

# NAGYMÉRETU HEGESZTETT MÉRNÖKI SZERKEZETEK VIRTUÁLIS GYÁRTÁSA

*Nézo János\* - Dunai László\*\* - Topping Barry H.V.\*\*\**

## RÖVID KIVONAT

Fémszerkezetekben elterjedten alkalmaznak hegesztett kapcsolatokat. A hegesztési eljárás elkerülhetetlen velejárói a szerkezetben kialakuló sajátfeszültségek és deformációk. Ezek az imperfekciók számottevően befolyásolhatják a szerkezet viselkedését mind statikus mind pedig fárasztó terhek esetén, ezért a méretezés során nem lehet őket figyelmen kívül hagyni. Jelen kutatás célja a hegesztésen alapuló gyártási folyamat numerikus modellezése (virtuális gyártás) és az eredmények integrálása a méretezési eljárásba acélszerkezetek esetén. A cikk a kutatás első lépéseiről ad áttekintést: bemutatja a modellezés során fellépő nehézségeket, a lehetséges megoldási módszereket, és a kutatás jelenlegi állását szemléltető mintapéldát.

## 1. BEVEZETÉS

Hegesztés az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer fémes anyagok összekapcsolására, ezért igen fontos szerepet játszik az ipar legkülönbözőbb területein. Ömlesztő hegesztési eljárás (ívhegesztés, lánghegesztés, lézerhegesztés, stb.) során egy magas hőmérsékletű koncentrált hőforrást vezetnek végig az összekapcsolandó elemek mentén. A hőforrás környezetében az alapanyagok megolvadnak és összekeverednek (adalekanyaggal vagy anélkül). A lehűlés során megszilárduló ömledék biztosítja a megfelelő szilárdságú kapcsolatot az elemek között. Egyéb hegesztési eljárások (pl. súrlódáson alapuló hegesztés) nem képezik a kutatás részét. A továbbiakban a 'hegesztés' kifejezés alatt mindig ömlesztő hegesztést értünk.

Hegesztés során az ömledékben és annak közvetlen környezetében megváltozik az anyagszerkezet, ami az anyagtulajdonságok (pl. szilárdsági jellemzők) megváltozásával jár. Emellett a halmazállapot-változás során bekövetkező térfogatváltozás gyártási sajátfeszültségek kialakulásához vezet. A koncentrált hőbevitel következtében a hegesztett elemekben kialakuló egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás további feszültségeket és deformációkat hoz létre a szerkezetben. Ezek a gyártásból adódó imperfekciók kedvezőtlenül befolyásolhatják a szerkezet viselkedését. A varrat környezetében kialakuló, akár folyáshatárt is elérő, húzófeszültségek csökkenthetik a teherbírást és növelhetik a fáradási repedések kialakulásának veszélyét. A húzófeszültségekkel egyensúlyt tartó nyomófeszültségek a szerkezet stabilitási határállapotát befolyásolják. A hőbevitel és gátolt deformációk következtében kialakuló

---

\* okl. építőmérnök, doktorandusz, Dept. of Mechanical and Chemical Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK

\*\* okl. építőmérnök, Dr. habil., egyetemi docens, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

\*\*\* professor, Dept. of Mechanical and Chemical Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK

jelentős mértékű geometriai imperfekciók – a teherbírásra gyakorolt hatás mellett – megnehezítik a szerkezeti elemek összeszerelését is [1]

A fenti imperfekciók tehát elkerülhetetlen velejárói a hegesztett szerkezetek gyártásának, és a méretezési vizsgálatok során figyelembe kell venni őket. A jelenlegi méretezési gyakorlat kísérleti vizsgálatok alapján kidolgozott szemi-empirikus vizsgálati eljárásokat alkalmaz erre a célra. Az elméleti módszereken alapuló méretezési eljárások kidolgozásának feltétele a hegesztésből származó imperfekciók ismerete. Jelen kutatásban – a számítástechnikai háttér és a fejlett numerikus módszerek alapján – az a célunk, hogy a mérnöki szerkezetek gyártásának szimulálásával az imperfekciókat meghatározzuk. Ebben a cikkben bemutatjuk a kutatás háttérét, a megoldási stratégiát és az eddigi eredményeket.

