

A HŐMÉRSÉKLETMEZŐ ELŐÁLLÍTÁSA NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTÉSÉNEK VÉGESELEMES MODELLEZÉSEKOR

REALIZATION OF TEMPERATURE FIELD BY FINAL ELEMENT MODELLING DURING THE WELDING OF HIGH STRENGTH STEELS

Gáspár Marcell¹

ABSTRACT

The welding of high strength steels requires different concept for the welding technology planning than normal structural steels. Therefore, it can be reasonable to use FEM for the optimization of welding parameters. This paper aimed to present the numerically defined temperature field, and the welding heat cycles of the different HAZ zones. The results of FEM are validated by a real welding experiment.

1. BEVEZETÉS

A végeselemes modellezés mechanikai hátterének kidolgozása döntően a XX. század 60-as, 70-es éveire tehető, a nemlineáris végeselemes feladatok, mint maga a hegesztés, megoldására pedig a 80-as évektől kezdődően nyílt lehetőség. A mechanika fejlődésével szoros összhangot mutatott a számítástechnika fejlődése is. Míg korábban az egyszerűbb lineáris feladatok megoldása, mint például egy rúd rugalmas alakváltozásának végeselemes modellezése is akár napokat vett igénybe, mára a végeselemes szempontból igen összetettnek bizonyuló ún. nemlineáris, ráadásul kapcsolt hegesztési folyamatok egy napjainkban átlagosnak mondható hétköznapi számítógépen akár néhány óra alatt modellezhetők [4].

A végeselemes modellezés alkalmazásának előnyei az alábbiakban foglalhatók össze:

- gyártási folyamatok mélyebb megértése,
- prototípusok és fizikai tesztek számának csökkentése,
- tudatosabb gyártás, jobb minőség,
- gyorsabb piacra lépés,
- alacsonyabb fejlesztési és gyártási költségek [3].

A járműiparban egyre szélesebb körben alkalmazott nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológiájának tervezéséhez különösen is célszerű lehet a végeselemes programok alkalmazása. Ezek a programok egyrészt segítséget nyújtanak a kutatás során a fizikai folyamatok mélyebb megértésében, másrészt pedig alkalmazásukkal

(pl. deformációk csökkentésére optimalizált hegesztési sorrendterv) csökkenteni lehet a fizikai tesztek számát, amely a költségesnek mondható nagyszilárdságú alap- és hozaganyagok tekintetében költségcsökkentés eredményezhet.

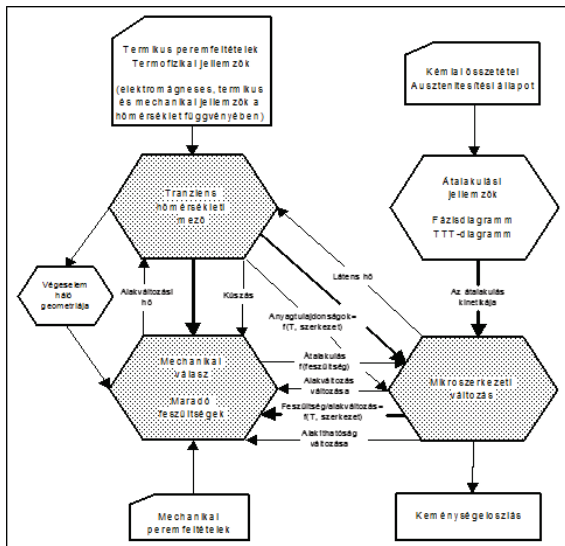
Napjainkban több, kimondottan a hegesztési folyamatok végeselemes modellezésére szolgáló célrendszer áll rendelkezésre, amelyek közül a továbbiakban a SYSWELD programhoz kapcsolódó VISUAL ENVIRONMENT-tel foglalkozom részletesen.

2. HEGESZTÉSI FOLYAMATOK VÉGESELEMES MODELLEZÉSE

A termikus eljárások során, mint például hegesztéskor, az anyagban rendkívül összetett, komplex változások mennek végbe. A munkadarabban a rajta végrehajtott hőciklus következményeként, hőtágulás-zsugorodás és fázisátalakulás(ok) játszódnak le. A legtöbb hegesztési feladat során a hőfolyamat következtében kialakuló alakváltozás gátolt, ez a darabban maradó feszültségeket és deformációkat okoz, amelyhez a fázisátalakulás(ok)ból származó strukturális feszültség is hozzáadódik, az alkatrészek élettartamát, üzemeltethetőségét rontva.

