



MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAI
MECHANIKAI TECHNOLOGIAI TANSZÉK
Technológiai Blokk



TDK-dolgozat

Acélok nem-egyensúlyi átalakulási diagramjának felvételének lehetőségei

Possibility to determine non-equilibrium transformation diagram of steel

Készítette:

Konzulensek:

Győr Ádám

BSc Gépészmérnök

Dr. Kuzsella László
egyetemi docens

2013.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	3
1. ANYAGTUDOMÁNYI, FÉMTANI ISMERETEK ÖSSZEFOGLALÁSA	4
1.1. A folyamatos hűtési sebesség hatása az acélok átalakulására	4
1.1.1. Hipoeutektoidos acéloknál az egyensúlyi viszonyok rész folyamatokra osztása	4
1.1.2. Hipereutektoidos acélokban az átalakulás hasonlóan ezt a négy elemi folyamatot tartalmazza az alábbi (összetételből adódó) különbségekkel	5
1.2. Folyamatos lehűtésre érvényes nem egyensúlyi átalakulási diagramok.....	9
2. A FIZIKAI SZIMULÁCIÓ LÉNYEGÉNEK RÖVID ISMERTETÉSE, ALKALMAZÁSÁNAK ELŐNYEI, FELHASZNÁLHATÓSÁGA.....	12
3. A GLEEBLE 3500 FIZIKAI SZIMULÁTOR ISMERTETÉSE, MŰKÖDÉSI ELVE, A BERENDEZÉS ELVI FELÉPÍTÉSE.	14
3.1. A Gleeble 3500 termálrendszer	14
3.2. A Gleeble 3500 mechanikus rendszer.....	14
3.3. A Gleeble 3500 digitális ellenőrző rendszer	15
3.4 Funkcionális egységek	17
3.5. CCT vizsgálat.....	19
4. Nem egyensúlyi fázisdiagramok meghatározása matematikai modellezéssel	21
4.1 A matematikai (számítógépes) szimuláció	21
4.2. Matematikai modellezés a JMat pro szoftver segítségével	24
5. Eredmények.....	24
IRODALOMJEGYZÉK.....	28

BEVEZETÉS

Acélok esetén a kémiai összetételen túl a mechanikai technológiai feldolgozás – mint például hengerlés, kovácsolás, forgácsolás – során lejátszódó metallográfiai folyamatok alapvetően befolyásolják a késztermék mechanikai tulajdonságait. Az utólagos hőkezelésekkel tervezett módon kialakított mikroszerkezettel lehet biztosítani a kívánt végső tulajdonságokat.

Acélok egyensúlyi átalakulása során kialakuló szövetszerkezetet az összetétel ismeretében az egyensúlyi fázisdiagramból könnyűszerrel meg lehet adni. Azonban a nem egyensúlyi szövetszerkezetek kialakulásáról csupán a nem egyensúlyi átalakulási diagramok adnak felvilágosítást.

Alapvetően kétféle nem egyensúlyi átalakulási diagram létezik, izotermás (IT vagy TTT) és folyamatos hűtésre vonatkozó átalakulási diagramok (CCT).

Izotermás átalakulási diagramok az állandó hőmérsékleten keletkező, a folyamatos átalakulási diagramok pedig az állandó hőmérséklet (idő szerinti) gradiens, vagyis állandó lehűlési sebesség során keletkező szövetelemeket mutatja meg.

Nem egyensúlyi átalakulási diagramok alakja nagymértékben függ a kémiai összetételtől, meghatározásuk tehát minden ötvözet esetében elengedhetetlen.

Adott összetétel esetében a TTT és különösen a CCT diagramok felvétele is számos körülmények vizsgálatát igényel.

A fizikai szimuláció anyagvizsgálat területén történő alkalmazása csupán a XX. század második felére tekint vissza, Egy olyan új tudományterület mely egyedülálló lehetőséget biztosít tudatos anyag- és technológiatervezések megvalósítására. Reprodukálható módon képes különböző folyamatok valószerű szimulálására, időt, költséget megtakarítva.

1. ANYAGTUDOMÁNYI, FÉMTANI ISMERETEK

ÖSSZEFOGLALÁSA

1.1. A folyamatos hűtési sebesség hatása az acélok átalakulására

Először is röviden össze kell foglalnunk, hogy milyen fő lépésekből áll az acélok allotróp, vagyis $\gamma \rightarrow \alpha$ fázisátalakulása. Ez a hipo – és hipereutektoidos acéloknál is 4 folyamatra bontható.

1.1.1. Hipoeutektoidos acéloknál az egyensúlyi viszonyok rész folyamatokra osztása

1. Az A_3 hőmérséklet elérésekor megkezdődik a proeutektoidos ferrit kiválása az ausztenit szemcsék határára. A ferritnek a karbon oldó képessége (azaz a karbon oldatban tartási képessége) kicsi, ezért a ferritté alakuló ausztenitből a karbon a visszamaradó ausztenitbe diffundál, így nő a karbon-tartalma. A_1 hőmérsékletnél az ausztenit karbon tartalma $C = 0,8\%$ -ra dúsul.

2. Az eutektoidosra dúsult összetételű ausztenitből megkezdődik a perlites átalakulás, majd cementit – lemezekké növekedése.

3. A vaskarbid kiválása miatt a karbonban elszegényedett ausztenit γ rácsa átrendeződéssel ferrit α – rácsává alakul. A $\gamma \rightarrow \alpha$ rácsátrendeződés az atomok helycseréje nélkül valósul meg, csak maximum távolságaik változnak. Ez tehát diffúziómentes folyamat, amely nagy sebességgel játszódik le.

4. A perlit cementit – lemezeinek alakja nem egyensúlyi, ezért ha elegendő idő áll rendelkezésre az A_1 hőmérséklet környezetében a cementit – lemezek „begömbösödnek”. A lemezes perlitből emiatt az egyensúlyinak jobban megfelelő, úgy nevezett szemcsés perlit lesz.



1. Az A_{cm} hőmérséklet elérésekor a proeutektoidos cementit (szekunder cementit) kiválása kezdődik meg az ausztenit szemcsék határára, melynek eredményeképpen az ausztenit karbon tartalma közvetlenül az A_1 hőmérsékletnél $C = 0,8\%$ karbon-tartalomra csökken.

Austenitesítési hőmérséklet: 880 °C

Y-axis: Hőmérséklet (°C)

X-axis: Idő (s)

Regions: $a+m$, $c+b+m+a$, $c+p+b+m+a$, $p+c$

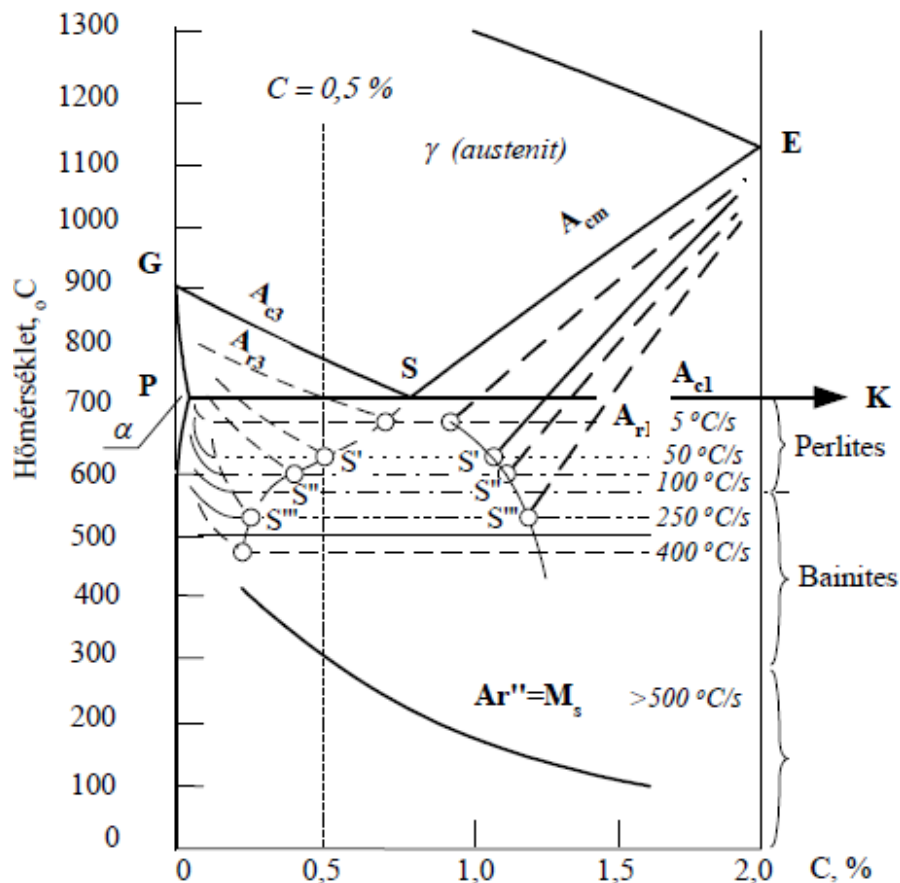
Points: t_m , t_p

Curves: a , b , p , m

Labels: A_{cm} , A_{cl} , M_s

2. ábra. Hiper-eutektoidos acél folyamatos hűtésű átalakulási diagramja

Mindkettő esetben tehát az 1., a 2. és a 4. diffúziós folyamat, míg a 3. lépés diffúziómentes. Ezért ha a hűtési sebességet növeljük, akkor először a begömbösödés marad el. A hűtési sebesség növelésével bekövetkezik a kritikus átalakulási hőmérséklet hiszterézise, azaz az átalakulások egyre csökkenő hőmérsékleten történnek.



