



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

Diffúziós hegesztés alkalmazása magfúziós reaktor környezetben

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Baross Tétény

Gödöllő

2021

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor, DSc
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Műszaki Intézet

Témavezető: Prof. Dr. Jánosi László, CSc
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Műszaki Intézet

Társ-témavezető: Dr. Veres Gábor, DSc
tudományos tanácsadó,
Energiatudományi Kutatóközpont
Fúziós Technológia Laboratórium



.....
Az iskolavezető jóváhagyása



.....
A témavezető(k) jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK.....	4
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége	4
1.2. Célkítűzések	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1. A diffúziós hegesztések megvalósítása	6
2.2. A Gleeble kísérletek hőtani jellemzői	7
2.3. A kontakt villamos ellenállás a kötési felület arányában.....	8
3. EREDMÉNYEK.....	10
3.1. Diffúziós hegesztések és a referencia mérések kiértékelése	10
3.2. A Gleeble kísérletek numerikus modellezése és eredményei	12
3.3. A kontakt villamos ellenállás időfüggő függvénye.....	16
3.4. A kontakt felületek nagyságának meghatározása	17
3.5. A Hill és Wallach-féle diffúziós modellezések eredményei.....	19
3.6. Az elméleti és a kísérletek modellezésével meghatározott kötési felületek összevetése	24
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	26
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	29
6. ÖSSZEFOGLALÁS	30
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	31

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésem ezen fejezetében a témám időszerűségét, jelentőségét, valamint a célkitűzéseimet mutatom be.

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Napjainkban a folyamatosan növekvő energiaigény miatt új, környezetbarát erőművek fejlesztésére van szükség. A jelenleg épülő ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) fúziós tokamak mind plazmafizikai, mind mérnöki szempontból jelentős lépés a későbbiekben áramot termelő fúziós reaktor megvalósítása felé.

A fúziós folyamat lényege, hogy a tórusz alakú vákuum környezetben mágneses térrel lebegtetnek töltött részecskéket (plazma állapot): deutériumot és tríciumot. Ezek egymással való ütközésük és magfúziójuk eredményeként hélium és nagy energiájú neutron keletkezik, amelyek felszabaduló energiáját fogják fel az első fal elemek. Innen a hűtőközegen keresztül elszállított hőt a későbbi fúziós erőművekben fogják árammá alakítani. A hőterhelés mellett jelentős neutronsugárzás is éri a fal szerkezetét: ez nagyságrendekkel nagyobb, mint egy atomerőműben tapasztalt terhelés. A sugárzás roncsolja az anyagszerkezetet és ezzel együtt a hegesztési kötések is, amelyek a vákuumkörnyezetben a jó hővezetés miatt kiemelt fontosságúak lesznek.

A vákuumedény burkolának hűtését biztosító ún. Blanket Modulok kötéseit többek között „szilárd halmazállapotú” (solid-state) diffúziós HIP hegesztési eljárással készítik (Goods, Puskar, 2011). Erre akkor van szükség, amikor síkfelületeket, nagy keresztmetszeteket kell összehegeszteni úgy, hogy az anyag eredeti szerkezete megmaradjon. Továbbá az ITER plazmát határoló fal eltérő mechanikai/hőtanai tulajdonságokkal rendelkező anyagainak jó hővezetését is a nagy felületű hegesztéssel lehet biztosítani. Ezek a hegesztett kötések a jelenlegi és a későbbiekben épített fúziós reaktorok esetében is kritikusak lesznek.

A hegesztés megfelelő minőségéhez a gyártás szigorú minőségügyi felügyeletére van szükség. A megfelelő hegesztési paraméterek megválasztása függ a hegesztendő minta anyagjellemzőitől, a felületek előkészítésétől, ahol a felületi szennyeződések, oxidok jelentősen befolyásolják a hegesztés minőségét.

1.2. Célkitűzések

Kutatásom célja az ITER és a jövő fúziós erőműveihez fejlesztett anyagok - többek között a porkohászati acélok - diffúziós hegesztési folyamatának vizsgálata volt. A standard vizsgálatokon túl alternatív vizsgálati eljárások fejlesztését is célul tűztem ki. A diffúziós hegesztés gyakorlati kivitelezése

mellett a diffúziós kötés elméleti számításainak megértését is szükségesnek láttam.

A diffúziós hegesztéseket a Dunaújvárosi Egyetemen található Gleeble laborban a Gleeble 3800 fizikai szimulátoron végeztem el, mely alkalmas volt az 1-2 órás hegesztési folyamat kivitelezésére vákuumkörnyezetben

A diffúziós hegesztéseket 316 L minőségű acélon terveztem végrehajtani, amely főbb anyagtechnológiai paraméterei megfelelnek az ITER-hez fejlesztett 316 L(N)-IG acélével.

Az irodalomban nem találtam a diffúziós hegesztések vizsgálatainál olyan eljárást, amelyek a diffúziós hegesztés elvégzése közben képesek követni a kötés folyamatát. A hosszú diffúziós hegesztés legfontosabb paraméterei: a hőmérséklet, nyomás, idő és a felületi érdesség. A kísérletek és a modellezések összehasonlításaival e paraméterek finomhangolására is lehetőség nyílik. A diffúziós kötés elméleti felületi modellezéseinél láthatjuk, hogy a felületi mechanizmusok más-más szakaszban fognak dominálni. Mindezekért érdekesnek láttam a diffúziós hegesztés folyamatában történő vizsgálatának lehetőségét.

Célul tűztem ki a következő feladatokat:

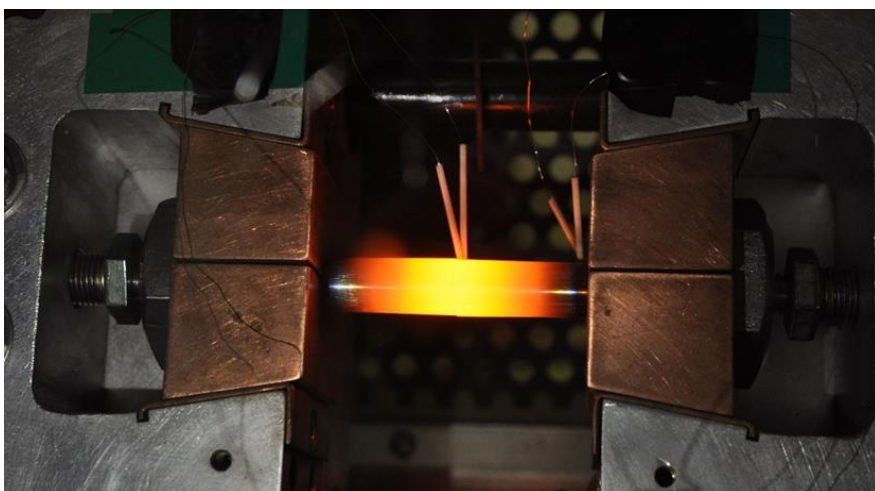
- a) A diffúziós hegesztés fizikai szimulációja és a folyamat megfigyelése és vizsgálata egy termomechanikus anyagvizsgáló berendezés, a Gleeble 3800 segítségével. A diffúziós hegesztési kísérleteket két fél mintával, azonos paraméterek mellett referencia mérésekkel, azaz egy mintán láttam célszerűnek elvégezni.
- b) A Gleeble 3800-zal végzett fizikai kísérletnek megfelelően numerikus modell létrehozása a mérési eredményekkel való összehasonlításra.
- c) A diffúziós kötés kontakt felületére felírt elméleti modelleinek összevetése a fizikai kísérletekkel. Ilyen módon a kontakt felület elméleti modelleinek jobb megértése, és amennyiben lehetséges a hegesztési paraméterek és az elmélet közötti összefüggések kimutatása.
- d) A diffúziós hegesztési minták vizsgálati lehetőségeinek kutatása, a jellemzően hosszú diffúziós hegesztések különböző hegesztési fázisáig eljutott kísérletek esetében.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben bemutatom a kísérleti mérések mellett, a kísérletekhez elvégzett hőtani ellenőrző számításokat, valamint a kontakt felületen ébredő villamos ellenállás modellezését.

2.1. A diffúziós hegesztések megvalósítása

A minták diffúziós hegesztését és a referencia minták kísérleteit a Dunaújvárosi Egyetemen üzemeltetett Gleeble 3800 termomechanikus szimulátoron végeztem el. Összehasonlítva más diffúziós hegesztési laborkísérletekkel jellemzője, hogy nem a vákuumedényben elhelyezett hőszugárzóval melegíti a mintadarabot, hanem a mintán áthaladó árammal, tehát ellenállásfűtéssel szabályozza a hőmérsékletet. A hegesztés elrendezését a Gleeble mérőcellájában a 1. ábra mutatja.



1. ábra Diffúziós hegesztés a Dunaújvárosi Egyetem Gleeble laborjában

A hőmérséklet eloszlás fordított parabola jellege miatt a legmagasabb középső hőmérsékletet és a legalacsonyabb, a réz befogó pofához közeli hőmérsékletet mértem, két R-típusú termoelemmel. A berendezés a középső hegesztési hőmérséklet állandó értéken tartva szabályozta a mintán áthaladó áramerősséget. Továbbá a megadott nyomás és keresztmetszet alapján a Quicksim szoftver 10 Hz-s ismétléssel állította az axiális erő nagyságát, állandó felületi nyomást biztosítva. A tengely irányú erőt a rendszer rögzítette, az áramerősség kitöltési tényezőjével együtt. A vákuumkamrában lévő nyomást manuális jegyeztem fel.

Hegesztési és referencia kísérletek összehasonlíthatósága érdekében azonos körülmények között végeztem kísérleteket. Ezzel biztosítottam azt, hogy a hegesztés adja az egyedüli különbséget a két kísérlet között. A minta 12,5 mm

átmérővel, a hegesztés esetében 30 + 30 mm hasznos szakasszal két darabból, a referencia minták esetében 60 mm hasznos szakasszal készültek egy darabból. A hegesztési és referencia vizsgálatok közül két párt kiválasztottam, melyeket részletesebben vizsgáltam a későbbiekben. A fontosabb értékeket lásd az 1. táblázatban

1. táblázat A hegesztési és a referencia minták fizikai szimulációja

Név, heg. előtt levegőn	Diffúziós hegesztés / Referencia minták fizikai szimulációja 316L mintákon			Balold. minta	Jobbo. minta	Eredeti hossz	Heg. utáni hossz
Elnevezés	T _{max} [°C]	P, MPa	t, min	Rz, μm	Rz, μm	mm	mm
DG3, 150 min	1000	30	60	0,58 / 0,93	0,6 / 0,59	30,07 + 30,02	58,48
RG3	1000	30	60			60,05	56,9
DG7, 120 min	1055	30	40	0,75 / 0,80	0,92 / 0,67	30,01 + 30,04	56,34
RG7, n.a.	1055	30	40			60,04	55,47

A hegesztendő felületeket csiszolása után a mérések alapján a minták felületi érdessége $Rz = 0.5 \div 1 \mu m$ értékekre állítottam be. A tisztítás után CITRANOX® savas oldattal történt a krómoxid eltávolítása. Majd az ismételt felületi tisztítás után egy vákuumedénybe Ar gáz alatt szállítottam a mintákat, megelőzve ezzel a további oxidációt. Bár a részleges oxidáció elkerülhetetlen a minták kivételénél és a mérőcellába való behelyezésekor, azonban a keletkező oxid réteg feltehetően jóval kevesebb, mint az eredeti felületen. A szerelési idő általában több volt, mint egy óra.