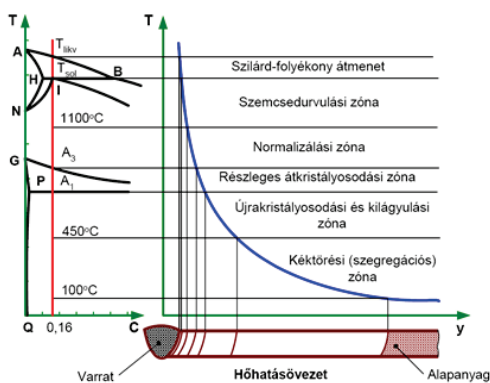
A hő-, mikroszerkezeti és mechanikai folyamatokat együttesen csatolt folyamatoknak nevezi a szakirodalom, hiszen ezek egy időben lejátszódó folyamatok [2]. A hegesztési csatolt folyamatokat foglalja össze a 1. ábra, amelyben látható, hogy egy hegesztési folyamat a modellezés szempontjából mennyire összetett. Ebből következik, hogy a végeselemes szoftverek közül viszonylag kevés az olyan program, amely a korábban említett valamennyi jelenség egyidejű modellezésére képes. Az általános rendeltetésű végeselemes programoknak különösen a mikroszerkezeti változások kezelése okoz nehézséget. A speciális folyamatok vizsgálatára ezért elsősorban egy adott gyártási folyamat modellezésére specializált célszoftverek, mint például a SYSWELD bizonyulnak a legalkalmasabbnak, amely alkalmas a szövetszerkezeti átalakulások követésére is.

¹ PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék



1. ábra. Hegesztési folyamatok végeelemes modellezése [2]

Nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológiájának tervezésekor több szempontból is célszerű végeelemes modellezést alkalmazni. A hegesztési paraméterek (ívhegesztés esetén elsődlegesen: $T_{elő}$, U , I , v_h) meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy a nagyszilárdságú acélok szövetszerkezete a hagyományos acéloktól jelentősen eltér. Ezek az acélok ugyanis kimagasló szilárdsági jellemzőiket ötvözők, hőkezelési (pl. edzés (Q) és megeresztés (HTT)) és esetenként alakítási folyamatok alkalmazásának köszönhetik. A hegesztési hőciklus hatására azonban az alapanyag szövetszerkezete megváltozik és a hőhatásövezetben kedvezőtlen változások mennek végbe [7]. A repedésképződésnek és terjedésnek kedvező durvaszemcsés, rideg övezetek alakulhatnak ki, bizonyos esetekben pedig kilágyult övezetek jönnek létre. Ezért nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a hegesztőmérnököknek részletes információkkal kell rendelkezniük a hőhatásövezetben létrejövő folyamatokról. A 2. ábrán egy kis karbontartalmú ötvözetlen acél hegesztésekor kialakuló hőhatásövezet látható.



2. ábra. Kis C-tartalmú ötvözetlen acél hegesztésekor kialakuló hőhatásövezet [8]

Ahogy a 2. ábrán láthatjuk, a hőhatásövezet egy meglehetősen inhomogén mikroszerkezettel, és ebből adódóan változó mechanikai tulajdonságokkal rendelkező része a hegesztett kötésnek. Rendkívül eltérő tulajdonságokkal rendelkező zónák jöhetnek létre, különösen a speciális alapanyagok, mint például a nagyszilárdságú acélok esetén. A folyamatos hűtésű átalakulási diagramok alapján a szövetszerkezet előrejelzésére is alkalmas SYSWELD program segítségével egyrészt meg tudjuk határozni a hőhatásövezet különböző zónáira jellemző hőciklusokat, amelyekből következtetéseket tudunk levonni a hegesztési paraméterek megfelelőségéről, másrészt pedig az átalakulási diagramok ismeretében információt kaphatunk a létrejövő szövetek típusáról és arányáról.

