

Horváth Csongor Márk*

Többrétegű varratok modell alapú TIG-hegesztése

Bevezetés

Az automatizált hegesztőrendszerek nagy részét az autóipar tömeggyártására fejlesztették ki, ennek ellenére egyre nagyobb hangsúlyt kaptak az utóbbi években a kis- és középvállalkozásokban is. A hegesztőrobotos rendszerek minőségi- és hatékony megoldásokat nyújtanak az általános hegesztőipar számára, bár téynyersük a hosszú üzembe helyezés miatt korlátozott, és kis sorozatgyártás esetén még mindig a kézi hegesztés a domináns.

A vastag lemezes munkadarabok ívhegesztése, mint például a nagy teljesítményű Francis-turbina lapátjai [1] vagy nagyméretű csőszerkezetek [2], általában a munkadarab bonyolult geometriája miatt alacsony ismételhetőségű feladat és többrétegű hegesztést igényel [3]. Ennek automatizálása nem minden esetben gazdaságos, viszont széleskörű kutatás folyik azért, hogy ezt a problémát megoldják [4]. A folyamat tervezése során klasszikusan a hegesztési varratsorok leegyszerűsítve, sematikus módon kerülnek meghatározásra, majd azok pozíciójának pontosítására a folyamat finomhangolásra kerül sor.

Ahogy az 1. ábra bal oldalán látható számos, a többrétegű hegesztést tervező alkalmazás a töltősorok keresztmetszetét négyszögekké egyszerűsítve kezeli, melyek csak durva pozíció becslést adnak a tervezési fázisban [5, 6]. Másik megközelítés a varratsorok geometriájának követése, mely a modell alapú folyamat tervezéshez vezet. Hagyományosan a varratsor magasságát

és szélességét adják meg a modellek a hegesztési változók hatására, mint például a hegesztő áramerősség, hegesztési feszültség, haladási sebesség és a hozaganyag-adagolás sebessége; amelyekre a későbbiekben hegesztési változóként (HV) fogunk hivatkozni.

Ebben a tanulmányban, egy empirikus modell kerül ismertetésre a hegesztési sorok alakjának becslésére, figyelembe véve a hegesztési változókat és a hegesztés alapjául szolgáló felület egyenletlenségét. A modell alapja olyan fuzzy szabálybázisok, amelyek gépi tanulással kerülnek finomhangolásra. A javasolt módszer célja a többrétegű hegesztés esetén a hegesztési sorok alakjának pontosabb meghatározása a robot hegesztési szerszám-pályák meghatározására, valamint az alakból levonható következtetésekre az alkalmazáskor (1. ábra).

Szakirodalmi áttekintés

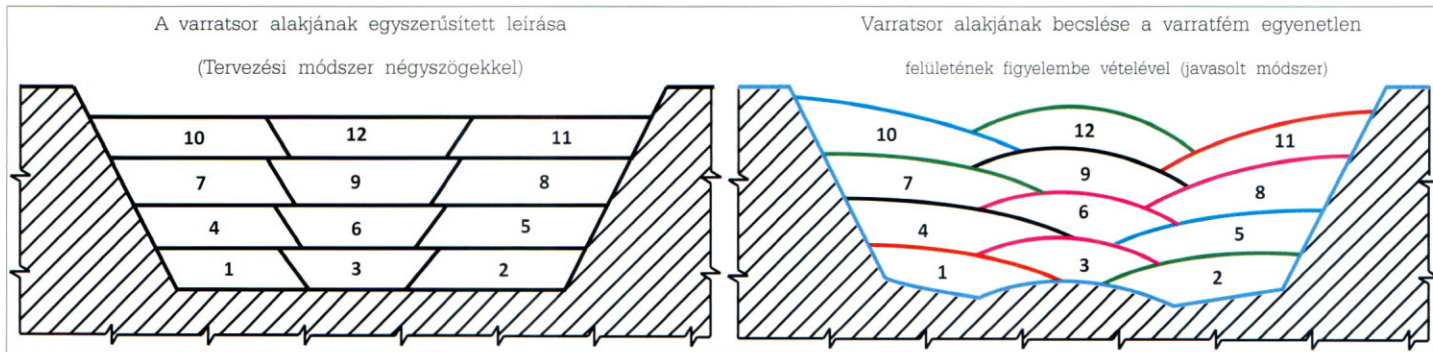
A varratsorok alakjának modellezése a gyors prototípus gyártásban rendelkezik széles irodalommal [7–9]. A varratsor alakjának finomabb leírására szimmetrikus görbéket vizsgáltak, melyek közül a parabola alakfüggvényt találták a legpontosabbnak. A parabola együtthatói a varratsorok szélességét és magasságát tartalmazzák és megbecsülhetőek egy megfelelő modellel a hegesztési változók és az anyagtulajdonságok függvényében. Az irodalomban bemutatott modellek sík lemezen elhelyezett varratsorok alakjának becslésére szolgálnak, többféle modellezési módszert alkalmazva [10].

Az utóbbi években a számítási intelligencia módszerek (*Computational Intelligence*), a gépi tanulás és mesterséges intelligencia módszerek válnak dominánssá a különböző modellezési feladatok megoldására. Ezen algoritmusok hatékonyan alkalmazhatóak komplex és nem-lineáris problémák közel optimális megoldására. A hegesztési modellezésben is több tanulmányt közöltek, amikben mesterséges neurális hálózatot (*Artificial Neural Networks*, ANN, [11, 12]), fuzzy következtető rendszert (*Fuzzy Systems*, FS[13, 14]), adaptív neuro-fuzzy rendszert (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems*, ANFIS, [15]), vagy éppen evolúciós fuzzy rendszert (*Evolutionary Fuzzy Systems*, EFS, [16, 17]) alkalmaznak.

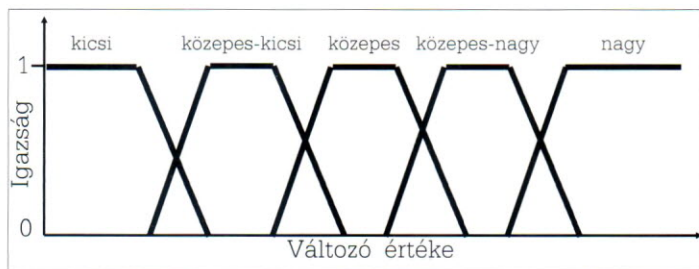
A fuzzy következtető rendszerek nagy előnye, hogy az általuk létrehozott szabály alapú érvelési rendszerek követik az emberi logikát és könnyen értelmezhető betekintést engednek a következtetéshez vezető érvek hátterébe. A szabályok természetes nyelvi változókból és elemi logikai kapcsolatokból épülnek fel. A nyelvi változó lehet például a (*lassú, gyors*) két értékű skála, vagy a (*kicsi, közepes-kicsi, közepes, közepes-nagy, nagy*) ötértékű skála. Egy fuzzy szabály például az alábbi alakban adható meg:

HA {Haladási sebesség} **gyors** ÉS {Hozaganyag mennyisége} **kevés** AKKOR {Varrat keresztmetszet} **kicsi** (1)

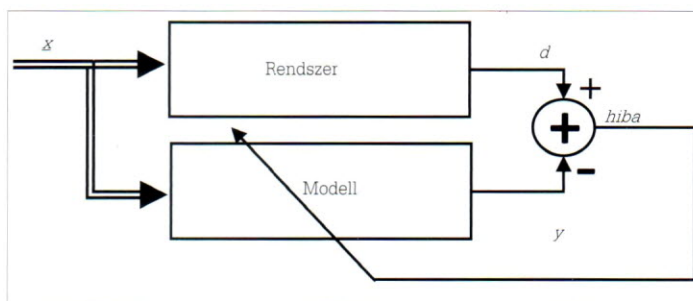
Több ilyen szabály alkotja a szabálybázist, ahol az adott változók értékkészletét osztjuk fel az értékskála szerinti tartományokra (4. ábra), és így



