

AZ ÍVHEGESZTÉSI FOLYAMATOK VÉGESELEMES MODELLEZÉSÉNEK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI

APPLICATION POSSIBILITIES OF FINITE ELEMENT MODELING OF ARC WELDING PROCESSES

Dobosy Ádám^{}, Gáspár Marcell^{**}*

ABSTRACT

The finite element modelling is a numerical tool for approximation solutions that is suitable for the analysis of many engineering problems. The role of finite element modelling is getting more important in the field of material technologies, especially in welding. Welding technology is a complex process that requires a number of factors to model. That is why the proper modelling of welding and the perfect approximation of real conditions is a very difficult task. However, with the help of a successful model, the cost and time of production could be significantly reduced. In this paper, we present the difficulties of arc welding modelling and their solutions, as well as the possibilities of using finite element modelling through practical examples.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban alapkövetelmény, hogy egy termék teljes életpályájára vonatkozó információkat szoftveresen is kezelni tudjunk, így a termékről minden műszaki információ rendelkezésre álljon. Ezeket a követelményeket elégítik ki többek között a CAD rendszerek (Számítógéppel segített mérnöki tervezés), a CAM rendszerek (Számítógéppel segített gyártás) és a CAE rendszerek (Számítógéppel segített mérnöki tevékenység). A különféle végeselemes szoftverek a CAE rendszerek csoportjába tartoznak. Ezen szoftverekkel oldható meg egy termék vagy szerkezet várható viselkedésének szimulációja. Számos kereskedelmi forgalomban elérhető végeselemes szoftver létezik, ilyen például a FEMAP, az ANSYS, a MARC, az ABAQUS, az ADINA, a SYSWELD stb.

A végeselemes módszer egy közelítő megoldásokkal szolgáló numerikus eszköz, amely számos mérnöki probléma elemzésére alkalmas. A végeselemes módszer háttérben parciális differenciálegyenletek közelítő megoldása áll. Elmondható, hogy napjainkban már nélkülözhetetlen eszköze a mechanikai elemzéseknek, mivel gyakorlatilag minden természeti jelenség és viselkedés leírására képes.

A végeselemes modellezés szerepe egyre inkább előtérbe kerül az anyagtechnológiák területén is, különös tekintettel a képlékenyalakításban és a hegesztésben [1],[2]. Szemben azonban más területekkel a hegesztés önmagában is egy összetett folyamat, amelynek modellezéséhez számos tényezőt kell figyelembe venni. Éppen ezért a hegesztéstechnológiák megfelelő modellezése, a valós állapot minél tökéletesebb közelítése igen nehéz feladat.

Ugyanakkor egy sikeres modell segítségével a gyártás költsége és idő ráfordítása számottevően csökkenthető. A végeselemes modell segítségével valós hegesztett kötés nélkül határozhatóak meg a szükséges hegesztési paraméterek, sorrendtervek, valamint a hegesztést követő maradó alakváltozások és feszültségek, a keletkező szövetszerkezet típusa és mennyisége is meghatározható.

Jelen közleményben bemutatjuk az ívhegesztések modellezésének nehézségeit, illetve azok megoldási lehetőségeit, valamint gyakorlati példákon keresztül alkalmazási példákat mutatunk be valós ipari feladatok megoldásából.

2. AZ ÍVHEGESZTÉSEK MODELLEZÉSÉNEK NEHÉZSÉGEI

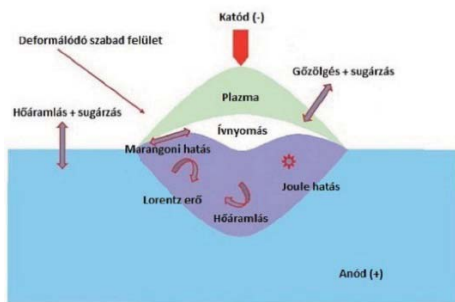
A hegesztés numerikus modellezésének alapja egy időben változó termomechanikai analízis. A mozgó hőforrás alapján meghatározható a szerkezetben kialakuló hőmérséklet eloszlás, amiből számíthatóak a sajátfeszültségek és alakváltozások. A teljes hegesztési folyamatot leíró modellezés során többek között az alábbi nehézségekkel kell számolni [2],[3]:

