

**MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHANIKAI TECHNOLÓGIAI TANSZÉK**

VÉKONYLEMEZEK ELLENÁLLÁS- PONTKÖTÉSEINEK MINŐSÉG- CENTRIKUS OPTIMALIZÁLÁSA

PhD ÉRTEKEZÉS

**GÉPÉSZMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK DOKTORI PROGRAM,
GYÁRTÁSI FOLYAMATOK ALPROGRAM,
MECHANIKAI TECHNOLÓGIÁK RÉSZPROGRAM**

KÉSZÍTETTE:

SZABÓ PÉTER
OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK, EWE

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

DR. BALOGH ANDRÁS Ph.D.

MISKOLC, 2002

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés	4
I. fejezet: Elméleti és kísérleti alapok, célkitűzés.....	6
1. Az ellenállás-ponthegeztés elméleti alapjai.....	6
2. Az ellenállás-ponthegeztés technológiája	12
2. 1. Szakirodalmi áttekintés	12
2. 2. Az ellenállás-ponthegeztett kötés vizsgálata.....	14
3. Az ellenállás-ponthegeztés számítógépes modellezésének áttekintése.....	19
4. A szakirodalmi eredmények összefoglalása, a minőség-centrikus optimalizáláshoz kapcsolható problémák felvetése.....	35
5. Célkitűzés.....	37
II. fejezet: Kísérlettervezés, optimalizálás	38
6. A kísérletek körülményei.....	38
7. Kísérlettervezési módszerek.....	44
7. 1. Box-Wilson féle módszer.....	45
7. 2. Taguchi féle módszer	51
7. 3. Harrington féle módszer.....	54
8. A kísérleti eredmények feldolgozása.....	56
8. 1. Egyszempontú optimalizálás	56
8. 1. 1. A kísérleti eredmények feldolgozása Box-Wilson féle módszerrel.....	56
8. 1. 2. A kísérleti eredmények feldolgozása Taguchi féle módszerrel.....	59
8. 2. Többszempontú optimalizálás	61

8. 2. 1. Optimalizálás összetett célfüggvénnyel	61
8. 2. 2. A kísérleti eredmények feldolgozása Harrington féle módszerrel.....	66
9. A kísérlettervezés eredményeinek összefoglalása.....	70
III. fejezet: Minőségcentrikus optimalizálás	72
10. Az ellenállás-ponthegeztett kötés minősítése a nyíró-szakító vizsgálat során bekövetkező törés jellege alapján.....	72
10. 1. Célkitűzés	72
10. 2. Elméleti és kísérleti háttér	72
10. 3. Az ellenállás-ponthegeztett kötés minősítése.....	73
10. 4. Eredmények és következtetések	82
10. 5. A minőségcentrikus optimalizálás eredményeinek összefoglalása.....	85
IV. fejezet: Szilárdságtani peremérték-feladat, numerikus megoldás	87
11. Az ellenállás-ponthegeztés kezdeti szakaszának mechanikai modellezése	87
11. 1. A mechanikai modell felépítése.....	87
11. 2. A modellezés eredményei.....	93
11. 3. Összefoglalás	99
V. fejezet: Eredmények összefoglalása, fejlesztési lehetőségek, ipari hasznosítások.....	100
12. Összefoglalás, további fejlesztési lehetőségek, ipari hasznosítások.....	100
VI. fejezet: Új tudományos eredmények	102
13. Tézisek ismertetése	102
Köszönetnyilvánítás	104
Felhasznált irodalom.....	105
A tézisekhez kapcsolódó publikációk	111
Melléklet.....	113

Bevezetés

Az ipari termelésben, egy termék előállításakor alapvető célként ma már nemcsak az anyagvizsgálati eljárásokkal kimutatható hibáktól mentes hegesztett kötés létrehozása a feladat, hanem a legkedvezőbb kötésminőség, a legnagyobb teherbírás, a leghosszabb élettartam biztosítása az adott gazdasági, élet- és környezetvédelmi feltételek figyelembevételével. Az adott optimalizálási feladat megoldására matematikai statisztikai módszereket, kísérlettervezési stratégiákat és optimalizációs technikákat vehetünk igénybe. Ahhoz, hogy egy kísérletet a leghatékonyabban hajtsunk végre, a kísérlet tervezéséhez és az eredmények elemzéséhez tudományos megközelítést kell alkalmazni. A statisztikai kísérlettervezés azt jelenti, hogy a megfelelő adatokat kísérletekkel kell gyűjteni, majd az adatokat statisztikai módszerekkel kell elemezni. A kísérlettervezés filozófiája szerint nem kell mindenáron a változékonyságok okainak kiküszöbölésére törekedni, mert nem biztos, hogy megéri, inkább együtt kell velük élni és a kimenő termék minőségi jellemzőjét befolyásoló faktorok olyan szintjeit kell beállítani, amelyek körüli ingadozások nem adódnak át a minőségi jellemzőre. A kísérlettervezés módszereit ílymódon használhatjuk optimalizálásra. Segítségükkel arra kaphatjuk meg a választ, hogy az egyes faktorokat mely szintekre kell beállítani ahhoz, hogy a minőségi jellemző a legkisebb ingadozás mellett minél kisebb, minél nagyobb, vagy a névleges értéken legyen.

A kísérlettervezés és a technológia-optimalizálás összetett folyamat. Legfontosabb lépéseként a minőségi jellemző, azaz a célfüggvény helyes megválasztása szükséges. Az optimális hegesztés-technológiai munkarend kidolgozásában komoly problémákat okozhat a helytelen célfüggvény-választás. Ilyen esetekben korrekciós műveleteket kell végrehajtani, hogy a célfüggvény-görbe optimumát megtaláljuk. Az ellenállás-ponthegeztés mérnöki szempontból rendkívül összetett folyamat, ezért olyan célfüggvényt kell felállítani, amely

megbízható és összehasonlítható eredményeket szolgáltat a kötés minősége szempontjából (minőség-centrikus optimalizálás), továbbá figyelembe tudja venni a kötés kialakulása során fellépő jelenségeket.

Disszertációm első fejezetében az ellenállás-ponthegesztés elméleti alapjainak ismertetése után a vékonylemezek ellenállás-ponthegesztett kötésére vonatkozó minősítési lehetőségeket mutatom be. Ezután a vékony lágyacéllemezek ellenállás-ponthegesztésének technológia-optimalizálására vonatkozó kísérleti eredményeket ismertetem. Végül az ellenállás-ponthegesztés számítógépes modellezésének főbb irányvonalait és eredményeit, valamint a kutatómunka célkitűzéseit mutatom be.

A második fejezetben az optimális technológiai munkarend kidolgozásához nélkülözhetetlen kísérlettervezési módszerek közül a Box-Wilson, a Taguchi és a Harrington féle kísérlettervezési módszer elméleti alapjait, illetve az alkalmazott kísérlettervezési módszerek eredményeit ismertetem. E fejezetben elsősorban arra keresem a választ, hogy a gyakorlatban alkalmazott célfüggvényekkel kapott eredmények statisztikai és gyakorlati szempontból mennyire megalapozottak.

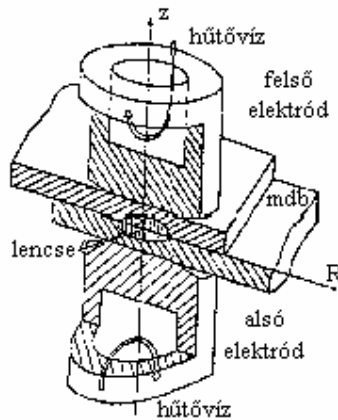
A harmadik fejezetben a korábban felmerülő problémák kiküszöbölésére olyan célfüggvény kidolgozását tűztem ki célul, amely az ellenállás-ponthegesztés során lezajló folyamatok bonyolult és összetett kapcsolata ellenére megbízható eredményt szolgáltat a kötés tönkremenetele szempontjából. E fejezetben további célul tűztem ki a vékonylemezek ellenállás-ponthegesztett átlapolt egy-pont kötésének minősítésére szolgáló feltételek felállítását a kidolgozott célfüggvény alapján.

Végző célom (IV. fejezet) a kidolgozott célfüggvény alkotóinak részletesebb vizsgálata volt mind kísérleti, mind elméleti úton. A kísérleti úton metallográfiai technikákat alkalmaztam (mikro- és makroszkópi vizsgálatok), míg elméleti úton a végeselemes modellezés alapján végzett számítások eredményeit mutatom be.

Végül az ötödik, illetve a hatodik fejezetben felsorolom a további fejlesztési lehetőségeket, és a kapott eredményekből megfogalmazható téziseket foglalom össze.

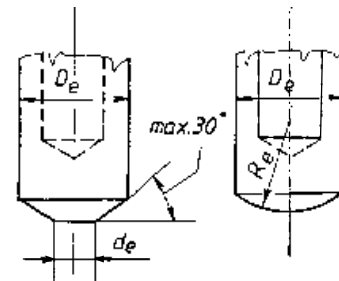
1. Az ellenállás-ponthegesztés elméleti alapjai

Az ellenállás-ponthegesztést 1877-ben Elihu Thomson találta fel és alkalmazása gyorsan el is terjedt a vékonylemezes konstrukcióknál. Annak ellenére, hogy a technológia több mint 100 éves, és a témával foglalkozó szakkönyvek száma is tekintélyes [1-1 – 1-10], az eljárás fizikai jelenségeit még nem sikerült teljes mértékben értelmezni. Az ellenállás-ponthegesztés sematikus ábráját az 1-1. ábra mutatja.



1-1. ábra

Az ellenállás-ponthegesztés sematikus ábrája



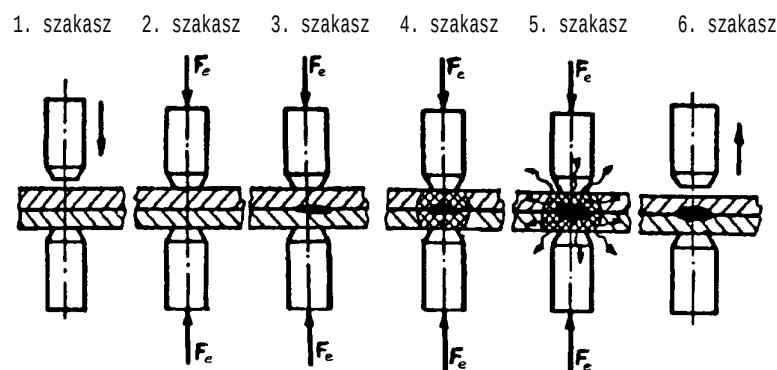
1-2. ábra

Sík- és gömb homloklületű elektródok

Az ellenállás-ponthegesztés fizikai alapja, hogy minden áramot vezető anyagban úgynevezett Joule-hő fejlődik, ha áram folyik át rajta. Ellenállás-ponthegesztés esetén a fejlődő hőenergia mennyiségét (Q_e) a hegesztő áramerősség (I_h), az eredő ellenállás (R) és az áramátfolyás ideje (t_h) határozza meg a következő képlet alapján:

$$Q_e = \int_0^{t_h} I_h^2 \cdot R \cdot dt \quad (1.1)$$

Ellenállás-ponthegesztéskor a hegesztőáramkör az elektródok révén - melyek homlokfelülete alapvetően sík- és gömb kialakítású lehet (1-2. ábra) - az összehegesztendő anyagokon keresztül záródik. A hegesztés ideje alatt az elektródok és a lemezek érintkező felületei, a munkadarabok fajlagos ellenállása és a két lemez felfekvését eredményező érintkezési terület az áramáthaladás szempontjából ellenállásokat jelentenek. Az elektród és a lemez közötti érintkezési ellenállások nagysága - fémtiszta, sima felületű lemezek és elektródcsúcsok esetén - nem számottevő. A pontvarrat létrehozásában a saját- és az átmeneti ellenállások nagyságának, illetve ezek összegének változása döntő fontosságú [1-11]. A hőfejlődésnek, illetve a pontvarrat létrehozásának egyes fázisait a 1-3. ábra mutatja.



1-3. ábra
A pontvarrat létrejöttének fázisai

Az átlapoltan illesztett lemezek a hegesztési folyamat megkezdése előtt általában az alsó elektródra támaszkodnak (1. szakasz). A hegesztési folyamat megindításakor a felső elektród elmozdul. Az összezárást követően rövid idő múlva létrejön a beállított elektródnnyomás, amit az elektród-lemez érintkezési felületre az elektród-összeszorító erő fejt ki (2. szakasz). Ezután bizonyos idő elteltével a vezérlés bekapcsolja a hegesztőáramot. Az áram bekapcsolásának pillanatában a hegesztőáramkör legnagyobb ellenállása a két lemez érintkezési felületénél van. A hegesztési folyamat kezdetén itt a legnagyobb a hőfejlődés. A felmelegedés és az állandóan ható elektród-összeszorító erő együttes hatására az anyagok érintkezési felülete nő, emiatt az átmeneti ellenállás erősen csökken, majd gyakorlatilag megszűnik. A hőmérséklet növekedésével növekvő anyagellenállás következtében viszont az áramkör legnagyobb ellenállása, illetve a legnagyobb hőfejlődés továbbra is a lemezek érintkezésének környezetében lesz. Bizonyos idő után elkezdődik az érintkező felületek megolvadása (3. szakasz) és lencse alakú hegömladék képződik (4. szakasz). Az áram kikapcsolása után a hőmérséklet a konvektív hőelvezetés és sugárzás révén csökken, az ömladék megdermedésével létrejön a pontvarrat (5. szakasz). Fontos, hogy az áram kikapcsolása után még bizonyos ideig

biztosítani kell a nyomás fennmaradását, sőt egyes esetekben a nyomást még növelni is szükséges, mert ezzel a pontvarrat tömörsége és mechanikai tulajdonságai javíthatók, továbbá a zsugorodási feszültségek okozta repedések kiküszöbölhetők. Miután a dermedés befejeződött, a felső elektród elmozdulásával megszűnik az elektródok szorító hatása, a hegesztési folyamat befejeződik (6. szakasz).

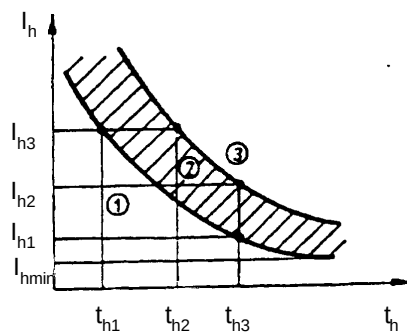
A ponthegeesztett kötés, illetve a pontvarrat minőségét döntően a hegesztés során fejlődő Joule-hő határozza meg. A Joule-hő általánosan elfogadott összefüggése (1.1) szerint a hegesztő áramerősségtől, az áramáthaladás idejétől (hegesztési főidő) és a hegesztési hely ellenállásától függ. A hegesztési hely ellenállását a lemezek minőségén, vastagságán és felületi állapotán kívül az elektród-összeszorító erő, valamint az elektród végének geometriájától és méreteitől függő érintkezési felület nagysága határozza meg. A Joule-hőre vonatkozó összefüggésből egyértelműen levonható az a következtetés, hogy azonos hőmennyiség a legkülönbözőbb hegesztő áramerősség és hegesztési főidő értékekkel hozható létre. Az 1-4. ábra vonalkázott sávja a hegesztési főidő és a hegesztő áramerősség lehetséges kapcsolatát mutatja. Az áramerősségnek van egy - a hegesztendő anyagok vastagságától és minőségétől függő - minimális értéke (I_{hmin}), amelynél kisebb hegesztő áramerősségnél még végtelen nagy hegesztési főidő esetén sem hozható létre pontvarrat. Ekkor ugyanis a nem kellően gyors hőfejlődés miatt a jelentősebb hőelvezetés és a kisebb mértékű sugárzás révén egyensúlyi állapot jön létre. Ennek következtében a hegesztési hely egy olyan állandósult hőmérsékletet ér el, amely kisebb, mint a kötés kialakításhoz szükséges hőmérséklet. Az 1-4. ábra az összetartozó hegesztő áramerősség és a hegesztési főidő kijelölésével három mezőt határoz meg. Az 1 jelű mezővel jellemzett összetartozó hegesztő áramerősség és hegesztési főidő értékekkel nem hozható létre megfelelő kötés. Ebben az esetben a fejlődő hőmennyiség nem elegendő a megfelelő hegesztett kapcsolatot biztosító pontvarrat létrehozásához. A 3 jelű mező összetartozó értékeinél túlzottan nagy a fejlődő hőmennyiség. A fröcskölés és az elektród benyomódása nagy. Megfelelő pontvarrat a 2 jelű mező által kijelölt összetartozó hegesztő áramerősségekkel és hegesztési főidőkkel lehet készíteni. Az 1-4. ábrából megállapítható, hogy a hegesztésnek a hőfejlődésre hatást gyakorló egyéb körülményeinek változatlansága mellett, rövid hegesztési főidő esetén nagy hegesztő áramerősséget, hosszú hegesztési főidőnél kis hegesztő áramerősséget kell alkalmazni. Az első esetet kemény, a másodikat lágy munkarendnek nevezzük.

Az elmondottakból azonban nem szabad azt a következtetést levonni, hogy a hegesztő áramerősség és a hegesztési főidő szélső értékei tetszés szerint változtathatók.

Az elektród-elektrod között folyó áram Q_e hőhatása elsődlegesen a hegesztési lencse megolvasztására (Q_{e1}), másodlagosan - mint hővezetési veszteség - a környezet (levegő és a környező fém) (Q_{e2}) és az elektródok (Q_{e3}) felmelegítésére használandó el:

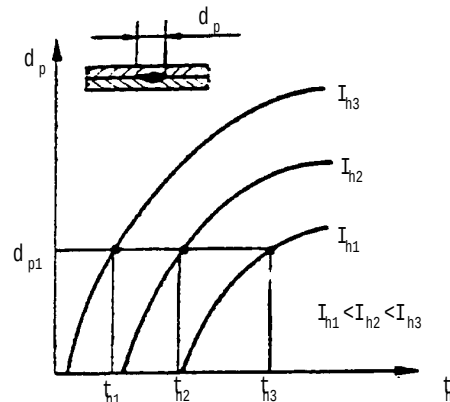
$$Q_e = Q_{e1} + Q_{e2} + Q_{e3}. \quad (1.2)$$

A fejlődő Q_e energiamennyiséget a hegesztés munkarendje és az összehegesztendő fémek hőfizikai tulajdonságai határozzák meg. A rövidebb hegesztési főidőjű munkarendek kisebb energiafelhasználással járnak.



1-4. ábra [1-5]

A hegesztési főidő és a hegesztő áramerősség kapcsolata



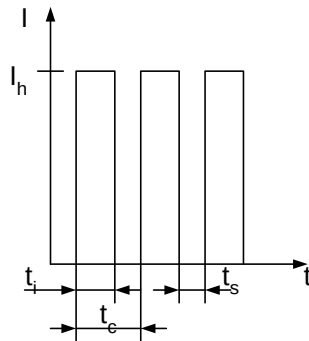
1-5. ábra [1-5]

A hegesztési főidő és a hegesztő áramerősség hatása a pontvarrat átmérőjére

A hegesztő áramerősség és a hegesztési főidő együttes hatását a ponthegesztett kötés egyik legfontosabb jellemzőjére, a pontvarrat átmérőjére az 1-5. ábra mutatja. Azonos pontvarrat átmérő (d_{p1}) előállítható rövid hegesztési főidővel (t_{h1}) és nagy hegesztő áramerősséggel (I_{h3}), illetve hosszú hegesztési főidővel (t_{h3}) és kis hegesztő áramerősséggel (I_{h1}).

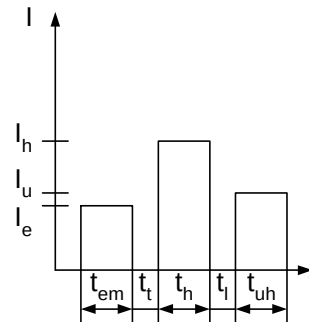
Az elektród-összeszorító erő jelentős hatással van a két lemez közötti érintkezési ellenállásra. Minél kisebb ez az erő, annál nagyobb az ellenállás. Az áramsükséglet nő az erő értékének növelésével. Igen fontos az áram- és a nyomásprogram egymáshoz viszonyított időbeni helyzete. A hegesztőáram csak akkor kapcsolható be, amikor az elektródok már kellő módon összenyomták a lemezeket és a megfelelő villamos kontaktus már létrejött közöttük. A fő hegesztési paraméterek – a hegesztő áramerősség, a hegesztési főidő, az elektród-összeszorítóerő és az elektródatmére, illetve a lekerekítési sugár - mellett egyéb tényezők is lényegesek a pontvarrat minősége vonatkozásában. Ezek a hegesztő áramerősség és az elektród-összeszorítóerő időbeli változása, valamint ezek egymáshoz viszonyított helyzete. Leggyakoribb az az eset, amikor hegesztés közben a hegesztő áramerősség nagysága nem

változik. Nagyobb anyagvastagság, merev munkadarabok, edződésre hajlamos anyagok hegesztésénél célszerű az áramimpulzusokkal való hegesztést választani (1-6. ábra). Hegesztést követő gyors lehűlés során keletkezett martenzites szerkezet utóhőkezeléssel megszüntethető. Merev munkadaraboknál a jobb érintkezés, illetve a hegesztés utáni lehűlési sebesség és ezzel a beedződés mértékének csökkentése előmelegítési program beiktatásával érhető el. Nagy vastagságú, vagy edződésre hajlamos anyagoknál legcélravezetőbb az előmelegítési és az utóhőkezelési program együttes alkalmazása (1-7. ábra).



1-6. ábra

Az impulzus hegesztés áramprogramja



1-7. ábra

Előmelegítési és utó-hőkezelési program együttes alkalmazása

Az ellenállás-ponthegesztés technológiájának néhány érdekessége [1-11]:

- Ha felületi szennyeződés van, akkor a megfelelő elektromos- és hőkapcsolat eléréséhez nagy elektród-összeszorító erő szükséges. A nagy elektród-összeszorító erő nagyobb felületi nyomófeszültséget eredményez.
- Amíg a réz-elektrod és a munkadarab közötti ellenállás kicsi, a megfelelő Joule-hő fejlődéséhez nagy hegesztő áramerősség szükséges.
- A hevítés hőtágulást és ebből adódó feszültséget okoz a nagy hőmérsékleti gradiens irányában.
- A hegfürdő létrejöttével szilárd-folyékony fázisátalakulás történik, amely jelentős anyagszerkezeti változást okoz.
- A hegesztési főidő alatt az elektród-összeszorító erőt fenn kell tartani, hogy ellensúlyozzuk a nagy hőtágulást. Mivel a munkadarab belsejében folyékony fém van, fröcskölés következhet be.

- Az elektród-összeszorító erő segít az elektromos- és a hőkapcsolat fenntartásában (amíg a hegesztett kötés létrejön), valamint meghatározza (az áramátfolyás megszűnése után) a metallurgiai minőséget, mivel amikor a kötés hűl, az anyag összehúzódik.

A felsorolásból kiderül, hogy az ellenállás-ponthegesztés elektromos, termikus, mechanikai és metallurgiai jelenségek összetett folyamata, ráadásul e hatások nem önmagukban, hanem csatoltan, azaz kölcsönösen egymásra hatva jelentkeznek.

A felsorolt jelenségek számottevő mértékben befolyásolják a szerkezetek használat közbeni viselkedését és teherbírását, ezért ismeretük a tervező és kivitelező mérnökök számára nélkülözhetetlen.

2. Az ellenállás-ponthegeztés technológiája

2. 1. Szakirodalmi áttekintés

A mérnök munkája során legtöbbször olyan problémákat old meg, ahol mennyiségek maximumát vagy minimumát keresi. Ez a szélsőérték valamilyen szempontból mindig a legkedvezőbb megoldást, az optimumot takarja. Ha az optimum helyét a hagyományos módon keresnénk, vagyis mindig egy kiválasztott paraméter értékét változtatnánk, miközben az összes többi körülményt érintetlenül hagynánk, a kívánt optimumot legfeljebb véletlenül találunk meg. Az iparban a kísérletezés nem új keletű. Múltbeli adatok statisztikai elemzésekor gyakran arra a következtetésre jutunk, hogy a kísérleti adatok alapján hozott döntések nem mindig voltak statisztikailag megalapozottak. Ez viszont nagyban csökkentette a kísérletezés értékét, mert több döntést a józan megfontolás révén és nem elméleti számítások alapján hoztak meg. Annak, hogy ez nem jelentett nagyobb problémát az egyik magyarázata az, hogy mind a termékek, mind a folyamatok gyakran túlméretezettek voltak. Emellett a kísérlettel összefüggő és a hibás termelés beindításából adódó veszély, valamint a beépített hibaszázalék a gyakorlatban elfogadott volt. Korlátozott volt a veszteséges folyamatok javításának ösztönzése is.

Annak ellenére, hogy a technológiák statisztikai alapon történő optimalizálása csak a 70-es évek végén, 80-as évek elején terjedt el, Johnson [2-1] már 1960-ban megfogalmazta, hogy „az optimumtól való eltérés az ellenállás-ponthegeztett kötéseknel csökkenő szilárdságot,

nagyobb inkonzisztenciát okoz, és több belső hibát eredményez. Gazdaságosabb egy tökéletes kötést készíteni, mint egy gyengébb minőségűt”.

Azért, hogy a konstruktőrök elkerüljék a szerkezetek törését, általában több hegesztett kötést terveztek, mint ami szükséges lett volna akkor, ha a kötések megbízhatóbbak lettek volna. Annak érdekében, hogy biztosítsák az eljárás egyenletességét, az elektród működő felületeit gyakran kellett szabályozni, aminek az eredménye a hatékonyság csökkenése lett. A minőségbiztosítási előírások, amelyeket az utóbbi időben használtak, azt tűzték ki célul, hogy az áramot legkésőbb akkor kell kikapcsolni, amikor a fröcskölés már megjelenne.

A heglencse növekedésének mérése a legtöbb nagyfelhasználónál (pl. General Motors) közvetett módon történik. Általában ezek a minősítő eljárások a heglencse méretét úgy vizsgálják, mint egy vagy több hegesztési változó függvényét. A független változók széles skáláját alkalmazzák, például a Ford egyedül a hegesztő áramerősséget használja, míg a Fisher Body a hegesztő áramerősséget és a hegesztési fődőt is figyeli.

A 60-as években megfigyelték, hogy azok a kötések, amelyek elkészítésekor fröcskölés tapasztalható, pórusosak. A későbbi fejlesztések az új anyagok és a növekvő követelmények miatt a minimális benyomódást és deformációt (görbülés, ferdülés) célozták meg.

A matematikai-statisztikai megalapozottság nélküli optimalizálás esetére Johnson [2-1] kutatásaiban rámutatott, hogy a nyíró-szakítóerő egyenesen arányos az érintkező felületen mérhető pontátmérővel. Ez hozzávetőlegesen számítható az érintkező felület és a lágyított állapotú anyagszilárdság alapján. A fő tervezési faktorokat e tapasztalatok alapján a következőkben fogalmazta meg: a lemezek átfedése, ponttávolság, pontszilárdság és a hozzáférhetőség.

A hőbevitel szempontjából az ellenállás-ponthegesztés technológiájának alapvető változói: hegesztő áramerősség, hegesztési fődő, elektród-összeszorító erő.

A nyomás befolyásolja az érintkező felületek ellenállását. Kisebb nyomás nagyobb ellenállást okoz. Ezért az áramigény úgy nő, ahogy a nyomás nő. A nyomásnak eléggé nagynek kell lennie ahhoz, hogy legyőzze a munkadarab merevségét, és hogy a pontvarratot képlékenyen alakítsa az áramátfolyás megszűnte után. Az alkalmazható maximális áramerősség a fémfröccsenés alatti ponthoz tartozó érték. Ez az érték egyenes arányban változik a nyomással. Fontos, hogy a mozgatható elektród nagyon gyors elmozdulásra legyen képes, lehetővé téve a közel állandó szorítóerő fenntartását.

A bemutatott hatások alapján a már korábban felsorolt három fő paramétert illetően a három legjobb beállítás-kombinációt a 2-1. táblázat foglalja össze. A technológia szempontjából a felsoroltak közül a vastagon szedett eredményezi a legkedvezőbb tulajdonságokat.

Sorszám	Hegesztő áramerősség	Hegesztési főidő	Elektród-összeszorító erő	Következmény (a jelenség változása az 1-től a 3 sorszám felé)		
				A nyíró-szakítóerő csökken.	A porozitás mértéke nő.	A nyíró-szakítóerő maximuma és minimuma között a szórás nő.
1	Nagy	Rövid	Nagy			
2	Közepes	Közepes	Közepes			
3	Kicsi	Hosszú	Kicsi			

2-1. táblázat: Paraméterkombinációk összehasonlítása a kötés minősége szempontjából

A hegesztés előtt tisztító műveletre van szükség, hogy eltávolítsuk, vagy csökkentsek a különféle felületi szennyezők (pl. por, zsír, illetve oxid (reve)) vastagságát. A jó felületi minőség csökkenti az elektród szennyeződését és növeli élettartamát. Az oxidréteg ellenállása különböző, így a hegesztés minőségére nézve jelentős szórást okoz. Rozsdás anyagot nem célszerű hegeszteni, az összefüggő oxidréteget viszont esetenként el lehet viselni. Az olaj és egyéb szerves szennyezők rontják a kötés minőségét és növelik a szilárdsági jellemzők szórását.

2. 2. Az ellenállás-ponthegesztett kötés vizsgálata

Az ellenállás-ponthegesztés egyike a vékonylemezeknél alkalmazott legtisztább és legtermelékenyebb hegesztő eljárásoknak annak ellenére, hogy a létrehozott kötést roncsolásmentes vizsgálattal nehezen lehet megbízhatóan vizsgálni. Nincs egyetlen kiemelt megbízható, gazdaságos eljárás a létrehozott kötés vizsgálatára. Ennek ellenére az ellenállás-ponthegesztett kötések minősítésére az ipari gyakorlat sokféle vizsgálati eljárást alkalmaz, melyek közül mindig a hegesztett kötés rendeltetésétől és előírt minőségétől függően választják ki a megfelelő ellenőrzési módszert, vagy módszereket. A legismertebb vizsgálatok a következők.

Nyíró-szakító vizsgálat

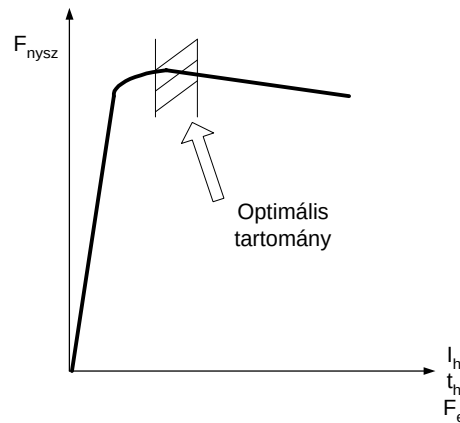
A vizsgálatok közül a legszélesebb körben alkalmazott, amelyet a legtöbb országban szabványosítottak (Pl.: MSZ 6991/1). A vizsgálati eljárások többségétől eltérően ez a vizsgálat méretezésre alkalmas, számszerű eredményt szolgáltat. Ez a vizsgálat azért is figyelmet érdemel, mert legjobban közelíti a szerkezetekben elhelyezkedő pontkötésekre ható igénybevételt.

A terhelés hatására a próbatest pontvarratai a lemezek érintkezési síkjában elnyíródnak, vagy az alapanyagból kiszakadnak (kifordulnak). A vizsgálat eredménye a kötés tönkremenetele során fellépő legnagyobb nyíró-szakítóerő (F_{nysz}).

A nyíró-szakító vizsgálat esetén a próbatest nagyon egyszerű (ld. később 6-1. ábra), de a vizsgálat elvégzésekor excentricitás lép fel, így a sima nyírás nem létezik (ld. később 10-1. ábra). A szakadás mechanizmusa a következőképpen írható le. Az átlapolt lemezek egytengelyűségtől való eltérése a kötés melletti részen hajlítást okoz. Ez a hajlítás erősen nő a szakítóerővel és a húzás vonalához képest egyre nagyobb szögű ferde síkba megy át. A töréshez vezető repedés így mindig a kerületen keletkezik. Az erő növekedésével a vizsgálat jellege erősen változik: a tiszta nyírásból átmegy egy komplex nyíró-szakító rendszerbe, amíg a törés bekövetkezik.

A hegesztett kötés fáradási szilárdsága sokkal kisebb, a nyíró-szakító szilárdságnak csak mintegy 10-20 %-ára tehető. Ha lyukat fúrnak a hegesztett kötésbe, annak szilárdsága nem csökken [2-1].

Az 1. melléklet kis karbon-tartalmú (ún. lágyacél) lemezek pontvarratainak F_{nys} nyíró-szakítóerejére ad tájékoztató értékeket. E táblázat az RWMA (Resistance Welder Manufacturers Association) által kidolgozott és az egész világon elfogadott öt minőségi osztály szerint adja meg az egy pontvarrattal átvihető nyíró-szakítóerő nagyságát [2-2]. A nyíró-szakítóerő jellegét az ellenállás-ponthegesztés elsőrendű változóinak függvényében a 2-1. ábra mutatja.



2-1. ábra

A nyíró-szakítóerő változása az elsőrendű változók függvényében

Szakítóvizsgálat

A pontvarratot a lemezek illeszkedési síkjára merőleges húzóerő terheli. Megfelelőnek akkor tekinthető a kötés, ha a pontvarrat kiszakad az egyik lemezből. Ha a pontvarrat az

érintkezési síkon keresztül szakad el, akkor a pontvarrat minősége nem kielégítő. A vizsgálati elrendezésből adódóan igen vékony lemezeknél ez a módszer nem alkalmazható.

Csavaró-vizsgálat

A vizsgálat céljára kereszt elrendezésű próbatestet készítenek, amelyet addig terhel a csavarónyomaték, amíg a pontvarrat elnyíródik. A pontvarrat akkor tekinthető jónak, ha nem az érintkezési síkban nyíródik el, hanem az egyik lemezből kicsavarodik.

