

Eutektikus szövetelemek automatikus számítógépi képelemzése

Bortnyik Kornél



Doktori Értekezés

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Fémtni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet
2020

Tartalomjegyzék

| | |
|---|-----------|
| 1. Az eutektikus szerkezet | 2 |
| 1.1. Az eutektikum kristályosodása | 2 |
| 1.2. Az eutektikumok morfológiája | 3 |
| 1.2.1. Az <i>Al-Si</i> ötvözetrendszer | 3 |
| 1.2.2. Az <i>Al-Ni</i> és az <i>Al-Cu</i> ötvözetrendszer | 7 |
| 1.2.3. Az öntöttvas | 8 |
| 1.2.4. Egyéb eutektikumok | 10 |
| 1.2.5. A klasszikus számítógépi képelemzés | 10 |
| 1.2.6. Sztereológiai alapfogalmak | 15 |
| 1.3. A képek érzékelése és kezelése | 15 |
| 1.4. Célkitűzés | 19 |
| 2. A sejtautomata | 21 |
| 2.1. A sejtautomaták osztályozása | 22 |
| 2.2. Egyszerű kétdimenziós sejtautomaták | 23 |
| 2.2.1. A Game of Life automata | 23 |
| 2.2.2. A Game of Life automata alkalmazása a számítógépi képelemzésben | 23 |
| 2.2.3. A páros-páratlan szabály | 24 |
| 2.2.4. A Q2R szabály | 25 |
| 2.2.5. A hőkezelő szabály | 26 |
| 2.2.6. A HPP szabály | 26 |
| 2.2.7. A HPP szabály alkalmazása | 28 |
| 2.3. Sejtautomaták a számítógépi képelemzésben | 28 |
| 2.4. Célkitűzés | 29 |
| 3. Az automatikus számítógépi képelemzés | 30 |
| 3.1. A képek előkészítése | 30 |
| 3.1.1. Az egyenlőtlen megvilágítás automatikus korrigálása | 31 |
| 3.1.2. A képek automatikus szegmentálása | 32 |
| 3.1.3. A háttér megkülönböztetése az objektumoktól | 32 |
| 3.2. A mérő sejtautomaták | 33 |
| 3.2.1. Az objektumok elrendeződése | 33 |
| 3.2.2. Az alakfelismerő algoritmus | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Az adatbányászat | 34 |
| 4.1. A klaszterelemzés | 35 |
| 4.1.1. Hierarchikus csoportelemzés | 35 |
| 4.2. Az osztályozó algoritmusok | 36 |
| 4.2.1. A tartóvektor-gép | 37 |
| 5. Anyagok és módszerek | 38 |
| 5.1. Az anyagok | 38 |
| 5.1.1. Az <i>Al-Cu</i> eutektikumok | 38 |
| 5.1.2. Az <i>Al-Ni</i> eutektikumok | 38 |
| 5.1.3. Az öntöttvasak | 39 |
| 5.1.4. Az <i>Al-Si</i> eutektikumok | 39 |
| 5.2. A képképző eszközök | 41 |
| 5.2.1. Az optikai mikroszkóp | 41 |
| 5.2.2. A pásztázó elektronmikroszkóp | 42 |
| 5.3. A mérést végző algoritmusok | 43 |
| 5.3.1. Az egyedi objektumokat jellemző algoritmus | 44 |
| 5.3.2. Az objektumcsoportok közötti jellemzőket mérő algoritmus | 44 |
| 6. Eredmények | 47 |
| 6.1. A különböző jellemzők | 47 |
| 6.1.1. Az alakfelismerés | 47 |
| 6.1.2. Az objektumok területének és kerületének a mérése | 63 |
| 6.2. Az automata alkalmazása a gyakorlati képelemzésben | 71 |
| 7. Új tudományos eredmények | 72 |
| 7.1. 1. Tézis | 72 |
| 7.2. 2. Tézis | 72 |
| 7.3. 3. Tézis | 73 |
| 7.4. 4. Tézis | 73 |
| 8. Összefoglalás | 74 |

Jelölések jegyzéke

| <i>jelölés:</i> | <i>mértékegység:</i> | <i>megnevezés:</i> |
|-----------------|----------------------|---|
| T | $^{\circ}C$ | olvadék hőmérséklete |
| T_L | $^{\circ}C$ | ötvözet likvidusz hőmérséklete |
| G_{α} | J/mol | az α fázis <i>Gibbs</i> energiája |
| G_L | J/mol | az olvadék <i>Gibbs</i> energiája |
| ΔG_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 |
| C | – | SVM költségfüggvénye |
| Φ | 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 ... |
| A | – | konstans |

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 nagyfelbontású 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 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 színtémekénél kisebb olvadáspont és a jó formakitöltő képesség miatt főleg az öntészeti alkalmazásoknál előny. Egy másik hasznos tulajdonsága az eutektikumoknak az, hogy a színtém mechanikai tulajdonságait az ötvözővel jelentősen lehet befolyásolni, és emiatt már nem csak gyártástechnológiai előnyt jelent az alkalmazásuk. Az eutektikumoknak a mikroszerkezete többféle lehet. Reguláris eutektikumról akkor beszélünk, mikor egyik fázis sem sík atomosan, míg irreguláris eutektikumról akkor, ha a második fázis hajlamos az atomosan sík felület kialakítására. Atomosan sík felülettel történő növekedés azt jelenti, hogy mindig az 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. A kialakuló irreguláris szerkezetek skálája széles, amit nagymértékben az atomosan sík fázis térfogatszázaléka befolyásol. 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 kialakulása 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]

1.1. Az eutektikum kristályosodása

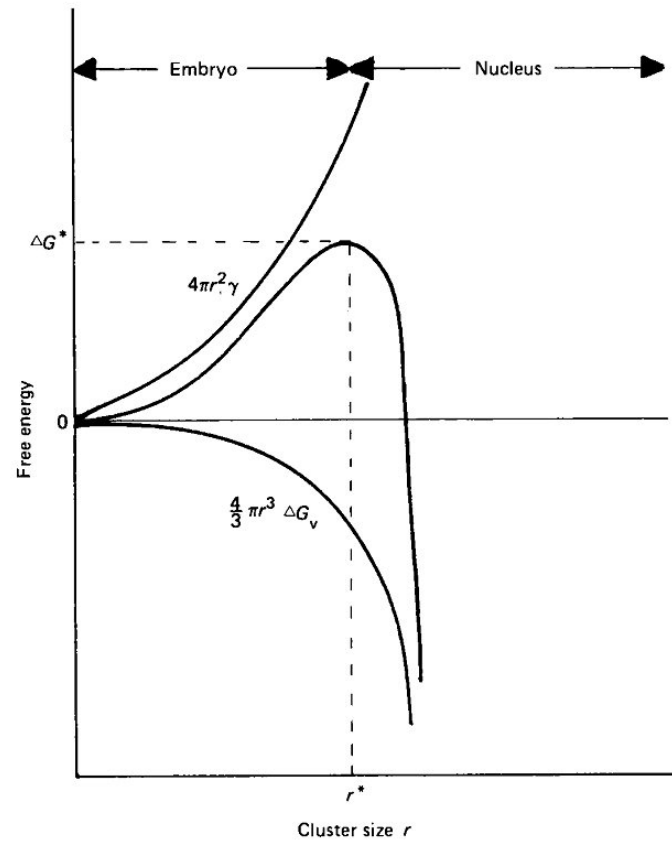
Ha az ötvözet eutektikus összetételű, akkor ez esetben a szilárd állapotban megtalálható szövetelem csak eutektikum lesz. Az olvadt állapotból szilárd állapotba kerülés közben a rendszerben kristályosodás történik. A kristályosodás a csíráképződéssel indul. A

csíráképződés akkor indul el ha az olvadék hőmérséklete $T < T_L$ és így $G_\alpha < G_L$. A csíráképződés hajtóereje a szilárd és olvadék állapot közötti szabadentalpia különbség. A csíráképződés elindul, ha a kritikus csírámérettől nagyobb csírák tudnak képződni. A kritikus csíráméret a ΔG_v függvénye, amint az a 1.1 ábrán látható. Ez a jellemző érték a túlhűtés mértékétől függ. A másik befolyásoló tényezője a kritikus csíráméretnek a felületi többlet energia, ez azonban nem függ olyan erősen a hőmérséklettől. Így ha a túlhűtés mértéke nagyobb, abban az esetben kisebb lesz a kritikus csíráméret, ennek következménye a finomabb szemcseszerkezet. A csíráképződést a csíranövekedés követi. Ha a csíra ötvözőben szegény, akkor körülötte lévő olvadék az ötvözőben dúsul. Így a csíra mellett ötvözőben dús lesz a megszilárdult rész. 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 a 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 dús. Ez látható a 1.3 és a 1.4 ábrákon. [2][4]

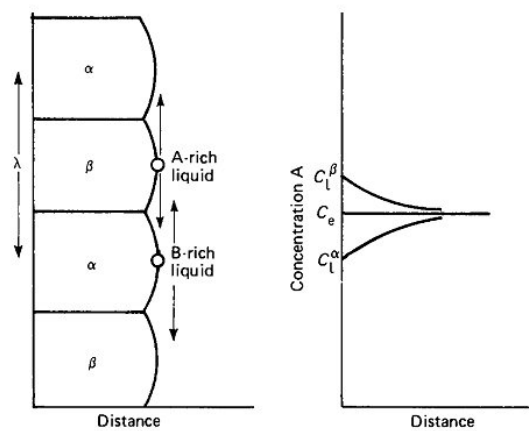
1.2. Az eutektikumok morfológiája

1.2.1. Az $Al-Si$ ötvözetrendszer

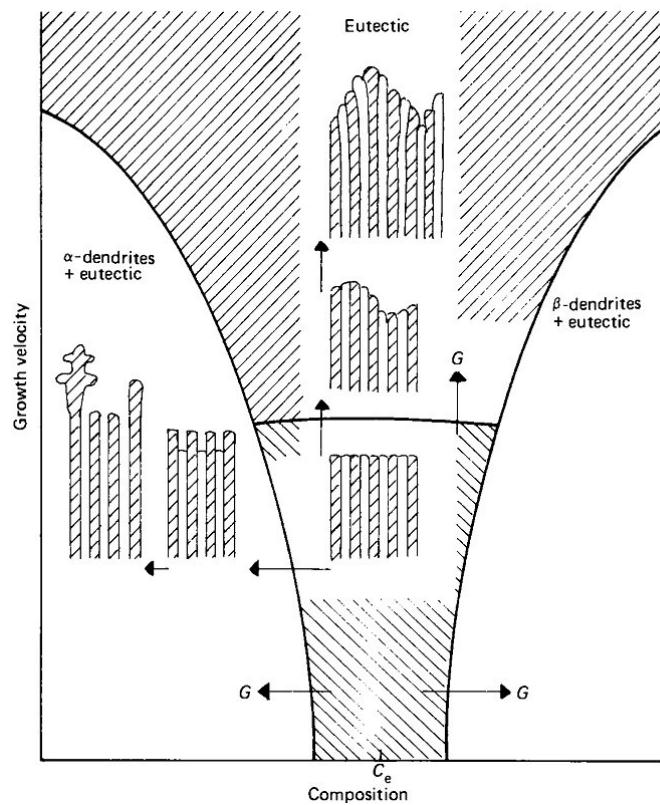
Az $Al-Si$ ötvözetek napjainkban nagyon elterjedtek. Felhasználása főleg a járműiparban terjedt el. Legfőbb előnyük a kicsi sűrűségük, a könnyű önthetőségük, melynek köszönhetően bonyolult és komplex alakú, valamint vékonyfalú öntvényeket lehet előállítani. Napjainkban az autóipar részéről folyamatosan 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 öntvöző 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 korlátolt oldhatósággal rendelkezik. A szilícium oldhatósága az alumíniumban 1,65% az eutektikus hőmérsékleten. Az alumínium-szilícium ötvözet megszilárdulása során, először primer alumínium





1.1. ábra. A kritikus csíraméret szabadentalpia függése. [2]

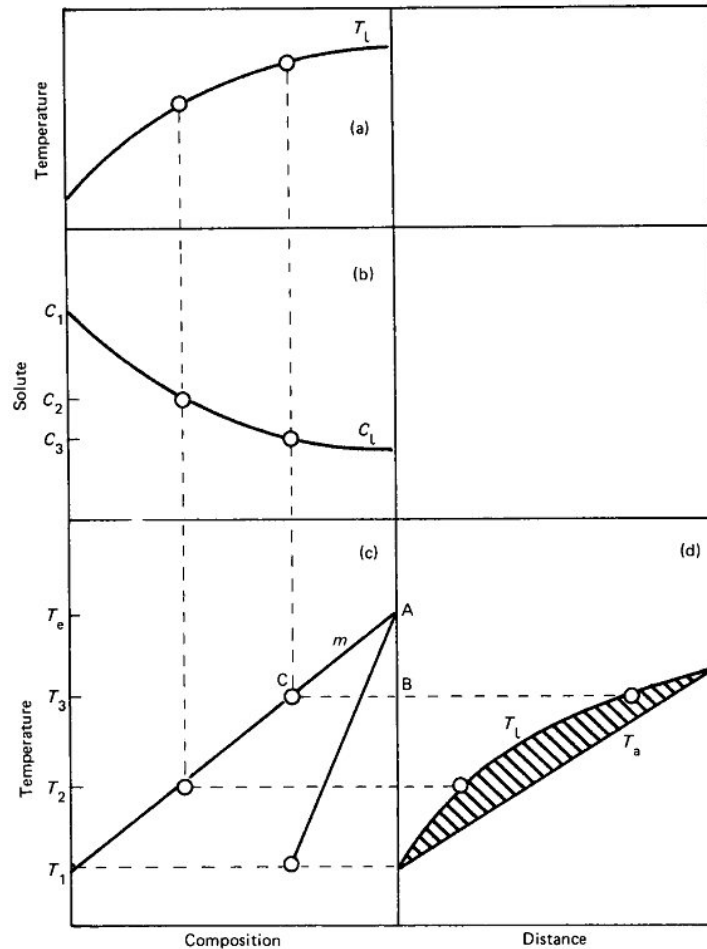


1.2. ábra. Az eutektikum növekedése. [2]



1.3. ábra.

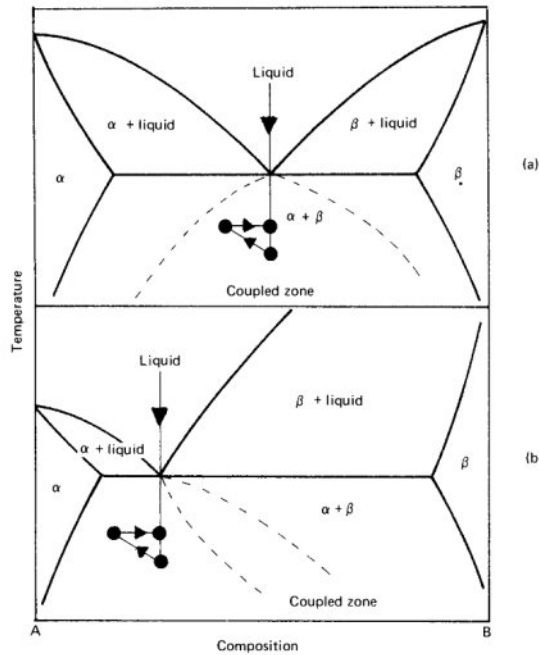
A normál ötvözetnek a növekedési sebessége. Síkfrontos a kristályosodás a  területen, a  területen sejtes határfelületű eutektikus növekedés megy végbe. A függőleges struktúra változás mutatja be a két fázis instabilitását; a vízszintes változás az egyfázisú instabilitást. A G nyilak mutatják a határfelület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



1.4. ábra.

Összetételei túlhűlés. a) A likvidusz hőmérséklet változása a távolság függvényében, b) Az olvadék koncentráció változása a távolság függvényében, c) Fázis diagram, d) A likvidusz hőmérséklet változása, a T_L és az aktuális T_a változása a távolság függvényében. [2]

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, az ideális gömbhöz



1.5. ábra.

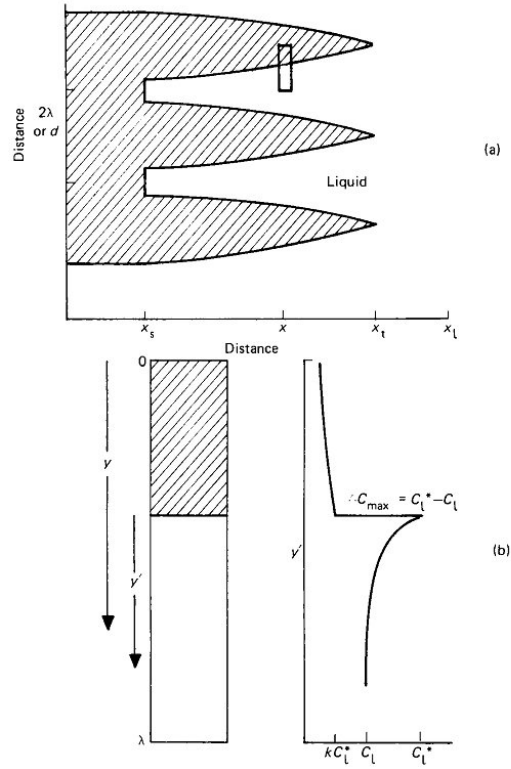
a) Egy tipikus eutektikum fázisdiagramja, mint pl.: $Pb-Sn$ b) Egy nem reguláris szerkezetű eutektikum fázisdiagramja, mint pl.: $Al-Si$. A nyilak a kristályosodás folyamatát mutatják. Az a) esetben a kapcsolt zónában van, a b) esetben a kapcsolt zónán kívül. [2]

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 módosított 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]

1.2.2. Az $Al-Ni$ és az $Al-Cu$ ötvözetrendszer

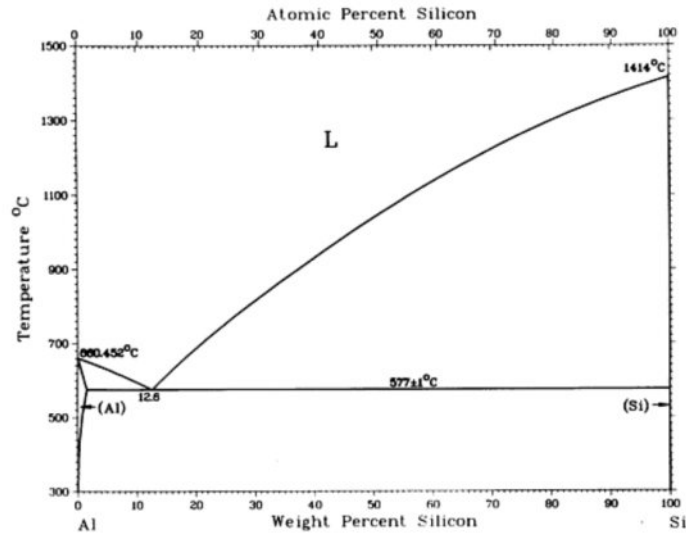
Az $Al-Ni$ ötvözetrendszer a kutatók soraiban népszerű modellanyag. A kristályosodás folyamatára ható jelenségeket vizsgálják. Ilyen például a gravitáció, mágneses tér, stb. Az anyag mikroszerkezetéből sok információ nyerhető annak kristályosodásáról. Kutatásomban az $Al-Ni$ ötvözetrendszer eutektikus tartományát vizsgálom. Ebben az esetben Al mátrixban Al_3Ni rudas eutektikum képződik. [95] [96]

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 hipoeutektikus ötvözetek nemesíthető Al ötvözetek. A KGST korszakban nagy mennyiségben használták a járműgyártásban. Mára a jelentősége csökkent a drága réz miatt. [97] [98]



1.6. ábra.

