

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola



# Eutektikus szövetelemek automatikus számítógépi képelemzése

**Bortnyik Kornél**

Témavezető:  
Dr. Barkóczy Péter

Miskolci Egyetem  
Műszaki Anyagtudományi Kar  
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet  
2022



## 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 értünk.

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.

# Automatikus számítógépi képelemzés

Az automatikus számítógépi képelemzés megvalósításához olyan módszerekre van szükség, amelyek segítségével teljesen kiküszöbölhető az emberi beavatkozás igénye. 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.

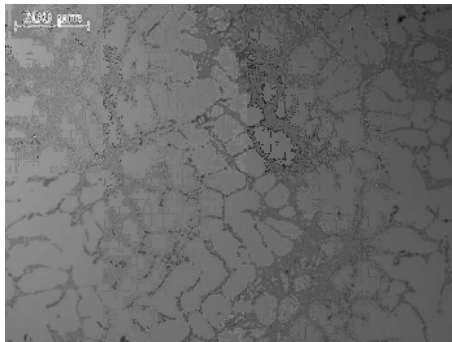
A számítógépi képelemzésben nem idegen a sejt automata, hiszen sok megoldásban találkozunk vele, bár nem mindig így mutatjuk be. A képelemzésben alkalmazott konvolúciós műveletek totális sejtautomaták. A digitális szürkeárnyalatos kép felfogható, mint egy négyzetes geometriájú sejtekből álló univerzum. 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. 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 alkalmazzák, bár nem általánosan elterjedt. Ahogy látható maga a kép reprezentációja teszi hatékonyá a sejt automata alkalmazását, ezért fejlesztésemben arra törekedtem, hogy a felvetett kérdésekre lehetőleg csak sejtautomata alkalmazásával adjak választ.

## Az egyenlőtlen megvilágítás automatikus korrigálása

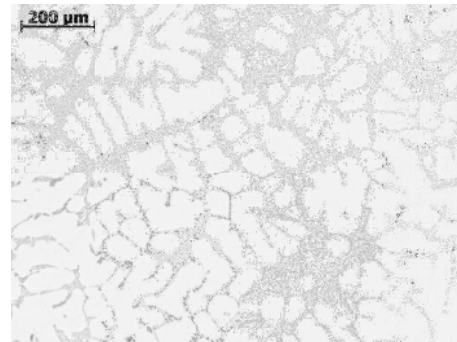
Az egyenlőtlen háttérvilágítás a képeken végzett méréseket jelentősen hátráltatja, ugyanis ez a hiba a szegmentálás műveletét nehezíti meg. Az ilyen hibával rendelkező képeken az argumentum nélküli automatikus szegmentáló algoritmusok nem működnek megfelelően. Mindez azt jelenti, hogy ilyenkor a szegmentálás folyamán emberi beavatkozásra van szükség, ami az automatikus képelemzés folyamatát megszakítaná. Ezért szükséges ennek a hibának a korrigálása. A módszer, amit a háttér megvilágítás korrigálásához választottam, a *Lava-flow* algoritmuson alapul, amelyet a lávafolyások irányának megjósolásához használnak, és még fejlesztési stádiumban van. Ezen eljárás használatához nincs szükség még egy képre, csupán a meglévőre van szükség a javításhoz. Ennek alapja szintén sejtautomata, csak ebben az esetben - mivel még 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 34 pixelnyi 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:

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

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 (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.



a) Hibás kép.



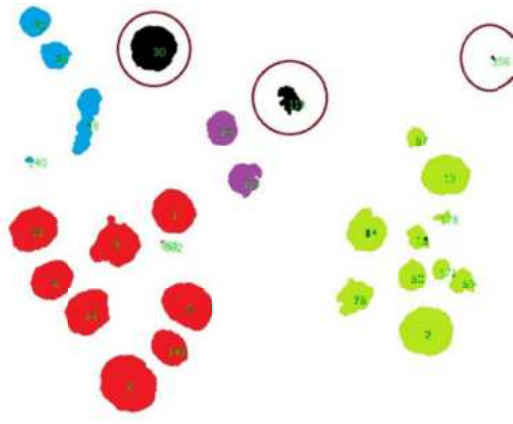
b) Korrigált kép.