## 2. A HEGESZTÉSI FOLYAMAT NUMERIKUS VIZSGÁLATA

### 2.1. A modell követelményei

Hegesztés egy igen összetett folyamat, ami magába foglalja számtalan tudományág témakörét és eredményeit. Ma még nem létezik olyan komplex modell, ami képes lenne a folyamatot leíró témaköröket integrálni. A szakirodalmi áttekintés alapján alapvetően két modellezési stratégiát lehet megkülönböztetni: a „folyamat megértését” és a „folyamat szimulálását” megcélzó modelleket. Mindkét modellezési szint numerikus – a vizsgált tanulmányokban kizárólag végesesemes – megoldó módszeren alapul. Az előbbi igen komplex modellek magának a hegesztési eljárásnak és az azt befolyásoló tényezőknek, jelenségeknek a vizsgálatára lettek kifejlesztve. Ezek minden bizonnyal nagy pontossággal alkalmazhatóak lennének minden hegesztéssel foglalkozó tanulmányban, azonban a rendelkezésre álló számítógépes teljesítmény még ma is igen korlátozott, ami szükségessé teszi, hogy egyszerűsítéseket vezessünk be.

A kitűzött célok alapján lehet eldönteni, hogy milyen szintű modell alkalmazása szükséges. A vizsgálni kívánt jelenségek (pl. sajátfeszültség) mellett a vizsgálandó szerkezet méretét is figyelembe kell venni. A varrat közvetlen környezetének vizsgálatára és egy a varrat méreténél nagyságrendekkel (100...1000-szer) nagyobb hegesztett szerkezet vizsgálatára kifejlesztett modellek jelentősen eltérhetnek egymástól. Az első modell használata a második esetben minden bizonnyal igen költséges és a gyakorlatban kevésbé alkalmazható számítást eredményezne.

### 2.2. Irodalmi áttekintés

Hegesztés numerikus modellezése terén végzett kutatások jó két évtizedes múlttal rendelkeznek. A számítástechnika gyors fejlődésének köszönhetően az elmúlt egy évtizedben már megjelentek reális szerkezetekkel is foglalkozó tanulmányok. Az alábbi néhány idézet áttekintést ad az eddig elért eredményekről:

1994: „ ... it is best to adopt a fully three-dimensional model but such models are usually **very costly and time consuming** so simplified models have to be used for welding problems” [2]

- 1995: „Even on current supercomputers, some relatively small problems can be **intractable** " [3]
- 1996: „ Even using today's most powerful computers, a complete analytical simulation of residual stresses and distortion produced during welding fabrication of complex weldments commonly used for actual, complex structures is **impractical, if not impossible.**" [4]
- 1997: „ ... the use of fully three-dimensional model to perform the thermomechanical weld simulations of complex structures is **impractical and computationally prohibitive.**" [5]
- 1999: „ ... welding ... modelling techniques ... **too complex and labour intensive** to be applied industrially" [6]
- 2000: „In recent years three-dimensional models in analysis of welding have become more frequent but still geometrical **complex structures are rarely, if ever, seen.**" [7]
- 2001: „ ... three-dimensional simulations demand a **large computing power** if good resolution is to be obtained." [8]

Az idézetek jól szemléltetik, hogy bár számottevő eredményeket értek el, még a mai fejlett számítástechnikai háttérrel sem sikerült minden problémát megoldani.

### 2.3. Modellezési nehézségek

A hegesztés numerikus modellezésének alapja egy időben változó termo-mechanikai analízis: a mozgó hoforrás alapján meghatározható a szerkezetben kialakuló hőmérséklet eloszlás, amiből pedig már számíthatóak a sajátfeszültségek. Ezt a jelenséget leíró modellezés során az alábbi nehézségekkel kell számolni:

**Kísérleti adatok hiánya:** A magas hőmérsékleten fellépő mérési nehézségek következtében viszonylag kevés a kísérleti adat. A rendelkezésre álló adatok nagy része a már kihalt szerkezeten végzett méréseken alapul. Ez jelentősen megnehezíti a numerikus modell tesztelést, mivel csak az analízis utolsó lépésének eredményei ellenőrizhetők.