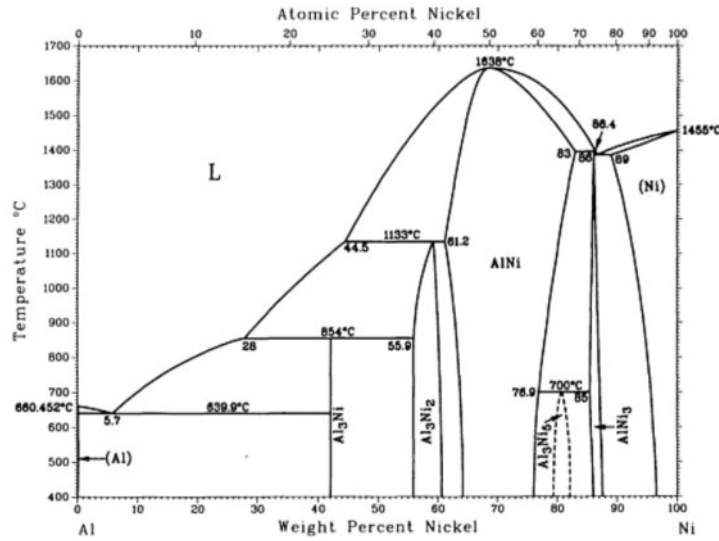
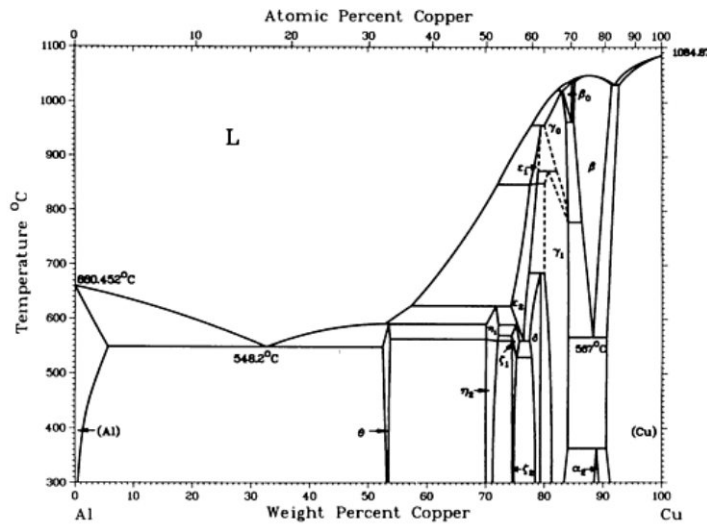
a) Sematikus ábra a dendritekről az olvadékban. b) Nagyított rajz az elemi térfogatról x pozícióban, amely az ötvöző koncentráció-eloszlását mutatja. [2]



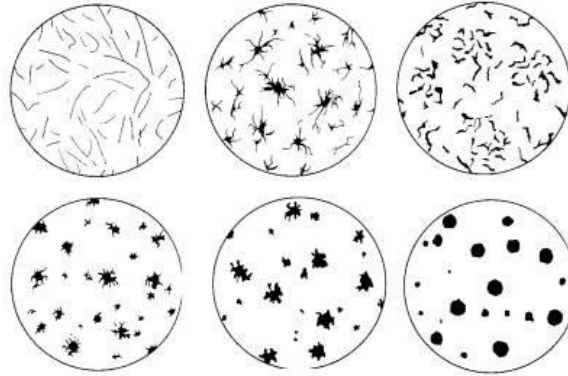
1.7. ábra. Az $Al-Si$ ötvözet fázisdiagramja. [14]

1.2.3. Az öntöttvas

Az öntöttvas a vasötvözeteknek olyan fajtája, amelyeknek a kristályosodása közben eutektikum keletkezik. A karbon stabil grafit, vagy metastabil Fe_3C formájában je-

1.8. ábra. Az *Al-Ni* ötvözet fázisdiagramja. [14]1.9. ábra. Az *Al-Cu* ötvözet fázisdiagramja. [14]

lenik meg a vasötvözetekben. A vasötvözeteknek két fő csoportja van, a fehértöretű, vagy a szürketöretű. Az eutektikumának két alaptípusa létezik, az egyik ausztenit – grafit fázisokból áll, a másik ausztenit – Fe_3C fázisokból képződő ledeburit. A fémek 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 rezgéscsillapító képessége, a korrózióállósága. Jól megmunkálható, mert a benne található grafitlemezek kenik a forgácsoló szerszámot. Hátránya ugyanakkor, hogy nem



1.10. ábra. A grafitalakok etalon képei. [86]

szívós, nincs mérhető nyúlása és a szilárdsága is kicsi. Felhasználási területei: járműipar, mezőgazdasági gépipar, építőipari berendezések, bányaiipari 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 három féle alakban kristályosodhat. A grafit morfológiájának kialakulásában sok tényező játszik szerepet pl.: hűtési sebesség, kémiai összetétel, hőmérséklet/növekedési sebesség hányados. A lemezgrafit 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 grafittól eltérően polikristallit. A gömbgrafit kialakulásának és növekedésének magyarázatára sokféle elmélet létezik. A grafit morfológiájának meghatározására etalonképeket használnak. A szabványban meghatározott etalonsorozatot mutatja a(z) 1.10 ábra. [86] [11]

1.2.4. Egyéb eutektikumok

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

1.2.5. A klasszikus számítógépi képelemzés

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. A látótér átlagadatai a következők lehetnek:

- Abszolút terület: A mérőkereten belül lévő detektált képpontok száma.
- Kerület: A mérőkereten belül detektált és nem detektált objektumok közötti határvonal hosszúsága.
- Vízszintes metszésszám: A mérőkereten belül detektált objektumokon keresztül húzott vízszintes hurok végeinek darabszáma.
- Függőleges metszésszám: A mérőkereten belül detektált objektumokon keresztül húzott függőleges hurok végeinek darabszáma.
- Területarány: A mért terület osztva a mérőkeret területével.
- Látótér anizotrópiája.
- Mérőkeret területe.
- Anizotrópia: A vízszintes metszésszám osztva a függőleges metszésszámmal.
- Kitöltöttség: A mért terület osztva a nem szegmentált területtel.

Az objektumok jellemzőinek mérésekor azokat az objektumokat vesszük figyelembe, amelyeknek egy megkülönböztetett pontja (FCP, feature count point) a mérőkereten belülré esik. Ilyen pont lehet pl.:

- A legalsó 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. Az objektum jellemzők a következők lehetnek:

- Az objektumok egyedi területe.
- Az objektumok konvex területe: Az objektum köré rajzolt konvex burok területe.
- Az objektumok egyedi kerülete.
- Az objektumok konvex kerülete.
- Az objektumok *Feret* átmérője: A legtávolabbi kontúrponatok távolsága adott irányban.
- Az objektumok hosszúsága (a legnagyobb átmérő).
- Az objektumok szélessége (a legkisebb átmérő).
- Az objektumok ortogonális átmérője (a hosszúságra merőleges átmérő)
- Az objektumok orientációja: A legnagyobb *Feret* átmérőhöz tartozó szög.
- Az objektumok helyzetére jellemző adatok
- Az objektumok körszerűsége: $\frac{P^2}{4\pi \cdot A}$ Értéke 1 esetén az objektum körszerű.

A további vizsgálható jellemzők a topológiai jellemzők. Ilyenek a következők:

- Az objektumok távolsága.
- Az objektumok határfelületeinek távolsága.
- Az objektumok elrendeződése (négyzetes, hatszöges, véletlenszerű, stb.).
- A legközelebbi szomszédok átlagos távolsága.
- A legközelebbi szomszédok távolsága.
- Hatósugár szerinti vázszerkezet átmérője.
- A szomszédok távolsága.
- A szomszédok átlagos távolsága.
- Az objektumok csoportosulásának jellemzői.
- Négyzetes cellák sűrűségfüggvénye.
- Párkorrelációs függvénye.
- Kovariancia.
- *Voronoi-mozaik*.

Az objektumok közötti távolságot többféle módon definiálhatjuk. Lehetséges például a legközelebbi kontúrponatok távolsága, vagy pl.: tetszőleges FCP-k távolsága. Amennyiben a tetszőleges FCP-unk a súlypont akkor a konkáv objektumok felvetnek egy problémát, mégpedig azt, hogy a súlypontjuk nem minden esetben esik a síkidomon belülré. Az objektumok csoportosulásának kimutatására, és a csoportosulás jellemzésére többféle módszer adott.

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 párkorrelációs 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:

$$H(r) = \frac{N_{ra}}{N_a} \quad (1.1)$$

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:

$$KOV(X, Y) = E \{ [X - E(X)] [Y - E(Y)] \} \quad (1.2)$$

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{B} . Ha a képpont a háttérhez tartozik az értéke 0, ha objektumhoz akkor az értéke 1. Toljuk el a \overline{B} halmazt \vec{h} translációs vektorral. Az eredeti halmaz (\overline{B}) és az eltolt halmaz $(\overline{B} + \vec{h})$ metszetének segítségével a kovarianciához $KOV(\overline{B} + \vec{h})$ jutunk:

$$KOV(\overline{B}, \vec{h}) = E \left\{ Mes \left[(\overline{B}) \cap (\overline{B} + \vec{h}) \right] \right\} \quad (1.3)$$

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

egymásba 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 eléink 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 területeit szűrjük majd ki, így minden objektum hatósugár szerinti területe benne marad az objektum képben. 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 feloszlását 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:

$$M_i = \{m_i : d(m_i, p_i) < d(m_i, p_{j \neq i})\} \quad (1.4)$$

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]

1.2.6. 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.

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.

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

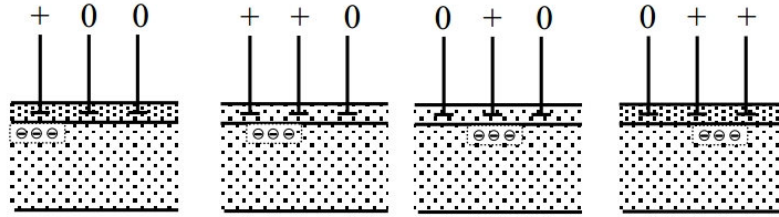
Azonban a számítógépi képelemzésben egy diszkrét világban dolgozunk, amelynek alapegysége a pixel. Így itt lehet értelmezni az ún. „city block távolság”, vagy „Manhattan távolság” fogalmát. A 1.6 összefüggés „city block távolságot” írja le.

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

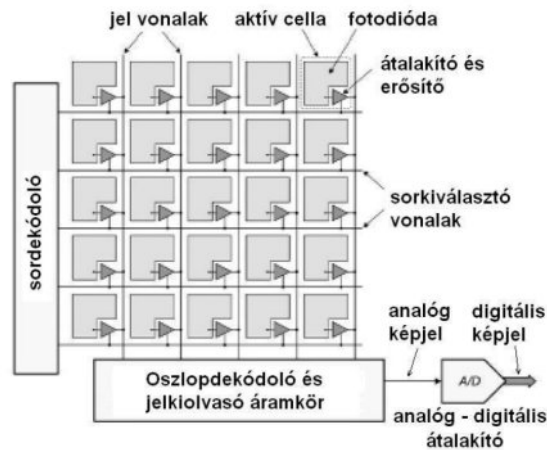
A „city block távolság” egyik tulajdonsága az, hogy nem egyértelmű, azonban ha mindig a cél felé teszünk egy-egy lépést, akkor a különböző utak hossza egyforma. Továbbá ennek használatával nem fordulhat elő, hogy két képpont közötti távolság nem egész értékre adódik. [21] [22] [23] [24] [25]

1.3. A képek érzékelése és kezelése

Ahhoz, hogy a szövetképeket számítógép segítségével feldolgozni, mérni tudjunk, 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 képpont-hoz elhelyezhető egy foton - feszültség átalakító, így ez az eszköz sor- és oszlop címzéssel rendelkezik, azaz az érzékelő minden képpontja címezhető. A CCD esetében viszont az elemi érzékelők értékei sorosan kerülnek kiolvasásra, így a pixelek címzése 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. Ez látható 1.11 ábrán. A CCD-k előnye a

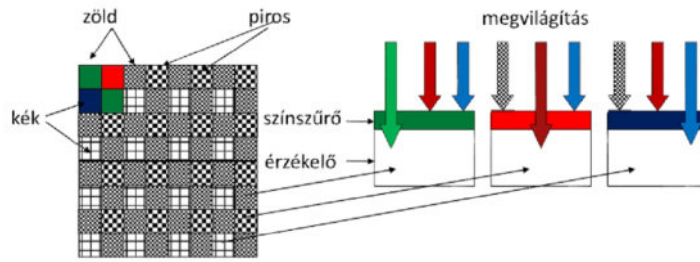


1.11. ábra. A CCD képérzékelőben a töltések továbbításának módja. [44]

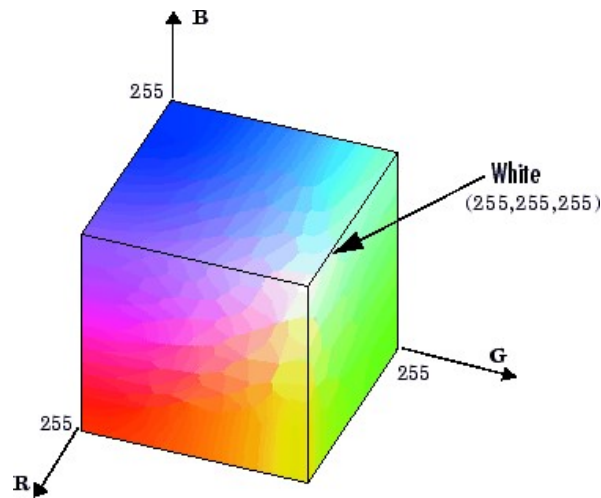


1.12. ábra. A CMOS képérzékelő felépítése. [44]

nagyobb érzékenységük 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 1.12 ábrán látható. A cellaerősítők kimenetei oszloponként közös jelvonalakra csatlakoznak. A sorkiválasztó vonal az erősítő kimenetét engedélyezi vagy letiltja. A sorkiválasztó vonalakat az oszlopdekódoló 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*) 1.13 ábra —, vagy egymás alá rétegesen. Az első megoldás egyszerűbb, de sok hátránya van. Ezek: kisebb valódi pixelszám,



1.13. ábra. A Bayer-szűrő. [44]



1.14. ábra. A színekocka. [45]

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 alapszínként 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 egy színekockában ábrázolható, —(1.14 ábra)—, ahol a kocka sarokpontjain szerepel a három színkomponens. Az origóban található a fekete szín — itt mind a három színkomponens intenzitásértéke nulla – a fehér pedig a mindhárom színkomponens maximális intenzitásértékénél. A három független színkomponensből 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 színkomponens intenzitás értékét, azaz az intenzitás felbontása 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 színkomponens 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:

$$\begin{aligned} v_1 &= Ar_1 \cdot R + Ag_1 \cdot G + Ab_1 \cdot B \\ v_2 &= Ar_2 \cdot R + Ag_2 \cdot G + Ab_2 \cdot B \\ v_3 &= Ar_3 \cdot R + Ag_3 \cdot G + Ab_3 \cdot B \end{aligned} \quad (1.7)$$

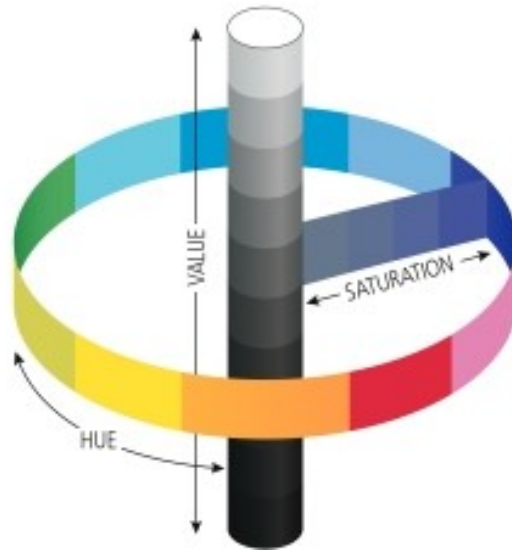
Hasonlóképpen bármely ilyen rendszerhez lineáris függvények használhatóak az RGB térbe való visszatranszformáláshoz. A D_r , D_g , D_c együtthatók a fenti egyenletek R , G , B megoldásával oldhatók meg. Például:

$$\begin{aligned} R &= Dr_1 \cdot v_1 + Dg_1 \cdot v_2 + Db_1 \cdot v_3 \\ R &= Dr_2 \cdot v_1 + Dg_2 \cdot v_2 + Db_2 \cdot v_3 \\ R &= Dr_3 \cdot v_1 + Dg_3 \cdot v_2 + Db_3 \cdot v_3 \end{aligned} \quad (1.8)$$

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 fénysűrűséget 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 fénysűrűséget, 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 alkalmazzák (megfelelő gamma-korrekció 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.

