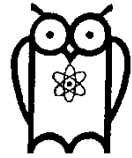




MISKOLCI EGYETEM  
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR  
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT  
3515 MISKOLC Egyetemváros

---



# Alumínium ötvözetek lágyító hőkezelésének szimulációja

## Simulation of annealing heat treatment for aluminium

**Készítette:**  
Lanszki Péter

**Konzulens:**  
Barkóczy Péter  
egyetemi docens

Tanszék  
2012



## Tartalomjegyzék

### Tartalomjegyzék

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Tartalomjegyzék.....                                                      | 3  |
| 1. Bevezetés.....                                                         | 4  |
| 1.1 Alumínium napjainkban .....                                           | 4  |
| 2. Alumínium ötvözetek csoportosítása .....                               | 6  |
| 2.1 Alakítható alumínium ötvözetek csoportosítása .....                   | 6  |
| 2.3 Nem nemesíthető alumínium ötvözetek.....                              | 9  |
| 2.2 Nemesíthető alumínium ötvözetek.....                                  | 10 |
| 2.3 Speciális alumínium ötvözetek .....                                   | 11 |
| 2.4 Lágyítás .....                                                        | 11 |
| 3. Mérések és eredmények .....                                            | 15 |
| 3.1 Vickers keménységmérés eredményeinek kiértékelése .....               | 15 |
| 3.1.1 Mérés előkészítése .....                                            | 16 |
| 3.1.2 Keménységmérés .....                                                | 17 |
| 3.1.3 Vickers-keménység (HV) a hőmérséklet függvényében .....             | 18 |
| 3.2 Szakítószilárdság mérési eredményeinek kiértékelése .....             | 23 |
| 3.2.1 Mérés előkészítése .....                                            | 23 |
| 3.2.2 Szakítóvizsgálat.....                                               | 24 |
| 3.2.3 Szakítószilárdságok a hőmérséklet függvényében .....                | 25 |
| 3.3 Szimuláció.....                                                       | 27 |
| 3.3.1 Szimulációs F-hőmérséklet diagramok három órás lágyítás esetén..... | 33 |
| 3.3.2 Szimulációs F-hőmérséklet diagramok egy órás lágyítás esetén.....   | 36 |
| 4. Összefoglalás, eredmények értékelése .....                             | 38 |
| 5. Köszönetnyilvánítás .....                                              | 39 |
| 6. Irodalomjegyzék.....                                                   | 40 |

## 1. Bevezetés

### 1.1 Alumínium napjainkban

Az alumínium felhasználása napjainkban az acél mögött a második helyet tölti be, mint legnagyobb mennyiségben termelt és felhasznált fém. Elterjedését annak köszönheti, hogy rengeteg előnyös tulajdonságot rejt, mint például: alacsony sűrűség, jó villamos vezetés és mindemellett megfelelő korróziós tulajdonságok.

Az alumíniumot és ötvözeit sokféleképpen megmunkálhatjuk, a leggyakoribb alakadási technológia a hideg képlékeny alakítás. Az alakítás hatására a szilárdság megnő, ezáltal csökken az alakíthatóság, ezért újbóli alakítás előtt lágyítanunk kell, hogy a keményedésnek a mértékét lecsökkentsük.

További finomabb megmunkálás esetén meg kell szüntetnünk a keményedés hatását, azaz lágyító hőkezelést kell alkalmaznunk. Hőkezelést nem csak alakítási műveletek között, hanem az esetleges végtermék paramétereinek pontos mechanikai tulajdonságainak beállítása miatt is alkalmaznunk kell.

Az iparban fontos a költséghatékony termelés megvalósítása, ezért a szakembereknek nap mint nap új feladatokat kell megoldaniuk a versenyképes termelés megőrzése céljából, valamint az üzemi költségek minimalizálása nem mehet a minőség rovására.

Az iparban új alumínium ötvözeteket is meg kell munkálni, amit a szakemberek a lehető legegyszerűbb módon próbálnak megoldani. Az új ötvözetek minőségét meg kell állapítanunk ezt legkönnyebben a szilárdsági paraméterek mérésével tehetjük. Beszélhetünk a vonatkozó szabvány szerint kemény, félkemény, negyed kemény és lágy állapotról.

Dolgozatomban egy lágyító hőkezelés tervezésére alkalmas eljárást mutatok be. A lágyulás során végbemenő újrakristályosodás, egy meglévő egy-dimenziós sejt automata szimulációját alkalmazom, egy kidolgozott simplex eljárás segítségével skálázom. A munkám célja, hogy az említett szimulációval a vizsgált ötvözetek esetében a lágyító hőkezelések tervezhetőek legyenek.

Az automaták skálázásához mérési adtabázisok szükséges. Ehhez 6 különböző alakítható alumínium ötvözetet hidegen hengereltem 4 alakítási mértékkel, majd 3 órás izotermás hőkezeléseket végeztem különböző hőmérsékleteken. Keménységméréssel és

szakítóvizsgálatok eredményén keresztül követtem a lemezek lágyulását. A mérési adatbázis minden elemére elvégeztem a szimuláció skálázását.

Eredményeimet egy adatbázisba foglalva, elkészülhet egy olyan tervezőrendszer, ami a lágyító hőkezelések közben segítséget nyújthat a megfelelő technológia kidolgozásához.

## 2. Alumínium ötvözetek csoportosítása

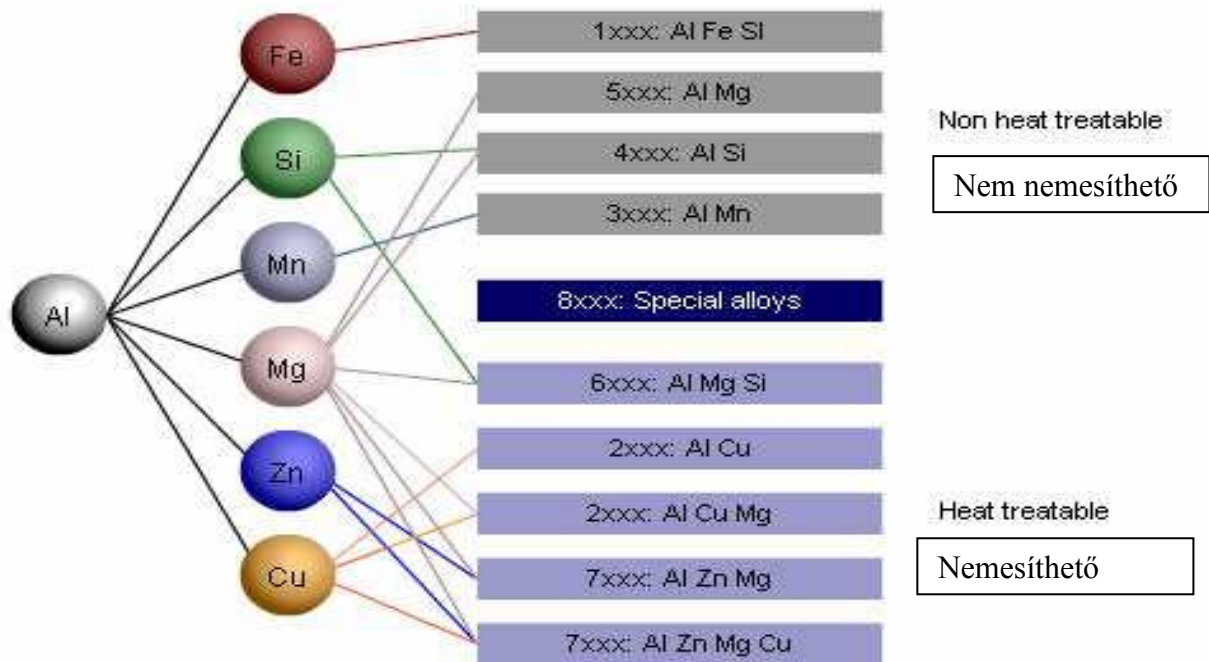
### 2.1 Alakítható alumínium ötvözetek csoportosítása

A félkész alumínium termékek előállításánál fontos szempont a megfelelő anyagminőség kiválasztása, mivel minden ötvözet csoportra más és más mechanikai, technológiai és fizikai tulajdonság jellemző. Az alakítható alumínium ötvözeteket 8 csoportba soroljuk, jellemzésére négy tagból álló számsort használunk, illetve szabvány és alakítás módja szerint még kiegészíthetjük a jelölésüket. Előtagként két jelölés használatos az elsőnek kialakult AA (Aluminium Association) az amerikai szabványt jelöli, míg az EN AW (European Aluminium Wrought) pedig az európai szabványé (pl.: EN AW-1050 / AA 1050). Csak két előtag eltérés van a két szabvány között mivel az európai jelölés átvette az amerikai és ezáltal nemzetközi szabvány lett az amerikai jelölésmód. Az 2.1. sz. táblázatban láthatjuk a jelenleg hatályos MSZ EN 573 szabvány milyen fő csoportokra osztja az alumínium ötvözeteket.

| Csoport    | Fő ötvöző elemek               | Főbb felhasználás                   |
|------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| EN AW 1xxx | Ötvözetlen alumíniumok (Fe Si) | Élelmiszeripar, fólia               |
| EN AW 2xxx | Cu Mg                          | Repülőgépipar, autóipar             |
| EN AW 3xxx | Mn                             | Csomagolás, edénygyártás, építőipar |
| EN AW 4xxx | Si                             | Edénygyártás, ívforrasztás          |
| EN AW 5xxx | Mg                             | Csomagolás, tartályok               |
| EN AW 6xxx | Mg Si                          | Autóipar, gázpalack, söröshordó     |
| EN AW 7xxx | Zn Mg Cu                       | Repülőgépipar, hőcserélő szalag     |
| EN AW 8xxx | Más elemek (Al Ti)             | Fólia, csomagolás, padlófűtés cső   |

2.1. sz. táblázat: Az alumínium csoportosítása és felhasználási területei [1]

Az alumínium ötvözeteket mindemellett két alapvető csoportba sorolják, ezáltal beszélhetünk önthető és alakítható ötvözetekről. Az alakítható ötvözetek általában kis mennyiségben tartalmaznak ötvözőket, többnyire 1-2%-ban. Míg az önthető alumíniumok ötvöző tartalma lényegesen magasabb, eutektikushoz közeli 6-12% is lehet (pl:2000 jelű AlCu4Timg nemesíthető nagy szilárdságú, 4000 jelű AlSi12 kiválóan önthető, jól használható a vékony falú öntvényekhez). Felosztását megtekinthetjük a 2.1. sz. ábrán.



2.1. sz. ábra Az alumínium csoportosítása [2]

Az alumínium ötvözésének mértékét a tiszta alumínium mennyiségét négytagú számmal jellemezhetjük. Minden tagjának külön jelentése van első tagja az adott ötvözet típusára, illetve a fő ötvözőjére utal, a másodig tag egy már meglévő ötvözet módosítását jelzi. A harmadik és negyedik tagnak jelentése annak függvényében változik, miként módosítjuk az első két tagot (pl: Az lxxx csoport esetében a 3. és 4. tag az alumínium 99,00 % feletti összetételét jelöli, így 1050 jelölésű alumínium ötvözet 99,5%-ban tartalmaz alumíniumot).

Az alumínium ötvözetek állapotát az MSZ EN 515 szabvány szerint utótagként jelölni kell.

**O** = teljesen kilágyított állapot, ezt a keménységi állapotot melegalakítással alították elő

**F** = gyártási állapot, mechanikai tulajdonságok értékeire nincsenek előírások

**T – F, O, H**= állapotól eltérő hőkezelések (nemesíthető ötvözeteknél)

**H** = hidegalakítással keményített anyagok (nem nemesíthető ötvözeteknél)

Az **O** állapotnak a hőkezeléssel, teljesen kilágyított ötvözeteket értjük, amik szabvány szerint is a legkisebb keménységi értékkel rendelkeznek.

Az **F** gyártási állapotnak azok a hidegalakítással, melegalakítással vagy öntéssel előállított félkésztermékek, melyeknél a végső lépés az alakítás vagy hőkezelés

nem ellenőrzött keretek között megy végbe, ezért a szilárdsági tulajdonságaik nem garantálhatóak.

A **T** hőkezelt állapotnak azok a termékek felelnek meg, melyek nemesíthető alumínium ötvözetekből (2xxx, 6xxx, 7xxx) készülnek és nagy hőmérsékletű, rövid ideig tartó oldó hőkezelés (esetleg ilyen hőmérsékletű gyártási technológia) utáni hűtés vagy hűlés, majd ezeket követő szoba- vagy növelt hőmérsékleten való hosszabb hevertetés során jönnek létre.

A **T** jelölés 10 féle állapotot különböztet meg, T1-T10.

A **H** hidegalakítással keményített állapotra jellemző, hogy a tennék szilárdsági tulajdonságait meghatározott hidegalakítással vagy a legnagyobb hidegalakítás utáni hőkezeléssel érik el. A **H** jelzés után az első számjegy azt jelenti, hogy az előírt minőséget milyen módon érik el.

**H1** = hengerelt vagy húzott állapot, ahol az utolsó művelet a hidegalakítás, mellyel beállítják a szilárdsági tulajdonságokat.

**H2** = visszaeresztett állapot esetén az utolsó hőkezelő művelet révén részleges lágyulással vagy megújulással egybekötött szilárdságcsökkenést előidézve érik el az előírt tulajdonságokat.

**H3** = stabilizált, feszültségmentesített állapot, amely csak kis mértékben tér el a H1 állapottól és hosszabb idejű tárolása megengedett a felhasználás előtt mivel enyhe hőkezeléssel a szilárdsági tulajdonságokat megmaradnak (különösen AlMg és AlMn önnemesedő ötvözetek esetén), hogy az esetleges szilárdság csökkenés elkerülhető legyen.

A **H** jelzés után a második helyen álló szám a keménységi fokozatot jelöli. A keménység fokozatai a lágy és kemény állapot között nyolcad részekből, vagy ebből egyszerűsítve adódnak. A **H** jelzés után a második szám megmutatja milyen a keménységi fokozata az anyagnak. Nyolc részből áll, ami a kemény és a lágy állapot közötti átmenetet foglalja magába, ezt megtekinthetjük a 2.2. sz. táblázatban.

| Állapot              |           |          |             |
|----------------------|-----------|----------|-------------|
|                      | Hengerelt | Hőkezelt | Stabilizált |
| Kemény               | H18       | H28      | H38         |
| $\frac{3}{4}$ kemény | H16       | H26      | H36         |
| $\frac{1}{2}$ kemény | H14       | H24      | H34         |
| $\frac{1}{4}$ kemény | H12       | H22      | H32         |
| Lágy                 | O         |          |             |

2.2 sz. táblázat Az alumínium ötvözetek állapotainak meghatározása [3]

Az alakítható alumínium ötvözeteket további két csoportba lehet sorolni: nem nemesíthető és nemesíthető ötvözetek.