- anyagjellemzők adatainak hiánya a hőmérséklet függvényében,
- a gyakorlatban használt anyagok ötvözöttek nem pedig tiszta fémek, ami megnehezíti a fázisátalakulások hatásainak pontos figyelembevételét a különböző hőmérsékleteken,
- a hőforrás pontos modellezése, ami magában foglalná a villamos ív fizikáját és a megolvadt anyag folyadékként való kezelését egyaránt (lásd 1. ábra),

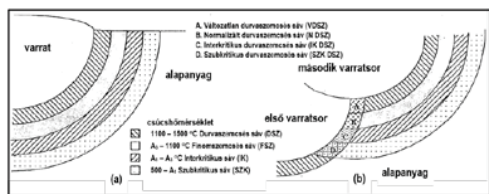
^{*} adjunktus, Miskolci Egyetem. Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet

^{**} egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet

- megfelelő közelítő hőforrás modell kiválasztása adott feladatra (Rykalin, Rosenthal, stb.),
- hegfördőben, hőhatásövezetben lejátszódó összetett szövetszerkezeti változások modellezése,
- varratsorok kölcsönhatása, többretegű varratok esetében az egyes rétegek közötti interakció modellezése (2. ábra),
- védőgáz hatása a varrat alakjára,
- hozaganyag adagolásának módja, hozaganyag varratfördőbe jutásának folyamata,
- feszültség-alakváltozás modellezésének nehézsége,
- a kellően részletes modellek számítási ideje túl magas.



1. ábra. A villamos ívben és hegfördőben lejátszódó folyamatok [2]



2. ábra. A hőhatásövezeti sávok egyrétegű és többretegű hegesztett kötések esetében [4]

3. A MODELLEZÉS NEHÉZSÉGEINEK MEGOLDÁSAI

A fenti nehézségek leküzdésére és a futtatási idő elfogadható mértékűre való csökkentéséhez bizonyos egyszerűsítések bevezetése szükséges. Az alábbiakban a leggyakrabban használt módszereket és azok alkalmazásának korlátait foglaltuk össze [2],[5].

3.1 Futtatott folyamatok szétválasztása

A fémek maradó alakváltozása során a mechanikai energia egy része hőenergiává alakul, ami ömlesztő hegesztési eljárások esetében több nagyságrenddel elmarad a hegesztés által bevitt hőtől és csak elhanyagolható mértékben befolyásolja a hőmérséklet eloszlást. Ez lehetővé teszi az analízis két független lépésre való osztását.

Első lépésben meghatározható a szerkezetben a hegesztés és a kihűlés teljes időtartama alatt kialakuló hőmérséklet eloszlás.

Ez alapján a második lépésben számíthatóak a sajátfeszültségek és a maradó alakváltozás.

Másik megoldás, hogy minden egyes időlépésben lefuttatjuk a hőmérsékletelemzést majd közvetlenül utána a feszültségelemzést. Ez lehetővé teszi, hogy a számítás a következő lépésében a hőmérsékletelemzést már egy új, a végbement maradó alakváltozásnak megfelelő geometrián futtassuk.

Legtöbb gyakorlati esetben nincs szükség erre a megoldásra, de előfordulhat, hogy az alakváltozást követően annyira megváltoznak a hőmérsékletelemzést peremfeltételei (például két, korábban egymáshoz nem kapcsolódó felület összeér), hogy ezt nem lehet figyelmen kívül hagyni.

A kölcsönhatás a két elemzés között nem minden esetben hanyagolható el, mint például a súrlódáson alapuló hegesztési eljárások (dörzshegesztés) esetén.