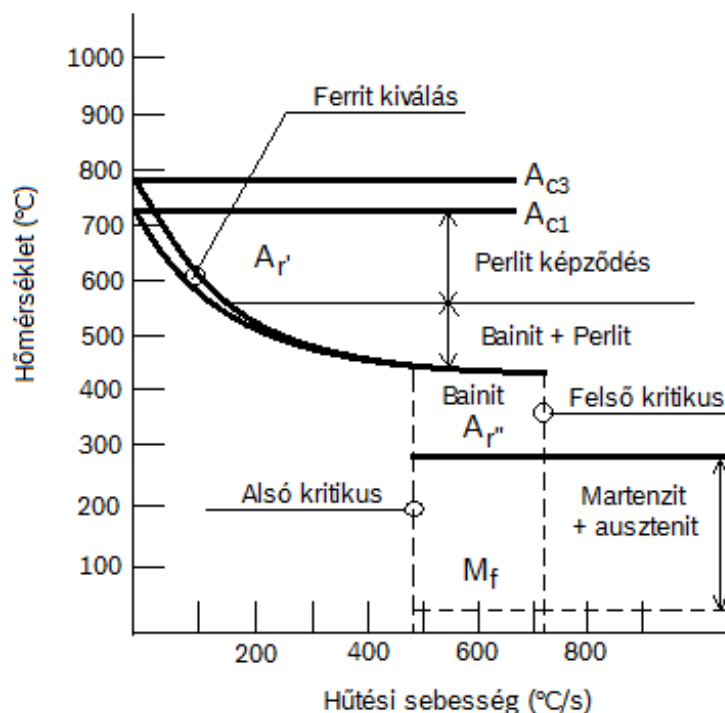
3. ábra. A lehülési sebesség hatása gyengén ötvözött acélok eutektoidos átalakulási hőmérsékletére

A hűtési sebesség növelésével fokozatosan csökken a proeutektoidos fázisok kiválására rendelkező idő. Ennek az a következménye, hogy növekszik a perliteseen átalakuló ausztenit mennyisége, ezzel érzékeltetve azt, mintha a perlitese összetétel egyensúlyi átalakulásának megfelelő $C = 0,8\%$ helyett egyre növekvő összetétel tartományra szélesedne.

A hűtési sebesség növelésével az eutektoidos átalakulásban is változás történik: a durva lemezes perlit helyett, mivel nincs idő az atomok diffúziójára, egyre vékonyabbak lesznek a perlit lemezei, tehát finomabb szerkezetűvé válik.

A hűtési sebesség további növelésénél ($v > 200^\circ\text{C/s}$) az átalakulás egyre alacsonyabb hőmérsékleten indul meg és megjelenik a szövetszerkezetben a bainit is a perlit mellett. Ha egészen $v = 700^\circ\text{C/s}$ fölé növeljük a $\gamma \rightarrow \alpha$ átalakulásból már csak a $\gamma \rightarrow \alpha$ rácsátrendeződés marad meg, azaz az ausztenit martenzites átalakulása megy végbe.

Ezek láthatóak a következő ábrán:



4. ábra. Hipoeutektoidos acél esetén a hűtési sebesség hatása

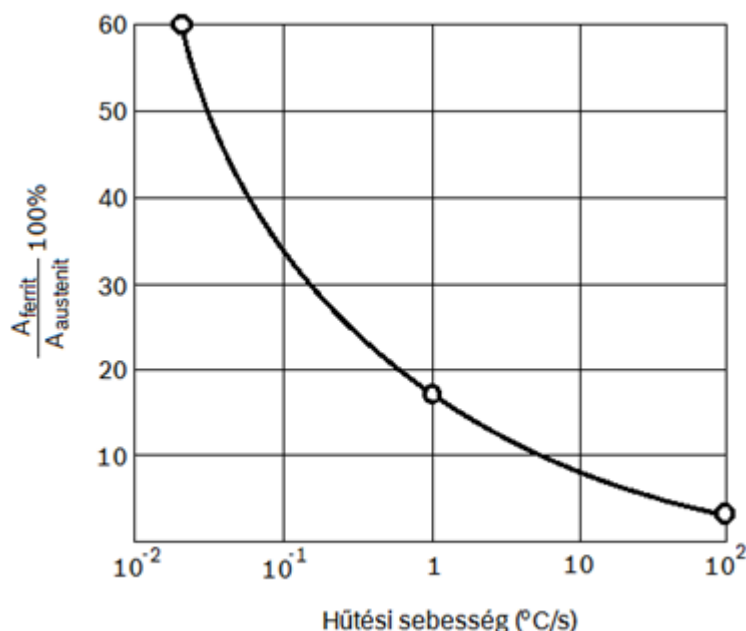
A hűtés sebessége hatással van az átalakulás termékeinek minősége (típusa) mellett a keletkezett termék méretére is. Az ausztenit – átalakulás termékeinek mérete a kiindulási ausztenit szemcsenagyságtól függ. A nagyságát az a hőmérséklet határozza meg, amelyre felhevült. A_{cm} hőmérséklet fölött a karbon-tartalom növekedésével már olyan magas hőmérséklet van jelen, amelynél az ausztenit szemcsedurvulásának veszélye fokozódik. Az ausztenit szemnagysága az A_3 és A_{cm} hőmérséklet fölött a homogén γ – mezőben való hevítés közben folyamatosan növekszik és legnagyobb méretét közvetlenül a szolidusz alatt éri el. A szemcseméretet a hőtartási idő is nagymértékben befolyásolja.

Az ausztenit lényeges jellemzője, hogy a hevítéskor elért szemcse nagysága hűtésekor a γ – mező alsó határhőmérsékletéig, az A_3 -ig, illetve a martenzites átalakulás M_s – hőmérsékletéig megmarad.

A hipoeutektoidos acélok ausztenitjének átalakulási terméke akkor lesz a legfinomabb, ha az a cél felhevítése közvetlenül A_3 fölé történik. A hipereutektoidos acéloknál ezzel

ellentétben legfeljebb 900°C-ig (G-pont) hevíthetjük fel az acélt A_{cm} fölé, mert nagyobb C – tartalmú acélok esetén túl nagy szemcsék keletkeznek és a szemcseszerkezet jelentősen eldurvul.

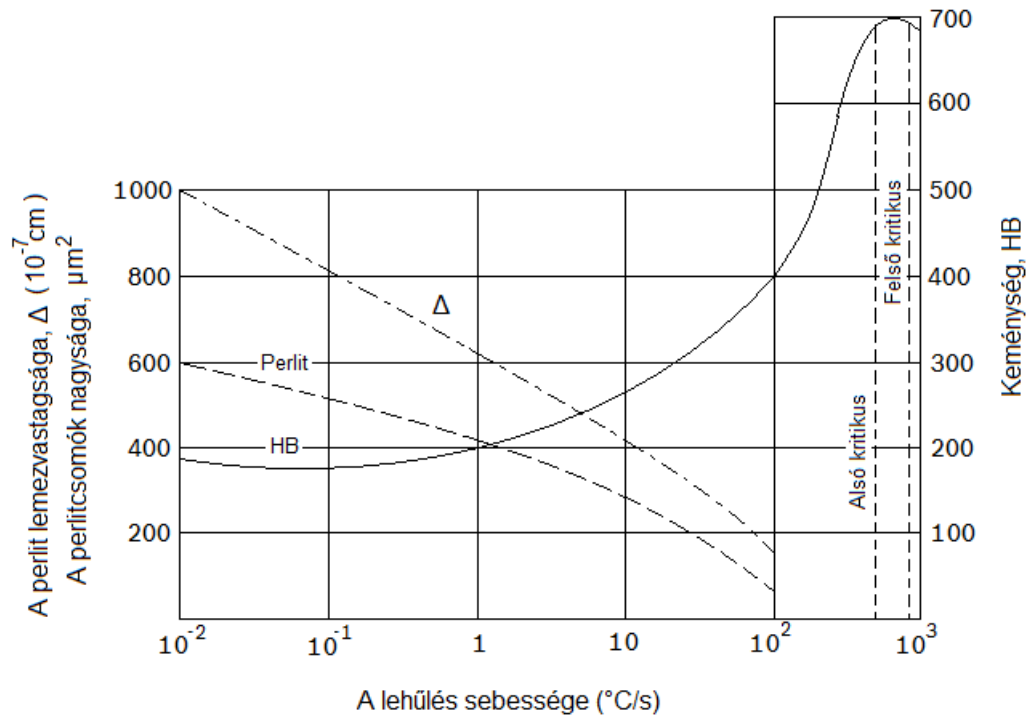
A $c < 0,2$ % karbon-tartalmú acélokban túlnyomórészt ferrit van, ezért ezeknél a ferritszemcse nagysága érdekes. Az ausztenitből alakult ferrit szemcsenagysága százalékban kifejezve az alábbi ábrán látható:



5. ábra. Ferritszemcse nagyságára vonatkozó hűtési sebesség

Az ábrán látható, hogy a ferritszemcse nagysága lassú hűtés esetén az ausztenitének mintegy fele, gyors hűtés esetén kevesebb, mint egy tizede.

