



Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék



Tudományos Diákköri Dolgozat

**AlSi7 ötvözet alakíthatóságának vizsgálata melegzőmítő
vizsgálattal**

Formability study of the AlSi7 alloy with hot forming test

Készítette:

Fehér Daniella, IDQGLI

Tervezésvezető:

Dr. Kuzsella László
egyetemi docens

EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott **Fehér Daniella** (Neptun kód: IDQGLI a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős **Műszaki menedzser** alapszakos hallgatója ezennel büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy a

AlSi7 ötvözet alakíthatóságának vizsgálata melegzömítő vizsgálattal

című tudományos diákköri dolgozatom saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályi szerint történt.

Tudomásul veszem, hogy plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén a szakdolgozat visszavonásra kerül.

Miskolc, 2022. november 04



hallgató neve

A konzulens nyilatkozata

Alulírott, Dr. Kuzsella László a Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetének oktatója a „AlSi7 ötvözet alakíthatóságának vizsgálata melegzőmítő vizsgálattal” című TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2022. november 07.



.....
a konzulens aláírása

Tartalom

Absztrakt.....	5
1. Bevezetés.....	6
2. Matematikai (számítógépes) szimuláció	8
2.1. Anyagjellemzők szerepe és jelentősége	8
2.2. A szimuláció.....	9
2.3. Numerikus modellezés folyamata	10
3. Fizikai szimuláció.....	13
3.1. Meghatározása, jelentősége.....	13
3.2. A fizikai szimuláció és a műszaki anyagtudomány komplex, átfogó kapcsolatrendszere	15
3.3. Fizikai szimuláció kezdete és fejlődése	20
3.4. Alkalmazásának területei esettanulmányok bemutatásán keresztül.....	24
3.4.1. Hegesztési melegrepedés – érzékenység megítélése fizikai szimuláció segítségével [9].....	24
3.4.2. Gyártási szimuláció, láng újrahevítés [10]	27
3.5. Tapasztalatok a Gleeble rendszerek előnyeiről és hátrányairól	29
4. Numerikus és fizikai modellezés összefüggése.....	31
4.1. Technikai ablakaik és jellemzőik	31
4.2. Fizikai és számítógépes szimuláció összekapcsolódása	33
5. Vizsgálatok	35
5.1. Vizsgált anyag.....	35
5.2. Vizsgálati berendezés, Gleeble 3500	36
5.2.1. Mechanikus rendszer	37
5.2.2. Termikus rendszer.....	37
5.3. Vizsgálat összeállítása.....	38
5.3.1. A vizsgálat folyamata	39
5.4. A vizsgálatok során meghatározó összefüggések (képletek)	43
6. Vizsgálati eredmények	44
Összefoglalás	48
Köszönetnyilvánítás.....	49
Irodalomjegyzék	50

Absztrakt

A fizikai szimuláció egy sokoldalúan alkalmazott innovatív vizsgálati eljárás, amely a fejlesztési és kutatási tevékenység szerves részét képezi.

Műszaki termékek előállítása és gyártása során lejátszódó folyamatok valós reprodukálásával a fizikai szimuláció a matematikai modellezés mellett a korszerű gyártástechnológia kifejlesztésének elkerülhetetlen részévé vált.

A dolgozatban az AlSi7 jelű alumínium ötvözet alakíthatóságát vizsgálom a hőmérséklet és az alakítás sebességének függvényében. A vizsgálatok eredményei az alapját képezik az adott ötvözet alakíthatósági keményedésének meghatározásának és az úgynevezett anyagkártyájának a létrehozásában, mely a numerikusmodellezést végző szoftverek számára nélkülözhetetlen. Segítségével tetszőleges alakítási technológia modellezhető, a gyártás során végbemenő folyamatok előre meghatározhatóvá válnak.

1. Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben a fejlődés robbanásszerű méreteket öltött az élet számos területén. Legyen szó a számítástechnika vívmányairól, az orvostudományokban elért hatalmas előrelépésekről, az energia igények miatti folyamatosan bővülő elektrotechnikai – elektronikai megoldásokról, lehetőségekről, vagy az autóiparban bekövetkező változásokról, a fejlődés mindenhol jelen van. A fejlődéssel együtt az igények minősége és mennyisége is fokozódik, és ezek az elvárások a különböző iparágak számos szekciójában jelen vannak, vagyis az alkalmazott anyagokat sem hagyják figyelmen kívül. Összetett igények kiszolgálása csak különleges, komplex adottságok, tulajdonságok révén érhető el. Ahogy ezeket kutatják elkerülhetetlen, hogy új körülmények új akadályokat támasszanak, amik leküzdéséhez szükségszerű a meglévő technológiák folyamatos módosítása és tovább gondolása, valamint minél korszerűbb és több lehetőséget biztosító berendezések alkalmazása a különféle probléma körök megoldására. Mindemellett, ami a kutató és fejlesztő tevékenység szerves részeit támogatja és lendíti előre, az a tudás birtoklója számára egyúttal hatalmas előnyt, versenyképességet jelent.

A fizikai szimuláció már a huszadik század felétől jelenlévő probléma megoldó módszer, eljárás a különböző anyagminőségek vizsgálatában, ami az évtizedek előrehaladtával egyre sokoldalúbbá nőtte ki magát és jelentős korábban feltárhatatlan problémák megoldásául szolgált. Az anyagok világát egészen új szemszögből világította meg. Napjainkra pedig nélkülözhetetlenné vált az összetettebb kutatások előrehaladásában, illetve a folyamatosan javuló és fejlődő modellezési szoftverek bővítéséhez, ezzel együtt pedig a mérnök tevékenység szerves részévé is vált. Kiegészítve a gazdaságossági döntések támogatását is.

Szakedolgozatom célja bemutatni a módszer elvét, lényegét, valamint fejlődésének állomásait. Rávilágítani azon jellemzőire, melyek egyedülállóvá és nélkülözhetetlenné teszik más szimulációstechnikák között. Mindemellett egyértelművé tenni a matematikai modellező szoftverekhez fűződő szoros kapcsolatát. Megismerni a Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetének birtokában lévő Gleeble 3500 – as berendezést, amely számos már megvalósított és megvalósításra váró kutatási projekt alapját képezi nemzeti és nemzetközi viszonylatokban is. A bemutatás egy

vizsgálatsorozaton keresztül történik majd, amelyeknek fő célja egy széles körben alkalmazott alumínium ötvözet alakíthatóságának megállapítása a különböző hőmérsékletek és az alakváltozási sebességek függvényében. A teljes folyamat végig tárgyalása révén megállapíthatóvá válhatnak az adott anyagminőségre vonatkozóan olyan alkalmazás során befolyásoló szereppel bíró tulajdonságok, melyek hagyományos módszerekkel nem meghatározhatóak és pontatlan következtetésekre vezetnének.

2. Matematikai (számítógépes) szimuláció

2.1. Anyagjellemzők szerepe és jelentősége

A mindennapi élet során felmerülő problémák megoldásához, feladatok elvégzéséhez sokszor elengedhetetlen valamilyen eszköz alkalmazása, amely esetében nem elhanyagolható szempont az őt alkotó anyag figyelembevétele sem. A szükséges tulajdonsággal kell rendelkeznie, ahhoz, hogy hasznosnak bizonyuljon. Ez a műszaki világban is kiemelten fontos a szerkezeti anyagok megválasztásakor. A leküzdendő nehézség szempontjából a lehető legjobb tulajdonságokkal, tulajdonság kombinációkkal rendelkező anyagok megállapítása, illetve az azokon belüli további szűkítés nélkülözhetetlen. Ugyanakkor ehhez elengedhetetlen tudás, hogy az általunk kívánt tulajdonságot mi idézi elő egy adott anyag esetében. A mérnöki anyagok világában a mechanikai tulajdonságoknak kiemelt szerepe van. Ezeket a makroszintű jellemzőket az anyag mikroszerkezete fogja determinálni. Viszont a szerkezet is további befolyásoló tényezők és hatások függvénye. Elsősorban az anyagot alkotó atomok és az ezáltal kialakuló atomi kötések szintjén alakulnak ki meghatározó tulajdonságok, például a rugalmassági modulust az atomi kötések típusa (erőssége) határozza meg. Ezeken túl az összetételnek legalább ugyanekkor szerepe van a kialakuló tulajdonságok vonatkozásában. Vagyis ennek a két komponensnek az együttes figyelembevétele (mikrostruktúra és összetétel) a leglényegesebb mozzanatok közé tartozik, hiszen ugyanolyan összetételű anyagok eltérő szerkezettel, éppúgy hatást gyakorolnak a tulajdonságokra, mint ugyanazon szövetszerkezet más összetétellel. Például nem megegyező hűlési körülmények teljesen különböző struktúrát hoznak létre. Például, ha az acélok családjában vizsgálódunk, az Fe – Fe₃C rendszerben 0,8 tömegszázaléknál a hűtés módja jelentős változásokat eredményez. Ebben az esetben, ha egyensúlyi hűtést alkalmazunk, a perlit elnevezésű lemezes szövetszerkezet jön létre, amelynek szilárdsági mérőszámai (például szakítószilárdság, keménység) nem kimagaslóak, viszont az alakváltozási és szívóssági jellemzői kedvezőek. Ugyanezt az atomi összetételt nem egyensúlyi, gyors hűtésnek kitéve egy szilárdságilag jobb, tűs martenzites szerkezetet kapunk. Ugyanakkor a szilárdság növekedésével az alakváltozásra való hajlam is csökkenni fog. Tehát a kialakuló szerkezetet nagy mértékben befolyásolja az előállítása is. Vagyis egy anyag tulajdonságainak meghatározásánál a kémiai összetétel, a gyártási előélet, ennek paraméterei, valamint az így kialakult szerkezet komplex kapcsolatrendszere vezet el a kívánt eredményhez [1].

2.2. A szimuláció

Mint minden más területen is a problémák megoldásánál kezdetben a már tapasztalati, valamint kísérleti úton megszerzett tudásukra támaszkodtak a szakemberek, viszont a feladatokat komplexitásának növekedésével ezek a módszerek egyre inkább háttérbe szorultak, mivel nem tudták figyelembe venni a bonyolultabb befolyásoló tényezőket és egyértelmű válasszal szolgálni a feladatokra. Már a XX. században a figyelem középpontjába került, hogy az egyes folyamatokat és az idejük alatt keletkező adatokat, információkat minél pontosabban megpróbálják leképezni, a minél pontosabb eredmények elérése érdekében. A folyamatok feltérképezése hatalmas kihívást jelentett a számos figyelembeveendő befolyásoló tényező miatt. Az informatika robbanásszerű fejlődése előtt az analitikus módszerek segítségével oldották meg a modellezést. A matematikai modellek leírását szolgáló differenciálegyenletek megoldása több nehézségbe is ütközött ezzel az eljárással. A megfejtés során kialakuló egyenletek bonyolultsága és túl kombináltsága nem tette lehetővé az exakt végeredményeket. A hőmérsékletfüggő fizikai paraméterek hőmérsékletfüggését (például hővezető képesség, fajhő) nem voltak képesek kezelni [2].

A lehetőségek tárházának kibővülését az számítástechnika hirtelen fejlődése hozta magával. A számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység (CAE: Computer Aided Engeneering) az 1960 – as évektől jelenik meg és napjainkig folytatja aktív fejlődését. Az 1970 – es években már a numerikus megoldási módszerek kora zajlik. Megjelennek a lineáris véges elem – módszerre adaptált tervező rendszerek a hibák analizálásának lehetőségével. Viszont bizonyos komponensek tovább bonyolították a feladatokat. Például az anyagi és alakváltozási viselkedés nem írható le lineáris szabályok mentén, így megjelentek azon rendszerek, melyek ezeket is kezelni tudták, viszont pontos megoldás itt sem jelent meg, csak még jobb közelítés. Ezeknél a szoftvereknél az eredményeket jelentősen befolyásolták azok a véges értékek, amelyeket helyettesítésre használtak, ezért a végső számítási eredmények ellenőrzése nem maradhatott el [2].

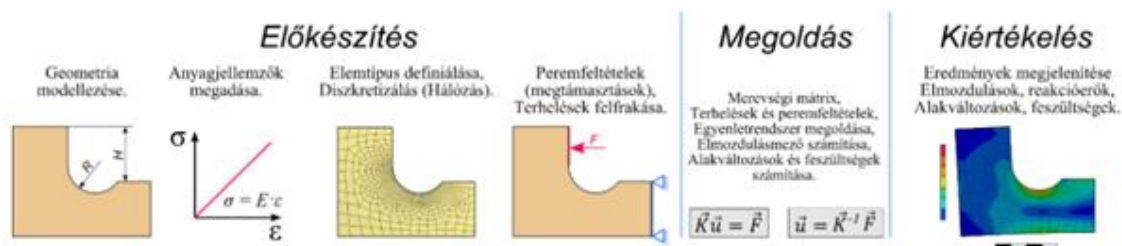
A szimuláció az anyagot alkotó lépcsők szerint osztható szintekre, ez alapján beszélhetünk [1]:

1. atomi szintű
2. nano szintű
3. mikro szintű
4. makro szintű szimulációról

Az atomi szintű adatok meghatározása összetett az alkotó ionok és elektronok mennyisége és elhelyezkedése miatt. Ebből a szintből származó alapadatok segítségével a fizikai modellre épített matematikai modell további szintjei, illetve a hozzájuk tartozó differenciálegyenletek szoftveres megoldásához ér a folyamat. Mikro szinten lehetőség nyílik a fázisok mennyiségének, minőségének meghatározására, valamint a kristálytani morfológia feltárására. A makro lépcsőben a különböző technológiai folyamatok hatásai válnak láthatóvá. [1]

2.3. Numerikus modellezés folyamata

A matematikai szimulációs rendszerek működésének alapjai a végeelem – módszerek elméletéből ered, így nem meglepő módon végeelem modellezésnek is nevezhetők. Egy feladat bonyolultságától és céljától függően különböző típusú és mennyiségű lépésből tevődik össze. Egy egyszerűbb modellezés esetén a szimuláció három, egymástól jól elkülöníthető egységből áll. A kezdeti szakasz az előfeldolgozás, azt követi a probléma megoldásának fázisa, majd végül a kiértékelés, elemzés zárja le a szimulációs folyamatot. Az első fázisában a szimulációnak definiálni kell a lényeges tényezőket, mint az anyagjellemzők, igénybevételek, valamint a szerkezet végeelemekre felbontását el kell végezni. Egy olyan geometria elkészítése a cél, amelyen a vizsgálandó jellemzők alapjául szolgáló hálózasi sűrűség megfelelően megvalósítható. Az egyértelmű geometria kialakítása nem könnyű, ezért számos alkalommal kell korrekciót végezni a kiinduló geometria rajzán (például részletelvételt, idealizálást, tisztítást). A javító módosítások révén egyszerűsödik a geometria, így a szükséges számítások ideje is redukálható. Ezt követi a végeelem felépítésének szakasza, ahol megtörténik a modell behálózása, azaz a diszkretizálás. A folyamat lépcsőit az 1. ábra demonstrálja [2]; [3].