3.2. Egyszerűsített anyagmodell

A nagy hőmérsékleten kialakuló feszültségeknek kicsi a hatásuk a maradó feszültségekre. A numerikus problémák elkerülésére ezért megtehetjük, hogy egy adott hőmérséklet felett elhanyagoljuk hatásukat, azaz a korábban említett hőmérsékletfüggő paraméterek értékeit, közelítésnek, nullának vesszük fel. A szimuláció pontossága javítható azzal, hogy egy hőmérsékletár helyett, több értéket veszünk figyelembe, amelyek felett fokozatosan hanyagolunk el bizonyos jelenségeket.

Gyakori megoldás a fázisátalakulás hatásainak (térfogatváltozás, anyagjellemzők változása) elhanyagolása. Amennyiben a folyáshatár még viszonylag jelentős a fázisátalakuláshoz tartozó hőmérsékleten, az átalakulás hatása jelentős lehet. Ennek ellenére, ebben az esetben is gyakran elhanyagolhatók a fázisátalakulás hatásai.

3.3. Hőforrás leírása helyettesítő modellel

Tekintve, hogy az ívhegesztések során alkalmazott villamos ív leírása, illetve az olvadt hegfördőben lejátszódó áramlási folyamatok igen összetettek, ezért minden esetben valamilyen helyettesítő, egyszerűsített hőforrás modell alkalmazására kerül sor a különböző hegesztő eljárások modellezése során.

Ilyen modellek például a Goldak modell (ívhegesztő eljárások esetén), a Conical modell (sugaras hegesztő eljárások esetén), a Rykalin-2D modell (hegesztési hőciklus definiálása többsoros varrat esetén), a Rykalin-3D modell (hegesztési hőciklus definiálása többsoros varrat esetén), a Rosenthal modell (hegesztési hőciklus definiálása többsoros varrat esetén), illetve a felületi hőforrás modell (felrakóhegesztések esetén) [6].

Adott hegesztő eljárás modellezése során a feladat a megfelelő hőforrás modell kiválasztása, illetve a választott modell megfelelő paramétereinek meghatározása.

Ezek hiányában az alkalmazott végeelemes modell számítása nem fogja közelíteni a valós körülményeket.

3.4. Hegesztőanyagok elhanyagolása

Védőgázos eljárás esetében a védőgáz hatását (levegő elleni védelem, gázáramlás, gáz hűtő hatása) minden esetben figyelmen kívül hagyjuk, a folyamatok szabad levegőn zajlanak. Hozaganyagos eljárás esetében a hozaganyag felhevítése, megolvasztása, anyagátmenete a hegfürdőbe szintén az esetek többségében elhanyagolásra kerül.

Ilyen esetben csak a varrat anyagát lehet kiválasztani, figyelembe véve az alapanyag és a hozaganyag összetételét és az adott hegesztő eljárásra jellemző keveredési arányát. A program valós keveredést nem számol. Ebből következik, hogy a védőgáz szerepét a kialakuló hegfürdőre és így a varratra nem lehet figyelembe venni, a szimuláció során a keletkező varrat alakját alapvetően az alkalmazott helyettesítő hőforrásmodell fogja meghatározni.

3.5. Végeelemes háló egyszerűsítése

Tekintve, hogy a végeelemes programok számításának alapvető elemei a hálózás során létrehozott cellák, ezek száma alapvetően meghatározza a számítás pontosságát és sebességét. Minél kisebbek a cellák, vagyis számuk minél nagyobb, a számítás annál pontosabb, azonban időigényesebb.

A modellezés szempontjából meghatározó helyek (varrat, hőhatásövezet) hálózása a lehető legsűrűbb kell, hogy legyen. A többi modellrész esetében azonban elegendő lehet egy ritkább, nagyobb cellákat tartalmazó háló alkalmazása.

3.6. Többsoros varratok egyszerűsített szimulálása

Az ipari gyakorlatban előforduló feladatok megkövetelik a háromdimenziós szimuláció futtatását. Azonban összetett, többsoros varratok esetén ez megsokszorozza a számítások összetettségét. Abban az esetben, ha nem a teljes szerkezet maradó alakváltozásának és feszültségének meghatározása a cél, hanem a varratban kialakuló hőmérséklet-eloszlás, szövetszerkezet, keménység becslése a kétdimenziós szimuláció is elegendő lehet.