**Anyagi viselkedés:** Hegesztés során az anyag hőmérséklete igen széles sávban mozog, ami az anyagjellemzők jelentős változásával jár. Mérési nehézségek következtében az anyagjellemzők értéke magas hőmérsékleten gyakran nem ismert, így az anyagmodellek paramétereinek beállítása nehézségekbe ütközik. Bizonyos jellemzők (pl. folyáshatár) nulla közeli értékre csökkennek, ami numerikus problémákhoz vezet. Emellett a gyakorlatban használt anyagok ötvözetek nem pedig tiszta fémek, ami megnehezíti a halmazállapot-változás hatásainak figyelembevételét.

**Hoforrás és ömledék:** Mivel a hegesztés jelentős hővesztéssel jár, a szimuláció során csak a hasznos hőbevitelt kell figyelembe venni. A hoforrás pontos modellezése magába foglalná az elektromos ív fizikáját és a megolvadt anyag folyadékként való kezelését. A hasznos hőbevitel számítására ma még nem létezik megoldás, ezért azt meghatározni csak a hőmérsékletek és az ömledék alakjának ill. méretének méréséből,

megfigyelésből lehet [8]. Emellett a hoforrás környezetében nagyon magas a hőmérséklet gradiens, ami igen suru diszkrét modellt (vége-selemes hálót) igényel.

**Varratok kölcsönhatása:** Gyakorlatban alkalmazott tipikus hegesztett szerkezetek esetén a hegesztések száma több tízes nagyságrendű. A hegesztési varratok kölcsönhatásának eredménye egy igen összetett sajátfeszültség eloszlás a szerkezetben.

## 2.4. Egyszerusítési lehetőségek és korlátok

A fenti nehézségek leküzdéséhez és a számítógépi megoldási idő elfogadható mértékűre való csökkentéséhez bizonyos egyszerűsítések bevezetése szükséges. Az alábbiakban a leggyakrabban használt módszereket és azok alkalmazásának korlátait foglaljuk össze.

**Analízis két lépésben:** Az anyag deformációja során a mechanikai energia egy része hőenergiává alakul, ami ömlesztő hegesztési eljárások esetén több nagyságrenddel elmarad a hegesztés által bevitt hőnél és csak elhanyagolható mértékben befolyásolja a hőmérséklet eloszlást. Ez lehetővé teszi az analízis két független lépésre való osztását. Elő lépésben meghatározható a szerkezetben a hegesztés és a kihülés teljes időtartama alatt kialakuló hőmérséklet eloszlás. Ez alapján a második lépésben számíthatóak a sajátfeszültségek és deformációk. A kölcsönhatás a két analízis között nem minden esetben hanyagolható el, mint például súrlódáson alapuló hegesztési eljárások esetén.

**2D modellek:** Síkbeli alakváltozási állapothoz tartozó és tengelyszimmetrikus modellek esetében egy, a hegesztés irányára merőleges keresztmetszetet vizsgálunk. Ezzel azt feltételezzük, hogy a hegesztés irányában mind a hőterjedés mind a deformációk nullával egyenlők. Ezek a modellek nem képesek visszaadni a valóságban jelenlévő hosszirányú változásokat, amik igen jelentősek lehetnek a hegesztési varratok elején és végén. Síkbeli feszültségállapothoz tartozó modellek esetében egy lemez középfelületét vizsgáljuk. Ezzel azt feltételezzük, hogy a hegesztési hoforrás is ebben a síkban mozog és a lemez vastagsága mentén minden jellemző konstans. Ezek a modellek még vékony lemezek modellezésére is csak korlátozottan használhatók, mivel teljesen elhanyagolják a vastagság hatását, ami jelentős lehet a varrat környezetében.