## 2.3 Nem nemesíthető alumínium ötvözetek

Az első csoportba (1xxx) a műszaki értelemben tisztának vett alumínium tartozik. Egyébként ez tartalmazhat 0...0,6 tömeg % Fe-t és 0...0,6 % Si-t, valamint kis mennyiségben egyéb szennyezőket is a 98,0...99,9 tömeg % alumínium mellett. Jól alakítható és korrózióálló, jó a villamos vezetőképessége. A felhasználás szempontjából mértékadó tulajdonságok az alakíthatóság és a villamos vezetőképesség.

A harmadik csoportba (3xxx) a Mn ötvöztetésű alumíniumok tartoznak. Ezek nem nemesíthető ötvözetek, melyeknek az ötvöztetlen alumíniumhoz képest 50...60 N/mm<sup>2</sup> szilárdságnövekedését körülbelül 1% Mn beötvöztetéssel érik el. Az ötvözetek végső tulajdonságainak szempontjából mértékadó az Mn viselkedése. Ahhoz, hogy jól továbbalakítható, finomszemcsés, megfelelő szilárdságú anyagot kapjunk, az ötvözetet nagy hőmérsékleten (530...620°C) kell homogenizálni. A kellően homogenizált tuskókból előállított lemezek viszonylag jól mélyhúzóhatók.

A negyedik csoportba (4xxx) a Si ötvöztetésű alumíniumok tartoznak. Ebbe az ötvözetcsoportha tartozó ötvözetek 5...17 % Si-t tartalmaznak egyéb ötvözők, elsősorban Cu, Ni, és Mg mellett. A nagy Si- tartalmú (12<Si) ötvözeteknek jó a kopásállósága és kicsi a hőtágulási együtthatójuk. A kisebb Si- tartalmúak pedig jól alakíthatóak.

Az ötödik csoportba (5xxx) a Mg ötvöztetésű alumíniumok tartoznak. A szilárdságukat a szilárd oldatban lévő Mg biztosítja, ezek a szilárdsági értékek alakítással tovább növelhetők. A Mg- tartalom növelésével nőnek az elérhető szilárdsági értékek, ugyanakkor rohamosan csökken a

nyúlás ami az alakíthatóság csökkenését vonja maga után. Ezért a felhasználás során megalkuvás szükséges a szilárdság és az alakíthatóság között, amelynek eredményeképp a különböző felhasználói igényeket olyan ötvözetsorral lehet kielégíteni, ahol az Mg-koncentráció százalékonként változik.

## 2.2 Nemesíthető alumínium ötvözetek

A második csoportba (2xxx) a Cu- tartalmú ötvözők tartoznak, mely 2,5-5,8%-ig terjed, de ezen kívül többféle mellékötvözőt is tartalmazhat, úgymint 0,4-2,5% Mg, 0,3-1% Mn, 0,2-1,3% Fe, 0,2-1,2% Si és 1,0-2,0% Ni[4]. Ezen ötvözőknek köszönhetően a 2xxx csoport ötvözei változatos összetételek között mozognak. Előnyös tulajdonságaik közé tartozik a közepes és nagy szilárdsági értékek. Fontosságuk és elterjedésük miatt kiemelendők a durálok, melyek a nagy szilárdság mellett jó hőálló tulajdonságú és gyártási költségük is elfogadható. Felhasználják az űrtechnológiában és a repülőgép iparban.

A hatodik csoportba (6xxx) tartoznak a Mg és Si ötvöztetésű ötvözetek. Az AlMgSi ötvözetek a legnagyobb mennyiségben gyártott nemesíthető Al- ötvözetek, amelyek az egész világon széles körben elterjedt pl.: bonyolult építőipari profilok, járműgyártás, karosszériaelemek, gázpalack alapanyag, erősáramú vezetéksodronyok, elektromos vezető sínek. A szilárdság növekedést hőkezeléssel GP zónák kialakításával érik el. Az ötvözet hevertetés érzékeny, ami az jelenti, hogy az edzés és mesterséges, öregítés között eltelt idő függvényében először csökken az elérhető szilárdság értéke majd egy minimum után növekszik.

A hetedik (7xxx) ötvözetcsoport két fő részre osztható:

- AlZnMg ötvözetek 3-5% Zn és 0,5-2,5% Mg-ot tartalmaz jól alakítható, közepes szilárdságú, hegeszthetők és hegesztés után önnemesedők [4].
- AlZnMgCu ötvözetek nagyobb Zn tartalom 8,5%-ig nagyobb Mg 3,8%-ig és Cu 3%-ig amelyből a legnagyobb szilárdságú 500-700 N/mm<sup>2</sup> termékek állíthatók elő [4].

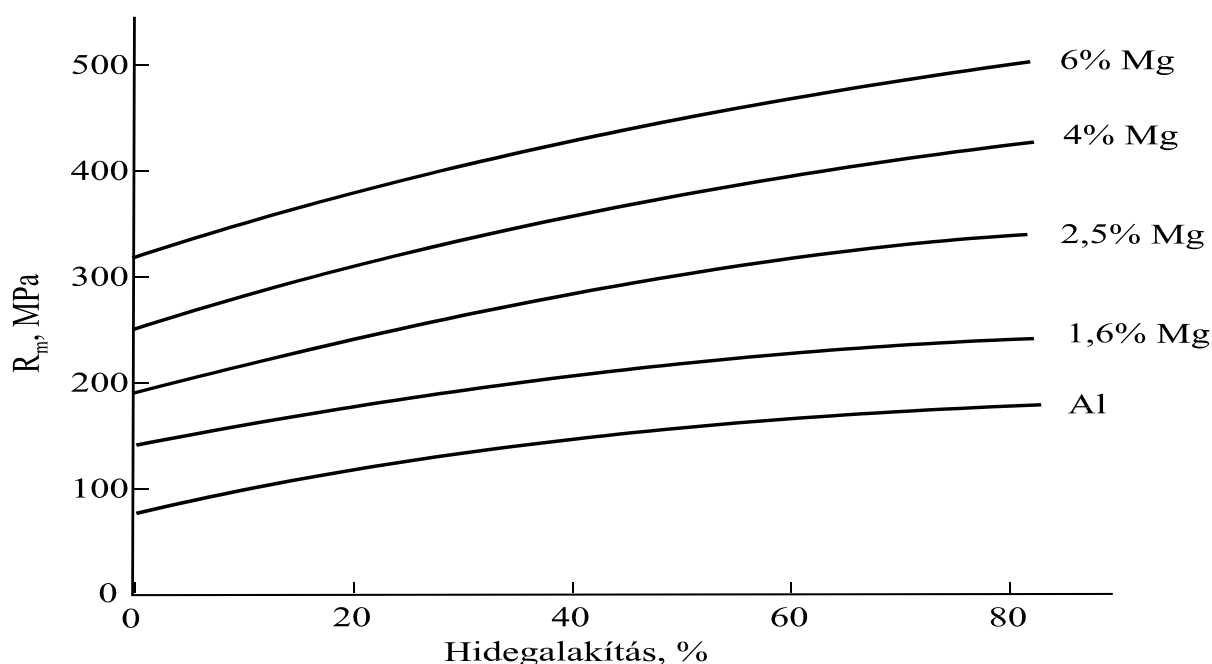
Mindkét ötvözet hátránya hogy a feszültségkorrózióra és a ridegtörésre hajlamosak. A széleskörű felhasználásuknak egyedül ez szab határt [4].

## 2.3 Speciális alumínium ötvözetek

A nyolcadik csoportba (8xxx) azok az ötvözetek tartoznak, amelyek nem illeszthetők az EN rendszer 1000-7000 ötvözetei közé. Ilyenek például az AlLi ötvözetek melyek nagy szilárdsági értékekkel rendelkeznek ( $R_m = 600 \text{ N/mm}^2$  és  $R_{p0.2} = 540 \text{ N/mm}^2$ ), valamint jó a hőállóságuk és nagy a rugalmassági modulusuk, megjelenését a repülőgépipar igényelte. Nem elhanyagolandó tény, hogy 1% Li beötvözésével az anyagnak 3%-al csökken a sűrűsége.

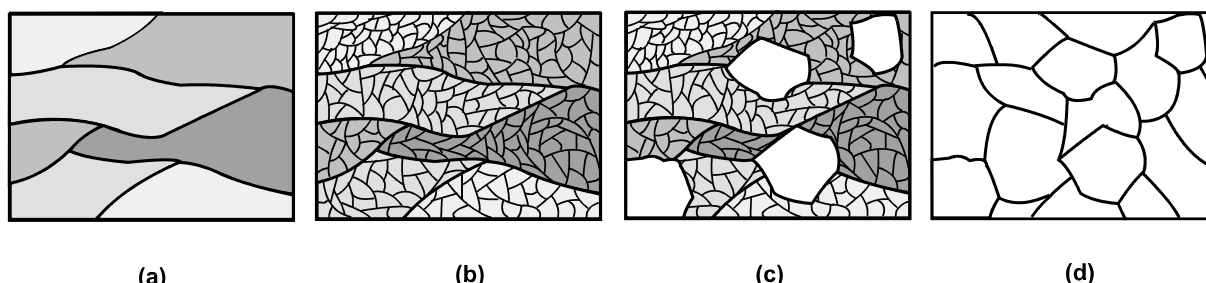
## 2.4 Lágyítás

Általában hidegen alakított félkész termékekhez alkalmazott hőkezelés. Célja az anyag szilárdság-keménység értékeinek csökkentése, a vezetőképesség növelése illetve további képlékenyalakítást tesz lehetővé (pl: hidegen hengerelt lemeznél további vastagságcsökkenés érhető el). A lágyítás folyamán csökkentjük az előzetes alakítás során felszaporodó és további alakítást megnehezítő rácshibák (pl: diszlokáció, szubkristályok, diszlokációhálók) mennyiségét. A lágyított alumíniumban  $10^7$  diszlokációsűrűség, ami képlékeny alakítás hatására akár elérheti  $\sim 10^{11}$ - $10^{13}$  értéket is [5]. Ennek oka, hogy sorokba rendeződnek, a nehezítve diszlokációk keresztcsúszását, így az anyag felkeményedik. Az alumíniumnál annál erőteljesebb a keményedés mértéke minél ötvözöttebb és minél nagyobb a képlékeny alakítás mértéke[6]. Ez a jelenség megtekinthető 2.1 sz. diagramon.



2.1 sz. diagram Al-Mg ötvözetek szilárdsága a hidegalakítás függvényében [6]

Alakítás hatására az öntött szemcsék az alakítás irányával megegyezően megnyúlnak, ezt alakított szemcseszerkezetnek is nevezzük. A kialakult szemcsehatárok, és diszlokációk termodinamikailag instabilak, mert a szabadenergiát növelik. A diszlokációk megszüntetéséhez és az újrakristályosodás megindításához elegendő mennyiségű energiát kell befektetnünk, ami elősegíti a diszlokációk mozgását. A diszlokációk mozgása termikusan aktivált, azaz egy aktiválási energia értéknél nagyobb mennyiségű energiát kell közölnünk a rendszerrel. Az aktiválási energia két részből tevődik össze, a diszlokációk közötti kölcsönhatásból származó- és a termikus energiából. Az alakított alumínium különböző mértékű lágyulását 2.2 sz. ábrán tekinthetjük meg.

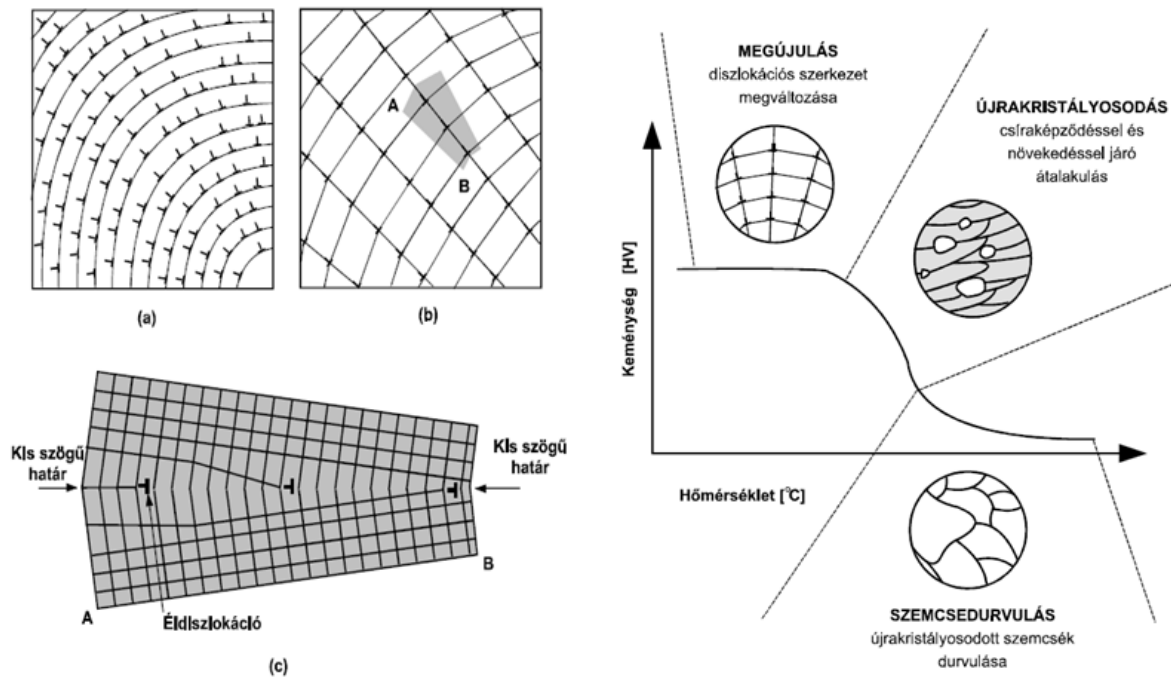


2.2 sz. ábra A hidegen alakított és hőkezelt alumínium szövetszerkezete

(a) kemény állapot; (b) fél kemény-; (c) negyed kemény-; (d) lágy – állapotba hozható [6]