A hűtési sebesség hatását a perlites átalakulásra az eutektoidos acél átkristályosodásának elemzésével figyelhetjük meg. A túlhűtés növelésével nő az időegységben keletkező cementitcsírák száma, tehát az ausztenit kristály határán több helyen indul meg a perlit kialakulása. A hűtés fokozásával a ferrit lemezvastagsága csökken, sűrűsége nő. A cementit lemezek számának növelése viszont növeli a perlit keménységét, valamint a csúszási síkok útjában álló cementit lemezek számának szaporodása hátráltatja az alakváltozás megindulását és így növeli a folyási határt, valamint a szakítószilárdságot.



6. ábra. Eutektoidos acél perlitszerkezetére való hatása a hűtési sebességnek

A hűtési folyamat sebességének 100°C/s fölé való növelésekor keletkezett bainites és martenzites szöveteknél a lemezvastagság csökkenése helyett az átalakulási termékek diszperzitásának növekedéséről beszélhetünk. Ezzel együtt újabb keménységnövekedés következik be.

A folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramokat különböző hűtési sebességekkel hűtött, kisméretű próbatestek vizsgálatával határozzuk meg. A kritikus átalakulási hőmérsékletek észlelésére általában az allotróp módosulatok fajtérfogat-különbségeinek differenciál-dilatométeres mérését alkalmazzuk.

1.2. Folyamatos lehűtésre érvényes nem egyensúlyi átalakulási diagramok

Kisméretű próbatestek homogén ausztenites állapotba hevítése

- hipoeutektoidos acélra: $A_{c3} + 20 \dots 30^\circ\text{C}$
- hipereutektoidos acélra: $A_{cm} + 20 \dots 30^\circ\text{C}$

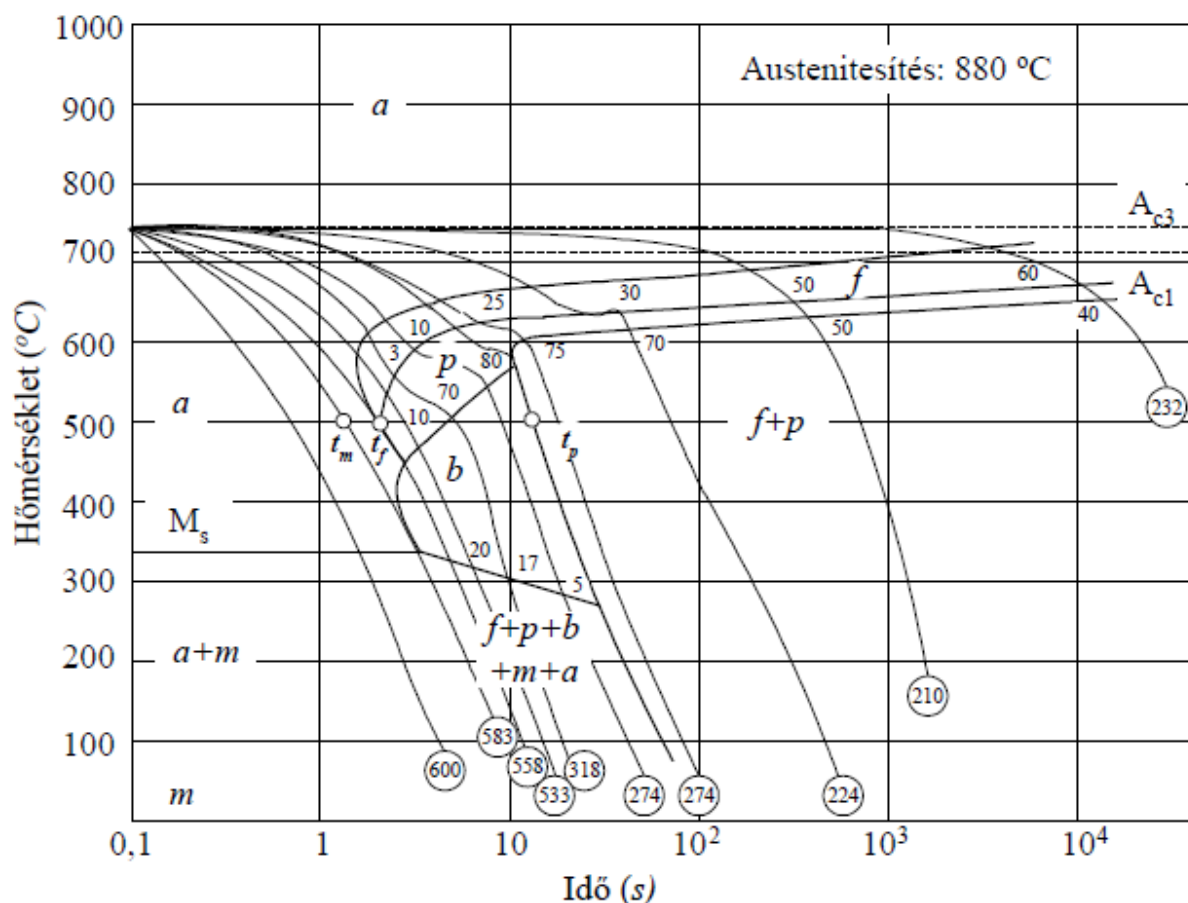
Rövid idejű hevítéssel a homogén ausztenites állapot biztosítása a cél.

Különböző, de egyenletes folyamatos hűtési sebességekkel való lehűtés (kemencében való lassú hűtés, nyugodt levegőn való lassú hűtés, fűjt levegőn való hűtés, olajban-, vízben való gyors hűtés) jellemzi.

A kritikus átalakulási hőmérsékletek (A_{c1} , A_{c3} , M_s) és hozzátartozó idők meghatározása a fajtérfogat változáson alapuló differenciál dilatométeres mérésekkel történik.

Az átalakult szövetelemek mennyiségi meghatározását szobahőmérsékleten mikroszkópi vizsgálattal végezzük.

T - lg t diagramokat használunk ábrázolásukra, amelyeken az ausztenitesítés hőmérsékletét, valamint a kritikus átalakulási hőmérsékleteket (A_{c1} , A_{c3} , A_{cm}) mindig fel kell tüntetni.



7. ábra. C = 0,45 % karbon-tartalmú hipoeutektoidos acél folyamatos hűlésre vonatkozó átalakulási diagramja

A diagramokon különböző hűtési sebességekre vonatkozó hűtési görbék szerepelnek:

- az átalakulások mindig csak a hűlésgörbék mentén elemezhetők,
- a diagramon nem szereplő hűlésgörbe berajzolható, figyelembe véve, hogy hűlésgörbék egymást nem keresztezhetik
- az egyes átalakulások végét jelző vonalaknál az átalakult szövetelemek %-os mennyiségét fel kell tüntetnünk
- a hűlésgörbék végén a keletkezett végszövet keménységét is ábrázolnunk kell

- Kritikus alsó hűtési sebesség, amelynél nagyobb hűtési sebesség esetén már keletkezik martensit. Meghatározása a következő összefüggéssel.

$$v_{krit}^{alsó} = \frac{T_{A_{c3}} - 500}{t_p}$$

- Kritikus felső hűtési sebesség, amelynél nagyobb hűtési sebesség esetén már csak martensit keletkezik. Meghatározása a következő összefüggéssel.

$$v_{krit}^{felső} = \frac{T_{A_{c3}} - 500}{t_m}$$

2. A FIZIKAI SZIMULÁCIÓ LÉNYEGÉNEK RÖVID ISMERTETÉSE, ALKALMAZÁSÁNAK ELŐNYEI, FELHASZNÁLHATÓSÁGA.

Az anyagfeldolgozó eljárások fizikai szimulációja olyan laboratóriumi körülmények között végzett modellezést jelent, amely során pontosan reprodukáljuk azokat a termikus és mechanikus folyamatokat, amelyek a tényleges feldolgozás során érik az adott anyagot. A végső felhasználás körülményeit létrehozva az anyag vagy szerkezet működés közbeni viselkedését is vizsgálhatjuk, a hatásokat elemezhetjük.

A szimuláció olyan vizsgálat, amikor egy rendszer, folyamat fizikai vagy számítógépes modelljén tanulmányozzák a rendszer várható, illetve valódi viselkedését. A modelltől és az alkalmazott eljárástól függően számos szimulációs megoldás létezik. A modell lehet az eredeti jelenségtől vagy folyamattól csak léptékben eltérő, de egyébként azonos jelhordozó közegre felépített kísérleti berendezés, vagy az eredeti jelhordozóktól különböző, de azokkal azonos módon viselkedő közegre épített fizikai modell.