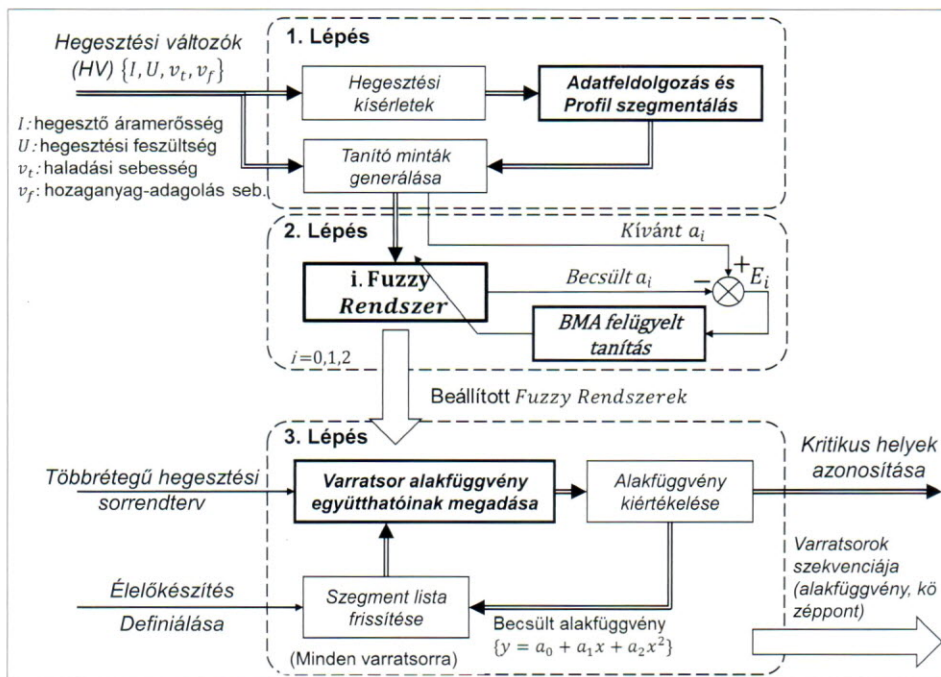
1. ábra. A hegesztési varratok hagyományos ábrázolása a javasolt módszerhez képest. (Balra) A hegesztési sorok alakjai négyszögekké egyszerűsítve. (Jobbra) A javasolt módszer szerinti, a hegesztési sorok alakjainak polinom függővel közelítése és szabadon elhelyezése az egyenetlen fémfelületen



2. ábra. Fuzzy nyelvi változók és a változó értéktartományának felosztása



3. ábra. Felügyelt tanítás egyszerűsített menete



4. ábra. A modellezési folyamat struktúrája

megadhatjuk, hogy a változó az értéke szerint mennyire írható le az adott nyelvi változóval. Így vannak olyan értékek, amik lehetnek csak *kicsi* (teljesen igaz), de akár olyan is hogy *kicsi* és *közepes-kicsi* egyszerre (részben igaz mindkettő).

Hasonló szabályok felállítása és alkalmazása triviális feladatnak tűnhet egy tapasztalt szakember számára, viszont a változókhoz rendelt pontos értékek hosszas gyakorlás útján sajátíthatóak el. Továbbá, egy automatizált rendszernek konkrét értékekkel kell megadni, hogy ezen tartományokat, más néven tagsági függvényeket milyen határok között definiáljuk.

Tehát, a fő kihívás a szükséges mennyiségű szabály és az azokat meghatározó tagsági függvények meghatározása. Egy hatékony módszer az adatok alapján tanítani a fuzzy rendszereket felügyelt gépi tanulás által (3. ábra). A gépi tanulás során egy rendszer viselkedését írjuk egy le a bemenetekre (x) adott válasza alapján (d), és

zett hegesztési sorok alakjának leírására, mely egy finomabb megközelítés a négyszögekkel való leíráshoz képest [7, 8, 24]. Viszont mivel ezek a modellek síklapon való elhelyezésre lettek kifejlesztve, az elhelyezés alapjúl szolgáló felületeket síknak tekintik, és elhanyagolják annak egyenletlenségét és a modellek bizonytalansága és pontatlanságába számítják bele [25].

Kísérletek és modellezési módszerek

A következőkben a hegesztési sorok alakjának modellezésére javasolt módszer kerül bevezetésre többretegű, hideg hozaganyag, volfrámelektródás semleges védőgázos ívhegesztés (TIG-hegesztés) esetén. A módszer kulcsfontosságú elemei az egyenletlen hegesztési felület szegmensekre bontása és azok másodfokú polinom függvényvel való leírása, valamint a varratsorok alakfüggvényének együtthatóinak meghatározása a felületet jellemző együtthatók és a hegesztési változókból (hegesztő áramerősség, hegesztési feszültség, haladási sebesség, hozaganyag-adagolás sebessége, röviden HV) felépített modell segítségével. A módszer struktúrája a 4. ábrán látható és a következő lépésekből tevődik össze:

- Adat gyűjtés és feldolgozás
- Hegesztési sorok alakjának modellezése
- Modell alkalmazása többretegű hegesztésben

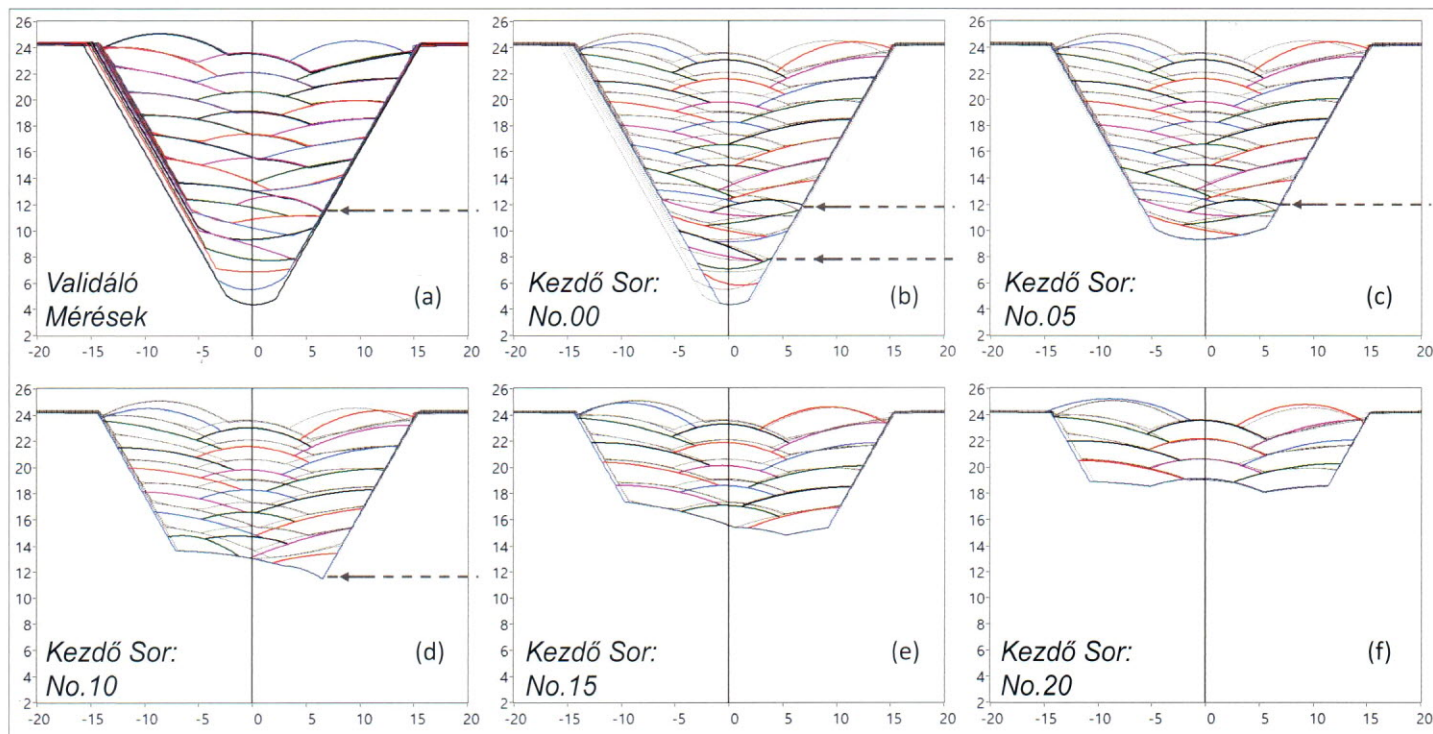
Kísérletek és adatfeldolgozás

A kísérleteket PA helyzetben végeztük, a hegesztési sorok síklemez felületen és V varratokban kerültek elhelyezésre. Az adatgyűjtés során a hegesztés előtti és utáni felületeket is megmértük, a hegesztő robot szerzőpályájának, a HV rögzítése mellett. A munkadarabok 304L rozsdamentes acél, és 40 °C előmelegítési hőmérséklettel kerültek meghatározó

hangolunk be egy modellt, hogy annak kimenete (y) minél jobban megközelítse a rendszer választát. A hibát az úgynevezett tanító minták kiértékelésével számítjuk egy tanító algoritmus segítségével. Az egyik lehetséges módszer az irodalomban a Bakteriális Memetikus Algoritmus (BMA, [18]), mely több tanulmányban is felülmúlta a hasonló módszereket [19]. A BMA-t különféle problémákra alkalmazzák, pl. kombinatorikus optimalizációs problémák megoldására [20, 21], folytonos optimalizációs feladatokra [22], és felügyelt gépi tanulási feladatokra [18, 23].

A síklapon elhelyezett hegesztési sorok geometria modellezéssel szemben a többretegű hegesztésnél mind a hegesztési sorok egymásra hatása, mind a korábban lehelyezett sorok egyenletlen felülete hatással van az aktuális varratsor alakjára.

