

**Óbudai Egyetem**  
**Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar**  
**Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet**



**TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT**

# **ELEKTROMÁGNESES ALAKÍTÁSSAL LÉTREHOZOTT ALUMÍNIUM CSŐ-MAG KÖTÉSEK**

**Szerző:** **Porkoláb Péter**  
gépészmérnöki szak, III. évfolyam

**Konzulens:** **Dr. Rác Pál**  
egyetemi docens  
**Dr. Göbl Nándor**  
kutató mérnök

**Budapest, 2012.**

## Tartalomjegyzék

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. Bevezetés.....                                                                       | 1  |
| II. Célkitűzés.....                                                                     | 2  |
| III. Az elektromágneses alakítás bemutatása.....                                        | 3  |
| IV. Alakzáró kötések létrehozása elektromágneses alakítással, a kötések vizsgálata..... | 9  |
| V. Kiértékelés .....                                                                    | 16 |
| VI. Összegzés .....                                                                     | 20 |
| Felhasznált irodalom .....                                                              | 21 |
| Ajánlott irodalom.....                                                                  | 21 |
| Köszönetnyilvánítás .....                                                               | 22 |

### I. Bevezetés

A TDK dolgozat témája alumínium cső és rúd közötti alakzáró kötések kialakítása egy kevésbé ismert és elterjedt technológiával az elektromágneses alakítással, valamint ezzel az eljárással létrehozott kötések vizsgálata.

Az elektromágneses alakításra vonatkozó 1958-as alapszabadalmat Harvey és Brower nyújtotta be. Az azóta eltelt időszakban számos országban kísérleteztek, sok disszertáció készült, és ipari technológiák sorát dolgozták ki e témakörben. Napjaink igényei: az anyag-, energia-, időtakarékoság, a környezetvédelem előírásai, valamint az elektronikában végbement fejlődés új lendületet adott e technológia fejlődésének és további ipari alkalmazásának [1] [2].

Magyarországon is volt előzménye az elektromágneses alakítással kapcsolatos kutatásoknak, az 1960-as évek közepétől a Villamosipari Kutató Intézet (VKI) és a Gépipari Technológiai Intézet (GTI) kutatói a technológia akkori szintjéhez mérten jelentősnek mondható kutatási eredményekkel járultak hozzá a technológia fejlődéséhez. 1970-90 között a GTI négy berendezést készített a Német Demokratikus Köztársaság részére ipari célokra [2].

A TDK dolgozat bemutatja az elektromágneses alakítást, ami képlékeny hidegalakítási eljárás, a nagyenergiájú (sebességátvitelen alapuló) technológiának lemez- vagy cső alakú munkadarabokra kidolgozott változata, amely az elektrodinamikus alakító eljárások csoportjába tartozik [3].

Elektromágneses alakítással jó villamos vezetőképességű és alacsony folyáshatárú lemez- vagy cső alakú munkadarabokat alakítanak elektromágneses impulzussal, mechanikus és hidraulikus kapcsolat nélkül. A nagyenergiájú alakító eljárások közül ciklusideje a legkisebb, így tömeggyártásban is használható. Legfontosabb alkalmazási jelentősége, hogy segítségével olyan feladatokat lehet megoldani, amit más technológiával nem, vagy csak nagyon bonyolult módon lehetséges [2] [3].

## **II. Célkitűzés**

Korábbi munkánk során elméletben és gyakorlatban is megismertük az eljárást. Réz cső és acél magok közötti kötéseket készítettünk, és vizsgáltuk a kötések tulajdonságait, teherbíró képességüket. A kötések vizsgálata során világossá vált, hogy csak axiális húzó igénybevételnek ellenálló megoldások nem elegendőek, az ipari igények csavarásnak is ellenálló kötéseket igényelnek. Ezen felismerés alapján kitűztük a további kutatás céljait. Egyrészt figyelembe véve a járműipari igényeket azonos anyagminőségű, alumínium cső és mag közötti kötéseket célszerű készíteni. Másrészt új, hosszanti hornyos kialakítású magokat alkalmazva, csavarásnak is ellenálló kötéseket kívántunk létre hozni kompressziós szerszámelrendezéssel. Az elkészített kötéseket röntgen tomográfus, valamint szakító és csavaró vizsgálatnak alávetve elemezhető a kötések teherbíró képessége, a geometriai kialakítás, a cső falvastagságának és az alkalmazott alakítási (elektromos) energia nagyságának hatása.

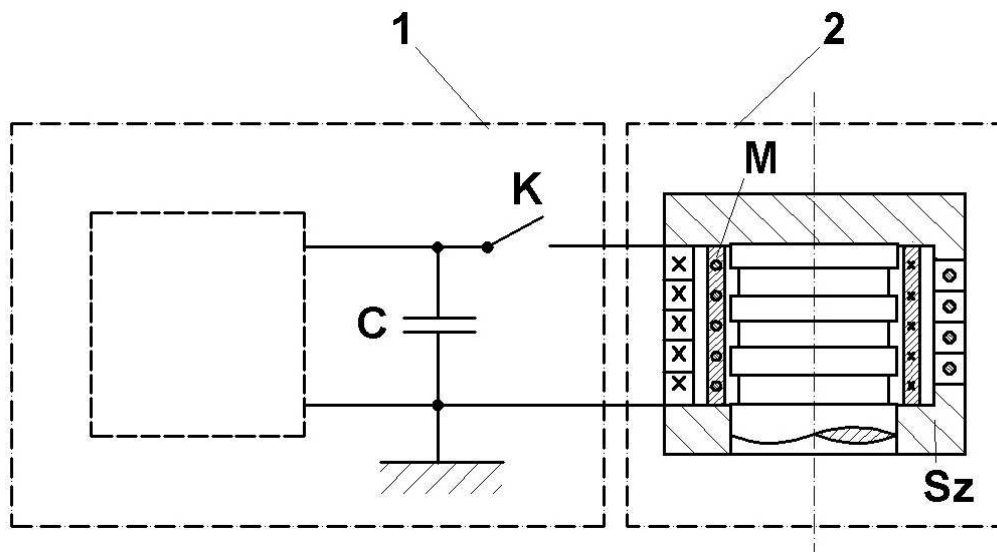
## **III. Az elektromágneses alakítás bemutatása**

Az elektromágneses alakítás képlékeny hidegalakító eljárás, a nagy energiasebességű (sebességhatáson alapuló) technológiának jó villamos vezetőképességű és alacsony folyáshatárú lemez- vagy csőszerű munkadarabokra kidolgozott változata, mely az elektrodinamikus alakító eljárások csoportjába tartozik. Elektromágneses alakítással mechanikus és hidraulikus kapcsolat nélkül nagy energiasűrűségű elektromágneses impulzussal alakítanak [1] [3].

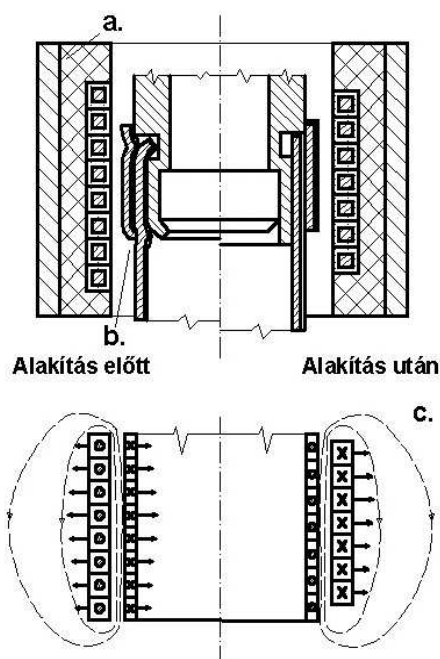
A nagyenergiájú alakító eljárások közös jellemzője a hagyományos alakító eljárásokhoz képest, hogy a munkadarab több nagyságrenddel nagyobb alakváltozási sebességét ( $>10^2 \text{ s}^{-1}$ ) koncentrált energia impulzusszerű felszabadítással hozzák létre, továbbá kevesebb számú energiaátalakításra kerül sor. Az alakító nyomás általában igen nagy, és igen rövid hatásidejű.

A nagyenergiájú alakító eljárásokat akkor alkalmazzák, ha nem gazdaságos hagyományos sajtológépeken végezni az alakítást a munkadarab anyaga, nagy mérete, a gyártandó kis darabszám (felszerszámozási költség) miatt. A nagyenergiájú alakító eljárások közül az elektromágneses alakítás ciklusideje a legkisebb, így tömeggyártásban is használható eljárás. Kisebb munkadarabok és nagy sorozatnagyságok esetén alkalmazzák [3] [4].