1. ábra: Egyenlőtlen háttérvilágítás okozta hiba, és korrekciója.

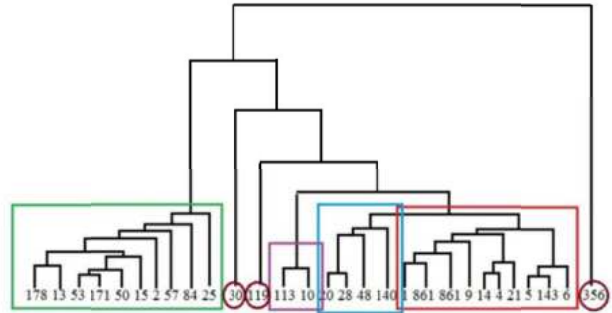
## Az objektumok elrendeződése

A mérő sejtautomaták által szolgáltatott adatok önmagukban még nem alkalmasak arra, hogy értékelni lehessen a képet. Ehhez adatbányászatra van szükség. A sejtautomaták által szolgáltatott adatokat klaszterelemzéssel és osztályozó algoritmusok segítségével értékeltem.

Az objektumok elrendeződésének elemzésére készült program sztochasztikus sejtautomatára épül. Az objektumok címkézése után a határfeltételek kerülnek beállításra. Ebben az esetben ez azt jelenti, hogy a képen a szélső képpontok egyenlők az eggyel beljebb található sor, ill. oszlop képpontjainak értékével. Ezután következik a sztochasztikus sejtautomata része az algoritmusnak. Az objektumok egészen addig növekednek, amíg össze nem érnek minden szomszédjukkal, de a növekedés egy  $P$  valószínűségi változó értékétől függ, amit a véletlen-szám generátor állít elő. Erre azért van szükség, mert egy bizonyos lépés után a növekvő objektumok felveszik a kernel alakját, ha determinisztikusan történik a növekedés. 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.

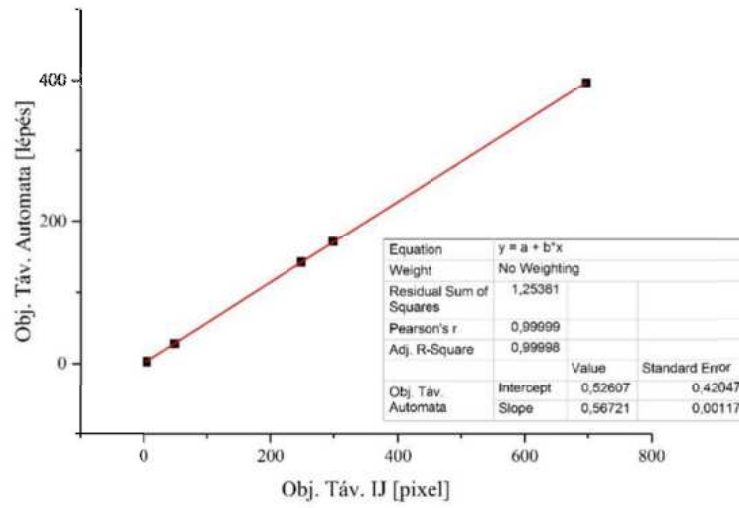


a) Csoportok.

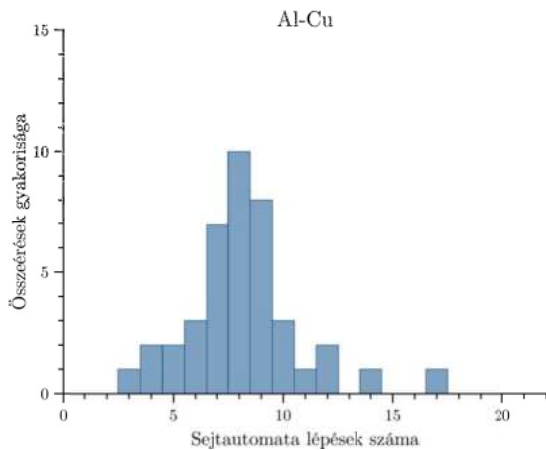


b) Osztályok.

