

316L mintákon végzett diffúziós hegesztési kísérletek Gleeble 3800 fizikai szimulátoron

*Baross Tétény¹, Veres Gábor¹, Palánkai Miklós¹,
Jánosi László², Bereczki Péter³*

¹ELKH Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

²Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, MATE, GÉTI Mechatronika Tanszék
2103 Gödöllő, Páter K. u. 1.

³Dunaújvárosi Egyetem, Gépészeti és Anyagtudományi Tanszék
2400 Dunaújváros, Táncsics M. utca 1/A.

Diffúziós hegesztési és referenciakísérleteket végeztünk 316L mintákon a Dunaújvárosi Egyetem Gleeble 3800 fizikai szimulátorán azonos paraméterek mellett (axiális kompresszió, hőmérséklet, hegesztési idő). A kísérletek numerikus modellezése során a hőmérséklet eloszlását és az axiális deformációt modelleztük. A fizikai kísérletekben megfigyelhető volt a hegesztett minták kisebb tengelyirányú kúszása a referenciamintákhoz képest. A jelenséget a hegesztési felületen ébredő kontakt villamos ellenállással magyaráztuk, amit numerikus modellezeink is alátámasztottak. A kontakt-ellenállásból Zhang (2012) modellje alapján a kötési felület becsülhetővé vált, amit a Hill és Wallach-féle (1989) elméleti modellel vetettünk össze. Így lehetőség nyílt a diffúziós hegesztési eljárás teljes folyamatának vizsgálatára.

Bevezetés

A világ energiaigénye folyamatosan növekszik, ám az energiatermelés környezetünk számára jelentős többletterhelést jelent, ami a természet mellett az emberek egészségét is károsíthatja. Ezért olyan új erőművek fejlesztésére van szükség, melyek helyettesíteni tudják a környezetre káros erőműveket. Ilyen új erőművek lehetnek a jövőben a fúziós erőművek. Ezek megvalósításának következő mérföldköve lesz a jelenleg épülő ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) fúziós tokamak. Az ilyen reaktor toroidális vákuumkamrájának háromdimenziós (3D) metszete az 1. ábrán látható.

A fúziós folyamat lényege, hogy tórusz alakú vákuumkörnyezetben mágneses térrel lebegtetnek töltött részecskéket: deutériumot és tríciumot. A töltött részecskék a plazmában egymással ütközve héliummá alakulnak, és a folyamat során nagy energiájú neutronok szabadulnak fel. A semleges töltésű neutronok mozgási energiáját a vákuumot közvetlenül határoló első fal nyeli el. Innen a fal hűtőközegének segítségével elszállított hőenergiát hagyományos módszerekkel elektromos árammá alakítják. Az első fal szerkezeti elemeit erő neutronsugárzás nagyságrendekkel nagyobb, mint ami egy atomerőmű reaktortartályának falát éri. A sugárzás károsítja a szerkezeti anyagot, és ezzel együtt a hegesztési kötések is roncsozja. A vákuumkörnyezetben ugyanakkor a hegesztési varratok nem csak a mechanikai kötések, hanem a megfelelő hővezetést is biztosítják. Mivel az ITER 30-40 perces pulzusokban fog működni, ezért a kötéseknek további ciklikus hőterhelést is el kell viselniük.

