

# HEGESZTÉS NUMERIKUS SZIMULÁCIÓJA, A GYÁRTÁSI FOLYAMAT SZÁMÍTÓGÉPES MODELLEZÉSE

**Kollár Dénes** / okl. építőmérnök, doktorandusz; BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

**Dr. Kövesdi Balázs Géza** / okl. építőmérnök, egyetemi docens; BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

## Bevezetés

A gyártási folyamat optimalizációja céljából egyre inkább előtérbe kerül a numerikus szimuláció, mely lehetőséget ad a gyártási folyamat virtuális modellezésére, próbagyártmányok virtuális készítésére, mellyel a valós kísérletek és előgyártmányok száma nagymértékben redukálható. A numerikus szimuláció a gyártóknak egyfelől anyagmegtakarítást jelent, másfelől a prototípusok gyártási ideje is rövidülhet. Példának okáért összetett szerkezetek esetén a hegesztési sorrend és hegesztési irányok helyes megválasztása komoly feladat lehet, melyek megválasztásában nyújthat kiemelkedő támogatást a kidolgozott szimulációs környezet. A cikk a hegesztési folyamat végeselemes szimulációjával foglalkozik, a szimulációs környezetet és az ebben rejlő lehetőségeket mutatja be.

## Hegesztett kapcsolatok vizsgálatának jelentősége

Új anyagok megjelenése és a hegesztési eljárások rohamos fejlődése azt eredményezi, hogy a hegesztett kapcsolatok mindinkább előtérbe kerülnek, legyen szó akár gyári vagy helyszíni kapcsolatok kialakításáról. Hegesztés során az anyagszerkezet változásokon megy keresztül a fúziós és a hőbefolyásolt zónán belül, emellett a maradó deformációk és a kialakuló sajátfeszültségek csökkentik a szerkezetek teljesítőképességét. Alapvetően kétféle szempontrendszerrel különböztethetünk meg:

- gyártói szempontból deformáció-vezérelt,
- tervezői szempontból pedig inkább sajátfeszültség-vezérelt tervezést.

Előbbi esetében a korrekciós munkálatok csökkentése és a minőség növelése az elsődleges, utóbbinál sok esetben az élettartam növelése, a fáradással és ridegtöréssel szembeni viselkedés javítása a célfüggvény. Nyilvánvalóan a két megközelítés között kell megtalálni az optimumot (1. kép), ez a maradó deformációk gyártási tolerancián belül tartását és a sajátfeszültségek együttes vizsgálatát teszi szükségessé.

Az optimum elérését valós ('trial and error') vagy virtuális kísérletekkel (numerikus szimuláció) lehet biztosítani. Utóbbi esetében is szükség lehet valós próbagyártmányokra főként verifikációs céllal, azonban számuk drasztikusan csökkenthető. Jó példa erre az autóipar, ahol

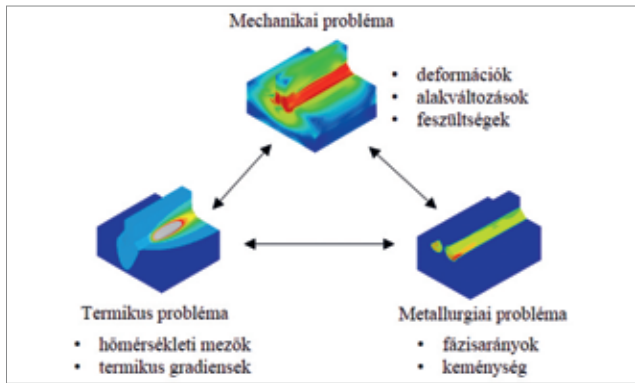


**1.kép:** Maradó deformációk és sajátfeszültségek alakulása a megfogási (merevségi) viszonyok függvényében

a gyártás számítógéppel való támogatása robusztus és hatékony módszernek bizonyult, Goldak és Akhlaghi [1] szerint a prototípusok száma egy nagyságrenddel csökkent. Az is lényeges és eldöntendő kérdés, hogy a numerikus szimulációk során kvalitatív vagy kvantitatív módon kívánjuk összehasonlítani a variánsokat. Amennyiben az egyes változatokat (például hegesztési irányok és sorrendek hatása) csak minőségileg szeretnénk értékelni, nincs szükség kalibrációra valós kísérletek alapján. A jelen kutatás célja egy olyan numerikus szimulációs környezet kidolgozása ANSYS [2] programkörnyezetben, mellyel a különböző hegesztési folyamatok kalibráció után nagy megbízhatósággal modellezhetők és mellyel a hegesztett gyártmányok gyártási deformációi, valamint sajátfeszültség eloszlása meghatározható. A kidolgozott szimulációs környezet ezután alkalmazható gyártási deformációk csökkentésére, valamint pontos, építőmérnöki tervezésben alkalmazható sajátfeszültség modellek kidolgozására.