A valóságot minél inkább megközelítő paraméterekkel és körülmények között zajlanak a folyamatok egy zárt, mérőeszközökkel felszerelt környezetben, az eredmények pedig valós problémákra nyújtanak megoldást. A fizikai szimuláció egyaránt alkalmas anyag- és folyamatmodellezésre, valamint anyagtudományi vizsgálatok elvégzésére is. Felhasználási területei a teljesség igénye nélkül a következők:

- Alkalmazások: hegesztés, folyamatos öntés, meleghengerlés, folyamatos izzítás, kovácsolás, hőkezelés, porkohászat, szinterelés, diffúziós kötés, stb.
- Vizsgálatok: termikus/mechanikus törés, melegalakíthatóság, folyamatos hűtési átalakulás, folyamatos hevítési átalakulás, izotermás izzítás, stb.
- Anyagismeret: diffúzió, feszültségrelexáció, olvadás és szabályozott dermedés, újrakristályosodás, edzés, stb.

A fizikai szimuláció mindig valósídejű, még az úgynevezett gyorsított szimulációk esetében is, csak a vizsgálat paraméterei úgy vannak módosítva, hogy a kapott reakció rövidebb idő alatt játszódjon le.

3. A GLEEBLE 3500 FIZIKAI SZIMULÁTOR ISMERTETÉSE, MŰKÖDÉSI ELVE, A BERENDEZÉS ELVI FELÉPÍTÉSE.

Meghatározható egy, a fizikai szimulálásban levő új korszak. A Gleeble 3500 bemutatásával a Dynamic Systems Inc. megint felemelte azt a lécezt, ami alapján minden termikus-mechanikus tesztelő gépet és szimuláló rendszert megítélnek.

A Gleeble 3500 egy teljesen integrált, digitális, zárt hurokvezérlésű, termikus és mechanikus tesztelő rendszer. Egyszerűen használható Windows alapú számítógépes szoftver, sok erőteljes processzorral van ellátva, ezeknek köszönhetően egy rendkívüli felhasználóbarát interfészt nyújt, hogy termál-mechanikus tesztek és szimulálás programokat minél könnyebben hozzassuk létre, futtathassuk és elemezhessünk adatokat.

3.1. A Gleeble 3500 termálrendszer

A Gleeble 3800 közvetlen ellenállásfűtéssel akár 10000 °C/s sebességgel képes felhevíteni a próbadarabot. Az állandósult állapot elérése érdekében nagy pontossággal állandó hőmérsékleten lehet tartani a próbatestet, melynek vizsgált részén egyenletes hőmérséklet-eloszlás valósítható meg, vagy adott hőmérséklet-profil is. A próbadarabokat nagy hővezetésű befogók tartják, melyek lehetővé teszik a nagy hűtési sebesség elérését. Opcionálisan rendelhető hűtőrendszerrel a próbadarab felületén akár 10 000 °C/s hűtési sebesség is elérhető.

A próbadarab felületének hőmérsékletét termoelemmel, vagy infravörös pirométerrel mérik, melyek a szabályozáshoz szükséges pontos visszacsatolást biztosítják. Az egyedülállóan gyors hevítést lehetővé tevő rendszer miatt a Gleeble szimulátorral 3-10-szer gyorsabban lehet termikus kísérleteket végrehajtani, mint a hagyományos, kemencével melegítő berendezésekkel.

3.2. A Gleeble 3500 mechanikus rendszer

A Gleeble 3500 mechanikai rendszere teljesen integrált szervohidraulikus rendszer, mely akár 10 tonna statikus nyomóerőt, vagy 10 tonna szakítóerőt is képes kifejteni. Az elmozdulás sebessége maximum 1000 mm/s lehet. Elmozdulás érzékelők, erőmérő cellák, vagy érintésmentes lézeres nyúlásmérő biztosítják a visszacsatolást a mechanikai vizsgálati program pontos végrehajtásához és a reprodukálhatósághoz.

A mechanikai rendszer lehetővé teszi, hogy a kezelő által írt program bármely vizsgálat közben átválthasson az egyik szabályozási módról egy másikra. Ez a lehetőség biztosítja a termomechanikus folyamatok szimulációjához szükséges rugalmasságot. A program bármely pillanatban, a vizsgálatához szükséges gyakorisággal válthat az egyik szabályozó változóról a másikra. A rendelkezésre álló szabályozási módok: alakítás mértéke, erő nagysága, nyúlás mértéke, konvencionális feszültség és alakváltozás, valamint valódi feszültség és alakváltozás.

3.3. A Gleeble 3500 digitális ellenőrző rendszer

A Gleeble 3500 szíve a Series 3 Digital Control System. Ez nyújtja a jelek közül mindegyiket, ami szükséges a vezérlő termikus és mechanikus tesztváltozókhoz, egyidejűleg digitális zárt termikus és mechanikus szervorendszereket hurkol össze. A Gleeble 3500 kézi irányítás által, vagy teljesen számítógéppel tudják működtetni, esetlegesen ezek kombinációjában.

A Gleeble 3500 számítógép irányítása egy Windows alapú munkaállomásból és erőteljesen beágyazott processzorból áll a vezérlőkonzolban. A Windows – munkaállomás egy rugalmas standardot ajánl, egy úgy nevezett Graphical User Interface-t, amely olyan szimulációs programokat hoz létre és olyan jól, ami elemzi a származó adatokat és jelentést is tesz.

A beágyazott processzor tesztet és szimulációs programokat hajt végre és adatot gyűjt a Windows-program irányítása alatt. A processzor olyan erős, hogy amíg tesztek futnak vagy szimulációk folynak a gépen, az üzemeltető képes arra, hogy új tesztek hozzon létre és adatot elemezzon.

Miközben a Gleeble 3500 üzemeltető interfészét tervezték, a DSI mérnökök felismerték, hogy a nagyon rugalmas irányítás alapvető gépeltetés szempontjából. Így minden szempontot a 3500 ellenőrző rendszerszámítógépen keresztül tudnak irányítani és előre el tudnak helyezni a programban. Hogy még rugalmasabbá tegye a rendszert és bármikor megengedje a rendszer a könnyű, kényelmes kézi irányítását, a Gleeble 3500 tartalmaz egy különálló vezérlőkonzolt, a Virtual Panel Meters 10-et (VPMs).

A VPMs tartalmaz egy vezérlőgombot és adatleolvasást, amit úgy konfiguráltak, hogy irányítsa annak a rendszernek a valamennyi részét, amit az üzemeltető igényel. Az üzemeltetőnek teljes rugalmassága van a rendszer kézi irányításában, de a számítógép

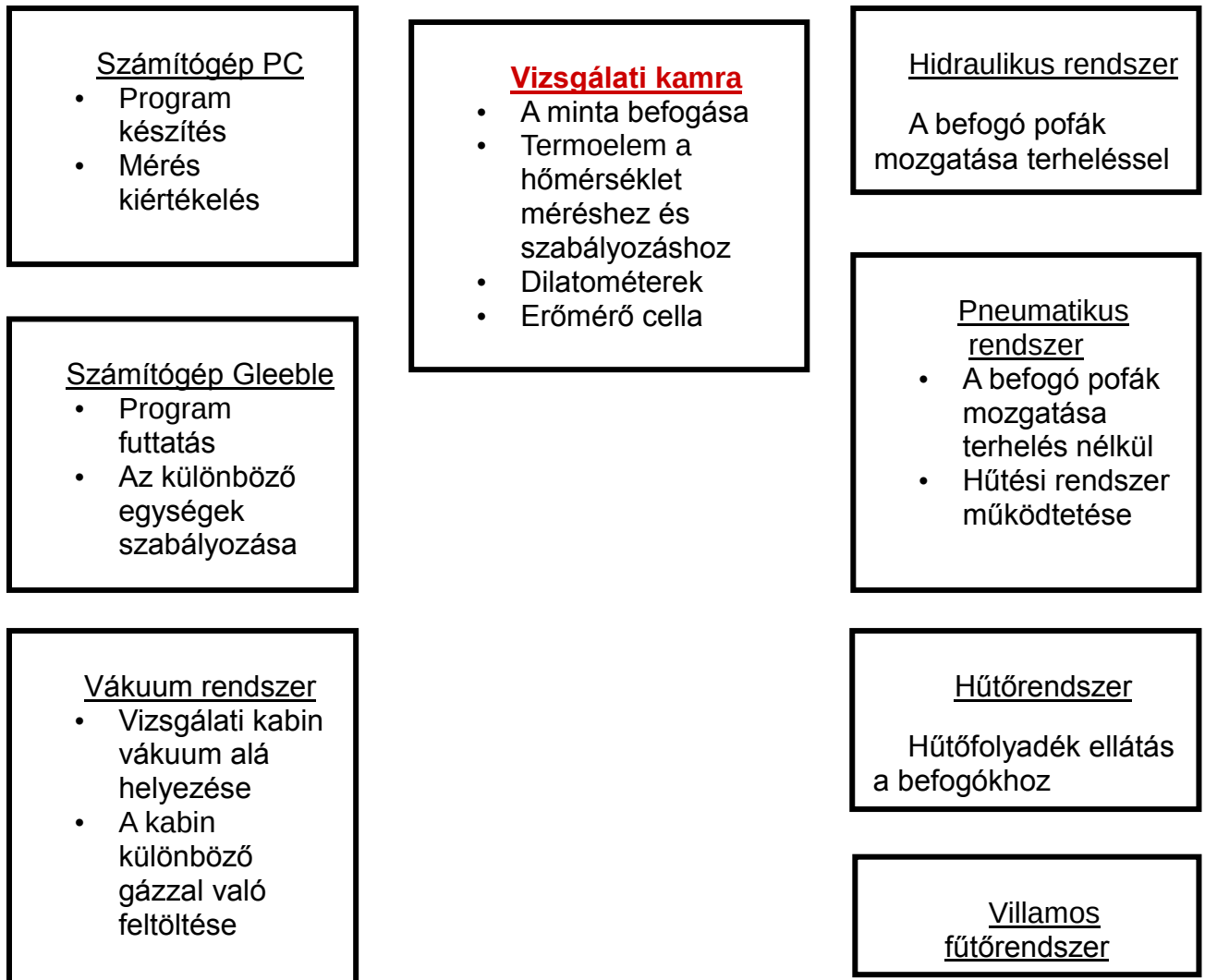
irányítás hatalmának és kényelmének nem fedi le egészét. A VPMs-t arra tudjuk használni esetlegesen, hogy beállítsuk a programot, amíg a teszt haladásban van.