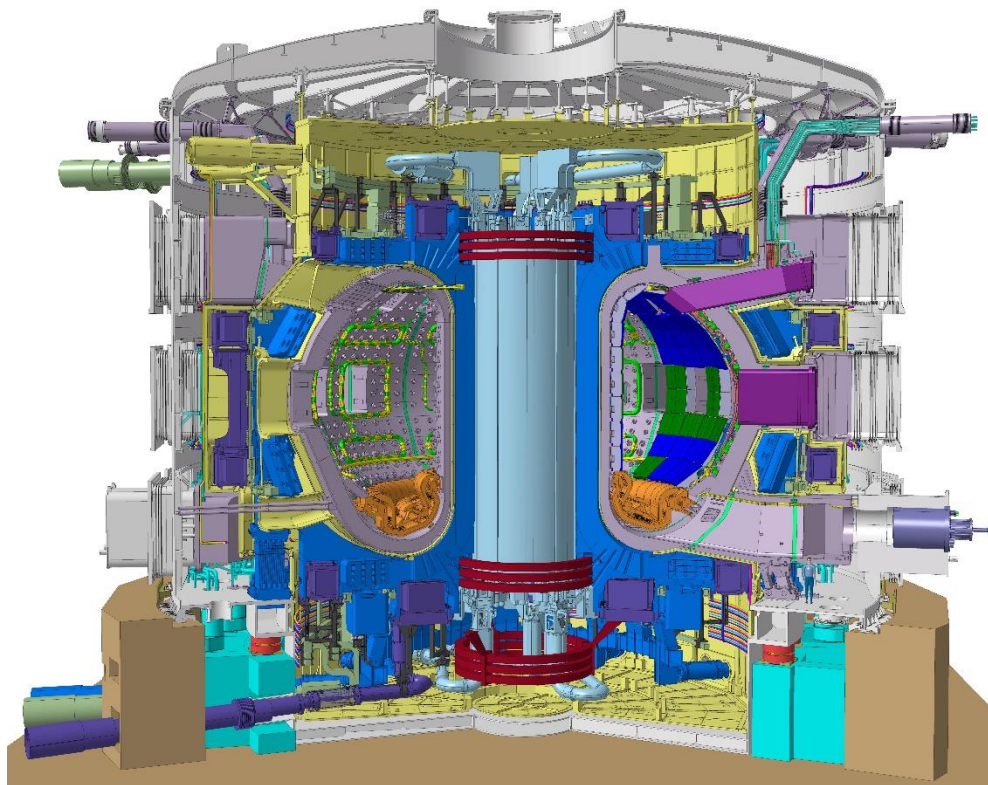
A vákuumedény első falának termikus védelmét biztosító hűtött elemek (ún. blanket modulok) hegesztési kötéseit

többek között „szilárd halmazállapotú” diffúziós HIP (Hot Isostatic Pressure) hegesztési eljárással készítik [1]. Ezt akkor alkalmazzák, amikor az eltérő mechanikai/hőtani tulajdonságú anyagokból készített, nagyméretű tömböket kell sík felületek mentén összehegeszteni. Az első fal főbb szerkezeti elemeit az ITER számára fejlesztett acélból (316L(N)-IG) fogják készíteni.

Kutatásunk során az első fal elemei készítéséhez hasonló paraméterekkel diffúziós hegesztési kísérleteket és referenciateszteket végeztünk azonos paraméterek mellett (hőmérséklet, nyomás, idő) 316L mintákon a Dunaújvárosi Egyetem Gleeble 3800 fizikai szimulátorán. Az 2. ábrán egy diffúziós hegesztés kísérlete látható.

Az ún. szilárd halmazállapotú diffúziós kötés teljes áthegegedése, azaz a kontaktfelületen keletkező üregek eltűnése [2] jellemzően hosszú időt vesz igénybe. A hosszú hegesztési folyamat hátrányai, hogy magas költségekkel jár, továbbá az eredeti mintadarabok anyagának szerkezete megváltozik, valamint a geometriája is deformálódhat a magas hőmérsékleten. Ugyanakkor az irodalomban nem találtunk példát a diffúziós hegesztés csatlakozó felületeinek kontakt villamos ellenállással történő vizsgálatára.

A diffúziós hegesztés során a fő kihívást a szennyeződések, oxidok eltávolítása, továbbá a felületi érdesség mellett a síklapúság beállítása jelenti. Az oxidok jelenlétét sokszor nehéz mérni a felületen, ezért nagy jelentősége van a hegesztések előtti kifűtésnek, bár erre a kísérletek során nem volt lehetőségünk. A hegesztett kötések kontakt villamos ellenállásának mérése egy új eljárást jelenthet a hegesztési felületek állapotának vizsgálatára.



1. ábra: Az ITER tokamak kriosztátjának és vákuumkamrájának 3D metszete

A Gleeble diffúziós hegesztési kísérleteinek jobb megértése érdekében olyan numerikus modellt készítettünk, amely a minta hőmérséklet-eloszlása és a felületi nyomás figyelembevételével modellezte a tengelyirányú deformációt, valamint figyelembe vette az anyagi jellemzők hőmérsékletfüggő voltát.