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B \\ Cr &= 0,701 \cdot R - 0,587 \cdot G - 0,114 \cdot B \\ Cb &= -0,299 \cdot R - 0,587 \cdot G + 0,886 \cdot B \end{aligned} \quad (1.9)$$

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



1.15. ábra. A HSI színrendszer szemléltetése. [46]

jelentősen csökken, azonban az eredeti kép is jobban különbözik a tömörítettől. Ezért a számítógépi képelemzés alkalmazásánál ügyelni kell a kép helyes tömörítésének módjára, hogy az információvesztést elkerüljük. Figyelembe véve az emberi látás „preferenciáját” a fénysűrűség 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 fénysávcsatorna egy byte-ként tárolódik minden egyes képpontnál, de a két színtartományt csak az egyes 4×4 méretű blokkok tárolják. A kapott kép $1/3$ -a az eredeti képnél. 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 feketefehér televíziózásban használt színek intenzitását megjelenítő szürke képek használata. A színek intenzitásának megértéséhez a HSI színrendszert kell megismerni, 1.15 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. [38] [39] [40] [41] [42] [43] [47] [44]

1.4. Célkitűzés

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.

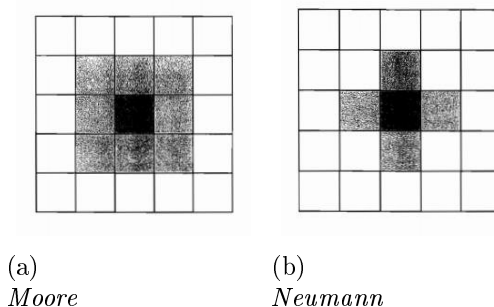
Mielőtt az eutektikumokat jellemző mérést végrehajtaná, az algoritmus azelőtt egy alakfelismerés történik, hogy a meghatározott négy alakból (lemezes, „kígyós”, gömbös, kompakt) melyekhez tartoznak az objektumok. Az objektumok távolsága, szabályosságok az elrendezésükben, jellemző nagyságuk – ez gömbös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

2. fejezet

A sejtautomata

A sejtautomata egy időben és térben diszkrét modellezési módszer, amit az 1940-es években fejlesztett ki Neumann János és Stanislaw 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 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 négyzetrácscsal 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 rácsban egy sejt. A sejt szomszédság megadására több mód is létezik. Ilyen pl.: *Moore-szomszédság*, vagy *Neumann-szomszédság*. Ezek láthatóak a 2.1 ábrán. [30] [26]

2.1. ábra. A (a) *Moore-féle* és (b) *Neumann-féle* szomszédságok. [26]

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 eltűntet 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 stabillá

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. [29]

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


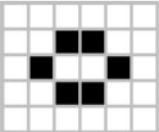
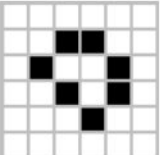
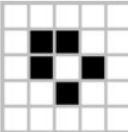
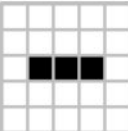
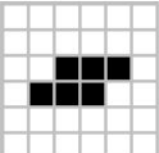
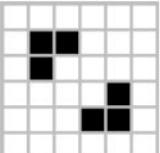
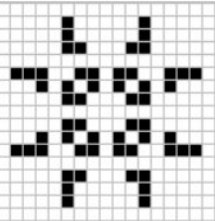
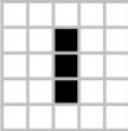
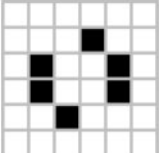
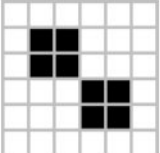
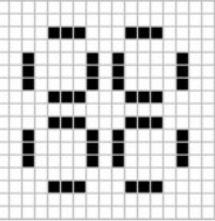
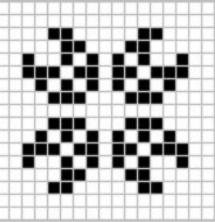
Az 1970-es években John Horton Conway a Neumann János által kidolgozott módszert igyekezett a lehető legegyszerűbbre módosítani. Az általa megalkotott *The Game of Life* nevű kétállapotú kétdimenziós sejtautomata, hamar ismertségre és népszerűsége talált. A sejtekhez két állapot van rendelve, élő vagy 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 „oszcillátor”, „úrhajó”, „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 életjátékra 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

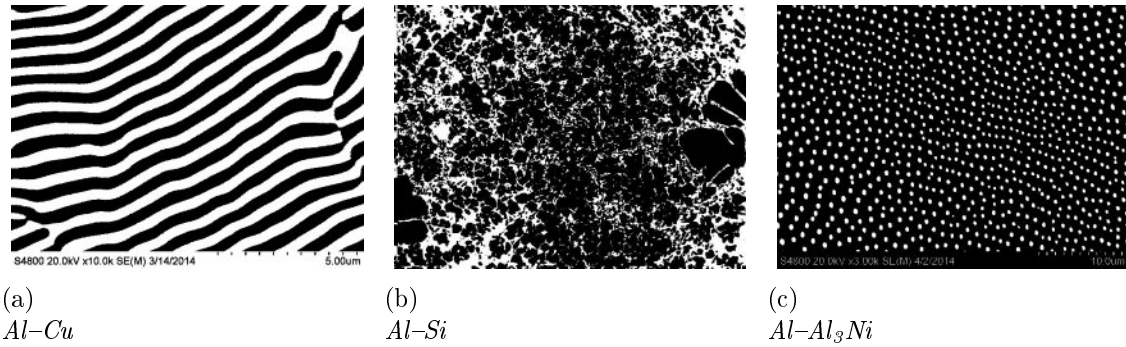
| | | | |
|---|--|---|---|
|  |  |  |  |
| stabil alakzatok | | | |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| n/a | n/a | n/a |  |
| oszcilláló alakzatok | | | |

2.2. ábra. A Game of Life automata alakzatai [26]

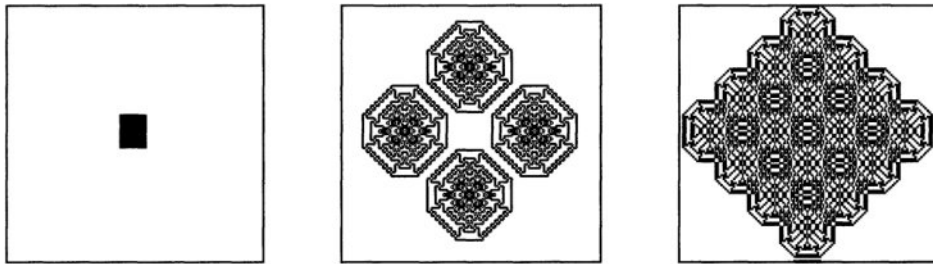
módra az életjátékszerű automaták közül csak ez az egy használható erre az elemzésre, mert a többi vagy kaotikus képed ad, vagy növekvő populációkat. Ebben az esetben a megmaradó populációk elemzéséből lehetséges eldönteni, hogy mi volt a képen. Azonban ez a módszer visszavezet a klasszikus képelemzési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

2.2.3. A páros-páratlan szabály

A páros-páratlan szabály egy nagyon egyszerű sejtautomata, ami komplex viselkedést mutat. Edward Fredkin alkotta meg ezt az automatát az 1970-es években. Az univerzumot négyzetes sejtek alkotják. Mindegyik sejt állapotát 0 vagy 1 jelöli. A Neumann szomszédságot és a periodikus határfeltételt használ az automata. Minden sejt vizsgálatakor a szomszédságában lévő sejtek állapota összegeződik, és ha a kapott érték



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



2.4. ábra. A páros-páratlan szabály futása során keletkező alakzatok. [30]

páratlan, akkor a sejt állapota 0 értékű lesz, ha páros, akkor 1 értéket fogja felvenni.

2.2.4. A Q2R szabály

A Q2R automatát az 1980-as években G. Vichinac mutatta be. Az *Ising-féle* spin modell megoldására készítette el ezt az automatát. Ez az automata is négyzetes sejt-rácsot használ. A sejtek állapota 0 (negatív spin) vagy 1 (pozitív spin) lehet. Az automata működése során a spinek fordulnak át pozitív vagy negatív irányba az állapotváltozásokon keresztül. Jelölje a pár-kölcsönhatások energiáját E_p . Ha az egymás mellett lévő sejtek spinje azonos, akkor a párkölcsönhatás energiája $-E_p$, ha eltérők akkor $+E_p$. Egy sejt akkor válthat állapotot, ha az állapotváltozást kísérően nem történik energiaváltozás. Azaz egy sejt akkor vált 1-es állapotra, ha a Neumann-féle szomszédságában egyenlő számú 0 és 1 állapotú sejtek találhatók. A spinváltás azon a feltételen alapul, hogy a környezet nem változik meg. A sejtautomata működése során, azonban sorra vizsgáljuk a sejteket egy lépésben, amivel megsértjük az energia megmaradás törvényét, hiszen a folyton változó szomszédságokkal nem biztosítható a spinváltás feltétele. Ezt a problémát úgy oldja meg a Q2R automata, hogy a sejtek rácsát két alrácra osztja, úgy, mint a sakktábla fehér és fekete mezői. Páros számítási lépésben az egyik alrácban történik csak spinváltás, míg páros lépésben csak a másik alrácson történik. Ez megköveteli egy új állapotjelző hozzárendelését a sejtekhez, ami azt jelöli, hogy az adott sejt melyik alrácshoz tartozik. Ha a sejtek pozícióját (i, j) jelöli, az alrácshoz tartozást b , aminek értéke 0 vagy 1 lehet alrácstól függően, akkor a sejt állapotának változása, és az automata működése a következő összefüggéssel írható le.

$$s_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1 - s_{ij}(t), & \text{ha } b_{ij}(t) = 1 \text{ és } s_{i-1,j} + s_{i+1,j} + s_{i,j-1} + s_{i,j+1} = 2 \\ s_{ij}(t), & \text{egyébként} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$b_{ij}(t+1) = 1 - b_{ij}(t) \quad (2.2)$$

2.2.5. A hőkezelő szabály

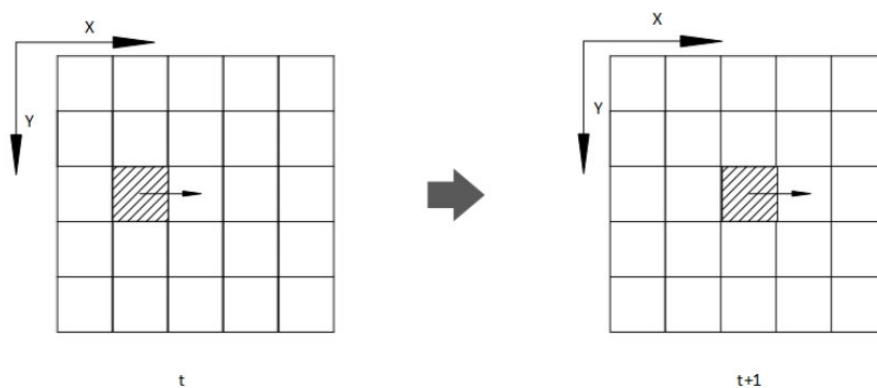
A hőkezelő szabály is G. Vichniac nevéhez kötődik. A sejtek ugyancsak építsenek négyzetes rácsot. A sejtek állapota ebben az automatában is 0 vagy 1 lehet. A *Moore-féle* szomszédságot, és a periodikus határfeltételt alkalmazza. Az automata működése során egy sejt vizsgálatakor a szomszédságában lévő sejtek állapotát összegzi, így 0 és 9 közötti egész szám lesz az eredmény. A vizsgált sejt új állapota a következő táblázat szerint alakul.

$$\begin{array}{rcccccccccc} \sum s_{ij}(t) & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ s_{ij}(t+1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

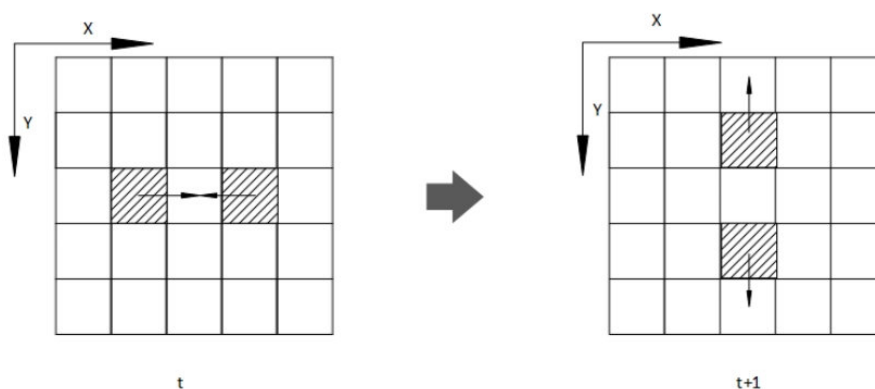
Az automatát egy olyan kezdő univerzummal indítva, ahol a sejtek véletlenszerűen kapnak 0 vagy 1 állapotot, az automata a fázishatárok mozgását szimulálja.

2.2.6. 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 fémes rácsban diffúciónak nevezzük. A diffúzió bármely alapmechanizmusát tekintve látható, hogy az atomok nem mozdulhatnak el bármely 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 szilárdoldatok 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 szabályrendszerrel 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 transzlációs szabálynak nevezünk. Ha a transzlációs szabálynak megfelelően az anyagrészek ugyanarra a pozícióra kerülnek, akkor a



2.5. ábra. A HPP translációs szabály. [30]



2.6. ábra. A HPP ütközési szabály. [30]

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 irány 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, mint a diffúzió dinamika vizsgálatában. A diffúzió dinamikai vizsgálatokban az univerzum kétállapotú. Az eutektikumok szövete képein 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.

2.2.7. 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 széle felől haladtak jobbra. A mozgó objektumok kiindulás helye a kép első tíz oszlopa. A sejtautomatát a szerkezetek felismerésére használtam. A mozgó objektumok száma minden sejtautomata lépésben, a kép minden oszlopában regisztrálva lett. A rudas szerkezetű eutektikumok kivételével mindegyik képből — az $Al-Al_3Ni$ képekből készült a második mérési sorozathoz egy 150% és egy 200% relatív nagyítású sorozat is — egy 1024×768 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. Minden mérés a 3500. sejtautomata lépésig futott. A mozgó objektumok a kép bal széléről indultak, és a számuk 10×768 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. [99]

2.3. Sejtautomaták a számítógépi képelemzésben

A képelemzésben alkalmazott konvolúciós műveletek totális sejtautomaták. A digitális szürkeárnyalatos 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 képponthoz hozzárendel egy 3×3 nagyságú képpont mátrix súlyozott számtani átlagát. A súlyokat ugyancsak 3×3 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:

$$O = \frac{1}{9} \sum_{j'=1}^3 \sum_{i'=1}^3 K(i'j')I(i'j') \quad (2.3)$$

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 szürkekép 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 szürkeárnyalatának maximumával, akkor a szürkeképek eróziós műveletét kapjuk. Hasonlóan a szürkekép 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. [30] [26] [27] [28] [29] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37]

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 Neumann architektúrán 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.

3. fejezet

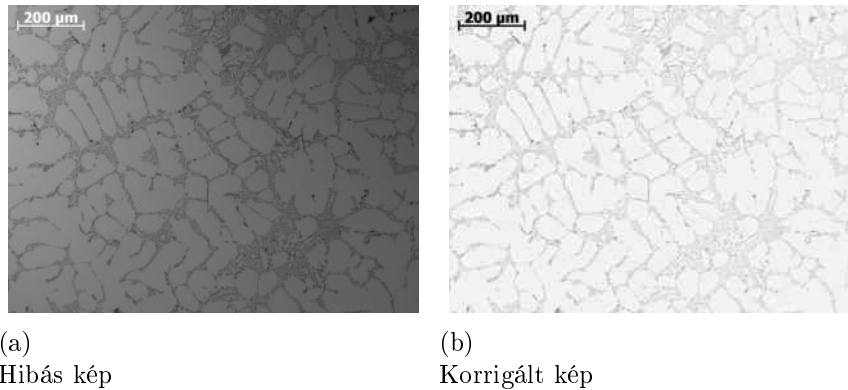
Az automatikus számítógépi képelemzés

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, képzaj) amelyektől függetlenül kell tudni működnie az algoritmusnak. A képek előkészítése a következőképpen történik:

1. A kép vágása 1024×768 pixel méretűre.
2. A kép YCC színrendszerbe (csak az Y csatorna meghagyásával).
3. A képen végrehajtani egy „autocontrast” műveletet, ami megkeresi a minimális és maximális intenzitásértékeket a képen és ezután széthúzza az értékeket a teljes intervallumra.



3.1. ábra. Egyenlőtlen háttérvilágítás okozta hiba, és korrekciója

4. Az egyenlőtlen háttérvilágítás korrigálása.
5. Az automatikus szegmentálás végrehajtása „*iter*” [54] 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 ez a hiba a szegmentálás műveletét nehezíti meg. 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. 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 olyan kép, amelyen jó a háttér. Azonban ezek a képek nem minden esetben hozzáférhetőek. Ezért olyan módszerre van szükség, amely ezt a jelentős hátrányt kiküszöböli.

A módszer, amit a háttér megvilágítás korrigálásához választottam, a *Lava flow* algoritmuson alapul, amelyet a lávafolyások irányának megjelöléséhez 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 szürkeképpel dolgozunk – 256 állapotú automatát jelent. A kép beolvasása után a maximális fényerejű terület helyzetének és az értékének a meghatározása történik, majd ezután kezd el a sejtautomata dolgozni. 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 3×4 pixelyni méretű lesz. 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 határmenti pixelsorokon belül, a maximális fényerejű képpont értékével helyettesítem. A sejtautomata minden lépésben végrehajtja a következő formulával írható műveletet:

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

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, ahol a láva betölti az objektumok által reprezentált árkokat és szétterül a képen. Ez csak akkor igaz, ha az objektumok sötétek a képen, ha nem így van, akkor invertálni kell a képet. Azért szükséges a szürke zárás, hogy a láva ne tudjon hamar lefolyni a kép szélén. 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 kisebb-e mint az eredeti képen, ha igen akkor a pixel fényerő értéke 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. Ha a szükséges lépésszám (kb. ezer) lefutott, akkor 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. [48] [49] [50]

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* [51], *Niblack* [58], *Sauvola* [61] – és amit nem szükséges paraméterezni. Amelyeket nem kell paraméterezni a következők: *Huang* [53], *iter* [54], *Kapur* [56], *Li* [66][67], *moment* [57], *Otsu* [59], *Renyi* [60], *Shanbhag* [64], *Yen* [65]. 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 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 szegmentációt. 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.