2.2. A Gleeble kísérletek hőtani jellemzői

A kísérletek alatti hőmérséklet eloszlást 1D-s számításokkal közelítettem, ahol a hőszugárzásból adódó sugár irányú hőmérséklet eloszlást is ellenőriztem. Megállapítottam, hogy a jelentős hőszugárzás ellenére a tengely irányú hőmérséklet eloszlás izotermikus közelítése a merőleges keresztmetszetekre megfelelő közelítést ad, azonban a számítások során a hőszugárzási veszteséggel is számolni kell. A közelítő számítások megmutatták, hogy a nagy hőmérséklet eloszlás miatt a hőmérsékletfüggő anyagjellemzők használata szükséges egy pontosabb modell létrehozásához. Ezért a vizsgált kísérletekre létrehoztam egy numerikus modellt.

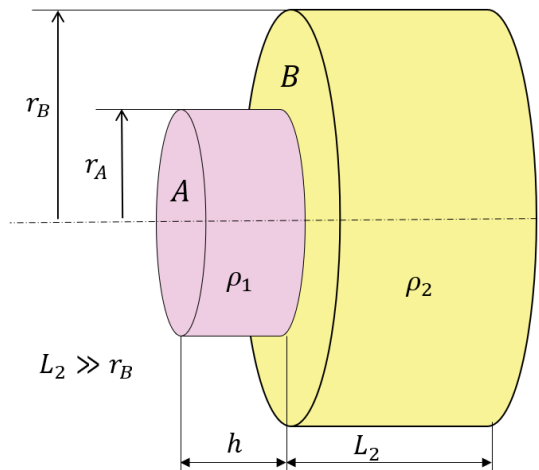
A diffúziós hegesztés kezdeti kontakt felületének kiszámításához a Hill és Wallach -féle felületi diffúziós model 0. mechanizmusa alapján számoltam a kialakult kötési felületet. Az eredmények szerint 30 MPa-s választott axiális terhelés a mellett a kezdeti hegesztési nyak 15% -s kontakt felületet mutatott

1000 °C / 1050 °C körül. A fizikai kísérletek során a megfelelő kontakt felület kialakulása miatt a felfűtési szakasz alatt 50 MPa felületi nyomást alkalmaztunk, mielőtt a névleges hegesztési nyomást alkalmaztuk volna. Ezzel elkerülve a felület lehetséges olvadását a magas áramsűrűség miatt. Ugyanakkor a hegesztési hőmérsékleten: 800-1050°C, az alacsonyabb nyomás alkalmazásával (30 MPa) a minta deformációját tudtuk elkerülni.

2.3. A kontakt villamos ellenállás a kötési felület arányában

A hegesztés során az irodalomban leírt tapasztalat szerint (Hill, 1983) az oxid felületek és szennyeződések miatt a felületen létrejövő kezdeti kontakt nem ad megfelelő fémes kötést. Ezért a plasztikus alakváltozás kezdeti kontakt felülete nem helyettesíti a lassú folyamatok által végbemenő szemcsék közötti diffúziót, és az oxid réteg eltűnését. Hasonlóan két villamosan vezető és érintkező felület között bár létrejön a mechanikai kapcsolat, de ez nem jelent ugyanakkora villamosan vezető kontaktot (Braunovic et al., 2007, 6. oldal). Ugyanakkor feltételezhetjük, hogy a diffúziós hegesztés során a villamosan vezető kontakt felület egyben már egy megfelelő fémes kötés. Mindezek alapján a kontakt villamos ellenállás jó jellemzője lehet a hegesztési folyamat állapotának is.

A hegesztés kontakt felületén ébredő villamos ellenállást elméleti számítással közelítettem Zhang (2012) modellezése alapján. Az általam számolt szimmetrikus fél kontakt felület geometriáját a 2. ábra mutatja. A hengeres koordináta rendszerben a „h” szakasz (híd) jelképezi a felületi érdességből származó geometriát, ahol a fajlagos ellenállását ρ_1 növelésével az oxid réteg és a szennyeződést is modellezhetjük.



2. ábra A Zhang-féle villamos kontakt ellenállás geometriai modellje szimmetrikus esetre

A teljes kontakt ellenállás a két minta szűkületi ellenállásának $R_{c\ A/B}$ és a közötté kialakult vezető híd ellenállásának összegeként írható fel.

$$R_{fél\ kontakt} = R_h + R_{c\ A/B} = \frac{\rho_1 \cdot h}{\pi \cdot r_A^2} + \frac{\rho_2}{4 \cdot r_A} \cdot \bar{R}_{c\ A/B} \left(\frac{r_B}{r_A}, \frac{\rho_1}{\rho_2} \right), \quad (1)$$

ahol ρ_1 a felületi nyak fajlagos ellenállása, ρ_2 pedig az alapanyag fajlagos ellenállása. A szűkületi ellenállást $\bar{R}_{c\ A/B}$ Zhang et al. (2010, 2012) alapján kidolgozott analitikus függvénnyel közelítettem. A számítások azt mutatták, hogy a vezető szigetek körül kialakuló szűkületi ellenállás jelentős többletet jelent a kontakt felület nagyságrendekkel ($\rho_1=100 \cdot \rho_2$) rosszabb vezető rétege esetében is. Az A/B kötési felület arány függvényében vizsgáltuk a kontakt vezető felület.

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom során elért eredményeket, melyekkel a diffúziós hegesztési kísérletek és a numerikus modellezés, valamint további elméleti számítások által a kötési felület arányát határoztam meg a folyamat során. Bemutatom a Hill és Wallach (1989) alapján modellezett elméleti kötési felület arányát, és a Zhang (2012) által számolt modell alapján becsült kötési felület arányát, melyet bevezetett villamos ellenállás függvényből számoltam.

3.1. Diffúziós hegesztések és a referencia mérések kiértékelése

A kiválasztott két pár paraméterei: a 1055 °C / 30 MPa / 40 min, a hegesztés DG7, a referencia RG7 volt, valamint 1000 °C / 30 MPa / 60 min, voltak DG3 és RG3 jelöléssel. A hegesztési és referencia kísérletek 540 s felfűtési szakaszból, 2400 s vagy 3600 s hegesztési szakaszból, majd 540 s hűlési szakaszból álltak. A DG3 és RG3 kísérletek utáni mintáinak fényképét a 3. ábra mutatja.

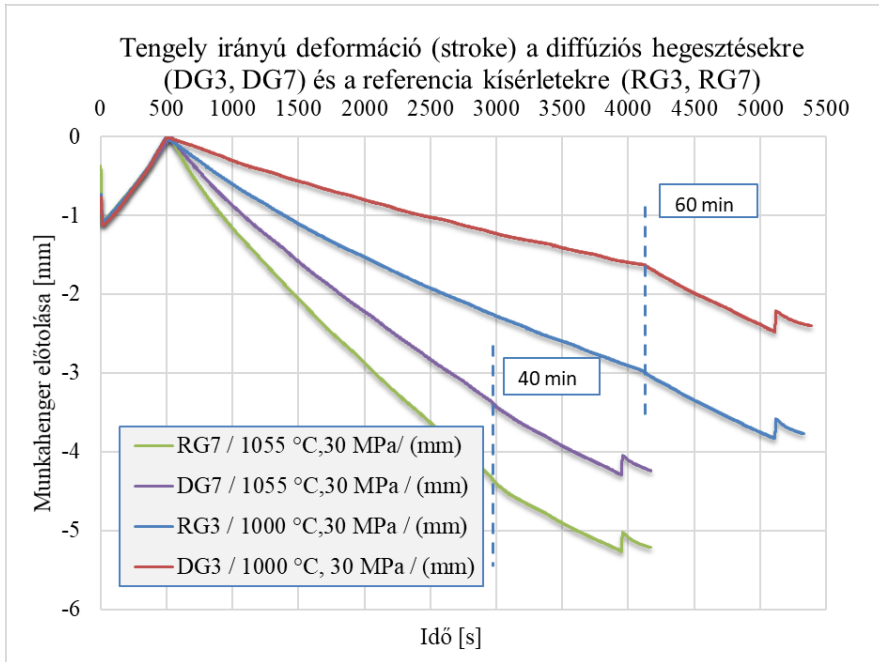


3. ábra A Gleeble mintadarabok RG3 (referencia), DG3 (hegesztés) azonos hőmérséklet és nyomással elvégzett kísérletek után, alatta a kiindulási minták

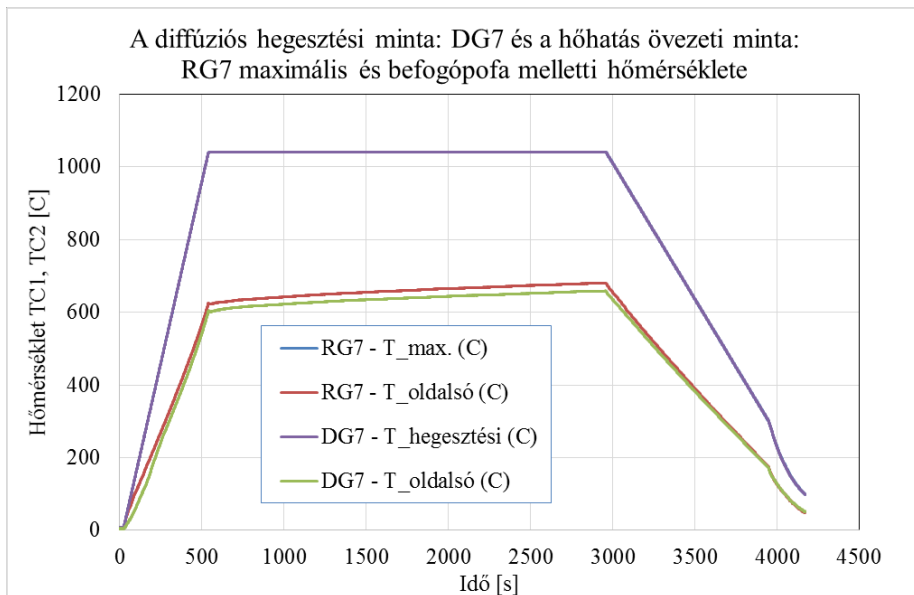
A négy kísérlet tengely irányú deformációjának mért függvényét a 4. ábra mutatja, ahol az összehasonlíthatóság miatt a hegesztés névleges kezdete egy pontba van tolva. A kísérletek alatt a hegesztett minták esetében megfigyelhető volt a kisebb tengely irányú előtolás, azaz a kisebb tengely irányú deformáció. A a DG7 / RG7 kísérletek mért hőmérsékletei az 5. ábrán láthatóak.