A kísérletek során megfigyeltük, hogy a hegesztett minták kevésbé kúsztak a referenciamintákhoz képest, azaz a hegesztett minták tengelyirányú deformációja kisebb volt az azonos terhelésű referenciamintákhoz képest. Ezt a jelenséget a numerikus modellek is kimutatták a kontaktfelületnél keletkező kontakt villamos ellenállással. Így a kísérletek alapján, a kúzás erős hőmérsékletfüggése miatt a modellezéssel becsülhetővé vált a hegesztési felületen ébredő kontakt villamos ellenállás. Ezzel összefüggést találtunk a minta tengelyirányú deformációja, a kontakt villamos ellenállás és a diffúziós hegesztés folyamata között.

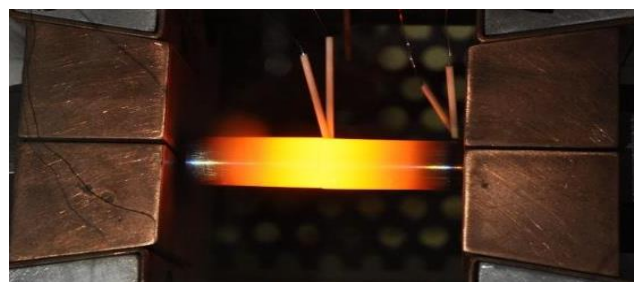
A mérési eredményeket és a numerikus modellt a [3]-ban, az előzetes tanulmányokat és részeredményeket, pedig a [4, 5, 6]-ben közöltük.

Minták előkészítése és a kísérletek kivitelezése a Gleeble fizikai szimulátorral

Az ellenállásfűtéssel hevített hengeres minták átmérője 12,5 mm, hasznos szakasza a befogó pofák között 30+30 mm, azaz a referenciaminta esetében 60 mm hosszú volt. Egy hegesztési kísérlet és a hőmérsékletmérésre szolgáló két termoelem a 2. ábrán látható. Kutatásaink során több kísérlet közül két hegesztési és két referenciakísérletet

vizsgáltunk és modelleztünk részletesebben, melyek paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

A megfelelő felületi minőség eléréséhez a diffúziós kötésre szánt felületeket mindkét minta esetében 600-tól 1000/1200 finomságú vizes csiszolópapírral políroztuk. A mérések alapján a minták felületi érdessége $R_z = 0,5 \pm 1 \mu\text{m}$ volt. A csiszolás után a minták tisztítása acetonnal történt. A felületi érdesség mérése után a krómoxid eltávolítása a felületekről CITRANOX savas oldattal történt, amely maratás 35°C -on ultrahangos fürdőben 10 percig tartott (desztillált víz, 2-5% oldattal). A maratás után a mintákat ultrahangos fürdőben, tiszta desztillált vízzel is tisztítottuk 5 percen keresztül. Ezután a mintákat nagynyomású levegővel szárazra fújtuk, majd beraktuk egy szállítható vákuumedénybe. Az edényt a vákuumozás után argongázzal töltöttük fel, hogy megelőzzük a további oxidációt. A minták rögzítése a Gleeble kísérleti cellába és a termoelemek bekötése több mint 60 percet vett igénybe, ezalatt a minták a levegőn voltak a cella vákuumozásáig. Így a felület részleges oxidációja elkerülhetetlen volt. Ugyanakkor az így keletkezett oxidréteg feltehetően jóval kevesebb, mint ami az eredeti felületen volt.



2. ábra: Diffúziós hegesztés a Dunaújvárosi Egyetem Gleeble laborjában

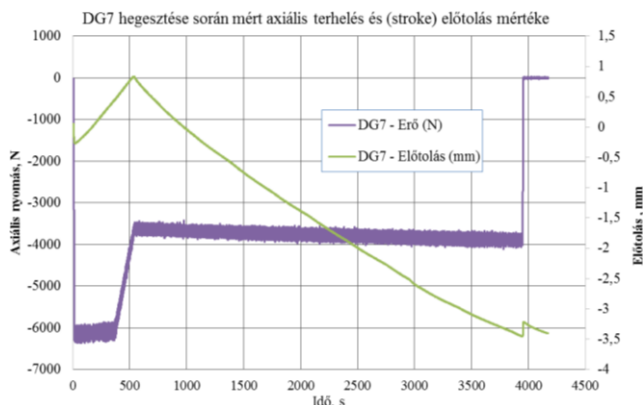
1. táblázat: A két hegesztés és a két referenciamérés paramétere, valamint az R_{kont} függvénye