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 az 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 kép vagy az objektum.

3.2. A mérő sejtautomaták

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

3.2.1. Az objektumok elrendeződése

A 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 egygel beljebb található sor, ill. oszlop képpontjainak értékével. 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 véletlenszám generátor állít elő. Erre azért van szükség, mert egy bizonyos lépés után a növekvő objektumok felveszik a kernel alakját, ha determinisztikusan történik a növekedés. Minden összeérés rögzítettem egy adatbázisban a következőképpen: az összeérő objektumok egyedi azonosítói és a sejtautomata lépés száma. 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.

3.2.2. Az alakfelismerő algoritmus

A másik sejtautomata 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. Majd, meghatározott lépésszámig erózió következik. Ha az összes objektum eltűnik, akkor a sejtautomata megáll. Minden sejtautomata lépésben itt is regisztrálásra kerülnek egy adatbázisban az objektumok egyedi azonosítói, a lépésszám, az objektum kerülete az adott lépésben, az objektum területe az adott lépésben.

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:

- Előrejelzés — jelenleg még nem ismert érték becslése a múltbéli tapasztalok alapján.
- Osztályozás — az a feladata, hogy az ismert struktúrák alapján az új adatokat besorolja csoportokba.
Ezt a módszert használom az adatfeldolgozó algoritmusaim között, az alakjellemzésre.
- 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.
- Idősorelemzés — egymást követő, vagy sorrendfüggő adatok elemzése.
Ezt a módszert használom az adatfeldolgozó algoritmusaim között, az objektumok alaktényezőjének meghatározásához.
- 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.

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

[75] [76] [77]

4.1. A klaszterelemzés

A klaszterelemzés feladata az objektumok csoportosítása oly módon, hogy az azonos csoportban lévő objektumok (úgynevezett klaszter) hasonlóbba (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 mintafelismerést, 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:

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

Ezek közül a hierarchikus klaszterelemzést használok, ezért a későbbiekben csak erről esik szó bővebben. [68] [69] [70]

4.1.1. 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).

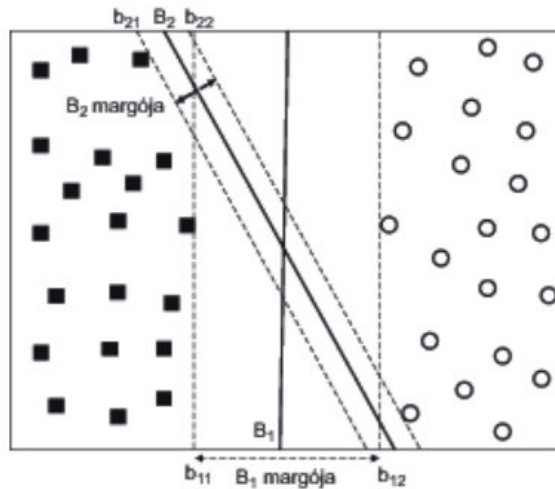
A csoportok közötti távolság a képen lévő objektumok közötti geometriai *city block* távolságot jelenti. Tehát ez a módszer alkalmas arra, hogy az eutektikumokban lévő fázisok távolságát, elrendeződését jellemezze. [68] [69]

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:

- Lineáris osztályozók.
- Négyzetes osztályozók.
- Döntési fák.
- Tartóvektor-gép.
- Neurális hálózatok.
- Magfüggvényes becslés.



4.1. ábra. A különböző hipersíkok és margójuk. [82]

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 4.1 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.
- *SVM* alkalmazható ordinális adatokra, az adatokban jelenlevő minden kategorikus attribútumhoz fiktív változók bevezetésével.

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) 1.9 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 [83] eredményei szerint a külső mágneses tér nélkül kristályosodott *Al-Cu* eutektikum reguláris lemezes szerkezetű, azonban a mágneses erőter növelésével ($\Phi > 6T$) a lemezes szerkezet átmegy hullámos irreguláris szerkezetbe. A mágneses erőter, és a kristályosodás sebessége befolyásolja a lemeztávolságot. Bing Liu és szerzőtársai [84] 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.

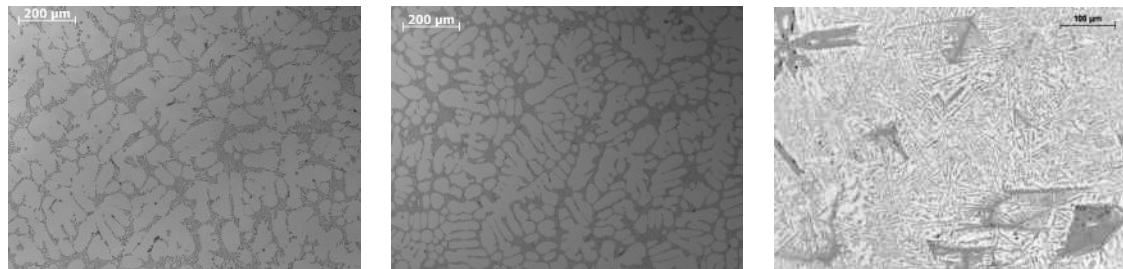
5.1.3. Az öntöttvasak

Az öntöttvasak tulajdonságait jelentősen befolyásolja a grafit alakja, mérete és eloszlása. Az első elvégzendő művelet a grafitalak osztályozása. Az *MSZ EN ISO 945:2000* szabvány szerint a grafitalak meghatározása etalonképek segítségével történik — amely a(z) 1.10 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.[86]

Ezen értékek alapján *naiv Bayesi* osztályozóval lehetséges az objektumok osztályokba való sorolása.

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 kerületének mérésével végzik. Egy másik módszer a módosítottság mérésre a termikus analízis, de az nem vizuális eljárás.[91]

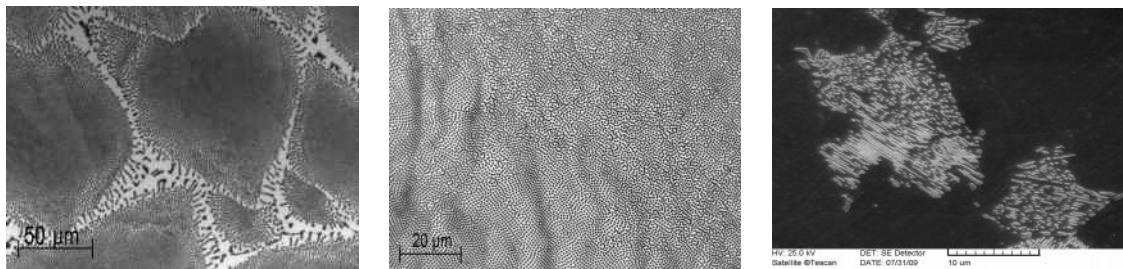


(a)
Al-Si,
hipoeutektikus összetétel,
nem finomított

(b)
Al-Si,
hipoeutektikus összetétel,
finomított

(c)
Al-Si,
hipereutektikus
összetétel

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



(a)
Al-Al₃Ni,
500× nagyítás, rudas szerkezet,
elfajulás.

(b)
Al-Al₃Ni,
1000× nagyítás,
rudas szerkezet.

(c)
Lemezes-
szemcsés
perlit.

5.2. ábra. Rudas és lemezes szerkezetű eutektikumok szövetképei.



(a)
Gömbgrafitos
öntöttvas.

(b)
Kompakt grafitos
öntöttvas.

(c)
Lemezgrafitos
öntöttvas.

5.3. ábra. Az öntöttvas típusok szövetképei.

5.2. A képalkotó eszközök

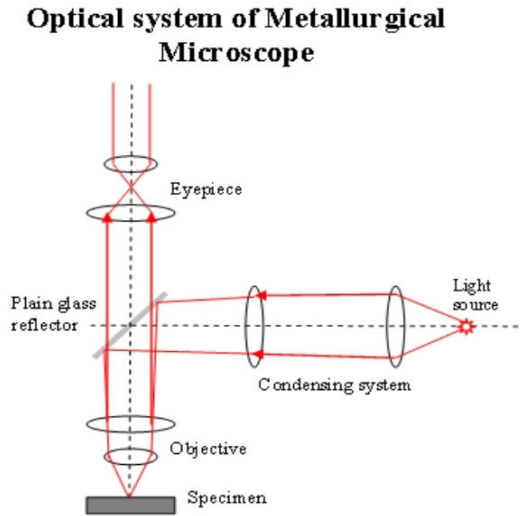
5.2.1. Az optikai mikroszkóp

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. A mikroszkóp képalkotó módjai a következők:

- Világos látótér.
- Sötét látótér.
- Polarizált.
- Differenciál Interferencia Kontraszt.

Ezek közül a vizsgált mintáim szempontjából a világos látótér a legfontosabb. Csak polírozás esetén az öntöttvasban csak a grafit vizsgálható. Ebben az esetben világosnak látszik a mintának az a felülete, amely sík maradt a kémiai kezelés után, illetve az öntöttvasban a vas polírozás után is. Azért látszik világosnak, mert arról a felületről vissza tud verődni a fény. A mart területeken a fény szóródik, csak kis része tud visszajutni a lencsék felé, ezért azok a részei a mintának sötéten látszanak. Az optikai mikroszkóp elvi működése a(z) 5.4 ábrán látható.

Az optikai mikroszkóp képalkotási hibája az ún. egyenlőtlen háttérvilágítás. Ez a hiba *Köhler-elv* nem teljesüléséből következik. 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 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. A(z) 5.3 ábrán láthatóak az optikai mikroszkóppal készült felvételek. [89]



5.4. ábra. Az optikai mikroszkóp működésének elve.
[87]

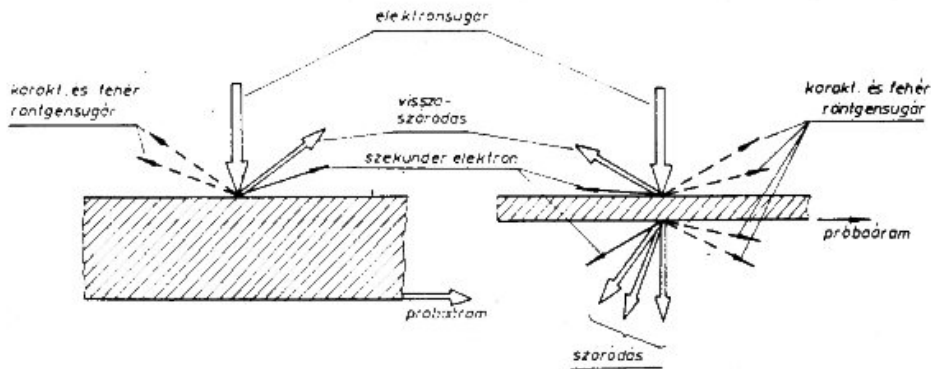
5.2.2. A pásztázó elektronmikroszkóp

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*).
- Karakterisztikus *Röntgen-sugárzás*.
- Próbaáram.
- Szóródás.

Ezek láthatóak a(z) 5.5 ábrán.

A szekunder elektronok nagyon közel vannak a minta felületéhez, ezért a *SEI* módszerével nagyobb nagyfelbontású 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



5.5. ábra. Az elektronok és az anyag kölcsönhatásai.

[88]

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 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. [88][90]

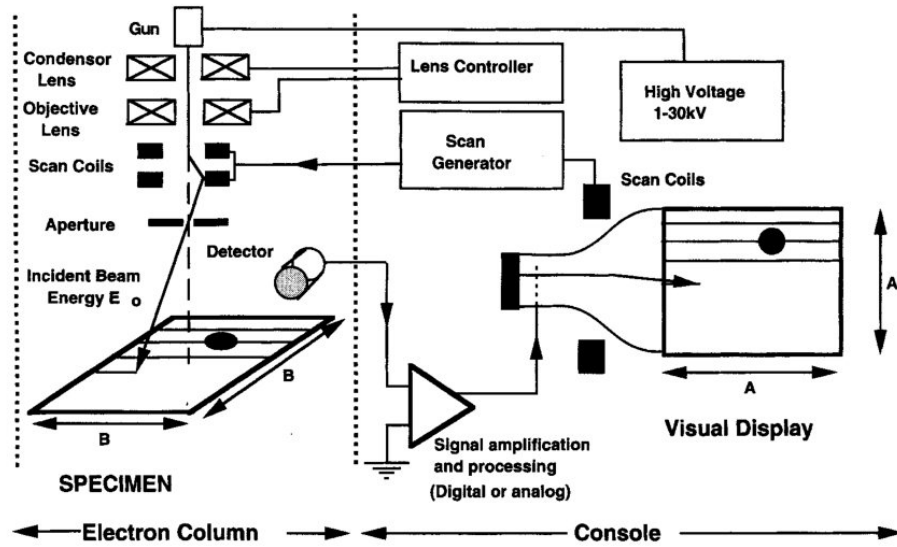
5.3. A mérést végző algoritmusok

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 terület alapegysége a pixel. A képeken a mért terület azoknak a pixeleknek a száma, amelyek az objektumok kontúrján helyezkednek el. Az objektumok területe az objektumokat alkotó pixelek összessége. Az objektumok közötti távolság a legközelebbi kontúrpontraik közötti *city block* távolság.



5.6. ábra. A pásztázó elektronmikroszkóp működésének elve.

[90]

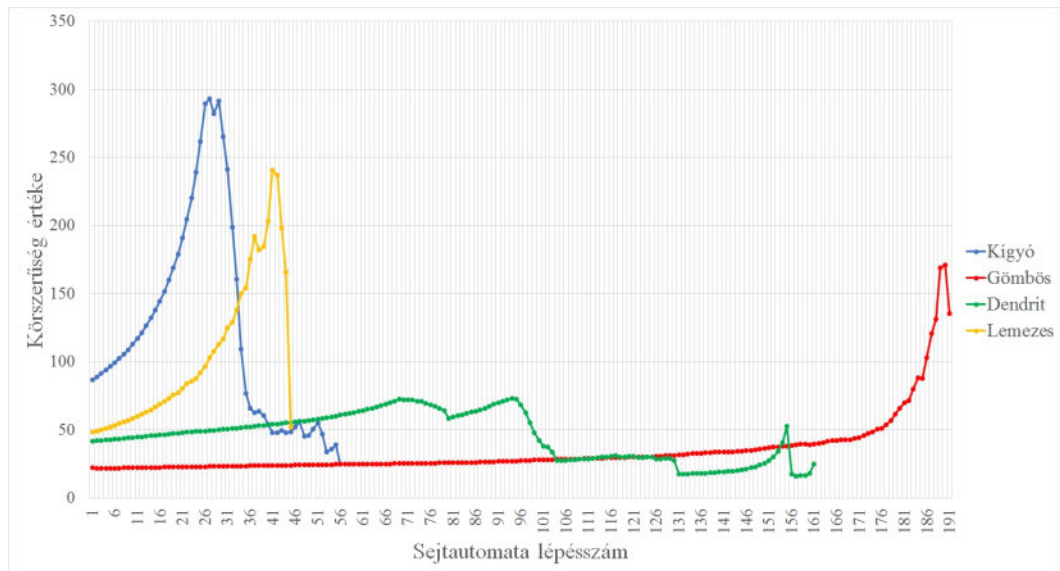
5.3.1. Az egyedi objektumokat jellemző algoritmus

Az alak-felismerési algoritmus sejtautomatán alapszik. 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 megszámlálásra 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) 5.7 ábrán. Maga a folyamat a(z) 5.8 ábrán látszik, ahol a legvilágosabb az eredeti objektum majd a sötétebb felé haladva $20\times$, $40\times$, és $80\times$ -os eróziója látható.

Ha az objektum alakja ismert akkor az adott alakra jellemző karakterisztikus méret meghatározásra kerül.

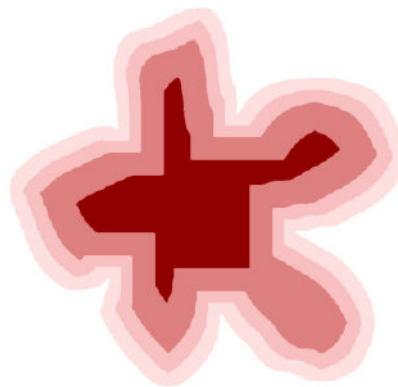
5.3.2. Az objektumcsoportok közötti jellemzőket mérő algoritmus

Ez a módszer szintén sejtautomatán alapszik. A képen az objektumok egyedi azonosítót kapnak, majd ezt követően az objektumok sztochasztikus dilatáción mennek keresztül. A sztochasztikus növesztéssel elkerülhető, hogy az objektumok felvegyék a kernel alakját. 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.

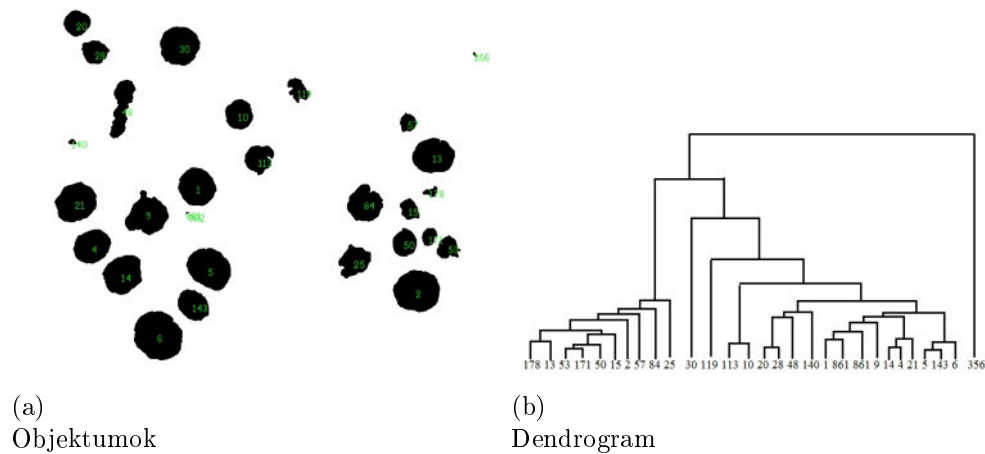


5.7. ábra.