Ebben az esetben csak a varrat egy „szeletét” modellezzük, azonban a kötés teljes keresztmetszetét részletesen le lehet modellezni.

4. AZ ÍVHEGESZTÉSEK MODELLEZÉSÉRE ALKALMAS SZOFTVEREK

Jelenleg számos programcsomag áll rendelkezésre a hegesztési folyamatok minél szélesebb körű numerikus modellezésére. Léteznek általános célú, komplex rend-

szerek, amelyek nem csak a hegesztés modellezésére alkalmasak, hanem más folyamatok általános célú leírására, mint például ANSYS, MARC, ABAQUS vagy NASTRAN.

Léteznek azonban célszoftverek is, amelyek már célzottan csak a hegesztés, illetve sok esetben a hőkezelés, modellezésére alkalmasak. Ezek általában a hegesztés körülményeit pontosabban megbecsülni képes alkalmazások, azonban még így is szem előtt kell tartani a korábban felsorolt nehézségeket. Ilyen célszoftverek VISUAL ENVIRONMENT (SYSWELD), SORPASS, COMSOL, illetve ANSYS-APDL.

A jelen közleményben bemutatott vizsgálatokat az ESI Group által fejlesztett Visual Environment és Sysweld programcsomag segítségével végeztük el, amelyet célzottan a hegesztési folyamatok végeelemes elemzéséhez fejlesztettek ki. A Visual Environment a végeelemes modellezési feladat összeállítását segítő grafikus környezetre utal, a Sysweld pedig a numerikus számítást végzi.

5. HEGESZTÉSBŐL ADÓDÓ MARADÓ ALAKVÁLTOZÁS CSÖKKENTÉSÉNEK ELEMZÉSE

Az ívhegesztési folyamatok modellezésének egyik leggyakoribb alkalmazása a maradó alakváltozások nagyságának becslése, ezek alapján pedig a megfelelő hegesztési paraméterek meghatározása. A bemutatott példa az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet egyik ipari partnerének végzett K+F munka, amelynek célja a 3. ábrán bemutatott gyártmány optimális hegesztési sorrendtervének meghatározása volt, a minimális maradó alakváltozás elérése szempontjából.



3. ábra. A vizsgálandó alkatrész az ellenőrzést szolgáló idomszerben

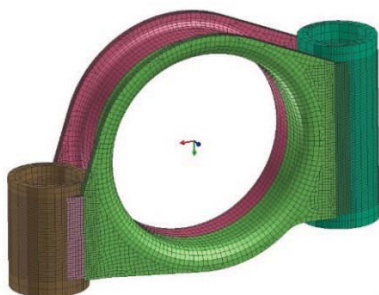
A gyártási probléma abban nyilvánult meg, hogy a hegesztésből adódó alakváltozás miatt a csövek alsó síkjai (homlokfelületei) közötti távolság túréson kívül esett. Az alkalmazott gyártástechnológiával nem tudták tartani a csövek homlokfelületei közötti távolságra előírt $10,1 \pm 0,2$ mm túrés tartományt. Az alkatrész hegesztését Fronius hegesztő berendezéssel, aktív védő-

gázos fogyóelektródás ívhegesztés CMT eljárás-változatával, hegesztő robot segítségével végezték. Az alkalmazott huzalelektróda átmérő 0,8 mm, a huzal-előtolási sebesség 14,3 m/min, a hegesztési sebesség 60 cm/min, a vonalenergia 250 J/mm, míg a védőgáz 90% Ar + 10% CO₂ volt.

A munka célja volt vége-selemes modellezéssel meghatározni azt a hegesztéstechnológiát, továbbá azokat a megfogási és hegesztési feltételeket, amelyekkel a hegesztést követően a készülékből tűréshatárokon belüli alkatrész kerül ki.