**Egyszerusített anyagmodell:** A magas hőmérsékleten kialakuló feszültségeknek kicsi a hatásuk a maradó feszültségekre [9]. A numerikus problémák elkerülésére ezért megtehetjük, hogy egy adott hőmérséklet felett elhanyagolunk mindent. Ez javítható azzal, hogy egy hőmérséklet-határ helyett, több értéket veszünk figyelembe, amelyek felett fokozatosan hanyagolunk el bizonyos jelenségeket. Emellett gyakori megoldás a halmazállapot-változás hatásainak (térfogat-változás, anyagjellemzők változása) elhanyagolása. Amennyiben a folyáshatár még viszonylag jelentős a halmazállapot-változáshoz tartozó hőmérsékleten, a halmazállapot-változás hatása jelentős lehet [10]. Ennek ellenére, ebben az esetben is gyakran elhanyagolják a halmazállapot-változás hatásait [11]. Az alkalmazott anyagmodellt a vizsgált feladat jellege is befolyásolja. A hegesztési varrat közvetlen környezetének a vizsgálatához egy minél komplexebb anyagmodell a javasolt. Ha egy hegesztett szerkezet egészének a vizsgálata a cél, akkor egy egyszerűsített modellel is gyakorlati szempontból kielégítő eredmények kaphatók [8].

### 3. A KUTATÁS CÉLJA

A kutatás végső célja egy gyakorlati szempontból alkalmazható, megfelelően – „mérnöki szempontból” – pontos és hatékony módszer kifejlesztése sajátfeszültségek és kezdeti deformációk számítására nagyméretű hegesztett mérnöki szerkezetekben. A módszernek alkalmasnak kell lennie a következő feladatok megoldására:

#### **Szerkezeti kutatás-fejlesztés:**

- kiindulási adatok biztosítása hegesztett szerkezetek numerikus analíziséhez
- hegesztett szerkezetek viselkedésének jobb megértésének segítése
- hegesztett kapcsolati részletek optimalizálása

#### **Gyártástechnológiai kutatás-fejlesztés:**

- gyártás optimalizálása az imperfekciók minimalizálására
- hegesztést követő hőkezelés megtervezése
- összeszerelés modellezéséhez a szerkezeti elemek deformált alakjának számítása

A fentiek közül talán a legjelentősebb a virtuális gyártás összekapcsolása a virtuális kísérletekkel. Az utóbbiak már ma is igen fontos szerepet játszanak az acélszerkezetek kutatása/tervezése területén. A jelenlegi gyakorlat szerint azonban virtuális kísérleteket általában idealizált (imperfekció mentes ill. valamilyen idealizált imperfekcióval rendelkező) szerkezeteken hajtunk végre. A virtuális gyártás tervezési folyamatba való bevonásával, a valóságot lényegesen jobban megközelítő modelleket használhatunk, ami minden bizonnyal gazdaságosabb szerkezetek tervezéséhez és a szerkezetek viselkedésének jobb megértéséhez vezetnek a jövőben.

A célok eléréséhez szükséges:

- a hegesztési modell szükséges komplexitásának meghatározása,
- a numerikus módszerek tanulmányozása hegesztés szempontjából,
- többprocesszoros hardveren alapuló hatékony programozási technika – parallel computing – alkalmazása,
- módszer széleskörű tesztelése kísérleti eredmények alapján.

Mint azt a 2.1. pontban hangsúlyoztuk, fontos meghatározni, hogy a hegesztés során fellépő jelenségek milyen hatással vannak a kívánt eredményekre és hogy mennyire számításigényesek. Ez alapján összeállítható egy, a feladat szempontjából optimális modell.

Ma már számtalan numerikus módszer áll rendelkezésre így azok megfelelő kiválasztása és kombinálása az adott feladathoz igen nagy hatással lehet mind az algoritmus bonyolultságára, mind annak teljesítményére.

Többprocesszoros számítógépek ma már egyre szélesebb körben hozzáférhetőek, és alkalmazásukkal a számítási idő jelentősen lecsökkenthető. Annak ellenére, hogy a szakirodalomban [13] már utaltak ilyen rendszerek hegesztés szimulációban való előnyös alkalmazására, eddig még ilyen tárgyú tanulmány nem került publikálásra.

A módszer minél alaposabb tesztelése különösen nagy hangsúlyt kap, hiszen a modellezés során olyan jelenségek figyelembevételéről, illetve elhanyagolásáról kell döntést hozni, amelyek önmagukban még kísérleti úton is igen nehezen vizsgálhatók.

