lévőket, jelentősen csökkentené az informatikai szakképzettség igényét a számítógépi képelemzés területén. A képet reprezentáló információhalmaz jellegében olyan, mint egy szabályos sejtautomata univerzum, és a sejtautomatára épülő



megoldások beváltak a képelemzésben, ezért célszerűbbnek tűnik olyan módszer kidolgozása, amely ezen alapul, mint egy teljesen másfajta eljárás fejlesztése. Ugyan a sejtautomata algoritmusok Neumman architektúráján nem natívak, létezik olyan architektúra, amelyen hatékonyan és gyorsan tud futni, ezért is célravezető csak a sejtautomatára alapuló algoritmusok használata.

Az iparban megjelenő egyre nagyobb fokú automatizáltság mellett megjelennek a nagyobb elemzendő mintaszámok is. Ez azt követeli meg, hogy a jövőbeni módszerek is egyre automatizáltabbak legyenek, egyszerre sok adatot tudjanak feldolgozni, és egyszerűbb legyen a használatuk is. Ma egy képelemző anyagmérnöknek szüksége van metallográfiai, anyagmérnöki és informatikai szaktudásra. Az automatizált képelemző eljárás használatakor többségében anyagmérnöki tudásra lesz szükség. Mindez azt jelenti, hogy az új eljárás használatával jelentősen növekszik a hatékonyság.

Az eutektikumok morfológiája sokféle lehet, de ezek azonban mind eutektikumok. Jelenleg mindegyik típusra külön-külön mérő algoritmusok használatosak, és ezek a módszerek vagy nem automatikusak, vagy ha automatikusak, akkor specifikusak. Egy olyan módszer kidolgozása volt a célom, amely minden eutektikum mérésére használható, és kevesebb informatikai szakismeretet, és manuális munkát igényel, mint a jelenlegi módszerek.

Mielőtt az eutektikumokat jellemző mérést végrehajtaná, az algoritmus azelőtt egy alakfelismerés történik, hogy a meghatározott négy alakból (lemezes, „kígyós”, gömbös, kompakt) melyekhez tartoznak az objektumok. Az objektumok távolsága, szabályosságok az elrendeződésükben, jellemző nagyságuk – ez gömbös esetében átmérő, lemezes esetben lemezvastagság, „kígyós” szerkezetűnél a lineáris méret – és a távolságuk a mérendő adatok.

## 3. fejezet

# Az automatikus számítógépi képelemzés

Az automatikus számítógépi képelemzés megvalósításához olyan módszerekre van szükség, amelyek segítségével teljesen kiküszöbölhető az emberi beavatkozás igénye. A megfelelően képzett személy rendelkezik olyan ismeretekkel, amelyek segítségével a kép szemrevételezésével nagyon sok dolgot meg tud állapítani a képről. Ezeket a megállapításokat a képelemzés során nagyrészt használja a megfelelő műveletek elvégzéséhez, majd a műveletek elvégzése után a képen méréseket végez, majd az eredményeket kiértékeli. Ehhez a személynek napjainkban rendelkeznie kell metallográfiai, informatikai (egyes esetekben mély informatikai), optikai, anyagmérnöki ismeretekkel. Napjainkban is folyamatosan fejlődő iparában olyan nagyszámú minta keletkezik amely, nagyon nehéz feladat elé állítja minőség ellenőrzést, a mintavizsgálatot. A mintákról készülő képeket már emberi munkával egyre nehezebb feldolgozni, és a mérésben megjelenik az emberi tényező, is mint hiba. Ahhoz, hogy a nagyszámú mintákat a megfelelő minőségben értékelni tudjuk elkerülhetetlen az automatikus számítógépi képelemzés használata. Azonban, hogy ez hatékonyan megvalósítható legyen, olyan algoritmust kell kidolgozni, amely egyetlen feltétele az, hogy a bemenő kép eutektikus szövet mikroszkópi képe legyen.

### 3.1. A képek előkészítése

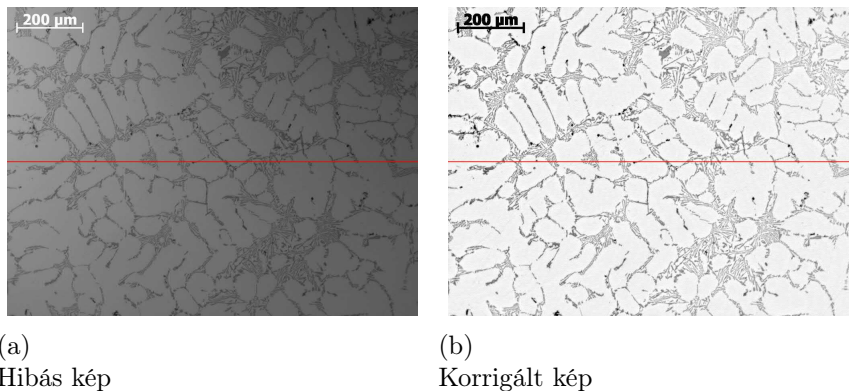
A képen mérést végző sejtautomata működéséhez olyan képre van szükség, amely megfelelő módon előkészített. Amit a számítógép kezelő meg tud állapítani, azt a gép nem tudja. A képen előfordulhatnak hibák, (egyenlőtlen megvilágítás, képzaaj) amelyektől függetlenül kell tudni működnie az algoritmusnak. A képek előkészítése a következőképpen történik:

1. A kép vágása  $1024 \times 768$  pixel méretűre.  
A képek különböző forrásokból jöhetnek. Annak érdekében, hogy ezek a képek összehasonlíthatóak legyenek – és a sejtautomata megfelelően gyorsan lefusson – a képeket ugyanakkora méretűre vágtam. Ennek oka, hogy a kép előkészítése során a szövegmezőt nem akarom szegmentálni, és az átméretezéssel megváltozik az objektumok mérete.

2. A kép YCC színrendszerbe (csak az  $Y$  csatorna meghagyásával). Jelen esetben a színek nincs információtartalma.
3. A képen végrehajtani egy „autocontrast” műveletet, ami megkeresi a minimális és maximális intenzitásértékeket a képen és ezután széthúzza az értékeket a teljes intervallumra.  
Erre a műveletre azért van szükség, mert a képek eltérő forrásból származhatnak és így általában nem azonos kontrasztarányúak.
4. Az egyenlőtlen háttérvilágítás korrigálása.  
Ennek és a következő lépéseknek jelentőségét a következő alfejezetekben részletezem.
5. Az automatikus szegmentálás végrehajtása „*iter*” [57] algoritmussal.
6. A háttér megkülönböztetése az objektumoktól.

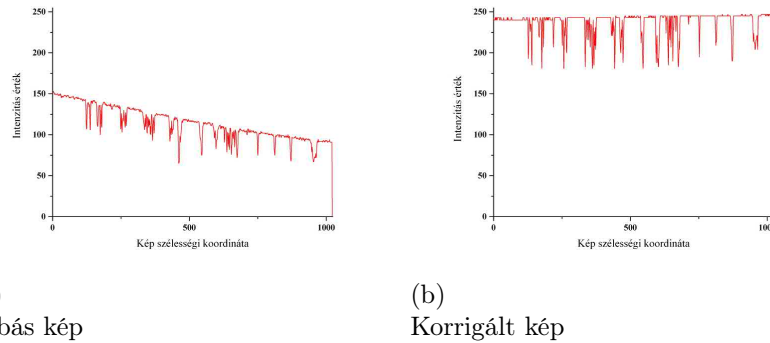
### 3.1.1. Az egyenlőtlen megvilágítás automatikus korrigálása

Az egyenlőtlen háttérvilágítás a képeken végzett méréseket jelentősen hátráltatja, ugyanis a szegmentálás műveletét nehezíti meg. Ez a hiba csak az optikai mikroszkóppal készült világos látóterű képeken fordul elő. Az ilyen hibával rendelkező képeken az argumentum nélküli automatikus szegmentáló algoritmusok nem működnek megfelelően. Mindez azt jelenti, hogy ilyenkor a szegmentálás folyamán emberi beavatkozásra van szükség, ami az automatikus képelemzés folyamatát megszakítaná. Ezért szükséges ennek a hibának a korrigálása. A 3.1 ábrán látható a hibás és a korrekció utáni kép, valamint a 3.2 ábrán a metszetben lévő intenzitás értékek.



3.1. ábra: Egyenlőtlen háttérvilágítás okozta hiba, és korrekciója

E hiba korrigálása nem csak az anyagvizsgálatoknál játszik fontos szerepet. Az orvostudományban is elterjedt a számítógépi képelemzés, és ott is előfordulhat ilyen megvilágítási hiba. A kérdéssel a szakirodalom is foglalkozik, sőt a mikroszkóp gyártó cégek a hozzá adott szoftvereikben is megtalálhatóak valamilyen háttérvilágítás korrekciós algoritmusok. Ezek közös jellemzője, hogy a korrekcióhoz szükséges egy másik kép. Ez a kép vagy olyan kép, amely csak a jól megvilágított háttérrel tartalmazza, vagy



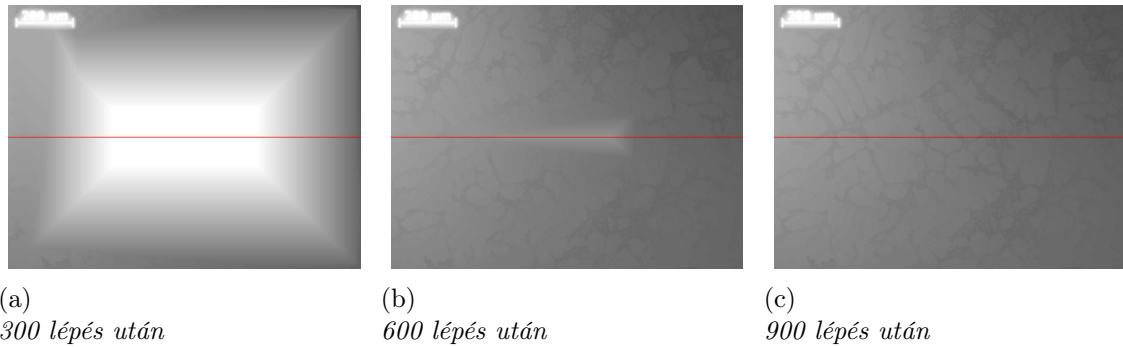
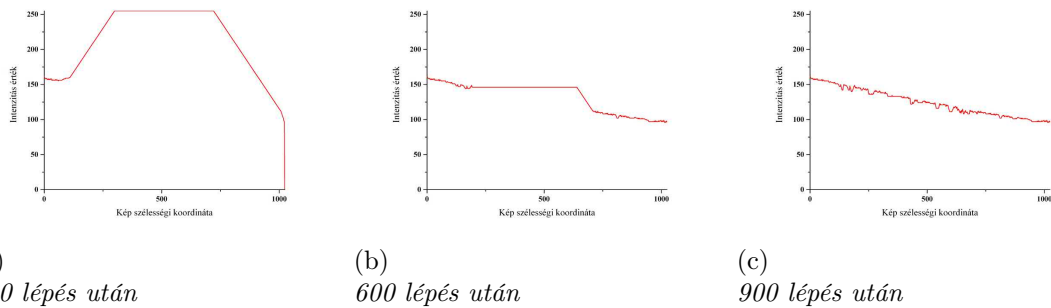
3.2. ábra: A 3.1. ábra képei jelölt metszetében az intenzitás értékek.

olyan kép, amelyen jó a háttér. Azonban ezek a képek nem minden esetben hozzáférhetők. Ezért olyan módszerre van szükség, amely ezt a jelentős hátrányt kiküszöböli. Ezzel a módszerrel tulajdonképpen ezt a hiányzó képet állítom elő.

A módszer, amit a háttér megvilágítás korrigálásához választottam, a *Lava-flow* algoritmuson alapul, amelyet a lávafolyások irányának megjósolásához használnak, és még fejlesztési stádiumban van. Ezen eljárás használatához nincs szükség még egy képre, csupán a meglévőre van szükség a javításhoz. Ennek alapja szintén sejtautomata, csak ebben az esetben – mivel még szürke képpel dolgozunk – 256 állapotú automatát jelent. A kép beolvasása után a maximális fényerejű terület helyzetének és az értékének a meghatározása következik, ezt a láva kitérésének helyeként lehet értelmezni. A terület meghatározása során először a kép felnegyedelésre kerül, majd ebből kerül kiválasztásra a legvilágosabb, és a legvilágosabb ismét felnegyedelésre kerül majd ebből is kiválasztásra kerül a legvilágosabb. Ez egészen addig folytatódik, amíg a terület  $3 \times 4$  pixelnnyi méretű lesz. Azonban ettől gyorsabb ha az egész képre ráömlik a láva és úgy kezd lefolyni. Az algoritmusomban az utóbbi módszert használom. Ezután a határfeltételek definiálása történik meg, ez jelen esetben azt jelenti, hogy a képen két szélső pixelsorokat egyenlővé tesszük egymással. Ezután egy szürke zárás következik az oldalsó két pixelsorokon, majd a kép a határ menti pixelsorokon belül, a maximális fényerejű képpont értékével helyettesítem. Ez a művelet a gát szerepét tölti be – 3.5 ábra –, így a „láva” nem folyik le nagyon gyorsan a képről. Ez a formula levezethető az explicit véges differencia módszerből is, csak ebben az esetben az állapotok 0–255 közötti egészek lehetnek csak. Ez a művelet tulajdonképpen értelmezhető a folyó láva analógiájaként, – ebben az esetben a láva kis viszkozitású és nem sodor magával szilárd anyagot, nem erodálja a domborzatot – ahol a láva betölti az objektumok által reprezentált árkokat és szétterül a képen. A sejtautomata futása közben a 3.3 ábrán és a 3.4 ábrán láthatóan terül szét a „láva” a képen. A sejtautomata minden lépésben végrehajtja a következő formulával írható műveletet:

$$PA_{i,j} = PA_{i,j} + A \cdot (PA_{i+1,j} + PA_{i-1,j} + PA_{i,j-1} + PA_{i,j+1} - 4 \cdot PA_{i,j}) \quad (3.1)$$

Az eddig bemutatott folyamat csak akkor működik megfelelően, ha az objektumok sötétek a képen, ha nem így van, akkor invertálni kell a képet. Ha a művelet befejeződik, akkor ez a korrekciós kép visszaadja a megvilágítási hibát. Ezután még az adott lépésben ellenőrzésre kerül, hogy a módosított képen az aktuális pixel fényerő értéke

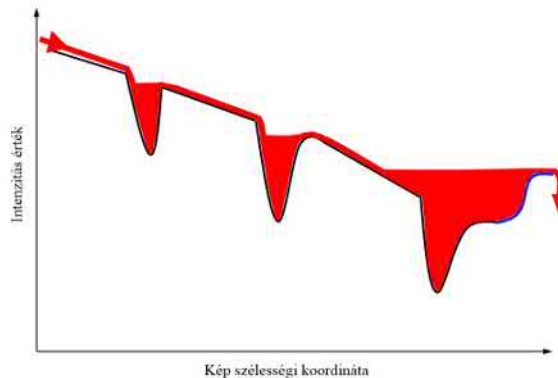
3.3. ábra: A módosított *Lava-flow* sejtautomata futásának folyamata.

3.4. ábra: A 3.3. ábra képei jelölt metszetében az intenzitás értékek.

kisebb-e mint az eredeti képen, ha igen akkor a pixel fényerő értékét nem módosítom, ha nem akkor a módosítás végleges. Ez azt eredményezi a képen, hogy a kisebb fényerő intenzitású területek a nagyobb fényerő intenzitású pixelekkel helyettesítem. Az automata megállási feltétele kétféle lehet, vagy fix sejtautomata lépésszám után megáll, vagy pedig addig fut amíg a képen már az automata nem végez változtatást. Az általam alkalmazott feltétel az első, tapasztalati úton megállapítottam a szükséges lépésszámot, ami ezer. A sejtautomata futása után az eredeti képből kivonva a korrekciós képet, majd invertálva és az „autocontrast” műveletet elvégezve rajta a képen már nem látható az egyenlőtlen háttérvilágítás okozta hiba. Az automatikus kontraszt algoritmus megtalálja a képen a pontos minimális és maximális intenzitásértékeket, majd az aktuális pixel intenzitásértékét az értékek teljes tartományához nyújtja. [51] [52] [53]

### 3.1.2. A képek automatikus szegmentálása

Erre a feladatra régóta léteznek különböző megfelelő körülmények mellett jól működő algoritmusok. Két fő fajtáját lehet megkülönböztetni, ami paraméterezhető, – ezek: *Brensen* [54], *Niblack* [61], *Sauvola* [64] – és amit nem szükséges paraméterezni. Amelyeket nem kell paraméterezni a következők: *Huang* [56], *iter* [57], *Kapur* [59], *Li* [69][70], *moment* [60], *Otsu* [62], *Renyi* [63], *Shanbhag* [67], *Yen* [68]. Az előbbi a feladatom jellegéből adódóan nem használható, ugyanis akkor már szükség lenne az emberi döntésre a paraméterek meghatározásához, vagy ha automatikus úton szeretném megoldani, akkor az egy nagyon messzire vezető probléma lenne. A különböző eljárások közül a nem paraméterezhető eljárásokkal végeztem kísérleteket annak megállapítására, hogy



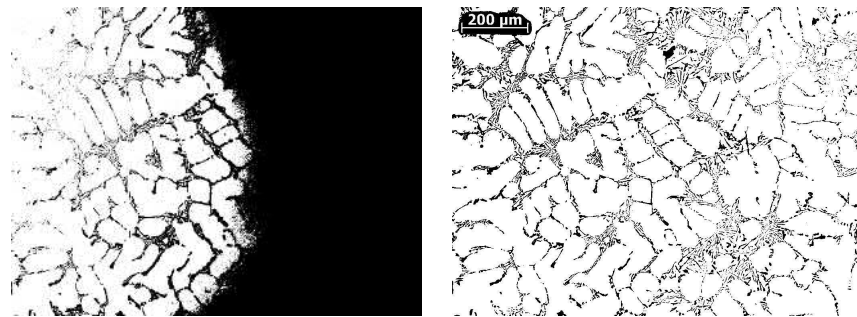
3.5. ábra: A „láva” folyásának elvi rajza

melyik eljárást lehet a legjobban beilleszteni az automatikus képelemzés folyamatába. Ezek közül számos mintaképen elvégzett tesztek alapján az *iter* eljárás a legalkalmasabb arra, hogy a célnak megfeleljen. E módszerre a legjellemzőbb a különböző szövetszerkezetű képeken mutatott egyenletesen jó minőségű szegmentáció. Sem túl sok objektumot el nem hagy, sem pedig olyan részeket nem detektál, amely nem objektum. Ezzel szemben a többi eljárás egyes képeken jobban teljesített, más képeket pedig rosszul szegmentáltak. A 3.6 ábrán látható az *iter* algoritmus szegmentációjának az eredménye háttérvilágítási hibával rendelkező kép esetén és a korrigált képen egyaránt. A módosított *Lava-flow* automata hatékonysága látható, hiszen a kép teljes területe megfelelően szegmentált.

### 3.1.3. A háttér megkülönböztetése az objektumoktól

Erre a műveletre azért van szükség, mert a különböző képeken a háttér és az objektumok nem ugyanolyan színűek lehetnek. Egy jó példa erre az *Al-Ni* ötvözet SEM felvétele 2.3(c) és a gömbgrafitos öntöttvas optikai mikroszkópi képe 5.3(a). Míg az *Al-Ni* esetében az objektumok fehérek, addig az öntöttvas képén az objektumok feketék. A számítógépi képelemzésben a bináris képen a háttér nulla értékű, tehát fekete, míg az objektumok értéke egy, ami a képen fehér színeként jelenik meg. Ezért szükséges a háttér és az objektumok megkülönböztetése.

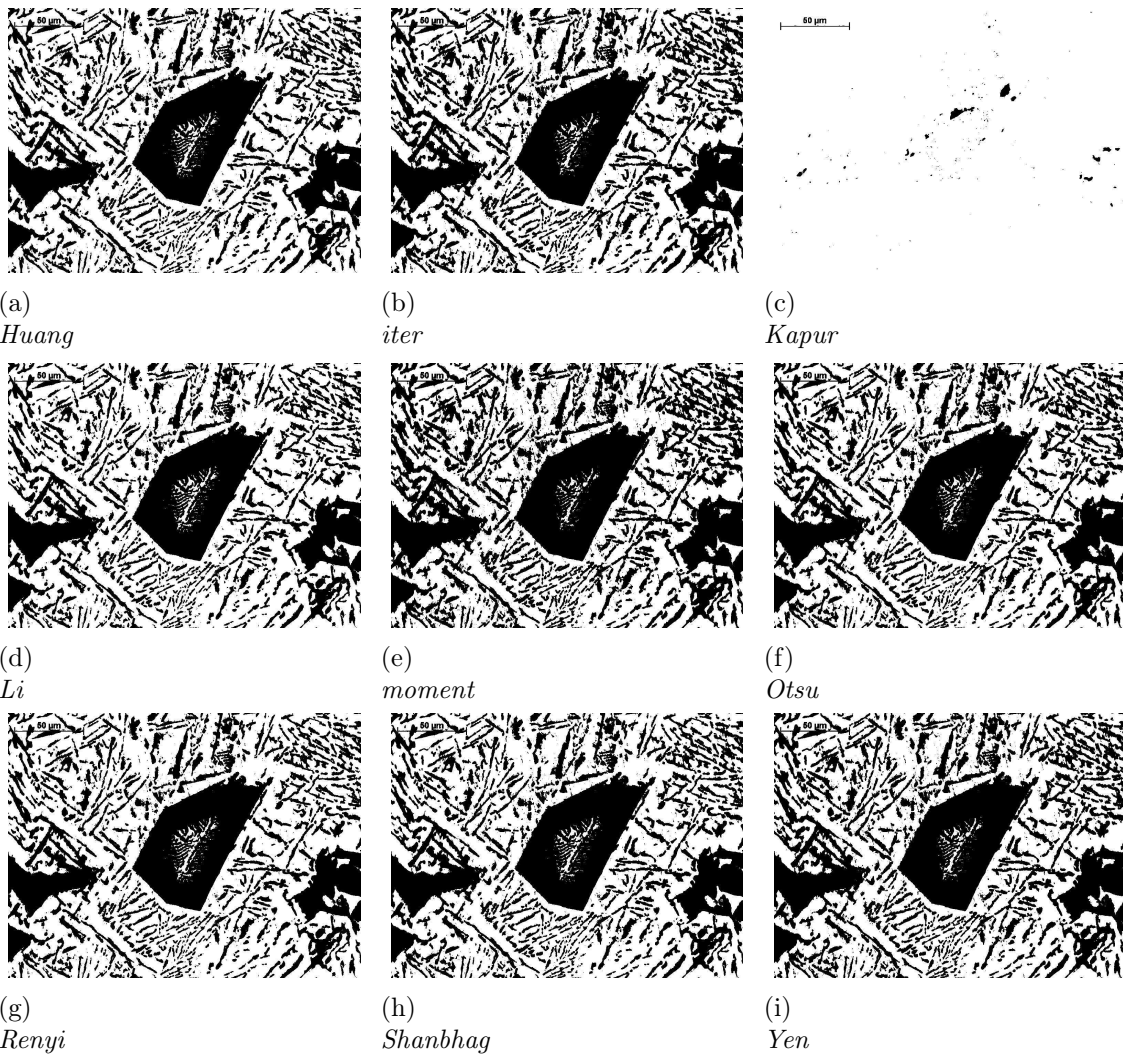
Ez a művelet a következő algoritmusnak megfelelően hajtódik végre: a képen minden képpont szomszédjának – a *Moore-szomszédságnak* megfelelően – vizsgálatra kerül a képpont értéke. Ha több olyan fehér képpont van, aminek többségében fehér szomszéd van, akkor a feketék az objektumok, ha több olyan fekete képpont van, amelynek többségben feketék a szomszédjai akkor az objektumok fehérek. Ez abból következik, hogy az objektumok a kontúrjuk mentén körüljárhatóak. Ez alól kivételt képeznek a 2.3(a) ábrán látható *Al-Cu* lemezes eutektikumok, de itt a szövetszerkezet jellegéből és a mérendő értékek értelmezéséből adódóan mindegy, hogy melyik a háttér vagy az objektum.



(a)  
Hibás kép szegmentálva

(b)  
Korrigált kép szegmentálva

3.6. ábra: Hibás és korrigált kép szegmentálva



3.7. ábra: A különböző automatikus szegmentáló algoritmusok eredményei

## 3.2. A mérő sejtautomaták

A képeken történő méréshez két sejtautomatát fejlesztettem ki. Az egyik módszer a dilatáción, a másik módszer az erózión alapszik. Az első az objektumok elrendeződésére, csoportosulások elemzésére alkalmas módszer, míg a második az objektumok alakjának, méretének elemzésére alkalmas.



## 4. fejezet

# Az adatbányászat

A mérő sejtautomaták által szolgáltatott adatok önmagukban még nem alkalmasak arra, hogy értékelni lehessen a képet. Ehhez adatbányászatra van szükség.

Az adatbányászat nagy mennyiségű adatban rejlő információk feltárása félautomatikus algoritmusok segítségével. Ezek az információk újszerűek, nem triviálisak, és vélhetően hasznos magyarázható összefüggéseket jelentenek. Ez egy olyan tudományos szakterület, amely a valós életben jól megfigyelhető jelenségek és a jól mérhető, numerikus adatok és adathalmazok közötti összefüggéseket keresi és elemzi. Fontos, hogy az adatbányászat e megfogalmazásában (az összefüggések keresésével) kizárja a statisztikai jellemzést, hiszen az lényegében csak egy állapot leírására szolgál. A megfigyelhetőség kritériuma azért fontos, mert egyértelműen el kell tudni dönteni, illetve ellenőrizni kell, hogy a következtetés adott esetben helytálló-e.

Az adatbányászat algoritmuscsaládjai:

- a) Előrejelzés — jelenleg még nem ismert érték becslése a múltbéli tapasztalok alapján.
- b) Osztályozás — az a feladata, hogy az ismert struktúrák alapján az új adatokat besorolja csoportokba.  
Ezt a módszert használom az adatfeldolgozó algoritmusaim között, az alakjellemzésre.
- c) Regresszió — megpróbál megtalálni egy olyan függvényt, amely a legkevesebb hibával modellezi az adatokat, vagyis az adatok vagy adatsorok közötti kapcsolatok becslésére használható.  
Ezt a módszert használom az adatfeldolgozó algoritmusaim között.
- d) Idősorelemzés — egymást követő, vagy sorrendfüggő adatok elemzése.  
Ezt a módszert használom az adatfeldolgozó algoritmusaim között, az objektumok alaktényezőjének meghatározásához.
- e) Klaszterezés — feladata az olyan adatok és csoportok megtalálása, amelyek valamilyen módon hasonlóak, anélkül, hogy az ismert struktúrákat felhasználná a keresésben.  
Ezt a módszert használom az adatfeldolgozó algoritmusaim között, az objektumok elrendeződésének jellemzésére.

- f) Anomáliák keresése — a szokatlan adat rekordok felismerése, amelyek érdekesek lehetnek további vizsgálatok céljából.
- g) Függőség modellezés — különböző változók közötti összefüggések keresése. Ezt a módszert használom az adatfeldolgozó algoritmusaim között, az alakjellemzésre.

[78] [79] [80]

## 4.1. A csoportelemzés

A klaszterelemzés feladata az objektumok csoportosítása oly módon, hogy az azonos csoportban lévő objektumok (úgynevezett klaszter) hasonlóbak (bizonyos értelemben) egymáshoz, mint a többi csoporthoz (klaszterekhez) tartozó objektumokhoz. A feltáró adatbányászat egyik legfőbb feladata és a statisztikai adatok elemzésére szolgáló közös módszer, amelyet számos területen alkalmaznak, beleértve a gépi tanulást, a minta-felismerést, a képelemzést, az információ-visszakeresést, a bioinformatikát, az adatok tömörítését és a számítógépes grafikát. Maga a klaszterelemzés nem egy konkrét algoritmus, hanem a megoldandó feladat. Különböző algoritmusokkal érhető el, amelyek jelentősen különböznek azokban a fogalmakban, hogy mi minősül egy klaszternek és hogyan lehet hatékonyan megtalálni azokat. A klaszterek gyakori fogalmai a csoporttagok között kis távolságra lévő elemek, intervallumok vagy bizonyos statisztikai eloszlások, az adattér sűrű területei. A klaszterezés tehát többcélú optimalizálási problémaként fogalmazható meg. A megfelelő klaszterezési algoritmus és a paraméterek beállításai (beleértve az olyan paramétereket, mint a használni kívánt távolságfüggvény, a sűrűségi küszöb vagy a várható klaszterek száma) függenek az egyes adatkészletektől és az eredmények tervezett felhasználásától.

A klaszterelemzés algoritmusai:

- a) Kapcsolatokon alapuló klaszterezés vagy Hierarchikus klaszterezés.
- b) Közép alapú klaszterezés pl. a *K-means* klaszterezés.
- c) Távolság alapú klaszterezés.
- d) Eloszlás alapú klaszterezés.

[71] [72] [73]

### 4.1.1. A *K-means* eljárás

Ez a klaszterezési algoritmus a nem hierarchikus klaszterező módszerek közé sorolható. Minden egyes elemet ahhoz a csoporthoz sorol, amelyiknek a középpontja a legközelebb esik az adott elemhez.

A klaszterezés lépései a következők:

1. Megadni a klaszterek számát ( $k$ )
2. Létrehozni véletlenszerűen  $k$  klaszter középpontot.

3. Minden elemet abba a csoportba sorolni, amelynek középpontjához a legközelebb helyezkedik el.
4. Kiszámolni az új csoport középpontokat.
5. Addig iterálni, míg valamilyen konvergencia kritérium nem teljesül.

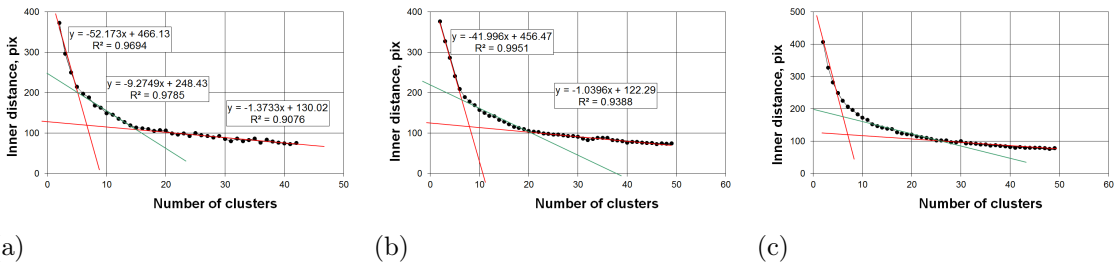
Ha a klaszterek száma változik 1-től  $N$ -ig akkor a klaszterek száma  $M$  ha a belső távolság – 4.1 egyenlet – a klaszterek között konstans. A klaszterek belső távolsága fontos sztereológiai információ. Ez a jellemző szoros összefüggésben van az anyag mechanikai tulajdonságaival, de önmagában nem elegendő az anyag jellemzésére.

$$d_{inner} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (1 - d_{ij}) \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{(n - 1)^2} \quad (4.1)$$

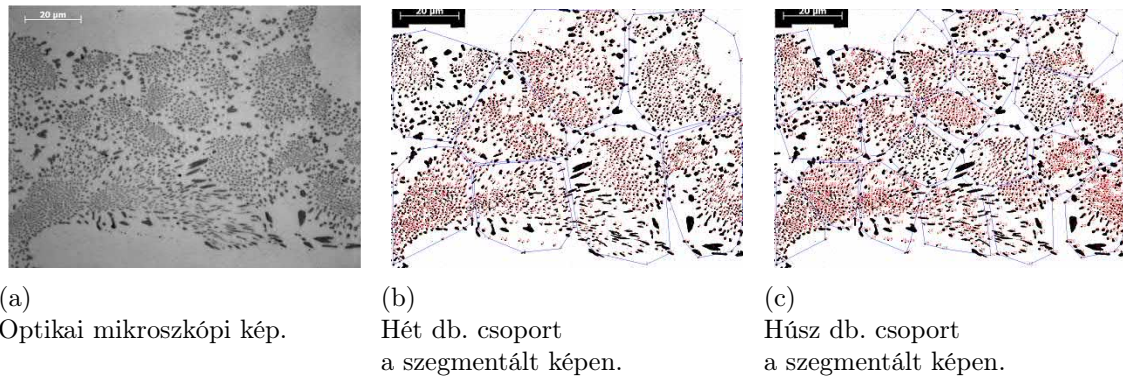
A klaszterelemzést 3003-as alumínium ötvözet szövete képéből kinyert adatokon végeztem. Ebben az esetben az objektumok távolságát a súlypontjaik távolságaként értelmeztem. A bináris képen SKIZ transzformációt végeztem el, ebből a legközelebbi szomszédok meghatározhatók.

A csoportok számának meghatározása közben három egyenes jellemzi a csoportok számát a belső távolság függvényében. Ez két metszéspontot jelent amelyek megadják a csoportok lehetséges számát. A(z) 4.1 a) ábrán az első metszéspont 5 csoportnál adódik, míg a másik metszéspont 15 csoportnál. Ugyanaz az analízis 7 és 20 csoportot ad meg a(z) 4.1 b) ábrán, míg a(z) 4.1 c) ábrán 7 és 26 csoport adódik. A fő feladat itt a csoportok helyes számának megadása. A(z) 4.2 a) ábrán látható a mikroszkópi képre fel lettek rajzolva – 4.2 b) és c) ábrák – a csoportok. Láthatóan a 20 csoport a jobb eredmény.

Látható, hogy a *K-means* algoritmus képes megtalálni a szemcséket a hipoeutektikus szerkezetben. A másik módszer mely a második fázisokat vizsgálja nem tud ilyen gazdag információkkal szolgálni a szerkezetről. Az eutektikus szemcsék jellemzői (méret, belső távolság) le tudják írni az ötvözet szilárdulását. Ennek a módszernek a hátránya, hogy sejtautomata algoritmusokkal nehezen használhatóak, és szükség van az alkalmazásuk közben emberi felügyeletre (klaszterek számának meghatározása, objektumok jellemző pontjainak kiválasztása). Emiatt ennek a módszernek a használata az automatikus számítógépi képelemzés megvalósításához nem kifizetődő, így a továbbiakban ezt nem használom. [104]



4.1. ábra: A belső távolság, mint a csoportok számának függvénye. [104]



4.2. ábra: A vizsgált szerkezet optikai mikroszkópi képe és a csoportok. [104]

### 4.1.2. Hierarchikus csoportelemzés

A hierarchikus klaszterezés, azon az alapötleten alapul, hogy az objektumok sokkal inkább a közelebbi objektumokhoz kapcsolódnak, mint a távolabbi objektumokhoz. Ez az algoritmus az objektumokat a távolságuk alapján sorolja csoportokba. A klasztert nagyjából leírja a legnagyobb távolság, amely a klaszter egyes elemeinek összekapcsolásához szükséges. Különböző távolságoknál különféle klaszterek alakulnak ki, amelyeket egy dendrogram segítségével ábrázolhatunk, ami megmagyarázza, hogy miért ez a hierarchikus klaszterezés neve: ez az algoritmus nem ad egyetlen felosztást, hanem egy kiterjedt hierarchiát épít fel egymásba épülő csoportokból. Egy dendrogramban az  $y$  tengely jelöli azt a távolságot, amelyen a klaszterek egyesülnek, míg az objektumok az  $x$  tengely mentén helyezkednek el, így a klaszterek nem keverednek össze. A hierarchikus klaszterezés lehet agglomeratív (egy elemből kiindulva és klaszterbe csoportosítva) vagy felosztó (a teljes adatkészletből kiindulva és partíciókra osztva).

A csoportok közötti távolság a képen lévő objektumok közötti geometriai *city block* távolságot jelenti. Tehát ez a módszer alkalmas arra, hogy az eutektikumokban lévő fázisok távolságát, elrendeződését jellemezze. [71] [72]

## 4.2. Az osztályozó algoritmusok

Az osztályozásnak az a feladata, hogy azonosítsa, hogy a kategóriák egy csoportjához milyen új megfigyelés tartozik, olyan megfigyeléseket (vagy példákat) tartalmazó tanulási készlet alapján, amelyek csoporttagsága ismert. Az osztályozás a mintafelismerés egyik példája. A gépi tanulás terminológiájában az osztályozást a felügyelt tanulás egy példajaként tekintjük, vagyis olyan tanulást, ahol helyesen azonosított megfigyelések állnak az algoritmus rendelkezésére. A felügyelet nélküli eljárás klaszterezésként ismert, és magában foglalja az adatok csoportosítását a lényeges hasonlóság vagy távolság bizonyos mértékére alapozva. Gyakori az a módszer, amely esetében az egyes megfigyeléseket egy kvantitatív tulajdonságok csoportjába sorolják, amelyek különböző magyarázó változóként vagy jellemzőként ismeretesek. Ezek a jellemzők különböző kategóriákba sorolhatók: ordinális (pl. kicsi, közepes, nagy), egész értékű, vagy valós. Más osztályozók úgy működnek, hogy hasonló megfigyelésekkel összehasonlítják a megfigyeléseket a hasonlósági vagy távolságfüggvény segítségével. Az *osztályozó* kifejezés

néha a matematikai függvényre is vonatkozik, amelyet egy osztályozási algoritmus hajt végre, amely a bemeneti adatokat egy kategóriába sorolja. A terminológia különböző területeken meglehetősen változatos. A statisztikában, ahol az osztályozást gyakran logisztikus regresszióval vagy hasonló eljárással végzik, a megfigyelések tulajdonságait magyarázó változóknak (vagy független változóknak, regresszoroknak stb.) nevezik, és az előre jelzett kategóriák eredményként ismeretesek, amelyeket lehetnek a függő változó lehetséges értékei. A gépi tanulás során a megfigyeléseket gyakran példaként ismerik, a magyarázó változókat nevezik (egy jellemzővektorba csoportosítva), és a várható kategóriák osztályok.

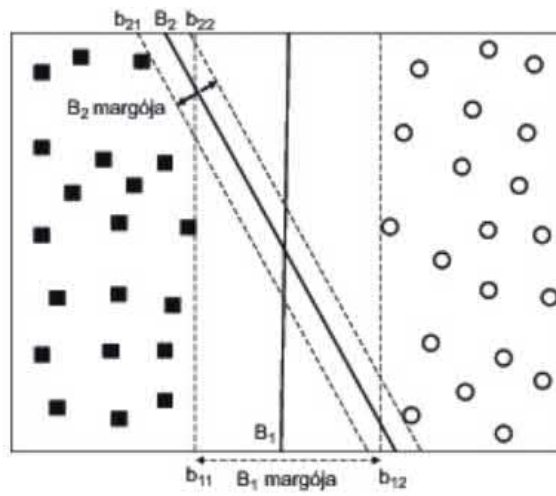
Az osztályozás algoritmusai:

- a) Lineáris osztályozók.
- b) Négyzetes osztályozók.
- c) Döntési fák.
- d) Tartóvektor-gép.
- e) Neurális hálózatok.
- f) Magfüggvényes becslés.

#### 4.2.1. A tartóvektor-gép

A tartóvektor gép olyan osztályozó algoritmus, amely többdimenziós adatokat képes bináris osztályokba sorolni. Természetesen léteznek módszerek a többosztályos kiterjesztésre is. A különböző osztályba adatpontokat a többdimenziós térben egy ún. maximális margójú hipersík választja el egymástól, melyet az *SVM* konstruál, a tanulóadatok alapján. Végtelen számú hipersík létezik, de csak a maximális margójút használjuk. Azért szükséges a maximális margójú hipersík használata mert ezáltal minimalizálható az általánosító hibája az osztályozásnak. A lineáris osztályozás elvégzése mellett a *SVM*-ek hatékonyan képesek nem-lineáris osztályba sorolást végrehajtani a kernel trükk használatával, implicit módon leképezve inputjaikat a nagy dimenziójú paraméterterekbe. A 4.3 ábrán láthatóak az adatokat elválasztó különböző hipersíkok. A *SVM*-nek sok jó tulajdonsága van, ezért az egyik legelterjedtebben használt osztályozó algoritmus. A *SVM* jellemzői:

- A *SVM* tanulási probléma konvex optimalizálási problémaként megfogalmazható, amelyhez hatékony algoritmusok állnak rendelkezésre a célfüggvény globális minimumának meghatározásához. Más osztályozási módszerek, például a mesterséges neurális hálók és a szabályalapú osztályozók mohó stratégiát alkalmaznak a hipotézistér kereséséhez. Az ilyen algoritmusok hajlamosak csak lokálisan megtalálni az optimális megoldásokat.
- A *SVM* a döntési határ margójának maximalizálásával kapacitás-szabályozást végez, de a felhasználónak továbbra is meg kell adni további paramétereket, például a kiegészítő változókat behozó  $C$  költségfüggvényt és a használandó kernelfüggvények típusát.



4.3. ábra: A különböző hipersíkok és margójuk. [85]

- *SVM* alkalmazható ordinális adatokra, az adatokban jelenlevő minden kategorikus attribútumhoz fiktív változók bevezetésével.

[73] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80] [81] [82] [83] [84] [85]

## 5. fejezet

# Anyagok és módszerek

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek a felhasznált képek, és az automatikus számítógépi képelemzés módszerei, valamint az eredmények.

### 5.1. Az anyagok

#### 5.1.1. Az *Al–Cu* eutektikumok

Az ilyen ötvözetű öntvények minősítése, vizsgálata esetén az alak felismerése után a lemeztávolság, ill. a vastagság mérése szükséges.

##### Az összetétel és morfológia

Az *Al–Cu* rendszer fázisdiagramja a(z) 1.6 ábrán látható. Az általam mért *Al–Cu* ötvözet összetétele a(z) 5.1 táblázatban látható. Az eutektikum morfológiájára sok tényező hatással van. Ezek befolyásolják a lemezek alakját és a lemeztávolságot. Ilyen befolyásoló tényező a kristályosodás során alkalmazott külső mágneses tér. Xi Li és szerzőtársai [86] eredményei szerint a külső mágneses tér nélkül kristályosodott *Al–Cu* eutektikum reguláris lemezes szerkezetű, azonban a mágneses erőtér növelésével ( $\Phi > 6T$ ) a lemezes szerkezet átmegy hullámos irreguláris szerkezetbe. A mágneses erőtér, és a kristályosodás sebessége befolyásolja a lemeztávolságot. Bing Liu és szerzőtársai [87] kutatása szerint az elektromos tér hatását vizsgálta az *Al–Cu* eutektikum kristályosodására. Ezen eredmények szerint a külső elektromos tér is befolyásolja a morfológiát. Az elektromos térerő ( $-2$  és  $2kV/cm$ ) a lemeztávolságot növeli.

Egy másik tényező, a lehülési sebesség is hatással van a lemeztávolságra. [2]

5.1. táblázat: Az *Al–Cu* ötvözet összetétele tömegszázalékban

Al	Cu	Ni	Si	Fe	Mg	Zn
67,5	31,3	0,02	0,47	0,01	0,007	0,46

#### 5.1.2. Az *Al–Ni* eutektikumok

Ebben az esetben az alak felismerése után, a rudak mérete elrendeződése, és a távolságuk mérése a szükséges elvégzendő műveletek.

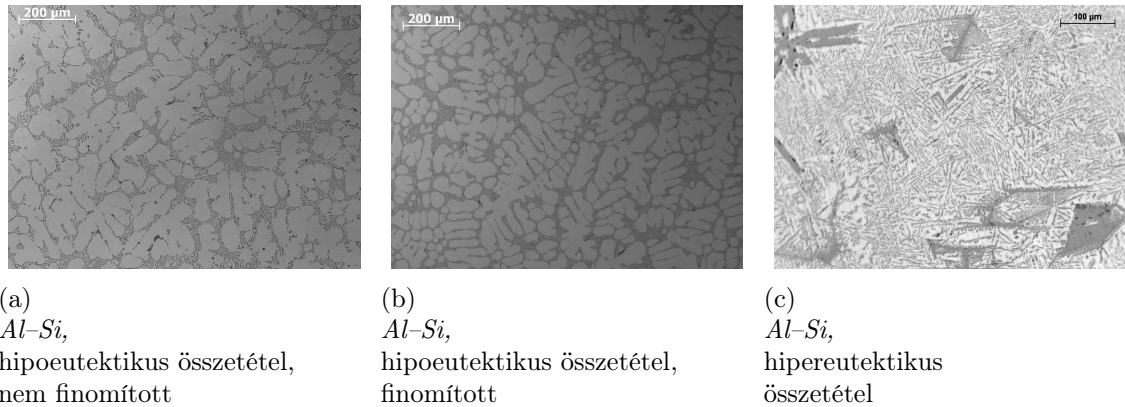
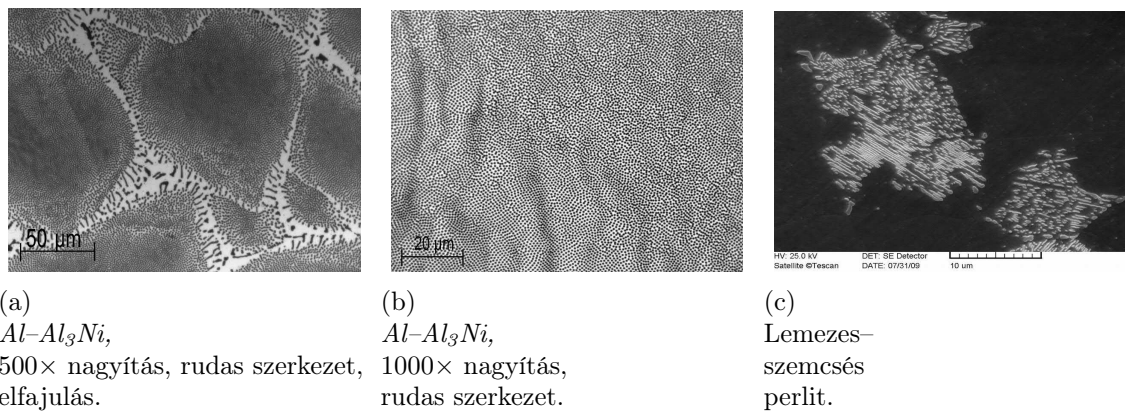
### 5.1.3. Az öntöttvasak

Az öntöttvasak tulajdonságait jelentősen befolyásolja a grafit alakja, mérete és eloszlása. Az első elvégzendő művelet a grafitalak osztályozása. Az *MSZ EN ISO 945-1:2019* szabvány szerint a grafitalak meghatározása etalonképek segítségével történik — amely a(z) 1.7 ábrán látható — ami egy lassú és szubjektív módszer. Ebből következik, hogy a mérési hibák gyakran előfordulnak ebben az esetekben, sőt még a klasszikus képelemző szoftverek esetében is. A módszer másik hátránya, hogy szakembert igényel, és mivel az ember végzi a kiértékelést is ezért időegység alatt megvizsgálható minták számának is korlátot szab, amely jóval kisebb, mint az automata által elérhető kiértékelhető mintaszám. A klasszikus számítógépi képelemzés során az objektumok körszerűsége, nyújtottsága, kitöltöttsége, legnagyobb *Feret-átmérője*, és ekvivalens körátmérője kerül mérésre.[89]

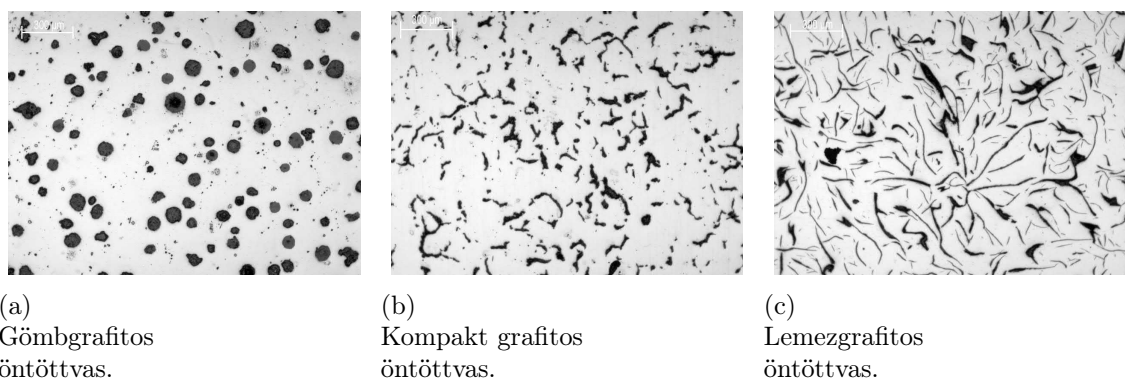
### 5.1.4. Az *Al-Si* eutektikumok

Az *Al-Si* ötvözetek közül a hipoeutektikus összetételűek a gyakoriak. Ebben az esetben a szövet irreguláris lemezes eutektikum. Itt szintén lehetőség van a lemeztávolságok mérésére. Az eutektikus hányad meghatározás fontos a mechanikai tulajdonságok értékelésekor. Az *Al-Si* ötvözetek módosítottságának mértékét az *American Foundry Society* által készített etalonképekhez szokás hasonlítani. A klasszikus számítógépi képelemzés során a módosítottság mértékének meghatározását a *Si* részecskék területének mérésével végzik. Egy másik módszer a módosítottság mérésre a termikus analízis, de az nem vizuális eljárás.[94]

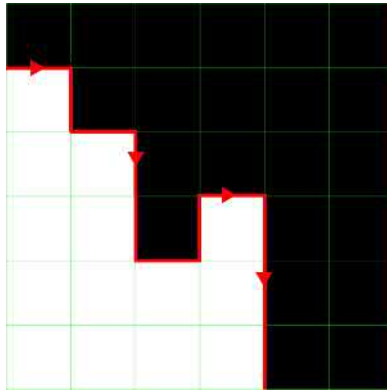


5.1. ábra: *Al-Si* ötvözetek szövetszerkezetének képei.

