

NITINOL HUZAL ÉS TITÁN CSAP HEGESZTÉSE

WELDING OF NITINOL WIRE AND TITANIUM TIP

Meiszterics Zoltán*

ABSTRACT

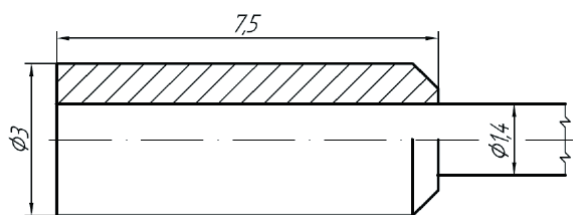
One of my former student had seen me in connection with a special welding problem in May 2007. He interested in for a purpose of medical application a micro welding project possible solution. The specialities of the problem derived from the size and material of probes. A diameter of 1,4 mm nitinol wire and a diameter of 3 mm tip with a connecting bore had to be welded together.

We examined several potential technologies. We needed a well controlled and concentrated heat source, such as the different lasers. At first we tried two types of laser for welding, then on the basis of results we chose resistance welding. We had done the finite element simulation of the resistance welding technology. During the project two students made their thesis.

In this article I summarised the results of our work.

1. BEVEZETÉS

2007 májusában egy volt tanítványom egy különleges hegesztési problémával kapcsolatban keresett meg. Orvosi alkalmazás céljaira egy- már inkább mikro hegesztési - feladat lehetséges megoldása után érdeklődött. A feladat különlegességét a hegesztendő anyag és a méretek adták. Egy Nitinol alapanyagú, Ø1,4 mm-es huzalra a hozzá illeszkedő Ø3 mm-es furatos csapot kellett ráhegeszteni.



1. ábra A munkadarab elrendezési vázlata

A feladat megoldására több lehetőséget is megvizsgáltunk. Mindenképpen egy jól szabályozható, kis felületre koncentrálható hőforrásra volt szükség. Ilyenek a

különböző lézerek. Így először kipróbáltuk a lézersugár-hegesztést, majd pedig az eredményekből okulva, ellenállás-hegesztést alkalmaztunk. Az utóbbi technológia igazolására pedig elvégeztük a folyamat végelesemes szimulációját. A probléma kapcsán két diplomaterv is íródott. Ebben a cikkben a feladat megoldása kapcsán elvégzett munkát foglaltam össze.

2. NITINOL HUZAL JELLEMZÉSE

Ez a legismertebb alakemlékező ötvözet. A tulajdonságai erősen függenek az összetételétől, ezért az ötvözet előállításánál 0,05% pontossággal kell van az alkotók arányát beállítani. Megfelelő hidegalakítással és az azt követő hőkezelési eljárással állítják be az ötvözet alakemlékező tulajdonságait. Rosszul forgácsolható, hagyományos forgácsolási eljárásokkal is megmunkálható, de igen gyors szerszámkopást okoz, ezért elsősorban abrazív eljárásokkal munkálják meg [5].

Irodalmi adatok szerint önmagával összehegesztve az alapanyag szilárdságának 75%-a érhető el [3,5]. Sikeresen alkalmazott eljárások: CO₂ és Nd-YAG lézersugaras hegesztés, AVI hegesztés, ellenállás-hegesztés. Védőgázként argont és héliumot alkalmaztak [3].

Ez az anyag 6% körüli rugalmas és 10%-ot meghaladó teljes alakváltozással rendelkezik [4], amit az úgynevezett ausztenites-martenzites átalakulásnak köszönhet. Az átalakulás hőmérsékletváltozás és mechanikai feszültség hatására is végbemehet. Itt az átalakulás ikerkristály képződéssel megy végbe, így a rácsszerkezetben az atomok nem váltanak szomszédot, így a folyamat reverzibilis, ellentétben az acélok esetében lezajló martenzites átalakulással.

Az alkalmazott huzal anyagspecifikációja:

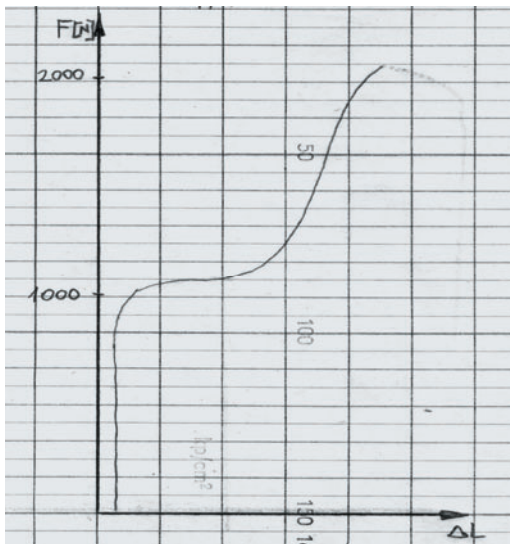
Gyártó: Euroflex Gmh.