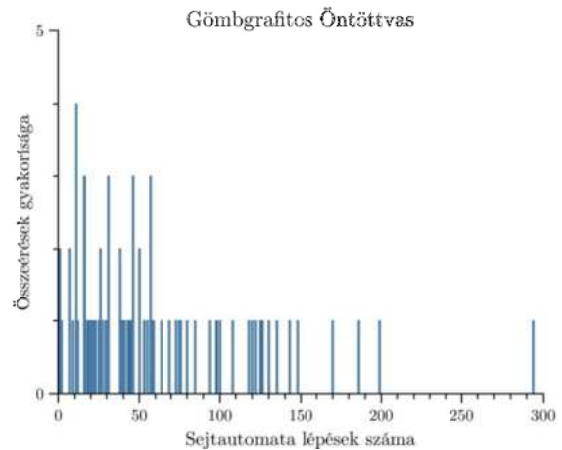
2. ábra: A gömbgrafitos öntöttvas objektumainak csoportjai és osztályai.



3. ábra: A sejtautomata kalibrációs diagramja.



(a) Nem csoportos szerkezet.

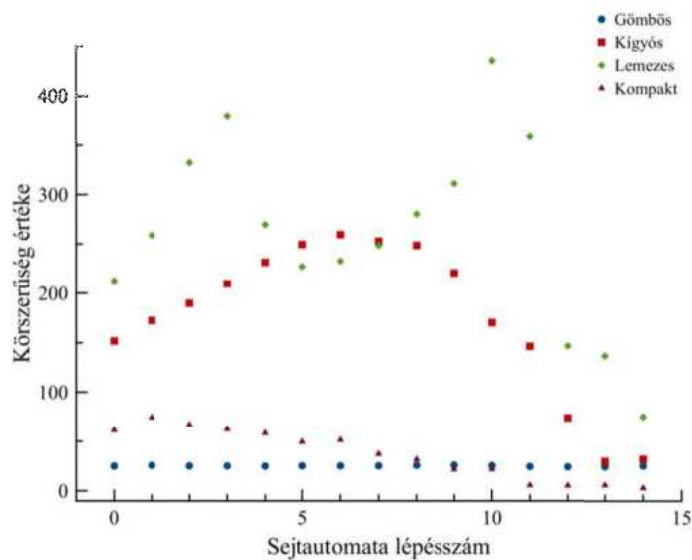


(b) Csoportosulást mutató szerkezet.

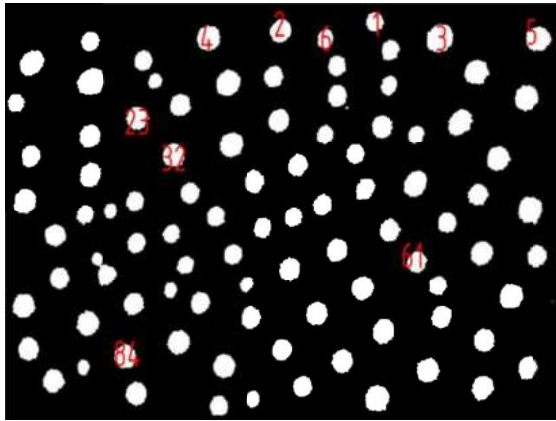
4. ábra: Az objektum-összeírások hisztogramja.

## Az objektumok alakfelismerése

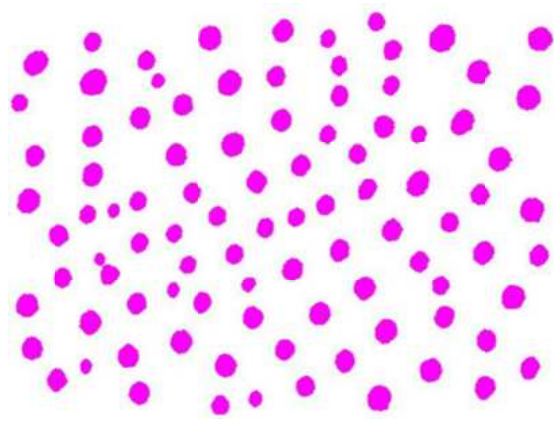
A másik sejtautomata az objektumok alakjának és méretének elemzésére alkalmas adatokat állít elő. Ennél a sejtautomatánál is megtörténik az objektumok címkézése. Ebben az esetben a határfeltételeket nem módosítottam, az univerzum egyben a kép is. Majd, meghatározott lépésszámig erózió következik. Ha 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.