5.2. ábra: Rudas és lemezes szerkezetű eutektikumok szövatképei.



5.3. ábra: Az öntöttvas típusok szövatképei.



5.4. ábra: A kerületmérés elve

## 5.2. A mérést végző algoritmusok

Az algoritmusokat célszerű sejtautomatával megvalósítani, mert:

- A képek jellegükből adódóan sejtautomata univerzumok.
- Ha sok algoritmus sejtautomatán alapszik akkor célhardver alkalmazható a későbbiekben.
- Célhardveren gyorsabban fut, mint *Neumann-architektúrán*.
- Az automata kizárja az emberi beavatkozást.

Természetesen a sejtautomata algoritmusokat addig alkalmazom, amíg a képeken végzek műveleteket. A sejtautomata használata miatt a mérendő értékek másképp értelmezendők, mint a klasszikus sztereológiában.

A hossz és a terület alapegysége a pixel. A képeken a mért terület azon a pixelek oldalainak száma, amelyeknek háttér a szomszédjuk.  $A(z)$  5.4 ábrán a kerület értéke tizenegy. Az ábrán zöld szín jelöli a pixelek határait – a könnyebb érthetőség érdekében – az objektum pixelei fehérek és a háttér fekete. Ez a jelen esetben irreleváns, amit figyel az algoritmus az az, hogy az objektum pixelének *Moore-szomszédság* szerint mennyi háttér szomszédja van. A kerület a piros vonal mentén haladva az aktuális pixel háttér szomszédainak megszámolásával kerül meghatározásra. Az objektumok területe az objektumokat alkotó pixelek összessége. Az objektumok közötti távolság a legközelebbi kontúrponjtjaik közötti *city block* távolság.

### 5.2.1. Az egyedi objektumokat jellemző algoritmus

Az alak-felismerési algoritmus sejtautomatán alapszik, az objektumok alakjának és méretének elemzésére alkalmas adatokat állít elő. Ennél a sejtautomatánál is megtörténik az objektumok címkézése. Ebben az esetben a határfeltételeket nem módosítottam, az univerzum egyben a kép is. A képen az automata addig hajtja végre az eróziót, amíg az objektumok teljesen eltűnnek. Minden sejtautomata lépésben regisztrálásra kerül az objektumok területe és kerülete. A kerület meghatározás úgy történik, hogy azok a képpontok megszámolásra kerülnek, amelyek egy objektumhoz tartoznak és

van olyan szomszédjuk, amelyik háttér. Az objektumok területének mérése során pedig az objektumok pixeleinek darabszámát határozom meg. Az objektumok terület és kerület adatait minden sejtautomata lépésben eltárolom egy adatbázisban. Ebből a két értékből minden lépésben kiszámítom a körszerűség értékét. A körszerűség értékei a sejtautomata lépések függvényében pedig az alakra jellemzőek, amelyeket azután egy tartóvektor-gép segítségével osztályokba sorolom. A körszerűség sejtautomata lépés függése látható a(z) 5.6 ábrán. Maga a folyamat a(z) 5.7 ábrán látszik, ahol a legvilágosabb az eredeti objektum majd a sötétebb felé haladva 20×, 40×, és 80×-os eróziója látható.

A tapasztalataim alapján az eutektikumokban előforduló objektumok alakjai négy osztályba sorolhatóak:

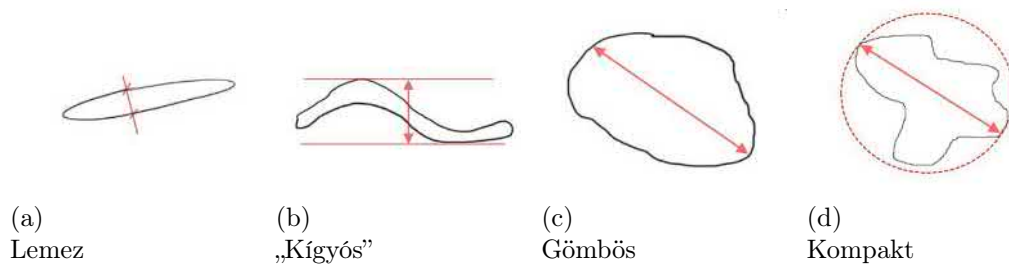
- Gömbös.
- Lemezes.
- „Kígyós”.
- Kompakt.

A felsorolt alakok adatpontjai bináris osztályozóval szétválasztatók. Az adatpontok osztályokba sorolására a tartóvektor-gépet javaslom. Mivel az *SVM* bináris osztályozó, ezért egyszerre csak két pontsört tud egymástól megkülönböztetni. Először a lemezes alak pontsorát a többi alakétól, majd a „kígyós” pontsorát – itt már az előző elválasztott adatok nem szerepelnek a szétválasztandók között – a maradéktól, végül a kompakt alak és a gömbös kerül szétválasztásra.

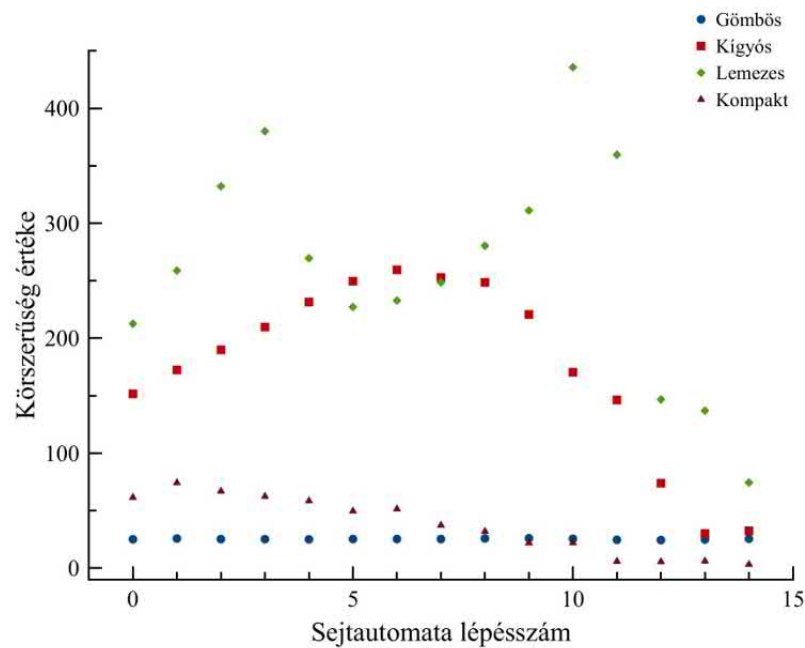
A rudas morfológiájú eutektikumok speciális esetet képeznek. A metszősík helyzetétől függően az eutektikus fázisok látszódnak lemezesnek illetve gömbösnek is. A kettő között a fázisok alakja ellipszis aminek numerikus excentricitása a metszősík szögétől függ. Bármely esetet vesszük figyelembe az automata képes meghatározni a fázisok méretét.

**Az alakfelismerés tanuló adatai** ♦ Ahhoz, hogy a tartóvektor-gép osztályozni tudja az objektumokat az alakjuk alapján tanuló adatokra van szüksége. A tanuló adatokat a lemezes szerkezethez öntöttvas és *Al-Cu* képekről kapja, a gömbös szerkezethez gömbgrafitos öntöttvas, a „kígyós” és a kompakt szerkezethez kompakt-grafitos öntöttvas szövetekepekről kapja. A körszerűség értéke gömbös esetben nem változik lényegesen a sejtautomata futása során. A kompakt szerkezetű objektumok esetében már a változás látható, a „kígyós” esetben először növekszik a körszerűség értéke, majd csökken, míg a lemezes esetben egy nagyobb értékről indul, meredekebben emelkedik, majd hirtelen csökkenésbe megy át. Ez látható a(z) 5.6 ábrán.

A lemezes szerkezetről készült kép a(z) 6.1 ábrán látható, az ábrán a számok az objektumok azonosítóit jelölik. A lemezes morfológiájú objektumok esetében a körszerűség értéke a kezdő sejtautomata lépésben, a többi alakú objektumokhoz képest — a négy alak közül a legnagyobb — nagyobb értékről indul, majd a lépésszám növekedésével egyre növekszik, majd egy csúcs elérése után zuhanni kezd az értéke. Ha a 15. lépésig az erózió eltünteteti akkor hozzárendelésre kerül a 0 értéke, azért, hogy a diagramban lehessen kezelni. Míg az *Al-Cu* esetében hosszú akár az egész képen átmenő objektumok helyezkednek el, addig a lemezgrafitos öntöttvas objektumaira ez nem



5.5. ábra: A megkülönböztetett alakok karakterisztikus méretei.



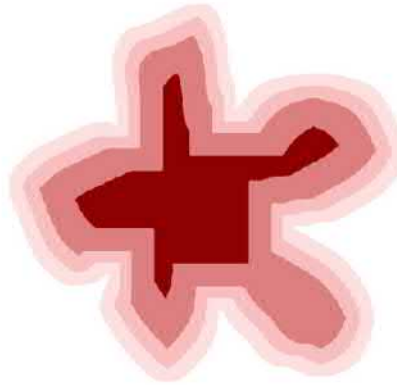
5.6. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése különböző alakú objektumok esetén.

igaz. Az öntöttvasban kisebb a lemezes objektumok nagysága és előfordulhatnak benne a „kígyós” morfológiájú objektumok is.

Ha az objektum alakja ismert akkor az adott alakra jellemző karakterisztikus méret meghatározásra kerül. Ezek a méretek a következők:

- Lemezvastagság
- „Kígyós” legvastagabb szakasza
- Gömb átmérője
- Kompakt objektum befoglaló körének átmérője

Ezek a méretek láthatók a(z) 5.5 ábrán, értékük minden esetben  $2 \times t$ .



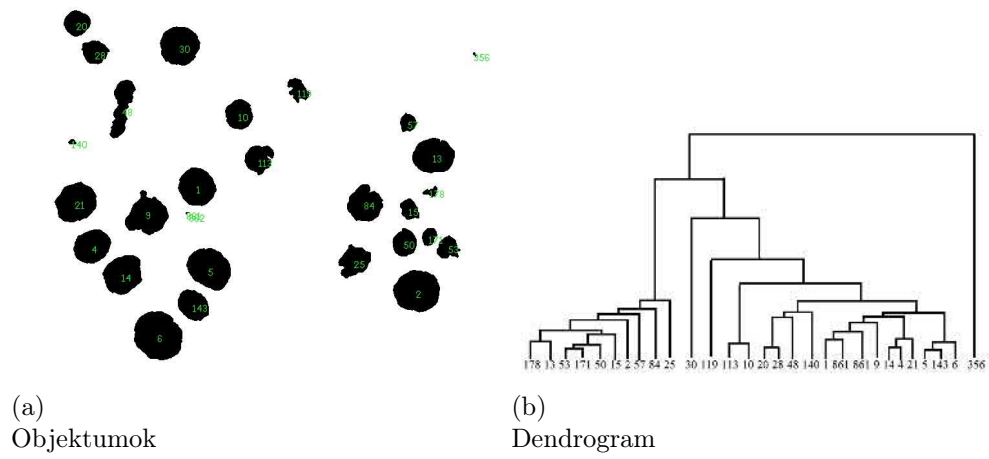
5.7. ábra: Az eróziós folyamat.

### 5.2.2. Az objektumcsoportok közötti jellemzőket mérő algoritmus

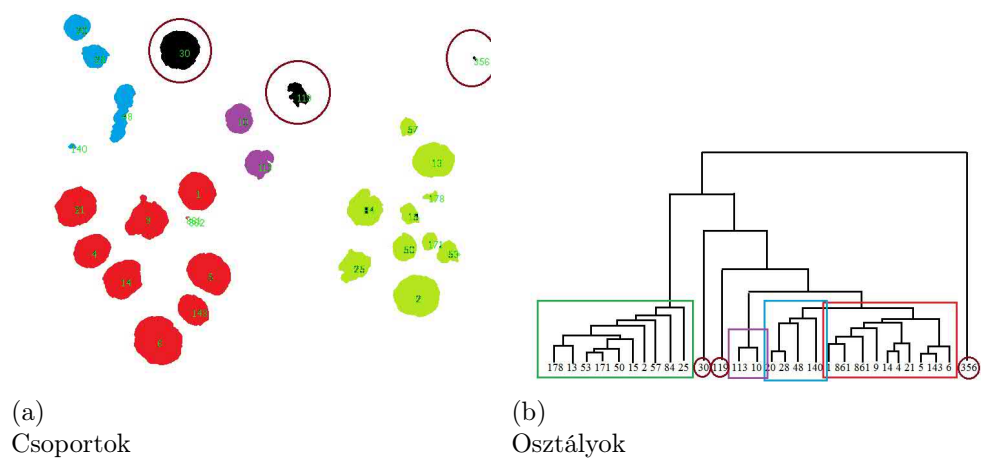
Az objektumok elrendeződésének elemzésére készült program a sztochasztikus sejtautomatára épül. Az objektumok címkézése után a határfeltételek kerülnek beállításra. Ebben az esetben ez azt jelenti, hogy a képen a szélső képpontok egyenlők az eggyel beljebb található sor, ill. oszlop képpontjainak értékével. A képen az objektumok egyedi azonosítót kapnak. Ezután következik a sztochasztikus sejtautomata része az algoritmusnak. Az objektumok egészen addig növekednek, amíg össze nem érnek minden szomszédjukkal, de a növekedés egy  $P_g$  valószínűségi változó értékétől függ, amit a véletlen szám generátor állít elő. Erre azért van szükség, mert egy bizonyos lépés után a növekvő objektumok felveszik a kernel alakját, ha determinisztikusan történik a növekedés. Egy objektum dilatációja addig történik, amíg az összeér egy másik objektummal. Ekkor (az összeérés lépésében) az objektumok azonosítói és a lépésszám eltárolásra kerül egy adatbázisban. Az összeért objektumok azonosítója azonos értékűvé változik. Ebből az adatbázisból azután fel lehet építeni a dendrogramot, amely a csoportosulások és az objektumok elrendeződésének elemzésére alkalmas. Ha az összeérések végigfutnak a képen, akkor az a morfológiai mozaikot eredményezi. Maga az algoritmus egészen addig fut, amíg egyetlen egy nagy objektum lesz a képen. A sejtautomata futása után kapott adatbázisból kinyerhetőek az objektumok helyzetei, azonosítói, az összeérés mely szomszédal és mikor történt. Ezekből az adatokból meghatározható a szomszédos objektumok távolsága, az objektumok elrendeződése. A(z) 5.8 a) ábrán láthatóak a gömbgrafitos öntöttvasról készült képen az objektumok azonosítóikkal, a b) ábrán a dendrogramjuk. A(z) 5.9 a) ábrán a csoportokba sorolt objektumok, és a b) ábrán az osztályok a dendrogramon.

### 5.2.3. Az automatikus számítógépi képelemzés megvalósítása

Az eddig bemutatott módszerekkel a képek automatikus mérése és vizsgálata megvalósítható, azonban az összes feladatra nem használható a sejtautomata. Ennek az oka, hogy a sejtautomata használata csak olyan bemenő adatokkal hatékony amely megfeleltethető sejtautomata univerzumnak. A bináris – és egyes esetekben szürke –



5.8. ábra: Az objektumok és a dendrogram.



5.9. ábra: A csoportok és osztályok.

képen lévő objektumok ilyenek. Különböző sejtautomata módszerekkel más-más adatokat nyerhetünk ki a képen lévő objektumokról. Ilyen módszerek, például ebben a fejezetben bemutatottak, vagy a HPP automata. Mindegyik eljárás sajátosan kezeli az objektumokat, az egyik algoritmusom erodálja, a másik dilatálja, míg a HPP automatában nem részei az univerzumnak. Ha az objektumokról egyedileg kell beszélni – tulajdonképpen kiemeljük az univerzumból – akkor már a sejtautomata nem nyújt hatékony segítséget.

A kép megnyitása után ellenőrzöm a kép méretét, ha nagyobb akkor vágom  $1024 \times 768$  méretűre, ha kisebb akkor az a kép nem használható. Ezután következik egy szürke képpé konvertálás, majd ezt követően egy *autocontrast* művelet. A szegmentálás sikerességének biztosítása érdekében következik a módosított *Lava-flow* algoritmuson alapuló háttérvilágítás korrekció. Ezt követően az automatikus szegmentálás végrehajtódik az *iter* algoritmussal. Az objektumok és a háttér megkülönböztetésre kerülnek (a képen fehérek az objektumok és fekete a háttér). Ezután az első mérő sejtautomata fut. Ennek során az objektumok területe és kerülete lépésenként rögzítésre kerül egy adatbázisban. Ezt követően a második mérő sejtautomata futása következik. Ennek futása során az objektumok összeérése rögzítésre kerül lépésenként, majd ezek az adatok is kiírásra kerülnek egy adatbázisba. A(z) 6.46 ábrán látható az automatikus képelemző rendszer folyamatábrája. A késsel jelölt folyamatokat sejtautomata algoritmussal valósítottam meg, a szaggatott vonallal jelölt területen belül alkalmazható hatékonyan a sejtautomatára épülő algoritmusok. Az objektum adatbázisokból különböző módszerekkel nyerhetők ki az adatok. Az objektumok jellemző méretét az objektum alakjának ismeretében lehet értelmezni. Először minden objektumnak elő kell állítani a körszerűség sejtautomata lépés függvényét. Ha ez megtörtént, akkor osztályokba lehet sorolni az objektumokat alakonként. Ehhez a *Tartóvektor-gépet* használtam. Az osztályok ismeretében az objektumok méret adatai értelmezhetők. Az objektumok távolságainak méréséhez és az elrendeződés jellemzéséhez a második sejtautomata adatbázisát kell használni. Ebből kinyerhetők az objektum-összeérés hisztogramok valamint a dendrogram is megrajzolható. Ezen adatokkal a vizsgált eutektikus szerkezet jellemezhető.

## 6. fejezet

# Eredmények

Ebben a fejezetben bemutatom a különböző jellemzők méréseinek eredményeit, illetve a mérés validációját.

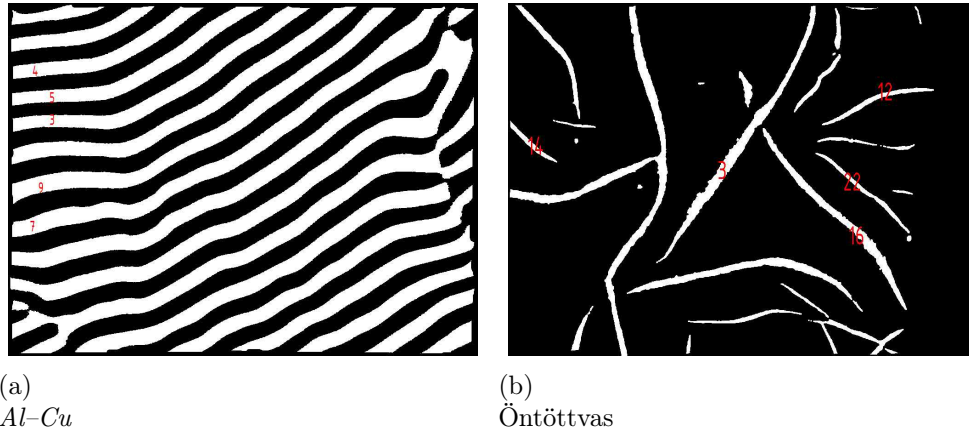
### 6.1. A különböző jellemzők

A méréseket *Al-Cu*, nem finomított hipoeutektikus *Al-Si*, finomított hipoeutektikus *Al-Si*, *Al-Ni*, és az öntöttvasak közül a gömb-, lemez-, valamint a kompaktgrafitos öntöttvas képeken végeztem el.

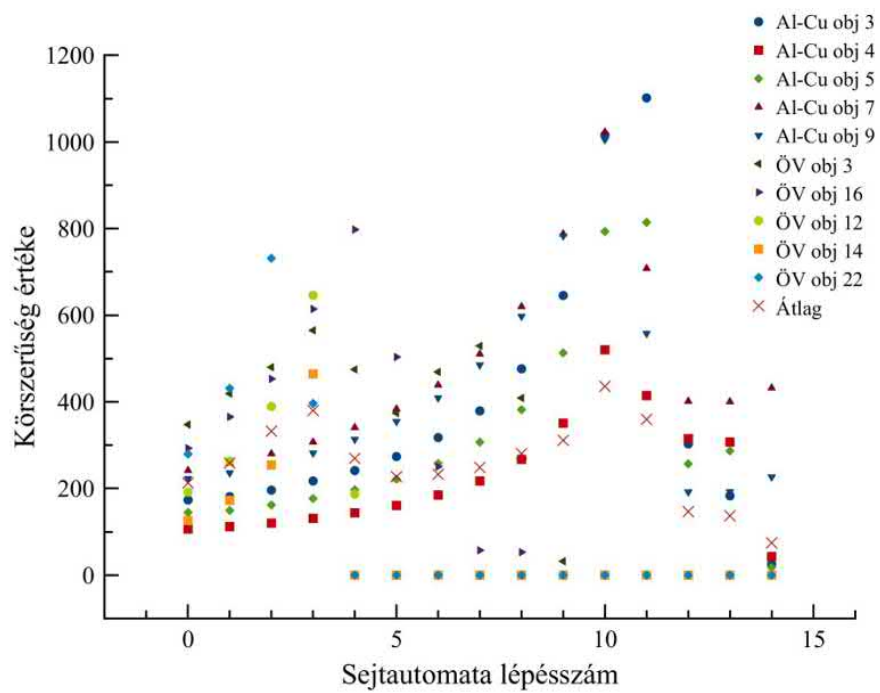
#### 6.1.1. Az alakfelismerés

Ebben a fejezetben láthatók a négyféle alak bináris képei az objektumokat jelölő azonosítókkal és a tartóvektor-gép tanuló adatai.

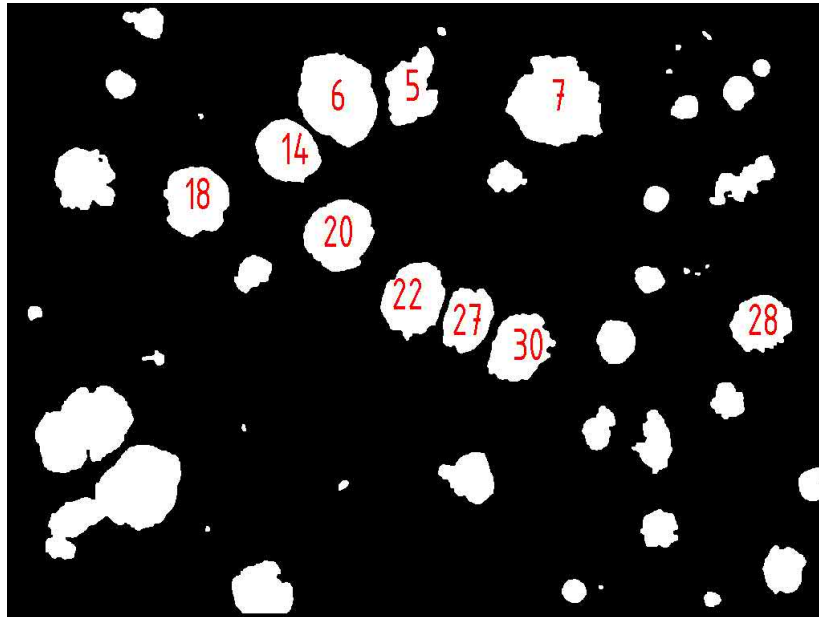




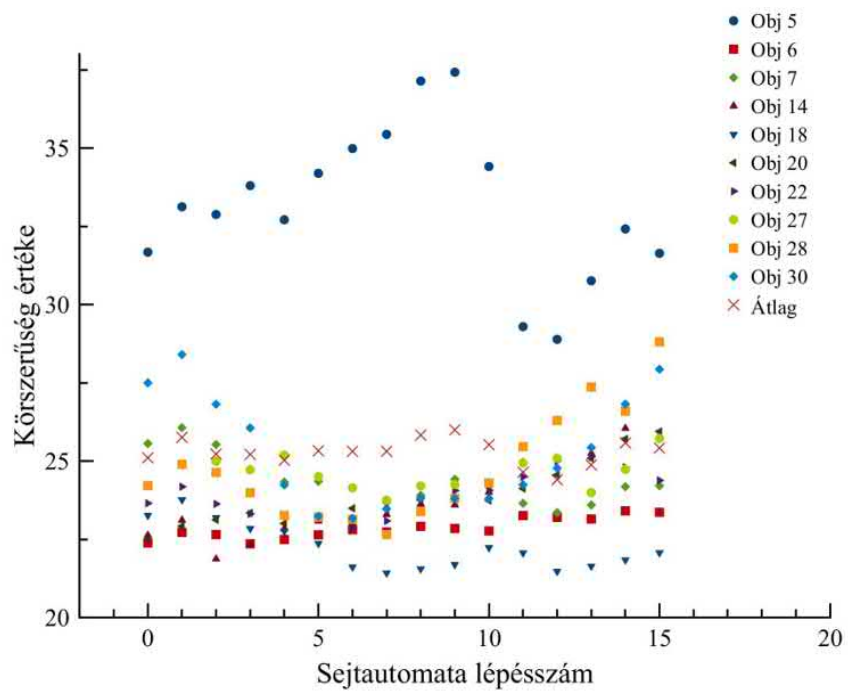
6.1. ábra: A lemezes eutektikum tanuló képei.



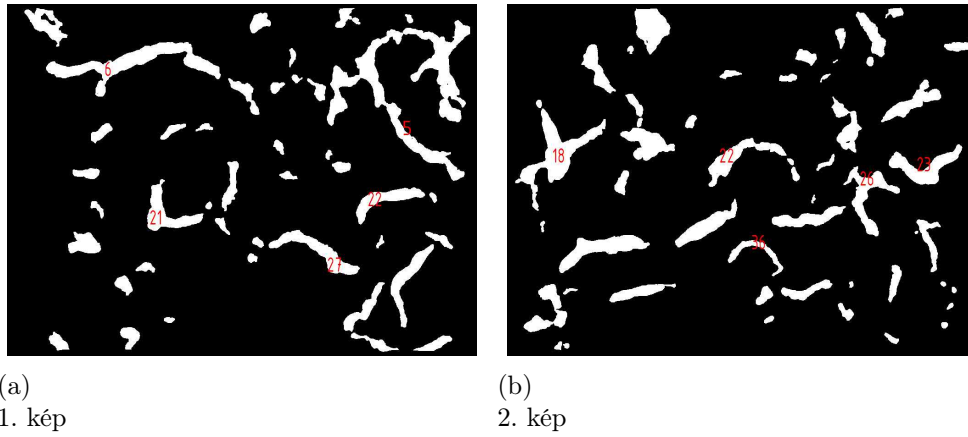
6.2. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése lemezes eutektikum esetén.



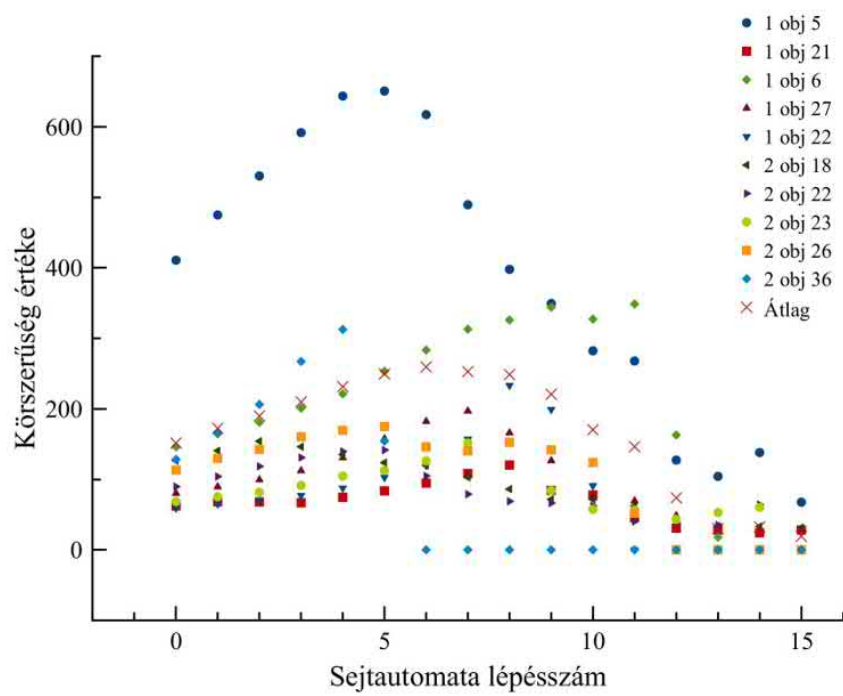
6.3. ábra: A gömbös morfológiájú eutektikum tanuló képe.



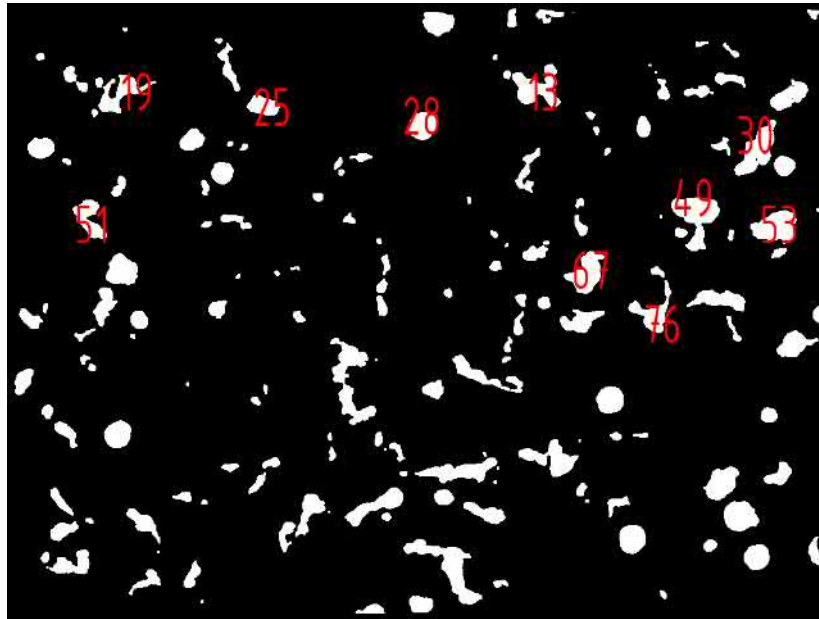
6.4. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése gömbös eutektikum esetén.



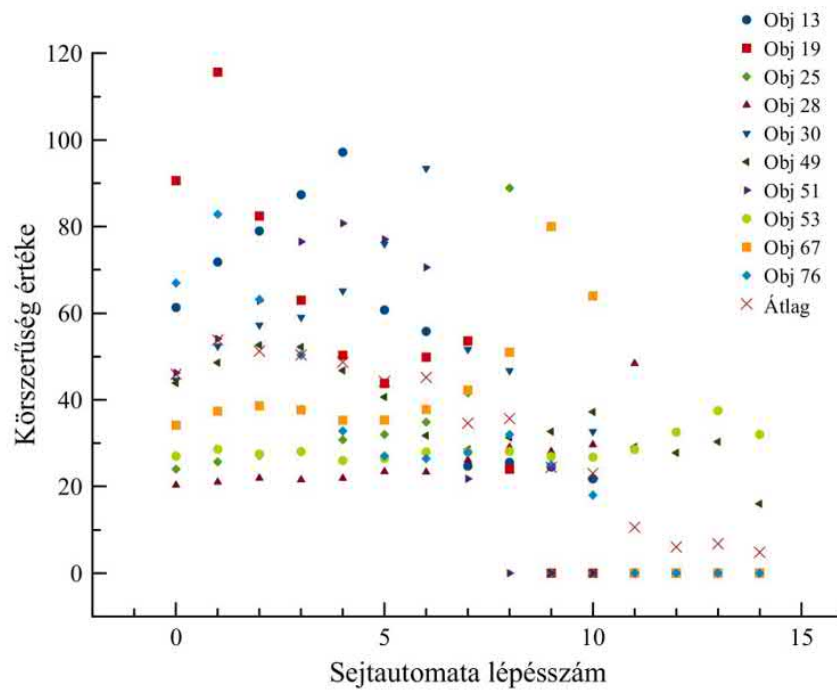
6.5. ábra: A „kígyós” eutektikum tanuló képei.



6.6. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése „kígyós” eutektikum esetén.



6.7. ábra: A kompakt eutektikum tanuló képe.



6.8. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése kompakt morfológiájú eutektikum esetén.

A gömbös morfológiájú objektumok esetén a körszerűség értéke az eróziós lépések előrehaladtával csak kis mértékben változik. Maga a körszerűség értéke is a legalacsonyabb a kezdő lépésben a négy szétválasztott alak közül. A gömbös morfológiájú objektumok tanuló adatsora a gömbgrafitos öntöttvas objektumainak — 10 darab objektum — számtani átlagából készült.

A kompakt grafitos öntöttvas objektumainak alakjára jellemző körszerűség értékek nagyobbak, mint a gömbös esetében.

A következő diagramokon az alakfelismeréshez szükséges adatsorokat látjuk, a hozzájuk tartozó objektumképekkel együtt.

Az *Al-Cu* eutektikum esetében látható, (6.11 ábra) hogy az objektumok többsége lemezes szerkezetű. Hat darab objektum esetében — ha a legközelebbi szomszédok módszerét alkalmazom — az 5. sejtautomata lépésig egyértelmű, hogy lemezes morfológiájúak az objektumok. A többi objektumot tekintve megállapítható, hogy a „20” jelű objektum nem lemezes, amely ebben az esetben igaz is. A „8” jelű objektum kígyós görbéje „kígyós” szerkezetűre utal, amely megállapítás szintén igaz.

Az *Al-Ni* eutektikum esetében egyértelműen megállapítható, hogy gömbös morfológiájú objektumok látszanak a képen. A 15. sejtautomata lépéshez közeledve, a görbe 0 értékei arra utalnak, hogy az objektumok addig a lépésig erodálódtak.

A nem finomított *Al-Si* eutektikum esetében, látható a(z) 6.15 ábrán, hogy az objektumok mérete nem túl nagy, viszonylag gyorsan erodálnak. Az objektumok többsége lemezes, vagy „kígyós” morfológiájú. A finomított eutektikum esetében még kisebbek az objektumok. Itt is lemezes vagy „kígyós” morfológiájúak.

A gömbgrafitos öntöttvas objektumainak körszerűség függvényén az látszik, hogy az objektumok többsége gömb alakú, azonban van három objektum, amely kivétel: az „5”, „6”, és a „15” jelű objektumok görbéi nem a gömbös alaknak megfelelőek. A „6” jelű a „kígyós” alakra hasonlít inkább, míg az „5” és „15” jelű görbéi a kompakt alakra jellemzőek.

A lemezgrafitos öntöttvas 6.21 ábráján az látható, hogy az objektumok többsége lemez alakú, ugyanakkor előfordul benne „kígyós” morfológiájú objektum is. Ilyen például a „101” jelű objektum, de a „9” jelű objektum sem lemezes morfológiájú, hanem kompakt.

A kompakt grafitos öntöttvas esetében a görbék a kompakt és a „kígyós” tanulógörbék között helyezkednek el. Az objektumok többségének a görbéi a kompakt alakhoz vannak közelebb. A „kígyós” morfológiájú öntöttvas esetében szintén a kompakt alakhoz vannak közelebb, azonban jellegükben inkább a kígyósra hasonlítanak.

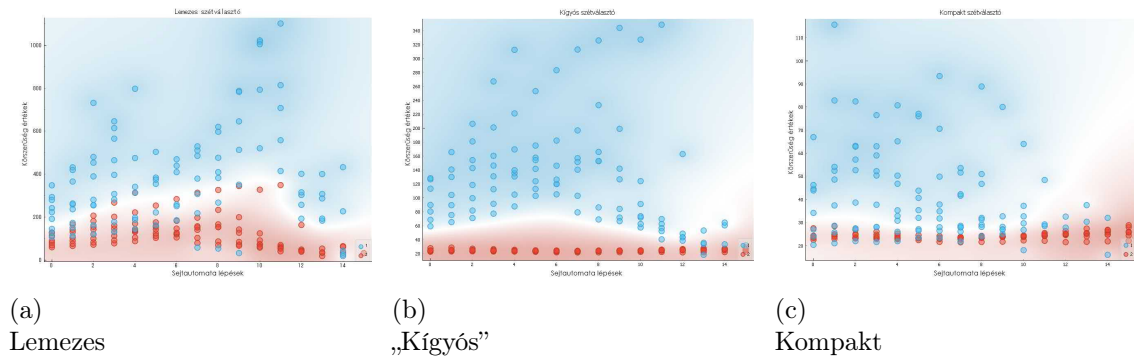
Összességében elmondható, hogy az objektumok körszerűségének sejtautomata lépésszám függvénye alkalmas az objektumok alakfelismeréséhez, azonban ha a képen az objektumok területe kisebb, mint egy meghatározott érték, akkor az alakfelismerés pontossága jelentősen romlik. Az objektumok területének legalább akkorának kell lenniük, hogy a hatodik sejtautomata lépés előtt ne tűnjenek el a képről.

A tartóvektor-gép paraméterei a következők:

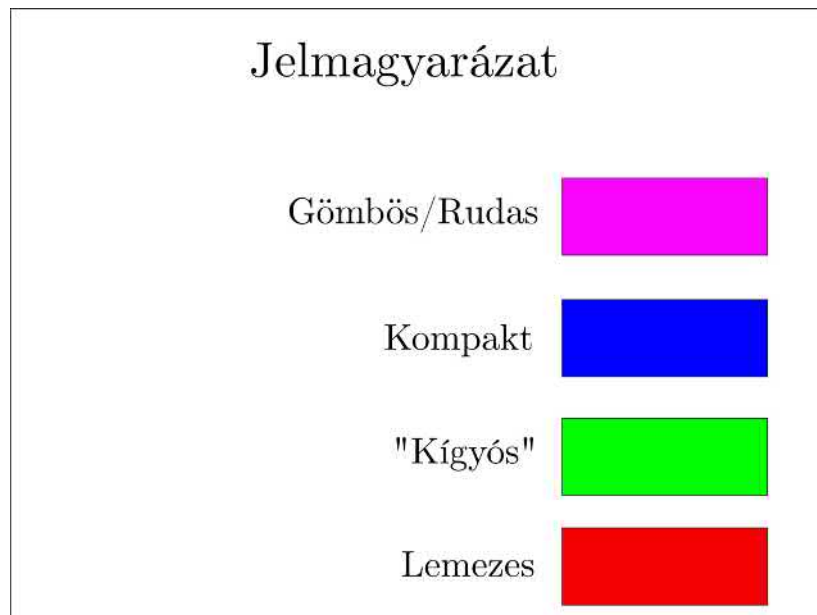
$$- C = 1$$

$$- \varepsilon = 0,10$$

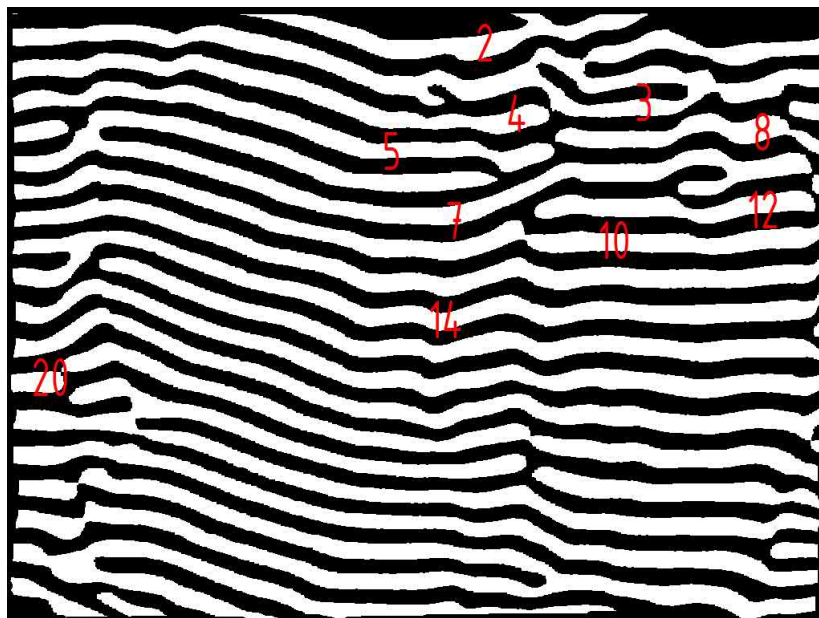
$$- \text{Kernel: } \tanh(0,02 \times x \times y + 10,00)$$



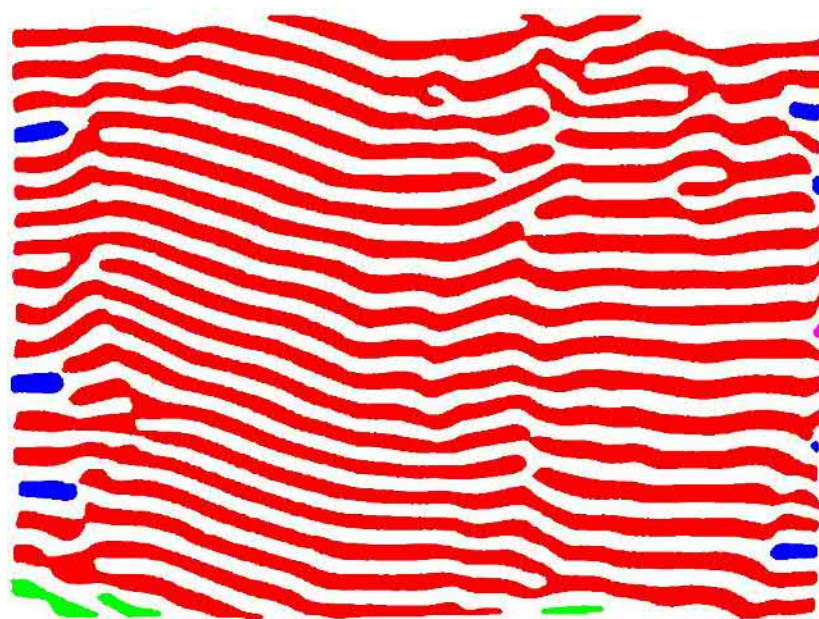
6.9. ábra: A tartóvektor-gép tanuló adatai osztályozva



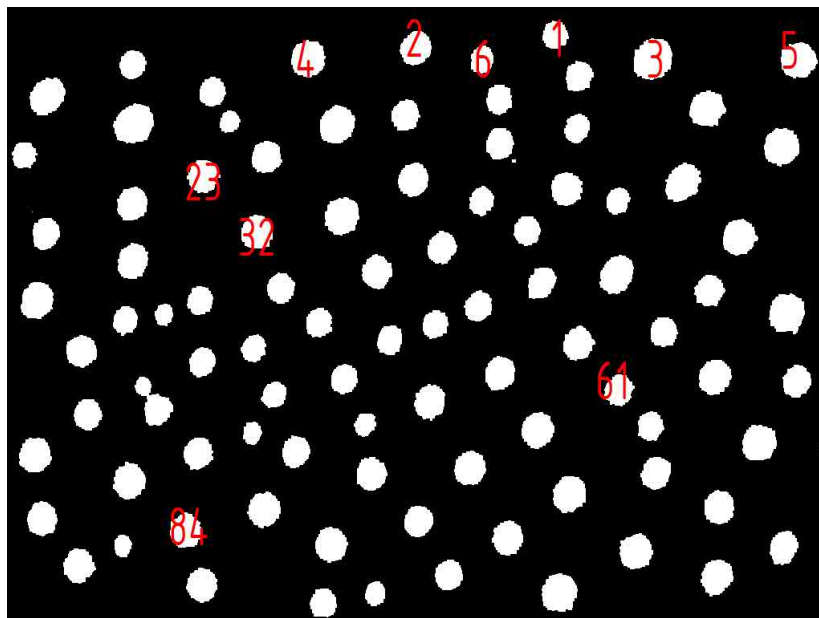
6.10. ábra: A felismert alakok szín szerinti jelölésének magyarázata.



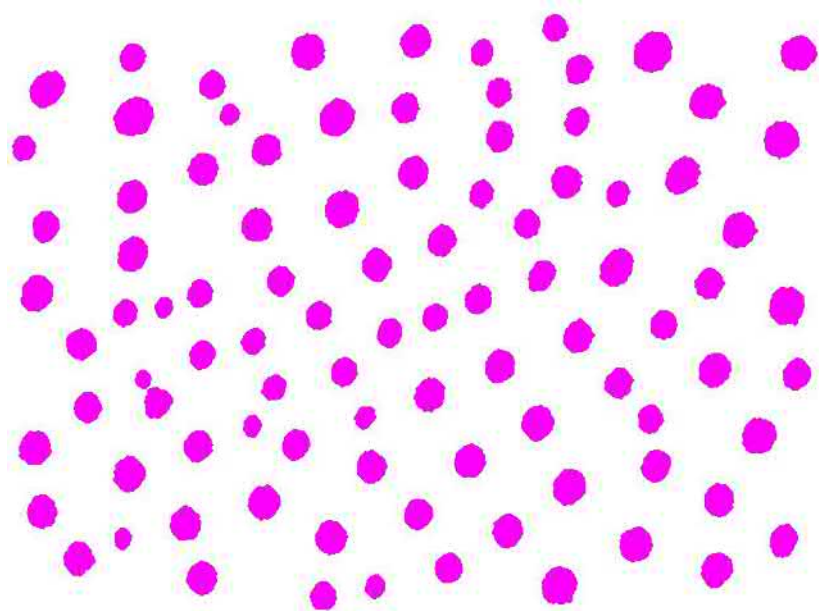
6.11. ábra: Az objektumok azonosítói  $Al-Cu$  eutektikum képén.



6.12. ábra: Az objektumok alak szerint színezve  $Al-Cu$  eutektikum képén.

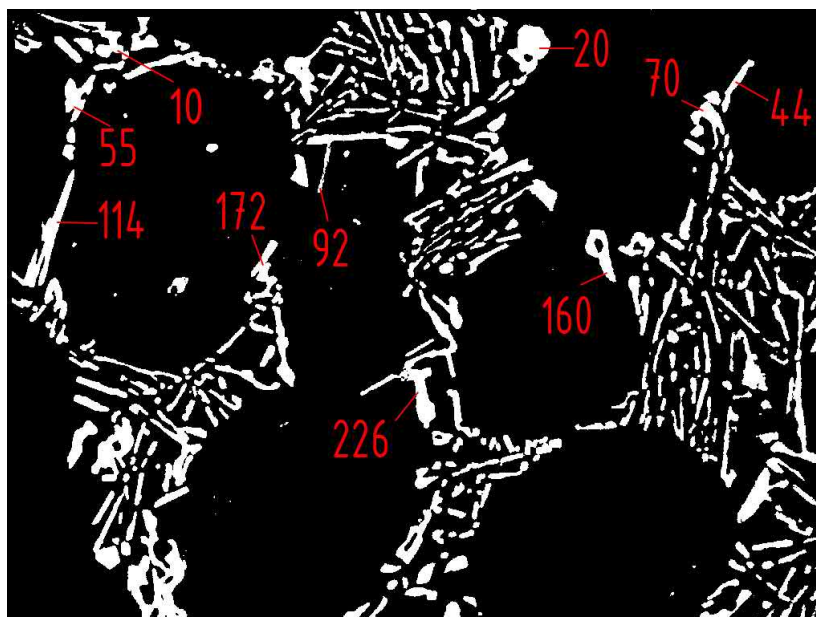


6.13. ábra: Az objektumok azonosítói az  $Al-Ni$  eutektikum képén.

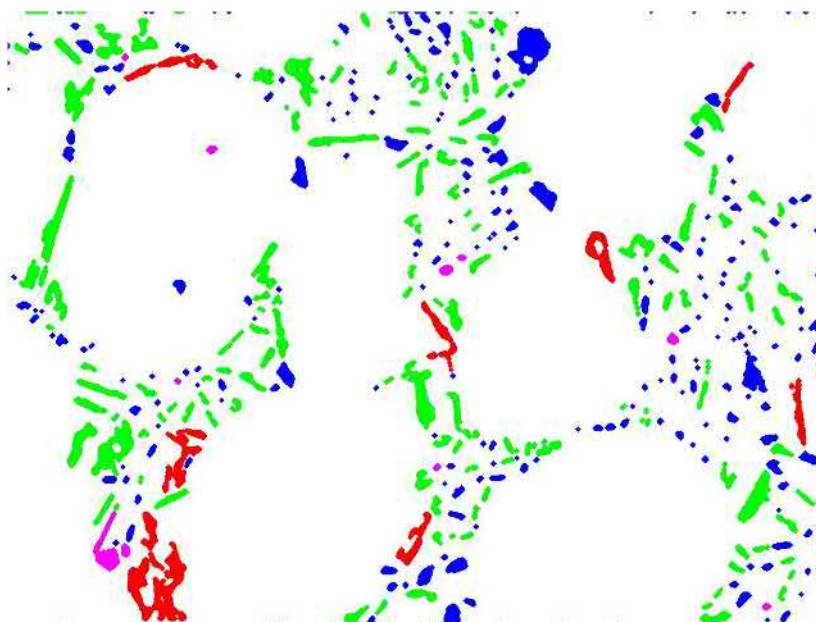


6.14. ábra: Az objektumok alak szerint színezve  $Al-Ni$  eutektikum képén.