#### 4. MEGOLDÁSI STRATÉGIA

A megoldás során egy térbeli és idobeli jelenség vizsgálata a feladat. A numerikus módszer követelményei alapján mindkét értelemben diszkretizáljuk a feladatot. A térbeli diszkretizáció megvalósításához a Langrange módszer tunik alkalmasabbnak mivel az lehetővé teszi tetszőleges geometria modellezését, a kerületi feltételek egyszerűbb figyelembevételét szemben az Euler módszerrel.

Az idobeli diszkretizáció esetén már nem ilyen egyértelmű a választás. Az ún. explicit módszer alkalmazásával az egyenletrendszer ismeretlenjei explicit módon kifejezhetők, így nincs szükség az egyenletrendszer megoldására és ezáltal a nagyméretű globális mátrixok összeállítására. A módszer fő hátránya, hogy feltételesen stabil, ami azt jelenti, hogy csak korlátozott idobeli lépésköz (kritikus lépésköz) esetén konvergál a közelítő megoldáshoz. Ez főleg gyors lefolyású, gyorsan változó jelenségek modellezésére teszi alkalmassá. A módszer egyéb jellemzői a kis memóriaigény, komplex anyagmodellek egyszerű kezelése, gazdaságosság egy lépésen belül.

Az ún. implicit módszerek esetén a megoldandó egyenletrendszer mindkét oldalán (implicit módon) szerepelnek az ismeretlenek, így nem kerülhető el az egyenletrendszer megoldása. Léteznek mind feltételesen, mind feltétel nélkül stabil implicit módszerek. Az utóbbi esetén tetszőleges nagyságú idobeli lépésköz esetén is konvergál a közelítő megoldáshoz – a megoldás pontossága a lépésköz méretének függvénye –, ami időigényesebb folyamatok modellezésére tesz inkább alkalmassá. Ugyanakkor komplex problémák esetén gyakran az eredmények pontosságának biztosítása nem engedi meg az explicit módszer kritikus lépésközénél lényegesen nagyobb lépések használatát [12]. Nagyobb memóriaigényűek, mint az explicit módszer, de iteratív egyenletrendszer megoldók alkalmazásával ez jelentősen csökkenthető, és egy lépésen belül nagyobb számításigényűek.

Hegesztés numerikus modellezésének folyamata mind térben mind időben két jól elkülöníthető részre osztható. Térben: a varratokban és azok közvetlen környezetében a meredek hőmérséklet gradiens igen nagy elemszámú igényel, míg a modell többi részén elegendő viszonylag nagy méretű elemek alkalmazása. Időben: maga a hegesztés viszonylag gyors lefolyású és gyorsan változó folyamat, míg a szerkezet lehülése egy jóval időigényesebb és lassabban változó folyamat. A hegesztési folyamat ezen sajátosságai befolyásolják a numerikus módszerek megválasztását. A hegesztés során és a varrat környezetében a hőmérsékletek gyorsan és igen széles tartományban változnak, és az anyagi viselkedés igen összetett. Ezek a tulajdonságok az explicit módszer alkalmazásának kedveznek. Ugyanakkor a lehülés stádiumában és a szerkezet varratoktól távolabbi részén a hőmérsékletek lassabban és lényegesen szűkebb tartományban változnak, és az anyagi viselkedés egyszerűbb. Ezek a tulajdonságok pedig az implicit módszer alkalmazásának kedveznek. A numerikus modellezés hatékonyságának fokozása érdekében valószínűleg szükséges lesz a különböző

módszerek kombinálására. A fejlesztés első lépésében az explicit módszeren alapuló megoldás kerül megvalósításra.

Több processzoron végzett számítás során a numerikus modell feldarabolásra kerül és az egyes processzorok egymással párhuzamosan (egyidőben) tudnak dolgozni a modell egyes részein ezáltal lecsökkentve a teljes számítási időt. A parallelizálás (többprocesszoros számítógépre való adaptálása) hatékonysága nagyban függ a modell megfelelő feldarabolásától, amelynek során a numerikus modell említett térbeli tulajdonságai valószínűleg jól kihasználhatóak lesznek.