| | DG7 - hegesztés | RG7 | DG3 - hegesztés | RG3 |
|--|--|---------|---|---------|
| T_{max} Hegesztési hőmérséklet | 1055 °C | 1055 °C | 1000 °C | 1000 °C |
| A hegesztési felület kontaktnyomása | 30 MPa | 30 MPa | 30 MPa | 30 MPa |
| Minták mért felületi érdessége: Rz, μm | 0,75 / 0,80 minta 1 0,92 / 0,67 minta 2 | - | 0,58 / 0,93 minta 1 0,60 / 0,59 minta 2 | - |
| Kontakt villamos ellenállás: $R_{kont} = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot t}$ (Ω) | $k_1 = 2,12 \cdot 10^{-5}$ (Ω) $k_2 = 3,8 \cdot 10^{-4}$ (1/s) | - | $k_1 = 8,2 \cdot 10^{-5}$ (Ω) $k_2 = 4 \cdot 10^{-4}$ (1/s) | - |

A fizikai szimulációk kivitelezése

Az első mérések tapasztalatai azt mutatták, hogy az egytengelyű nyomás (30 MPa), magas hőmérséklet (1050 °C) és a hosszú hegesztési idő (80 perc) a minta jelentős tengelyirányú deformációját és hasasodását eredményezte, így a méréseket rövidebb időre, 40-60 percre korlátoztuk. A QuickSim szoftverrel vezérelt értékeknek megfelelően a Gleeble 3800 berendezés 10 Hz mintavételezési frekvenciával rögzítette az adatokat, melyeket a 2. táblázat összegez.

A vezérlés a mintára ható tengelyirányú terhelést a referencianyomás és az előtolásból számított keresztmetszet függvényéből állítja be. Így a rövidülő minta tengelyirányú terhelése növekedni fog, ahogy a 3. ábrán is látható. A berendezés a hegesztési hőmérsékletet a kitöltési tényező szabályozásával tartja állandó értéken. A hegesztés egy 540 s-os felfűtési szakaszból (20 °C → 1050 °C), egy 2400 s-os hegesztési szakaszból, és egy kontrollált hűlési szakaszból állt.



3. ábra: A teljes hegesztési eljárás alatt mért axiális terhelés és az előtolás mértéke

A referencia- és a hegesztési mintákat összevetve, a referenciamintákon is hasasodást tapasztaltunk a minták melegebb szakaszán, ám a hegesztési mintákon a referenciákhoz képest kisebb tengelyirányú deformációt mértünk. Feltételezésünk szerint a diffúziós hegesztésnél a hegesztési felületen a kontakt villamos ellenállás miatt járulékos hőforrás keletkezett, ami a hőmérséklet eloszláson keresztül a minta tengelyirányú deformációját is befolyásolta. Ezt a hosszbeli eltérést látjuk a DG3/RG3-nak nevezett mintákon a 4. ábrán.



4. ábra: Gleeble mintadarabok a kísérletek után, fentről lefelé: referenciaminta (RG3), hegesztési minta (DG3) azonos terheléssel, alatta a nyers kiindulási minták

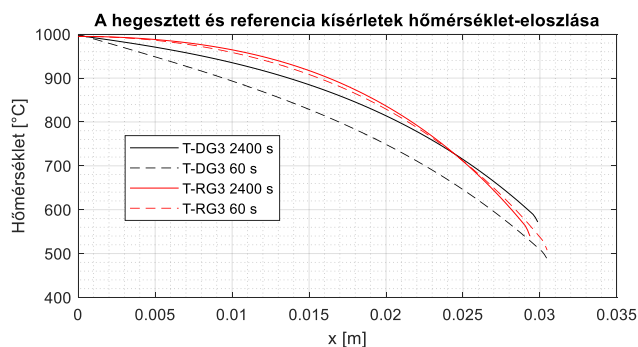
A Gleeble kísérletek numerikus modellezése

A hegesztési minta hőmérséklet-eloszlását numerikus modellezéssel közelítettük a minta tengelyirányú és radiális deformációjával együtt. A modell alkalmas volt a változó geometria és hőmérséklet mellett az egyes keresztmetszetek eltérő hővezetésének és hőfejlődésének számítására. A numerikus modell a Gleeble berendezéshez hasonlóan szabályozta a szükséges egyenáramot és a munkahengeren alkalmazott tengelyirányú erőt. A modellezés során figyelembe vettük az anyagparaméterek hőmérsékletfüggését, valamint modelleztük a fűtéshez használt - konstans maximális hőmérsékletet biztosító - egyenáram-sűrűségét. A modell egydimenziós (1D), csak a tengelyirányú hőmérséklet-eloszlást számolta, és a minta tengelyére merőleges hőmérséklet-eloszlást izotermikusnak tekintette, ugyanakkor a magas hőmérséklet miatt figyelembe vette a hőszugárzási veszteséget. A tengelyirányú nyomás miatt fellépő deformációt a hőmérséklet-eloszlás függvényében kúszási függvényekkel közelítettük.

