

## DUPLEX ACÉLCSÖVEK ORBITÁLIS HEGESZTÉSE

### ORBITAL WELDING OF DUPLEX STEEL PIPES

**Pásku Péter**

paskupeter87@gmail.com

**Dobránszky János**

Budapesti Műszaki és  
Gazdaságtudományi Egyetem  
1111 Budapest,  
Bertalan Lajos u. 7.  
dobranszky.janos@eik.bme.hu

**Rada Péter**

Acis Complex Kft.  
H-2041 Budaörs,  
Gyár utca 2.  
peter.rada@acis-complex.hu

*Absztrakt: A kutatómunka során a hegesztéstechnológiai paraméterek varratgeometriára, szövetszerkezetre, elektródakopásra gyakorolt hatásait vizsgáltuk a statisztikai kísérlettervezés módszerét alkalmazva, duplex korrózióálló acélcsövek orbitális TIG technológiával történő hegesztése során.*

*Abstract: The aim of this research was to investigate the effects of different welding parameters on weld geometry, weld microstructure, tungsten electrode wear, using orbital TIG technology and duplex corrosion resistant steel pipes as base material and utilizing a statistical method called design of experiment.*

### 1. Bevezetés

A kísérleti munka a BME Anyagtudomány- és Technológia Tanszék és az ACIS Complex Kft. együttműködése során valósult meg. A feladat alapötlete onnan származott, hogy az ipari csőrendszereket gyártó ACIS Complex Kft. által alkalmazott orbitális TIG technológiánál jellemzően használt WT-20 és WT-40 típusú volfrámelektrodákat a közeljövőben fokozatosan kivonják a forgalomból. A kutatás célja az orbitális TIG technológia részletesebb megismerése, egyes hegesztési paraméterek (többek között a volfrámelektroda geometriájának) varratgeometriára, szövetszerkezetre gyakorolt hatásának feltárása, illetve amennyiben lehetséges, az elektródakopás mértékének csökkentése volt.

## 2. Elméleti áttekintés

A duplex acélok – röviden fogalmazva - a korrózióálló acélok egy olyan csoportja, amely acélok szövetszerkezete ferrites-ausztenites (nagy általánosságban 30-70% és 70-30% ferrit-ausztenit arány tartományában). Ilyen szövetszerkezettel rendelkező acélok már az 1920-as években is léteztek, fejlesztésük, elterjedésük csak a 60-as, 70-es években kezdett jelentős mértékben növekedni. Egyrészt a nikkeltartalom emelkedése szükségessé tette olyan acélok megjelenését, amelyek csökkentett nikkeltartalommal rendelkeztek, de közben birtokolták az ausztenites acélok korrózióálló tulajdonságait, szívósságát, valamint a ferrites acélok szilárdsági tulajdonságait. Másrészt az acélgártásban az AOD (argon-oxigén dekarbonizálás) megjelenésével a létrejött technológiai háttér lehetővé tette a szennyezők hatékonyabb eltávolítását, a karbon tartalom kellő (kellően kis) értékre való pontos beállítását. A 70-es évektől kezdve nitrogén beötvözésével és a karbon tartalom további csökkentésével jelentősen javultak a duplex acélok korróziós tulajdonságai.

A 80-as években megjelentek a második generációs duplex acélok. Ezek a hegeszthetőség javulását hozták magukkal, elsősorban N-ötvözés által: a nitrogén az ausztenit kiválás hőmérsékletének növelésével elkerülhető a túl nagy ferrittartalom a hőhatásövezetben. A N által jelentősen javult az általános, illetve a feszültségkorróziós ellenállás, valamint előnyösen változtak egyes mechanikai tulajdonságok (nőtt a szívósság, folyáshatár). [1]

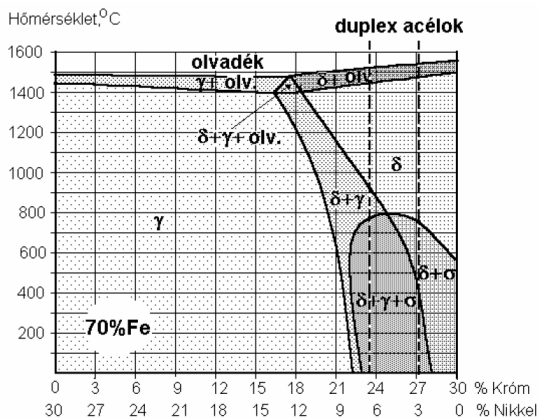
A duplex rozsdamentes acélok csoportosítása:

1. Lean („sovány”) duplex korrózióálló acélok: csökkentett Ni- és Mo-tartalmú acélok. Az ausztenitképző nikkeltartalom hiányának pótlása N-nel és Mn-nal.
2. Standard duplex korrózióálló acélok: általános felhasználású duplex acélok. Ide tartozik a legnagyobb arányban, 80%-ban felhasznált 2205-ös típus.
3. Szuperduplex korrózióálló acélok: növelt Cr- és Mo-tartalom (jelentősen növelt általános korróziós ellenállás), Cu és W ötvözőknek köszönhetően jobb lyukkorróziós ellenállás.
4. Hiperduplex korrózióálló acélok: a Cr- és Mo-tartalom együttesen elérheti a 35%-ot, a N elérheti az oldhatósági határt. Különlegesen jó ellenálló képesség lyuk-és réskorrózióknak, valamint általános korrózióknak agresszív savas közegekben.
5. Ausztenit-ferrites hőálló acél: a nagyobb C-tartalom (0,15%) és Si jelenléte (1,5%) biztosítja a hőállóságot. [2]