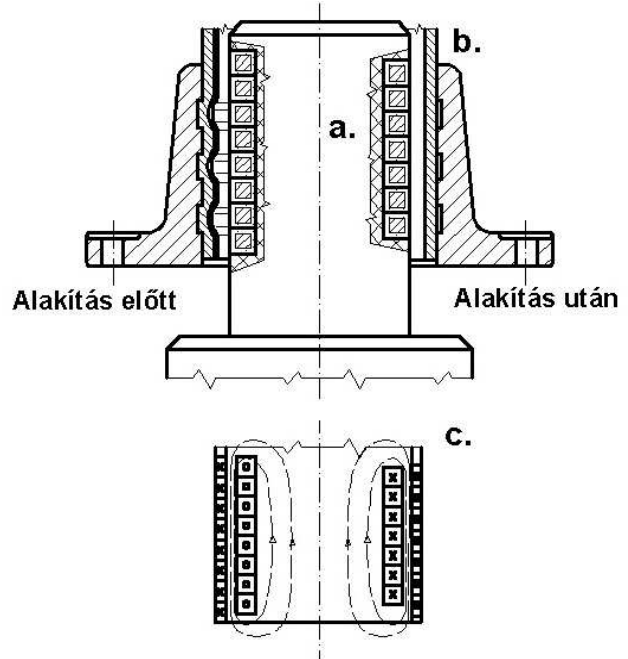
Az elektromágneses alakítóberendezés két fő részből: nagyáramú impulzusgenerátorból (legfontosabb részei: energiatároló kondenzátortelep és nagyáramú kapcsoló) és alakító szerszámból (alakítótekerces és alakadó szerszámfél) áll. Az elektromágneses alakításhoz szükséges energiát a kondenzátortelep feltöltéséből nyerik; a töltőfeszültség tartománya 3...15 kV. Az alakítóberendezésben tárolt energiát meghatározza a kondenzátortelep kapacitása és töltési feszültsége. A tárolt energia mennyisége fokozatmentesen szabályozható a töltési feszültség beállításával. Az alakítótekerces a munkadarabhoz viszonyított helyzete szerint lehet kompressziós tekercs (körbeveszi a munkadarabot), expanziós tekercs (a munkadarab belsejében van), síktekerces (munkadarabbal párhuzamos). Kompressziós és expanziós tekercssel csöveket, üreges profilokat, síktekerccsel lemezeket lehet alakítani. Az eljárásnál alkalmazott hatásmechanizmus megköveteli a munkadarab esetében a zárt alakzatot, és a jó – réz vezetőképességének 10%-ánál nem kisebb – vezetőképességet. Rossz vezetőképességű fém munkadarab is alakítható, ha az alakítótekerces felőli felületén jó vezetőképességű bevonattal látják el. A tekercs mechanikai szilárdságának elegendőnek kell lennie az alakítási nyomások felvételére [1] [2] [4] [5].



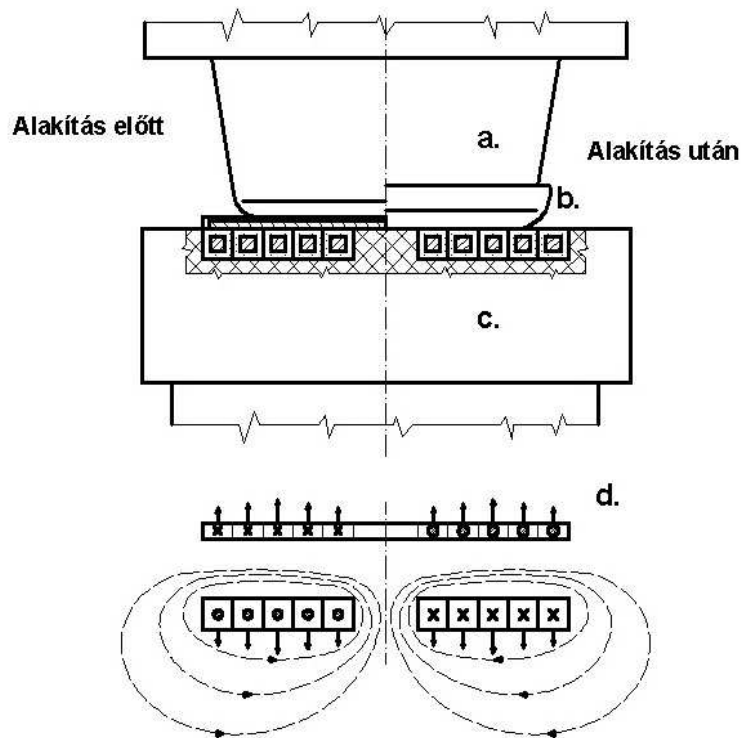
1. ábra. Az elektromágneses alakítás elvi vázlata [5]  
 1-nagyáramú impulzusgenerátor, 2-alakítóegység,  
 C-kondenzátor, K-nagyáramú kapcsoló, M-munkadarab, Sz-szerszám



2. ábra Hengeres kivitelű kompressziós tekercsű szerszámelrendezés vázlata [5]



3. ábra Hengeres kivitelű expanziós tekercsű szerszámelrendezés vázlata [5]

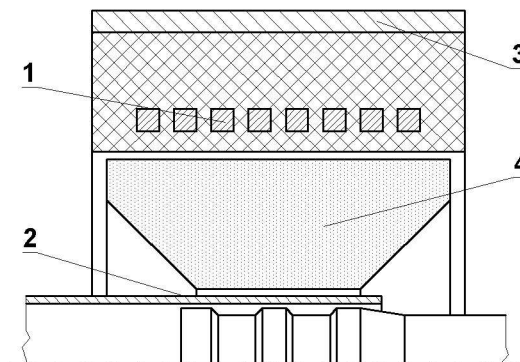


4. ábra Síktekercses szerszámelrendezés elvi vázlata [5]

Amennyiben a primer áram frekvenciája elég nagy és a munkadarab villamos vezetőképessége megfelelő az áram nem a munkadarab teljes keresztmetszetében folyik, hanem kiszorul a felülethez közel eső  $\delta$  vastagságú térrészbe. A  $\delta$  értékét skin-mélységnek nevezzük: ebben a távolságban a felszíni érték  $1/e$ -ad részére csökken az áram. Ha a skin-mélység nagyobb a munkadarab vastagságánál, akkor csökken a mágneses nyomás.

Ilyenkor a fém matricában is áram indukálódik (a munkadarabon kívül a többi elektromos vezető anyagú rész is egymeneses szekunder tekercsként induktív kapcsolatban van az alakítótekercssel) amelynek ellenkező irányú erőhatását mágneses párnahatásnak nevezzük. A mágneses párnahatás miatt a munkadarab nem tölti ki tökéletesen az alakadó szerszámot [4].

A technológia sokoldalúságát növeli, hogy egy kompressziós tekercstípus különböző térformáló segítségével különféle alakú és méretű munkadarabokhoz alkalmazható. A térformáló a mágneses teret a geometriai kialakításától függően erővonal sűrítéssel (indukciónövelő hatással) „formálja”. Ez a külső és belső aktív felületeihez tartozó átmérők, a gerjesztett (a szerszám tekercselésének irányában lévő) és alakítást létrehozó (a munkadarab irányában lévő) felület hatásos hosszának arányától függ. Az erővonal-sűrítő képességet csak a külső és belső felület összekötésével, folyamatos áramvezetést biztosító átkötő felületek kialakításával (például hasíték) lehet biztosítani. A térformáló 1:1 áttételű transzformátornak tekinthető, amely sajnos csökkenti a hatásfokot. A hatásfok térformáló nélkül 5-10% (15%-ot elérő hatásfok általában közvetlen alakító hatású, egyszer használatos/egylövéses tekercssel valósítható meg), egyesek szerint legfeljebb 20%, térformálóval 3-4% [1] [3] [4] [5].



5. ábra Térformálóval ellátott, kompressziós hatású hengeres szerszám-elrendezés vázlata [5]  
1-tekercs, 2-alakítandó munkadarab, 3-külső fémburkolat, 4-térformáló

Az elektromágneses alakítással megvalósítható alakítási műveletek: szűkítés, tágítás, dombornyomás, kivágás, peremezés, sajtolás, szerelés. Legfontosabb alkalmazási jelentősége, hogy segítségével olyan feladatokat lehet megoldani, amit más technológiával nem, vagy csak nagyon bonyolult módon lehet (például fémeket lehet kerámiákkal nem bontható kötással szerelni). Alkalmazzák még nanométer szemcseméretű porkohászati porok tömörítésére, hegesztett és képlékenyalakítással létrehozott kötések kialakítására, személygépkocsik alumínium karosszériaelemek gyártására [2] [3] [5].

## Az elektromágneses alakítás előnyei a hagyományos eljárásokhoz képest

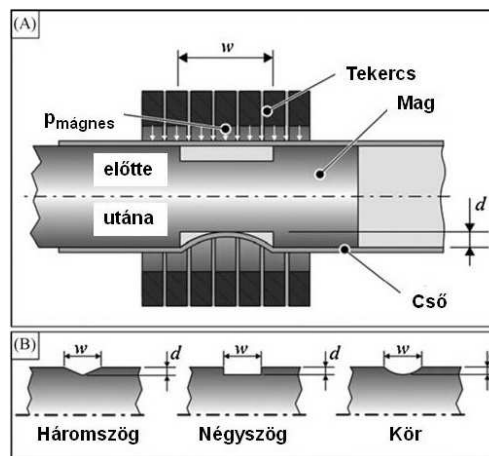
Mechanikus, hidraulikus érintkezés nélkül lehetővé válik bevonatolt, festett darabok felületi rétegének sérülése nélküli alakítása. Nincs szükség kenőanyagra, ezért is környezetbarát, a darabok szennyeződésével, illetve utólagos tisztításával nem kell számolni. Lehetővé válik nagyon eltérő tulajdonságú anyagok (például fém és kerámia) kötése. Elegendő az alakadó szerszámfél elkészítése, így olcsóbb és egyszerűbb, ami például prototípusok készítésénél előny. A nagy alakítási sebesség miatt jelentősen javulnak az anyag mechanikai tulajdonságai, alakítás során csökken a visszarugózás mértéke [1] [5].