Gyártói megnevezés: Nitinol SE508 – szuperrugalmas huzal szoba- és teshőmérsékleti alkalmazásokra.

Kémiai összetétel: Ni 55,8%, Ti maradék, O max. 0,05%, C max. 0,02% tömegszázalék

Hogy legyen viszonyítási alapunk a kötés minősítéséhez elvégeztük az eredeti huzal szakító vizsgálatát. A maximális erő $F_{max}=2085$ N-ra adódott, ami $R_m=1354$ MPa szakítószilárdságot jelent.

* Egyetemi adjunktus, Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar



2. ábra. Nitinol huzal szakítódiagramja

3. A CSAP ANYAGÁNAK KIVÁLASZTÁSA

Hegesztés szempontjából legésszerűbb választás a saját anyaggal való összehegesztés lett volna, mivel az irodalmi adatok szerint így lehet elérni a legnagyobb varratszilárdságot [5], de az anyag ára és a furatok elkészítésének nehézségei miatt a megrendelő ezt elvetette.

Először rozsdamentes csapokat küldtek, amit a témával foglalkozó irodalmak alapján gyorsan el kellett vetni, mivel a nitinol Ti tartalma igen nagy affinitást mutat a vassal és olvadék állapotból lehűlve rideg $TiFe_2$ és $TiFe$ vegyületi fázisokat alkot [5]. Ezt a kísérletek is alátámasztották, a szemre megfelelő hegesztett varratok a legkisebb hajlításra üvegszerűen eltörték.

A [3] irodalom beszámol $\varnothing 0,1$ mm-es nitinol és saválló ausztenites acél huzalok Nd-YAG lézerrel való összehegesztéséről, ahol az elért varrat szakítószilárdsága a nitinol szakítószilárdságának majdnem 50%-a. A varratban 900 HV_{0,05} keménységet is mértek, ami bizonyítja a rideg fázisok jelenétét.

Ezen intermetallikus vegyületek kialakulását és a varratok elridegését meg lehet akadályozni a két anyagot elválasztó tantál réteg segítségével [5].

Rozsdamentes acél helyett tehát valami más anyagot kellett választani. Kézenfekvőnek tűnt, hogy a nitinol egyik fő alkotója legyen a csap anyaga. Mivel orvosi alkalmazásról volt szó, így az egyébként is biokompatibilis titánt választottuk.

Két különböző anyagminőségű csappal végeztünk hegesztési kísérleteket:

Gyártó: Bibus Metals Ag.

Gyártói megnevezés:

1. ATSM Grade 2– ötvözetlen titán.
2. Grade5 6Al-4V ELI - 6% Al és 4% V tartalmú titánötvözet

3. LÉZERHEGESZTÉS

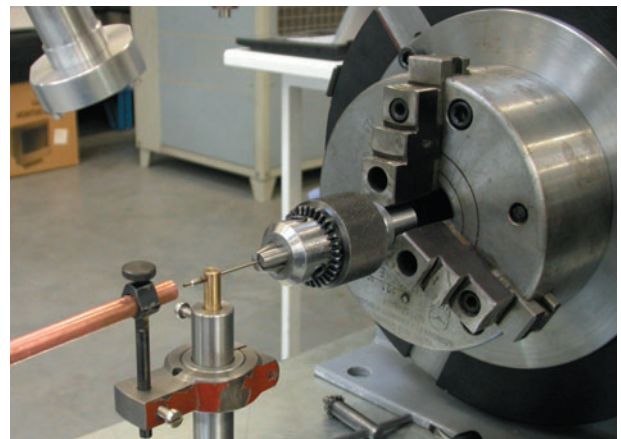
A lézerhegesztést kétféle lézer típusal is elvégeztük. A hegesztési összeállítás lényegében megegyezett a két esetben. A huzalt befogtuk egy vezérelhető forgatóba, majd az álló lézer alatt megfogatva a lézer megfelelő ki és bekapcsolásával kialakult a hegesztett kötés, a hegesztéshez hozaganyagot nem használtunk. A csap letöréssel rendelkező végét megolvasztva alakult ki a hegesztett kötés. A hegesztésnél a legnagyobb problémát a munkadarab forgatás közbeni helyzetének biztosítása adta. Egy furatos állítható vezetővel lehetett megakadályozni a csap forgatás közbeni bolygó mozgását.