### 2.1. Duplex acélok hegeszthetősége

Korrózióálló acélok esetén, így tehát duplex acéloknál is a kialakult szövetszerkezet alapvetően meghatározza a korróziós, mechanikai, hegeszthetőségi tulajdonságokat, szükséges tehát ismernünk a duplex acélok átalakulásait, a kialakuló szövetszerkezet előzetes becslésének, valamint utólagos ellenőrzésének módszereit. Vegyük alapul a vas-króm-nikkel háromalkotós állapotára 70%-os vastartalomhoz tartozó metszetét (1. ábra). Ez a diagram nem alkalmazható a kísérletek során használt LDX2101-típusú acélra (az alacsonyabb ötvöztartalom miatt), de a kristályosodási-átkristályosodási folyamat jól megfigyelhető rajta. Szükséges figyelni arra, hogy közben a vas-szén kétalkotós rendszer C=0,03% metszete mentén történik az átalakulási folyamat. Ennek megfelelően a varrat kristályosodása  $\delta$ -ferrit képződésével valósul meg, amely megakadályozza, hogy a

szennyezők filmszerűen beburkolják a szemcséket. Ennek köszönhetően a duplex acélok gyakorlatilag nem hajlamosak melegrepedésre. A folyamat úgy folytatódik, hogy a  $\delta$ -ferrit egy része  $\gamma$ -vassá alakul. Ez az átalakulás a ferrit-szemcsék határán indul, ahol a legnagyobb a rácsrendezetlenség, tehát a legnagyobb az energiaszint [Cszmazia, 2003]. Az így kialakuló ausztenit finomszemcsés, a szennyezők főleg a szemcsehatárokon, zárványszerűen helyezkednek el. Ezeknek a hatásoknak az együtteseként lehetséges a már említett nagy szívósság (kis átmeneti hőmérséklet) és nagy szilárdság. A képződő ausztenit (és ezáltal a visszamaradó ferrit) mennyisége a lehűlési sebességgel szabályozható, azonban tudni kell, hogy a duplex acélokban 600-1000°C tartományban adott inkubációs idő eltelte után a  $\delta$ -fázis  $\sigma$ -fázissá alakul [Gunn RN, 1998]. Ez a fázis egy Fe-Cr-Mo intermetallikus elektronvegyület, rideg kemény, az ütőmunkát jelentősen csökkenti. A  $\sigma$ -fázis kiválását mindenképpen el kell kerülni, ez a hűlési idő felülről való korlátozásával érhető el. Ez hegesztési folyamatoknál úgy érhető el, hogy a rétegek közti hőmérsékletet 150°C-ban, a fajlagos hőbevitelt pedig 2 kJ/mm-ben kell maximalizálni.



1. ábra: Fe-Cr-Ni háromalkotós egyensúlyi diagram Fe=70%-os metszete, forrás: [5]

## 2.2. Statisztikai kísérlettervezés ismertetése

A műszaki- és tudományos életben a kutató-fejlesztő munka költségének (és időtartamának) a legnagyobb hányadát a kísérletek teszik ki. Ebből az következik, hogy a lehető legkisebb számú kísérletből a lehető legtöbb információt nyerjük ki. Ez nem csupán azt jelenti, hogy a kísérleteket nagy körültekintéssel kell megterveznünk, hanem azt, hogy már a tervezési fázisban segítségül kell hívnunk a matematikai statisztika eszközeit: ezek lehetővé teszik, hogy a szükséges információt a legkevesebb kísérleti munkával szerezzük meg.

A kísérleti munkánk folyamán teljes mértékben indokolt volt a statisztikai kísérlettervezés módszereinek használata. Egyrészt azért, mert szeretnénk feltárni a folyamatban részt vevő technológiai paraméterek hatását az elektródakopásra, illetve a varrat geometriájára, szövetszerkezetére; e paraméterek száma nagyon nagy, csak néhánynak ismert a hatása, a kölcsönhatások nem ismertek. Másrészt a kísérletek időigényesek, előkészítésük, elvégzésük, kiértékelésük hosszadalmas, nehézkes. Harmadrészt a kísérletek anyagigényesek, szükség van alapanyagra, hegesztőelektródákra, védőgázra,

hegesztőberendezés kezelésére felhatalmazott és kiképzett személyre, ezek korlátozott rendelkezésre állása is indokolja a kísérletek számának minimalizálását [4].

A kísérlettervezés célja: kísérleteket azért végzünk, hogy az adott folyamatról valamilyen információt nyerjünk. Azokat a kísérleteket, amelyekhez a kísérlet körülményeit úgy választjuk meg, hogy az adott információ megszerzéséhez a legkevesebb kísérletet kelljen elvégezni, aktív kísérleteknek nevezzük. A kísérlettervezés (azaz a független változók terében a kísérleti pontok kijelölése) célja első közelítésben kétféle lehet:

**Tudományos vagy oksági célú kísérlettervezés:** célja az objektum vagy jelenség belső törvényszerűségeinek feltárása a változók közötti ok-okozati összefüggések matematikai formában való megadása.

**Fenomenológiai/pragmatikus célú kísérlettervezés:** A független változók (itt hegesztéstechnológiai paraméterek) olyan értékeinek (értéktartományának) keresése, amelyeknél az optimális működés biztosított

Az első csoportba tartozó, kauzális célú tervezést csak indokolt esetben alkalmazzuk. Ennek oka, hogy a teljes kísérleti teret leíró ok-okozati összefüggések pontos feltárása nagyon sok mintavételi pontot igényel, másrészt nincs szükségünk ilyen részletes eredményre, az optimális technológiai paraméter-beállítások viszonylag kevés kísérlettel is meghatározhatók.

Hagyományos kísérletezés és többfaktoros kísérletek: a független változókat a kísérlettervezésben alkalmazott terminológia szerint faktoroknak nevezzük. A faktorok a következőképpen csoportosíthatók:

#### **Minőségi skála**

- Névleges, kategorikus (nominal, categorical) változó: nem szám jellegű változó, például elektróda típus. A faktor egyes szintjeihez rendelhetők ugyan számok, de ezek sorrendje nem értelmezhető. Jelen dolgozatban ilyen típusú változó lesz az elektróda típusa.
- Sorrendi (ordinal, ordered categorical) változó: eredendően ez sem szám, de az ilyen faktorok értékei között már definiálható a sorrend.

#### **Mennyiségi skála**

- Intervallum (interval) változó: Szám jellegű változó, például °C-ban mért hőmérséklet
- Arányos (proportional) változó: Eredendően ez is szám, például a K-ben mért hőmérséklet. Természetes zéruspontja van. A dolgozatban szereplő legtöbb faktor ilyen típusú lesz (például áramerősség, elektróda csúcscső).