## Meg kell említeni a hátrányokat is

Az eljárás jó elektromos vezetőképességű, viszonylag alacsony folyáshatárú fémek alakítására alkalmas. A hatásfok alacsony, 5-10% (15%-ot elérő hatásfok általában közvetlen alakító hatású, ún. egyszer használatos/egylövéses tekercsel valósítható meg), egyesek szerint legfeljebb 20%, térformálóval 3-4%. Az alkalmazott nagy áramerősség és feszültség miatt fokozott biztonsági intézkedések szükségesek a baleset elkerülése érdekében [1] [3] [4] [5]. Összegezve a technológia megfelel napjaink igényeinek: termelékeny, takarékos és környezetkímélő.

## A cső és mag közötti alakzáró kötés

Az elektromágneses alakítással rúdra sajtolt cső és a hornyokkal ellátott rúd együttese határozza meg a kötés teherbírását, amely egyenesen arányos az összeszorító nyomással és a kötés hosszával. Az alakzáró kötés szilárdságát a csőnek a rúdra munkált hornyokba való besajtolása eredményezi.



6. ábra

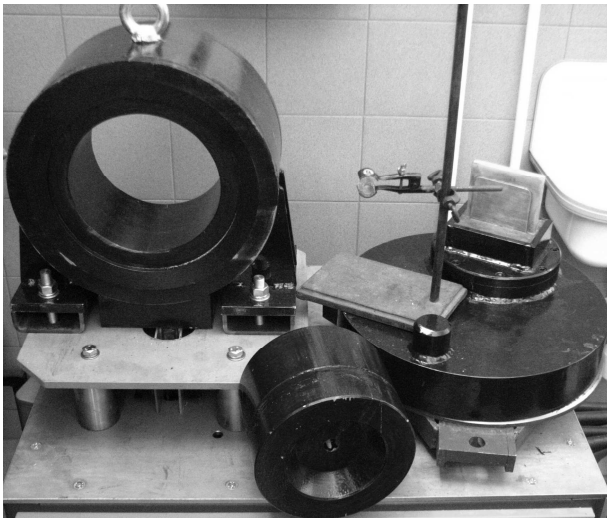
Alakzáró kötések létrehozása és különböző horonyprofilok [1]

Az így kialakított kötés széthúzásához le kell győzni a súrlódást és alakítani kell a csövet. A kötés erőssége olyan nagy is lehet, hogy a húzó igénybevétel hatására a cső elszakad [6]. A kötés szilárdsága szempontjából a legjobb, ha az alakított cső belső felülete eléri a horony fenekét. A kötés szilárdságát csökkenti a túl mély horony esetén a horony széleinél bekövetkező nyírási jelenség, a túl széles horony, a lekerekített horony (utóbbi az esetben a horony kitöltését eredményező töltési energia kisebb lehet).

#### IV. Alakzáró kötés létrehozása elektromágneses alakítással, és vizsgálata

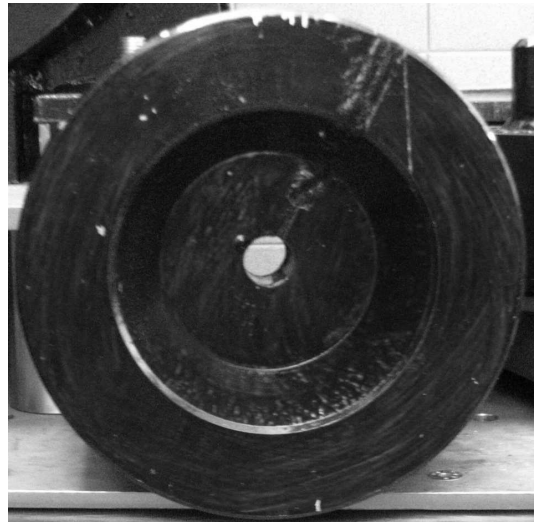
Jelen munkánk az elmúlt évben elvégzett kísérleteinken alapulnak, amelyeket referenciaként használunk.

A kötések EMA-EHA-EM 24/30 elektromágneses alakító berendezéssel, M30 kompressziós tekercssel és illeszkedő térformálóval készítettük.



1. kép

M30 kompressziós tekercs (balra),  
térformálóval (középen), síktekercs (jobbra; a  
kísérlet során nem használtuk)



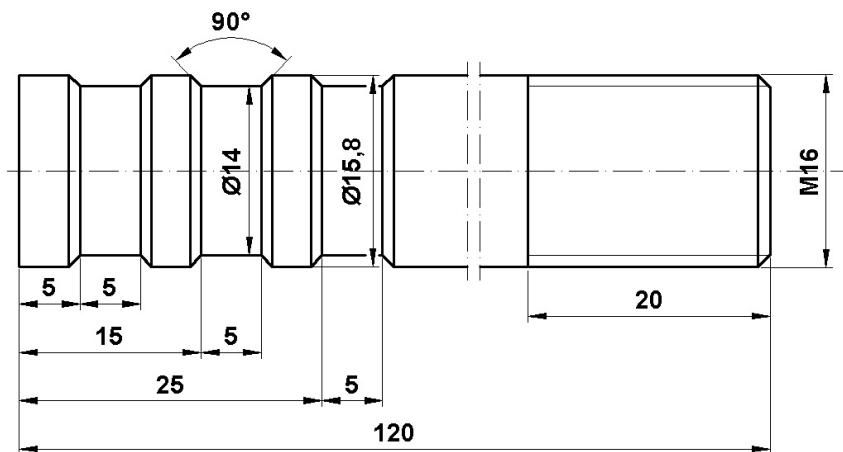
2. kép

Térformáló

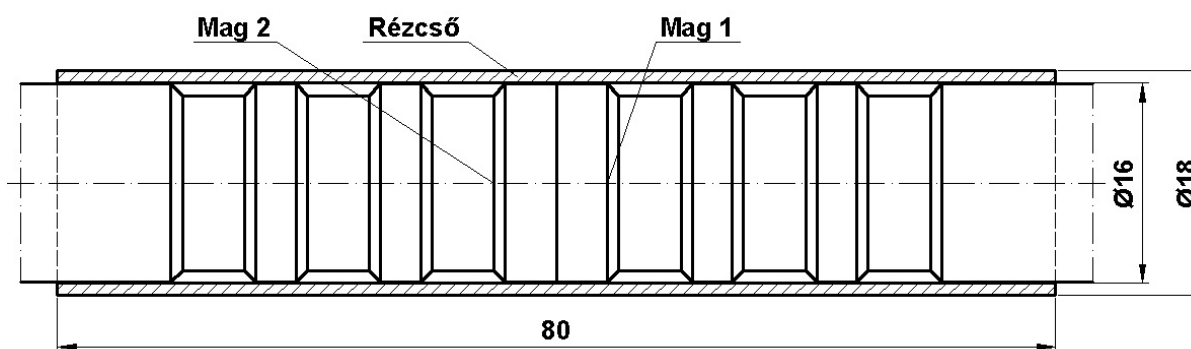
#### Réz cső - acél mag közötti kötések

Egy sorozat próbatestet készítettünk lágyított elektrolit-rézből készített csővel és az 7. ábrán látható – geometriai tulajdonságokban csak a beszúrások számában (egyől háromig) eltérő (3. kép) – acél magokkal. Trapéz alakú beszúrást választottunk, ami szilárdsági szempontból a legkedvezőbb (a cső kevésbé hajlamos az elnyíródásra). A két magból és egy csőből álló kísérleti elrendezést a 8. ábra mutatja. Mivel az acélmagok átmérőjét 15,8 mm-re készítettük el azokon a rézcsövek lazán illeszkedtek.

Az alakítási szempontból meghatározó térformáló és alakítandó rézcső közötti rés mérete 1 mm-re adódott. A réz csövek falvastagsága 1 mm volt. 45 mm hosszú belső aktív felülettel rendelkező térformálót használtunk, a töltési energiát 6,5 kJ-ra állítottuk be, amely 4,4 kV-os töltőfeszültséget igényelt [7].