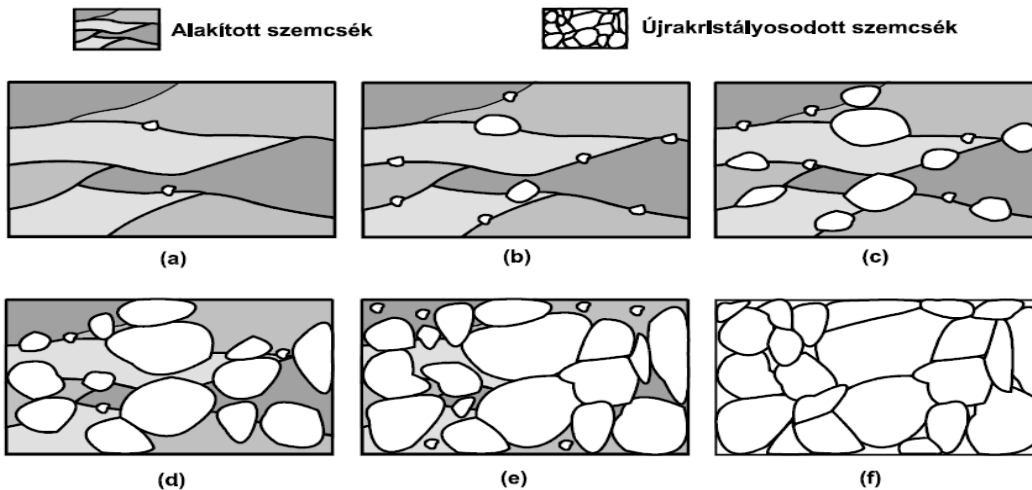
A lágyulás és újrakristályosodás több lépcsőbe megy végbe:

- Vakcinák diffúziója és eltűnése a szemcsehatárokon, diszlokációkon.
- Diszlokációk átrendeződése, részleges eltűnése
- Kisszögű szemcsehatárok kialakulása (2.3 sz. ábra)
- Új szemcsék kialakulása
- Az új nagyszögű szemcsehatárok mozgása
- Az újrakristályosodott szemcsék növekedése.(2.4 sz. ábra)



2.3sz. ábra Megújulás, újrakristályosodás folyamata kyszögű szemcsehatárok folyamata [7]

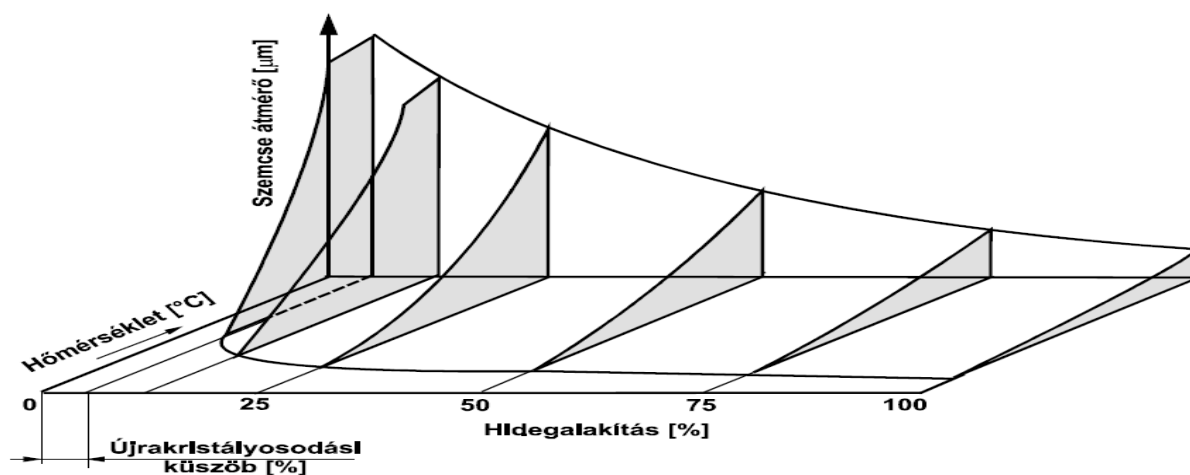
- a) az alakított szerkezetben a feltorlódott diszlokácók
- b) a diszlokációk átrendeződése, részleges eltűnés
- c) kyszögű szemcsehatárok elhelyezkedése



2.4 sz. ábra Az újrakristályosodott szemcsék növekedésének folyamata [7]

- a) az alakított szerkezet és a kristálycsirák megjelenése
- b),c),d),e) az új kristályok növekedése, az alakított szerkezet elfogyása
- f) az újrakristályosodott szemcseszerkezet eldurvulása

Az első három folyamatot együttesen megújulásnak nevezik. A következő két lépésben eltűnik az alakított szemcseszerkezet. Az elnyúlt szemcsék között új, majdnem gömb alakú kristályok jelennek meg, amelyek gyorsan növekedve behálózzák az egész anyagot. Az új szemcsék megjelenésével eltűnnek a kisszögű szemcsehatárok, ami a szabadenergia csökkenésével jár. Ez a folyamat az elsődleges újrakristályosodás. Ezek az új szemcsék tovább növekednek egymás rovására és így kialakulnak a közel  $120^\circ$ -os méhsejt szerű fajlagosan kis felületű szemcsehatárok. Az előző szerkezethez képest ez már egy sokkal durvább szemcsézetet ad. A 2.4 sz. ábrán megfigyelhető az újrakristályosodás folyamata. Az újrakristályosodás egy csíráképződéssel és növekedéssel végbemenő folyamat. A csíráképződéssel és növekedéssel végbemenő átalakulásokban az új fázis a régi rovására nő oly módon, hogy az inkoherens fázishatár vándorol. A növekedés annak a következménye, hogy az atomok egyedi atommozgással átlépik ezt a határt, természetesen a hőmérséklettől függő sebességgel. A legtöbb gyakorlati jelentőségű átalakulás heterogénnek tekinthető. Ekkor az átalakulás közben az anyagban együtt figyelhetők meg az átalakult és az át nem alakult térfogatrészek. Az újrakristályosodás végbemenéséhez a következő feltételeknek kell teljesülni. Az anyagnak megfelelő alakítást kell kapnia, hogy kellőképpen feltorlódjanak a diszlokációk és az általuk az anyagban felhalmozódott többletenergia megfelelő hajtóerőt biztosítson az újrakristályosodási folyamat végbemeneteléhez. A hőmérséklet emelkedésével nő a diffúziós együttható, melynek következtében a diffúzió gyorsul, így az atomok könnyebben változtathatják helyüket. Az alakítás mértéke befolyásolja a szemcsék elnyújtottságát és ezzel felgyorsítja az újrakristályosodást, (2.5 sz. ábrán) megtekinthető.

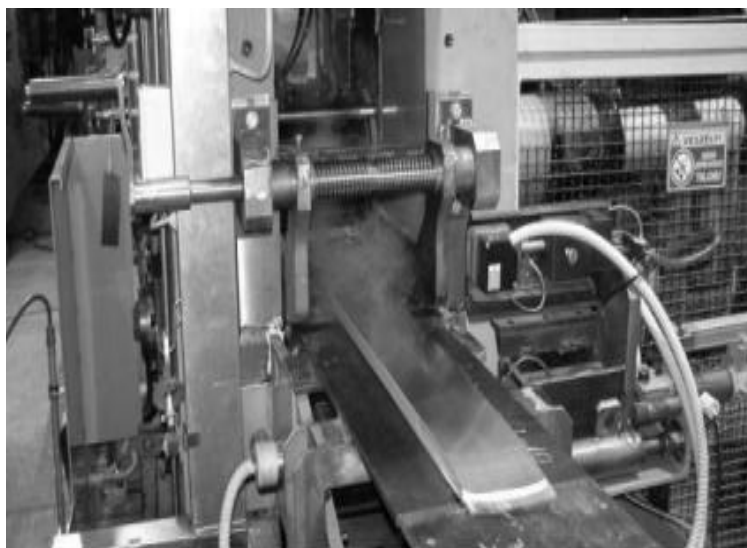


2.5 sz. ábra Az újrakristályosodási diagram általános alakja [8]

## 3. Mérések és eredmények

### 3.1 Vickers keménységmérés eredményeinek kiértékelése

Az alumínium lemezek hideghengerlését a Miskolci Egyetem Képlékenyalakító



Laboratóriumban a Von Roll kísérleti hengerállványon hajtottam végre. A kísérleti hőkezeléseket a Miskolci Egyetem Fémteni- és Képlékenyalakítási Tanszékén található hőkezelő műhely laboratóriumában hajtottam végre, villamos ellenállás fűtésű kemencében. A kísérlethez az Alcoa-Köfém Magyarország Kft.

által gyártott 9 db melegen hengerelt alumíniumlemezt használtam fel melyeket az Alcoa-Köfém székesfehérvári üzeméből kaptam. A jelölését és darabok összetételét 3.1 sz. táblázatban foglaltam össze.

|         |           | Jellemző összetétel |         |          |           |          |           |         |         |
|---------|-----------|---------------------|---------|----------|-----------|----------|-----------|---------|---------|
| Jelölés |           | Cr                  | Ti      | Zn       | Cu        | Mn       | Mg        | Si      | Fe      |
| 1       | 8006      | -                   | -       | -        | 0,1-0,3   | 0,05-0,3 | 0,01      | 0,2-0,5 | 0,4-0,8 |
| 2       | M7- 3003  | -                   | -       | max 0,1  | 0,05-0,2  | 1-1,5    | -         | max 0,6 | max 0,7 |
| 3       | M8- 5754  | -                   | -       | -        | -         | 0,5      | 2,6-3,2   | 0,4     | 0,4     |
| 4       | M9- 1050  | -                   | 0-0,05  | 0-0,07   | 0-0,05    | 0-0,05   | 0-0,05    | 0-0,25  | 0-0,40  |
| 5       | M10- 3104 | -                   | max 0,1 | max 0,25 | 0,05-0,25 | 0,8-1,4  | 0,8-1,3   | max 0,6 | max 0,8 |
| 6       | 3004      | -                   | -       | 0,25     | 0,25      | 1,0-1,5  | 0,80-1,30 | 0,30    | 0,70    |
| 7       | 8011      | 0,05                | 0,08    | 0,1      | 0,1       | 0,1      | 0,05      | 0,5-0,9 | 0,6-1,0 |
| 9       | 71-5083   | 0,05-0,25           | 0,15    | 0,25     | 0,1       | 0,4-1,0  | 4,0-4,9   | 0,4     | 0,4     |

3.1 sz. táblázat Kapott lemezek jelölése, összetétele

A kiinduló lemezvastagságot és a hideghengerléssel több szúráspann legyártott lemez vastagságot 3.2 sz. táblázatban foglalom össze.

|   | Jelölés | Kiinduló vastagság<br>[cm] H | Hengerelt lemez vastagságok<br>[cm] |      |      |      |      |
|---|---------|------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|
|   |         |                              | 1                                   | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 1 | 8006    | 7                            | 1,4                                 | 1,75 | 2,1  | 3,85 | 4,9  |
| 2 | M7      | 7                            | 1,4                                 | 1,75 | 2,8  | 3,35 | 4,9  |
| 3 | M8      | 6                            | 1,2                                 | 1,5  | 2,4  | 3,3  | 4,2  |
| 4 | M9      | 8                            | 1,6                                 | 2,0  | 2,2  | 4,4  | 5,6  |
| 5 | M10     | 4,8                          | 0,94                                | -    | 1,92 | 2,64 | 3,36 |
| 6 | 3004    | 5                            | 1,0                                 | 1,25 | 2,0  | 2,75 | 3,5  |
| 7 | 8011    | 4,2                          | 0,84                                | 1,05 | 1,58 | 2,31 | 2,94 |
| 8 | 03      | 7                            | 1,4                                 | -    | 2,8  | 3,85 | 4,9  |
| 9 | 71      | 5,9                          | 1,18                                | 1,4  | 2,36 | 3,25 | 4,13 |

3.2 sz. táblázat Kiinduló lemezvastagság és hengerelt lemezvastagság

## 3.1.1 Mérés előkészítése

Az Alcoa-Köfém-től kapott 9 db különböző vastagságú melegen hengerelt lemezből a hideghengerlés után hőkezelési műveletekhez 10x15mm-es próbadarabokat vágtam ki. A hengerlési irány a 15 mm-es oldallal megegyező volt. 9 db különböző összetételű alumínium lemez minden vastagságból 7 darabot vágtam le összesen 315 darabot. Mivel a darabok igen aprók és sok volt belőlük ezért, munkám megkönnyítése érdekében a hőkezelő kemencébe történő be.-ill.-kivételéhez kis próbadarab tálcákat készítettem, így a kemence ajtaját sem kellett sokáig nyitva tartani és a kemence térhőmérséklete kevésbé ingadozott. A mintadarabokon 3h időtartamig (200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C) hőmérsékleteken izotermás lágyító hőkezelést végeztem.

A hőkezelt mintadarabokat ezután beágyaztam dentakril hideg műgyantába. A műgyanta megszilárdulása után a darabokat csúcsesztergán megszesztergáltam. Az eszterganyomok eltüntetése és a pontos mérés érdekében száraz szappanos csiszolást alkalmaztam P280-as majd P320-as csiszolópapíron.