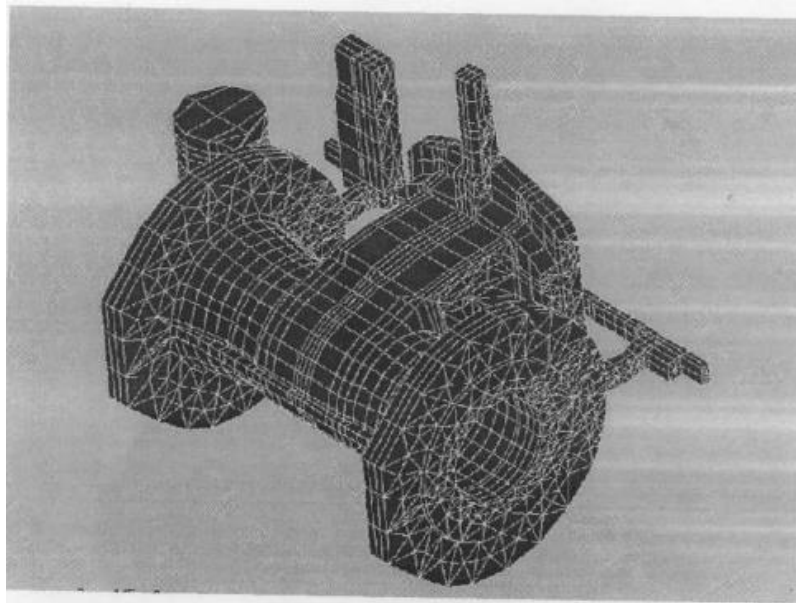


1. ábra. Végeselem analízis folyamat lépései statikai feladat keretein belül [3]

Amennyiben a hálózás megfelelő és nem szükséges több mértani korrigálás, kezdetét veheti a vizsgálat tárgyát képező jellemzők kiszámítása. A megoldáshoz különféle összefüggések, algoritmusok, egyenletek szükségesek, amiket automatikusan a szoftverbe beépítve találunk, vagy adatbázisokból hívhatjuk elő őket. Eljárásmódját tekintve a rendszer a végeselem hálózat minden megmaradt szabadságfokát egy – egy ismeretlenként azonosítja. Vagyis szilárd testek vektoriális hatásainak estében 3 ismeretlen figyelembevétele szükséges, ugyanakkor a skalármennyiségek elmozdulásai kivételt képeznek ezekben az esetekben (egy ismeretlennek tekintik őket a rendszer), mint a termikus gradiensek. Miután a számítások végbementek, az elemzés következő, ami számtalanszor bonyolult tevékenység, mivel rengeteg adat áll rendelkezésünkre, amelyeket többféle variációban tudunk megjeleníteni. A helyes eredmények feltárásához a megelőző fázisok lehetséges rendellenességeit, tévedéseit kell figyelembe venni. Ilyen hiba lehet numerikus jellegű, de a korrekciók során is előfordulhat, hogy nem megfelelő elemeket távolítunk el a szerkezetről, vagy a háló felvétel pontosságában van tévesztés. Működésük minél jobb megértése érdekében célszerű egy komplex eset megvizsgálása a mérnöki gyakorlatból. Egy öntvény szerkezet dermedésének szimulációja alapvetően 8 lépésből [1]:

1. CAD rendszerben az öntvény műszakirajzának elkészítése
2. Forma és beömlő megtervezés
3. Hálós generálása
4. Formatöltés szimulációja
5. Hőmérsékletmező szimulációja
6. Mikrostruktúra szimulációja
7. Feszültség szimulációja
8. Tulajdonság szimuláció

A szoftver a szimuláció során ebben a bonyolultabb esetben is differenciál módszert alkalmaz a feladat megoldásához, így állapítva meg az olvadékáramlást, a kialakuló feszültség állapotokat, és a hőmérséklet mezőket. A modellezési folyamat során a behálózási fázist szemlélteti az 2. ábra.



2. ábra. Öntvény szerkezet modellezésének diszkretizálási fázisa [1]

3. Fizikai szimuláció

3.1. Meghatározása, jelentősége

Az anyagfeldolgozó eljárások fizikai szimulációja egy laboratóriumi körülmények között végzett modellezést jelent, melynek során az anyagban a tényleges gyártás, feldolgozás és felhasználás folyamán lejátszódó termikus és mechanikus folyamatokat exakt módon reprodukálják. Az végső stádium, azaz az üzemeltetési körülmények biztosításával az adott anyag, ezáltal a belőle gyártott szerkezeti elem tényleges működés közbeni állapotának elemzése válik lehetővé, a környezeti és egyéni hatások teljeskörű figyelembevételével [4].

A folyamatok egy környezettől elkülönített, laboratóriumi, többféle mérőeszközzel felszerelt térrészben történnek, ahol a valóságot és annak attribútumait a lehető legpontosabban megközelítjük. A pontosság megléte teszi lehetővé, hogy az itt kapott eredmények valós problémák megoldásául szolgáljanak. A szimuláció jellegzetességeiből adódóan merőben eltér az általánosnak megnevezett vizsgálatoktól. Például nem egy bonyolult módszer, ha egy adott próbatestet kemencében egyenletes hőmérséklet eloszlásra felhevítünk, majd az adott hőmérsékleten nyomó feszültséggel terheljük. Ezt követően a bekövetkező alakváltozás mértékét vizsgáljuk. Amennyiben a folyamat megfelelően lett elvégezve az eredmények reprodukciónak minősülhetnek. Ugyanakkor, ha egy meghatározott eljárás révén létrejövő szövetstruktúra és az ehhez tartozó tulajdonságok elérése a cél, vagy a folyamat modellezése által a jobb megértés és feltérképezés, ezáltal pedig a fejlesztés (javítás) lehetőségeinek feltárása, a fizikai szimuláció elengedhetetlen. Ennek igazolásához tekintsünk egy esetet. Meg akarjuk határozni egy hengerlő berendezés beállítási paramétereit egy új ötvözet esetében, ehhez több információra van szükség. A hengerlő eljárás sajátossága, hogy az acél feldolgozása során az acéllap szélei a sarkai látványosan sötétebbek, akár csak a sarok találkozások, mint a lap közepe. Ezt ugyanaz a jelenség magyarázza, mint ami a hőkezelő eljárások során is gyakran problémát jelent a szakemberek számára, a munkadarab különböző zónái eltérő időpontban hűlnek le. Így a sötétebb szín jelzi azokat a területeket, amik erélyesebben hűltek le. Vagyis az acéllap teljes keresztmetszetében nem egyenletes hőmérséklet eloszlás figyelhető meg, hanem átmeneti zónák jelennek meg, úgynevezett termikus gradiensek a melegebb és hidegebb tartományok között. Ahol hűtési és hevítési tevékenység van jelen a folyamatban, ott a termikus gradiensek megjelenése nem

elkerülhető, ezáltal a fémgyártási –, és fémfeldolgozási iparban befolyásoló tényezőként jelen vannak. Korlátozzák az anyag alakváltozó képességét (a hidegebb részek szilárdsága már nagyobb, mint a még melegebbeké), ezáltal a munkadarab megmunkálhatóságát is befolyásolják. Következésképpen, ahhoz, hogy optimális paramétereket állíthassunk be berendezésen, a modellnek mindhárom zónáját fel kell térképeznünk. Ehhez három lépéses fizikai szimulációra van szükség, amellyel először az acéllap sarkának replikáját hozzuk létre, a benne lejátszódó részfolyamatokkal, tényezőkkel és termikus gradiensekkel együtt. Majd ugyanígy leképezzük a szél egy tartományának anyagminőségét a vonatkozó tulajdonságokkal, végül pedig a belső résszel is elvégezzük a szimulációt. Ezzel az eljárással a három eredmény összekapcsolható egy komplett modellé, amely magában hordozza az összes információt, amely a különböző esetekre vonatkozik, így prediktív módon alkalmazható a teljes gyártási –, valamint feldolgozási folyamat során [4].

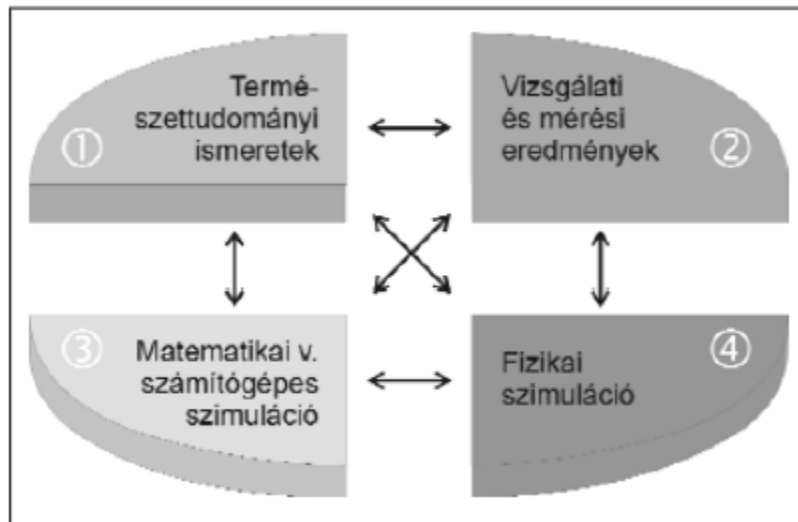
A fizikai szimuláció alkalmazása a megnövekedett vevői igények és a feladatok komplexitásának fokozódása mellett a gazdaságossági kérdések, illetve döntések nélkülözhetetlen kulcs eljárásává vált. A számos egyedülálló funkció, melyekkel rendelkezik, az elengedhetetlen befolyásoló komponensek, amiket kezelni képes lehetővé tették számára, hogy felhasználásának területei a legszélesebb skálán mozogjanak. Említésképpen a folyamatai valós idejűek és a tényleges körülményeket valósítják meg, és ennek a kritériumnak gyorsított vizsgálatok esetén is eleget tesznek a paraméterek módosításával, mivel a lejátszódó folyamat, azaz az anyag igénybevételre adott válasza ugyanaz, csak rövidebb idő alatt következik be (például egy időben hosszabb jelenség az anyag kúszása, ennek feltárására szolgál a gyorsított kúszás vizsgálat). A folyamat modellezésen és anyagmodellezésen túl, remekül teljesít az anyagtudományi vizsgálatok terén is. A teljesség igénye nélkül alkalmazási területeinek bemutatása [4]:

<i>Alkalmazások</i>	<i>Vizsgálatok</i>	<i>Anyagtudomány</i>
- extrudálás - hegesztés - folyamatos öntés - meleghengerlés - porkohászat - szinterelés - diffúziós kötés - hőkezelés - kovácsolás - folyamatos izzítás	- melegalakíthatóság - folyamatos hevítési átalakulás - folyamatos hűtési átalakulás - izotermás izzítás - termikus/mechanikus fáradás - termikus/mechanikus törés	- diffúzió - olvadás és szabályozott dermedés - újraakritályosítás - edzés - feszültségrelexáció

3.2. A fizikai szimuláció és a műszaki anyagtudomány komplex, átfogó kapcsolatrendszere

A fizikai szimuláció és a műszaki anyagtudomány kapcsolatának feltárásához minkét fél szerepét és lényegét ismernünk kell. Az előzőekben megállapítottuk a fizikai szimuláció mibenlétét és a problémák megoldásának szempontjából egyedülállóságát, viszont a kérdés megválaszolásához a kapcsolat másik részvevőjét is meg kell vizsgálnunk. A műszaki anyagtudomány definiálása sokrétűsége miatt nem egy egyszerű feladat, így az egész tevékenységét legelfogadhatóbban lefedő fogalom: „A műszaki anyagtudományt a tudatos anyagtervezés és előállítás tudományának tekintjük.” Mindez kiegészülve négy alkotó elemével, melyeknek kölcsönös kapcsolat rendszerét írja le az előzőekben említett meghatározás, amelyet az 3. ábra mutat be. Ez a négy forrás, amelyből a tudomány folyamatosan táplálkozik [5]:

- a természettudományok által feltárt törvényszerűségek, törvények
- a korszerű vizsgálatait és mérési módszerekből eredő eredmények
- a matematikai szimuláció révén nyert ismeretanyagok
- a fizikai szimuláció által megszerzett információk



3. ábra. Műszaki anyagtudomány tartalmi elemei és a rájuk vonatkozó kapcsolatrendszer [5]

A fizikai szimulációs műszaki anyagtudományban betöltött szerepéhez az üzemi és félüzemi kísérletek vonatkozásában kell vizsgálnunk, mivel a kutatás-fejlesztés folyamata egy befejezett technológia iparba történő kitelepítésével zárul. De miért lényeges ez? A műszaki világban, így az anyagminőségek és berendezések fejlesztését a piac tényleges igényei indukálják. Az igény lehet már meglévő, vagy újszerű, de a K+F mindig ezeknek a szükségleteknek a kielégítésére irányul. Ezekre a választ adhatják már létező anyagminőségek, műszaki berendezések a már hozzájuk rendelt használat, szabványokkal, valamint kritériumokkal. Ugyanakkor számtalan esetben a megoldás egy teljesen új tulajdonságokkal, tulajdonság kombinációkkal rendelkező anyag testesíti meg számunkra [5].