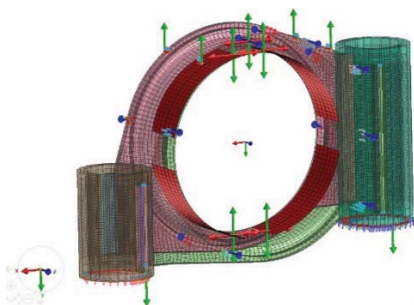
A vizsgálandó alkatrész hegesztésének modellezése a következő fő lépésekből tevődött össze.

1. A vége-selemes háló elkészítése (4. ábra).



4. ábra. Az alkatrész hálózott modellje

2. A hegesztéssel kapcsolatos paraméterek és peremfeltételek megadása:
 - a. az alapanyagra és hozaganyagra vonatkozó anyag törvények megadása,
 - b. a hőforrás modell kiválasztása és paramétereinek beállítása,
 - c. a hegesztési pályák megadása,
 - d. az alapvető hegesztési paraméterek megadása,
 - e. a hűtési feltételek beállítása,
 - f. a peremfeltételek beállítása (megfogások és mechanikai terhelések) (5. ábra),

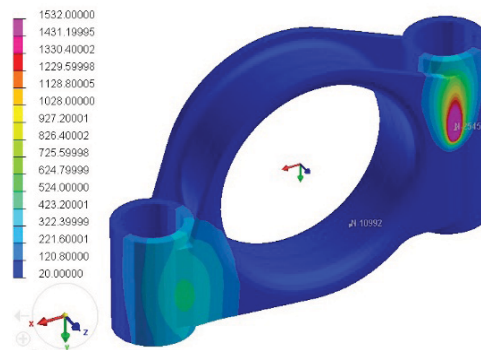


5. ábra. Az alkatrész befogásakor értelmezett mechanikai peremfeltételek

- g. a numerikus számításához szükséges paraméterek megadása.
3. Numerikus számítás, futtatás.
 4. A futtatási eredmények értékelése alapján döntés a bemeneti modell, a beállítási paraméterek, illetve más adatok esetleges módosításáról.

5. A hegesztési technológiára vonatkozó következtetések megfogalmazása a végleges modellezési eredmények részletes, problémaorientált elemzése alapján.

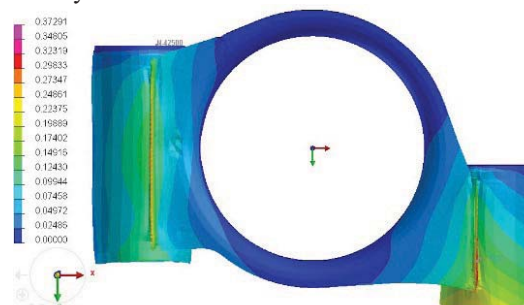
A szimuláció futtatása után, az eredmények ellenőrzésére minden esetben érdemes megvizsgálni a kialakuló hőmérsékletmező minimális és maximális értékeit, illetve a mező eloszlását, ez a jelen feladat kapcsán a 6. ábrán látható.



6. ábra. A gyártás során alkalmazott hegesztési sorrend során kialakuló hőmérsékletmező pillanatképe, °C

A modell validálása után van lehetőség a hegesztési paraméterek változtatására, a hegesztési sorrendterv módosítására. A jelen feladat kapcsán a hegesztendő munkadarab négy kötést tartalmaz, így a kötések elkészítésének sorrendje, illetve a kötések iránya meghatározó az alakváltozások szempontjából.

A négy varrat elkészítését követően kialakuló maradó elmozdulást a 7. ábra szemlélteti, a gyártási paraméterek esetén, amelyen a kedvezőbb szemléltetés érdekében a torzulás mértékét felnagyítottuk. A csőszerű alkatrészek homlokfelületei közötti elmozdulás (d_y) 10,29 mm-re adódott, amely a 10,1+/-0,2 mm megengedett tűréstartomány felső határa.