A kísérleti vizsgálatok alapján a feltételezhetjük, hogy az egyedüli különbséget a varratnál kialakuló jelentős kontakt villamos ellenállás adta. Ez az ellenállás a kísérlet folyamata alatt a mintán keletkező hőmérséklet

eloszlást jelentősen módosította, amely így hatással volt a kúszás függvényére.



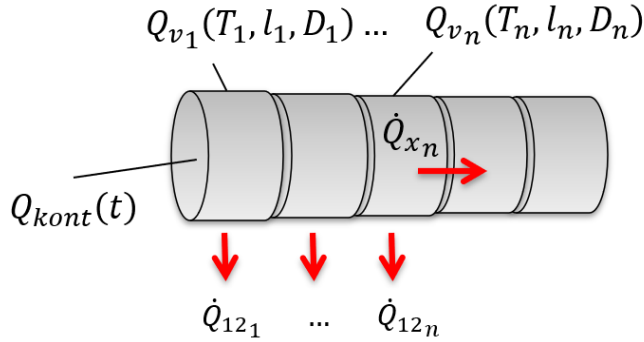
4. ábra A minta tengely irányú deformációja, munkahenger elmozdulása (stroke) diffúziós hegesztési és a referencia mintákon



5. ábra A DG7 / RG7 vizsgálat hőmérsékletmérése, kontrollált felfűtés (540 s), hőntartás(2400 s), kontrollált hűlési szakasszal

3.2. A Gleeble kísérletek numerikus modellezése és eredményei

A hegesztési minta hőmérséklet eloszlását numerikus modellezéssel közelítettem a minta tengely irányú 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 tengely irányú erőt. A modellezés figyelembe vette a hőmérsékletfüggő anyagparamétereket, valamint szimulálta a konstans maximális hőmérsékletet biztosító egyenáram sűrűségét. A modellezés 1D-s tengely irányú hőmérséklet eloszlást feltételezve izotermikusnak vette a minta tengelyére a hőmérsékletet, viszont a magas hőmérséklet miatt a hősugárzási veszteséget figyelembe vette. A tengely irányú nyomás miatt fellépő deformációt a hőmérséklet eloszlás függvényében kúszási függvénnyel közelítettük. A 6. ábra a minta hőfejlődését és hőtranszportját ábrázolja.



6. ábra A hőfejlődés és hővezetés ábrázolása a mintában

A fél mintán balról az n -ik elemen áthaladó hőárama az összes előző $1 \dots n$ elemekben fejlődő hőfejlődés összege lesz, vagyis $\sum_1^n \dot{Q}_{x_n}$, amely már a hősugárzással csökkentett mennyiség. Ez a hőfejlődés fog egyensúlyt tartani állandósult állapotban adott elemben a hővezetésével. Így írhatjuk k -ik időpillanatban a következő függvényt:

$$\sum_0^n \dot{Q}_{x_{n,k}} = \lambda(T_{n+1,k}) \cdot \frac{A_{n,k}}{l_{n,k}} (T_{n-1,k} - T_{n,k}), \quad (2)$$

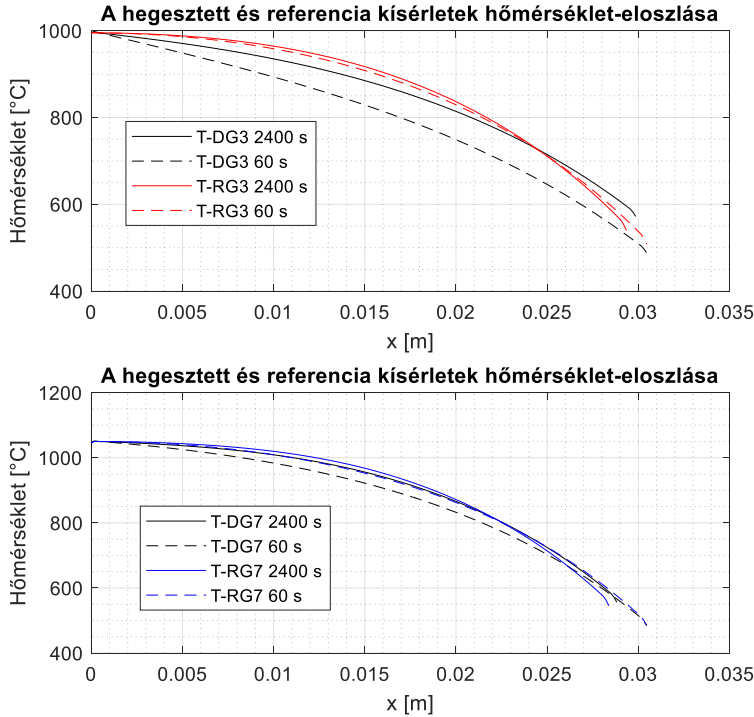
ahol $\lambda(T_n)$ a n -ik elem hővezetése.

A befogáshoz közeli elem és a hűtővíz kapcsolatát a mérés során meghatároztam a hőátadási tényezőt a szélső elemen mért hőmérséklet alapján. Így a $(n=N)$ távozó hőmennyiség a következő lesz:

$$\sum_0^{n=N} \dot{Q}_{x_{N,k}} = \alpha_{befogás} \cdot A_{N,k} (T_{N,k} - T_{hűtővíz}), \quad (3)$$

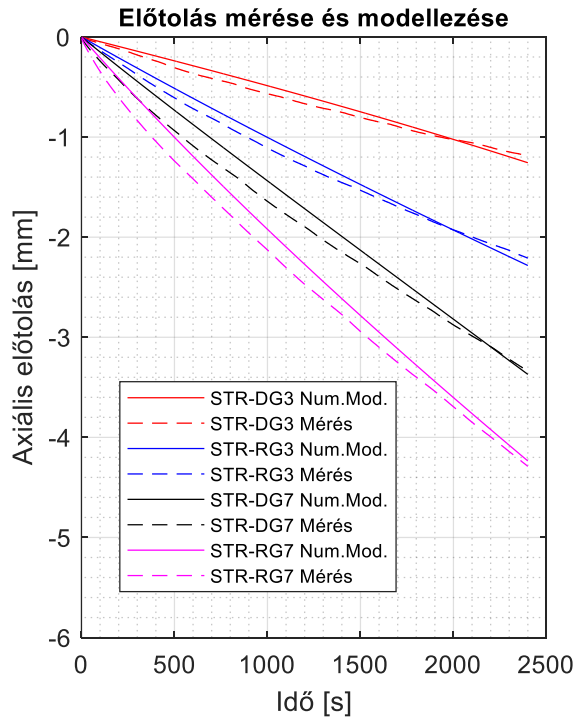
ahol $\alpha_{befogó} = 2000 - 4200 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ között választottam meg. A nem ismert $T_{N,k}$, $T_{n-1,k}$ értékei átrendezéssel fejezhetőek ki, ahol a hegesztési hőmérséklet a T_1 lesz.

A mintákon keletkező fordított parabola hőmérséklet eloszlások szabad szemmel igen hasonlóak voltak minden kísérletben, azonban a modellezések alapján láthatóak a módosított hőmérséklet eloszlások jellege 60 s és 2400 s idő elteltével. Lásd 7. ábra. A kontakt villamos ellenállás módosítja a hőmérséklet eloszlást a hegesztési mintán és meredekebb hőeloszlást idéz elő a referencia mintákhoz képest. Ez a jelenség a hegesztés előrehaladásával a csökken a kötési felület arányának növekedésével.

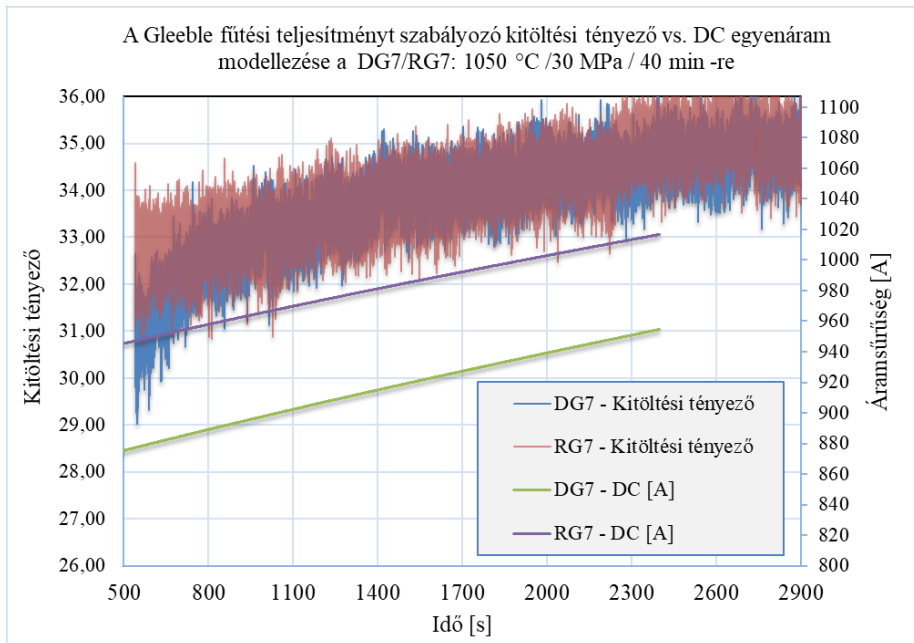


7. ábra A modellezett minták hőmérséklet eloszlásai 60 és 2400 s-nál
(Baross et al, 2020)