Ha a független változó minőségi jellegű, a változók által felvett értékek (a faktor szintjei) ábrázolhatók ugyan a vízszintes tengelyen, de a függő változók között függvénykapcsolat nem értelmezhető, nincsenek köztes értékek. Az ilyen kísérletek kiértékelésére varianciaanalízist alkalmazunk. Mennyiségi jellegű változók esetén alkalmazható mind a varianciaanalízis, mind a regresszióanalízis, de célszerűbb az utóbbit választani, ugyanis ez kvantitatív modellhez vezet, következtetésre alkalmasabb. Ha ez a változó típus jelen van (mint esetünkben), regresszióanalízis és varianciaanalízis kombinációja használatos. Belátható, hogy egyrészt a kísérletek számának szempontjából a hátrányos, ha van kategorikus változónk, másrészt a változó szintjei közötti teret nem tudjuk kiértékelni, nem tudunk középponti kísérleteket definiálni. A dolgozatban a kategorikus változó jelenléte

nem kiküszöbölhető, ugyanis a feladat célja pont egy ilyen változó, az elektróda típusának különböző szempontok szerinti vizsgálata. Jelenleg a piacon több mint 10 különböző kémiai összetételű volfrámelektróda elérhető, az összes típus elemzése irreálisan nagyszámú kísérletet eredményezne, a vizsgálandó típusok kiválasztásánál nagy körültekintéssel kell eljárunk.

**A kísérlettervezés lépései:** Kísérlettervezés során a következőképpen kell eljárni: először a vizsgálandó faktorokat kell meghatározni. Ennél a lépésnél célszerű a lehető legtöbb befolyásolható faktort összegyűjteni. Eldöntendő, hogy hány szintes kísérleteket kívánunk végezni, azaz, hogy adott faktor hatását hány beállításnál kívánjuk vizsgálni. Kétszintes tervek lineáris hatások leírására alkalmasak, kvadratikus hatások modellezéséhez 3 vagy 5 szintes terv szükséges, de a kísérletek száma a szintek számával hatványozottan nő. Ez a kijelentés annyi kiegészítésre szorul, hogy kétszintes terveknél érdemes középponti kísérletet (az a beállítás, ahol minden faktor a tartományának középponti értékét veszi föl) végezni, és többször megismételni. Ez 3-5-tel növeli meg a kísérletek számát, cserébe meghatározható belőle a véletlen szórás, valamint ellenőrizhető, hogy a mérési pontokra illesztett lineáris modell által a középpontban becsült érték megegyezik-e a mért értékkel. Azt mondhatjuk tehát, hogy kellő odafigyeléssel elegendő lehet egy kétszintes terv, kvadratikus hatások jelenléte esetén is. Következő lépés a faktorok szintjeinek beállítása. Itt irányelv, hogy a beállított tartományok lefedjék azt a területet, ahol az optimumot sejtjük, de ne legyenek egymáshoz túl közel (hiszen adott esetben nem tudjuk eldönteni, hogy szignifikáns hatást, vagy véletlen szórás eredményét látjuk), és ne legyenek egymástól túl távol sem, bár ez utóbbi szerencsésebb eset, a középponti kísérletek kiküszöbölik az ebből adódó hibát. A faktor legkisebb és legnagyobb értékét rendre alacsony és magas szintnek nevezzük, jelölésük egyezményesen +1 és -1, ezek segítik a kísérleti terv táblázat átláthatóságát. A középső szint jele 0.

Ha több faktor hatását vizsgáljuk egy folyamatban, a következő hatások léphetnek fel:

- átlagos hatás
- főhatások
- páronkénti kölcsönhatások
- magasabb rendű kölcsönhatások

Ezek száma együttesen:

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = 2^n \quad (1)$$

Ha minden faktor összes beállításánál végzünk kísérletet, a mérési pontok egy kocka (3 független faktor esetén; általános esetben egy n-dimenziós hiperkocka) csúcsaiban helyezkednek el. A kísérletek száma tehát  $2^n$  (**1. egyenlet**). Ilyenkor a rendszer határozott, lineáris modell illesztésével meghatározhatók a fő- és kölcsönhatások. Ezt a fajta tervet teljes faktoros tervnek nevezzük. Hátránya, hogy a kísérletek száma a faktorok számával erősen növekszik, de nem eredményez ezzel arányos mennyiségű hasznos többlet információt. Emiatt szükség lehet tehát a futások számának csökkentésére, azaz egyes faktorbeállítások (azaz a kocka egyes csúcsainak) valamely olyan kompromisszumos módon történő elhagyására, hogy a még mindig kinyerhető legyen a megfelelő mennyiségű és megfelelő pontosságú információ. Megtehetjük ezt azért, mert a (másod- és magasabb) rendű kölcsönhatások általában elhanyagolhatók, valamint sokszor már elsőrendű

kölcsönhatások sem jelennek meg, tehát a  $2^n$  db kísérlet lefuttatása fölösleges információt szolgáltat (túlhatározottság). Csökkentve a kísérletek számát ún. részfaktoros tervet kapunk, a rendszer viszont alulhatározott lesz, egyes faktorbeállításoknál nem leszünk képesek eldönteni, hogy adott faktor hatását, vagy valamilyen magasabb rendű kölcsönhatást látunk-e a mérési eredményben. Ezt a jelenséget a faktorok keveredésének (confounding) vagy alias-hatásnak nevezzük.

Itt vezetjük be a feloldóképesség (resolution) fogalmát. A feloldóképesség utal a faktorok keveredésének jellegére:

*Res III:* A főhatások egymással nem keverednek, ellenben keverednek a páronkénti (elsőrendű) kölcsönhatásokkal, valamint a páronkénti kölcsönhatások egymással

*Res IV:* A főhatások nem keverednek egymással, sem az elsőrendű kölcsönhatásokkal, de a páronkénti kölcsönhatások egymással igen

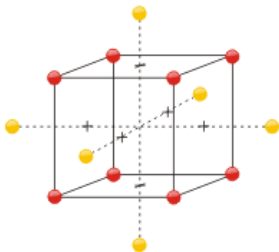
*Res V:* A főhatások nem keverednek sem egymással, sem a páronkénti kölcsönhatásokkal. Az utóbbiak sem keverednek egymással, csak magasabb rendű kölcsönhatásokkal

Ennél kisebb felbontóképességű tervek túl kevés információtartalommal rendelkeznek (a főhatások egymással is keverednek), V-nél nagyobb felbontás esetén pedig a terv „pazarló”, túl sok beállítást tartalmaz.

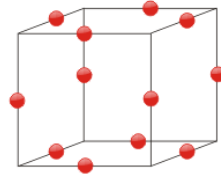
Ezeket a terveket ún. screeningre használják; a screening célja a szignifikáns főhatások kiszűrése, sok faktor esetén a III-as felbontású design-t szokás alkalmazni, ennek angol neve *Placket-Burman design*. Ha fennáll a lehetősége, hogy lényeges másodrendű kölcsönhatások is felléphetnek, használható III-nál nagyobb feloldóképességű terv.