A gyors prototípus gyártásból átvett modellek megjelentek a többretegű hegesztésben az átfedésben lehelye-



7. ábra V keresztmetszet feltöltése. (a) kísérleti mért felületek, (b)-(f) modell által becsült felületek. A szürke nyilak a hegesztési hibára érzékeny helyeket jelöli

sor, ahol a hegesztési sorok hegesztési együtthatói és a robot szerszám-pálya referencia pontja előre meg volt határozva a hegesztési sorrendtervben.

Első lépésként a munkadarab felületeinek paraméterezésére került sor, melyet egy listába rendeztünk. Ezután a hegesztési sorrendterv alapján meghatároztuk a hegesztési változókat (hegesztő áramerősség, hegesztési feszültség, haladási sebesség, hozaganyag-adagolás sebessége), és a lokális koordináta rendszer közép-pontját, ami a volfrámelektroda tengelyének és az aktuális hegesztési fel-szín metszéspontja határozott meg. Az alakfüggvények átranzformálása után a modell megadta a hegesztési sor felületét leíró görbe együtthatóit, amivel a szegmenseket tartalmazó lista frissítésre került. Ezután a követ-kező sor került lehelyezésre annak az alakjának meghatározásával. Ez a fo-lyamatot mindaddig ismételtük, amíg az összes sort nem helyezték le. A fo-lyamat végén az egyes sorok felületén kívül a T_1 , T_2 varratszegélyek helyzete, a θ_1 , θ_2 peremszögek és a keresztmet-szet mérete is meghatározásra került. Az elvégzett kísérletek kiértékelése a következőkben kerülnek tárgyalásra.

Eredmények bemutatása

A következő részben a modell tanítá-sának kiértékelése és az alkalmazás-

kor tapasztalt eredmények tárgyalása következik. A kifejlesztett modell jósa-gát egy független validáló adathalmaz-on végeztük el, a mért és becsült ér-tékek közötti átlagos négyzetes hiba gyökével jellemezve. A vizsgálatban a felületet leíró görbe együtthatóit, a he-gesztési sorok méretét és a származ-tatott további geometriai adatokat (T_1 , T_2 varratszegély helye, θ_1 , θ_2 perem-szögek értéke) vettük figyelembe. Mi-vel a modell megközelítése újszerű, és az irodalomban nem áll rendelkezésre hasonló adat, ezért az eredményein-ket egy multilinéaris regresszió analí-zis útján kapott modell eredményeivel hasonlítottuk össze.

A modell tanításának kiértékelése

A modell tanítása kettő és tizenkettő közötti szabályszámmal lett elvégez-ve. A feladat nagysága a két szélső ér-ték között hatszoros, viszont a taní-táshoz szükséges idő közel 25-szörös volt. Ez jól mutatja, hogy a gépi tanu-lási módszerek számítási igénye a fel-adat komplexitásával nem lineárisan nő. Viszont, a kész modellek válaszi-de-jei között nem volt jelentős különbség.

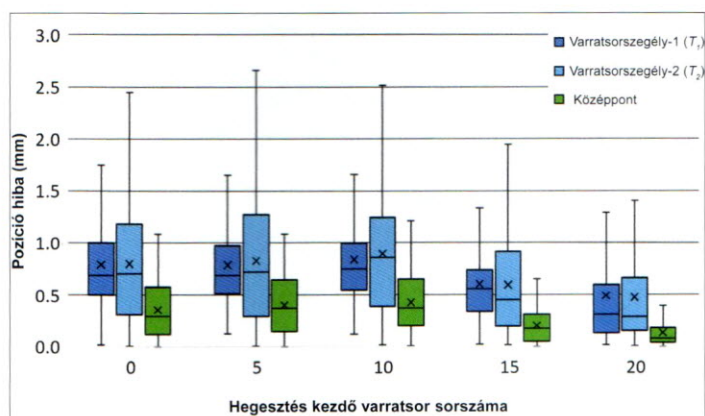
A hegesztési sorok felületének együt-t-hatóit a modell a növekvő szabálysza-m-mal arányosan egyre pontosabban ha-tározta meg. Tizenkét szabály esetén adta a legpontosabb eredményt., há-rom százalék alatti hibával visszaadva az alakfüggvény együtthatóit, így ezt

a modellt használtuk a további kísérle-tekben. Összehasonlítva a statisztikai modellel, már négy szabály alkalmazá-sa esetén pontosabb eredményt kap-tunk mind az együtthatók, mind a származtatott jellemzők becslésére.

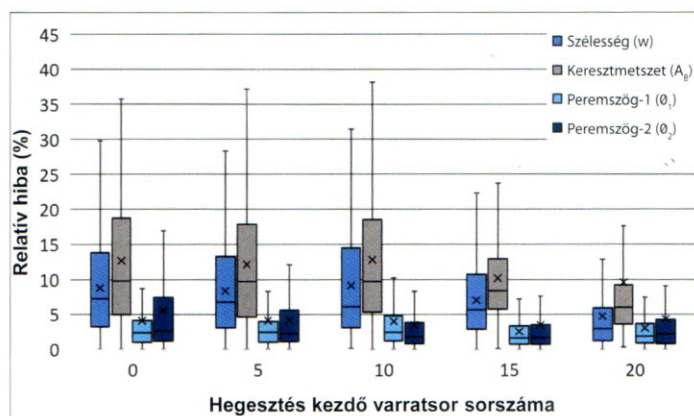
A tizenkét szabályos modell három százalékos hibával adta vissza a bur-koló görbe együtthatóit. A hegeszté-si sor szélességét és területét tíz szá-zalékos hibával kaptuk meg. A továb-bi származtatott jellemzők esetén még jobb eredményt kaptunk, mégpedig a T_1 , T_2 varratszegély helyét fél millimé-teres pontossággal tudtuk meghatá-rozni, míg a θ_1 , θ_2 peremszög értékét öt százalék alatti hibával. Az eredmé-nyekből levonható a tanulság, hogy a bemutatott módszerrel megbecsülhe-tő a varratsorok alakja többretegű he-gesztés esetén.

Többretegű hegesztési kísérlet értékelése

Ahogy azt az előző szekcióban bemu-tattuk, a kifejlesztett modell jól telje-sített az egyedi hegesztési sorok alak-jának becslésekor. A következőkben egy átfogóbb elemzés következik több-retegű hegesztés közben a varratso-rok felületének alakulására. Az érté-keles során a mért és becsült érté-keket hasonlítottuk össze az összes lehelyezett sort figyelembe véve. A T_1 , T_2 varratszegély helyzetének hibáját abszolút értékben (milliméterekben), a



8. ábra. Varratsor nevezetes pontjainak pozíció hibája



9. ábra. Varratsor jellemző méreteinek relatív hibája

többi származtatott értéket pedig relatív (százalékos) hibaként adtuk meg. A kiértékelést nem csak a teljes varrat feltöltésére, hanem különböző kezdőpontok meghatározásával is elvégeztük, ezáltal szimulálva a folyamat közbeni visszaméréseket.

A kísérletben használt munkadarab 36 keresztmetszetére végeztük el a kiértékelést, melyek mindegyike egy 5mm-es szeletet reprezentált. A munkadarab paraméterei és a kísérleti körülmények megegyeztek a modellalkotáshoz használt kísérletekkel. A varratsorok elhelyezése egy előre definiált hegesztési sorrendterv alapján történt, mely tartalmazta a hegesztőberendezés beállításait és a szerszámpályákat mind a 31 hegesztési sorra. A felületek mérését a varratsorok hegesztése előtt és után is elvégeztük. A mérések alapján megrajzolt keresztmetszetet a 7. ábra (a) mutatja.

A végrehajtás során a kezdeti varratsorok lehelyezése a geometria torzulásához vezetett, mely a bal oldali leélezés eltolódása mutat. Ez az egyedi varratsorok alakjának becslését nem befolyásolja, viszont a teljes keresztmetszetbe elhelyezett hozaganyag mennyiségét igen. Ezért a szimulációban használt leélezési oldalért a deformáció utáni értéként vettük figyelembe a teljes keresztmetszetben (7. ábra (b)), ekvivalens hozaganyag mennyiséggel számolva.

Arra számítottuk, hogy a többlépcsős hegesztési folyamat szekvenciális jellege miatt az alakfüggvények becslés halmazódó hibát tartalmaz. A felső rétegekben lévő varratsorok már jelentősen eltérnek az elvárttól, mivel a halmazódó hiba és a munkadarab deformációja miatt már a hegesztés felülete is jelentősen eltér a tényleges felülettől. Ezért a hiba csökkentésére a tervezést közbelső felületekről indítva is elvégeztük. Így az ötödik, tizedik, tizenötödik és huszadik varratsortól kezdve

is megvizsgáltuk a modell által becsült geometriákat. Ezek eredményei a 7. ábra (c)-(f) láthatóak, ahol a színes, folytonos vonalak jelzik a becsült varratsorok felületét, a fekete pontozott vonalak pedig a mért referencia adatokat.