Innentől kezdve az első lépés abból indul ki, hogy a vevők meghatározott funkciókat várnak el a „terméktől”. Ezek a funkciók fogalmazzák meg a tulajdonságokat, amelyekkel rendelkeznie kell az anyagnak az igényeknek való megfelelés érdekében. Vagyis az anyag nem lesz más számunkra, mint egy tulajdonságegyüttes hordozója, ahol az első akadályt az jelenti, hogy minden tulajdonságegyütteshez megalkotható – e a saját

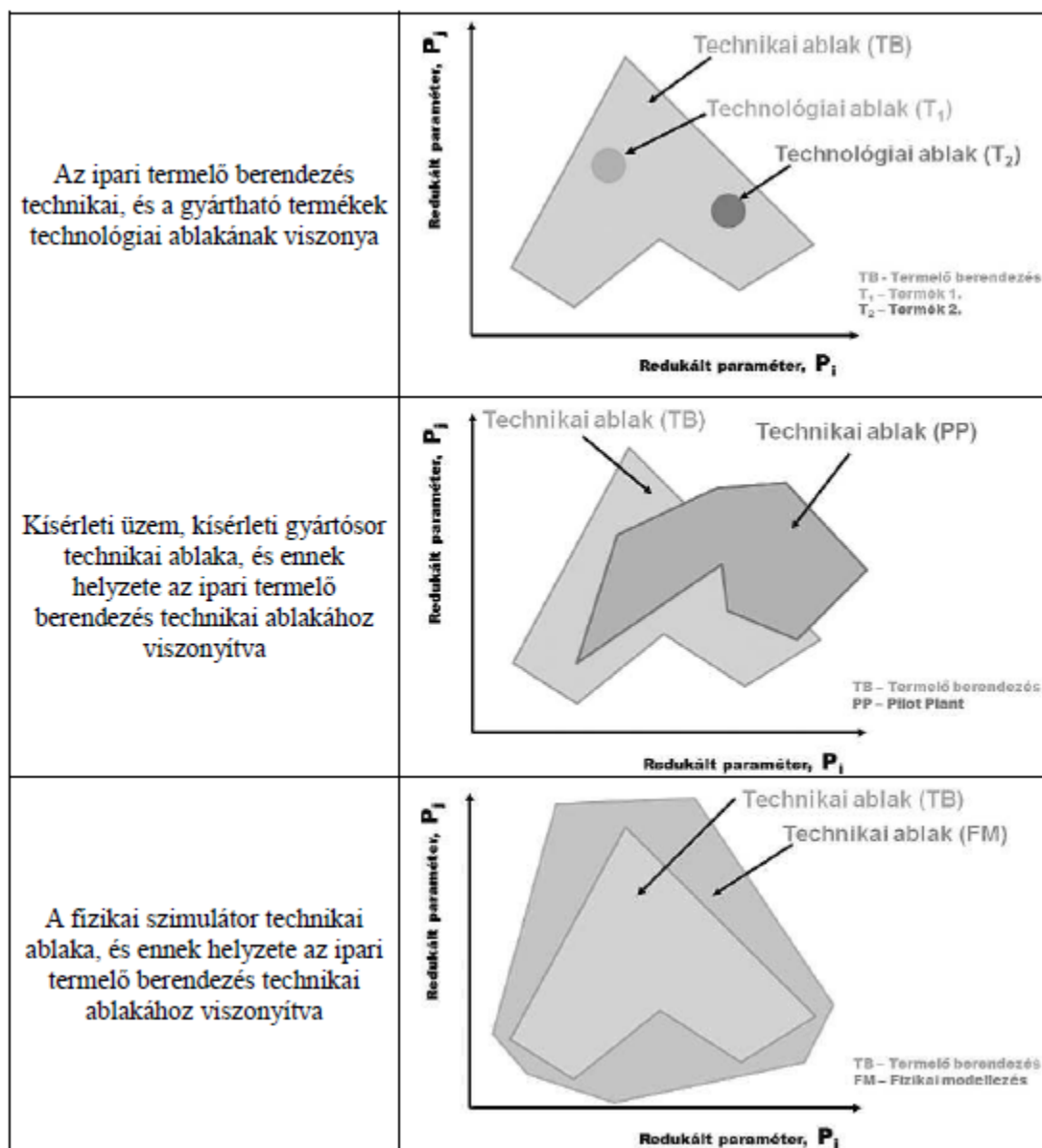
hordozója. Ahogyan a 3. ábra is szemlélteti ennél a fázisnál a kiindulási alapot a tulajdonság – összetétel – szerkezet közötti természettudományi ismeretekben kell keresni, amelynek teljességéhez elengedhetetlen a korszerű mérés –, és vizsgálatechnika. Minél átfogóbbak tudással rendelkezünk az anyagszerkezet – tulajdonság vonatkozásában, annál közelebb érünk a molekuladinamika alkalmazásához, amelynek segítségével a kívánt tulajdonságokkal bíró molekulák tervezése valósulhat meg [5].

Az előzőekben említett tulajdonság – összetétel – szerkezet háromtagú rendszer kölcsönhatásainak felderítéséhez és megértéshez szükségesül alkalmazni a korszerű vizsgáló –, és méréstechnikákat, Ugyanakkor, hogy ezek segítségével a megfelelő eredményekre juthassunk, tisztázandó tény, hogy a mérés nem azonosítható a vizsgálattal. A vizsgálat tágabb fogalmat határol le. Több mérést foglal magába, amiknek célja, hogy a meghatározott objektumot minél mélyebben megismerjük, a jelenség okait feltárjuk és megértsük. A mérés esetében két irányban kell gondolkodni. Az első, amikor a vizsgálendő objektum állapota a mérési tevékenység végén, azaz az anyagszerkezete és az ebből adódó tulajdonságai nem változnak meg. Egy próbatest szövetelem vizsgálatának elvégzésekor a megelőző laboratóriumi előkészítésnél ez kiemelt figyelmet igényel. Ettől merőben eltér a mérések másik csoportja, mivel ezeknél a technikáknál a mérendő mintát külső hatásoknak (kémiai, mechanikai, termikus stb.) tesszük ki. Ezekre az anyag válasz reakciót ad, amelynek jellege, vagy mértéke mérhető és ebből származó eredmények jelentenek számunkra információt. Lényeges és figyelembeveendő szempont, hogy ezeknél a mérendő mennyiség jellemzői határozzák meg a külső hatások jellemzőit, mint például szakítóvizsgálat, vagy egy differenciál termikus analízis folyamatában [5].

Egy adott technológia folyamat reprodukálási módjainak megértéséhez két fogalom használata és megértése nélkülözhetetlen. Ahhoz, hogy a meghatározott tulajdonságokat létrehozassuk az adott technológiával, az általa megszabott paraméterek kijelölnek számunkra egy úgynevezett technológiai ablakot, ami a megfelelő anyagminőség határait is jelenti. Viszont egy technológia megvalósítása csak a termelő berendezéssel együtt történhet. A gépezet adottságai szintén korlátot jelentenek, ezek szabják meg a technikai ablak kereteit. A két fogalom egymással kölcsönös viszonyban áll, metszetük nélkül nem teljesülhet egy gyártás. A modellezés annál hatékonyabb eszköz, minél jobban lefedi a gép által behatárolt területet. A lehetőségek és megoldások színes skáláját hordozza

magában, amennyiben képes meghaladni ezt a területet, ugyanakkor, amennyiben az alkalmazandó berendezés teljesítőképességén kívül esik a technológiai ablak, akkor a berendezés nem lesz alkalmas az adott feladat elvégzésére [5].

Egy folyamat leképezése többféle változatban valósulhat meg, amelyeknek pontossága a végeredményre vonatkozóan eltérő. Egyik megoldás a termelőberendezés kicsinyített és megfelelően módosított klónja, amelynél megpróbálunk rendkívül hasonló technikai feltételeket teremteni, amiből a hatások és anyagviselkedés közel megegyezősége következik. Technikai ablakuk hasonló, de látványosan el is térhet a berendezés saját ablakától. Ezeket nevezzük pilot planteknek (az 4. ábra hivatott bemutatni), melyek hatékonyak, viszont nagy tökebefektetést igényelnek, ezért gyakran csak ténylegesen újszerű vívmányok, elképzelések esetében alkalmazzák őket, ahol a megtérülési ráta kedvezőbben alakul [5].



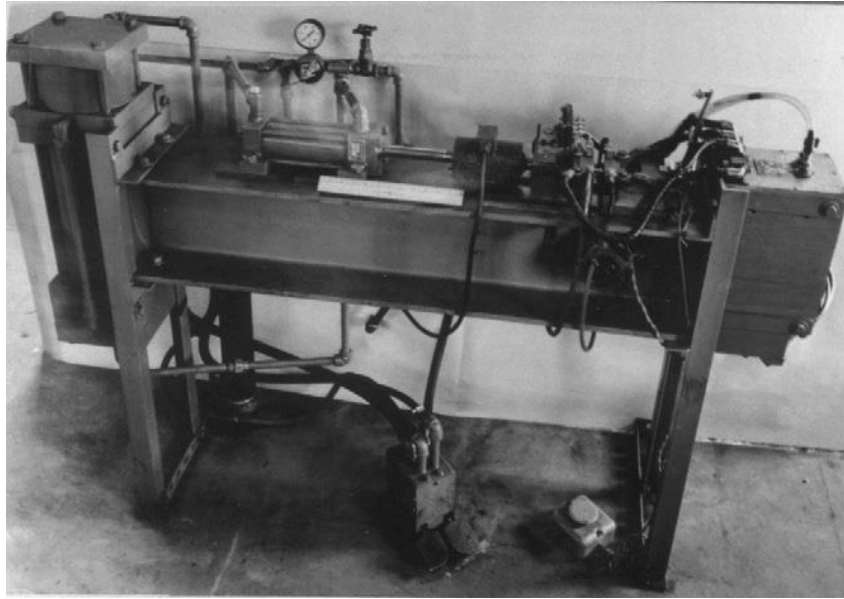
4. ábra. Technikai ablakok egymáshoz való viszonyai – technológiai és technikai ablak elhelyezkedés; pilot plantek és berendezés viszonya; fizikai szimuláció technikai ablakának határai [6]

A fizikai szimuláció eltérő az előbbieken ismertetett reprodukciós eljárástól, mivel nem a gyártókészülék kicsinyített mását alkotják meg, hanem egy attól teljesen eltérő berendezést, amely termelési célokra teljesen alkalmatlan. A mérnöki berendezés alapja, hogy az ipari gépezetben lezajló folyamatokat és a munkadarabra (anyagminőségre) gyakorolt termikus, mechanikus igénybevételeit ismerjük, és a szimuláció során ezek a műveletek tényleges végbemennek, ugyanazokkal a kölcsönhatásokkal. A szimulátor technikai ablak nem csak fedi, de meg is haladja a berendezés által meghatározott kereteket, amelyeknek viszonyát a pilot planthez hasonlóan az 4. ábra prezentálja. Ez

teszi lehetővé a fizikai szimuláció számára, hogy az új anyagok, tulajdonságok és tulajdonság kombinációk létrehozásának, feltárásának, valamint megértésének akadályait leküzdje bármilyen technológia esetében [5].

3.3. Fizikai szimuláció kezdete és fejlődése

A fizikai szimuláció több évtizedes fejlődésen ment keresztül, amely fokozatos előre lépések egészen napjainkig tartanak. Az 1900 – as évek felétől fellelhetők az írásos dokumentációk, amelyek először utalnak és foglalkoznak az előzőekben is tárgyalt fémipari gyártások és feldolgozások fejlesztéséhez nélkülözhetetlen szimulációról. A kutatók ezekben az években a saját maguk által tervezett és elkészített mérnöki konstrukciókat alkalmazták a vizsgálatok, mérések lebonyolításához. A problémák köre, melyekre ezek révén keresték a megoldást a hegesztési eljárásokban jelentkeztek, azon belül is a hegesztett szerkezetek hővel érintett területeivel összefüggésben. A varratok környezetében erős hőmérsékleti hatások jelennek meg, melyek megváltoztatják az alapanyag mikrostruktúráját, ezáltal az elvárt tulajdonságok is módosulnak. Ezek a nehézségek világszerte foglalkoztatták a szakembereket, így számos kezdeti gépezet látott napvilágot a Föld legkülönbözőbb országaiban (egy ilyen kezdeti berendezést prezentál az 5. ábra), mint Nagy-Britanniában a Hegesztési Intézetében, az akkori Szovjetunió tag, Ukrajnában, az E. O. Paton Hegesztési Intézetben, Kínában a Központi Vas és Acél Intézetében, valamint az Amerikai Egyesült Államok sem maradt el a Rensselaer Politechnikai Intézetben folytatott kutatások során, ahol az 50 – es évek végére kifejlesztették az első berendezést, mely a ma is használatos fizikai szimulációs rendszerek alapja lett [6].