A screening után nyert információk (a kiszűrt faktorok optimális, konstans értékre állítása után) felhasználhatók optimalizálásra, akár kvadratikusan hatások jelenléte esetén is, jellemzően 2-6 faktor esetén. Kvadratikusan hatások kimutatására ilyenkor többszintes terveket kell alkalmazni, ilyen terv lehet: ilyen a *Central-composite* (CCD; 5 szint) és *Box-Behnken design* (BB; 3 szint). 3 vagy több faktor esetén az utóbbi kettő valamelyikét érdemes alkalmazni, a kocka-terv ilyenkor aránytalanul sok, arányosan kevesebb információtartalommal rendelkező futást eredményez. A CCD és BB designok alkalmasak a válaszfelület modellezésére, az eredmények jól szemléltethetők háromdimenziós ábra formájában.

*Central-composite design* (**2. ábra**) alkalmazunk, a screening során kiderül, hogy a középpont nem véletlen szórás, hanem kvadratikusan hatás miatt nem illeszkedik a felületre. Ekkor megtarthatók a kocka csúcsai, a kísérleti terv úgynevezett csillagpontokkal egészítendő ki, a középpontban további ismétlések szükségesek. *Box-Behnken design* (**3. ábra**) akkor készítünk, ha már előre tudjuk, hogy jelen lesz kvadratikusan hatás is.



2. ábra: Central Composite Design, CCD  
forrás: [10]



3. ábra: Box-Behnken Design, BB  
forrás: [10]

### 3. Kísérlet ismertetése

Az orbitális hegesztés ezen fajtájánál az összeillesztett, fűzővarratokkal összekötött csővégeket egy zárt hegesztőfej veszi körül (amely zárt gázteret eredményez), a kötést fogaskoszorúba radiálisan rögzített volfrámelektroda és a munkadarab között égő villamos ív hozza létre. Egy előzetes kísérletsorozat (amelynek részleteit jelen írásban nem ismertetjük) alapján arra jutottunk, hogy a vizsgált paraméter-tartományban nincs különbség a választott WL 20 és WC 20 típusú elektrodák között. Ennek következtében a jelenlegi kísérletsorozatot WL 20, 2% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dal adalékolt elektrodával végeztük. Az elsődrendű kölcsönhatások keveredésének teljes kiküszöböléséhez 5-ös felbontású terv készült (Res V). Szükséges külön szót ejtenünk az áramerősségről. Ehhez a csőmérethez üzemi körülmények között a csőfal teljes áthegesztéséhez szükséges áramerősség 55 [A] (csúcsáram). A berendezés nem állandó áramerősséggel hegeszt, a folyamat során a hegesztőáram értéke egy alapérték (az ív fenntartásához szükséges alapáram) és az ömlesztést végző csúcsáram között váltakozik. A váltakozás (lűktetés) frekvenciája körülbelül 3 Hz. Ha valamilyen módon megnöveljük a hegfürdőbe bevitt hőt, a fürdő beomolhat, károsítva a hegesztőfej mechanikáját. Mivel egyes faktorok (nitrogén mennyisége a védőgázban) hatása nem, más faktoroké részben ismert, biztonsági okokból ennél alacsonyabb értéket választottunk felső határnak. Az ezek alapján generált design mátrixot az **1. táblázat** tartalmazza.

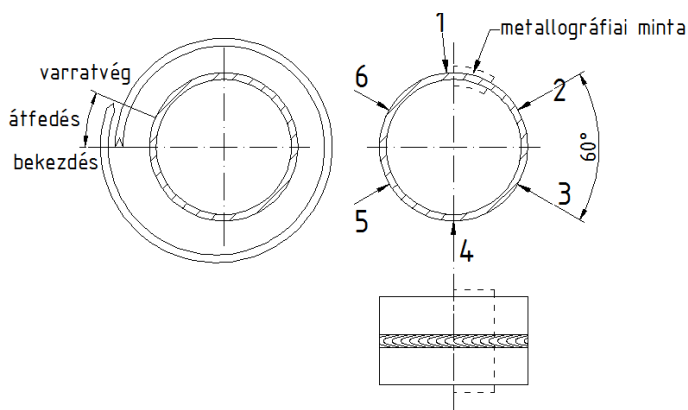
Sorszám	Kúpszög A (°)	Csúcs- tompítás B (mm)	Védőgáz C (%)	Áram- erősség D (A)	Ívhossz E (mm)	Varrat- szélesség (mm)	Beolvadási mélység (mm)	Ferrit- tartalom (%)
1	50	0	4	40	1,4	3,47	1,57	43,1
2	20	0,4	4	50	1	3,84	1,54	51,0
3	50	0,4	0	40	1,4	2,76	0,92	55,2
4	20	0	0	40	1,4	3,12	1,09	53,9
5	20	0,4	0	40	1	2,56	0,98	54,5
6	20	0	4	50	1,4	4,16	1,57	50,2
7	20	0	4	40	1	3,76	1,55	48,8
8	50	0,4	4	40	1	3,11	1,59	49,3
9	50	0	0	40	1	2,76	1,11	57,5
10	20	0,4	0	50	1,4	3,63	1,54	58,2
11	50	0,4	0	50	1	3,49	1,55	57,6
12	50	0	4	50	1	4,32	1,66	51,7
13	20	0	0	50	1	4,13	1,57	56,3
14	20	0,4	4	40	1,4	3,22	1,56	45,8
15	35	0,2	2	45	1,2	3,69	1,55	51,1
16	35	0,2	2	45	1,2	3,72	1,56	52,7
17	35	0,2	2	45	1,2	3,62	1,57	49,9
18	50	0,4	4	50	1,4	4,10	1,59	51,4
19	50	0	0	50	1,4	3,94	1,54	58,3

1. táblázat: a kísérletsorozathoz generált design mátrix (mérési eredményekkel)

Az egyik érdekes ellentmondás, amelyre megoldást kerestünk, a volfrámelektroda csúcs kialakításának varratgeometriára gyakorolt hatásával kapcsolatos. Egy gyártó (Pro-Fusion) kutatásai alapján [8] az elektródacsúcs kúpszögének növelése a varrat szélességét csökkenti, a beolvadást növeli. A Migatronic cég azonban ezzel pontosan ellentétes eredményeket tett közzé [9], azaz, hogy a hegyesebb elektróda mélyebb beolvadást eredményez. További forrásokat is elemezve arra jutottunk, hogy ezzel a kérdéssel kapcsolatban még nem született konszenzus.