Az említett programok segítségével lehetőség nyílik a nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségével kapcsolatos másik fontos témakörnek, az ún. „matching”-nek a vizsgálatára, amely a hozaganyag alapanyaghoz viszonyított szilárdságára utal. Több szakirodalom az alapanyaghoz képest kisebb szilárdságú, de nagyobb alakváltozó-képességű, ún. undermatching hozaganyagot ajánl a nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez [7]. A végeelemes modellezés alkalmazásával még a tényleges hegesztési kísérlet megkezdése előtt lehetőség nyílik undermatching típusú hegesztett kötések virtuális készítésére, a maradó feszültségek és deformációk numerikus meghatározására. Jelen cikkben a hőmérsékletmezővel és a hőhatásövezettel foglalkozom részletesen, az undermatching típusú nagyszilárdságú hegesztett kötések végeelemes analízisét a későbbiekben tervezem elvégezni. Az ilyen kötések modellezésekor általában nehézséget jelent, hogy a hozaganyag összetétele és mechanikai jellemzői eltérnek az alapanyagétól, ami az anyagjellemzők meghatározásához további vizsgálatok elvégzését teszi szükségessé. Ha még figyelembe szeretnénk venni, hogy a varrat lényegében az alapanyag és a hozaganyag keveredésének eredményeként jön létre, a modellezési feladat tovább bonyolódik.

A hegesztési folyamatok végeelemes modellezésekor több nehézséggel is találkozunk, amelyre a szoftverfejlesztők különböző megoldásokkal szolgálnak. A hegesztett szerkezetekben viszonylag ritkán alkalmaznak egysoros varratokat, ezért a végeelemes programoknak alkalmasnak kell lenniük a többsoros varratfelépítés modellezésére is. Ebben az esetben viszont jelentősen megnövekszik a modell összeállításához, valamint a számításokhoz szükséges idő.

Bár már az eddigiekben is látható volt, hogy a hegesztett kötés különböző zónáinak előállítása, a varratra vonatkozó összetétel és anyagjellemzők megadása mennyire bonyolult feladatot jelent a modellező számára, a következőkben célszerű pillantást vetni a hegfürdőben lejátszódó áramlási folyamatokra is [4]. A hegfürdőt érő erőhatások (ívnyomás, felhajtó erő, gravitáció, felületi feszültség) áramlási folyamatokat indukálnak (pl. Marangoni áramlás), amelyek befolyásolják a keveredés mértékét, az összetételbeli inhomogenitást és

a varratlakot is. Ezeknek a modellezése meglehetősen bonyolult, és túlmegy a végeselemes modellezés határán (CFD: computational fluid dynamics rendszer szükséges), ezért csak kivételes esetekben térnek ki ezeknek a folyamatoknak a virtuális modellezésére (pl. a COMSOL program a hegfürdő áramlási folyamatainak modellezésére). Ezért a SYSWELD rendszer alkalmazásakor eltekintünk a hegfürdőben lejátszódó áramlási folyamatoktól.

A leírtakból látható, hogy a hegesztési folyamatok modellezésénél a valóságot megközelíteni meglehetősen bonyolult és összetett feladat, nincs lehetőség és általában nincs is igazán szükség minden részlet vizsgálatára. Ezzel a fejezettel elsősorban a modellezés nehézségeire, összetettségére próbáltam felhívni a figyelmet. Más szemléletet és módszert igényel a hegfürdőben lejátszódó áramlási folyamatok, és ezáltal a varratlak modellezése, mint egy optimális hegesztési sorrendet és minimális maradó deformációt eredményező technológiai variáns kidolgoása [4].

A Mechanikai Technológiai Tanszéken rendelkezésre álló, a francia ESI Group által forgalmazott SYSWELD és VISUAL ENVIRONMENT végeselemes szoftvercsomagok segítségével egy átlagos ömlesztő-hegesztési folyamatról az alábbi információkat szerezhetjük [2, 3]:

- hőmérsékletmező,
- hőmérséklet gradiens,
- hűlési és hevítési sebesség,
- keletkező fázisok aránya (CCT görbe alapján),
- maradó alakváltozások,
- maradó feszültségek,
- keménység,
- folyáshatár, stb.

A programok azonban nem alkalmasak:

- hegfürdő és a (pikkelyes szerkezetű) varratfelület alakjának meghatározására,
- ömlesztési, keveredési, áramlási folyamatok modellezésére,
- a hegesztési folyamat fizikai megvalósításának modellezésére (elektromos ív, elektronsugár, huzaladagolás stb.).