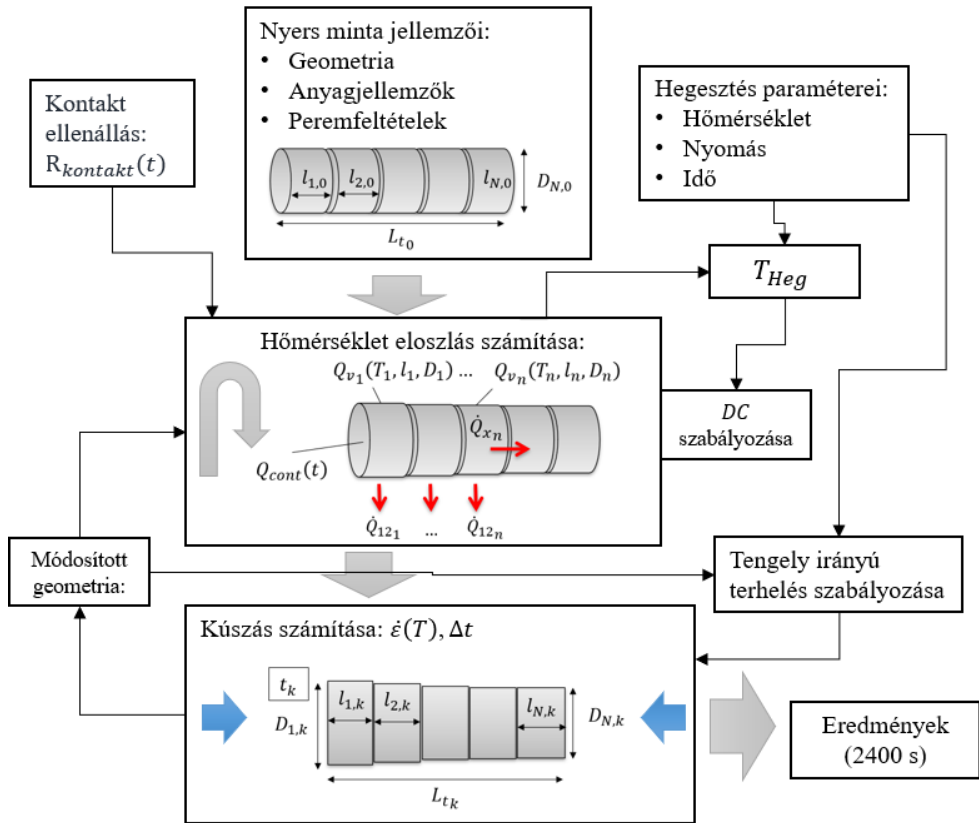
A Gleeble-n mért és a modellezett előtolás mértékét a 8. ábra mutatja, a növekvő modellezett egyenáram mellett. A numerikus modellezés blokkdiagramját a 10. ábra mutatja.



8. ábra A névleges hegesztés alatt mért és modellezett előtolás függvénye időben (Baross et al, 2020)



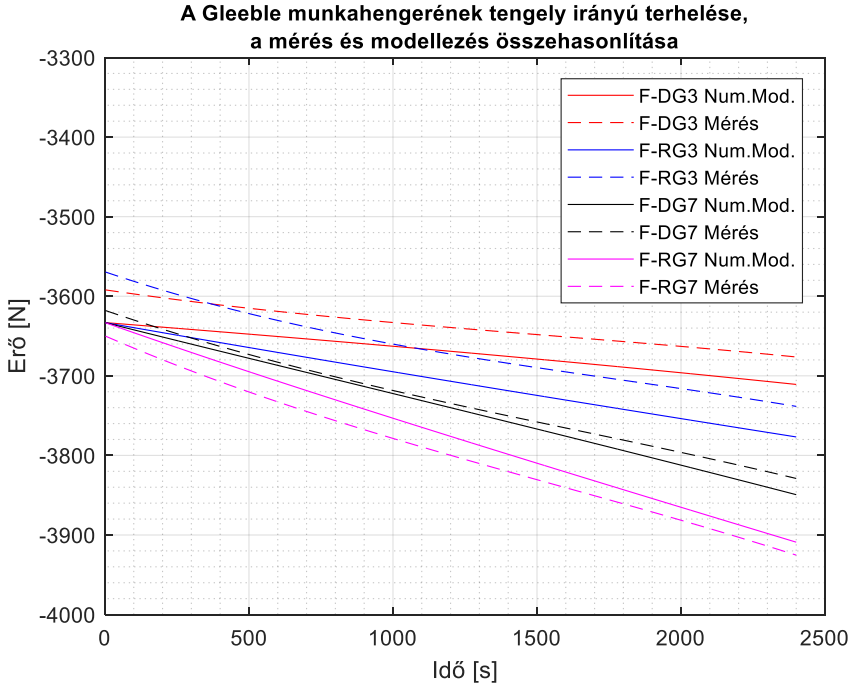
9. ábra A kitöltési tényező és a növekvő áramerősség modellezése



10. ábra A numerikus modellezés blokkdiagramja

Az elemi keresztmetszetek alakváltozását 950–1050°C hőmérsékleten a térfogat megmaradásával számoltam - felhasználva a korábbi tanulmányokat (Hill, 1983, 1989, Rieth, 2004) - az ún. Arrhenius típusú hatványfüggvénnyel. A kúszási függvényt a referencia mérésekhez igazítottam, mely függvényeket a hegesztésekre is alkalmaztam. Ezzel a numerikus modellezésekkel becsülhetővé tettem a minták deformációját a hegesztés szempontjából hosszú kísérletek alatt.

A rövidülő mintán a növekvő tengely irányú terhelés mért és modellezett értéke kevesebb mint 1% eltérést mutatott. Lásd a 11. ábrán.



11. ábra A tengely irányú terhelés mérése és modellezésének eredménye

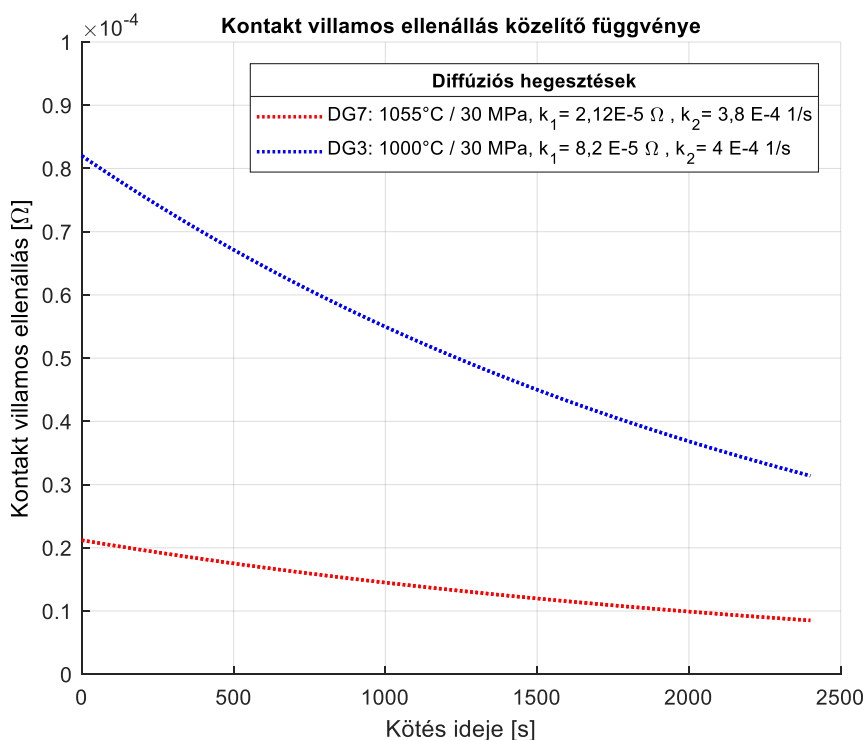
3.3. A kontakt villamos ellenállás időfüggő függvénye

A diffúziós hegesztés kontakt felületét a kontakt villamos ellenállás csökkenésével közelítettem. Az ellenállást a félminta esetében a baloldali (kontakt) elem ellenállásához adtam hozzá. Mivel a kontakt villamos ellenállás mért paraméterhez nem volt köthető, ezért időben csökkenő függvényt választottam. A kísérletek eredményeit a következő exponenciálisan csökkenő függvénnyel közelítettem:

$$R_{kontakt} = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot t}, \quad (4)$$

ahol k_1 mértékegysége Ω , a k_2 mértékegysége $1/s$ lesz. A k_1 és k_2 paramétereket módosításával a minta kúszásának a 40. percében mért tengely irányú előtolásának értékéhez igazítottam.

Az így megállapított két hegesztéshez tartozó függvényt a 12. ábra mutatja.



12. ábra A kontakt villamos ellenállás közelítő függvényei

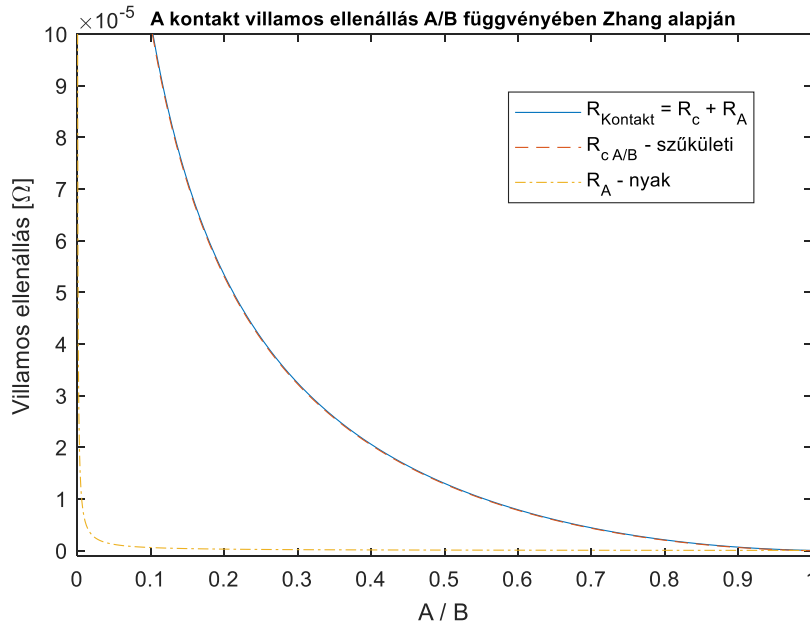
3.4. A kontakt felületek nagyságának meghatározása

Meghatároztam a Zhang-féle modell alapján a minta keresztmetszetének megfelelő kontakt villamos ellenállást a kötési felület függvényében. A kötési felület arányában (A/B) a kontakt villamos ellenállást láthatjuk a 13. ábrán, amit az 1. egyenlet szerint fél modellre számoltam ki.