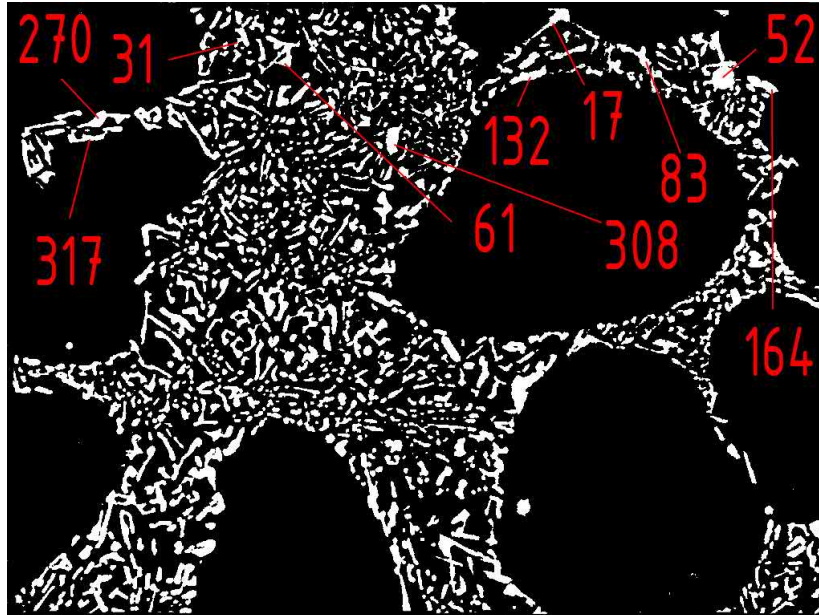




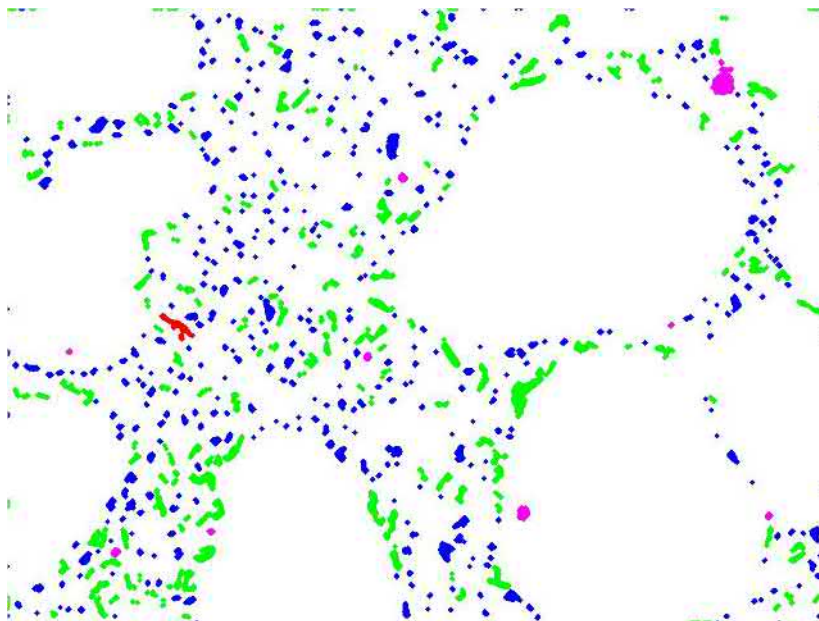
6.15. ábra: Az objektumok azonosítói nem finomított  $Al-Si$  eutektikum képén.



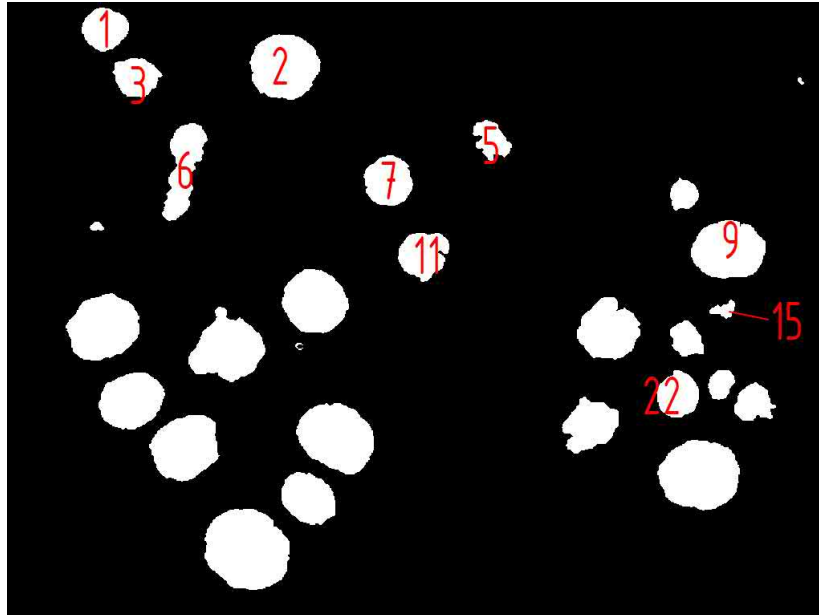
6.16. ábra: Az objektumok alak szerint színezve a nem finomított  $Al-Si$  eutektikum képén.



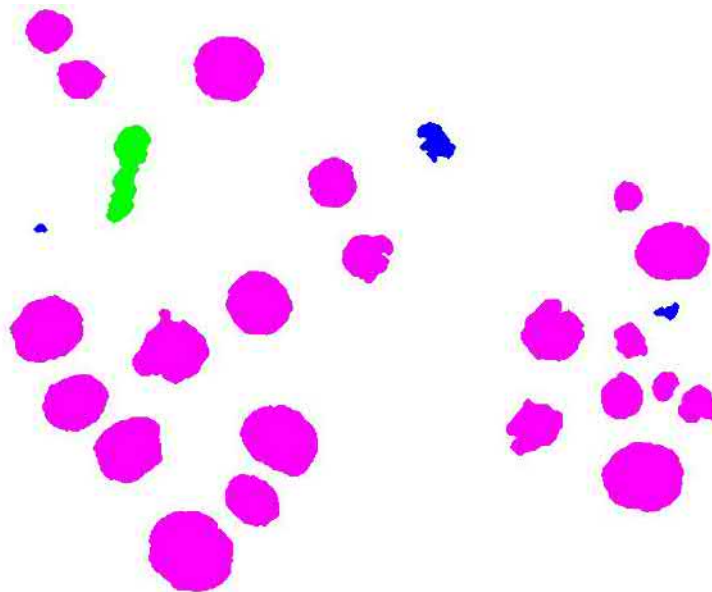
6.17. ábra: Az objektumok azonosítói finomított  $Al-Si$  eutektikum képén.



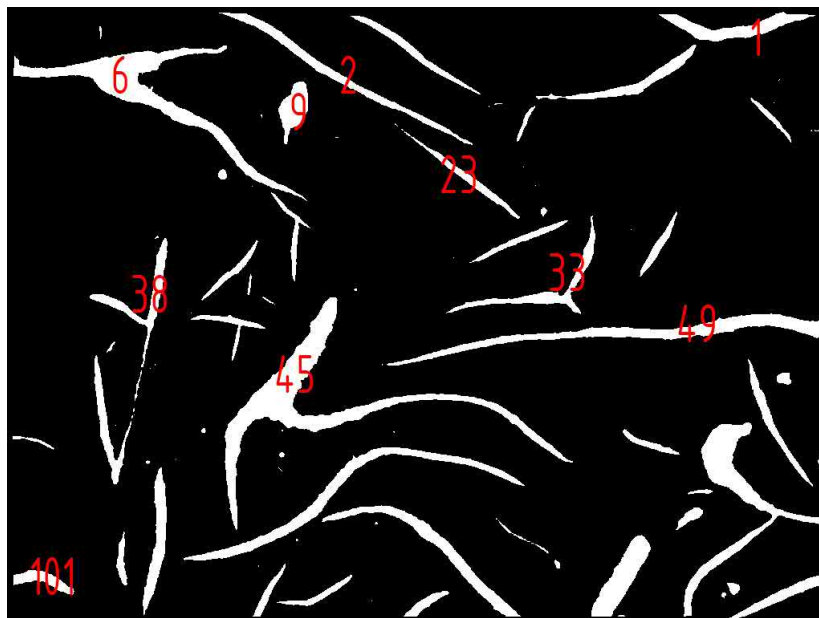
6.18. ábra: Az objektumok alak szerint színezve a finomított  $Al-Si$  eutektikum képén.



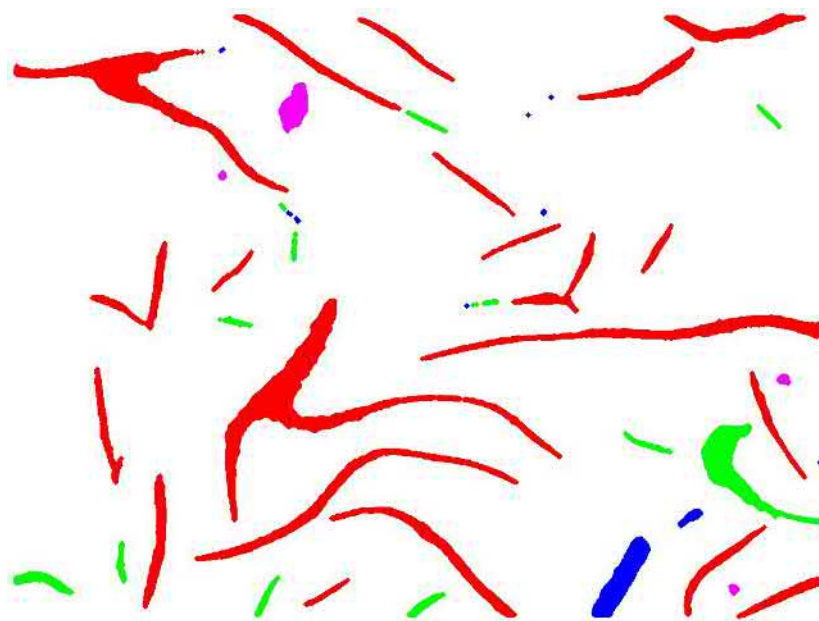
6.19. ábra: Az objektum azonosítói gömbgrafitos öntöttvas képén.



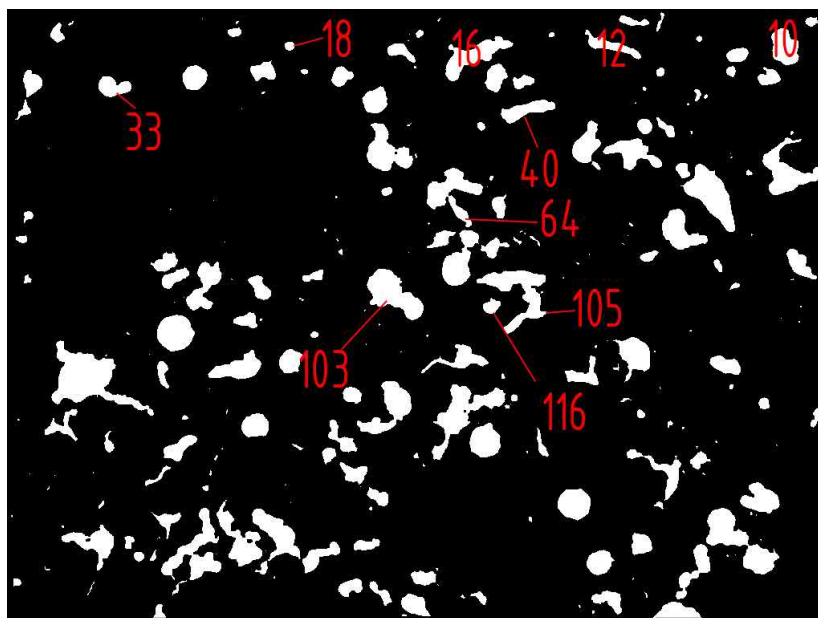
6.20. ábra: Az objektumok alak szerint színezve a gömbgrafitos öntöttvas képén.



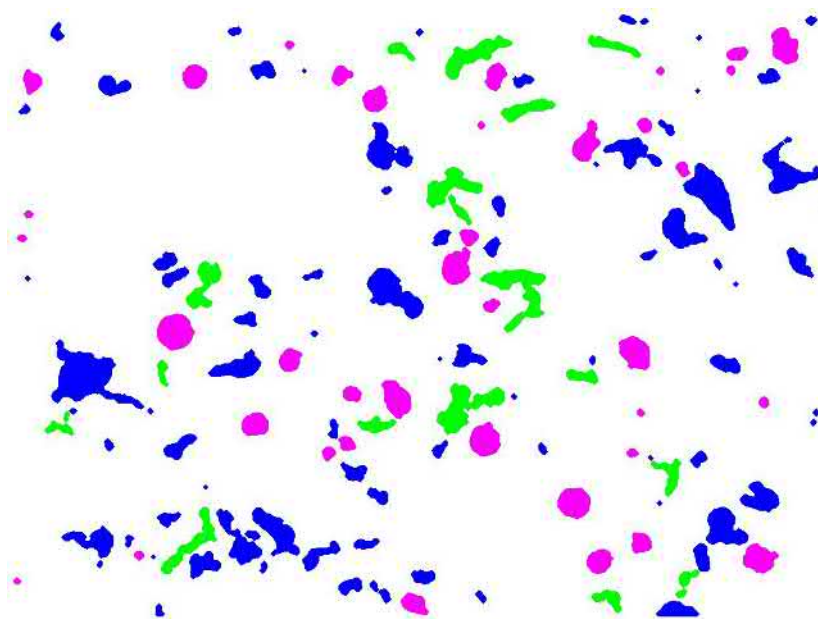
6.21. ábra: Az objektumok azonosítói lemezgrafitos öntöttvas képén.



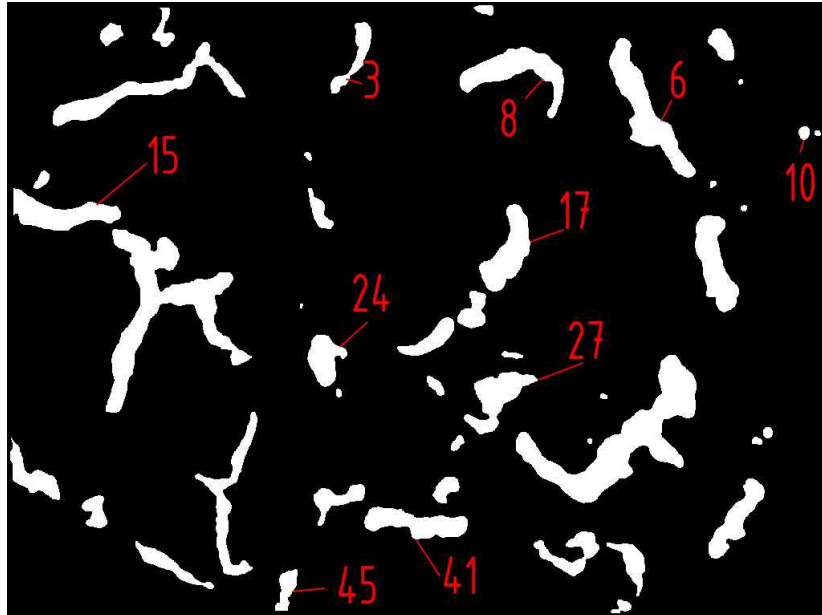
6.22. ábra: Az objektumok alak szerint színezve a lemezgrafitos öntöttvas képén.



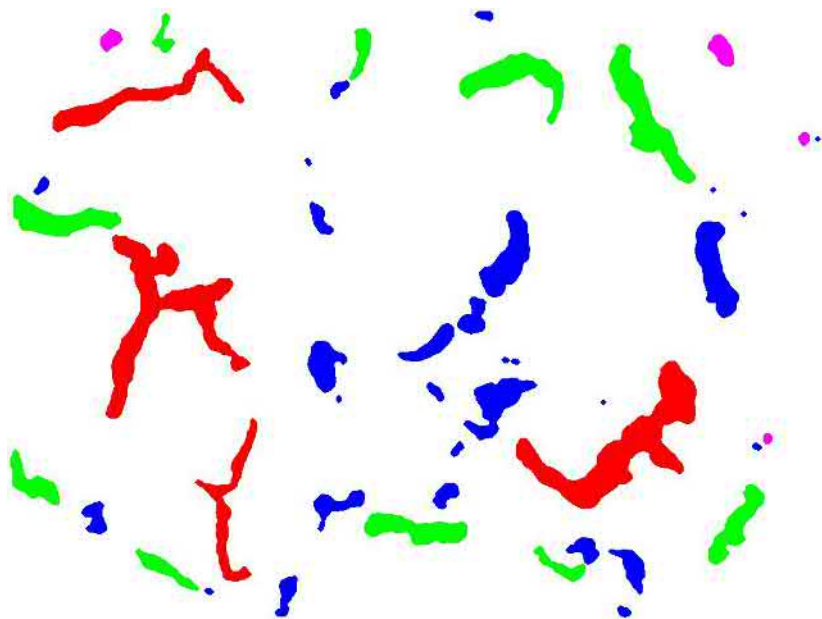
6.23. ábra: Az objektumok azonosítói a kompakt grafitos öntöttvas képén.



6.24. ábra: Az objektumok alak szerint színezve a kompakt grafitos öntöttvas képén.



6.25. ábra: Az objektumok azonosítói a kompakt grafitos öntöttvas képén.



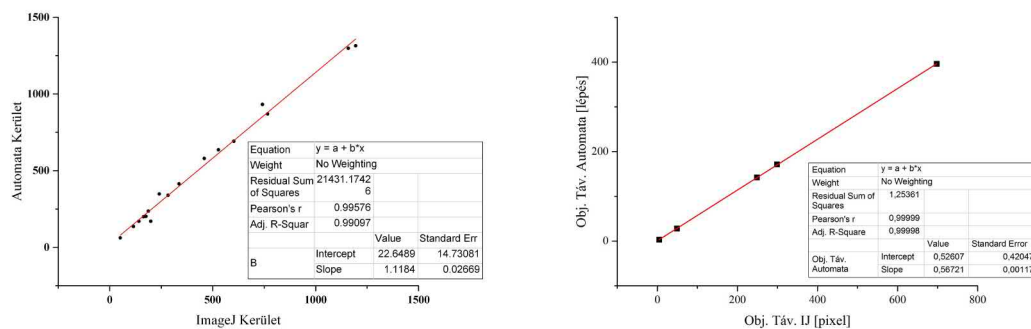
6.26. ábra: Az objektumok alak szerint színezve a kompakt grafitos öntöttvas képén.

### 6.1.2. Az objektumok területének és kerületének a mérése

Ebben az esetben a validálás az *ImageJ* képelemző szoftver *Measure Particles* algoritmusával végeztem el.

Az eredményekből jól látható, hogy az automata megbízhatóan méri az objektumok területeit és kerületeit. A kerületek közötti eltérés abból adódik, hogy míg az automata a kontúrpxeleket összeszámolja, addig az *ImageJ* azokat a pixeleket, amelyek csak a csúcspuknál van szomszédjuk  $\sqrt{2}$  értékkel számol. [96]

Az objektumok összeérésének sejtautomata lépésszáma és az objektumok közötti távolság arányos. Ahhoz, hogy ez az arányosság konkretizálható legyen, el kell végezni egy kalibrációs mérési sorozatot — 5 db mérést — és így a sejtautomata lépésszámából az objektumok közötti távolság számítható. A mérést kézzel végeztem az *ImageJ* szoftver segítségével. A 6.27 ábrán látható, hogy egy sejtautomata lépés távolságban mennyinek felel meg.



(a)  
Kerület mérés

(b)  
Távolság mérés

6.27. ábra: A sejtautomata kalibrációs diagramjai.

6.1. táblázat: *Al-Cu* – 6.11. ábra – egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
2	9991	1298	9991	1158,583
3	32532	3954	32532	3050,553
4	14008	1686	14008	1498,548
5	13787	1698	13787	1509,963
7	32998	3900	32998	3472,962
8	7012	870	7012	766,902
10	21437	2514	21437	2259,183
12	7674	844	7674	771,362
14	23396	2740	23396	2448,864
20	1543	192	1543	174,426

6.2. táblázat: *Al-Ni* – 6.13. ábra – egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
1	868	136	868	114,912
2	1274	166	1274	136,711
3	1969	202	1969	175,64
4	1534	182	1534	152,125
5	1573	186	1573	155,539
6	777	128	777	108,083
23	1240	168	1240	141,054
32	1320	164	1320	141,154
61	1072	162	1072	132,711
84	1329	170	1329	141,882



6.3. táblázat: Nem finomított  $Al-Si$  – 6.15. ábra – egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
10	1306	478	1306	403,019
20	2023	352	2023	251,907
44	589	216	589	170,894
55	1102	266	1102	214,451
70	1297	400	1297	315,747
92	1322	442	1413	442,534
114	2262	636	2252	527,831
160	1102	274	1102	179,439
172	1149	378	1150	298,919
226	3105	932	3105	741,737

6.4. táblázat: Finomított  $Al-Si$  – 6.17. ábra – egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
17	469	214	469	167,723
31	317	174	255	181,865
52	1646	580	1647	458,943
61	701	348	701	240,593
83	445	196	445	156,752
132	423	148	423	120,468
164	469	162	469	129,196
270	551	200	551	164,267
308	470	138	470	111,054
317	482	236	482	197,924

6.5. táblázat: Kompakt grafitos – 6.23. ábra – öntöttvas egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
10	1174	170	1174	141,296
12	733	220	733	183,095
16	1777	326	1777	265,664
18	111	48	111	38,627
33	719	144	719	118,225
40	967	200	967	167,782
64	2015	414	2015	336,676
103	2356	294	2356	236,593
105	2429	476	2429	5,657
116	286	84	286	67,598

6.6. táblázat: „Kígyós” – 6.25. ábra – grafitos öntöttvas egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
3	1320	292	1320	243,38
6	5373	592	5373	481,286
8	4177	514	4177	426,132
10	188	62	188	50,87
15	3534	408	3534	352,936
17	3371	356	3371	294,492
24	1933	242	1933	198,066
27	3024	404	3024	329,605
41	3079	378	3079	325,865
45	840	170	840	199,095

6.7. táblázat: Gömbgrafitos öntöttvas – 6.19. ábra – egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
1	2355	232	2355	184,551
2	5550	354	5550	288,978
3	2172	228	2172	186,409
5	1494	236	1494	187,38
6	3666	418	3666	334,233
7	2956	260	2956	209,622
9	5277	340	5277	283,179
11	2808	282	2808	229,279
15	410	118	410	94,569
22	2332	224	2332	183,581

6.8. táblázat: Lemezgrafitos öntöttvas – 6.21. ábra – egyedi objektumok adatai.

Obj. sz.	Automata		ImageJ	
	Terület	Kerület	Terület	Kerület
1	2502	510	2502	439,12
2	2910	962	2910	768,105
6	8477	1418	8478	1187,1
9	1605	232	1605	198,024
23	1105	478	1121	378,299
33	2234	692	2235	602,86
38	1985	600	1985	515,647
45	11670	1852	11670	1546,805
49	6061	1314	6061	1194,5
101	962	228	962	191,095

### 6.1.3. Az objektumok elrendeződésének jellemzése

Annak érdekében, hogy a képről értékelhető információkat kapjunk meg kell vizsgálni az objektumok számát a képen. Ha az objektumok száma meghaladja az 50 darabot, akkor nem célszerű alkalmazni az adatok megjelenítését dendrogrammal, annak átláthatatlansága miatt. Azonban egy másik diagramtípus is rendelkezésünkre áll, hogy az objektumok közötti adatokat megjeleníthessük, ez a diagram pedig az objektumösszeéréseknek a hisztogramja. Ez a diagram azt mutatja meg, hogy adott lépésben hány darab objektum ért össze. Ebből következtetni lehet a csoportosulások jelenlétére és az objektumok közötti átlagos távolságra.

Az alumínium-réz eutektikum esetében látszik a(z) 6.36 ábrán, hogy egy csúcsa van a hisztogramnak, ez a szerkezet nem tartalmaz csoportokat.

Az alumínium–nikkel esetében 6.37 ábra, is egy nagy csúcs van, de vannak kisebb csúcsok is, a dendrogramon is látni kisebb csoportokat, viszont ebben az esetben nem célszerű a dendrogramot alkalmazni, mert nehezen áttekinthető.

A kompakt grafitos öntöttvas esetében a(z) 6.39 ábrán látható, hogy tartalmaz csoportokat, azonban ezek csak kisebb csoportok.

A gömbgrafitos öntöttvas hisztogramján — 6.40 ábra — láthatóak a csúcsok, amelyek arra utalnak, hogy a szerkezet csoportosulásokat mutat. A dendrogramon — 6.41 ábra — is láthatóak a csoportok.

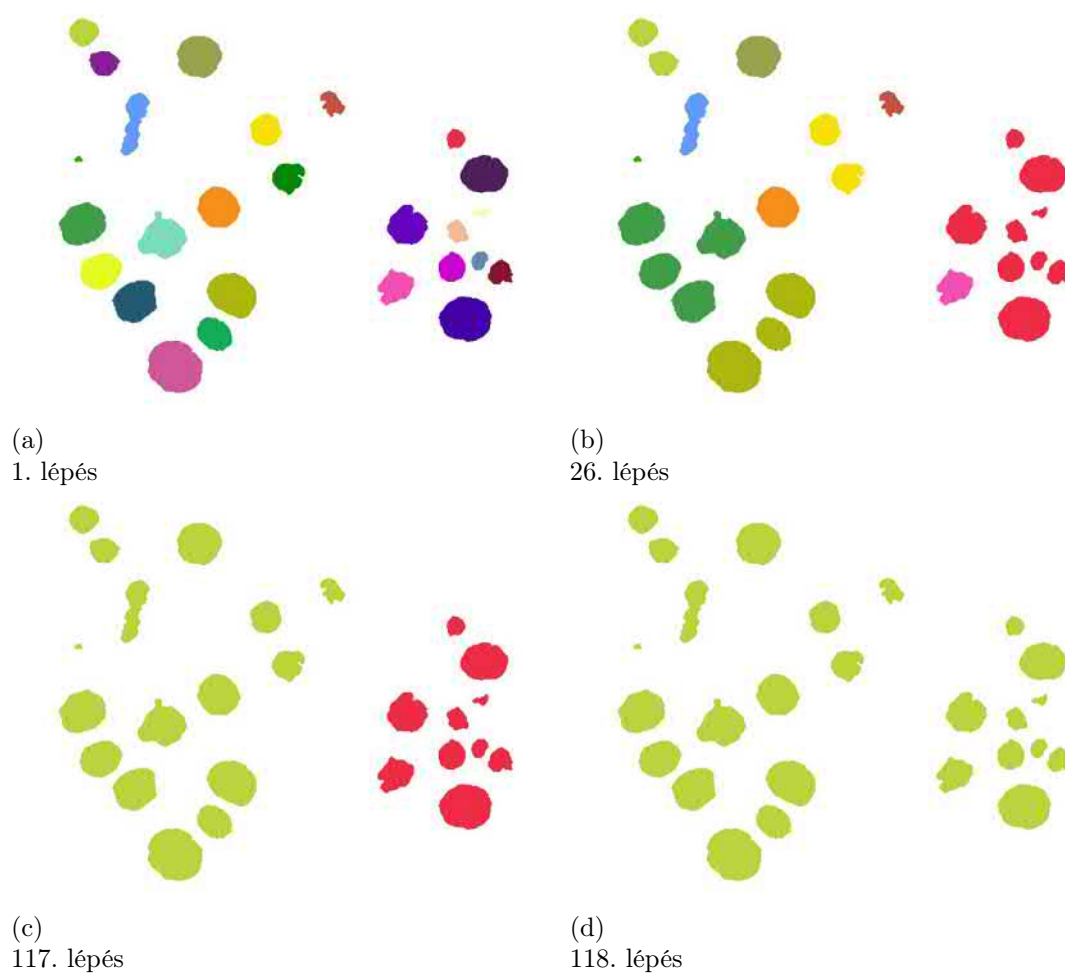
A „kígyós” morfológiájú öntöttvas esetében a(z) 6.42 ábrán látható, hogy csoportosultak az objektumok. E módszer előnye, hogy szerkezettől függetlenül képes kimutatni a csoportosulás mértékét.

A lemezgrafitos öntöttvas hisztogramján 6.43 ábra, nem láthatóak nagyobb csoportok.

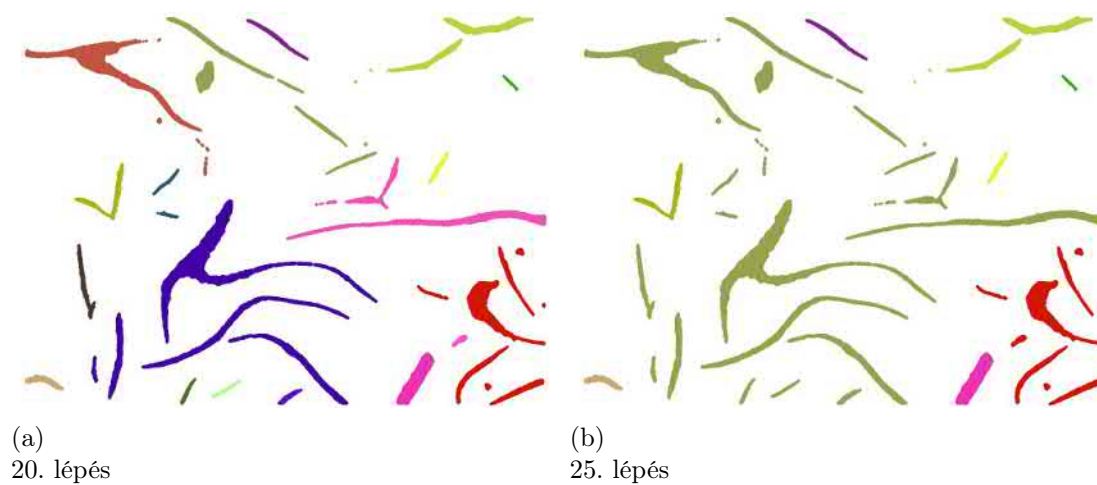
A nem finomított alumínium-szilícium eutektikum hisztogramján — 6.44 ábra — látható, hogy egy nagy csúcs van, hamar összeérnek az objektumok, viszont a lépésszám növekedésével kis csúcsok megjelennek utalva ezzel arra, hogy kevés, de sok objektumot tartalmazó csoportok észlelhetőek a szövethépen.

A finomított alumínium-szilícium ötvözet esetében — 6.45 ábra — is az látszik, hogy sok kicsi objektum van, és hamar összeérnek, viszont itt már nem jellemzőek a csoportosulások.

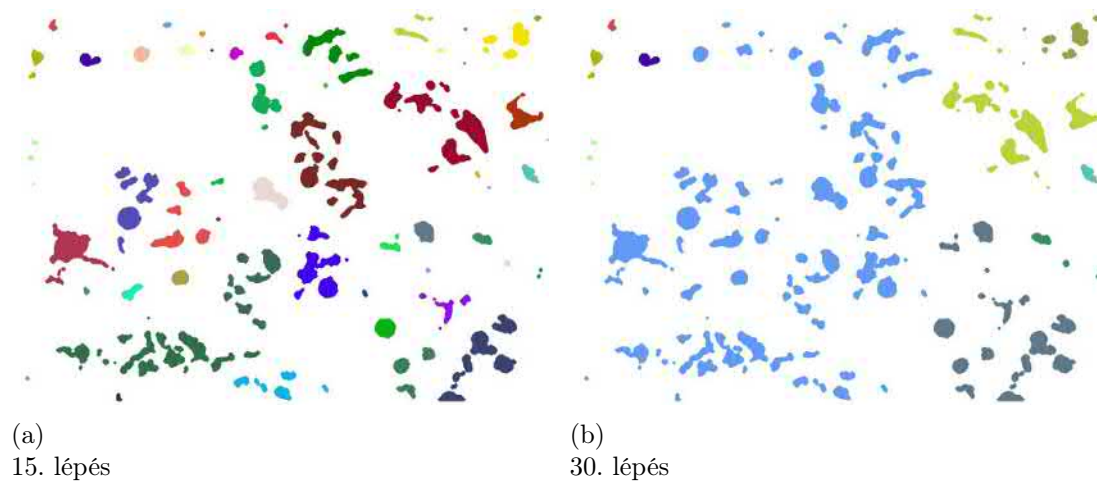
**Az osztályokba sorolás menete.** ♦ A folyamat kezdetekor minden címkézett objektum különböző színt kap. Ekkor még nincsenek azonos színű objektumok a képen. Ez látható a 6.28 a) ábrán. Az automata futása során az objektumok egyre növekednek és megtörténnek az összeérések, az összeért objektumok azonos színt kapnak és azonos címkét. Az azonos címkéjű objektumok az adott sejtautomata lépésben egy csoportot alkotnak. A 6.28 b) és 6.28 c) ábrán a 26. ill. 117. lépésben láthatóak a csoportok. A folyamat végére már csak egyetlen csoport marad, ez látható 6.28 d) ábrán.



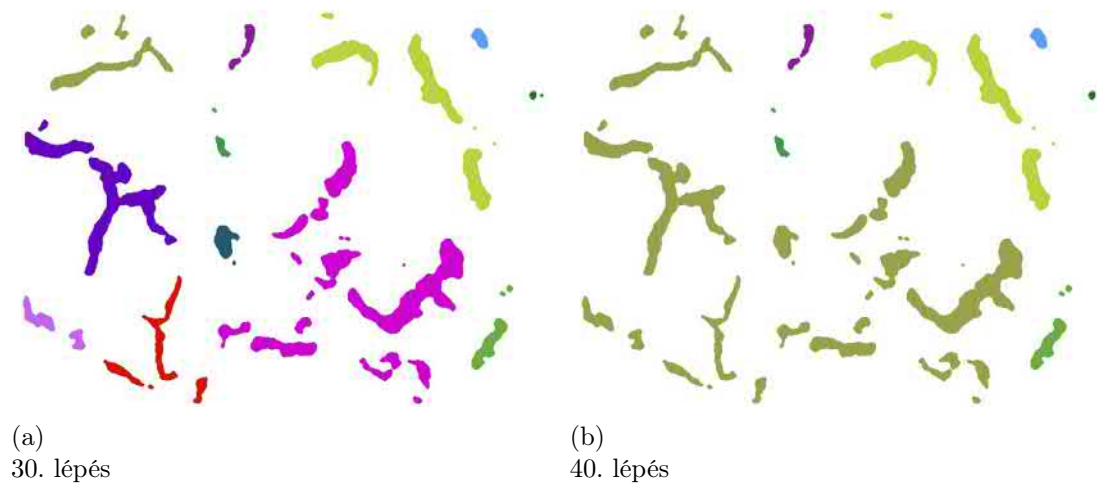
6.28. ábra: Gömbgrafitos öntöttvas objektumainak csoportosulásai.



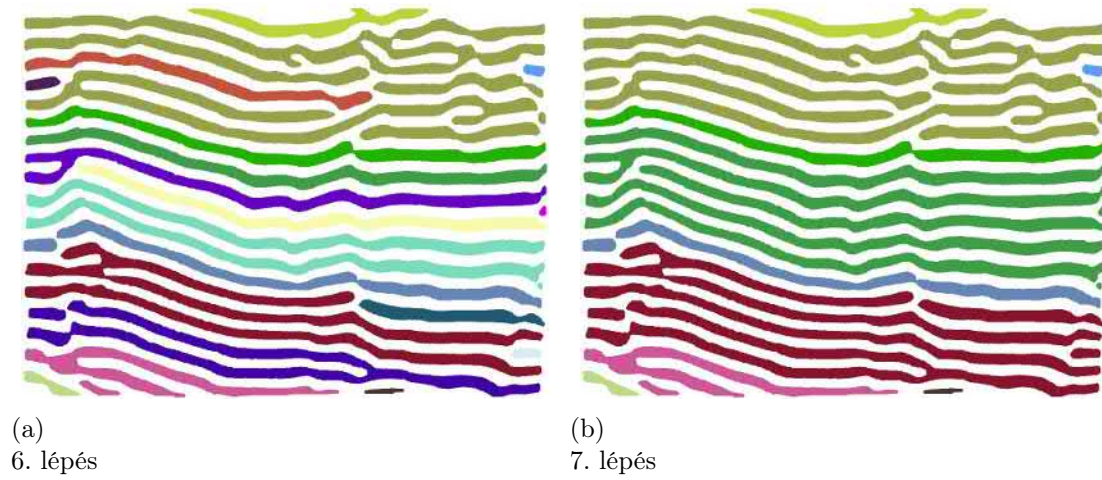
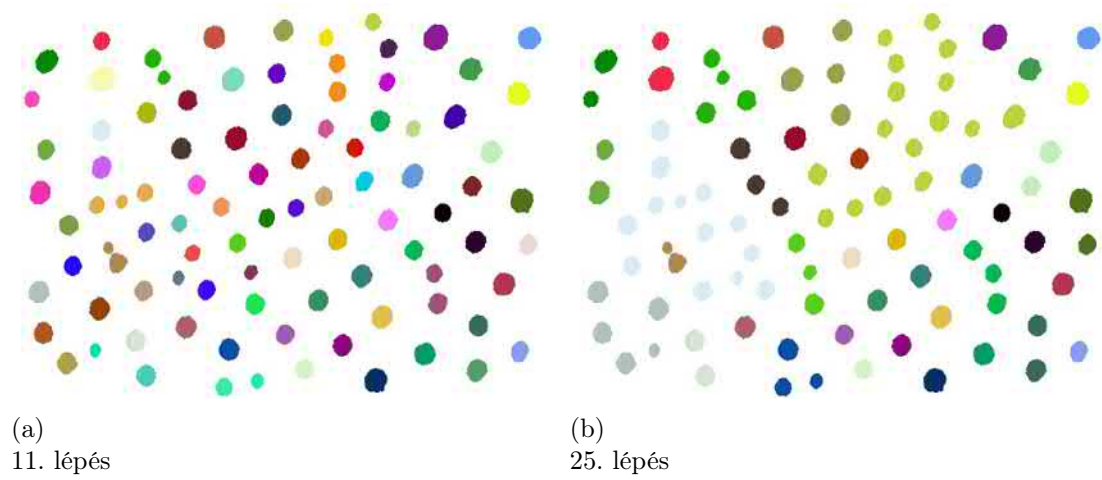
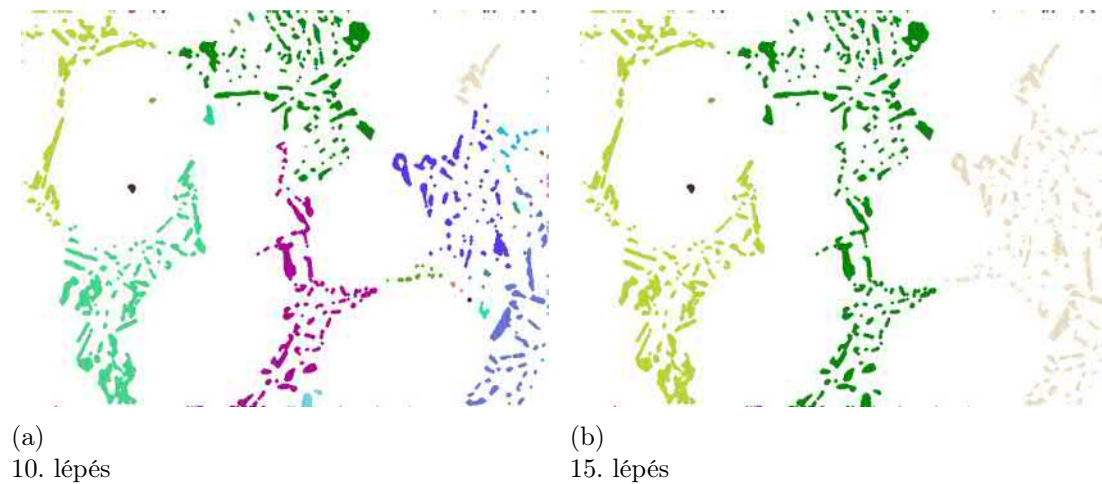
6.29. ábra: Lemezgrafitos öntöttvas objektumainak csoportosulásai.

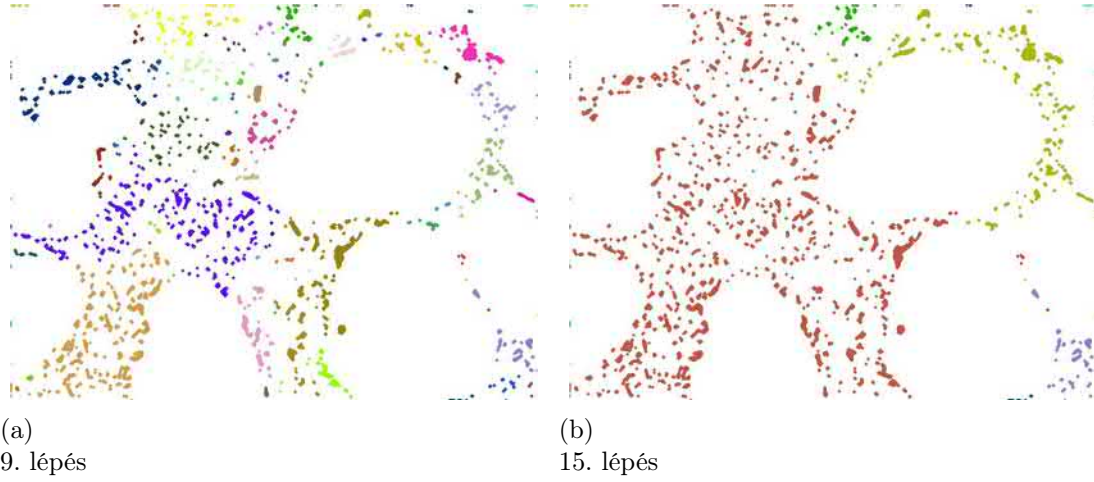
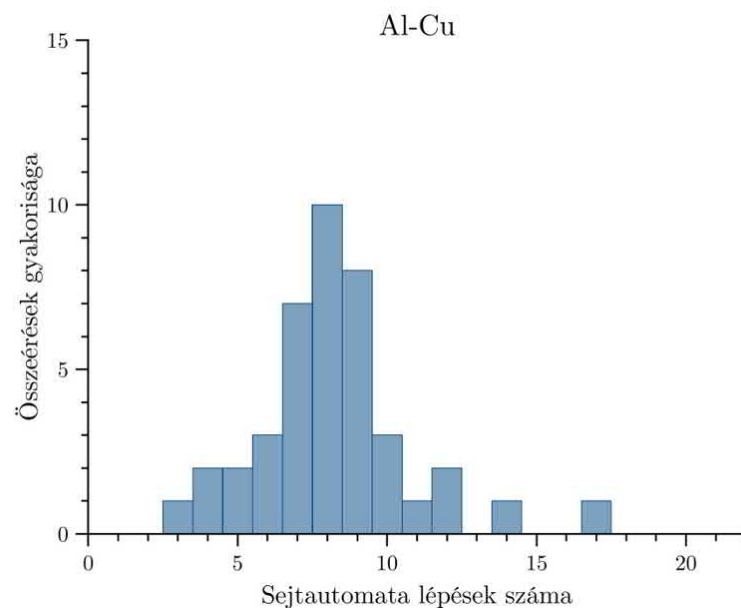


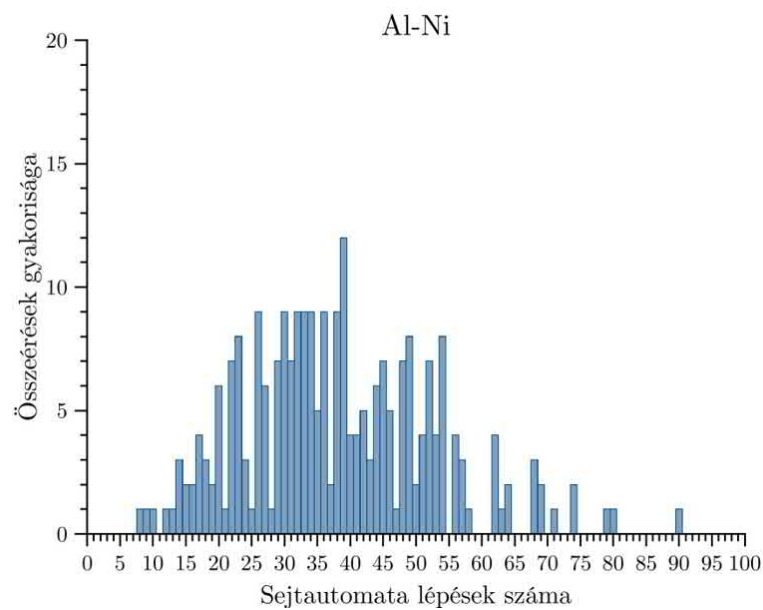
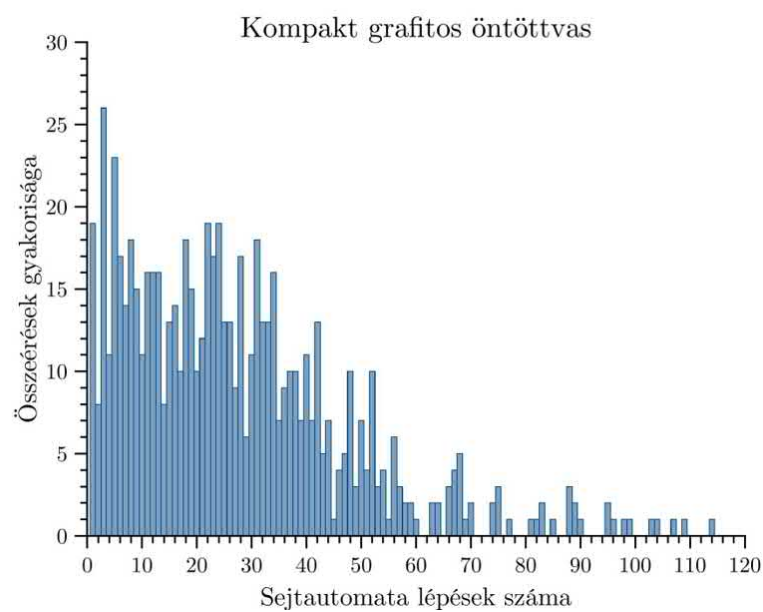
6.30. ábra: Kompakt grafitos öntöttvas objektumainak csoportosulásai.



6.31. ábra: Kompakt grafitos öntöttvas objektumainak csoportosulásai.

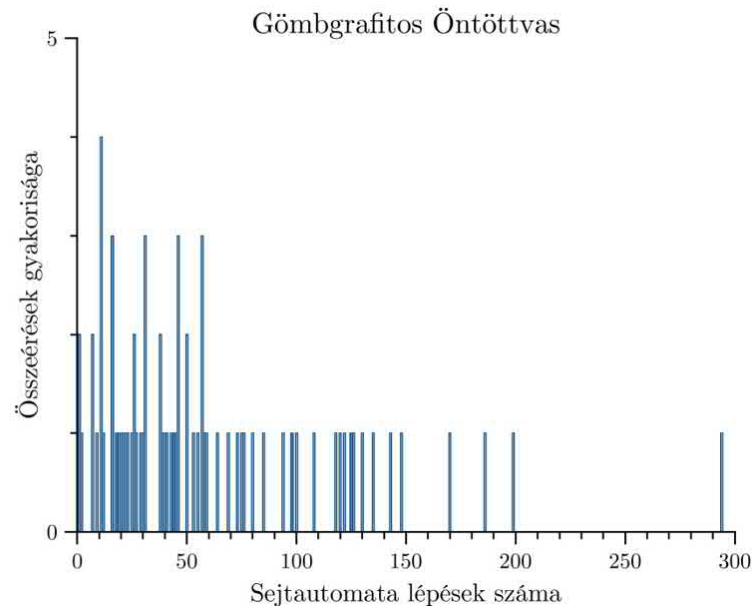
6.32. ábra: *Al-Cu* ötvözet objektumainak csoportosulásai.6.33. ábra: *Al-Ni* ötvözet objektumainak csoportosulásai.6.34. ábra: Nem finomított *Al-Si* ötvözet objektumainak csoportosulásai.

6.35. ábra: Finomított *Al-Si* objektumainak csoportosulásai.6.36. ábra: Az *Al-Cu* eutektikum objektum-összeírés histogramja.

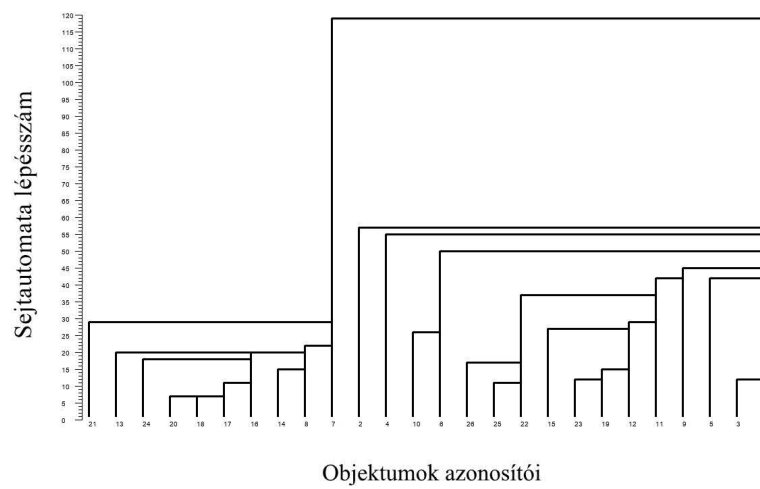
6.37. ábra: Az *Al-Ni* eutektikum objektum-összeérés hisztogramja.6.38. ábra: Az *Al-Ni* eutektikum dendrogramja.