A vártaknak megfelelően, a teljes keresztmetszet feltöltése adta a legnagyobb eltérést, és ahogy a keresztmetszet töltöttsége növekedett, a módosított oldalél helyzete egyre jobban megközelítette a ténylegesen mért oldalért, a varratsorok becslése is egyre pontosabbá vált.

A varratsorok jellemzőire a számszerűsített hibaanalízis doboz-diagramok formájában kerül bemutatásra, melyek a T_1 , T_2 varratszegély és a varrat középpont esetén abszolút hibaként milliméterben (8. ábra), a θ_1 , θ_2 peremszög, szélesség és keresztmetszet mérete szerint pedig relatív hibaként százalékban került megadásra (9. ábra). Az összegzett hibák csökkenő tendenciát mutatnak ahogy a szimulációt magasabb töltöttségtől indítjuk. Ez egyrészt a kevesebb számú varratsor miatt, másrészt a kisebb munkadarab torzulás következménye, mely a becsült és a mért felszínnek nagyobb egyezését eredményezi. Az összegzett relatív hiba a 10-15 százalék közötti értékről 5-10 százalék közötti értékekre csökken, míg a pozíció hiba a 0,5-1 mm közötti tartományból a 0,5 mm alá csökkent. Ezek az eredmények jól illeszkednek a varratsorok egyenként történő becsléséhez. A θ_1 , θ_2 peremszögek becslése minden esetben alacsony hibát mutat, 4-8%-ot kezdetben, majd tartósan 5% alatti értékeket. Ennek a becslési jóságát a felvett értéktartomány szűkülése mutatja a legjobban, vagyis a kiugróan eltérő becslések számának csökkenése.

Halmazódó hiba és korrekció

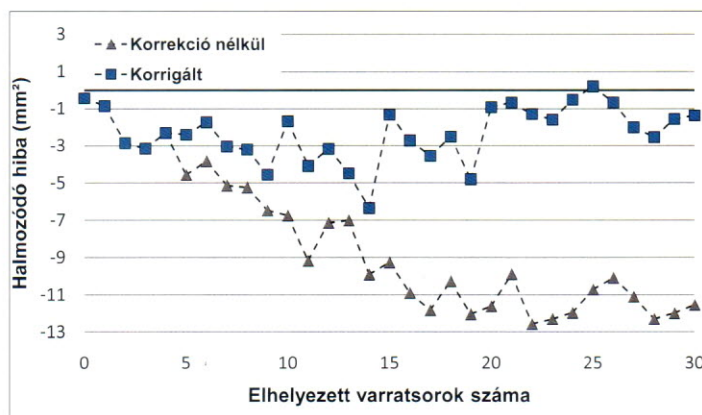
A feltöltés halmazódó hibáját a varratsorok keresztmetszetének mére-

te alapján határoztuk meg. A hibát az aktuális számú varratsorig lehelyezett keresztmetszetek összegzett, mért és becsült értékeinek összehasonlítása adja meg. A teljes hozzáadott hozaganyag mérete 315,7 mm²-nek adódott. A 10. ábrán, a szürke grafikon mutatja a keresztmetszet halmazódó hibájának alakulását. Az utolsó varratsor elhelyezése után a hiba mértéke -11,54 mm². Ez a teljes keresztmetszetre vetítve három százalékos hiba, mely egy közepes méretű varratsornak felel meg, mely sok kicsi, de szinte folyamatos méret alábecsülés eredménye. Az egyedi varratsorok és az iteratív feltöltés becslése közötti különbség a hibák előjelének figyelembevételéből adódik. Előbbinél a hibák abszolút értékét vizsgáltuk, míg a többiregű hegesztés kapcsán előjelesen, amely a méretek becslésénél kompenzálta az alá- és felülbecsléseket.

A hibahalmazódás csökkentésére korrekciós mérések közbeiktatásával is megvizsgáltuk a modell viselkedését. A korrekciókat minden ötödik varratsor lehelyezése után elvégeztük a huszadik sorral bezárólag. A hiba alakulását a 10. ábra kék grafikonja reprezentálja. A modell továbbra is alábecsülte a varratsorok méretét, viszont az eltérés szinte végig 5 mm² alatti. A legutolsó varratsor elhelyezése után pedig -1,37 mm²-nek adódik, ami a teljes hegesztési keresztmetszetre vetítve csupán közel három ezredes hiba.

Hegesztési hibára érzékeny helyek azonosítása

Az alakfüggvények becslésének egyik fő előnye, hogy hozzáférést biztosít a profil karakterisztikájához. Így, a hegesztési keresztmetszet azon helyeinek azonosítására is lehetőség nyílik, ahol a hegesztési hibák előfordulásának nagyobb a valószínűsége.



10. ábra Halmazódó hiba többsoros hegesztés esetén

A többrétegű hegesztés mérései alapján egy ilyen helyet azonosítottunk, melyet szürke nyíllal jelöltünk a 7.(a) ábrán. A munkadarab keresztmetszetének vizsgálata és a mikroszkópos elemzés megerősítette, hogy az adott helyen hegesztési hiba található, mely a teljes fúzió hiányából adódott a túl éles peremszög miatt (11. ábra). Ennek javítását célszerű még a gyártás során elvégezni, mivel a kész munkadarabon ez plusz költségeket okoz a varrat feltárása és újra-hegesztése miatt.

Ahogy azt a 7. ábra (b) és (c) mutatják, a modell által becsült varratok alakja alapján előrejelzés adható a hibahely előfordulására, mivel mindkét esetben egyértelműen azonosíthatóak kritikus helyek, a (b) esetben több is, igaz ebből az egyik esetben megtörtént a teljes beolvadás.

Összefoglalás és konklúzió

Ebben a cikkben egy kísérleti adatokból felépített modellt mutattunk be a többrétegű hegesztésben elhelyezett varratsorok valóság közeli alakjának becslésére. A modell központi eleme a fuzzy szabálybázisként megadott geometriai modell, amely a hegesztési sorok felületét leíró alakfüggvény együtthatóit adja meg a hegesztési paraméterek és a paraméteresen megadott egyenetlen hegesztési felszín alapján. A modell kísérleti eredményekkel összehasonlítva, alacsony, három százalék alatti hibával adta vissza az alakfüggvényt.

A modell pontosságát az egymásra rétegzett varratsorok alakjának becslésével is ellenőriztük V keresztmetszetben. A származtatott geometriai jellemzők (varratsor keresztmetszeti mérete, varratszegély, peremszögek) értékeit is nagy pontossággal, néhány százalékos hibával kaptuk meg. Ez a pontosság és a valósághű varratalak leírás lehetővé tette, hogy már a terve-

zési fázisa során azonosíthassuk a hegesztési hibákra érzékeny területeket többrétegű hegesztésben. A kutatása folytatásaként a tervezés további támogatását tűztük ki célul, amellyel a varratsorrend automatikus tervezése lehetővé válik.

Köszönetnyilvánítás

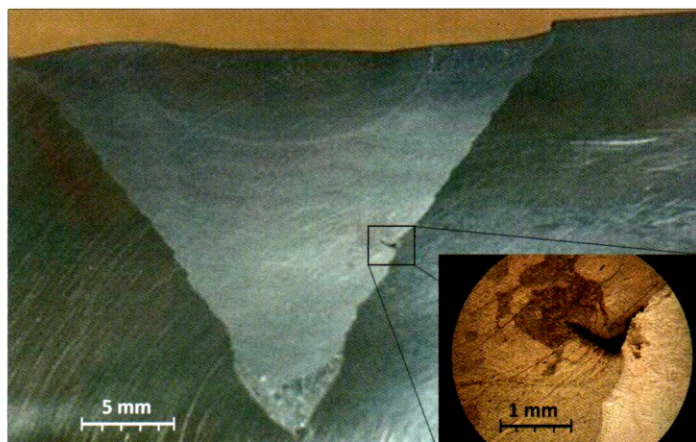
A kutatás megvalósításához PPM Robotics AS (Norvégia), és a Norvég Kutatási Tanács biztosította az anyagi és a laboratóriumi támogatást az „Industrial PhD program” (244972/O30) és a „CoRoWeld (245691) projekten keresztül. További támogatást biztosított a NKFIH a BME Mesterséges Intelligencia TKP2020 IE alapon keresztül (BME IE-MI-FM TKP2020).