Amint egy tesztet vagy a szimulálást befejezett, az eredmények egy külön szoftverbe automatikusan betöltődnek.

Performance Parameters	Gleeble 3500
Maximuális hevítési sebesség	10,000°C/sec
Maximuális hűtésisebesség	10,000°C/sec
Maximális elmozdulás	100 mm
Maximális elmozdulási sebesség	1,000 mm/sec
Maximális erő	10 tonna
Maximális próbadarab méret	Ø 20mm

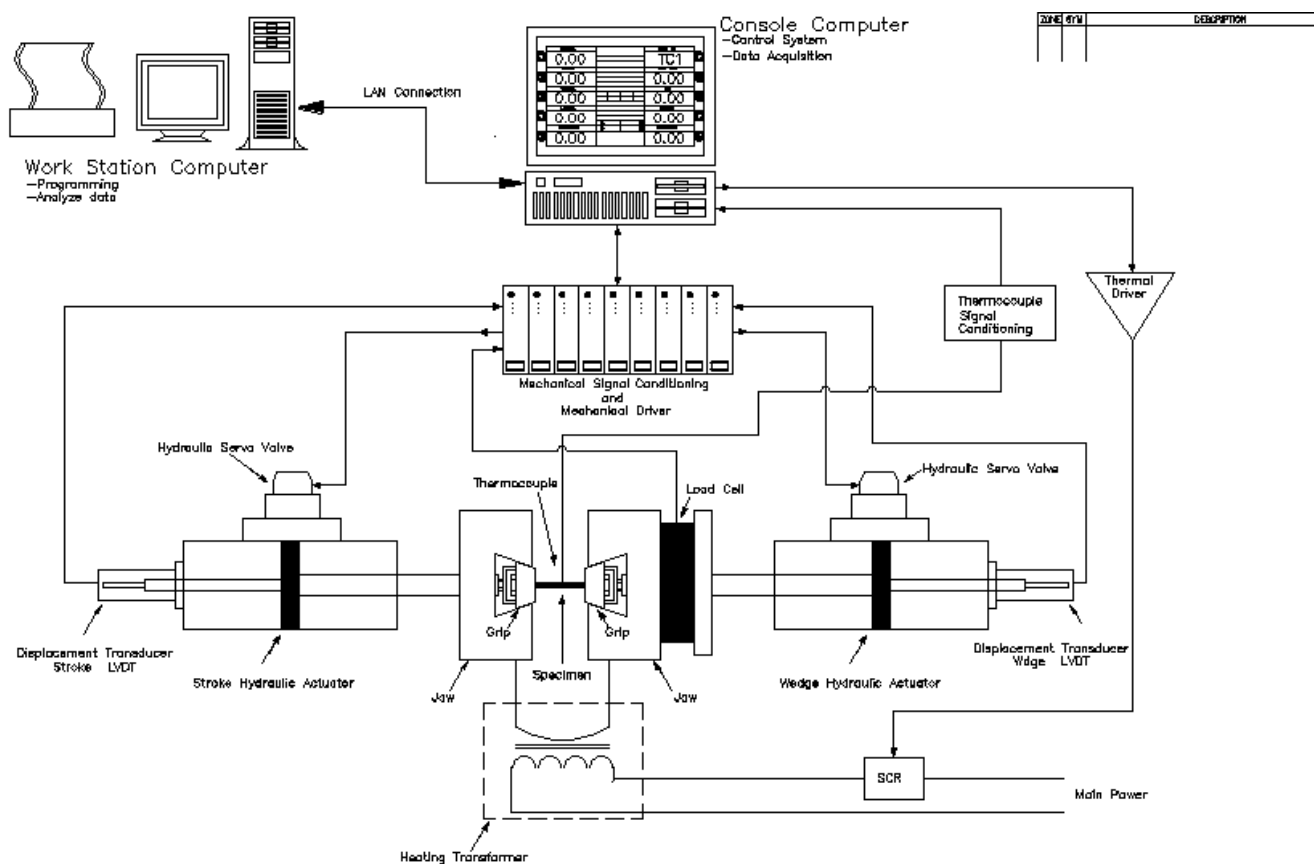
8. ábra. Pár teljesítmény adat a Gleeble 3500-hoz

3.4 Funkcionális egységek



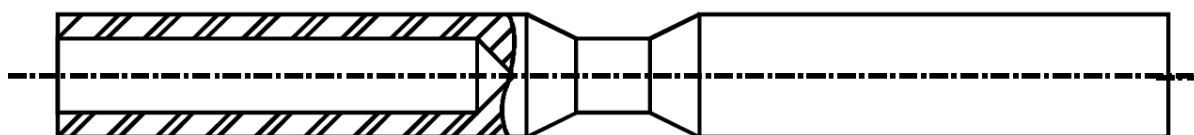
9. ábra. A Gleeble rendszer felépítésének blokksémája

A Gleeble rendszer sematikus ábrája látható a következő ábrán. A főbb egységek, vizsgálati kamra, a számítógép (PC), munkaállomás, a Gleeble rendszer, vákuum rendszer, valamint a hidraulikus, pneumatikus, hűtő – és villamos rendszerek.

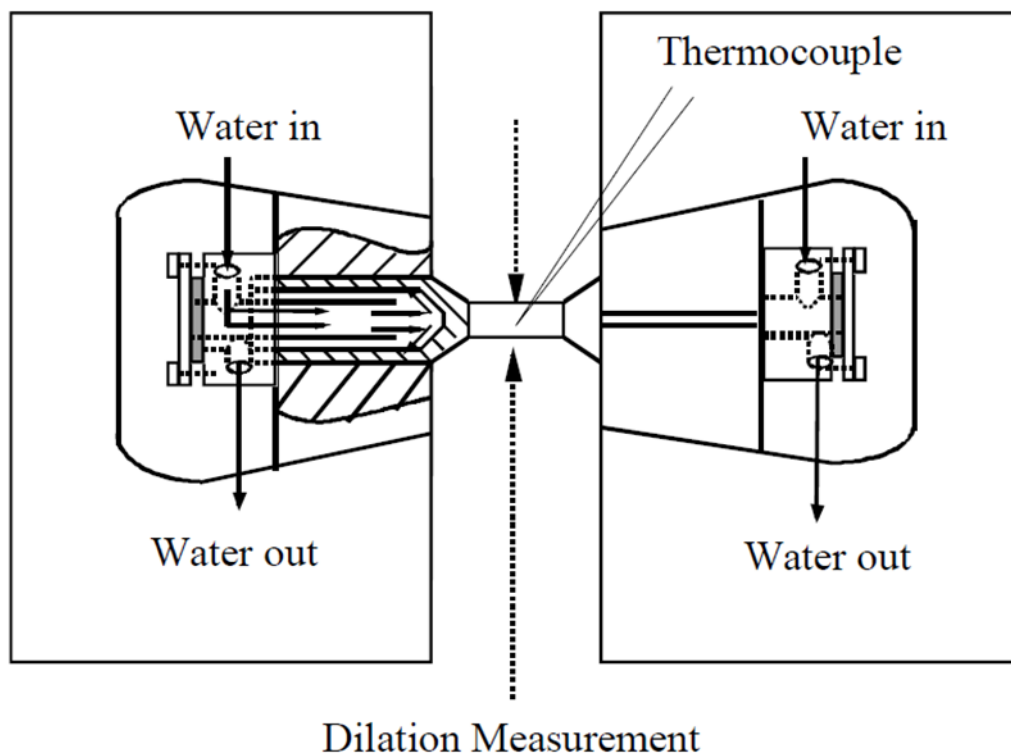


10. ábra. A Gleeble rendszer sematikus ábrája

CCT diagram felvételéhez használt próbadarab speciális felépítésű. A középső rövid részen történik a fázisátalakulások vizsgálata. A két vége pedig a megfelelő hűtési erélyesség elérése érdekében üregek.