6.39. ábra: A kompakt grafitos öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.

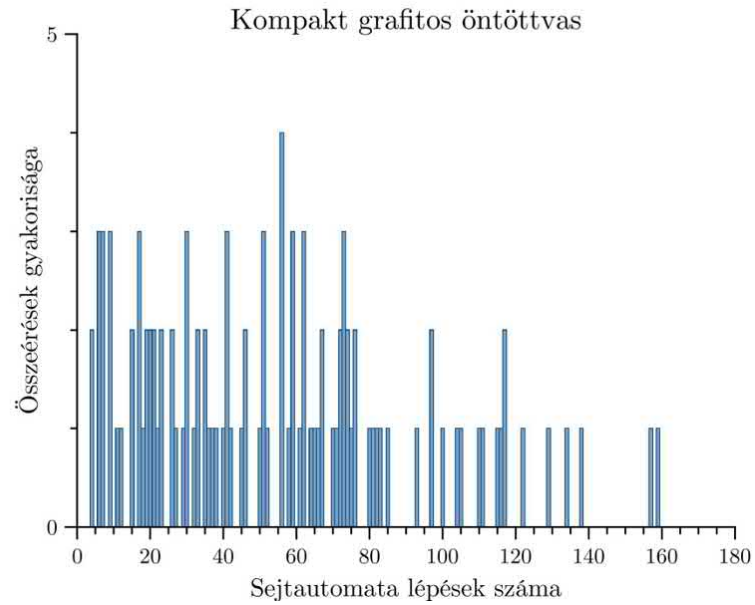




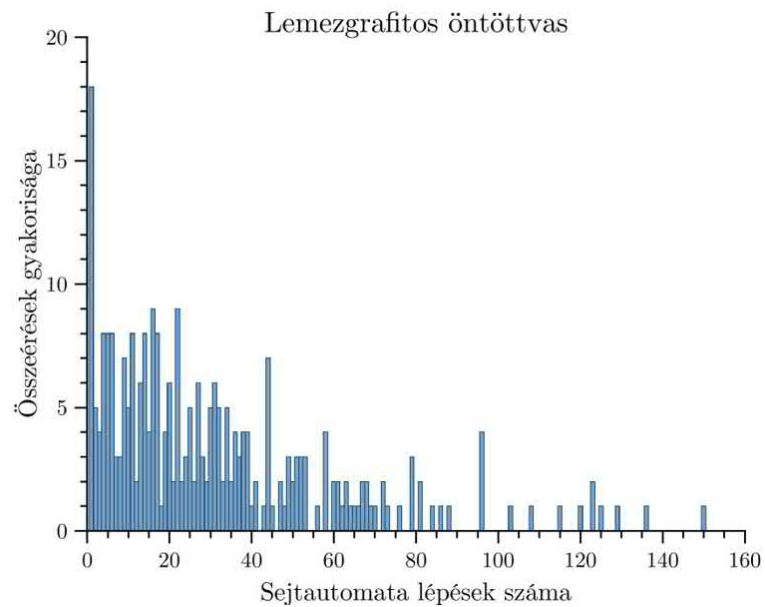
6.40. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.



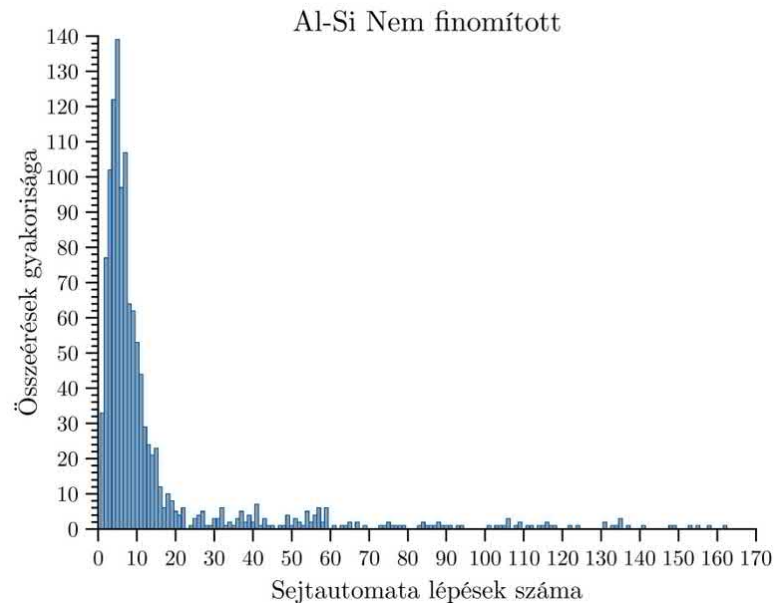
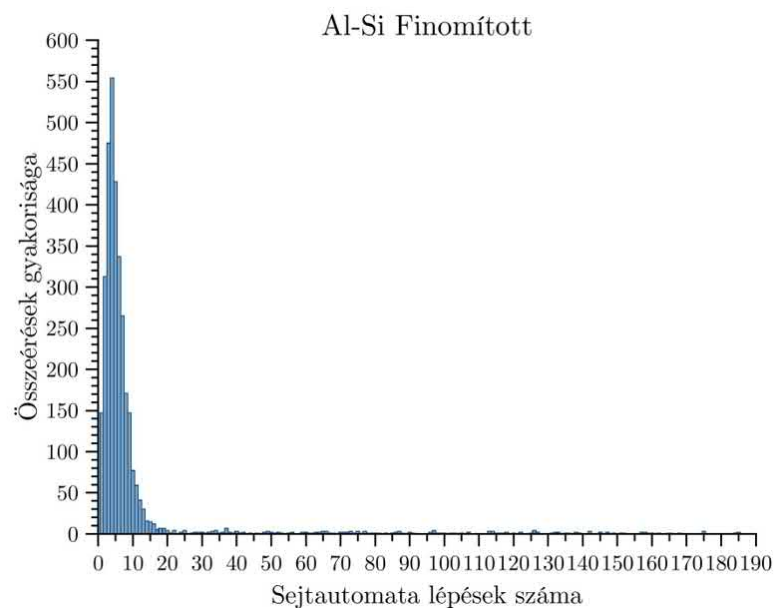
6.41. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas dendrogramja.



6.42. ábra: A „kígyós” öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.



6.43. ábra: A lemezes öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.

6.44. ábra: A nem finomított *Al-Si* eutektikum objektum-összeérés hisztogramja.6.45. ábra: A finomított *Al-Si* eutektikum objektum-összeérés hisztogramja.

## 6.2. Az automata alkalmazása a gyakorlati képelemzésben

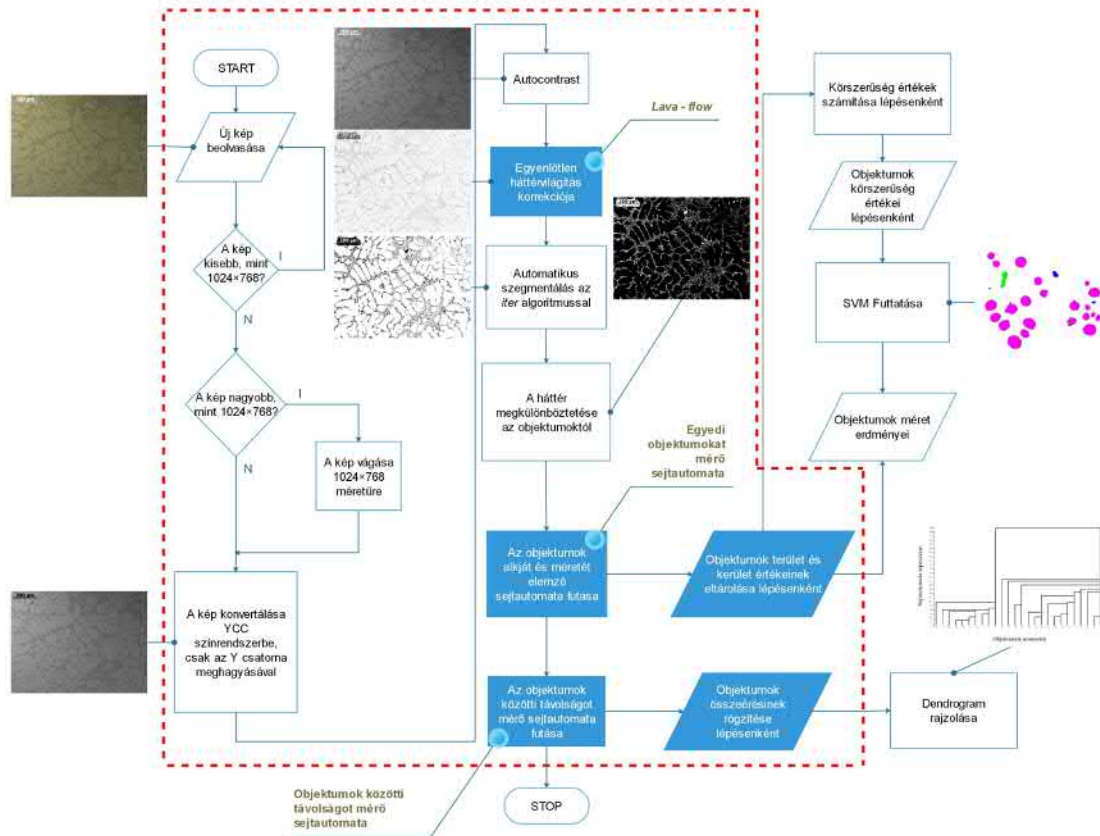
A nehéziparban a bonyolult, tagolt geometriájú alkatrészeket általában valamilyen öntési eljárással készítik. Különösen igaz ez a járműiparra és a mezőgazdasági erőgépgyártásra, ahol nagy mennyiségben használnak öntvényeket, ilyenek például: motorblokk, hengerfej, nyomatékvtáló-ház, stb. A gépipari technológiákban végbemenő változások és a növekvő vevői igények új, jobb minőségű anyagok használatát követelik meg. Emiatt különösen fontos az anyagok precíz minősége, a gyártási volumen növekedésével együtt.

Az öntvényeket általában eutektikus szerkezetű anyagokból készítik a kedvező önthetőségi tulajdonságaik miatt. Az öntödei minőség-ellenőrző laboratóriumokban a minták minősítése számítógépi képelemzéssel történik. A napjaink mikroszkópi technológiai fejlettsége mellett lehetőség van a minták automatikus fényképezésére nagy mennyiségben. A nagy mintaszám miatt szükség van a minták gyors kiértékelésére. Ebben az értekezésben bemutatott képelemzési módszerek segítségével a minták kiértékelésének sebessége gyorsítható. Ez egyrészt a folyamat automatizáltsága miatt valósul meg. Az emberi döntések és műveletvégzések kizárásával gyorsítható a folyamat, ugyanakkor a mérési hibák száma is csökkenthető. Másrészt ezeknek a képelemző algoritmusoknak a futtatása *Neuman-architektúrán* nem optimális, viszont létezik célhardver, amin a mérő sejtautomaták futtatása megvalósítható. [97] Ez szintén további gyorsulást eredményez a folyamatban. Tehát egységnyi idő alatt több minta kerülhet elemzésre és kiértékelésre az adott üzemben, ami által lehetősége van a termelő vállalatnak, hogy növelje az ellenőrizendő minták számát, vagy ugyanakkora mintaszám esetén időt takaríthat meg és másra használhatja a felszabadult időt. Ezáltal az adott üzemnek lehetősége nyílik a termék minőségének javítására, vagy a termelékenység növelésére, amely megnövekedett árbevételt eredményezhet. Az *ipar 4.0* technológiák térnyerésével az üzemekben egyre több rendszert automatizálnak, egyre több gyártásközi információ elérhető valós időben a vállalatirányítási rendszerben az illetékes döntéshozók számára. E technológiák közé az automatikus képelemzési eljárás jól beilleszthető.

A sejt automata hatékony módszer az eutektikus szövetszerkezetek minimális beavatkozási igényű képelemzési folyamatában. Az algoritmusokban a sejtek a képpontok, a sejtek lehetséges állapotai a képpontok értékei, az állapotváltási szabályok pedig: módosított Lava-flow, képi erózió és sztochasztikus dilatáció. Sejt automaták alkalmazásával az egyenlőtlen háttér korrigálható, az objektumok karakterisztikus lineáris mérete mérhető, a legközelebbi szomszédok kontúrjának legkisebb távolsága mérhető. Az automaták működésének további eredményeiből az eutektikus fázisok csoportosulásának elemzése és az alak szerinti osztályozásuk elvégezhető, de ehhez más, nem sejt automata algoritmusok hatékonyak. A sejt automaták alkalmazásának ez a határa fontos a képelemző rendszer tervezésében. Az összefoglaló folyamatábrája a 6.46 ábrán látható. A szaggatott pirossal bekeretezett részen belül az algoritmusnak az a része található, amelyet sejtautomatával valósítottam meg, ez a rész futtatható célhardveren is.

Jelenleg az eutektikus mintát kiértékelő személynek szüksége van metallográfiai, anyagmérnöki, és mélyebb informatikai ismeretekre. Az itt bemutatott módszer alkalmazásával, a mérést végző személyzetnek nincs szüksége mélyebb informatikai ismeretekre. Ez szintén további előnyököt kínál az üzem számára, hiszen nem szükséges

széles speciális ismeretekkel rendelkező munkaerőt alkalmazni, valamint hiány esetén könnyebb megfelelő képzettségű személyt találni, ezáltal a kiesett idő csökkenthető.



6.46. ábra: Az automatikus számítógépi képelemzés folyamatábrája

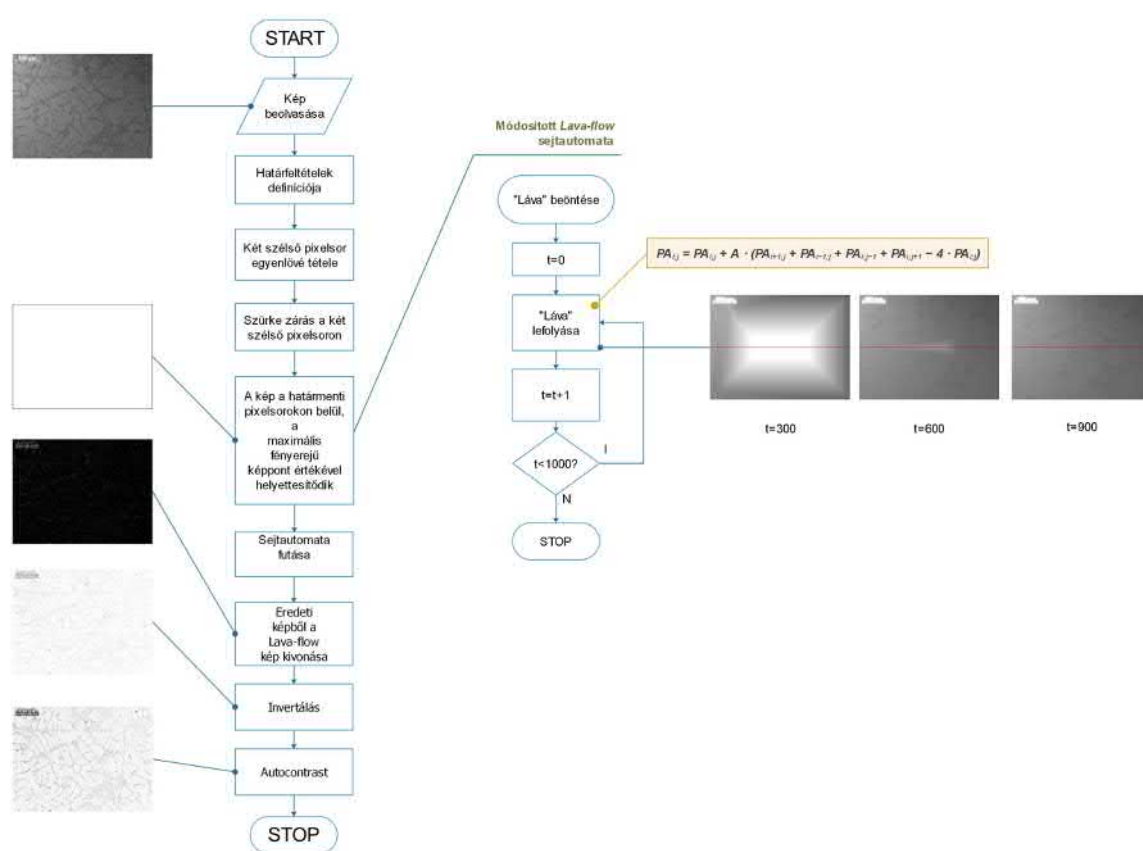
## 7. fejezet

# Új tudományos eredmények

### 1. Tézis

Eutektikus szövetszerkezetek optikai mikroszkópi felvételeinek automatikus képelemzése során, a háttér nem egyenletes megvilágítása a megvilágítási hiba mértékétől függetlenül korrigálható módosított *Lava-flow* sejt automatával.

- a) Ehhez a szürke képet, mint domborzatot kezeljük, ahol magassági koordinátákat az intenzitás értékek adják.
- b) A meginduló „láva” folyamatosan kitölti az intenzitás képen jelentkező gödröket és árkokat.
- c) Ahhoz, hogy a kép szélére kifutó árkokban és a kép szélén lévő gödrökben a „láva” képen belül maradjon, a kép szélén szükséges megemelni az intenzitás értékeket  $2\times$ -es lineáris zárással, ami egy gátat képez.
- d) Amint a kitörési pontokban megjelenő láva túlcsondulása megszűnik a gáton, visszkapjuk a megvilágítási hiba okozta háttérképet, amit az eredeti képből kivonva korrigálható a megvilágítási hiba.

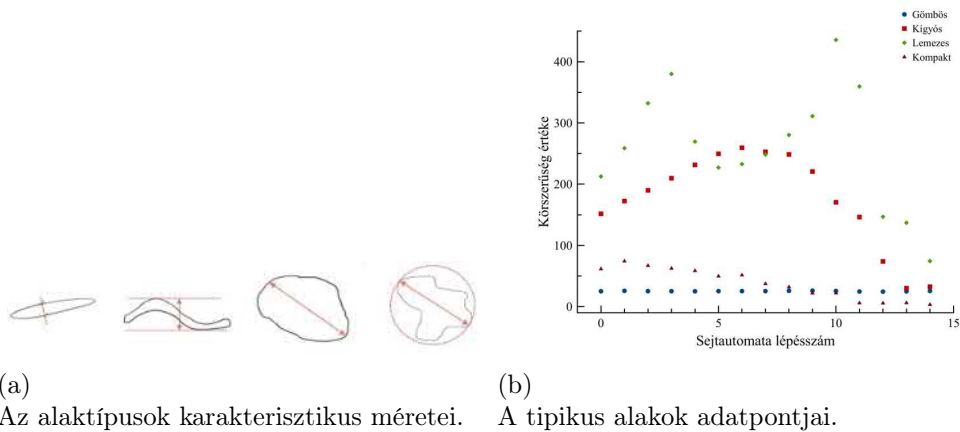


7.1. ábra: Az első tézis folyamatábrája

## 2. Tézis

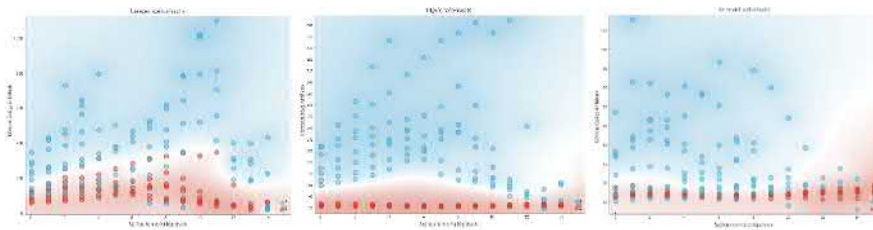
Determinisztikus erózió során, a képen lévő eutektikus fázisok alakja és mérete megváltozik. Az eróziós lépések függvényében a digitális terület és kerület alapján képzett alakjellemező változása alkalmas alak szerinti osztályozásra. Mikroszkópi felvételeken az eutektikus fázisok négy alaktípusba sorolhatók. Ezek rendre: lemezes, „kígyós”, gömbös/rudas, kompakt.

- a) A determinisztikus erózió során az egyes tipikus alakok alakjellemezője eltérően változik. Az eróziós lépések és alakjellemező adta paraméter térben egy eutektikus fázis egy pontsorként jelenik meg. Az egyes tipikus alakokhoz egy adott terület tartozik ebben a paraméter térben.



7.2. ábra: A megkülönböztetett alakok jellemzői.

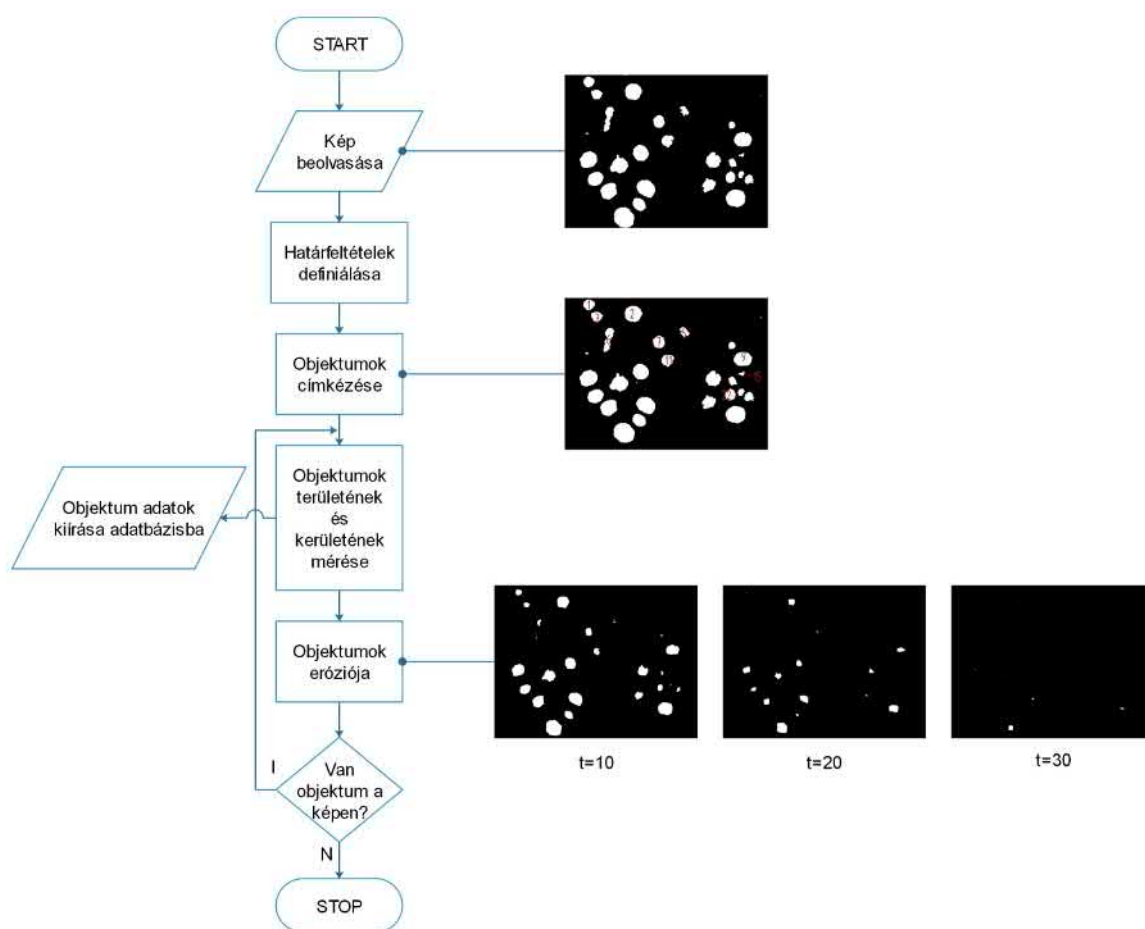
- b) Az egyes eutektikus fázisok osztályba sorolása tartóvektor géppel végezhető el hatékonyan.
- c) Egy eutektikus fázis abba a tipikus alakosztályba sorolódik, amelyik érvényességi területébe a legtöbb a fázist jellemző pont esik.



7.3. ábra: Az osztályokba sorolás lépései

- d) Az eutektikus fázis karakterisztikus lineáris méretével arányos az eltűnéséhez tartozó eróziós lépések száma.
- e) A karakterisztikus lineáris méret értelmezése az alak ismeretében tehető meg.



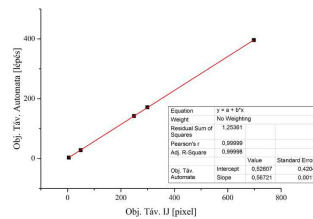


7.4. ábra: A második tézis folyamatábrája

### 3. Tézis

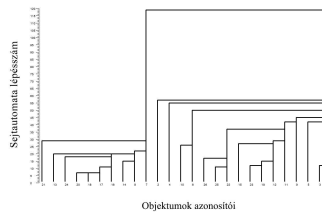
Folyamatosan végzett sztochasztikus dilatáció során az első összeérések regisztrálásával és azok elemzésével az objektumok távolsága és elrendeződése meghatározható. Sztochasztikus dilatációval biztosítható, hogy az eutektikus fázisok kontúr elemei közel azonos sebességgel mozogjanak.

- A folyamatosan végzett dilatációt addig alkalmazzuk, amíg a teljes képet el nem foglalják az objektumok.
- Eközben az első összeéréseket a dilatációs lépés függvényében regisztráljuk.
- Az első összeéréshez tartozó dilatációs lépések az eutektikus fázisok kontúrjai között mérhető legrövidebb távolsággal arányos.
- Mivel a dilatáció sztochasztikus így a skálázáshoz kalibráló függvény meghatározása szükséges.
- A kalibráló függvény csak a sztochasztikus dilatáció valószínűségi változójától függ.



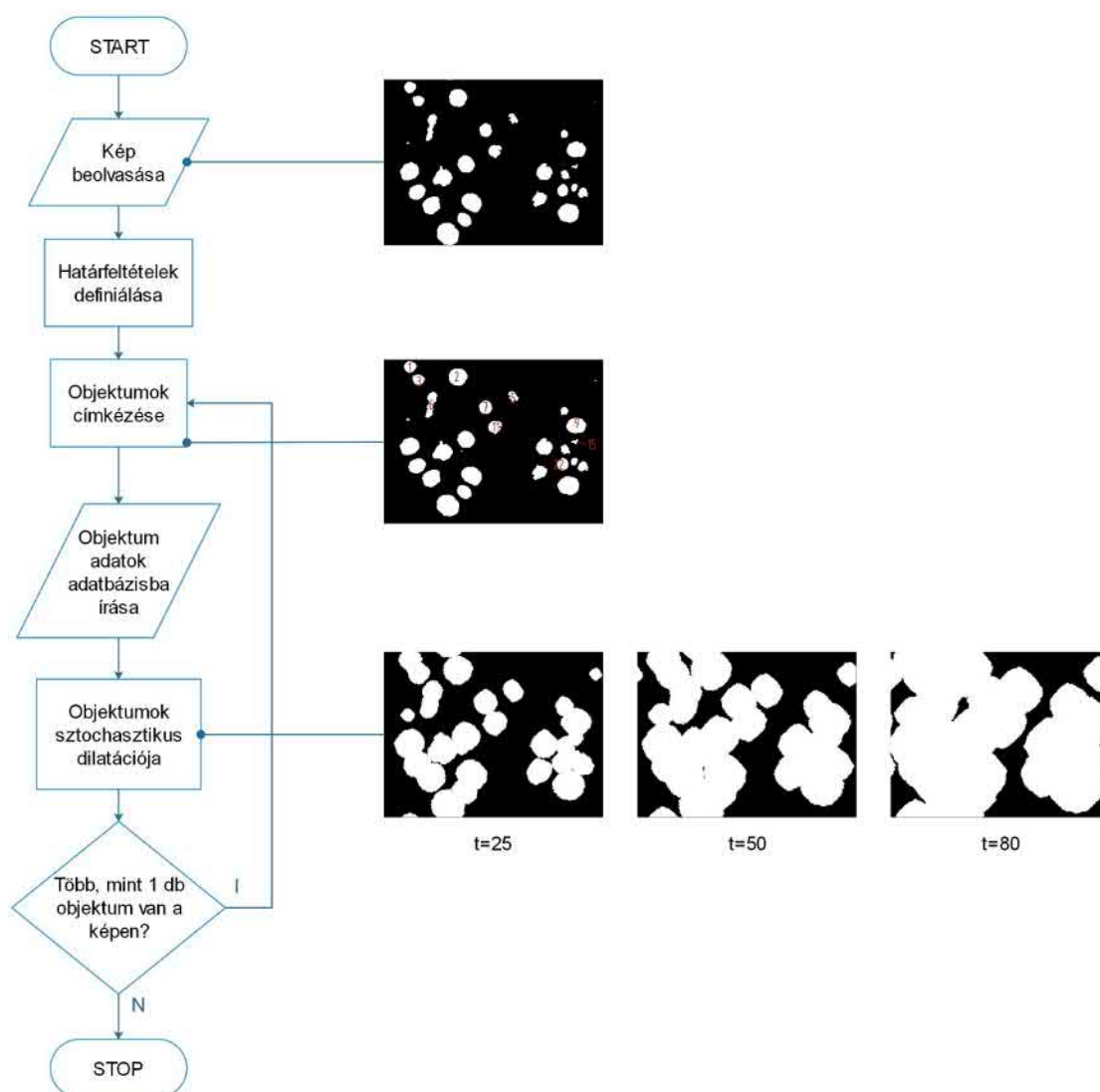
7.5. ábra: A kalibráló diagram, a valószínűségi változó értéke  $p = 0,5$  ami jól közelíti a függvény meredekségét.

- Összevonó csoportelemzésnek megfelelően az első összeérések alapján dendrogram szerkeszthető, ami alapján a csoportosulás és a csoportok elemzése elvégezhető.



7.6. ábra: Példa dendrogram

- Ha az eutektikus fázisok nem alkotnak csoportokat, akkor az eloszlásuk szabályossága az első összeérések eloszlása alapján vizsgálható.



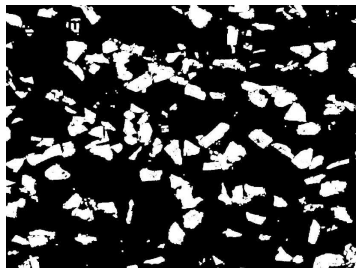
7.7. ábra: A harmadik tézis folyamatábrája

## 4. Tézis

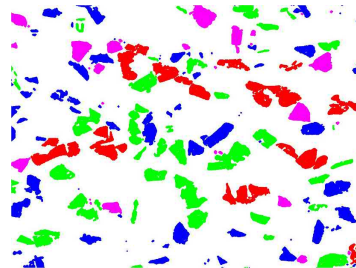
A bemutatott automatikus képelemző eljárás alkalmas nem eutektikus szövetszerkezetről készített mikroszkópi felvétel feldolgozására és értékelésére. Ehhez a következő feltételeknek kell teljesülnie:

- a) Az eljárás két fázist különböztet meg: mátrix és a mérendő fázis.
- b) A mérendő fázis és a mátrix között olyan mértékű intenzitáskülönbség kell legyen, hogy az *iter* algoritmus szegmentálni tudja a mérendő fázist. Amennyiben ez a feltétel nem teljesül más automatikus szegmentáló algoritmus választása megoldást adhat.
- c) A mérendő fázis területaránya 10% és 80% közé kell eszen. Ettől eltérő érték esetén az *iter* automatikus szegmentáló algoritmus nem ad megfelelő eredményt, más eljárást kell választani.
- d) A mérendő fázis minimális lineáris mérete 10 képponttól nem lehet kevesebb. Apró fázisok esetén az alakelemzés nem ad értékelhető eredményt.

Amennyiben a felsorolt feltételek teljesülnek, mind az elemzés és értékelés folyamata és eredményeinek értékelése ugyanúgy történik, mint az eutektikumokról készült mikroszkópi felvételek elemzése esetén.



(a)  
A szegmentált kép.



(b)  
Az objektumok alak szerint  
színezve.



(c)  
A csoportok a huszadik lépésben.

7.8. ábra: Az *Al-SiC<sub>20</sub>* kompozit 100-szoros nagyítású képei.

# Összefoglalás

Napjaink informatikai, képalkotási és gyártástechnológiája mellett adott a lehetőség, hogy az öntödei anyagvizsgáló laboratóriumokban nagyon nagyszámú mintáról készüljön mikroszkópi felvétel. A klasszikus számítógépi képelemzési módszerek több tudományterületről igényelnek szaktudást, és nem teljesen automatizáltak. A mérést és/vagy kiértékelést végző személyeknek szüksége van metallográfiai, anyagmérnöki és mélyebb informatikai ismeretekre. A manuális mérési feladatoknál fennáll az emberi mérési hiba lehetősége is. A különböző morfológiájú eutektikus szerkezetekre eddig csak morfológia specifikus mérési algoritmusok léteztek. Doktori értekezésemben megoldást kerestem a képelemzés folyamatának automatizálására, az emberi beavatkozás szükségességének minimálisra csökkentésére, egy uniform eljárás kidolgozására minden eutektikus szövetszerkezethez. Az első feladat a képek alkalmassá tétele az automatikus számítógépi képelemzésre. A második feladat az eutektikus szerkezet morfológiájának meghatározása. A harmadik feladat az egyedi objektumok terület és kerület mérése, valamint a szomszédos objektumok közötti távolság mérése, és az objektumok elrendeződésének jellemzése.

A klasszikus számítógépi képelemzésben is előfordulnak olyan képátalakító műveletek, amelyek sejtautomatán alapszanak. A bináris és a szürke kép is alkalmas sejtautomata univerzumbként történő használatra. Gyakran előforduló hiba az optikai mikroszkóp képalkotási folyamatában a háttérvilágítás egyenetlensége. Ez egy ún. *Lava-flow* algoritmuson alapuló sejtautomatával korrigálható, úgy hogy nincs szükség másik kép használatára. Determinisztikus eróziós sejtautomata segítségével lehetséges olyan adathalmazt előállítani, amelyet aztán idősor elemzés használatával megállapítható a képen lévő objektumok alakja. Sztochasztikus dilatációs sejtautomata segítségével olyan adathalmaz nyerhető ki a képből, amelyet felhasználva hierarchikus csoportelemzés végezhető el. Ebből az objektumok elrendeződése megállapítható. A sejtautomata adataiból a szomszédos objektumok közötti távolság is kinyerhető.

Ezek az algoritmusok mind optikai, mint pásztázó-elektronmikroszkóppal készült felvételeken használhatóak. A módszer alkalmazhatóságához szükséges minimális objektumméret olyan, hogy az objektum csak öt eróziós lépés után tűnik el a képről. Ettől kisebb objektumok esetén csak nagy bizonytalansággal állapítható meg az alakja. Ez a korlát a klasszikus képelemző eljárásokra is igaz, a kép pixeles jellege miatt. A módszereket *SEM* felvételes lemezes szerkezetű *Al-Cu*, gömbös szerkezetű *Al-Ni* képeken validáltam. Optikai mikroszkópi képeket használtam gömbös, kompakt, „kígyós”, lemezes szerkezetű öntöttvasakhoz valamint finomított és nem finomított szerkezetű *Al-Si* eutektikumokhoz. Mindegyik szerkezeten megtörtént az alakfelismerő algoritmus alkalmazása, és a manuális terület és a kerület ellenőrzése. Az alakfelismerés eredményének ellenőrzése szemrevételezéssel történt. A sztochasztikus dilatációra épülő sejtautomata

algoritmus segítségével a szomszédos objektumok közötti távolság mérésre került. Az adatokat felhasználva hierarchikus csoportelemzést végeztem.

Az itt bemutatott módszerek segítségével a képelemzést végző személyzetnek kevesebb informatikai szaktudásra van szüksége, az emberi beavatkozás minimálisra csökkenthető. Ezáltal a képelemzés folyamata felgyorsul, nagyszámú minta válik elemezhetővé a mérési pontosság növekedésével. Továbbá az automatizáltság lehetővé teszi, hogy a képelemző rendszer beilleszthető legyen az *ipar 4.0* technológiák közé. Mindez együttesen lehetővé teheti az adott üzemnek a költségtakarékos, hatékony és magas minőségű termelést.

# Summary

In addition to today's IT, imaging and manufacturing technology, it has been possible to take microscopic images of a very large number of samples in foundry material testing laboratories. Classical computer image analysis methods require expertise in several disciplines and are not fully automated. Persons performing measurement and / or evaluation need metallographic, materials engineering and in-depth IT skills. There is also the possibility of a human measurement error for manual measurement tasks. So far, only morphology-specific measurement algorithms have existed for eutectic structures with different morphologies. In my thesis I was looking for a solution to automate the process of image analysis, to minimize the need for human intervention, to develop a uniform procedure for every eutectic structure. The first task is to make the images suitable for automatic computer image analysis. The second task is to determine the morphology of the eutectic structure. The third task is to measure the area and perimeter of individual objects, as well as to measure the distance between adjacent objects, and to characterize the arrangement of the objects.

There are also image transformation operations based on cellular automation in classical computer image analysis. Both binary and grey images are suitable for use as a cellular automata universe. A common error in the imaging process of an optical microscope is the unevenness of the backlight. It can be corrected with a *Lava-flow* algorithm-based cellular automaton so that there is no need to use another image. With the help of a deterministic erosion cellular automaton, it is possible to generate a data set, which can then be used to determine the shape of the objects in the image using time series analysis. With the help of a stochastic dilatation cellular automaton, a data set can be extracted from the image, which can be used for hierarchical cluster analysis. From this, the arrangement of the objects can be determined. The distance between adjacent objects can also be extracted from the data of the cellular automaton. These algorithms can be used in both optical and scanning electron microscopy images. The minimum object size required for the method to be applicable is such that the object disappears from the image only after five erosion steps. In the case of smaller objects, its shape can only be determined with great uncertainty. This limitation is also true for classical image analysis methods due to the pixel nature of the image. The methods were validated on *SEM* images, lamellar *Al-Cu*, spherical *Al-Ni* images. Optical microscopic images were used for spherical, compact, "snake-like", lamellar cast irons and refined and unrefined *Al-Si* eutectics. The shape recognition algorithm was applied to each structure and the manual area and perimeter were checked. The result of the shape recognition was checked visually. Using a cellular automation algorithm based on stochastic dilatation, the distance between adjacent objects was measured. Using the data, a hierarchical cluster analysis was carried out. With the help of the

---

methods presented here, the personnel performing image analysis need less IT expertise, and human intervention can be minimized. This speeds up the image analysis process, making it possible to analyse a large number of samples as the measurement accuracy increases. Furthermore, automation allows the image analysis system to be integrated into *industry 4.0* technologies. Taken together, this can enable a plant to produce cost-effectively, efficiently and with high quality.



# Irodalomjegyzék

- [1] Roy Elliott (1988) "Cast Iron Technology" Butterworths
- [2] Roy Elliott (1983) "Eutectic Solidification Processing" Butterworths
- [3] Javier LLorca, Victor M. Orera (2006) "Directionally solidified eutectic ceramic oxides" Progress in Materials Science 51: 711-809
- [4] Stephen H. Davis (2001) "Theory of Solidification" Cambridge University Press
- [5] Doru Michael Stefanescu (2002) "Science and Engineering of Casting Solidification" Springer Science+Business
- [6] Anil Kumar Sinha (2003) "Physical Metallurgy Handbook" McGraw-Hill
- [7] David E. Laughlin, Kazuhiro Hono (2014) "Physical Metallurgy Vol. I" Elsevier
- [8] David E. Laughlin, Kazuhiro Hono (2014) "Physical Metallurgy Vol. II" Elsevier
- [9] David E. Laughlin, Kazuhiro Hono (2014) "Physical Metallurgy Vol. III" Elsevier
- [10] Dmitry G. Eskin (2008) "Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys" CRC Press
- [11] Verő József, Káldor Mihály (1977) "Fémtan" Nemzeti Tankönyvkiadó
- [12] Madeleine Durand-Charre (2003) "Microstructure of Steel and Cast Irons" Springer
- [13] Joseph R. Davis (2001) "Metals Handbook" ASM International
- [14] Hugh Baker (1992) "ASM Handbook Vol. 3: Alloy Phase Diagrams" ASM International
- [15] George F. Vander Voort (2004) "ASM Handbook Vol. 9: Metallography and Microstructures" ASM International
- [16] Ruth E. Whan (1998) "ASM Handbook Vol. 10: Materials Characterization" ASM International
- [17] Douru Michael Stefanescu (1998) "ASM Handbook Vol. 15: Casting" ASM International

- [18] [http://www.georgevandervoort.com/images/Metallography-Specific/AlSi\\_Phase\\_Diagram\\_a.pdf](http://www.georgevandervoort.com/images/Metallography-Specific/AlSi_Phase_Diagram_a.pdf)
- [19] George E. Totten, D. Scott MacKenzie (2003) "Handbook of Aluminum: vol. 1: Physical Metallurgy and Processes" Marcel Dekker, Inc.
- [20] George E. Totten, D. Scott MacKenzie (2003) "Handbook of Aluminum: vol. 2: Alloy Production and Materials Manufacturing" Marcel Dekker, Inc.
- [21] Gácsi Zoltán (2001) "Sztereológia és Képelemzés" Well-Press
- [22] Frank Y. Shih (2009) "Image Processing and Mathematical Morphology" CRC Press
- [23] John C. Russ, Robert T. Dehoff (2000) "Practical Stereology" Springer Science+Business
- [24] Laurent Najman, Hughes Talbot (2010) "Mathematical Morphology" Wiley
- [25] C.V. Howard, M.G. Reed, (2005) "Unbiased Stereology" Garland Science
- [26] Herbert Gross (2007) "Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems." Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA
- [27] Landini G. (2006-2020) Background illumination correction. Available at: <https://blog.bham.ac.uk/intellimic/background-illumination-correction>
- [28]
- [29] Joel L. Schiff (2008) "Cellular Automata" Wiley
- [30] Bastien Chopard, Michel Droz (1998) "Cellular Automata Modeling of Physical Systems" Cambridge University Press
- [31] Kendall Preston Jr., Michael J.B. Duff (1984) "Modern Cellular Automata" Springer Science+Business
- [32] Stephen Wolfram (2002) "A New Kind of Science" Wolfram Media
- [33] Barkóczy Péter, Gyöngyösi Szilvia (2012) "Sejtautomata Anyagtudományi Alkalmazásai" Miskolci Egyetem
- [34] Arto Salomaa (1985) "Computation and Automata" Cambridge University Press
- [35] William Aspray (1990) "John von Neumann and The Origins of Modern Computing" MIT Press
- [36] Dieter A. Wolf-Gladrow (2000) "Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models" Springer
- [37] Andrew Ilachinski (2001) "Cellular Automata: A Discrete Universe" World Scientific

- [38] Tino Gramß, Stefan Bornholdt, Michael Groß, Melanie Mitchell, Thomas Pellizzari (2000) "Non-Standard Computation" Wiley
- [39] Lemont B. Kier, Paul G. Seybold, Chao-Kun Cheng (2005) "Modeling Chemical Systems using Cellular Automata" Springer
- [40] Richard J. Gaylord, Kazume Nishidate (1996) "Modeling Nature" Springer Science+Business
- [41] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle (1998) "Image Processing, Analysis, and Machine Vision" Brooks/cole Publishing
- [42] Dwayne Phillips (1994) "Image Processing in C" R&D Publications
- [43] William K. Pratt (2007) "Digital Image Processing" Wiley
- [44] John C. Russ (1998) "The Image Processing Handbook" CRC Press
- [45] Rastislav Lukac, Konstantinos N. Plataniotis (2007) "Color Image Processing" CRC Press
- [46] Paul Borke (1995) "Colour Spaces" <http://paulbourke.net/changes.html/colourspace>
- [47] Kovács Ernő (2010) "Elektronika II. Előadás Jegyzet" Miskolci Egyetem
- [48] <http://www.mathworks.com/help/releases/R2013b/images/color7.gif>
- [49] <http://jun.hansung.ac.kr/DI/IMAGES/ch02/color-hsi.jpg>
- [50] Gácsi Zoltán (2003) "Az anyagok szövetszerkezetének morfológiai anizotrópiája és rendezettsége Doktori Értekezés" Miskolci Egyetem
- [51] G.M. Crisci, Di. Gregorio, O. Pindaro & G.A. Ranieri (1986) "Lava Flow Simulation Bv A Discrete Cellular Model:First Implementation"International Journal of Modelling and Simulation, 6:4, 137-140
- [52] D. Barca , G. M. Crisci , S. Di Gregorio F. Nicoletta (1994) "Cellular automata for simulating lava flows: A method and examples of the Etneaneruptions", Transport Theory and Statistical Physics, 23:1-3, 195-232
- [53] Giuseppe Bilotta, Annalisa Cappello, Alexis Héroult, Annamaria Vicari, Giovanni Russo, Ciro Del Negro (2012) "Sensitivity analysis of the MAGFLOW Cellular Automaton model for lava flow simulation" Environmental Modelling Software 35, 122-131
- [54] Bernsen J. (1986) "Dynamic Thresholding of Grey-Level Images" Proc. of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition, pp. 1251-1255
- [55] Sezgin M. and Sankur B. (2004) "Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation" Journal of Electronic Imaging, 13(1): 146-165

- [56] Huang L.-K. and Wang M.-J.J. (1995) "Image Thresholding by Minimizing the Measures of Fuzziness" *Pattern Recognition*, 28(1): 41-51
- [57] Ridler T.W. and Calvard S. (1978) "Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method" *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics* SMC-8(8): 630-632
- [58] Trussell H.J. (1979) "Comments on Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method" *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-9(5): 311.
- [59] Kapur J.N., Sahoo P.K., and Wong A.K.C. (1985) "A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram" *Graphical Models and Image Processing*, 29(3): 273-285
- [60] Tsai W.H. (1985) "Moment-Preserving Thresholding: A New Approach" *Graphical Models and Image Processing*, 29(3): 377-393
- [61] Niblack W. (1986) "An introduction to Digital Image Processing" Prentice-Hall
- [62] Otsu N. (1979) "A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms" *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 9(1): 62-66
- [63] Sahoo P.K., Wilkins C., and Yeager J. (1997) "Threshold Selection Using Renyi's Entropy" *Pattern Recognition*, 30(1): 71-84
- [64] Sauvola J. and Pietaksinen M. (2000) "Adaptive Document Image Binarization" *Pattern Recognition*, 33(2): 225-236
- [65] Savakis A.E. (1998) "Adaptive Document Image Thresholding Using Foreground and Background Clustering" *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Image Processing*, 3: 785-789
- [66] Duc D.A., Du T.L.H., and Duan T.D. (2004) "Optimizing Speed for Adaptive Local Thresholding Algorithm Using Dynamic Programming" *2004 Int. Conf. on Electronics, Information, and Communications* 1: 438-441
- [67] Shanbag A.G. (1994) "Utilization of Information Measure as a Means of Image Thresholding" *Graphical Models and Image Processing*, 56(5): 414-419
- [68] Yen J.C., Chang F.J., and Chang S. (1995) "A New Criterion for Automatic Multilevel Thresholding" *IEEE Trans. on Image Processing*, 4(3): 370-378
- [69] Li, CH Lee, CK (1993), "Minimum Cross Entropy Thresholding", *Pattern Recognition* 26(4): 617-625
- [70] Li, CH Tam, PKS (1998), "An Iterative Algorithm for Minimum Cross Entropy Thresholding", *Pattern Recognition Letters* 18(8): 771-776
- [71] Anil K. Jain, Richard C. Dubes (1988) "Algorithms for Clustering Data" Prentice-Hall
- [72] Vojislav Kecman (2001) "Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models" MIT Press

- [73] Rui Xu, Donald C. Wunsch, II (2009) "Clustering" Wiley, IEEE Press
- [74] Michael R. Berthold, Christian Borgelt, Frank Höppner, Frank Klawonn (2010) "Guide to Intelligent Data Analysis: How to Intelligently Make Sense of Real Data" Springer
- [75] Shiego Abe (2005) "Support Vector Machines for Pattern Classification" Springer
- [76] Johan A. K. Suykens, Marco Signoretto, Andreas Argyriou (2015) "Regularization, Optimization, Kernels, and Support Vector Machines" CRC Press
- [77] Ingo Steinwart, Andreas Christmann (2008) "Support Vector Machines" Springer
- [78] Bodon Ferenc, (2010) "Adatbányászati algoritmusok"  
<http://www.cs.bme.hu/bodon/magyar/adatbanyaszat/tanulmany/adatbanyaszat.pdf>
- [79] Andrea Ahlemeyer-Stubble, Shirley Coleman (2014) "A Practical Guide to Data Mining for Business and Industry" Wiley
- [80] David L. Olson, Dursun Delen (2008) "Advanced Data Mining Techniques" Springer
- [81] Gérard Govaert, Mohammed Nadif (2014) "Co-Clustering: Models, Algorithms and Applications" ISTE, Wiley
- [82] Lutz Hamel (2009) "Knowledge Discovery with Support Vector Machines" Wiley
- [83] Nello Cristianini, John Shawe-Taylor (2000) "An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods" Cambridge University Press
- [84] Yunqian Ma, Goudong Guo (2014) "Support Vector Machines Applications" Springer
- [85] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, Vipin Kumar (2011) "Bevezetés az adatbányászathoz" Panem
- [86] Z. R. Y. F. Xi Li (2006) "Effect of a high axial magnetic field on the microstructure in a directionally solidified  $Al-Al_2Cu$  eutectic alloy" *Acta Materialia*: 5349-5360
- [87] Z. Z. Y. W. Z. C. Bing Liu (2004) "The solidification of  $Al-Cu$  binary eutectic alloy with electric fields" *Journal of Crystal Growth*: 294-301
- [88] Gergely Gréta (2008) "A stroncium és az olvadékáramlás hatása a  $Si$  morfológiájára,  $Al7Si03Mg$  ötvözet esetén, Doktori Értekezés" Miskolci Egyetem
- [89] Kardos Ibolya (2009) "Digitális képfeldolgozás és színes metallográfia, Doktori Értekezés" Miskolci Egyetem
- [90] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metallurgical\\_microscope](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metallurgical_microscope)
- [91] Bárczy Pál, Fuchs Erik (1981) "Metallográfia I.: Röntgenes finomszerkezetvizsgálatok" Tankönyvkiadó Budapest