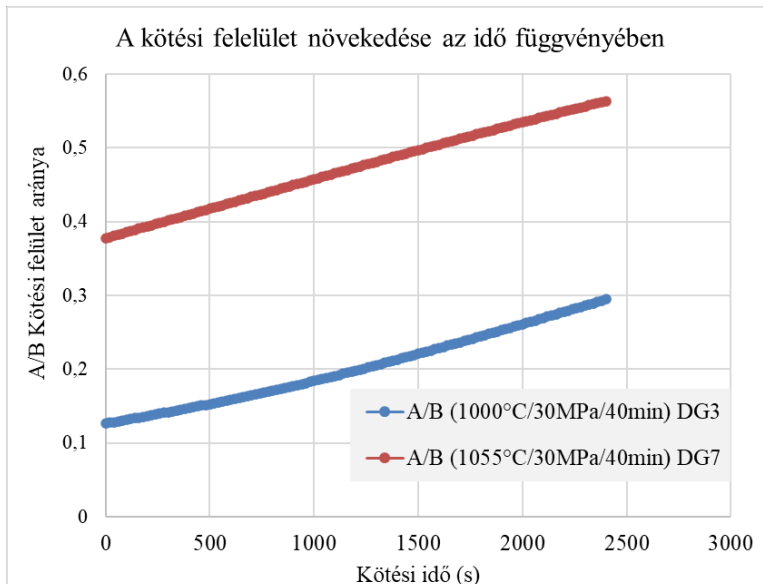
A Zhang-féle kontakt ellenállás elméleti végtelen értéktől indul, viszont a 10%-s kötés után esik 10^{-5} (Ohm) nagyságrend alá esik, ami azonos nagyságrendű lesz a Gleeble mérés és modellezéssel meghatározott időfüggő kontakt villamos ellenállás közelítő függvényével. Így a két függvényre összevethető eredményt kaptam. Ezzel a mérés és modellezés által meghatározott kontakt villamos ellenállás (12. ábra) és az elméleti kontakt villamos ellenállás (13. ábra) értékével meghatározhatjuk az időtől függő kontakt felület változását is: $A/B(R_{\text{kontakt}})$.

Ennek megfelelően az $R_{\text{kontakt}}(A/B)$ helyett az $A/B(R_{\text{kontakt}})$ függvényt létrehoztam. A függvényt a 10×10^{-5} nagyságrend alá eső szakaszán közelítettem polinommal (10% kontaktnál nagyobb esetre). A korábban leírt alapján a valós kezdeti felületetra is feltételezhetjük a 10% -s kontaktot a

hegesztés kezdetén. A kötési felület arányának időben meghatározott függvényei, $A/B(R_{\text{kontakt}})$ a 14. ábrán láthatóak.



13. ábra A kontakt villamos ellenállás a kötési felület arányában, nyak magassága: $h = 0,12 \mu\text{m}$; névleges csatlakozó felület sugara: $r_B = 6,25 \text{ mm}$; az érintkező felület sugara $r_A = 0,05 \div 6,25 \text{ mm}$ között; $\rho(1050^\circ\text{C}) = 1,256\text{e-}06 \Omega\text{m}$; $\rho_1/\rho_2 = 50$.



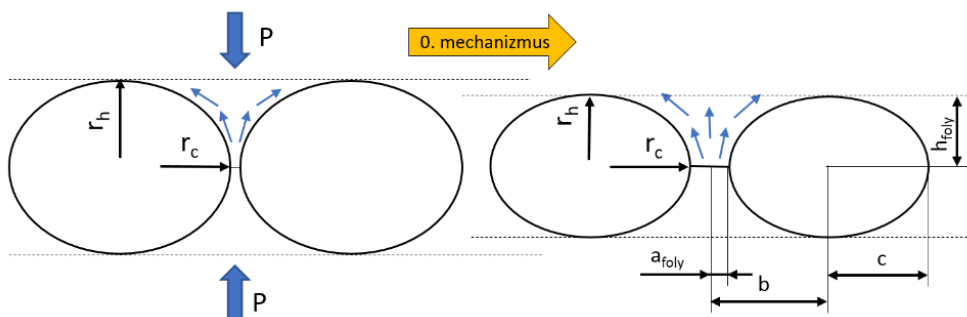
14. ábra A kötési felület aránya időben a mérések alapján $A/B(R_{\text{kontakt}})$

3.5. A Hill és Wallach-féle diffúziós modellezések eredményei

A diffúziós kötés elméleti modellezését elvégeztem Hill és Wallach alapján. Az elméleti modellezés igen gyors kötést mutat a különböző mechanizmusok ideális jellege miatt. Ugyanakkor a tapasztalatok szerint a mechanikai kontakt gyors kialakulása 10-20 perc után még nem megfelelő fémes kötést eredményez a jelenlévő oxid réteg és a szennyeződések jelenléte miatt. Mivel a mintadarabok kifűtésére vákuum alatt az ellenállásfűtés elrendezése miatt nem volt lehetőségem, ezért a felületi szennyeződések, illetve az oxid rétegre számíthattunk.

A programot Hill és Wallach alapján a 316L anyagjellemzőit felhasználva, illetve a hegesztés paramétereit és a felületi minőséget felhasználva futtattuk le. A két hegesztés kezdeti pillanatszerű plasztikus deformációját a 16. ábra (DG7) és a 19. ábra (DG3) mutatja, a hegesztés hosszú folyamatának a mechanizmusait a 17. ábra (DG7) és a 20. ábra (DG3) mutatja, a hegesztés során modellezett üreg változását a 18. ábra (DG7) és a 21. ábra (DG3) mutatja.

A Hill és Wallach modellezés első lépése a pillanatszerű plasztikus deformációval kezdődik. Kiszámításával a folyáshatárhoz tartozó nyak szélességét: a_{foly} számoljuk ki, illetve a nyak magasságát: h_{foly} . A modellezés szimmetrikus felületi érdességi profilt feltételez, ahol a folyás teljes mértékben a síkban történik. A kontaktnál a helyettesítő ellipszis csúcsok tökéletesen találkoznak, nincs felületi hullámosság. Ideálisan plasztikus az anyag, nincs alakítási keményedés, a deformációnak nincs hatása a szemcsehatárookra. A kezdeti pillanatszerű folyamatnak a modellezésben nincs időfüggése. Ennek a mechanizmusnak a képét a 15. ábra mutatja.



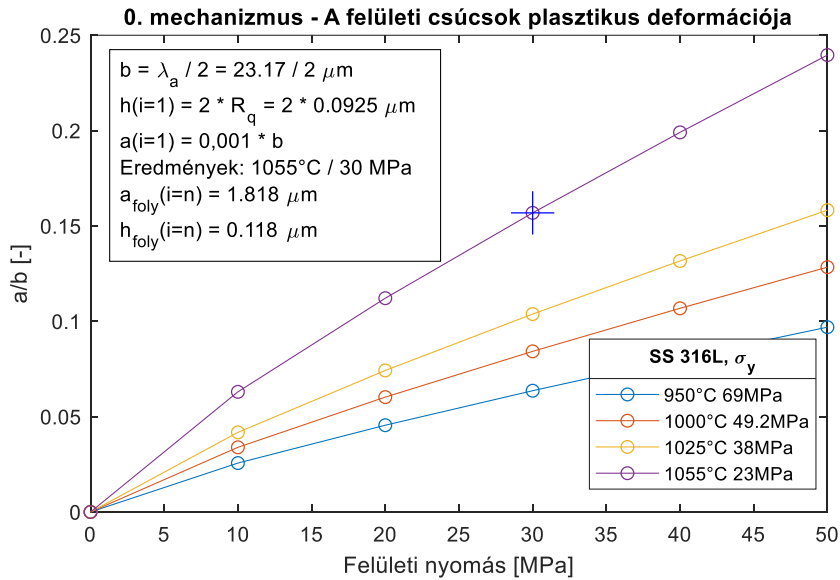
15. ábra Az ellipszis üreg plasztikus alakváltozása, 0. alakváltozási mechanizmus anyagtranszport

A Hill és Wallach-féle modellezéshez a felületi érdességből származtatott adatokat a kísérleti minták méréseiből származtatjuk, melyet a 2. táblázat foglal össze.

Eredmények

2. táblázat A hegesztési minták felületi érdességéből származtatott értékei

	Minta sz.		R _a (μm)	R _z (μm)	R _q (μm)	λ _a (μm)
DG7	Nr. 1.	1. mérés	0,06	0,75	0,08	23,24
		2. mérés	0,06	0,8	0,08	22,47
	Nr. 4.	1. mérés	0,09	0,92	0,13	28,42
		2. mérés	0,06	0,67	0,08	18,55
1055 °C / 30 MPa / 40 min		Átlag	0,0675	0,785	0,0925	23,17
DG3	Nr. 8.	1. mérés	0,06	0,58	0,07	20,84
		2. mérés	0,06	0,93	0,08	20,46
	Nr. 11.	1. mérés	0,06	0,6	0,07	21,76
		2. mérés	0,06	0,59	0,07	22,13
1000 °C / 30 MPa / 40 min		Átlag	0,06	0,675	0,0725	21,30
Geometria ellipszis bemeneti adatok		Szemcsem: 20 μm			$h = 2 R_q$	$2 b = \lambda_a$

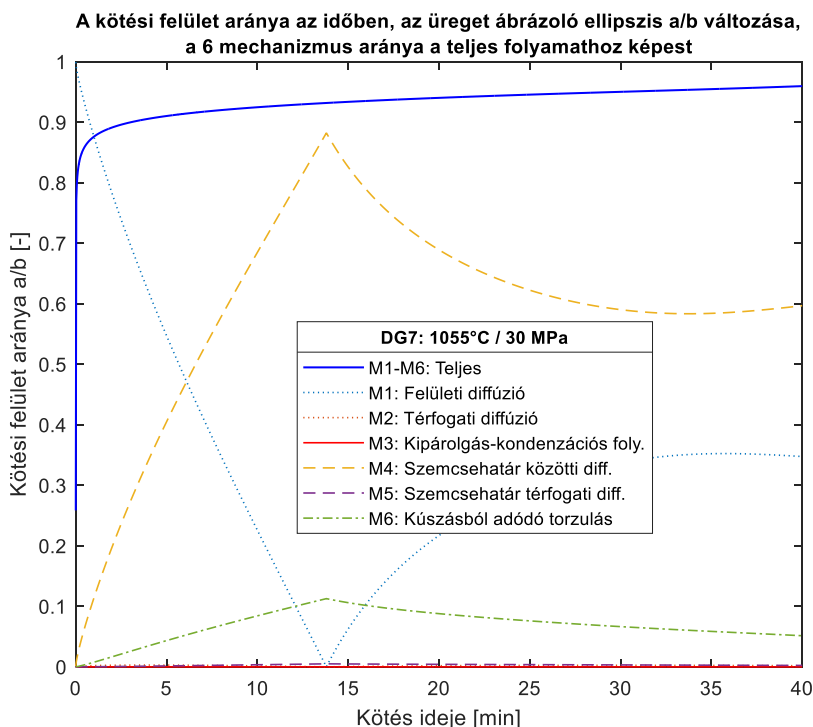


16. ábra A (DG7) 1055 °C / 30 MPa szerint futtatott Hill és Wallach-féle modell kezdeti pillanatszerű 0. mechanizmusának eredményei, a h_{foly} és a_{foly} lesz felhasználva az időben lejátszódó 1-6 folyamatokban

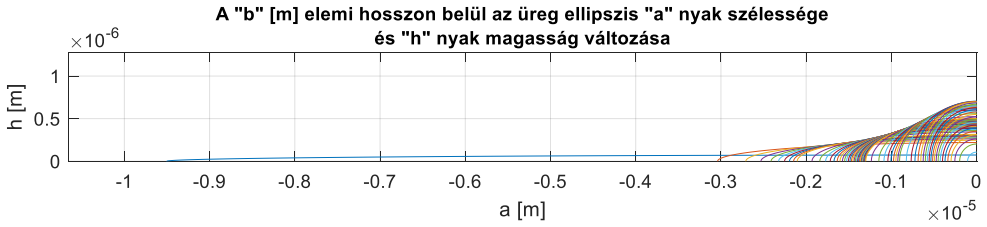
A pillanatszerű plasztikus alakváltozás eredményeként a 16. ábra mutatja a kötések arányát a felületi nyomás és hőmérséklet függvényében a DG7-hez (keresztrel jelölve) tartozó felületi érdességgel és hőmérsékleten számolva,

összehasonlításuképpen a 950-1055 °C hőmérsékletre kapott eredményekkel. Itt a 30 MPa-s felületi nyomáshoz tartozó kb. 15%-s kötési arányt kaptam az a/b 1055 °C mellett vett folyáshatár értékre.