5. ábra. 1950 – es évek kezdetleges hőhatásövezet vizsgáló berendezése az USA – ban
[7]

Az előzőekben már említésre került, hogy a fizikai szimulációs rendszerek szükségszerűségét a hegesztés fejlődése és hibáinak kiküszöbölése hozta magával. Igény fogalmazódott meg egy gépezetre, amely a hőhatásövezetben lejátszódó folyamatokat képes leképezni és mérni metallurgiai módosulásokat, ezzel még mélyebb ismeretek feltárását biztosítani az anyag válaszreakcióiról. Az első fizikai szimulátor, ami rendelkezett ezekkel a kívánt funkciókkal a már konkretizált feladatok megoldásához és kereskedelemben is forgalmazható volt a Gleeble szimulátorok családjának első képviselője, a Gleeble 501 – es rendszer volt. Ez a készülék képes volt megvalósítani a hegesztései eljárások lényeges jellemzőit, mint például a hatalmas hevítési hőmérsékletet és sebességét, illetve ugyanezt a döntő folyamatot a lehűlés során is. Több ezer fokok hevítést vitt végbe másodpercek alatt a próbatesteken a hőmérséklet precíz szabályozása mellett. A modellezés során először a varrat elkészítése utáni olvadék zónák megszilárdulását kellett megvalósítani, majd a keletkezett hővel terhelt zóna már birtokolta jellemzőket, amiknek feltárását célozták kutatások. A pneumatikus gépezetet biztosította az állandó sebességgel történő húzás lehetőségét, így bármely anyag bármely hőmérsékleten történő húzóvizsgálata ált rendelkezésre a feszültség viszonyok feltérképezésében [6].

Már említésre került, hogy a hegesztési problémák megoldása iránti törekvés volt a fő hajtóereje ezen technológia megszületésének és folyamatos fejlődésének, de az nem miért rendelkezett ez a fejlesztő tevékenység hatalmas horderővel. A második világháború a műszaki világ fejlesztésének nagy befolyással bíró ösztönzője volt. A hajógyártás hatalmas méreteket öltött, ahol már az idő, mint döntő tényező jelent meg. Ennek a tényezőnek a redukálására jelentette a módszert az ívhegesztés térnyerése a szegecselt acéllemezek alkalmazásához képest. Ugyanakkor az fontos tisztában lenni, hogy a hegesztés mindig hibát generál az anyag szerkezetében, akár csak a már tárgyalt hengerelt acéllap esetében, itt is hőmérsékleti gradiensek jelennek meg a nagy mértékű termikus feszültségek miatt, amik eltorzítják az elvárt tulajdonság biztosításához szükséges rácsszerkezetet. Ez több katasztrofális tönkremenetelhez is vezetett, példaként a Liberty hajók kréta módjára való kettétörése. Ezek mind a varratok gyenge minőségére és nem megfelelőségére voltak visszavezethető, így még nagyobb szerepet kapott a hőhatásövezet megismerése alakváltozási és törésmechanikai szempontból is. A Gleeble 501 – es készüléknek már minden a birtokában volt ezek megállapításához. 1960 – as évektől a berendezés fejlesztése a mindennapi tevékenység részét jelentette, a termo – mechanikus rendszer vezérlésének helyét egy elektro – mechanikus generátor vette át. A Gleeble berendezések csapata folyamatosan új tagokkal bővült, melyek egyre bővülő funkciókkal bírtak, egy ilyen készüléket szemléltet az 6. ábra is. [8]



6. ábra. Gleeble 512 – es szimulációs berendezés, a Gleeble 2000 megjelenéséig fizikailag a legnagyobb konstrukció [8]

Ezekben az években nem csak az USA – ban zajlottak fejlesztések, a keleti szigetország területén is hatalmas áttörésekre került sor, mivel a kezdeti készüléken dr. Hirowo G.

Suzuki és a Nippon Steel Corporation sikeresen megvalósította a folyamatos öntés és megszilárdulás szimulációjának eljárását. Ezt követően a Dynamic Systems Inc. (DSI) nyilvánosság elé tárta a második generációs Gleeble 1500 – as fizikai szimulátort, amelynek megtervezésénél ténylegesen létrehozták a zárt hurkú szervo – hidraulikus rendszert, amelynek vezérlése számítógéppel volt működtethető. Biztosították az ellenállás hevítés megvalósulását, aminek következményeképpen a fizikai szimulációk száma és típusa nagy mértékben gyarapodott. Ez a berendezés látható az 7. ábrán. [8]



7. ábra. Gleeble 1500, a második generáció [8]

A számítástechnika és szimulációk (bele értve a fizikai és matematikai szimulációt) fejlődése egymástól elhatárolhatatlan volt. Minél nagyobb teljesítményű és több lehetőséget magukban hordozó számítógépek jelentek meg a Gleeble szimulátorok által nyújtott probléma megoldások száma is fokozatosan gyarapodott. A már korábban is említett termikus gradiensek miatt ébredő belső feszültségek leküzdése már nem volt akadály ezeknek a gépezeteknek. A gradiensek következtében kialakult rácshibák diszlokációinak leépítése képlékeny alakváltozás révén érhető el. Az folyamatosan fejlődő Gleeble konstrukciók képesek voltak a meghatározott hőmérsékleten pontosan előírt, állandó alakváltozási sebességet megvalósítani a művelet elvégzése közben. A különféle technikák és technológiák fejlesztése vezetett el a napjainkban legkorszerűbb és legfelszereltebb szimulátorok megépítéséig, mint a Gleeble 3500, illetve a Gleeble 3800, amelybe már vezérlőkonzoltól kezdve tesztkamerás rádióegységig minden megtalálható a kutatás széleskörű támogatása érdekében. A 8. ábra szemlélteti a berendezést [8].



8. ábra. A legfejlettebb kivitel, a Gleeble 3800 [8]

3.4. Alkalmazásának területei esettanulmányok bemutatásán keresztül

Ahhoz, hogy megértsük a fizikai szimuláció valódi hasznosságát a műszaki világ által tapasztalt problémák körének megoldásában célszerű tényleges gyakorlati példákat alapul venni, amelyek valós körülmények közötti alkalmazását mutatják be a technológiának.

3.4.1. Hegesztési melegrepedés – érzékenység megítélése fizikai szimuláció segítségével [9]

A hegesztési technológiák, eljárások fejlődése hatalmas áttöréseket jelentett a mérnökvilág számára, ugyanakkor rengeteg nehézséget és akadályt hordoztak magukban a folyamatok komplex jellegéből adódóan. A hegeszthetőség meghatározása egy összetett tevékenység, mivel anyagonként és technológiánként eltérő vizsgálati –, és mérési módszerek születtek ennek megállapítására, amelyek összehasonlíthatósága korlátozott és adott feltételek között érvényesek, a különböző számításba vett befolyásoló komponensek miatt. Vagyis ezt a többrétű fogalmat nem lehetséges egy meghatározott mérőszámmal, vagy konkrét vizsgálattal meghatározni. A vizsgálatok ellentmondásai pedig további kérdéseket vetnek föl. Egy eredmény mennyire bizonyulhat megbízhatónak, abban az esetben, ha a mérethatas következtében egy valóságos folyamat csak egy „apró” próbatesten zajlik le? Illetve a próbák során valójában mennyire sikerül az anyag belsejében ugyanazokat a válasz reakciókat létrehozni, mint a valós üzemi körülmények között? Ezeket az ellentéteket oldhatják fel a különféle szimulációk az általános értelemben vett vizsgálatoktól merőben precízebb eredményekre vezetve. A termo – mechanikus szimuláció tárgyát mindig a valós folyamatban is szereplő

anyagminőség jelenti, ami a modellezés ideje alatt a tényleges igénybevételeket szenvedő el azok időbeni lefolyásának megegyezőse mellett.

A melegrepedés a hegesztési folyamatban számtalanszor előforduló jelenség, ami a varratfémekben keletkezik. Két acélszerkezet összehegesztése alatt nagyon magas hőmérsékletnek van kitéve az anyag. A varrat és alapanyag találkozásának gyenge határvonalán jön létre az úgynevezett kristályosodási repedés, mely az olvadék megszilárdulása ideje alatt megy végbe. A varratfém nagy termikus ingadozásnak van kitéve, amely húzó igénybevételként jelentkezik, ami alakváltozásra kényszeríti a fémeket. A repedés akkor jön létre, ha a képlékeny alakváltozás mértéke meghaladja az anyag teljesítőképességét. Ennek a jelzőnek a megállapításához több mennyiségi jelző összekapcsolása szükséges, anyagminőségként eltérően. A kérdés az, hogy a fizikai szimuláció mennyire képes ezt a problémát kezelni eltérő anyagok esetén és biztonságosan megállapítani azok melegrepedésre való hajlamát.

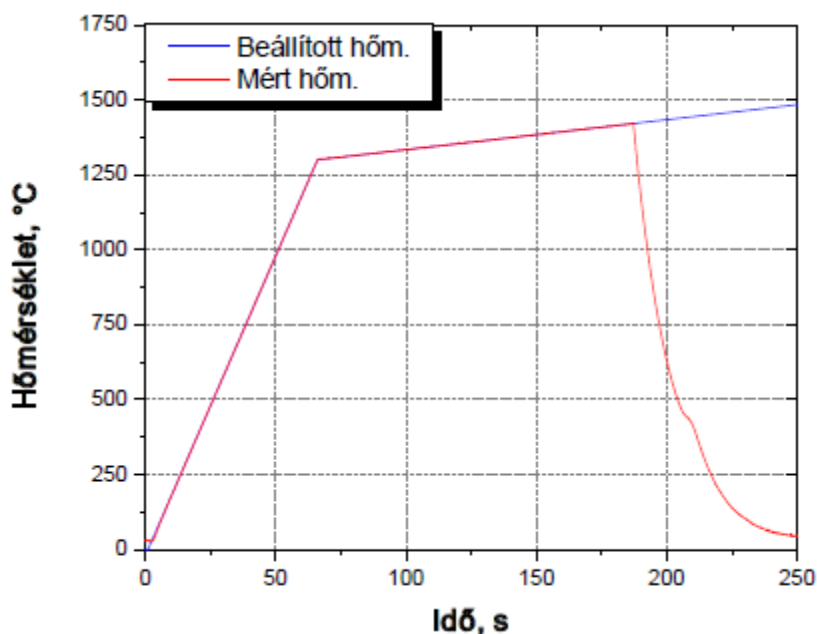
Ahhoz, hogy az anyagok ezen jellemzőjét meghatározhassuk két jellemző számszerűsítése szükséges. A zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklet (NST) ismerete elengedhetetlen, mivel ez határozza meg azt a határértéket, melynél a legkisebb igénybevétel is károsodáshoz vezet. Az eljárás során négy különböző anyagminőség kerül a vizsgálat középpontjába:

- *Nagyszilárdságú acélok: S690QL, S960QL*
- *Alumínium ötvözetek: AlMg3, 6082 – T6*

Az NST megállapítása berendezést próbáló feladat, amelyre sok anyagvizsgáló készülék nem is bizonyul megfelelőnek. Az anyagjellemző reprodukciójához a gépezetnek nagy precíz hőmérséklet szabályozással kell rendelkeznie, mivel az anyag olvadás pontjához a lehető legközelebbi hőmérsékletre kell felhevíteni a mintadarabot egy környezettől elzárt vákuumos térben. Emellett egy minimális, állandó mértékű előfeszítésnek kell kitenni a próbatestet, ami az emelkedő hőmérséklet és a hőtágulás kölcsönhatásának következtében nehézséget kivitelezni. Ugyanakkor a fizikai szimulátor a kritériumokat pontosan képes teljesíteni. A próbatestek jellemzői minden anyag tekintetében megegyeztek:

- próbatest átmérője 6 mm
- próbatest hossza 80 mm
- vizsgálati hossza 25 mm

Az NST megállapítása során lényeges, hogy a rendszer által vezérelt hőmérséklet és a mintadarab tényleges hőmérsékletének eltérése egy – két foknál nem lehet nagyobb. Az S690QL jelű acél esetét ábrázolja, az 9. ábra, amelyről jól látható, hogy meghatározott és valós hőmérséklet különbsége a nullához közelít.



9. ábra. Vezérelt és szabályozott hőmérséklet azonos időbeni összehasonlítása

Ezt követően végezhetőek el a melegsakító vizsgálatok (HTT). Fontos, hogy ezen vizsgálatok hőmérséklete az NST függvénye, ezért lényeges a meghatározási sorrend. A hőmérséklet maximális értéke ezekben az esetekben a zérus szilárdsághoz tartozó hőmérséklettől 20...30 °C-kal alacsonyabbnak kell lennie. Ebben az esetben a meghatározandó jellemzők közé tartozott a hevítés és hűtési ciklus alatti kontrakció, a szilárdság, illetve fajlagos keresztmetszet csökkenés is. Ezek csak az S960QL acéltípusra terjedtek ki, így a berendezésen alkalmazandó paraméterek az anyagminőséghez voltak rendelve. A vizsgálatok befejeztével az adott acél minőségű mintadarab a melegrepedés

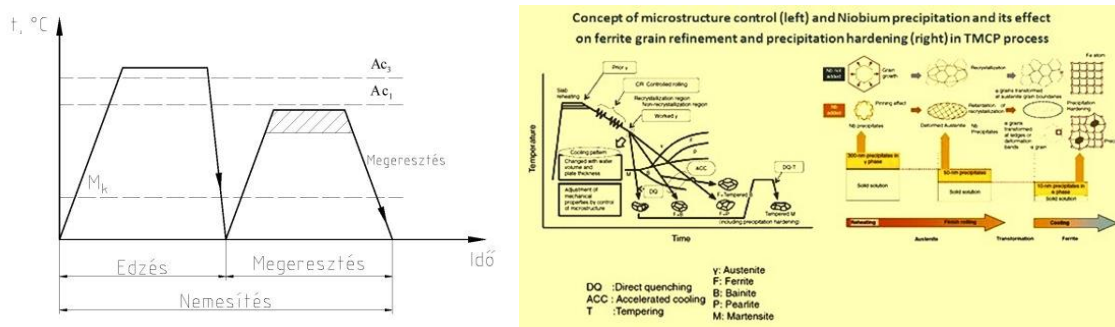
– érzékenységre negatív eredményt hozott. A próbatest jellemzői itt is minden esetben megegyeztek:

- próbatestek átmérője 10 mm
- próbatestek hossza 116,5 mm
- vizsgálati hossza 80 mm
- menetes vég

A kutatási folyamat révén megállapítást nyert, hogy egy fizikai szimulációs rendszer az NST értékét hitelesen képes megállapítani. Továbbá a melegrepedési – érzékenység megállapításának is megfelelő eszköze, így precíz előrejelző modellként képesek funkcionálni a hegesztési problémák feltárásánál és meghatározásánál, ezáltal pedig támogatja és biztosítja a hegesztési eljárások minőségét.