Az egyik sugárforrás egy PRC2000 típusú 1800 W maximális teljesítményű CO₂ lézer volt.



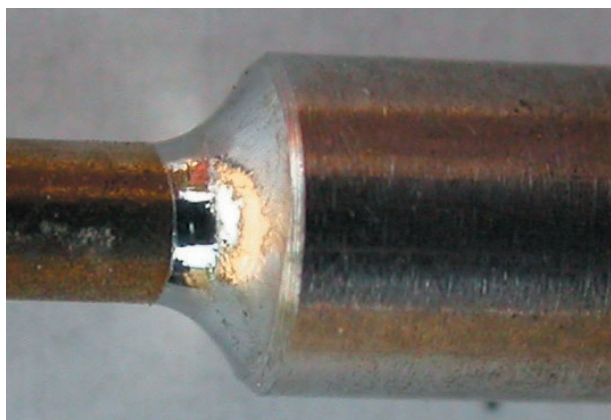
3. ábra. CO₂ lézerrel hegesztett munkadarab

A másik lézer pedig egy SPI redPOWER típusú 100 W maximális teljesítményű szállézer volt, mely sugárforrás csak egyetlen napra állt rendelkezésünkre, így csak egyetlen kísérletsorozat elvégzésére volt módunk.



4. ábra. Kísérleti összeállítás szállézeres hegesztéshez

Mindkét anyagminőséggel készültek varratok, melyeket utána szakítással minősítettünk. A Grade5 minőség esetében kaptunk nagyobb szakító erőt.



5. ábra. Szállézerrel hegesztett varrat

A beállítási paraméterek és a szakító próbák eredményei az 1. táblázatban találhatóak.

Lézer típus	Lézer teljesítmény [W]	Fordulatszám [1/min]	Szakító erő [N]
PRC2000	600	100	705
SPI redPOWER	95	40	533

1. táblázat

A sugárzás fémekben való elnyelődése a szállézeres esetében jobb, mint a CO₂ lézereknél a rövidebb hullámhossznak köszönhetően, így kisebb lézer teljesítmény elegendő azonos varrat létrehozásához. A varratok kívülről sokkal tetszetősebbek voltak, mint a CO₂ lézerrel hegesztett varratok, mégis a szakítóerők elmaradtak azoktól. Ennek a kisebb beolvadás lehetett az oka.

A lézeres hegesztési próbákból azt lehetett leszűrni, hogy nagyon kis keresztmetszettel rendelkezik a varrat, így a szakítóerő nem növelhető jelentősen. Ha a bevitt energiát növeljük, akkor a hő hatására a huzal gyengül meg és az szakad el, kis hő és varratkeresztmetszet mellett pedig a szál szakad ki a csapból.

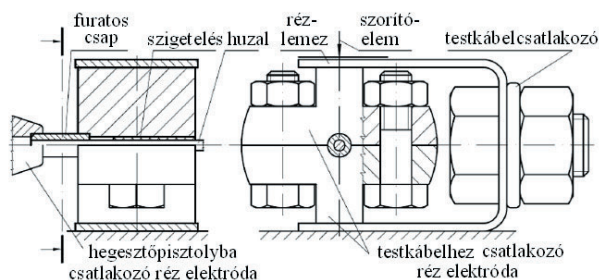
4. ELLENÁLLÁS-HEGESZTÉS [1]

Olyan hegesztési eljárást kellett keresni, amely során a kötés keresztmetszetét lehetett növelni. Ha a csap és a huzal érintkezési felületét lehetne összeolvasztani, úgy hogy a szálát lehetőleg minimális hőhatás érje, akkor várhatóan jelentősen lehet növelni a kötés szilárdságát. Erre a villamos ellenállás hegesztés kiválóan alkalmasnak tűnt.

A hegesztéseket egy HBS gyártmányú ARC800-as típusú transzformátoros csaphegesztő géppel végeztük. A gép névleges árama 800 A, a hegesztési időt 5 és 1000 ms között lehet állítani ms-os lépésközzel.