A kezdeti szakasz után a hosszabb felületi folyamatok esetében a különböző felületi és terfogati diffúziós, kondenzációs és kúszási mechanizmusok eltérő arányban vesznek részt a folyamatban. (17. ábra, 20. ábra) Az eredményekből látható, hogy a felületi diffúzió fog dominálni ezen a hőmérsékleten és nyomáson. A kipárolgás, szemcsék közötti diffúzió, valamint a kúszásból adódó deformáció hatása az ellipszisre jóval kisebb szerepet játszik. A felületi mechanizmusok hajtóerejét az elnyújtott ellipszis forma eltérő felületi görbülete adja, mely folyamatok a kör keresztmetszetet közelítve lassulnak, illetve elérve megállnak. Az ellipszis üregek geometriáját a 18. ábra, és a 21. ábra mutatja. Az ábrákon látható, hogy a kezdetben a modellezés szerint igen elnyújtott ellipszissel közelíti a modell a két felület találkozását. Az elnyújtott ellipszis formájú üregek a felületi diffúziós hatások miatt gyorsan körre deformálódnak, majd a további mechanizmusok miatt folyamatosan zsugorodnak, míg végül eltűnnek.

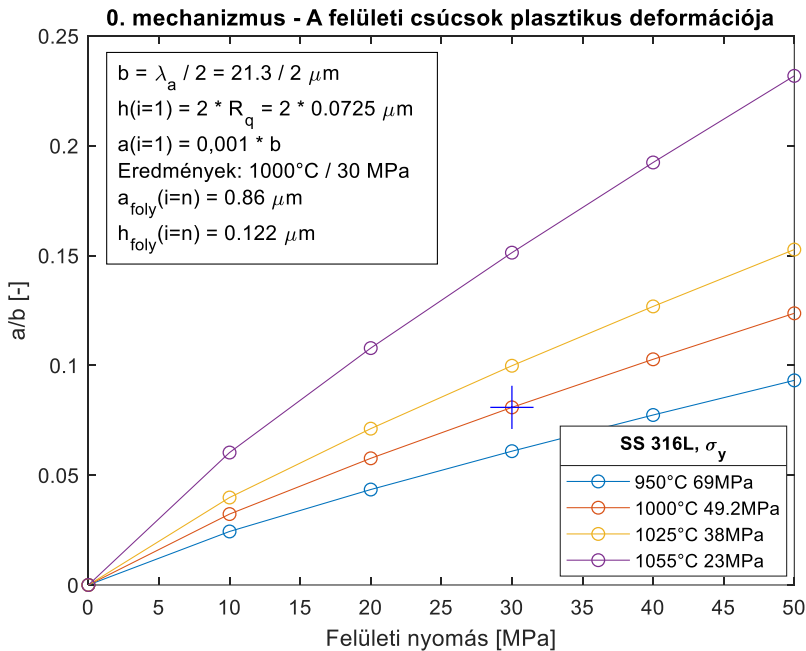


17. ábra A DG7 (1055 °C /30 MPa /40 min) diffúziós hegesztéshez tartozó Hill és Wallach program eredménye, $h_{foly} = 0,118 \mu\text{m}$, $a_{foly} = 1,818 \mu\text{m}$, $2 \cdot b_0 = 23.17 \mu\text{m}$, szemcseméret $7 \mu\text{m}$

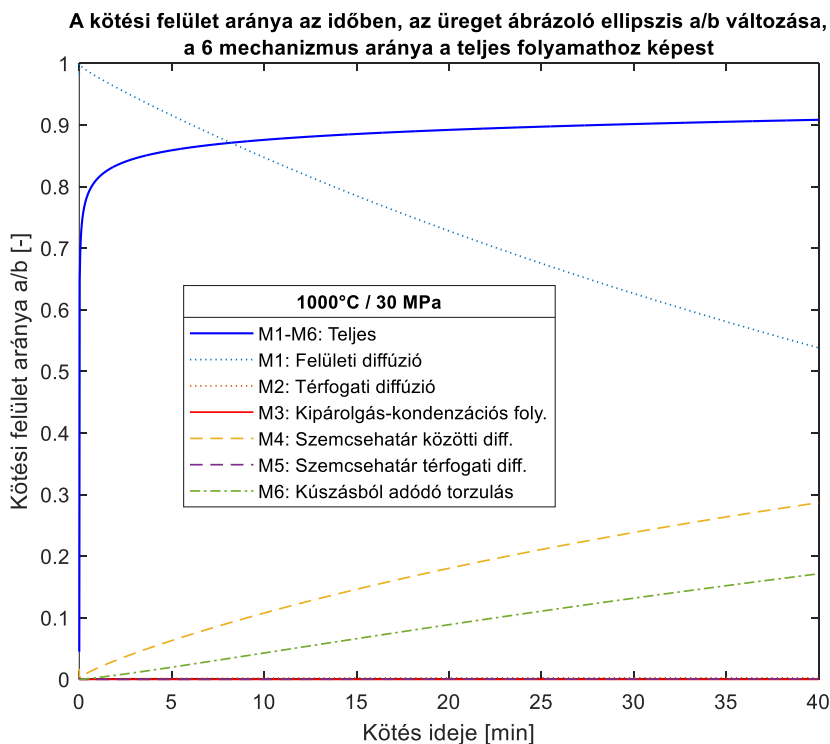


18. ábra A DG7 hegesztésben egy b cellában, ellipszis üregben, mely szélessége: $c(t)$, magassága: $h(t)$ (eltérő időlépésekkel ábrázolva), nyak szélessége: $a=b-c$

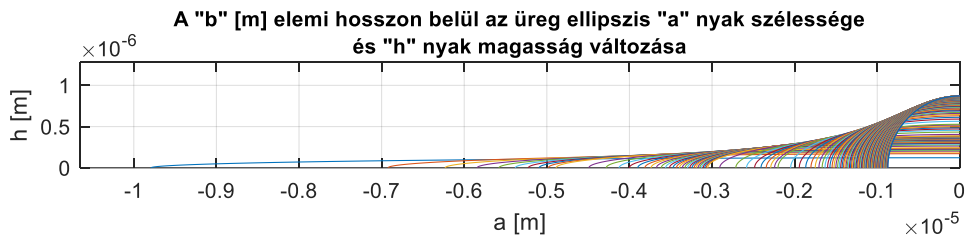
Hasonlóan a DG3-hoz tartozó modellezésekhez is a 0. mechanizmus számításait elvégezve a 19. ábra mutatja a hegesztéshez számolt értékeket (30 MPa, 1000 °C) a kötés arányára.



19. ábra A DG3 1000 °C / 30 MPa szerint futtatott Hill és Wallach-féle modell kezdeti pillanatszerű 0. mechanizmusának eredményei a folyáshatár és a felületi nyomás függvényében, a h_{foly} és a_{foly} lesz felhasználva az időben lejátszódó folyamatokban



20. ábra A DG3 (1000 °C /30 MPa /40 min) diffúziós hegesztéshez tartozó Hill és Wallach program eredménye, $h_{foly} = 0,122 \mu\text{m}$, $a_{foly} = 0,86 \mu\text{m}$, $2 \cdot b_0 = 23.17 \mu\text{m}$, szemcseméret $7 \mu\text{m}$



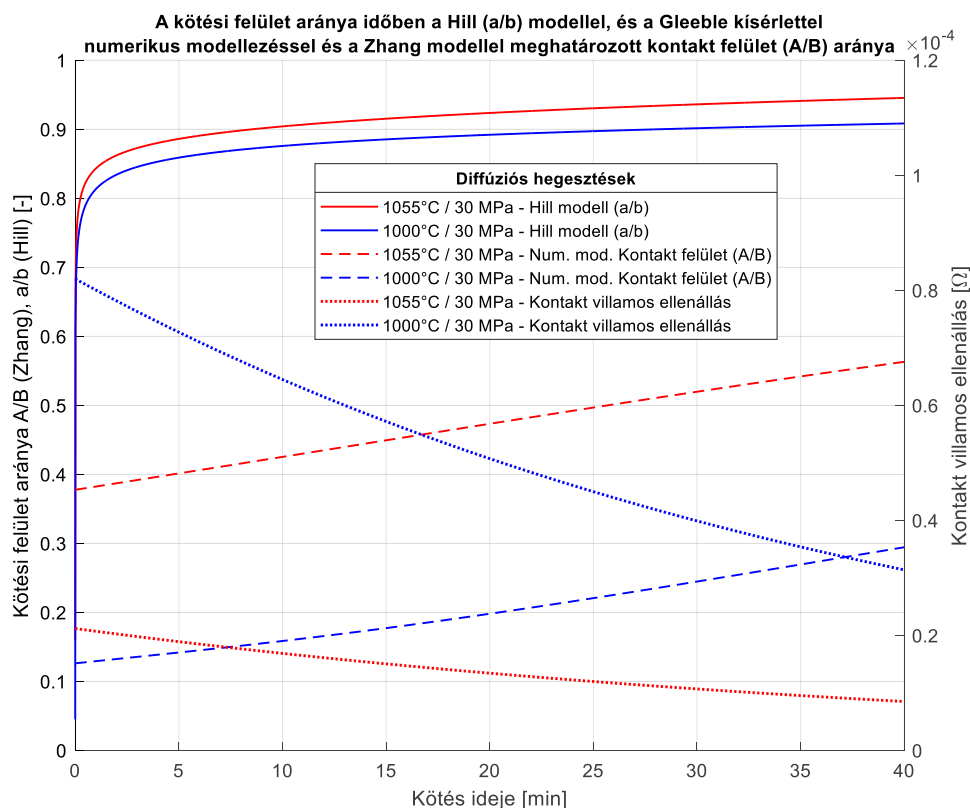
21. ábra A DG3 hegesztésben a b széles negyed ellipszis üreg alakulása a hegesztés alatt