3.4.2. Gyártási szimuláció, láng újrahevítés [10]

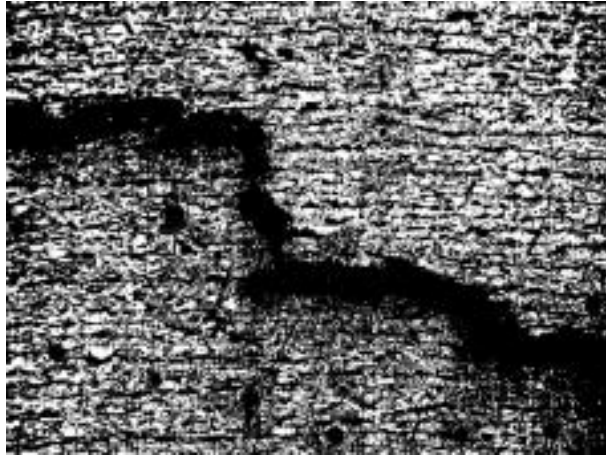
Amennyiben különböző acéltípusok viselkedésének összehasonlítása képezi a vizsgálat tárgyát, a láng újrahevítéses szimuláció módszerével a kívánt célhoz érünk. Az adott esetben a technológia indokoltságát a maximális 1150 °F (~ 620 °C) üzemi hőmérséklet túllépése jelentette. Az érintett két acél nagyteljesítményű acél volt, melyet hídszerkezetekben alkalmaztak. Típusukat tekintve HPS 70 W acélok, melyek anyagainak összetétele rendkívül hasonló, ugyanakkor az előállítás során más eljárások felhasználásával készültek. Az egyik acél nemesítéssel, a másik pedig TMCP technológiával készült. A TMCP (thermo – mechanically controlled processing), azaz a termo – mechanikusan vezérelt feldolgozási eljárás végeztével egy acélszerkezet szövetszerkezetének végső mechanikai tulajdonságai közel megegyezők lesznek egy hagyományosan hengerelt vagy kovácsolt acél hőkezelése utáni mechanikai jellemzőkkel. Egymástól jól elkülöníthető műveletek végeredménye ez a módszer, mivel az első fázisban az acéllemezt a melegmegmunkálások hőmérsékletére (körülbelül 1200 °C) hevítik, ahol a nagyoló technológiák dolgoznak rajta, majd még mindig a normál hőmérséklettől magasabb, de az előbb említetthez képest alacsonyabban egy mechanikus hengerlő berendezés segítségével képlékeny alakváltozásnak tesszük ki a munkadarabot. Ezt követi a gyors lehűtés idő tartománya. Két eltérő eljárás, mégis két nagyon hasonló tulajdonságokkal rendelkező szerkezet a végeredmény. A két eljárás elvi megvalósítását mutatja be a 10. ábra.



10. ábra. A két előállítási eljárás – bal: nemesítés; jobb: TMCP módszer [11]; [12]

Ívelt híd tartók esetében ahhoz, hogy a meghatározott sugarú görbületet elérhessük, többszöri, különböző hőmérsékletekre történő újrahevítés szükséges. A tárgyalt szimuláció típus elvégzésekor Charpy – féle próbatesteket alkalmaztak. A TMCP – vel készült acél esetében egy szokatlan, arányban ritka összetételű töretfelület jelent meg, a képlékeny törési és a ridegtörési zónák keveredésével. Ezt a bizarr végeredményt szemlélteti az 11. ábra. A vizsgálat során egyértelműen látszott, hogy mindkét acélminőség esetében a kezdeti szívóssági értékek nagyobbak voltak, mint az újrahevítés utániak. Sikeresen megállapították az alapanyagok átmeneti hőmérsékletéhez tartozó ütőmunkáját $-20\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-28\text{ }^{\circ}\text{C}$) hőmérsékleten, ami a nemesített acélnál $93,5\text{ J}$, a másik eljáráshoz tartozó esetben 67 J értéket vett fel. Az étekek stabilan maradtak az újra melegítések során, egészen addig, amíg a maximális hőmérséklet nem lépte túl az $1300\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($\sim 704,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) – et. Ezen mérőszámok meghatározásához kizárólag láng újraheített mintadarabokat vizsgáltak. Minkét HPS 70 W acéltípusnál $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ – os hőmérséklettartományban 190 J és 216 J között maradt az ütőmunka értéke, viszont ezek kétszeresen haladták meg a Gleeble szimulációval megállapított jellemzőket. Erre a meglepő ellentmondásra két valószínű válasz van:

- A fizikai szimuláció során az érintett terület, amelyre a vizsgálat koncentrált az mintadarabok felszíne volt, így a kéregtől a mag felé haladva a csúcshőmérséklet érték folyamatosan csökkent.
- A Gleeble hőciklusok túlságosan szélsőségesek voltak, így az előre jelzett viselkedés a valós állapotnál rosszabb kimenetelűnek bizonyult.



11. ábra. TMCP eljárás esetén, az acél rideg – képlékeny töretfelületének képe

A kutatás eredményét nem kudarcként könyvelték el, viszont a tisztázások szükségességét senki nem vitatta. Ugyanakkor 2003 és 2006 között csak az USA – ban 200 darab ehhez hasonló híd építésének estét vizsgálták meg, ahol a szóban is forgó nagyteljesítményű acélokat alkalmaztak, és tényleges tönkremenetelre egyik esetben sem került sor.

3.5. Tapasztalatok a Gleeble rendszerek előnyeiről és hátrányairól

A fizikai szimulációs rendszereknek, hasonlóan minden elvhez, eljáráshoz, módszerhez eszközhöz és gépezethez, amelyet a társadalom napjainkig használ két oldallal rendelkezik. A probléma megoldásokban való alkalmazhatóságuk és az így létrejövő hasznos eredményeik miatt létezhetnek, ugyanakkor megvannak a maguk korlátai is, amelyekre az előzőekben bemutatott esettanulmányok rávilágítottak, amelyek így már könnyen összegezhetőek. [10]

Előny:

- A vizsgált technológiai folyamatot precízen és pontosan reprodukálja.
- A vizsgálat tárgyár képező anyagból elegendő egy kis próbatest, így redukálja az anyagköltségeket.
- A fizikai szimulációval megvalósított anyagstruktúra homogén, további vizsgálatokban és mérésekben hitelesen alkalmazható.
- A megvalósítható termikus és mechanikus igénybevételek nagysága széles skálán mozog.

- Képes a mechanikus és termikus feszültségek, hatások külön kezelésére a folyamat során.
- Egy termék életciklusának minden állomásán megjelenő problémák okainak vizsgálatához rugalmasan alkalmazható.

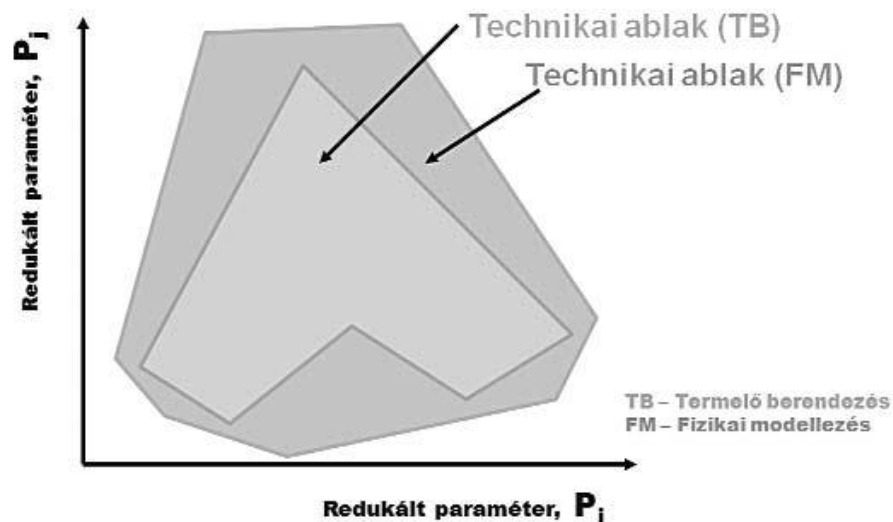
Hátrány:

- A berendezés a próbatest melegítését az ellenálláshevítés módszervével éri el, következésképpen a vizsgált anyagnak elektromos vezetőnek kell lennie.
- A leképezni kívánt folyamat releváns paramétereinek precíz ismeretére van szükség.
- A gyors hűtési sebesség reprodukálásához elengedhetetlen vízsugár vagy hélium alkalmazása.
- A gépezet beszerzése, üzemeltetése és karbantartása, valamint az oktatott személyzet biztosítása nagy mennyiségű tőkét igényel.
- Teljes kihasználásának sikerességéhez félempirikus, empirikus összefüggések ismerete és számítógépes szimuláció alkalmazása szükséges.
- Bizonyos esetekben a modellezés eredményeit a valós méretekbe történő átültetésre alkalmazni nem lehet (ahogy a második esettanulmány példája is igazolta).

4. Numerikus és fizikai modellezés összefüggése

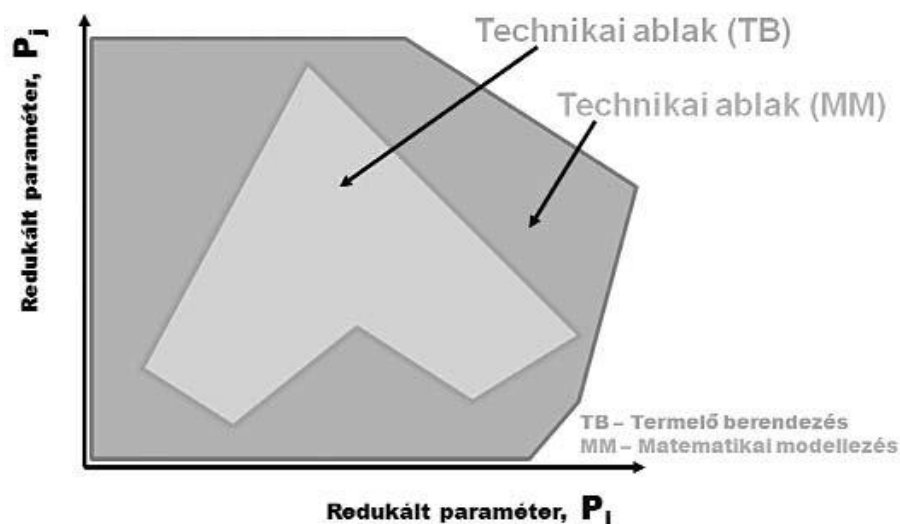
4.1. Technikai ablakaik és jellemzőik

A dolgozat korábbi egységeiben már említésre került a technikai és technológiai ablak ipari folyamatok leképezésében betöltött szerepe. A kutatási és fejlesztési tevékenységek során ezek a kétdimenzióra egyszerűsített ábrák hivatottak szemléltetni egy termék gyártásának megvalósíthatóságát a termelőberendezés konstrukciós és technikai korlátainak számításba vételével. A gyártás során végbemenő folyamatok laboratóriumi körülmények közötti megvalósítására nem egy módszer létezik, melyeknek alkalmazása más lehetőségeket és megoldásokat biztosít a kutatók számára. A már említett pilot plantek (a berendezés „kicsinyített” másolatai) technikai ablakai az eredeti gyártókészülékek technikai ablakaival átfedett területeket képeznek, amely metszeteken belül állapíthatóak meg az adott technológiával megoldandó feladatok problémáinak válaszai. A fizikai és matematikai szimulációs rendszerek által nyújtott lehetőségek területeinek viszonya a termelőszerkezet területeivel merőben eltérőek az előbbi esettől. A termo – mechanikus rendszerek feladata a tényleges gyártási tevékenység megvalósítása, az ott megjelenő összes hatás valós időben történő kialakulását is beleértve. Vagyis ennek a modellező berendezésnek sikeres alkalmazhatóságához a termelőberendezés által nyújtott lehetőségek kétdimenziós területének egészét le kell fednie, valamint szélesebb határok között kell mozognia, ahogy ezt az 12. ábra ábrázolja. Azt a tényt is figyelembe véve, hogy ez az állapot nem egy meghatározott termelőgépezet esetében áll fent, hanem számos feldolgozó és gyártótechnológiában ugyanilyen hatással érvényesül. Mindez igazodva ahhoz, hogy a szimuláció során vizsgált mintadarabok további vizsgálatokban, mérésekben teljesen alkalmazhatóak, a hatékonyság a hagyományos modellező eljárásokhoz képest többszörös értékek produkálását eredményezi a kutatásokban. [13]



12. ábra. Fizikai szimuláció technikai ablaka a berendezés technikai ablakához viszonyítva [13]