## 5. A KUTATÁS JELENLEGI ÁLLÁSA

### 5.1. Modell- és programfejlesztés

A kutatás első fázisában a programfejlesztés két területen indult el: 3D strukturált végelem hálógeneráló és 3D hőtérjedés analízis program. A hálógeneráló program nem része az eredeti céloknak, azonban a modellezéshez szükséges végelemes háló említett sajátosságai és az acélszerkezetek „lemezes” jellege miatt célszerűnek tűnik az adott feladatra kifejlesztett egyszerű program használata, más általános célú programokkal szemben.

**Hálógeneráló program:** A program egy szövegfájlból olvassa be a szerkezetet felépítő, tetszőleges számú, derékszögű lemezek, illetve blokkok adatait (pozíció és méret), és az azok felosztásához szükséges egyéb adatokat. A blokkok ezután egyesével felosztásra kerülnek, majd a program eltávolítja az átfedésben lévő csomópontokat, illetve elemeket ezáltal ‘összeolvasztva’ az eddig különálló blokkokat. Végezetül pedig létrehoz egy listát, amelyben az egyes elemekhez kapcsolódó szomszédos elemek szerepelnek. Ezáltal a teljes szerkezet külső határoló felületén lévő elemek könnyen kiválaszthatók, ami jelentősen megkönnyíti a kerületi feltételek definiálását.

**Általános célú hőtérjedés analízis program:** A program alkalmas az alapvető hőtérjedési módok vizsgálatára az alábbi kerületi feltételek figyelembevételével:

- hőátadás a környezetnek az elemek felületén,
- adott hőáram az elemek felületén,
- hőforrás az elemeken belül,
- fix és változó csomóponti hőmérséklet.

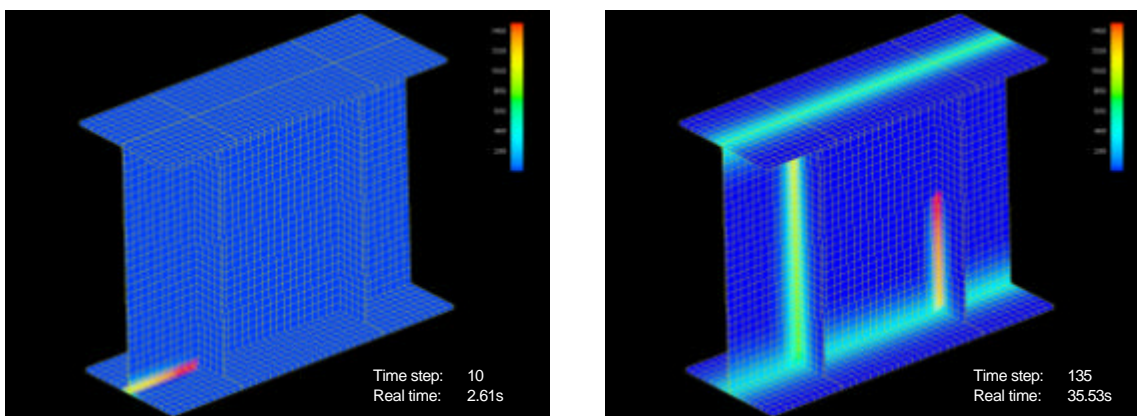
A program explicit módszert és 8-csomópontú hexahedron elemeket használ Lagrange vonatkoztatási rendszerben. Az anyagjellemzőket a kutatás jelenlegi fázisában konstansként kezeli.

### 5.2. Mintapélda

A programfejlesztés még korai stádiumban van, a program azonban már így is alkalmas egyszerű, a hegesztési folyamat kiindulásának tekinthető analízis végrehajtására. Az 1. ábra mutatja a mintapéldában szereplő magasgerincű acél tartó 800 mm hosszú szakaszát, két-két keresztbordával a gerinc mindkét oldalán. A gerinclemez 6 mm vastag és 600 mm magas. Mindkét öv 10 mm vastag és 300 mm