### 3.1. A ferrittartalom elemzése

A varrat ferrittartalmát ennél a mérésnél roncsolásmentes módszerrel, Feritscope-pal (Fischer FMP-30) mértük. A mérés során azt tapasztaltuk, hogy a varrat adott pontján megismételt mérések eredményei között akár 10% eltérés is adódott, ezt okozhatja többek között, hogy az eredmény erősen függ a vizsgált felület minőségétől, tisztaságától [6]. Ezt a bizonytalanságot viszonylag nagyszámú méréssel küszöböltük ki. Ezt annak köszönhetően lehetett megtenni, hogy a Feritscope-os mérés könnyen és gyorsan végezhető. Az egy mintához (egy hernyóvarrathoz) tartozó ferrittartalom-értékeket az adott varraton történő számos mintavételi pont átlagaként határoztuk meg. A varrat kerülete mentén 60°-os osztásban 6 pontban, pontonként ötször mérjük a ferrittartalmat, és ezeket átlagoljuk ennek elrendezési vázlatát a **4. ábra** mutatja, amelyen látható még a metallográfiai minta kivágásának helye is.



4. ábra: A hegesztőfej útja (bal oldali vázlat), Feritscope mérési pontok, metallográfiai minta kivágásának helye (jobb oldali vázlat)

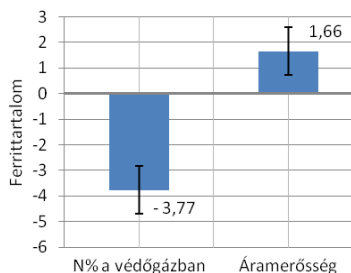
A mérés úgy történik, hogy a műszer bekapcsolása után a szondát a felülethez szorítjuk. A mért érték ferrit %-ban leolvasható a kijelzőről. A kapott eredményeket azonban fenntartással kell kezelni. A Feritscope útmutatója szerint a műszer által mért értékek 2 mm-es falvastagság alatt torzulnak (azaz a valóságnál mindig kisebb ferrittartalmat mérünk). [7] Nincs ismeretünk arra vonatkozóan, hogy ezeket az értékeket hogyan lehet átskálázni a falvastagság függvényében, ettől függetlenül a faktorok hatásának jellegére minden további nélkül következtethetünk, hiszen a falvastagságból adódó hiba előjele mindenesetben ugyanakkora lesz. A mért ferrittartalom értékeit a már közölt **1. táblázat** tartalmazza. A szokásos megoldást követjük, azaz az adatelemző programmal minden



faktor hatását figyelembe véve lefuttatunk egy elemzést. Kiszűrjük a nagyobb p-értékkel rendelkező faktorokat, majd újabb elemzést futtatunk. Ezt a folyamatot addig ismételjük, amíg csak a szignifikáns hatások maradnak. Három ilyen lépés után a **2. táblázatban** és az **5. ábra** látható eredményeket kaptuk.

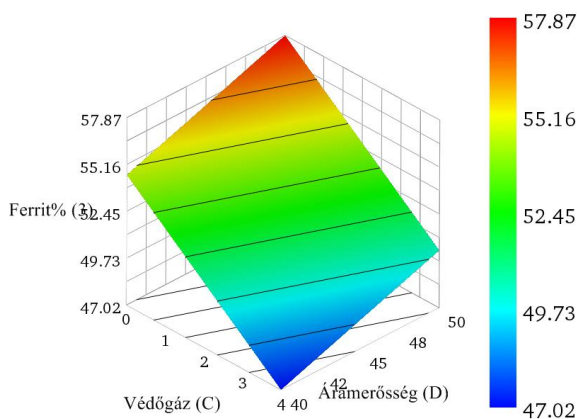
Faktor	Szignifikancia	Együttható	p-value
$B_0$		52,45	
C – Védőgáz N <sub>2</sub> -tartalom	---	-3,77	2E-07
D - Áramerősség	+++	1,66	0,0016

2. táblázat: Szignifikáns faktorok hatásának összefoglalása (ferrittartalom)



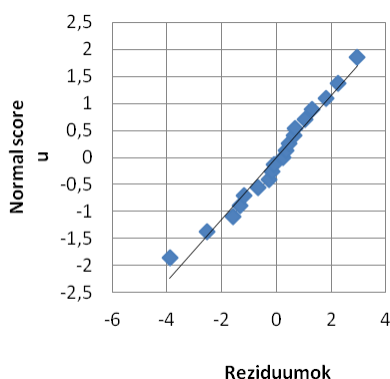
5. ábra: Szignifikáns faktorok hatásának grafikus ábrázolása (ferrittartalom)

Mit olvashatunk ki ezekből az eredményekből? Egyrészt azt, hogy a hegesztési varrat ferrittartalmát tekintve két szignifikáns faktorunk maradt (**2. táblázat**), ezek az áramerősség és a védőgáz nitrogéntartalma (a táblázatban az „együttható” oszlopban tulajdonképpen a mérési pontokra illesztett sík egyenletének együtthatói láthatók). A p-érték mindkét esetben nagyon közel áll 0-hoz (bőven a 0,05-ös határérték alatt). Ez azt jelenti, hogy a konzervatív hipotézis (vagy nullhipotézis, jelen esetben az, hogy a faktoroknak nincs hatása a függő változóra) megtartása mellett p a valószínűsége, hogy ekkora vagy ennél szélsőségesebb mérési eredményeket kapjunk. Az illesztett lineáris modell (sík) együtthatóit szemlélteti a **5. ábra**: adott faktor egységnyi változása a vizsgált tartományban ennyivel változtatja meg a vizsgált paramétert (a ferrittartalmat). Az ábrán jelöltük még a hibasávokat, a hatások erőssége csak ezekkel együtt értelmezhető. A két faktor együttes hatását (de nem kölcsönhatását) szemlélteti a **6. ábra**.