5. ábra: A körszerűség sejtautomata lépésszám függése különböző szerkezetű eutektikumok esetén.



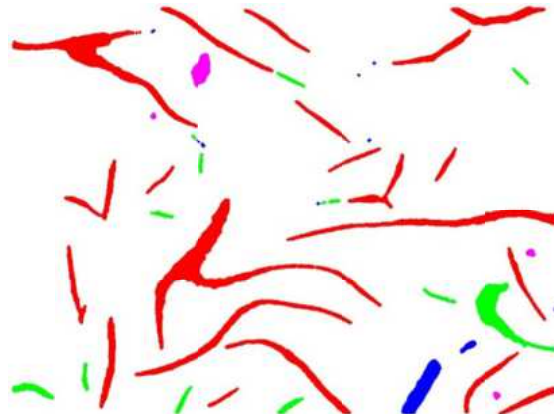
(a) *Al-Al<sub>3</sub>Ni* szövete képe.



(b) *Al-Al<sub>3</sub>Ni* objektumai alak szerint színezve.



(c) Lemezgrafitos öntöttvas szövete képe.



(d) Lemezgrafitos öntöttvas objektumai alak szerint színezve.

6. ábra: A különböző morfológiák szövetei. A színek jelentése: piros: lemezes, kék: kompakt, zöld: „kígyós”, lila: gömbös/rudas.

Az objektumok alak szerinti besorolását tartóvektor-gép végzi, amely tanítását az osztályozandó alakoknak megfelelő tanító képekkel végeztem el.

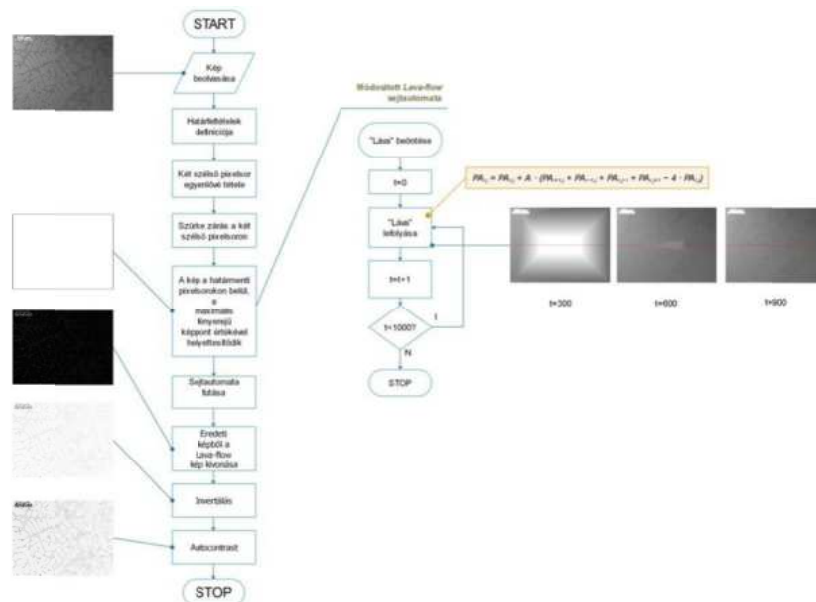


# Új tudományos eredmények

## 1. Tézis

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

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



7. ábra: Az első tézis folyamatábrája.

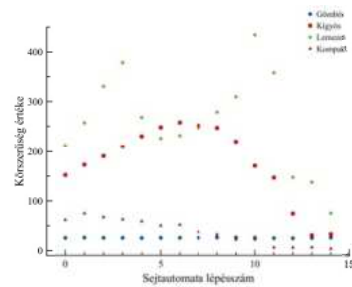
## 2. Tézis

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

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



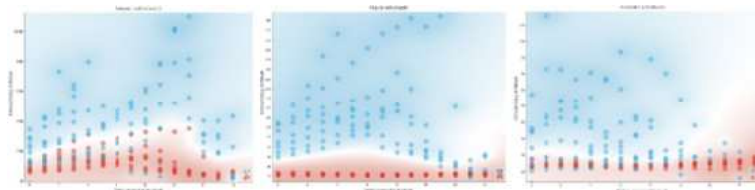
Az alaktípusok karakterisztikus méretei.