7. ábra. Hegesztést követő maradó elmozdulás (alapeset), mm

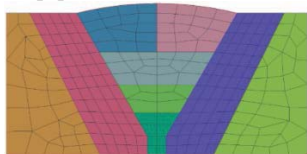
Több lehetséges hegesztési sorrendtervet és megfogási módot is megvizsgálva azt kaptuk, hogy 250 J/mm vonalenergia és 2000 N leszorító erő alkalmazásával a d_y elmozdulás 10,276 mm, míg a legjobb eredmény 200 J/mm vonalenergia, 188 N terhelőerő alkalmazásával, két oldalról egy-egy robot használatával, új hegesztési sorrend mellett, ezáltal az elmozdulás 10,169 mm.

Az alkatrész csövei alsó homlokfelületeinek távolságára vonatkozó tűrés-tartomány betartását elsősorban a hőbevitel, azaz a vonalenergia csökkentésével lehet elérni, ugyanakkor a csövek homlokfelületeit leszorító erő növelése, illetve a hegesztési sorrend és az irányok megváltoztatása is hatékonyan csökkenti a maradó elmozdulások, illetve alakváltozások mértékét. A leghatékonyabb megoldás az, amikor az alkatrész hegesztését párhuzamosan, egyszerre két oldalról végzik, PF és PG pozíciókban. Nyilvánvalóan ez a megoldás jelentős beruházással jár. Amennyiben a felhasználónak korlátozott lehetőségek állnak rendelkezésre, akkor a többi megoldás is szóba jöhet.

6. HEGESZTÉSI FOLYAMATOK MODELLEZÉSE TÖBBSOROS VARRATFELÉPÍTÉS ESETÉN

Az ipari gyakorlatban acélszerkezetek hegesztésekor általában a többsoros varratfelépítés a jellemző. Ennek során, a többszörös hőbevitelnek köszönhetően, a hőhatásövezet, illetve magának a varratnak a felépítése is összetett [4]. A legtöbb esetben a többsoros felépítés mind a modell összetettségét, mind a számítási idő nagyságát megnöveli, számos esetben nagyságrendi méretekkel.

A többsoros varrat modellezését igen sokszor csupán kétdimenziós modellen végzik el. Ennek leggyakoribb oka a modell összetettsége, bonyolultsága és ennek megfelelően a szimuláció nagy ideje. Kétdimenziós modell alkalmazása során nagyságrendekkel kisebb az elemszám, gyorsabb a számítási idő. Azonban figyelembe kell venni, hogy ebben az esetben nem lehetséges a háromdimenziós modellezésből adódó teljes szerkezet vizsgálata, csupán egy kiválasztott keresztmetszetben lejátszódó folyamatok modellezhetőek. A bemutatott feladat során csak a keresztmetszetben vizsgáltuk a kötés jellemzőit [7].



8. ábra. A vizsgált kétdimenziós geometriai modell részlete

A modellezett lemezek vastagsága 15 mm, míg a szélességük 140 mm, továbbá a hegesztéshez használt 2 mm illesztési hézag figyelembevételével 242 mm volt a modell legszélső pontjainak távolsága. A varratkorona feltételezett magassága 1 mm, a hőhatásövezet feltételezett szélessége pedig 5-5 mm volt. A ténylegesen alkalmazott geometriai modell a 8. ábrán látható.

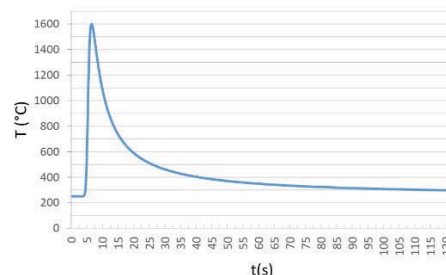
A következő lépésben a hegesztés hőfolyamatának definiálására került sor. Eltérően az előző feladatnál be-

mutatott esettől, tekintve, hogy a vizsgált modell csupán kétdimenziós, nem a helyettesítő hőforrás modell megadása szükséges, hanem egy adott varratsorban lejátszódó hőciklust kell definiálni. Jelen feladathoz a Rykalin-3D modell alapján határoztuk meg a konkrét hőciklusokat, úgy, hogy a megadott hegesztési paraméterek és a Rykalin-3D modell alapján a helyvektor értékének megadásával állítottuk elő a hőciklust. A hegesztési paraméterek esetében az előző feladatnál már bemutatott adatok megadása szükséges.