A programcsalád lehetővé teszi a varratok tervezését (kialakítás, elhelyezkedés), a maradó deformációk csökkentését szolgáló hegesztési sorrend tervezését és a hegesztési paraméterek optimalizálását. A szoftverek használata segítséget jelent a fizikai szimulátoron végrehajtható hőhatásövezeti tesztek elvégzéséhez is [4, 7]. A végeselemes modellezés eredményeként meghatározott hőmérsékletmező időbeli változásának ismeretében lehetőség nyílik a szoftverből nyert hőciklusok fizikai szimulátorba történő betáplálására. Ennek köszönhetően csak kontroll vizsgálat céljából szükséges analitikus összefüggéseket (pl. Rykalin) használnunk a valóságos hegesztési hőciklus közelítéséhez [7]. Ezáltal kapcsola-

tot tudunk teremteni a végeselemes modellezés és a fizikai szimuláció között.

A cikkben szereplő modellezés során nagyszilárdságú acélok aktív védőgázos fogyóelektródás ívhegesztését (ISO számjel: 135) fogom bemutatni. Az ívhegesztési folyamat modellezése során tulajdonképpen az adott eljárásra jellemző hőforrást kell végig vezetnünk a varrat vonalán, és ez a hőforrás eredményezi a különböző hőmérsékletmezőt, az anyagszerkezeti változásokat, a maradó deformációkat és feszültségeket. Tehát nem modellezzük az elektromos ívet, el kell tekintenünk a huzaladagolástól, a cseppeleválástól és a különböző áramlási folyamatoktól. Lényegében egy mozgó hőforrást kell definiálni, amelyet a hegesztési paraméterek és valós hegesztési kísérletek alapján az adott hegesztési folyamathoz harmonizálunk.

A hozaganyaggal történő (exogén) ívhegesztési folyamatok szimulációjának egyik különlegessége a varrat modellezése, mivel a hegesztést megelőzően a leélezés miatt tulajdonképpen anyagmentes tér helyezkedik el az összehegesztendő felületek között, amit a hegesztés során a hozaganyag és az alapanyag keveréke tölt ki. A modellezés során ezt technikailag úgy oldható meg [3], hogy a varratot is megrajzolják és behálózzák, de az ott lévő elemeket csak akkor teszik aktívvá, amikor a hőforrás odaér. A nem aktív elemek is rendelkeznek bizonyos anyagtulajdonságokkal, mivel a számítás miatt az anyagjellemzők értéke nem lehet zérus, de ezeknek az értéke a nullához közelít egészen a hőforrás érkezéséig, amikor az elemek végül automatikusan felveszik az adott anyagra vonatkozó tulajdonságokat [4].

3. MODELLEZÉS LÉPÉSEI

A VISUAL ENVIRONMENT kezelőfelületén a végeselemes modell összeállítása az alábbi módon történik:

- Geometria definiálása, hálózás;
- Anyagtulajdonságok megadása: alap- és hozaganyag;
- Hegesztési folyamat paramétereinek megadása:
 - Hőforrás kiválasztása,
 - Geometria modell részeinek csoportokba rendezése (alapanyag, hozaganyag, stb.)
 - Hőforrás pályájának megadása,
 - Hegfürdő méretének megadása (hőforrás paraméterek segítségével),
 - Fajlagos hőbevitel megadása: vonalenergia (J/mm);
- Hűtési feltételek (pl. szabad levegő);
- Mechanikai peremfeltételek megadása: megfogás és terhelések;
- Számítási paraméterek megadása, fájlok generálása a számításokhoz, futtatás.

A végeeselemes analízis első lépéseként egy geometriai modellt kell definiálnunk, amelyet a technológiai szempontok figyelembevételével egy csomópontokat tartalmazó hálóra alakítunk. Lehetőség van arra, hogy külső forrásból olvassunk be egy kész geometriát, illetve magának a szoftvernek a VISUAL MESH modulja is kiválóan alkalmas a geometria megrajzolására és behálózására. Mivel hegesztés esetén nemlineáris feladatokról és kapcsolt folyamatokról van szó, ezért hálózaskor törekedni kell arra, hogy a hálózás sűrűségét csak a kritikusnak vélt részekben vegyük finomra. Tehát elsősorban a varratot, illetve annak közvetlen környezetét, a feltételezett hőhatásövezetet célszerű sűrűn behálózni.