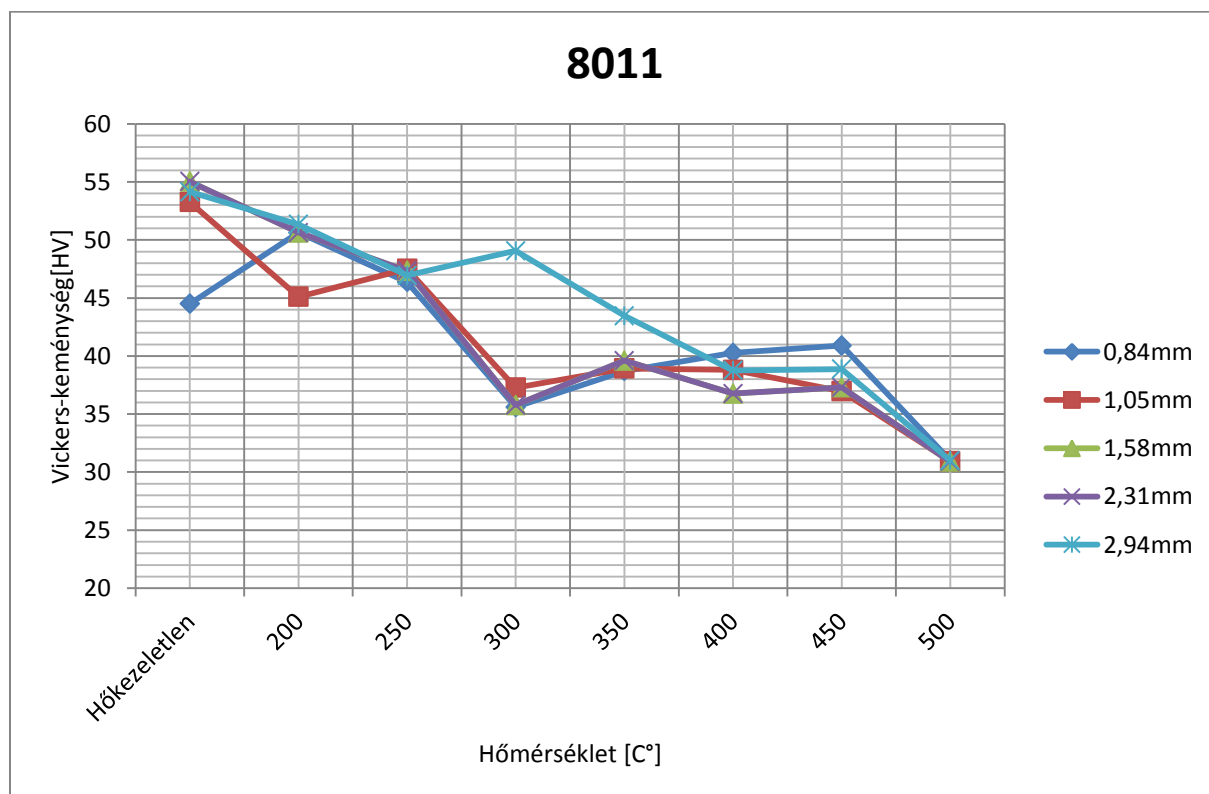
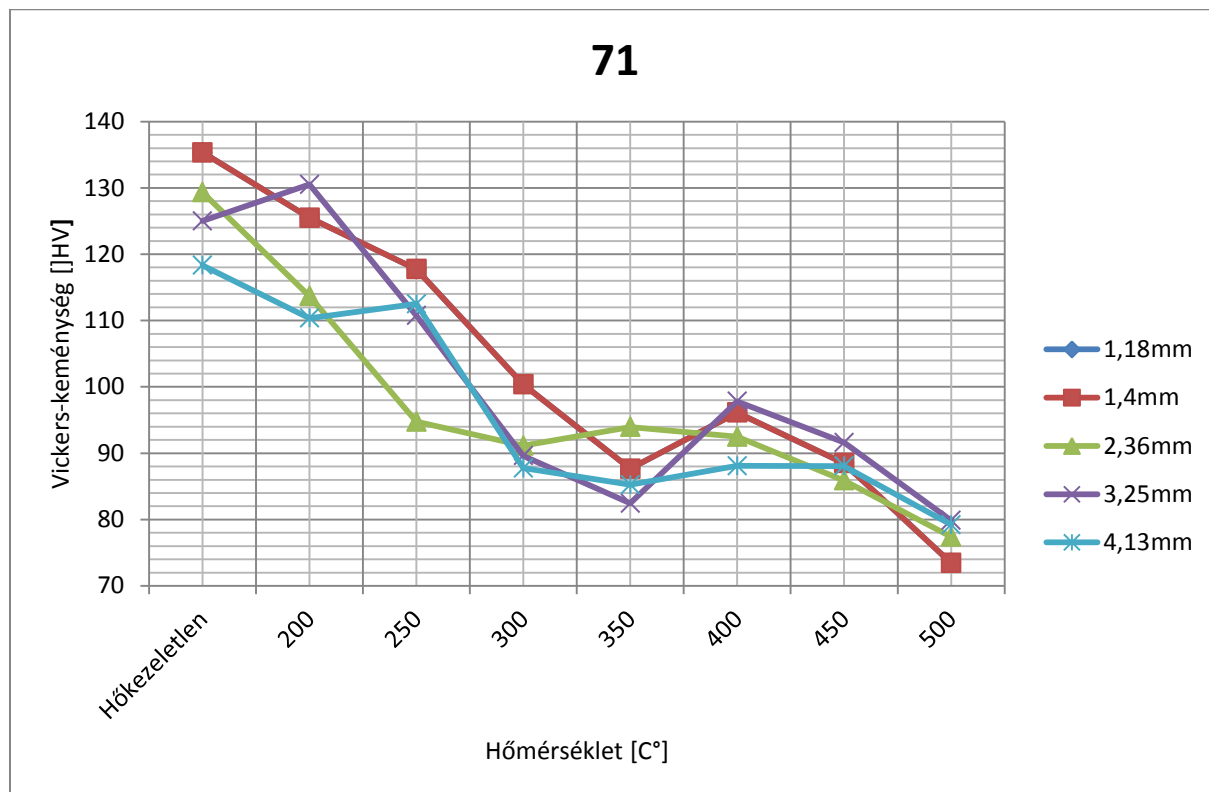
## 3.1.2 Keménységmérés

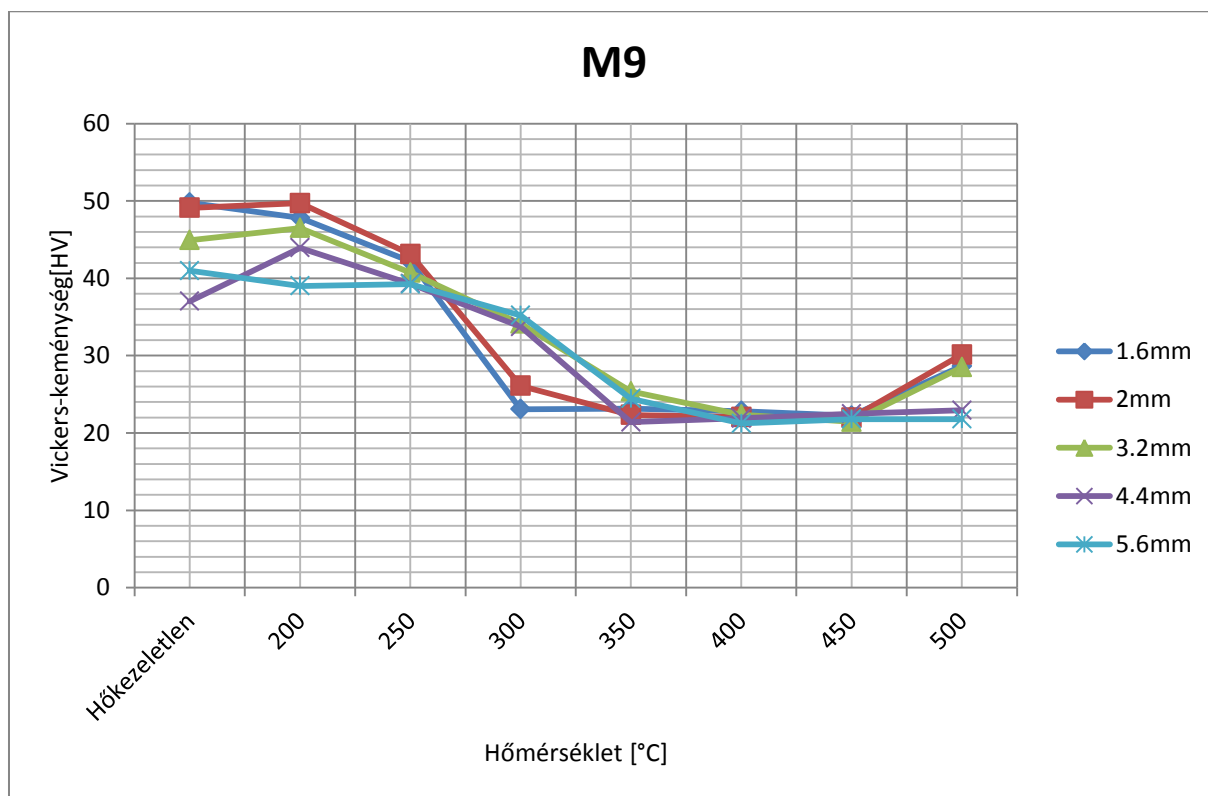
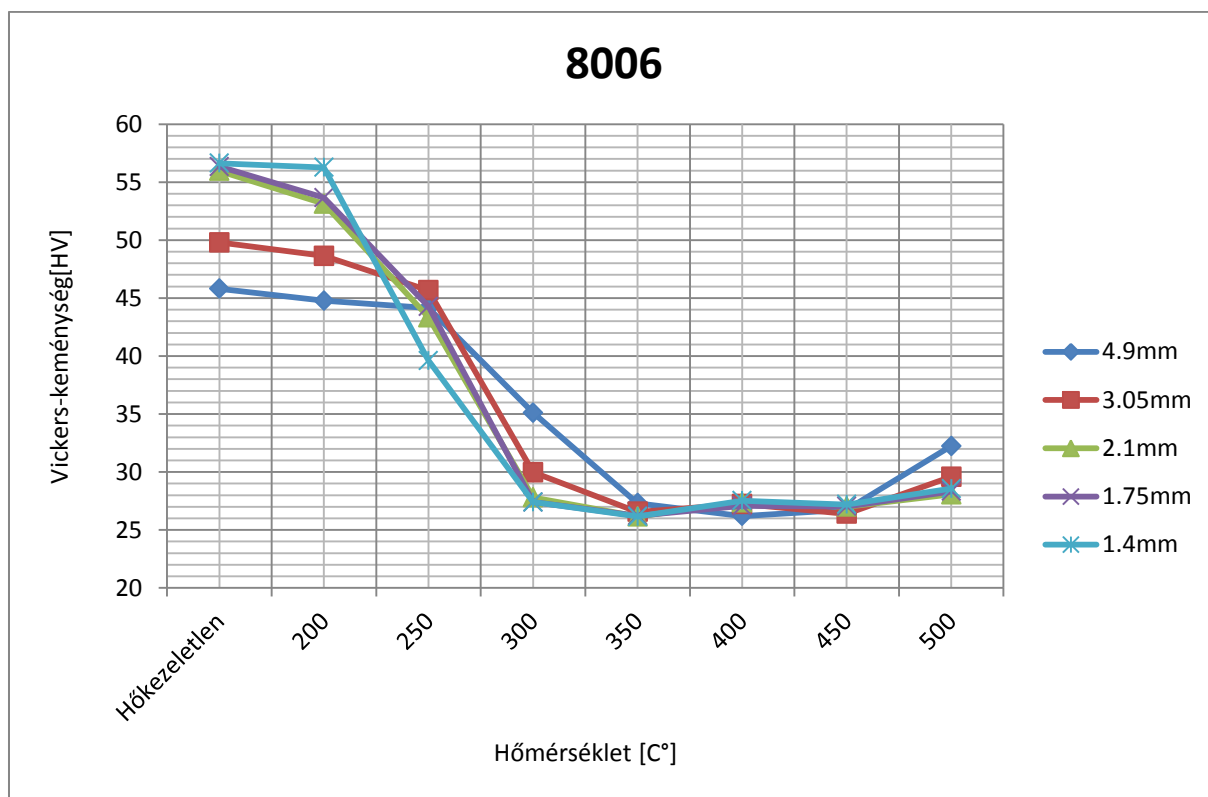
Keménységméréshez a Miskolci Egyetem Fémtani- és Képlékenyalakítási Tanszékén található Instron TUKON 2100 B Vickers típusú keménységmérő gépet használtam 3kg