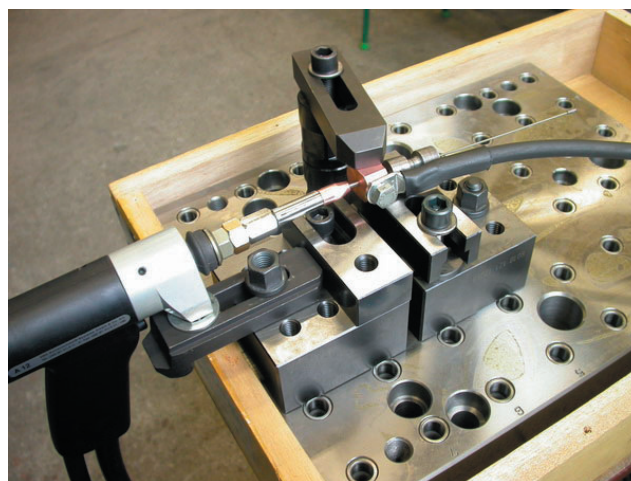
Első próbálkozásként a szálon és a csapon keresztül zártuk az áramkört, reménykedve abban, hogy a csap és a huzal közti átmeneti ellenállás lesz a legnagyobb, így a hő nagy része éppen az összehegesztendő felületen fog keletkezni. Sajnos nem ez volt a helyzet, a minimális hegesztési idő mellett is a keletkező hő hatására szétrobbant a szál.

Ez után jött a gondolat, hogy hagyjuk ki az áramkörből a huzalt. Tegyük a két elektródát a csapra, így az áram csak a csapon keresztül folyik és a csapban keletkező hő közvetve hevíti fel a szálát. Ez abból a szempontból is jó, hogy így el lehet érni, hogy a szál a lehető legkisebb hőt kapja, így a huzal szilárdságcsökkenését minimalizálni lehet. Szerencsés körülmény a hegesztés szempontjából, hogy a titánnak jelentősen magasabb az olvadáspontja, mint a nitinolé.



6. ábra Kísérleti összeállítás elvi vázlata

A hegesztések során a hegesztési időt változtattuk és a maximális szakítóerőt kerestük, ami várhatóan a szál kicsúszásának és a szál szakadásának a határ állapotánál keresendő.



7. ábra. Az egyik ellenállás-hegesztési összeállítás

Már az első próbálkozások nagyon biztatóak voltak. A hegesztések reprodukálhatóságának érdekében összeállítottunk egy befogó készüléket, és többszöri átalakítás után jutottunk el a megfelelő elektróda kialakításig.

A szál nagy keménysége és kis átmérője miatt probléma volt a szakítással, mert az edzett sík befogópofákból minduntalan kicsúszott a szál. Ezért ahhoz a megoldáshoz folyamodtunk, hogy kifűrt szakító próbatetek fej részét használtuk befogó betétként. Így viszont előre fel kellett fűzni a betéteket és a varratokat párosával teszteltük.



8. ábra. A szakító próbatest a felfűzött betétekkel

A kis mennyiségben rendelkezésre álló kísérleti anyag miatt mindig az el nem szakadt varrat mellé hegesztettünk egy új varratot. Ez viszont azt jelentette, hogy minden jól sikerült varrat legalább kétszer lett megterhelve a szakító szilárdságát megközelítő terheléssel, így természetesen a kapott szakítóerők kisebb értéket mutatnak ahhoz képest, mintha a varratokat egyesével terheljük volna.

A hegesztés során a titán csap nem olvadt meg, csak felizzott egy pillanatra, így védőgáz használata nélkül is csak némi elszíneződés volt tapasztalható a csap áramjárta felületén. Védőgáz alkalmazásával még ez az elszíneződés is megszüntethető volt.



9. ábra A csap hegesztés előtt, védőgáz nélkül és Ar védőgázzal hegesztett munkadarab

A kötés kialakításából adódóan nem alkalmazhattunk az összehegesztendő darabok között külső szorítóerőt. A csap és a huzal közötti illesztés fontos tényező ennél az elrendezésnél. A huzal méretét egy Tesamaster típusú 0-25 mm mérés határu mikrométerrel ellenőriztük, az átmérők 1,4004 és 1,4007 mm között változtak. A csapok furatait pedig egy PZO MWD 1139 típusú mű-

helymikroszkóppal mértük meg. A furatátmérők 1,41 és 1,445 mm között változtak. A csapokat a megrendelő készítette el, úgy hogy a csap a huzalra nagyobb erő nélkül felhelyezhető legyen, de ne legyen túl nagy játék a két alkatrész között. A mérések alapján a játék átmérőben 0,04-0,065 mm között változott. A nitinol hőtágulási együtthatója valamivel nagyobb, mint a titán ötvözeté, ez a hegesztés szempontjából jó mivel a hevítési szakaszban az alkatrészek közötti hézag csökken.