A kiszakító- (tépő)- és az ékvizsgálat

A vizsgálat során a két összehegesztett lemezt a pontvarrat szétszakadásáig, illetve kiszakadásáig feszítjük szét. Ez utóbbi eset bekövetkezésekor tekinthető a pontvarrat megfelelőnek. Kiszakító vizsgálatkor a lemezeket lecsavaró (letépő) szerszám feszíti szét, az ékvizsgálatkor éket vernek a két lemez közé. Mindkét vizsgálat technológiai próbának tekinthető, mérőszáma nincs.

Makroszkópi- és mikroszkópi vizsgálat

A vizsgálat céljára a lemezekre merőleges és a pontvarrat középpontján átmenő vizsgálati felületű csiszolatot készítünk. A felületet csiszolással, polírozással és maratással hozzuk vizsgálatra alkalmas állapotba.

A *makroszkópi vizsgálat* (20x-os nagyítással) célja a durva kötéshibák (repedés, porozitás, szivódási üreg), illetve a varratjellemzők (pontvarrat méretei, az elektród benyomódása) meghatározása. A lencseátmérő nagyságát az ellenállás-ponthegesztés alapvető változóinak függvényében az 1-5. ábra mutatja.

A *mikroszkópi vizsgálat* lehetővé teszi a pontvarrat és a hőhatásövezet szövetszerkezetének vizsgálatát. Ez a vizsgálat különösen nagy karbon-tartalmú és ötvözt acélokra ad értékes tájékoztatást a kötés minőségéről.

További vizsgálatok

A csiszolaton a *keménységvizsgálat* is elvégezhető. A kötés maximális keménysége nem lehet nagyobb, mint az adott alapanyagra elfogadott határérték.

A *röntgen- és ultrahangvizsgálatok* elsősorban a térfogati (nem repedés jellegű, illetve síkszerű) varrathibák kimutatására alkalmasak, és elsősorban laboratóriumi körülmények között kerülnek alkalmazásra [2-1].

A röntgen csak a belső hibákat mutatja ki (pórusok, repedések), de nem teszi láthatóvá a pont méretét és az áthegesztődés mértékét, az ultrahang a pont minőségére ad utalást, de a reprodukálhatósága nagyon gyenge.

A számos roncsolásos vizsgálat közül a *lefejtő-teszt* (peel-test) a legegyszerűbb, legkönnyebben végrehajtható és leghatékonyabb vizsgálat.

Ez a vizsgálat bár egyszerű, két jellemző hátránya van:

1. A lencse átmérője inkább mérhető, mint a vastagsága. A ponthegeesztés alatt a hőáramlás legnagyobb része a lemez felületére merőleges. Így a lencse fejlődése a vastagság irányú növekedés sebességével szabályozott, ami beolvadás a lefejtő-teszttel nem mérhető.
2. A tényleges lencseátmérő gyakran nem mérhető pontosan. A lefejtő-teszt alatt a kötés ritkán törik pontosan a lencse végében, a törés általában vagy a hőhatásövezetben, vagy a lencse szélénél kezdődik.

A különböző típusú anyagok ponthegeesztésével kapcsolatos további forrásmunkákat az alábbiakban sorolom fel:

- Nikkel-ötvözet: [2-3];
- Bevonatos acél: [2-4], [2-5], [2-6];
- Titán-ötvözet: [2-7];
- Alumínium-ötvözet:
 - hegeszthetőségi vizsgálatok: [2-8], [2-9], [2-10], [2-11], [2-12], [2-13],
 - a kötés szilárdsági vizsgálata: [2-14], [2-15],
 - számítógépi modellezés: [2-16], [2-17].
- Korrozíóálló acél: [2-18], [2-19].

Az 50-es évektől kezdődően mélyreható tanulmányok születtek az elektródok hegesztés közbeni viselkedésével, élettartamával kapcsolatosan: [2-20], [2-21], [2-22], [2-23].

Kísérletek tervezése

Kísérlettervezéssel foglalkozó cikk csak elenyésző számban jelent meg a szakirodalomban. Ennek oka a számítógépes modellezések adta újszerű lehetőségekkel magyarázható, mely témával részletesebben a 3. alfejezetben foglalkozom.

Hogy a kísérlettervezésnek mégis van létjogosultsága, arra példa Shrivastava, Vasudevan, Pankhawala és Raju (1998) [2-24] cikke. Értelmezésük szerint a kísérlettervezést olyan eljárásnak definiálhatjuk, amely a legkisebb befektetéssel (munka, idő, energia, pénz) a legnagyobb információt szolgáltatja. Számos kísérlettervezési módszert használnak manapság.

A két fő irányvonal a klasszikus és a Taguchi által kidolgozott [2-24]. A klasszikus kísérlettervezési módszer ott ajánlott, ahol magas kutatási költségek vannak, illetve az időszükséglet az iterációk miatt nagy. Ilyen például az űrrepülőgép kísérletek, gyógyászati kutatások. A Taguchi-módszer viszont ott ajánlott, ahol sok az ellenőrizhetetlen paraméter, vagy ahol gyorsan eredményt akarunk elérni.

Az indiai kutatók célfüggvénye a nyíró-szakítószilárdság volt, a faktorok a hegesztési főidő, az utószorítás ideje, és a hőbevitel. Azt tapasztalták, hogy vékonylemezek átlapolt egy-pontkötése esetén az optimális paraméterkombináció a hosszú hegesztési főidő, rövid utószorítási idő és a mérsékelt hőbevitel. Elméletileg a ponthegeesztett kötésnek csak tiszta nyírást kellene elviselni, azonban a gyakorlatban olyan egyéb igénybevételek is megjelennek, mint a hajlítás és csavarás. A ponthegeesztés tervezésének szabálya a kötés kis fáradási ellenállása miatt elvileg nem enged meg normálirányú erőhatást.

Az eredmény az volt, hogy alacsony karbon-tartalmú acél ponthegeesztése esetén, ha az átolvadás mértéke eléri a lemez vastagságának 70%-át, akkor az általában maximális szilárdságot biztosít.

3. Az ellenállásponthegesztés számítógépes modellezésének áttekintése

Jelen fejezet elsősorban azon publikációkban ismertetett eredményeket foglalja össze, melyek az ellenállásponthegesztett lencse kialakulásával foglalkoznak. Részletesen ismertetem azokat a modelleket, melyek eredményeit a IV. fejezetben összehasonlítás céljából felhasználók.

Az elmúlt fél évszázadban számos szerző jellemezte a ponthegeztés alatt végbemenő hőciklust. A legkorábbi munkák (pl: Heuschkel - 1947) a helyi keménységértékekből következtettek a hűlési sebességre. Az 50-es évek közepétől már analitikus technikák zárt formájának alkalmazásával írták le a vizsgált hőfolyamatot (pl: Adasinskii - 1955 [3-1]; Roberts, Roberts, Wells - 1958 [3-2]; Bowen és Williamson – 1958 [3-3]; Greenwood és Williamson - 1958 [3-4]; Archer - 1960 [3-5]). E technikák alkalmazása jelentős mértékben leegyszerűsíti az ellenállásponthegesztést, így ezeket a modelleket csak az eljárás általános leírásánál használták, mivel a heglencse növekedésének értelmezésekor különböző korlátok merültek fel, melyek Gould [3-6] szerint a következők:

- az acél hegesztésekor végbemenő metallurgiai változásokat nagy részben elhanyagolták,
- a modell tesztelésére nagyon kevés számú kísérletet végeztek el,
- nem megfelelő következetességgel alkalmazták a hőmérsékletre vonatkozó mérési eredményeket.

Az analitikus technikák alkalmazásával elért főbb eredmények az alábbiak voltak.

- Bowen és Williamson [3-3] vizsgálatai azt mutatták, hogy a hőmérséklet a két szilárd test érintkezési felületei között - a felületi érdesség miatt - állandó nyomás alatt, helyi lágyulást okoz a fémekben, amely növeli az érintkezési területet.

- Greenwood és Williamson [3-4] kutatásai alapján az áramsűrűség maximuma az érintkezés szélénél jelentkezett. A hőfejlődés itt a legnagyobb, így a hőmérséklet az olvadáspontot a kerületen hamarabb eléri, mint a középpontban.
- Archer [3-5] munkájában meghatározta az olvadáspont eléréséhez szükséges hegesztési főidőt. Az olvadáspont időfüggése határozza meg a kötés dinamikus viselkedését. Egydimenziós modelljében a hegesztendő anyagot izotrópnak és homogénnek tekintette, a fajhőt, a hővezetési tényezőt és az elektromos ellenállást végig állandó értéken tartotta. A modell eredménye alapján a hőmérsékletet egy időben állandósult és egy dinamikus részre bontotta. Az időben állandósult hőmérséklet a feszültség, azaz az elektródok között kialakuló potenciálkülönbség alapján számítható. A dinamikus hőmérsékletet pedig a hely és idő függvényeként adta meg.

A 60-as évek elejétől az ellenállásponthegesztés modellezésére numerikus technikákat alkalmaztak: Greenwood (1961) [3-7]; Bentley, Greenwood, Knowlson, Baker (1963) [3-8]; Rice, Funk (1967) [3-9]; Houchens, Page, Yang (1977) [3-10]; Kaiser, Dunn, Eagar (1982) [3-11], Nied (1984) [3-12].

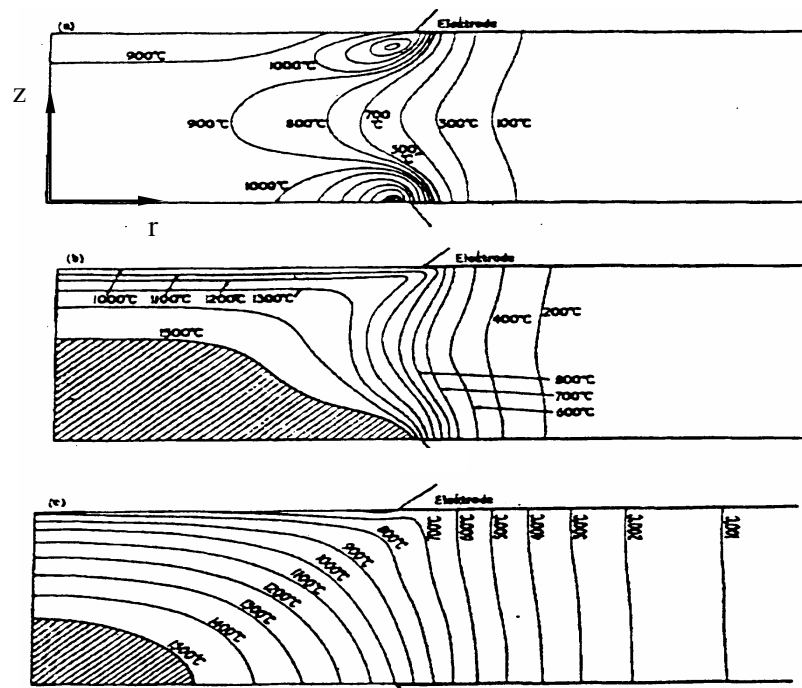
Greenwood - 1961 [3-7] modelljében a peremfeltételek a következők voltak:

- a hő konduktív úton távozik a lemez távolabbi részébe, illetve az elektródba. Az elektródba történő hővezetés arányos az elektród érintkezési felületével,
- a lemez felületéről is távozik hő sugárzással, illetve konvektív úton. A modellezés során azonban e jelenség elhanyagolható,
- a lemezek közötti felületen nincs érintkezési ellenállás. Az árameloszlás a kötés geometriájából számítható,
- a hővezetési tényező, a fajhő és a fajlagos ellenállás (anyagtulajdonságok) értékeit a modellezés során állandó értéken tartották.

E peremfeltételek alapján az alábbi megállapításokat tették:

- a maximális hőmérsékletű hely (csak a Joule-hő miatt) az elektród-munkadarab érintkezési felületének szélénél található,
- hosszabb hegesztési főidő alkalmazása esetén a maximális hőmérsékletű hely áthelyeződik a szimmetria-tengely környékére,
- a maximális hőmérsékletű helyeken a hűlési sebesség olyan nagy, hogy majdnem minden acélfajtában martenzites szövetszerkezet alakul ki,
- a szerzők által kapott hőmérséklet-eloszlást különböző hegesztési főidők esetére a 3-1/a, 3-1/b és 3-1/c ábrák mutatják be.

- 3-1/a: Rövid hegesztési fődő esetén a hőmérséklet-maximumok az érintkezési felületek széleinél vannak és a hő konduktív úton terjed a középvonal felé. A szimmetria-tengely mentén a hőmérséklet nagyon kis mértékben változik, közel állandó, csak az elektród felületéhez közel csökken kb. 10%-ot.
- 3-1/b: A hosszabb hegesztési idő esetét mutatja. A nagy áram következtében nagyon nagy a megolvadt zóna mérete. A hőtágulást is figyelembe véve itt kell bekövetkeznie a fröcskölésnek.
- 3-1/c: A megfelelő hegesztési idő alkalmazásával készült. A megömlött zóna és a legmelegebb izoterma ovális alakú. Az elektród közelében az izoterma egyenes és párhuzamos az elektród felületével. E jelenségekből arra következtethetünk, hogy a hőátzármaztatásban az elektródba történő konduktív hővezetés a meghatározó. Fontos, hogy a szimmetria-tengelytől távolodva a hőmérséklet jelentősen csökken, kétszeres sugártávolságban már csak 100°C.



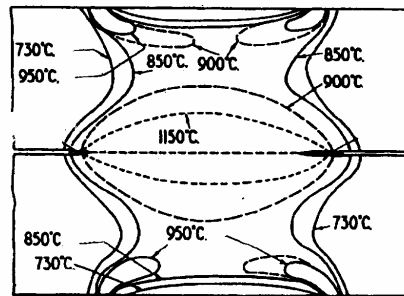
3-1. ábra

A hőmérsékleteloszlás különböző hegesztési fődők esetén

Bentley, Knowlson, Baker és Greenwood - 1963 [3-8] a ponthegeztés során kialakuló hőmérsékleteloszlás meghatározására lágyacél alapanyagon metallográfiai módszereket alkalmaztak. A vizsgálatot főleg szimulált ponthegeztett próbatesten hajtották végre lemez-lemez érintkezési felület nélkül, és az eredményeket összehasonlították Greenwood korábbi

eredményeivel. A következtetés az volt, hogy a kötés kialakulás korai szakaszának jellemzésekor az érintkezési ellenállást a lemezek között, illetve az elektród és a lemez között nem lehet elhanyagolni. A későbbi szakaszban az érintkezési ellenállás már kevésbé jelentős, és az elméleti és a gyakorlati hőmérséklet minták között nagy a hasonlóság.

Az elmélet és a gyakorlat összehasonlításánál azt tapasztalták, hogy a fröcskölést az érintkezés szélénél mérhető nagy áramsűrűség eredményezi (3-2. ábra), ami nagyfokú hőtermelést eredményez. Mivel a fémfröccsenés közel van az alacsony hőmérsékletű anyagrészekhez, a hő konduktív úton távozik. A középső anyagrész viszont távol van az alacsony hőmérsékletű helytől, ezért a hőt sokkal lassabban veszíti el és a kötés közepe egyre melegebb lesz.



3-2. ábra

A hőmérsékleteloszlás a hegesztett kötésben

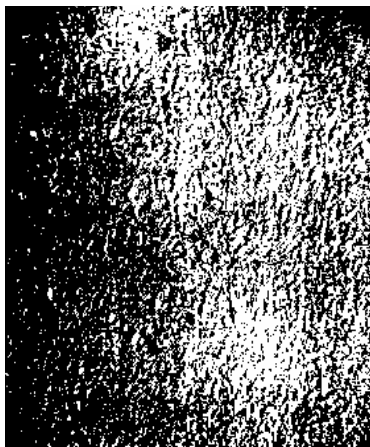
Rice és Funk – 1967 [3-9] modelljében a következő peremfeltételeket alkalmazták:

- a hő- és elektromos tulajdonságok változói mind hőmérsékletfüggőek,
- a munkadarabokban a fajlagos ellenállásokon hő fejlődik,
- hő fejlődik továbbá a hegesztendő munkadarabok érintkezési felületei közötti ellenálláson, amely a hőmérséklet növekedésével csökken,
- hő fejlődik végül az elektródokon is,
- a hő a munkadarabról egyrészt az elektród felé, másrészt a munkadarab távolabbi részeibe áramlik.

A modell alapján azt a megállapítást tették, hogy az érintkezési ellenállás időfüggését meg kell határozni, mivel a hegesztés során az összes paraméter folyamatosan változik. Az érintkezési ellenállás-idő görbének a hegesztés folyamán nincs túlzottan nagy jelentősége, mivel a hegesztés kezdetén az érintkezési felületek olyan hőmérsékletre hevülnek, aminek hatására az érintkezési ellenállás közelítően a végleges értékére csökken le. Szerzők szerint elfogadható közelítés, hogy a hegesztési folyamatra vetítve az érintkezési ellenállás a modellezéskor konstansnak vehető, ami így is jelentősen befolyásolja a hegesztés folyamatát.

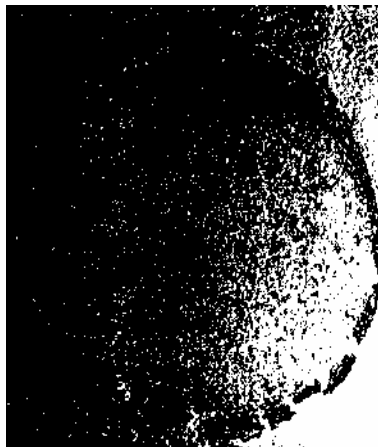
Satoh, Katayama és Abe - 1969 [3-13] az érintkezési ellenállás hatásának, az oxidréteg összetörésének, illetve az elektród összeszorító erőnek, valamint az elektródalak hatásának meghatározására egy hőmérséklet-érzékeny réteget vittek fel a próbatest felületére és nagysebességű kamerával regisztrálták a hegesztési folyamatot. Az eredmény az volt, hogy a megolvadás nem a középvonal mentén következett be, hanem egy kicsit eltolva a kerületi pontok felé. A hegesztett kötés tórusz alakban formálódik. A megömlött zóna gyorsan kitölti a tórusz közepét, azaz a hegesztett kötés kialakulása axiális és radiális irányban nem azonos sebességű.

Kaiser, Dunn és Eagar – 1981 [3-11] különböző hegesztési paraméterek esetén, az elektromos ellenállás lencsekialakulásra gyakorolt hatását vizsgálták. A 3-3. ábra a helyi érintkezési pontok megolvadását mutatja. Nagy hegesztő áramerősség és rövid hegesztési idő esetén a kezdeti megolvadás az érintkezési felületen az elektród széle körül megy végbe (3-4. ábra). Kis hegesztő áramerősség és hosszú hegesztési idő esetén viszont a heglencse az érintkezési felület középpontjából kifelé radiálisan növekszik (ld. 3-5. ábra). E jelenség magyarázata a radiális hőmérséklet-gradiens, melynek a hosszú hegesztési idő az alapja. Ebben az esetben mindkét lemezben a teljes érintkezési felület megolvad.



3-3. ábra

A helyi érintkezési pontok
megolvadása ($I_h=10,5$ kA;
 $t_h=0,06$ s; $F_e=2,89$ kN)
N=20x



3-4. ábra

Kerületi megolvadás
($I_h=24,5$ kA; $t_h=0,02$ s;
 $F_e=2,89$ kN)



3-5. ábra

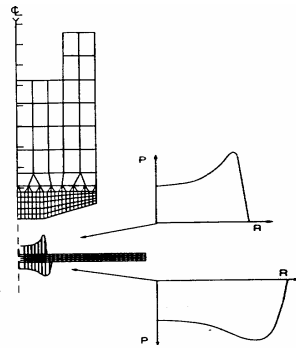
Radiális irányú
lencsenövekedés ($I_h=7,25$
kA; $t_h=0,48$ s; $F_e=2,89$ kN)

Nied – 1984 [3-12] az ellenállásponthegesztés szimulálására egy tengelyszimmetrikus végelelemes modellt fejlesztett ki. A munkadarab és az elektród modellezésére izoparametrikus szilárd négyszög elemeket alkalmazott. A felületi elemeknél figyelembe vette az elektromos ellenállás, a hőátadás és a helyi deformációk hatását mind az elektród-

munkadarab, mind a munkadarabok között. A felületi elemeknek három feltételt kellett kielégíteni:

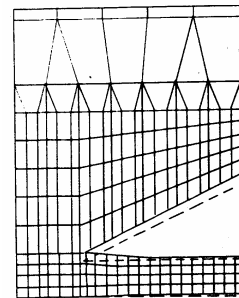
- a mechanikai deformáció modellezésére a nyomófeszültség értelmezett, de a húzó nem,
- a relatív csúszás az elektród és a munkadarab között a különböző hőtágulások miatt megengedett,
- az elektrotermikus felületi feltételhez az elektromos felületi ellenállást és a hővezetést kellett szimulálni.

A fő problémát a munkadarabok közötti érintkezési felület meghatározása jelentette. Az érintkezési felület ugyanis ismeretlen és többek között nyomásfüggő. A lényeg, hogy az elektród és a munkadarab közötti felületen a nyomásmaximum az érintkezési körfelület kerülete mentén van, egy kicsit beljebb, mint a kerületi pontok (3-6. ábra). A munkadarabok között a helyzet teljesen hasonló, a középpontban kisebb a nyomás, mint a peremen. Amikor a benyomódás kicsi, az érintkezési felület az elektród és a munkadarab között az elektród-átmérő által meghatározott kör területével egyenlő.



3-6. ábra

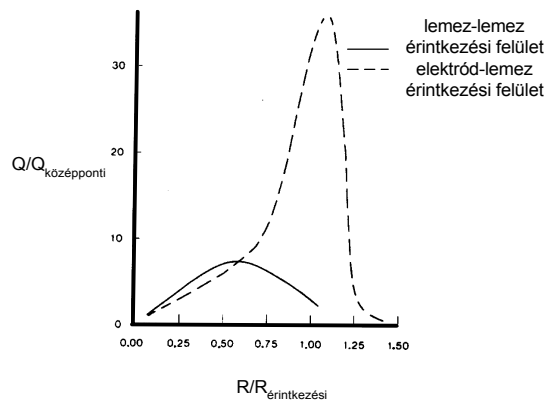
A nyomáseloszlás az érintkezési körfelület kerülete mentén



3-7. ábra

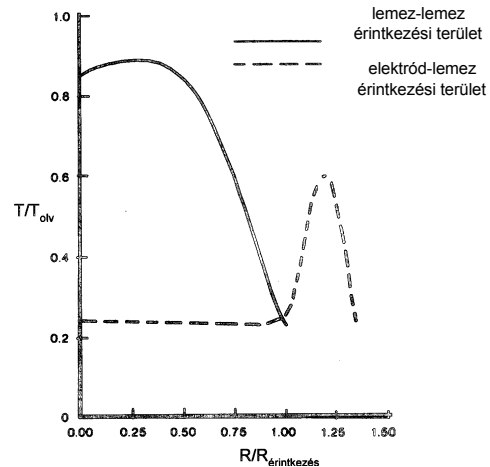
Az összegződött hőtágulás

Megállapította továbbá, hogy a hőmérséklet okozta hőtágulás legnagyobb része az elektród alatti térfogatban megy végbe. Az összegződött hőtágulást a 3-7. ábra mutatja. A hőfejlődéssel és a kialakuló hőmérséklettel kapcsolatos további eredményeket a 3-8. és a 3-9. ábrák mutatják:



3-8. ábra

A hőfejlődés az érintkezési felületeken



3-9. ábra

A hőmérséklet az érintkezési felületeken

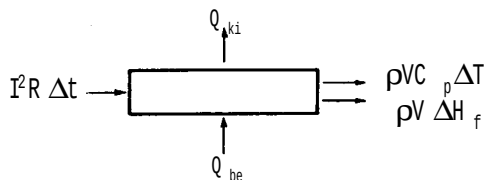
Gould – 1987 [3-6] analitikus technikaként egydimenziós hőmodellt, kísérletileg metallográfiai technikákat alkalmazott. Alapvetően a heglencse fejlődését 3 változó alapján vizsgálta: a hegesztő áramerősség, a hegesztési főidő, illetve a hegesztendő anyagvastagság szemszögéből. A heglencse fejlődését empirikus úton optikai mikroszkópos technikával vizsgálta. A modell a következő jelenségeket és az azok által okozott hatásokat veszi figyelembe:

- elektród geometria (csonkakúp),
- megolvadás látens hője,
- az acél hőmérsékletfüggő hő- és elektromos tulajdonságai,
- a folyadék fázisban végbemenő hővezetés,
- érintkezési ellenállás a megfelelő érintkező felületek között,
- Joule-hő.

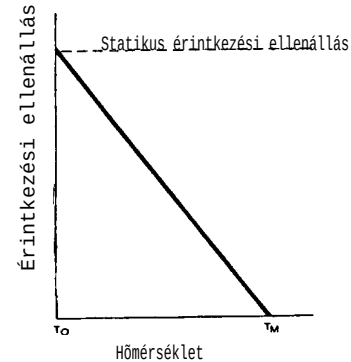
A modell egyezett a mikroszerkezeti megfigyeléssel, és ezt felhasználta az egyes faktorok kötés-kialakulásra gyakorolt hatásának feltárásánál. Így hangsúlyozni kell, hogy a modell fő újdonsága a hegfürdő tényleges hőszállításának kezelése és az érintkezési ellenállás változásának figyelembevétele. A modell fő hibája viszont, hogy a környező lemezrészbe távozó radiális hővesztést nem veszi figyelembe. A főbb peremfeltételek a következők voltak:

- $t = 0$ időpontban a hőmérséklet a hűtővíz hőmérsékletével egyenlő és egyenletes eloszlású,

- az elektród hőmérsékletéről feltételezzük, hogy végig állandó marad és a hűtővíz hőmérsékletével azonos,
- feltételezzük, hogy a két lemez határfelületén keresztüli hőáramlás a szimmetria miatt nem megy végbe.



3-10. ábra
A hőegyensúly



3-11. ábra
Az érintkezési ellenállás hőmérséklet függvénye (közelítés)

Az energia kétféle módon kerül be az elembe: a belső (joule) hő révén és konduktív úton. Ez egyensúlyban van a belső hőfelhasználással (a hőmérséklet növekedése, ill. megolvadás) és a konduktív úton történő hővesztéssel. A 3-10. ábra ezt a hőegyensúlyt szemlélteti. A modell figyelembe veszi az olvadás hatását mind a megolvadáshoz szükséges hő, mind a folyadékban szállított hő kapcsán. A megolvadás látens hője esetében feltételezték, hogy az acél úgy viselkedik, mint a tiszta vas, pontosan 1536°C-on olvad, illetve szilárdul meg. A folyadék-fázisban történő hőszállítást egy tényleges hőszállítási együtthatóval vették figyelembe. Kohn (1984) kísérletei alapján ez az együttható kb. a kétszerese a szobahőmérsékleten mért hővezetésnek. A modell az érintkezési ellenállás változásának hatását is figyelembe veszi. Az elektród-lemez érintkezési ellenállásáról feltették, hogy a hegesztés során változatlan, és Savage (1978) alapján $20 \mu\Omega$ -nak választották. Az érintkezési ellenállást Dickinson (1980) munkája nyomán, ami lineáris változást feltételezett, a hőmérséklet függvényeként kezelték (3-11. ábra). Az ábrán a végpontok a következőket jelölik:

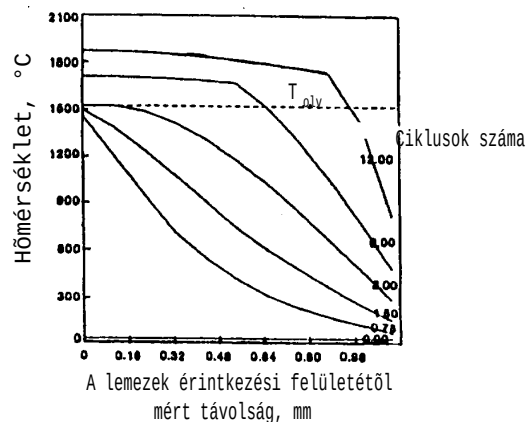
- a statikus érintkezési ellenállás szobahőmérsékleten (értéke kísérletileg könnyen mérhető),
- ha a hőmérséklet eléri az olvadáspontot, az érintkezési felületek eltűnnek, így az olvadáspont fölött az áramkör eredő ellenállása az elektród-lemez érintkezési felület ellenállásának és az olvadék, illetve szilárd test fajlagos ellenállásának függvénye.

A 3-12. ábra a hőmérséklet és az érintkezési felülettől z irányban (szimmetria-tengely) mért távolság kapcsolatát mutatja különböző hegesztési idők esetén. A legfontosabb metallurgiai jellemvonások e görbék esetében a varratban végbemenő hevítés és hűlés sebessége. A hevítés sebessége nagyon nagy, de a határfelülettől mért távolság növekedésével jelentősen csökken. A hűlési sebesség a varratban valamivel kevésbé érzékeny a pozícióra és a csúcsértéke az austenit-ferrit átalakulási zónában mintegy 5000 °C/s-ra tehető.

A heglencse kialakulását a hegesztési változók függvényeként vizsgálták ebben a tartományban (hegesztő áramerősség, hegesztési főidő, anyagvastagság). A lencsenövekedés az áramerősség és az idő függvényeként minőségileg teljesen hasonló módon megy végbe, és a következőképpen lehet leírni:

- lappangási ciklus,
- gyors lencsenövekedés időszaka,
- az az időtartam, amikor a lencsenövekedés sebessége jelentősen lecsökken,
- fröcskölés.

E két paraméter lencse-kialakulásra gyakorolt hatásának eltérő jellemvonásai a 4 ciklus intervallumának relatív méretével írható le. Például, a heglencse növekedése az áramerősség függvényeként hosszú lappangási ciklussal, a gyors és a csökkenő ütemű heglencse-növekedés rövid időintervallumával és fröcsköléssel jellemezhető. Hasonlóan, az idő függvényeként rövid lappangási ciklussal, rövid „gyors növekedési” zónával és hosszú „csökkenő ütemű növekedés” zónával jellemezhető. Gyakran, ez a „csökkenő ütemű” növekedés zóna egy pontként értelmezhető, ahol a heglencse állandósult állapotban van az alkalmazott áramerősség alatt, azaz a heglencse mérete függetlenné válik az időtől. Következésképpen a fröcskölés nagyon ritkán következik be.



3-12. ábra
Lemezvastagság irányú hőmérsékletnövekedés

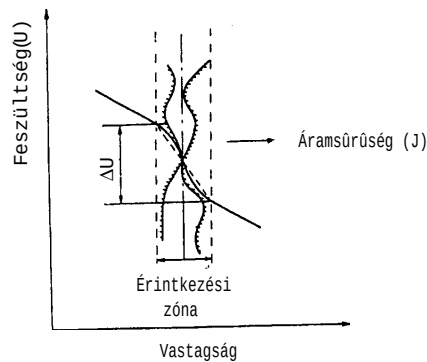
H. S. Cho és Y. J. Cho - 1989 [3-14] tanulmánya arra mutatott rá, hogy az ellenállásponthegesztés modellezésének legjelentősebb problémái - az elektromos áramátfolyás helye, a hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságok, a fázisátalakulások problémája - miatt az analitikus előrejelzések kísérletileg nincsenek teljes mértékben alátámasztva. Munkájuk során a kötés létrejöttének ideje alatti hőmérséklet- és feszültség-eloszlás előrejelzésére egy véges differencia modellt fejlesztettek ki. A modell a következő főbb szempontokat vette figyelembe:

- a belső hőfejlődést az elektromos áram „ösvényén” az alapanyagban, illetve az elektród-munkadarab érintkezési felületén keresztül,
- a hőelektromos kölcsönhatásokat az elektród-munkadarab érintkezési felületén,
- a fázisátalakulások hatását, illetve a kötés méretének növekedését.

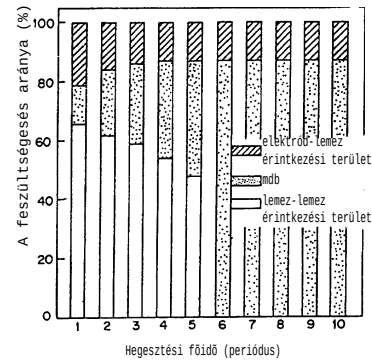
Olyan szimulációkat készítettek, amelyek segítségével a hőmérséklet és a feszültségeloszlás időfüggése a hegesztett szerkezetben különböző hőbevitelűk esetén, illetve a kötés geometriájának változása a hegesztési fődő hatására előrejelezhető. A feladat komplexitására tekintettel az egyszerűség kedvéért két modellt állítottak fel. Az egyiket az időben változó hőmérsékletmező, míg a másikat a feszültségeloszlás meghatározására használták. Az ellenállásponthegesztés folyamatának jellegzetességeit a következőképpen foglalták össze:

- az anyagtulajdonságok adottak, a hegesztendő lemezeket két elektród szorítja össze,
- a villamos terhelés a hegesztő berendezés impedanciája által önvezérlő,
- a hegesztett lemezekben feszültségmező alakul ki, ami meghatározza az elektromos áramátfolyást,
- a hőmérséklet az elektródban és a hegesztett lemezekben az áramátfolyás okozta hőfejlődés, illetve a hűtővíz okozta hőelvezetés alapján oszlik el,
- a hegesztett lemezek közötti felület a hőmérséklet növekedésével összeolvad, és az eredő ellenállás a hőmérsékleteloszlással és a kötés geometriájával megváltozik.

A hegesztett lemezek felülete mindig egy kissé érdes. Így az érintkezés mikrokontakt pontokon keresztül jön létre, miközben ezeken a mikrokontakt pontokon az elektromos áramátfolyás konvergenciája alagúteffektust eredményez. Az érintkezési ellenállás a felületen feszültségéshez vezet, ami a munkadarab megolvasztására hőt termel. Az elektromos ellenállás a hegesztő eljárás során nagymértékben változik és függ az anyag mechanikai tulajdonságaitól, a szennyezők mennyiségétől és milyenségétől, az alkalmazott hőmérséklet- és nyomáseloszlástól, amelyek erősen befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat. A hegesztés megkezdésekor a feszültségés legnagyobb része az elektród és a munkadarab között, illetve a két lemez között (3-13. ábra) jelenik meg (21% és 66%).