A geometriai modell elkészítését követően az anyagtulajdonságok megadásakor segítségünkre van a szoftver anyagadatbázisa, amelyben a szerkezeti acélok közül mindösszesen az S355, a nagyszilárdságú acélok közül pedig csak a DP-W-600 és TRIP700Z szerepelnek. Ezért az általam vizsgált nagyszilárdságú szerkezeti acélok vizsgálatához (S960QL) a szoftverhez tartozó Material Data Manager elnevezésű Excel alapú programot kell használnom, amelynek segítségével a vizsgált nagyszilárdságú acélon elvégzett anyagvizsgálatok eredményeit felhasználva lehet előállítani a számításokhoz szükséges anyagjellemzőket tartalmazó fájlt. Ezek az anyagjellemzők a következők

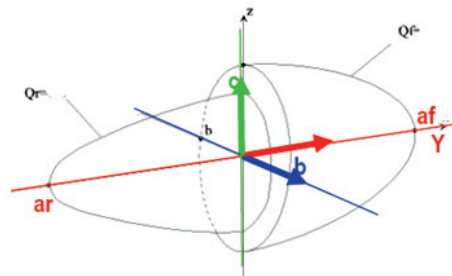
Mechanikai anyagjellemzők	Termometallurgiai anyagjellemzők
folyáshatár $R_{p0,2}(T)$	hővezetési tényező, $\lambda(T)$
alakítási szilárdság, $k_f(\varphi)$	fajhő, $c_p(T)$
Young modulusz, $E(T)$	entalpia, $h(T)$
Poisson tényező, ν	sűrűség, $\rho(T)$
Termikus nyúlás, $L(x,y,z,T)$	fázisátalakulások reakciói

1. táblázat. A modellezéshez szükséges anyagjellemzők

Az 1. táblázatban szereplő anyagjellemzők közül a GLEEBLE 3500 fizikai szimulátor segítségével elvégzett melegsakító vizsgálatokkal felvettük az $R_{p0,2}(T)$ görbét [5]. A hegesztési hőciklus eredményeként létrejövő szövetszerkezet modellezéssel történő meghatározásához szükséges folyamatos hűtésű átalakulási diagram (CCT, vagy röviden "C görbe") felvételére két lehetőség is rendelkezésre áll. Az egyik egy termodinamikai alapokra építkező szoftveres módszer, a másik pedig a dilatόμεteres mérés technika alkalmazására képes fizikai szimuláció. Az alakítási szilárdság meghatározására pedig több hagyományos módszer is rendelkezésre áll. A többi anyagjellemző esetén költség- és időtakarékosági megfontolásból a szoftver anyagadatbázisában szereplő normál szerkezeti acél anyagjellemzőit használom, mivel a kutatásom során vizsgált S960QL nagyszilárdságú acél gyengén ötvözöttnek tekinthető. Ebből adódóan ez az egyszerűsítés a modellezés eredményeit nem fogja érdemben befolyásolni.

Miután sikerült az alap- és hozaganyag (pontosabban varrat) anyagminőségét kiválasztanunk, illetve

szükség esetén az anyagjellemzőket definiálnunk, a következő menüpontban a hegesztési pályák és a hegesztési paraméterek definiálását, valamint a hőforrás beállítását kell elvégeznünk. Első lépésként az adott hegesztő eljárásra jellemző hőforrást kell kiválasztani. Az ívhegesztő eljárások esetén a 3. ábrán lévő Goldak-féle hőforrás bizonyul a legalkalmasabbnak [3].



3. ábra Goldak-féle hőforrás

A Goldak-féle hőforrás matematikai összefüggését az (1) képlet tartalmazza:

$$Q(x, z, y) = Q_{f,r} \cdot e^{-\frac{y^2}{a_{f,r}^2}} \cdot e^{-\frac{x^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{z^2}{c^2}} \quad (1)$$