Az elért legnagyobb szakítóerő $F_{max}=870$ N volt, ami terhelést tehát egy másik varrat még kibírt. A hegesztési idő $t_{heg}=101$ ms volt.

Valószínűsíthető, hogy egy átmeneti illesztés alkalmazásával még tovább lehetett volna növelni a varratok szilárdságát, hiszen így a kötés kialakításakor nagyobb összeszorító erő lépett volna fel a hegesztendő darabok közt. Ezt a lehetőséget jeleztem a megrendelő felé, de a kis méretek miatt nem vállalták a csapok furatainak kívánt tűréssel való elkészítését.

5. ELLENÁLLÁS-HEGESZTÉS VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓJA [2]

Felmerült a kérdés, hogy a kísérletileg megtalált optimális ellenállás-hegesztési paramétereket meg lehet-e elméleti úton is határozni? Ehhez egy FlexPDE nevű általános célú parciális differenciálegyenleteket megoldó végeelemes szoftvert alkalmaztunk.

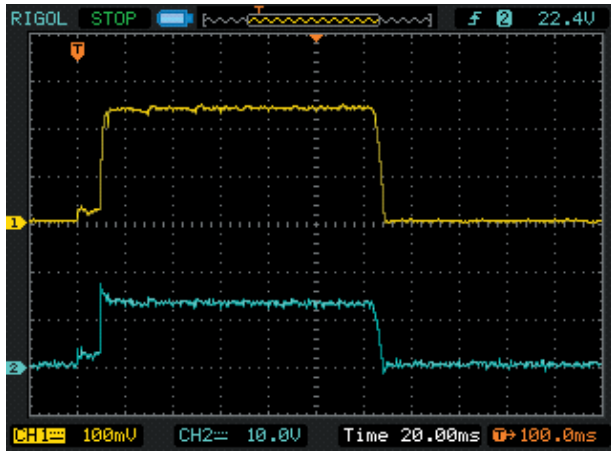
A modellt lépésről lépésre fejlesztettük addig, amíg a szimulációk a gyakorlati tapasztalatainkat meg nem közelítették. Még egy ilyen egyszerű feladat elméleti úton való megoldása is számos problémát vet fel. Mérlegelni kell, hogy mi az, amit el lehet hanyagolni és mi az, amit a jó eredmények érdekében figyelembe kell venni. Alapfeltétel továbbá, hogy a hegesztési folyamatban szerepet játszó fizikai és technológiai paraméterek kellő pontossággal ismertek legyenek.

A munkadarab alakjából következik, hogy hengerkoordináta rendszerben célszerű megoldani a feladatot, a szimmetria miatt pedig elegendő a munkadarab felét vizsgálni. A jól megválasztott koordináta rendszernek jelentős hatása van az elvégzendő számítások mennyiségére, így a program futásidejére.

A darabok méretei miatt a réz elektródákat is bele kellett venni a modellbe, mert hegesztés közben és után jelentős hő vonnak el a munkadarabtól és így jelentősen befolyásolják a hőmérséklet lefutását. A program a geometria megadása után automatikusan elvégzi a hálózást és a pontosabb számítások érdekében menet közben változtatja a háló sűrűségét.

Az áramforrás névleges áramával lefutott szimulációk a tapasztalatoktól jelentősen eltérő eredményeket mutattak, ezért méréssel ellenőriztük a hegesztés során átfolyó áramot. Kiderült, hogy jóval nagyobb a tényleges áram, mint amit feltételeztünk. Ennek oka az, hogy

a csaphegesztő gépet ellenállás-hegesztésre alkalmaztuk. A csaphegesztés ugyanis egy ívhegesztési eljárás, az ív ellenállása pedig nagyobb, mint ami rövidzárlatkor kialakul. Egy RIGOL DS1042CD típusú oszcilloszkóppal, 300A/60mV típusú mérőszónt segítségével rögzítettük az átfolyó áram erősségét, valamint a körön eső feszültség nagyságát.