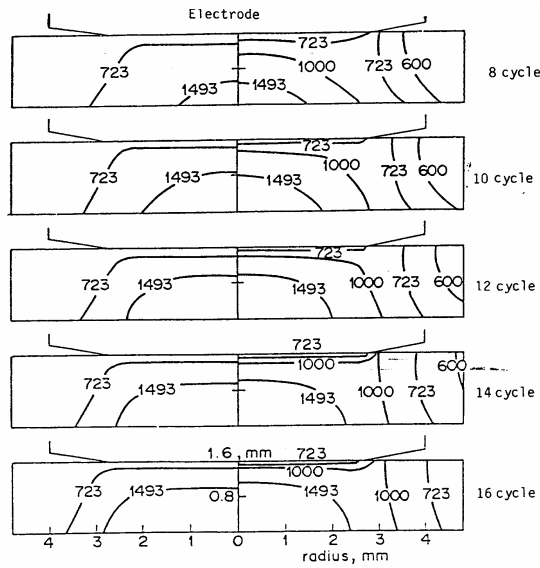
**3-13. ábra**

A két lemez közötti feszültségesés

**3-14. ábra**

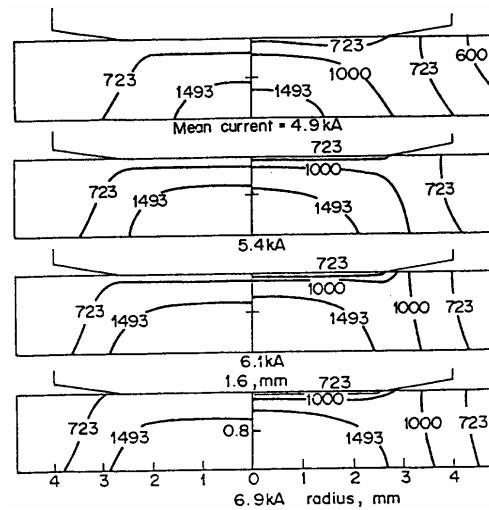
A feszültségesések aránya az érintkezési felületeken, illetve az alapanyagban

Átlagos esetet feltételezve az érintkezési felület ellenállása sokkal nagyobb, mint az alapanyag ellenállása. Ahogy az idő növekszik, az érintkezési felületen a feszültségesés aránya a teljes feszültségeséshez képest csökkenő tendenciát mutat, viszont a feszültségesés aránya az alapanyagban nő. Amikor a hegesztési főidő eléri a 6 ciklust (3-14. ábra), és a hegesztett szerkezet összeolvadása közepén megkezdődik, a teljes feszültségesés már tartalmazza az alapanyagban történt feszültségesést (87%). Ez magyarázza azt a tényt, hogy a felületi ellenállás csökken a hőmérséklet növekedésével, míg az alapanyag ellenállása növekszik. A kísérlet során készített makroképeken alapvetően három különböző szövetszerkezet figyelhető meg. Az első, amely betölti a kötés közepét, dendrites szerkezetű, ami akkor jelenik meg, amikor az olvadék megszilárdul. A következő terület, ami körülveszi a kötést a hőhatásövezet, ahol az austenitből a gyors hűlés miatt – a karbon-tartalom és a hűlési sebesség függvényében – részben martensit és más szövetelemek alakulnak. A metallurgiai szerkezet a hőhatásövezeten túl változatlan marad. A különböző hegesztési főidők alkalmazásával készített kötések jellemző hőmérsékleti tartományait mind kísérleti (az ábra baloldali része), mind elméleti (az ábra jobboldali része) úton a 3-15. ábra mutatja. A hőbevitel változtatásával az egyes tartományok az ábrán látható módon bővülnek. A 3-16. ábra a hőmérséklet eloszlást mutatja különböző hegesztő áramerősség értékek alkalmazása esetén.



3-15. ábra

A jellemző hőmérsékleti tartományok



3-16. ábra

A hőmérsékleteloszlás különböző hőbevitel
esetén

Az elektród-összeszorító erő hatása a kötés kialakulására a következő. Ahogy az elektród-összeszorító erő növekszik, az olvadáspont eléréséhez szükséges idő is megnő, mivel az ellenállás a két lemez felülete között lecsökken. Ennek oka, hogy az alkalmazott szorítóerő növelése az elektródok, és az érintkezési felület között a kiemelkedések deformálódása miatt nagyobb érintkezési felületet, jobb fémes érintkezést eredményez, miközben az anyag vastagság irányú mérete még kissé csökken is. A csökkenő érintkezési ellenállás miatt, az olvadáspont eléréséhez szükséges idő meghosszabbodik, és ebből következően a kötés kialakulása az összeszorító erő növelésével lelassul.

Wei és Ho - 1990 [3-15] három-dimenzióban meghatározták a heglencse növekedését különböző hegesztő áramerősség, elektród alak és anyagvastagságok esetén. A fázisátalakulások meghatározására a Crank (1984) által leírt entalpia eljárást használták. Az olvadék mozgásának hatását a rövid hegesztési főidő és hegfürdő kis mérete miatt elhanyagolhatónak tekintették. Figyelembe vették:

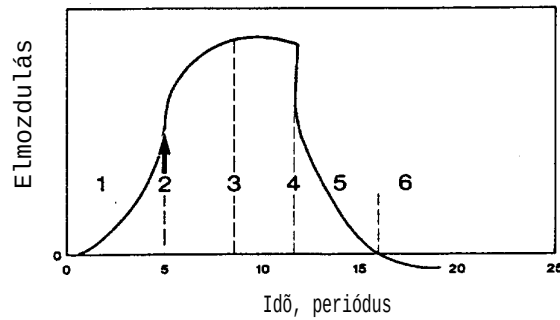
- a Joule-hőt,
- az érintkezési ellenállást,
- elektródok hűtő hatását,
- az olvadáskor történő fázisátalakulást,
- az olvadék és a szilárd test termikus- és elektromos tulajdonságait (amelyeket állandónak feltételeztek).

A két lemez érintkezési felülete közötti elektromos ellenállás meghatározása bizonytalan, mivel kémiai, mechanikai, termikus és metallurgiai jelenségek összetett módon befolyásolják. Savage – 1978 [3-16] és Kaiser – 1981 [3-11] mérték az érintkezési ellenállást különböző hegesztési áramerősségek, elektród összeszorító erők és kezdeti felületi feltételek esetén. A mérési eredmények azt mutatták, hogy azon a helyen, ahol a kötés kialakul az érintkezési felület ellenállása csökken. Mindenféle rendszerezett adat helyett a lemezek érintkezési felületének érintkezési ellenállásáról feltételezték, hogy a hőmérséklet lineáris függvényeként változik (Gould 1987). A hegesztés korai szakaszában a lemezek érintkezési felületei közötti hőfejlődés, míg hosszú hegesztési főidő esetén a Joule-hő az, ami dominál a heglencse növekedésében. A radiális hővesztesség figyelembe vétele hosszabb hegesztési főidő, illetve nagyobb hegesztő áramerősség alkalmazása esetén fontos. A hegesztett kötés kialakulása a határfelületi hőfejlődéssel indul, amely gyorsan nullára csökken, azaz hosszabb hegesztési főidő alkalmazása esetén a kötés kialakulását mindenképpen a Joule-hő határozza meg. A Joule-hő fontosságát mutatja, hogy nem csak a hegesztő áramerősségnek van jelentős hatása a kötés kialakulásra, hanem nagy hegesztési főidők esetén a hőmérsékletfüggő térfogati elektromos ellenállásnak is mind az olvadék, mind a szilárd fázisban. Az előzőekből következik, hogy a térfogati ellenállás és az érintkezési ellenállás részletes vizsgálatára határozottan szükség van.

Broomhead és Dony - 1990 [3-17] elmozdulásmérés alapján arra a következtetésre jutott, hogy az összehegesztendő darabok érintkezési felületei között létrejövő hőfejlődés alatt egy termikus expanzió megy végbe, amely az alkalmazott erővel ellentétes hatású. Ugyanebben az időben az anyag hevítése és a nyomóerő hatására bekövetkező képlékeny alakváltozás miatt az elektródok belesüllyednek a munkadarabba, csökkentve ezzel a hőtágulás mértékét. A végső elektród-elmozdulás a hőtágulás függvénye, amelyet a hőbevitel határoz meg.

Az elektród elmozdulásának időfüggvényét a 3-17. ábra mutatja:

- az elektród-eltávolodás nő a hőtágulás hatására (1),
- az elektród-eltávolodás mértéke csökken a pontátmérő növekedésével (2),
- az elektród-eltávolodás mértéke csökken a hőmérséklet növekedésével (3),
- átmeneti csökkenés az elektród elmozdulás értékében (4),
- kovácsolási nyomás alkalmazása (5),
- az elektród benyomódása a munkadarab felületébe (6).

**3-17. ábra**

Az elektród elmozdulása egy hegesztési cikluson belül

Wei és Yeh - 1991 [3-18] a faktorok (mechanikai-, hő- és metallurgiai tulajdonságok, illetve a hegesztési feltételek) heglencse növekedésére gyakorolt hatásának vizsgálatára egy időben változó, tengelyszimmetrikus modellt fejlesztettek ki. Figyelembe vették:

- az elektromágneses erőhatást,
- a Joule-hőt,
- a felületek közötti hőfejlődést,
- az elektród hűtő hatását.

Munkájukban a heglencse növekedésének vizsgálatára Bennon és Incropera által 1987-ben kifejlesztett kontinuum-modellt használták, figyelembe véve a nyomatékot, a hőt, a kétalkotós egyensúlyi rendszer alapfolyamatait. A feltételek a következők voltak:

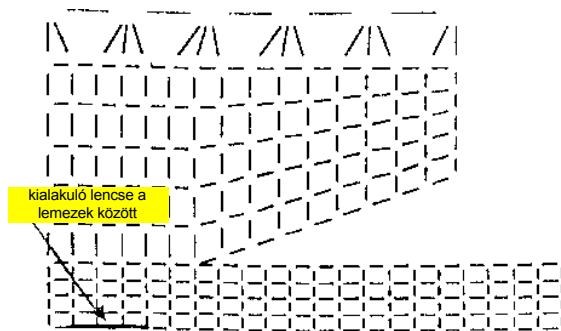
- egyenletes eloszlású és tengelyirányú elektromos áramsűrűség,
- a Joule-hőt az átmeneti zónában tömegarányos elektromos vezetőképesség alapján becsülték,
- az érintkezési felületen fellépő hőfejlődés úgy tekinthető, mint egy kis tényleges vastagsággal jellemezhető térfogati hőforrás,
- az érintkezési ellenállás a hőmérséklet lineárisan csökkenő függvénye,
- a munkadarabok kétalkotós ötvözetek,
- a szilárd és a folyékony rész a fázisok közötti határon helyileg hő- és fázisegyensúlyban van,
- a folyadék, szilárd és a határfázis tulajdonságairól feltételezték, hogy homogén és izotróp,
- a termofizikai tulajdonságokat állandónak tekintjük, de ezek a különböző fázisokban különbözőek.

A heglencse növekedésének vizsgálatakor megállapították, hogy a folyadékáramlás a határfázis zónájában az oldott fém felhajtóereje alatt az óramutató járásával megegyező, majd a megömlött zónában a termikus felhajtóerő eredményeként átmegy az óramutató járásával ellentétes irányba. Ezt a jelenséget minőségileg már 1965-ben Cunningham és Begeman vizsgálta. A folyadék maximális sebességét 5 mm/s-ban állapították meg, amely sokkal kisebb, mint akár az ív (200 mm/s), akár a nagy hőáramsűrűségű sugárhegesztések (5000 mm/s) hegfürdőjében mérhető. Ennek a magyarázata az, hogy a folyadékáramra ható elektromágneses erő az ellenállás-ponthegesztés tengelyszimmetrikus volta miatt eltűnik.

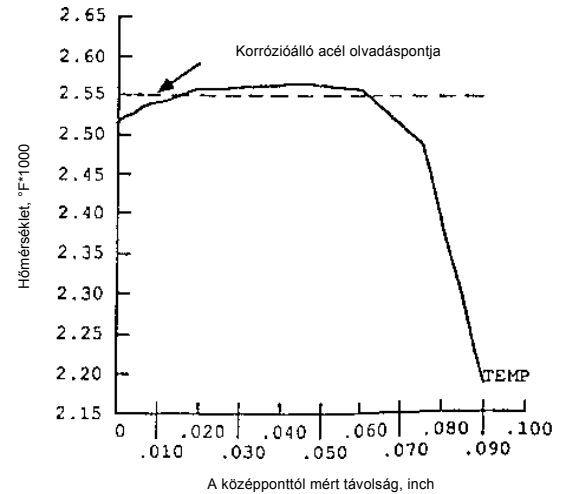
Tsai, Jammal, Papritan és Dickinson – 1992 [3-19] a heglencse kialakulásának modellezésére kétdimenziós végeselemes modellt készítettek. A peremfeltételek a következők voltak:

- az elektród felső vége (teteje) és a munkadarabok érintkezési felületei között feszültségesés van,
- az áramátfolyás az érintkezési területeken történik,
- a munkadarab és az elektród határfelületén keresztül - a lemezek érintkezési felülete és a szimmetria-tengely kivételével - konduktív úton hő áramlik a környezetbe,
- hőelvezetés van még az elektród belsejében a hűtővíz-csatorna felületén,
- a szimmetria-tengely mentén és a lemezek érintkezési felületén a szimmetria miatt nincsen hőátadás,
- az elektród-összeszorító erőt az elektród felső, gyűrű alakú végén megoszló terhelésként vették figyelembe,
- a lemezek érintkezési felületén a normál irányú elmozdulás a szimmetria miatt nem megengedett,
- a szimmetria-tengely mentén lévő pontok radiális irányban nem mozdulhatnak el.

Az eredmények alátámasztották Satoh, Katayama és Abe [3-13] megfigyeléseit, miszerint a lemezek megolvadása nem a középpontban kezdődik, hanem egy kicsit attól eltolva sugárirányban (3-18. ábra). A jelenséget a lemezek érintkezési felülete mentén számított hőmérsékleti görbe (3-19. ábra) alakjával magyarázták.

**3-18. ábra**

A heglencse kialakulásának kezdeti szakasza
($t_h=0,055$ s; $I_h=8$ kA)

**3-19. ábra**

Hőmérséklet-eloszlás a lemezek érintkezési
felületén ($t_h=0,055$ s; $I_h=8$ kA)

További kutatási irányzatok

Az utóbbi évtizedben az ellenállás-ponthegesztés számítógépes modellezésével kapcsolatos kutatások egy része a ponthegeztett kötést elsősorban a fáradás szempontjából vizsgálta [3-20 – 3-22]. Ezekben az esetekben a vizsgálatok célja nem a heglencse kialakulásának elemzése, hanem a hűlés során létrejövő maradó feszültségek meghatározása, illetve a fáradásos repedés megindulási kritériumának kidolgozása volt.

Magyarországon az ellenállás-ponthegeztés modellezésére a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen [3-23] és a Bay Zoltán Logisztikai és Gyártástechnikai Intézetben, Miskolcon [3-24] is kutatások folytak az utóbbi években. A kutatási eredmények jól illeszkednek a nemzetközi eredményekhez.

4. A szakirodalmi eredmények összefoglalása, a minőségcentrikus optimalizáláshoz kapcsolható problémák felvetése

Jelen fejezet a szakirodalom alapján az ellenállás-ponthegeztés minőségcentrikus optimalizálása kapcsán megfogalmazható problémákat foglalja össze. A dőltbetűs részeket a disszertációm további fejezeteiben részletesen is kifejtem.

1. Technológiai adatsorok elemzésekor gyakran jutunk arra a következtetésre, hogy a kísérleti adatok alapján hozott döntések statisztikailag nem megalapozottak. Napjainkban a minőségi termelés és a minőségbiztosítás előretörése nyomán a kísérletek tervezéséhez és az eredmények elemzéséhez tudományos megközelítést kell alkalmazni. A kísérlettervezés alapján:
 - megállapítható *mely faktoroknak van jelentős befolyásuk a minőségi jellemző (céljellemző) változékonyságára* és melyeknek nincs, azaz mely faktorokat kell fokozott ellenőrzés alatt tartani,
 - minimális kísérletszámmal megbízható eredményt érhetünk el,
 - optimalizálhatjuk az adott technológiát, *meghatározhatjuk, hogy az egyes faktorokat mely szintekre kell beállítani* ahhoz, hogy a minőségi jellemző a legkisebb ingadozás mellett az optimális értéken legyen.
2. Napjainkban az ellenállás-ponthegeztett kötések minősítésénél két alapvető követelményt kell kielégíteni. Az egyik a minél nagyobb terhelhetőség, míg a másik a minél kisebb deformáció. A hőbevitel függvényében e két tényezőhöz kapcsolódó jellemzőket mutat be az 1-5. és a 2-1. ábra. A technológia szempontjából további feltételként fogalmazható meg a fröcskölésmentes kötés elkészítése. A széles körben alkalmazott roncsolásos vizsgálatok eredményei alapján minősített kötések az adott szempont alapján vagy megfelelnek, vagy nem felelnek meg a követelményeknek. Figyelembe kell azonban venni, hogy a roncsolásos vizsgálatok eredményeül kapott mérőszámok nem biztos, hogy megfelelő célfüggvényként szolgálnak, mivel a kötés, amikor egy adott szempont alapján a

minimum, vagy a maximum határon van, más szempontból közelebb állhat a hibás állapothoz, mint a megfelelőhöz. *A kísérlettervezés során alkalmazott minőségi jellemző (célfüggvény) helyes megválasztása így alapkövetelmény a technológia szempontjából.*

3. Az ellenállás-ponthegeztés modellezésére számos közelítést találunk a szakirodalomban. Ezen modellek alapján megfogalmazható, hogy az ellenállás-ponthegeztés összetett folyamatát leíró termikus, mechanikai, elektro-mágneses és metallurgiai jelenségek összekapcsolását egyik modell sem tudta megvalósítani. A különböző jelenségek befolyásának különbözősége miatt jelentőségük nem azonos, ezért a fontossági sorrendben élen álló termikus, mechanikai és elektromos folyamatokra koncentráló termo-elektromos és *termo-mechanikai* modellekből kapott eredmények hiányosságai ellenére azonban jól közelítik a valóságos jelenségeket.
4. Az *ellenállás-ponthegeztett lencse kialakulási folyamatára* vonatkozóan a 80-as évektől újabb elmélet látott napvilágot. A korábbi elméletek, melyek szerint a lencse kialakulása a középpontból indul és a hőbevitel mértékétől függően mind axiális, mind radiális irányban növekszik, kemény munkarend esetén megdőlni látszottak. Metallográfiai vizsgálatok alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a lencse kialakulása kemény munkarend esetén tórusz alakban megy végbe. Ez a felvetés a minőségi kötés létrehozását illetően számos problémát von maga után, illetve számos új lehetőséget nyújt a fröcskölés elkerülésére, illetve a hőbevitel szabályozására.

5. Célkitűzés

Kutatómunkám célja a vékonylemezek ellenállás-ponthegesztett kötésének minőség-centrikus optimalizálása. E témával foglalkozó szakirodalom előző fejezetekben bemutatott eredményei alapján a disszertáció címében adott témát a következő részletezés szerint dolgozom ki:

1. Vékony lágyacéllemez ellenállás-ponthegesztéssel készített átlapolt egy-pontkötésének minősítésére kísérlettervezési módszerek alkalmazása.
 - 1.1. A 7. alfejezetben ismertetett kísérlettervezési módszerek alapján kapott eredmények értékelése és összehasonlítása a kísérleti úton meghatározott minőségi kötés létrejöttét eredményező paraméterkombinációval (8. 1. 1. és 8. 1. 2. alfejezetek).
 - 1.2. Többszemponútú optimalizálási módszerek alkalmazása komplex kötéstulajdonságok elérésére, illetve alkalmas célfüggvény-konstrukciók kidolgozása a kötés mechanikai, geometriai vizsgálata, illetve metallográfiai elemzések alapján (8. 2. 1. és 8. 2. 2. alfejezetek).
2. Az ellenállás-ponthegesztés technológiájának optimalizálására alkalmazható rendszer kidolgozása és erre alkalmas célfüggvény felállítása.
 - 2.1. A kötések roncsolásos vizsgálatánál kialakuló tönkremeneteli módok és a technológiai folyamat hatásának elemzése a tönkremeneteli módokra. A tönkremenetelt meghatározó tényezők hatásainak vizsgálata. E tényezőkből alkalmas célfüggvény felállítása és a minősítő feltételek kidolgozása.
 - 2.2. Az optimális minőségi kötés létrehozásának feltételei (III. fejezet).
3. A pontkötés kialakulása kezdeti fázisának vizsgálata végeselemes modellezéssel és hagyományos metallográfiai technikákkal, célzottan a kemény munkarendű hegesztés alkalmazási arányának növelésére és a hegesztés során lejátszódó folyamatok leírására.
 - 3.1. Elméleti úton szilárdságtani peremérték feladat megfogalmazása és numerikus megoldása végeselemes technikával a TOCHNOG [5-1] végeselemes szoftvercsomag felhasználásával a lencsefejlődés bemutatására (11. alfejezet).
 - 3.2. Az elméleti eredmények kísérletes igazolása metallográfiai technikák alkalmazásával (10-11. alfejezet).

6. A kísérletek körülményei

A próbatest anyagaként kísérleteimhez az S 235 JR (EN 10025) jelű fényes lemezt választottam, amelynek vegyészeti vizsgálatát ARL 3460-as vizsgáló berendezéssel CE-spektrométeres módszerrel a Metalcontrol Kft. (Miskolc) végezte el. A lemez anyagának kémiai összetételét és jellemző mechanikai tulajdonságait a 6-1. táblázatban foglaltam össze.

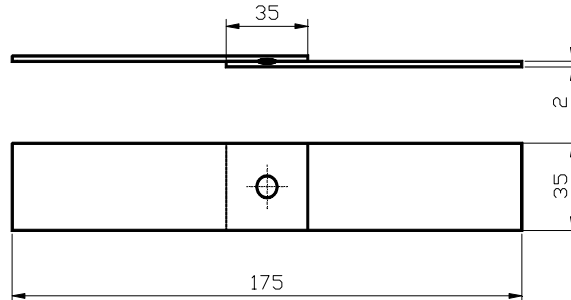
Az acél típusa	Csillapított alapacél
Szakítószilárdság, MPa	334
Folyáshatár, MPa	235
Szakadási nyúlás hosszirányban	34,8
C %	0,04
Mn %	0,31
Si %	0,07
S %	0,015
P %	0,016
Cr %	0,03
Ni %	0,02
Cu %	0,05

6-1. táblázat: Az S 235 JR anyag jellemzői

A próbatestet az MSZ 6691/1-75 szabvány „*Ponthegeztett kötések vizsgálata*” című fejezetének ajánlásai alapján alakítottam ki [6-1].

A szabvány előírja, hogy az egy vizsgálati tételt képező próbatestek, illetve próbadarabok hegpontjait azonos technológiai feltételekkel (lemezfelület, munkarendi adatok, stb.) kell hegeszteni. A próbatest 6-1. ábrán látható méretei biztosították, hogy a kötések nyíró-szakító vizsgálatára során a szakadás ne a varrattól távoli alapanyagrészekben következzen be. A

próbatest készítésekor a pontkötést és a próbatest anyagának szerkezetét, tulajdonságait az átlapolás területén nem szabad befolyásolni.



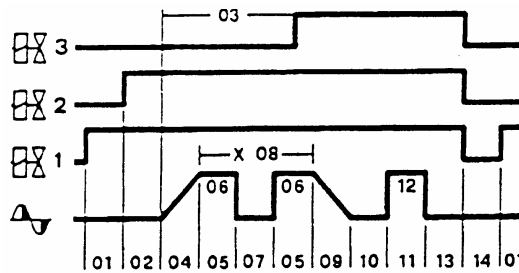
6-1. ábra
Egyszeresen nyírt próbatest

A ponthegeesztett kötések elkészítéséhez az olasz gyártmányú, TECNA 8007 típusjelű, programozható, egyfázisú váltóáramú, helyhezkötött kivitelű pont- és dudorhegesztőgépet használtam.

A hegesztőgép lényeges műszaki paramétereit a 6-2. táblázatban foglaltam össze, a paraméterprogramozáshoz nélkülözhetetlen ciklusdiagramot a 6-2. ábra mutatja.

Típus	TECNA 8007
Névleges teljesítmény	80 kVA
Áramnem	Váltakozóáram
Fázisszám	Egy
Primer feszültség	380 V
Primer áramfelvétel	Max. 150 A
Hegesztési áramerősség	Max. 27 kA
Hegesztő főidő	Max. 2 s
Elektróderő	Max. 7 kN
Levegőnyomás	Max. 6 bar
Hűtés	Vízhűtés (2 l/min.)
Hegeszthető lemezvastagság (lágyacél)	Max. 4+4 (mm)
Tárolt programok száma	15
Egy programhoz tartozó paraméterszám	16
Nyomtató csatlakozás	RS 232

6-2. táblázat: A pont- és dudorhegesztő gép lényeges technikai adatai



6-2. ábra

A ponthegesztőgép ciklusdiagramja

Optimalizációs paraméterként elsőként a kötés szabvány által használt nyíró-szakító erejét választottam. A hegesztőeljárás elsőrendű (faktorjellegű) változói a hegesztő (szekunder) áramerősség (I_h [kA]), a hegesztési főidő (t_h [periódus]) és az elektród-összeszorító erő (F_e [kN]). E három – a hőbevitelt döntően meghatározó – paramétertől el kell különítenünk a hegesztés minősége szempontjából kisebb jelentőségű, illetve a nem használt paramétereket, melyek értékeit nullának választottam. Ezeket a továbbiakban másodrendű változóknak fogom nevezni. A másodrendű változókat (6-3. táblázat) a kísérletek alatt állandó értéken tartottam.

Paraméter	Mértékegység	Érték
Elektród-zárásidő	periódus	10
Előszorítás	periódus	25
Kovácsoló nyomás késleltetése	periódus	0
Áramfelfutás ideje	periódus	5
Hűtési idő 1	periódus	0
Áramimpulzusok száma	db	0
Áramlefutás ideje	periódus	5
Hűtési idő 2	periódus	0
Utóhevítési idő	periódus	0
Utóhevítő áramerősség	kA	0
Utószorítás	periódus	25
Ciklusok közötti szünetidő	periódus	0
Minimális áramerősség	kA	$I_h - 10\%$
Maximális áramerősség	kA	$I_h + 10\%$

6-3. táblázat: A másodrendű változók értékei

A célfüggvény értékeinek meghatározására a 2.2. fejezetben felsorolt előnyei alapján a nyíró-szakító vizsgálatot választottam.

A kísérleti terv összeállításához a 6-4. táblázatban szereplő faktorok tervközépponti értékének és variációs intervallumának megválasztása szükséges. Az elsőrendű változók

(faktorok) tervközépponti értékeit az 1. melléklet ajánlásai szerint választottam meg (RWMA szerinti A minőségi osztály). A variációs intervallum értékét úgy határoztam meg, hogy a kísérleti beállítások kellően nagy tartományt fogjanak át, ugyanakkor a hegesztőgépen beállítható kombinációt és kivitelezhető hegesztést eredményezzenek. Alsó korlátként az össze nem hegedést, felső korlátként a lemezek elektródhoz hegedését választottam. A tesztelés során – a hegesztés közbeni jelenségek alapján – világosan elkülönítettem a hegesztési tartományokat. A hegesztéseknél figyelmet fordítottam arra, hogy a pontkötések az átlapolás geometriai középpontjába kerüljenek és a szerves oldószerrel gondosan letisztított lemezek hegesztés előtt, és közben ne szennyeződjenek. A csonkakúp végződésű elektródok véglap átmérőjét a

$$d_e = 5 \cdot \sqrt{s} = 5 \cdot \sqrt{2} = 7,071 \quad (6.1)$$

képlet alapján 7 mm-ben határoztam meg. A technológiai paraméterek értékeit a következőkre választottam (6-4. táblázat).

Paraméter	Mértékegység	Tervközéppont	Variációs intervallum	Alsó szint	Felső szint
I_h	kA	12	4	8	16
t_h	periódus	25	15	10	40
F_e	kN	3	1	2	4

6-4. táblázat: A kísérleti terv

A kísérleti beállítások tervét a 6-5. táblázat tartalmazza, ahol a nyolcféle beállítás a 7-2. táblázatnak megfelelően adható meg. A kísérleteket e terv alapján, a kisebb hőbevitelt jelentő munkarend felől a nagyobb hőbevitelt jelentő felé haladva hajtottam végre. Ezzel az eredmények megbízhatósága javítható és a kísérletek közben kevesebb elektród-felszabályozásra van szükség.

A kísérletek végrehajtásakor a faktorok szintjeit a lehető legpontosabban, a vélt pontos értéket mindig azonos irányból közelítve célszerű beállítani. A másodrendű (nem faktorjellegű) körülményeket állandó értéken kell tartani. Egy-egy beállításban három-három párhuzamos hegesztést, a tervközéppontban öt hegesztést terveztem. A nyíró-szakító vizsgálatok során mért maximális erőértékeket (F_{nysz}) a 6-5. táblázatban összegeztem.

Sorszám	I_h [kA]	t_h [periódus]	F_e [kN]	F_{nysz} [kN]			$\bar{F}_{nysz}$ [kN]	s [kN]	s^2 [MN ²]
1	8	10	2	3.6	4.2	6.9	4.9	1.6	3.9
2	8	10	4	0.5	2.4	3.5	2.13	1.52	2.303
3	8	40	2	13.4	12.7	12.4	12.83	0.51	0.253
4	8	40	4	10.5	9.8	10.9	10.4	0.56	0.31
5	16	10	2	16.3	16.1	16.5	16.3	0.2	0.04
6	16	10	4	13.4	15.1	15.3	14.6	1.04	1.09
7	16	40	2	17.0	15.9	16.9	16.6	0.61	0.37
8	16	40	4	18.5	17.1	19.3	18.3	1.11	1.24

6-5. táblázat: A kísérleti eredmények

A nyíró-szakító vizsgálat során a 10 kN alatti húzóerőnél eltört próbatestek lemezei a kötésben szétváltak, 10 kN erő fölött a heglencsék a lemezből kiszakadtak (ún. kigombolódási jelenség), míg a 7. és 8. beállításban a törés az alapanyagban következett be.

A 6-3. ábra a 8. sorszámú próbatestet mutatja törés után. Az ábrán megfigyelhető a lemezhégek elfordulása, a két lemez beállása közel azonos síkba, a kötés melletti törés és a folyékony fém hegesztés közbeni kifröccsenésének következménye, a vékony fémhártya.

A ponthegeztések elvégzése után az elektródbenyomódásokat százados mérőórával megmértem (6-6. táblázat), majd a próbatesteket a Mechanikai Technológiai Tanszék anyagvizsgáló laboratóriumában ZD 20 típusú hidraulikus szakítógépen elszakítottuk. A szakítás sebessége minden esetben azonosan lassú (kb. 0,3 mm/s) volt.



6-3. ábra
Törés utáni próbatest

Sorszám	I_h [kA]	t_h [periódus]	F_e [kN]	h_b [mm]			$\bar{h}_b$ [mm]	s [mm]
1	8	10	2	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01
2	8	10	4	0,05	0,05	0,07	0,06	0,012
3	8	40	2	0,19	0,21	0,18	0,19	0,015
4	8	40	4	0,22	0,24	0,27	0,24	0,025
5	16	10	2	0,50	0,53	0,45	0,49	0,04
6	16	10	4	0,70	0,78	0,75	0,74	0,04
7	16	40	2	1,1	1,2	1,1	1,13	0,058
8	16	40	4	1,3	1,2	1,3	1,27	0,058

6-6. táblázat: A benyomódások értékei

A 6-6. táblázat benyomódás (h_b) értékei 0,01 és 1,3 mm között szóródnak. A nyíró-szakítóerők megfelelő értékeiből megállapítható, hogy minőségi kötéshez az adott ponthegeztési feladatnál (2 mm anyagvastagság esetén) legalább néhány tized mm h_b érték szükséges, de az 1 mm-en felüli benyomódások durva felületi jelenséggé hatnak és esztétikailag erősen kifogásolhatók.

Az F_{nysz} erők és a h_b benyomódások szórásai elfogadható értékűek. Az adatokból látható, hogy minél távolabb vagyunk a tervközépponttól, annál nagyobbak a szórások, mégpedig az alacsony hőbevitelnél a bizonytalan kötés, a túlzott hőbevitelnél a folyékony fém kifröccsenésének véletlenszerűsége miatt. A tervközéppontban azonban a nyíró-szakító erők alig szórnak (6-7. táblázat).

Sorszám	I_h [kA]	t_h [periódus]	F_e [kN]	F_{nysz} [kN]
1	12	25	3	15.6
2	12	25	3	15.8
3	12	25	3	15.7
4	12	25	3	15.5
5	12	25	3	15.6

6-7. táblázat: A középponti értékekkel elvégzett kísérleti eredmények

7. Kísérlettervezési módszerek

Mérnöki feladatok esetén a kísérlettervezés célja a kimenő termék minőségi jellemzőjét befolyásoló faktorok olyan szintjének beállítása, hogy a minőségi jellemző a legkisebb ingadozás mellett érje el extrémumát.

A kísérlettervezésnek alapvetően két metodikája terjedt el. Attól függően, hogy a kísérleti körülményeket - szigorú matematikai módszerekkel - úgy választjuk meg, hogy a kísérlet információtartalma valamilyen értelemben maximális legyen, vagy az adott információ megszerzéséhez kelljen a legkevesebb kísérletet elvégezni.

Amennyiben célunk a jelenség megismerése, a változók közötti ok-okozati összefüggések felderítése, akkor *optimális kísérletek tervezéséről* beszélünk.

Amennyiben csupán viszonylag egyszerű (lineáris és másodfokú) függvények alkalmazásával a független változóknak az optimális működés tartományát jellemző értékeiket keressük, akkor *kísérletes optimalizálásról* beszélünk. Jelen munkámban az e csoportba tartozó módszerekkel foglalkozom.

A vékonylemezek ellenállás-ponthegesztésének technológia optimalizálására alkalmas kísérlettervezési módszerek közül kutató munkám során az alábbi három módszert használtam:

- Box-Wilson féle módszer,
- Taguchi féle módszer,
- Harrington féle módszer.