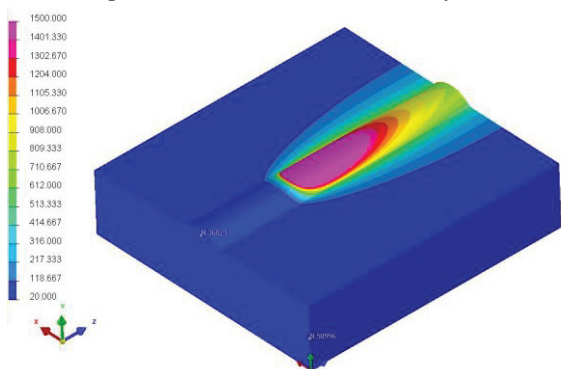
Lényegében a hőforrás helyes beállítása jelenti a modellezés sikerének kulcsát. Amíg egy valós ívhegesztési folyamat esetén az anyagminőség, vonalenergia, védőgáz stb. határozza meg a beolvadási alakot, addig a modellezés során nekünk kell előzetes becslést adnunk a varrat méreteiről (a, b, c). Ezért sokszor a hőforrás kalibrálása egy iteratív folyamat, több számítást kell lefuttatnunk a kívánt hőforrás precíz előállításához. Kutatási feladatok esetén ezért célszerű tényleges hegesztési kísérleteket is elvégezni, és a hegesztett kötésből kimunkált makrociszolatot összehasonlítani a modellezésünk eredményeivel. A következő fejezetekben ismertett modellezés eredményeihez is több lépésen keresztül lehetett eljutni. Viszonylag sok számítást kellett lefuttatni ahhoz, hogy a hegesztés során kialakuló hőmérsékletmezőt jól közelítő eredményt kapjunk (8. ábra).

4. HŐMÉRSÉKLETMEZŐ

A fejezetben bemutatásra kerülő végeeselemes modellezési feladat célja a nagyszilárdságú acélok aktív védőgáz fagyóelektródás ívhegesztése során előálló hőmérsékletmező, illetve az abból származtatható hőciklusok előállításának. Ahogyan a korábbi fejezetben írtam, jelenleg még nem áll rendelkezésre a modellezéshez szükséges valamennyi anyagjellemző, azonban a hőmérsékletmező előállításához elegendő felhasználni egy normál szerkezeti acél (jelen esetben S355) termometallurgiai anyagjellemzőit.

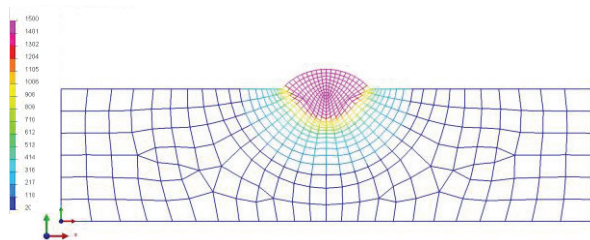
A modellezés során első lépésként a VISUAL MESH modul alkalmazásával előállítottam a geometriai modellt és a végeeselemes hálót. A modellezés

során egy 80x80 mm alapterületű és 20 mm vastagságú lemezre készített hernyóvarratnak megfelelő geometriát rajzoltam meg. A varratszélesség és a beolvadási mélység pontos definiálásához a korábbi fejezetekben leírt szempontok szerint tényleges hegesztési kísérletet is végeztem. A végeselemes hálót pedig úgy készítettem el, hogy a hegesztett darabról készült makrociszolaton lemértem a varrat jellemző méreteit, és a beolvadási vonal közelében finomabb hálósűrűséget alkalmaztam. A hegesztési paraméterek megadásakor 1000 J/mm vonalenergiát alkalmaztam, a hegesztési sebesség pedig 47 cm/min volt. Előmelegítési hőmérsékletnek szobahőmérsékletet állítottam be (20 °C), mivel a valós hegesztési kísérletnél a hűlési idő meghatározására szolgáló Rykalin-3D modell alkalmazásához ennél a paraméter kombinációknál teljesültek biztonságosan a határlemez-vastagságra vonatkozó feltételek ($S_{hat,2D,3D} < 20 \text{ mm}$) [6, 7]. A végeselemes számítás a 4. ábrán szereplő hőmérsékletmezőt eredményezte.



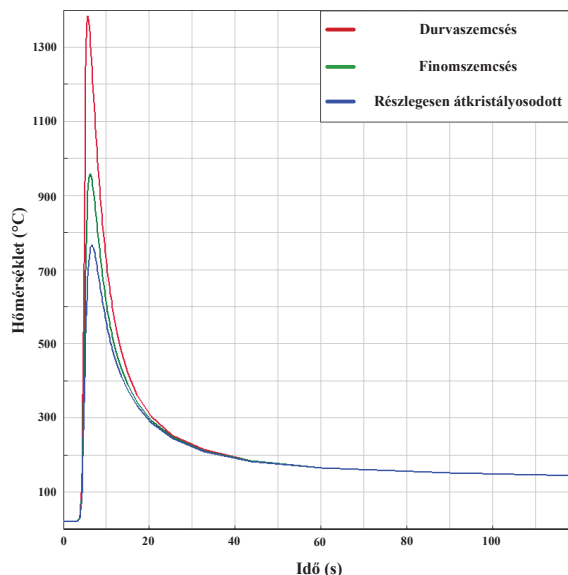
4. ábra. Hőmérsékletmező a 3D darabon

A hőforrás viszonylag körülményes beállítása miatt ez a hőmérsékletmező egy kb. 8-10 lefuttatott szimulációból álló iteratív folyamat eredményeként jött létre. A hőforrás elhaladásakor létrejövő hőmérséklet eloszlás az 5. ábrán lévő keresztirányú metszeti képen is látható, amelyen jól megfigyelhető a végeselemes háló szerkezete is.