Absztrakt

A mesterséges intelligencia módszerek hatékonyan támogathatják hegesztési folyamatok tervezését és kivitelezését. A következőkben, egy olyan modellt mutatunk be, amely alkalmas a többrétegű TIG-hegesztés esetén a varratsorok felületét leírni a hegesztési paraméterek és a hegesztés alapján szolgáló egyenetlen felület jellemzői alapján. A modell által becsült alakfüggvények jó egyezést mutattak a kísérleti eredményekkel való összehasonlításakor. A modell segítségével már a tervezési fázisban megbecsülhetővé válnak az egyes varratsorok alakjai így a következő varratsorok pontosabb pozicionálása mellett az esetleges hibák is előre jelezhetőek.

Hivatkozások

- [1] C. M. Horvath, T. Thomessen, and P. Korondi, 'Robotized Multi-Pass



11. ábra Validásra használt munkadarab keresztmetszeti képe és az azonosított hibahely

- Tungsten Inner Gas Welding of Francis Hydro Power Turbines', in 2017 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, Jun. 2017, pp. 1759–1765, doi: 10.1109/ISIE.2017.8001514.
- [2] S. Yan, H. Fang, S. Ong, and A. Nee, 'Optimal pass planning for robotic welding of large-dimension joints with nonuniform grooves', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Jul. 2017, doi: 10.1177/0954405417718877.
- [3] C. M. Horváth and P. Korondi, 'Supportive Robotic Welding System for Heavy, Small Series Production with Non-Uniform Welding Grooves', Acta Polytechnica Hungarica, vol. 15, no. 8, p. 25, 2018.
- [4] B. Takarics, P. T. Szemes, G. Németh, and P. Korondi, 'Welding trajectory reconstruction based on the Intelligent Space concept', in 2008 Conference on Human System Interactions, May 2008, pp. 791–796, doi: 10.1109/HSI.2008.4581542.
- [5] C. Yang, Z. Ye, Y. Chen, J. Zhong, and S. Chen, 'Multi-pass path planning for thick plate by DSAW based on vision sensor', Sensor Review, vol. 34, no. 4, pp. 416–423, Aug. 2014, doi: 10.1108/SR-04-2013-649.
- [6] H. Zhang, H. Lu, C. Cai, and S. Chen, 'Robot Path Planning in Multi-pass Weaving Welding for Thick Plates', in Robotic Welding, Intelligence and Automation, T.-J. Tarn, S.-B. Chen, and G. Fang, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 351–359.
- [7] Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, and W. Wang, 'Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic

- MAG welding process', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, no. 3, pp. 641–645, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.rcim.2010.11.002.
- [8] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, 'A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 31, pp. 101–110, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008.
- [9] Y. Wang, C. Zhang, J. Lu, L. Bai, Z. Zhao, and J. Han, 'Weld Reinforcement Analysis Based on Long-Term Prediction of Molten Pool Image in Additive Manufacturing', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 69908–69918, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2986130.
- [10] K. Y. Benyounis and A. G. Olabi, 'Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide', *Advances in Engineering Software*, vol. 39, no. 6, pp. 483–496, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.advengsoft.2007.03.012.
- [11] S. Mishra and T. DebRoy, 'Tailoring gas tungsten arc weld geometry using a genetic algorithm and a neural network trained with convective heat flow calculations', *Materials Science and Engineering: A*, vol. 454–455, pp. 477–486, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.msea.2006.11.149.
- [12] G. A. Bestard, R. C. Sampaio, J. A. R. Vargas, and S. C. A. Alfaro, 'Sensor Fusion to Estimate the Depth and Width of the Weld Bead in Real Time in GMAW Processes', *Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 4, Mar. 2018, doi: 10.3390/s18040962.
- [13] H. K. Narang, U. P. Singh, M. M. Mahapatra, and P. K. Jha, 'Prediction of the weld pool geometry of TIG arc welding by using fuzzy logic controller', *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 9, Art. no. 9, 2011, doi: 10.4314/ijest.v3i9.6.
- [14] K. R. Naik and A. K. Khandelwal, 'Effects of the Bead Geometry of MIG Arc Welding Analysis by Fuzzy Logic Method', *International Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 6, p. 6, 2017.
- [15] Y. Liu and Y. Zhang, 'Iterative Local ANFIS-Based Human Welder Intelligence Modeling and Control in Pipe GTAW Process: A Data-Driven Approach', *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1079–1088, Jun. 2015, doi: 10.1109/TMECH.2014.2363050.
- [16] O. Cordón, Ed., *Genetic fuzzy systems: evolutionary tuning and learning of fuzzy knowledge bases*. Singapore: World Scientific, 2001.
- [17] A. Fernandez, F. Herrera, O. Cordón, M. Jose del Jesus, and F. Marcelloni, 'Evolutionary Fuzzy Systems for Explainable Artificial Intelligence: Why, When, What for, and Where to?', *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 69–81, Feb. 2019, doi: 10.1109/MCI.2018.2881645.
- [18] J. Botzheim, C. Cabrita, L. T. Kóczy, and A. E. Ruano, 'Fuzzy rule extraction by bacterial memetic algorithms', *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 312–339, 2009, doi: 10.1002/int.20338.
- [19] K. Balázs, J. Botzheim, and L. T. Kóczy, 'Comparative Investigation of Various Evolutionary and Memetic Algorithms', in *Computational Intelligence in Engineering*, vol. 313, I. J. Rudas, J. Fodor, and J. Kacprzyk, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 129–140.
- [20] J. Botzheim, Y. Toda, and N. Kubota, 'Bacterial memetic algorithm for offline path planning of mobile robots', *Memetic Comp.*, vol. 4, no. 1, pp. 73–86, Mar. 2012, doi: 10.1007/s12293-012-0076-0.
- [21] D. Zhou, Y. Fang, J. Botzheim, N. Kubota, and H. Liu, 'Bacterial memetic algorithm based feature selection for surface EMG based hand motion recognition in long-term use', in *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Dec. 2016, pp. 1–7, doi: 10.1109/SSCI.2016.7850241.
- [22] A. Csik, J. Botzheim, J. Balázs, T. Csoknyai, and J. L. Hontvári, 'Energy and cost optimal design for the reconstruction of residential building envelopes by bacterial memetic algorithms', in *The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems*, Kobe, Japan, Nov. 2012, pp. 1226–1231, doi: 10.1109/SCIS-ISIS.2012.6505181.
- [23] J. Botzheim and P. Földesi, 'Novel calculation of fuzzy exponent in the sigmoid functions for fuzzy neural networks', *Neurocomputing*, vol. 129, pp. 458–466, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.neucom.2013.09.013.
- [24] Y. Li, Y. Sun, Q. Han, G. Zhang, and I. Horváth, 'Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 252, pp. 838–848, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.017.
- [25] H. C. Fang, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, 'Robot path planning optimization for welding complex joints', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–11, Nov. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-9684-z.
- [26] E. H. Mamdani and S. Assilian, 'An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller', *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, Jan. 1975, doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

*Horváth Csongor Márk
Budapesti Műszaki
és Gazdaságtudományi Egyetem
Mechatronika, Optika,
és Gépészeti Informatika Tanszék

Kollár Dénes*

Hegesztésszimuláció alkalmazása acélszerkezetek gyártásában és tervezésében

A virtuális gyártás (azaz numerikus modell alapú gyártási szimulációk) és virtuális kísérletek (azaz numerikus modell alapú teherbírás-vizsgálat) új irányt jelentenek és lehetőséget teremtenek a gyakorlatban a gyártási folyamatok optimalizálására és fejlesztésére, a gyártás és tervezés közvetlen összekapcsolására, gyártási specifikumok tervezési, valamint méretezési módszerekben való figyelembevételére. Hegesztésszimulációval az acél gyártmányokban a hegesztésből adódó maradó deformációk és sajátfeszültségek meg-

határozhatók, melyek ismeretében a gyártás és tervezés folyamata pontosítható, továbbfejleszthető. Jelen cikk mintegy rövid kivonata a szerző „Welding Simulation in Advanced Manufacturing and Design of Steel Structures” című doktori értekezésének [1]. A disszertációban bemutatott kutatási program hegesztett acélszerkezeti elemek virtuális gyártásának és virtuális kísérleteinek előnyeit vizsgálja és mutatja be, mely előnyök mind a gyártási, mind a tervezési folyamat során kihasználhatók.

tartók teherbírás-vizsgálatának témájában. A kutatás többek között foglalkozik a tartótípus tipikus sajátfeszültség-eloszlásának meghatározásával gyártási szimulációk alkalmazásával, valamint a geometriai és szerkezeti eltérések nyírási horpadási ellenállásra gyakorolt hatásának meghatározásával, elemzésével és értékelésével. Ezzel jelen cikk nem foglalkozik, részletei megtalálhatók a doktori disszertációban, illetve folyóiratcikkekben [2][3].