A modellek az irodalomban ismert eredményeknek megfelelően igen gyors kötést mutattak, ahol a modellezés feltételezi a síklapúságot és a felület tökéletes tisztaságát. Megfigyelhető, hogy bár a nyak „a” szélessége igen gyorsan csökken, a nyak magassága a lassabb diffúziós vagy kúszási folyamatok miatt a DG3 esetében lassabban tűnik el, mint a DG7 hegesztésnél. A két folyamat között a fő különbséget a hőmérséklet eltérés adja a kísérletnek megfelelően. A két hegesztésnél és a modellben további különbséget jelentett a felületi érdesség eltérése és alkalmazása, de ennek befolyása nem volt

számottevő. A modellezésekre általában elmondható, hogy a felületen keletkező üreg elnyújtott ellipszis formája először rövid idő alatt körre alakul a felületi folyamatok miatt, majd az átmérője lassabban csökken a kevésbé domináns diffúziós és kúszási folyamatok miatt. A modellezésekből látható, hogy az irodalom alapján is indokolt a magasabb hőmérséklet (1050 °C–1100 °C) választása, amely így biztosítja az üregek 1-2 órás időtartam alatti bezáródását. Természetesen a nyomás növelésével is tovább növeljük a kötés sebességét, ugyanakkor ennek vizsgálatára nem törekedtünk a tengely irányú terheléskor tapasztalt hasasodás miatt.

3.6. Az elméleti és a kísérletek modellezésével meghatározott kötési felületek összevetése

Az elméleti diffúziós kötés kialakulását (a/b) Hill és Wallach modellel és a mérés és numerikus modellezéssel meghatározott kötési felület arányát a 22. ábra foglalja össze.



22. ábra A diffúziós hegesztésekhez tartozó Hill és Wallach modell (a/b) kötési felület aránya, összevetve a Gleeble méréssel és numerikus modellezéssel meghatározott ellenállással $R_{kont}(t)$, és az abból a Zhang elméletével számolt kontakt felülettel $A/B(R_{kont}(t))$

A magasabb hőmérsékleten végzett kísérlet és modell a vártak megfelelően a kontakt felület gyorsabb kialakulását mutatja az alacsonyabbhoz képest mindkét esetben. A kontakt felület valós arányát törésszeggel és mikroszkópiával készített vizsgálatokkal tervezzük meghatározni a későbbiekben.

Az elméleti modellezés és a mérés által meghatározott kontakt felület jelentős eltérést mutatott, ahol az utóbbi alacsonyabb értékeket vesz fel. Figyelembe véve a korábban leírt folyamat során a kialakuló felületi oxidálódást és egyéb szennyeződést, az elméleti modellezéshez (Hill és Wallach) képest kisebb vezető kontakt felületre számítottunk. Továbbá a felületi diffúziós modellezés későbbi javított változatai alapján (Zhang, M. Q. Li, 2015, 2018) (Ruifang et al., 2012), a jelen modell a valóságnál feltehetően ideálisabb, gyorsabb kötést eredményez. Ezért az újabb modellek alkalmazását és validálását a jövőben szükségesnek látom a 316L acélra is elvégezni.

Ezzel az eljárással a Gleeble berendezés segítségével egy új eljárást dolgoztam ki a diffúziós hegesztés kontakt felületének meghatározására. A kötési arány kialakulását összevethetővé tettem a Zhang-féle modellen keresztül az elméleti modellezésekkel kapott kötési felület arányával.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Kutatómunkám során a fúziós környezetben használt 316L acélok diffúziós hegesztésével foglalkoztam. Az eredményeimet tézisek formájában az alábbiakban összegzem.

1. *A diffúziós hegesztés folyamatának vizsgálata a Gleeble fizikai szimulátor berendezéssel*

316L rozsdamentes acél mintákon végzett kísérletekkel igazoltam, hogy az ellenállásfűtéssel végzett diffúziós hegesztési kísérletek a referencia mérésekkel együtt alkalmasak a diffúziós hegesztési folyamatok vizsgálatára. Összefüggést találtam a mérések során a diffúziós hegesztések és a referencia kísérletek eltérő tengely irányú alakváltozása, és a diffúziós hegesztés kontakt folyamatai között.

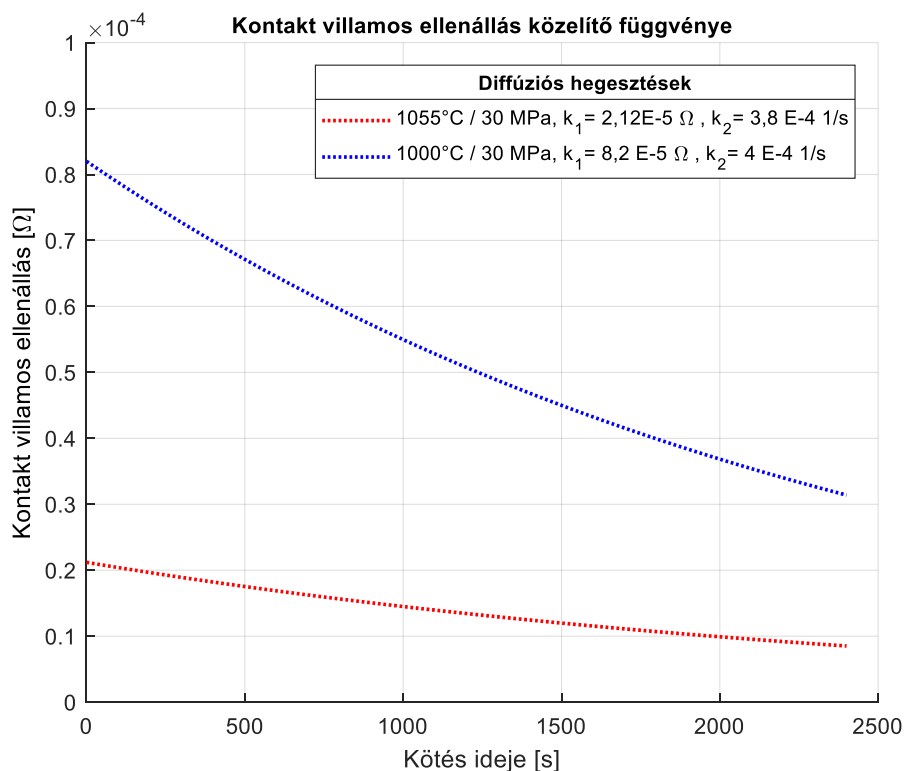
A hegesztési és referencia kísérleteket azonos paraméterek mellett végeztem el: 1000 °C/30 MPa/60 min és 1050 °C/30 MPa/40 min.

Kidolgoztam egy új numerikus modellezést, amellyel a kísérletek alatt a mintán keletkező hőmérséklet eloszlást és a minta deformációját tudtam modellezni, a modellezést a referencia mérésekhez igazítottam.

2. *A diffúziós hegesztés kontakt felületének villamos ellenállással való közelítése*

Bevezettem a diffúziós hegesztés modellezésére, a kontakt felületen keletkező, csökkenő tendenciájú kontakt villamos ellenállás függvényét: $R_{kontakt} = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot t}$ [Ω]. A függvényt a referencia vizsgálatoktól eltérő hegesztési kísérletekhez igazítottam a numerikus modellezésben.

A modellezéssel megállapítottam, hogy a hegesztési varratnál fellépő kontakt villamos ellenállás jelentősen befolyásolja a minta hőmérséklet eloszlását és áramfelvételét. Igazoltam, hogy a hegesztéskor fellépő kontakt villamos ellenállás a referencia mérésekhez képest a minta tengely irányú alakváltozását mérhető módon csökkenti.



A hegesztési felület kontakt villamos ellenállásának közelítő függvénye a két vizsgált hegesztés numerikus modellezéséhez igazítva a hegesztés ideje alatt

3. A Hill és Wallach-féle diffúziós modell és a Zhang-féle kontakt villamos ellenállás modell használata

Elvégeztem Hill és Wallach alapján a kísérleti diffúziós hegesztések elméleti felületi modellezését. A modellezés alapján 10-20 perc után 90% kontakt felületet kapunk, hasonlóan Hill (1983) eredményeihez. A modellezés és az irodalom alapján megállapítottam, hogy a tapasztalatnak megfelelően lassabb hegesztési folyamatokra, és az elmélethez képest bizonytalan kötési arányra számíthatunk a valóságban.

Kiszámoltam Zhang (2012) modellezése alapján a kötési felület arányához tartozó kontakt villamos ellenállás értékeket a hegesztett minták felületeire. Bemutattam, hogy a kontakt villamos ellenállás általam bevezetett függvénye és Zhang elméleti ellenállás értékek azonos nagyságrendbe esnek, melyeket így egymással összevethetővé tettem.

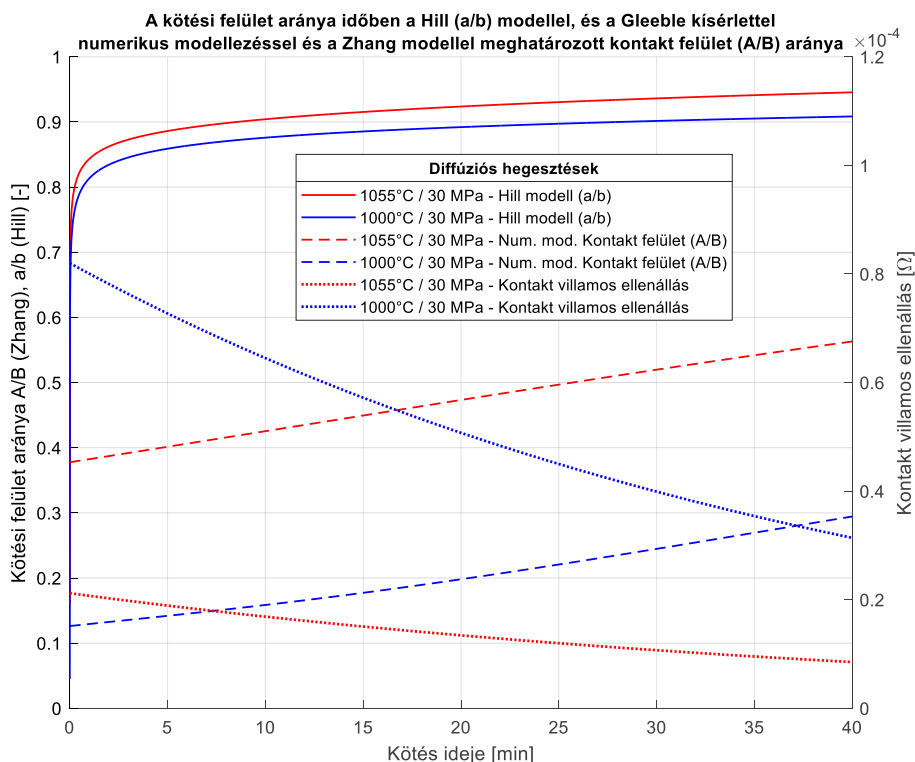
Igazoltam a Hill és Wallach és a Zhang-féle modellezésekkel, hogy a diffúziós hegesztés kötési felületének kialakulására és arányára a kontakt villamos ellenállás jó jellemző lehet.