11. ábra. CCT diagram felvételére használt próbadarab sematikus rajza

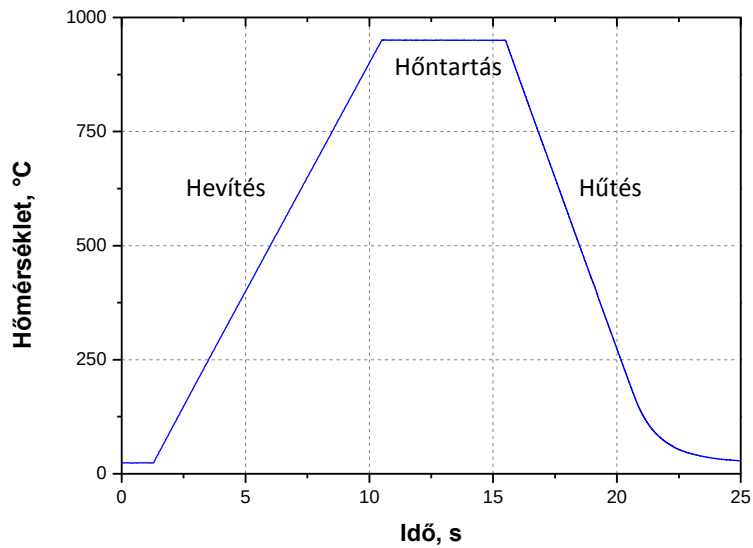


12. ábra. Mérési összeállítás sematikus rajza CCT diagram felvétel esetén Gleeble 3500 esetén

3.5. CCT vizsgálat

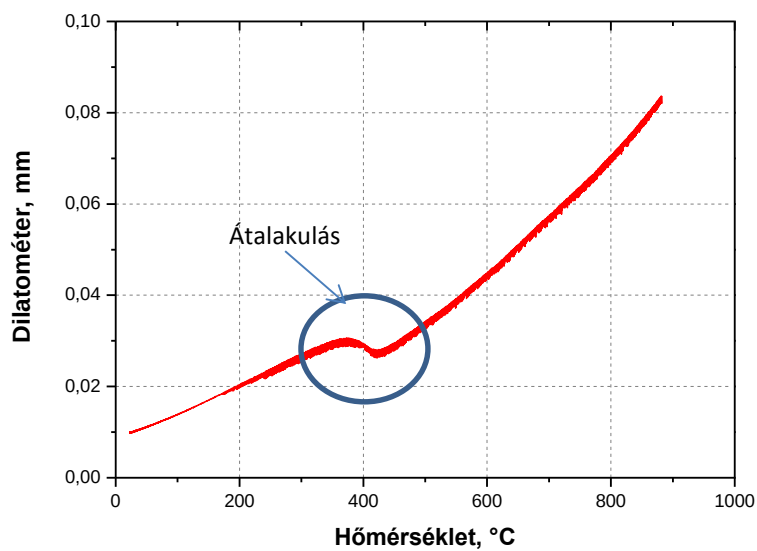
A CCT vizsgálat lényege röviden, hogy a mintadarabokat azonos hevítési sebességgel a vizsgált acél összetételének megfelelő ausztenitesítési hőmérsékletre hevítik, majd adott hőtartás után az előre meghatározott hűtési sebességgel lehűtik, miközben folyamatosan regisztrálják a mintarab keresztirányú méretváltozását egy dilatometer segítségével.

Egy tipikus ciklus hőmérséklet idő diagramja látható a következő ábrán. Az adott esetben az ausztenitesítés hőmérséklete 950°C volt, hevítési sebesség 100°C/s , a hűtési sebesség 150°C/s . A vizsgálatot a Mechanikai Technológiai Tanszéken James Jarvis-Girtler és Dr. Kuzsella László végezte.



13. ábra. Hőmérséklet – idő diagram

A hűlési szakaszban felvett dilatométeres görbe megmutatja, hogy milyen hőmérsékleten történt átalakulás. A következő áran bemutatott, 150°C/s lehűléshez tartozó dilatométeres görbén az átalakulás kezdete 437°C az átalakulás befejezése 358°C.



14. ábra. Dilatométeres görbe

Az átalakulás kezdetét és végét jelölő hőmérsékletek segítségével megalkotható az adott összetételre vonatkozó átalakulási diagram.

4. NEM EGYENSÚLYI FÁZISDIAGRAMOK MEGHATÁROZÁSA

MATEMATIKAI MODELLEZÉssel

4.1 A matematikai (számítógépes) szimuláció

Számítógéppel segített mérnöki tevékenységről (CAE – Computer Aided Engineering) körülbelül az 1960-as évektől beszélhetünk. 1975-től létrejöttek a lineáris, az utóbbi években pedig a nemlineáris végelem-programmal integrált tervezőrendszerek. A végelem-módszer az elmúlt évtizedek és napjaink egyik leggyorsabban terjedő, nagy hatékonyságú számítástechnikai módszere [19]. Így a matematikai szimuláció bemutatásához röviden tekintsük át a lényegét.

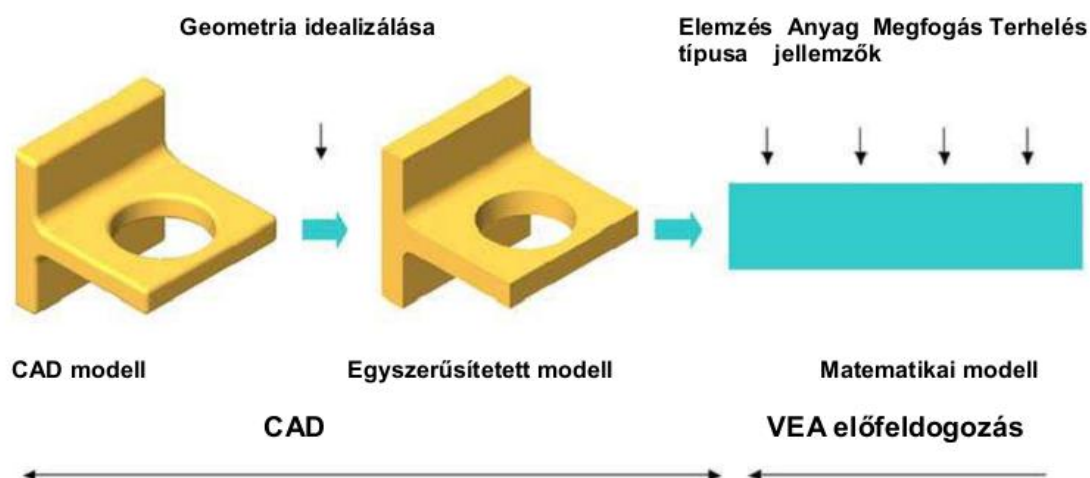
Kövessük végig egy végelelemes analízis (VEA) lépéseit és hibáit, hogy rávilágítsunk miben tér el a fizikai modellezéstől. VEA típusú szoftverek esetén a modellezés három lépésből áll. Elsőként az előfeldolgozás történik meg, ahol definálják az analízis típusát, anyagi jellemzőket, terheket, kényszereket, valamint végelemekre darabolják a modellt. A megoldás-szakasz, vagyis a kívánt eredmények kiszámolását követően pedig az elemzés, kiértékelés következik. Másképp fogalmazva a szükséges lépések a következők:

1. A feladat értelmezése
2. a matematikai modell felépítése
3. a végelem modell felépítése
4. a végelem modell megoldása
5. az eredmények elemzése

Végezzünk el egy modellezést SolidWorks Simulation segítségével. Egy olyan korrekt geometriával kell kezdenünk, amelynek kicsi (tetraéder vagy háromszög) elemekre oszthatónak kell lennie. Ugyanis csak így jön létre a megfelelő hálózasi sűrűség, ami majd a pl. a feszültségek, hőmérséklet eloszlás, elmozdulások helyes meghatározásában játszik kulcsszerepet. Ennek érdekében gyakran szükségessé válik a CAD geometria módosítása, pl. részletek elvétele, tisztítás vagy idealizálás.

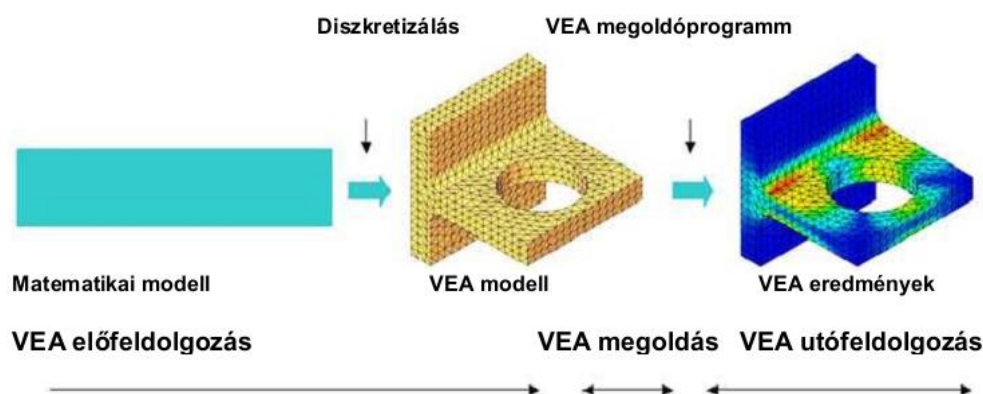
Részletek elvétele alatt olyan geometriai elemek eltávolítását értjük, amelyet a vizsgálat szempontjából elhanyagolhatónak ítélnünk meg. Az idealizálás viszont már egy komolyabb beavatkozást jelent, például szolid geometria esetében felületként kezelünk vékony falakat. A

tisztítás pedig olyan elemek elvétele, amelyek végképp megnehezítik vagy lehetetlenné teszik a behálózást. A geometria módosításával csökkenthető a számítási idő. A végelem modell felépítése következik, ami tehát nem más, mint a modell vizuális behálózása, más néven diszkretizálás.