7. ábra  
Háromhornyos acélrúd (mag)

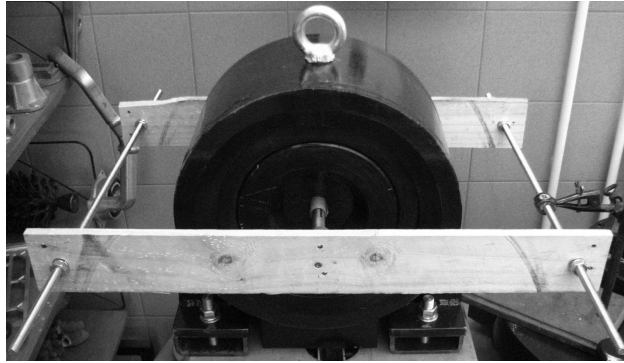


8. ábra  
Összeállítás magokból és csőből



3. kép  
Hornyos acélrudak (magok)

A kötésre előkészített két azonos hornyolású acélmagból és egy rézcsőből álló szerelési egységet a térformálóval ellátott tekercsbe behelyeztük egy egyszerű készülékbe fogva, amely az alakítás során biztosította a kötés alkatrészeinek helyzetét (4. kép). A rézcső szerelés előtti rögzítése szigetelőszalaggal történt. A rézcsövet prespannal szigetelve helyeztük a térformálóba.

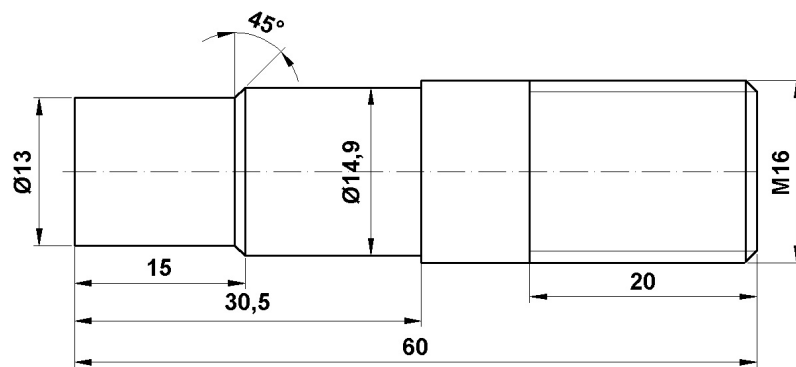


4. kép  
Tartószerkezet

Egyhornyos kötés esetén egyetlen alakítási művelettel hoztuk létre az alakzáró kötet: a rudakon található horonyba alakítottuk a csövet. Két- és háromhornyos kötésnél három lövéssel hoztuk létre az alakzáró kötet: az első lövéssel a két rudat pozícionáltuk (a rudak egymás felé eső végén található egy-egy horonnyal ugyanúgy létrehoztuk az alakzáró kötet, mint egyhornyos kötésnél), a második és harmadik lövéssel horonyba sajtoltuk az addig alakítatlan csőszakaszokat. Több lövésre a térformáló belső aktív felületének hossza miatt volt szükség, amely rövidebb volt az alakítandó csőszakasznál. A réz cső-acél mag kötések szakítóvizsgálatait TT100 golyósorsós szakítógépen végeztük 4 mm/min szakítósebességgel.

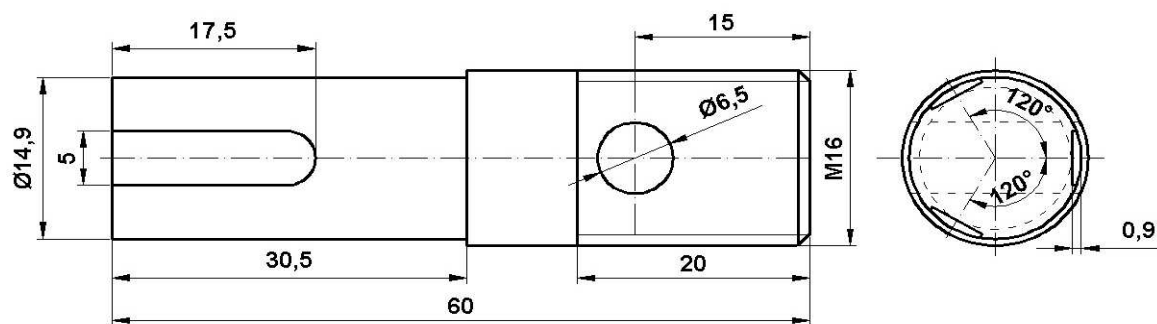
#### **Alumínium cső-mag közötti kötések**

Két sorozat próbatestet készítettünk a 9-14. ábrákon látható alumínium magokkal, amelyek anyagminősége: EN AW 2007 T351, a lágyított alumínium csövek anyagminősége: EN AW 3103 H12. A kísérleti elrendezés a magok geometriai tulajdonságai és anyagminősége, és a cső anyagminősége kivételével megegyezett a 8. ábrán láthatóval. Mivel az alumínium magok átmérőjét 14,9 mm-re készítettük el, azokon a 15 mm-es belső átmérőjű alumínium csövek lazán illeszkedtek.