A hegesztési hőfolyamat modellezése során kétféle hőciklust készítettünk. Külön hőciklust kapott a gyöksor, valamint egy hőciklus készült a töltő-, és takaró-sorok hegesztésének modellezéséhez. Erre azért volt szükség, mert a valós hegesztett kötések esetében is a hegesztési paraméterek változnak sorról-sorra, a gyöksor esetében általában kisebb hőbevitelt alkalmaznak, mint a későbbi sorok esetében. A hegesztés paramétereit az 1. táblázatban foglaltuk össze. Az alkalmazott, definiált hőciklusok közül a töltő soroknál alkalmazott a 9. ábrán látható. A program ezen függvények szerint rendeli hozzá a hőciklust az egyes számítási pontokhoz.

1. táblázat Hegesztési paraméterek a hőciklusok előállításához

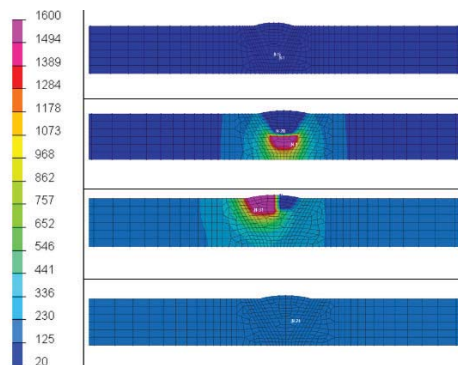
	$T_{elő}/T_{re-}$ tegközi	I_b [A]	U_{iv} [V]	V_{veg} [cm/mm]	$t_{várakozás}$ [s]	Q [J/mm]	$t_{s,5/5}$ [s]
Gyöksor	20	140	22,4	24	0	628	2,7
Töltő- és koronasorok	250	260	32,6	36	360	1130	13



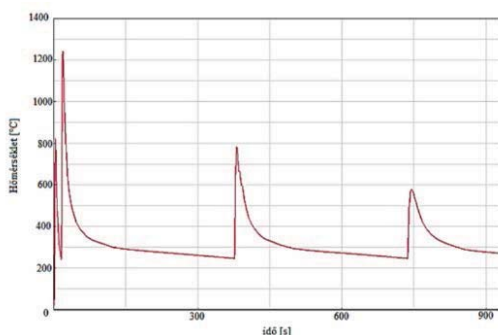
9. ábra. A töltő- és a takaró-sorok modellezése során alkalmazott Rykalin-3D modell szerinti hőciklus

Az előző feladat kapcsán már bemutatott módon, az első lépés a modell validálása a hőmérsékletmező alapján (lásd 10. ábra). Továbbá a program képes az elkészült modell bármely pontjában a szimuláció során kialakuló hőciklusokat megjeleníteni. Ezen diagramok segítségével lehetőség van a különböző zónákban lejátszódó hőciklusok előrejelzésére. A hőhatásövezet kritikus zónájának tekinthető interkritikus durvaszemcsés sávot kiválasztva, a 11. ábra szemléltet egy jellegzetes pont esetében kialakuló hőmérséklet-változást. A hőhatásövezeti hőciklus ismeretében lehetőség van a többretegű varratokban kialakuló lokális hőhatásövezeti sávok fizikai szimulációjára, amelynek köszönhetően a kritikus sávok mérete a későbbi anyagvizsgálatokhoz (pl. ütővizsgálat) szükséges méretben előállíthatók.