7.1. Box-Wilson féle módszer

Az optimumkeresési feladatok megoldására 1951 óta ismeretes a Box-Wilson féle módszer, amely kedvező kísérletszámmal, tervszerűen közelíti meg a tényleges szélsőértéket. A módszer a többtényezős kísérletek, és a hatékony irányok kombinációjára épül. Lényege, hogy az ismeretlen folyamat változóit (paramétereit) egyidejűleg változtatja, és a kapott eredmények matematikai statisztikai feldolgozásával biztosítja a legnagyobb gradiens irányába való haladás lehetőségét [7-1].

A kísérleti terv magában foglalja az összes faktor középponti, valamint az alsó és felső szintnek megfelelő értékeit és a variációs intervallumot természetes egységben. A kísérleti terv szokásos alakja a 7-1. táblázat szerinti.

Paraméter (faktor)	Mértékegység	Tervközéppont	Variációs intervallum	Alsó szint -1	Felső szint +1
$I_h (X_1)$	kA	I_0	ΔI	$I_0 - \Delta I$	$I_0 + \Delta I$
$t_h (X_2)$	Periódus ($f = 50 \text{ Hz}$)	t_0	Δt	$t_0 - \Delta t$	$t_0 + \Delta t$
$F_e (X_3)$	kN	F_0	ΔF	$F_0 - \Delta F$	$F_0 + \Delta F$

7.1. táblázat: A kísérleti terv

A kísérleti beállítások terve a faktorok szintvariációit tartalmazza. A célszerű sorrend az alsó szintek felől a felső szintek felé halad, mint ahogy azt két szint és három faktor esetére a 7-2. táblázat mutatja.

A kísérletek végrehajtása után, a kísérleti eredmények feldolgozásához szükséges számítások elvégzéséhez feltesszük, hogy a vizsgált optimalizációs paraméter (mint valószínűségi változó) normális eloszlást követ. (A mérnöki gyakorlat csaknem teljes egészen ez a feltevés megengedhető).

A párhuzamos mérések eredményeit (Y_i) két adattal jellemezzük. Ezek a várható érték ($\bar{Y}$) és a szórásnégyzet (s^2). Kiszámításuk az alábbi képletekkel történik.

$$\bar{Y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_i \quad (7.1)$$

$$s^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (7.2)$$

Sorszám	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

7.2. táblázat: A kísérleti beállítások terve

A várható értéket és a szórásnégyzetet eggyel több értékes számjegy pontossággal adjuk meg, mint a mérési eredményeket. A feladat megoldásának modellezésekor feltesszük továbbá, hogy a vizsgált folyamat faktorai elsőrendűen befolyásolják az optimalizációs paramétert, így szükségképpen léteznie kell a következő alakú függvénykapcsolatnak:

$$Y=Y(X_1; X_2; \dots; X_n) \quad (7.3)$$

Ha erről az előző összefüggésről - az ún. célfüggvényről - feltételezzük, hogy folytonos és minden pontjában differenciálható, akkor bármely pontjában Taylor sorba fejthető, és sorával tetszőleges pontossággal közelíthető. A sorfejtés helyéül célszerű a tervközéppontot választani, így a közelítő függvény - a kísérleti tervhez hasonlóan - a középpontra szimmetrikus lesz. A leghatékonyabb irány megállapításához és a végső optimum megtalálásához általában megfelelő a következő tagokat tartalmazó polinom:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \alpha_{ijk} X_i X_j X_k + \dots + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{z=1}^n \alpha_{ijkz} X_i X_j X_k \dots X_z \quad (7.4)$$

és

$$i \neq j \neq k \neq \dots \neq z.$$

ahol: $\alpha_0, \alpha_i, \alpha_{ij}, \alpha_{ijk}, \dots, \alpha_{ijk\dots z}$: az egyenlet együtthatói.

A polinom a kiegészítő feltétel miatt nem tartalmaz tiszta másod-, harmad- stb. fokú tagokat. Ennek az az oka, hogy a kétszintes terveknél e tagok együtthatóinak becsléséhez nincs elegendő adatunk. Itt ugyanis a polinom együtthatóinak a száma minden n-re megegyezik a kísérleti beállítások számával, a szabadságfok zérus és a teljes összefüggés a pontos kiindulási értéket (a mérési eredmények várható értékét) szolgáltatja. A szintszám növelésével lehetőség

nyílik a tiszta másod-, harmad- stb. fokú tagok figyelembevételére. A mérnöki gyakorlatban erre ritkán van szükség [7-2].

A polinom α -val jelölt együtthatóit az ismeretlen célfüggvény parciális deriváltjainak tervközépponti értékei adnák, így tehát a meghatározásukra nincs lehetőség. A pontos α érték viszont a kísérleti eredményekből, matematikai statisztikai módszerekkel tetszőleges pontossággal becsülhető. Az α együtthatók becsléseit standardizált változók esetén a megfelelő indexű **a** betűvel, természetes egységekben adott változóknál **b** betűvel jelöljük. Az **a** és **b** együtthatókat regressziós együtthatóknak, a velük felépített célfüggvényt regressziós polinomnak nevezzük. A regressziós együtthatókat a legkisebb négyzetek elvén, a kapott mérési eredmények várható értékének felhasználásával számíthatjuk ki a kísérleti beállítások számának megfelelő változó- és tagszámú lineáris egyenletrendszerből. Az egyenletrendszer általános esetben elektronikus számítógéppel oldható meg (pl. az **a** és **b** együtthatók közvetlen meghatározása), de léteznek egyszerű megoldási lehetőségek is, ahol az egyenletrendszer determinánsának speciális tulajdonságait és a standardizált változók adta előnyöket használják ki (**a** együtthatók meghatározása).

Az együtthatók meghatározása után meg kell vizsgálnunk, hogy a modellben szereplő regressziós polinom lehet-e egy végtelen nagy számú kísérleti sorozatot jellemző polinom.

A szórásnégyzetek homogenitás-vizsgálata arról ad felvilágosítást, hogy az egyes kísérleti beállítások (véges k mérésszámmal meghatározott) szórásnégyzetei (ξ_k^2) lehetnek-e ugyanannak az elméleti szórásnégyzetnek (σ^2) a becslései. A homogenitás-vizsgálatnak két eljárása használatos: a Fisher féle F próba és a Cochran féle G próba.

a) Az F próba

Az egyes kísérleti beállítások maximális és minimális szórásnégyzetére vonatkozóan fenn kell állni a következő összefüggésnek [7-3]:

$$F_{sz} = \frac{s_{max}^2}{s_{min}^2} \leq F_t(f_{sz}; f_n); (s_{min}^2 \neq 0) \quad (7.5)$$

ahol: F_{sz} - a Fisher próba számított értéke,

F_t - az F próba táblázatbeli értéke 95%-os egyoldali megbízhatósági szinthez,

f_{sz} - a számláló szabadságfoka,

f_n - a nevező szabadságfoka.

A szabadságfokok kiszámítása azonos k párhuzamos mérésszám esetén a következő összefüggéssel történik:

$$f_{sz} = f_n = k - 1. \quad (7.6)$$

b) A G próba

A szórásnégyzeteket akkor tekintjük homogénnek, ha teljesül a következő feltétel [7-3]:

$$G_{sz} = \frac{s_{max}^2}{\sum_{h=1}^N s_h^2} \leq G_t(f_{sz}; f_n), \quad (7.7)$$

ahol: G_{sz} - a Cochran próba számított értéke,

G_t - a Cochran próba 95%-os megbízhatósági szinthez tartozó táblázatbeli értéke,

f_{sz} - a számláló szabadságfoka,

f_n - a nevező szabadságfoka.

A szabadságfokok kiszámítása a következő összefüggések alapján lehetséges:

$$f_{sz}=k-1, \quad (7.8)$$

$$f_n=N. \quad (7.9)$$

Amennyiben a szórásnégyzetek nem bizonyulnának homogénnek, a kritikus kísérleti beállítás(ok)ban a méréseket - a lehetséges hibák okainak feltárása és kiküszöbölése után - meg kell ismételni.

Az **a** együtthatók némelyike abszolút értékben olyan kicsi is lehet, hogy hatása a mérések szórásaitól nem különíthető el. Ilyenkor az adott együttható(ka)t nem szignifikáns(ak)nak (nem jelentős(ek)nek) minősítjük és a regressziós polinomból elhagyjuk. A szignifikancia eldöntésére a Student próba (t próba) szolgál.

A t próba szerint az együttható szignifikáns, ha abszolút értéke nagyobb a konfidencia (megbízhatósági) intervallum felszélességénél. Esetünkben a konfidencia intervallum minden **a** együtthatóra azonos nagyságú. A feltételi egyenlőtlenség:

$$t_{sz} = \frac{a}{s_a} \geq t_c(f), \quad (7.10)$$

ahol: t_{sz} - a Student próba számított értéke,
 a - a vizsgált a együttható abszolút értéke
 s_a - az a együttható szórása,
 t_c - a Student próba táblázatbeli értéke 95%-os kétoldali megbízhatósági szinthez és f szabadságfokhoz.

A valamennyi a együtthatóra megegyező szórásérték (s_a) kiszámítása a következő összefüggéssel lehetséges:

$$s_a = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^N s_h^2}}{N}. \quad (7.11)$$

Az f szabadságfok a kísérleti beállításoktól és a párhuzamos mérések számától függ:

$$f=N(k-1). \quad (7.12)$$

A változatos műszaki jelenségek közötti összefüggések közelítésére a választott modellünk nem minden esetben alkalmas. Az alkalmasságot illeszkedésvizsgálattal dönthetjük el. Ha az illeszkedés nem megfelelő, a modell nem adekvát; ilyen esetben más felépítésű (pl. exponenciális, hatványfüggvény stb.) modellt kell választanunk.

A modell adekvátságát a Fisher féle F próbával vizsgálhatjuk:

$$F_{sz} = \frac{s_{ill}^2}{s_{rep}^2} \leq F_t(f_{sz}; f_n), \quad (7.13)$$

ahol: s_{ill}^2 - az illeszkedési szórásnégyzet,
 s_{rep}^2 - a reprodukálhatósági szórásnégyzet.

Az illeszkedési szórásnégyzet az egyes kísérleti beállításokban mért eredmények várható értéke (Y_m) és az optimalizációs paraméternek a szignifikáns a együtthatókat tartalmazó regressziós egyenlettel számított értéke (Y_{sz}) közötti eltérések (reziduumok) nagyságát jellemzi:

$$S_{11}^2 = \frac{k \sum_{h=1}^N (Y_m - Y_{sz})^2}{f \cdot N} , \quad (7.14)$$

A fenti összefüggésben szereplő f szabadságfok a teljes regressziós egyenletből hiányzó együtthatók számával egyenlő:

$$f_{sz} = f = 2^n - w , \quad (7.15)$$

ahol: w - a szignifikáns együtthatók száma.

Ha minden együttható szignifikáns ($w = 2^n = N$), a szabadságfok nulla, ekkor a regressziós egyenlet pontosan a mérési eredmények várható értékét szolgáltatja. Ilyenkor az illeszkedésvizsgálatnak nincs értelme.

A reziduumokat a mérések szórásaihoz kell hasonlítani. A mérési szórások jellemzésére a reprodukálhatósági szórásnégyzetet használjuk, amelyet a tervközéppontban végrehajtott K számú párhuzamos méréssel kell meghatározni. Lehetőség szerint $K \geq k$ legyen. Az S_{rep}^2 számításának módja a következő:

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (Y_i - \bar{Y})^2}{K - 1} . \quad (7.16)$$

7.2. Taguchi-féle kísérlettervezés

Taguchi [7-4] célja a minőségi módszerek gyártási folyamatba történő beépítése volt. A japán minőségügyi szakembert az ortogonális elrendezések és lineáris gráfok statisztikai elméletének kidolgozásáért 1960-ban Deming díjjal tüntették ki.

Taguchi szerint a minőség hiánya az a veszteség, amelyet a termék a társadalomnak okoz. A veszteséget két kategóriába sorolja:

- A működési változékonyság okozta veszteség.
- Az ártalmas hatások okozta veszteség.

Taguchi a minőségsszabályozást két részre bontja:

- A gyártási folyamaton kívüli minőségsszabályozás (off-line control), amely a következő tevékenységeket foglalja magába: a termék megtervezése, kutatás-fejlesztés, kísérlettervezés és minőségi intézkedések a gyártási folyamat tervezésében.
- A gyártási folyamathoz tartozó minőségsszabályozás (on-line control), amely a gyártás közbeni minőségsszabályozási tevékenységekre terjed ki.

Az alternatív (megy-nem megy) átvételi kritérium esetén a minőségnek csak két típusa létezik. Ebben az esetben minden termék egyformán jó, vagy egyformán rossz. Ez nem minősíti megfelelően a világot, hiszen a termék, vagy folyamat, amikor a minimum, vagy a maximum határon van, közelebb áll a hibás állapothoz, mint a megfelelőhöz.

Ha a minőség a célérték esetén a legjobb, akkor a minőség-veszteséget úgy értékeljük, mint a célértéktől való eltérés fokának függvényét. A minőség ezért a jellemzőnek a célértékétől való eltérés függvényeként értékelhető. A termékminőség tehát nemcsak a jellemzőknek az előírt határon belül lévőségét, hanem a jellemzőknek a célérték körüli állandóságát is jelenti.

A minőség veszteség függvény a következő képlettel fejezhető ki:

$$L(Y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n K \cdot (Y_i - M_i)^2}{n} \quad (7.17)$$

ahol: $L(y)$ - a veszteség mértéke,

Y_i - a minőség jellemző értéke,

M_i - az y célértéke,

K - konstans,

n - a mérések (vizsgált termékek) száma.

E négyzetes függvény minimumát $Y_i = M_i$ esetén veszi fel.

Az ortogonális elrendezésen alapuló kísérlettervezés [7-5, 7-6] oly módon szolgáltatja a kísérleti eredményeket, hogy egy adott tényező változtatásának hatása a többi hatástól elkülöníthető legyen. Ortogonális elrendezés alkalmazásakor különböző szintszámú változók könnyedén jelölhetők ki kevés számú kísérlettel. Az ortogonális elrendezésből származó legnagyobb nyereség a kísérleti határok megbízhatósága, vagy a magas fokú reprodukálhatóság. Ajánlott, hogy annyi változót vonjunk be a kísérletbe, amennyi csak lehetséges.

A következő két-szintű ortogonális elrendezés az $L_8(2^3)$ elrendezés, ahol 3 tényezőt vizsgálunk, mindegyiket 2 szinten. A kísérletek száma 8. A feladat megoldásához a következő táblázatot kell kitölteni (7-3. táblázat):

Kísérletek sorszáma	Faktorok szintjei			Célfüggvény értékek			
	A	B	C	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	$\sum_{p=1}^3 Y_{ip}$
1	1	1	1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	$\sum_{p=1}^3 Y_{1p}$
2	1	1	2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	$\sum_{p=1}^3 Y_{2p}$
3	1	2	1	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	$\sum_{p=1}^3 Y_{3p}$
4	1	2	2	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	$\sum_{p=1}^3 Y_{4p}$
5	2	1	1	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	$\sum_{p=1}^3 Y_{5p}$
6	2	1	2	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	$\sum_{p=1}^3 Y_{6p}$
7	2	2	1	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}	$\sum_{p=1}^3 Y_{7p}$
8	2	2	2	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}	$\sum_{p=1}^3 Y_{8p}$

7-3. táblázat: A feldolgozandó adatok

A táblázat adatai alapján a feladat megoldásának menete a következő:

1. Összegezzük az egyes paraméterkombinációval elkészített párhuzamos mérési

eredményeket az adott i kísérleti beállításban ($\sum_{p=1}^3 Y_{ip}$),

ahol: i : a kísérleti beállítások sorszáma,

p : a párhuzamos mérések száma.

2. Képezzük az $a = \sum_{j=1}^m (\sum_{p=1}^3 Y_{jp})_j$ összeget, (7.18)

ahol: m : azon mérések száma, ahol az adott faktor az 1. szinten van.

$$3. \text{ Képezzük a } b = \sum_{k=1}^l \left(\sum_{p=1}^3 Y_{ip} \right)_k \text{ összeget,} \quad (7.19)$$

ahol: l : azon mérések száma, ahol az adott faktor a 2. szinten van.

Két-szintű teljes ortogonális elrendezés esetén fennáll, hogy $m + l = 8$.

$$4. \text{ Képezzük a } c = a / z \text{ átlagértéket} \quad (7.20)$$

ahol: $z = m \cdot p$. A „c” érték megmutatja, hogy az adott faktor 1. szintű beállítása esetén milyen átlagos célfüggvény értéket eredményez, miközben a többi faktor értékét változtatjuk.

$$5. \text{ Képezzük a } d = b / v \text{ átlagértéket,} \quad (7.21)$$

ahol: $v = l \cdot p$. A „d” érték megmutatja, hogy az adott faktor 2. szintű beállítása esetén milyen átlagos célfüggvény értéket eredményez, miközben a többi faktor értékét változtatjuk.

6. Képezzük az átlagok különbségét: $d - c$.

7. Az eltérések négyzetösszegének (SS) kiszámítása két szint esetén a következő képletre egyszerűsödik:

$$SS = \frac{(d - c)^2}{N}, \quad (7.22)$$

ahol: N - a mérések (kísérletek) száma. Az SS érték megmutatja, hogy az adott faktor hatása a célfüggvény értékére mennyire jelentős.

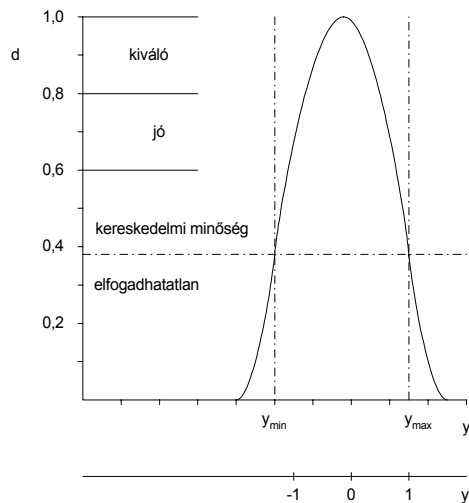
A d és c átlagérték különbsége alapján a következő megállapítások tehetők:

- ha $d - c \ll 0$, akkor az 1. szint alkalmazása optimális,
- ha $d - c \approx 0$, akkor egyéb szempont(ok) alapján kell a két szint között dönteni,
- ha $d - c \gg 0$, akkor a 2. szint alkalmazása optimális.

7.3. A Harrington-féle módszer

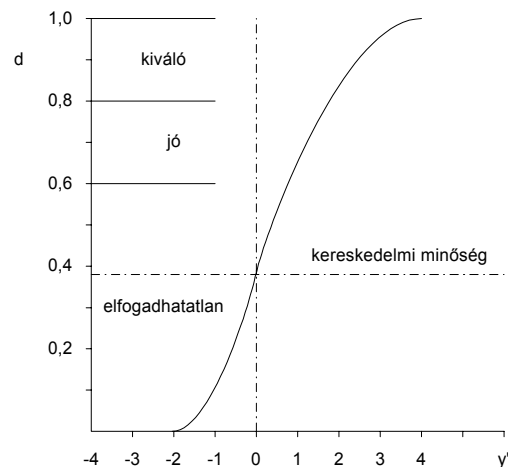
A gyakorlatban, különösen termékek minőségének javítására irányuló kísérleteknél, a célfüggvény (pl. a termék minősége) egyetlen adattal nem jellemezhető. A több, különböző mértékegységben kifejezett és különböző súlyokkal figyelembe veendő jellemző kombinációjára dolgozta ki Harrington [7-7] a kívánatossági függvényt (desirability function), melyben bonyolult lineáris és exponenciális transzformációkat alkalmazott. Az általa javasolt függvény a (0, 1) intervallum felosztásával különböző számértékekhez, különböző minőségi fokozatokat rendelt, a következő szerint:

- 1 elvi határérték, amelyen túl a minőség már nem javítható,
- $1 - 0,8$ kiváló (a termék a kereskedelmi minőséget messze meghaladja)
- $0,8 - 0,63$ jó (a kereskedelmi minőségnél jobb),
- 0,63 jó (kereskedelmi minőségű),
- $0,63 - 0,37$ elfogadható,
- 0,37 elfogadási határérték,
- $0,37 - 0$ elfogadhatatlan,
- 0 elvi alsó határérték.



7-1. ábra

A d-függvény értéke kétoldali elfogadási korlát esetén



7-2. ábra

A d-függvény értéke egyoldali elfogadási korlát esetén

A d-függvény értéke kétféleképpen számítható ki. Ha a vizsgált tulajdonságra az elfogadási korlát kétoldali (alsó és felső határ van) (7-1. ábra) :

$$d_i = e^{-(|y_i|)^{n_i}}, \quad (7.23)$$

ahol y'_i az y_i függő változó lineáris függvénye:

$$y'_i = \frac{2y_i - (y_{\max} + y_{\min})}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (7.24)$$

$y'=1$, ha $y=y_{\max}$ a felső határ, és $y'=-1$, ha $y=y_{\min}$ az alsó határ, n_i pozitív szám (nem szükségképpen egész).

Az n_i kitevő értéke kiszámítható, ha d_i értéke egy további y'_i helyen megadható, pl. ha a $d=0,8$ kiválósági határt y_i (ill. y'_i) valamely értékéhez rögzítjük:

$$n_i = \frac{\ln\left(\ln \frac{1}{d_i}\right)}{\ln|y'_i|}. \quad (7.25)$$

Ha a vizsgált tulajdonságra egyoldali elfogadási korlát (7-2. ábra) érvényes ($y \leq y_{\max}$ vagy $y \geq y_{\min}$), a következő függvény alkalmazható:

$$d_i = e^{-(e^{-y'_i})}, \quad (7.26)$$

ahol y'_i az y_i tulajdonságnak lineáris (vagy nemlineáris) függvénye. A lineáris $y' = b_0 + b_1 \cdot y$ függvény b_0 és b_1 paramétereinek meghatározásához két összetartozó y , d értékpár szükséges.

Az összetett célfüggvény a komponensekre vonatkozó d értékek geometriai átlagolásával kapható:

$$D = \sqrt[q]{d_1 d_2 \dots d_q}, \quad (7.27)$$

ahol q a célfüggvénykomponensek (a vizsgálandó tulajdonságok) száma. A D függvény ugyanolyan tulajdonságú, mint d_i komponensei, egyes értékei ugyanúgy értelmezhetők – így használható optimum keresésére. D értéke akkor és csak akkor nagy, ha egyik d_i komponens se kicsi, a geometriai átlagolás következtében a kisebb d értékek súlya jelentős, vagyis kompromisszumot ad a részcélok között. Figyelembe véve korlátait ($0 \leq D \leq 1$), bármilyen matematikai és statisztikai kezelésre ugyanúgy alkalmas, mintha egyetlen tulajdonság lenne. Felvethető, hogy az egyes y tulajdonságokból számított d értékeket az átlagolásnál különböző súllyal (hatványkitevővel) kellene figyelembe venni. Ez azonban nem jelent mást, mint a $d(y')$ függvény megfelelő megválasztását: a kritikusabb tulajdonságokra meredekebb, a kevésbé kritikusakra kevésbé meredek görbét kell választani (ez az n_i , ill. a b_i paraméterekkel szabályozható).

8. A kísérleti eredmények feldolgozása

8. 1. Egyszempontú optimalizálás

8. 1. 1. A kísérleti eredmények feldolgozása Box-Wilson féle módszerrel

A kutatómunka kitűzött célja a hagyományos mechanikai szemlélet elsődlegességének érvényesítése miatt a pontkötések teherbírásának maximalizálása volt. Első célfüggvénynek az F_{nysz} erőt választottam, így a feladat megtalálni azt az (I_h^*, t_h^*, F_e^*) paraméterkombinációt, melyre fennáll, hogy

$$F_{nysz}(I_h^*, t_h^*, F_e^*) \geq F_{nysz}(I_h, t_h, F_e)_i, \quad (8.1)$$

ahol $i=1 \dots n$. Az n a kísérletek számát jelöli, amely jelen esetben 8.

A 7.1. alfejezetben ismertetett regressziós polinom előállítása és a hozzá kapcsolódó statisztikai számítások meglehetősen számításigényesek. A számítások elvégzéséhez azonban rendelkezésemre állt a Mechanikai Technológiai Tanszéken kifejlesztett BOXWILSN nevű program V. 2.1 verziója, amely a kísérleti adatokból (változók) és eredményekből (F_{nysz}) a szükséges műveleteket elvégezve szolgáltatja a rész- és végeredményeket.

A számítások eredményeit a 8-1. táblázatban foglaltam össze. A kapott adatok szerint az egyes beállítások szórásai homogének (Cochran), a kevésbé meghatározó Fisher próba kedvezőtlen eredményeire a minimális szórás nagyon alacsony értéke a magyarázat, ami a jó beállításokban a hegesztőgép reprodukálási képességét dicséri és a lemezfelületek gondos tisztításából is következik.

Próba	Számított érték	Szabadságfok	Táblázati érték	A próba eredménye
Cochran	0,3549	2,8	0,5157	A szórások homogének
Fisher	77,2502	2,2	19,00	A minimális szórás nagyon kicsi
Fisher	5,3346	4,8	4,12	A modell nem adekvát
Student	$a_0 = 12,0083$ $a_1 = 4,4417$ $a_2 = 2,525$ $a_{12} = -1,525$	16	2,12	Az együtthatók szignifikánsak
Student	$a_3 = -0,65$ $a_{13} = 0,65$ $a_{23} = 0,4667$ $a_{123} = 0,3833$	16	2,12	Az együtthatók nem szignifikánsak

8-1. táblázat: Az első kísérleti terv statisztikai próbái

Kissé több gondot jelent a modell Fisher szerinti adekvátsági próbája, amelynél a számított érték (5,3346) és a táblázatbeli érték (4,12) közel van ugyan egymáshoz, de előbbi nagyobb az utóbbinál, ezért a modell a választott szintnél (95%) csak kisebb megbízhatósággal adekvát. Ebből következik, hogy a kísérleti beállítások újratervezésénél a variációs intervallum szűkítése lenne kívánatos. A regressziós polinom együtthatóinak szignifikancia-határa 95 %-os szinten $a_{cr} = 0,7819$, az ennél kisebb a_3, a_{13}, a_{23} és a_{123} együtthatók nem jelentősek. A nem szignifikáns együtthatókban mindegyikben jelen van a 3. paraméter (F_e), amelyből az a következtetés vonható le, hogy ennek a nyíró-szakítóerőre gyakorolt befolyása az adott intervallum szélességénél messze elmarad a hőfejlődést meghatározó paraméterektől (I_h és t_h). A nem szignifikáns a együtthatók elhagyása után a regressziós egyenlet a standardizált változókkal a következő alakot veszi fel:

$$Y = 12,0083 \cdot X_0 + 4,4417 \cdot X_1 + 2,525 \cdot X_2 - 1,525 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (8.2)$$

Az előbbi egyenlet transzformálásával a fizikai változókkal felírt összefüggést is előállítottam:

$$F_{nysz} = -2,9944 + 0,4486 \cdot I_h + 0,2533 \cdot t_h - 0,00508 \cdot I_h \cdot t_h. \quad (8.3)$$

Ez az összefüggés közvetlen számításra is alkalmas. Az F_{nysz} erő növeléséhez a paraméterek legnagyobb gradiens irányában (leghatékonyabb irány) történő változtatására van szükség. Az egyenletből a leghatékonyabb irány egységvektora a következő:

$$\vec{e}_{grad} = 0,8693 \vec{e}_I + 0,4942 \vec{e}_t. \quad (8.4)$$

ahol: $\vec{e}_{grad}; \vec{e}_I; \vec{e}_t$: egységvektorok.

A tervközéppontból a leghatékonyabb irányban $\lambda \cdot \vec{e}_{grad}$ lépésekkel haladva új kísérleteket végeztem, amelyek eredményei a 8-2. táblázatban találhatók.

λ	I_h [kA]	t_h [periódus]	F_e [kN]	F_{nysz1} [kN]	F_{nysz2} [kN]	F_{nysz3} [kN]
2	13.7	26	2.83	14.8	16.0	14.9
4	15.4	27	2.66	15.1	14.6	15.3
6	17.1	28	2.49	18.7	17.4	17.9
8	18.8	29	2.32	18.7	17.5	17.7
10	20.5	30	2.15	Nem kivitelezhető	Nem kivitelezhető	Nem kivitelezhető

8-2. táblázat: A leghatékonyabb irányban elvégzett kísérletek eredményei

A gradiens irányban a nyíró-szakítóerők valóban nőttek egészen 18,7 kN maximum értékig, de az ezt követő lépés már a hegesztő elektródok lemezhez hegedése miatt nem volt kivitelezhető. A 16-19 kN közötti nyíró-szakítóerőkhöz elfogadhatatlanul mély benyomódás ($h_b > 1,0$ mm) és nagy elektródkopás tartozik. Figyelembe véve a technológiai követelményeket – melyek a 2. fejezetben kerültek ismertetésre (azaz a minimális benyomódás és deformáció) – e jellemzők a végeredmény szempontjából elfogadhatatlanok. Az önmagában törőerő-maximumra való optimalizálás a ponthegecsztett kötéseknél a minőség komplex követelményeit figyelembe véve nem megfelelő.

8. 1. 2. A kísérleti eredmények feldolgozása Taguchi módszerrel

Az eredmények feldolgozása a 7.2. fejezet alapján történik, amely szerint az alábbi két táblázatot kell kitölteni (8.3. és 8.4 táblázat). A Taguchi féle módszerrel tehát arra keressük a választ, hogy az egyes célfüggvény-alkotók milyen hatással vannak a célfüggvényre. A kapott eredményt a Box-Wilson féle módszerrel történő elemzés ellenőrzésének is tekinthetjük.

Kísérletek sorszáma	Faktorok szintjei			Célfüggvény értékek			
	A	B	C	Y1	Y2	Y3	ΣY
1	1	1	1	3,6	4,2	6,9	14,7
2	1	1	2	0,5	2,4	3,5	6,4
3	1	2	1	13,4	12,7	12,4	38,5
4	1	2	2	10,5	9,8	10,9	31,2
5	2	1	1	16,3	16,1	16,5	48,9
6	2	1	2	13,4	15,1	15,3	43,8
7	2	2	1	17,0	15,9	16,9	49,8
8	2	2	2	18,5	17,1	19,3	54,9

8.3. táblázat: Az input paraméterek

Jellemzők	Faktorok		
	A	B	C
a	90,8	113,8	151,9
b	197,4	174,4	136,3
c	7,56	9,48	12,65
d	16,45	14,53	11,35
d-c	8,89	5,05	-1,3
SS	3,29	1,06	0,07

8.4. táblázat: Az output paraméterek

A d-c értékek alapján a legjelentősebb faktor az „A” faktor, ami nem más, mint a hegesztő áramerősség, pozitív értéke azt mutatja, hogy a felső szinthez közeli érték az optimális. A „B” (hegesztési főidő) faktor kevésbé jelentős, a pozitív érték itt is a felső szinthez közeli értékre történő beállításra utal. A „C” (elektrod-összeszorító erő) hatása még kisebb, negatív értéke pedig az alsó szinthez közeli érték beállítására utal.

Összegzésként elmondható, hogy a kapott eredmény egyezik a Box-Wilson féle módszerrel kapott eredménnyel. A legkedvezőbb nyíró-szakítóerőt eredményező beállításnál a nagy hegesztő áramerősség és a kis elektrod-összeszorító erő a nagy érintkezési ellenállások miatti hirtelen nagy hőfejlődést és az ezt kísérő hőtágulás eredményeként impulzusszerű fröcskölést

eredményez. Még kedvezőtlenebb esetben a lemezek elektródhoz való hozzáhegedése említhető.

Mindezek alapján az a következtetés vonható le, hogy az ellenállás-ponthegesztés technológiájának optimalizálására a nyíró-szakítóerő egymagában nem alkalmas, mert a teherbírási optimum az adott anyagnál és lemezméretnél nehezen elkészíthető, esztétikailag erősen kifogásolható paraméter-tartományba esik. A technológia optimalizálásánál komplex célfüggvényre kell áttérni, amely szilárdsági és geometriai szempontok egyidejű figyelembevételével reális optimumot eredményezhet.

8. 2. Többszemponútú optimalizálás

8. 2. 1. Optimalizálás összetett célfüggvénnyel

Mivel az egycélú optimalizálás olyan eredményt szolgáltatott, ami egy adott szempontból jól minősít, de más szempontból kifogásolható eredményre vezet, így érdemes többcélú optimalizálásra áttérni [8-1 - 8-7], amikor egy egyváltozós célfüggvény helyett többváltozós (összetett) célfüggvény feltételes szélsőértékét szeretnénk egyidejűleg elérni. A leggyakoribb alkalmazási esetekben a következő jellemzők közül választhatunk:

1. Szilárdsági jellemzők:
 - nyíró-szakítóerő,
 - szakítószilárdság,
 - kifáradási határ,
 - tartamszilárdság,
 - keménység.
2. Alakváltozási jellemzők:
 - szakadási nyúlás,
 - kontrakció,
 - hajlítási szög.
3. Statikus törésmechanikai jellemzők:
 - fajlagos törési munka,
 - törési szívósság,
 - kritikus repedésszétnyílás.
4. Dinamikus törési ellenállás:
 - Charpy féle ütőmunka,
 - dinamikus törési energia,
 - dinamikus törési szívósság.
5. Egyéb mérnöki kötéstulajdonságok:
 - korrózióállóság,
 - repedésmentesség,
 - esztétikai jellemzők.
6. Gazdaságossági jellemzők [8-8]:
 - hegesztési idő,
 - anyag-, energia-, és bérköltségek,
 - gép- és készülékköltségek,
 - előkészítő- és utóműveletek költségei.
7. Geometriai jellemzők:
 - elektródátmérő,
 - lemezszétnyílás,
 - lencseátmérő,
 - lencse magasság,
 - benyomódási mélység.