5. ábra. Hőmérsékletmező metszeti képe

A program lehetőséget biztosít arra, hogy az általunk kiválasztott csomópontokhoz megjelenítsük a hegesztési hőciklusokat. Amennyiben a beolvadási vonalhoz közel sűrű hálózást alkalmazunk, akkor a 6. ábrán szereplő módon meg tudjuk jeleníteni a különböző hőhatásövezeti zónákra jellemző hőciklusokat.



6. ábra Hőhatásövezet hőciklusai

A végeselemes modellezés által kapott hőciklusok a későbbiekben felhasználhatók a GLEEBLE 3500 fizikai szimulátor hőhatásövezeti tesztjeihez. Nemesített nagyziládságú acélok hegesztéstechnológiájának tervezésekor figyelembe kell venni a kísérleti úton meghatározható optimális $t_{8,5/5}$ hűlési idő tartományt, amely a 850 °C-ról 500 °C-ig tartó lehülésre utal [6]. A 6. ábrán szereplő hőciklusok esetén ez a kritikus hűlési idő átlagosan 4,7 s.

5. EREDMÉNYEK IGAZOLÁSA HEGESZTÉSI KÍSÉRLETTEL

A végeselemes modellezés validálásához tényleges hegesztési kísérletet végeztem, amely során a geometriai modellnek megfelelő hernyóvarratot készítettünk. A kísérlet során alkalmazott hegesztési paramétereket a 2. táblázat foglalja össze, amelyben a Rykalin-3D modell [6] eredeti, és konstansokkal kiegészített, egyszerűsített összefüggésével meghatározott $t_{8,5/5}$ hűlési idők is szerepelnek. Eddigi kísérleteimnél alkalmazott termoelemes kontroll vizsgálatok tapasztalatai alapján rendszerint az egyszerűsített összefüggés szokott jobb közelítést adni [7]. A szobahőmérsékletnek megfelelő 20 °C előmelegítés esetén a Rykalin 2D és 3D modell alkalmazási lehetőségeit kijelölő határlemezvastagság 14,5 mm, amely kellő biztonsággal kisebb az alkalmazott 20 mm lemezvastagságtól. Ebből adódóan teljesül a felületi hőátadást elhanyagoló ún. nagytest modell alkalmazásának feltétele [6].

I [A]	U [V]	v_h [cm/min]	E_v [J/mm]	$t_{8,5/5,3D}$ [s]	$t_{8,5/5,3D}$ egysz. [s]
301,4	32,3	47	994	2,4	5,2

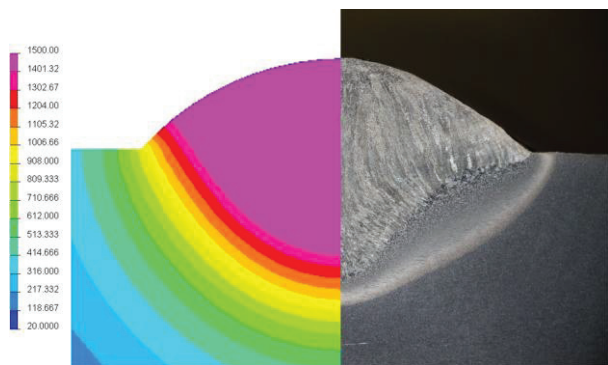
2. táblázat. Hegesztési paraméterek

A Rykalin-3D modell egyszerűsített változatával meghatározott 5,2 s hűlési idő és a végeelemes modellezés eredményeként kapott 4,7 s jól közelítik egymást. Ezzel kapcsolatban érdemes kiemelni, hogy az S960QL acélra az ajánlott hűlési idő tartomány alsó határa 5 s. [6, 8] A táblázatban adott hegesztési paraméterekkel készített hernyóvarratról készült felvétel a 7. ábrán szerepel. Ezúton szeretném kihangsúlyozni, hogy az állandó hegesztési sebesség biztosítása érdekében hegesztő kocsit alkalmaztam a kísérlethez.