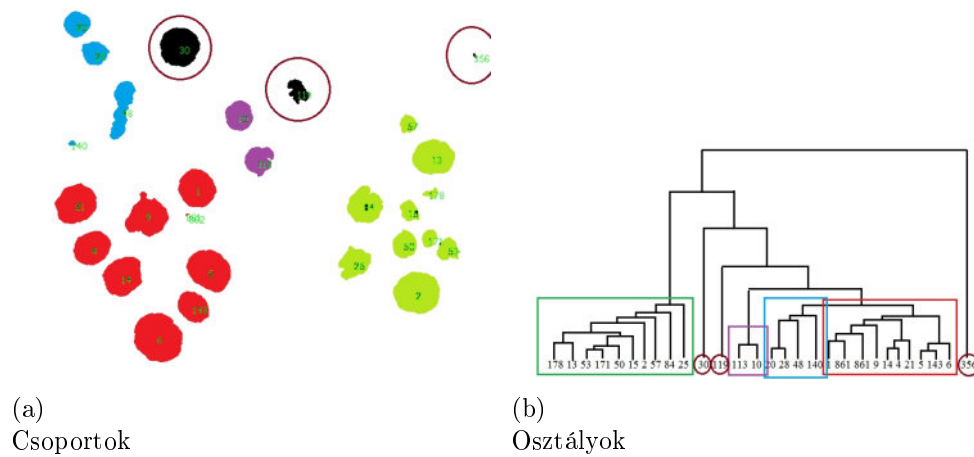
A körszerűség sejtautomata lépésszám függése különböző alakú objektumok esetén.



5.8. ábra. Az eróziós folyamat.



5.9. ábra. Az objektumok és a dendrogram.



5.10. ábra. A csoportok és osztályok.

Maga az algoritmus egészen addig fut, amíg egyetlen egy nagy objektum lesz a képen. A sejtautomata futása után kapott adatbázisból kinyerhetők az objektumok helyzetei, azonosítói, az összeérés mely szomszédal és mikor történt. Ezekből az adatokból meghatározható a szomszédos objektumok távolsága, az objektumok elrendeződése. A(z) 5.9 a) ábrán láthatóak a gömbgrafitos öntöttvasról készült képen az objektumok azonosítóikkal, a b) ábrán a dendrogramjuk. A(z) 5.10 a) ábrán a csoportokba sorolt objektumok, és a b) ábrán az osztályok a dendrogramon.

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

Az alakfelismerés validálása szemrevételezéses módszerrel történik. Az objektumok alakjai négy osztályba sorolhatóak:

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

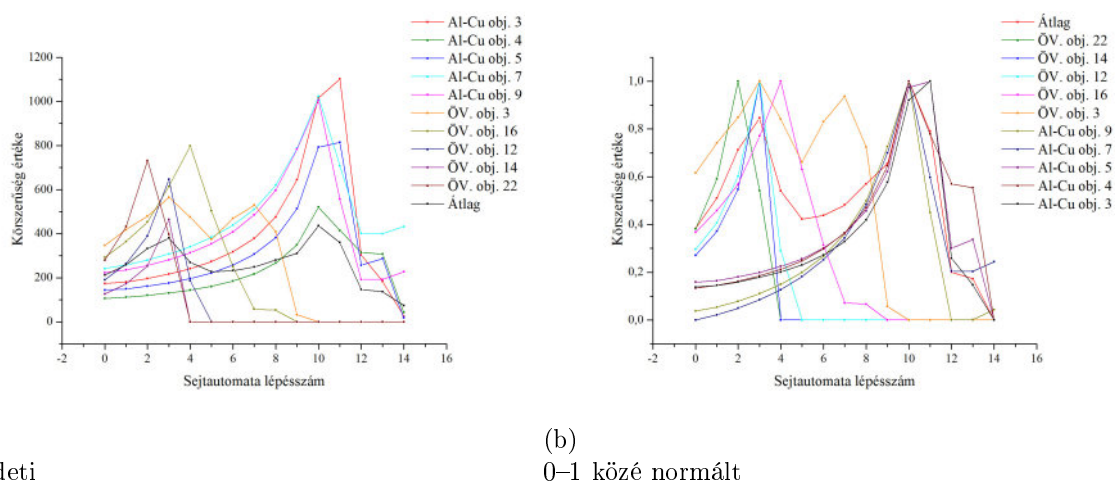
Az alakfelismerés tanuló adatai

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) 6.9 ábrán. A mestergörbét úgy határoztam meg, hogy a tanuló képekről tíz darab objektumot választottam ki mielőtt a görbéje ismert volt és a tíz objektum lépésenkénti körszerűségének számtani átlagát vettem.

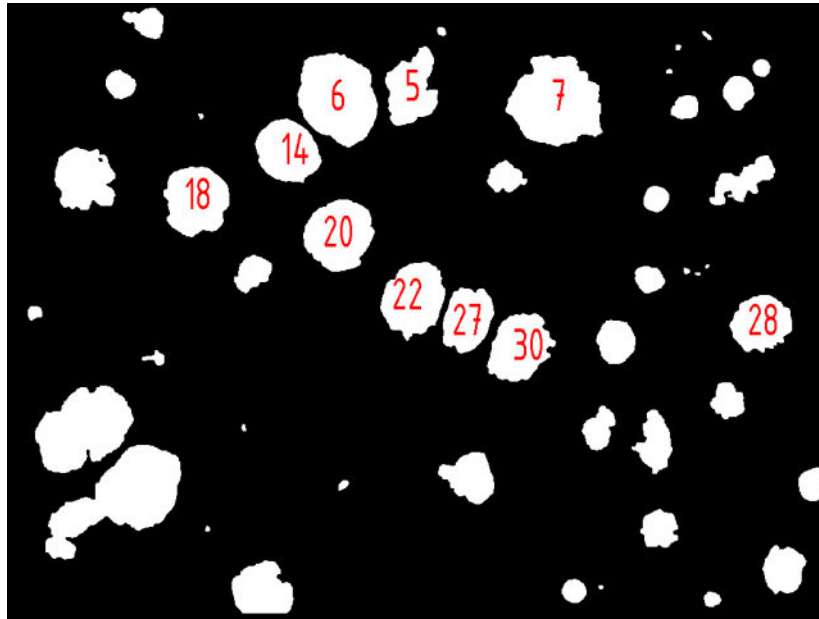
A lemezes szerkezetről készült kép a(z) 6.1 ábrán látható, az ábrán a számok az objektumok azonosítóit jelölik. A lemezes morfológiájú objektumok esetében a kör-szerűség értéke a kezdő sejtautomata lépésben, a többi alakú objektumokhoz képest — a négy alak közül a legnagyobb — nagyobb értékről indul, majd a lépésszám növekedésével egyre növekszik, majd egy csúcs elérése után zuhanni kezd az értéke. Ha a 15. lépésig az erózió eltűnteti 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 igaz. Az öntöttvasban kisebb a lemezes objektumok nagysága és előfordulhatnak benne a „kígyós” morfológiájú objektumok is. Mivel a lemezes morfológia mestergörbéje 5 darab alumínium-réz és 5 darab öntöttvas objektumot tartalmaz, ezért annak a jellegében van egy csökkenő, és egy újra növekvő szakasz is.



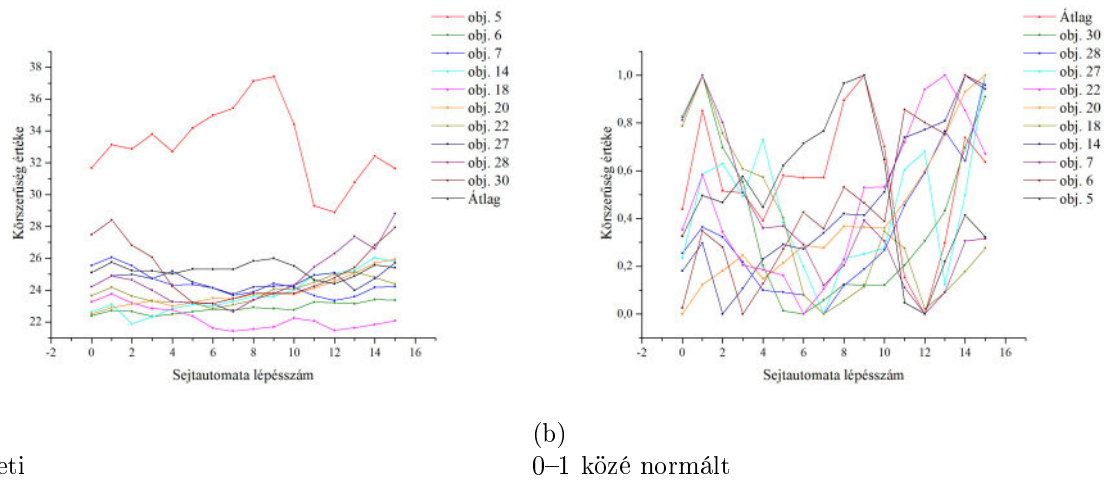
6.1. ábra. A lemezes eutektikum tanuló képei.

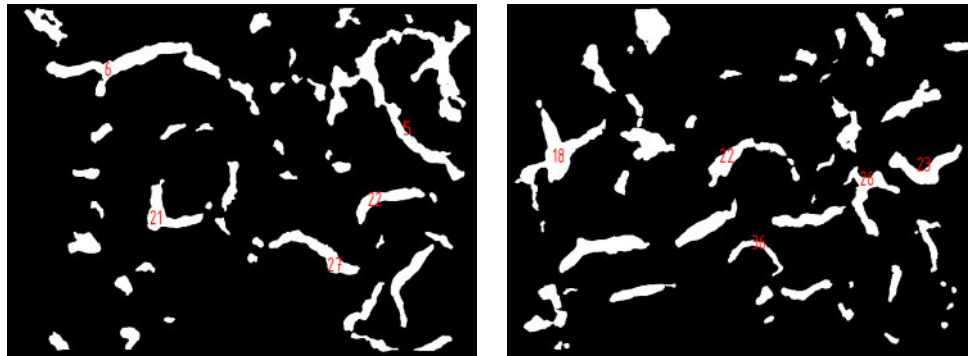


6.2. ábra. A körszerűség sejtautomata lépésszám függése lemezes eutektikum esetén.

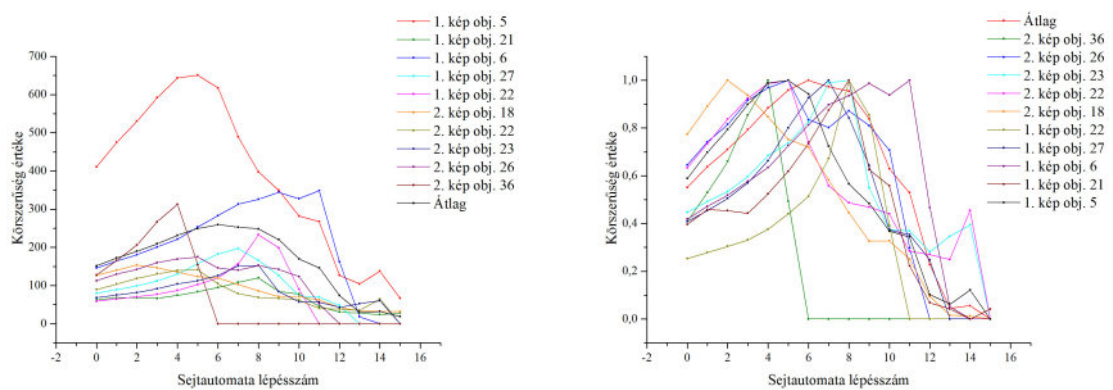


6.3. ábra. A gömbös morfológiájú eutektikum tanuló képe.

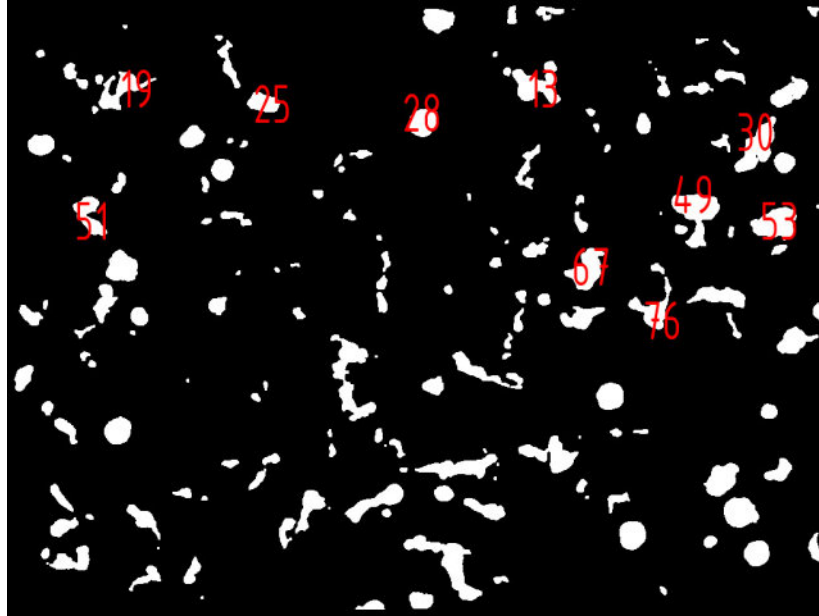


(a)
1. kép(b)
2. kép

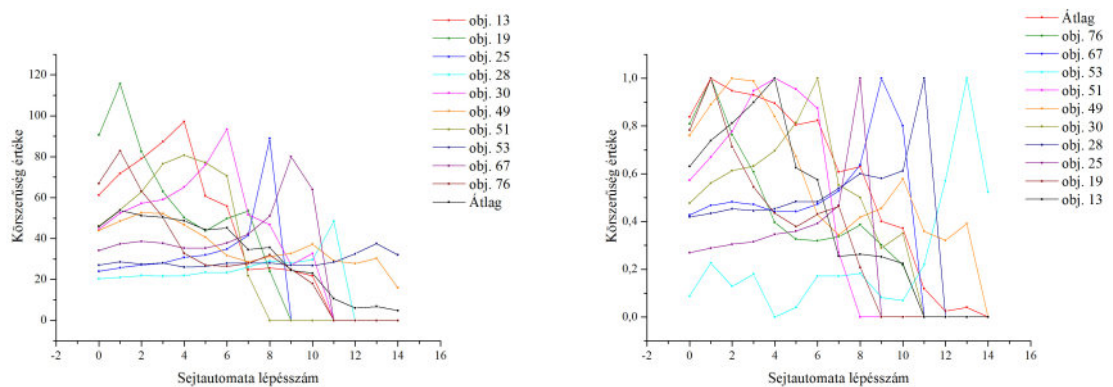
6.5. ábra. A „kígyós” eutektikum tanuló képei.

(a)
Eredeti(b)
0–1 közé normált

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

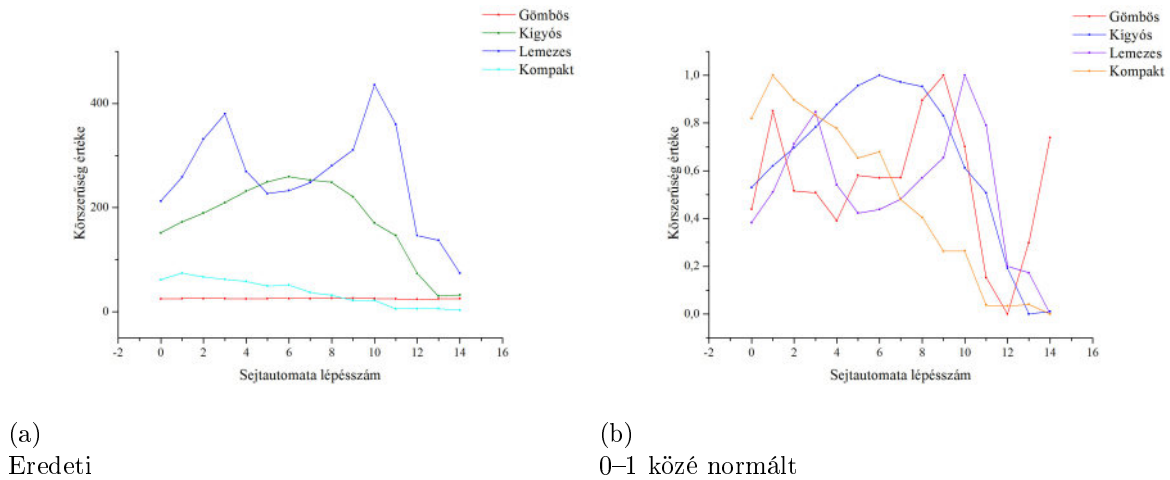


6.7. ábra. A kompakt eutektikum tanuló képe.

(a)
Eredeti(b)
0–1 közé normált

6.8. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése kompakt morfológiájú eutektikum esetén.



6.9. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése különböző szerkezetű eutektikumok 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 mestergörbéje a gömbgrafitos öntöttvas objektumainak — 10 darab objektum — számtani átlagából készült.

A „kígyós” morfológiájú objektumok körszerűségének kezdő értéke a lemezes szerkezetűekhez képest kisebb. A kezdőt követő néhány lépésben ez az érték növekszik, de nem olyan meredeken, mint a lemezesé. A lemezes szerkezetre jellemző csúcs utáni hirtelen csökkenés sem tapasztalható. A két mestergörbe metsződése azért lehetséges, mert a természetben is — algoritmussal előállított mesterséges tesztgeometriát nem használtam a mestergörbe adataihoz — nehezebb megkülönböztetni a két alakot egymástól. Ebben az esetben a tartóvektor-gép használata nem ajánlott ugyanis olyan hipersíkot nem tudtam definiálni, amely alkalmas a két alak szétválasztására. Ehelyett a *legközelebbi szomszédok* módszere hatékony az ilyen esetekben.

A kompakt grafitos öntöttvas objektumainak alakjára jellemző körszerűség értékek nagyobbak, mint a gömbös esetében. Ez a mestergörbe is metszi a gömbös alak mestergörbét. A metszés ebben az esetben azért fordul elő, mert az eróziós lépések előrehaladtával az objektum egyre inkább hasonlít az eróziós kernelre — ami a gömbös alaknál is igaz, de azok az objektumok nagyobb területűek, mint a kompakt objektumok így később tűnnek el — és az automata futása vége felé már a két objektum erodált alakja erősen hasonlít egymáshoz.

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

Az $Al-Cu$ eutektikum esetében látható, (6.10 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.