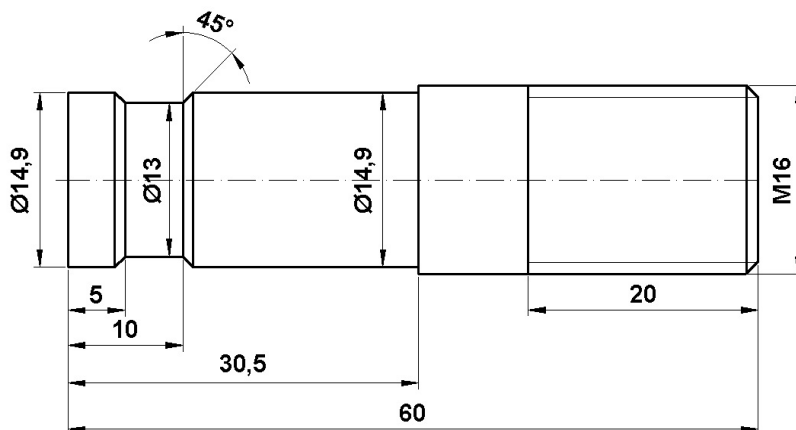
9. ábra

Alumínium mag beszúrás nélkül



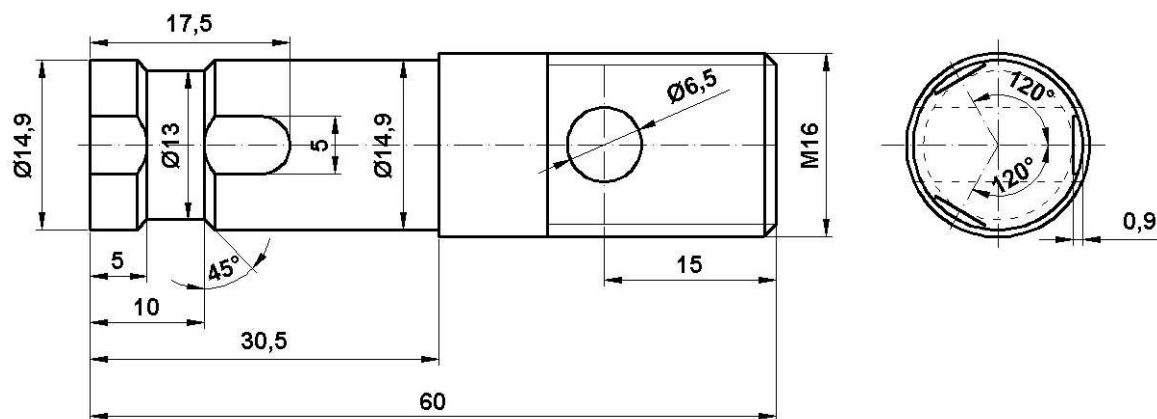
10. ábra

Alumínium mag beszúrás nélkül, axiális hornyokkal



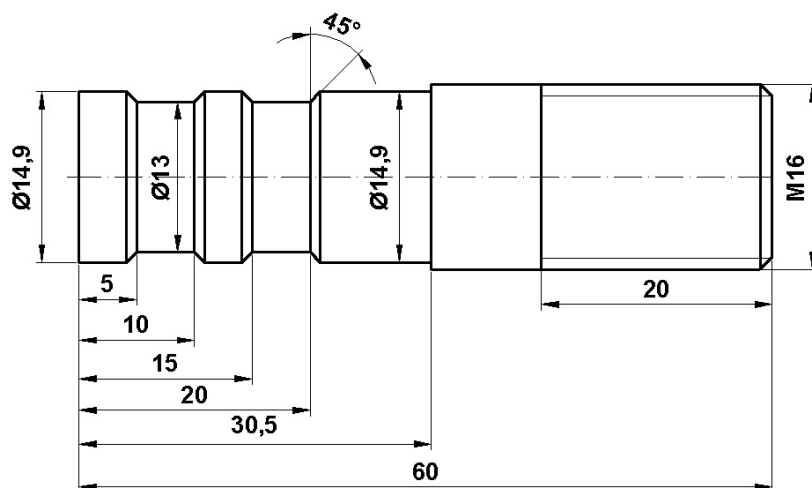
11. ábra

Alumínium mag egy beszúrással



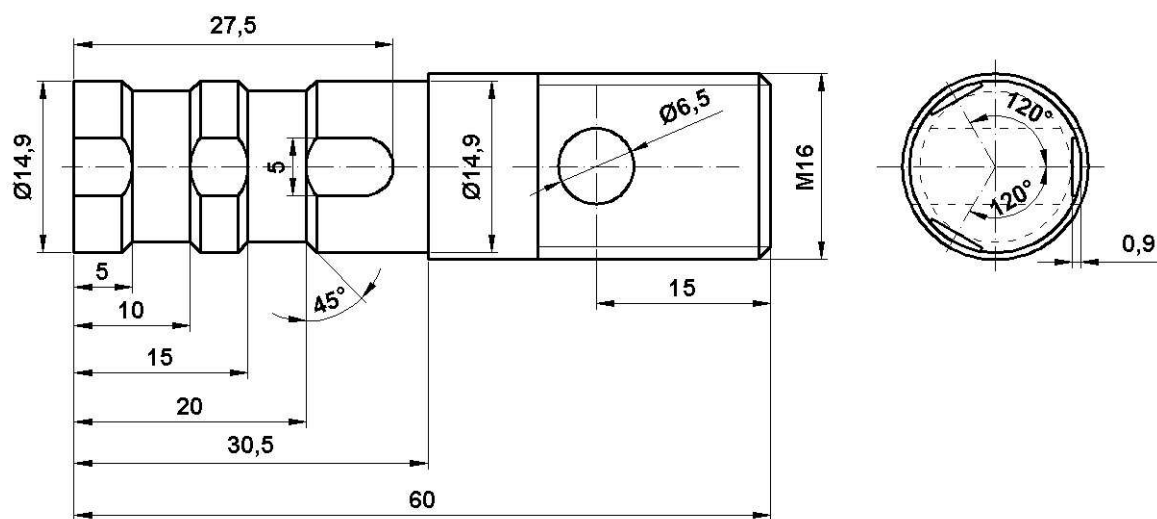
12. ábra

Alumínium mag egy beszúrással, axiális hornyokkal



13. ábra

Alumínium mag két beszúrással

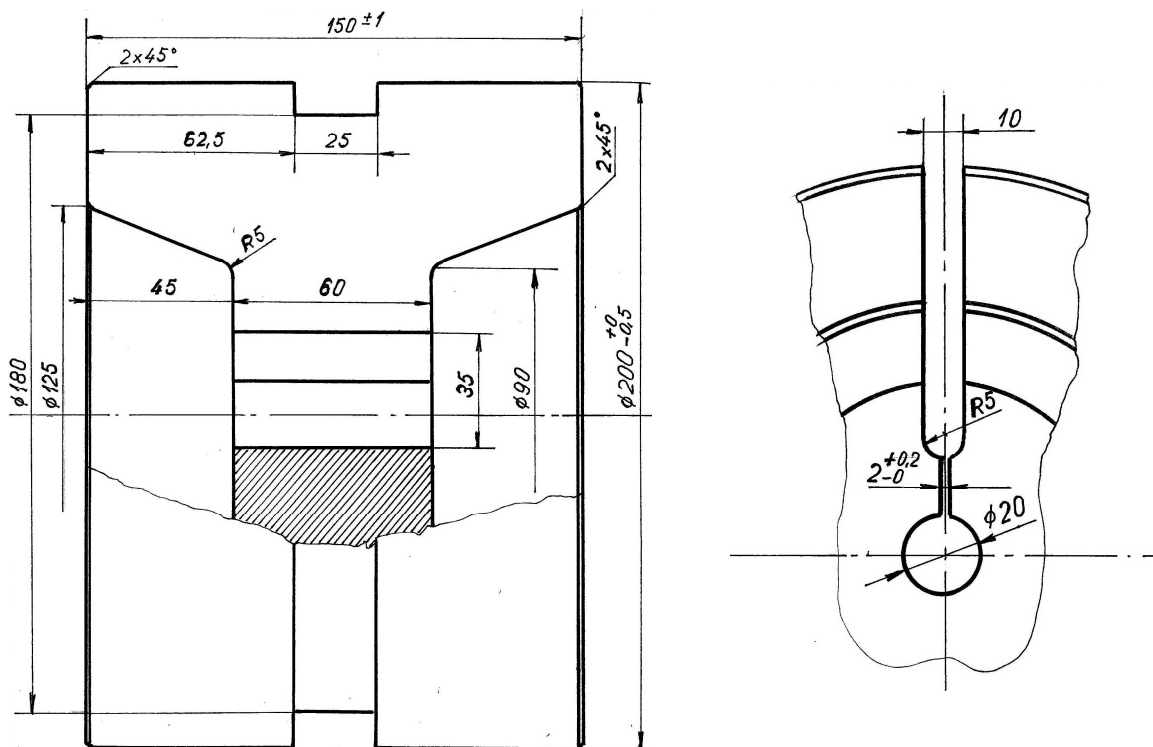


14. ábra

Alumínium mag két beszúrással, axiális hornyokkal

Az első mérési sorozatnál az alumínium cső falvastagsága 1,5 mm volt. Az alakítási szempontból meghatározó térformáló és alakítandó alumínium cső közötti rés mérete 1,05 mm-re adódott. Ugyanazt a rézcsövek alakításánál alkalmazott 45 mm hosszú belső aktív felülettel rendelkező térformálót használtunk, a töltési energiát 10 kJ-ra állítottuk be, amely 5,3 kV töltőfeszültséget igényelt. A rézcsövekkel létrehozott kötésekhez hasonlóan a térformáló belső aktív felületének hossza miatt több lövéssel hoztuk létre az alakzáró kötéseket.

A második mérési sorozatnál az alumínium cső falvastagsága 1 mm volt. Az alakítási szempontból meghatározó térformáló és alakítandó alumínium cső közötti rés mérete 1,55 mm-re adódott. Új, 60 mm hosszú belső aktív felülettel rendelkező térformálót használtunk (15-16. ábra), a töltési energiát 12 kJ-ra állítottuk be, amely 5,8 kV töltőfeszültséget igényelt. Az új, hosszabb belső aktív felülettel rendelkező térformálónak köszönhetően egyetlen lövéssel hoztuk létre az alakzáró kötéseket.



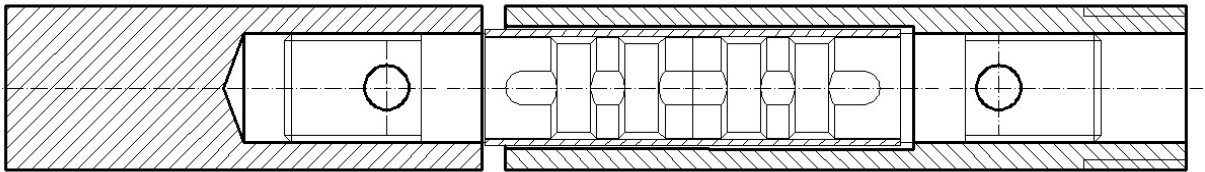
15-16. ábra

Az új, 60 mm hosszú belső aktív felülettel rendelkező térformáló műhelyrajza

Az első mérési sorozat 3. és 7., és a második mérési sorozat 2., 5., 7., 9., 10. sorszámú próbatesteit röntgen tomográfus vizsgálatnak vetettük alá.

Az alumínium cső-mag kötések szakítóvizsgálatait TT100 golyósorsós szakítógépen végeztük 8 mm/min szakítósebességgel.

Az első mérési sorozat kötéseinek csavaróvizsgálatát BETA 599DGT/10X digitális kijelzőjű nyomatékkulccsal (5. kép) végeztük, a 6-7. képen látható saját tervezésű csavarókészülék segítségével. A csavarókészülékben átmenő csavarokkal rögzítettük a próbatestet elfordulás ellen.



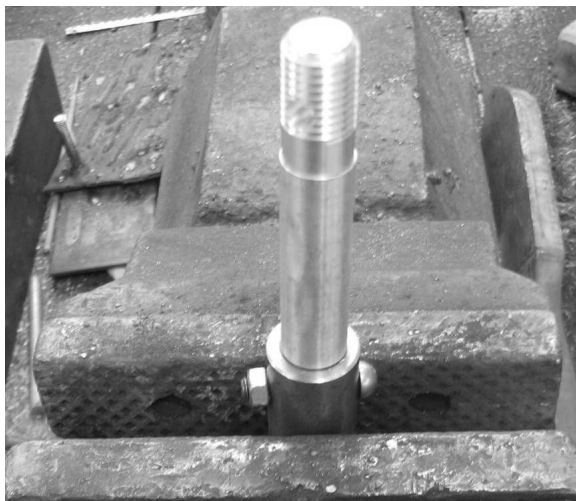
17. ábra

A csavarókészülék metszeti ábrája a behelyezett próbatesttel



5. kép

BETA 599DGT/10X digitális kijelzőjű nyomatékkulcs



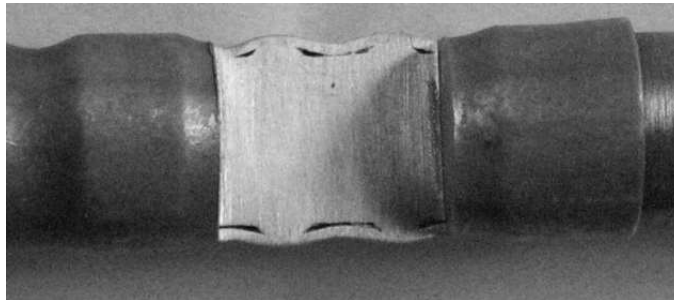
6-7. kép  
A készülékbe fogás

A csavarókészüléket satuba fogtuk, a nyomatékkulcson 100 Nm maximális nyomatékokot állítottunk be csúcsérték-kijelző üzemmódban, így a szakadásnál, elfordulásnál fellépő nyomatékokat a vizsgálat végén leolvashattuk. A csavarókészüléken és a nyomatékkulcson kívül szükség volt még egy 36-os dugókulcsra.