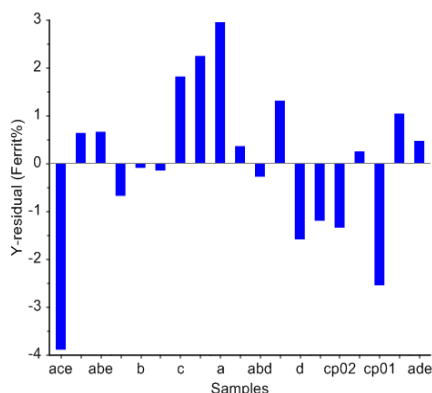


6. ábra: a védőgáz nitrogéntartalmának és az áramerősségnek a varrat ferrittartalmára gyakorolt együttes hatása (nincs kölcsönhatás)

### Reziduumok vizsgálata, normalitásvizsgálat:



7. ábra: reziduumok ábrázolása normal probability ploton (ferrittartalom)

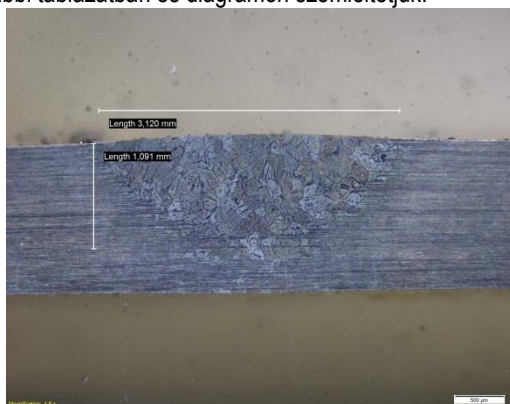


8. ábra: reziduumok ábrázolása a kísérletek elvégzésének sorrendjében

A reziduumok (az illesztett modell által becsült és a mért értékek közötti eltérés) vizsgálatánál a következőket állapítjuk meg: a normal probability ploton (7. ábra) azt vesszük észre, hogy a reziduumok jó közelítéssel egy origón átmenő egyenes mentén helyezkednek el. Egy kiugró értéket találunk, de nagy biztonsággal megállapíthatjuk ez alapján, hogy a hibák normális eloszlást követnek. A reziduumokat a kísérletek elvégzésének sorrendjében ábrázolva (8. ábra) nem vélünk felfedezni semmilyen trendet. Ez azt jelenti, hogy a kísérleteket nem befolyásolta valamely időfüggő, általunk nem irányítható külső tényező. Ezzel igazoljuk, hogy helyes az alkalmazott módszer (teljesült a normalitás feltétele), valamint, hogy a mérés megfelelően, jelentős zavarások nélkül folyt le. Láthatjuk tehát, hogy a nitrogén beötvöződve a varratba szignifikánsan növeli az ausztenit mennyiségét. Nagy biztonsággal kijelenthető, hogy az illesztett lineáris modell jól leírja a faktorok hatását ezen a tartományon. A reziduumok elemzését a többi kimeneti paraméter (varrat szélessége és beolvadási mélység) esetén nem részletezzük, de megállapítottuk, hogy ezek a változók a várakozásoknak megfelelően minden esetben normális eloszlást követnek.

### 3.2. Varratszélesség elemzése

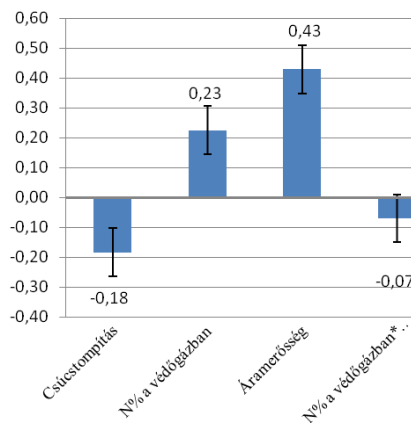
A készített varratok beolvadási mélységének és szélességének meghatározásához a csövekből keresztmetszeti csiszolatokat készítettünk, a **9. ábra** megfelelően. A varratszélesség elemzésénél ismét lépésről lépésre elhagytuk a nem szignifikáns hatásúnak bizonyuló faktorokat. 5 lépés után a következő eredményeket kaptuk. Az eredmények az alábbi táblázatban és diagramon szemléltetjük.



9. ábra: a 4. számú mintából készült keresztcsiszolati fotó

Faktor	Szignifikancia	Együttható	p-value
B <sub>0</sub>		3,55	
B - Csúcsstompítás	---	-0,18	2,3E-4
C - N <sub>2</sub> -tartalom	+++	0,23	3,0E-5
D - Áramerősség	+++	0,43	1,6E-8
CD	?	-0,07	0,081

3. táblázat: szignifikáns faktorok hatásának összefoglalása



10. ábra: Szignifikáns hatások grafikus szemléltetése

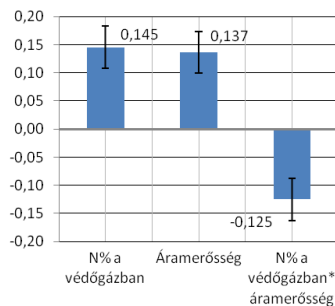
A **3. táblázatban** foglalt értékek (a mérési pontokra illeszthető hiperfelület együtthatói) megmutatják, hogy három szignifikáns faktorunk van, ezek az áramerősség (C), a nitrogén mennyisége a védőgázban (D); ezek növelik a varrat szélességét), valamint az elektróda csúcsának tompítása (B), ennek növelése pedig csökkenti a varrat szélességét. Látható még, hogy találtunk egy másodrendű kölcsönhatást is (CD-faktor): az áramerősség magas értékénél a nitrogén arányának növelésével kisebb mértékben nő a varrat szélessége. Ez utóbbi eredményt nem szabad feltétel nélkül elfogadnunk, ugyanis a p-érték erre a faktorra

0,081. A nullhipotézis (a faktornak nincs szignifikáns hatása) elfogadása mellett 8,1% az esély arra, hogy (a varratszélesség szórásából kifolyólag) ilyen, vagy ennél szélsőségesebb eredményt kapjunk. Ezt elég nagy értéknek tekintjük, főként van az 5%-os (egyébként tetszőlegesen választott, de általában jellemző) határértéknek. Ezt a kölcsönhatást ilyen okok miatt nem fogadjuk el, de el sem utasíthatjuk, pontosabb feltárása további kísérleteket igényel.