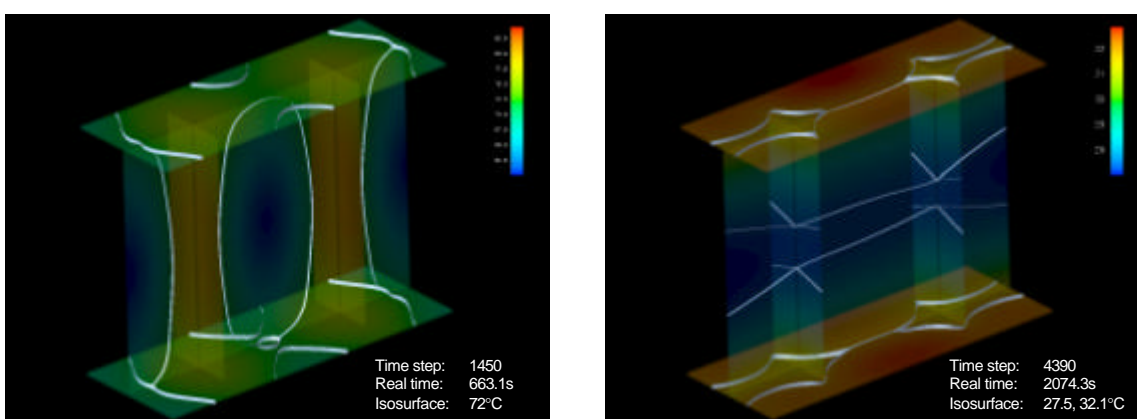
széles. A négy keresztborda pedig 6 mm vastag és 84 mm széles. Az analízis során, 20°C környezeti hőmérséklet mellett, egy leegyszerűsített hoforrás – három egymást követő 1500°C hőmérsékletű csomópont – halad végig a gerinclemez és az övek illetve a gerinclemez és a keresztbordák metszésvonalain.

Az 1. ábra mutatja a végelelemes modellt és a hőmérséklet-eloszlást, a hoforrás két különböző helyzetében. A hoforrás eloször a gerinclemez és az alsó öv metszésvonalain (a gerinclemez mindkét oldalán egyidejűleg), majd a gerinclemez és a felső öv találkozásánál halad végig, balról jobbra. Ezt követően a gerinclemez és a bal oldali keresztborda metszésvonalain (a gerinclemez és a borda mindkét oldalán egyidejűleg), majd a gerinclemez és a jobb oldali borda találkozásánál halad végig, lentől felfelé.



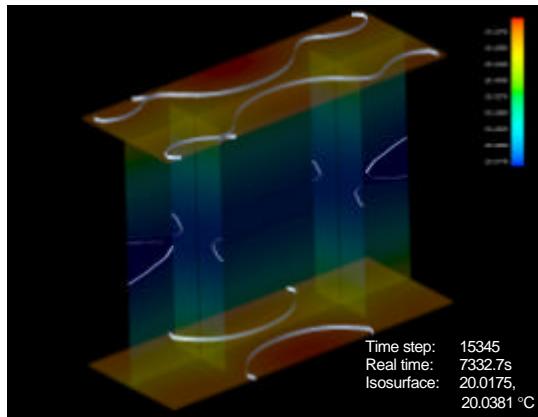
1. ábra: Végelelem modell és a mozgó hoforrás

A 2. és 3. ábrák a hosszú lehelési folyamat néhány lépésekor kialakuló hőmérséklet-eloszlást mutatják. Ezekon az ábrákon a jobb szemléltetés érdekében a modell átlátszó és néhány izotermikus felület is berajzolásra került (az ábrák az Open Visualization Data Explorer [14] adatfeldolgozó programmal készültek).



2. ábra: Lehelés közben





3. ábra: Szobahőmérséklet közelében

A bemutatott mintapélda nagyon sok szempontból (pl. hoforrás modell, anyagjellemzők, hőátadási együttható értéke) még igen távol esik a tényleges hegesztési folyamat modellezésétől, de még a hiányosságok ellenére is az eredmények jellege realisztikusnak tűnik. A mintapélda tapasztalatai alapján úgy tűnik, hogy a további fejlesztés során kulcsfontosságú lesz az igen hosszú lehülési szakasz modellezésének minél hatékonyabbá tétele.

## 6. A KUTATÁS FOLYTATÁSA

A hőterjedés analízáló program mellett szükség van egy általános feszültség analízáló program megírására is. Amennyiben ezek az alapvető programok már rendelkezésre állnak, kezdődhet a hegesztés speciális jelenségeinek (pl. mozgó hoforrás, halmazállapot-változás) beépítése. Ez minden bizonnyal maga után vonja a végesselemez hálógeneráló program igényeknek megfelelő módosítását is (pl. varrat profiljának pontosabb modellezése).