- [92] S. Amelinckx, D. van Dyck, J. van Landuyt, G. van Tendeloo (1997) "Handbook of Microscopy: Vol. 1. Methods I" VCH
- [93] S. Amelinckx, D. van Dyck, J. van Landuyt, G. van Tendeloo (1997) "Handbook of Microscopy: Vol. 2. Methods II" VCH
- [94] Mónika Tokár, György Fegyverneki, Valéria Mertinger (2014) "Analysis of the antimony and strontium cross-effects in Al-Si foundry alloys" Materials Science Forum Vol. 790-791, pp 464-469
- [95] Bernd Jähne, Horst Haußecker (2000) "Computer Vision and Applications" Academic Press
- [96] [https://imagejdocu.tudor.lu/faq/technical/what\\_are\\_the\\_algorithms\\_used\\_to\\_calculate\\_particle\\_area\\_and\\_perimeter](https://imagejdocu.tudor.lu/faq/technical/what_are_the_algorithms_used_to_calculate_particle_area_and_perimeter)
- [97] P. Anghelescu, S. Ionita and E. Sofron, (2008) "FPGA Implementation of Hybrid Additive Programmable Cellular Automata Encryption Algorithm" Eighth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, Barcelona, pp. 96-101.
- [98] V. Mertinger, P. Bárczy (2000) "The Effect of Gravitation Forced Convection on Structure of Al-Ni Eutectic" Materials Science Forum Vols 329-330, pp 309-316
- [99] Chunjiang Wang, Qiang Wang, Zhongying Wang, Hutian Li, Keiji Nakajima, Jicheng He (2008) "Phase alignment and crystal orientation of Al<sup>3</sup>Ni in Al-Ni alloy by imposition of a uniform high magnetic field" Journal of Crystal Growth 310 1256-1263
- [100] M. Zimmermann, M. Carrard, W. Kurz (1989) "RAPID SOLIDIFICATION OF Al-Cu EUTECTIC ALLOY BY LASER REMELTING" Acta metall. Vol. 37, No. 12, pp. 3305-3313
- [101] AN Geying and LIU Lixin (1986) "DENDRITE SPACING IN UNIDIRECTIONALLY SOLIDIFIED Al-Cu ALLOY" Journal of Crystal Growth 80 pp. 383-392

**Az értekezés témakörében megjelent publikációk:**

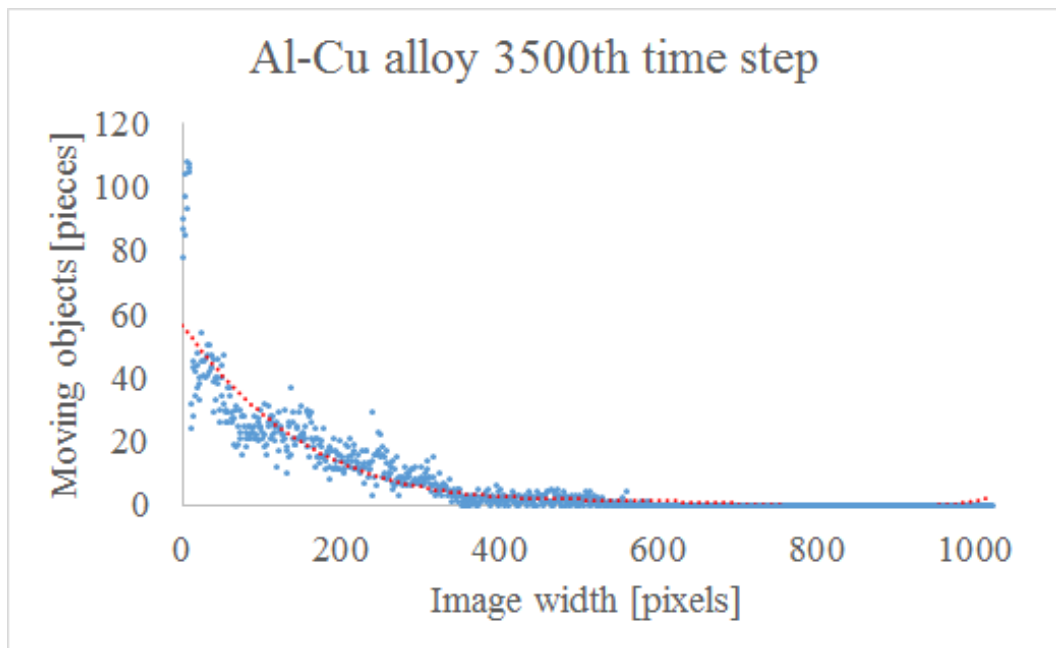
- [102] Kornél Bortnyik, Dr. Péter Barkóczy (2016) "Identification of Eutectic Microstructure by HPP Cellular Automata" Materials Science Forum Vol. 885, pp 228-233
- [103] Kornél Bortnyik, Dr. Péter Barkóczy (2017) "Examination Of Clustering In Eutectic Microstructure" Arch. Metall. Mater. 62, 2B, 1155-1159
- [104] Kornél Bortnyik, Dr. Péter Barkóczy, Emese Ivanics, (2016) "Cluster Analysis Of Compound Phases In 3003 Al Alloy" The 48th International October Conference on Mining and Metallurgy

- [105] Bortnyik Kornél, Léránth Gábor, Dr. Barkóczy Péter (2015) "NYOMÁSOSAN ÖNTÖTT ALUMÍNIUM ALKATRÉSZEK DENDRITES SZERKEZETÉNEK JELLEMZÉSE AUTOMATIKUS KÉPELEMZÉSSEL" X. Országos Anyagtudományi Konferencia
- [106] Bortnyik Kornél, Dudás Dóra Daniella (2015) "Irányítottan kristályosított és Mágnesesen kevert  $Al-Al_3Ni$  eutektikus ötvözet mikroszerkezetének jellemzése számítógépi képelemzéssel" Tavaszi Szél Konferencia 2015

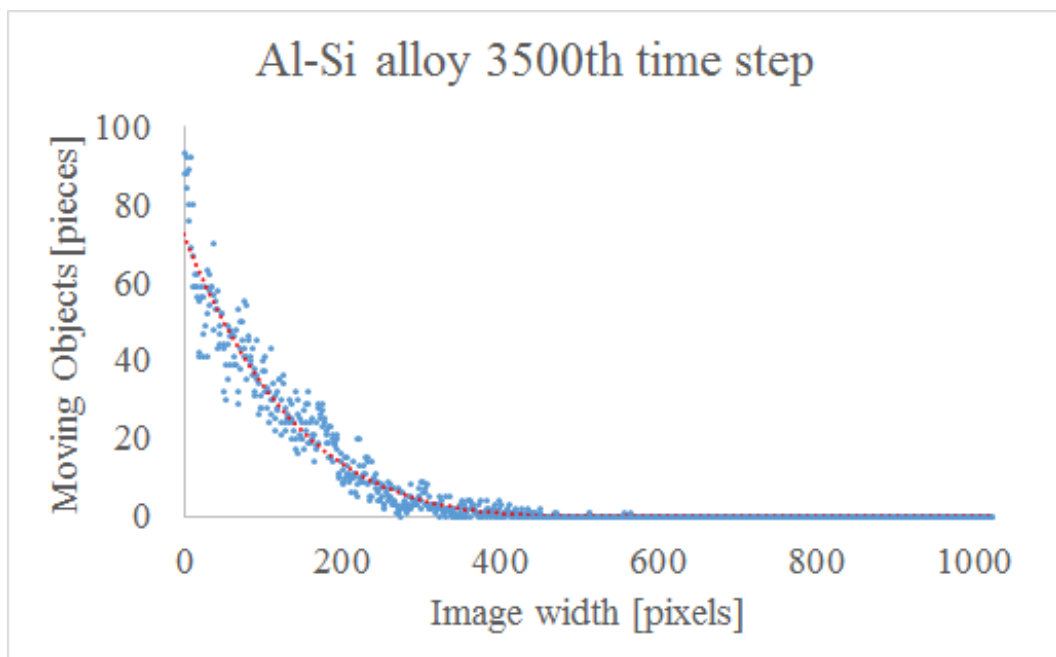




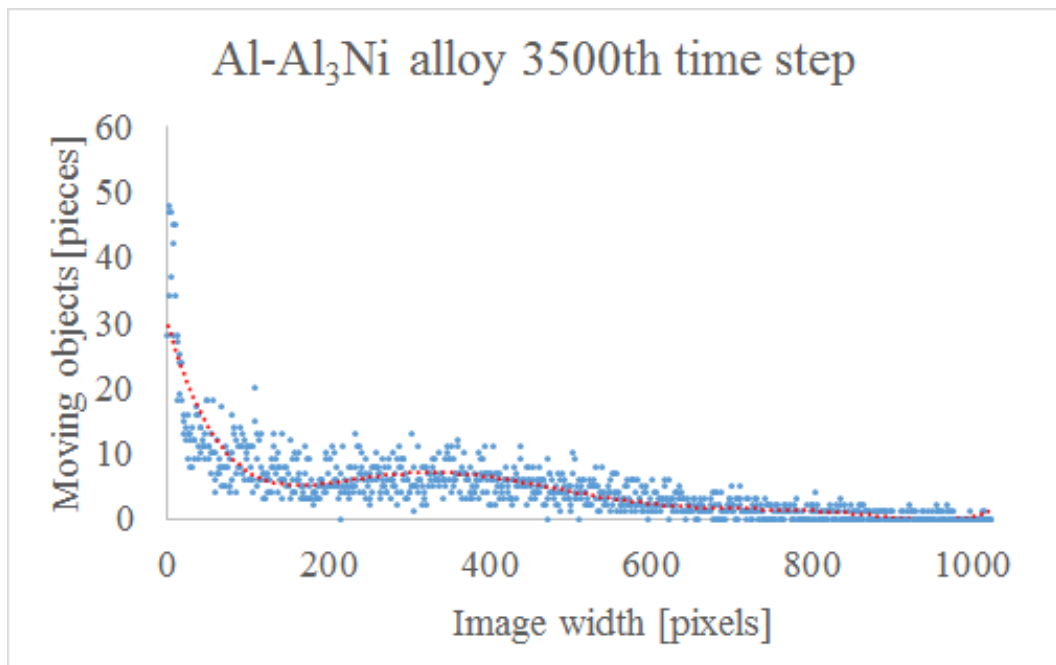
# Melléklet



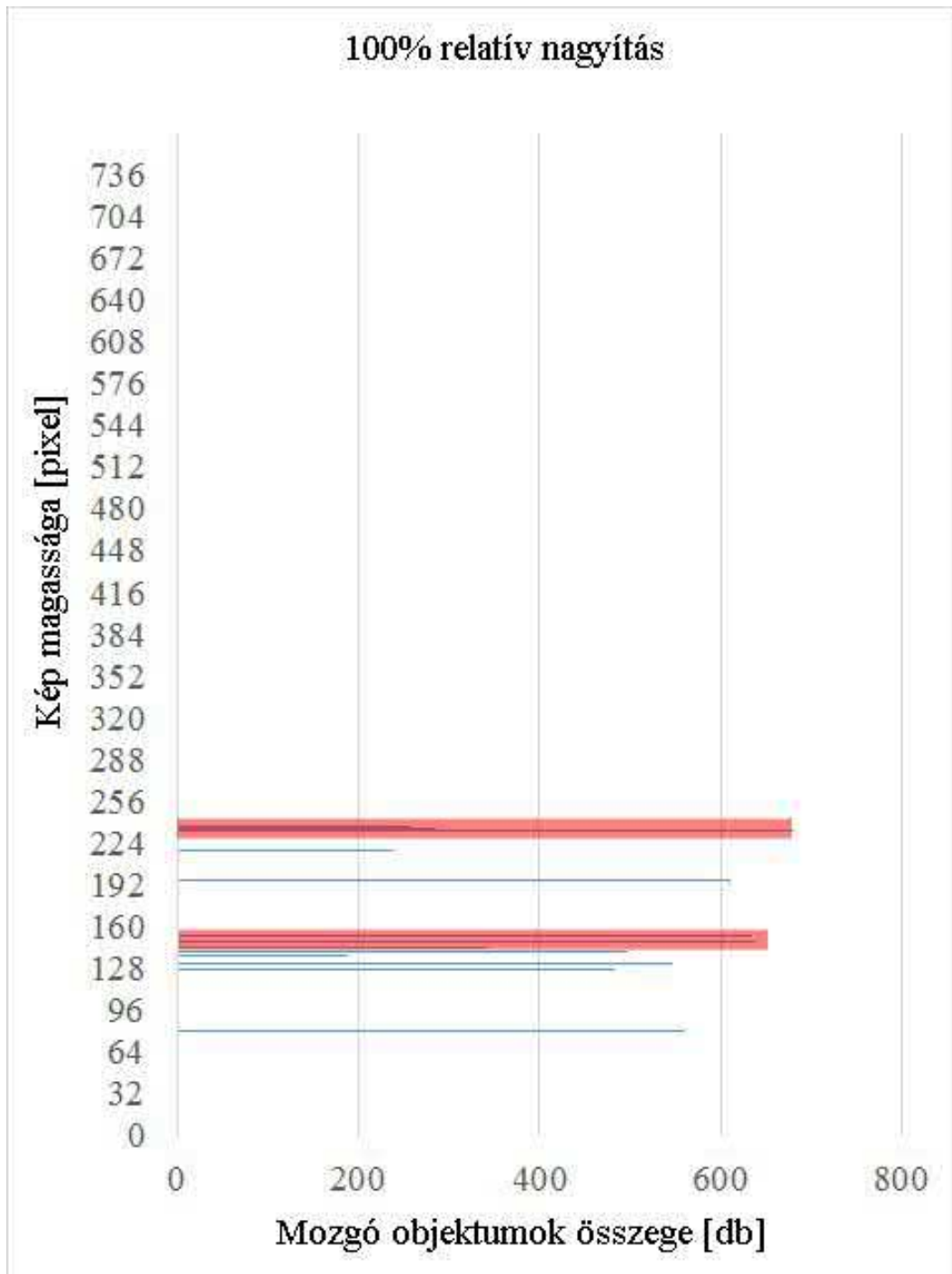
7.9. ábra: A mozgó objektumok eloszlása a 3500. lépésben.



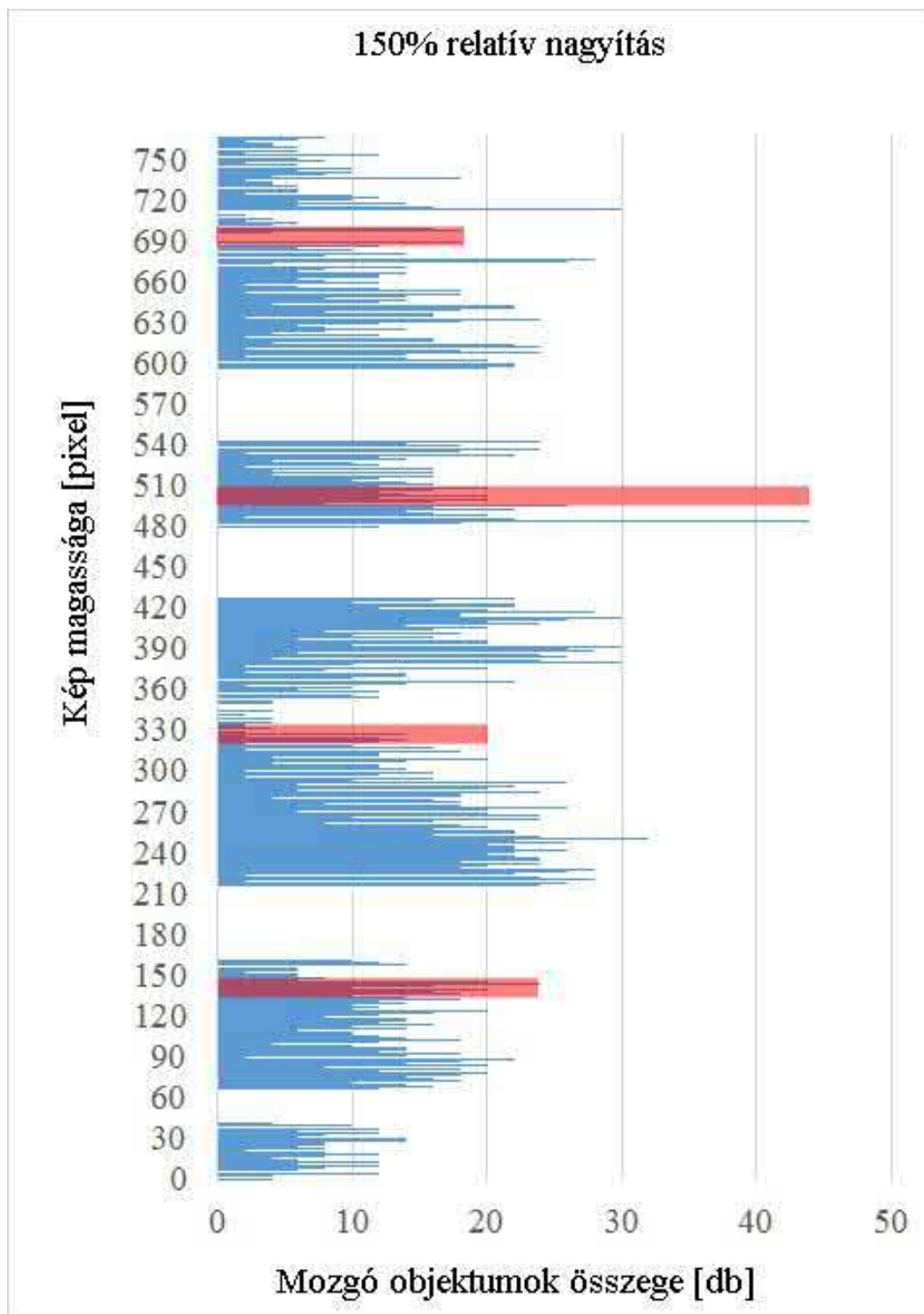
7.10. ábra: A mozgó objektumok eloszlása a 3500. lépésben.



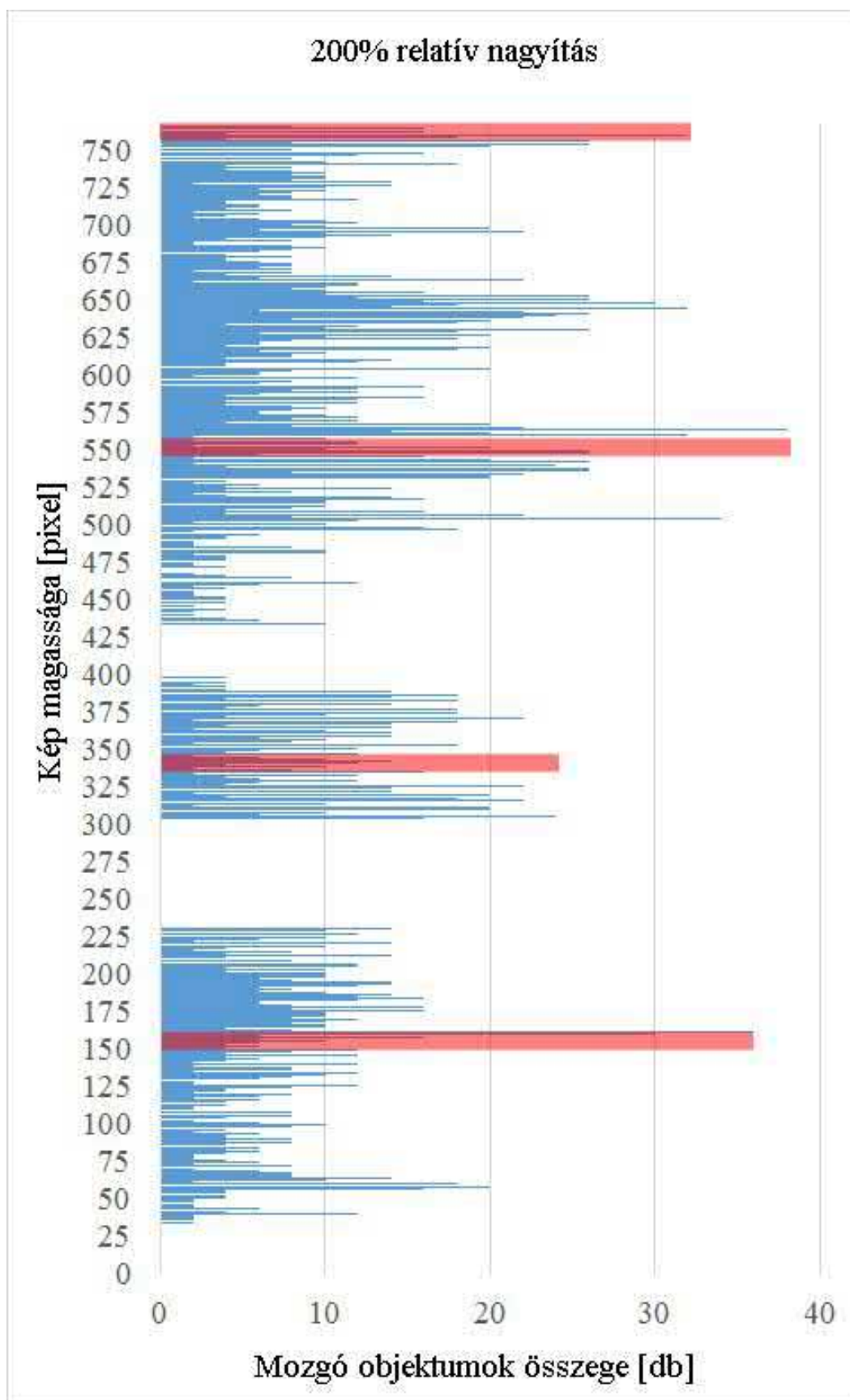
7.11. ábra: A mozgó objektumok eloszlása a 3500. lépésben.



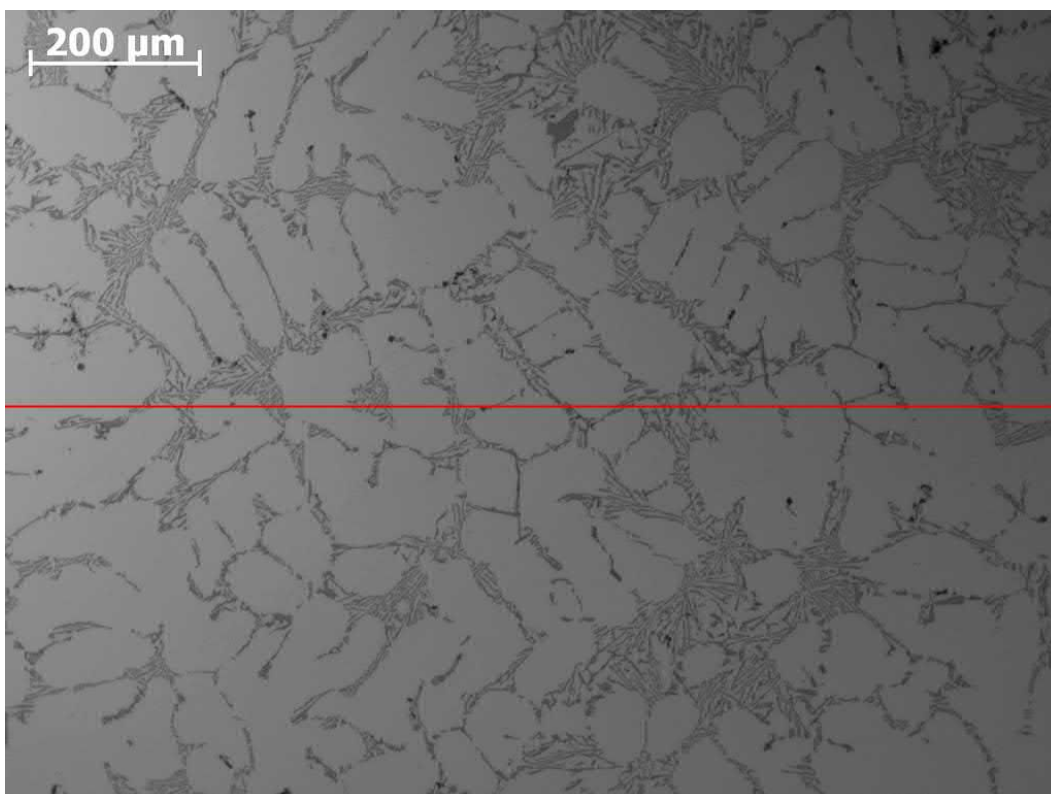
7.12. ábra: A kép utolsó oszlopában megjelent mozgó objektumok számának összege.



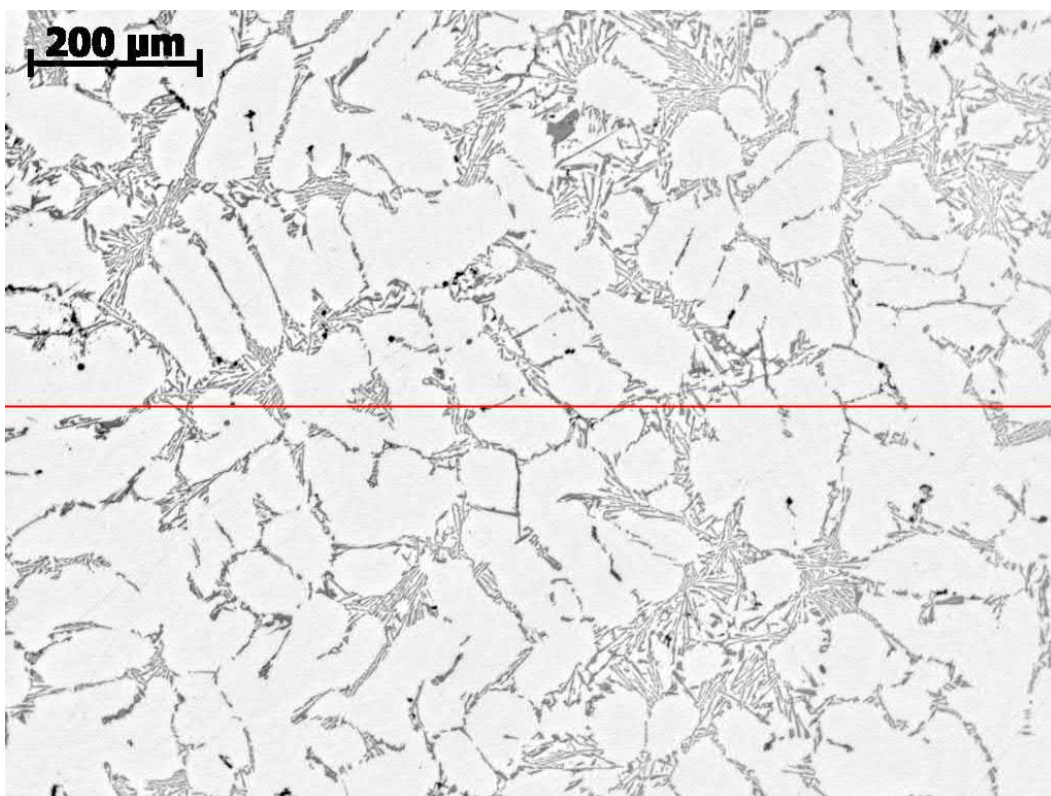
7.13. ábra: A kép utolsó oszlopában megjelent mozgó objektumok számának összege.



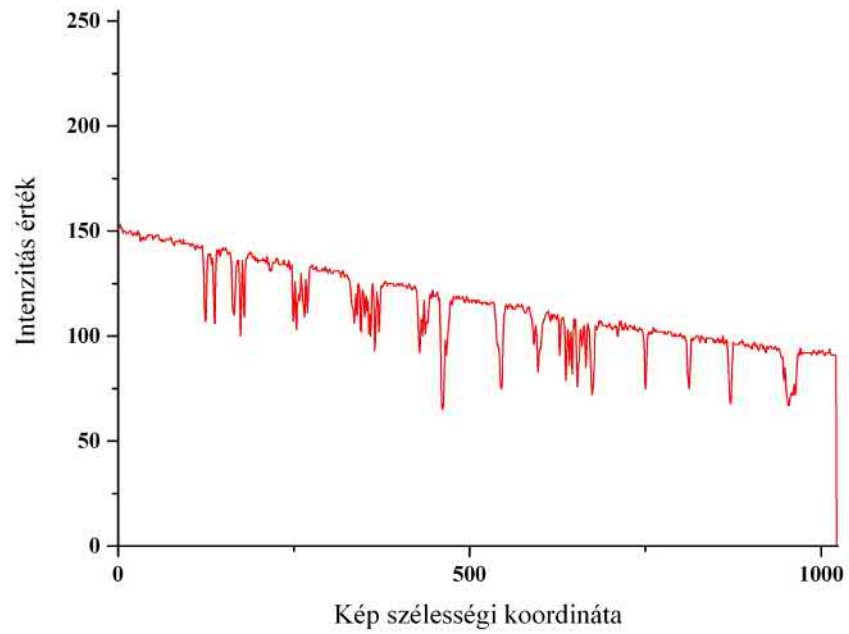
7.14. ábra: A kép utolsó oszlopában megjelent mozgó objektumok számának összege.



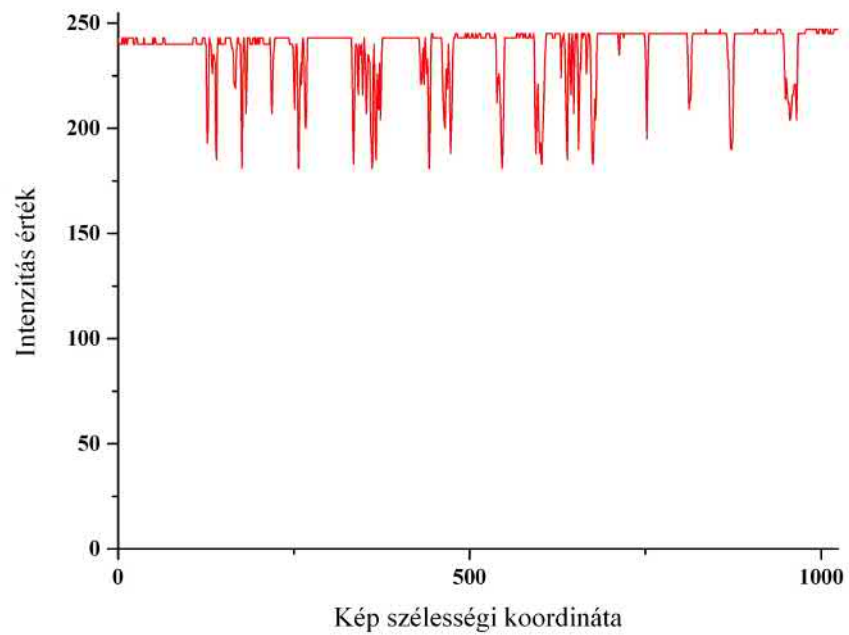
7.15. ábra: Egyenlőtlen háttérvilágítás okozta hiba.



7.16. ábra: Egyenlőtlen háttérvilágítás okozta hiba korrekciója után.

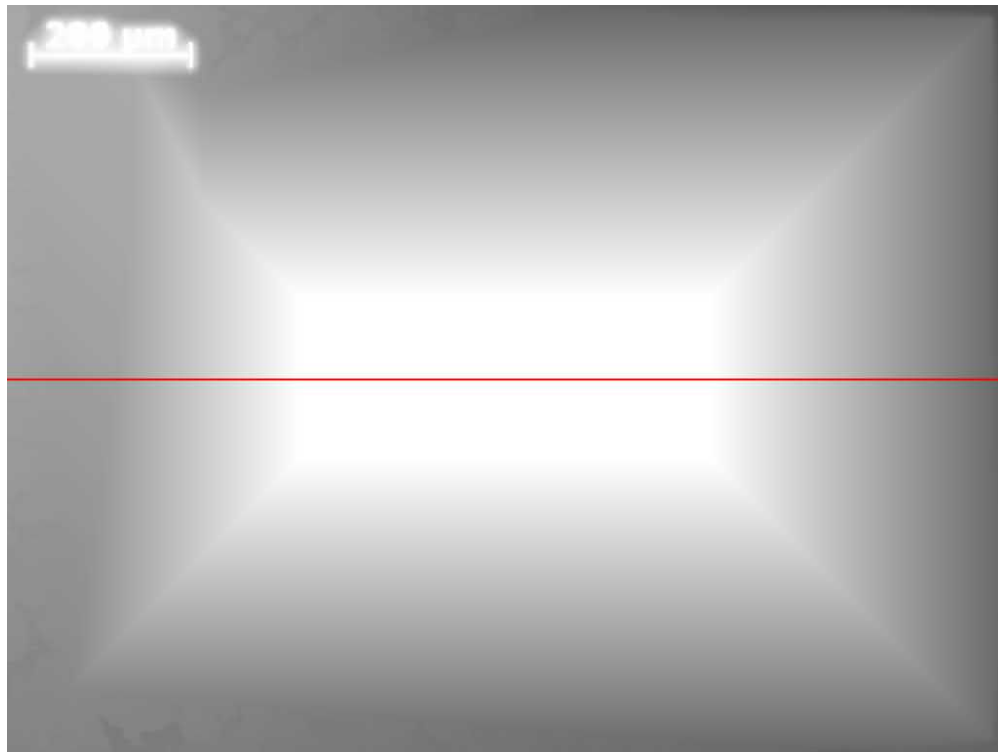


7.17. ábra: A hibás képen a metszetben jelölt intenzitás-eloszlás az oszlopok mentén.

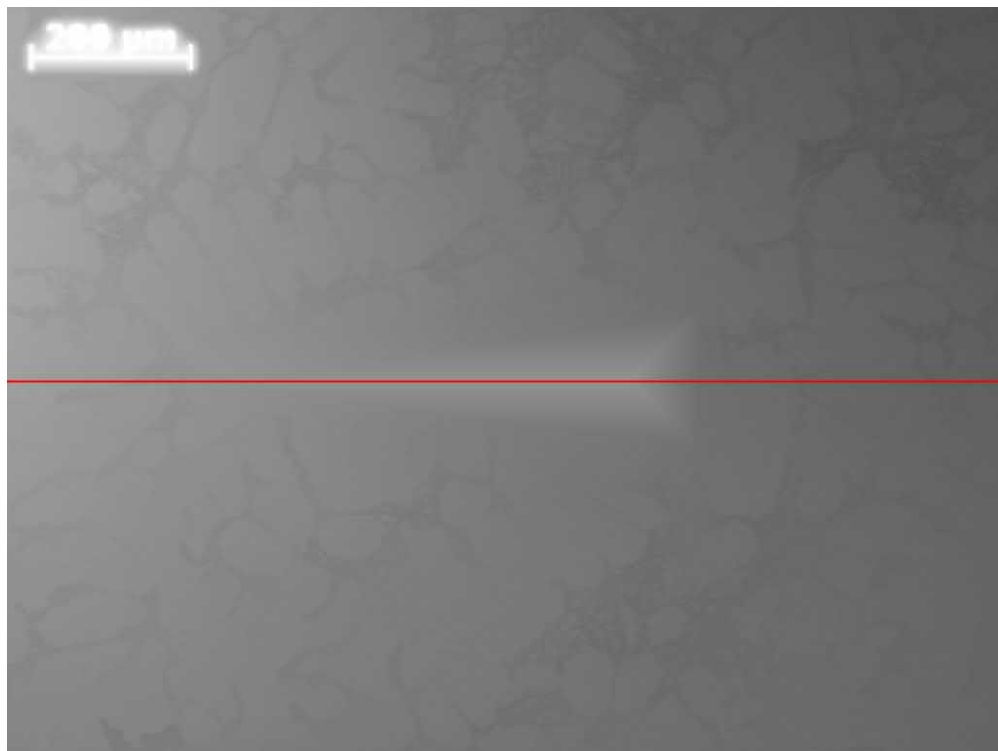


7.18. ábra: A javított képen a metszetben jelölt intenzitás-eloszlás az oszlopok mentén.

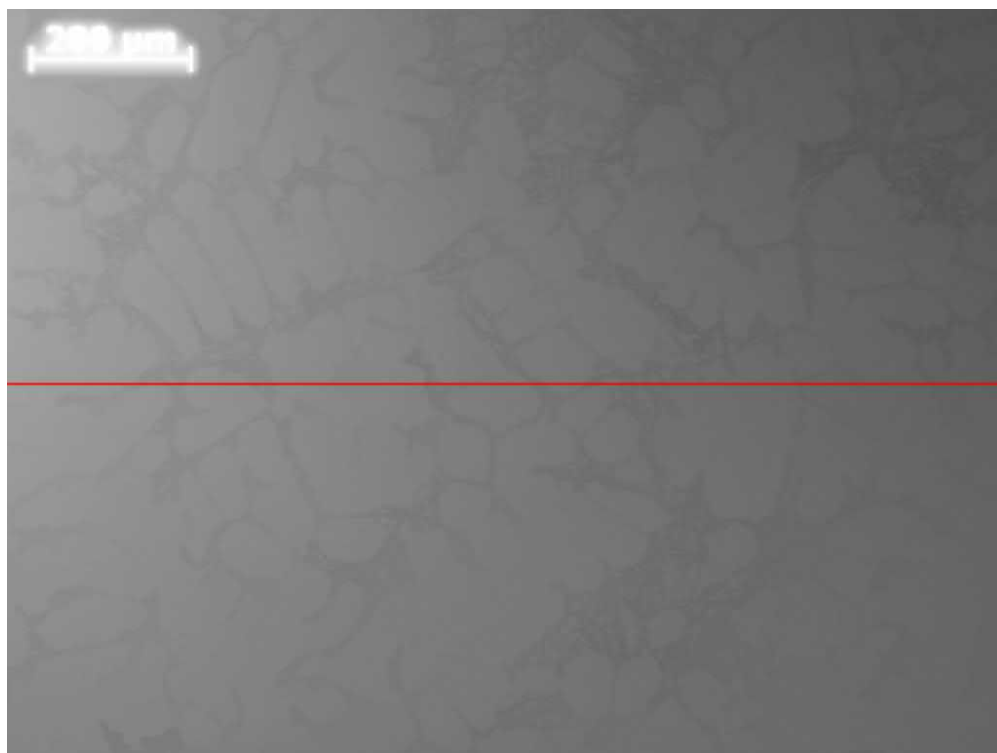




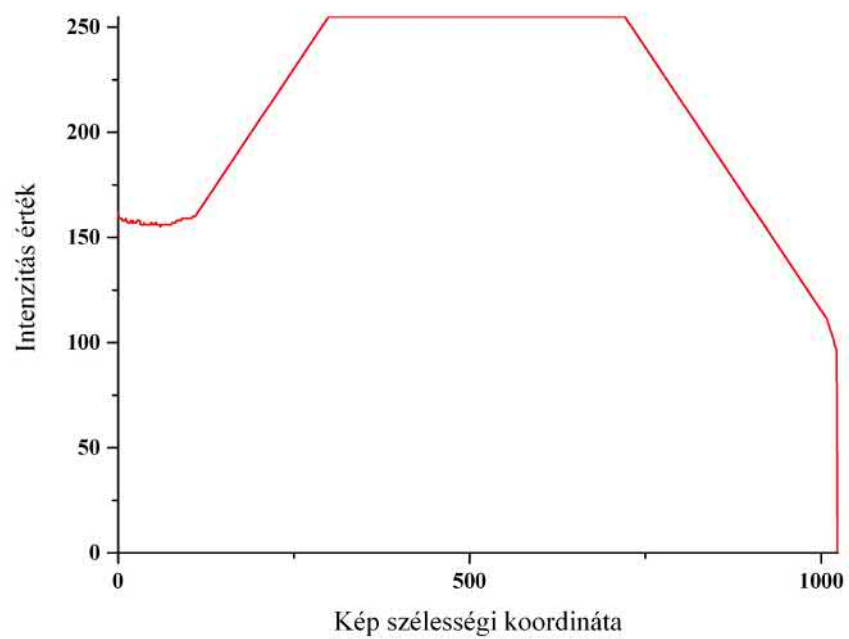
7.19. ábra: A módosított *Lava-flow* sejtautomata futásának folyamata 300 lépés után.



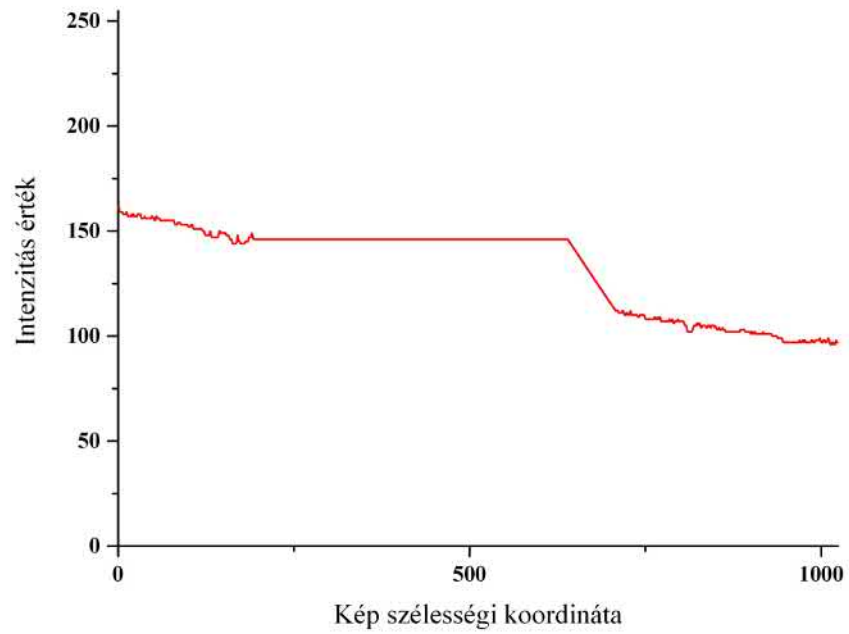
7.20. ábra: A módosított *Lava-flow* sejtautomata futásának folyamata 600 lépés után.



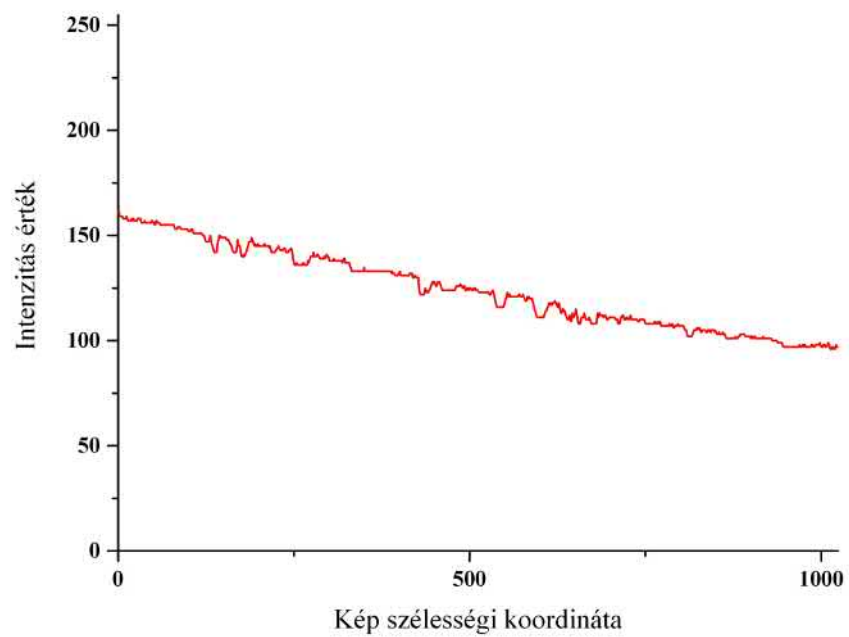
7.21. ábra: A módosított *Lava-flow* sejtautomata futásának folyamata 900 lépés után.



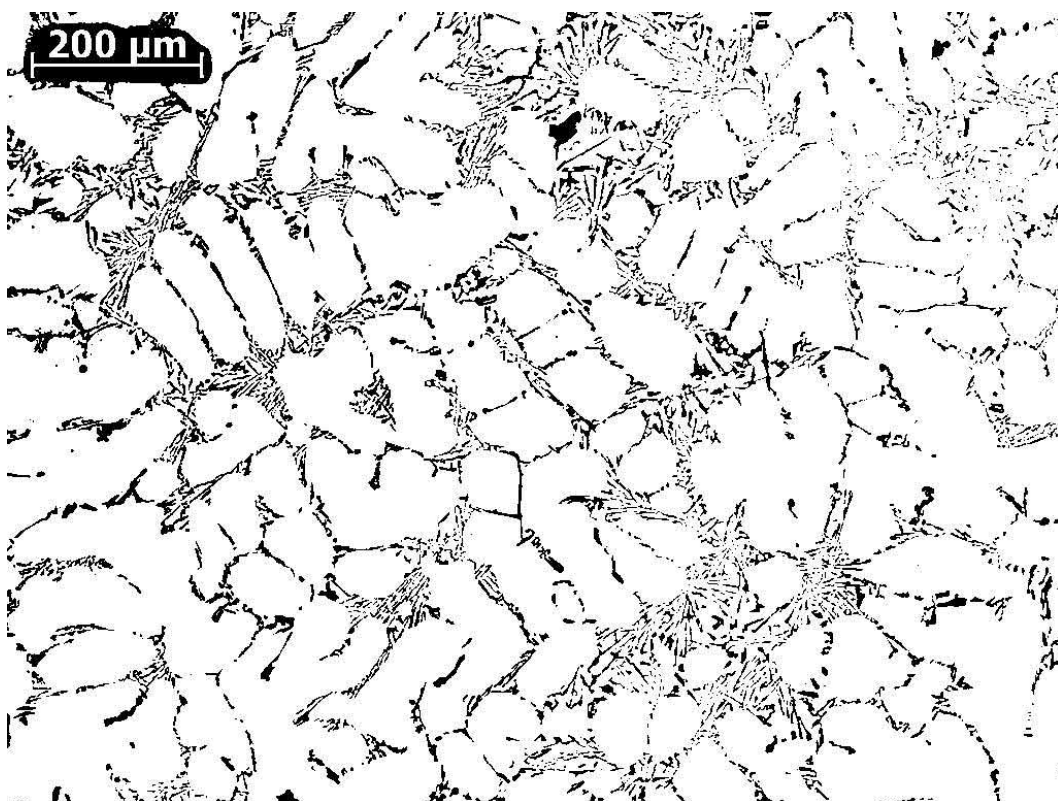
7.22. ábra: A 7.19. ábra képei jelölt metszetében az intenzitás értékek 300 lépés után.



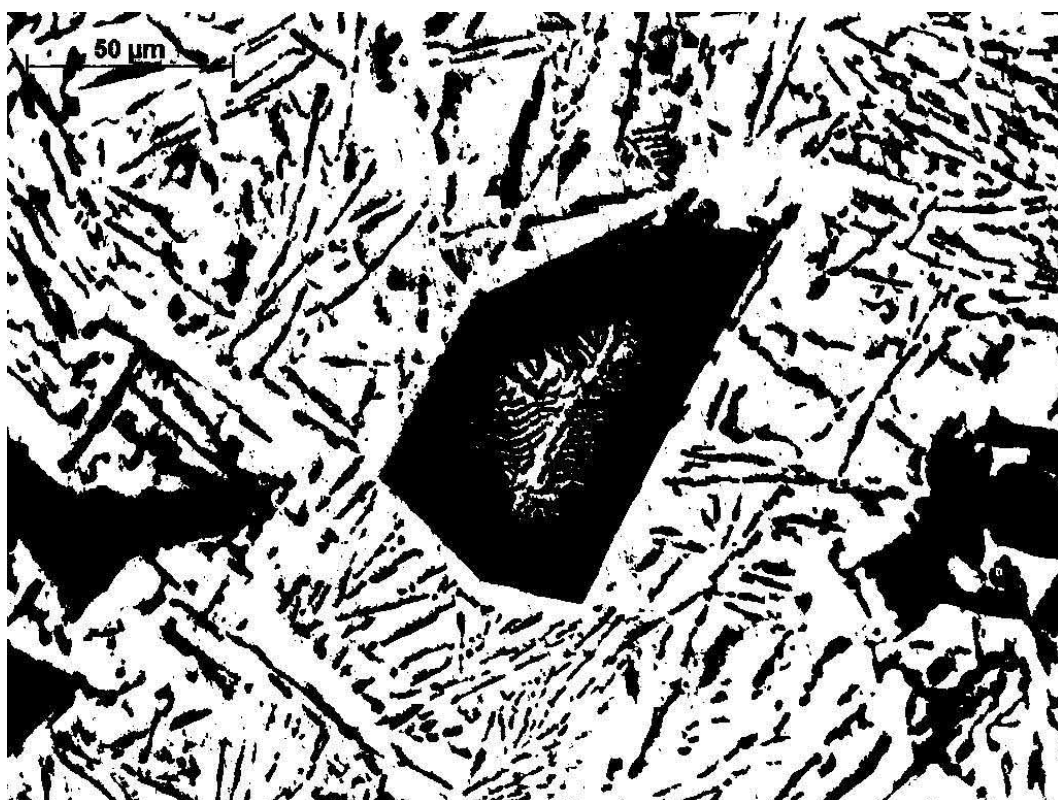
7.23. ábra: A 7.20. ábra képei jelölt metszetében az intenzitás értékek 600 lépés után.