Az 5. ábrán a numerikus modellezéssel kiszámolt hőmérséklet-eloszlást látjuk a hegesztési és a referenciaminta esetében a hegesztés névleges kezdeténél: 60 s-nál, és a végénél: 2400 s-nál. Az ábrán látható, ahogy a DG3 hegesztés kontaktfelületének villamos ellenállása módosítja a hőmérséklet eloszlását az RG3 referenciaméréshez képest, ezzel befolyásolva a minta kúszását és így a tengelyirányú alakváltozást.

2. táblázat: A Gleeble vezérlése által rögzített adatok

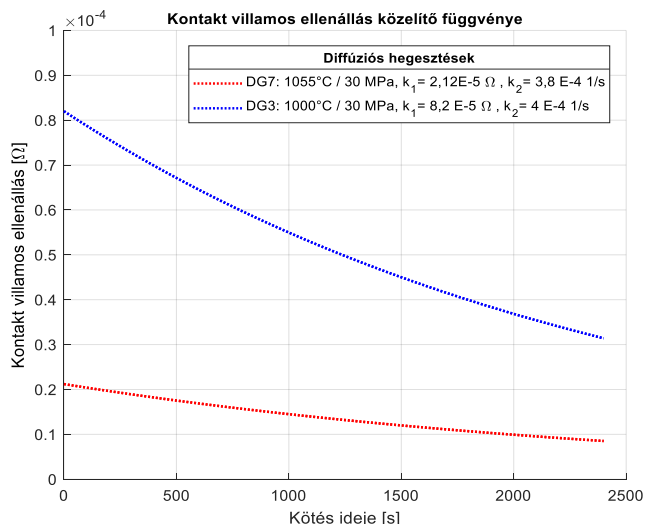
| Mért értékek | Jellemzők | Mértékegység |
|---|--|--------------|
| Hegesztési hőmérséklet, legmelegebb pont | R-típusú termoelem, a teljesítmény szabályozása erre a hőmérsékletre történt | °C |
| Befogás melletti hőmérséklet, leghidegebb pont | R-típusú termoelem | °C |
| Az axiális deformáció / előtolás (stroke) | -5 ÷ 0 | mm |
| A minta tengelyirányú terhelése | Vezérelt paraméter melyet az erőmérő cella szerint rögzít a berendezés szoftvere (Quicksim). | N |
| Kitöltési tényező (a fűtési teljesítmény szabályozását mutatja) | A Gleeble a hegesztési hőmérsékletnek megfelelően szabályozza. Nem vezérelhető közvetlenül. | ° (fok) |
| Vizsgálókamra vákuum értéke | Manuálisan került rögzítésre, a kontrol kijelzőről leolvasva | torr |



5. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a DG3 / RG3 kísérletekhez, (60 s, 2400 s)

A hegesztés kontaktfelületének elméleti modellezése

A hegesztett minták csatlakozó felületén a kontaktfelület növekedésével az ellenállás csökkenésére számítottunk. Ennek megfelelően a modellezés során a hegesztéseket időben csökkenő ellenállás-függvényekkel közelítettük. Az ellenállás-függvények úgy módosították a hőeloszlást a hegesztés modellezése során, hogy a mérésnek megfelelően azonos tengelyirányú deformációt kaptunk az időben. A DG7 és a DG3 hegesztési kísérletekre meghatározott kontakt villamos ellenállás függvényeit a 6. ábra mutatja.



6. ábra: A kontakt villamos ellenállás közelítő függvényei [1]

A mérések modellezésénél a felületen ébredő kontakt villamos ellenállást egy időben exponenciálisan csökkenő függvénnyel közelítettük:

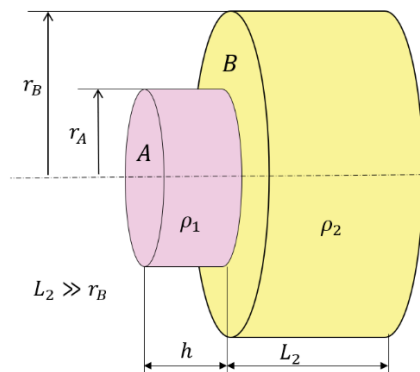
$$R_{kontakt} = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot t} \tag{1}$$

ahol k_1 mértékegysége Ω , a k_2 mértékegysége $1/s$.