A matematikai szimuláció és a valós üzemi termelés viszonyainak feltárásához lényeges tény, hogy ez a tevékenység nem a reális térben foglalja el a helyét. Végősoron ebben az esetben az folyamat érvényesül, hogy az anyagokban végbemenő valós viselkedést leíró szoftvereket veszünk igénybe. Ebből az okból kifolyólag a folyamatok nem valós időben játszódnak le, sokkal gyorsabbak. Ezt végbe menési sebességet befolyásoló tényezők között a gépteljesítménye kiemelt szerepet játszik a programozás minőségével párhuzamosan. Ugyanakkor ezekből következik egyik legnagyobb kedvező jellemzője bármely szimulációs technikával szemben, a modellezés során nem áll fent sem vagy, sem személyi károsodás kockázata (nem veszélyezteti az alkalmazó személyzetet, a termelőberendezést, vagy magát a szimulátort sem). Technikai ablakának tekintetében ez a megoldás tekinthető a legsokoldalúbbnak, mivel képes a lehető legszélesebb határok között mozogni. Ennek oka a korlátok megszabásában keresendő. A számítógépes modellezés technológiai ablakának behatárolása kizárólag az meghatározott természettudományi törvényektől és törvényszerűségektől függ. A terület könnyen nagyobbítható vagy zsugorítható a figyelembe vett komponensek variálásával. Ez remekül látható az 13. ábra szemléltetésében is. [13]



13. ábra. Matematikai modellezés technikai ablakának elhelyezkedése a berendezés technikai ablakához képest [13]

4.2. Fizikai és számítógépes szimuláció összekapcsolódása

A műszaki anyagtudomány fogalmának meghatározása során egyértelművé vált, hogy a komplex rendszert alkotó négy tartalmi elem között folytonos kölcsönhatások érvényesülnek. Tehát a fizikai szimuláció és a numerikus modellezés alkalmazásával megfelelően biztonságos eredmények csak akkor érhetőek el, ha a két módszer összekapcsolódó használata teljesül. A számítástechnika hatalmas fejlettsége és a kódolás magas szintű alkalmazása ellenére is számtalan esetben előfordul, hogy egy adott, lényeges anyagjellemzőről (például a törési szívósság a szerkezet anyagának egy kis térfogatában) nem áll módunkban információt kapni a matematikai modellezés révén. Ezeknek a tulajdonságoknak a prediktív szimulációja bonyolult, ezért szükséges a két eljárás együttes figyelembevétele a végeredmények hitelességének igazolásához. A numerikus szimuláció segítségével létrehozhatóak a kívánt tulajdonság kombinációkkal rendelkező anyagminőségek modelljei az ismert termikus, mechanikus és korróziós igénybevételeknek megfelelően. Ugyanakkor a meghatározott szövetstruktúra metallurgiai vizsgálata biztosítja a pontos előre jelzést az anyag viselkedésével kapcsolatban, ami az ipari körülmények között tapasztalható lesz. Vagyis a két módszer egymás szétválaszthatatlan biztosítékaként is funkcionál. Összehangolt működésükkel a feldolgozó és termelési folyamatok végeredményeként egyre jobb minőségű termékek állíthatók elő, amellyel együtt nő a vállaltok értékteremtő tevékenységeinek aránya és

gazdaságos működése, valamint redukálja a folyamatok káros hozadékait (például karbon lábnyom csökkentése) [13].

A két modellezési módszer szükségszerű együttműködése egy konkrét példán keresztül könnyebben belátható. Egy termelésben alkalmazott meleghengermű meghatározott műszaki paraméterekkel rendelkezik (állvány szám, állvány terhelhetőség, henger átmérő, hengerek fordulatszáma stb.). Új acélminőség felhasználásához kell meghatározni a szükséges adatokat, hogy tesztelésre kerülhessen az üzemi kísérletek során, majd konkrét ipari alkalmazásba. A HSMM (Hot Strip Mill Model) numerikus szimulációs rendszer segítségével meghatározásra kerül a meleghengerlési szűrás terv, valamint a hűtési stratégia. Az itt kapott befolyásoló jellemzők fizikai szimulátorra történő átvitele után, az adott anyagszerkezeten elvégezhető a modellezés a folyamatok valós időbeni lefolyásával megegyező időléptékben, megkapva a vizsgált mérési eredményekkel együtt. A két szimuláció végeredményeinek összehasonlításával (megegyezőségük tekintetében) ellenőrizhető a megbízható prediktív modell megalkotásának sikeressége [13].

5. Vizsgálatok

5.1. Vizsgált anyag

A vizsgálat sorozat során az AlSi7 jelű alumínium ötvözet viselkedését vizsgáltuk meghatározott hőmérséklet értékeken, illetve alakváltozási sebességekkel.

Az alkalmazott anyag összetételét tömegszázalékban megadva mutatja az 1. táblázat.

1. táblázat. AlSi7 alumínium ötvözet kémiai összetétele tömegszázalékban [14]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
6,5-7,5	0,45	0,15	0,35	0,25-0,65	0,15	0,15	0,15	0,05	0,2

Az alumínium ötvözetek tulajdonságai szignifikánsan függenek a hőkezelési állapottól, vagyis az anyagon elvégzett hőkezelési technológiá(k)tól. Az AlSi7 ötvözet meghatározóbb mechanikai tulajdonságait összegzi a 2. táblázat különböző hőkezelési szinteken.

2. táblázat AlSi7 jellegzetes mechanikai tulajdonságai különböző hőkezelési szinteken [14]

Hőkezelési állapot	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]	HBS
SF	140	80	2	50
ST6	220	180	1	75
KF	170	90	2,5	55
KT6	260	220	1	90
KT64	240	200	2	80

A táblázatban szereplő hőkezelési technológiák (állapotok) jelmagyarázata:

- SF: homokformába öntés, öntött állapot;
- ST6: homokformába öntés, oldó hőkezelés + mesterséges öregítés maximális keménységre;
- KF: kokillaöntés, öntött állapot;

- KT6: kokillaöntés, oldó hőkezelés + mesterséges öregítés maximális keménységre;
- KT64: kokillaöntés, oldó hőkezelés + mesterséges öregítés nem maximális keménységre.

Az alumínium ötvözetek alkalmazásának területe rendkívül széles. Széleskörű alkalmazásának legfőbb oka az alumínium viszonylag nagy fajlagos szilárdsága, vagyis a szilárdsági jellemzőhöz képest viszonylag kicsi a sűrűsége, ami azt eredményezi, hogy azonos terhelés mellett jelentős tömegcsökkentés érhető el az alkalmazásával [15;16].

Ennek a széleskörű alkalmazásnak az oka, a súlycsökkentés iránti jelentős. Az előbbieken említett tényezők figyelembevételével nem meglepő, hogy a legfőbb alkalmazási területeik között megjelenik az autóipar (például személygépjárművek „A” oszlopaként), repülőgép ipar és a haditengerészet világa is. Az AlSi7 hőkezelhetőségének következményeképpen elérhetőek olyan tulajdonságok, tulajdonság kombinációk, melyek képessé teszik arra, hogy jelentősebb termikus hatásoknak is ellenálljon, mindamellett, hogy tömegcsökkentést lehet elérni az alkalmazásával. Egy ilyen speciális területen, ahol nagy mértékben megjelenik a funkcionális alkatrészekben való alkalmazás során (a korábban említett iparágak mellett) az űrtechnikai ipar [15;16].

Fémpor formájában jelentős a portechnológiai alkalmazása, illetve megtalálható még a lézer vagy elektronsugaras adalékanyagok gyártásának folyamatában is (SLM vagy EBM), továbbá fémszórások esetén is gyakran felbukkan [15].

5.2. Vizsgálati berendezés, Gleeble 3500

A Gleeble 3500 fizikai szimulációs rendszer egy teljeskörűen integrált, digitálisan zártkörűen vezérelt termo – mechanikus vizsgáló berendezés. A DSI vezette piacra 1995-ben, mint az első harmadik generációs szimulációs rendszert, amelynél a teljes vezérlést már egy zárt lánc mentén, számítógép által valósították meg. A szimulációk széles kutatási körben való alkalmazhatóságához a berendezés két meghatározó rendszert foglal magába, egy termikus és egy mechanikus rendszert, melyekre elnevezése is rámutat [17].

5.2.1. Mechanikus rendszer

A Gleeble 3500 mechanikus rendszeréről elmondható, hogy az összetett, zárt és teljeskörűen integrált szervó – rendszer számos lehetőséget biztosít a felhasználó kutatók számára. Húzó vagy nyomó feszültségek létrehozásánál képes akár 100 kN (10 tonna) statikus terhelésnek is kitenni a próbatestet, illetve 1000 mm/sec – os sebességgel alakváltozásra kényszeríteni az anyagot. Az LDVT érzékelő, erőmérő cella, vagy érintésmentes lézeres extenzométer (nyúlásmérő) biztosítja a vizsgálat hiteles és pontos elvégzését, valamint reprodukálhatóságát. A rendszer számos paraméter változtatását lehetővé teszi, ami rendkívüli flexibilitást biztosít, kialakítása lehetővé teszi az üzemeltető számára, a vizsgálaton belül bármilyen gyakorisággal lehessen változtatni a szabályozási módokat, ami szükséges a folyamatok (mechanikus és termikus) pontos leképezéséhez. A következő szabályozási módok alkalmazhatók, dugattyú elmozdulás, erő, hossz- és keresztirányú extenzométer, valódi feszültség, valódi nyúlás, mérnöki feszültség, mérnöki nyúlás stb. [17].

5.2.2. Termikus rendszer

A szimulátor ellenállás hevítést alkalmaz, ennek köszönhetően a próbatest felhevítését bármilyen sebességgel képes elvégezni a maximális határának eléréséig, a 10000 °C/sec sebességig. A két befogó, melyek rögzítik a munkadarab pozícióját nagy hővezetési tényezővel rendelkeznek, így lehetővé téve a (szintén) rendkívül nagy hűtési sebesség alkalmazást, a 10000 °C/sec – ot (például egy edzési folyamatot megvalósító szimuláció során). Mindemellett képes a minta meghatározott hőmérsékleten való tartására, egyenletes hőmérséklet eloszlást biztosítva. A folyamatok reprodukálása során, a termoelemek vagy opcionálisan választható infravörös pirométer teszi lehetővé a próbatest hőmérsékletének precíz szabályozhatóságát (például a 3.4.1 -es alfejezetben a vezérelt és mért/valós jelalakok közötti minimális eltérést). Ennek az egyedülállóan gyors termikus hatásokat biztosító rendszernek hatékonyságát mutatja, hogy egy hagyományos kemencés hevítő berendezéshez képest háromszor, tízszer hamarabb képes a keresett eredmények előállítására [17].

A Gleeble 3500 – as szimulátor lelke, azaz harmadik generáció, digitális vezérlő rendszere a Series 3 Digital Control System. Ez biztosít a rendszer működése során minden jelet ahhoz, hogy a termikus és mechanikus folyamatok változóit egyidejűleg

tudja kezelni. Ezt támogatják a termikus és mechanikus szervo rendszerek is. A számítógépes vezérlést egy felhasználóbarát Windows környezet biztosítja az üzemeltető számára, párhuzamosan egy nagy teljesítményű processzorral a kontroll konzolban. A Windows szoftver alkalmazása rendkívül előnyös, mivel rugalmas, könnyen kezelhetőséget biztosít. Általa komplex és sokrétű grafikai programok használata válik lehetségessé a programok kódolásához, a kapott eredmények gyors elemzéséhez. A processzor és a Windows közös alkalmazás lehetőséget ad a felhasználónak, hogy még a vizsgálat folyamata alatt előkészíthesse a következő programot, vagy azoktól eltérő adatokat elemezzon, illetve nagyon széles tartományban biztosítja a folyamat mintavételezésének műveletét a lehető legpontosabb eredmények elérésének érdekében. Tovább növeli sokoldalúságát, hogy lehetőség van kizárólag számítógépes vezérlés létrehozására vagy végig manuális irányítási tevékenységet folytatni. Ugyanakkor ezek különböző arányú variációja sem akadály, amely segítségével további összetett és bonyolult feladatok megoldása válik lehetségessé [17].

Az alábbi ábra mutatja be az aktuális vizsgálatok elvégzéséért felelős Gleeble 3500 - as berendezést.



14. ábra. Miskolci Egyetem, Anyagszerkezzetani és Anyagtechnológiai Intézetének
Gleeble 3500 - as fizikai szimulátora

5.3. Vizsgálat összeállítása

A fizikai szimulációs vizsgálat egy összetett folyamat, mely ebben az esetben is több lépcsőből tevődött össze. A vizsgálat során a fő cél a már előzőekben említett AlSi7 alumínium ötvözet alakíthatóságának vizsgálata volt. A konkrét alakíthatósági vizsgálatokat megelőzte a berendezésen elvégzett számos előkísérlet, melyek a készülék

optimális működéséhez szükséges paraméterek összehangolását, illetve a próbatest megfelelő méreteinek meghatározását szolgálták. Az adott anyagminőség alakíthatóságára vonatkozóan két meghatározó befolyásoló tényező került kiválasztásra, mely paraméterek folyamatos változtatása mellett figyeltük meg az anyag viselkedését. E két variálandó paraméter a hőmérséklet, illetve az alakváltozás sebessége. Öt különböző hőmérsékletre történt a mintadarabok hevítése, ahol az adott alakítási sebességének megfelelően a szimulátor meghatározta a szükséges terhelést, mellyel az megvalósítható. Ez húsz eltérő paraméter variációt jelentett. A hőmérsékletre vonatkozóan a 350; 400; 450; 500 és 550 °C – os értékek voltak megvizsgálva. Az alakítási „gyorsaság” szempontjából négy sebesség került beállításra, a 0,001; 0,01; 0,1 és végül a leggyorsabb az 1 1/sec.