7.24. ábra: A 7.21. ábra képei jelölt metszetében az intenzitás értékek 900 lépés után.



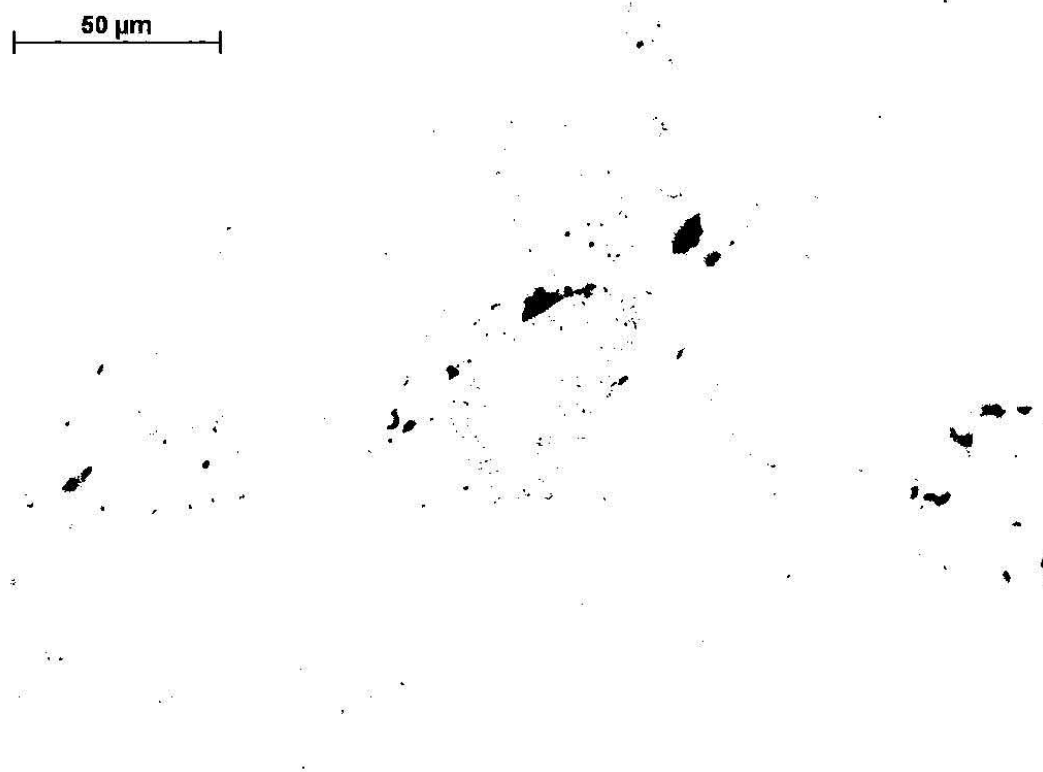
7.26. ábra: Korrigált kép szegmentálva.



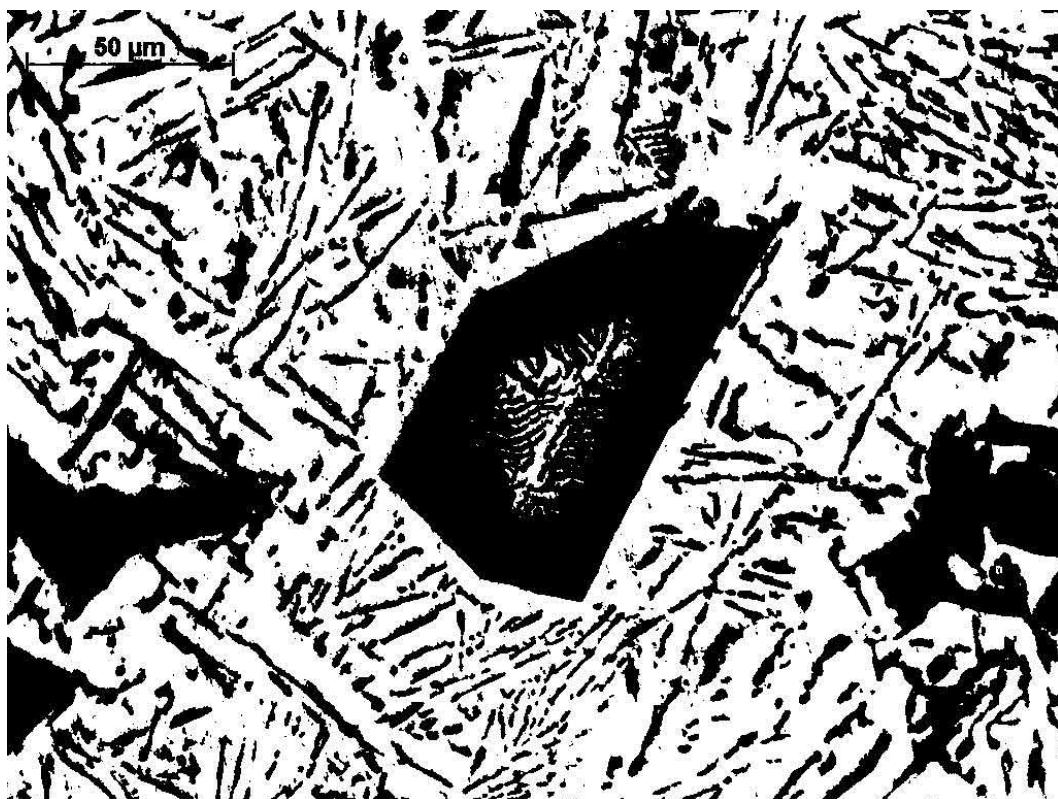
7.27. ábra: A *Huang* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.



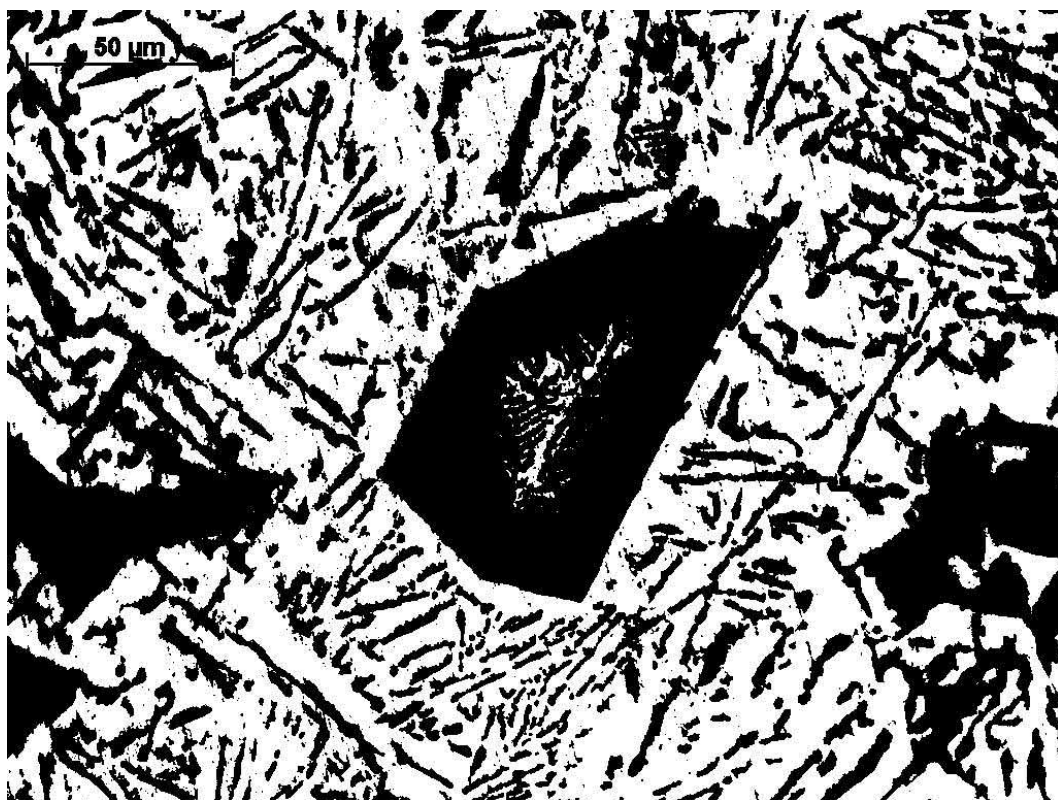
7.28. ábra: Az *iter* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.



7.29. ábra: A *Kapur* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.



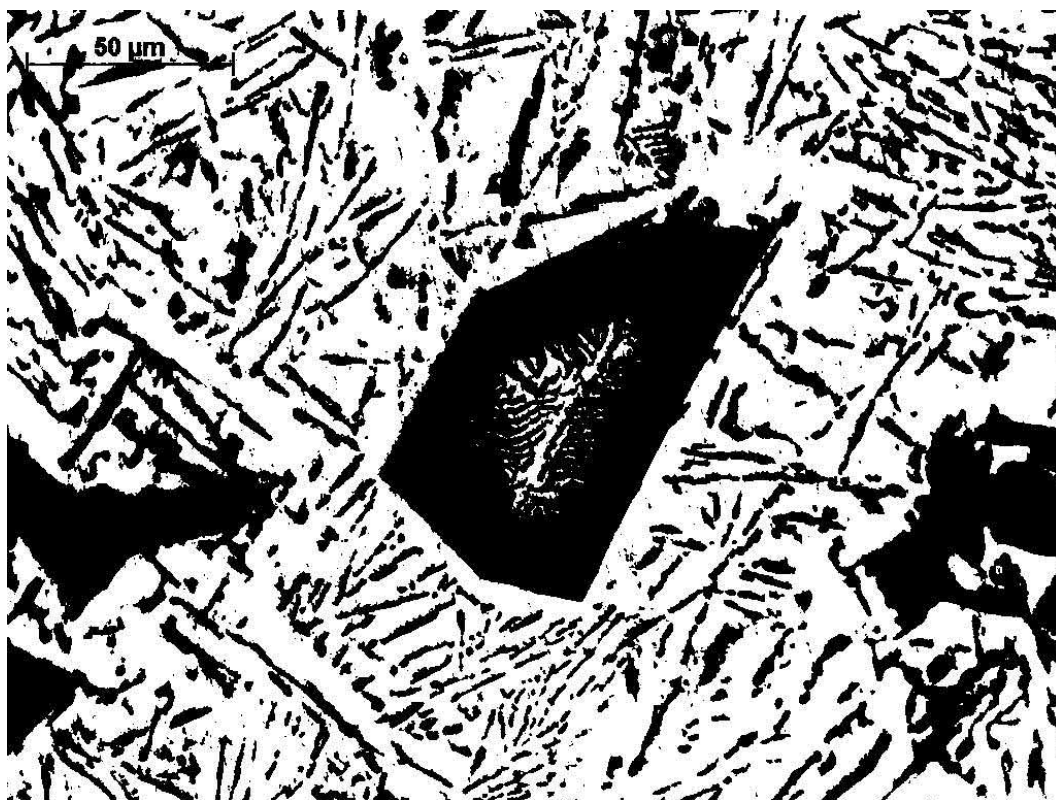
7.30. ábra: A *Li* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.



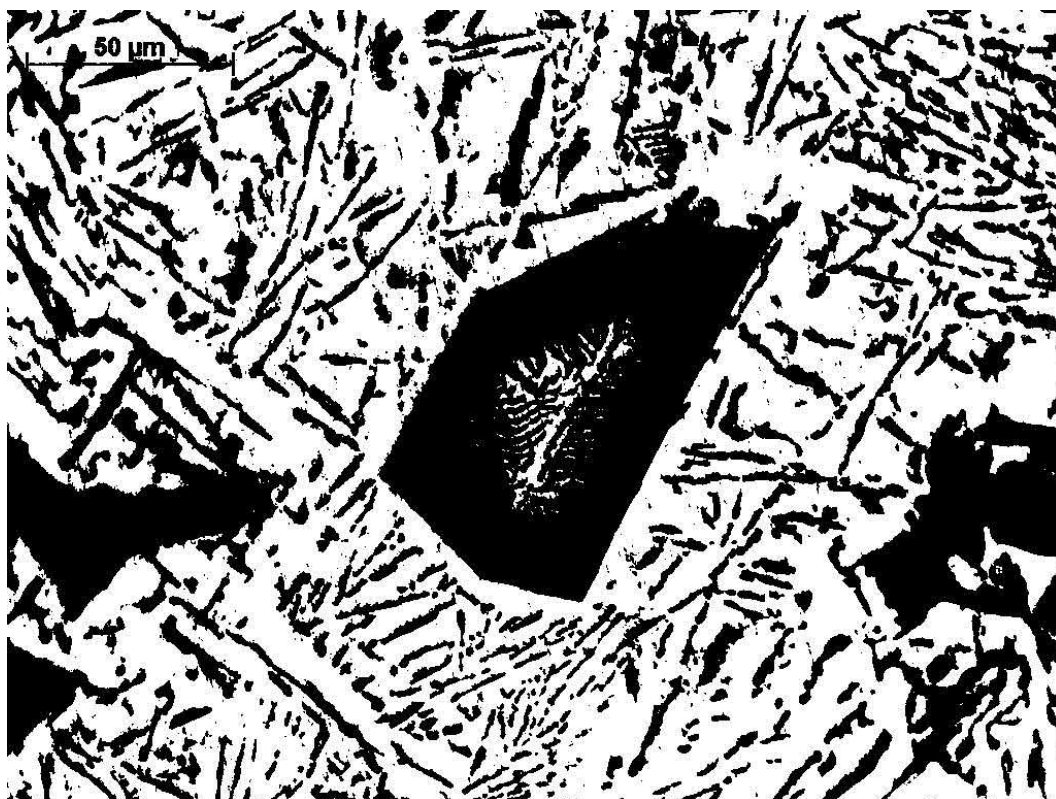
7.31. ábra: A *moment* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.



7.32. ábra: Az *Otsu* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.



7.33. ábra: A *Renyi* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.

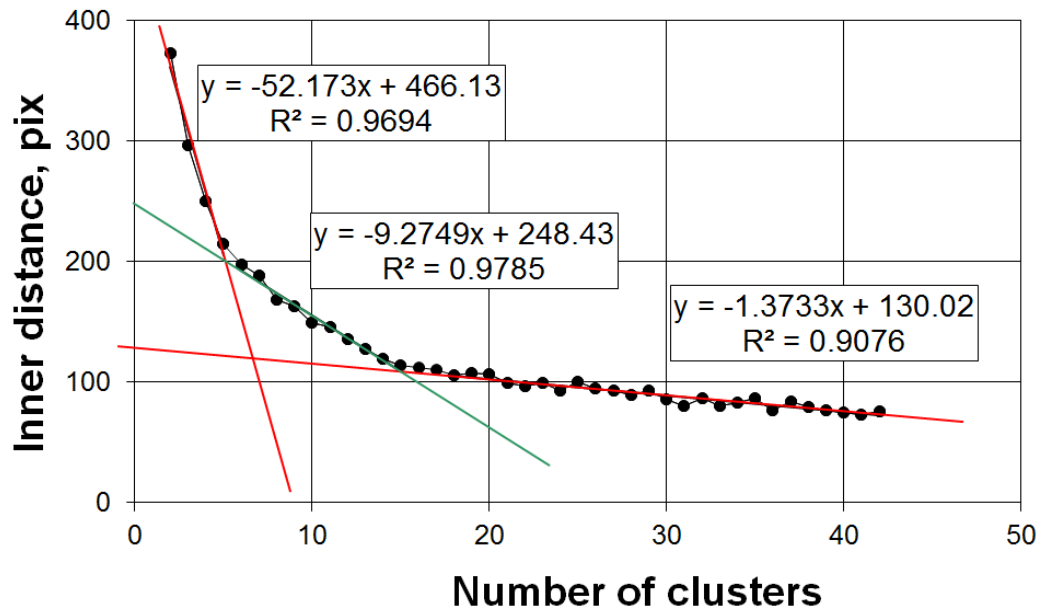


7.34. ábra: A *Shanbhag* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.

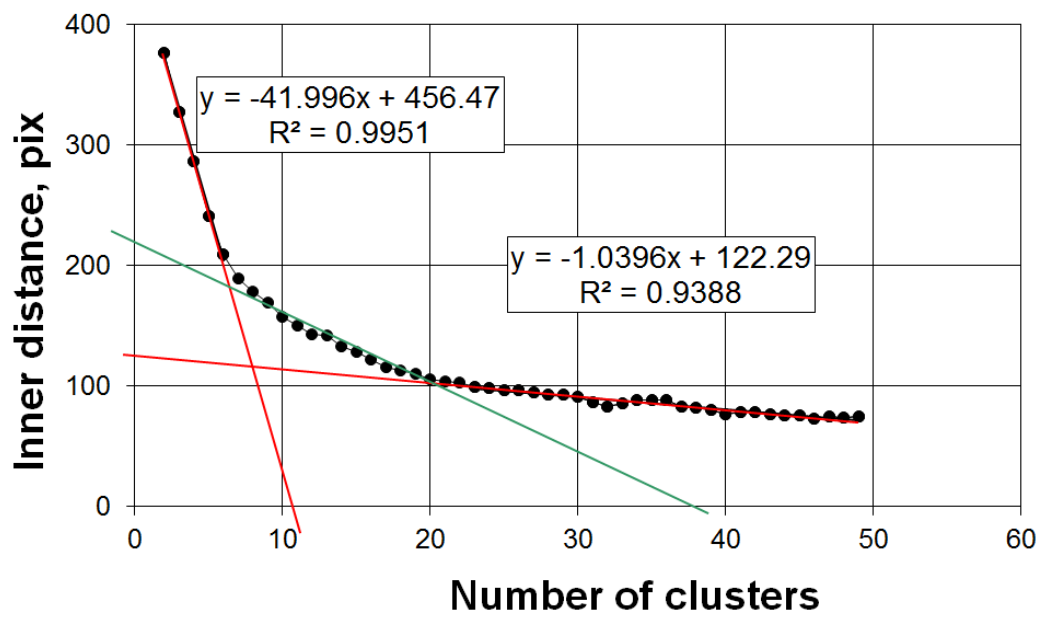


7.35. ábra: A *Yen* automatikus szegmentáló algoritmus eredménye.

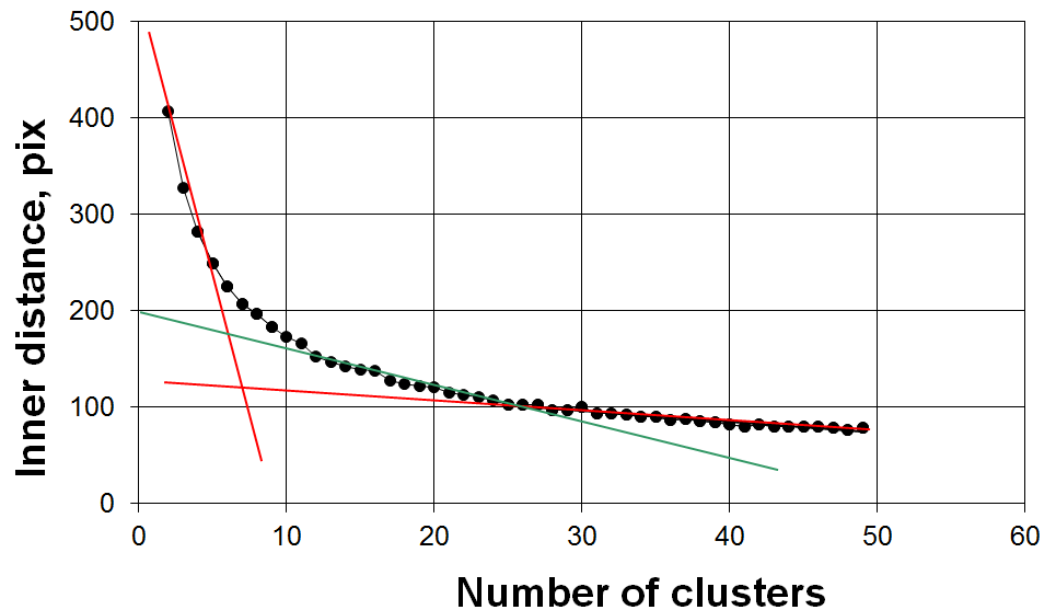




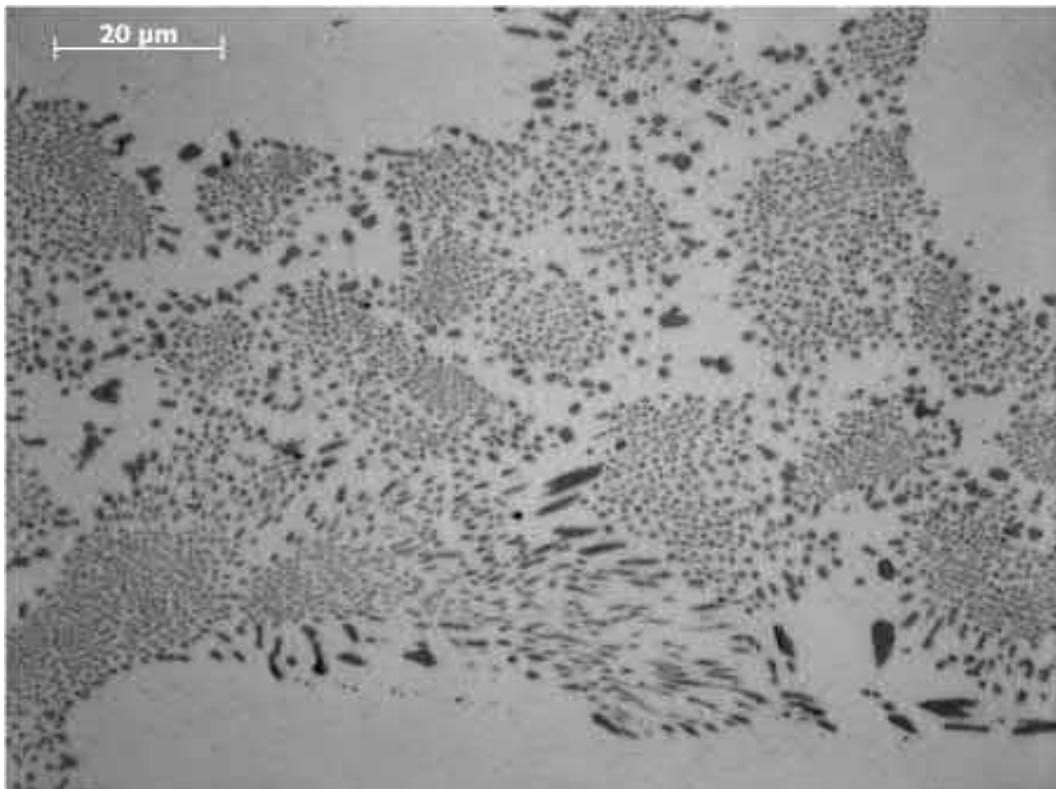
7.36. ábra: A belső távolság, mint a csoportok számának függvénye.



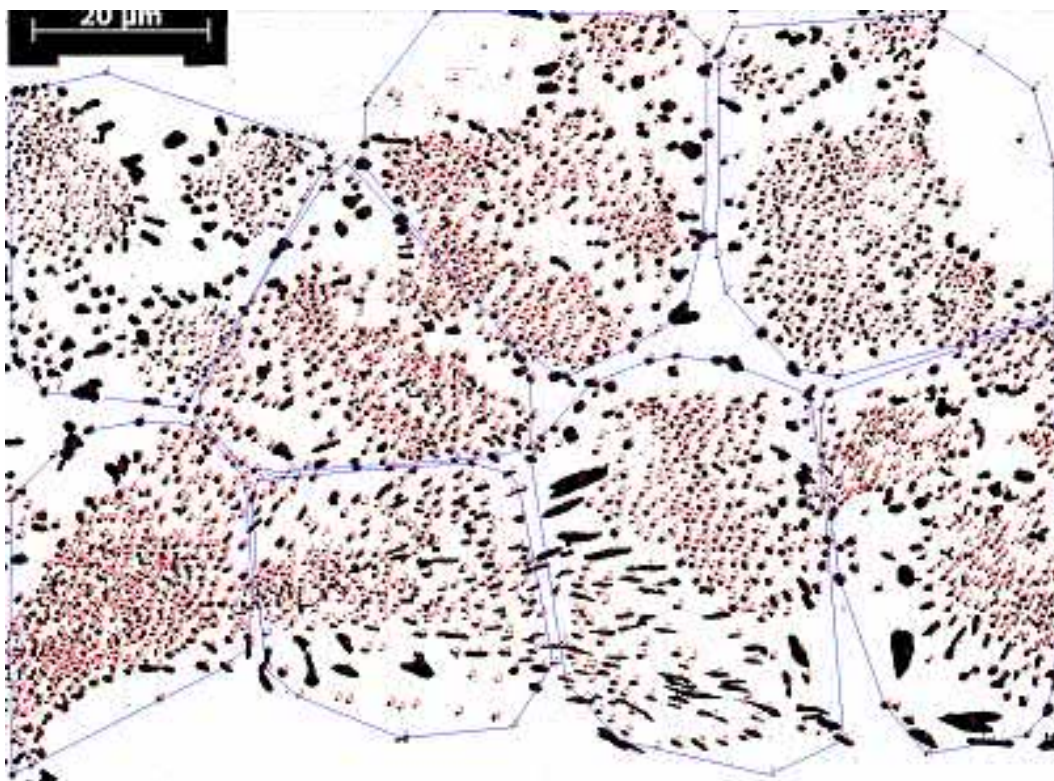
7.37. ábra: A belső távolság, mint a csoportok számának függvénye.



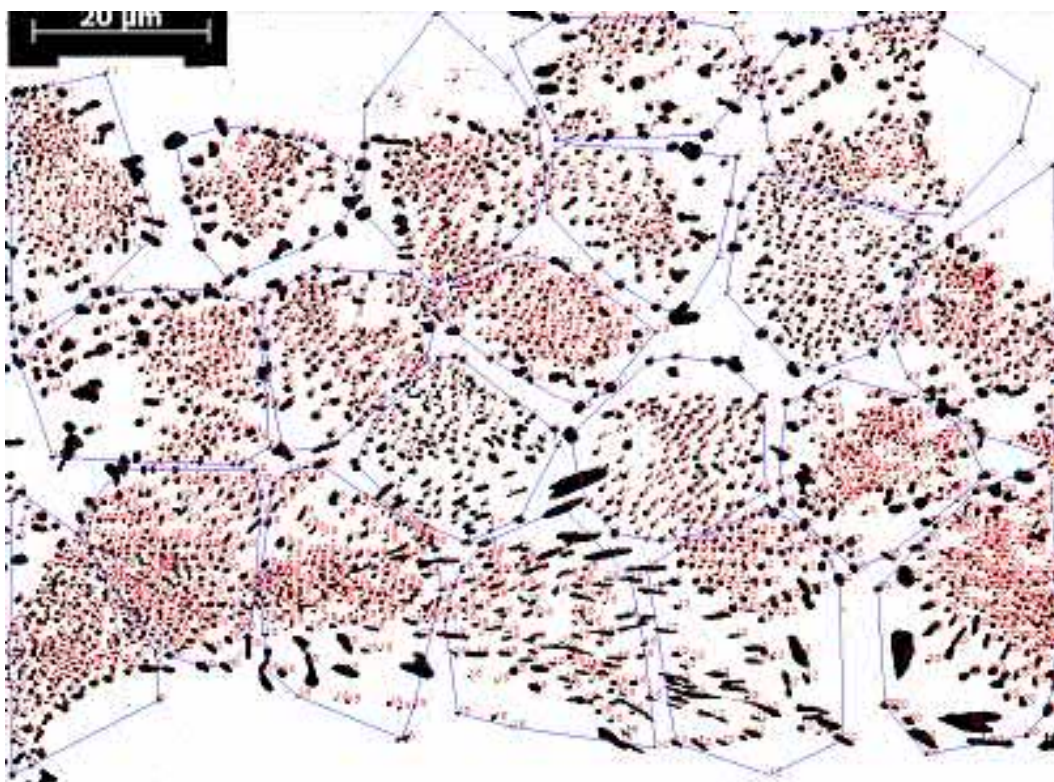
7.38. ábra: A belső távolság, mint a csoportok számának függvénye.



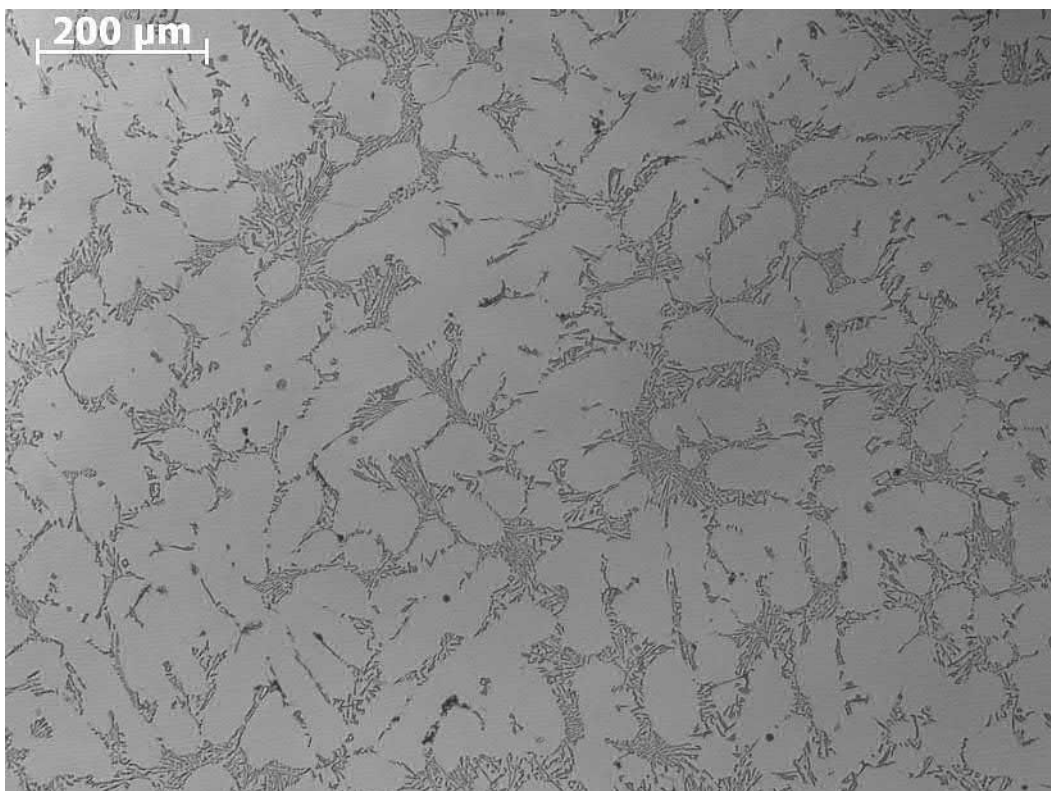
7.39. ábra: 3003-as alumínium ötvözet optikai mikroszkópi képe.



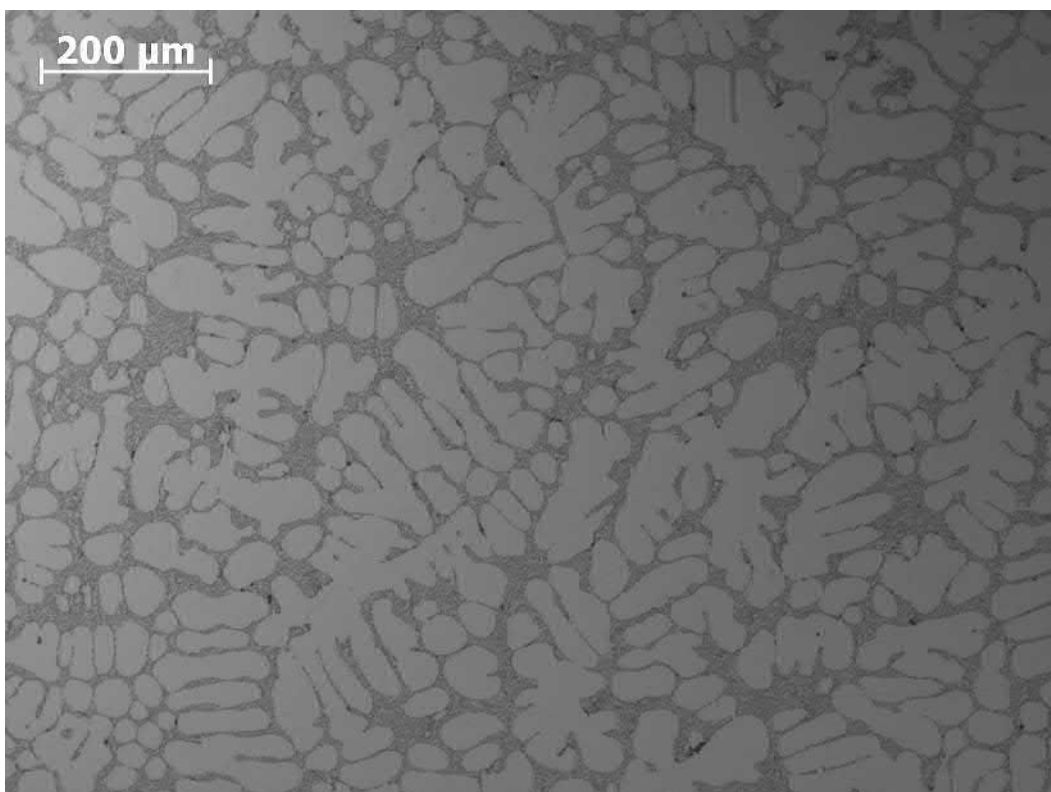
7.40. ábra: Hét db. csoport a szegmentált képen.



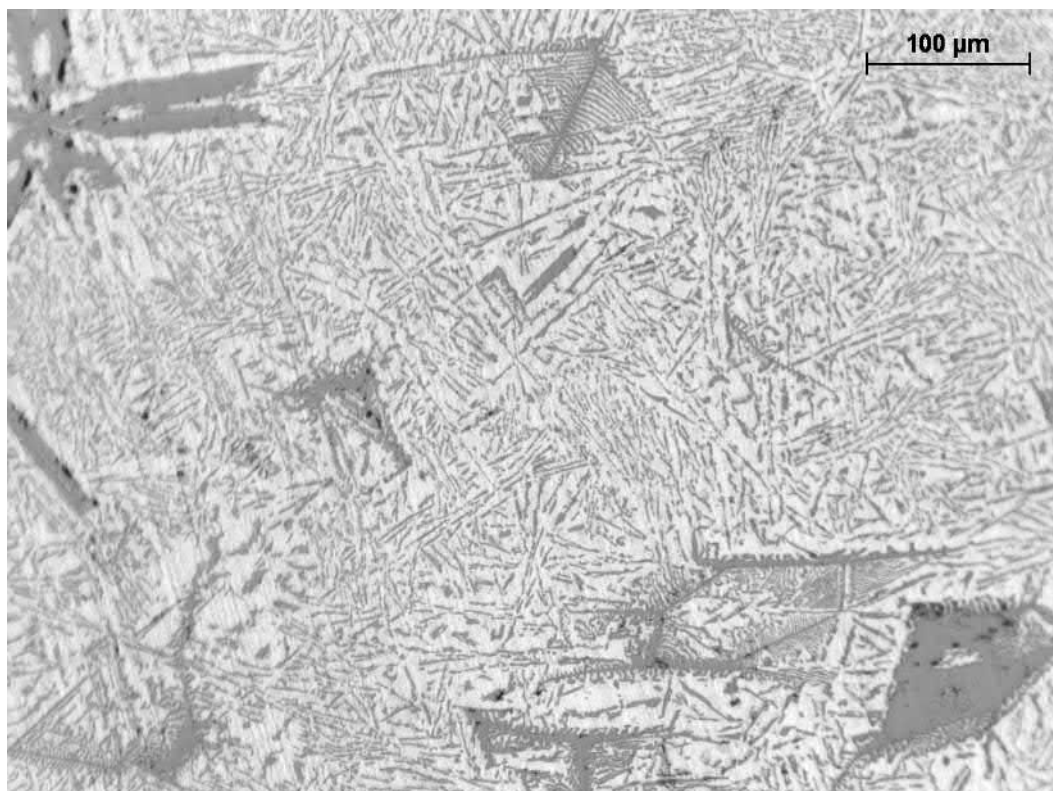
7.41. ábra: Húsz db. csoport a szegmentált képen.



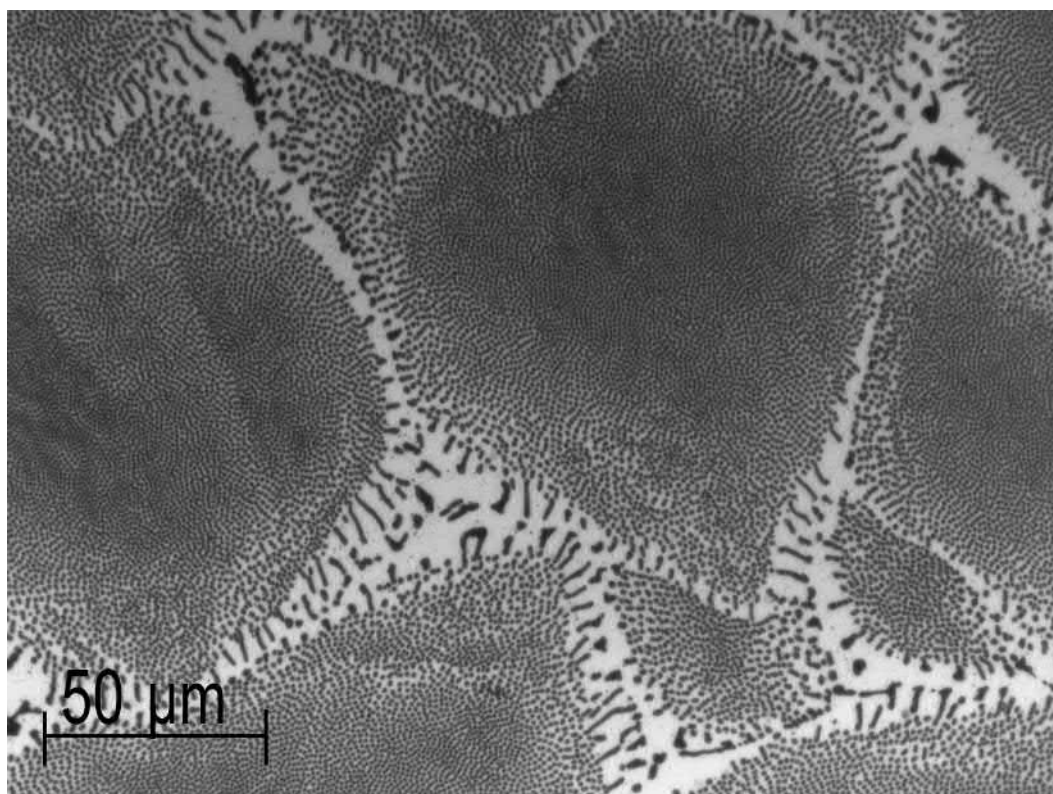
7.42. ábra: *Al* – *Si* hipoeutektikus összetétel, nem finomított.



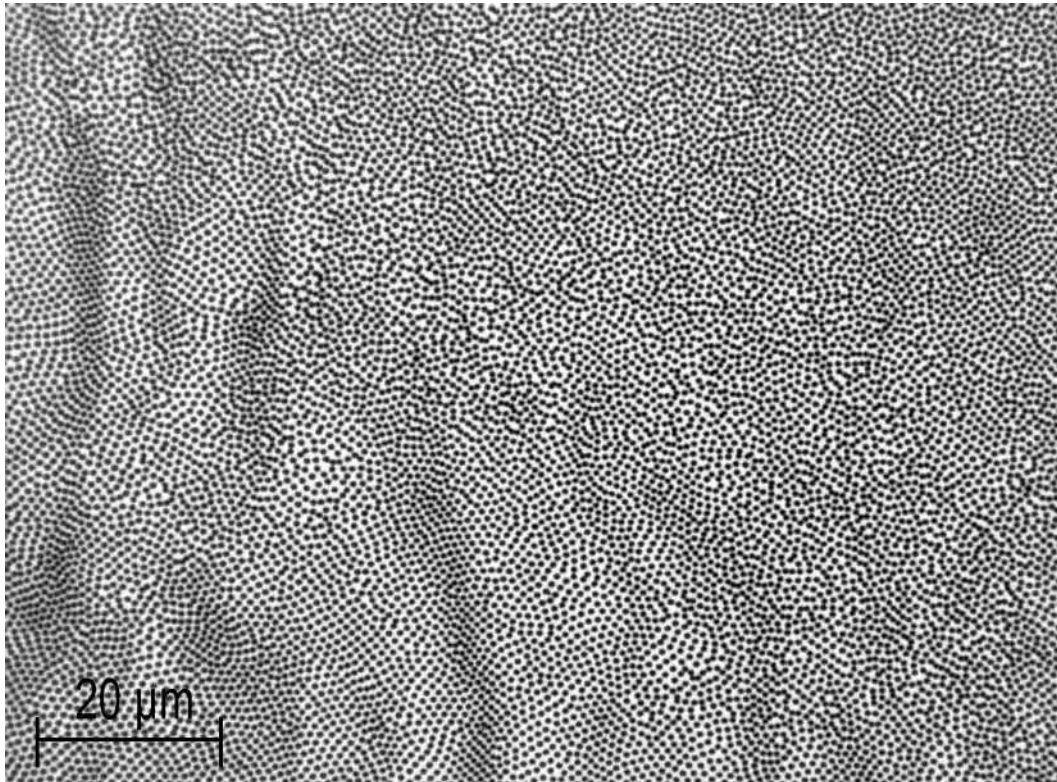
7.43. ábra: *Al* – *Si* hipoeutektikus összetétel, finomított.



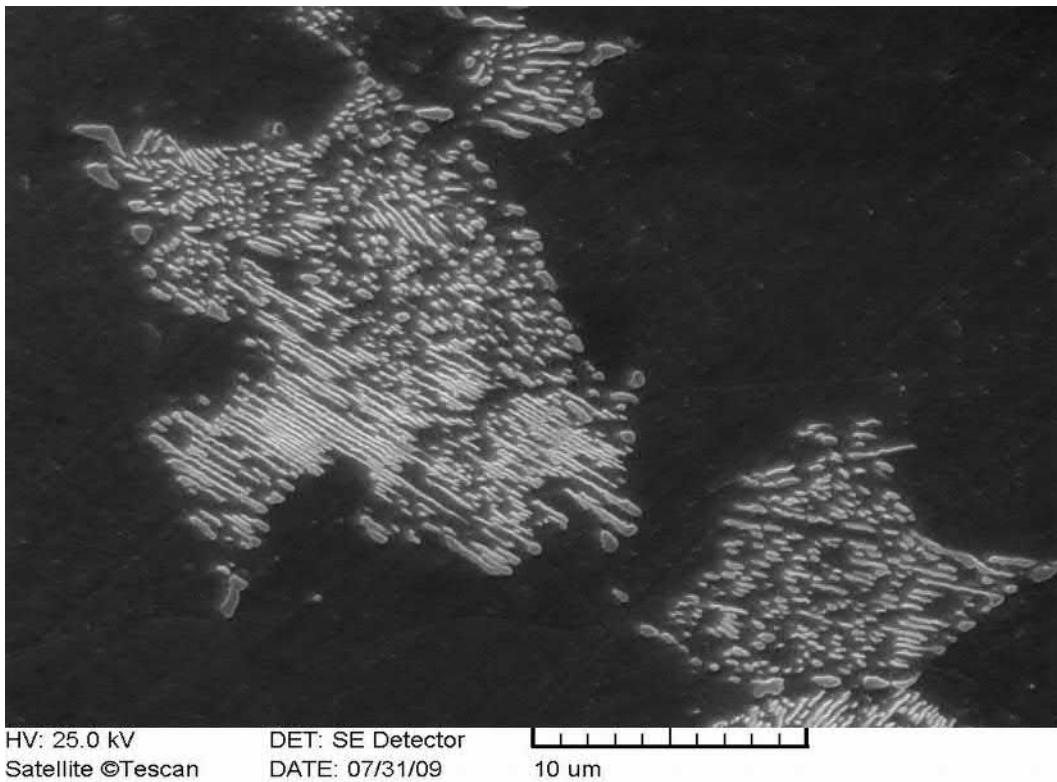
7.44. ábra:  $Al - Si$  hipereutektikus összetétel.



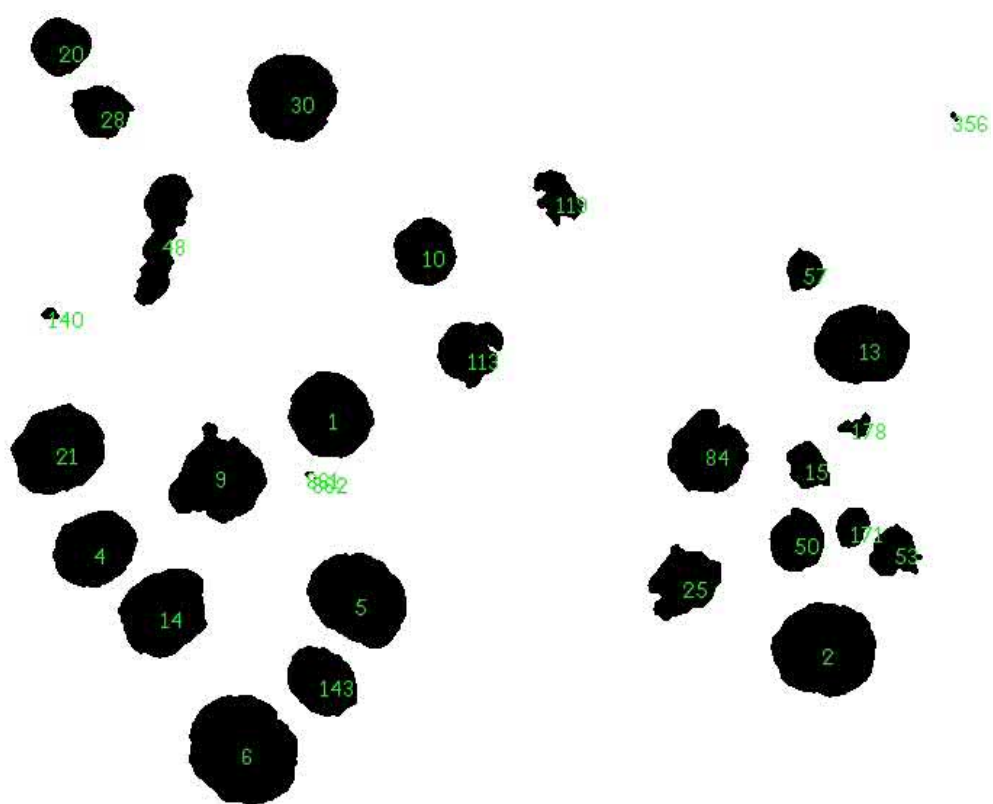
7.45. ábra:  $Al - Al_3Ni$ , 500x nagyítás, rudas szerkezet, elfajulás.



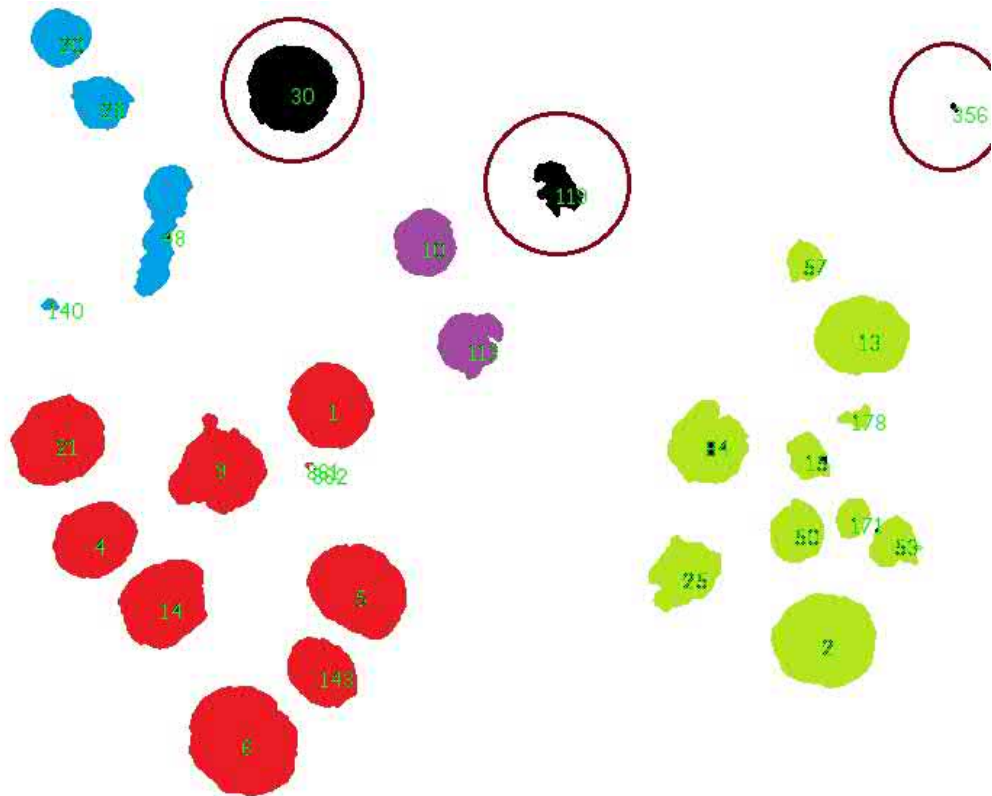
7.46. ábra:  $Al - Al_3Ni$ , 1000x nagyítás, rudas szerkezet.