15. ábra - VEA modellezés első lépései, CAD modell, előfeldolgozás

A végeselemes modell létrehozása után a szoftver valamely megoldó programjával kiszámoltatjuk a kívánt eredményeket. A végelem hálózat minden meghagyott szabadságfoka egy-egy ismeretlent jelent. Szolid elemek esetén csomópontonként három ismeretlennel számol, ugyanakkor például hőmérséklet-gradiens meghatározásakor, mivel a hőmérséklet skalármennyiség, nem pedig vektor, az elmozdulást csak egy ismeretlennel számítja. Ezt a lépést követi az elemzés. Ez olykor nagyon nehéz, mivel a megoldás többféle adatot nyújt, amiket sokféleképpen jeleníthetünk meg. A helyes következtetésekhez számba kell venni az eddigi lépések során bevitt esetleges hibákat. Ilyenek pl. a modellezési vagy idealizálási hibák, diszkretizálási hibák és a megoldással járó numerikus (kerekítési, stb.) hibák.

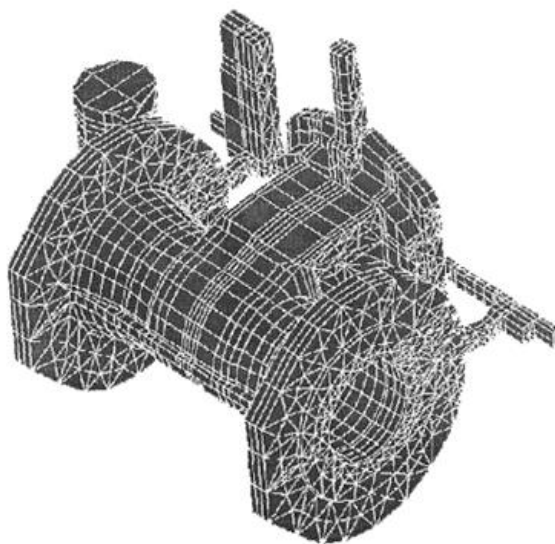


16. ábra VEA megoldás, utófeldolgozás

Mint minden módszernek, a SolidWorks VEA szoftver alkalmazásának is vannak korlátai. Csak olyan feltételezések mellett végezhetünk vizsgálatot, mint hogy az anyag lineáris, statikus terhek hatnak és a szerkezeti deformáció kismértékű. Az eredmények nem érvényesek, ha bármelyik feltétel nem teljesül. A SolidWorks (Static) bár rendelkezik geometriailag nem lineáris megoldóval is, ám ennek csak alapértelmezett beállításai érhetőek el, így e funkció alkalmazhatósága meglehetősen korlátozott.

Másik példaként nézzük meg egy öntvény (ábra) dermedési szimulációjának lépéseit^{Hiba! A könyvjelző nem létezik.}

1. öntvényrajz készítés CAD rendszerben
2. forma és beömlő tervezés
3. háló generálás
4. formatöltés szimulációja
5. hőmérsékletmező szimulációja
6. mikroszerkezet szimulációja
7. feszültség szimuláció
8. tulajdonság szimuláció.



17. ábra - Szelepház a beömlő rendszerrel és a felöntésekkel. A fehér vonalak a generált hálót szemléltetik [20]

Ez a szimuláció is véges elem vagy véges differencia módszerrel számítja ki a hőmérséklet mezőt, az olvadákáramlást és a feszültség állapotot. Ezek után a megfelelő összefüggések

ismeretében a tulajdonságok becsülhetők. Az összefüggéseket és a szimulációhoz szükséges egyenleteket, algoritmusokat vagy a szoftverekbe beépítve vagy adatbankokban találhatjuk [20].

4.2. Matematikai modellezés a JMat pro szoftver segítségével

A JMat pro anyagok tulajdonságainak modellezésére az Nagy-Britanniában, a Sente Software Ltd. által fejlesztett JAVA alapú szoftver, mely termodinamikai törvények és empirikus képletek segítségével ad becslést fémek és ötvözeik tulajdonságaira a kémiai összetétel alapján.

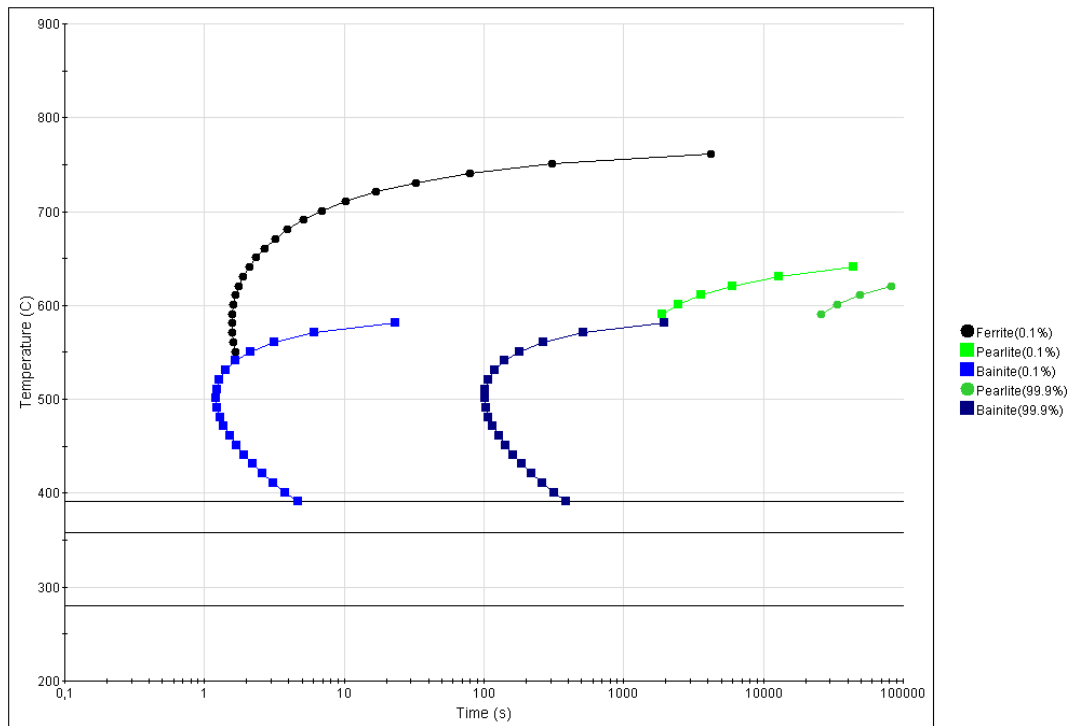
Nem egyensúlyi fázisdiagramok meghatározására a Kirkaldy és szerzőtársai, valamint Zener és Hiller által leírt eljárásokat alkalmazza. Először a TTT diagramot határozza meg, majd a TTT diagram meghatározása után a CCT diagram könnyen előállítható a Kirkaldy-féle additivitási tétel segítségével.

5. EREDMÉNYEK

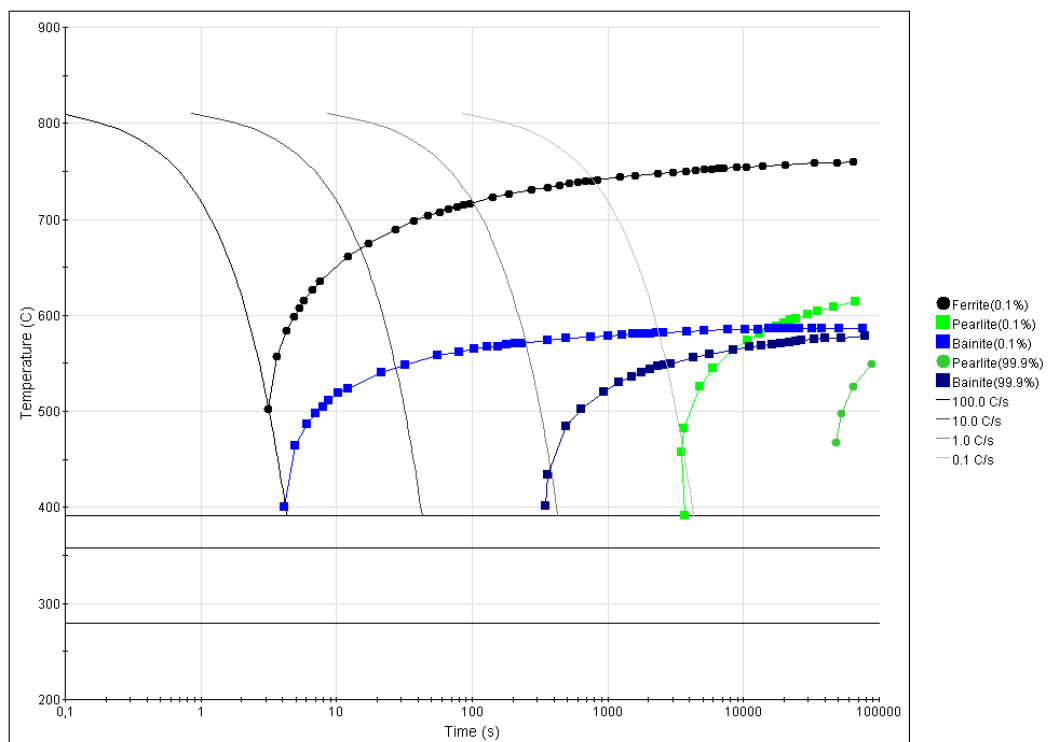
A futtatásokat az Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézetében Dr. Réger Mihállyal végeztük.