A tipikus alakok adatpontjai.

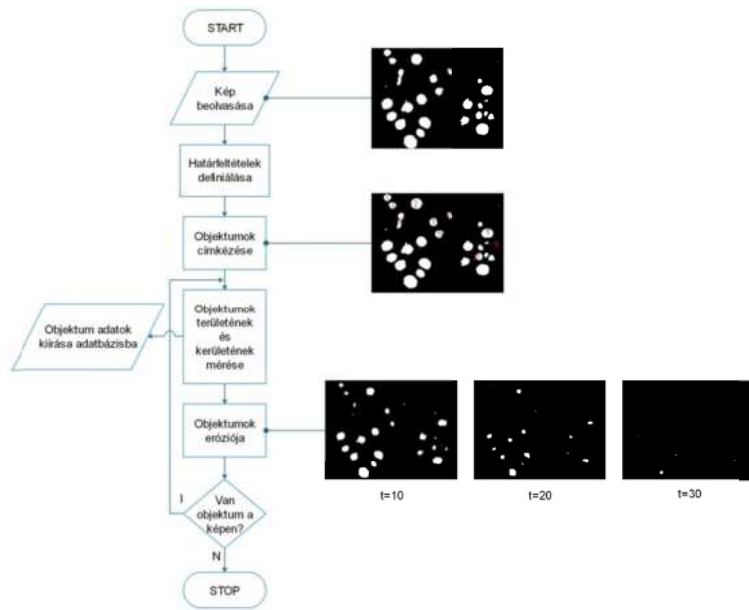
### 8. ábra: A megkülönböztetett alakok jellemzői.

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



### 9. ábra: Az osztályokba sorolás lépései.

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

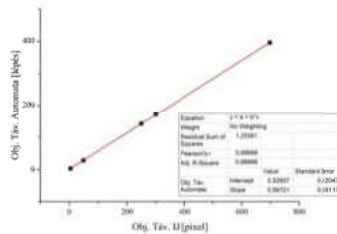


10. ábra: A második tézis folyamatábrája.

### 3. Tézis

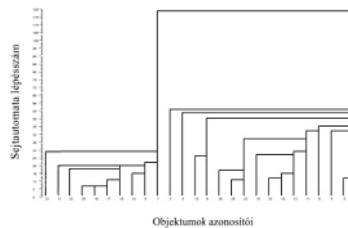
Folyamatosan végzett sztochasztikus dilatáció során az első összeérések regisztrálásával és azok elemzésével az objektumok távolsága és elrendeződése meghatározható. Sztochasztikus dilatációval biztosítható, hogy az eutektikus fázisok kontúr elemei közel azonos sebességgel mozogjanak.

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



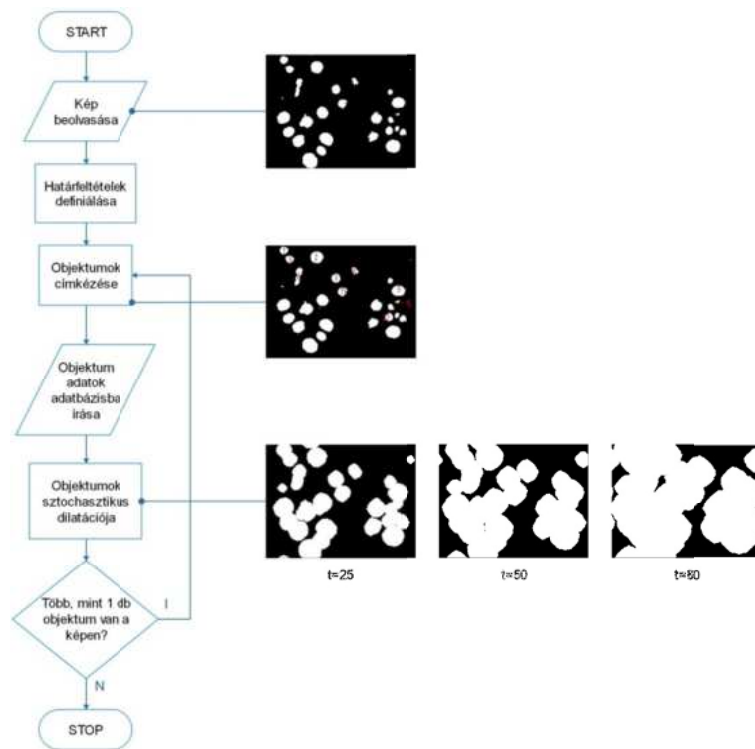
11. ábra: A kalibráló diagram, a valószínűségi változó értéke  $p = 0,5$  ami jól közelíti a függvény meredekségét.