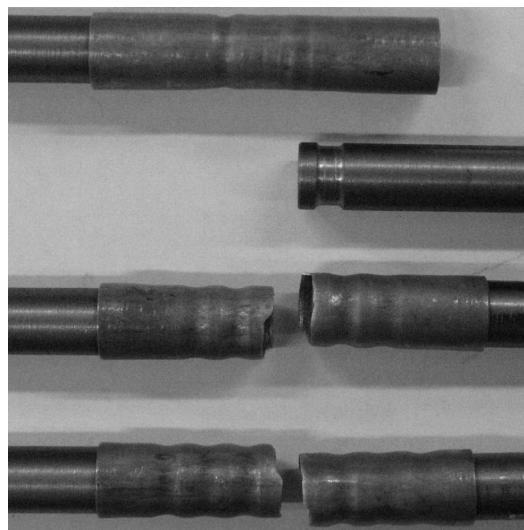
## V. Kiértékelés

### Réz cső-acél mag közötti kötések

A háromhornyos rézcsővel készült kötések közül egy próbatestet ujjmaróval a szimmetriasíkgig lemartunk, a felületet gyémántreszelővel és csiszolóvászonnal megcsiszoltuk, a forgácsot levegőfúvással eltávolítottuk. A 8. képen látható, hogy cső nem töltötte ki a hornyokat, de elérte a horony fenekét. A csőnek a horony külső élével érintkező részén enyhe kontrakció is megfigyelhető [7].



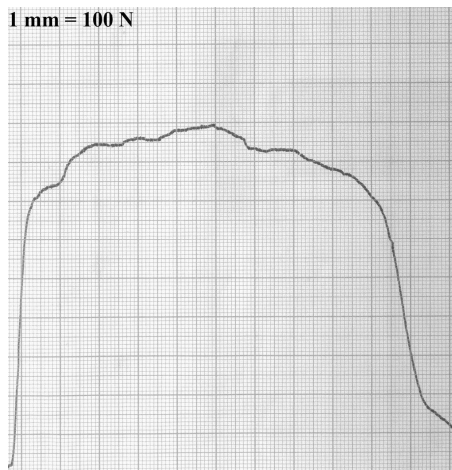
8. kép  
Az elmetezett kötés



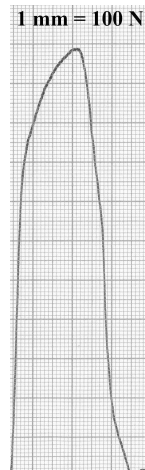
9. kép  
Szétcsúszott és elszakadt kötések

Rézcsővel készült kötések szakítóvizsgálata során az alkalmazott horonyprofilal az egyhornyos kötésű próbatest csak részben viselte el a terhelést (a rézcsőből a rúd kicsúszott), míg a két- illetve háromhornyos kötéseknel a rézcső elszakadt, a kötés szilárdsága a rézcső szakítószilárdságával megegyezett (9. kép, 1. táblázat).

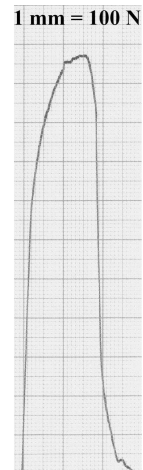
A szakítódiagramokból (18-20. ábra) leolvasható maximális kihúzó erők értéke (az erőlépték az eredeti szakítódiagramon 100 N/mm).



18. ábra  
Egyhornyos kötés  
szakítódiagramja



19. ábra  
Kéthornyos kötés  
szakítódiagramja



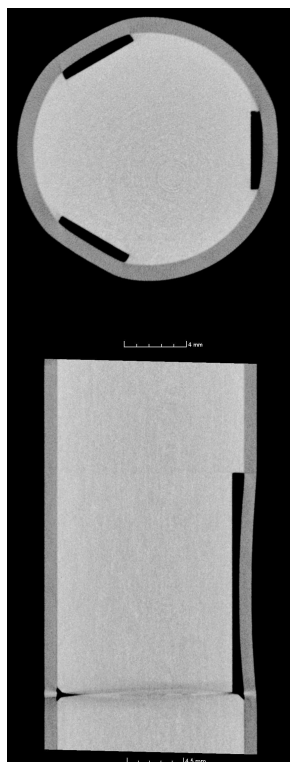
20. ábra  
Háromhornyos kötés  
szakítódiagramja

1. táblázat

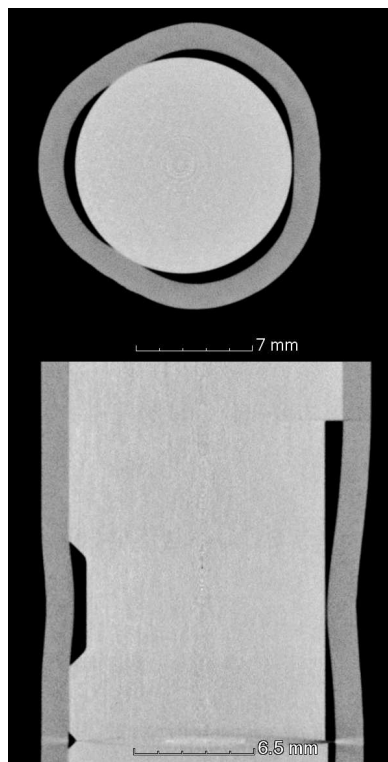
| Réz cső-acél mag kötések szakítóvizsgálata |                |                 |            |
|--------------------------------------------|----------------|-----------------|------------|
| Megnevezés                                 | Kötés sorszáma | Szakító erő [N] | Megjegyzés |
| egy beszúrási hengeres                     | 1.             | 8900            | kicsúszott |
| két beszúrási hengeres                     | 2.             | 10800           | elszakadt  |
| három beszúrási hengeres                   | 3.             | 10700           | elszakadt  |

### Alumínium cső-mag közötti kötések

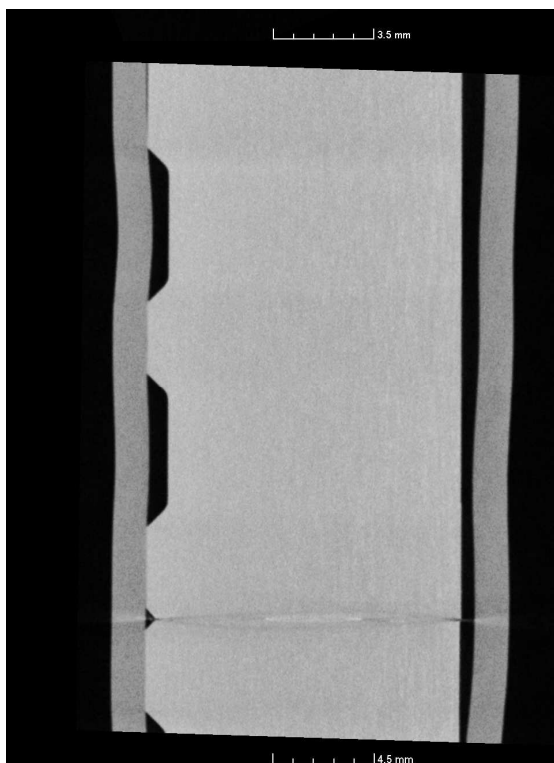
Az alumínium cső-mag kötések röntgen tomográf felvételei (21-24. ábra) alapján kijelenthető, túl kicsi alakító energiát alkalmaztunk, az alakváltozás mértéke nem a legmegfelelőbb. A cső belső felülete egyetlen esetben sem érte el a beszúrási és/vagy a horony fenekét, ami kiemelten fontos a kötés erőssége szempontjából.