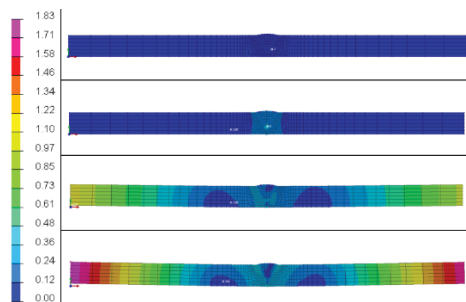
Ennek eredményeként kapcsolat állítható fel a numerikus és a fizikai szimuláció között [8],[9]. A számítógépes modellezés további eredményeként a maradó alakváltozás figyelhető meg a 12. ábrán.



10. ábra. A hőmérséklet változása a hegesztés folyamán



11. ábra. Egy tetszőlegesen kiválasztott hőhatásövezeti pontban lejátszódó hőmérséklet ciklus



12. ábra. A maradó alakváltozás mértéke a hegesztés során

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A jelen cikkben bemutatott végeselemes modellezési példákon keresztül látható, hogy a hegesztési folyamatok numerikus modellezése nem egyszerű feladat, igen sok tényezőt kell figyelembe venni.

Ugyanakkor a peremfeltételek megfelelő megadásával, a szükséges egyszerűsítésekkel és elhagyásokkal a

valós körülményeket jól megközelítő modellt lehet alkotni.

A bemutatott példákon keresztül látható, hogy a hegesztési paraméterek optimalizálása, a megfelelő hegesztési sorrend meghatározása valós hegesztett kötések nélkül is megvalósítható. A hőciklus hatására kialakuló alakváltozások, maradó feszültségek becslése külön fizikai mérések nélkül is elvégezhető. A többsoros varratok esetében az egyes pontokban lejátszódó hőciklusok ismeretében pedig kapcsolat teremthető a fizikai szimulációval, ezáltal az ott kialakuló szövet-szerkezet minősége, eloszlása, keménysége is pontosan meghatározható valós hegesztett kötés elkészítése nélkül.

A különböző helyettesítő hőforrásmodellek lehetővé teszik továbbá akár legmodernebb lézer- és elektronsugaras hegesztő eljárások modellezését is.

7. IRODALOM

- [1] TISZA, M.; GÁL, G.; KISS, A.; KOVÁCS, P. Z.; LUKÁCS, Zs.: *Számítógépes mérnöki módszerek alkalmazása a képlékenyalakításban*, Gép, 64 (2), 2013. pp. 11-14.
- [2] GÁSPÁR, M., BALOGH, A.: *Számítógéppel segített technológiai tervezésre alkalmas programok ömlesztő hegesztő eljárások esetén*, Tanulmány, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2012.
- [3] PALOTÁS, B.: *CAD/CAM rendszerek a hegesztésben*, Digitális Tankönyvtár, 2013.
- [4] DAVIS, C., KING, J.: *Cleavage initiation in intercritically reheated coarse-grained heat affected zone: Part I. Fractographic evidence*. Metallurgical and Materials Transactions A 25, 1994. pp. 563-573.
- [5] PRÉM, L., BALOGH, A.: *Számítógéppel segített technológiai tervezésre alkalmas programok ömlesztő a sajtoló hegesztő eljárások esetén*, Tanulmány, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2012.
- [6] GOLDAK, J. A., AKHLAGHI, M.: *Computational welding mechanics*, Springer, 2005. ISBN 0-387-23287-7
- [7] CSORBAI, P.: *Termikus- és mechanikai folyamatok végeselemes modellezése többsoros varratfelépítés esetén*, MSc diplomatervezés (témavezető: Dr. Gáspár Marcell), 2016.
- [8] KONCSIK Zs., FÓTOS R., LUKÁCS J.: *A fizikai szimuláció és alkalmazása az anyagtechnológiákban*, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban Konferencia, Debrecen, 2012. pp. 211-217.
- [9] KUZSELLA L., LUKÁCS J., SZÜCS, K.: *Fizikai szimulációval végzett vizsgálatok S96QL jelű, nagyszilárdságú acélon*, Gép, 63 (11), 2012. pp. 37-42.