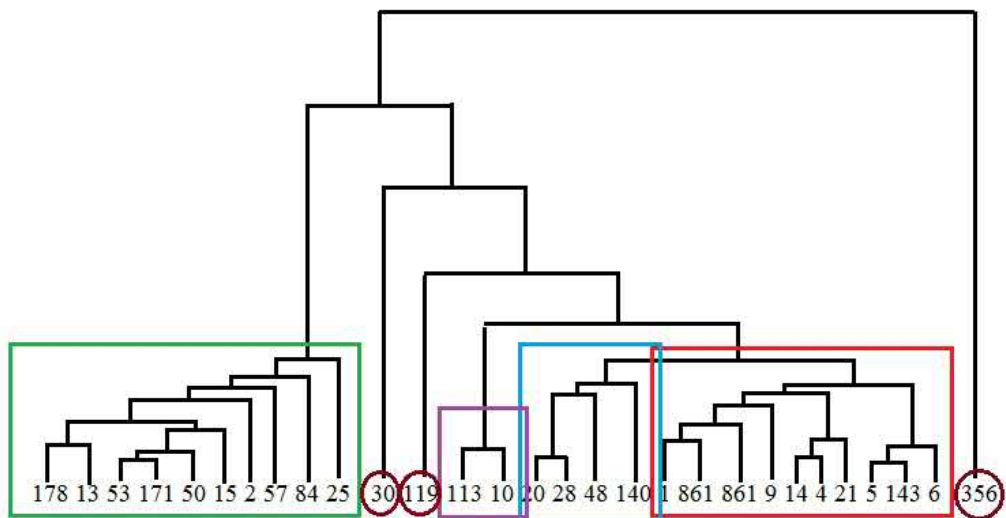
7.47. ábra: Lemezes-szemcsés perlit.



7.48. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas objektumai számozva.

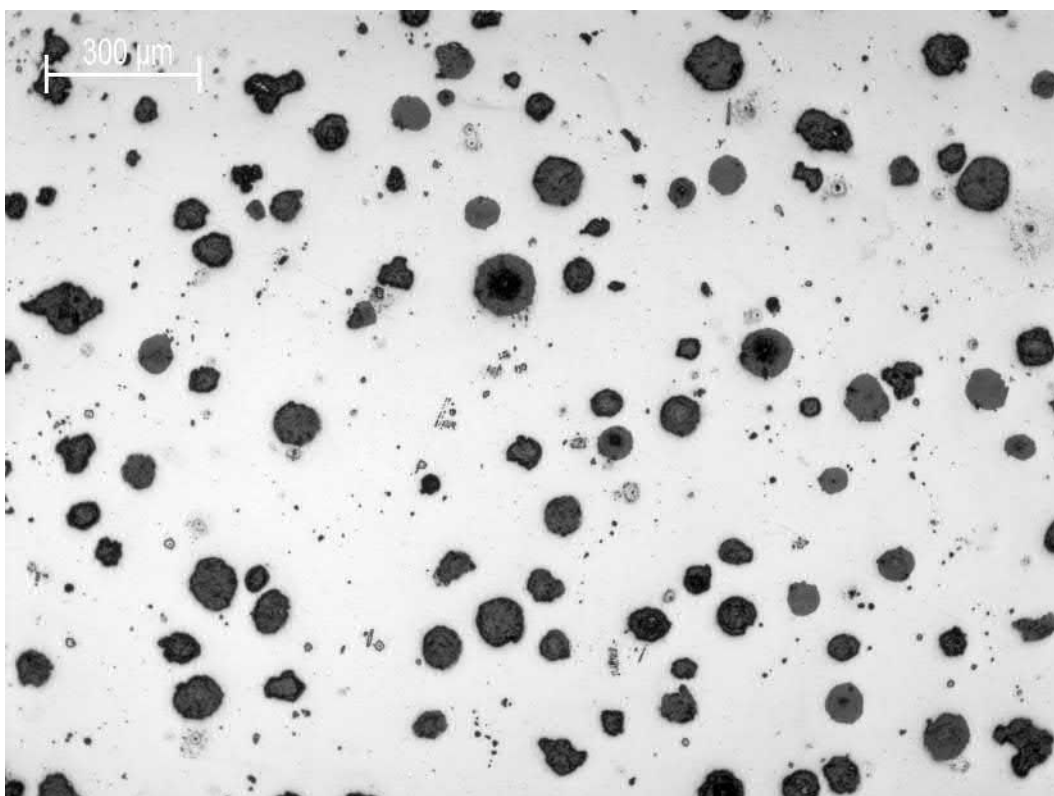


7.49. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas objektumai csoportok szerint színezve.



7.50. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas dendrogramja, és a csoportok színek szerint.

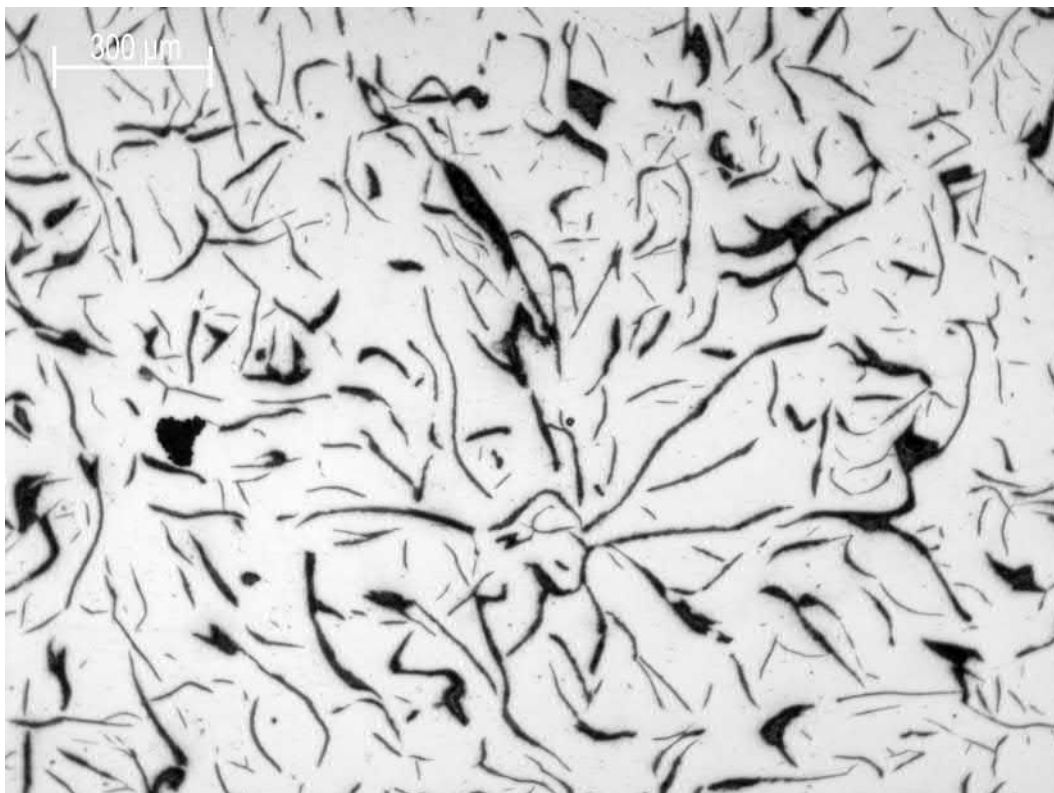




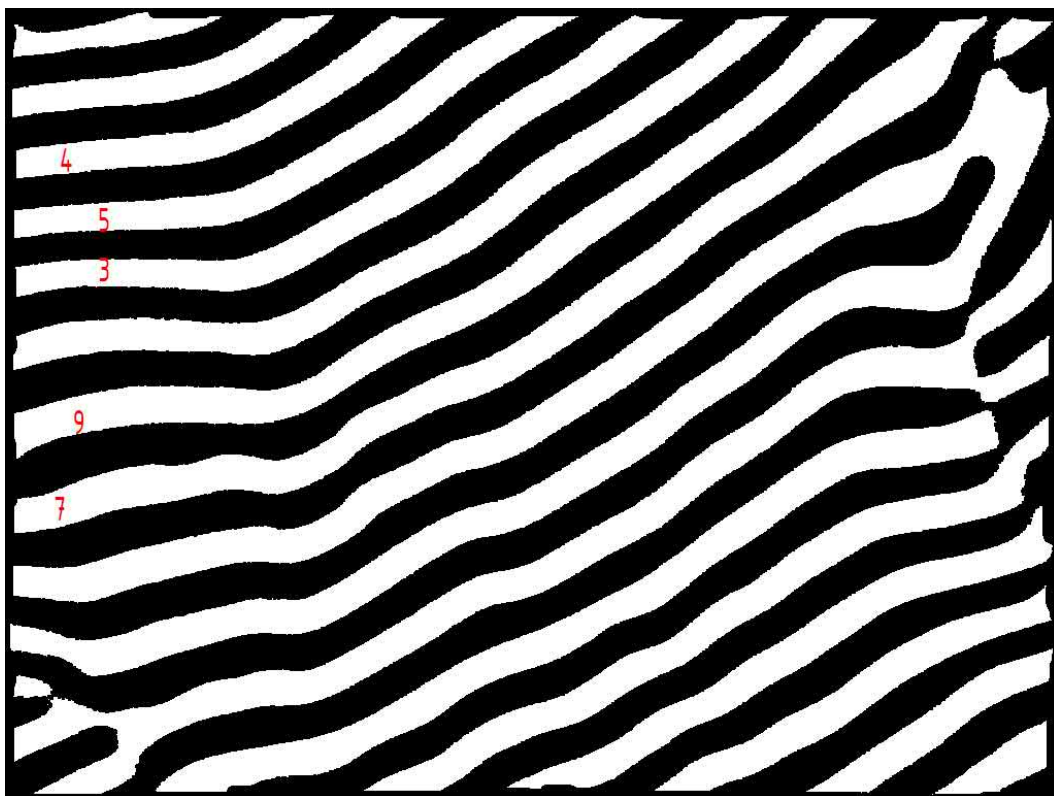
7.51. ábra: Gömbgrafitos öntöttvas.



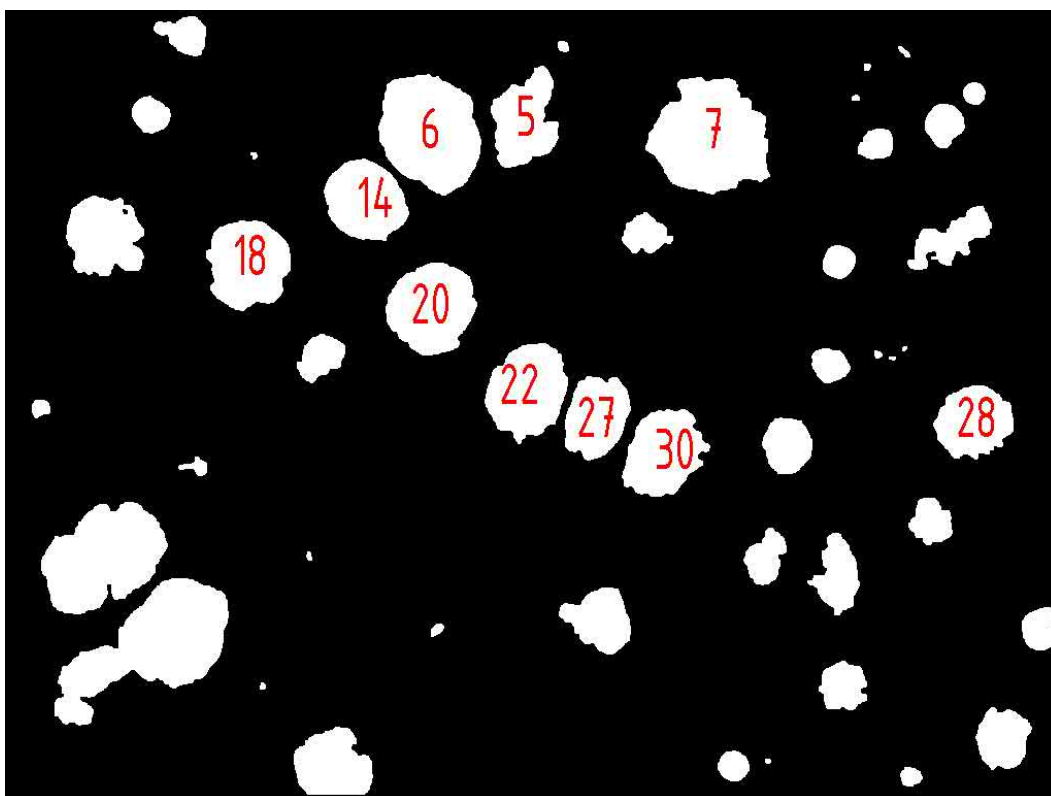
7.52. ábra: Kompakt grafitos öntöttvas.



7.53. ábra: Lemezgrafitos öntöttvas.



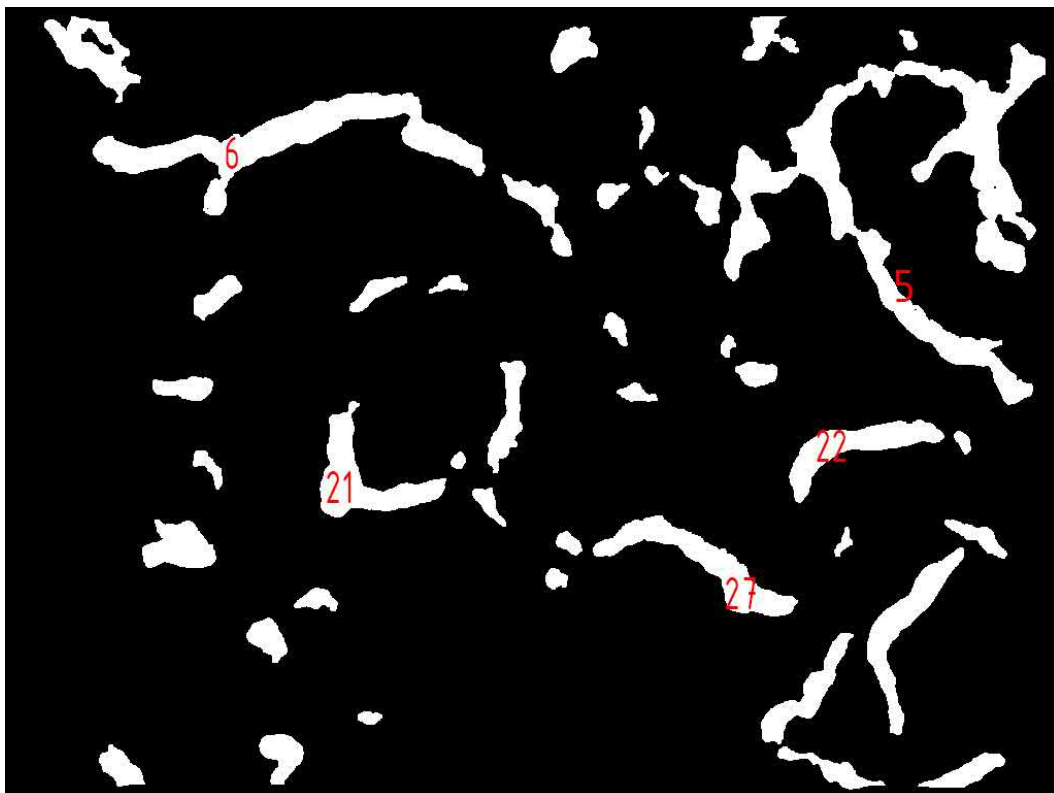
7.54. ábra: *Al-Cu* lemezes eutektikum tanuló képe.



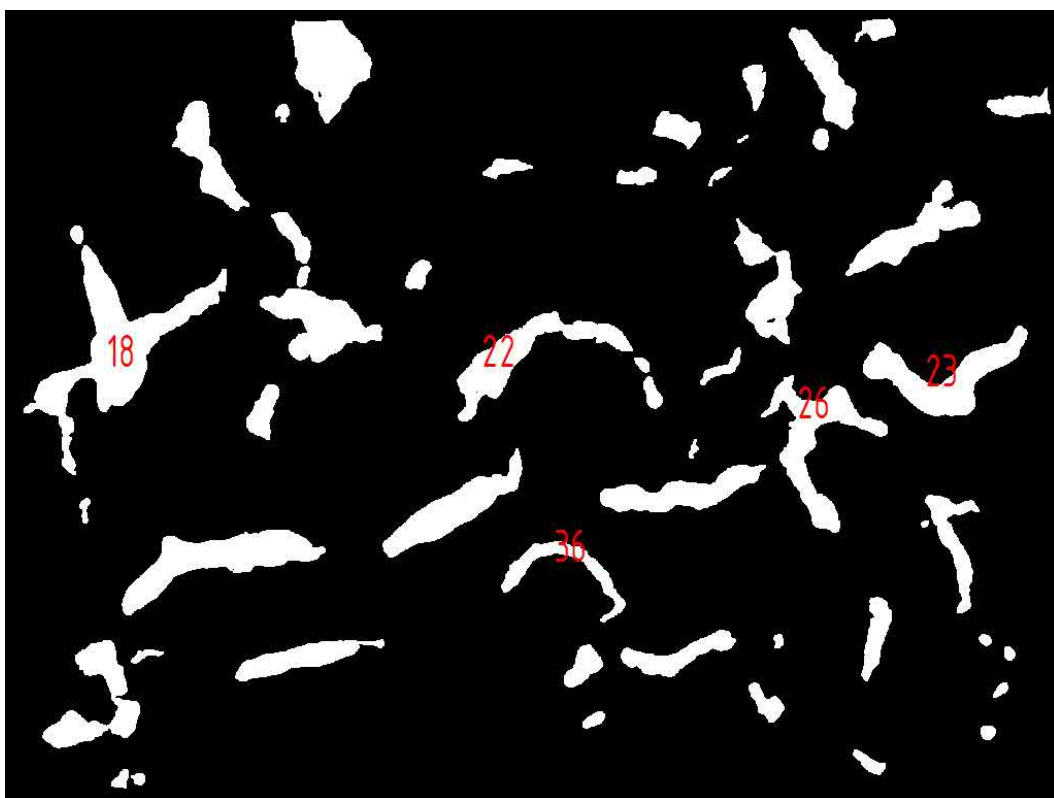
7.55. ábra: Gömbgrafitos öntöttvas, gömbös morfológiájú eutektikum tanuló képe.



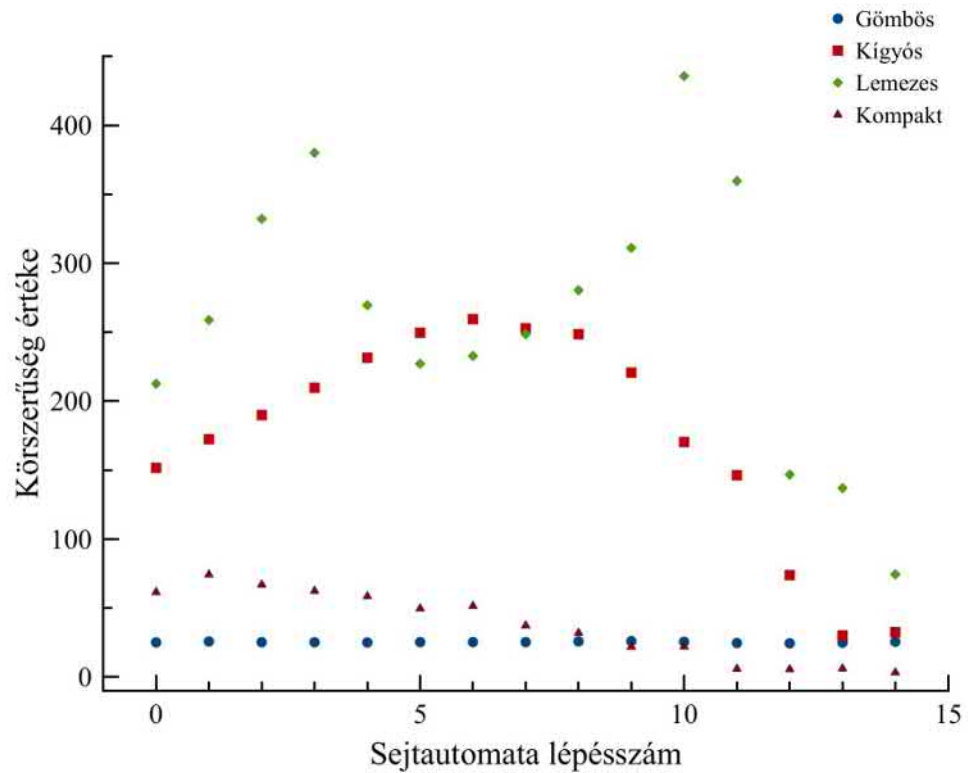
7.56. ábra: Lemezgrafitos öntöttvas, lemezes morfológiájú eutektikum tanuló képe.



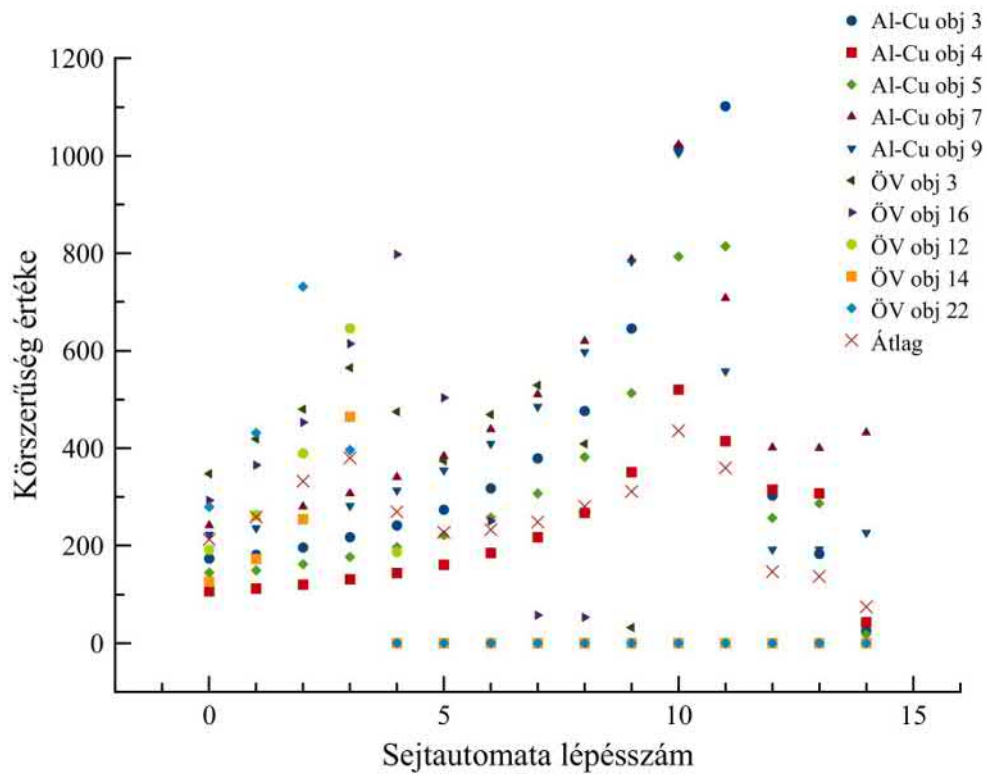
7.57. ábra: Kompakt grafitos öntöttvas, „kígyós” morfológiájú eutektikum tanuló képe.



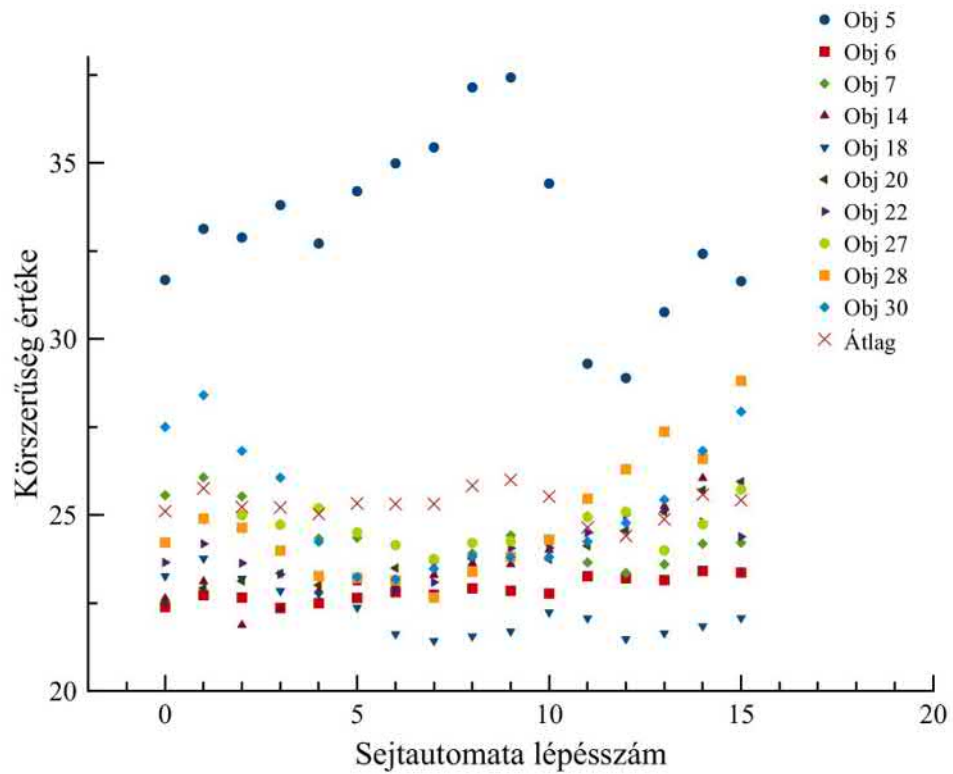
7.58. ábra: Kompakt grafitos öntöttvas, „kígyós” morfológiájú eutektikum tanuló képe.



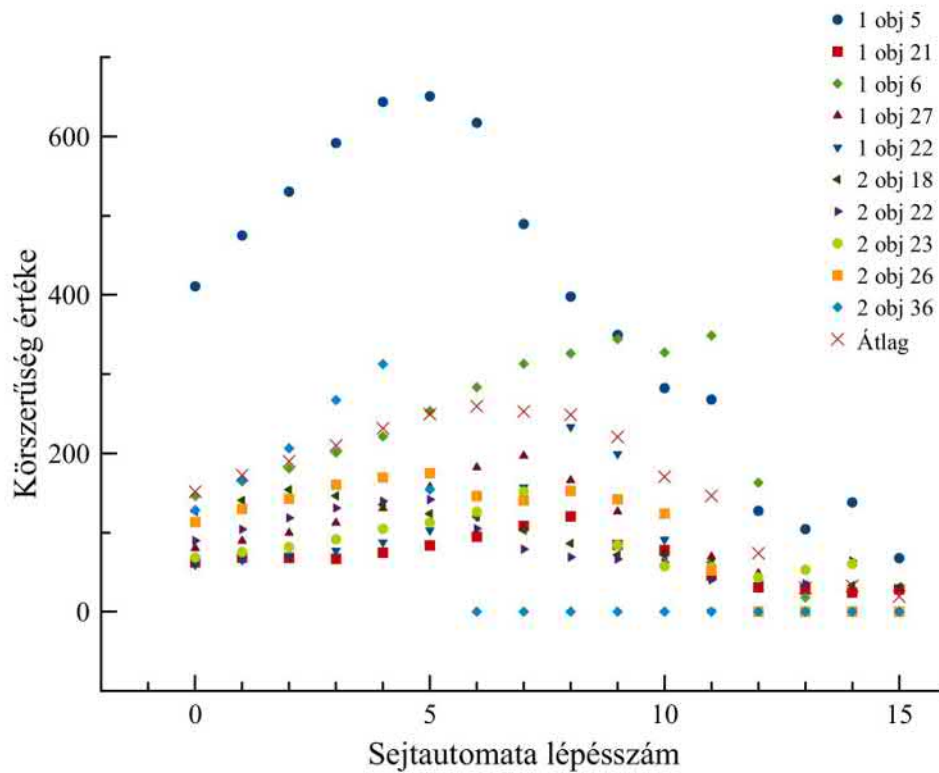
7.60. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése különböző alakú objektumok esetén.



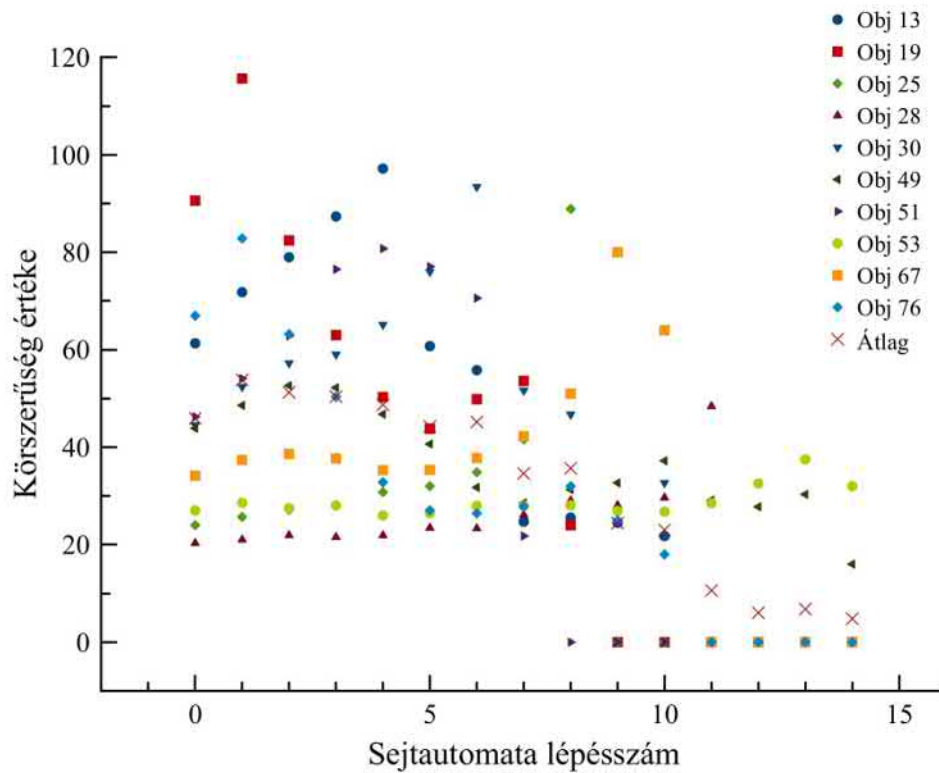
7.61. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése lemezes eutektikum esetén.



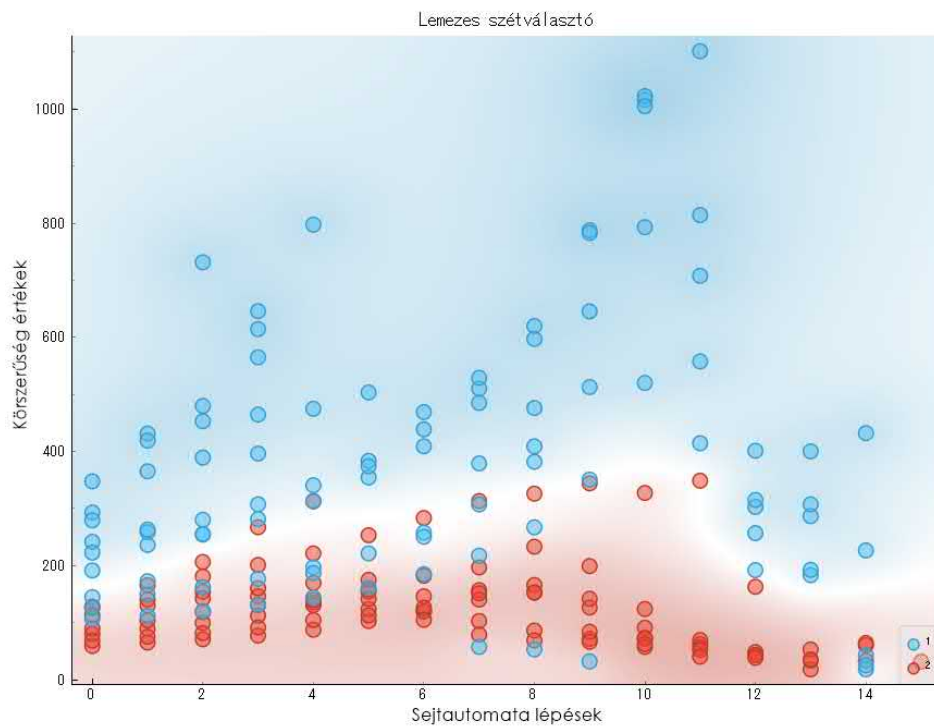
7.62. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése gömbös eutektikum esetén.



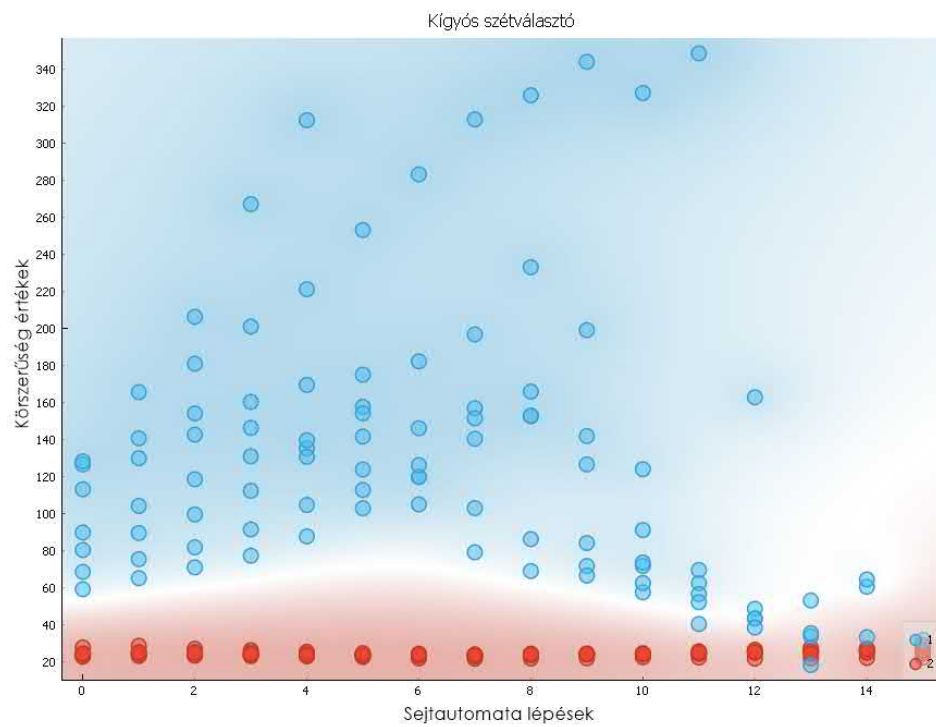
7.63. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése „kígyós” eutektikum esetén.



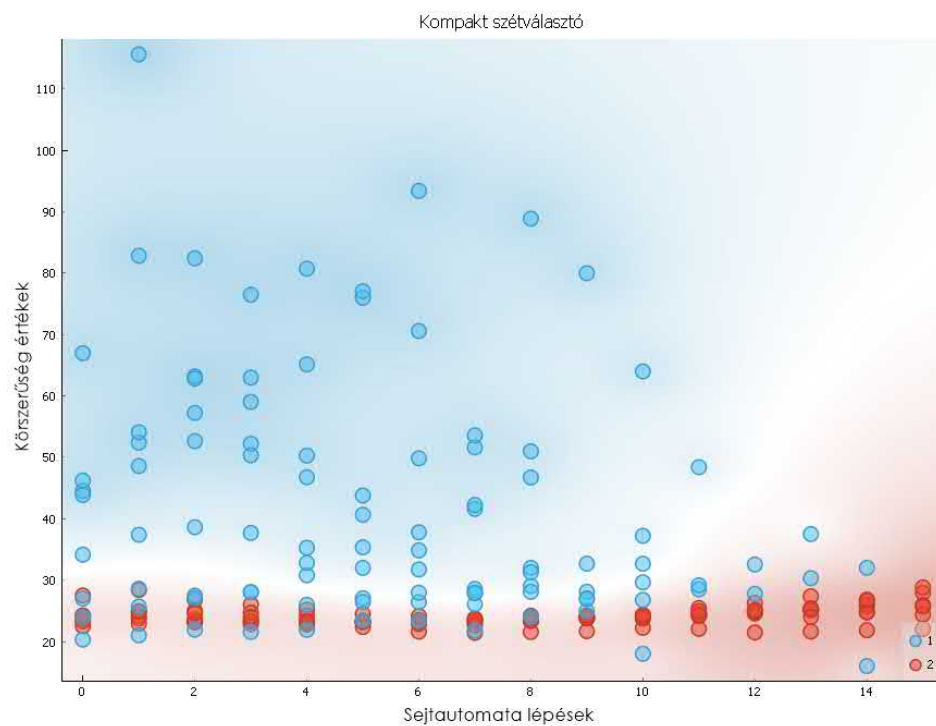
7.64. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése kompakt morfológiájú euktektikum esetén.



7.65. ábra: A tartóvektor-gép tanuló adatai osztályozva, lemezes és nem lemezes osztályok.

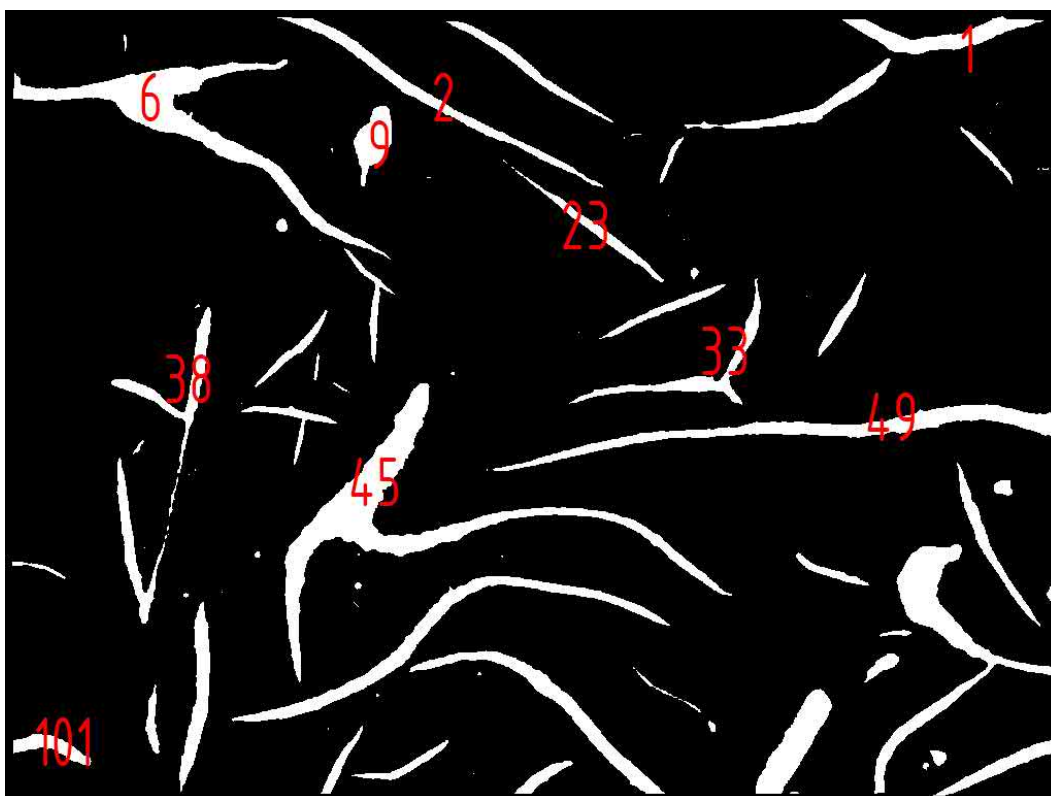


7.66. ábra: A tartóvektor-gép tanuló adatai osztályozva, kígyós és nem kígyós, nem lemezes osztályok.

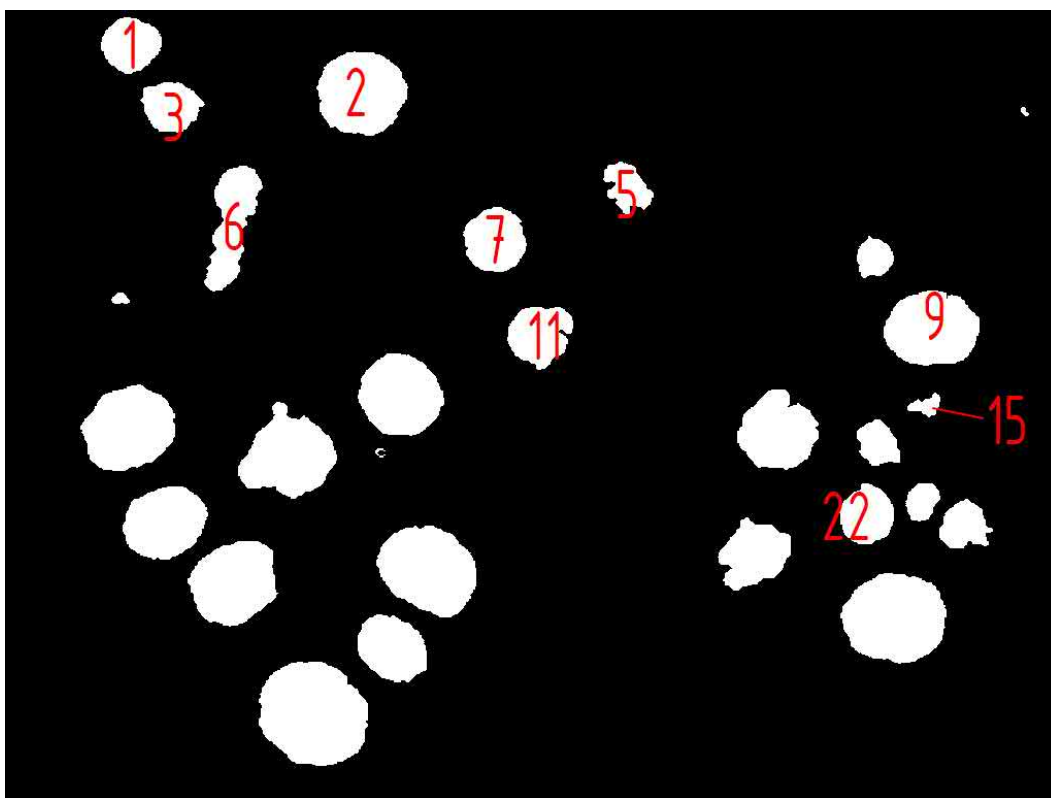


7.67. ábra: A tartóvektor-gép tanuló adatai osztályozva, kompakt és nem kompakt, nem kígyós, nem lemezes osztályok.

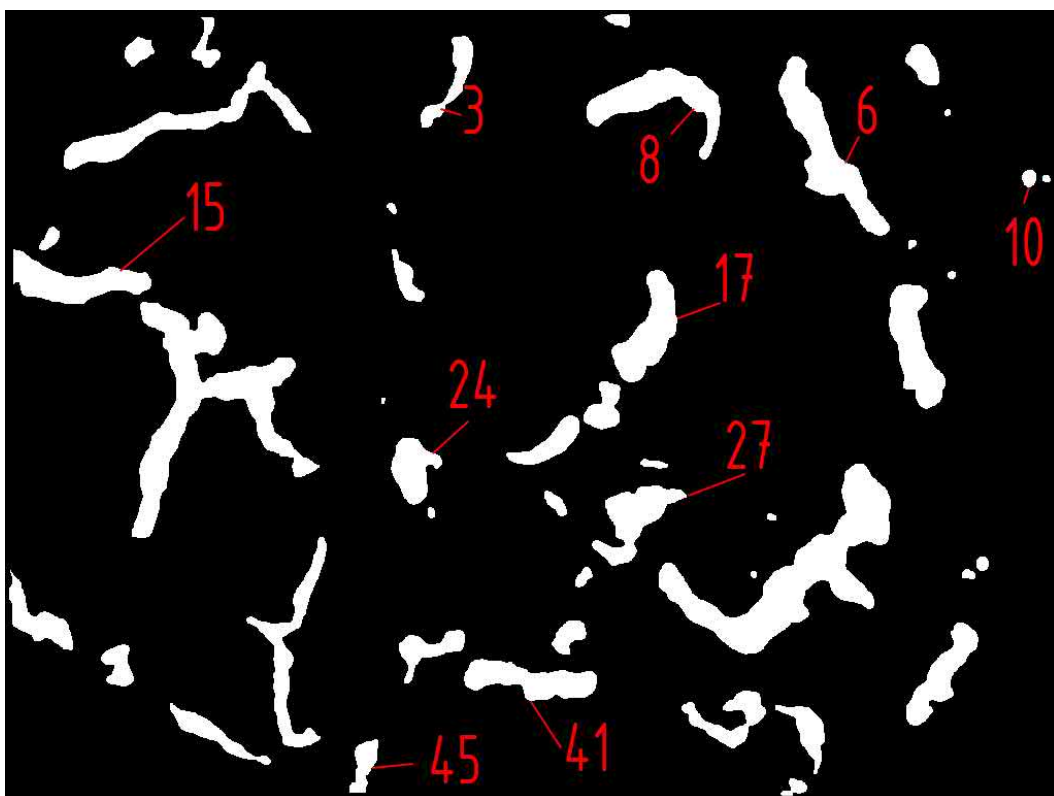




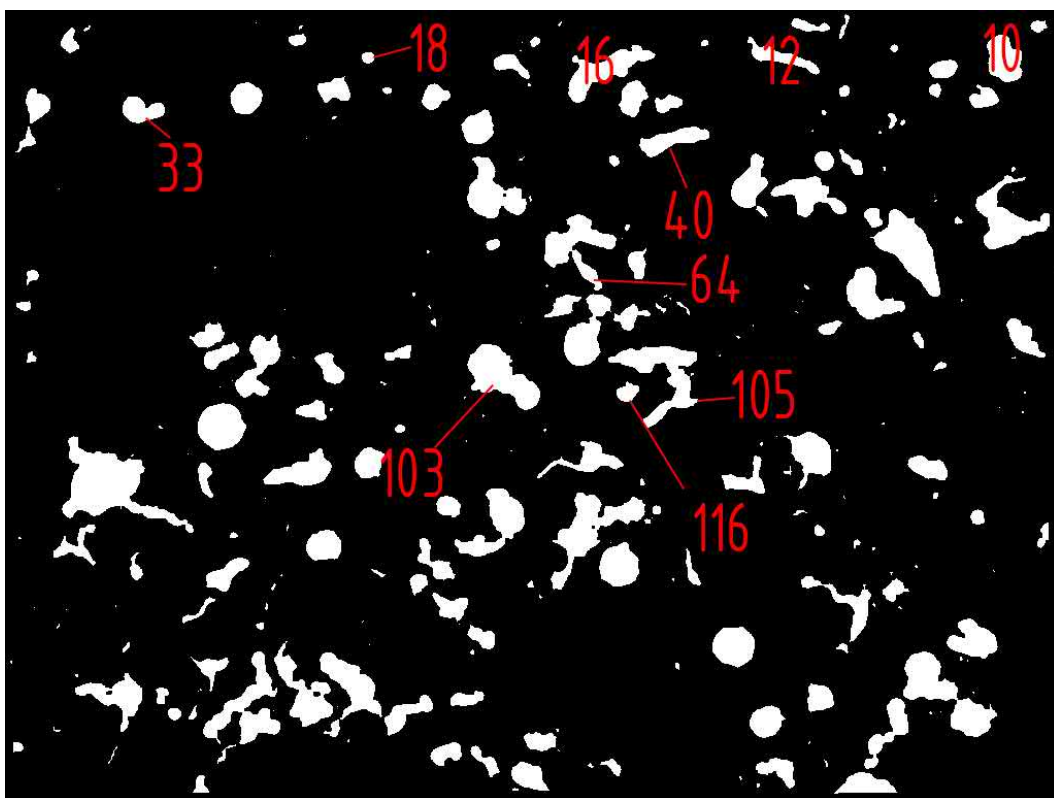
7.68. ábra: Lemezgrafitos öntöttvas megjelölt objektumai.