7. ábra. Valós hegesztési kísérlet eredménye

A tényleges hegesztési folyamat és a végeelemes modellezés eredményeinek összehasonlításában a 8. ábra nyújt segítséget. A valós hernyóvarratról készült csiszolati kép és a végeelemes modell metszeti képének összehasonlításakor pozitív eredményként lehet értékelni, hogy a látható hőhatásövezet széle és a hozzá tartozó A_1 hőmérsékletre ($723\text{ }^\circ\text{C}$) utaló izoterma viszonylag jó átfedésben vannak egymással, bár a virtuális hőhatásövezet csekély mértékben ugyan, de szélesebbnek bizonyul. A hőforrás paramétereinek további javításával viszont még jobban meg lehet közelíteni a valós hőhatásövezetet eredményező hőmérsékletmezőt.



8. ábra. A modellezéssel előállított és a tényleges varratkeresztmetszet

A két metszeti felvétel összehasonlításakor fontos felhívni a figyelmet arra, hogy a védőgáz típusa alapvető hatással bír a varrat beolvadási alakjára. A 8. ábra jobb oldali részén jól megfigyelhető a viszonylag kis hővezető képességű gázkeverék (82% argont és 18% CO_2) jellegzetes beolvadási alakja, melyet nem tudunk tökéletesen reprodukálni a Goldak-féle hőforrás modellel. Nagyobb CO_2 tartalmú, esetleg He bázisú gázkeverékekkel készült hegesztett kötés beolvadási alakja ezzel a hőforrás modellel feltételezhetően jobban közelíthető.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatott FEM technikával a nagyszilárdságú acélok aktív védőgáz fogóelektródás ívhegesztésére jellemző hőmérsékletmező, és a hőhatásövezet jellegzetes zónáihoz tartozó hőciklusok sikeresen előállíthatók voltak. A hőforrás paramétereinek további javításával a tényleges hegesztési folyamatot még jobban közelítő, a hegesztés fizikai szimulációját támogató, valamint a hegesztőmérnök munkáját jelentősen megkönnyítő FEM modell összeállítására nyílik lehetőség.

7. IRODALOM

- [1] Balogh, A.; Komócsin, M.: Hegesztési Technológiák Számítógépes Tervezése, „A felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése” CAD/CAM/FEM kompetencia kurzusok projekt, Miskolci Egyetem, 2005
- [2] Pogonyi, T.; Palotás, B.: „SYSWELD” a hegesztés végeelemes modellezésének eszköze, 26. Hegesztési Konferencia és Hegesztéstechnikai Kiállítás, Budapest, 2012, p.: 35-44
- [3] Tejc, J.: Welding Simulation Solution, Előadás, Sysweld és Visual Environment tanfolyam, ESI Group, Dunaújváros, 2012
- [4] Gáspár, M.; Balogh, A.: Számítógéppel segített technológiai tervezésre alkalmas programok ömlesztő hegesztő eljárások esetén, TÁMOP Tanulmány, Innovációs anyagtechnológiák tudományos műhely, Miskolci Egyetem, 2012
- [5] Kuzsella, L.; Lukács, J.; Szűcs, K.: Fizikai szimulációval végzett vizsgálatok S960QL jelű, nagyszilárdságú acélon, GÉP, LXIII. évf. 4. sz., p.: 37-42., 2012
- [6] Balogh, A.; Kirk, S., Görbe, Z.: Role of cooling time when steels to be welded requires controlled heat input, GÉP Vol. V., L. évfolyam, 1999
- [7] Gáspár, M.: A nemesített állapotú nagyszilárdságú acélok hagyományostól eltérő hegesztési megoldásai középvas tag lemezeknél, Hegesztő Szakmérnöki Diplomaterv (témavezető: Dr. Balogh András), 2013
- [8] Balogh A., Sárvári J., Schäffer J., Tisza M.: Mechanikai Technológiák, 4. kiadás, Miskolci Egyetemi Kiadó, p.:143-270., 2008

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az ismertetett kutatómunka TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt eredményeire alapozva az Európai Unió és Magyarország támogatásával megvalósuló TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú „Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program” című kiemelt projekt keretében valósult meg.