Céltulajdonságnak a legelfogadottabb szilárdsági paraméter (F_{nysz}) megtartása mellett az esztétikai szempontot jól kifejező, könnyen mérhető benyomódást (h_b) választottam. Az adott kombináció célja, hogy a lehető legkisebb benyomódás mellett a kötés a lehető legszilárdabb legyen (ily módon a minimális deformáció is biztosítható):

$$F_{nysz} \Rightarrow \max ,$$

$$h_b \Rightarrow \min .$$

Mivel a vizsgálati tartományban az I_h és t_h hőbevitelt meghatározó faktorok függvényében F_{nysz} növekvő függvény, a szélsőértékes görbe előállításához a hőbevitellel csökkenő h_b függvényre van szükség. Ezt a benyomódásnál megmaradó lemezzvastagság

$$s_m = s - h_b , \quad (8.5)$$

ahol: s : lemezzvastagság,

h_b : elektród-benyomódás a lemezbe,

mint geometriai jellemző jól kifejezi. Így az $F_{nysz} = f(I_h, t_h)$ növekvő függvény és a $s_m = f(I_h, t_h)$ csökkenő függvény szorzatfüggvénye várhatóan maximumos lesz, ezért célfüggvénynek alkalmas. Az új célfüggvény tehát:

$$Y = F_{nysz} (s - h)^n \text{ [Nmm}^n\text{]}, \quad (8.6)$$

ahol az $n \leq (\geq) 1$ benyomódási kitevővel a két céltulajdonság relatív aránya változtatható. Jelen esetben az n kitevő értékét 1-re választottam, vagyis első közelítésben a két szempontot egyenértékűnek tekintem. Újra elvégezve a statisztikai számításokat, az új célfüggvényre a 8-5. táblázatban összefoglalt jellemzőket kaptam.

Próba	Számított érték		Szabadságfok	Táblázati érték	A próba eredménye
Cochran	0,4542		2 , 8	0,5157	A szórások homogének
Fisher	80,7798		2 , 2	19,00	A minimális szórás nagyon kicsi
Fisher	2,9451		4 , 8	3,838	A modell adekvát
Student	a_0	15,7445	16	2,12	Az együtthatók szignifikánsak
	a_1	1,9246			
	a_2	1,5655			
	a_3	-2,2185			
	a_{12}	-5,3396			
Student	a_{13}	0,4006	16	2,12	Az együtthatók nem szignifikánsak
	a_{23}	0,731			
	a_{123}	0,5719			

8-5. táblázat: A módosított kísérleti terv statisztikai próbái

A Cochran próba szerinti homogén szórások mellett figyelmet érdemel, hogy az új modell (a választott 95 %-os megbízhatósági szinten) biztosan adekvát. Érdekes, de nem meglepő újdonság, hogy a benyomódásban jelentős szerepet játszó elektród-összeszorítóerő együtthatója ($a_3 = -2,2185$) abszolút értékben nagyobb, mint a szignifikancia határ ($a_{cr} = 1,3499$), ezért az együttható most szignifikáns. Az interakciót kifejező a_{13} , a_{23} és a_{123} együtthatók ezúttal is elhanyagolható hatásúak.

A célfüggvény a standardizált és a fizikai változókkal a következő alakokat veszi fel:

$$Y = 15,744 + 1,9246 X_1 + 1,5655 X_2 - 2,2185 X_3 - 5,3396 X_1 \cdot X_2, \quad (8.7)$$

$$F_{nysz} \cdot (s-h) = 1,27666 + 0,66226 I_h + 0,52324 t_h - 1,10925 F_e - 0,0178 I_h \cdot t_h. \quad (8.8)$$

Sorszám	X_1	X_2	X_3	Az összetett célfüggvény mért értéke: kNmm	Az összetett célfüggvény számított értéke: kNmm	Residuum: kNmm	Residuum négyzet: MN^2mm^2
1	-1	-1	-1	7,128	9,133	2,005	4,0214
	-1	-1	-1	8,358	9,133	0,775	0,6011
	-1	-1	-1	13,593	9,133	4,46	19,8886
2	-1	-1	+1	0,975	4,696	3,721	13,8483
	-1	-1	+1	4,68	4,696	0,016	0,0003
	-1	-1	+1	6,755	4,696	2,059	4,2381
3	-1	+1	-1	24,254	22,944	1,31	1,7174
	-1	+1	-1	22,733	22,944	0,211	0,0443
	-1	+1	-1	22,568	22,944	0,376	0,141
4	-1	+1	+1	18,69	18,507	0,184	0,0337
	-1	+1	+1	17,248	18,507	1,258	1,5838
	-1	+1	+1	18,857	18,507	0,35	0,1228
5	+1	-1	-1	24,45	23,662	0,788	0,6215
	+1	-1	-1	23,667	23,662	0,005	0
	+1	-1	-1	25,575	23,662	1,913	3,6608
6	+1	-1	+1	17,42	19,225	1,805	3,2568
	+1	-1	+1	18,422	19,225	0,803	0,6443
	+1	-1	+1	19,125	19,225	0,1	0,0099
7	+1	+1	-1	15,3	16,114	0,814	0,6618
	+1	+1	-1	12,72	16,114	3,394	11,5159
	+1	+1	-1	15,21	16,114	0,904	0,8163
8	+1	+1	+1	12,95	11,677	1,273	1,6218
	+1	+1	+1	13,68	11,677	2,003	4,014
	+1	+1	+1	13,51	11,677	1,833	3,3617

8-6. táblázat: A mért és a számított értékek

Az új célfüggvénynek az egyes kísérleti beállításokban mért és számított értékeit a 8-6. táblázatban adom meg. Megállapítható az adatokból, hogy az összetett célfüggvény legnagyobb értékét az 5 jelű beállítás adja.

Az eredmény fizikai szempontból annyit változott, hogy most az optimumhoz rövid hegesztési főidő tartozik. Így a technológiai munkarend már kedvezőbb, de még mindig nem tekinthető optimálisnak. Ennek magyarázata az, hogy a két célfüggvény értékeinek intervalluma nagyságrendileg jelentősen eltér egymástól - ami egyfajta súlyozást jelent a két mennyiség között a nagyobb intervallumú jellemző felé - így a módszer nem szolgáltatott reális optimumot. Ennek kiküszöbölésére a Harrington módszer (ld. 7.3. alfejezet), vagy más hasonló stratégiájú módszer [8-6] alkalmas.

A méretezési nyíró-szakítóerő meghatározása

A méretezési nyíró-szakítóerő egy szabványosított korszerű anyagvizsgálati mérőszám, amely kifejezi, hogy a ponthegeesztett kötések szakadása - azonos igénybevételt és a statisztikai változó normális eloszlását feltételezve - az adott megbízhatósággal mely érték felett következik be. Definíció szerint (MSZ 6691/1):

$$F_{nym} = \overline{F_{ny,n}} - t \cdot s^* \quad (8.9)$$

ahol: F_{nym} [kN] : a méretezési nyíró-szakítóerő,

$\overline{F_{ny,n}}$ [kN] : az n elemszámú sokaság átlaga,

s^* [kN] : az n elemszámú sokaság korrigált empirikus szórása,

t : $f = n - 1$ szabadságfokhoz és a választott megbízhatósági szinthez tartozó Student (Gosset) tényező.

A nyíró-szakítóerő definiált alsó küszöbértékének, mint méretezési jellemzőnek meghatározásához és másodlagos céllal a ponthegeesztőgép reprodukciós jellemzőjének vizsgálatához az 5. jelű (optimumként kezelt) beállításhoz tartozó paraméter kombinációval 100 kötést készítettem. A kötések nyíró-szakítóereje a 8-7. táblázatban található.

16.3	16.1	16.5	16.6	16.2	16.3	15.8	16.2	16.5	16.5
16.5	16.3	16.3	16.3	16.4	16.4	15.9	16.5	16.2	16.2
16.4	16.3	16.2	16.5	16.7	16.4	16.5	16.3	16.4	16.3
16.4	16.2	16.2	16.4	16.2	16.6	16.6	16.2	16	16.3
16.1	16.5	16	16.1	16.1	16.1	16.5	15.8	16.4	16.1
15.9	16.4	16.2	16.3	16.7	16.4	16.3	16.6	16.2	16.1
16.4	16.5	16.2	16.4	16.2	16.6	16.2	16.8	16.6	16.4
16.7	16.4	16.5	16.1	16.2	16.6	16.5	16.1	16.3	15.7
16.3	16.6	16.3	16.3	16.1	16.3	16.5	16.4	16.6	16.3
16.1	16.5	15.7	16.3	15.9	16.5	16.6	16.7	16.3	16.1

8-7. táblázat: A 100 elemű minta nyíró-szakítóerő értékei

A 100 elemű minta statisztikai jellemzői a következők:

$$\overline{F_{ny,100}} = 16,317 \text{ kN},$$

$$S^* = 0,2240781$$

A 97,5 %-os egyoldali megbízhatósági szinthez és az $f=100-1=99$ szabadságfokhoz tartozó Student tényező :

$$t(97,5 \%; 99) = 1,987.$$

A méretezési nyíró-szakítóerő

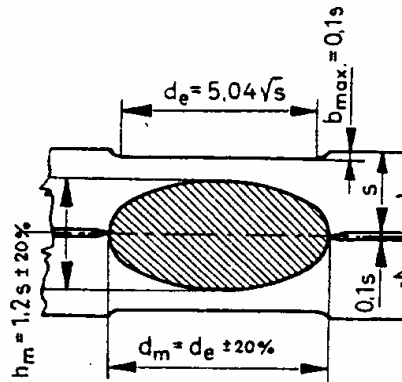
$$F_{nym} = 15,871 \text{ kN}.$$

A hegesztések reprodukálhatóságát az F_{nysz} erők alacsony szóródása jellemzi. A relatív szórás ugyanis mindössze:

$$s_{rel} = \frac{S^*}{\overline{F_{nysz}}} \cdot 100 \% = 1,3728 \% .$$

8. 2. 2. A kísérleti eredmények feldolgozása Harrington módszerrel

Az előző két kísérlettervezési módszer eredménye alapján először a vizsgált tulajdonságokra (célfüggvényekre) kétoldali elfogadási korlátot írunk elő, ezek után a célváltozókat matematikailag jobban összehasonlíthatóvá tesszük. Ezt az RWMA ajánlások [8-9] alapján meg is tehetjük (ld. 8-1. ábra).



8-1. ábra

Lágycél ponthegesztett kötés ideális méretei [8-10]

A feltételek tehát az alábbiak:

1. A nyíró-szakítóerő (F_{nysz}) értéke 2 mm vastag lemezek esetén:

$$15 \text{ kN} \pm 20 \%$$

2. A maximális elektród-benyomódás értéke:

$$h_b = 0,1 \cdot s, \text{ ahol } s \text{ az összehesztendő lemezek vastagsága.}$$

Az egyes célfüggvény-értékek optimális tartományát a 8-7. táblázat foglalja össze:

Célfüggvény	Mértékegység	Optimális tartomány
Nyíró-szakítóerő	kN	$12 \leq F_e \leq 18$
Elektród-benyomódás	mm	$0 \leq h_b \leq 0,2$

8-7. táblázat: A célfüggvény-értékek optimális tartományai

A 7.3. alfejezetben leírt gondolatmenet alapján a fenti optimalizálási feladatot megoldjuk. A nyíró-szakítóerő értékeire vonatkozó számítási eredményeket a 8-8. táblázatban foglaltam össze.

A célfüggvény maximális értéke a 6. beállítás esetén érhető el, amely a kemény munkarendhez tartozó paraméterkombináció.

Sorszám	$\bar{F}_{nyz_i}$; kN	$\bar{F}'_{nyz_i} = \frac{2 \cdot \bar{F}_{nyz_i} - (F_{nyz_{max}} + F_{nyz_{min}})}{F_{nyz_{max}} - F_{nyz_{min}}}$	$d_1 = e^{- \bar{F}'_{nyz_i} }$
1	4,9	-3,3667	0,0345
2	2,13	-4,29	0,0137
3	12,83	-0,7233	0,4851
4	10,4	-1,5333	0,2158
5	16,3	0,4333	0,6484
6	14,6	-0,1333	0,8752
7	16,6	0,5333	0,5867
8	18,3	1,1	0,3329

8-8. táblázat: A nyíró-szakítóerő értékeire vonatkozó számítási eredmények

A benyomódás értékeire vonatkozó számítási eredményeket a 8-9. táblázat tartalmazza:

Sorszám	$\bar{h}_i$; mm	$\bar{h}'_i = \frac{2 \cdot \bar{h}_i - (h_{max} + h_{min})}{h_{max} - h_{min}}$	$d_2 = e^{- \bar{h}'_i }$
1	0,02	-0,8	0,4493
2	0,06	-0,4	0,6703
3	0,19	0,9	0,4066
4	0,24	1,4	0,2466
5	0,49	3,9	0,0202
6	0,74	6,4	0,0016
7	1,13	10,3	0,00003
8	1,27	11,7	0,000008

8-9. táblázat: A benyomódás értékeire vonatkozó számítási eredmények

A célfüggvény maximális értékét a 2. beállítás adja, amely a kicsi hegesztő áramerősség, rövid hegesztési főidő és nagy elektród-összeszorító erő paraméterkombinációt jelenti. Ezen eredmény is a már korábban (8.1.1. és 8.1.2. alfejezet) megállapításra kerülő tényt támasztja alá, miszerint az elektród-összeszorító erő negatív irányban befolyásolja a célfüggvényt.

Végül az összetett szemléletű optimalizálás eredményeit a 8-10. táblázat ismerteti:

Sorszám	d_1	d_2	$\sqrt{d_1 d_2}$
1	0,0345	0,4493	0,1245
2	0,0137	0,6703	0,0958
3	0,4851	0,4066	0,4441
4	0,2158	0,2466	0,2307
5	0,6484	0,0202	0,1144
6	0,8752	0,0016	0,0381
7	0,5867	0,00003	0,0044
8	0,3329	0,000008	0,0017

8-10. táblázat: Az összetett szemléletű optimalizálás eredményei

A 8-10. táblázatból kiolvasható, hogy optimális eredményt kis hegesztő áramerősség, hosszú hegesztési főidő és kis elektród-összeszorító erő értékek alapján kapunk (3. beállítás). Összehasonlítva az előző alfejezet eredményeivel az tapasztalható, hogy a nagy hegesztő áramerősségből kicsi, míg a rövid hegesztési főidőből hosszú lett. Ez a hőbevitel mértékét lecsökkentette, illetve jelentősen lecsökkentette az időegység alatt bevitt hőmennyiséget.

Ez a paraméterkombináció egyike a hegesztés szempontjából három legkedvezőbb beállításnak (ld. 2-1. táblázat), negatívumaiként említhető, hogy a nyíró-szakítóerő kisebb, a kötés porozitásának mértéke nagyobb, mint a 2-1. táblázatban szereplő első két paraméterkombináció esetén. Ennek oka az lehet, hogy az elektród-benyomódás értékei nagyon szigorú feltételnek bizonyulnak a szilárdsági jellemző elvárt értékével szemben.

Azért, hogy minél pontosabb eredményt kaphassunk, ne csak az axiális (z) irányú, hanem a radiális irányú lencseméret hatását is figyelembe tudjam venni, újabb kísérleteket végeztem a hegesztett pontkötés átmérőjének meghatározására. A 8-11. táblázat a mért értékeket foglalja össze.

Sorszám	I_h [kA]	t_h [periódus]	F_e [kN]	$\overline{d_l}$ [mm]	s [mm]
1	8	10	2	6,7	0,73
2	8	10	4	6,1	0,31
3	8	40	2	7,2	0,22
4	8	40	4	7,1	0,21
5	16	10	2	8,0	0,32
6	16	10	4	8,5	0,19
7	16	40	2	9,5	0,89
8	16	40	4	10,2	0,75

8-11. táblázat: A lencseátmérő értékei

Az optimalizálás elvégzéséhez szükségünk van az optimális paramétertartomány meghatározására (8-12. táblázat), mely a következő:

Az ellenállás-ponthegesztett lencse átmérője:

$$d_e \pm 20 \%, \text{ ahol } d_e \text{ az elektród átmérője.}$$

Számszerűsítve:

Célfüggvény	Mértékegység	Optimális tartomány
Lencse-átmérő	mm	$5,6 \leq d \leq 8,4$

8-12. táblázat: A pontátmérő optimális tartománya

Az optimalizálást elvégezve először a lencseátmérő alapján (8-13. táblázat), majd a bővített célfüggvénnyel a következő eredményeket kapjuk (8-14. táblázat):

Sorszám	d_1 [mm]	$\bar{d}_1' = \frac{2 \cdot \bar{d}_1 - (d_{l\max} + h_{l\min})}{h_{l\max} - h_{l\min}}$	$d_3 = e^{- \bar{d}_1' }$
1	6,7	-0,2143	0,8071
2	6,1	-0,6429	0,5257
3	7,2	0,1429	0,8668
4	7,1	0,0714	0,9311
5	8,0	0,7143	0,4895
6	8,5	1,0714	0,3425
7	9,5	1,7857	0,1677
8	10,2	2,2857	0,1017

8-13. táblázat: A lencse-átmérő értékeire vonatkozó számítási eredmények

Sorszám	d_1	d_2	d_3	$\sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}$
1	0,0345	0,4493	0,8071	0,2321
2	0,0137	0,6703	0,5257	0,1690
3	0,4851	0,4066	0,8668	0,5550
4	0,2158	0,2466	0,9311	0,3673
5	0,6484	0,0202	0,4895	0,1858
6	0,8752	0,0016	0,3425	0,0792
7	0,5867	0,00003	0,1677	0,0149
8	0,3329	0,000008	0,1017	0,0065

8-14. táblázat: A bővített célfüggvény eredményei

Az optimális paraméterkombináció továbbra is a 3. beállítás marad.

d_1	d_2	d_3	$\sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}$
0,3084	0,0049	0,0995	0,0535

8-15. táblázat: A középponti értékkel elvégzett számítási eredmények bővített célfüggvény esetén

A Harrington féle módszer eredményeként kapott optimális paraméterkombináció már szerepel a 2-1. táblázat optimális paraméter kombinációi között. Az optimális paraméterkombinációval történő hegesztés munkarendje megfelel a lágy munkarend paraméterkombinációjának. Ennek magyarázata, hogy a geometriai átlagolás következtében a kisebb „d” értékek súlya jelentős. A 8-15. táblázat alapján látható, hogy jelen esetben a benyomódás a legjelentősebb tényező a „d” függvény értéke alapján. Ennek eredménye, hogy kívánatos időben elnyújtottan bevinni a hegesztéshez szükséges hőenergiát.

9. A kísérlettervezés eredményeinek összefoglalása

1. A kísérleti eredmények Box-Wilson féle módszerrel történő feldolgozása során azt tapasztaltam, hogy a leghatékonyabb irányban a célfüggvény értékek addig nőttek, amíg az adott paraméterkombinációval készíthető hegesztés – a hegesztő elektród, vagy a hegesztőgép tönkremenetelét elkerülendő – már nem volt kivitelezhető. Hangsúlyozni kell továbbá, hogy a gradiens irányban az elektród-benyomódás értékei jelentősen megnöttek, illetve az elektród jelentős mértékben szennyeződött és kopott. Ezért arra a következtetésre jutottam, hogy a nyíró-szakítóerő maximumra való optimalizálás (maximalizálás) az ellenállás-ponthegeesztett kötéseknél nem szerencsés. Más jellegű, vagy összetett szemléletű célfüggvény definiálására van szükség.
2. A Taguchi féle módszerrel elvégzett számítások eredménye megerősítette a Box-Wilson féle módszerrel kapott eredményt. E módszer alapján történő elemzés eredményei megerősítik azt az 1. pontban megfogalmazott megállapítást, miszerint a nyíró-szakítóerőre történő optimalizálás nem a legjobb stratégia. Megoldásként vagy más jellegű célfüggvényt kell keresni, vagy a már meglévőt kell oly módon korrigálni (összetett célfüggvény), hogy az eredményül kapott paraméterkombinációval megfelelő kötést lehessen létrehozni. Hangsúlyozni kell, hogy nem hibás eredményekről van szó. A kísérletek valóban azt mutatják, hogy a hőbevitel növelésével nő a célfüggvény-érték. A nyíró-szakítóerő értékét nem egyértelműen csökkenti a jelentős benyomódás, ami viszont más szempontokból elfogadhatatlan. Az összetett célfüggvény másik alkotójának így célszerű a maradó anyagvastagságot definiálni, amely a hőbevitel függvényeként szigorúan monoton csökkenő függvény. E két alkotó szorzatfüggvénye várhatóan maximumos lesz.
3. Az összetett célfüggvény alapján történő optimalizálás eredménye technológiai szempontból sokkal kedvezőbb. A kapott paraméterkombináció már beleesik a 1-4. ábra megfelelő kötést biztosító tartományába, azonban a kezdeti nagy hőfejlődést és az ezzel

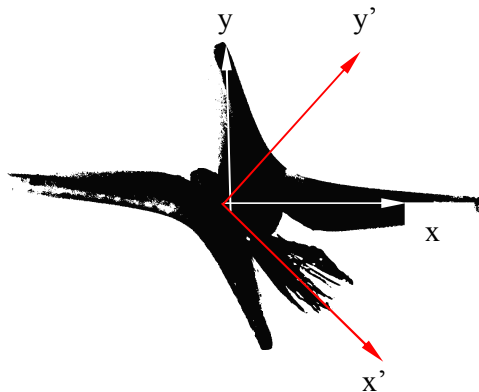
együtt járó fröcskölést még nem kerültük el. Ennek magyarázata, hogy a két célfüggvény értékeinek intervalluma nagyságrendileg jelentősen eltér egymástól, így a módszer nem szolgáltatott reális optimumot. Megoldásként a Harrington féle módszer szolgálhat, mely egyrészt összehasonlíthatóvá teszi a különböző jellegű mennyiségeket, másrészt kifejezetten összetett szemléletű optimalizálásra dolgozták ki.

4. A Harrington féle módszer segítségével elméletileg minden korábban felmerült probléma kiküszöbölhető, mégsem szolgáltatotta a kísérleti eredmények alapján legjobbnak tekintett paraméterkombinációt. Ennek oka, hogy a geometriai átlagolás következtében a kisebb „d” értékek súlya jelentős.
5. Az előző megállapítások alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a kísérlettervezés és a technológia-optimalizálás legfontosabb lépéseként a minőségi jellemző, azaz a célfüggvény helyes megválasztása szükséges. Olyan célfüggvényt kell felállítani, amely komplex módon, egyidejűleg veszi figyelembe az alábbi követelményeket:
 - minél nagyobb terhelhetőség,
 - minél kisebb elektród-benyomódás,
 - lehetőség szerint a fröcskölés elkerülése.
6. Mivel e szempontok jellemző adatai különböző mértékegységekkel szerepelnek, így azokat összehasonlíthatóvá kell tenni. A korábbi fejezetekben bemutatott kísérlettervezési eljárások eredményei alapján erre csak akkor van lehetőség, ha a megfelelő célfüggvény-alkotókat valamilyen formában súlyozzuk. Ezek a súlyok viszont nem általánosíthatóak, hiszen a hegesztéstechnológia erősen berendezésfüggő (áramnem, hűtés módja, összeszorítás módja, a berendezés reagálása a különböző villamos és mechanikai jelenségekre, stb.), továbbá a különböző geometriai és anyagvizsgálati mérőszámokkal jellemzett ellenállás-ponthegesztett lencsék számos különböző paraméter-kombinációval érhetők el. További problémát jelent még, hogy az összetett célfüggvény alkotók értékeinek meghatározása ugyanazon próbatesten nem, vagy csak bizonyos hibával határozható meg (pl. elszakított próbatesten lemérni a geometriai jellemzőket).

10. Az ellenállás-ponthegesztett kötés minősítése a nyíró-szakító vizsgálat során bekövetkező törés jellege alapján

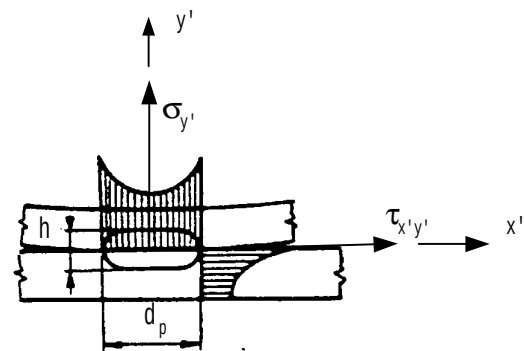
10. 1. Célkitűzés

A jelen fejezet alapját képező kutatómunka célja az ellenállás-ponthegesztett kötések nyíró-szakító vizsgálata során fellépő tönkremenetel elemzése különböző kötés-geometriai jellemzők esetén. A geometriai alakot a heglencse mérete jellemzi, mivel a törés és az ezzel együtt járó jelenségek (elfordulás, elhajlás) szempontjából nem közömbös, hogy a heglencse milyen méretű és alakú. Mindent összevetve olyan célfüggvény definiálható, mely a korábbi fejezetek célfüggvény-alkotóit egyidejűleg, egy adott jelenség, a nyíró-szakítóvizsgálat közbeni törés leírásával tudja figyelembe venni.



10-1. ábra

A terhelés hatására deformálódó pontkötés



10-2. ábra

Feszültségcsúcsok a varrat széleinél

A pontkötés szilárdságának a meghatározása az 10-1. ábrán látható módon történik. A pontkötés nem tiszta nyírásnak, hanem összetett igénybevételnek van kitéve, mivel a terhelés következtében az átlapolási sík kissé elfordul. A jelenséget az xy koordináta helyett így célszerű az elforgatott $x'y'$ derékszögű koordináta rendszerben vizsgálni. A lencse széleinél

feszültségcsúcsok keletkeznek (10-2. ábra), ez egyben meghatározza a repedéskeletkezés helyét [10-1].

10. 2. Elméleti és kísérleti háttér

Az ellenállás-ponthegesztéssel készített pontkötés alapvetően kétféle módon mehet tönkre, vagy képlékenyen deformálódik, vagy eltörik. A törés repedésterjedés révén következik be. A repedésterjedés több tényező együttes hatásaként jelentkezik, melyek egyúttal meghatározzák a törési felület jellegét is. A befolyásoló tényezőket két nagy csoportra oszthatjuk:

- anyagszerkezeti tényezők,
- igénybevételi hatások.

Az anyagszerkezeti jellemzőket az összetételen túl a hőkezelési állapot, a szövetszerkezet, a szemcsenagyság, a szövetelemek mennyisége, alakja, eloszlása, az alakítás stb. együttesen határozzák meg.

Az igénybevételnél a feszültségi állapot, az igénybevétel sebessége, a hőmérséklet és a környezeti hatások a legfontosabbak.

Alakváltozások (szívós) törésről akkor beszélünk, amikor a csúsztató feszültség hatására az anyag szétválását jelentős alakváltozás előzi meg és a törési felületen jellegzetes gödröcskék jönnek létre. Az alakváltozások törést jelentős helyi képlékeny alakváltozás előzi meg. Az alakváltozás utolsó fázisaiban a mikropórusok, zárványok stb. környezetében szakadások és erős helyi befűződés, kontrakció lép fel. Az utoljára szakadó részek erősen megnyúlnak és a gödröcskék szélét képezik. Az igénybevételtől és a szövet jellegétől függően a gödröcskék alakja, mélysége különböző lehet.

Rideg a törés, ha a terhelés hatására az anyag a normálfeszültségre merőlegesen, gyakorlatilag alakváltozás nélkül válik ketté [10-6].

A nyíró-szakítóvizsgálat alatt az ellenállás-ponthegesztéssel készített pontkötés tönkremenetelének jellege háromféle lehet. A vizsgálat közben a pont vagy kiszakad a lemezből (kigombolódás jelensége), vagy az illesztés síkjában nyíródik el, vagy a szakadás a varrat szélétől távolabb a hőhatásövezetben következik be. A szakadási esetek bemutatására a 10-1. táblázatban definiált kötések nyíró-szakítóvizsgálata ad lehetőséget. A 10-1. táblázat vékony lágyacél lemezek átlapolt, egy pont kötésének elkészítéséhez szükséges kísérleti tervet és annak eredményeit foglalja össze. A 8 féle beállításban 3-3 párhuzamos mérést végeztem, mely eredményekből számított középértékeket az 10-1. táblázat tartalmazza.

Sorszám	I_h [kA]	t_h [periódus]	F_e [kN]	$\bar{F}_{nysz}$ [kN]	s [kN]	A szakadás jellege
1	8	10	2	4,9	1,6	Az illesztés síkjában nyíródik el
2	8	10	4	2,13	1,52	Az illesztés síkjában nyíródik el
3	8	40	2	12,83	0,51	Kigombolódik
4	8	40	4	10,4	0,56	Kigombolódik
5	16	10	2	16,3	0,2	Kigombolódik
6	16	10	4	14,6	1,04	Kigombolódik
7	16	40	2	16,6	0,61	A hőhatásövezetben szakad
8	16	40	4	18,3	1,11	A hőhatásövezetben szakad

10-1. táblázat: A kísérleti eredmények

Amikor a kötés az illesztés síkjában nyíródik el, akkor a megfelelő lencseméret nem fejlődik ki. Ebben az esetben a kötés szilárdsága még a leggyengébb „E” minőségi osztályt sem éri el (1. melléklet).

Bauer [10-1] szerint kigombolódás következik be minden olyan esetben, amikor a pont d_p átmérője a hegesztett lemez vastagságának négyszeresét meghaladja. Gyakorlatilag ez fordul elő a 2 mm-nél nem vastagabb lemezeknél minden esetben, ha a paramétereket jól választjuk meg. Ha d_p a fenti értéknél kisebb, akkor a pont szakad. Ez a megállapítás kísérleti megfigyeléseken alapszik. Tapasztalataim alapján figyelembe kell azonban venni, hogy a lencseátmérő nem határozza meg egyértelműen a hegesztett kötés alakját, mivel különféle paraméterkombinációval állítható elő.

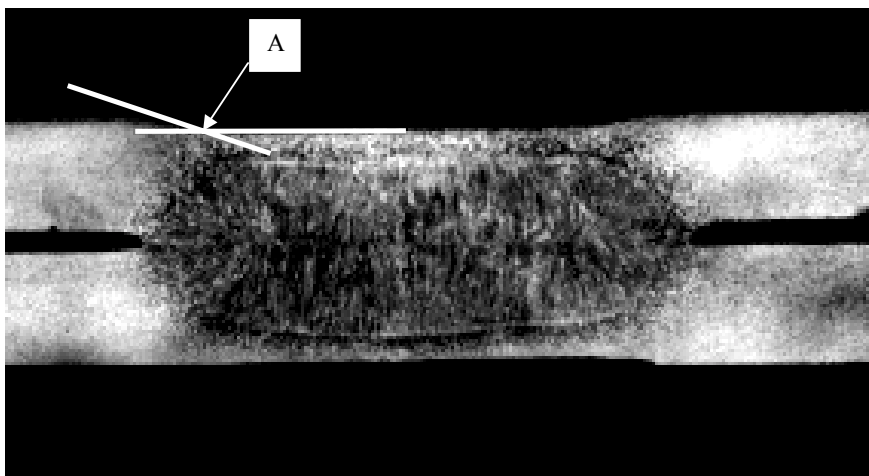
Abban az esetben, amikor a lencseátmérő jelentősen nagyobb, mint az elektród átmérője, akkor a szakadás a heglencse szélétől távolabb a hőhatásövezetben következik be. Ekkor a kötés szilárdsága jelentősen meghaladja az „A” minőségi osztály értékét (1. melléklet).

A kigombolódás jelensége tehát nem más, mint amikor a heglencse palástfelülete mentén a kötés a lemezből kiszakad. Elemezve ezt a szakadási módot azt tapasztaljuk, hogy a jelenség – bár összetett, hiszen függ a lemez „előéletétől”, a szövetszerkezettől, a geometriai jellemzőktől, stb. - alapvetően a pontátmérő (d_p) és a benyomódás (h_b) által meghatározott. A szakadás ugyanis a lencse széleinél kezdődik (10-20. ábra szerinti B pont) és kigombolódás esetén a benyomódási él mentén ér véget. A benyomódási él egyik pontját mutatja a 10-20. ábra szerinti „A” kerületi pont. Amennyiben az elektród kopása miatt a benyomódási él nem határozható meg pontosan, úgy az érintők metszéspontja jó közelítést jelent (10-3. ábra).

A töréses tönkremenetel okainak felderítésében nagy segítséget nyújt a törésfelületek elemzése. A töretek makroszkópikus és mikroszkópikus vizsgálatok alapján jellemeztem.

A vizsgálatok elvégzéséhez kemény- és lágy munkarenddel próbatesteket készítettem, majd a már korábban ismertetett módon elszakítottam azokat. Az egyes munkarendeket úgy

határoztam meg, hogy a hegesztési főidőket és az elektród-összeszorítóerőket állandó értéken tartva a hegesztő áramerősség értékét addig növeltem, amíg a lemezek a kötés síkjában nyíródtak el.



10-3. ábra

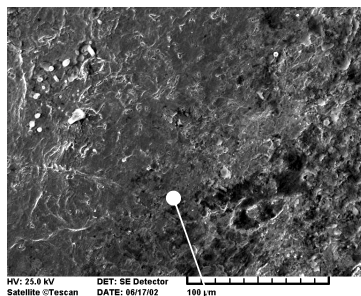
Az „A” pont meghatározása az elektródok kopása esetén

A 10-4. – 10-15. ábrákon bemutatott felvételek ehhez az állapothoz tartozó scanning-elektronmikroszkóppal végrehajtott vizsgálat eredményeit mutatják.

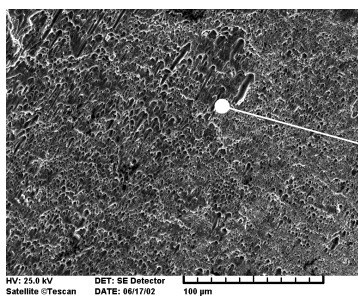
Kemény munkarend esetén a töretfelület (10-6. ábra) középső részén jelentős helyi alakváltozás után gödröcskés törés tapasztalható (10-8. ábra). A nagyobb gödröcskékben sok esetben gázzárványok (10-9. ábra) is megfigyelhetők, amelyben a dendritok végei (10-10. ábra) jól kivehetők. Az összetett igénybevétel (nyírás, szakítás) hatására a keresztmetszetben a gödröcskék nem egyformák, hanem bizonyos területeken elnyúltak.

A középső területet övező elhajló dendrites rész (10-5. ábra) tisztán nyírásnak van kitéve. A töretfelületen a gödröcskéket nem lehet felfedezni, így teherbírás szempontjából ez a terület nem meghatározó. A külső sajtoló gyűrű (10-4. ábra), amely ugyan a fröcskölés szempontjából egy záró-gyűrűnek fogható fel, teherbírás szempontjából szintén nem meghatározó. Fontos azonban kiemelni, hogy a külső sajtoló gyűrű belső szélénél (10-7. ábra) szintén felfedezhetünk bizonyos gödröcskéket, de ezek száma és eloszlása nem számottevő.