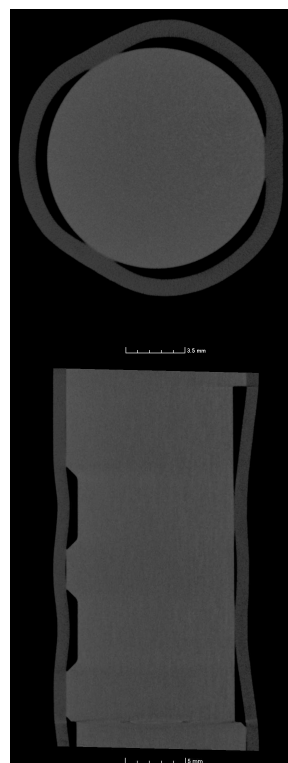
2/2. próbatest (sima hengeres axiális  
hornyokkal, 2. mérési sorozat)



1/3. próbatest (egy beszúrás axiális  
hornyokkal, 1. mérési sorozat)



1/7. próbatest (két beszúrás axiális  
hornyokkal, 1. mérési sorozat)



2/9. próbatest (két beszúrás axiális  
hornyokkal, 2. mérési sorozat)

21-24. ábra

Néhány jellemző röntgen tomográfus felvétel

Az alumínium cső-mag kötések szakítóvizsgálatának eredményei (2-3. táblázat) ezt alátámasztják, hiszen csak a két beszűrásos kötések szakadtak el, a többi szétszúszott. Az alumínium cső-mag kötések szakítóvizsgálata során jól látható, az első sorozat nagyobb falvastagságú csővel bíró kötése a második sorozat vékonyabb falvastagságú csővel bíró kötéseivel képest nagyobb egytengelyű húzó igénybevételnek állnak ellent, de szétszúszásra érzékenyebbek. Ez utóbbinak valószínűsíthető oka a kisebb alakváltozás: a cső belső felülete egyetlen esetben sem érte el a beszűrás és/vagy a horony fenekét.

Az egy beszűrással rendelkező magokkal készült kötések mind széthúzódtak. A szakirodalom nem említ olyan esetet, hogy egy beszűrással rendelkező maggal készült kötés nem csúszott szét, hanem elszakadt.

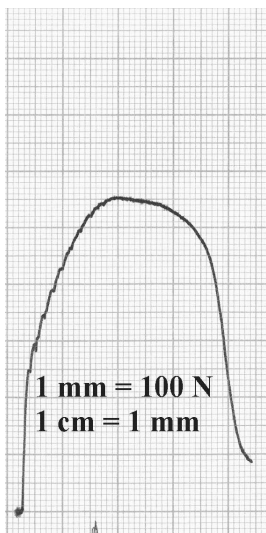
Az axiális hornyok egytengelyű húzó igénybevétellel szemben kismértékben erősítették – néhány esetben nem befolyásolták – a kötés erősségét. Tehát az axiális hornyokkal megnövelt felületen létrejövő súrlódás nem ad számottevő erőt a kötésnek egytengelyű húzó igénybevétellel szemben, de nem is rontja annak tulajdonságait.

2. táblázat

| <b>Alumínium cső (t=1,5 mm) - mag kötések szakítóvizsgálata (1. mérési sorozat)</b> |                       |                        |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| <b>Megnevezés</b>                                                                   | <b>Kötés sorszáma</b> | <b>Szakító erő [N]</b> | <b>Megjegyzés</b> |
| sima hengeres                                                                       | 1/8.                  | 0                      | szétszúszott      |
| egy beszűrás hengeres                                                               | 1/1.                  | 5500                   | szétszúszott      |
| egy beszűrás axiális hornyokkal                                                     | 1/2.                  | 5500                   | szétszúszott      |
| két beszűrás hengeres                                                               | 1/5.                  | 8400                   | szétszúszott      |
| két beszűrás axiális hornyokkal                                                     | 1/6.                  | 8600                   | elszakadt         |

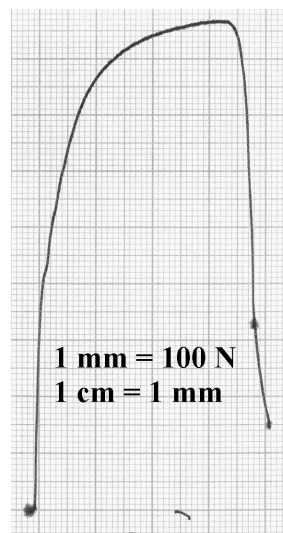
3. táblázat

| <b>Alumínium cső (t=1 mm) - mag kötések szakítóvizsgálata (2. mérési sorozat)</b> |                       |                        |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| <b>Megnevezés</b>                                                                 | <b>Kötés sorszáma</b> | <b>Szakító erő [N]</b> | <b>Megjegyzés</b> |
| egy beszűrás hengeres                                                             | 2/3.                  | 4200                   | szétszúszott      |
| egy beszűrás hengeres                                                             | 2/6.                  | 3000                   | szétszúszott      |
| egy beszűrás axiális hornyokkal                                                   | 2/4.                  | 3800                   | szétszúszott      |
| két beszűrás hengeres                                                             | 2/7.                  | 5500                   | elszakadt         |
| két beszűrás hengeres                                                             | 2/8.                  | 5650                   | elszakadt         |
| két beszűrás hengeres                                                             | jel nélkül            | 5400                   | elszakadt         |
| két beszűrás axiális hornyokkal                                                   | 2/9.                  | 6000                   | elszakadt         |



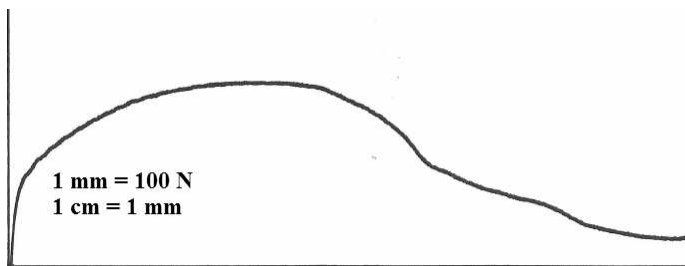
25. ábra

1/1. próbatest (egy beszúrás, 1. mérési sorozat)



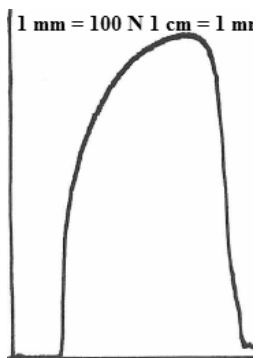
26. ábra

1/6. próbatest (két beszúrás axiális hornyokkal, 1. mérési sorozat)



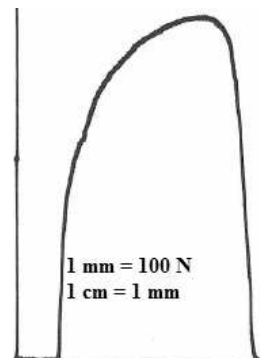
27. ábra

2/3. próbatest (egy beszúrás, 2. mérési sorozat)



28. ábra

2/7. próbatest (egy beszúrás axiális hornyokkal, 2. mérési sorozat)



29. ábra

2/9. próbatest (két beszúrás axiális hornyokkal, 2. mérési sorozat)

Csavaróvizsgálatoknál (4-5. táblázat) jól látható, hogy a kötések csavaró igénybevétellel szembeni teherbírása nem mutat jelentős szórást. A cső falvastagsága közel sem olyan mértékben befolyásolta a kötés erősségét csavaró igénybevétellel szemben, mint egytengelyű húzó igénybevétellel szemben. A csavaró igénybevétellel szembeni ellenállásnál az axiális hornyok mellett fontos szerepet játszanak a beszúrások is. Minél több beszúrás volt

a magokon, a csavarással szemben annál ellenállóbb kötéseket kaptunk. Így legnagyobb csavarónyomatékot a két beszűrásos, axiális hornyokkal ellátott kötések eredményezték.

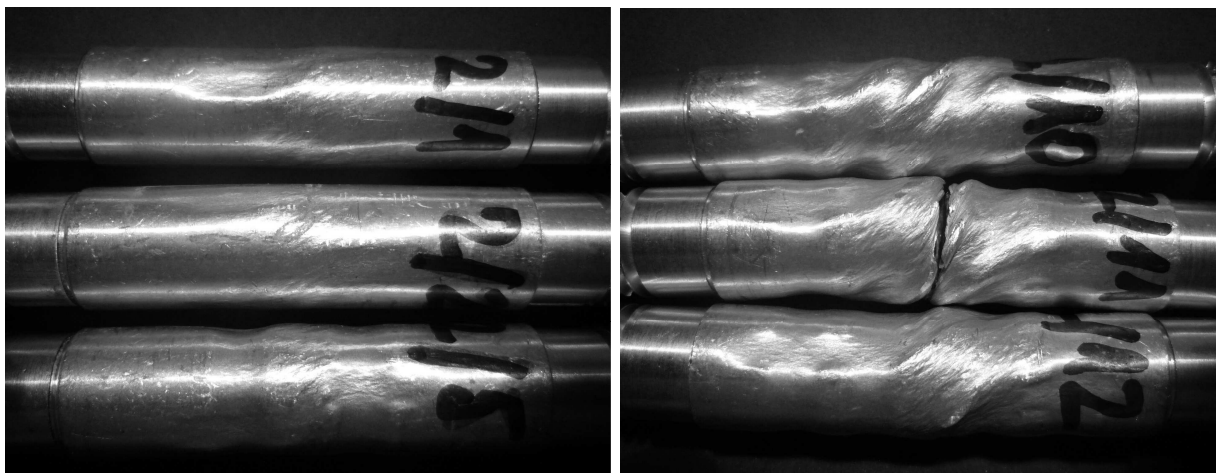
4. táblázat

| <b>Alumínium cső (t=1,5 mm) - mag kötések csavaróvizsgálata (1. mérési sorozat)</b> |                       |                              |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|
| <b>Megnevezés</b>                                                                   | <b>Kötés sorszáma</b> | <b>Csavaró nyomaték [Nm]</b> | <b>Megjegyzés</b> |
| egy beszűrás axiális hornyokkal                                                     | 1/3.                  | 37,8                         | szétcsavarodott   |
| két beszűrás axiális hornyokkal                                                     | 1/7.                  | 39,2                         | szétcsavarodott   |