10. ábra. Az áramerősség és a feszültség időbeli lefutása

A 10. ábrán az egyes csatornán (felül, sárgával) az áramerősség látható – pontosabban a mérőszónton eső feszültség, amelyből számítható az áramerősség -, a kettes csatornán pedig a teljes hegesztési összeállításon eső feszültség. Megfigyelhető, hogy 10 ms ideig egy előáram lép fel, melynek nagysága 200 A, a hegesztőáram időtartama 114 ms, nagysága pedig 1200 A.

Mivel a hegesztés egy külső áramforrással történt, ezért az áramot az áramsűrűség segítségével a következő differenciál egyenlettel adtuk meg:

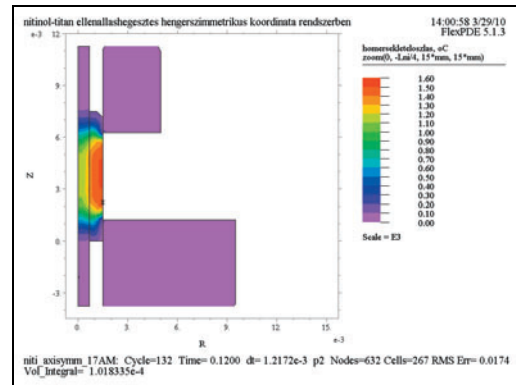
$$\text{div}J = 0$$

ahol J az áramsűrűség.

Az átfolyó áram hatására keletkező Joule hő a hegesztés hőforrása, a hőmérsékleti mező térbeli és időbeli alakulását a hővezetés differenciálegyenlete írja le:

$$\frac{Q}{\rho \cdot c} + \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}$$

ahol Q [W/m³] a belső térfogati hőforrás (az átfolyó áram hatására keletkező Joule hő)
 ρ [kg/m³] a sűrűség
 c [J/kg^oK] állandó nyomáson vett fajhő
 λ [W/m^oK] hővezetési tényező
 $T(r,t)$ [°K] hőmérsékleti mező
 t [s] idő



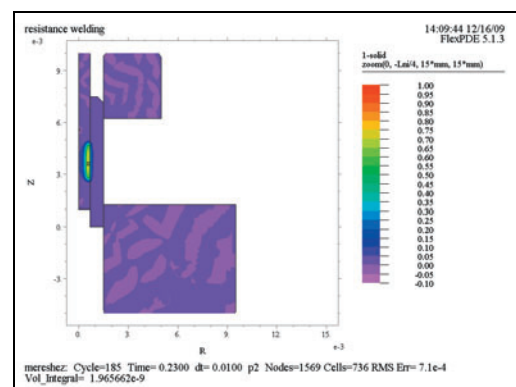
11. ábra. Hőmérsékleti mező a $t=0,12$ s időpillanatban

A pontosabb számítások érdekében figyelembe vettük a hegesztés során lezajló megolvadási és megszilárdulási folyamatokat. Bevezettünk egy új változót- a szilárd fázis mennyiségét (solid)-, aminek értéke a megolvadás során 1-ről 0-ra csökken, megszilárdulásakor pedig ismét 1 értéket vesz fel. A véges elemes analízis esetén problémát okoz egy változó hirtelen, ugrásszerű megváltozása. Ezért a megolvadást a hőmérséklet függvényében írtuk le, amit egy kezdeti és egy befejező hőmérséklettel jellemezhetünk. Tehát egy olyan folytonos, jól kezelhető függvényre volt szükség, amely 0 és 1 között változtatja az értékét. Ilyen az erfc függvény megfelelő módosítások után.

Az alkalmazott függvény a következőképpen alakult:

$$\text{Solid} = 0,5 \cdot \text{erfc} \left(\frac{4(T - T_{olv})}{T_0} \right)$$

ahol T_{olv} az olvadáspont
 T_0 annak a hőköznék a fele, ahol a teljes megolvadás bekövetkezik.