Emellett meg kell vizsgálni az egyes numerikus módszerek hatékonyságát hegesztés szempontjából és megkeresni azok optimális kombinációját. Mind a hatékonyság, mind a pontosság igénye megköveteli a szimuláció folyamatos ellenőrzését. Ezt meglévő irodalmi adatok, illetve saját laboratóriumi mérések alapján kívánjuk végrehajtani. A kutatás célja olyan módszer kifejlesztése, amellyel tetszőleges hegesztett mérnöki szerkezetek vizsgálhatók, aminek következtében a laboratóriumi mérésekhez nem feltétlen szükséges külön erre a célra legyártott próbatestek használata. Reményeink szerint a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában végzendő egyéb kísérletekhez legyártott próbatesteken végzett mérések (pl. kezdeti deformáció) elegendő adatot biztosítanak az ellenőrzéshez.

Amennyiben a program már megfelelően működik egy processzoron, megkezdődhet a program parallelizációja. Ehhez szükséges a parallelizációs módszerek hegesztés szempontjából való értékelése. Mint már korábban említettük a hegesztés bizonyos sajátosságai jól kihasználhatóak lehetnek a parallelizáció során.

A program több processzoron való futtatásával lehetővé válik bonyolult, valós szerkezetek gyártásának hatékony szimulációja és a virtuálisan legyártott szerkezeteken virtuális kísérletek végrehajtása. A kutatás ezen szakaszában a hangsúly átkerül a kifejlesztett módszer alkalmazására és annak kutató-fejlesztői gyakorlatba való integrálására.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] Masubuchi, K.: *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, 1980
- [2] Wikander, L., Karlsson, L., and Nasstrom, M., Webster, P.: *Finite Element Simulation and Measurement of Welding Residual Stresses*, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2(4): pp 845-864, 1994
- [3] Zacharia, T., Vitek, J.M., Goldak, J.A., DebRoy, T.A., Rappaz, M., Bhadeshia, H.K.D.H.: *Modeling of Fundamental Phenomena in Welds*, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 3(2): pp 265-288, 1995
- [4] Masubuchi, K.: *Prediction and Control of Residual Stresses and Distortion in Welded Structures*, International Symposium on Theoretical Prediction in Joining and Welding, pp 71-88, JWRI Osaka University, 1996
- [5] Michaleris, P., DeBiccari, A.: *Prediction of Welding Distortion*, *Welding Journal*, 75: pp 172s-181s, 1997
- [6] Bachorski, A., Painter, M.J., Smailes A.J., Wahab, M.A.: *Finite-Element Prediction of Distortion during Gas Metal Arc Welding using the Shrinkage Volume Approach*, *Journal of Material Processing Technology*, 92-93: pp 405-409, 1999
- [7] Runnemalm H., Hyun, S.: *Three-Dimensional Welding Analysis using Adaptive Mesh Scheme*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 189: pp 515-523, 2000
- [8] Lindgren, L.-E.: "Finite Element Modeling and Simulation of Welding Part 1: Increased Complexity", *Journal of Thermal Stresses*, 24: pp 141-192, 2001
- [9] Oddy, A.S., Lindgren, L.-E.: *Modeling in Welding, Hot Powder Forming and Casting*, chapter Mechanical Modeling and Residual Stresses, pp 31-59, ASM International, 1997
- [10] Radaj, D.: *Heat Effects of Welding*, Springer-Verlag, 1992
- [11] Lindgren, L.-E.: "Finite Element Modeling and Simulation of Welding Part 2: Improved Material Modeling", *Journal of Thermal Stresses*, 24: pp 195-231, 2001
- [12] Jaluria, Y., Torrance, K.E.: *Computational Heat Transfer*, Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences, Hemisphere Publishing Corp., 1986
- [13] Lindgren, L.-E.: "Finite Element Modeling and Simulation of Welding Part 3: Efficiency and Integration", *Journal of Thermal Stresses*, 24: pp 305-334, 2001
- [14] Open Visualization Data Explorer, Version 4.1.3, 2002, [www.opendx.org](http://www.opendx.org)