A kontakt villamos ellenállás elméleti értékét a kötési felületek arányának megfelelően számolhatjuk a Holm-féle szűkületi ellenállással a Zhang-féle modellben [7]. Zhang számításában figyelembe veszi a kontaktréteg felületi ellenállásának hatását (Pl. szennyeződések, oxidok), a szűkületi ellenállást, továbbá a kontaktfelületek különböző fajlagos ellenállását is.

A számításokkal belátható volt, hogy a fenti Gleeble méréssel és a numerikus modellezéssel meghatározott kontakt villamos ellenállás az idő függvényében, valamint a Zhang-féle kontakt villamos ellenállás a kötés arányában (A/B) azonos nagyságrendű eredményeket adott. Ilyen módon a mért kontakt villamos ellenállás alapján becsülhetővé vált a kontaktfelület változása. A számításokat a minta méretének megfelelően első közelítésként egy vezető csatornával határoztuk meg a 7. ábra szerint.

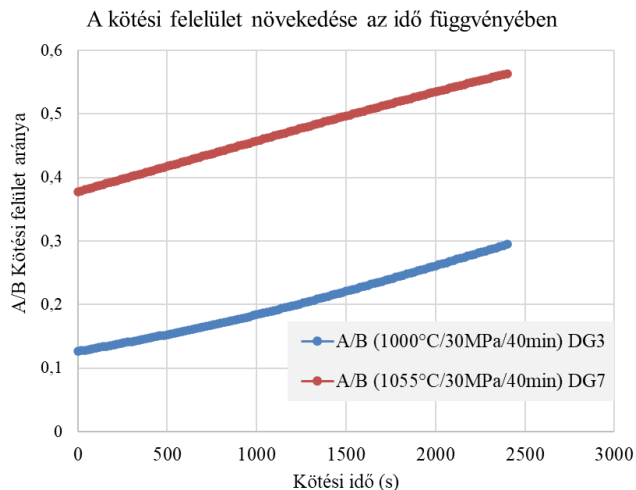
A Zhang-féle elméleti villamos ellenállás alapján az $A/B(R_{kontakt})$ kötési felület arányát is meg lehetett állapítani a 8. ábrának megfelelően.



7. ábra: A Zhang-féle villamos kontakt-ellenállás körszimmetrikus geometriai modellje

A diffúziós hegesztések és azok modellezésének irodalma alapján a kontaktfelület 10-15%-os aránya rövid idő alatt kialakul még a hegesztés kezdetén, az alacsony folyáshatárnak köszönhetően [8]. Azonban az általunk

végzett kísérletek során a kezdeti kontaktfelület kialakulásának mérésére nem volt lehetőség, mivel a névleges hegesztési szakaszt egy hosszú (540 s) felfűtési szakasz előzte meg. Ugyanakkor a kísérletek alapján elmondható, hogy a számított kontaktfelület kötési aránya reális volt, illetve magasabb hőmérsékleten – a várakozásnak megfelelően – nagyobb felületen alakul ki a kötés. A kötés arányának pontosabb megállapítására a későbbiekben a felület törési képét fogjuk felhasználni, illetve a töretek mikroszkópiával történő vizsgálatát tervezzük.



8. ábra: A kötési felület aránya a mérés alapján meghatározott kontakt villamos ellenállás alapján

A diffúziós hegesztés kontaktfelületének elméleti modellezését Hill és Wallach [8] alapján is elvégeztük. A modell a kiinduló felületi érdességi profilt a kontaktfelületek közötti ellipszis barázdákkal közelíti. A modell azt feltételezi, hogy a felületen keletkező üregek bezáródása plasztikus, diffúziós és kúszási folyamatokkal jól leírható; erre épülnek a számítások. A Hill és Wallach-

féle modell ötvözött acélok (mint pl. a 316L) diffúziós felületi modellezésére is alkalmas. Az eredmények a valós kísérletekhez képest ideális kötést eredményeznek a különböző elhanyagolások miatt. A modellezés ugyanakkor jó lehetőséget ad a felületi folyamatok megértéséhez és alkalmazása segíthet a hegesztési paraméterek optimális megválasztásához.