5. táblázat

| <b>Alumínium cső (t=1 mm) - mag kötések (2. mérési sorozat)</b> |                       |                              |                   |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|
| <b>Megnevezés</b>                                               | <b>Kötés sorszáma</b> | <b>Csavaró nyomaték [Nm]</b> | <b>Megjegyzés</b> |
| hengeres axiális hornyokkal                                     | 2/1.                  | 6,3                          | szétcsavarodott   |
| hengeres axiális hornyokkal                                     | 2/2.                  | 27,8                         | szétcsavarodott   |
| egy beszűrás axiális hornyokkal                                 | 2/5.                  | 30,7                         | szétcsavarodott   |
| két beszűrás axiális hornyokkal                                 | 2/10.                 | 41,3                         | szétcsavarodott   |
| két beszűrás axiális hornyokkal                                 | 2/11.                 | 47,1                         | elszakadt         |
| két beszűrás axiális hornyokkal                                 | 2/12.                 | 37,7                         | szétcsavarodott   |

A 10. képen jól látszik, hogy bár a kötések (2/1., 2/2., 2/5.) szétcsavarodtak, de ezt megelőzően a csövek jelentős képlékeny alakváltozást szenvedtek. A 11. képen a két beszűrásos csavart kötések láthatók. Megfigyelhető, milyen nagymértékű a képlékeny alakváltozás, valamint itt látható az elnyíródott 2/11. kötés.



10-11. kép

Szétcsavarodott kötések és egy elszakadt kötés; megfigyelhető a jelentős képlékeny alakváltozás

Mivel használható kötéseket sikerült létrehozni, kijelenthetjük, az eredményeink kedvezőek. Ennek ellenére további munkánk során nagyobb alakítási energiát kell alkalmazni, hogy a beszúrások, hornyok fenekét a cső belső felületével elérve a kötések legnagyobb ellenállását vizsgálhassuk.

## **VI. Összegzés**

A TDK dolgozat témája alumínium alakzáró kötések kialakítása egy kevésbé ismert és elterjedt technológiával: az elektromágneses alakítással, valamint ezzel az eljárással létrehozott kötések vizsgálata.

Az elektromágneses alakítás képlékeny hidegalakító eljárás, amely során jó villamos vezetőképességű és alacsony folyáshatárú lemez- vagy cső alakú munkadarabokat alakítanak elektromágneses impulzussal, mechanikus és hidraulikus kapcsolat nélkül. A nagyenergiájú alakító eljárások közé tartozik, amelyek közül ciklusideje a legkisebb, így tömeggyártásban is használható. Alkalmazásnak legfontosabb jelentősége, hogy segítségével olyan feladatok oldhatók meg, amit más technológiával nem, vagy csak nagyon bonyolult módon vagyunk képesek [2] [3].

Korábbi munkánk során elméletben és gyakorlatban is megismertük az eljárást. Réz cső és acél magok közötti kötéseket készítettünk, és vizsgáltuk a kötések tulajdonságait, teherbíró képességüket. A kötések vizsgálata során világossá vált, hogy csak axiális húzó igénybevételnek ellenálló megoldások nem elegendőek, az ipari igények csavarásnak is ellenálló kötéseket igényelnek. Ezen felismerés alapján kitűztük a további kutatás céljait. Egyrészt figyelembe véve a járműipari igényeket azonos anyagminőségű, alumínium cső és mag közötti kötéseket célszerű készíteni. Másrészt új, hosszanti hornyos kialakítású magokat alkalmazva, csavarásnak is ellenálló kötéseket hoztunk létre. Az elkészített kötéseket röntgen tomográfiás, szakító és csavaró vizsgálatnak vetettük alá, elemezve a kötések teherbíró képességét, a geometriai kialakítását, a cső falvastagságának és az alkalmazott alakítási (elektromos) energia nagyságának hatását.

A röntgen tomográfus felvételek alapján megállapítottuk, hogy az alumínium cső-mag kötések létrehozása során alkalmazott alakítási energia nem volt elegendő. A szakítóvizsgálatok alátámasztották ezt a kijelentést, kiegészítve azzal, hogy az így létrehozott kevésbé tökéletes kötések is használhatóak, ami a technológia életképességét bizonyítja. Továbbra sem sikerült egy beszúrással rendelkező húzó igénybevételnek ellenálló kötést készíteni. Csavaróvizsgálataink során kiderítettük, hogy várakozásaink szerint az axiális

hornyok alkalmazásának van gyakorlati előnye, valamint a beszúrások számának növelése is növeli a csavaró igénybevétellel szembeni ellenállást.

Mivel használható kötéseket sikerült létrehozni, kijelenthetjük, az eredményeink kedvezőek, további munkánk során nagyobb alakítási energiát kell alkalmazni, hogy a beszúrások és hornyok fenekét a cső belső felületével elérve nagyobb teherbírású kötéseket készíthessünk.

### **Felhasznált irodalom**

- [1] V. PSYK - D. RISCH - B.L. KINSEY - A.E. TEKKAYA - M. KLEINER: Electromagnetic forming - A review, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) pp. 787-829, Elsevier 2011.
- [2] GÖBL Nándor - HORVÁTH Dániel - BALOGH István: Elektromágneses fémalakítás, Villamos gépek, hajtások, villamosenergia-szolgáltatás, villamosipari és épületvillamossági berendezések, Műszaki Kiadványok, pp. 14-15, Budapest 2011.
- [3] ARTINGER István - KATOR Lajos - ZIAJA György: Új fémes szerkezeti anyagok és technológiák. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1974. ISBN 963 10 0629 8
- [4] CZEGLÉDI Istvánné - GÖBL Nándor: Nagysebességű lemezalakító eljárások, Gépgyártástechnológia, 12. (1972) 7-8. pp. 329-335.
- [5] RÁCZ Pál – GÖBL Nándor – HORVÁTH Dániel: Elektrodinamikus megmunkálások. Repüléstudományi Közlemények (online tudományos folyóirat), XXIV. évf. 2. szám, 2012, pp. 119-141. ISSN 1789-770X
- [6] Ch. WEDDELING - S. T. WOODWARD - M. MARRÉ - J. NELLENSEN - V. PSYK - A. E. TEKKAYA - W. TILLMANN: Influence of groove characteristics on strength of form-fit joints, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) 925–935, Elsevier 2011.
- [7] PORKOLÁB Péter: Elektromágneses alakítással létrehozott kötés kialakítása és vizsgálata (TDK dolgozat), Budapest, ÓE-BGK, 2011.  
MSZ ISO 690:1990 Bibliográfiai hivatkozások

### **Ajánlott irodalom**

ARTINGER ISTVÁN - KATOR LAJOS - ROMVÁRI PÁL: Fémek technológiája. Gillemot László szerkesztő, Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1971.  
GILLEMOT LÁSZLÓ - ZIAJA GYÖRGY: Fémek képlékeny alakítása. 12. változatlan kiadás, Budapest, Tankönyvkiadó, 1987.

ZHENGHUA Meng – SHANGYU Huang – JIANHUA Hu – WEI Huang – ZHILIN Xia: Effects of process parameters on warm and electromagnetic hybrid forming of magnesium alloy sheets, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) 925–935, Elsevier 2010.

### **Köszönetnyilvánítás**

Köszönöm konzulensem, Dr. Rác Pál egyetemi docens segítségét, aki megszervezte a Kecskeméten végrehajtott kísérleteket, szakirodalmat ajánlott, és dolgozatomat stilisztikai szempontból is ellenőrizte. Köszönettel tartozunk Dr. Göbl Nándor kutató mérnöknek, az S-Metalltech 98 Kft. munkatársának, aki több évtizedes tapasztalatával önzetlenül segítette munkánkat. A röntgen tomográfus felvételeket Kozma István, a SZE-MTK Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék Optikai Felületdigitalizálás Laboratórium vezetője készítette, akinek testvérem, Porkoláb Márton, jutatta el a próbatesteket, és hozta el a felvételeket. Dr. Sárossy György a szakítóvizsgálatok során nyújtott segítséget. A csavaróvizsgálathoz Kovács Gábor készítette el a készüléket, és a csavaróvizsgálathoz helyet biztosított a műhelyben. Nem feledkezhetünk meg Dr. Végvári Ferencről, a KFO-GAMF főiskolai tanáráról, aki az elektromágneses alakító berendezést rendelkezésünkre bocsátotta.

A TDK dolgozat a **TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások** című projekt keretében készült, amely az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.