A próbatestek kezdeti geometriája minden esetben megegyezett, illetve a módosított méretek is közel azonosak voltak.

Ezeket a geometriai méreteket tartalmazza az 3. táblázat:

3. táblázat Próbatestek geometriai méretei a kezdeti és végállapotban

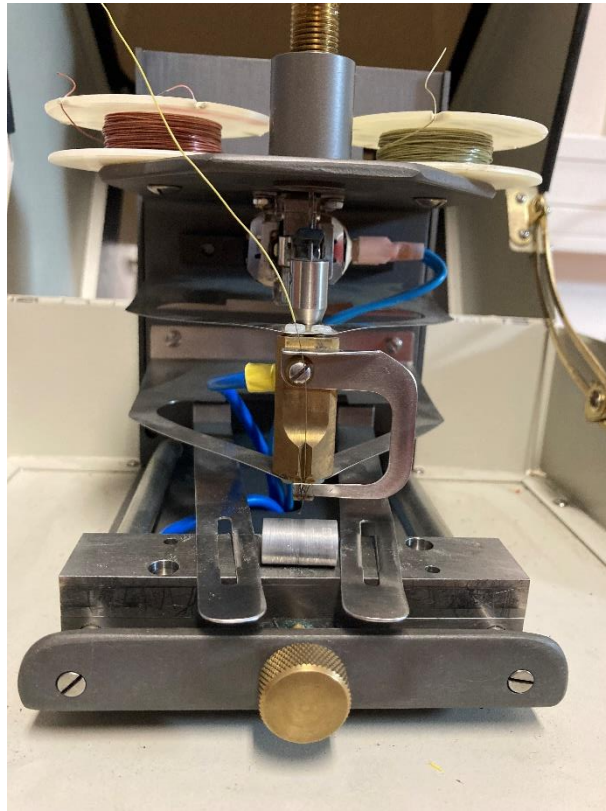
Paraméter	Jelölés	Érték
Kezdeti magasság	h_0	18 mm
Alakítás mértéke	φ	$1 \frac{mm}{mm}$
Zömített (csökkent) magasság	h_u	6,62 mm
Kezdeti átmérő	d_0	12 mm

5.3.1. A vizsgálat folyamata

Az alakíthatóság megállapítása érdekében termikus nyomóigénybevételnek tettük ki az adott próbatesteket. Egy általános nyomóvizsgálat során a nyomó pofák közé befogott próbatesteket középpontosan ható erővel terheljük negatív irányba, majd a deformáció mértékét vizsgáljuk és mérjük.

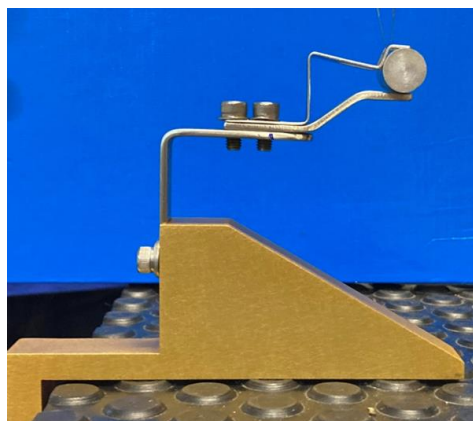
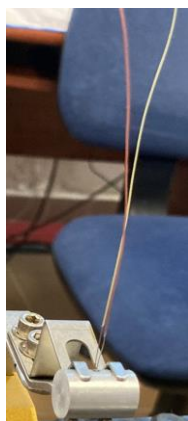
Minden vizsgálat megkezdése előtt elengedhetetlen a mintadarabok megfelelő előkészítése a minél pontosabb eredmények elnyerése érdekében. Első lépésként a termoelektrodok rögzítése valósult meg. Az 15. ábrán látható készülék alkalmazásával kerültek felhegesztésre a termoelemek a próbatestek palást felületének felező pontjába. Az előzőekben tárgyaltak figyelembevételével egyértelműen megállapítható, hogy a termoelektrodok elengedhetetlen egységét képezik a megbízható vizsgálatnak, mivel

általuk valósul meg a próbatest hőmérsékletének szabályozás, azaz a nyomon követés és ellenőrzés.



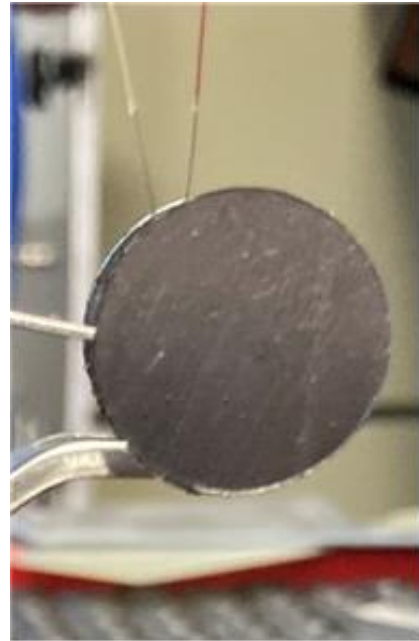
15. ábra. Termoelemek felhegesztése a mintadarabra

Továbbiakban az érintkező felületek előkészítését és a pozícionálási pontosságot kellett biztosítani. A próbatest vizsgálókamrában történő elhelyezése során, a nyomópofák közötti pontos pozícionálás érdekében egy speciális készüléket alkalmazunk. Ezáltal a körkeresztmetszetű próbatest tengelyközépvonala és a nyomópofák tengelyközépvonal mindig egybe esik. A pozícionáló készülék látható a 16. ábrán.



16. ábra. Pozicionáláshoz alkalmazott speciális eszköz a vizsgálati próbatesttel

A pozicionálóban történő elhelyezést követően két eltérő réteg felvétele volt szükséges a nyomópofákkal érintkező keresztmetszeti felületekre. Az első réteg, amely a nyomópofákra külön – külön is felkerült egy nikkel bázisú tömítésre alkalmas vegyület (kenő anyag). A vizsgálat során magas hőmérséklet tartományok is megjelennek, ezért előnyös a nikkel alkalmazás, nagy hőálló tulajdonsága miatt. A két tömítő réteg közé egy vékony grafit réteg került elhelyezésre. Miután grafit lapkát alkalmaztunk, szükséges a vizsgálat során a zárt munkatérben vákuum létrehozása, mivel a grafit bizonyos esetekben reakcióba lép a levegő oxigén atomjaival és meggyullad. A 17. ábra mutatja a próbatest vizsgálat utáni könnyebb leválasztását lehetővé tevő kenőanyagot illetve a súrlódás csökkentésére alkalmazott grafitpapírt.



17. ábra. Érintkező felületek előkészítés: első – a próbatest vizsgálat utáni könnyebb leválasztását lehetővé tevő kenőanyag; második: grafitpapír elhelyezése

Minkét réteg egy nyomóvizsgálatoknál jellegzetesen megjelenő deformitás mértékének redukálását szolgálja. Az érintkező felületek (nyomópofák – próbatest keresztmetszeti részei) szabad szemmel nem látható ugyan, viszont érdesek. Ennek következményeképpen a találkozás területeiben súrlódás lép fel, ami az adott zónában korlátozza az alakváltozást, így a próbatest deformációja a gátolatlan, szabad irányok mentén következik be. Ez a folyamat eredményezi a hordósodás jelenségét. A tömítő anyag kitölti az érdességi árkokat, illetve a grafit felülete jelentősegteljesen simább, mint a próbatestté, így segítik a hordósodás mértékének csökkenését.

A mintadarab megfelelő előkészítése után elhelyeztük a berendezés munkaterében és rögzítettük a nyomópofák segítségével. Ahhoz, hogy a rögzítés megvalósulhasson szükséges volt egy bizonyos mértékű erő kifejtés a dugattyú által. Ugyanakkor ez a szükséges terhelési szint elhanyagolható mértékű hatást fejtett ki a próbatestre. A munkatér elszigetelése után kezdetét vették a vizsgálatok, mindegyik meghatározott hőmérséklet kombinálva az előírt alakváltozási sebességekkel. A berendezés az általunk megadott paraméterek függvényében határozta meg, hogy az egyes hőmérsékletekkel társított alakváltozási sebességeknél milyen mértékű terhelésre van szükség a kívánt cél elérése érdekében a kritériumoknak való megfelelés mellett.

5.4. A vizsgálatok során meghatározó összefüggések (képletek)

A vizsgálatok során valódi alakváltozást és valódi feszültséget határoztuk meg. A valódi mérőszámok esetén, nem a kezdeti hossza, vagy keresztmetszetre vonatkoztatjuk a mérőszámokat, hanem a pillanatnyi értékre.

Az alakváltozás pillanatnyi értékét az alábbi képlettel lehet megadni.

$$\varphi(t) = \frac{dh(t)}{h(t)} \quad (1)$$

Ahol,

$\varphi(t)$: az alakváltozás pillanatnyi értéke;

$h(t)$: a próbatest pillanatnyi magassága;

$dh(t)$: a pillanatnyi magasság csökkenés.

Összenyomáskor, nagy alakváltozások esetén, ha a kezdeti magasság h_0 , összenyomás után a magasság h_u , akkor a teljes alakváltozásra a következő képlet írható fel.

$$\varphi = \int_{l_0}^{l_u} d\varphi(t) = \int_{l_0}^{l_u} \frac{dh(t)}{h(t)} = \ln h_u - \ln h_0 = \ln \frac{h_u}{h_0} \quad (2)$$

Vagyis, ha egy hengert h_u magasságra összenyomjuk, Δh össz-magasságcsökkenéssel, a valódi alakváltozás eközben a következő képlettel számítható,

$$\varphi = \ln \left(\frac{\Delta h + h_0}{h_0} \right) \quad (3)$$

Az anyagban ébredő feszültséget pedig az alábbiak alapján tudjuk meghatározni. Feszültség esetén is a valódi vagyis a pillanatnyi erő hatásra a pillanatnyi keresztmetszetben ébredő feszültséget alkalmazzuk.

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A(t)} \quad (4)$$

A térfogatállandóságot figyelembe véve, felírható az alábbi összefüggés.

$$V(t) = \text{állandó} = V_0 = V_u = r_0^2 \cdot \pi \cdot h_0 = r_u^2 \cdot \pi \cdot h_u \quad (5)$$

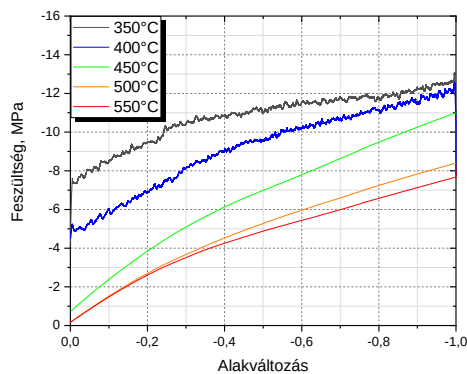
Ahol, V_0 és V_u illetve r_0 és r_u a próbatest vizsgálat előtti és utáni térfogata illetve sugara.

A fentebbi (4) és (5) összefüggésből a valódi feszültség számítására a következő képlet adódik.

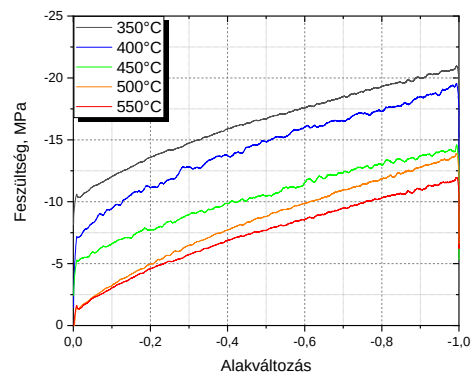
$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{\frac{r_0^2 \pi L_0}{\Delta L(t) + L_0}} \quad (6)$$

6. Vizsgálati eredmények

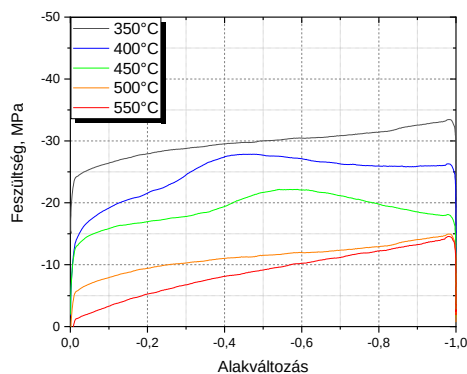
A vizsgálat sorozat célja, hogy a hőmérséklet és az alakítási sebesség alakíthatóságra gyakorolt hatását vizsgálja AlSi7 jelű alumínium ötvözet esetén. Összesen húsz féle beállítással végeztünk kísérleteket, 350; 400; 450; 500; és 550°C-on, 0,001; 0,01; 0,1; és $1\frac{1}{s}$ alakítási sebességgel. Tehát minden hőmérsékleten négy alakítási sebességgel vagy másképpen megfogalmazva, minden alakítási sebességet öt féle hőmérsékleten vizsgáltuk. Kétféle módon lehet csoportosítani a vizsgálatokat. Hőmérséklet és alakítási sebesség szerint. A vizsgálatok alakítási sebesség szerint csoportosítva a 18... 21. ábrák tartalmazzák.