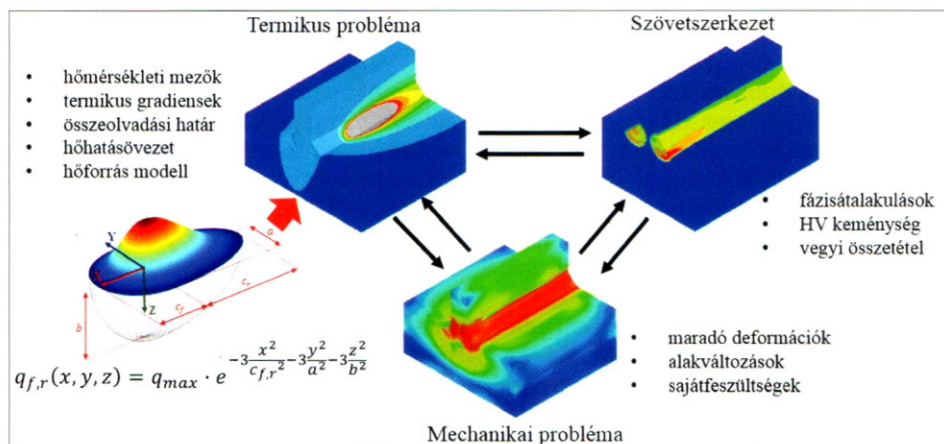
Kutatási célok

A dolgozat három különféle kutatási témára összpontosít az acélszerkezetek fejlett gyártása és tervezése területén numerikus szimulációk segítségével. Az első kutatási cél egy validált-numerikus modellezési keretrendszer kidolgozása ömlesztő hegesztési eljárások szimulálására egy általános célú végelemes szoftver segítségével, mellyel a hőmérsékleti, a feszültség és alakváltozási mezők meghatározhatók. A szimulációk alapján meghatározott pontosított eltérések figyelembevétele geometriai és anyagi nemlineáris imperfekt analízisben (GMNIA) a hegesztett szerkezetek teherbírásának pontosabb meghatározását, acélszerkezetek megbízhatóságának növelését eredményezi. A második kutatási cél egy hegesztési folyamatmodell kidolgozása tipikus hegesztett kötések-

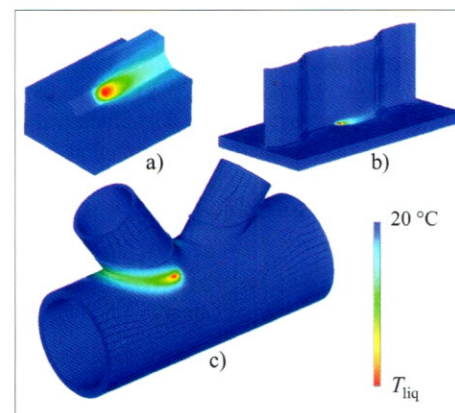
hez, háromdimenziós hőátadási modell és dupla ellipszoid hőforrás modell felhasználásával, figyelembe véve a hegesztési változókat és a huzalelektroda típusát a virtuális gyártási folyamat során. A kifejlesztett modellezési környezet alkalmazása jelentősen csökkentheti a gyártási költségeket azáltal, hogy kiküszöböli a hegesztést követő javítási munkálatokat, csökkenti a próbagyártmányok számát és növelheti a szerkezetek élettartamát. A kutatás utolsó témáját trapézlemez gerincű tartók vizsgálata adja, mely elsősorban építőmérnöki szempontból érdekes, mivel az elmúlt évtizedekben egyre gyakrabban alkalmazták acél hídszerkezetekben. Szerkezeti viselkedésük számos különlegességgel rendelkezik (pl. 'harmonikahatás'), amelyek további vizsgálatokat tesznek szükségessé a trapézlemez gerincű

Modellezési keretrendszer kidolgozása

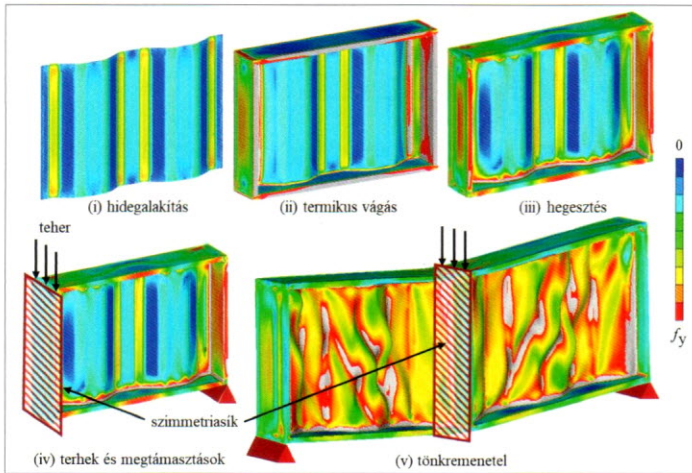
ANSYS programban kifejlesztésre került egy komplex modellezési keretrendszer (1. ábra), amely magában foglalja a háromdimenziós tranziens termo-metallurgiai-mechanikai és különválasztott termo-mechanikai analíziseket. A kidolgozott eljárás validációja hőmérsékleti és sajátfeszültség mérések alapján történt [4], [5]. A tranziens analízisnél a valós hőforrást, valamint a hőforrás környezetében lejátszódó komplex fizikai folyamatokat a hőenergia sűrűséget leíró Goldak-féle dupla ellipszoid hőforrás modell [6] helyettesíti egyszerűsítésként. A hőforrás haladását lokális koordináta-rendszerek térbeli mozgásával lehet modellezni. Mivel a hegesztési trajektóriák és a lokális koordináta-rendszerek pozíciói az esetek többségében egyszerű egyenletek alkalmazásával nem írhatók le, így egy automatikus varratkö-



1. ábra Kidolgozott tranziens analízisben modellezett jelenségek



2. ábra. Hőmérsékleti mezők a kidolgozott automatikus varratkövető algoritmus alkalmazása során a) 1D, b) 2D és c) 3D hegesztési trajektória esetén



3. ábra. Acél gyártmányok virtuális kísérletére kifejlesztett modell lépései

vető algoritmust fejlesztettem ki bármilyen lehetséges trajektória szimulálására, melynek az alap gondolatát a hegesztőrobotok világa és a varratkövető szenzorok adták. A 2. ábra hőmérsékleti mezőket mutat be virtuális próbatetek hegesztése során egy-, két- és háromdimenziós trajektória (1D, 2D és 3D) esetén, a kifejlesztett algoritmus alkalmazásával.

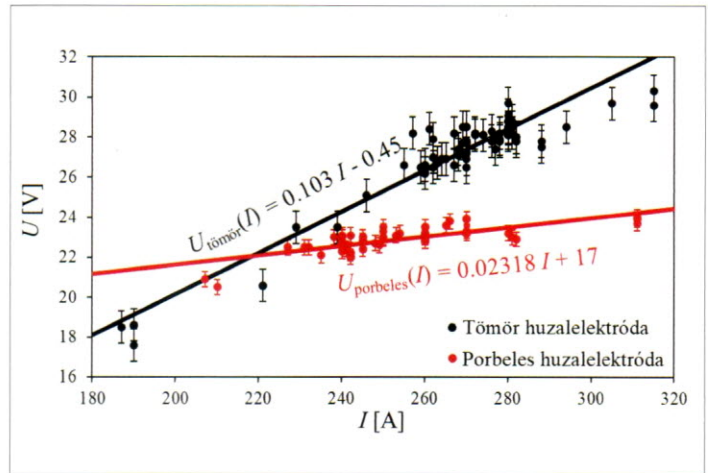
Az acél gyártmányokon végrehajtott virtuális kísérletek egy fejlett méretezési módszert jelentenek a gyártásban és tervezésben. Az alkalmazott módszert a 3. ábra szemlélteti, mely egy trapézlemez gerincű tartó von Mises sajátfeszültségeit mutatja be a gyártási folyamat minden egyes lépését követően, (i) hidegalakítás, (ii) termikus vágás és (iii) hegesztés után. A (iv) jelű részlet a virtuális kísérletek során újradefiniált terheket és peremfeltételeket ábrázolja. A von Mises feszültségeket, beleértve a maradó feszültségeket a nyírási horpadási tönkremenetel közben a (v) jelű részlet mutatja be. A numerikus eljárást zárt szelvényű oszlop kísérlettel és numerikus modellel meghatározott kihajlási ellenállása alapján validáltam. Az eredményeket összehasonlítottam, melyekben 2%-nál kisebb eltérést tapasztaltam szakítóvizsgálatok alapján meghatározott anyagjellemzők alkalmazásával [7].

Hegesztési folyamatmodell fejlesztése

Egy olyan hőbevitel alapú hegesztési folyamatmodell kidolgozása adta a kutatás további alapját, amely a Goldak-féle dupla ellipszoid hőforrás modellel alkalmazza és háromdimenziós hőátadási problémát old meg huzalelektrodás, aktív védőgázos ívhegesztés

tési eljárásváltozatok esetén. A kutatás során egy szélturbina generátorház szegmensének kisméretű, hegesztett T-kötései kerültek görcső alá. A kísérleti kutatási program egyik célja a különféle huzalelektrodák, hegesztési változók és varratípusok termelékenysége és a szerkezeti viselkedésre gyakorolt hatásainak meghatározása. A nagyciklusú fáradás döntő jelentőségű szélturbinák esetében, ezért három eltérő kialakítás – K-varratos, kétoldali sarokvarratos és egyoldali 1/2 V-varratos T-kötés – vizsgálata is megtörtént, amelyek ciklikus terheléssel szemben jelentősen eltérő ellenállással rendelkeznek.