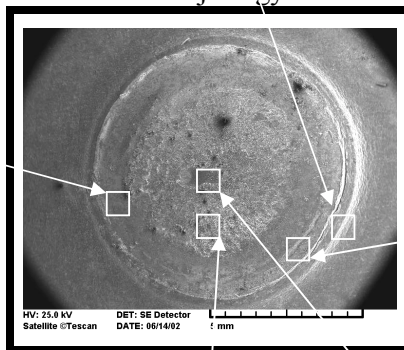
Lágy munkarend esetén a töretfelület (10-13. ábra) nem mutat olyan élesen elkülöníthető sávokat, mint a kemény munkarend esetén. Ezzel együtt a különbség a két munkarend között szembetűnő. A külső sajtoló gyűrű töretfelületének (10-11. ábra) már szívós, gödrös töret jellege van. A középpont felé haladva a húzott-nyírt-húzott töretfelület jellegek változnak.



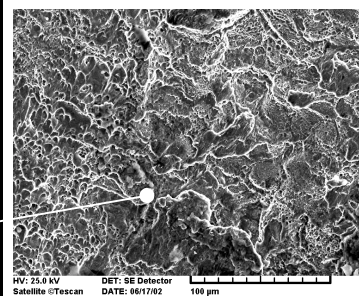
10-4. ábra
Külső sajtoló gyűrű



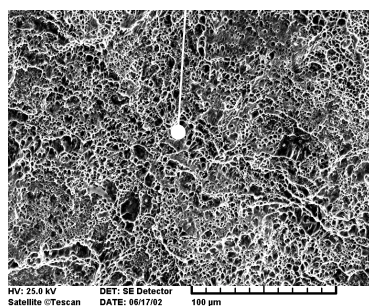
10-5. ábra
Az elhajló dendrites rész



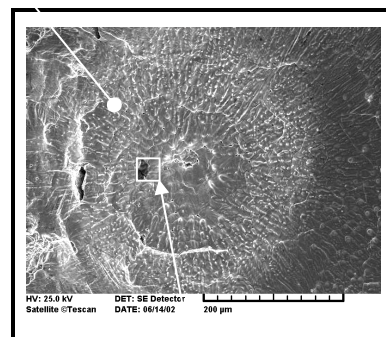
10-6. ábra
A töret felülete kemény
munkarend esetén



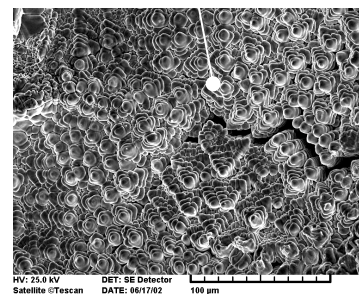
10-7. ábra
A sajtoló rész belső széle



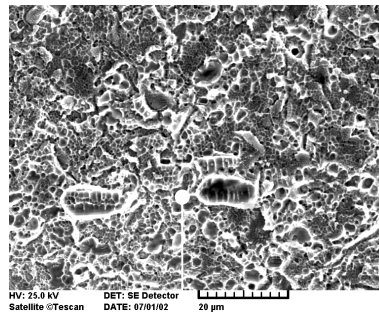
10-8. ábra
A függőlegesen álló dendrites
rész



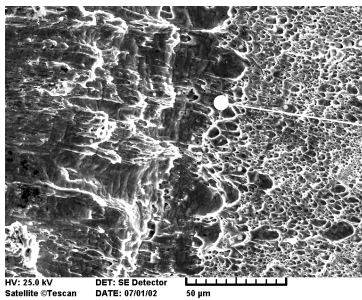
10-9. ábra
Gázzárvány közepén



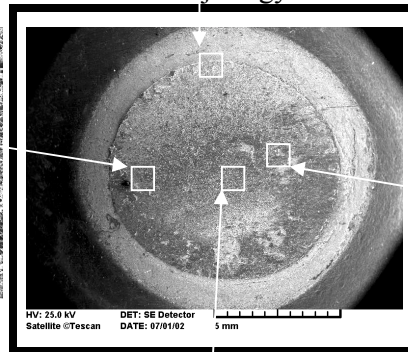
10-10. ábra
Össze nem érő dendritek
közepén



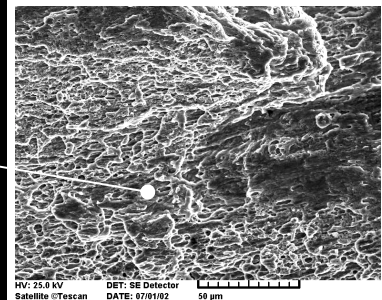
10-11. ábra
Külső sajtolt gyűrű



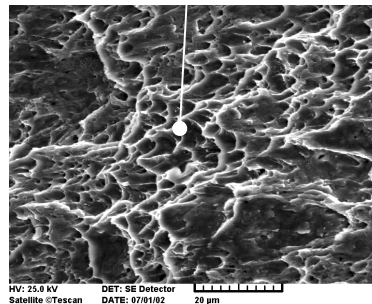
10-12. ábra
A húzott és a nyírt felület
találkozása



10-13. ábra
A töret felülete lágy
munkarend esetén



10-14. ábra
A nyírt és a húzott felület
találkozása

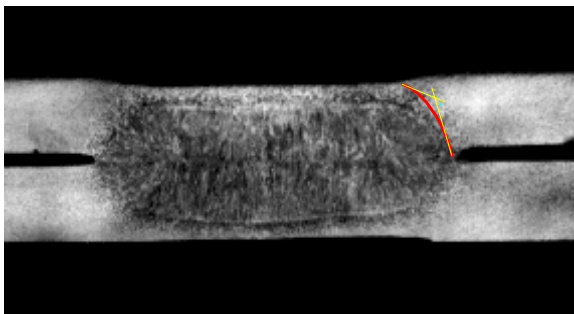


10-15. ábra
Szívós gödrös törés a középső
területen

Nagyon fontos különbség azonban, hogy míg a kemény munkarend esetén gyakorlatilag nincsen elektród-benyomódás a lemez felületén, addig a lágy munkarend esetén ez jelentős. Teherbírás szempontjából a két kötés között nincs számottevő különbség, mivel a nyírószakítóerő értékek között a különbség mindössze 0,15 kN, ami alig több mint 1%-os eltérést jelent.

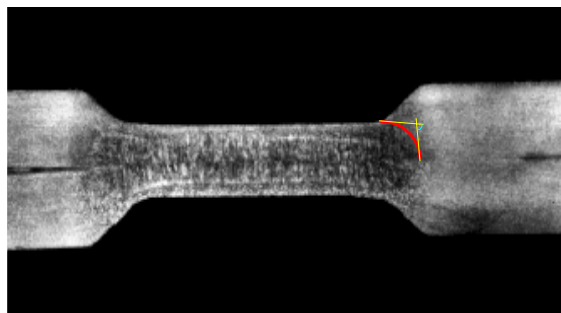
10. 3. Az ellenállás-ponthegesztett kötés minősítése

A makroszkópi felvételeken jól látható, hogy az ellenállás-ponthegesztett lencse metszete ellipszishez közelálló kontúrral rendelkezik. Az „ellipszis” a munkarendtől függően lehet magas (10-16. ábra) vagy lapos (10-17. ábra).



10-16. ábra

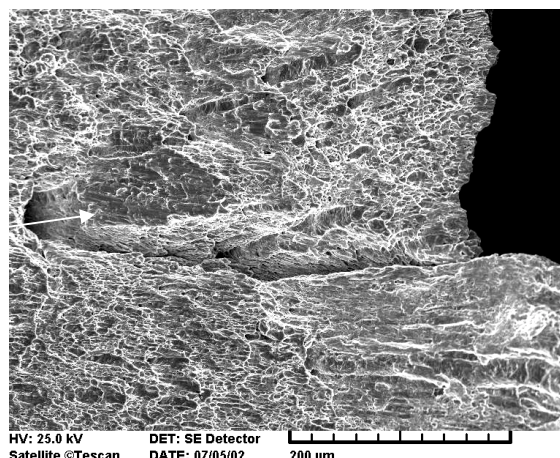
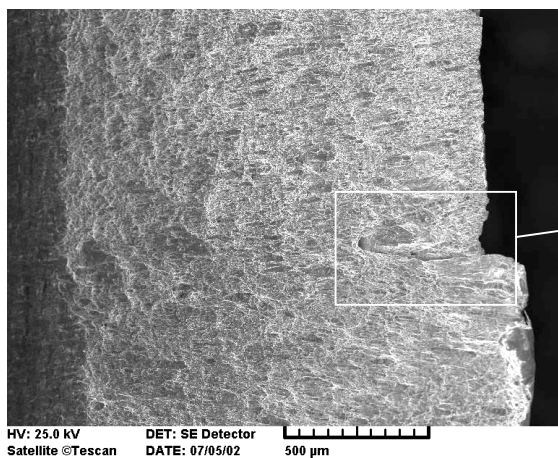
A lencse keresztmetszeti alakja kis hőbevitel esetén



10-17. ábra

A lencse alakja nagy hőbevitel esetén

A 10-20. ábra jelölései alapján legyen az s_m a maradó anyagvastagság, d_p pedig az ellenállás-ponthegesztett lencse átmérője. Tételezzük fel, hogy a repedésterjedés az A és B pontok által meghatározott k íven megy végbe (10-18. ábra).

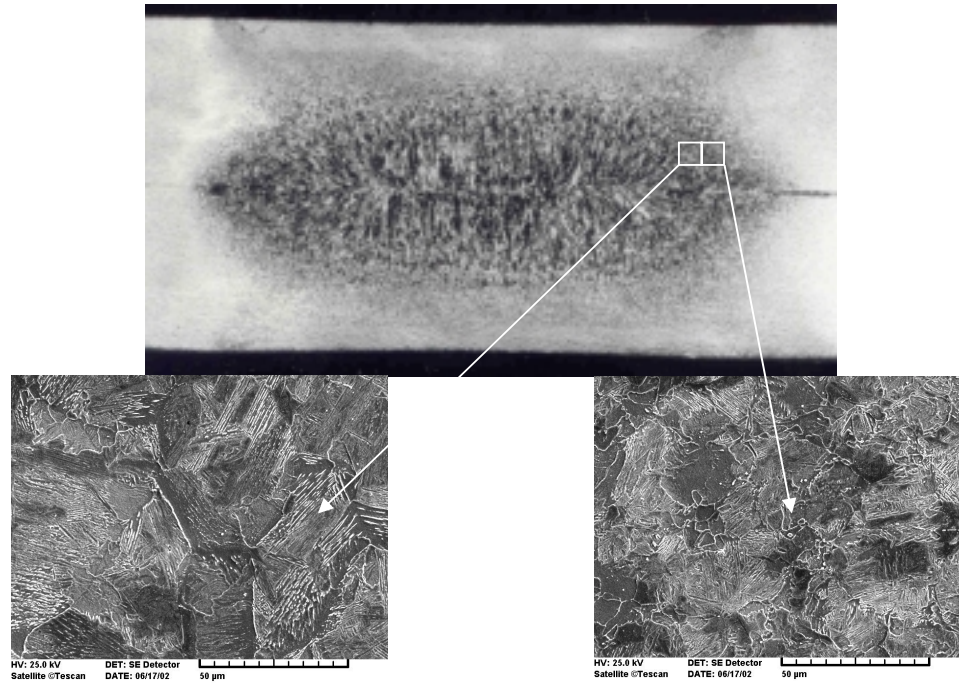


10-18. ábra

A kigombolódott töretfelület, illetve annak kiindulási helye

Tapasztalataim alapján a hidegen hengerelt lemez hegesztése során a lencse körüli rész kilágyul, és a szemcsék eldurvulnak (10-19. ábra), aminek következménye szilárdságcsökkenés. Másrészt ez a legkisebb keresztmetszet, mivel a benyomódás miatt az

anyagvastagság, ebből következően a keresztmetszet lecsökken. A repedésterjedés szempontjából ez lesz a leggyengébb keresztmetszet, azaz a törés itt fog bekövetkezni.



10-19. ábra

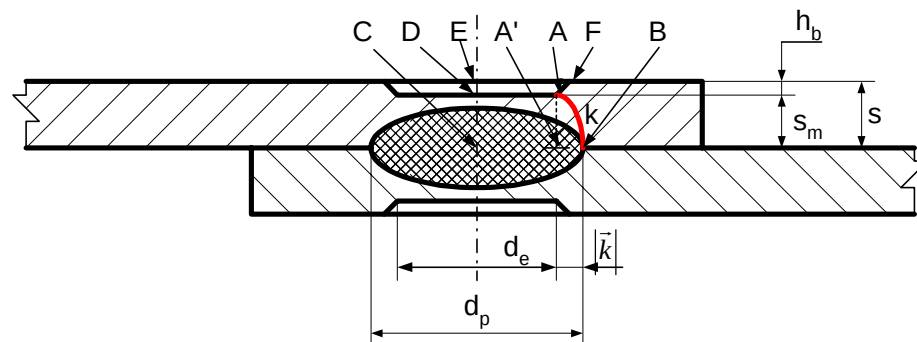
A lencse széle és a hőhatásövezet szövetszerkezete

A 10-19. ábra a hőhatásövezet és a lencse szélének szövetszerkezetét hasonlítja össze. A képeken jól látható a szemcsedurvulás és a tűs ferrit + bénites szövetszerkezet.

A benyomódás alapköre - jó közelítéssel - az elektródátmérővel egyezik meg, így a sugarakra fennáll, hogy

$$\overline{DA} = r_e \quad (10.1)$$

ahol r_e : az elektród sugara.



10-20. ábra

Az ellenállás-ponthegesztett kötés sematikus ábrája

A repedésterjedés közelítőleg így az $\overline{AA'} = s_m$ és $\overline{A'B} = |r_p - r_e|$ sugarú ellipszis kerületének negyedével megegyező szakaszon (törési ív: $k = \frac{K}{4}$) megy végbe. Az ellipszis kerülete az ismert összefüggés alapján:

$$K = \pi \left[1,5 \cdot (s_m + |r_p - r_e|) - \sqrt{s_m \cdot |r_p - r_e|} \right] \quad (10.2)$$

Definiáljuk az $\overline{A'B} = \vec{k}$ különbségvektort, amelynek hossza

$$|\vec{k}| = |r_p - r_e| \quad (10.3)$$

értékkel egyenlő, iránya pedig a 10-20. ábra alapján $r_p - r_e < 0$ esetén a szimmetria-tengely felé mutat, $r_p - r_e > 0$ esetén azzal ellentétes irányú.

A repedésterjedés szempontjából nem közömbös, hogy az ellipszis két féltengelye milyen nagyságrendi viszonyban áll egymással. Abban az esetben, ha $s_m > |r_p - r_e|$, akkor a szakadás könnyebben végbemegy ezen az íven, mivel a szakadás kezdő- és végpontjából húzott érintők által bezárt szög kicsi (10-16. ábra), így az elhajlás nem túl jelentős. Ha $s_m < |r_p - r_e|$ a helyzet megváltozik, (mert az érintők ekkor már jóval nagyobb szöget zárnak be, ld. 10-17. ábra), így ahhoz, hogy a szakadás az „A” pontban végződjön, a törési ív jelentős görbülete szükséges. A kísérletek alapján e darabok a hőhatásövezetben (az elektród-lemez érintkezési területtől távolabb) szakadtak el. E jelenség hatásának a bemutatására definiáljunk egy T_a alaktényezőt, amely az ellipszis-szakasz két féltengelyét hasonlítja össze és utal arra, hogy az A' (ld. 10-20. ábra) középpontú ellipszis melyik szakaszán megy végbe a törés.

$$T_a = \frac{r_p - r_e}{s_m}, \quad s_m \neq 0. \quad (10.4)$$

A definícióból kiderül, hogy az $s_m = 0$ érték nincsen értelmezve, mivel ez az alapanyag eltünését jelentené a két elektród közül. Az alaktényező értékére vonatkozóan az alábbi megállapítások tehetők:

- ha $s_m > (r_p - r_e) \geq 0$, akkor $0 \leq T_a < 1$,
- ha $s_m > (r_p - r_e)$ és $(r_p - r_e) < 0$, akkor $T_a < 0$,
- ha $s_m = (r_p - r_e)$, akkor $T_a = 1$,
- ha $s_m < (r_p - r_e)$, akkor $T_a > 1$.

Amennyiben az $s_m < r_p - r_e$, úgy a T_a tényező képletesen megnöveli a „k” törési ív hosszát, így a kigombolódás nem feltétlenül következik be. Ha $s_m > (r_p - r_e) \geq 0$, akkor a T_a tényező csökkenti a „k” törési ív hosszát, nyomatékosítva ezzel a biztos kigombolódást. A T_a tényező

negatív értéke arra utal, hogy a lencse nem fejlődött ki megfelelően, így a kötés szilárdságilag nem felel meg.

A cél ennek a törési ívnek az anyagvastagsággal történő összehasonlítása. A célfüggvény tehát:

$$Y = \frac{k \cdot T_a}{s}, \quad (10.5)$$

mely célfüggvény értékei az alábbiak lehetnek:

1. Ha a $k \cdot T_a$ érték negatív, akkor a célfüggvény ($Y < 0$) értéke is negatív. Ez fizikailag azt jelenti, hogy a ponthegeesztett lencse nem fejlődött ki megfelelően. Ennek következtében nem lesz kigombolódás, hanem a kötés az illesztés síkjában nyíródik el.
2. A célfüggvény értéke két esetben lehet zérus ($Y = 0$):
 - ha a „k” törési ív hossza zérus, ez azt jelenti, hogy a maradó anyagvastagság és a különbségvektor is zérus. A maradó anyagvastagság értéke viszont nem lehet zérus. (Ezt az esetet az alaktényező definiálásánál kizártuk.)
 - ha a T_a alaktényező értéke zérus, azaz a $\vec{k}$ különbségvektor zérusvektor. Ebben az esetben a kigombolódás jelensége nem az ellipszis vonala, hanem a két átmérő-végpontot összekötő egyenes mentén megy végbe ($\overline{AA'}$). Ezt az esetet tekintem a kigombolódás alsó határértékének (lásd 10-21, 10-22 és 10-23. ábrák).
3. Ha a célfüggvény értéke $0 < Y < 1$, akkor a pont kigombolódik az alapanyagból, mert a tönkremenetel szempontjából a törési ív rövidebb utat jelent, mint az anyagvastagság.
4. Jellemző érték még az $Y = 1$ is. Fizikailag ez azt jelenti, hogy a törés íve az anyagvastagsággal megegyezik. Ezt a függvényértéket tekintem a kigombolódás felső határértékének (lásd 10-21, 10-22 és 10-23. ábrák).
5. Ha a célfüggvény értéke $Y > 1$, akkor az alapanyag szakad, mert ekkor a tönkremenetel szempontjából az anyagvastagság rövidebb utat jelent.

10. 4. Eredmények és következtetések

A már korábban végrehajtott kísérletek eredményeiből számított középértékek (ld. 10-1. táblázat) alapján a szükséges számítási eredményeket a 10-2. táblázatban foglaltam össze.

Sorszám	Maradó anyagvastagság s_m [mm]	Különbőségvektor $\vec{k}$ [mm]	Az ellipszis kerülete K [mm]	A törési ív hossza k [mm]	Alaktényező T_a [-]	Célfüggvény-érték Y [-]
1	1,98	$\vec{-0,15 \cdot e_x}$	8,3252	2,0813	-0,0757	-0,0787
2	1,94	$\vec{-0,45 \cdot e_x}$	8,3274	2,0818	-0,2319	-0,2414
3	1,81	$\vec{0,1 \cdot e_x}$	7,6642	1,9161	0,0552	0,0529
4	1,76	$\vec{0,05 \cdot e_x}$	7,5976	1,8994	0,0284	0,027
5	1,51	$\vec{0,5 \cdot e_x}$	6,742	1,6855	0,3311	0,279
6	1,26	$\vec{0,75 \cdot e_x}$	6,418	1,6045	0,5952	0,4775
7	0,87	$\vec{1,25 \cdot e_x}$	6,7144	1,6786	1,4368	1,2059
8	0,73	$\vec{1,6 \cdot e_x}$	7,5848	1,8962	2,1918	2,078

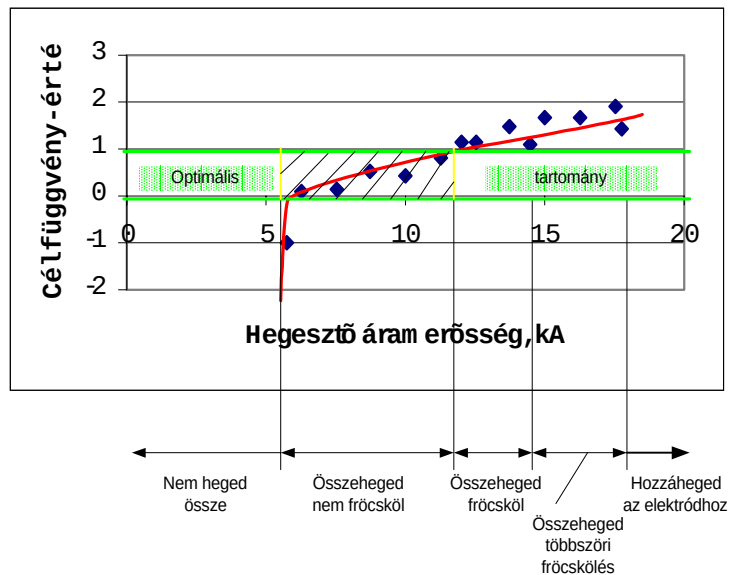
10-2. táblázat: A célfüggvény értékek különböző beállítások esetén

Kísérlettervezés szempontjából optimálisnak tekinthető minden olyan kötés, amelynél a kigombolódás jelensége figyelhető meg. Csak olyan kötések között keresem az optimumot, amelyek kigombolódnak. Amennyiben a benyomódást tekintjük súlyosabb feltételnek, úgy az Y célfüggvény értéke zérushoz közelít, míg szilárdság szempontjából az 1 értékhez közeli, de 1-nél nem nagyobb értékek optimálisak. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy súlyozás esetén a másik szempont mindig jelentős hátrányt szenved, így általában kijelenthető, hogy a célfüggvény optimális értékének az optimális tartomány (ld. 10-21, 10-22, 10-23. ábra) közepét tekintem, tehát az $Y = 0,5 \pm 10\%$. A kísérleti eredmények alapján – ha nem súlyozzuk a célfüggvény alkotókat – a 6. beállítást tekintem optimálisnak, amelyre a célfüggvényérték az optimális tartomány közepén helyezkedik el. Ilyen paraméterkombinációval történő hegesztés során megbízhatóan kigombolódo kötések kapunk.

Megvizsgálva ezt a munkarendet elmondható, hogy az így készített hegesztett kötés szilárdság szempontjából jelentősen meghaladja az „A” minőségi osztályt. Abban az esetben, ha a cél a minimális benyomódás melletti lehető legnagyobb szilárdság, akkor az $Y=0$ érték felé haladva finomítani lehet az eredményt. Hangsúlyozni kell, hogy a javasolt célfüggvény, amely tartalmazza a maradó anyagvastagság és a lencse radiális méretét is, érzékeny a fröcskölés jelenségére is, mivel az anyag kifröccsenésekor fellépő térfogatcsökkenésre, az

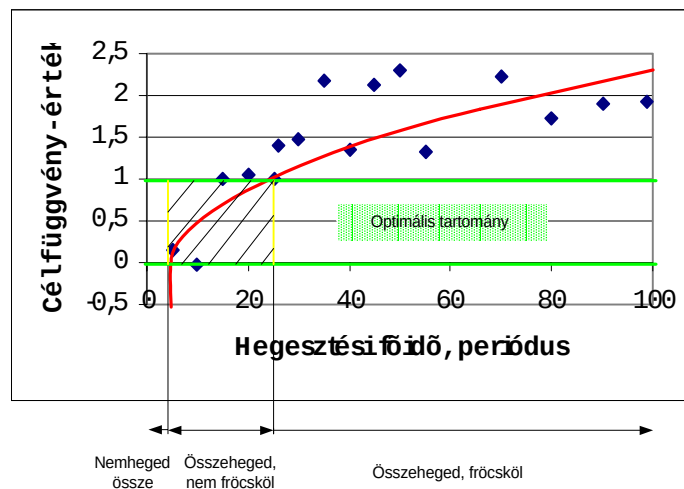
említett tényezők csökkenésével reagál. Figyelembe veszi továbbá a minőségbiztosítás szempontjából másik fontos feltételt, azaz a minimális deformáció követelményét is, hiszen minél nagyobb az alaktényező értéke, annál nagyobb a deformáció.

Az Y célfüggvény értékeinek bemutatására további kísérleteket végeztem oly módon, hogy a hőbevitelt leginkább meghatározó tényezők közül az egyik értékét változtattam, míg a összes többi paraméter értékét állandó (középponti) értéken tartottam. Az alábbi ábrák sorban a célfüggvény hegesztő áramerősség (10-21. ábra), hegesztési főidő (10-22. ábra) és elektród-összeszorítóerő (10-23. ábra) kapcsolatát mutatja be.



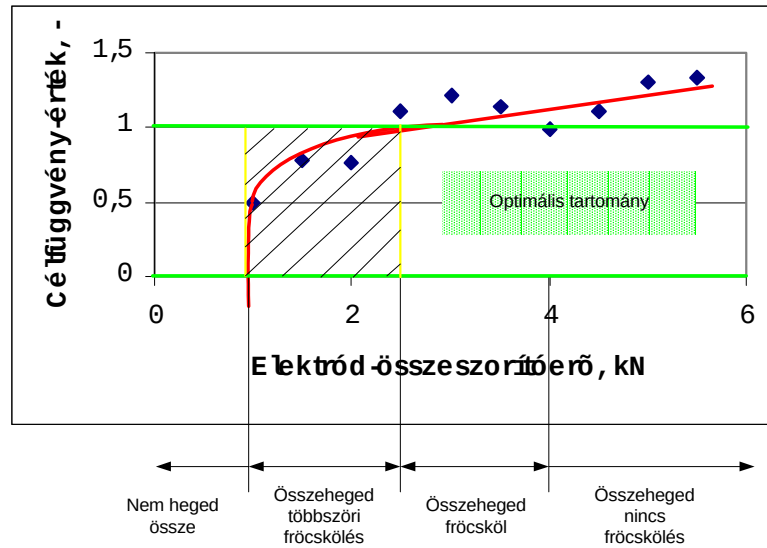
10-21. ábra

A célfüggvény és a hegesztő áramerősség függvénye



10-22. ábra

A célfüggvény és a hegesztési főidő függvénye



10-23. ábra

A célfüggvény és az elektrod-összeszorítóerő függvénye

A 10-21. és a 10-22. ábra alapján megállapítható, hogy a célfüggvény értékek optimális tartománya szoros kapcsolatban van az ellenállás-ponthegesztés során megfigyelhető jelenségekkel. Amennyiben a célfüggvény értéke eléri az optimális tartomány alsó határát ($Y=0$), akkor a két lemez összehegedt és egészen a tartomány felső határáig a fröcskölés jelensége nem figyelhető meg. Ki kell emelni, hogy a hegesztési főidő változtatásával kapott eredmények alapján a nagyon rövid idejű hegesztés (extra kemény munkarend) eredményezi a megfelelő kötést.

A 10-23. ábra esetén a fröcskölés szempontjából az optimális célfüggvény-tartomány a nem túl kedvező többszöri fröcskölés tartományát jelenti. Ehhez néhány magyarázat a következő:

- A kísérlettervezési eljárások eredményei alapján az elektrod-összeszorító erő hatásának jelentősége messze elmarad a hegesztő áramerősség és a hegesztési főidő jelentőségétől, illetve az elektrod-összeszorító erő értékének növelése negatív irányban befolyásol.
- A számított célfüggvény-értékek nem mutatnak jelentős ingadozást az elektrod-összeszorító erő teljes tartományán, hiszen a célfüggvény maximális értéke 1,3 körüli érték.
- A középpontinak minősített paraméterkombináció esetén a hegesztő áramerősség értéke az optimális tartomány felső határértékével egyenlő, illetve a hegesztési főidő értéke is ahhoz közeli. Ez jelentősebb hőbevitelt jelent és megnöveli a célfüggvény értékét is.

Következésképpen a fröcskölés jelenségét elsősorban a hegesztő áramerősség és a hegesztési főidő szabja meg. E két paraméter optimális tartományának középvértékeivel történő hegesztés során az elektrod-összeszorító erő értékeinek változtatásával fröcskölés nem következik be.

10.5. A minőség-centrikus optimalizálás eredményeinek összefoglalása

1. Az ellenállás-ponthegesztés összetett folyamatának eredményeként kialakuló kötésnek a nyíró-szakítóvizsgálat alatti tönkremenetelét elemezve olyan célfüggvényt definiáltam, amely figyelembe veszi az ellenállás-ponthegesztés minőségi követelményeit (minimális deformáció, maximális szilárdság, fröcskölésmentes kötés kialakulás).

2. A javasolt célfüggvény a következő alakú:

$$Y = \frac{k \cdot T_a}{s}$$

ahol: Y: a célfüggvény,
 k: a törési ív hossza,
 T_a: alaktényező,
 s: a munkadarab anyagvastagsága.

A célfüggvény értékére vonatkozóan az alábbi megállapítások tehetők:

- Y < 0, akkor a kötés az illesztés síkjában nyíródik el,
- Y = 0, a kötés kigombolódásának alsó határa,
- 0 < Y < 1, a kötés kigombolódik az alapanyagból,
- Y = 1, a kötés kigombolódásának felső határa,
- Y > 1, a törés a varrat szélétől távolabb, a hőhatásövezetben következik be.

E jellemző értékek alapján az ellenállás-ponthegesztett kötés minősíthető. Csak az a kötés megfelelő, amely az alapanyagból kigombolódik, azaz $0 \leq Y \leq 1$.

3. A 10-21, 10-22 és 10-23. ábrák, valamint a metallográfiai vizsgálatok eredményei alapján az alábbi következtetések vonhatók le:
 - a. Az Y=0 esetén a lencse már kigombolódik, de a kötés közel van a nem megfelelő állapothoz,
 - b. A minimális deformáció szempontjából szintén az Y=0 érték optimális,
 - c. Technológiai szempontból viszont az Y=1 érték lenne indokolt, mivel ekkor a kötés közel van ugyan az „összeheged + fröcsköl” állapothoz, de a kötés szilárdsága mindenképpen megfelelő lesz,
 - d. Szilárdsági szempontból szintén az Y=1 érték az optimális,

- e. A **minőségi kötés** nem más, mint a kigombolódási tartomány közepe, azaz $Y = 0,5 \pm 10\%$. Ezen tartományhoz tartozó kötések már kigombolódnak, így szilárdsági szempontból megfelelnek, viszont a benyomódás szempontjából sem szenvednek jelentős deformációt, illetve a varrat szélénél zárógyűrű alakul ki, amely megakadályozza az olvadt fém kifröccsenését.
- f. A kísérleti eredmények alapján a célfüggvény nagyon érzékeny a hegesztési főidő értékére. Javasolt az extra kemény munkarend alkalmazása, azaz néhány periódusnál többel csak akkor hegesszünk, ha a hegesztési áramerősség értékének növelésével nem érjük el a minőségi kötés tartományát.
4. A 10-1. táblázat a korábbi fejezetekben ismertetett kísérlettervezési módszerek adott célfüggvények alapján eredményül kapott optimális paraméterkombinációit foglalja össze. Összehasonlításként feltüntettem a kísérletek eredményei alapján elfogadott optimális paraméterkombinációt, illetve a 10. fejezetben kidolgozott minősítő feltételek alapján kapott eredményeket. A táblázatban a + a felső szinthez közeli érték beállítását, míg a – az alsó szinthez közeli értékre történő beállítást tekinti optimálisnak.

Kísérlettervezési módszer megnevezése	Az alkalmazott célfüggvény	A faktorok optimális beállításai		
		Hegesztő áramerősség	Hegesztési főidő	Elektrod-összeszorító erő
Box-Wilson	F_{nysz}	+	+	-
Taguchi	F_{nysz}	+	+	-
Összetett	$F_{nysz} \cdot s_m$	+	-	-
Harrington	$\sqrt[3]{F_{nysz} \cdot h_b \cdot d_p}$	-	+	-
Kísérleti úton	-	+	-	+
Minősítő rendszer alapján	$Y = \frac{k \cdot T_a}{s}$	+	-	+

10-1. táblázat: Az optimális paraméterkombinációk

További vizsgálatokat igényel annak tisztázása, hogy a modell a tórusz külső, vagy belső átmérőjét tekinti a célfüggvényben szereplő heglencse átmérőjének a több szerző [10-3, 10-4, 10-5, 10-6] által leírt tórusz formában kialakuló lencseképződés esetén. További kérdésként merül fel, hogy a külső átmérő szerepeltetése esetén, azonos átmérő-értékeknél, vajon a lencse és a tórusz alakú varrat egyenértékű-e. A heglencsekialakulás folyamatának tisztázására szilárdságtani peremérték feladatot állítottam fel, melyet végeeselemes módszerrel oldottam meg, az eredményeket pedig a 11. fejezetben mutatom be.

11. Az ellenállás-ponthegesztés kezdeti szakaszának modellezése

11.1. A mechanikai modell felépítése

Jelen fejezetben ismertetett munka célkitűzése az volt, hogy a nyíró-szakítóvizsgálat során bekövetkező szakadás szempontjából fontos szerepet játszó - a kidolgozott célfüggvényt alkotó - lencseátmérő kialakulásáról képet kapjak. Első lépésként az ellenállás-ponthegesztés kezdeti szakaszának modellezését tűztem ki célul. A kitűzött peremértékfeladatot a végeselemes módszer eszközeivel oldottam meg [11-9].

Ellenállás-ponthegesztés során a felmelegedés és az állandóan ható elektród-összeszorító erő együttes hatására az anyag érintkezési felülete megnő, emiatt az érintkezési ellenállás jelentősen lecsökken, majd gyakorlatilag megszűnik. Ekkor feltételezzük, hogy az érintkezés a teljes – az elektród-lemez érintkezési felülettel megegyező – felületen megy végbe. Jelen modell ezen az érintkezési felületen végbemenő folyamatokat vizsgálja extra kemény-, kemény- és lágy hegesztési munkarend esetén.