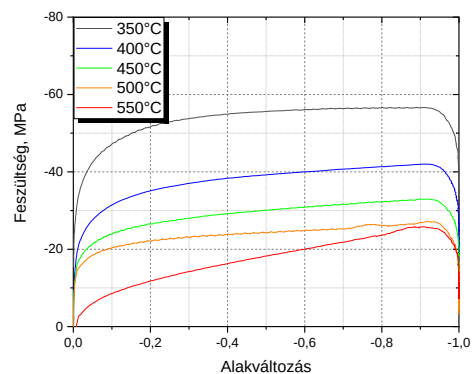
18. ábra. $0,001 \frac{1}{s}$ alakítási sebességgel végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok



19. ábra. $0,01 \frac{1}{s}$ alakítási sebességgel végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok



20. ábra. $0,1 \frac{1}{s}$ alakítási sebességgel végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok

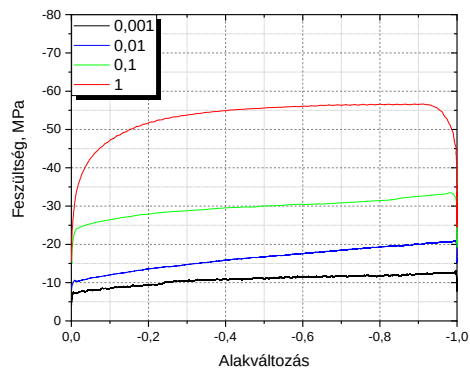


21. ábra. $1 \frac{1}{s}$ alakítási sebességgel végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok

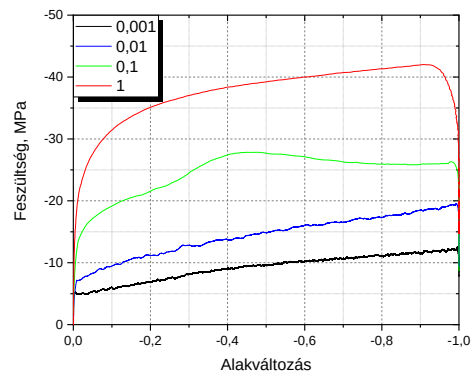
Az ábrán látható diagramokból megállapítható, hogy minden alakváltozási sebesség esetén az anyag nyomással szembeni ellenállása a zömítés sebességének növelésével növekszik.

A vizsgálatok hőmérséklet szerint csoportosítása, vagyis az alakváltozási sebesség hatása a 22. ... 26. ábrákon látható.

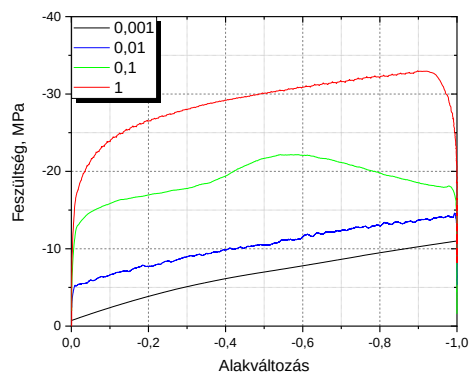
Az ábrán látható diagramokból megállapítható, hogy minden vizsgált hőmérsékleten az anyag nyomással szembeni ellenállása csökken.



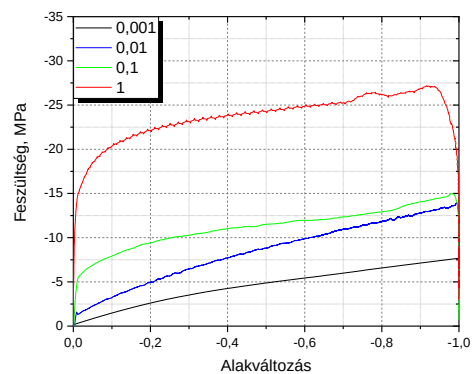
22. ábra. A 350°C hőmérsékleten végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok



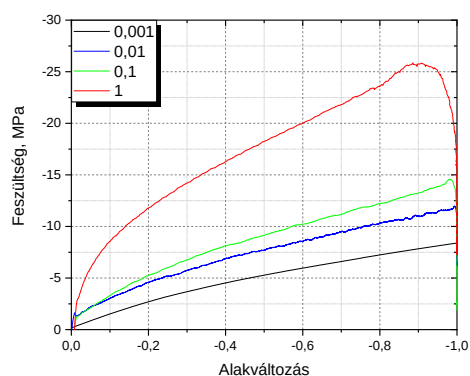
23. ábra. A 400°C hőmérsékleten végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok



24. ábra. A 450°C hőmérsékleten végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok



25. ábra. A 500°C hőmérsékleten végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok



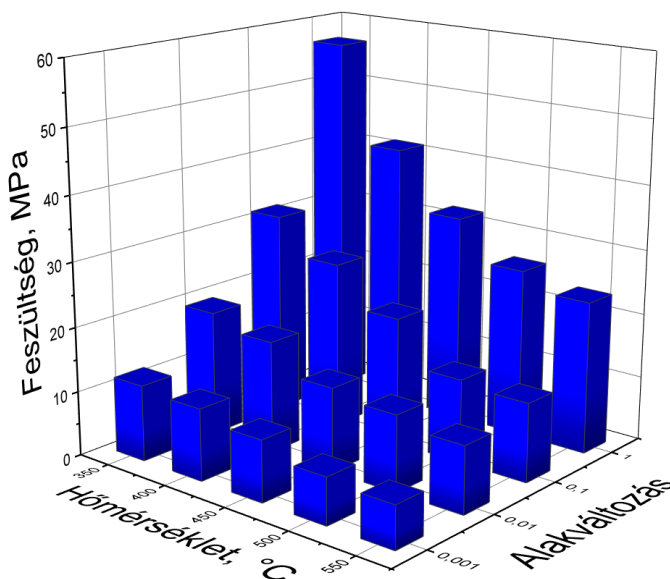
26. ábra. A 550°C hőmérsékleten végzett vizsgálatok során felvett alakváltozás – feszültség diagramok

A zömítést 1 mm/mm értékig végeztük. A legnagyobb sebesség esetén (1 1/s) ez azt jelenti, hogy 1 s alatt kell a dugattyúnak felgyorsulni a megadott sebességre, elvégezni a zömítést és le is lassulni. Az alakítás végén, az alakítást végző hidraulikus dugattyúnak nagyon gyorsan kell lelassulnia, hogy az alakítás mértéke pontosan a megadott 1 mm/mm = 6,62 mm legyen. A diagramokon is látható, hogy 1 1/s esetén a feszültség erősen csökkenni kezd. Ez azért van, mert a dugattyú már elkezd lassulni és nem a megadott sebességgel zömít. Mivel a sebesség 0,8 mm/mm esetén még minden vizsgálati sebesség esetében a beállított érték volt, ezért az adott hőmérsékletet és vizsgálati sebességet jellemző szilárdsági értéket a 0,8 mm/mm alakítás esetén az anyag által kifejtett szilárdság értékkel jellemezzük. A szilárdság értékeket a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat. 0,8 mm/mm zömítés esetén az alakítási szilárdság értéke a vizsgált hőmérsékleteken és alakítási sebesség mellett

Alakváltozási sebesség/ Hőmérséklet	0,001 1/s	0,01 1/s	0,1 1/s	1 1/s
350°C	11,75	19,33	31,43	56,67
400°C	11,12	17,31	25,93	41,33
450°C	9,48	12,97	19,79	32,28
500°C	7,24	11,83	12,93	26,18
550°C	6,58	10,33	12,21	23,63

A mérési adatok oszlopdiagramban ábrázolva a 27. ábrában láthatók.



27. ábra. 0,8 mm/mm zömítés esetén az alakítási szilárdság értéke a vizsgált hőmérsékleteken és alakítási sebesség mellett

Összefoglalás

A jelen tudományos diákköri dolgozat kutatási célkeresztjének egyik fő tárgya a fizikai szimuláció elméleti alapjainak feltárása, és gyakorlati megvalósulásainak megismerése volt. Ezzel rávilágítva jelentőségteljes szerepére a műszaki anyagtudományok vonatkozásában. A dolgozat során feltárásra került, hogy az egyes anyagoktól elvárt funkcionális tulajdonságok miként indokolták a technológia minél fejlettebb szintjeinek elérését, ebből következően azt is megérthettük miként képezi a műszaki anyagtudományokon belül érvényesülő komplex kapcsolatrendszer szerves elemét.

Bemutattam a fizikai szimuláció és matematikai modellezés közötti különbségeket. Az elméleti háttérük és gyakorlati alkalmazhatóságuk megismerésével egyúttal igazolást nyert, hogy a kettő elválaszthatatlan egysége révén juthatunk a feladatok legoptimálisabb megoldásaihoz. Ezekkel párhuzamosan bemutattam fizikai szimuláció megjelenésének, majd pedig fejlesztésének lépcsőit. Az egyre bővülő funkciókkal, kiegészítő egységekkel, valamint egyre korszerűbb és megbízhatóbb működtetéssel rendelkező kezdeti, illetve napjainkban is előszeretettel alkalmazott fizikai szimuláció rendszerek képviselőit.

Részletesen ismertetem a vizsgálatok során alkalmazott legújabb generációs Gleeble 3500 típusú termomechanikus szimulációs berendezést. A vizsgálatok középpontjában az AlSi7 megnevezésű, az ipar számos területén alkalmazott alumínium ötvözet alakíthatósága volt. Bemutattam a próbatest előkészítést, a hőmérséklet szabályozáshoz elengedhetetlen termoelem felhegesztését és a súrlódási együttható csökkentésére alkalmazott grafitpapír és a kenőanyag alkalmazását.

Azonos alakítási sebességgel, különböző hőmérsékleten végzett vizsgálatok esetén a hőmérséklet hatása egyértelmű. A hőmérséklet emelkedésével az anyag nyomással szembeni ellenálló képessége csökken, vagyis a vizsgált legkisebb hőmérsékleten lesz a legnagyobb, és a legnagyobb hőmérsékleten pedig a legkisebb a nyomó igénybevétellel szemben az anyag ellenállása.

Megegyező hőmérsékleten, eltérő alakváltozási sebességgel vezérelt vizsgálatoknál is szembetűnő a hatás. Minél kisebb (lassabb) az alakítás sebessége, annál kisebb mértékű terheléssel érhető el ugyanolyan zömítés. Vagyis a gyorsabb alakítás hatására az anyag agresszívabb ellenállást tanúsít a nyomás ellen. A 0,8 mm/mm alakításnál megállapított alakítási szilárdságok az eddig leírtakat támasztják alá számok segítségével is.

A vizsgálatssorozat során felvett diagramok az alapját képezik a AlSi7 alumínium ötvözet alakíthatóságának, és alakítási keményedésének a vizsgálatának.

Köszönetnyilvánítás

A kutató munka az 2019-2.1.7-ERA-NET – pályázat és az ERA-NET COFUND és EJP COFUND programok közös nemzetközi pályázatán elnyert, „Rétegelt kompozitok új koncepciójának kifejlesztése” című támogatásból valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Roósz A.: A szerkezeti anyagok jövője – szimulációs módszerek, Kolozsvár, 2003.
- [2] Páczelt I., Szabó T., Baksa A.: A végeselem módszer alapjai, tananyag, 2007. p. 7-9.
- [3] https://mogi.bme.hu/TAMOP/vegeselem_modszerek/ch02.html (2022. 11. 08.)
- [4] DSI Dynamic Systems Inc. homepage, Resources/What is Physical Simulation? <https://gleeble.net/resources/what-is-physical-simulation.html> (2022. 11. 08.)
- [5] Verő, B.: A fizikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban, ISD Dunaferri Műszaki Gazdasági Közlemények, 2007. XLVII. évfolyam 4. szám (148.) p. 167-172.
- [6] Koritárné Fótos, R.; Koncsik, Zs.; Lukács, J.: A fizikai szimuláció és alkalmazása az anyagtechnológiában; Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága; Debrecen, 2012. p. 211-216. ISBN 978-963-7064-28-9
- [7] Ferguson, D.; Chen, W.; Bonesteel, T.; Vosburgh J.: A look at physical simulation of metallurgical processes, past, present and future; Materials Science and Engineering A 499, 2009., p. 329-332.
- [8] DSI Dynamic Systems Inc. homepage, About us/Company History <https://gleeble.net/about-us1/company-history.html> (2022.11.08.)
- [9] Lukács, J.; Kuzsella, L.; Dobosy, Á.; Pósalaky, D.: Hegesztési melegrepedési – érzékenység megítélése fizikai szimuláció segítségével, Gép folyóirat, 2013. LXIV. évfolyam 8. szám p. 45-50.
- [10] Adonyi Y.: Heat-Affected Zone Characterization by Physical Simulations, Welding Journal (October, 2006) p. 42-47.
- [11] Tudásbázis adatszolgáltató felülete <https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/gepeszet/megmunkalasok/feluleti-hokezelesek/nemesites-folyamata> (2022.11.08.)
- [12] Ispat Guru homepage/ Thermo mechanical control processing in rolling mills <https://www.ispatguru.com/thermo-mechanical-control-processing-in-rolling-mills/> (2022.11.08.)

- [13] Verő, B.: A fizikai és matematikai szimuláció helye és szerepe a vaskohászati kutatás-fejlesztésben, ISD Dunaferri Műszaki Gazdasági Közlemények, 2008. XLVIII. évfolyam 3. szám, p. 114-116.
- [14] Stena Aluminium homepage, Aluminium alloys and Services/ Alloy Specification
<https://www.stenaaluminium.com/aluminium-alloys-and-services/alloy-specifications/> (2022.11.08.)
- [15] MSE Supplies homepage/ AlSi7Mg Aluminum Based Metal Powder for additive Manufacturing
<https://www.msesupplies.com/products/alsi7mg-aluminum-based-metal-powder-for-additive-manufacturing-3d-printing> (2022.11.08)
- [16] Wang, M.; Song, B.; Wei, Q.; Zhang, Y.; Shi, Y.: Effects of annealing on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg alloy, Materials Science and Engineering A, 2018.
- [17] DSI Dynamic Systems Inc. homepage, Products/3500
<https://gleeble.net/products/gleeble-systems/gleeble-3500.html> (2022.11.08.)