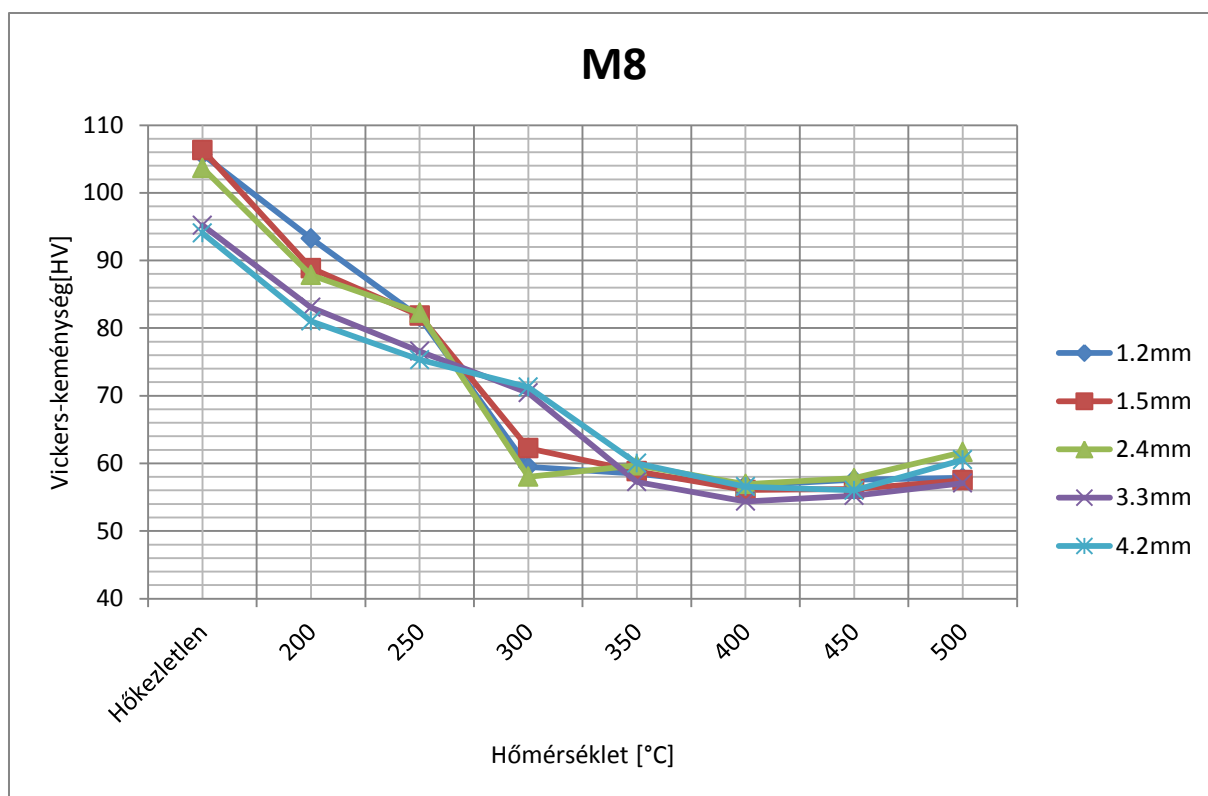


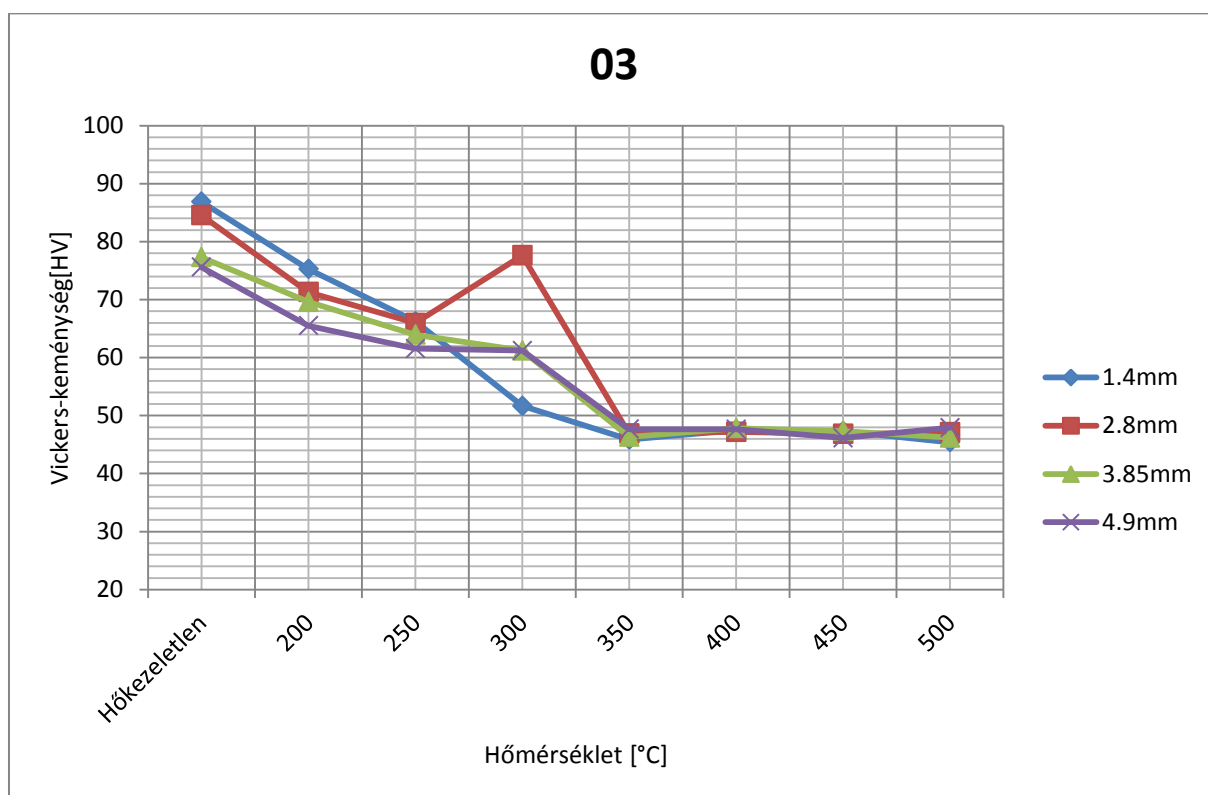
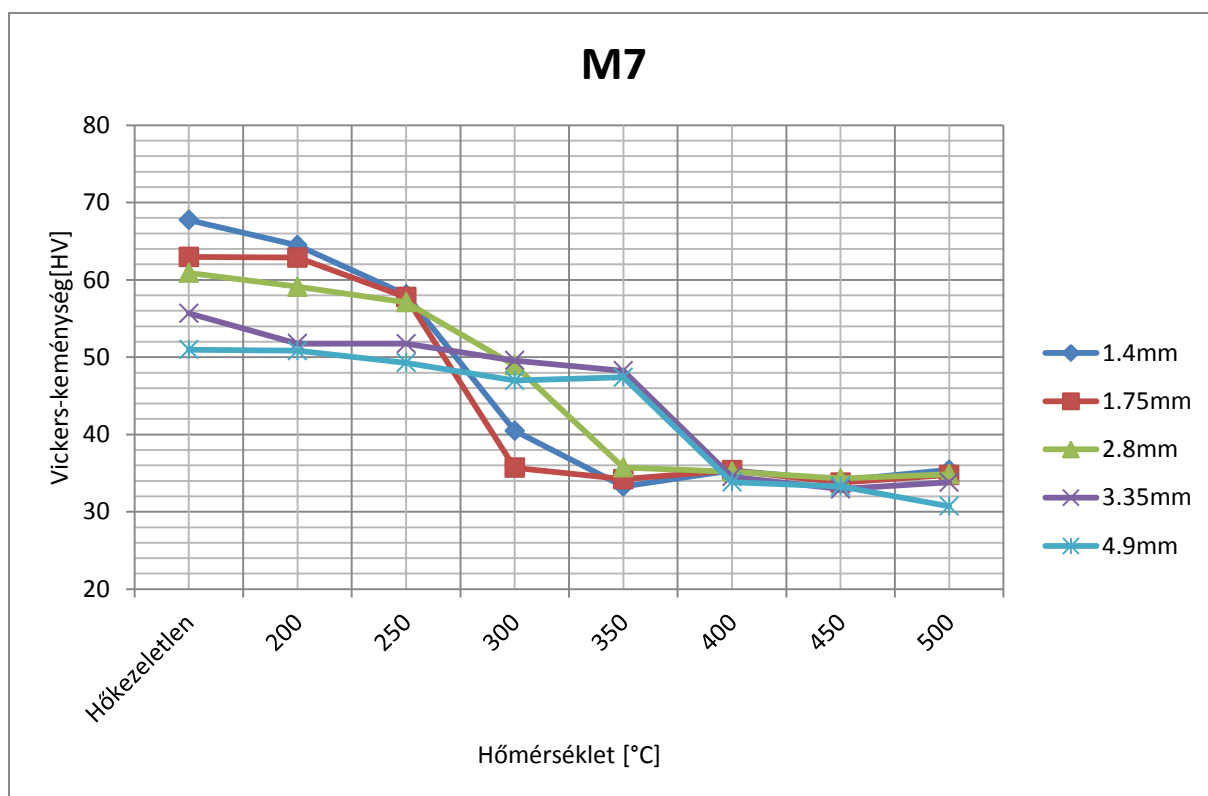
terhelőerővel 10 s ideig végeztem a keménységmérést minden egyes mintadarabon. Ezáltal 945 db mért keménységet kaptam, a nagy terjedelem miatt csak az átlagolt értékekből készült keménység-hőmérséklet diagramokat mutatom be.

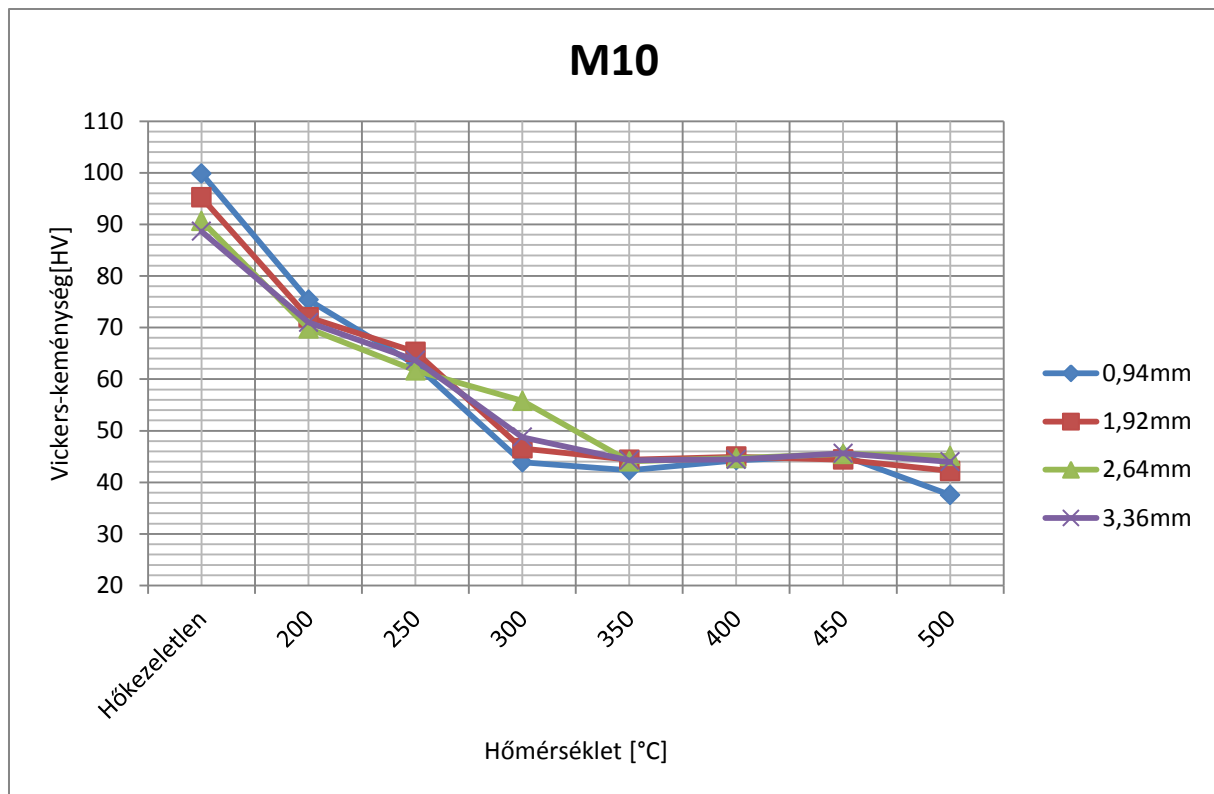
## 3.1.3 Vickers-keménység (HV) a hőmérséklet függvényében











A mérési eredményekből felvett görbék lefutásából egyértelműen látszanak a hőkezelési műveletek hatására lejátszódó lágyulási folyamatok. Megfigyelhető, hogy a három órás izotermás hőkezelés alatt 250°C-ig a darabok vastagságtól függetlenül még nem lágyulnak ki teljesen. A hőmérséklet további emelésével tovább csökkennek a keménységi értékek. Majdnem minden ötvözet esetén vastagságtól függetlenül kb 370-430°C-on beszélhetünk teljesen lágy állapotról.

## 3.2 Szakítószilárdság mérési eredményeinek kiértékelése

### 3.2.1 Mérés előkészítése

Az Alcoa-Köfém-től kapott 9 db különböző vastagságú melegen hengerelt lemezből, hideghengerléssel több szúrással kialakítottam 5 különböző lemezvastagságot. Következő lépésként a fent kiértékelt keménység-hőmérséklet diagramok segítségével kiválasztottam három alumínium típust a hőkezelési műveletekhez, hogy szakításra is alkalmas legyen ezért próbatestek geometriáját szabványnak megfelelően téglalap alakúra alakítottam ki, ez megtekinthető 3.2.1 sz. ábrán. A hosszabb oldala hengerlési iránnyal megegyező volt. A szabványok keresztirányú szakítóminta vizsgálatát írják elő, ellenben ezt nem tudtam kimunkálni, mivel a szalag keskenyebb volt, mint a szabványos szakítóminta hossza. Az általam elkészített 168 db próbatestet különböző hőmérsékleteken izotermásan egy órán keresztül hőkezelttem. A kiválasztott alumínium ötvözeteket és hőkezelési hőmérsékletüket 3.2.1 sz. táblázat foglalja össze.

| Ötvözet jelölése | Izotermás hőkezelési hőmérsékletek |       |       |       |
|------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|
|                  | 250°C                              | 275°C | 300°C | 400°C |
| 71               | +                                  | +     | +     | +     |
| 3                | +                                  | +     | +     | +     |
| 8006             | +                                  | +     | +     | +     |

3.2.1 sz. táblázat Kiválasztott alumínium ötvözetek és hőkezelési hőmérsékletük



3.2.1 sz. ábrán Egy órás izotermásan hőkezelt szabványosan kimunkált szakítóminták.

## 3.2.2 Szakítóvizsgálat

A vizsgálatokat egy Instron 5982 típusú, 10 tonnás, padlótelepítésű univerzális anyagvizsgáló berendezéssel végeztük el.



A szakítóvizsgálat alapvető célja a próbatestet (állandó sebességű) húzó igénybevétellel szakadásig terheljük, miközben mérjük a terhelést, feszültséget, a keresztfej elmozdulást, a videó tengelyirányú alakváltozást, melyekből közvetlenül, illetve számítások segítségével hozzájutunk a rugalmassági modulusához (GPa), 0,2% maradó alakváltozáshoz tartozó folyáshatárhoz (MPa), szakítószilárdsághoz (MPa). A szakítószilárdságot a maximális erő ( $F_m$ ) és az eredeti keresztmetszet ( $S_0$ ) hányadosaként lehet értelmezni (1. képlet) [5].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (1)$$

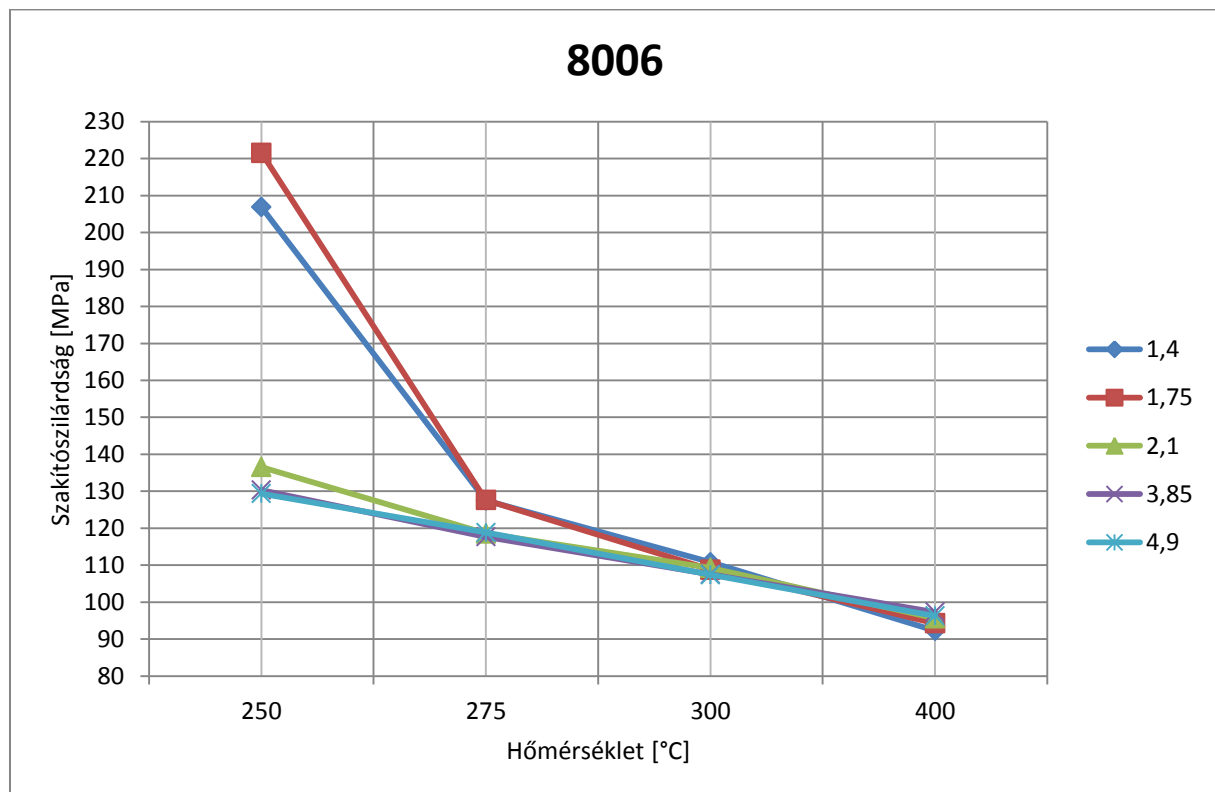
Az  $R_m$  szakítószilárdság nem valódi feszültség, mert a maximális erő elérésekor már a próbatest keresztmetszete jelentősen lecsökkenhet (egyenletes alakváltozás) az eredeti