### 3.3. A beolvadási mélység elemzése

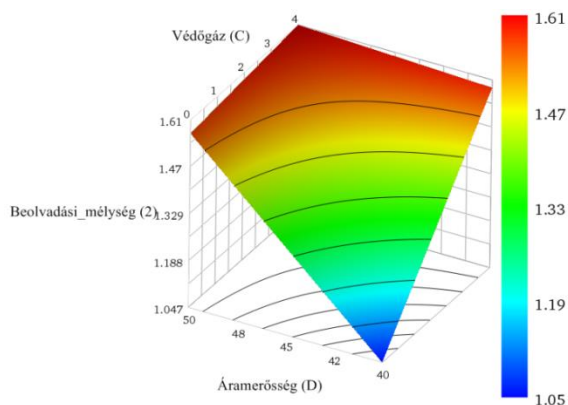
Faktor	Szignifikancia	Együttható	p-value
$B_0$		1,454	
C – N <sub>2</sub> -tartalom	+++	0,145	5,51E-7
D - Áramerősség	+++	0,137	1,19E-6
CD	---	-0,125	3,45E-6

4. táblázat: A szignifikáns faktorok hatásának bemutatása



11. ábra: A szignifikáns faktorok hatásának grafikus ábrázolása

A beolvadási mélység vizsgálatánál három szignifikáns hatású faktort találtunk, ezeket a 4. táblázatban foglaltuk össze. A varratszélességnél tapasztaltakhoz hasonlóan a védőgáz nitrogéntartalma (C faktor) és az áramerősség (D faktor) pozitív hatással van a beolvadási mélységre, a hatások erőssége közel megegyező. A p értéke minden esetben 0-hoz nagyon közeli szám, biztosak lehetünk benne, hogy a hatások szignifikánsak, ezt vizuális úton megerősíti a **11. ábra**. Látható, hogy a hibasávok jóval szűkebbek, mint az egyes hatások együtthatói. A harmadik jelentős hatás az említett két faktor kölcsönhatásából (CD faktor) adódik. Ezt szemlélteti a **12. ábra**.



12. ábra: az áramerősség és a védőgáz nitrogéntartalmának a beolvadási mélységre gyakorolt együttes hatása; elsőrendű kölcsönhatás

Ezt a diagramot úgy értelmezhetjük, hogy a nitrogénmennyiség nagy értékénél az áramerősség már nem növeli tovább a beolvadási mélységet. Az eredmény nem meglepő, a kölcsönhatás a cső falának véges vastagsága miatt jelentkezik. Vastagabb anyag esetén vélhetően másféle eredményt kapnánk, a beolvadási mélység valószínűleg a két faktor lineáris függvényeként nőne tovább (az itt tapasztalt 1,6 mm-es fizikai határon túl). Megállapítható, hogy a lineáris modell ugyan jól illeszkedik a mérési pontokra, de az Unscrambler X szoftver által számolt lack of fit ellenőrzés p-értéke a kritikus 5%-os határ alatt van. A lack of fit ellenőrzés azt hivatott eldönteni, hogy a mért értékek modelltől való eltérését (tehát a reziduumokat) elsősorban a véletlen szórás, vagy éppen az illesztett modell helytelensége okozza.

Jelenleg az utóbbi eset áll fenn, azaz a középponti minta értéke jelentősen „lelóg” a válaszfelületről. Ez a modell tehát előrejelzésre még nem teljesen alkalmas, a pontos felület meghatározásához többszintes, optimalizáló, 5 szintes kísérlettervre (Central Composite vagy Box-Behnken) lenne szükség.

#### 4. Elektródakopás vizsgálata

A kutatás célja volt még a volfrámelektroda kopásának vizsgálata, esetleges optimalizálása. Mint ismeretes, a hegesztés folyamán a volfrámelektroda és a munkadarab között villamos ív ég védőgáz atmoszférában. A jelen esetben alkalmazott technológiánál az egyenes polarítású kapcsolási módnak megfelelően a negatív pólusra kötött volfrámelektrodából (katód) elektronok lépnek ki, és a munkadarab felé áramlanak. Ezzel párhuzamosan a védőgáz argonatomjai ionizálódnak, és a pozitív töltésű argonionok a katód felé áramlanak, és beleütközve roncsolják annak felületét. Az elektróda nagy hőmérsékletre hevülve kémiai reakcióba léphet a védőgázzal (ha az tartalmaz aktív komponenseket, pl. nitrogént), vagy a környező atmoszférából bekeveredő aktív gázokkal (pl. oxigén). Az áram hőhatása egy önmagát gerjesztő folyamaton keresztül nyilvánul meg. Ismeretes jelenség a csúcs hatás, azaz a töltéshordozók koncentrációja a csúcsos felületek közelében. Ez makroszkopikus szinten úgy jelenik meg, hogy az ívkilépés az elektróda kúpos csúcsánál lép ki, az áramsűrűség ott lesz a legnagyobb. Mikroszkopikus szinten pedig a felület egyenetlenségéből adódó érdességi csúcsoknál lesz a legnagyobb az áramsűrűség, ami az elektróda anyagának lokális megolvadását eredményezi. Ennek következtében ezek a csúcsok növekedésnek indulnak, ami tovább erősíti a csúcshatást. A kopást okozó folyamatok tehát:

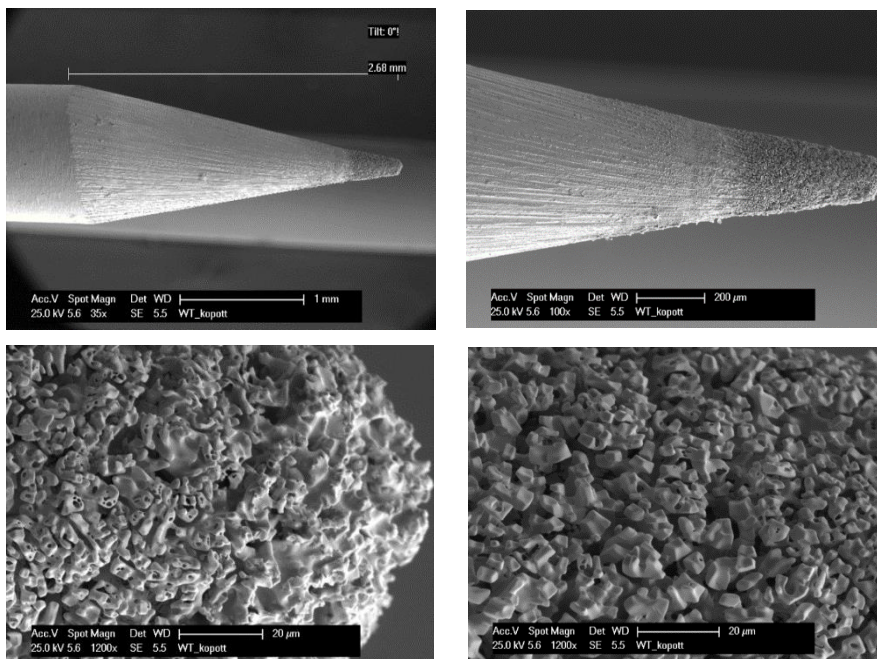
- villamos ív hőhatása
- kémiai igénybevétel
- mechanikai igénybevétel