Összefoglalás, következtetések

A Dunaújvárosi Egyetem Gleeble 3800 fizikai szimulátorán diffúziós hegesztési kísérleteket és referenciakísérleteket végeztünk azonos hegesztési paraméterek mellett. A hegesztési minták kisebb tengelyirányú deformációját figyeltük meg a referenciához képest, melyet a későbbi numerikus modellezésekkel is igazoltunk. A hegesztés kontaktfelületét az ellenállásfűtéssel hevített minták numerikus modellezése során egy csökkenő villamos ellenállás függvényével közelítettük. Az így meghatározott függvényvel, valamint a Zhang-féle elméleti kontakt-ellenállás felhasználásával a vezető kötési felület arányát is megállapítottuk, melyet összevetettünk a kötési felület leíró Hill és Wallach-féle elméleti modellel is. Bár a méréssel megállapított és az elméleti modellekből számított értékek nagy eltérést mutattak, azonban, – figyelembe véve a hegesztési felület oxidációját és szennyeződését, valamint az elméleti modell ideális jellegét, – eredményeink megfelelnek az előzetes várakozásainknak.

A Gleeble-kísérletek numerikus modellezésével lehetőséget teremtettünk a kísérletek folyamatának pontosabb megértésére. A hegesztés kontaktfelületére meghatározott ellenállás-függvényekkel a diffúziós hegesztés folyamatát tudtuk jellemezni, melyre az irodalomban nem találtunk példát. A fenti eljárással és a diffúziós kötésre alkalmazott elméleti modellezéssel a hasonló kötési eljárások további vizsgálatára nyílt lehetőség.

Irodalomjegyzék

- [1] Kalinin, G., Barabash, V., Fabritsiev, S., Kawamura, H., Mazul, I., Ulrickson, M., Wu, C., Zinkle S. (2001): ITER R&D: Vacuum Vessel and In-Vessel Components Materials Development and Test, *Fusion Engineering and Design* 55, 231–246
- [2] Sato, S., Enoda, M., Kuroda, T., Ohara, Y., Mohri, K., Cardella, A. (2001). Characteristic evaluation of HIP bonded SS/DSCu joints for surface roughness. *Fusion Engineering and Design - FUSION ENG DES.* 58. 749-754. 10.1016/S0920-
- [3] Baross, T., Bereczki, P., Jánosi, L., Palánkai, M., Sánta, B., Veres, G. (2020): Diffusion bonding experiments of 316L steels in a Gleeble 3800 thermomechanical simulator for investigation of non-destructive inspection methods, *Fusion Engineering and Design, Volume 160*, 111768, ISSN 0920-3796
- [4] Baross, T., Jánosi, L. and Veres, G. (2017): Analytical and numerical model of the temperature distribution of diffusion welding specimens on a Gleeble 3800 thermomechanical simulator, *Mechanical Engineering Letters, Szent István University, Volume 15*, pp. 16-26., HU ISSN 2060-3789
- [5] Baross, T., Bereczki, P., Jánosi, L., Palánkai, M., Sánta, B., Veres, G. (2019): Non-destructive inspection methods of diffusion bonding on 1.4404 specimens welded in a Gleeble 3800 thermomechanical simulator, Synergy International Conferences - Engineering, Agriculture and Green Industry Innovation Gödöllő, Hungary, November 4-6., *Mechanical Engineering Letters, Szent István University, Volume 18* (2019), pp. 17-26., HU ISSN 2060-3789
- [6] Baross, T., Jánosi, L., Veres, G. (2018): Plastic deformation and heat generation rate at the contact surface during diffusion bonding at Gleeble 3800 thermomechanical simulator, *Mechanical Engineering Letters, Szent István University, Volume 17* (2018), pp. 37-46., HU ISSN 2060-3789
- [7] Zhang, P., (2012): Effects of Surface Roughness on Electrical Contact, Thesis, RF Heating and Field Enhancement, University of Michigan, Horace H. Rackham School of Graduate Studies
- [8] Hill, A. D., Wallach E.R. (1989): Modelling solid-state diffusion bonding, *Acta Metallurgica, Volume 37*, Issue 9, Pages 2425-2437, ISSN 0001-6160
- [9] Braunovic, M. (2007): Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. 6-8 p., 150 p., 168 p.