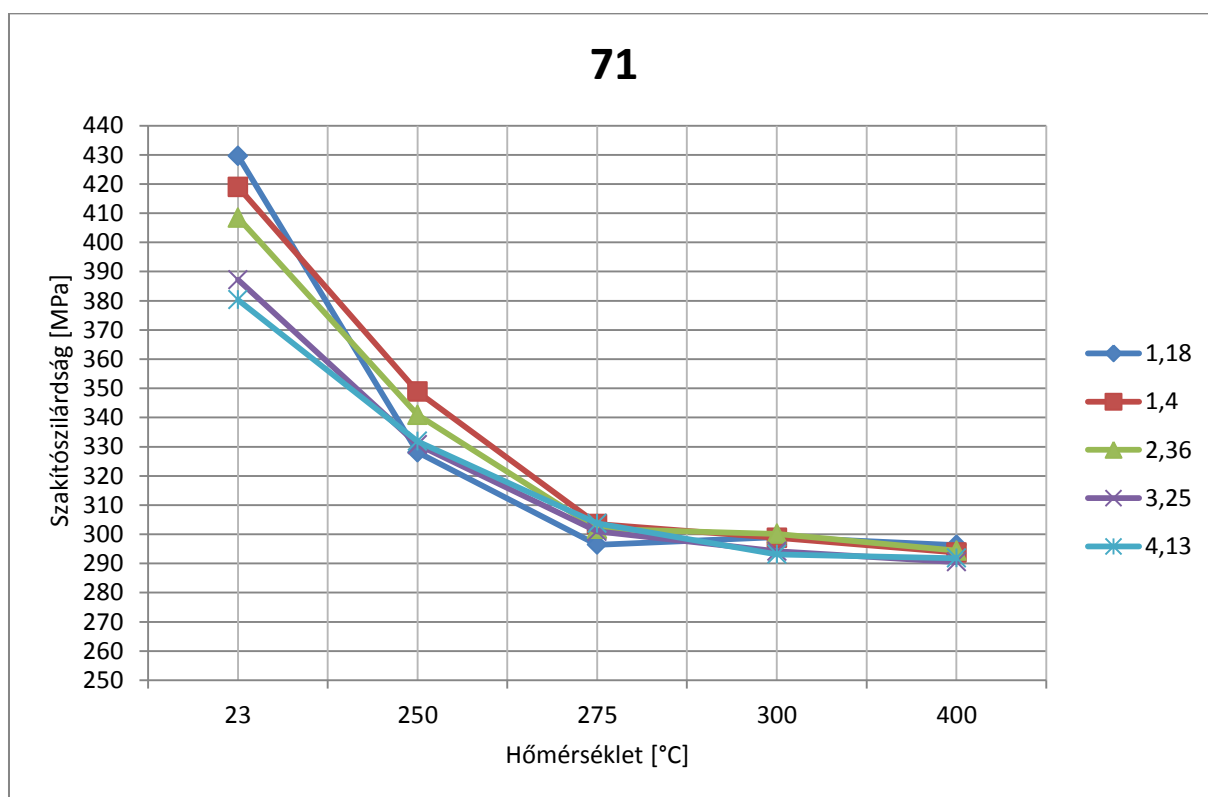
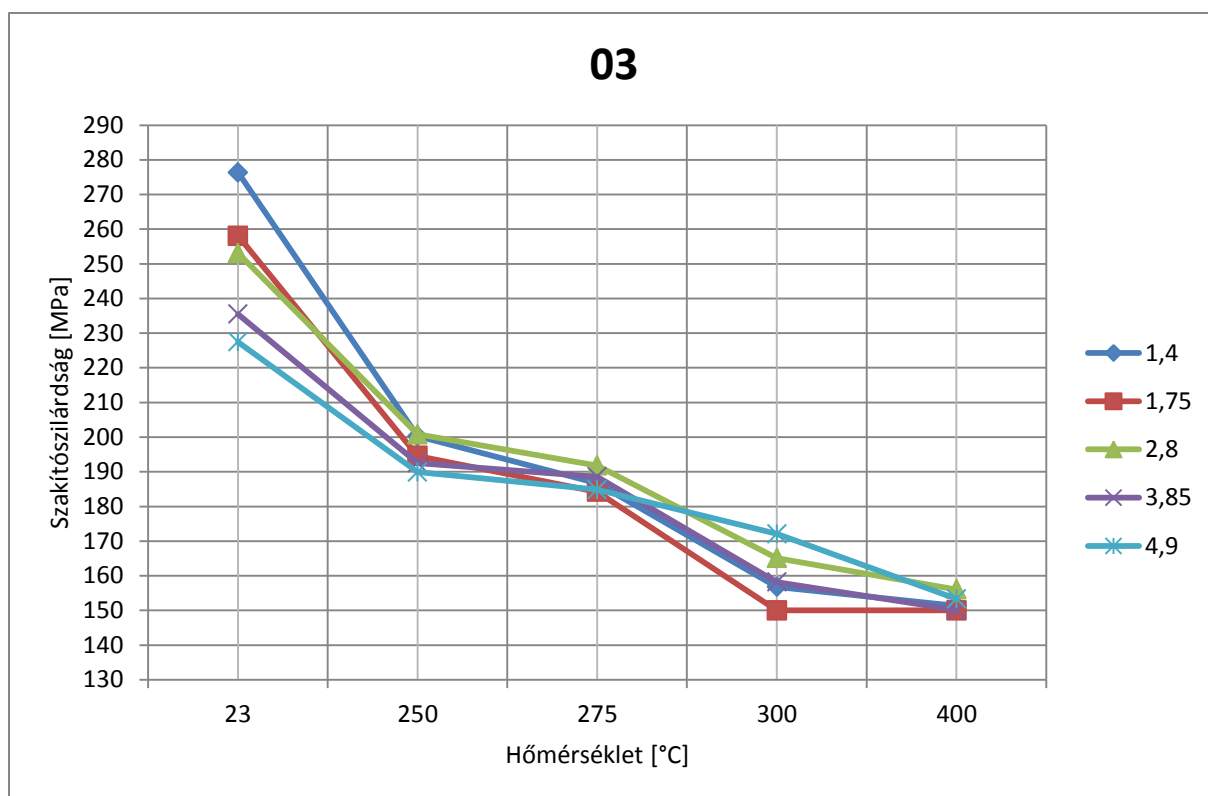
keresztmetszethez képest. Viszont ez a mérőszám mégis jól alkalmazható az anyagok húzó igénybevétellel szembeni ellenállásának jellemzésére, és a különböző anyagok összehasonlítására, mivel a szakítószilárdsághoz tartozó maximális erő elérése után a próbatest alakváltozása már csökkenő erő hatására is tovább folytatódik, tehát ez az a terhelési határ, amelyet a próbatest még egyenletes alakváltozással képes elviselni. A szakadási nyúlást, mint másik jellemző mérőszámot a vizsgálati szakaszon bejelölt eredeti jeltávolság ( $L_0$ ) és a szakadáskor mért maradó megnyúlásból számítható (2. képlet) [5].

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100 [\%] \quad (2)$$

A vizsgált próbatestek geometriája téglalap alakú. A vizsgált jeltávolság  $L_0=65$  mm. Egy fajta próbatestből (azonos hőkezelési paraméterek mellett) három szakítást végeztem, hogy azok statisztikailag is értékelhetők legyenek.

### 3.2.3 Szakítószilárdságok a hőmérséklet függvényében





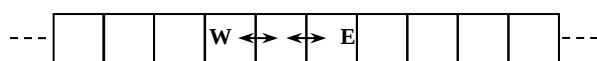
## 3.3 Szimuláció

A szimulációhoz egy-dimenziós sejt automatával aaz újrakristályosodás szimulációt alkalmaztam. A szimuláció leírása és tulajdonságainak elemzése a [9-10] irodalomban olvasható. A szerzők a cikkben bemutatják, hogy a szimuláció hatékonyan alkalmazható az újrakristályosodás, és így a lágyulás folyamatának leírására.

A sejt automatában a vizsgált tartományt egymással teljesen azonos elemekre osztjuk fel. Ezeket az elemeket nevezzük sejteknek. Egy dimenzióban a sejtek mintha egy fonalra lennének felfűzve. A hengerelt lemezeket tekintve, az anyag egy adott hosszúságú szakaszát vizsgáljuk. Ez az absztrakció csak akkor végezhető el ha figyelembe vesszük a szemcseszerkezet sztereológiai jellemzőit.

A sejtek mindegyike rendelkezik egy állapottal. Ezek az állapotok az általam felhasznált automatában az alakított állapot és az újrakristályosodott állapot. A sejtek csak az említett két állapot valamelyikével rendelkezhetnek.

Az állapotokat állapotváltási szabályok változtatják meg. Az állapotváltozási szabályok az éppen vizsgált sejt és a szomszédságában lévő sejtek állapotát veszik figyelembe az új állapot meghatározásakor. Egy-dimenziós sejt automata szomszédsági relációját mutatja a következő 3.3.1 sz. ábra.



3.3.1 sz. ábra Egy-dimenziós sejt automata szomszédsági reakciója

Az egy-dimenziós sejt automata szomszédsági relációja

A sejt automata működése során mindegyik sejtre alkalmazza az állapotváltozási szabályokat. Mikor minden egyes sejtet megvizsgált az automata, egy lépés eltelt az automata működésében. Az automata működésekor rögzíteni kell, hogy egy lépés mennyi idő a valódi ötvözet esetében. Vizsgálataimban egy lépés 10 másodpercnyi időt foglal magában.

A sejtek és szomszédjaik állapotán túlmenően az állapotváltásnál egy véletlen folyamatot is figyelembe vesz az automata, mely során az állapotváltás valószínűsége a hőmérséklettől függ az Arrhenius féle összefüggésnek megfelelően.

Az állapotváltási szabály külön létezik a csíráképződésre és növekedésre. Csíra csak teljesen alakított szakaszon keletkezik, azaz ha a vizsgált sejt és a szomszédjai is alakítottak. Ekkor, ha a véletlen folyamat is engedi a vizsgált sejt állapota újrakristályosodottra változik. Növekedés csak akkor következik be, ha a vizsgált sejt alakított és a szomszédjai közül legalább az egyik állapota újrakristályosodott. Az állapotváltási szabályokból következik, hogy a szimuláció eredménye két paramétértől, a csíráképződés és a növekedés aktiválási eredményétől függ. Ezt a két értéket kell addig változtatni, amíg vissza nem kapjuk a mérési eredményeket.

A szimuláció azonban nem a szilárdsági értékeket, hanem az újrakristályosodott hányadot számolja [9]. Ennek köszönhetően az eddig bemutatott mérési eredményeket átszámoltam újrakristályosodott hányadra a következő összefüggések alapján:

$$F(t) = \frac{HV(t) - HV_{l\acute{a}gy}}{HV_{kem\acute{e}ny} - HV_{l\acute{a}gy}}, \quad F(t) = \frac{Rm(t) - Rm_{l\acute{a}gy}}{Rm_{kem\acute{e}ny} - Rm_{l\acute{a}gy}}$$

A fenti összefüggésekben HV a keménység értéket, Rm a szakítószilárdság értéket jelöli. A lágy index az O állapot, a kemény index pedig H18 állapot keménységét jelöli. F az újrakristályosodott hányad, t az idő.

Az említett két szimulációs paraméter megkeresése fáradságos feladat lenne, ezért képezve a szimuláció által adott eredmények és a mért F értékek közötti eltérés négyzetet egy felületet kapunk, aminek minimum pontjában található az a beállítás, amit keresünk, ahol a szimuláció a vizsgált anyag lágyulását számítja. Ezt simplex, a megfelelő szoftver alkalmazásával megkereshetjük.

A szoftver működéséhez a mérési eredményekből számított F értékeket kell megadni, majd az aktiválási értékeket addig változtatja a program, amíg meg nem kapjuk a legjobb egyezést. Az ekkor meghatározott aktiválási energiák azok, amelyekkel a szimulációval a vizsgált anyag lágyulása leírható.

Emellett még fontos paraméter a szimulációban szereplő automatát építő sejtek száma. Erre a szimuláció fejlesztői elvégeztek egy stabilitás vizsgálatot. Az abban a vizsgálatban

megállapított leggyorsabb automatát biztosító beállítást használtam. Amik megtekinthetők 3.3.1 sz. ábrán.

3.3.1 sz. ábrán Szimulációs beállítások

A lépések számát a hőkezelési időnek megfelelően változtattam, három órás izotermás hőkezelés esetén 540, egy órásnál pedig 360-ra állítottam be. Ezután a szimulációs programba betöltöttem az adatbázisokat, melyekben ötvözet orientáltan az izotermás hőmérsékletek darab száma, F és hőmérséklet értékei szerepelnek. Egy ilyen táblázat adatai megtekinthető 3.3.1 sz. táblázatban.