Ezek a hatások a hegesztési folyamat előrehaladtával együttesen változtatják meg a volfrámelektroda tulajdonságait:

- ívgyújtási jellemzők romlása
- ívstabilitás hanyatlása (imbolygó ív)
- elektróda felületének elhasználódása
- elektróda tömegének csökkenése

A koptatóvizsgálatokhoz egy, a BME ATT hegesztőműhelyében található kísérleti berendezést használtunk, a kísérleti terv előállítása itt is a statisztikai kísérlettervezés

módszerével történt. A vizsgálni kívánt paraméterek megegyeztek az első kísérlet sorozatban vizsgáltakkal, valamint ezek mellett megjelent az iv újragyújtások száma és a hegesztés időtartama. Kimeneti változónak az elektródák tömegének változását, valamint az elektródacsúcs felületének elhasználódását választottuk. Előbbit analitikai mérleggel történő mérésével, utóbbit pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken történő elemzéssel értékeltük ki. Ilyen SEM-felvételeket mutat a **13. ábra**.



13. ábra: WT-20 típusú elektródáról készült SEM-felvételek 8 hegesztési ciklus után

Az elektródacsúcsok felületének hegesztés utáni vizsgálata a következő eredményeket hozta. Az elektródák tömegének csökkenése a mérőműszer (analitikai mérleg) legutolsó digitjével (0,1 mg) összehasonlítható mértékű volt, a változás tehát túl kicsi volt bármiféle következtetés levonásához. Az elektródacsúcsok felülete a várakozásoknak megfelelően szemmel láthatóan megváltozott. A faktorok hatásainak elemzéséhez egy kellő osztással (pl. legalább 10) rendelkező, minőséget kifejező, de mennyiségi skálára lenne szükségünk, azonban egy ilyen részletes skálán nem tudjuk egyértelműen elhelyezni az elektródákat. A másik lehetőség, hogy kevés osztással rendelkező skálát alkalmazunk (3 szint: referenciánál rosszabb, referenciánál jobb, referenciához hasonló minőségű). Ennél a megoldásnál, bár az elektródák egyértelműen osztályozhatók, a skála nem elég részletes bármilyen hatás nagy biztonsággal való kimutatására. Ezeknek az eredményeknek az interpretálása történhet a következőképpen: a vizsgált faktoroknak az adott tartományon belül kimutatható hatása van, de ez a hatás véletlenszerű, és/vagy az adott vizsgálati módszerrel nem számszerűsíthető. A vizsgált elektródatípusok között kopás szempontjából nem található különbség.

## 5. Összefoglalás

A kutatómunka folyamán a következő konklúzióhoz jutottunk. Korábbi kutatások eredményeivel, és várakozásainkkal ellentétben azt tapasztaltuk, hogy az elektródacsúcs kúposságának nem látható szignifikáns hatása a varrat geometriájára. Ez nem jelenti azt, hogy nincs semmilyen hatás, csak azt, hogy elhanyagolható a többi paraméter hatásához képest, illetve a kimenő változók (beolvadási mélység, varrat szélessége) belső tapasztalati szórásához képest, azaz nem kimutatható. Ez az eredmény meglepő lehet, azonban az ellentmondás feloldható, ha feltételezzük, hogy minden kísérleti eredmény csak adott tartományban értelmezhető. Tapasztaltuk még, hogy már kisebb mennyiségű (1-2%) nitrogén argon védőgázhoz keverésével nagymértékben növelhető a beolvadási mélység és varratszélesség, azaz kisebb hegesztő árammal létrehozható a megfelelő kötés. Ennek pozitív hozadéka a varrat ferrittartalmának csökkenése (amely ferrittartalom az eredmények alapján a védőgáz nitrogéntartalmának növelésével, valamint a hegesztő áram csökkenésével egyaránt kisebb lesz). A változás jellege a mérőműszer már ismertetett korlátai miatt nem került számszerűsítésre, de a kimutatott hatás egyértelmű. A volfrámelektróda kopásának folyamatát nem sikerült pontosan leírni, arra a következtetésre jutottunk, hogy ezen a területen akár a WL-20, akár a WC-20 típusú elektróda használható a tórium-oxid adalékolt típusok helyett. A kutatás során meggyőződhattünk a statisztikai kísérlettervezés hatékonyságáról és korlátairól is. Nagyon fontos feltétel a független változók (faktorok) pontos beállíthatósága, illetve a függő változók egyértelmű számszerűsíthetősége. Ez a módszer elképzelésem szerint sikerrel alkalmazható új technológia bevezetésénél, optimumkeresésnél. Különösen alkalmas lehet magas fokú automatizáltsággal rendelkező folyamatoknál, sorozatgyártás folyamán.

## 6. Irodalomjegyzék

- [1] Alvarez-Armas, I. (2007): Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. Instituto de Física Rosario – CONICET, Universidad Nacional de Rosario, Rosario
- [2] Csizmazia Ferencné (2003): *Hőkezelés* (kézirat), Széchenyi István Egyetem, Anyagismereti És Járműgyártási Tanszék, Győr
- [3] Dobránszky J. (2012): *Anyag- és technológiismeret műszaki menedzsereknek*. DyTh Műszaki Tanácsadó Bt, Budapest
- [4] Kemény S., Deák A. (2002): *Kísérletek Tervezése és Értékelése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [5] Komócsin M. (2008): A duplex szerkezetű korrózióálló acélok és hegesztésük. Miskolci Egyetem, Miskolc  
<http://www.att.bme.hu/~femtech/letoltes/duplex-Komocsin-2008.pdf>
- [6] Niagaj J., Mazur L. (2012): Ferrite Content Measurement In S32101 Lean Duplex Stainless Steel And Its Welded Joints. *Archives Of Metallurgy And Materials*, **58**, 3.
- [7] FMP-30 Feritscope kezelési útmutató
- [8] Pro-Fusion: <http://www.pro-fusiononline.com>
- [9] Migatronic: Wolframkompendie:  
[www.migatronic.hu/Media/wolframkompendie\\_uk.pdf](http://www.migatronic.hu/Media/wolframkompendie_uk.pdf) (letöltve: 2013 október)
- [10] Unscrambler Help