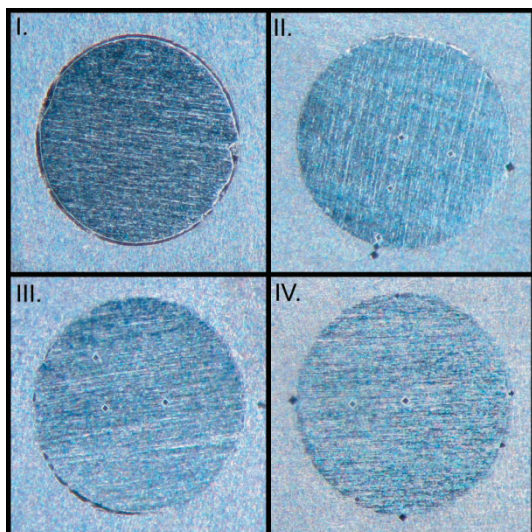
12. ábra. A megolvadt zóna

Az olvadáskor és megszilárdulásakor az olvadáshőt egy előjeles hőforrástagként vettük figyelembe a hővezetés differenciálegyenletében.

A differenciálegyenletek megoldásához természetesen

meg kellett adnunk a kezdeti és a peremfeltételeket.

A megolvadás határát úgy vetettük össze a szimulációs eredményekkel, hogy a hegesztett darabokat különböző síkokban elmetszve mikroszkóp alatt megvizsgáltuk. Az I. metszeten látható az eredeti illesztési hézag, ezen a részen nem folyt áram, így itt nem is olvadt össze a két darab. A II-III. metszeten még megfigyelhetők összeolvadási hibák, a IV. metszeten pedig már teljes összeolvadás látható.



13. ábra. A hegesztett darab metszeti képei

A szimulációs eredmények és a mért értékek között 14,5% eltérés adódott, ami már elfogadható pontosságot jelent.

5. ÖSSZEFOGLALÓ

Csap anyagaként több lehetőséget megvizsgáltunk, legjobb eredményeket a Grade5 6Al-4V ELI titánötvözet esetén kaptuk.

Két lézer típusal is végeztünk hegesztéseket, de végül is az ellenállás hegesztés ennél a feladatnál minden szempontból jobbnak adódott, mint a lézersugárhegesztés. A berendezés sokkal olcsóbb, a beállítási és a hegesztési idő rövidebb volt, a kötések szakítószilárdsága pedig meghaladta a lézerhegesztéssel elért értékeket. Kísérleti úton meghatároztuk a hegesztési idő optimális értékét, a varratok minősítését szakító vizsgálattal végeztük el. A kísérletek gyorsabb végrehajthatóságának érdekében összeállítottunk egy hegesztő készüléket, az elektródák végső kialakításához pedig több kísérletsorozaton keresztül jutottunk el.

Elvégeztük az ellenállás-hegesztési folyamat végelelemes szimulációját. A szimuláció során meghatároztuk a hőmérsékleti mező időbeli alakulását, a nitinol szál és a titán csap megolvadásának időbeli és

térbeli alakulását. Metszeteket készítettünk a hegesztett darabokból és meghatároztuk az összeolvadás határát. A szimulációs eredmények a tapasztalati értékeket jól közelítik.

A hegesztett kötések megfeleltek az elvárt követelményeknek.

SUMMARY

We had probed different quality as material of tips and we have got the best results with a Titanium alloy named Gade 5 6Al-4V ELI.

We welded probes with two types of lasers, but in this case the resistant welding is better technology than laser welding from all point of view. The equipment is cheaper, adjusting and welding time are shorter, the strength of beads exceeded the results of laser welding. Experimentally we founded the optimal welding time and qualified the seams with tensile test. For shorter adjusting time, we pieced together a welding fixture and improved the electrodes with tests.

We made the simulation of the resistance welding process with finite element method. We determined the temperature field in function of time and location and simulated the melting and solidification process with the software. The cross sections of the probes were examined at different planes and determined the boundary of melting. Results of simulation are near to practical observations.

The welded beads have fulfilled the requirements.

6. IRODALOM

- [1] RAJKÓ P.: Nitinol szál és titán csap hegesztése ellenálláshegesztéssel. Diplomaterv
- [2] SZLIPCSEVICS ZS.: Ellenálláshegesztés végelelemes szimulációja. Diplomaterv
- [3] H. GUGEL, A. SCHUERMAN, W. THEISEN: Laser welding of NiTi wires. Materials Science and Engineering xxx (2007) xxx-xxx
- [4] A. FALVO, F. M. FURGIUELE, C. MALETTA: Laser welding of a NiTi alloy: Mechanical and shape memory behaviour. Materials Science and Engineering A 412 (2005) 235-240
- [5] MING H. WU: Fabrication of Nitinol Materials and Components. Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Kunming, China, P.285-292 (2001)