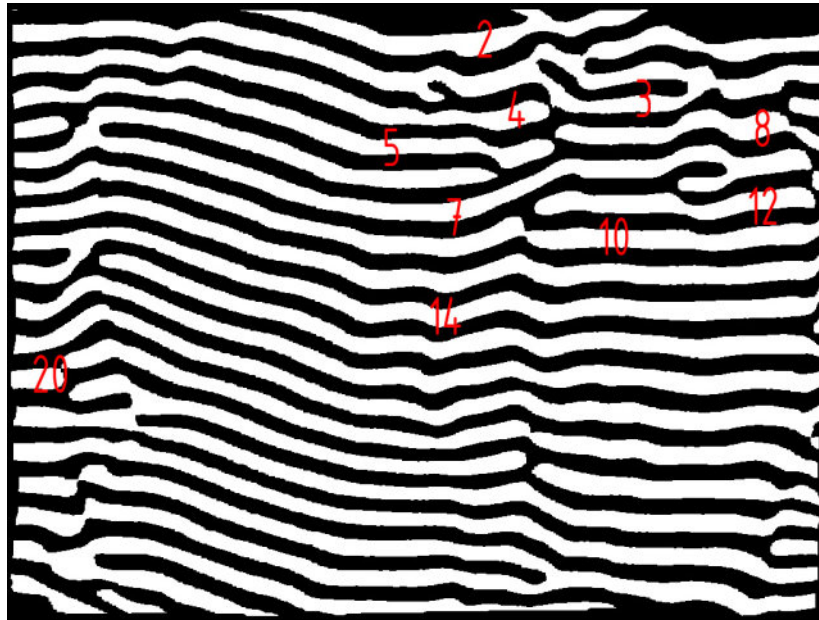
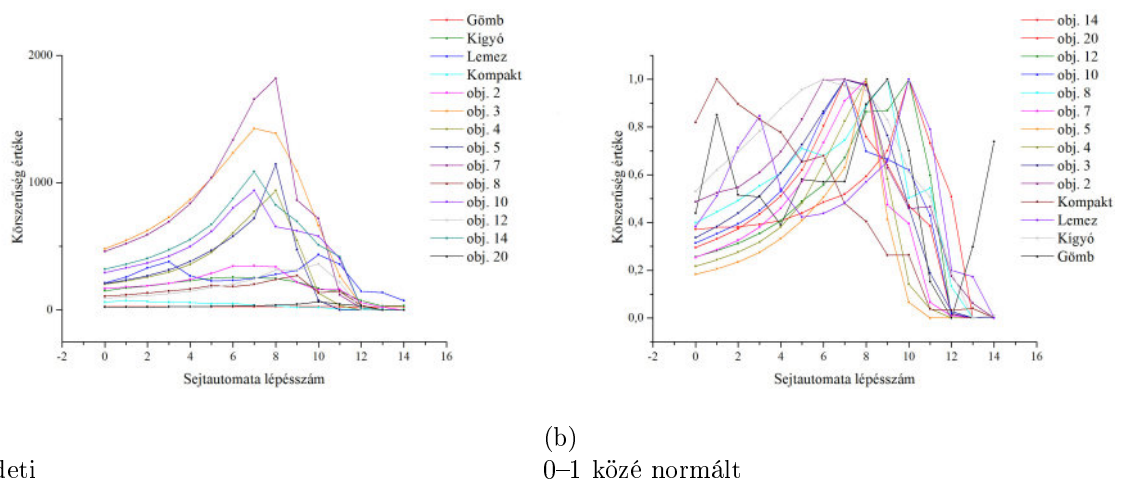
A nem finomított *Al-Si* eutektikum esetében, látható a(z) 6.15 ábrán, hogy az objektumok mérete nem túl nagy, viszonylag gyorsan erodálódnak. Az objektumok többsége lemezes, vagy „kígyós” morfológiájú. A finomított eutektikum esetében még kisebbek az objektumok. Itt is lemezes vagy „kígyós” morfológiájúak.

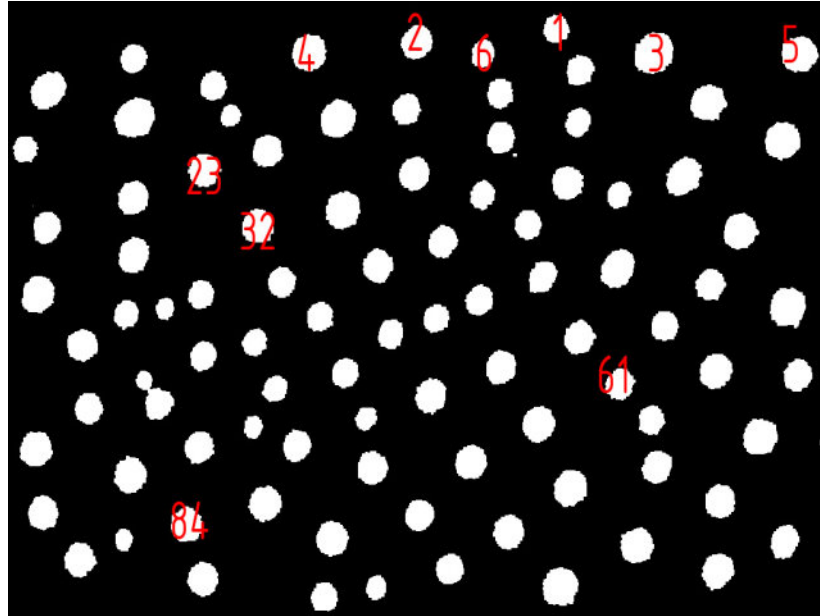
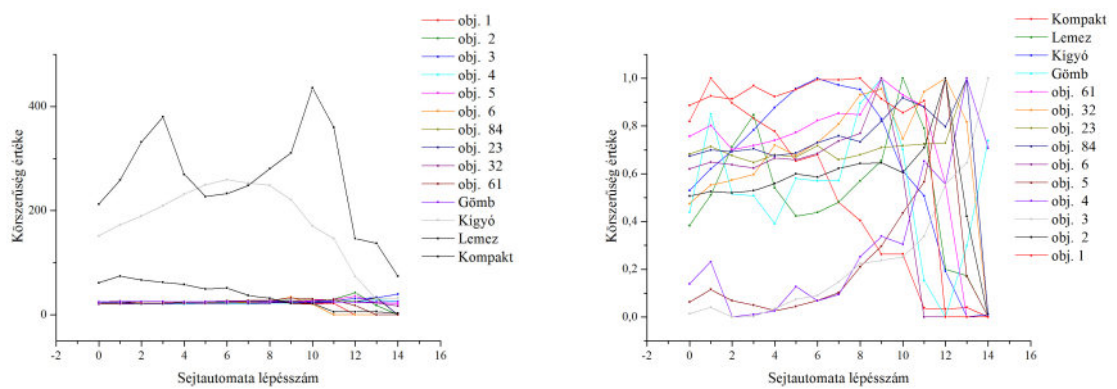
A gömbgrafitos öntöttvas objektumainak körszerűség függvényén az látszik, hogy az objektumok többsége gömb alakú, azonban van három objektum, amely kivétel: az „5”, „6”, és a „15” jelű objektumok görbéi nem a gömbös alaknak megfelelőek. A „6” jelű a „kígyós” alakra hasonlít inkább, míg az „5” és „15”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

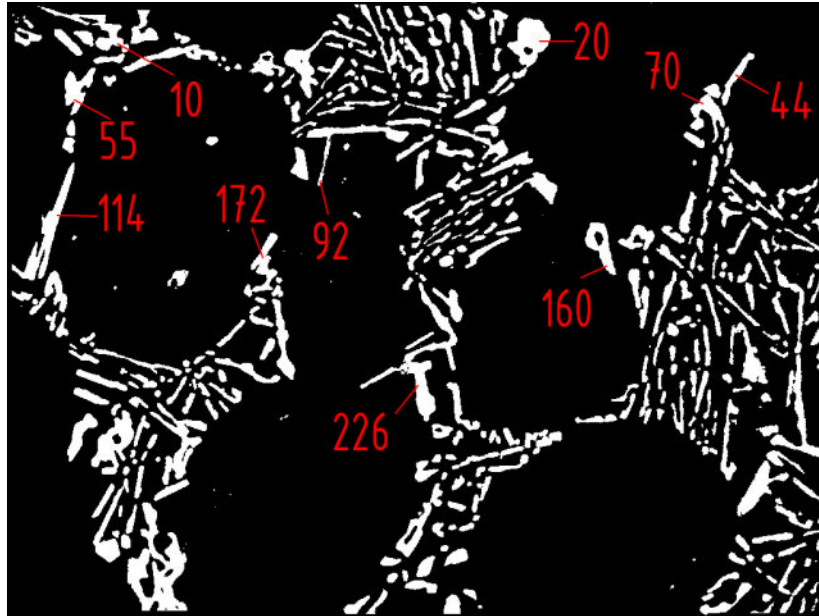
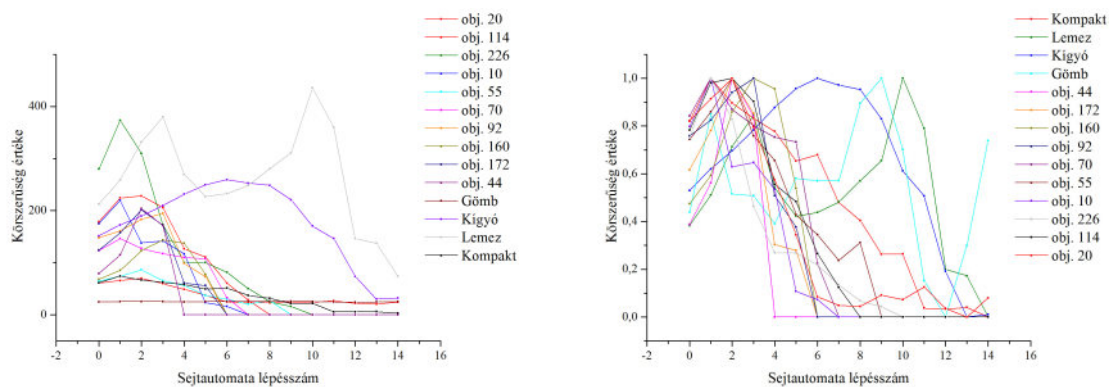
Összességében elmondható, hogy az objektumok körszerűségének sejtautomata lépésszám függvénye alkalmas az objektumok alakfelismeréséhez, azonban ha a képen az objektumok területe kisebb, mint egy meghatározott érték, akkor az alakfelismerés pontossága jelentősen romlik. Az objektumok területének legalább akkorának kell lenniük, hogy a hatodik sejtautomata lépés előtt ne tűnjenek el a képről. Az alakfelismerést a *Nearest-neighbour* algoritmussal célszerű végezni, a mestergörbe alakja miatt.

6.10. ábra. Az objektumok azonosítói $Al-Cu$ eutektikum képén.6.11. ábra. körszerűség sejtautomata lépésszám függése $Al-Cu$ eutektikum esetében.

6.12. ábra. Az objektumok azonosítói az $Al-Ni$ eutektikum képén.(a)
Eredeti(b)
0–1 közé normált

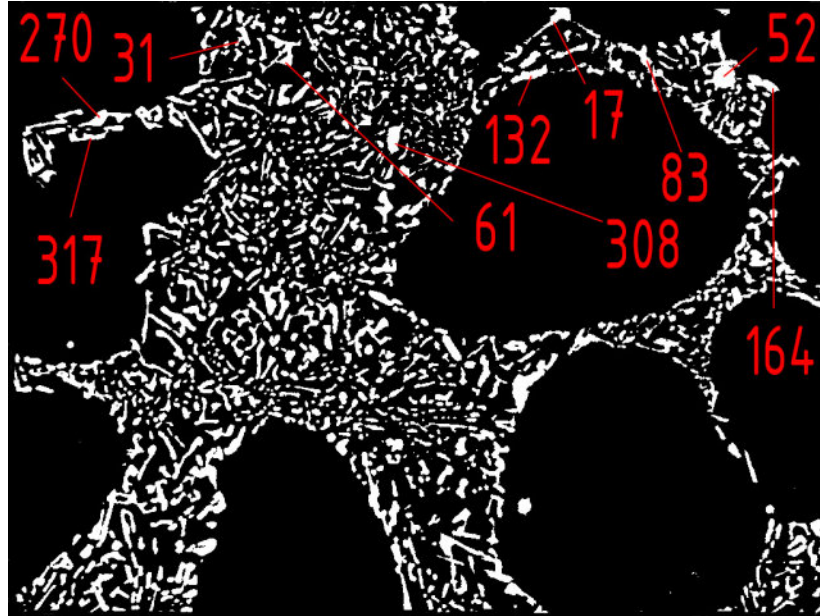
6.13. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése $Al-Ni$ eutektikum esetében.

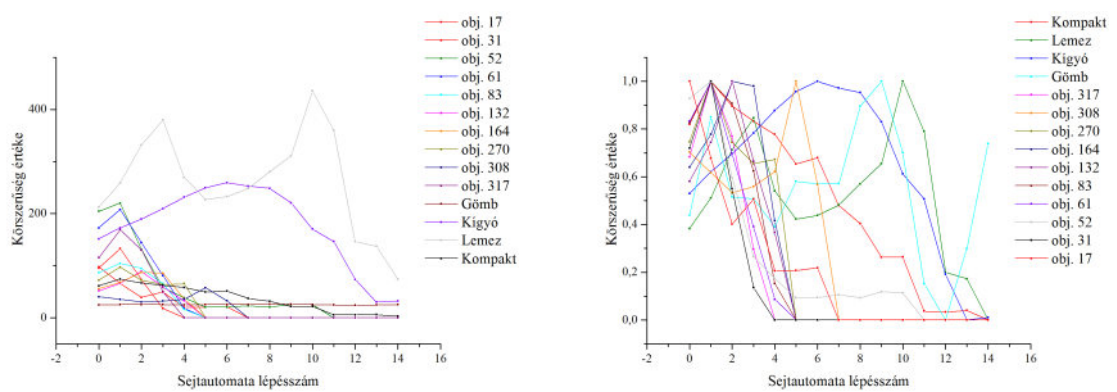
6.14. ábra. Az objektumok azonosítói nem finomított *Al-Si* eutektikum képén.(a)
Eredeti(b)
0–1 közé normált

6.15. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése nem finomított *Al-Si* eutektikum esetében.



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

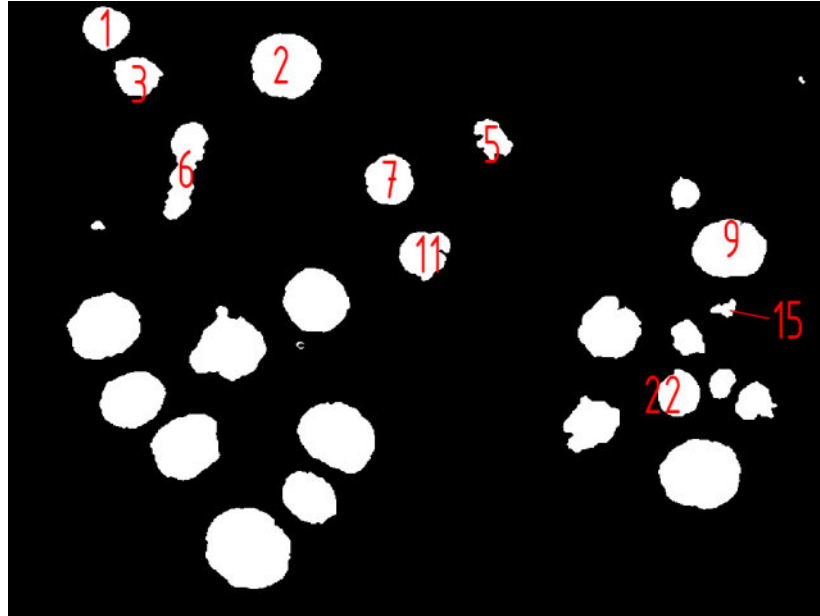


(a)
Eredeti

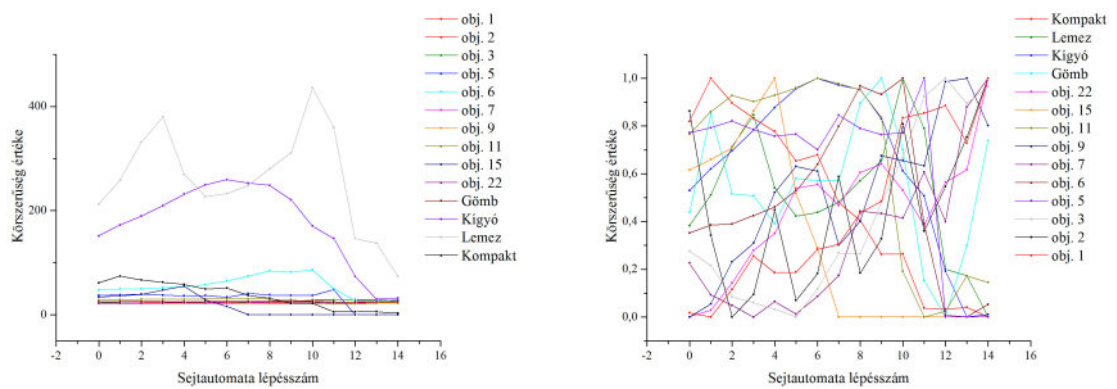
(b)
0–1 közé normált

6.17. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése finomított $Al-Si$ eutektikum esetében.



6.18. ábra. Az objektum azonosítói gömbgrafitos öntöttvas képén.

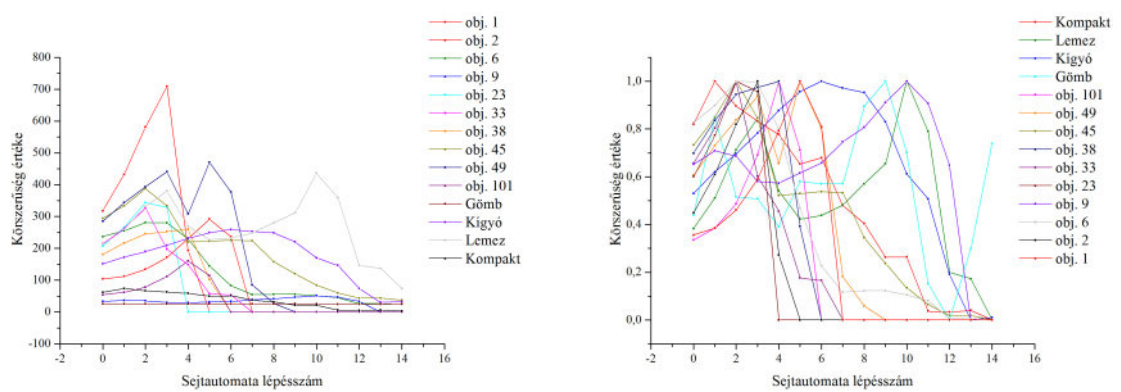
(a)
Eredeti(b)
0–1 közé normált

6.19. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése gömbgrafitos öntöttvas esetében.