4. A kontakt felület arányának meghatározása a mérések és az elméleti modellezésekkel

Meghatároztam a Zhang-féle modellt felhasználva az időben növekvő kötési felület arányát a mérésnél alkalmazott kontakt villamos ellenállás függvénye alapján. Így a diffúziós hegesztések hosszú folyamatának megállítása nélkül vizsgálhatóvá tettem annak előrehaladását.

Az eredményeket a Hill és Wallach-féle modellel összevettem és megállapítottam, hogy ismerve a Hill és Wallach-féle modell ideális eredményeit, a vártak megfelelően kisebb kontakt felületet kaptunk. Megállapítottam továbbá, hogy a nagyobb hőmérsékletű hegesztés (1055 °C) a vártak megfelelően nagyobb arányú kötési felületet adott a kisebb hőmérsékletű hegesztéshez (1000 °C) képest.

Ezzel a diffúziós hegesztések folyamatának vizsgálatára egy új módszert dolgoztam ki az alkalmazott fizikai szimulációs berendezéssel végzett kísérletekkel és a numerikus modellezéssel, melyet összehasonlíthatóvá tettem a kontakt felületek elméleti modellezéseivel.



A diffúziós hegesztésekhez tartozó Hill és Wallach program (a/b) kötési felület aránya, összevetve a bevezetett kontakt villamos ellenállással, és abból a Zhang elméletével kiszámolt kontakt felület arányával (A/B)

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutatómunkám során az ITER tokamakban és más fúziós környezetben használt 316L acélok diffúziós hegesztésével foglalkoztam.

A kísérletekkel igazoltam, hogy az ellenállásfűtéssel végzett diffúziós hegesztési kísérletek a referencia mérésekkel együtt alkalmasak a diffúziós hegesztési folyamatok vizsgálatára. Összefüggést találtam a mérések során a diffúziós hegesztések és a referencia kísérletek eltérő tengely irányú alakváltozása, és a diffúziós hegesztés kontakt folyamatai között. A hegesztési és referencia kísérleteket azonos paraméterek mellett végeztem el: 1000 °C/30 MPa/60 min és 1050 °C/30 MPa/40 min.

Kidolgoztam egy új numerikus modellezést, amellyel a kísérletek alatt a mintán keletkező hőmérséklet eloszlást és a minta deformációját tudtam modellezni, a modellezést a referencia mérésekhez igazítottam. Javasolom a modellezés pontosítását több ponton. A magas hőmérsékletű kísérletek kúszási jelenség modellezésére (900 °C – 1100 °C) relatíve gyors kúszása miatt javaslom a jövőben a Lindgren et al. (2017) által bemutatott plasztikus deformációs modell alkalmazását. A mérések alapján az irodalomban látható, hogy egy nagy egyenáramsűrűségű mintadarabnál a szakítószilárdság csökken, illetve a kúszási folyamat felgyorsulhat. Javaslom a folyáshatárra ható jelentős áramsűrűség vizsgálatát Varga (2020) munkájában kidolgozott modellezései alapján.

Elvégeztem Hill és Wallach alapján a kísérleti diffúziós hegesztések elméleti felületi modellezését. A modellezéssel javaslom a hegesztési paraméterek (hőmérséklet, nyomás, idő) felső és alsó határának pontosabb definiálását, valamint a paraméterek egymással való helyettesítésének vizsgálatát. A Hill és Wallach-féle modellezés további javított dinamikus paraméterezésű változatát mutatja be Ruifang (2012), amivel pontosabb modellt ér el a TC4 (Ti-6Al-4V) ötvözetre. Ennek alkalmazása a 316L acélra jelentősen pontosíthatja a modellezését. A 2D ellipszis modell helyett a 3D felület ellipszoid alkalmazása szintén javíthatják és pontosíthatják a modellezést Zhang (2018) alapján.

Az elméleti felületi modellezéseket és a kísérleteket igen hasznos lenne eltérő anyaggépekre kiterjeszteni. Az irodalom alapján a Hill és Wallach-féle modellre is vannak ilyen javaslatok. Bár ez utóbbi kiterjesztése alaposabb elméleti és kísérleti kutatómunkát von maga után.

A 316L acélokon túl javaslom a fúziós erőművekben használatos EUROFER97 és hasonló ötvözetű ODS acélok diffúziós hegesztésének vizsgálatait.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Diffúziós hegesztési kísérleteket és azonos paraméterekkel referencia kísérleteket végeztem el 316L mintákon a Dunaújvárosi Egyetem Gleeble 3800 GTC fizikai szimulátorán. A hengeres minták 30+30 mm és 60 mm hasznos szakasszal rendelkeztek. A fizikai kísérletekből kiválasztott két párra (hegesztés/referencia) részletes numerikus modellezést készítettem.

A Joule-hővel fűtött mintákon 1D hővezetési és kúszási numerikus modellt készítettem, ahol a hegesztési paraméterek a kísérleteknek megfelelően a következők voltak: 1000 °C / 30 MPa / 60 min és 1055 °C / 30 MPa / 40 min. A numerikus modell alkalmas volt megbecsülni a hengeres minta tengely irányú kúszását, a radiális irányú deformációját, a felhasznált egyenáram mennyiségét és a hegesztési felületen ébredő villamos ellenállást, modellezve a Gleeble-n végrehajtott kísérleteket. A modellezés figyelembe vette a hőmérsékletfüggő anyagparamétereket, valamint a Gleeble működésének megfelelően szabályozta a tengely irányú terhelést és szabályozta a konstans maximális hőmérsékletet biztosító áramsűrűséget. Az eredményeket a Baross et al. (2020, 2022) cikkben publikáltam, az előzetes tanulmányokat és részeredményeket, illetve kísérleteket a Baross et al. (2015, 2017, 2018, 2019) cikkekben írtam le.

A fizikai kísérletekben megfigyelhető volt a hegesztett minták tengely irányú kúszásának alacsonyabb mértéke az azonos paraméterű referencia mintákhoz képest. Ezt a jelenséget a numerikus modellezések is kimutattak a hozzáadott kontakt villamos ellenállással. Így a kísérletek alapján a kúszás erős hőmérsékletfüggése miatt becsülhetővé vált a hegesztési felületen ébredő kontakt villamos ellenállás.

A diffúziós hegesztés kontakt felületén a kötési arány elméleti modellezését és a kontakt villamos ellenállás elméleti számítását elvégeztem. Így számításokat végeztem a Hill, Wallach (1989)-féle modellel a felületi érdességi üregek változására és a kötési arány változására. Zhang (2012) modellezésével a kontakt felület ellenállását meghatároztam a kötési arány függvényében. Ezzel az eljárással a numerikus modellezésem során becsült kontakt villamos ellenállásból a valós kontakt felületre tudtam következtetni. Az így kapott kötési arány nagyságrendileg megfelelt az elméletileg számolt kötésnek.

A kontakt villamos ellenállás és a diffúziós hegesztés folyamatának összekapcsolása a hegesztés lefolyására a szakirodalom alapján új módszer, aminek alkalmazását célszerűnek tartom más diffúziós hegesztési folyamatok vizsgálatára is.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. **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, Vol. 160, 111768, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111768> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379620303161> (IF : 1,692 2020)
2. **Baross, T.**, Biel, W., Krejczinger, A., Krasikov, Yu., Panin, A. (2013): Retractable tube design issues in ITER CXRS UPP #3, Fusion Engineering and Design, Vol. 88, Issues 6–8, Pages 1352-1356, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.02.105>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379613002202>) (IF: 1,453 2013)
3. Krasikov, Yu., **Baross, T.**, Biel, W., Litnovsky, A., Hawkes, N., Kiss, G., Klinkhamer, J.F.F., Koning, J.F., Krimmer, A., Neubauer, O., Panin, A. (2011): Development of design options for the port plug components of the ITER core CXRS diagnostic, Fusion Engineering and Design, Volume 86, Issues 9–11, Pages 2055-2059, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.086>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379611000986>) (IF: 1,49 2011)
4. Mertens, Ph., Castaño Bardawil D. A., **Baross, T.**, Biel W., Friese, S., Hawkes, N., Jaspers, R.J.E., Kotov, V., Krasikov, Yu., Krimmer, A., Litnovsky, A., Marchuk, Olaf Neubauer, O., Offermanns, G., Panin, A., Pokol, G., Schrader, M., Samm, U. (2015): Status of the R&D activities to the design of an ITER core CXRS diagnostic system, Fusion Engineering and Design, Vol. 96–97, Pages 129-135, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.05.039>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379615300028>) (IF: 1,301 2015)
5. **Baross, T.**, De Baets, P., Veres, G. (2017): Development of structural materials for fusion reactors, Scientific Bulletin, Serie C, Fascicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, pp. 13-16., ISSN 1224-3264

6. **Baross, T.**, Jánosi, L., Kalácska, G., Veres, G. (2015): Diffusion bonding of plasma facing components of fusion reactor (ITER), Mechanical Engineering Letters, Szent István University, Vol. 12, pp. 101-109., HU ISSN 2060-3789
7. **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, Vol. 15, pp. 16-26., HU ISSN 2060-3789
8. **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, Vol. 18, pp. 17-26., HU ISSN 2060-3789
9. **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, Vol. 17, pp. 37-46., HU ISSN 2060-3789

Lektorált cikk magyar nyelven

10. **Baross, T.**, Bereczki, P., Jánosi, L., Palánkai, M., Veres, G. (2022): 316L mintákon végzett diffúziós hegesztési kísérletek Gleeble 3800 fizikai szimulátoron, Nukleon, XV. évf. (2022) 241, ISSN: 1789-9613