Kétféle acélminőségnek határoztuk meg a TTT és a CCT görbéjét.

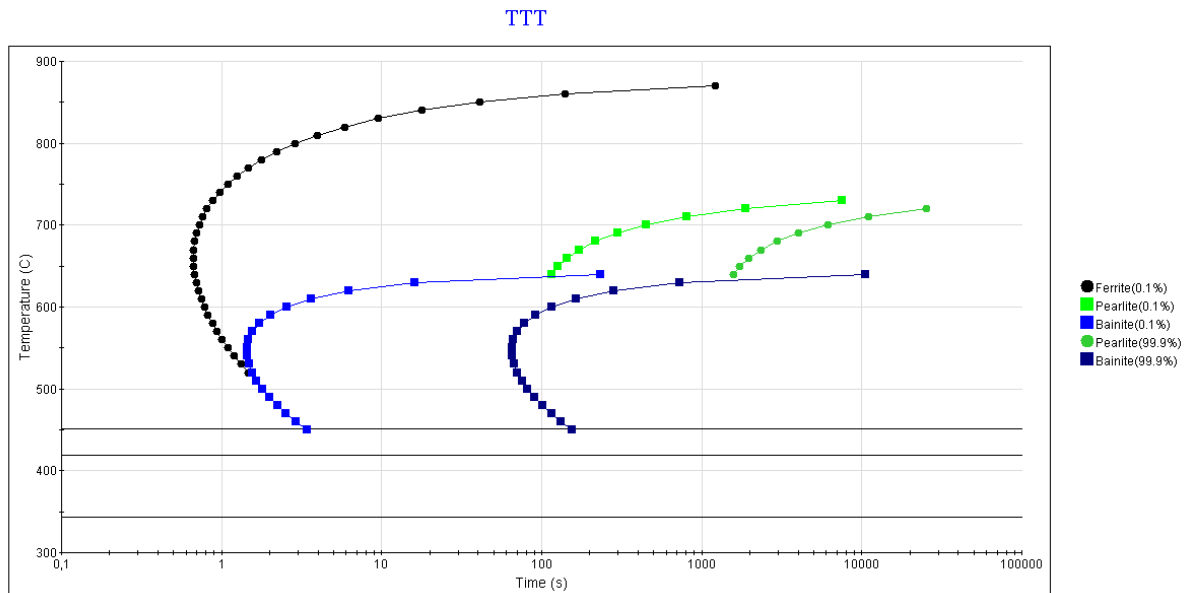
- általános rendeltetésű 4815 jelölésű acél
- nagyszilárdságú Weldox S960QL hegeszthető acél



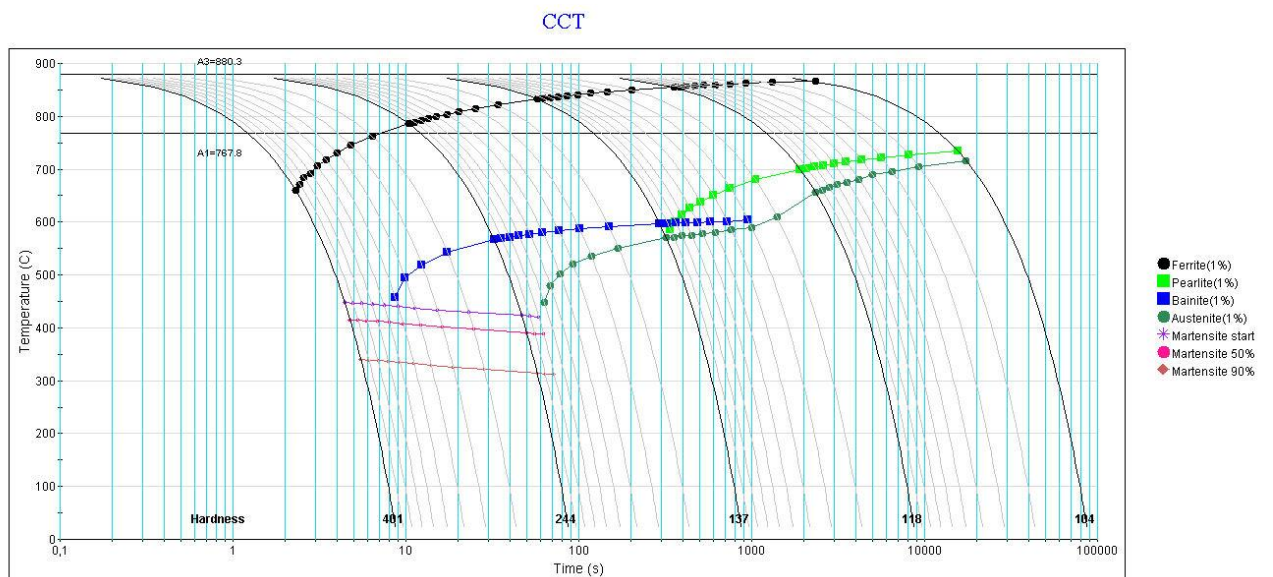
6. ábra. Általános rendeltetésű 4815 jelölésű acél TTT görbéje



7. ábra. Általános rendeltetésű 4815 jelölésű acél CCT görbéje



8. ábra. Weldox S960QL nagyszilárdságú hegeszthető acél TTT görbéje



9. ábra. Weldox S960QL nagyszilárdságú hegeszthető acél CCT görbéje

ÖSSZEFOGLALÁS

Tudományos diákköri dolgozatomban röviden bemutattam acélok nem egyensúlyi folyamatokra vonatkozó átalakulási diagramjait. Összefoglaltam a fizikai szimuláció lényegét, és bemutattam az egyik legkorszerűbb rendszert a GLEEBLE 3500 fizikai szimulátort, valamint azt, hogyan alkalmazható a fizikai szimulátor TTT és CCT diagramok felvételére.

Röviden összefoglaltam a matematikai modellezés lényegét és a JMat pro anyagok tulajdonságainak modellezésére fejlesztett szoftver segítségével meghatároztam két acélminőség TTT illetve CCT diagramját.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

„A TDK dolgozatban ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.”

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Balogh A., Sárvári J., Schäffer J., Tisza M.: *Mechanikai technológiák*, Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN 963 661 571 3 Miskolc, 2010.
- [2] Tisza M.: *Az anyagtudomány alapjai*, Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN 978-963-661-844-5 Miskolc, 2008.
- [3] Tisza M. : *Metallográfia*, Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN 963 661 338 9, Miskolc, 2006.
- [4] Lizák József: *Hőkezelés, Gyakorlati Segédlet*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
- [5] Kisfaludy Antal, Rozsnoki László: *Fémek technológiája II., Fázisátalakulások vasötvözetekben*, BDGMF, Budapest, 1980.
- [6] Bagyinszki Gyula: *Anyagismeret*, BMF-BGK, Budapest, 2002.
- [7] Csizmazia Ferencné dr.: *Hőkezelés kézirata*, Győr, 2003.
- [8] Gál I. – Schäffer József: *Számítógépes C-görbe elemző és hőkezelés-technológiai tervező rendszer*, *Anyagok világa*, III. évfolyam 1. szám, 2002. szeptember Budapest, <http://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2002/szept/GI-Schaffer.htm>
- [9] Kovács Ferenc: *Anyagszerkezetek kézirata*, Miskolc, 1997.
- [10] Dr.Artinger István: *Szerszámacélok és hőkezelésük*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1978
- [11] <http://gleeble.com/index.php/products/gleeble-3500.html>
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_cooling_transformation
- [13] <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/F2010/EP1/Materials4Students/Quinn/Atkins-CCT-Atlas-Intro.pdf>
- [14] <http://www.scientific.net/AMM.152-154.585>
- [15] M. Atkin, *Atlas of Continuous Cooling Transformation diagrams for Engineering Steels*, ASM, Metals Park, Ohio 44073; British Steel Corporation, Sheffield, England, 1980.
- [16] *Dynamic Thermal/Mechanical Metallurgy, Using the Gleeble 1500*. 2nd Edition, Chapter 9, Dynamic Systems Inc., Poestenkill, New York, USA.
- [17] *Dynamic System Inc. – Gleeble Systems, Application Note, Isothermal Quenching Technique for Development of CCT/TTT Diagrams Using Gleeble Systems*

- [18] Continuous Cooling Transformation (CCT) Software For Windows
- [19] Páczelt I., Szabó T., Baksa A.: A végeselem módszer alapjai, tananyag, (2007), p. 7-9.
- [20] Roósz A.: *A szerkezeti anyagok jövője – szimulációs módszerek*, Kolozsvár, (2003)