A kísérleti programban összesen harminc darab próbatestet vizsgáltam: 6 darab K-varratos, 18 darab kétoldali sarokvarratos (egy, illetve több varratsoros), valamint 6 darab egyoldali 1/2 V-varratos T-kötést gyártottak le kézi hegesztéssel. Az összes próbatest hossza egységesen 100 mm volt a generátorház szegmensnél alkalmazott kötésnek megfelelően. Az alaplemezek mérete 300 mm × 100 mm × 40 mm, míg a merevítők mérete 140 mm × 100 mm × 15 mm volt. Az alaplemezek és a merevítők S355J2+N szerkezeti acélból készültek. A próbatetek PA vályú vagy PB vízszintes sarokhelyzetben készültek Fronius Trans Puls Synergic 5000 huzalelektrodás, aktív védőgázos ívhegesztő áramforrást használva, melyre enyhén eső áramforrás jellegű görbe jellemző. Egyenáramot és fordított polaritást (DC+) alkalmaztak hegesztés közben, az áramerősség (I) és feszültség (U) értékeket hegesztés közben feljegyeztem. Így az egyes varratsorokhoz a munkapontokat előállítottam (feltételezve, hogy az ívhossz konstans) tömör



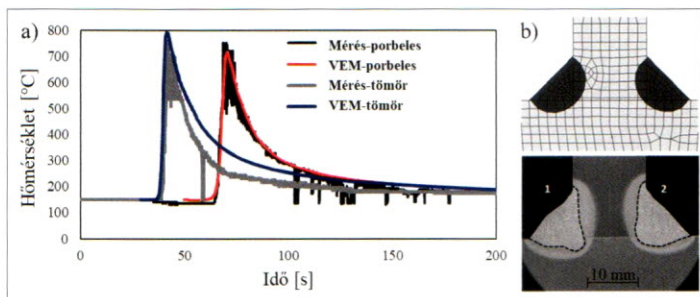
4. ábra Munkapontok és az áramerősség-feszültség összefüggések tömör és porbeles huzalelektrodák esetén

és porbeles huzalelektrodák esetén is. Egyszerűsítésképpen lineáris regressziót végrehajtva – a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva – a hegesztési áramerősség és feszültség közötti kapcsolatot meghatároztam a vizsgált huzalelektroda típusokhoz (4. ábra), mely ily módon az előzetes tervezésnél a hőbevitel számításánál, valamint a T-kötések hegesztésszimulációjához kifejlesztett numerikus modellben közvetlenül alkalmazható. A hibasávok a mért és regressziós egyenessel meghatározott vonatkozó értékek eltéréseinek szórását jelölik tömör és porbeles huzalelektrodáknál ($s = 0.81$ V és $s = 0.38$ V), ez az ív karakterisztika ívhossz és áramátadó-munkadarab távolság csökkenéséből növekedéséből adódó bizonytalanságokkal – és a különböző anyagáviteli módokhoz tartozó változások figyelmen kívül hagyásával – magyarázható. A tömör huzalelektroda Esab OK Aristorod 12.50 (EN ISO 14341:2011 G 42 4 M G3Si1), a porbeles huzalelektroda Böhler Ti52 T-FD (EN ISO 17632:2016 T 46 4 P M 1 H5) típusú volt, mindkét esetben 1.2 mm átmérővel. A védőgáz EN ISO 14175 - M21 - ArC – 18 volt 12–15 l/min gázáramlási mennyiség mellett. Az előmelegítési és sorközi hőmérséklet 150 °C volt a kísérletek során, melyet hőfokjelző krétával ellenőriztek. A környezeti hőmérséklet 20–22 °C között, a fajlagos hőbevitel 0.60 és 2.71 kJ/mm között változott a hozaganyagtól, a varratkialakítástól és a varratsorok számától függően. A vizsgálatok során a varratsorok számának és a fajlagos hőbevitelnek a hegfürdő keresztmetszeti területére gyakorolt hatása volt a középpontban.

A hegfürdő méretek makrociszolatok (ld. 5. ábra a kísérleti program 6



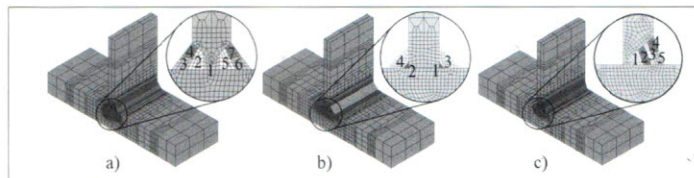
5. ábra Makrosziszolatok kétoldali sarokvarratoknál (többsoros varratok)



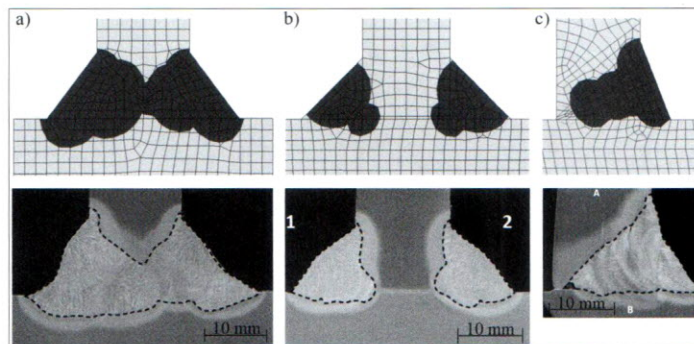
6. ábra. Termikus hatások meghatározása a) hőmérsékleti mérések alapján porbeles és tömör huzalelektrodához, valamint b) kétoldali sarokvarrattal kialakított próbatest makrosziszolata

darab kétoldali, többsoros sarokvarrata esetén), a hőmérséklet-idő görbék K-hőeleme és hőkamerás mérések alapján lettek meghatározva. Ezek a mérések képezik a hegesztési folyamatmodell validálásának alapját. A próbatest hegesztésből adódó maradó deformációkat koordináta-mérő géppel (coordinate measuring machine - CMM) történő mérések alapján határoztam meg a kezdeti és deformált alakokon elvégzett vizsgálatok, majd a mérési adatok koordináta-transzformációinak felhasználásával. A termikus hatások kalibrálását a 6. ábrán bemutatott kísérleti ('Mérés') és numerikus ('VEM') idő-hőmérsékleti görbék összehasonlításával végeztem el. Az ábra egy kétoldali sarokvarrattal kialakított próbatest makrosziszolatát és a végeleemes modell keresztmetszetét is bemutatja, mely jelzi a hegfürdő nagyságát. Fontos kiemelni, hogy a numerikus modell kalibrálása a hegfürdő mérete és nem a hegfürdő alakja alapján történt. A cél a mért hegfürdő méretének közelítése volt a hegesztési változók bizonytalanságainak kezelésére önkényesen megadott $\pm 10\%$ -os tartományon belül. A feltételnek eleget téve a numerikus számítások futtatásakor a termikus hatások mindkét elektródatípusnál $\eta = 0.90$ volt. A numerikus modellbe beépített dupla ellipszoid hőforrás modell jellemző paraméterei a hegesztési változók tipikus tartományára kerültek kalibrálásra kétoldali, egysoros sarokvarratok esetén, mely összesen tizenkét próbatest modellezését jelenti a numerikus kutatási programban. A kötések tényleges méretekkel, a megfelelő gyökmérettel kerültek modellezésre. Számos iteráció elvégzése után

kifejlesztettem a Goldak-féle dupla ellipszoid hőforrás modell a és b jellemző paramétereit, melyek porbeles huzalelektrodákhoz fajlagos hőbeviteltől függő polinom függvény formájában, míg tömör huzalelektrodánál fajlagos hőbeviteltől független, konstans értékek formájában álltak elő. A paraméterek közötti további összefüggésekkel a doktori disszertációt, illetve folyóiratcikk [8] foglalkozik. Az így kapott hegfürdő méretek esetén a minimális és a maximális hiba -9.9% és 9.8% , míg a hibák átlaga és szórása -1.9% és 6.0% volt. A kétoldali, egysoros sarokvarratok alapján kalibrált paraméterek validálását egy kibővített paramétertartomány segítségével háromféle kialakítás – több varratsoros K-varratos, kétoldali sarokvarratos és egyoldali $\frac{1}{2}$ V-varratos T-kötés – esetén hajtottam végre, az egyes konfigurációk közül egyet-egyet mutatok be. A 7. ábra a validálási folyamatban figyelembe vett geometriájú T-kötések végeleemes modelljeit és hegesztési sorrendjét mutatja be. A 8. ábra mutatja be a szimulált hegfürdőket és az összeolvadási határokat szaggatott vonalakkal kiemelve a makrosziszolatokon. A likvidusz hőmérsékletet 1500°C -nak feltételeztem. A mérések és a numerikus eredmények jó egyezést mutatnak, a hegfürdő méretének abszolút maximális hibája 8.8% , ami jó közelítésnek mondható. A 8. ábrán bemutatott és a validációnál alkalmazott a)–c) jelű próbatestek maximális szimulált keresztirányú deformációja sor-