## Szimulációs lehetőségek

A számítógépek számítási kapacitása folyamatosan növekszik, mely nagyban elősegíti a komplex szimulációs problémák és nagyméretű szerkezetek vizsgálatát. A BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén kidolgoztunk egy szimulációs környezetet ANSYS [2] általános végeselemes programban, mely a hegesztés során felmerülő termikus, metallurgiai és mechanikai jelenségeket is képes kezelni (2. kép) és alkalmas a hegesztési eljárás numerikus szimulációjára.



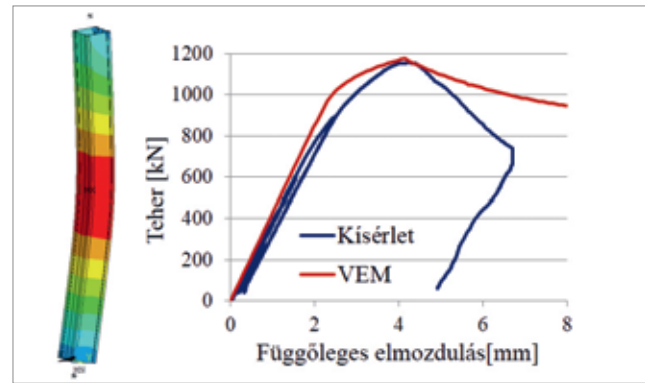
**2. kép:** Kidolgozott szimulációs környezet egy hegesztett T-kapcsolat példáján

A kidolgozott modell magában foglalja

- a tranziens hőforrások leírását,
- a hőmérsékleti mezők szimulációját,
- az acél anyagjellemzőinek és szövetszerkezetének változását a hőmérséklet és hőmérséklet-változás sebesség függvényében, valamint
- a kialakuló sajátfeszültségek és maradó deformációk meghatározását is.

Ezen felül a virtuális gyártmányokon további vizsgálatok elvégzésére is van lehetőség: geometriai és anyagi nemlinearitást is figyelembe vevő analízissel a hegesztett szerkezet statikai viselkedése elemezhető, a szilárdsági vagy stabilitási ellenállása meghatározható. Erre mutat példát a 3. kép, melyen egy virtuálisan legyártott zárt szelvényű oszlop globális stabilitásvesztési alakja, valamint a hozzá tartozó – kísérleti és numerikus (VEM) úton meghatározott – függőleges erő-elmozdulás diagram látható. A valós és a végeleemes számítással kapott teherbírás értékek között mindössze 1.5-2 % eltérés adódott. A bemutatott példa jól szemlélteti a kidolgozott módszer alkalmazhatóságát a tervezési gyakorlatban, mellyel lehetőség nyílik a szerkezettervezési eljárásban figyelembe venni a gyártási specifikumokat. Hosszabb távú céljaink közé tartozik egy numerikus modell alapú méretezési eljárás kidolgozása, mely a gyakorlatban alkalmazható lesz tervezőmérnökök számára is.

Az előbbi példa esetében egy viszonylag egyszerű esetet mutattunk be a hegesztési trajektória szempontjából, hiszen minden élen egy egydimenziós vonal mentén kell végighaladnia a hőforrásnak. Azonban a legtöbb esetben inkább két- vagy háromdimenziós trajektóriákkal találkozhatunk. Az automatizálás térnyerésével és ennek köszönhetően a hegesztőrobotok megjelenésével szükségessé vált a legkülönbözőbb hegesztési pályagörbék követése. Erre több eshetőség is van, többek között ilyen a pálya előzetes betáplálása vagy a trajektória valós idejű követése, mely lézeres szenzorokkal kivitelezhető. A szenzorok a hegesztőpisztoly előtt pásztázzák a gyártmányt és