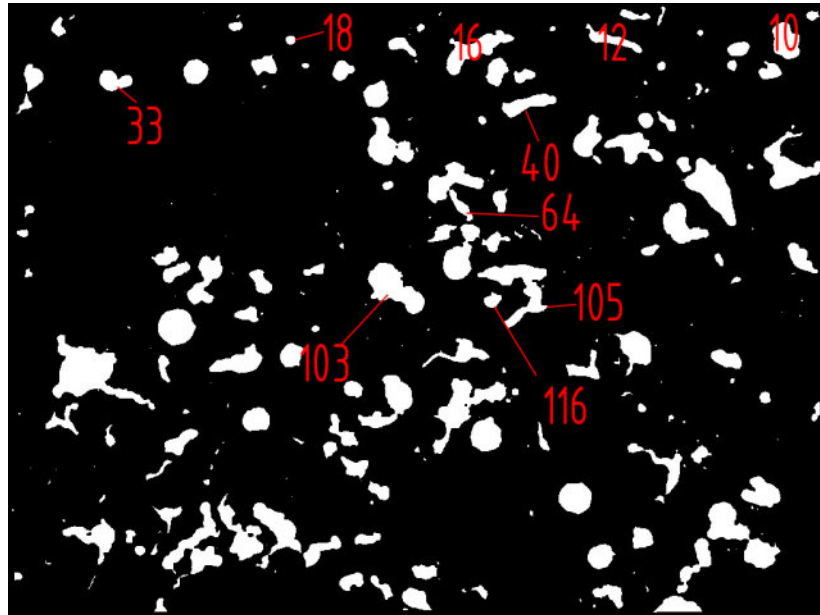


6.20. ábra. Az objektumok azonosítói lemezgrafitos öntöttvas képen.

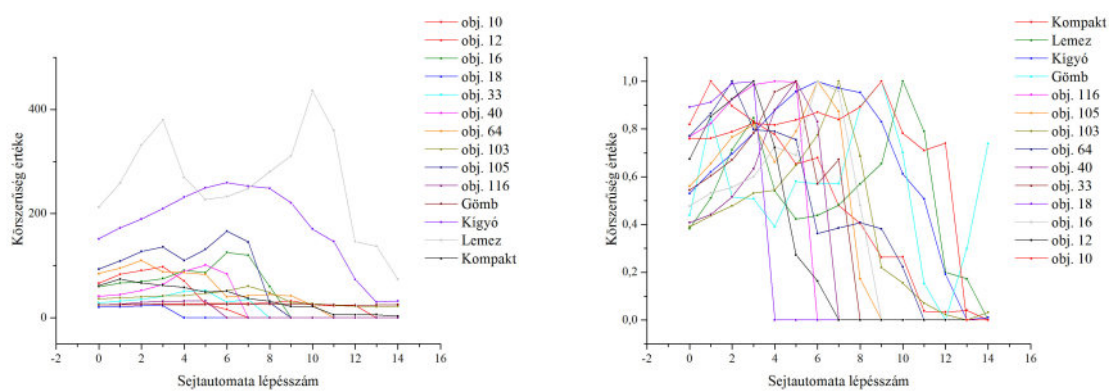
(a)
Eredeti(b)
0–1 közé normált

6.21. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése lemezgrafitos öntöttvas esetében.



6.22. ábra. Az objektumok azonosítói a kompakt grafitos öntöttvas képén.

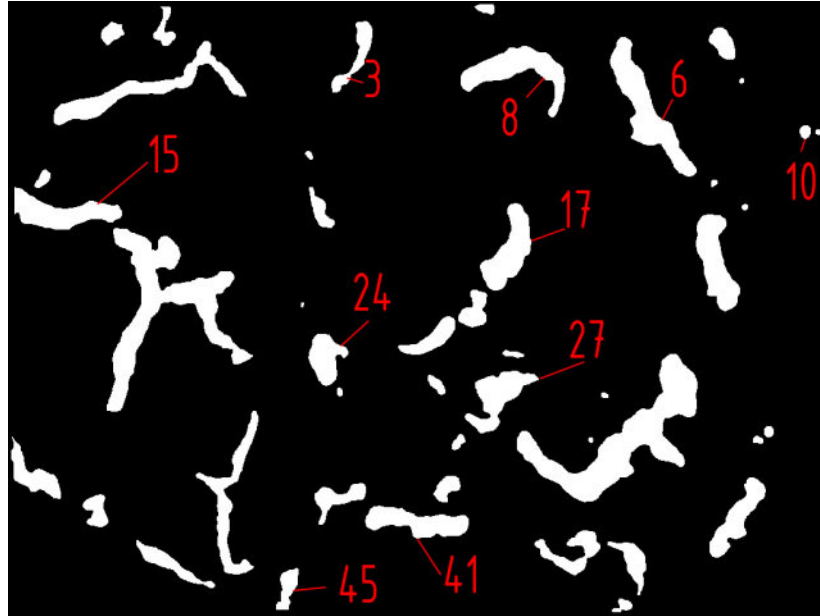


(a)
Eredeti

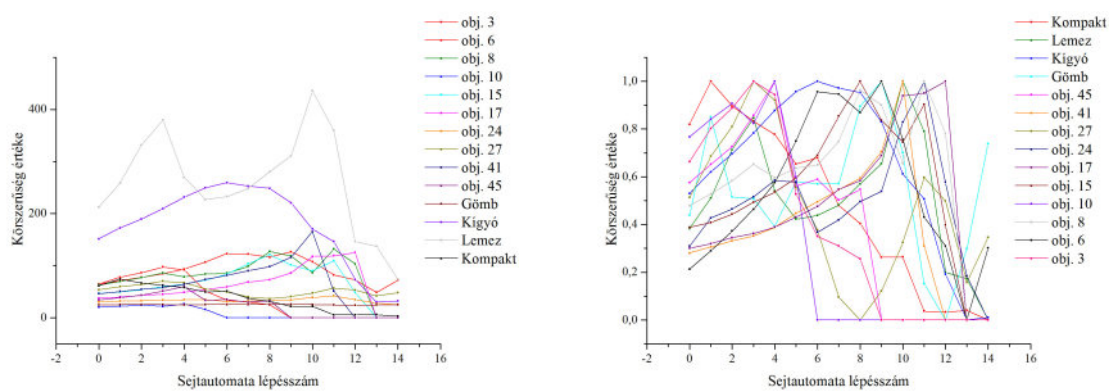
(b)
0–1 közé normált

6.23. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése a kompakt grafitos öntöttvas esetében.



6.24. ábra. Az objektumok azonosítói a kompakt grafitos öntöttvas képén.



(a)
Eredeti

(b)
0–1 közé normált

6.25. ábra.

A körszerűség sejtautomata lépésszám függése a kompakt grafitos öntöttvas esetében.

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 csúcuknál van szomszédjuk $\sqrt{2}$ értékkel számol. [93]

Az objektumok közötti jellemzőket mérő algoritmus eredményei:

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 objektum-összeéréseknek 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 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.

6.1. táblázat. *Al-Cu* egyedi objektumok adatai.

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

6.2. táblázat. *Al-Ni* egyedi objektumok adatai.

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

6.3. táblázat. Nem finomított *Al-Si* egyedi objektumok adatai.

| Automata | | | ImageJ | | |
|----------|------|-----------|--------|------|-----------|
| ObjID | Area | Perimeter | ObjID | Area | Perimeter |
| 10 | 1306 | 478 | 9 | 1306 | 403,019 |
| 20 | 2023 | 352 | 19 | 2023 | 251,907 |
| 44 | 589 | 216 | 41 | 589 | 170,894 |
| 55 | 1102 | 266 | 52 | 1102 | 214,451 |
| 70 | 1297 | 400 | 66 | 1297 | 315,747 |
| 92 | 1322 | 442 | 88 | 1413 | 442,534 |
| 114 | 2262 | 636 | 109 | 2252 | 527,831 |
| 160 | 1102 | 274 | 151 | 1102 | 179,439 |
| 172 | 1149 | 378 | 164 | 1150 | 298,919 |
| 226 | 3105 | 932 | 214 | 3105 | 741,737 |

6.4. táblázat. Finomított *Al-Si* egyedi objektumok adatai.

| Automata | | | ImageJ | | |
|----------|------|-----------|--------|------|-----------|
| ObjID | Area | Perimeter | ObjID | Area | Perimeter |
| 17 | 469 | 214 | 44 | 469 | 167,723 |
| 31 | 317 | 174 | 48 | 255 | 181,865 |
| 52 | 1646 | 580 | 77 | 1647 | 458,943 |
| 61 | 701 | 348 | 86 | 701 | 240,593 |
| 83 | 445 | 196 | 106 | 445 | 156,752 |
| 132 | 423 | 148 | 150 | 423 | 120,468 |
| 164 | 469 | 162 | 178 | 469 | 129,196 |
| 270 | 551 | 200 | 278 | 551 | 164,267 |
| 308 | 470 | 138 | 315 | 470 | 111,054 |
| 317 | 482 | 236 | 322 | 482 | 197,924 |

6.5. táblázat. Kompakt grafitos öntöttvas egyedi objektumok adatai.

| Automata | | | ImageJ | | |
|----------|------|-----------|--------|------|-----------|
| ObjID | Area | Perimeter | ObjID | Area | Perimeter |
| 10 | 1174 | 170 | 10 | 1174 | 141,296 |
| 12 | 733 | 220 | 12 | 733 | 183,095 |
| 16 | 1777 | 326 | 16 | 1777 | 265,664 |
| 18 | 111 | 48 | 18 | 111 | 38,627 |
| 33 | 719 | 144 | 32 | 719 | 118,225 |
| 40 | 967 | 200 | 39 | 967 | 167,782 |
| 64 | 2015 | 414 | 61 | 2015 | 336,676 |
| 103 | 2356 | 294 | 99 | 2356 | 236,593 |
| 105 | 2429 | 476 | 101 | 2429 | 5,657 |
| 116 | 286 | 84 | 111 | 286 | 67,598 |

6.6. táblázat. „Kígyós” grafitos öntöttvas egyedi objektumok adatai.

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

6.7. táblázat. Gömbgrafitos öntöttvas egyedi objektumok adatai.

| Automata | | | ImageJ | | |
|----------|------|-----------|--------|------|-----------|
| ObjID | Area | Perimeter | ObjID | Area | Perimeter |
| 1 | 2355 | 232 | 1 | 2355 | 184,551 |
| 2 | 5550 | 354 | 2 | 5550 | 288,978 |
| 3 | 2172 | 228 | 3 | 2172 | 186,409 |
| 5 | 1494 | 236 | 5 | 1494 | 187,38 |
| 6 | 3666 | 418 | 6 | 3666 | 334,233 |
| 7 | 2956 | 260 | 7 | 2956 | 209,622 |
| 9 | 5277 | 340 | 9 | 5277 | 283,179 |
| 11 | 2808 | 282 | 11 | 2808 | 229,279 |
| 15 | 410 | 118 | 15 | 410 | 94,569 |
| 22 | 2332 | 224 | 19 | 2332 | 183,581 |

6.8. táblázat. Lemezgrafitos öntöttvas egyedi objektumok adatai.

| Automata | | | ImageJ | | |
|----------|-------|-----------|--------|-------|-----------|
| ObjID | Area | Perimeter | ObjID | Area | Perimeter |
| 1 | 2502 | 510 | 1 | 2502 | 439,12 |
| 2 | 2910 | 962 | 2 | 2910 | 768,105 |
| 6 | 8477 | 1418 | 6 | 8478 | 1187,1 |
| 9 | 1605 | 232 | 8 | 1605 | 198,024 |
| 23 | 1105 | 478 | 19 | 1121 | 378,299 |
| 33 | 2234 | 692 | 28 | 2235 | 602,86 |
| 38 | 1985 | 600 | 32 | 1985 | 515,647 |
| 45 | 11670 | 1852 | 38 | 11670 | 1546,805 |
| 49 | 6061 | 1314 | 41 | 6061 | 1194,5 |
| 101 | 962 | 228 | 82 | 962 | 191,095 |

A 6.26 ábrán látható, hogy egy sejtautomata lépés távolságban mennyinek felel meg.

Az alumínium-réz eutektikum esetében látszik a(z) 6.27 ábrán, hogy egy csúcsa van a hisztogramnak, ez a szerkezet nem tartalmaz csoportokat.

Az alumínium–nikkel esetében 6.28 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) 6.30 ábrán látható, hogy tartalmaz csoportokat, azonban ezek csak kisebb csoportok.

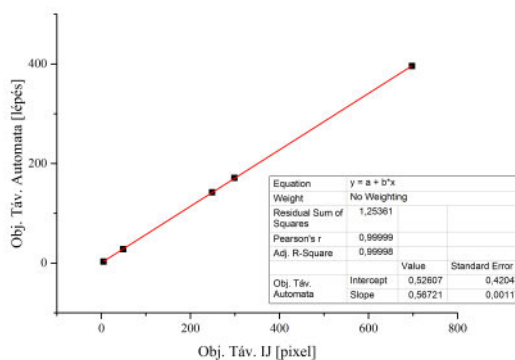
A gömbgrafitos öntöttvas hisztogramján — 6.31 ábra — láthatóak a csúcsok, amelyek arra utalnak, hogy a szerkezet csoportosulásokat mutat. A dendrogramon — 6.32 ábra — is láthatóak a csoportok.

A „kígyós” morfológiájú öntöttvas esetében a(z) 6.33 ábrán látható, hogy csoportosultak az objektumok. E módszer előnye, hogy szerkezettől függetlenül képes kimutatni a csoportosulás mértékét.

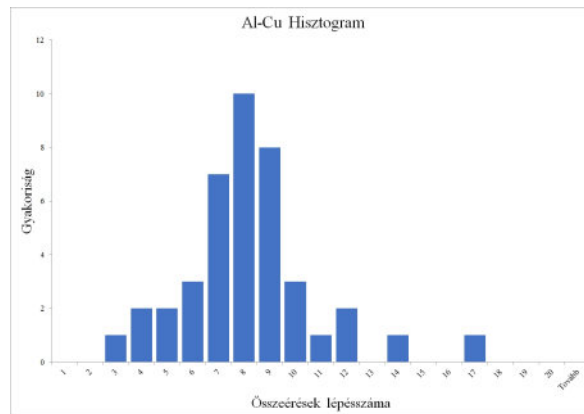
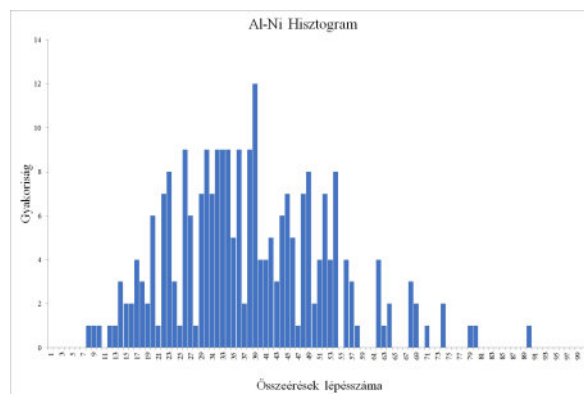
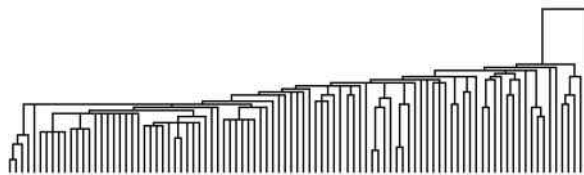
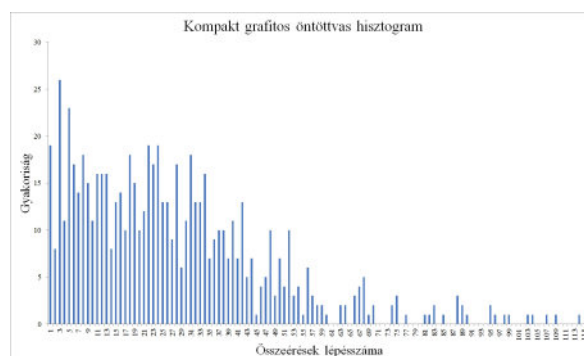
A lemezgrafitos öntöttvas hisztogramján 6.34 ábra, nem láthatóak nagyobb csoportok.

A nem finomított alumínium-szilícium eutektikum hisztogramján — 6.35 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.

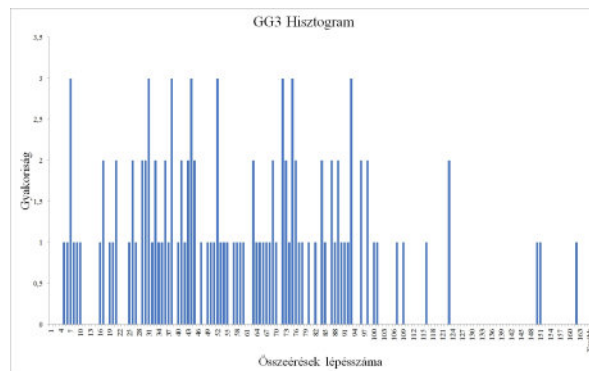
A finomított alumínium-szilícium ötvözet esetében — 6.36 ábra — is az látszik, hogy sok kicsi objektum van, és hamar összeérnek, viszont itt már nem jellemzőek a csoportosulások.



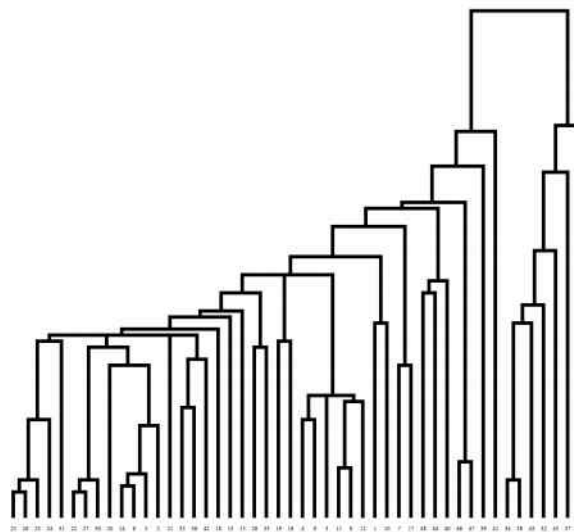
6.26. ábra. A sejtautomata kalibrációs diagramja.