A hőmérséklet növekedésével növekvő anyagellenállás következtében a legnagyobb hőfejlődés - az érintkezési ellenállás megszűnése után - továbbra is a lemezek érintkezési környezetében lesz. Ennek megfelelően a lemez-lemez érintkezési felületre hőforrást definiáltam, amely a szükséges hőmennyiséget biztosítja.

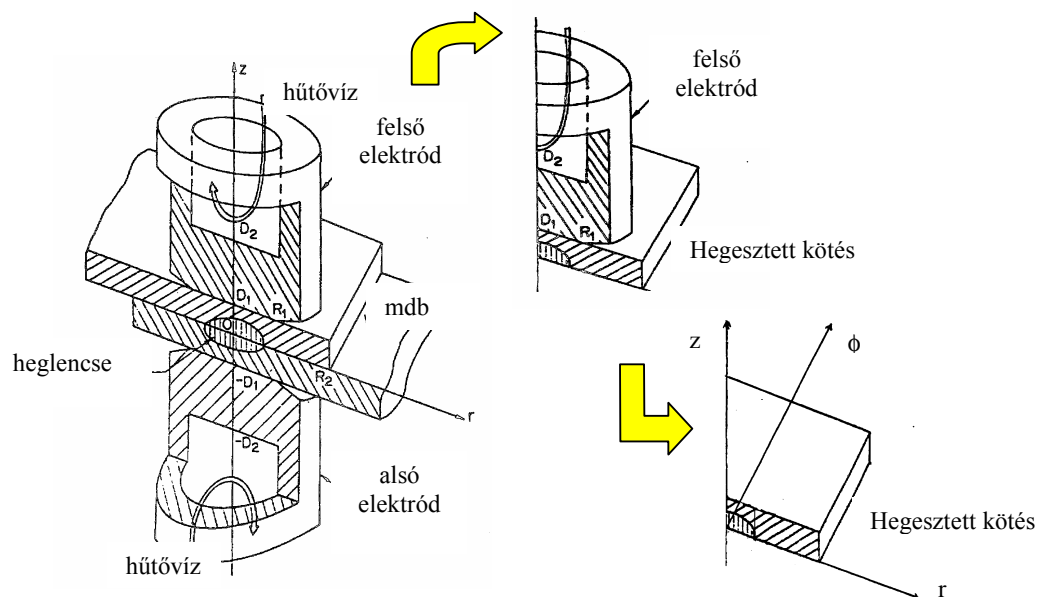
Az összehegesztendő darabok érintkezési felületei között létrejövő hőfejlődés alatt a lemez tágul, amely az alkalmazott erőhatással ellentétes irányú. A kezdeti szakaszban az elektród-lemez érintkezési felület „z” irányú elmozdulása (elektród-benyomódás) így elhanyagolható, mivel a jelentős tágulás csak a megolvadás során következik be, amikor a teljes anyagtérfogat jelentős hőmérsékletet ér el, illetve mivel a benyomódás csak ez után következik be. Mivel a

modellezés célja a különböző munkarendek alatt lezajló folyamatok jellegéből adódó különbségek meghatározása, így a modellezés során ezt a közelítést elfogadhatónak ítélem.

Fémtest, tökéletesen sima felületeket feltételezve elsősorban arra voltam kíváncsi, különböző munkarendek esetén milyen hatással lehetnek a mechanikai- és hőterhelések a kialakuló kötésre, és hogyan befolyásolják a kötés kialakulásának menetét. Ehhez adott munkarendek esetén meghatároztam a hőmérséklet és a képlékeny alakváltozás jellegét.

Az ellenállás-ponthegesztésben résztvevő elemek által alkotott rendszer tengelyszimmetrikus volta miatt lehetőség nyílik egy egyszerűsített 2D-s modell felépítésére (11-1. ábra). Az egyszerűsítés lehetősége abból adódik, hogy a valóságban 3D-s feladatot egy olyan 2D-s forgásszimmetrikus feladatként kezeljük, melyben a lemez geometriáját és terheléseit is forgásszimmetrikusnak tételezzük fel. A forgásszimmetrikus modellezés azt jelenti, hogy az adott henger-koordináta rendszerben minden meridián metszetben azonos állapotot számítunk. Mivel elsősorban a lemezben végbemenő folyamatokra vagyunk kíváncsiak, így az elektród-lemez érintkezési felületen olyan peremfeltételeket definiáltam, amelyekkel az elektród helyettesíthető.

Az adott geometriát négyszög-elemekből felépített hálózival fedtem le, ezért a munkadarab jellemző méretei módosultak (11-1. táblázat). Ez a módosítás az érintkezési felületen lezajló folyamatokat nem befolyásolja jelentősen, a geometriai stabilitást viszont jelentősen növeli.



11-1. ábra
Az egyszerűsített 2D-s modell

Jellemző	Méret
Anyagvastagság (z méret)	1,75 mm
A sugár (r) irányú méret	10,5 mm

11-1. táblázat: A lemez méretei

A lemez anyagaként alacsony karbon-tartalmú (max: 0,17 %) csillapított alapacélt választottam, melynek a modellezés szempontjából lényeges, hőmérsékletfüggő tulajdonságait a 11-2. táblázat foglalja össze [11-7, 11-8].

	20 °C	100 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	1500 °C
ρ [kg/m ³]	7870	-	-	-	-	-	-	-	6340
c [J/(kg·K)]	456	-	-	-	-	-	-	-	791
λ [W/(m·K)]	78,2	-	-	-	-	-	-	-	29,7
E [GPa]	205	-	178	170	152	125	-	-	-
ν [-]	0,291	0,291	0,291	0,291	0,291	0,291	0,291	0,291	0,291
σ_y [MPa]	227	147	127	89	57	27	-	-	-
α [$10^{-6} \frac{1}{K}$]	10,7	-	-	-	13,7	-	-	16,2	-

11-2. táblázat: A modellezésnél használt anyagjellemzők

Ahol szükséges volt, a hiányzó értékeket lineáris interpolálással számítottam ki.

A lemezben lejátszódó hőtani folyamatok mennyiségi és minőségi leírására a szilárd testekben fellépő vezetékes hőátvitel (hővezetés) differenciálegyenletét oldom meg [11-5].

$$\rho \cdot c \cdot \dot{T} + \lambda \cdot \nabla^2 T = 0 \quad (11.1)$$

ahol: ρ : az anyag sűrűsége,
 c : fajhő,
 T : hőmérséklet (az ismeretlen)
 λ : hővezetési tényező.

Az elektród-lemez érintkezési felületen végbemenő hővezetés leírására peremfeltételként a newtoni felületi hőátadási törvénynek a vizsgált test felületén kell érvényesülnie:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_F + \alpha (T_F - T_0) = 0 \quad (11.2)$$

ahol: λ : hővezetési tényező,
 α : hőátadási tényező,
 T_F : felületi hőmérséklet,
 T_0 : környezeti hőmérséklet.

Az áram bekapcsolásának pillanatában – mint azt az I.1. alfejezetben már leírtam - a hegesztőáramkör legnagyobb ellenállása a két lemez érintkezési felületénél van. A hegesztési folyamat kezdetén itt a legnagyobb a hőfejlődés. A lemez-lemez érintkezési felületen lejátszódó hőtani folyamatok leírására a következő egyenletet használtam:

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{s_c} + q = 0 \quad (11.3)$$

ahol: q hőáramsűrűség,
 S_c lemez-lemez érintkezési terület.

A kezdeti feltétel, azaz a folyamat kezdetét jelentő $t=0$ időpontban, a test belsejében uralkodó hőmérséklet-eloszlás:

$$T(r, \varphi, z, t=0) = {}^0T(r, \varphi, z) = T_0 \quad (11.4)$$

A hőtani peremfeltételek a következők alapján kerültek kijelölésre:

- a hő az anyagban konduktív úton áramlik,
- a hővezetést a lemezek külső felületén hőátadási tényezővel vesszük figyelembe,
- az elektród hűtő hatását az érintkezési felületen állandó külső hőmérséklet és nagy hőátadási tényező helyettesíti,
- a két lemez érintkezési felületén egy hőforrás biztosítja a szükséges hőáramsűrűséget,

Kezdeti feltételek:

- az anyag hőmérséklete $t = 0$ időpontban $20\text{ }^\circ\text{C}$,
- a külső környezeti hőmérséklet $t = 0$ időpontban $20\text{ }^\circ\text{C}$,
- a hűtött elektród hőmérséklete állandó $T_e = 20\text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$.

A mechanikai modellben kvázistatikus állapotot tételeztem fel. Geometriailag a feladat lineáris, következésképpen az elmozdulás és alakváltozási koordináták kicsik. Az alkalmazott modell kétváltozós és forgásszimmetrikus, így a szokásos módon felvett (r, φ, z) hengerkoordináta rendszerben az elmozdulás vektor [11-3, 11-4]:

$$\underline{u}^T = [u, w], \quad (11.5)$$

- r : sugár-irány,
- φ : a kerületi irány,
- z : a forgástengely iránya,
- u : radiális irányú elmozdulás,
- w : axiális irányú elmozdulás,

T felső index: a transzponálás jele.

Az alakváltozási és feszültségi állapot tenzorainak mátrixai a szokásos jelölések szerint:

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_R & 0 & \frac{\gamma_{RZ}}{2} \\ 0 & \varepsilon_\varphi & 0 \\ \frac{\gamma_{ZR}}{2} & 0 & \varepsilon_Z \end{bmatrix}, \quad (11.6)$$

$$\underline{\underline{T}} = \begin{bmatrix} \sigma_R & 0 & \tau_{RZ} \\ 0 & \sigma_\varphi & 0 \\ \tau_{ZR} & 0 & \sigma_Z \end{bmatrix}, \quad (11.7)$$

ahol: $\varepsilon_R, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_Z$: a megfelelő irányú fajlagos nyúlás,
 γ_{ZR}, γ_{RZ} : a megfelelő irányú fajlagos szögelfordulás,
 $\sigma_R, \sigma_\varphi, \sigma_Z$: normál feszültségek,
 τ_{ZR}, τ_{RZ} : csúsztató feszültségek.

A geometriai egyenletek a következő alakúak:

$$\varepsilon_R = \frac{du}{dR}, \quad (11.8)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{u}{R}, \quad (11.9)$$

$$\gamma_{RZ} = \gamma_{ZR} = \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial R}. \quad (11.10)$$

A feszültségi állapot leírása a kontinuummechanika egyensúlyi egyenlete alapján hőtani szempontból is homogén izotróp anyagot feltételezve az alábbiak szerint történik [11-13]:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + (1 - \beta T) \rho g_i = 0 \quad (11.11)$$

ahol:

ρ : az anyag sűrűsége,
 σ_{ij} : feszültség mátrix eleme,
 x : helykoordináta,
 g_i : gravitációs gyorsulás
 β : hőtágulási együttható,
 T : hőmérséklet.

A mechanikai peremfeltételek a következők alapján kerültek kijelölésre:

- A felső elektród axiális irányú elmozdulása nem megengedett az elektród-lemez érintkezési felületen.
- Kinematikai előírások biztosítják, hogy a test merevtestszerűen nem mozdul el. Ezek a következők:
 - Az „r” sugár mentén a függőleges, azaz axiális irányú elmozdulás nem megengedett.
 - A forgásszimmetrikus modell esetén a forgástengelyre nem szükséges további feltételeket írni, de a tapasztalatok alapján nulla radiális elmozdulás előírásával a numerikus stabilitás növelhető, ami az együttható mátrix invertálásánál előny.

Kezdeti feltétel:

- A rendszer feszültségmentes állapotban van.

A fémeknél a rugalmas-, illetve képlékeny alakváltozás szétválasztására a Huber-Mises-Hencky képlékenységi elméletet használok. A modellezésnél rugalmas, ideálisan képlékeny anyagot feltételeztem. Az elmélet szerint akkor következik be képlékeny alakváltozás, ha a redukált feszültség értéke eléri a képlékeny állapot küszöbét jelölő feszültséget.

Rugalmas-képlékeny forgásszimmetrikus alakváltozás esetén a képlékeny alakváltozási növekmény tenzorának mátrixa:

$$[d\underline{A}^{pl}] = \begin{bmatrix} d\varepsilon_R^{pl} & 0 & \frac{1}{2}d\gamma_{Rz}^{pl} \\ 0 & d\varepsilon_\varphi^{pl} & 0 \\ \frac{1}{2}d\gamma_{zR}^{pl} & 0 & d\varepsilon_z^{pl} \end{bmatrix} \quad (11.12)$$

A redukált képlékeny növekményes alakváltozás [11-14]:

$$d\varepsilon^{pl} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_r^{pl} - d\varepsilon_\varphi^{pl})^2 + (d\varepsilon_r^{pl} - d\varepsilon_z^{pl})^2 + (d\varepsilon_\varphi^{pl} - d\varepsilon_z^{pl})^2 + \frac{3}{2}(d\gamma_{rz}^{képl})^2} \quad (11.13)$$

A tehernövekményes, iterációs, rugalmas-képlékeny végelelemes program az ε^{pl} egyenértékű redukált képlékeny alakváltozást számítja:

$$\bar{\varepsilon}^{pl} = \int d\varepsilon^{pl} \quad (11.14)$$

a teljes kvázistatikus terhelési folyamatra. A számítási eredményeket a következő fejezetben ismertetem.

11. 2. A modellezés eredményei

Az adott kezdeti- és peremfeltételekkel meghatározott feladat végeselemes módszer segítségével oldottam meg. A termo-mechanikus modellezés eredményei az ellenállásponthegesztés kezdeti szakaszára érvényesek az előző alfejezetben leírt feltételek mellett. A kutatómunkában három különböző munkarenddel (11-3. táblázat) készített kötéseket vizsgáltam.

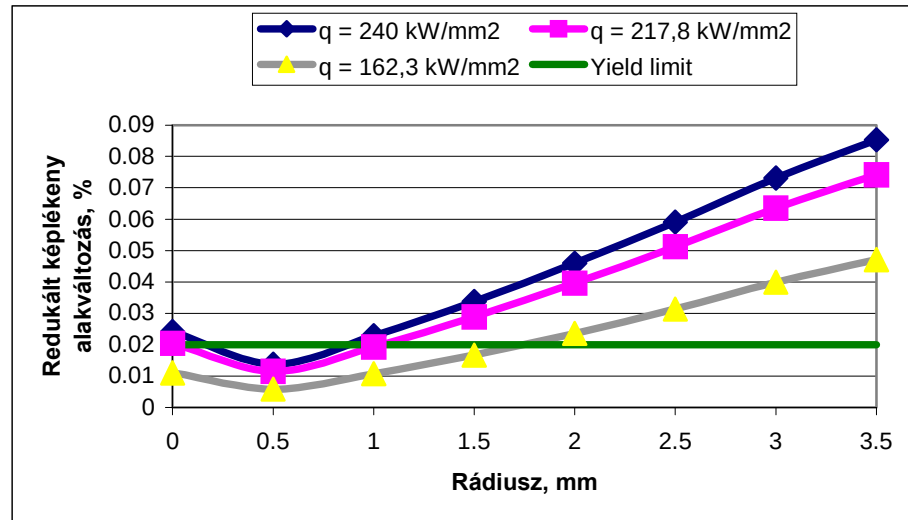
Sorszám	Munkarend	t_h [s]	q_{max} [kW/mm ²]
1	Extra kemény	0,02	240
2	Kemény	0,12	80
3	Lágy	1,2	29

11-3. táblázat: A vizsgált hegesztési munkarendek

Minden egyes hegesztési munkarendnél megvizsgáltam a folyási felület kialakulását és a hőmérséklet-eloszlást a lemez-lemez érintkezési felületen. A modell feltételezi a már kialakult, tökéletesen sima érintkezési felületet. A hőbevitel függvénye így lineáris, ami azt jelenti, hogy $t = t_0 = 0$ időpillanatban $q = 0$, illetve $t = t_9 = t_h$ esetén $q = q_{max}$. Mivel q_{max} meghatározása gyakorlatilag nehezen megoldható, így annak értékét számítógépi iteráció során kaptam meg. A kísérletekből, adott munkarendhez tartozó hegesztési főidő értékhez meghatároztam azt a legnagyobb hőbevitelhez tartozó hegesztő áramerősség értéket, amelynél a kötés még éppen az érintkezési síkban nyíródott el (az a kötés, ahol a hőbevitel egységnyi növelése már a lencse kigombolódását eredményezte). Ezután a FEM alkalmazásával meghatároztam azt a hőáramsűrűséget, amely adott idő alatt biztosítja, hogy az érintkezési felület elérje az olvadáspontot. Ezután (1.1) alapján feltételeztem, hogy a hőáramsűrűség a hegesztő áramerősség négyzetével egyenesen arányos, majd a hegesztett lencse kialakulási folyamatának bemutatására újabb kísérleteket végeztem, illetve a jelenséget modelleztem. A hőáramsűrűség értékeire vonatkozó számítási eredményeket a 11-4. táblázat tartalmazza.

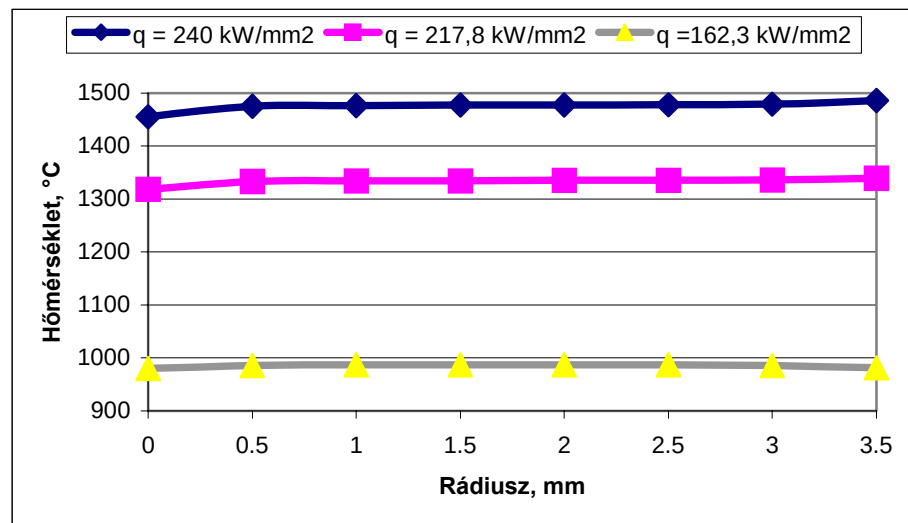
Munkarend megnevezése	I [kA]	I ² [MA ²]	q_{max} [kW/mm ²]
Extra kemény	16,9	285,61	240
	16,1	259,21	217,8
	13,9	193,21	162,3
Kemény	11,9	141,61	80
	10,7	114,69	64,8
	9,9	98,01	55,3
Lágy	8,5	72,25	29
	7,5	56,25	22,5
	6,7	44,89	18

11-4. táblázat: A hőáramsűrűség számított értékei



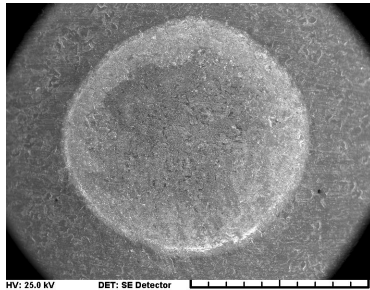
11-2. ábra

A folyási felület kialakulása extra kemény munkarend esetén ($t_h=0,02\text{s}$)



11-3. ábra

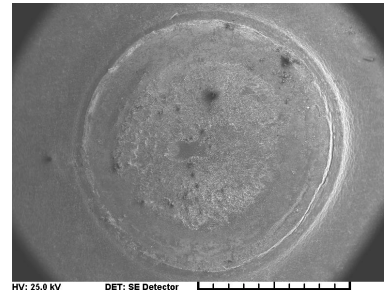
A hőmérséklet-eloszlás a lemezek érintkezési felületén extra kemény munkarend esetén ($t_h=0,02\text{s}$)



$t_h=0,02\text{s}$; $I_h=13,9\text{kA}$; $F_e=3\text{kN}$



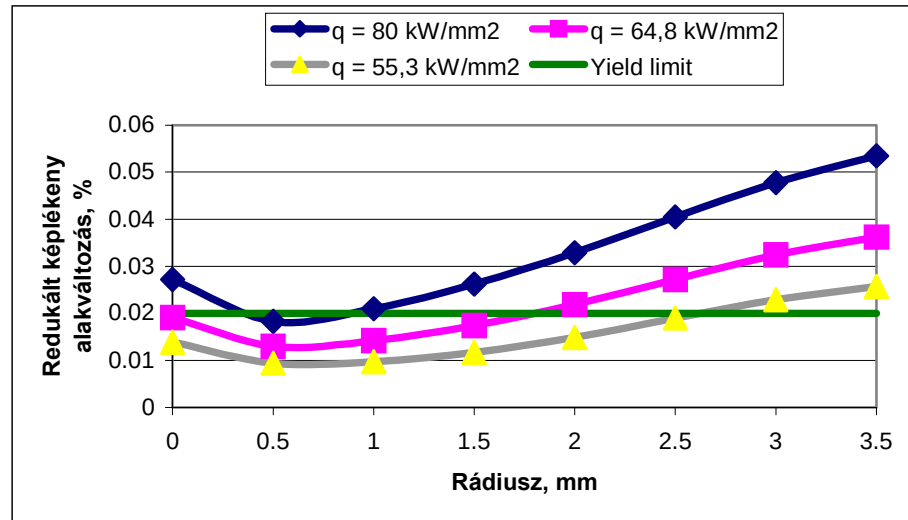
$t_h=0,02\text{s}$; $I_h=16,1\text{kA}$; $F_e=3\text{kN}$



$t_h=0,02\text{s}$; $I_h=16,9\text{kA}$; $F_e=3\text{kN}$

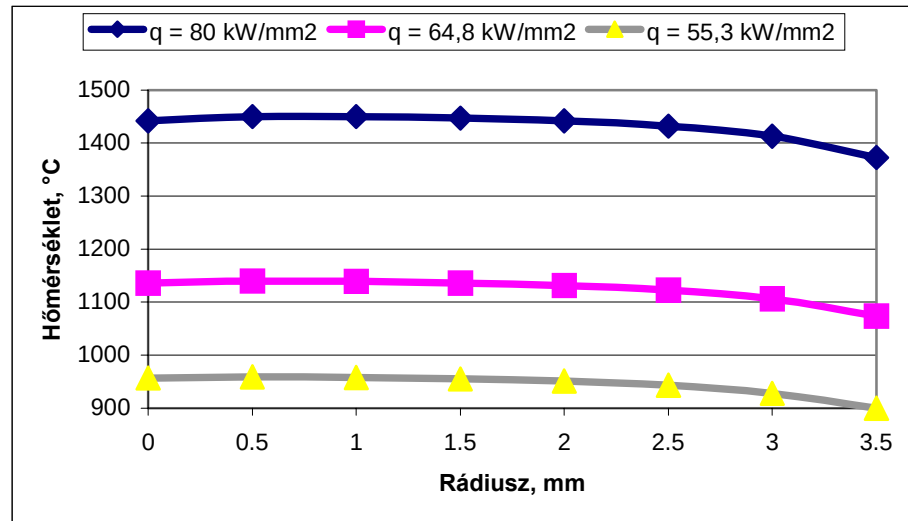
11-4. ábra

A lencse kialakulási folyamata a lemezek érintkezési felületén, extra kemény munkarend esetén



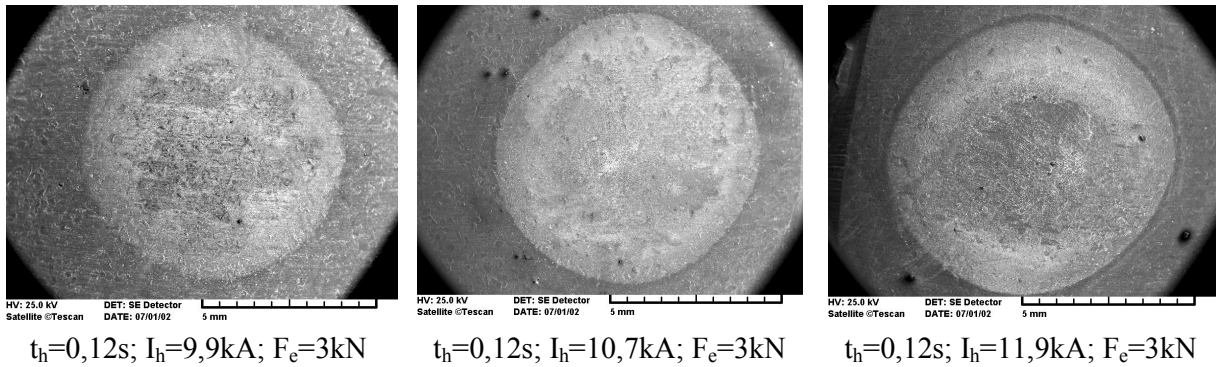
11-5. ábra

A folyási felület kialakulása kemény munkarend esetén ($t_h=0,12\text{s}$)



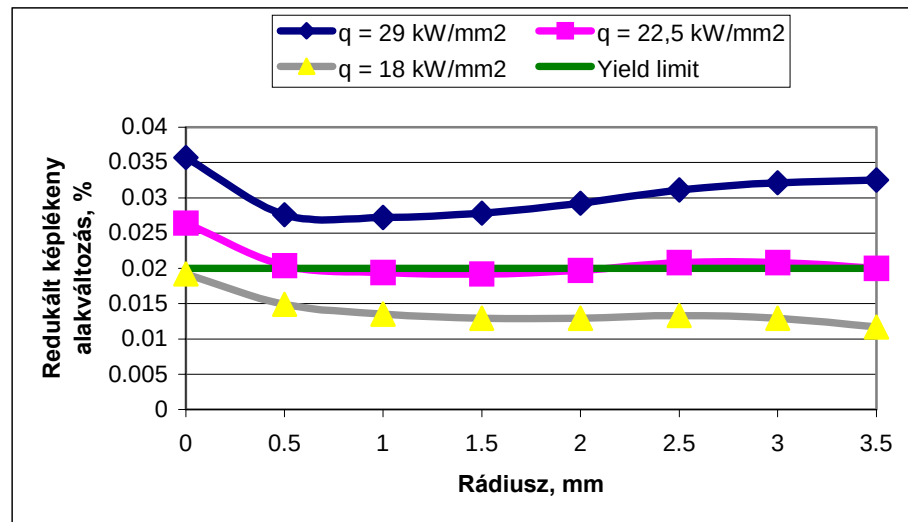
11-6. ábra

A hőmérséklet-eloszlás a lemezek érintkezési felületén kemény munkarend esetén ($t_h=0,12\text{s}$)

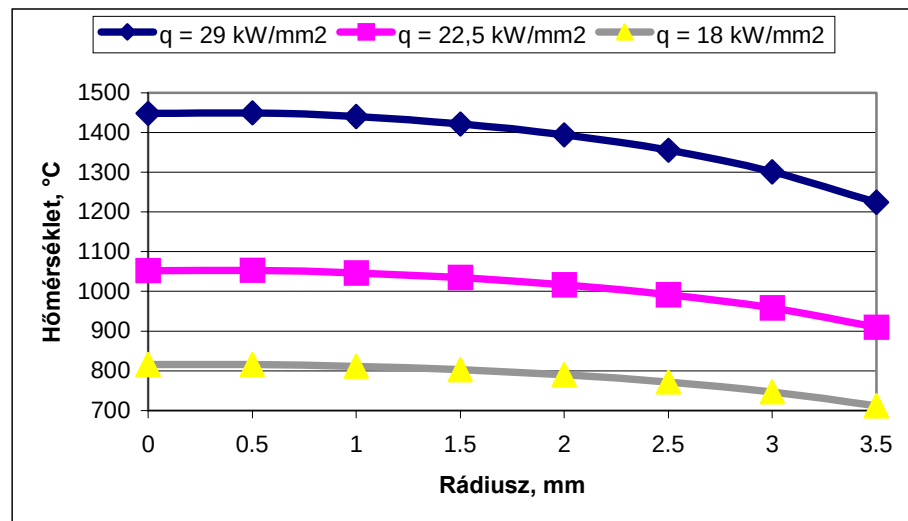


11-7. ábra

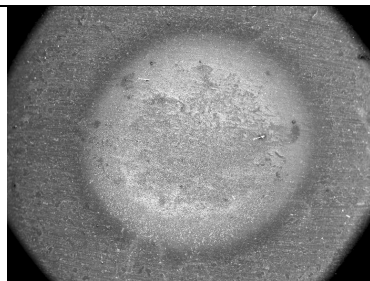
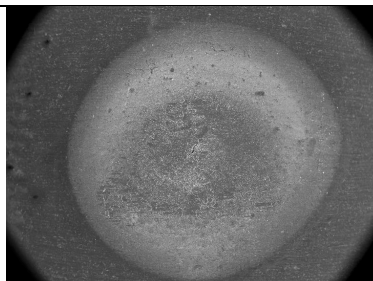
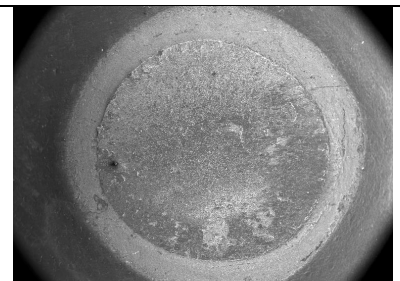
A lencse kialakulási folyamata a lemezek érintkezési felületén kemény munkarend esetén



11-8. ábra

A folyási felület kialakulása lágy munkarend esetén ($t_h=1,2s$)

11-9. ábra

A hőmérséklet-eloszlás a lemezek érintkezési felületén lágy munkarend esetén ($t_h=1,2s$) $t_h=1,2s$; $I_h=6,7kA$; $F_e=3kN$  $t_h=1,2s$; $I_h=7,5kA$; $F_e=3kN$  $t_h=1,2s$; $I_h=8,5kA$; $F_e=3kN$

11-10. ábra

A lencse kialakulási folyamata a lemezek érintkezési felületén lágy munkarend esetén

A folyási felület kialakulását különböző munkarendek esetén a 11-2, 11-5 és 11-8. ábrák, míg a hőmérséklet eloszlást különböző hőbevitel esetén a 11-3, 11-6 és 11-9. ábrák mutatják. A modellezés eredményeit kísérletileg is ellenőriztem, a fotókat a 11-4, 11-7 és 11-10. ábrák szemléltetik.

Az eredményekből levonható következtetések

Lágy munkarend esetén a folyási felület a teljes érintkezési felületen gyakorlatilag egyszerre alakul ki (11-8. ábra). Extra kemény és kemény munkarend esetén az érintkezési terület szélénél lényegesen nagyobb alakváltozás megy végbe, mint a középső területen. A képlékeny alakváltozás megindulása így az érintkezési terület szélénél kezdődik gyűrű alakban. A kísérleti eredményekről készült fotókon ez a jelenség jól látszik.

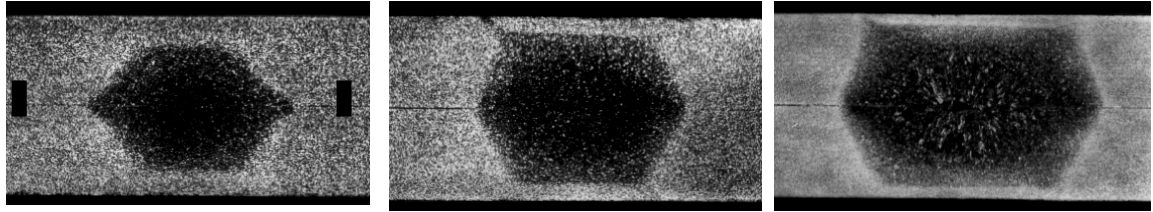
A képlékeny alakváltozás hatása az anyag fajlagos ellenállása szempontjából jelentős. A képlékenyalakítás ugyanis a vezetők ellenállását megnöveli, mert alakítás közben nagymértékben megnő a kristályhibák száma. Nagyobb ellenálláson átfolyó áram ugyan intenzívebb hőfejlődést, de az áramátfolyás szempontjából viszont kisebb áramsűrűséget eredményez az adott érintkezési területen.

Extra kemény munkarend esetén a hőmérséklet-eloszlás a teljes érintkezési felületen gyakorlatilag egyenletes. A hőmérséklet minimuma a középpontban, maximuma a kerületi pontban van. A két érték közötti eltérés mindössze 30°C. Lágy munkarend esetén a hőmérsékleti görbe maximuma egyértelműen a középpontban, míg minimuma a kerületi pontban van. A két érték közötti eltérés ekkor már jelentős, kb. 250°C.

Kaiser, Dunn és Eagar megállapítását, miszerint kemény munkarend esetén a lencse kialakulása a kerületi pontoknál kezdődik, nem találtam egyértelműen megalapozottnak. A 10-7. ábrán ugyan látszódnak bizonyos szívós törésre utaló gödröcskék, amelyek egy kissé el vannak kenődve, de a teherbíró kötés mindenképpen a középső területen jelenik meg. A bemutatott fotón levő gyűrű alakú rész inkább a - középső területhez viszonyítottan jelentősen nagyobb - képlékeny alakváltozás hatására alakul ki.

Az egyetlen jel, ami arra utal, hogy a megolvadás nem középen kezdődik el, az hogy extra kemény munkarend esetén a hőmérséklet maximuma (a modell alapján) a kerületi pontokban van. Ez az érték viszont néhány 10 °C fokra tehető, illetve hangsúlyozni kell, hogy a modell érvényessége a megolvadás előtti pillanatig tart. A megolvadáshoz szükséges jelentősen nagyobb hőmennyiség bevitelkor ez a különbség így eltűnhet. A középpont felé ugyanis a hő torlódik, a kerületi pontok felé, pedig elvezetődik.

A 11-11. és 11-12. ábrák jól mutatják az alapvető különbséget a lágy és a kemény munkarend között. Lágy munkarend kezdeti szakaszában az axiális heglencse-növekedés a jellemző, ellentétben az extra kemény munkarenddel, ahol az elnyújtott, lapos heglencse-kialakulás a jellemző.