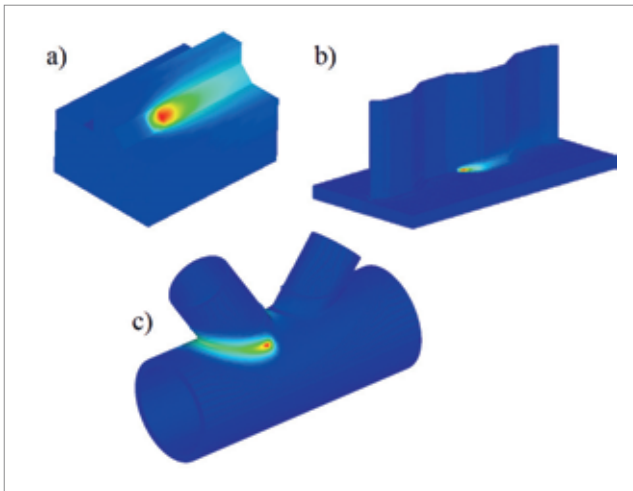
**3. kép:** Kihajlási alak és a függőleges elmozdulás-teher görbék [3]

a varratárok geometriai változásait (szögtörés, árok méretének változása) rögzítik, mely információk alapján a hegesztési pozíciók és paraméterek automatikusan számíthatók, változtathatók [4].

Ez a hegesztőrobotoknál alkalmazott technológia adta az ötletet egy olyan algoritmus kidolgozására, mely segítségével a végeleemes szimuláció során a hőforrás bármilyen összetett térgörbén végig tud haladni oly módon, hogy az esetleges geometriai változásokat is figyelembe vegye. Ilyen lehet például egy csőkapcsolat, melynél az árok mérete nem állandó, így a hegesztési sebesség módosításával megváltoztatható a fajlagos bevitt hőmennyiség és ezzel együtt a beolvadás mértéke is. A módszer teljes mértékben automatizált, nincs szükség manuális közbeavatkozásra a végeleemes probléma megoldása során. A robothegesztés fő előnyei közé tartozik többek között:

- a jobb és állandó varratminőség,
- a szimmetrikus, többrobotos hegesztés esetén létrejövő kisebb deformációk és
- a nagyobb termelékenység.

A kézi és robothegesztés közötti különbségek numerikusan is modellezhetők. Látható, hogy a bemutatott eljárást elsősorban hegesztőrobotok gyártmányainak szimulációjára lehet optimálisan, nagy biztonsággal alkalmazni, azonban lehetőség van a hegesztési bemenő adatok szórásában figyelembe lehet venni az emberi tényezőt is. Ez mintegy szimulálja az átlagos hegesztési sebességtől való eltérést és az ebből adódó pl. beolvadási hibákat. Matematikai értelemben kísérő triéderként értelmezhető a lokális koordináta-rendszer, mely a hegesztőpisztoly és ezáltal a hőforrás pillanatnyi helyzetét írja le. A varratkövető algoritmus legkülönbözőbb kapcsolat-kialakítási eseteknél való alkalmazását mutatja be az 4. kép. Az egydimenziós eset egy T-kapcsolathoz, a kétdimenziós pályagörbe egy trapézlemez gerincű tartóhoz, míg a háromdimenziós trajektória esete egy CHS-szelvényekből kialakított K-kapcsolat hegesztés szimulációját mutatja be.



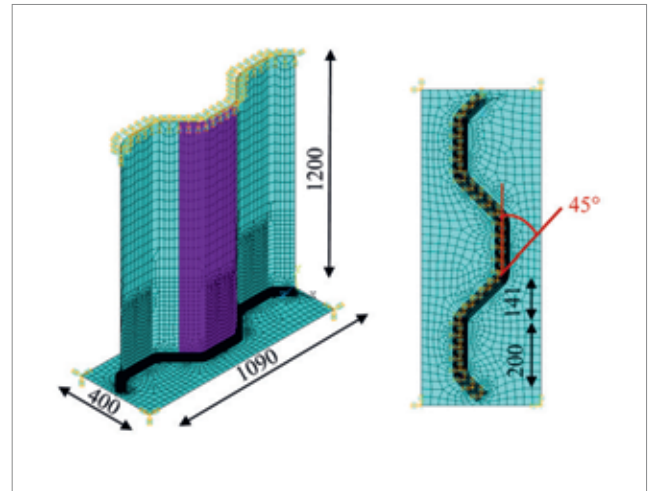
**4. kép:** Hőmérsékleti mezők hegesztés közben a) egy- b) két- és c) háromdimenziós trajektóriák esetén

### Példa hegesztés-technológia változtatásának hatására

Ebben a fejezetben egy trapézlemez gerincű tartó szegmens esetén mutatjuk be az eltérő hegesztés-technológiákhoz tartozó jellemző deformációs ábrákat, mellyel szemléltethető, milyen módon befolyásolhatják a megfogási viszonyok a számítás végeredményét (a sajátfeszültségek kialakulásával és hatásával jelen cikkben nem foglalkozunk).