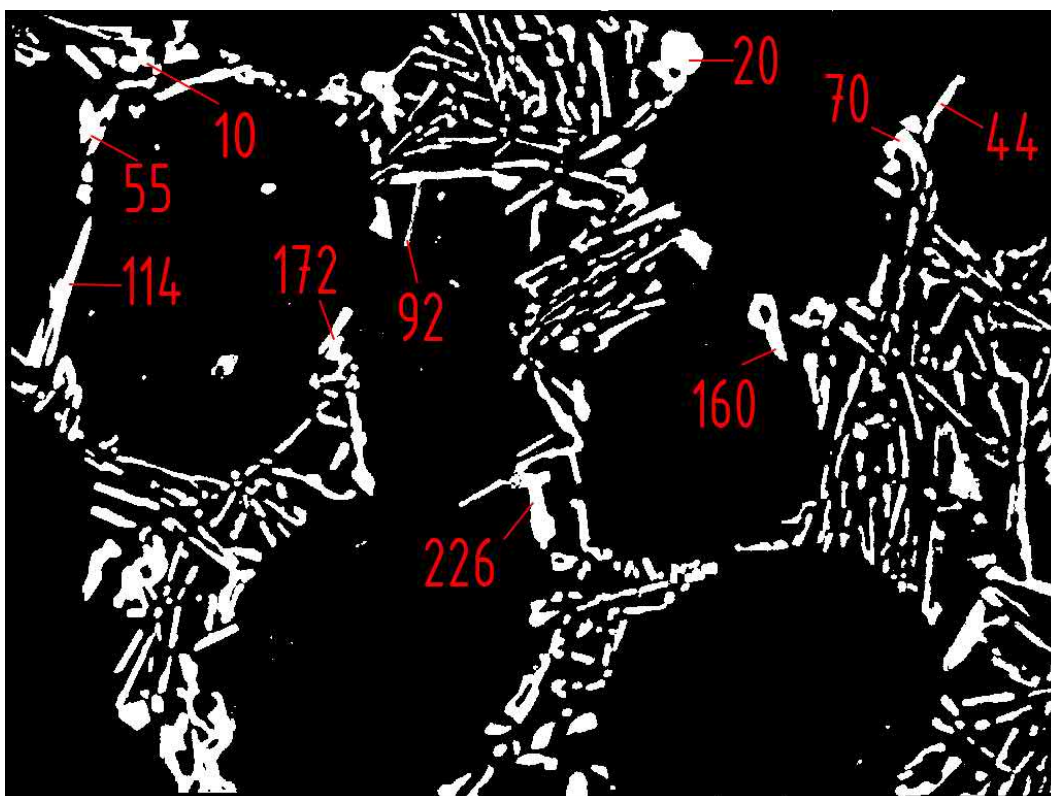
7.69. ábra: Gömbgrafitos öntöttvas megjelölt objektumai.



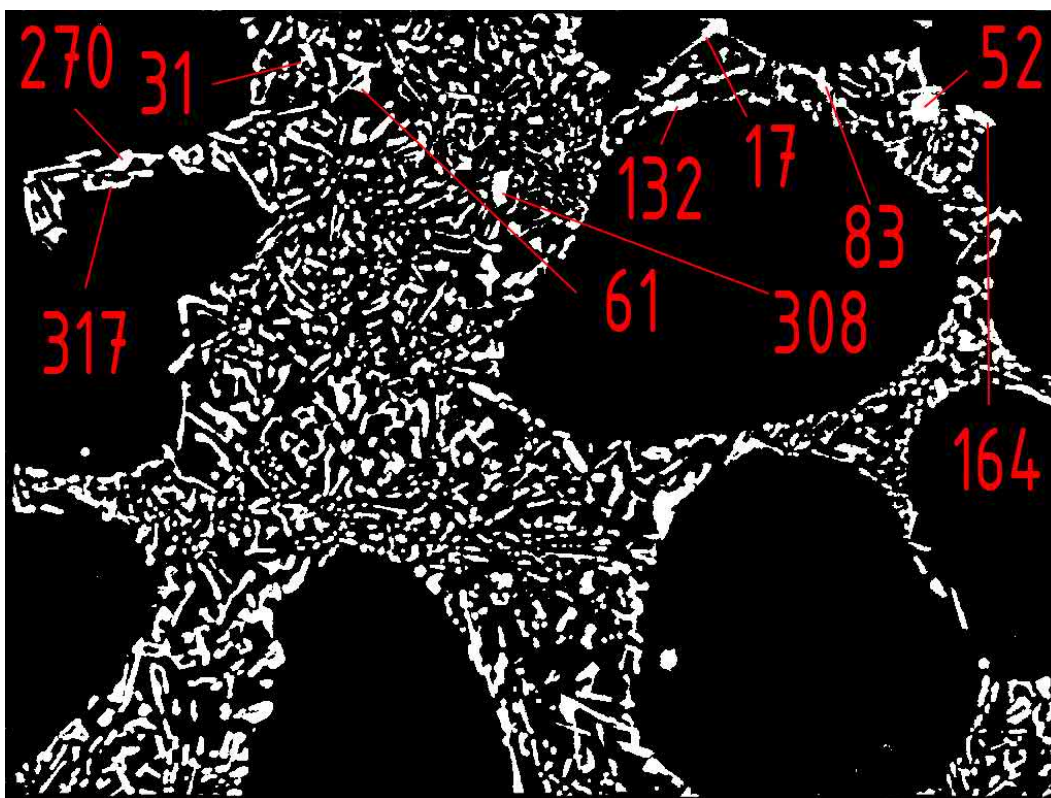
7.70. ábra: Kompakt („kígyós”) grafitos öntöttvas megjelölt objektumai.



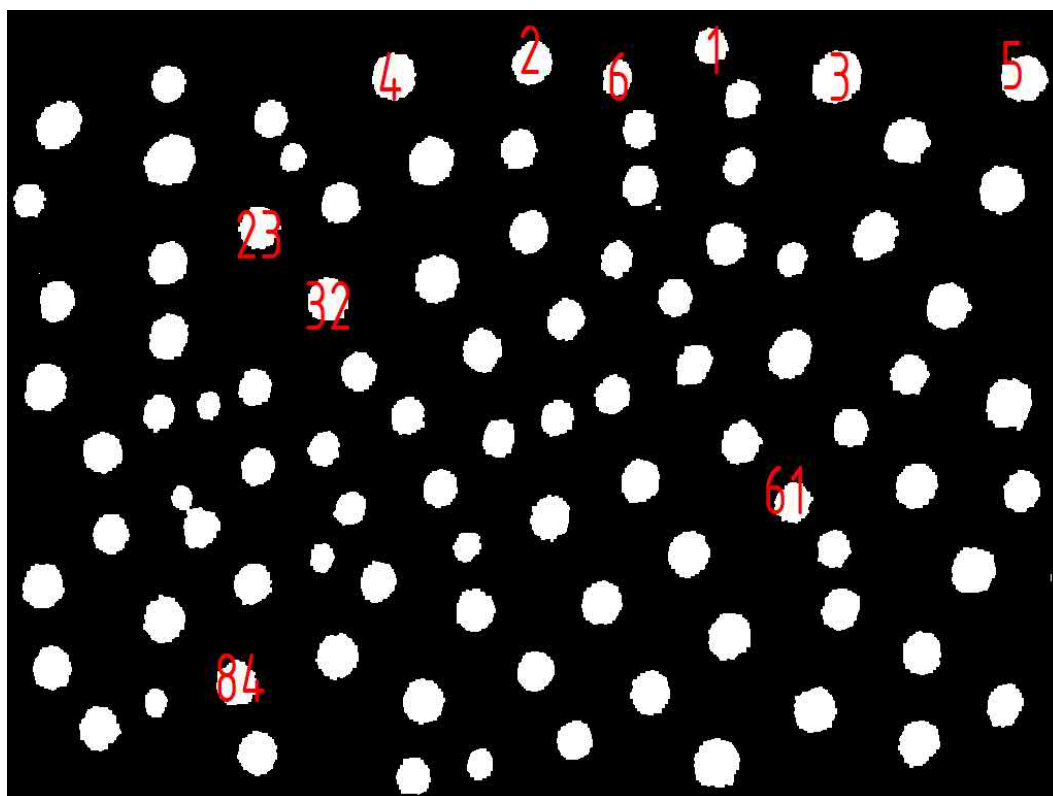
7.71. ábra: Kompakt grafitos öntöttvas megjelölt objektumai.



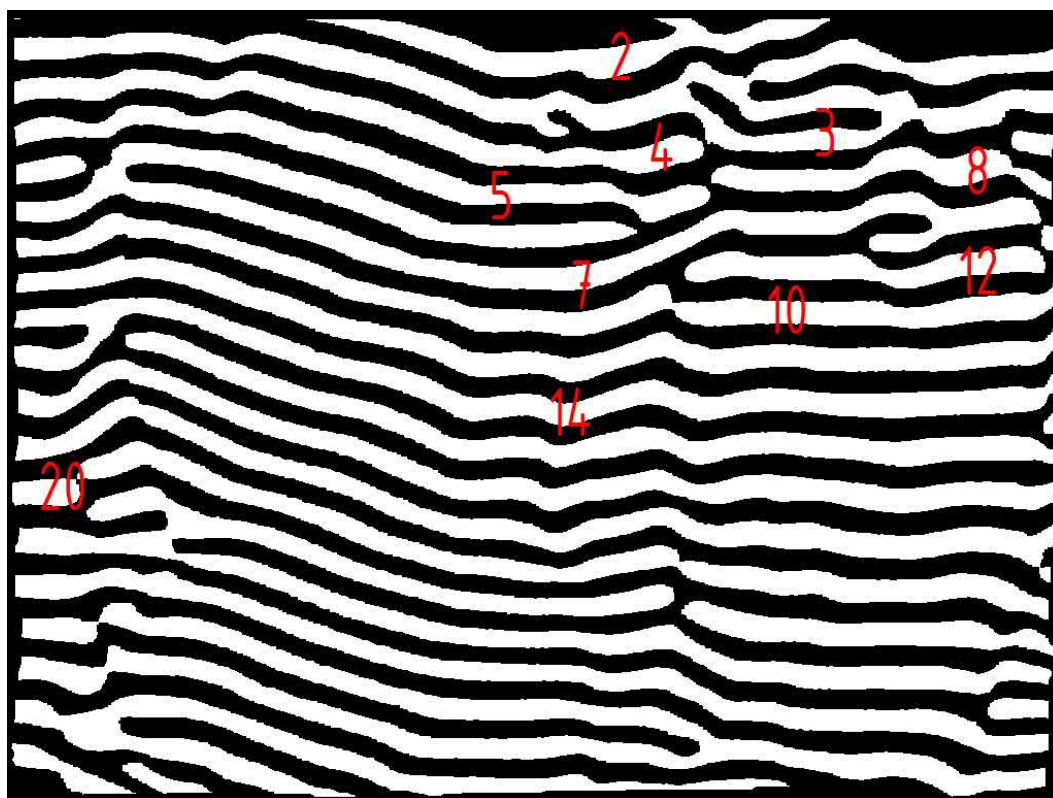
7.72. ábra: Nem finomított *Al-Si* ötvözet megjelölt objektumai.



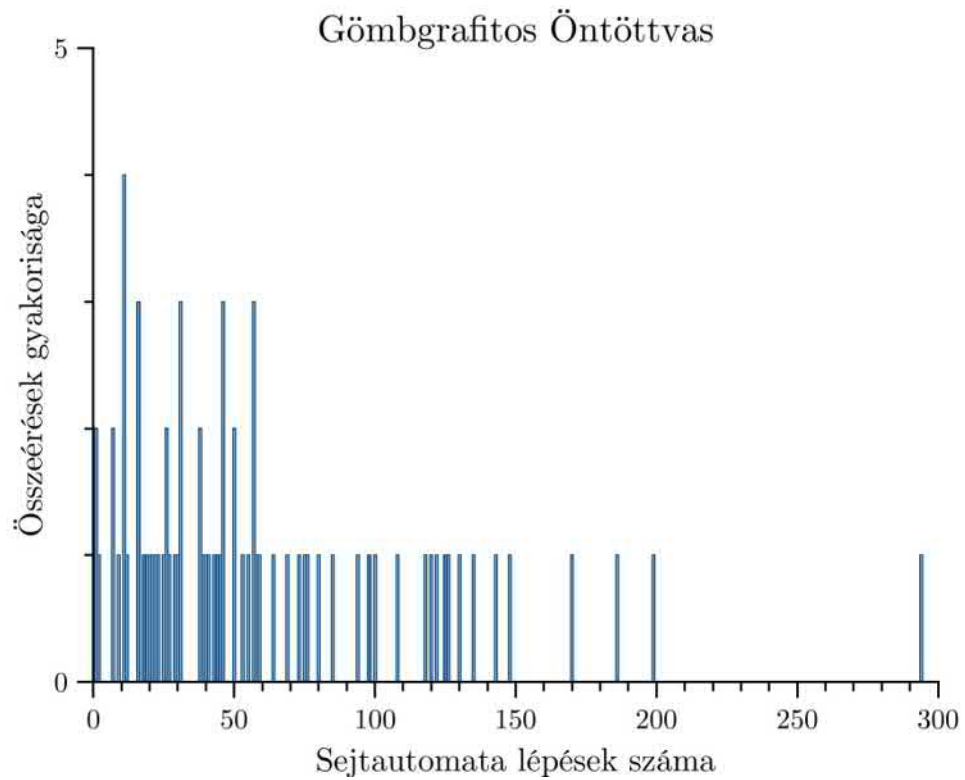
7.73. ábra: Finomított *Al-Si* ötvözet megjelölt objektumai.



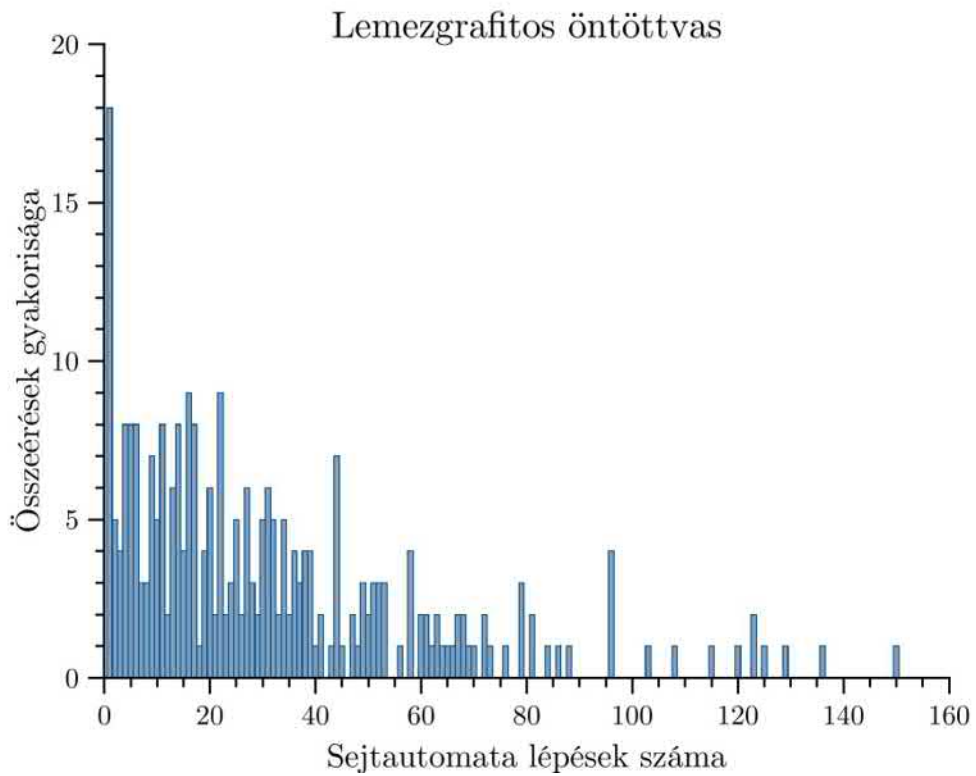
7.74. ábra: *Al-Ni* ötvözet megjelölt objektumai.



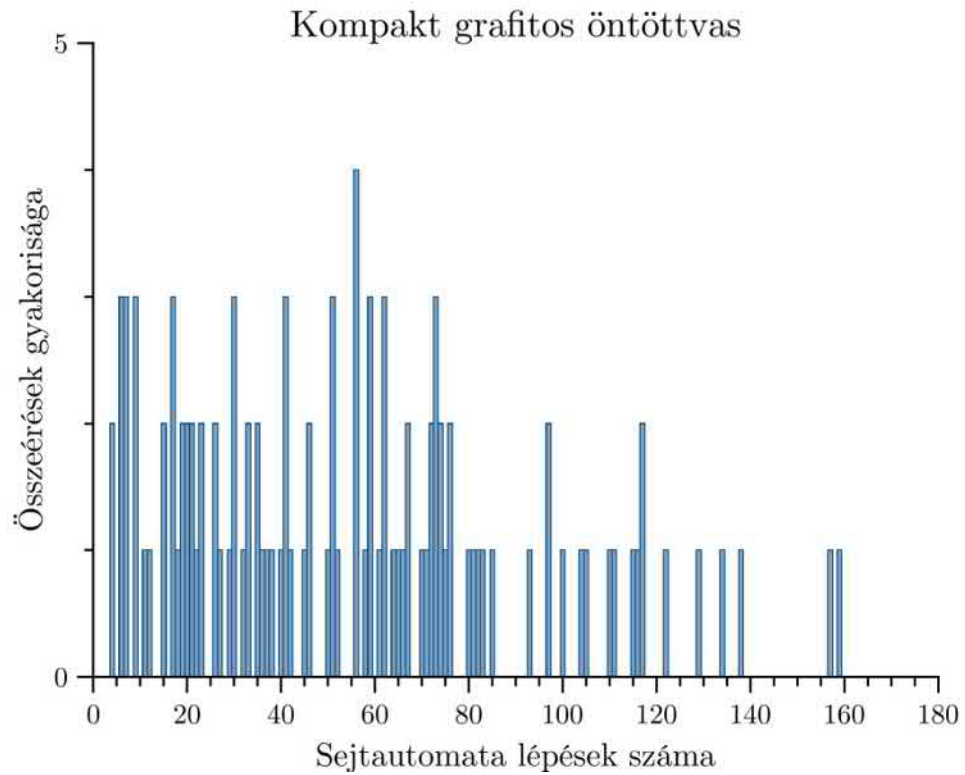
7.75. ábra: *Al-Cu* ötvözet megjelölt objektumai.



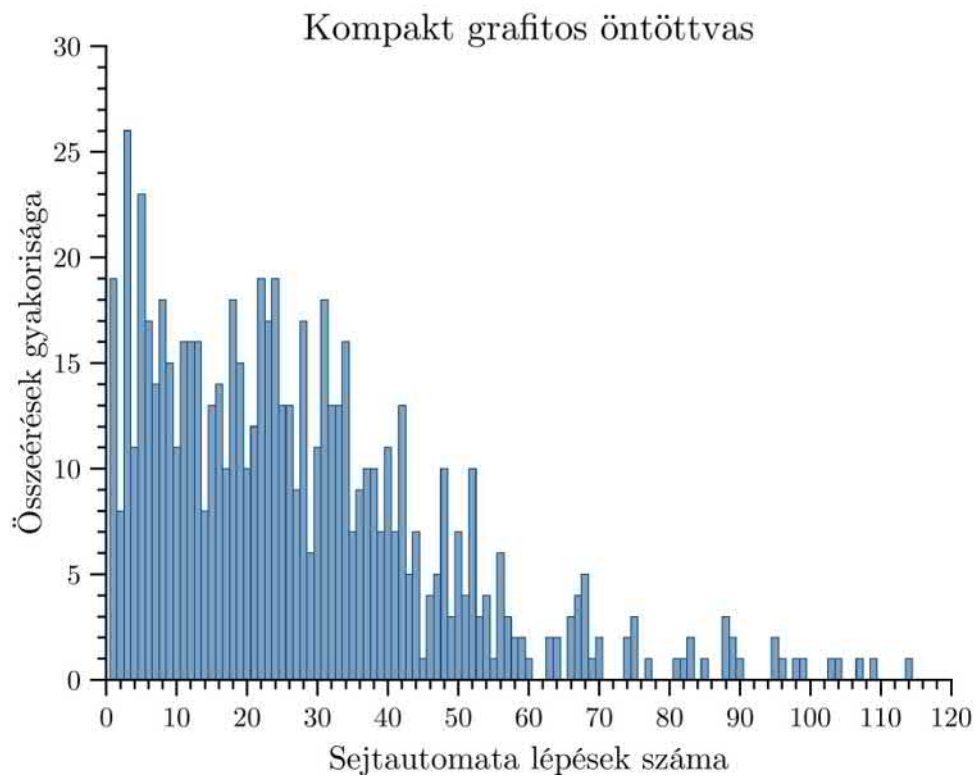
7.76. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas objektum-összeérési hisztogramja.



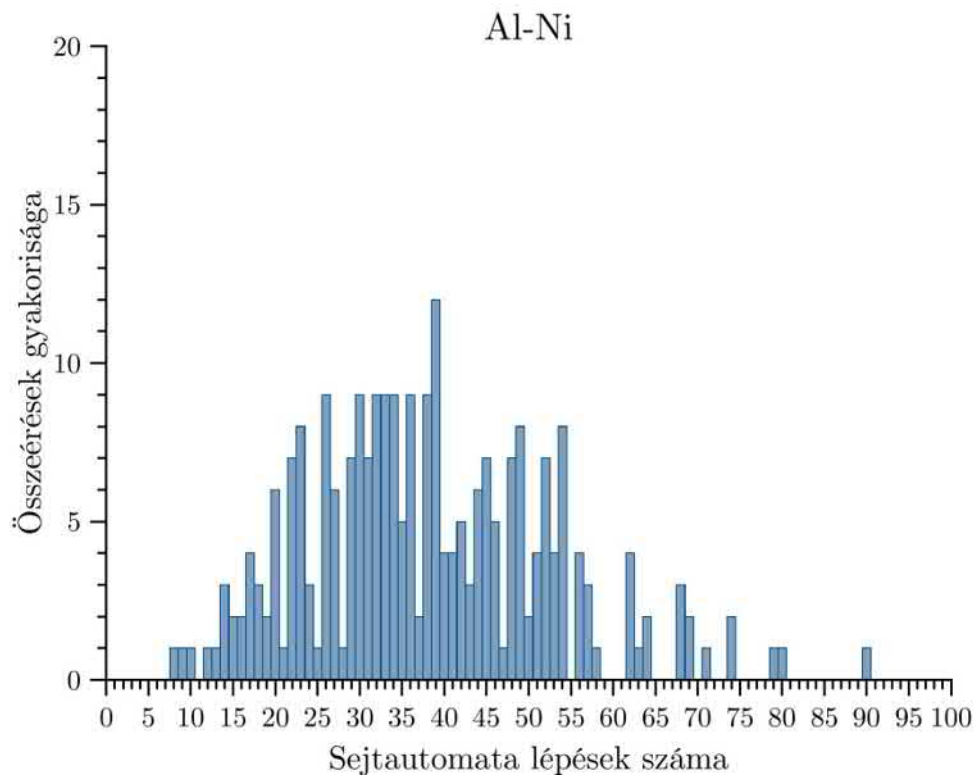
7.77. ábra: A lemezgrafitos öntöttvas objektum-összeérési hisztogramja.



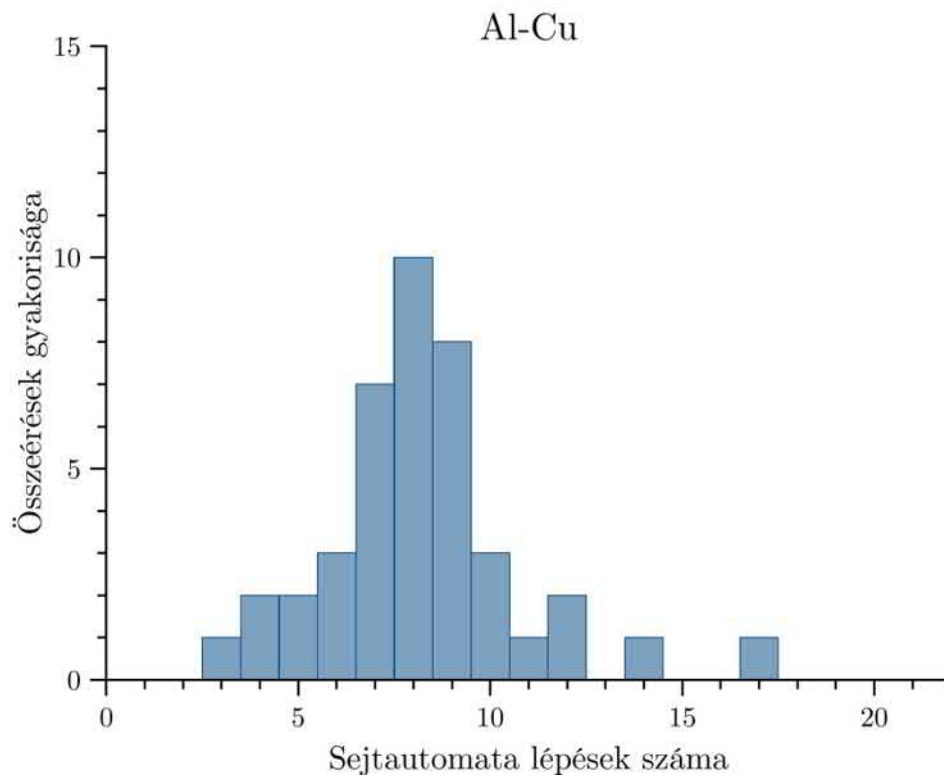
7.78. ábra: A kompakt („kígyós”) grafitos öntöttvas objektum-összeérési hisztogramja.



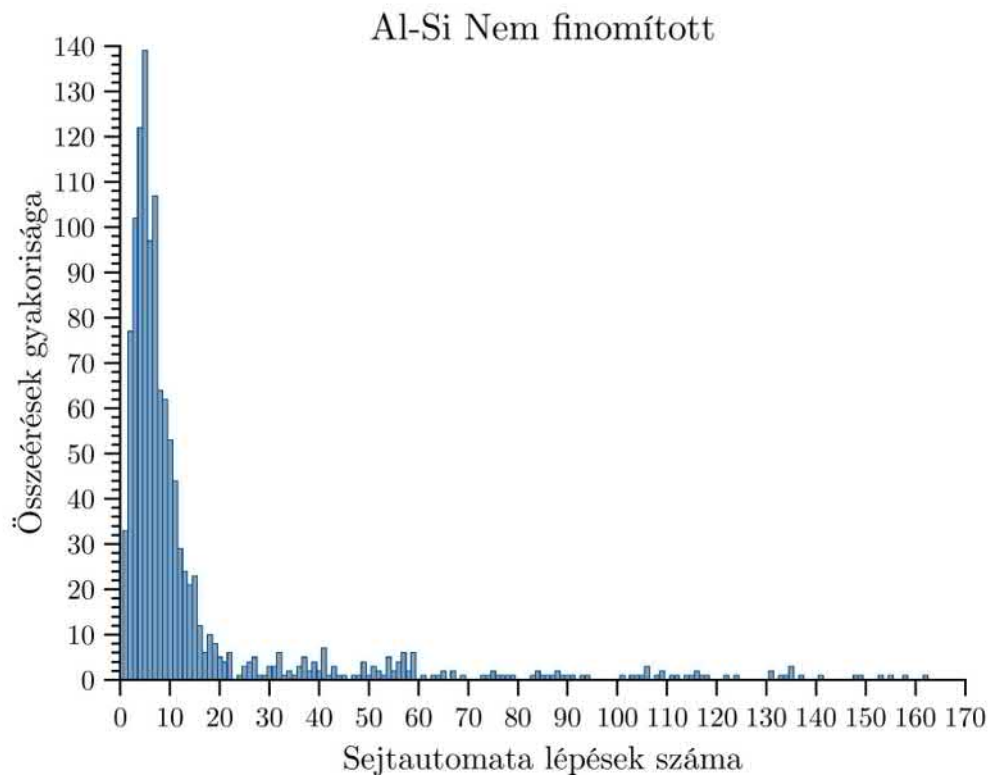
7.79. ábra: A kompakt grafitos öntöttvas objektum-összeérési hisztogramja.



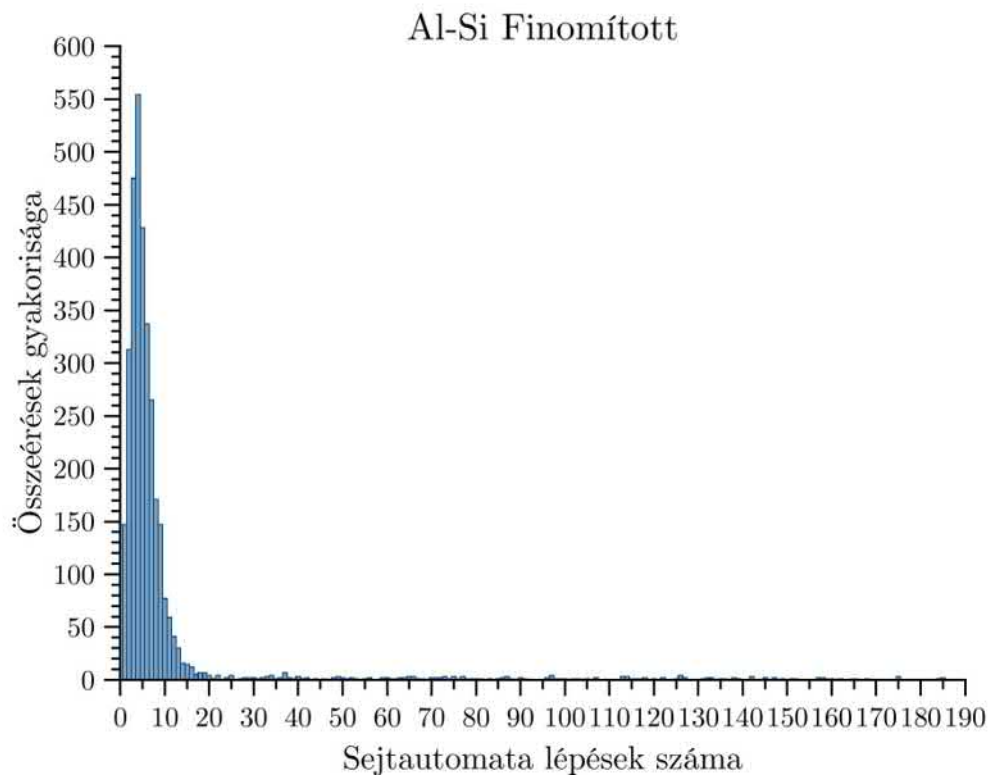
7.80. ábra: Az *Al-Ni* ötvözet objektum-összeérési hisztogramja.



7.81. ábra: Az *Al-Cu* ötvözet objektum-összeérési hisztogramja.

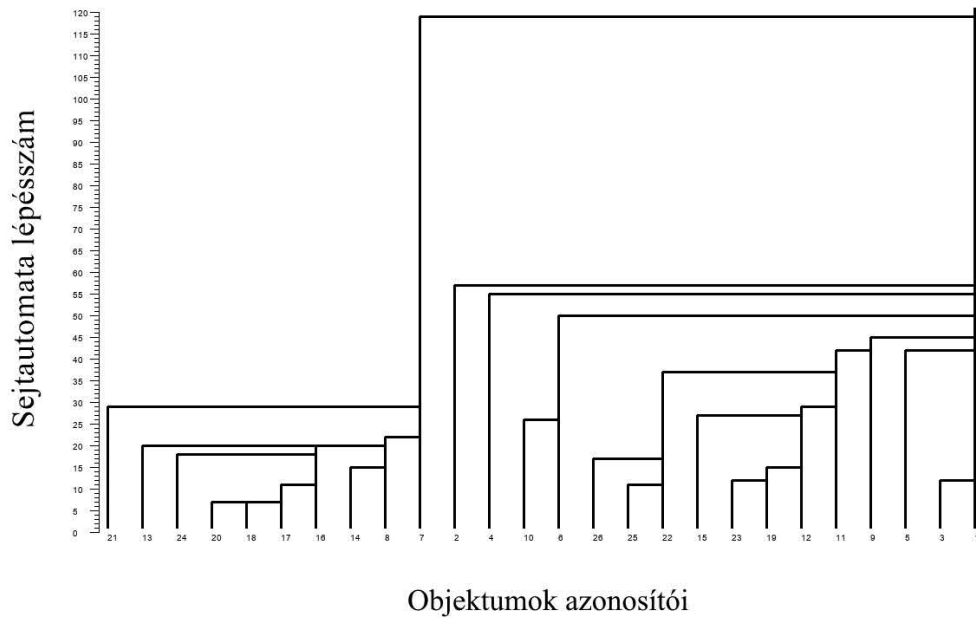


7.82. ábra: A nem finomított *Al-Si* ötvözet objektum-összeérési hisztogramja.

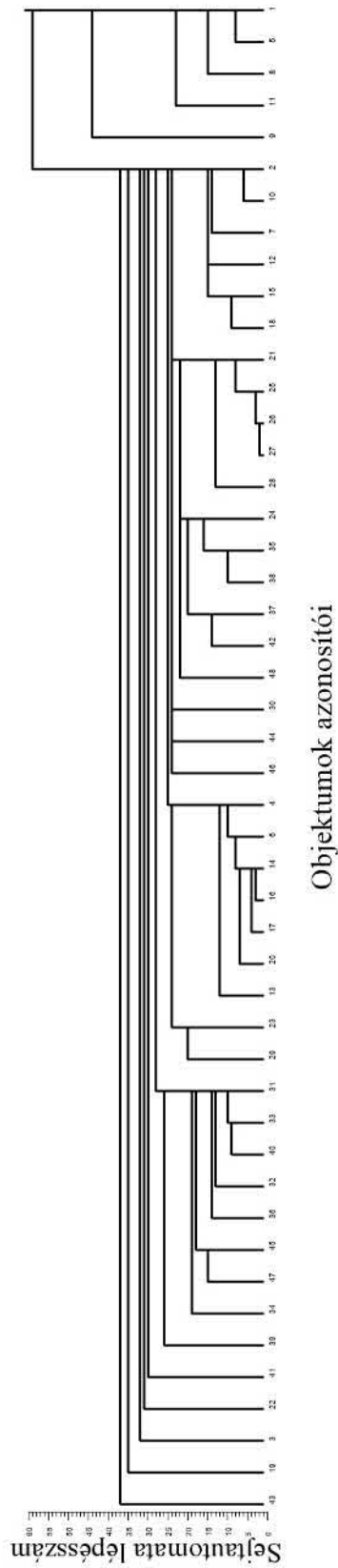


7.83. ábra: A finomított *Al-Si* ötvözet objektum-összeérési hisztogramja.

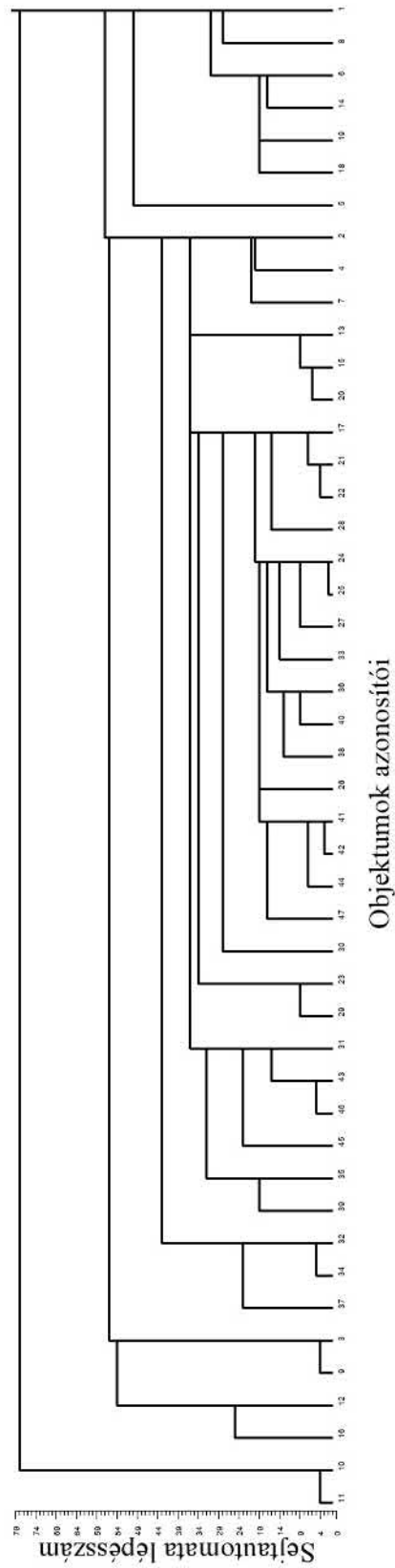




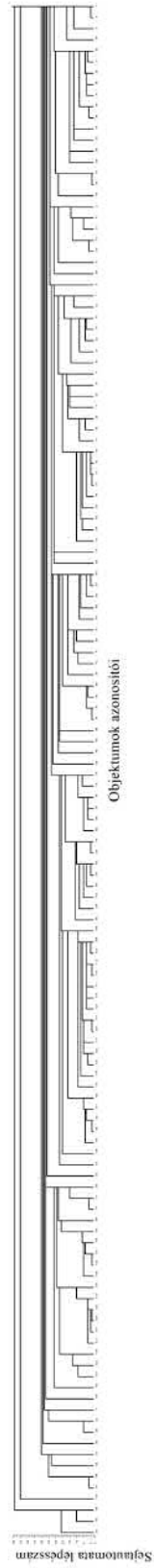
7.84. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas dendrogramja.



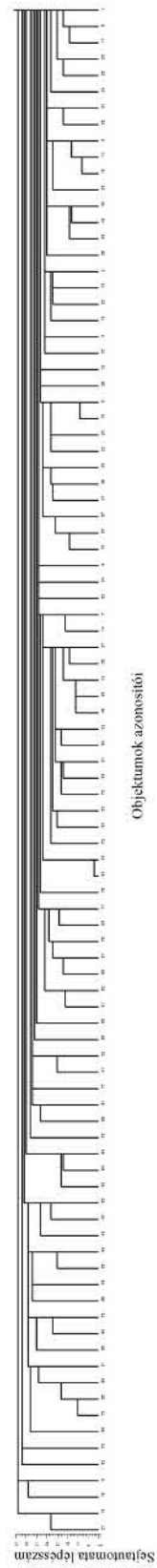
7.85. ábra: A lemezgrafitos öntöttvas dendrogramja.



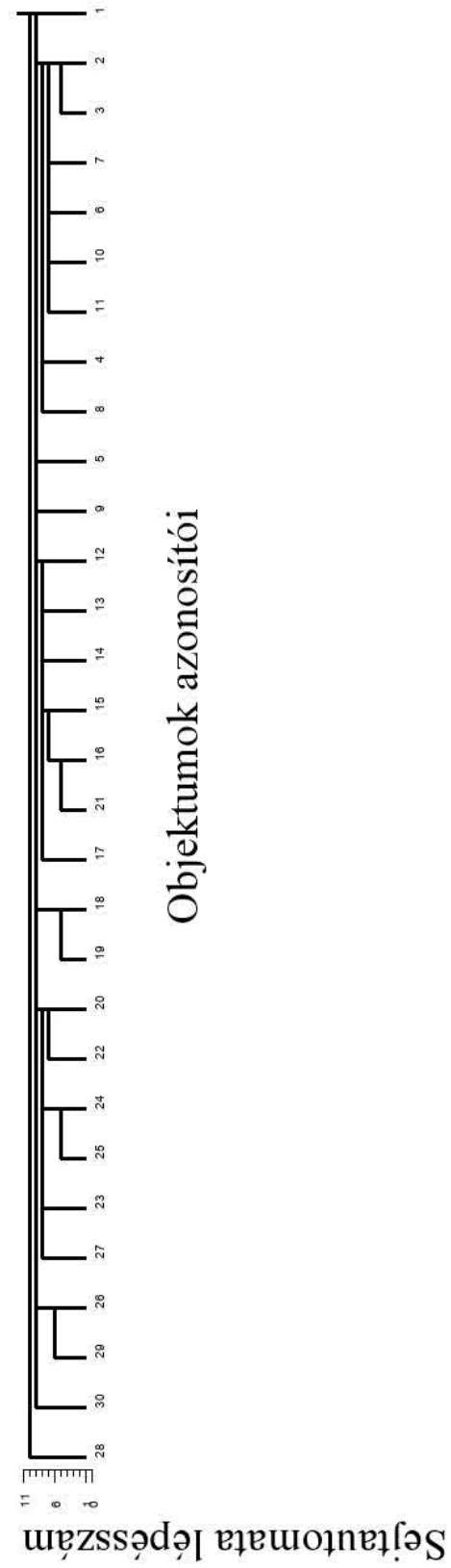
7.86. ábra: A kompakt („kígyós”) grafitos öntöttvas dendrogramja.



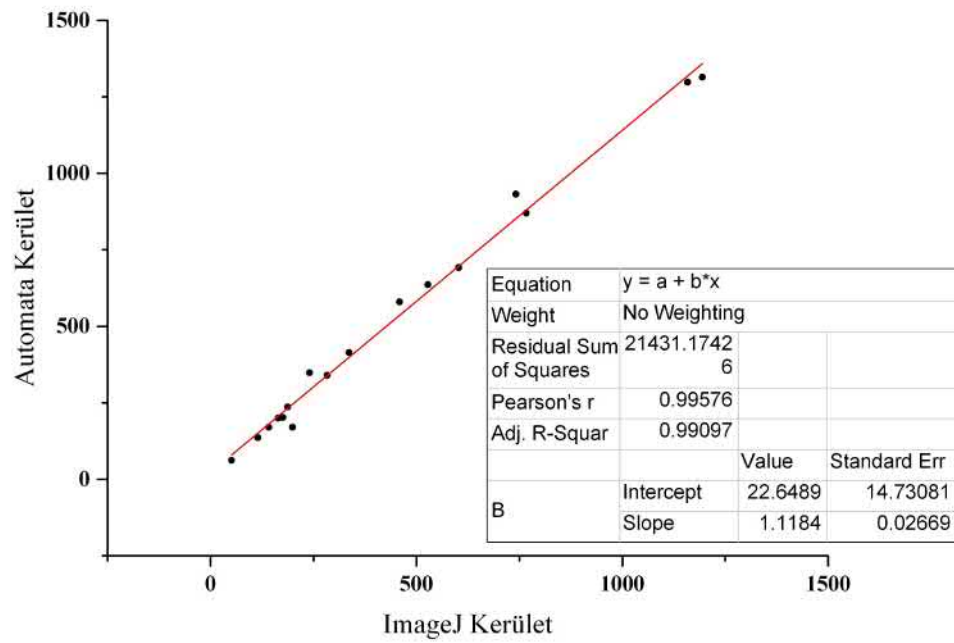
7.87. ábra: A kompakt grafitos öntöttvas dendrogramja.



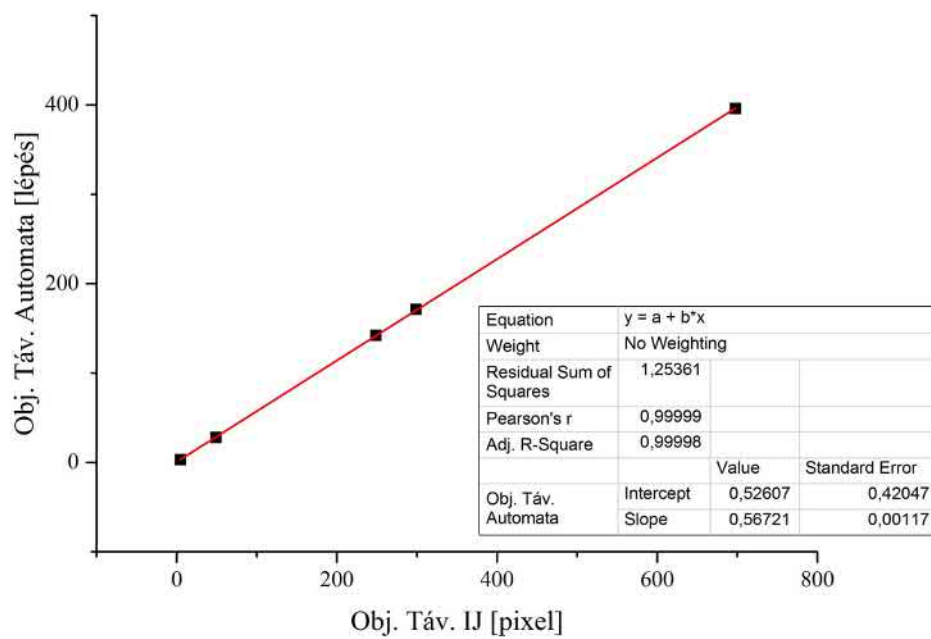
7.88. ábra: Az *Al-Ni* ötvözet dendrogramja.



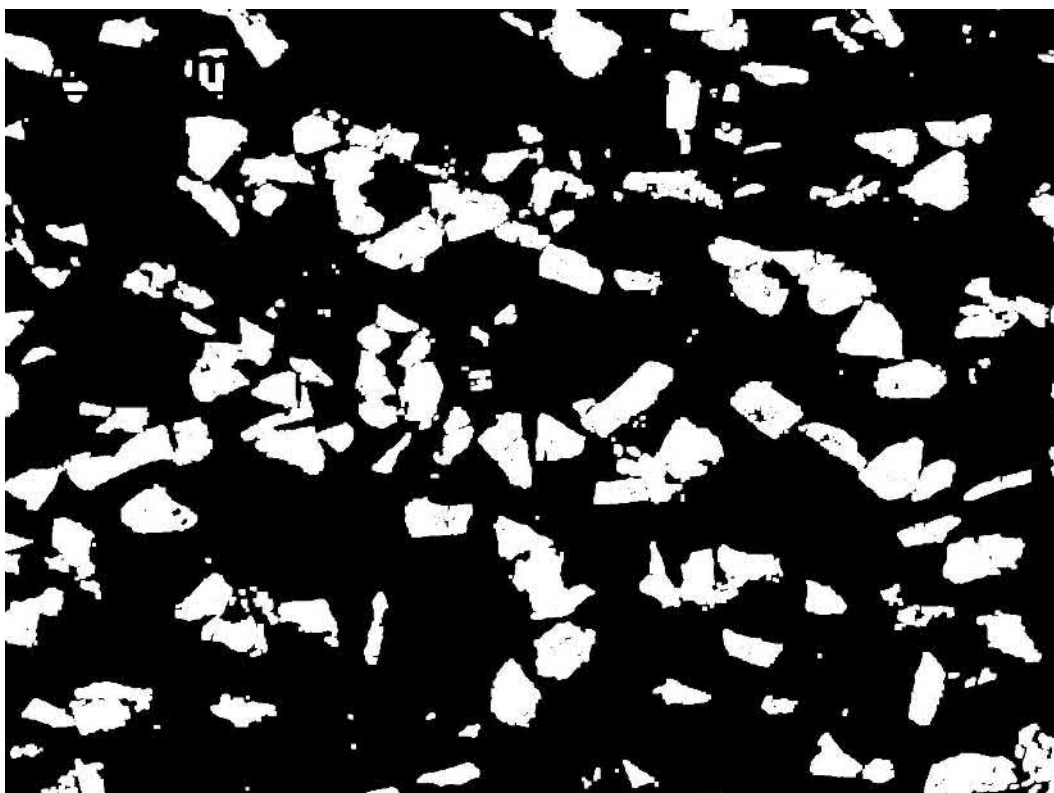
7.89. ábra: Az *Al-Cu* ötvözet dendrogramja.



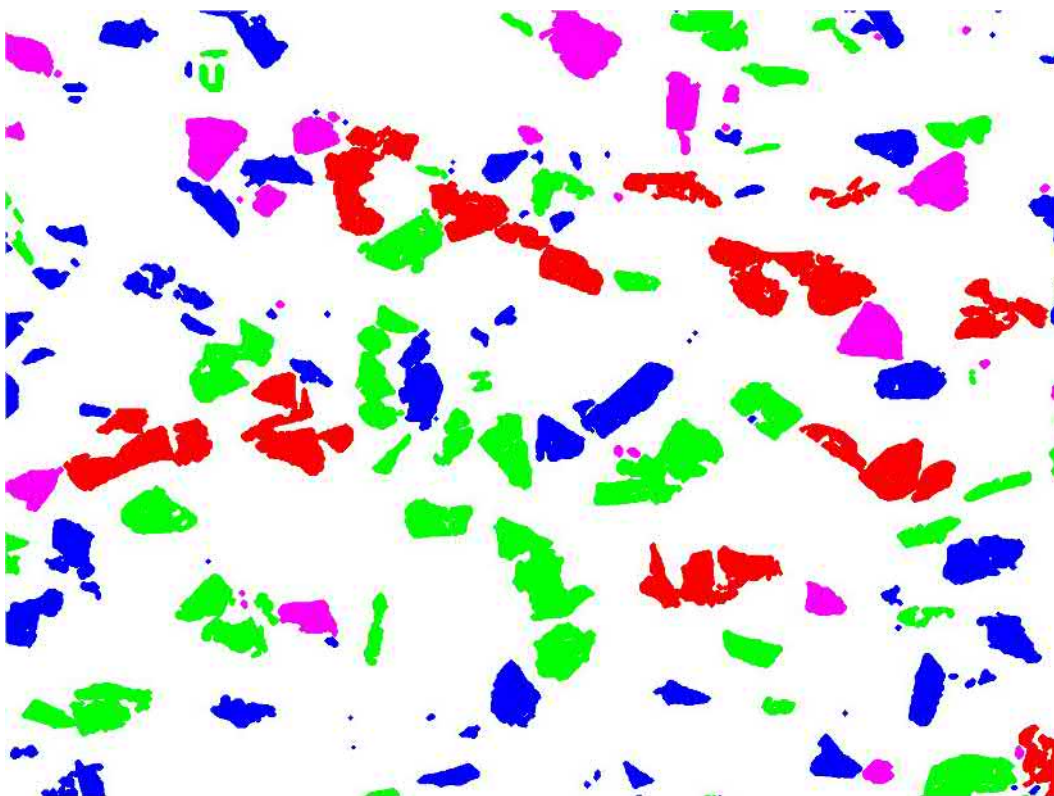
7.90. ábra: A sejtautomata kerületmérő kalibrációs diagramja.



7.91. ábra: A sejtautomata objektumok közötti távolságot mérő részének kalibrációs diagramja.



7.92. ábra: Az *Al-SiC20* kompozit 100-szoros nagyítású szegmentált képe.



7.93. ábra: Az *Al-SiC20* kompozit objektumai alak szerint színezve.





7.94. ábra: Az *Al-SiC20* kompozit objektumainak csoportjai a huszadik lépésben.