7. ábra Több varratsoros a) K-varratos, b) kétoldali sarokvarratos és c) $\frac{1}{2}$ V-varratos T-kötések végeleemes modellje és hegesztési sorrendje



8. ábra Szimulált és mért hegfürdők több varratsoros a) K-varratos, b) kétoldali sarokvarratos és c) $\frac{1}{2}$ V-varratos T-kötéseknél

rendben 2.19 mm (mérés: 2.80 mm), 1.02 mm (mérés: 1.53 mm) és 8.65 mm (mérés: 8.85 mm) volt. Az eredmények azt mutatják, hogy a K-varratos és a kétoldali sarokvarratos kialakítások kedvezők deformációvezérelt tervezésnél. Nyilvánvaló, hogy az egyoldali $\frac{1}{2}$ V-varratos T-kötés ebben a tekintetben a legkedvezőtlenebb konfiguráció. A hosszirányú deformáció elhanyagolható ($\sim 0.2\text{--}0.3\text{ mm}$) volt a keresztirányú deformációkhoz képest a rövid próbatesteknél.

Összefoglalás

Nagyszámú kísérleti adat alapján kidolgozásra és validálásra került egy újfajta, hőbevitel alapú hegesztési folyamatmodell, mely Goldak-féle dupla ellipszoid hőforrás modellét alkalmaz és háromdimenziós hőátadási problémát old meg huzalelektrodás, aktív védőgázos (82% argon és 18% széndioxid gázkeverék) ívhegesztési eljárásváltozatok esetén. A folyamatmodell alkalmazásával S355J2+N jelű szerkezeti acélok esetén a hegfürdő mérete és maradó deformációk megfelelő pontossággal meghatározhatók hegesztési pozícióként PA vályúhelyzetet vagy PB vízszintes sarokhelyzetet, tömör vagy porbeles huzalelektrodát alkalmazva. A kidolgozott hegesztési folyamatmodell újdonsága, hogy a fajlagos hőbevitel és a hőforrás modell paraméterei közötti összefüggést írja le sarokvarratos, K-varratos és $\frac{1}{2}$ V-varratos T-kötések esetén. A vali-

dált folyamatmodell közvetlenül alkalmazható a bemutatott paraméter-tartományban és hegesztéstechnológiai megkötések mellett többek között (i) termékfejlesztésnél, (ii) gyártásoptimalizálásnál, (iii) maradó deformációk és utólagos korrekciós munkálatok csökkentése, valamint (iv) selejtelek számának redukálása érdekében.

Abstract

Welding and subsequent cooling cause complex thermal cycles resulting in residual stresses and distortions in the weldment. There are several in-process control methods and post-weld corrective methods that can be used to mitigate welding-induced imperfections; however, these can be expensive and time-consuming techniques. Virtual manufacturing (i.e., numerical modelling-based manufacturing simulations) and virtual tests (i.e., numerical modelling-based resistance calculations) mean a novel possibility in product development and optimization by coupling design and manufacturing directly, and taking manufacturing specialities into account in design approaches. Therefore, the paper, and the according dissertation, deals with the application and refinement of welding simulation methods. The dissertation focuses on three different research topics in the field of steel structures using numerical simulations consisting of virtual manufacturing and virtual testing. First, a numerical modelling framework is developed and validated for simulating arc welding processes in order to predict temperature, stress and deformation fields during welding. The novelty of the framework is an automated weld tracking algorithm developed for tracking arbitrary three-dimensional welding trajectories. Secondly, a weld process model, focusing on weld pool size in structural steel weldments, is developed and validated using a three-dimensional heat transfer model and Goldak's double ellipsoid heat source model for metal active gas welding processes. Manufacturing and testing of steel corrugated web girders are in the focus of the third research topic; however, it is not presented in the current paper as it is mainly a civil engineering practice related issue.

Absztrakt

A hegesztés és az azt követő lehűlés összetett hőciklusokat eredményez,

amelyek a hegesztett szerkezetekben maradó feszültségekhez és maradó deformációkhoz vezetnek. Számos gyártásközi és gyártás utáni korrekciós módszer létezik, amelyek alkalmazhatók a hegesztésből származó geometriai és szerkezeti eltérések csökkentésére. Ezek végrehajtása azonban általában költséges és időigényes. A virtuális gyártás (azaz numerikus modell alapú gyártási szimulációk) és virtuális kísérletek (azaz numerikus modell alapú teherbírásvizsgálat) új irányt jelentenek és lehetőséget teremtenek a termékfejlesztésnél és optimalizálásnál gyakorlatban a gyártás és tervezés közvetlen összekapcsolásával, gyártási specifikumok tervezési, valamint méretezési módszerekben való figyelembevételével. A cikk – és a cikk alapját képező doktori disszertáció – hegesztésszimulációs eljárások alkalmazásával és pontosításával foglalkozik. A disszertáció három kutatási témát tartalmaz, melyek acélszerkezetek virtuális gyártásával és virtuális tesztelésével foglalkoznak. Először egy numerikus modellezési keretrendszer került kidolgozásra és validálásra ívhegesztési folyamatok szimulációjára a hegesztés során fellépő hőmérsékleti, feszültség és deformációs mezők meghatározásának céljából. A keretrendszer újszerűsége hegesztésszimulációs célszoftverekhez képest egy beépített automatizált varratkövető algoritmus kifejlesztése, amely tetszőleges háromdimenziós hegesztési trajektória lekövetésére alkalmas. A második kutatási téma egy hőbevitel alapú hegesztési folyamatmodell kifejlesztése és validálása, mely a hegfürdő méretének meghatározására szolgál szerkezeti acélok-nál. A folyamatmodell háromdimenziós hőátadási modellt és Goldak-féle dupla ellipszoid alakú hőforrás modellt alkalmaz huzalelektrodás, aktív védőgázos ívhegesztési eljárásváltozatok esetén. A kutatás harmadik témája trapézlemez gerincű tartók virtuális gyártására és teherbírás meghatározására fókuszál, azonban ezzel jelen cikk nem foglalkozik, mivel egy főként építőmérnöki vonatkozású témáról van szó.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben szereplő kísérleti program elvégzése a GINOP-2.1.1-15-2016-008854 számú, 'Energiatermelő berendezések nagy teljesítőképességű acél szerkezeti elemeinek gyártástechnológiai kutá-

tás-fejlesztése' című kutatás-fejlesztési projekt keretein belül zajlott, apénzügyi támogatásért a szerző ezúton is köszönetét fejezi ki.

Hivatkozások

- [1] Kollár D. (2020). Welding Simulation in Advanced Manufacturing and Design of Steel Structures. PhD disszertáció. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- [2] Kollár D., Kövesdi B. (2020). Welding simulation of corrugated web girders - Part 1: Effect of manufacturing on residual stresses and imperfections. Thin Walled Structures, 146, 106107. doi:10.1016/j.tws.2019.04.006.
- [3] Kollár D., Kövesdi B. (2019). Welding simulation of corrugated web girders - Part 2: Effect of manufacturing on shear buckling resistance. Thin Walled Structures, 141, 477–488. doi:10.1016/j.tws.2019.04.035.
- [4] Somodi B., Kollár D., Kövesdi B., Nézó J., Dunai L. (2017). Residual stresses in high-strength steel welded square box sections. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 170, 804–812. doi: 10.1680/jstbu.16.00139.
- [5] Kollár D., Kövesdi B., Nézó J. (2017). Numerical simulation of welding process – Application in buckling analysis. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 61, 98–109. doi: http://dx.doi.org/10.3311/PPci.9257.
- [6] Goldak J.A., Chakravarti A., Bibby M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B, 15, 299–305.
- [7] Kollár D., Kövesdi B. (2016). Experimental and numerical simulation of welded columns. In: Bauer B., Garasic I. (szerk.), Proceedings of 41st International Conference Zavarivanje – Welding 2016 - Opatija, Hrvatsko Drustvo Za Tehniku Zavarivanja /Croatian Welding Society, Zagreb, 123–132.
- [8] Kollár D., Kövesdi B., Vigh L.G., Horváth S. (2019). Weld process model for simulating metal active gas welding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102(5-8), 2063–2083. doi: 10.1007/s00170-019-03302-3.

Kollár Dénes (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.)