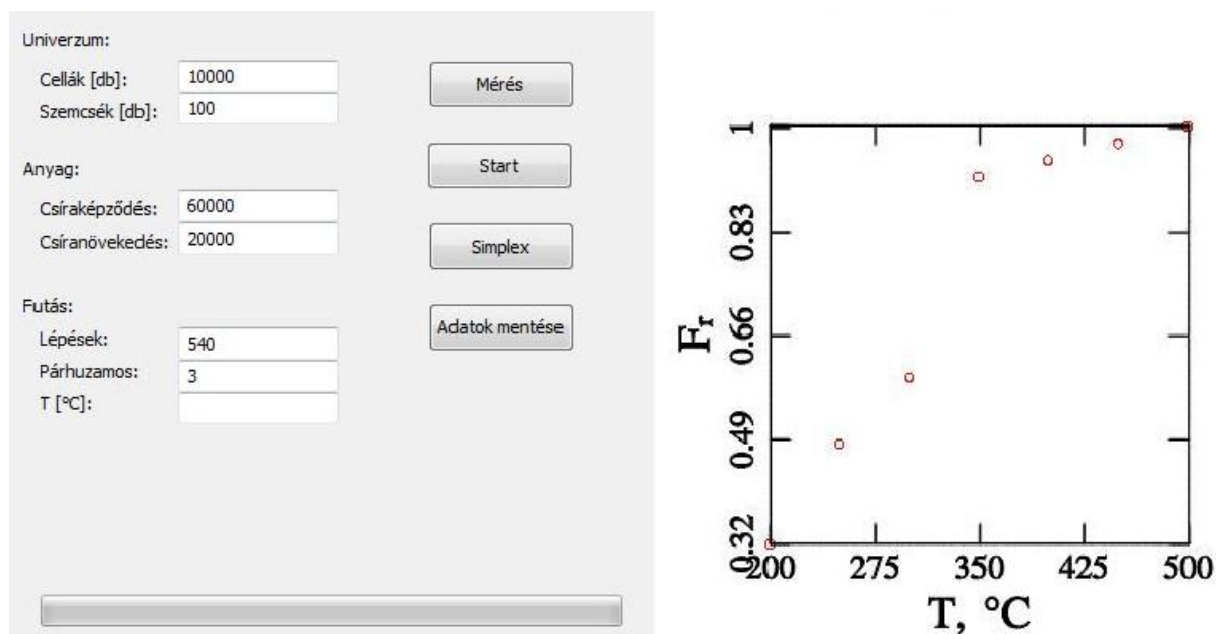
|                        |         |        |
|------------------------|---------|--------|
| Hőkezelések darabszáma | 7       |        |
|                        | 200.000 | 0.3243 |
|                        | 250.000 | 0.4865 |
|                        | 300.000 | 0.5946 |
|                        | 350.000 | 0.9189 |
|                        | 400.000 | 0.9459 |
|                        | 450.000 | 0.9730 |
|                        | 500.000 | 1.000  |

Izotermás hőkezelés  
hőmérsékletei [°C]

Kiszámított F  
értékek

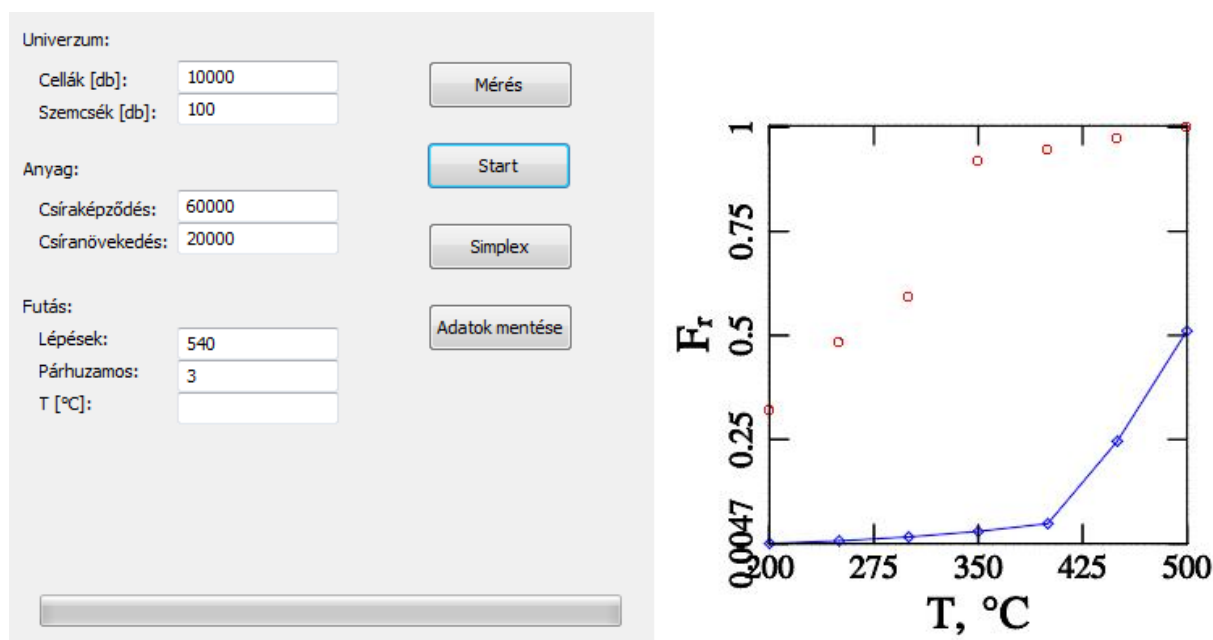
3.3.1 sz.táblázat 03 alakítható alumínium ötvözet adatbázisa

A 3.3.1 sz. táblázatot betöltve a szimulációs programba a 3.3.1 sz. ábrán látható.



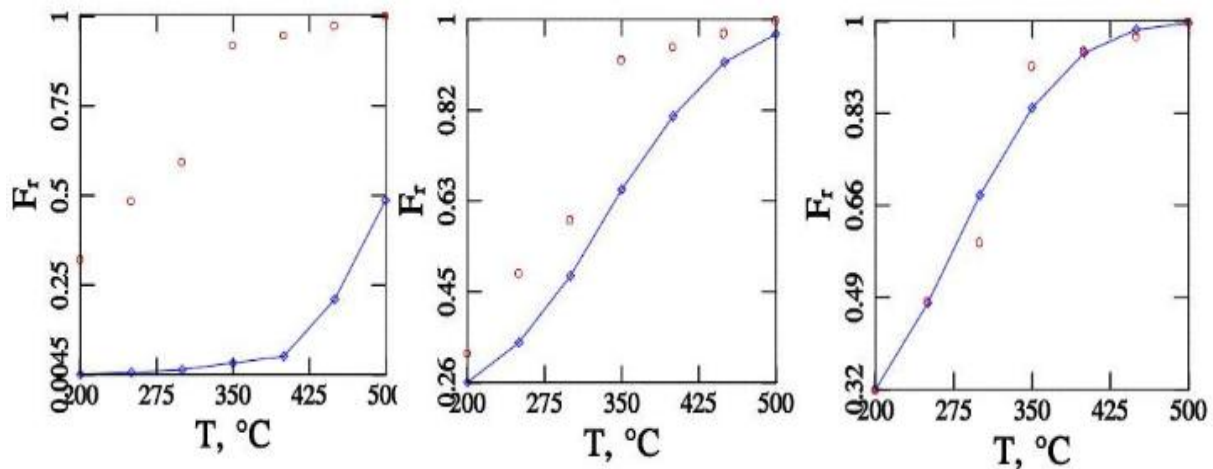
3.3.1 sz. ábra 03 anyag három órás izotermás hőkezelésére jellemző szimulációs program működése

Start gomb lenyomásával kezdeti diagramot illeszt be a program ez a 3.3.2 sz. ábrán megtekinthető.



3.3.2 sz. ábra 03 anyag három órás izotermás hőkezelésére jellemző szimulációs program működése [Start]

Következő lépésben elindítom a simplex szimulációt, mely megtekinthető 3.3.3 sz. ábrán.



3.3.3 sz. ábra 03 anyag három órás izotermás hőkezelésére jellemző szimulációs program működése [Simplex]

A szimuláció befejezésével megkapom  $Q_n$  csíráképződés aktiválási energiáját,  $Q_g$  csíráképződés aktiválási energiáját és a szimulációból adódott  $F$  értékeket. Elvégeztem a szimulációt mind a két izotermás hőkezeléssel lágyított alumínium esetén a  $Q_n$  csíráképződés aktiválási energiát és a  $Q_g$  csíráképződés aktiválási energiáját a 3.3.2 sz. táblázatban foglaltam össze.

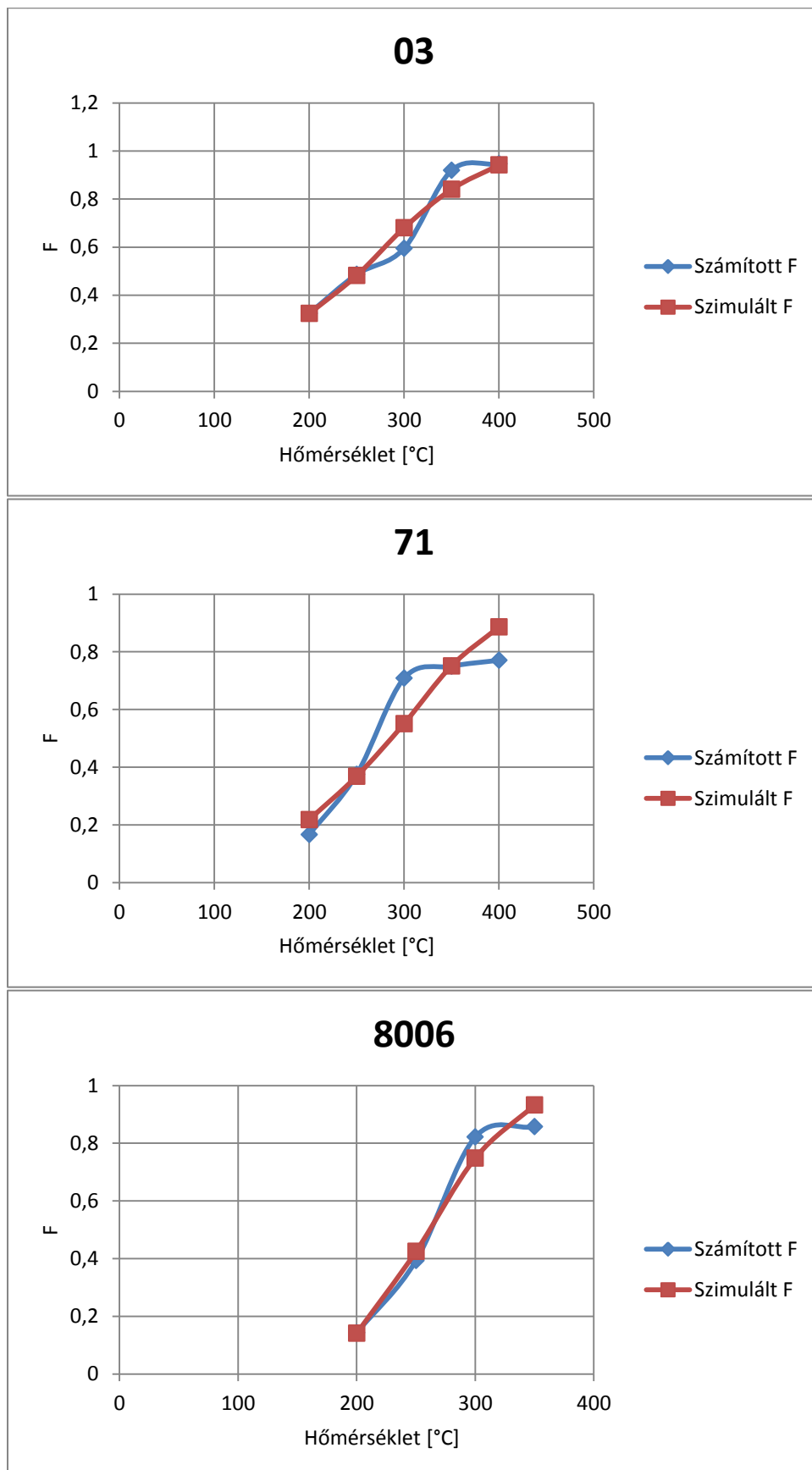
A mérési eredményekben az alakítás mértéke a legtöbb ötvözet esetében nem okoz nagy különbséget az átalakult hányad változásában. Ezért minden ötvözet esetén vettem egy közepes vastagságot, és arra végeztem el az illesztést. Kivételt képez egy órás izotermás hőkezelésnél 8006- és három órás izotermás hőkezelésénél 71 jelölt ötvözetek mivel itt úgy számoltam, mint ha egy átlagolt vastagság értékem lenne. A kapott eredmények visszaszámolásánál ügyelni kell arra, hogy az alakváltozás függvényében azonban a kiinduló alakított keménység erősebben függ az alakítás mértékétől. Természetesen ha nagyobb pontosság szükségeltetik, akkor minden egyes görbére el kell végezni az illesztést, de az jóval nagyobb ráfordított időt igényel. A kapott eredményekből lejjebb látható, hogy az így kapott eredmények is jól felhasználhatóak a lágyulás tanulmányozása során.

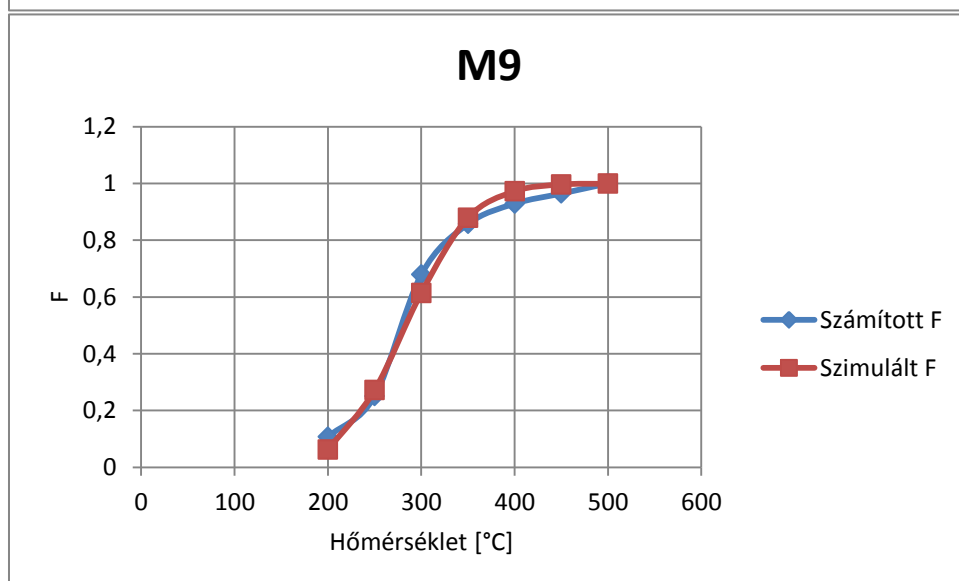
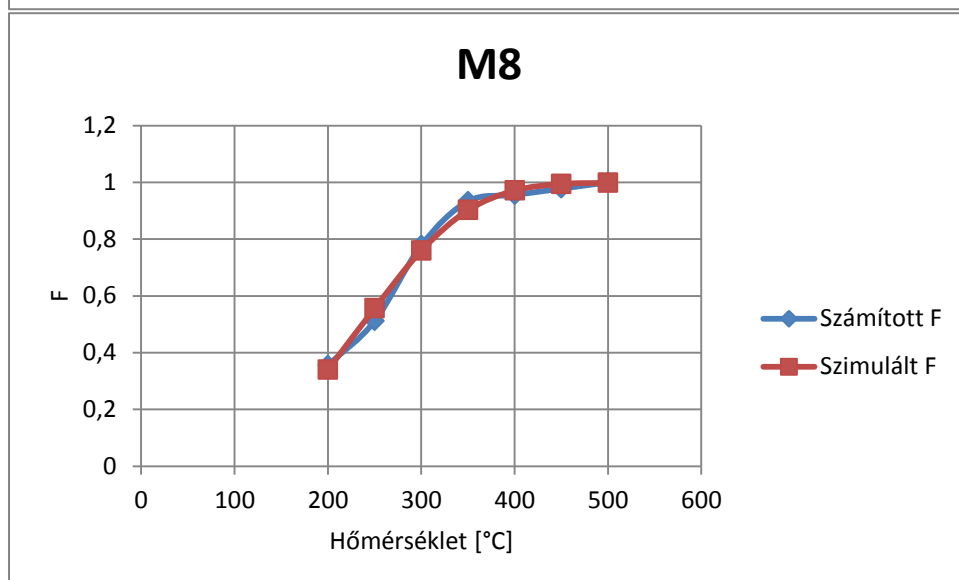
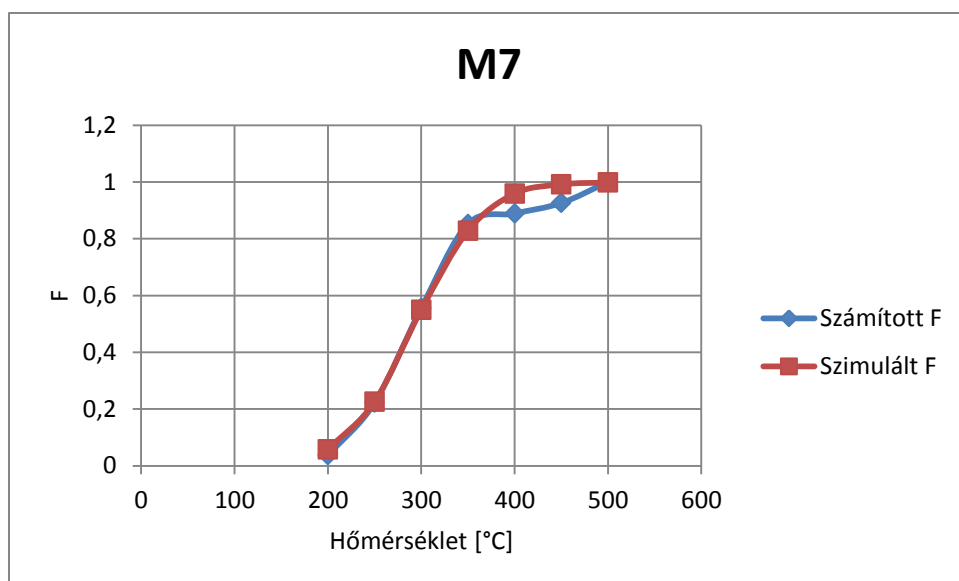
Az  $F$  kezdeti és szimulált értékeket a lágyítás időtartalmának megfelelően diagramokon ábrázoltam a következő két alfejezetben.