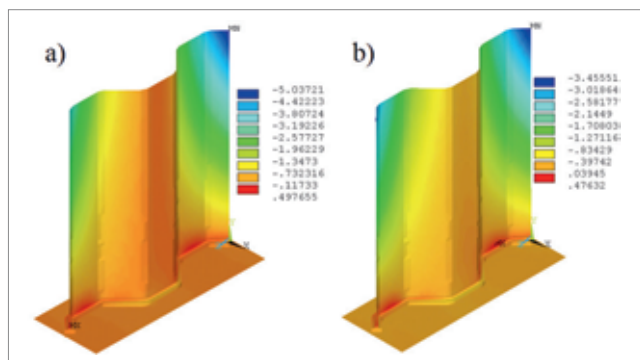
A gerenda 1090 mm hosszú, a gerinclemez 1200 mm magas és 10 mm vastag, az övlemez 400 mm széles és 40 mm vastag. A trapézlemez gerinc lemezmezői 200 mm hosszúak és 45°-os szögtörés tartozik hozzájuk. Az öv és a gerinc kapcsolata teljes beolvadású, 5 mm gyökméretű kétoldali sarokvarrattal került kialakításra. A vizsgált szerkezeti rendszert acél-beton ösvérszerkezetben lehet alkalmazni, így csak egy övlemez hegesztését modellezzük, a gerinc másik élén nyírt kapcsolati elemek kerülnek alkalmazására a vasbeton lemez fogadására. A varratot és annak közvetlen környezetét 8 csomópontú téglá tesselemekkel, míg az öv és gerinc további részeit 4 csomópontú héjelemekkel modelleztük (5. kép).

A különböző hegesztési beállítások összehasonlításának elsődleges célja a maradó deformációk elemzése. Ehhez a héjelemek kiterjedt felületen való alkalmazása is megfelelőnek bizonyult, tesselemeket mindössze a nagy termikus gradienssel terhelt zónában szükséges alkalmazni, hiszen itt várjuk a legnagyobb feszültségeket és feszültség-változásokat. A varrat környezetében sűrű hálófelosztást alkalmaztunk, ettől távolodva a héjelemeknél egyre nagyobb elemmérettel dolgoztunk. A környezet, illetve a szerkezet kezdeti hőmérsékletét egyaránt 20 °C-nak feltételeztük a szimuláció során. Mindkét



**5. kép:** Vizsgált trapézlemez gerincű tartó geometriája és a végeleemes háló

varratsort azonos hegesztési beállításokkal és hőforrás-paraméterekkel alakítottuk ki. MAG hegesztési eljárás mellett az áramerősséget 240 A-re, a feszültséget 30 V-ra, a hatásfokot pedig 0,85-ra vettük fel, míg a hegesztési sebesség 200 mm/min volt. Ez összességében 18,4 kJ/cm fajlagos hőbevitelt jelent. Egyirányú hegesztést feltételeztünk a modelleknél, a varratsorok közötti maximális – sorközi – hőmérsékletet 150 °C-ra vettük fel. A hegesztés-szimuláció esetén mindegyik próbatestnél a teljes tranziens folyamat modellezésre került, így végeleemes szempontból a legmagasabb szinten foglalkoztunk a problémával. Mivel az alkalmazott öv nagy merevséggel rendelkezik, így a függőleges deformációk vizsgálatát nem tartottuk szükségesnek. Kisebb lemezvastagság esetén előállhat az öv hullámosodása is gyártás során, melyre ebben a cikkben nem térünk ki. A tartó esetében a hosszirányú maradó deformációk sem jelentősek, emiatt a későbbiekben csak a keresztirányú deformációkat mutatjuk be. Az első variáns esetében hagytuk a szerkezetet szabadon alakváltozni és deformálódni hegesztés és lehűlés közben. A kettes számú változatnál viszont a gerinc felső élét mereven megfogtuk, ezzel elértük, hogy csak minimális deformációk alakuljanak ki a gyártmányban, azonban nagy sajátfeszültségek mellett. A szobahőmérsékletre való visszahűlést követően a befogott felső él elengedtük, ekkor a gerinc visszarugózott és a belső feszültségek átrendeződtek az új peremfeltételeknek megfelelően. Az így kapott deformációs alak megegyezik a második variáns keresztirányú maradó deformációs alakjával. A 6. kép alapján belátható, hogy a maradó deformációk jelentősen – közel 30 %-kal – csökkenthetők voltak a gyártástechnológia kismértékű változtatásával.