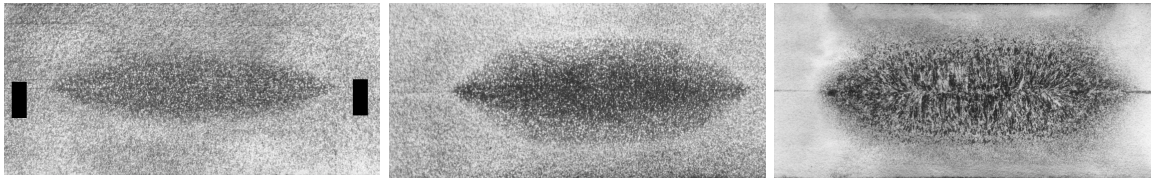
$t_h=0,04s$; $I_h=7,5kA$; $F_e=1kN$

$t_h=0,08s$; $I_h=7,5kA$; $F_e=1kN$

$t_h=0,1s$; $I_h=7,5kA$; $F_e=1kN$

11-11. ábra (a, b, c)

Az ellenállás-pontheesztett lencse kialakulási folyamata a lágy munkarend kezdetén



$t_h=0,02s$; $I_h=13,9kA$; $F_e=3kN$

$t_h=0,02s$; $I_h=14,6kA$; $F_e=3kN$

$t_h=0,02s$; $I_h=16,4kA$; $F_e=3kN$

11-12. ábra (a, b, c)

Az ellenállás-pontheesztett lencse kialakulási folyamata extra kemény munkarend esetén

11.3. Összefoglalás

Összefoglalva az extra kemény, a kemény és a lágy munkarendre vonatkozó eredményeket, a következő megállapítások tehetők:

1. A lencsekialakulás mindhárom munkarend esetén az érintkezési terület közepéről indul, de az érintkezési terület alakváltozása különböző a három munkarend esetén.
 - a. Extra kemény munkarend esetén:
 - i. A képlékeny alakváltozás nem egyenletes az érintkezési területen. Az érintkezés kerületén jelentősen nagyobb.
 - ii. A hőmérséklet-eloszlás egyenletes az érintkezési területen. Maximuma a kerületi pontokon van, de ez csak néhány fokkal nagyobb, mint a középpontban.
 - b. Lágy munkarend esetén:
 - i. A képlékeny alakváltozás gyakorlatilag egyenletes az érintkezési területen. A folyás a középpontban és a kerületi pontoknál közel azonos időben valósul meg.
 - ii. A hőmérséklet-eloszlás nem egyenletes az érintkezési területen. A középpont hőmérséklete több száz fokkal magasabb a kerületi pontok hőmérsékletéhez viszonyítva.
 - c. A hegesztési munkarend „lágylásával” a vizsgált jellemzőkre érvényes átmenetek jól megfigyelhetők.
2. A képlékeny alakváltozás és a hőmérséklet-eloszlás meghatározza a vastagság irányú lencsekialakulást:
 - a. Extra kemény munkarend esetén az alapanyag megömlésének oka, hogy a képlékeny alakváltozás miatt a nagyobb áramsűrűség és az ezzel négyzetesen arányos hőfejlődés az érintkezési terület középső tartományában van.
 - b. Lágy munkarend esetén az alapanyag megömlésének oka az érintkezési terület közepének nagyobb hőmérséklete.

12. Összefoglalás, további fejlesztési lehetőségek, ipari hasznosítások

Értekezésemben a vékony lágyacéllemezek ellenállás-ponthegeztett átlapolt egy pont kötésének minőség-centrikus optimalizálását végeztem el. Az 5. alfejezetben megfogalmazott célok elérésében a következő feladatokat hajtottam végre.

Az ismertetett kísérlettervezési módszereket alkalmaztam vékony lágyacéllemezek ellenállás-ponthegeztett átlapolt egy pont kötésének optimalizálására. Az eredmények technológiai alkalmazhatóságát ellenőriztem és a kapott eredményeket összehasonlítottam.

Az eredményekből arra következtettem, hogy az ellenállás-ponthegeztés technológiájának optimalizálására a nyíró-szakítóerő egymagában nem alkalmas, mert a teherbírási optimum az adott anyagnál és lemez méretnél nehezen elkészíthető, esztétikailag erősen kifogásolható paraméter-tartományba esik. A technológia optimalizálására komplex célfüggvényt javasoltam, amely szilárdsági és geometriai szempontok egyidejű figyelembevételével reális optimumot eredményezhet.

Az összetett célfüggvény alapján történő optimalizálás eredménye technológiai szempontból már sokkal kedvezőbb volt. Továbbiakban az okozott problémát, hogy az egyes függvényalkotók milyen súlyt jelentenek az adott célfüggvényben. A bemutatott esetekben a célfüggvények fizikai jelentését nem lehetett egzakt módon megmagyarázni.

Az ellenállás-ponthegeztett kötések nyíró-szakító vizsgálat során a szakadási folyamat elemzése különböző kötés-geometriai jellemzők esetén lehetőséget teremtett olyan célfüggvény definiálására, amely komplex módon minősíti a kötet, és amely az ellenállás-ponthegeztés során lezajló folyamatok bonyolult és összetett kapcsolata ellenére megbízható eredményt szolgáltat. Segítségével a minőség-centrikus optimalizálás eredményeként definiálható a minőségi kötés fogalma, alkalmazásával pedig, az ellenállás-ponthegeztett kötések minősíthetők.

Az ellenállás-ponthegeztett lencse kialakulási folyamatának kezdeti szakasza bemutatására szilárdságtani peremérték feladatot definiáltam, melyet vége-selemes módszerrel oldottam meg a TOCHNOG vége-selemes szoftver alkalmazásával. Az eredmények alapján

képet kaptam az ellenállás-ponthegeesztett lencse kialakulásáról különböző munkarendek esetén, illetve a minősítő rendszerben alkalmazott célfüggvény alkotók alakulásáról. A kapott elméleti eredményeket minden esetben kísérleti úton ellenőriztem.

A továbbfejlesztés lehetőségei

Jelen kutatómunka eredményei vékony lágyacéllemezek ellenállás-ponthegeesztett átlapolt egy-pontkötésére vonatkoznak. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a valóságos hegeesztett szerkezetek több pontot tartalmaznak, így további vizsgálatokat igényel:

- A több-pontkötések elkészítésekor fellépő technológiai jellegzetességek (pl. sönt-hatás) bemutatása.
- Az igénybevétel szempontjából soros-, illetve párhuzamos pont-elrendezések esete.
- Különböző anyagvastagságok ellenállás-ponthegeesztett kötése.
- Más, a lágyacéltól eltérő anyagtulajdonságok hegeesztésének esete.
- Különböző anyagok között létrehozott pontkötés esete.

Eredményül így egy olyan komplex minősítő rendszer kidolgozására nyílna lehetőség, mellyel az ellenállás-ponthegeesztett kötések megbízhatóan minősíthetők lennének.

A kutatás eredményei felhasználhatók egy, az ellenállás ponthegeesztési folyamatok technológizálását segítő szakértői rendszer kidolgozása során. Jelen kísérletsorozatot adott anyagminőség, adott anyagvastagság esetén végeztem el és igazoltam a módszer alkalmasságát optimalizálásra. A minőségcentrikus optimalítás elve azonban ugyanaz, pl. 1,5 mm-es lemezzvastagság, illetve pl. az 1.4003 anyagminőség esetén is.

Az értekezés eredményei az oktatásban is jól hasznosíthatók. A graduális és posztgraduális képzés keretein belül a szimulációs program, illetve a minősítő feltételek alkalmazási lehetőségei kitűnő lehetőséget biztosítanak a minőségcentrikus optimalizálás szükségességének bemutatására.

Az értekezés eredményei a műszaki gyakorlatban is alkalmazhatók. Az összetett szemléletű optimalizálás során megfogalmazott törvényszerűségek technológiatervezésnél jól alkalmazhatók [12-1].

A Miskolci Egyetemen, és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen is további kutatások folynak e témakörben, melyek választ adhatnak a felvetett továbbfejlesztési kérdésekre [12-2].

13. Tézisek ismertetése

1. Kísérlettervezési módszerek alkalmazásával és a kapott eredmények összehasonlításával bizonyítottam, hogy technológia-optimalizáláskor a minőségi jellemzők meghatározása a legfontosabb lépés a célfüggvény előállításakor.

1.1. A kísérleti eredményekből kimutattam, hogy a nyíró-szakítóerő maximumra való optimalizálása (maximalizálás) az ellenállás-ponthegeztett kötéseknel nem elegendő.

1.2. Az ellenállás-ponthegeztett kötések minősítésére, egy olyan célfüggvényre van szükség, amely a minőség-centrikus optimalizálás feltételeit komplex módon, egyidejűleg veszi figyelembe.

2. A vékony lágyacéllemezek ellenállás-ponthegeztett kötésének jellemzőiből az $Y = \frac{k \cdot T_a}{s}$ összefüggéssel minősítő feltételeket adtam meg.

2.1. Az ellenállás-ponthegeztett kötések tönkremenetelének elemzésével a kötés minősítésére célfüggvényt állítottam fel.

2.2. Az ellenállás-ponthegeztett kötés szakadása során létrejövő törési ívek összehasonlítása alapján felépített célfüggvény technológia-optimalizálásra az ellenállás-ponthegeztő berendezéstől függetlenül alkalmas.

2.3. Megadtam az optimális minőségi kötés fogalmát.

3. Az ellenállás-ponthegeztett kötés lencse-kialakulási folyamatának ún. kezdeti szakaszára szilárdságtani peremérték feladatot állítottam fel. Végeselemes technikákkal a modell elméleti vizsgálatát végeztem el és megadtam a feladat

numerikus megoldását. Az eredményeket kísérletileg metallográfiai módszerekkel igazoltam.

- 3.1. Kemény munkarend esetén a képlékeny alakváltozás az érintkezés területén a legnagyobb. Kimutattam, hogy a hőmérséklet a kerületi pontokon csak néhány fokkal nagyobb, mint a középpontban.
- 3.2. Lágy munkarend esetén a képlékeny alakváltozás a középpontban és a kerületi pontoknál gyakorlatilag azonos időben indul meg. A középpont hőmérséklete több száz fokkal magasabb a kerületi pontok hőmérsékletéhez viszonyítva.
- 3.3. Ellenállás-ponthegesztéskor az optimális minőségi kötés extra kemény munkarenddel állítható elő.

Köszönetnyilvánítás

1996-ban a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki Karának Hegesztéstechnológia szakirányán szereztem diplomát. Ezt követően felvételt nyertem a Miskolci Egyetem doktori képzésére, a Gépészmérnöki tudományok program, Gyártási folyamatok alprogram, Mechanikai Technológiák (Hegesztés) részprogramjára, majd 1999-ben teljesítettem az abszolutórium feltételeit. 2000-ben megszereztem az EWE és IWE diplomákat. 2001-től az ESAB Kft Északkelet-magyarországi területi képviselője és a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék oktatója vagyok. Az eltelt néhány év alatt az ellenállás-ponthegesztés területén végzett folyamatos kutatáson kívül számos ipari munkában vettem részt, amelyek tapasztalatai jelentősen segítettek az értekezés elkészültét.

Az értekezés elkészülte több tudományterület párhuzamos alkalmazását kívánta meg, amelyek megismerését nagyban elősegítette a doktori képzés során oktatott tantárgyak ismeretanyaga, és az előadó professzorok patronálása. Külön köszönettel tartozom Dr. Balogh András egyetemi docensnek, tudományos vezetőmnek, aki a kutatás irányítását végezte. Dr. Tisza Miklós tanszékvezető úrnak, aki a technikai megvalósítás feltételeit és a kutatás háttérét biztosította. Dr. Páczelt István akadémikusnak és Dr. Sárközi Lászlónak a mechanikai modell felállításában nyújtott támogatásukért. Dr. Tranta Ferencnek és Kovács Árpádnak a Scanning Elektron mikroszkópos felvételek elkészítésében és annak értelmezésében nyújtott segítségükért.

Köszönöm továbbá minden tanszéki kollégámnak, akik hasznos tanácsaikkal, a próbatestek előkészítésével, fotózásával, a vizsgálatok végrehajtásában segítettek és támogatták disszertációm elkészülését.

Köszönettel tartozom a Bay Zoltán Alapítványnak, aki doktori kiegészítő ösztöndíjával 1996 és 1999 között támogatta kutatói pályám indulását.

Felhasznált irodalom**1. fejezet**

- [1-1] Zorkóczy B.: Hegesztéstechnológia IV. Tankönyvkiadó, Budapest, 1963.
- [1-2] Romvári P.: Hegesztéstechnológia II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
- [1-3] G. E. Lheureux, E. I. Belotte: Ellenálláshegesztés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970.
- [1-4] Beckert, Neuman: A hegesztés alapismeretei, Hegesztési eljárások, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1972.
- [1-5] Herden A.: Hegesztési Kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [1-6] Bauer F.: Ellenálláshegesztés, OTKI, Budapest, 1974.
- [1-7] Becker, Kovács: Hegesztés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
- [1-8] Orlov: Ellenálláshegesztés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- [1-9] Baránszky-Jób I.: Hegesztési Kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
- [1-10] Bauer F.: Hegesztéstechnológia c. tárgy segédletei 9. számú füzet, Ellenállás ponthegesztés, BME, Mechanikai Technológiai Tanszék
- [1-11] H. A. Nied: The Finite Element Modelling of the Resistance Spot Welding Process Welding Research Supplement, 1984. April pp. 123s-132s

2. fejezet

- [2-1] I. W. Johnson: Spot Welding of Carbon Steel, Welding Research, 1960. March pp. 89s-96s
- [2-2] AWS: Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 6, Welding, Brazing and Soldering, 1983.
- [2-3] W. D. Padian, R. P. Robelotto: Resistance Welding of Inconel 718 Nickel Base Alloy Welding Research, 1964. Febr. pp. 49s-56s
- [2-4] N. A. Freytag: A Comprehensive Study of Spot Welding Galvanized Steel, Welding Research Supplement, 1965. April pp. 145s-156s
- [2-5] L. M. Friedman, R. B. McCauley: Influence of Metallurgical Characteristics on Resistance Spot Welding of Galvanized Steel, Welding Research Supplement, 1969. Okt. pp. 454s-462s
- [2-6] C. T. Lane, C. D. Sorensen, G. B. Hunter, S. A. Gedeon, T. W. Eagar: Cinematography of Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheet, Welding Research Supplement, 1987. Sept. pp. 260s-265s
- [2-7] K. C. Wu, T. A. Krinke: Resistance Spot Welding of Titanium Alloy 8A1-1Mo-1V Welding Research, 1965. Aug. pp. 365s-371s
- [2-8] C. A. Roest: Spot Welding Aluminium Using a Rotating Electrode, Welding Journal, 1985. July pp. 36-40
- [2-9] P. B. Dickerson, B. Irving: Welding Aluminium: It's not as Difficult as it Sounds Welding Journal, 1992. April pp. 45-50

- [2-10] J. Matsumoto, L. Jinrui: Resistance Spot Welding of aluminium alloy
Welding in the World, 1994. Sept. pp. 407
- [2-11] U. Krüger: Parameter selection for the resistance spot welding of aluminium-lithium alloys, Welding and Cutting, 1995. Jan. pp. E5-E8
- [2-12] M. Hao, K. A. Osman, D. R. Boomer, C. J. Newton: Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminium, Welding Research Supplement, 1996. Jan. pp. 1s-8s
- [2-13] Thornton, Krause, Davies: The Aluminium Spot Weld
Welding Research Supplement, 1996. March pp. 101s-108s
- [2-14] R. L. Cohen, K. W. West: Aluminium Spot Weld Strength Determined from Electrical Measurements, Welding Journal, 1985. June pp. 37-41
- [2-15] Gean, Westgate, Kucza, Ehrstrom: Static and Fatigue Behavior of Spot-Welded 5182-0 Aluminium Alloy Sheet, Welding Research Supplement, 1999. March pp. 80s-86s
- [2-16] Browne, Chandler, Evans, Wen: Computer Simulation of Resistance Spot Welding in Aluminium: Part I, Welding Research Supplement, 1995. Okt. pp. 339s-344s
- [2-17] Browne, Chandler, Evans, James, Wen, Newton: Computer Simulation of Resistance Spot Welding in Aluminium: Part II, Welding Research Supplement, 1995. Dec. pp. 339s-344s
- [2-18] Balogh A.: Korrozióálló CrNi acél ellenállásponthegesztése és a pontkötések tulajdonságai, Hegesztéstechnika, II. évfolyam 2. szám (1991/2) pp. 28-29
- [2-19] Kaliszewski, Sitko, Grochla: Investigation into the weldability of the new OH18AN6. G3 stainless steel, Welding Research Abroad, 1995. Nov. pp. 5-13
- [2-20] D. N. Waller, P. M. Knowlson: Electrode separation applied to quality control in resistance welding Welding Research Supplement, 1965. April pp. 168s-174s
- [2-21] W. P. Simmons: Spot Welding Electrode Life, Welding Journal, 1967. Nov. pp. 915-920
- [2-22] A. V. Nadkarni, E. P. Weber: A new dimension in resistance welding electrode geometry, Welding Research Supplement, 1977. Nov. pp. 331s-338s
- [2-23] R. J. Bowers, C. D. Sorensen, T. W. Eagar: Electrode Geometry in Resistance Spot Welding, Welding Research Supplement, 1990. Febr. pp. 45s-51s
- [2-24] B. B. Shrivastava, P. Vasudevan, V. A. Pankhawala, S. Raju: Reliability based design for spot welded joints under fatigue in automotive components, Fatigue Design 1998.

3. fejezet

- [3-1] Adasinskii, Svar. Proizv. 1955. No. 8. pp. 6
- [3-2] D. K. Roberts, J. E. Roberts, A. A. Wells: Fundamental Resistance Welding Investigations; Welding Research Supplement, 1958. May pp. 3-12.
- [3-3] Bowen, Williamson: Electrical conduction in solid-I: Influence of the passage of current on the contact between solids, Proc. Roy. Soc. 1958, London, pp. 1-12
- [3-4] Greenwood, Williamson: Electrical conduction in solid-II: Theory of temperature-dependent conductors, Proc. Roy. Soc. 1958, London, pp. 13-31

- [3-5] G. R. Archer: Calculations for Temperature Response in Spot Welds, Welding Research Supplement, 1960. Aug. pp. 327s-330s
- [3-6] J. E. Gould: An Examination of Nugget Development during Spot Welding, Using Both Experimental and Analytical Techniques, Welding Research Supplement, 1987. Jan. pp. 1s-10s
- [3-7] J.A. Greenwood: Temperatures in Spot Welding, British Welding Journal, 1961. June pp. 316-322
- [3-8] K. P. Bentley, J. A. Greenwood, P. McKnowlson, R. G. Baker: Temperature Distributions in Spot Welds, British Welding Journal, 1963. Dec. pp. 613-619
- [3-9] W. Rice, E. J. Funk: An Analytical Investigation of the Temperature Distributions During Resistance Welding, Welding Research Supplement, 1967. April pp. 175s-186s
- [3-10] A. F. Houchens, R. E. Page, W. H. Young: Numerical modelling of resistance spot welding, Proceedings of Numerical Modelling Manufacturing Processes, ASME Winter Conference, 1977. pp. 117-129
- [3-11] J. G. Kaiser, G. J. Dunn, T. W. Eagar: The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation during Spot Welding, Welding Research Supplement, 1982. June pp. 167s-174s
- [3-12] H. A. Nied: The Finite Element Modelling of the Resistance Spot Welding Process Welding Research Supplement, 1984. April pp. 123s-132s
- [3-13] Satoh, Katayama, Abe: Temperature distribution and breakdown of oxide-layer during resistance spot welding using two-dimensional model, Annual assy. of I.I.W. 1969.
- [3-14] H. S. Cho, Y. J. Cho: A Study of the Thermal Behavior in Resistance Spot Welds Welding Research Supplement, 1989. June pp. 236s-244s
- [3-15] P. S. Wei, C. Y. Ho: Axisymmetric Nugget Growth during Resistance Spot Welding, Journal of Heat Transfer, 1990. May pp. 309-316
- [3-16] W. F. Savage, E. F. Nippes, F. A. Wassel: Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds, Welding Research Supplement, 1978. Febr. pp. 43s-50s
- [3-17] J. H. Broomhead, P. H. Dony: Resistance spot welding quality assurance, Welding and Metal Fabrication, 1990. July pp. 309-314
- [3-18] P. S. Wei, F. B. Yeh: Factors Affecting Nugget Growth with Mushy-Zone Phase Change during Resistance Spot Welding, Journal of Heat Transfer, 1991. Aug. pp. 643-649
- [3-19] C. L. Tsai, Jammal, J. C. Papritan, D. W. Dickinson: Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth, Welding Research Supplement, 1992/2. pp. 47s-54s
- [3-20] H. Difant-Jaeckels, A. Galtier: Fatigue Lifetime Prediction Model for Spot Welded Structures, Fatigue Design 1998. Vol. I. pp. 191-204
- [3-21] S. Nagai, T. Yoshimura, T. Nakaho, Y. Murakami: Analysis of stress by the combination of thermoelastic stress analyzer and FEM, Fatigue Design 1998. Vol. I. pp. 205-216
- [3-22] H. F. Henrysson, F. Abdulwahab, B. L. Josefson, M. Fermer: Residual Stresses in Resistance Spot Welds: Finite Element Simulations, X-Ray Measurements and Influence on Fatigue Behaviour, Fatigue Design 1998. Vol. I. pp. 179-190

- [3-23] Borhy I.: Ellenállás-ponthegesztés számítógépes modellezése ANSYS 5.3 végeselemes rendszer segítségével, MicroCad '97 Konferencia Kiadványa, Mechanikai Technológiák, 1997. Febr. 26-27. pp. 51-59
- [3-24] Hegman N., Szabó P., Klementis O.: Finite Element Modelling of Resistance Spot Welding, MicroCad 2000 Nemzetközi Számítástechnikai Konferencia Szekció-kiadványa, Mechanikai Technológiák, p:27-31

5. fejezet

- [5-1] TOCHNOG explicit/implicit FE program (www.tm.wb.utwente.nl/~roddeman/tm_release)

6. fejezet

- [6-1] Szabványgyűjtemények, 70. kötet. Hegesztés III. Szabványkiadó, Budapest, 1984.

7. fejezet

- [7-1] Adler, Markova, Granovszkij: Kísérletek tervezése optimális feltételek meghatározására, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [7-2] Balogh A.: A mérnöki kísérletek tervezése és végrehajtása, A kísérleti eredmények feldolgozása, Oktatási segédlet, NME, Miskolc, 1980.
- [7-3] Dowdy, Wearden: Statistics for research, John Wiley and Sons, New York, 1983.
- [7-4] Taguchi: System of Experimental Design, Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs, Kraus International Publications, New York, 1987.
- [7-5] Kísérlettervezés (G. R. Technologies Ltd. szellemi terméke)
- [7-6] Montgomery, Douglas: Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [7-7] Kemény-Deák: Mérések tervezése és eredmények értékelése, Műszaki Kiadó, Budapest

8. fejezet

- [8-1] Balogh A.: Hegesztéstechnológia többszempon্তু optimalizálása Hegesztéstechnika, VI. (1995) 4. pp. 11-15
- [8-2] Balogh A.: A dörzshegesztés folyamatjellemzői és alkalmazásuk optimális kötéstulajdonságok elérésére (Process Variables of Friction Welding and Their Application to Achieve Optimal Joint Properties), Ph.D. értekezés, Miskolci Egyetem, 1995. pp. 1-40
- [8-3] Balogh A.: Ellenállásponthegesztés technológiájának új szemléletű optimalizációja Gép, 48. (1996) 1. pp. 24-28
- [8-4] Balogh A.: New Optimisation Concept for Welding Processes, Publ. Univ. of Miskolc, Series C, Mechanical Engineering, Vol. 46 (1996) No. 1. pp. 5-17
- [8-5] Balogh A.: Standardizálási módszerek technológia-optimalizáláshoz, Észak-Magyarországi Gazdaság-Kultúra-Tudomány, 1997. 9-10. pp. 21-26

- [8-6] Balogh A.: Komplex minőségértékelés standardizált termékjellemzőkkel, Minőség és Megbízhatóság, 1998. No. 2. pp. 70-74
- [8-7] Galántai A., Hujter M.: Optimalizálási módszerek, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1997.
- [8-8] Jármái K., Farkas J.: Új eredmények a hegesztett szerkezetek tervezése területén (kézirat)
- [8-9] Török I.: Kötéstulajdonságokat befolyásoló tényezők Al-ötvözetek fogyóelektródás ívhegesztésénél, Munkásság tézisszerű összefoglalása Ph.D., Miskolci Egyetem, Miskolc, 1995. pp. 1-43.
- [8-10] Szunyogh L.: Austenites Cr-Ni acélok ponthegeztési feltételei és a kötések mechanikai tulajdonságai, A Vasipari Kutató Intézet Évkönyve IV, Budapest, 1969.

10. fejezet

- [10-1] Bauer F.: Ellenálláshegesztés, OTKI, Budapest, 1974.
- [10-2] J. A. Greenwood: Temperatures in Spot Welding, British Welding Journal, 1961. June pp. 316-322
- [10-3] J. G. Kaiser, G. J. Dunn, T. W. Eagar: The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding, Welding Research Supplement, 1982. June, pp. 167s-174s
- [10-4] H. A. Nied: The Finite Element Modelling of the Resistance Spot Welding Process Welding Research Supplement, 1984. April pp. 123s-132s
- [10-5] C. L. Tsai, Jammal, Papritan, D. W. Dickinson: Modelling of Resistance Spot Weld Nugget Growth, Welding Research Supplement, 1992/2. pp. 47s-54s
- [10-6] Tranta F.: Acélok törése, fraktográfiaja, Miskolci Egyetem, Anyagtudományi Intézet, Fémteni Tanszék

11. fejezet

- [11-1] Brenner, Palotás B.: Számítógéppel segített hegesztés CAW, BME, Budapest, 1989.
- [11-2] Páczelt I., Pere: Modelling of wearing problem coupled with heat generation, Gép, L. évfolyam, 1999.
- [11-3] Béda Gy., Kozák I., Verhás: Kontinuummechanika, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1986.
- [11-4] Béda Gy., Kozák I.: Rugalmas testek mechanikája, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1987.
- [11-5] Czibere T.: Vezetékes hőátvitel, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998.
- [11-6] Kaliszky S.: Képlékenységtan, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1975.
- [11-7] Kaye, Laby: Tables of Physical and Chemical Constants and some Mathematical Functions, Longman Inc. New York, 1986.
- [11-8] Goldenblat: Szilárdsági számítások a gépészetben, Testek nagy hőmérsékleten, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.
- [11-9] Páczelt I.: Végeselem-módszer a mérnöki gyakorlatban, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1999.
- [11-10] A. Sz. Gelman, Sajtólóhegesztés, Műszaki Könyvkiadó, 1973.

- [11-11] C. S. Kirk, L. Béres, A. Balogh, A. R. Mileham: Predicting austenite grain size and homogeneity using continuous heat flow equations, Proceedings of MicroCad '99 International Computer Science Conference, Miskolc, Section H: Mechanical Technologies, pp. 13-18
- [11-12] Tisza M.: Metallográfia, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998.
- [11-13] Gibbins: Thermo-mechanics, The Governing Equations, Pergamon Press, Oxford, 1970.
- [11-14] R. D. Cook: Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Elsevier, 1970. pp. 293

12. fejezet

- [12-1] Palotás B: A hegesztés modellezésének hazai és nemzetközi helyzete
Proc. of XI. Országos Hegesztési Konferencia pp. 105-119, Budapest, 2002 III. 28.-29.
- [12-2] Borhy I., Schwartz I.: Adaptation of FEM in Design of Technology of Resistance Spot Welding in Railway Production, Proceedings of MicroCad 2002 International Computer Science Conference, Miskolc, 2002. pp. 13-19.

1. tézis

- [1] Szabó P.
Hegesztéstechnológia optimalizálása összetett célfüggvény segítségével
TDK dolgozat, Miskolci Egyetem, 1994. pp. 1-33
- [2] Szabó P.
Vékony lágyacéllemezek ellenállás-ponthegesztési feladatának optimalizálása nemlineáris polinommal
TDK dolgozat, Miskolci Egyetem, 1995. pp. 1-26
- [3] Szabó P.
Ellenállás-ponthegesztés technológiájának optimalizálása többszemponútú célfüggvény segítségével
Gépgyártástechnológia, XXXVI/9-10. (1996. Szept-Okt), pp. 55-59
- [4] Szabó P.
Optimisation of Technology of Resistance Spot Welding by Using Multi-objective Function
Gép, IL. évfolyam, 1997. 1. szám, pp. 39-42
- [5] Szabó P.
Computer Aided Optimisation of Welding Technology
MicroCad '97 Nemzetközi Számítástechnikai Konferencia kiadványa, Mechanikai Technológiák, pp. 61-67
- [6] Szabó P.
Optimisation of Technology of Resistance Spot Welding Using Non-linear Polynomial
Gépgyártástechnológia, XXXVII/3 (1997. Márc), pp. 13-16
- [7] Szabó P.
Optimalizációs módszerek alkalmazása vékonylemezek ellenállás-ponthegesztésére
Műszaki Tudományos Füzetek, Kolozsvár, 1997. pp. 57-60
- [8] Szabó P.
Vékony Al-lemezek ellenállás-ponthegesztésének optimalizálása Box-Wilson féle módszerrel
Doktoranduszok Fóruma 1997 kiadványa, pp. 62-66
- [9] Szabó P.
Effects of the welding parameters on final properties in resistance spot welding of commercial Al sheet-joints
COPERNICUS IIIrd Annual Meeting (AMME' 97) Proceedings, pp. 260-263
- [10] Szabó P.
Resistance spot welding of unalloyed Al sheet-joints in different surface conditions
MicroCad '98 Nemzetközi Számítástechnikai Konferencia kiadványa, pp. 91-95
- [11] Szabó P.
Könnyűfém ellenállás-ponthegesztésének technológia-optimalizálása összetett célfüggvénnyel
Műszaki Tudományos Füzetek, Kolozsvár, 1998. pp. 237-240

- [12] Szabó P.
Az ellenállás-ponthegesztés metallográfiai vizsgálatokra alapozott optimalizálása
Műszaki Tudományos Füzetek, Kolozsvár, 1999. pp. 81-84

2. Tézis

- [13] Szabó P.
Az ellenállás-ponthegesztett kötés minősítése
Hegesztéstechnika, XI. évf. 4. sz. pp. 30-36

3. tézis

- [14] Szabó P.
Vékonylemezek ellenállás-ponthegesztett kötésének kialakulási folyamata
Doktoranduszok Fóruma '99 Szekciókiadványa, p:71-77
- [15] Szabó P., Hegman N., Klementis O.
Finite Element Modelling of Resistance Spot Welding
MicroCad 2000 Nemzetközi Számítástechnikai Konferencia Szekció-kiadványa,
Mechanikai Technológiák, p:27-31
- [16] Szabó P.
Az ellenállás-ponthegesztés véges elemes modellezésének sajátosságai
Műszaki Tudományos Füzetek, Kolozsvár, 2000. p:201-206
- [17] Szabó P., Balogh A.
Finite Element Modelling of Formation Process on Resistance Spot Welded Joint
3rd GTE-MhtE-DVS International Conference on Welding 2000, p:313-317
- [18] Szabó P., Balogh A.
Az ellenállás-ponthegesztett kötés kezdeti szakaszának véges elemes modellezése
Gép, LI. Évfolyam, 2000. 6. Szám, p:119-121
- [19] Szabó P., Tisza M., Fülöp T., Adorján G., Kiss A., Magyar Z., R. Rowshan, ifj. Tisza
Modellezés és szimuláció a Mechanikai Technológiákban
Gépgyártástechnológia, XL. évf. 8. szám, 2000. augusztus, pp. 13-18
- [20] Szabó P.
Az érintkezési felület deformációja az ellenállás-ponthegesztési folyamat korai
stádiumában
Gép, LIII. Évf. 2002/2-3, pp. 26-29
- [21] Szabó P.
Deformation of Contact Area During the Early Stage of Resistance Spot Welding
MicroCad 2002, Material Science Engineering, Production Systems and Processes
Section, pp. 35-41
- [22] Szabó P., Balogh A.
Modelling of Resistance Spot Weld Nugget Formation During Long and Short Time
Welding Using FEM, Publ. Univ. of Miskolc, Series C, Production Processes and
Systems (Közlésre elfogadott teljes terjedelmű közlemény)

1. MELLÉKLET: Pontkötések minőségi osztályai az *RWMA* szerint

Minőségi osztály	Jellemzők	Lemez-vastagság: 0,5 mm	Lemez-vastagság: 1 mm	Lemez-vastagság: 1,5 mm	Lemez-vastagság: 2 mm	Lemez-vastagság: 2,5 mm	Lemez-vastagság: 3 mm
A	F_{nysz} , kN	2	5,5	11	15	20	30
	I_h , kA	7	9	11	13	15	17
	t_h , s	0,1	0,17	0,24	0,35	0,42	0,5
	F_e , kN	1,2	2,4	3,6	4,8	6	7,2
	d_e , mm	4	5,5	7	8	9	10
B	F_{nysz} , kN	1,7	4,4	10	14	19	28
	I_h , kA	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12
	t_h , s	0,17	0,35	0,48	0,6	0,73	1,0
	F_e , kN	0,8	1,6	2,4	3,2	4	4,8
	d_e , mm	3,5	5	6,5	7,5	8,5	9,5
C	F_{nysz} , kN	1,4	4,1	8,8	12,5	17	26
	I_h , kA	5	6	7	8	9	10
	t_h , s	0,36	0,6	0,8	0,96	1,1	1,3
	F_e , kN	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4
	d_e , mm	3	4,5	6	7	8	9
D	F_{nysz} , kN	1,1	3,6	6,7	10	14	20
	I_h , kA	4	4,8	5,6	6,4	7,2	8
	t_h , s	0,7	0,95	1,2	1,5	1,75	2,0
	F_e , kN	0,3	0,6	0,9	1,1	1,4	1,7
	d_e , mm	2,5	4	5	6	7	8
E	F_{nysz} , kN	0,8	2,5	4,8	7,4	11	17
	I_h , kA	3,5	4	4,5	5	5,5	6
	t_h , s	1,2	1,5	1,8	2,2	2,6	3,0
	F_e , kN	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
	d_e , mm	2	3	4	5	6	7