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



12. ábra: Példa dendrogram.

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



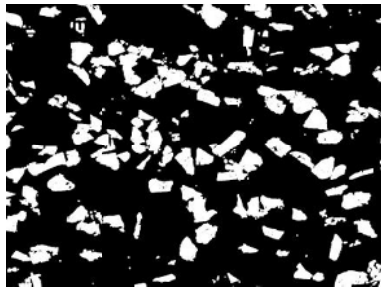
13. ábra: A harmadik tézis folyamatábrája.

#### 4. Tézis

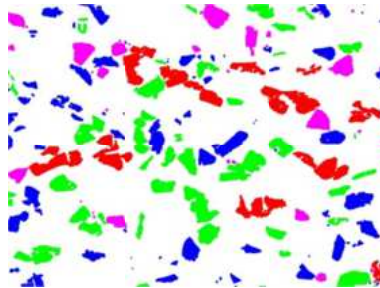
A bemutatott automatikus képelemző eljárás alkalmas nem eutektikus szövetszerkezetről készített mikroszkópi felvétel feldolgozására és értékelésére. Ehhez a következő feltételeknek kell teljesülnie:

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

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



a) A szegmentált kép.



b) Az objektumok alak szerint színezve.



c) A csoportok a huszadik lépésben.

14. ábra: Az *Al-SiC20* kompozit 100-szoros nagyítású képei.

## Publikációk

Kornél Bortnyik, Dr. Péter Barkóczy (2016) "Identification of Eutectic Microstructure by HPP Cellular Automata" Materials Science Forum Vol. 885, pp 228-233

Kornél Bortnyik, Dr. Péter Barkóczy (2017) "Examination Of Clustering In Eutectic Microstructure" Arch. Metall. Mater. 62, 2B, 1155-1159

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

Bortnyik Kornél, Léránth Gábor, Dr. Barkóczy Péter (2015) "NYOMÁSOSAN ÖNTÖTT ALUMÍNIUM ALKATRÉSZEK DENDRITES SZERKEZETÉNEK JELLEMZÉSE AUTOMATIKUS KÉPELEMZÉSSEL" X. Országos Anyagtudományi Konferencia

Bortnyik Kornél, Dudás Dóra Daniella (2015) "Irányítottan kristályosított és Mágnesesen kevert Al-Al<sub>3</sub>Ni eutektikus ötvözet mikroszerkezetének jellemzése számítógépi képelemzéssel" Tavaszi Szél Konferencia 2015

# 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 tudomány területről 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 szövet szerkezetéhez. 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 szerkezetű  $Al - Si$  eutektikumokhoz. Mindegyik szerkezeten megtörtént az alakfelismerő algoritmus alkalmazása, és a manuális terület és a kerület ellenőrzése. Az alakfelismerés eredményének ellenőrzése szemrevételezéssel történt. A sztochasztikus dilatációra épülő sejtautomata algoritmus segítségével a szomszédos objektumok közötti távolság mérésre került. Az adatokat felhasználva hierarchikus csoportelemzést végeztem. Az itt bemutatott módszerek segítségével a képelemzést végző személyzetnek kevesebb informatikai szaktudásra van szüksége, az emberi beavatkozás minimálisra csökkenthető. Ezáltal a képelemzés folyamata felgyorsul, nagyszámú minta válik elemezhetővé a mérési pontosság növekedésével. Továbbá az automatizáltság lehetővé teszi, hogy a képelemző rendszer beilleszthető legyen az ipar 4.0 technológiák közé. Mindez együttesen lehetővé teszi az adott üzemnek a költségtakarékos, hatékony és magas minőségű termelést.