**6. kép:** Keresztirányú deformációk a) szabad alakváltozás biztosítása mellett, illetve b) merev megfogás, majd visszaruhozás után

### Összefoglalás

A cikk a hegesztési folyamat végelesemes szimulációjával foglalkozik. Nemcsak a szerkezettervezésnél, de a gyártásban is egyre inkább alkalmaznak numerikus modelleket gyártás optimalizálás céljából, hiszen a valós kísérletek és előgyártmányok száma a virtuális kísérletekkel számottevően csökkenthető. Az anyagmegtakarítás mellett a prototípusok gyártási ideje is lerövidülhet. A cikkben bemutatásra került egy általunk kidolgozott, hegesztés-szimulációs numerikus környezet, és annak

alkalmazhatósága, mely a legfontosabb termikus, metallurgiai és mechanikai jelenségeket is képes figyelembe venni. A cikkben néhány szemléletes példán keresztül érzékeltettük a hegesztés-szimulációban rejlő lehetőségeket és a gyártási folyamatba való implementálásának előnyeit.

### Köszönetnyilvánítás

A cikkben szereplő kutatási munka többek között a PIAC-13-1-2013-0160, a GINOP-2.1.1-15-2015-00659 és a GINOP-2.1.1-15-2016-008854 kutatás-fejlesztési projektek keretein belül zajlott, melyek pénzügyi támogatásáért a szerzők ezúton is köszönetet mondanak. A kutatást ezen kívül támogatta az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíja.

### Irodalomjegyzék

- [1] Goldak, J.A. és Akhlaghi, M. (2005). Computational Welding Mechanics. Boston MA: Springer Science + Business Media, Inc.
- [2] ANSYS version 15.0. (2014). Computer software. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA.
- [3] Kollár, D. és Kövesdi, B. (2016). Experimental and numerical simulation of welded columns. In: 41st International Conference Zavarivanje – Welding 2016. Opatija, Croatia, 8-11 June 2016, pp. 123-132.
- [4] www.igm-group.com

## MKE HÍREK

Egy forró nyári nap délutánján került megrendezésre a 2017-es év Könnyűszerkezetes továbbképzése. A rendezvény helyszíne a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék tárgyalója volt. A program, melyet Dr. Dudás Annamária állított össze, a toronyok és kilátók tervezési lépéseit, szerkezeti megoldásait, kivitelezési problémáit, és a helyreállításhoz szükséges geodéziai felmérést volt hivatott bemutatni.

A két egységre bontott előadássorozatban összesen hét előadás szerepelt. Több előadó is foglalkozott a magas acélszerkezetekre ható szélterhek meghatározásával, hiszen a toronyok (legyen az kilátótorony, vagy antennatorony) alakjának, szelvényeinek optimális kialakítása érdekében ennek vizsgálata döntő jelentőségű. Szélterhkekkel kapcsolatban több kísérletet bemutató videót, animációt láthattak a jelenlévők. Megismerhettük egy toronytípus nemzetközi karrierhez vezető első lépéseit is. Az előadást felelevenítő cikk - az ECOPOL nevű torony tervezésének és kivitelezésének folyamatáról - olvasható jelen kiadványunkban.

A Könnyűszerkezetes Egyesület tagjai előadóként és résztvevőként is megjelennek az „Acél BIM - oktatás, kutatás, tervezés, gyártás, szerelés” című november 14-i konferencián, amelynek szervezői a BME, a Könnyűszerkezetes Egyesület, a KTE Mérnöki Szerkezetek Szakosztálya, a MAGÉSZ és a Magyar BIM Szövetség. A rendezvény a 21. Fémszerkezeti Konferencia és egyben a 31. Acélszerkezeti Anket is lesz. A téma a BIM - az integrált számítógépes épületmodell alkalmazásának módszerei és lehetőségei az acélszerkezet-építés különböző fázisaiban.

Ehhez az összevont eseményhez a Fémszerkezetek újság több cikke kapcsolódik, főként a különböző szoftverekkel támogatott komplex tervezés okán.

Az Egyesület évbúcsúztató találkozója hagyományosan december második hetében lesz, melyre tagjaink levélben kapnak meghívót.