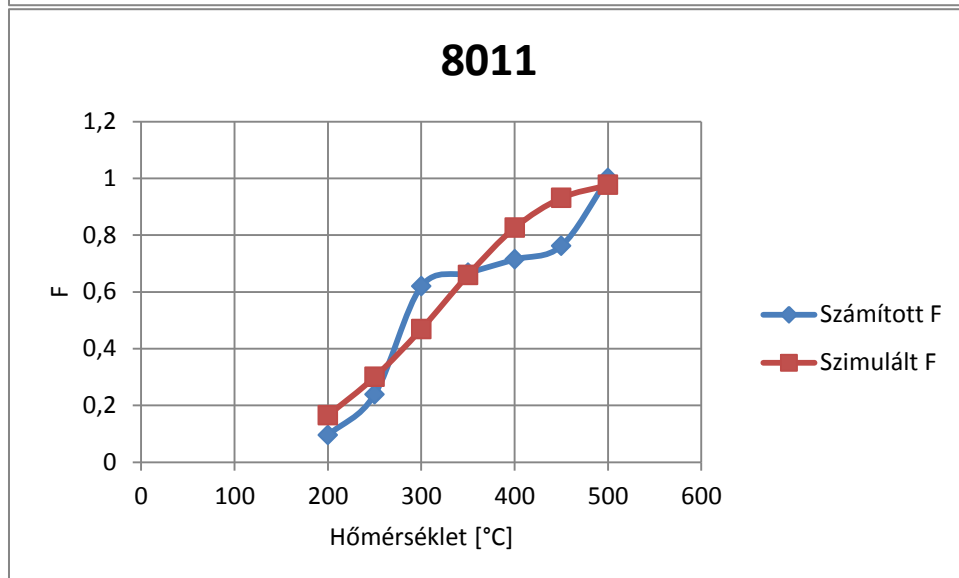
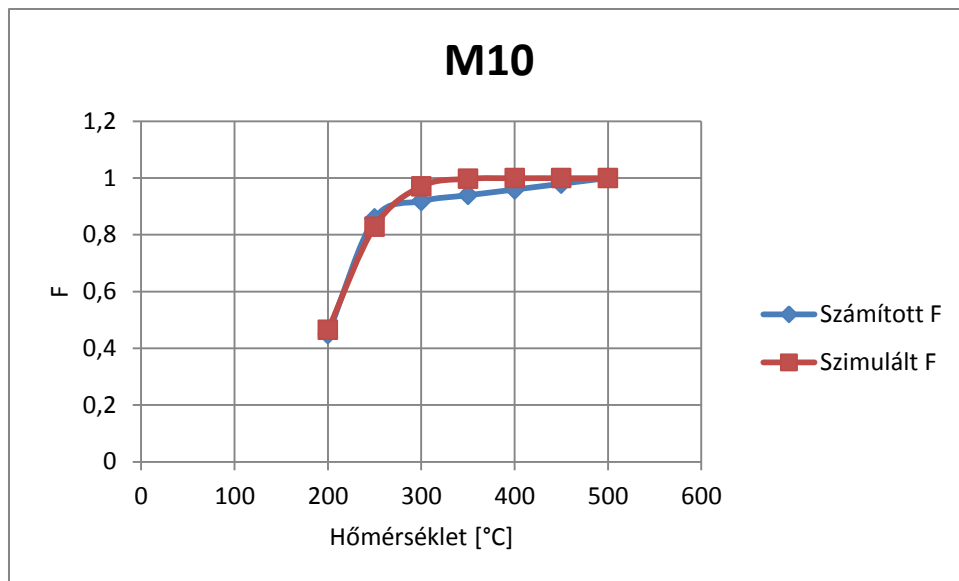
|             | Alumínium ötvözetek | $Q_n$ csíráképződés<br>aktiválási energiája | $Q_g$ csíráképződés<br>aktiválási energiája |
|-------------|---------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 3h lágyítás | M10                 | 22410,8462                                  | 27437,2231                                  |
|             | 03                  | 20582,5195                                  | 28909,6680                                  |
|             | M7                  | 31078,5778                                  | 27037,4277                                  |
|             | M8                  | 26786,1394                                  | 22378,2332                                  |
|             | M9                  | 38208,7031                                  | 22334,1094                                  |
|             | 8006                | 27901,7080                                  | 26709,6533                                  |
|             | 8011                | 35592,3621                                  | 22851,3527                                  |
|             | 71                  | 24144,0973                                  | 29849,9433                                  |
| 1h lágyítás | 71                  | 20062,2420                                  | 25557,8873                                  |
|             | 03                  | 72156,0947                                  | 3992,7174                                   |
|             | 8006                | 70205,4523                                  | 5123,7331                                   |

3.3.2 sz. táblázat Szimulált  $Q_n$  csíráképződés aktiválási energiát,  $Q_g$  csíráképződés sebességét a lágyítási időtartalomnak megfelelően átlagolt középvastagságot véve.

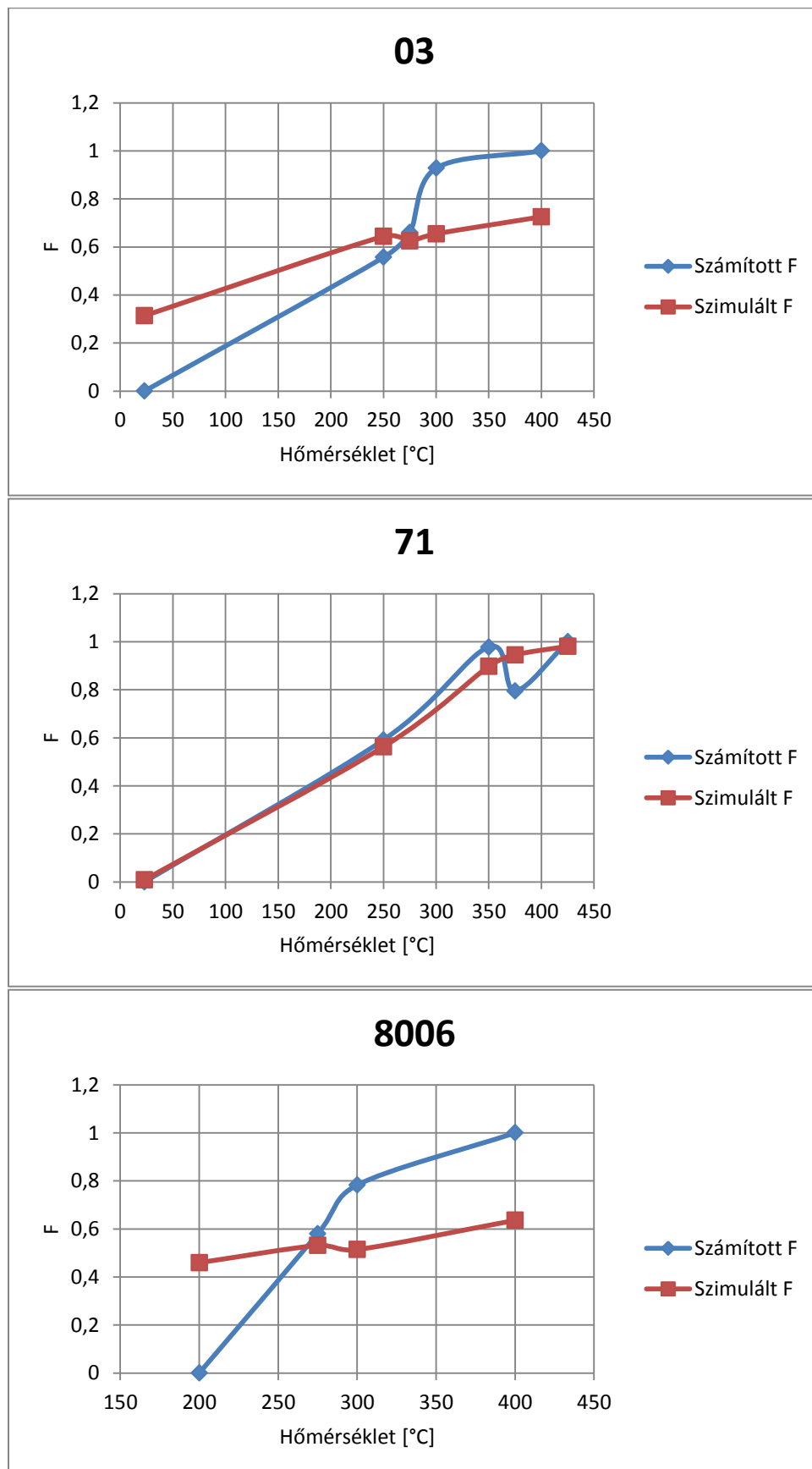
## 3.3.1 Szimulációs F-hőmérséklet diagramok három órás lágyítás esetén







## 3.3.2 Szimulációs F-hőmérséklet diagramok egy órás lágyítás esetén



A fenti diagramok mutatják, hogy az alkalmazott szimuláció skálázása sikeres volt. A 3.3.2 sz. táblázatban megadott értékekkel beállítva a bemutatott szimuláció a vizsgált ötvözetek lágyulását szimulálja. Ezzel a szimuláció alkalmas technológia tervezés megkönnyítésére.

## 4. Összefoglalás, eredmények értékelése

Tudományos diákköri munkámban alumínium ötvözetek lágyító hőkezelésének tanulmányozásával, hőkezelési kísérletek elvégzésével, és a lágyulás szimulációjával foglalkoztam.

Az Alcoa-Köfém-től kapott 9 db különböző ötvözetű melegen hengerelt lemezt különböző vastagságúra hengereltem. A lemezeken, megfelelő előkészítés után, vizsgálatokat végeztem, hogy kiderítsem a több szúrásban hidegen hengerelt ötvözt alumínium lemezek lágyulásának mértékét három órás izotermás hőkezelés után. Az anyag szilárdságának meghatározásához a keménységmérést választottam mivel sokkal kevesebb előkészítést igényel mint a szakítóvizsgálati mintadarabok kimunkálása. Az iparban használatos szakítóvizsgálattal lineáris kapcsolatban van a lemezek keménység értéke.

A kapott eredményeket felhasználva az iparban elfogadott szakítóvizsgálatnak megfelelően szerettem volna kategorizálni az értékeimet, ezért a mérést az általam kiválasztott 3db tetszőleges hidegen hengerelt ötvözetten megismételtem. Ebben az esetben már szabványos szakítómintákat munkáltam ki.

A két mérésből származó értékek összevetésével megállapítottam, hogy az alakítható alumínium ötvözetek lágyulása elvárt értékek szerint zajlott le, így a továbbiakban sejt automata szimulációt végeztem. Simplex eljárást alkalmazó szoftverrel skáláztam a szimuláció értékeit a mérési eredményeimmel. A számítások során a csíráképződés és csíranövekedés aktiválási energiáját kaptam eredményül. A kapott adatbázis felhasználásával az automata felhasználható a lágyítási technológia szimulációjára.

Eredményeim felhasználásával elkészíthető az az automata ami több alakítható alumínium ötvözet lágyítási technológiájának vizsgálatában, tervezésében segítséget nyújthat az ezzel foglalkozó szakemberek számára.

## 5. Köszönetnyilvánítás

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 "A Miskolci Egyetemen működő tudományos képzési műhelyek összehangolt minőségi fejlesztése"

## 6. Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Bagyinszki Gyula: Anyagtechnológia alapjai I.
- [2] aluMATTER [<http://aluminium.matter.org.uk>]
- [3] Fedur András: 8006-os alumínium ötvözet lágyulásának vizsgálata
- [4] Dr. Köves Elemér: Alumínium kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.
- [5] Voith Márton: A képlékenyalakítás elmélete, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998.
- [6] Dr. Gácsi Zoltán Fémötvözetek hőkezelése.
- [7] Gácsi Zoltán, Mertinger Valéria: Fémtan, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- [8] Verő József, Káldor Mihály: Fémtan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
- [9] Gyöngyösi Szilvia, Dr. Barkóczy Péter Egydimenziós sejtautomata stabilitás vizsgálata
- [10] Gyöngyösi Szilvia, Dr. Barkóczy Péter Scaling cellular automaton simulations of short-range diffusion processes