6.27. ábra. Az $Al-Cu$ eutektikum objektum-összeérés hisztogramja.6.28. ábra. Az $Al-Ni$ eutektikum objektum-összeérés hisztogramja.6.29. ábra. Az $Al-Ni$ eutektikum dendrogramja.

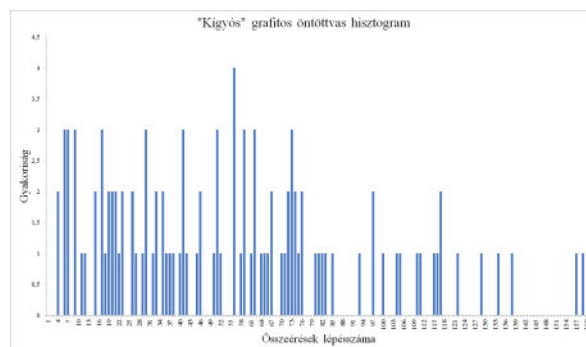
6.30. ábra. A kompakt grafítos öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.



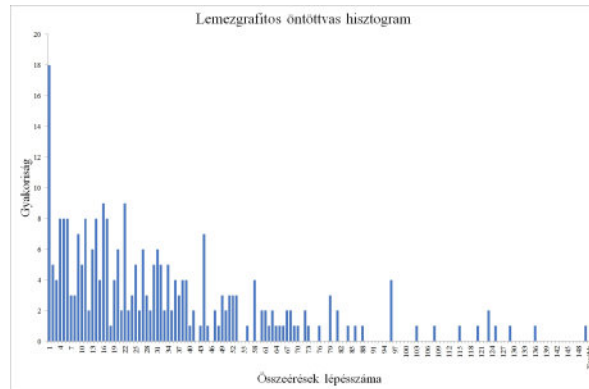
6.31. ábra. A gömbgrafitos öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.



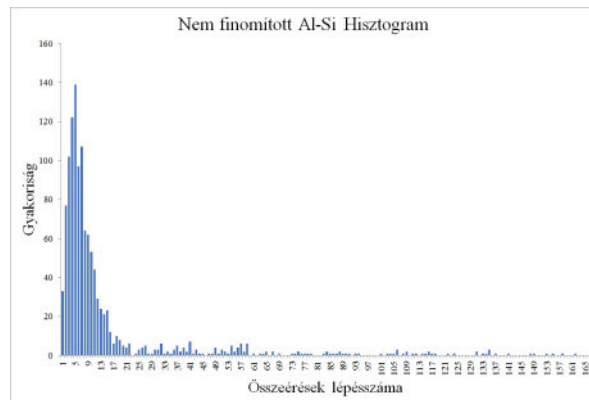
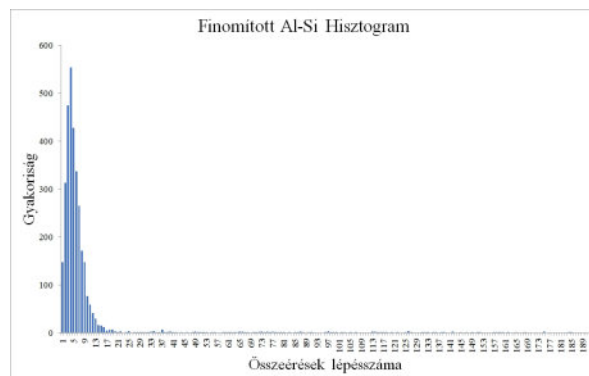
6.32. ábra. A gömbgrafitos öntöttvas dendrogramja.



6.33. ábra. A „kígyós” öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.



6.34. ábra. A lemezes öntöttvas objektum-összeérés hisztogramja.

6.35. ábra. A nem finomított $Al-Si$ eutektikum objektum-összeérés hisztogramja.6.36. 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, nyomatékváltó-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 minőségellenőrző 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 a 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. [94] 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.

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 előnyt 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.

7. fejezet

Új tudományos eredmények

7.1. 1. Tézis

Eutektikus szövetszerkezetek optikai mikroszkópi felvételeinek automatikus képelemzése során, a háttér nem egyenletes megvilágítása a megvilágítási hibától függetlenül korrigálható úgynevezett *Lava-flow* sejt automatával. Ehhez a szürke képet, mint domborzatot kezeljük, ahol magassági koordinátákat az intenzitás értékek adják. A megvilágítási hiba optikai mikroszkópi felvételen intenzitás maximummal jelentkezik, amit a kitörés helyeként azonosíthatunk. Az intenzitás maximum keresése egyszerű szélsőérték kereséssel elvégezhető. Az innen meginduló „láva” folyamatosan kitölti az intenzitás képen jelentkező lyukakat és árkokat. A „láva” képen belül tartásához a kép szélén szükséges megemelni az intenzitás értékeket $2\times$ -es lineáris zárással. Amint a kitörés pontjában megjelenő mennyiségű láva túlcserél a gáton, visszakapjuk a megvilágítási hiba okozta háttérképet, amit az eredeti képből kivonva korrigálható a megvilágítási hiba.

7.2. 2. Tézis

Determinisztikus erózióval és pixelek számlálásával az eutektikus fázisok alak szerint csoportosíthatók. Tipikus eutektikus szövetszerkezetek mikroszkópi felvételeinek vizsgálatkor az eutektikus fázisok négy alakcsoportját különböztettem meg: lemezes, kígyós, kompakt és gömbös. Biztonságos csoportosításhoz több alakjellemző szükséges, azonban képpont számlálással csak a terület és kerület határozható meg, ami alapján az objektumok körszerűsége számítható. A determinisztikus erózió során az egyes tipikus alakok körszerűsége eltérően változik. Az eróziós lépések után számított körszerűségek a lépések függvényében, mint idősor elemezhető. Kiválasztott tanuló mintasor alapján a körszerűség – eróziós lépés paraméterterben a tipikus alakokhoz tartozó átlagos függvények definiálhatók. Ezeket felhasználva egy legközelebbi szomszéd kereső algoritmussal a vizsgált objektum alak szerint csoportosítható. Ha az átlag-függvények alapján definiáljuk az egyes alakokat elválasztó hipersíkokat, akkor pedig egy tartó vektor gép végezheti el a csoportosítást.

Az objektumok lineáris méretének meghatározása sejt automata alapú számítással nem triviális. A szokásos kereső és elemző algoritmusok sejt automata architektúrán nem hatékonyak. A terület számlálása azonban rövid számítási idővel elvégezhető. Ha

a terület, a kerület és az objektumhoz tartozó alak osztály ismert, akkor sztereológiai összefüggésekkel, amennyiben szükséges, az objektum lineáris mérete számítható.

7.3. 3. Tézis

Sztochasztikus dilatációval az eutektikus szövetszerkezetben az objektumok távolsága és elrendeződése meghatározható. Sztochasztikus dilatáció során biztosítjuk, hogy az objektumok egyes kontúr elemei közel azonos sebességgel mozogjanak. A dilatáció során regisztráljuk azt a dilatációs lépésszámot, ahol az objektumok összeérnek. Ha a dilatációt addig folytatjuk, amíg a háttér el nem tűnik, és csak objektumokhoz tartozó képpontok alkotják a képet, akkor egy úgynevezett morfológiai mozaikot kapunk, amit szokásosan alkalmaz a szakirodalom az elrendeződés értékelésére. Az összeérési eseményekhez tartozó lépések és az összeérő objektumok alapján a felosztó csoportelemzés dendrogramja előállítható. A dendrogram alapján vizsgálható a csoportosulás ténye és csoportok is kijelölhetők. Ha a dendrogramon a csoportosulás nem állapítható meg, akkor az összeérésekhez tartozó lépések szórása alapján az elrendeződés szabályossága elemezhető. Természetesen ez a kialakult morfológiai mozaik elemzésével is megmondható.

A dilatáció mértéke és a dilatációs lépések száma között kölcsönösen egyértelmű és szigorúan monoton kapcsolat áll fenn, így az objektumok összeéréséhez tartozó lépések számából a közöttük lévő legrövidebb út számítható. Mivel a dilatáció sztochasztikus, így ehhez egy kalibráló függvény meghatározása szükséges. A módszerrel az eutektikus szövetszerkezet fázisainak távolságát, mint a fázisok közötti legrövidebb út átlagát definiálom.

7.4. 4. Tézis

Eutektikus szövetszerkezetről készített digitális mikroszkópi felvételt sejt automata univerzumként kezelve, determinisztikus és sztochasztikus állapotváltási szabályok alkalmazásával hatékonyan elemezhető. Elvégezhető a képek posteriori háttérkorrekciója. A szegmentálás szürkeségi hisztogram elemzésén alapuló eljárásai implementálhatók sejt automata környezetben. Mérhető az objektumok távolsága, elemezhető az elrendeződésük – csoportosulásuk, az objektumok alak szerinti csoportosítása elvégezhető. Az eljárásban egy automata az objektumokat, egy másik pedig az elrendezésüket elemzi és az eredményeket, mint idősor kapjuk. Ennek folyamatos elemzéséből kapjuk az eredményeket. A klasszikus képelemző eljárásokat tekintve egy az eutektikus szövetszerkezetek elemzésére fejlesztett speciális módszert kapunk, ami csak sejt automatákat alkalmaz és számítási erőforrás kihasználásban hatékonyabb.

8. fejezet

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 univerzumként 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 sz-

erkezetű *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.

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 Aluminium 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] Doru Michael Stefanescu (1998) "ASM Handbook Vol. 15: Casting" ASM International

-
- [18] 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] Joel L. Schiff (2008) "Cellular Automata" Wiley
- [27] Bastien Chopard, Michel Droz (1998) "Cellular Automata Modeling of Physical Systems" Cambridge University Press
- [28] Kendall Preston Jr., Michael J.B. Duff (1984) "Modern Cellular Automata" Springer Science+Business
- [29] Stephen Wolfram (2002) "A New Kind of Science" Wolfram Media
- [30] Barkóczy Péter, Gyöngyösi Szilvia (2012) "Sejtautomata Anyagtudományi Alkalmazásai" Miskolci Egyetem
- [31] Arto Salomaa (1985) "Computation and Automata" Cambridge University Press
- [32] William Aspray (1990) "John von Neumann and The Origins of Modern Computing" MIT Press
- [33] Dieter A. Wolf-Gladrow (2000) "Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models" Springer
- [34] Andrew Ilachinski (2001) "Cellular Automata: A Discrete Universe" World Scientific
- [35] Tino Gramß, Stefan Bornholdt, Michael Groß, Melanie Mitchell, Thomas Pellizzari (2000) "Non-Standard Computation" Wiley
- [36] Lemont B. Kier, Paul G. Seybold, Chao-Kun Cheng (2005) "Modeling Chemical Systems using Cellular Automata" Springer
- [37] Richard J. Gaylord, Kazume Nishidate (1996) "Modeling Nature" Springer Science+Business

- [38] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle (1998) "Image Processing, Analysis, and Machine Vision" Brooks/Cole Publishing
- [39] Dwayne Phillips (1994) "Image Processing in C" R&D Publications
- [40] William K. Pratt (2007) "Digital Image Processing" Wiley
- [41] John C. Russ (1998) "The Image Processing Handbook" CRC Press
- [42] Rastislav Lukac, Konstantinos N. Plataniotis (2007) "Color Image Processing" CRC Press
- [43] Paul Borke (1995) "Colour Spaces" <http://paulbourke.net/changes.html/colourspace>
- [44] Kovács Ernő (2010) "Elektronika II. Előadás Jegyzet" Miskolci Egyetem
- [45] <http://www.mathworks.com/help/releases/R2013b/images/color7.gif>
- [46] <http://jun.hansung.ac.kr/DI/IMAGES/ch02/color-hsi.jpg>
- [47] Gácsi Zoltán (2003) "Az anyagok szövetszerkezetének morfológiai anizotrópiája és rendezettsége Doktori Értekezés" Miskolci Egyetem
- [48] G.M. Crisci, Di. Gregorio, O. Pindaro & G.A. Ranieri (1986) "Lava Flow Simulation By A Discrete Cellular Model:First Implementation" International Journal of Modelling and Simulation, 6:4, 137-140
- [49] 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
- [50] 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
- [51] Bernsen J. (1986) "Dynamic Thresholding of Grey-Level Images" Proc. of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition, pp. 1251-1255
- [52] Sezgin M. and Sankur B. (2004) "Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation" Journal of Electronic Imaging, 13(1): 146-165
- [53] Huang L.-K. and Wang M.-J.J. (1995) "Image Thresholding by Minimizing the Measures of Fuzziness" Pattern Recognition, 28(1): 41-51
- [54] 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
- [55] Trussell H.J. (1979) "Comments on Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method" IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-9(5): 311.

-
- [56] 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
- [57] Tsai W.H. (1985) "Moment-Preserving Thresholding: A New Approach" *Graphical Models and Image Processing*, 29(3): 377-393
- [58] Niblack W. (1986) "An introduction to Digital Image Processing" Prentice-Hall
- [59] Otsu N. (1979) "A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms" *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 9(1): 62-66
- [60] Sahoo P.K., Wilkins C., and Yeager J. (1997) "Threshold Selection Using Renyi's Entropy" *Pattern Recognition*, 30(1): 71-84
- [61] Sauvola J. and Pietaksinen M. (2000) "Adaptive Document Image Binarization" *Pattern Recognition*, 33(2): 225-236
- [62] 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
- [63] 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
- [64] Shanbag A.G. (1994) "Utilization of Information Measure as a Means of Image Thresholding" *Graphical Models and Image Processing*, 56(5): 414-419
- [65] 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
- [66] Li, CH Lee, CK (1993), "Minimum Cross Entropy Thresholding", *Pattern Recognition* 26(4): 617-625
- [67] Li, CH Tam, PKS (1998), "An Iterative Algorithm for Minimum Cross Entropy Thresholding", *Pattern Recognition Letters* 18(8): 771-776
- [68] Anil K. Jain, Richard C. Dubes (1988) "Algorithms for Clustering Data" Prentice-Hall
- [69] Vojislav Kecman (2001) "Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models" MIT Press
- [70] Rui Xu, Donald C. Wunsch, II (2009) "Clustering" Wiley, IEEE Press
- [71] Michael R. Berthold, Christian Borgelt, Frank Höppner, Frank Klawonn (2010) "Guide to Intelligent Data Analysis: How to Intelligently Make Sense of Real Data" Springer
- [72] Shiego Abe (2005) "Support Vector Machines for Pattern Classification" Springer

- [73] Johan A. K. Suykens, Marco Signoretto, Andreas Argyriou (2015) "Regularization, Optimization, Kernels, and Support Vector Machines" CRC Press
- [74] Ingo Steinwart, Andreas Christmann (2008) "Support Vector Machines" Springer
- [75] Bodon Ferenc, (2010) "Adatbányászati algoritmusok"
<http://www.cs.bme.hu/bodon/magyar/adatbanyaszat/tanulmany/adatbanyaszat.pdf>
- [76] Andrea Ahlemeyer-Stubble, Shirley Coleman (2014) "A Practical Guide to Data Mining for Business and Industry" Wiley
- [77] David L. Olson, Dursun Delen (2008) "Advanced Data Mining Techniques" Springer
- [78] Gérard Govaert, Mohammed Nadif (2014) "Co-Clustering: Models, Algorithms and Applications" ISTE, Wiley
- [79] Lutz Hamel (2009) "Knowledge Discovery with Support Vector Machines" Wiley
- [80] Nello Cristianini, John Shawe-Taylor (2000) "An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods" Cambridge University Press
- [81] Yunqian Ma, Goudong Guo (2014) "Support Vector Machines Applications" Springer
- [82] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, Vipin Kumar (2011) "Bevezetés az adatbányászathoz" Panem
- [83] 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
- [84] 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
- [85] Gergely Gréta (2008) "A stroncium és az olvadákáramlás hatása a Si morfológiájára, $Al7Si03Mg$ ötvözet esetén, Doktori Értekezés" Miskolci Egyetem
- [86] Kardos Ibolya (2009) "Digitális képfeldolgozás és színes metallográfia, Doktori Értekezés" Miskolci Egyetem
- [87] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metallurgical_microscope
- [88] Bárczy Pál, Fuchs Erik (1981) "Metallográfia I.: Röntgenes finomszerkezetvizsgálatok" Tankönyvkiadó Budapest
- [89] S. Amelinckx, D. van Dyck, J. van Landuyt, G. van Tendeloo (1997) "Handbook of Microscopy: Vol. 1. Methods I" VCH
- [90] S. Amelinckx, D. van Dyck, J. van Landuyt, G. van Tendeloo (1997) "Handbook of Microscopy: Vol. 2. Methods II" VCH

- [91] 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
- [92] Bernd Jähne, Horst Haußecker (2000) "Computer Vision and Applications" Academic Press
- [93] https://imagejdocu.tudor.lu/faq/technical/what_are_the_algorithms_used_to_calculate_particle_area_and_perimeter
- [94] 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.
- [95] 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
- [96] Chunjiang Wang, Qiang Wang, Zhongying Wang, Hutian Li, Keiji Nakajima, Jicheng He (2008) "Phase alignment and crystal orientation of Al³Ni in Al-Ni alloy by imposition of a uniform high magnetic field" *Journal of Crystal Growth* 310 1256-1263
- [97] 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
- [98] 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:

- [99] Kornél Bortnyik, Dr. Péter Barkóczy (2016) "Identification of Eutectic Microstructure by HPP Cellular Automata" *Materials Science Forum* Vol. 885, pp 228-233
- [100] Kornél Bortnyik, Dr. Péter Barkóczy (2017) "Examination Of Clustering In Eutectic Microstructure" *Arch. Metall. Mater.* 62, 2B, 1155-1159
- [101] 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
- [102] Bortnyik Kornél, Léránth Gábor, Dr. Barkóczy Péter (2015) "NYOMÁSOSAN ÖNTÖTT ALUMÍNIUM ALKATRÉSZEK DENDRITES SZERKEZETÉNEK JELLEMZÉSE AUTOMATIKUS KÉPELEMZÉSEL" X. Országos Anyagtudományi Konferencia
- [103] Bortnyik Kornél, Dudás Dóra Daniella (2015) "Irányítottan kristályosított és Mágnesesen kevert Al-Al₃Ni eutektikus ötvözet mikroszerkezetének jellemzése számítógépi képelemzéssel" Tavaszi Szél Konferencia 2015