

## CSÖVEK KÖTÉSE KÉPLÉKENYALAKÍTÁSSAL

### JOINING OF TUBES BY METAL FORMING

*Dr. Jónás Szabolcs*

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, GT3, Műegyetem rkp. 3, 1111  
[szabolcs.jonas@gt3.bme.hu](mailto:szabolcs.jonas@gt3.bme.hu)*

*Dr. Kovács Péter Zoltán*

*Miskolci Egyetem, GÉIK-ATI, Miskolc, Egyetemváros, 3515  
[metkpz@uni-miskolc.hu](mailto:metkpz@uni-miskolc.hu)*

#### ÖSSZEFOGLALÁS

A csövek kötésére számos technológia létezik, azonban jelen tanulmányban egy innovatív, tisztán alakítási eljárás segítségével létrehozható variáns kerül bemutatásra. A technológia a képlékeny instabilitás jelenségét használja ki. A cikkben a későbbi kísérleti munkához szükséges szerszám tervezési tartományának meghatározása a cél vége-sele-mes analízis segítségével.

#### ABSTRACT

Several technologies have been developed for joining tubes. In this study an innovative technology has been shown, which is purely using metal forming process. The technology is using the phenomenon of plastic instability. In this study the tool design phase for the further experimental tests is shown by finite element analyses.

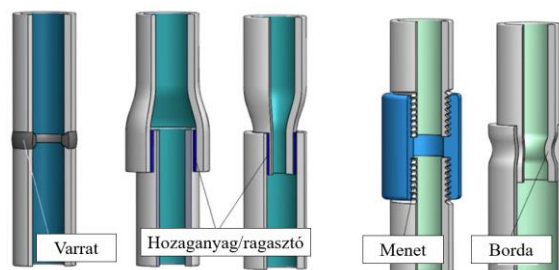
#### 1. BEVEZETÉS

A csövek kötésére többféle eljárás létezik, így például a csövégek hegesztése, forrasztása, ragasztása, menetes kötések vagy éppen különböző karimás kötések alkalmazása (1. ábra).

Jelen tanulmányban egy olyan, képlékeny alakítás segítségével létrehozható kötés kerül bemutatásra, amelyben az alakítás hatására a csövek között létrejövő alámetszés biztosítja a kötést.

A csövek a képlékeny instabilitása következményeként kihajlanak, és az alakítást végző szerszámok geometriájának függvényeként alakul ki az alámetszés. A cél, tehát az, hogy a legkisebb erő mellett ideális geometria kerüljön kiválasztásra úgy, hogy az

alámetszés és egyéb geometriai jellemzők a lehető legkedvezőbbek legyenek. Számos mérnöki szerkezet esetében kiemelten fontos, hogy az összekötött csövekben ne legyen keresztmetszetváltozás, amely az áramlási viszonyokat befolyásolni tudja, ezzel szemben, ahol ez nem követelmény, ott ez a technológia hatékonyan alkalmazható [1].



1. ábra Példák csövek kötésére [1]

A képlékeny alakítással készíthető csövkötésekkel kapcsolatban több tanulmány is született, különböző szerszámalkalítások alkalmazása mellett ([1]-[3]).

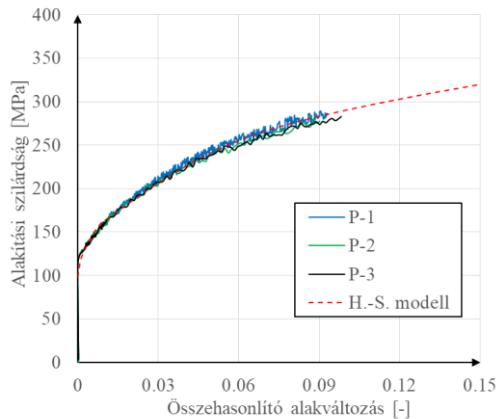
Az eljárás egyik legfontosabb előnye amellet, hogy környezetbarát, nincsen hőhatásövezet és relatíve kevés energiát igényel, hogy alkalmas eltérő minőségű anyagok kötésére is, ugyanakkor osztott szerszámot igényel, és minden egyes esetre külön vége-sele-mes számítás szükséges az optimális szerszám kialakítás megtalálásához [3].

## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

### 2.1. Alkalmazott anyagminőség

A jelen cikkben bemutatott előtervezési fázisban a csövek alapanyagaként magnéziummal ötvözött, nagyszilárdságú EN AW 5754-es alumínium ötvözetet tételeztünk fel, amely ötvözetet a járműiparban és nyomástartó edények anyagaként is alkalmazzák.

Az alkalmazott anyagmodell a Hockett-Sherby-féle leírást követi, amely három darab szakítóvizsgálat mérési eredményére lett illesztve. A folyásgörbét a 2. ábra mutatja. A Hockett-Sherby-féle leírás az (1) szerint van értelmezve, és a görbe illesztés során meghatározott paramétereket az 1. táblázat tartalmazza. Feltételezhető, hogy az alakváltozás meg fogja haladni a mérés során felvett legnagyobb alakváltozási értéket, ezért a görbét extrapolálni szükséges.



2. ábra Folyásgörbe

$$\sigma = \sigma_s - \exp(-(N\varepsilon)^p)(\sigma_s - \sigma_i) \quad (1)$$

1. táblázat Hockett-Sherby modell paraméterei

Paraméter	Érték
$\sigma_s$ [MPa]	464,3
$\sigma_i$ [MPa]	98,5
$N$ [-]	5,98
$p$ [-]	0,58

### 2.2. Alkalmazott végeelemes modell

A numerikus számítások az MSC.Marc/Mentat 2019 Academic szoftverrel készültek, amely egy általános rendeltetésű végeelemes megoldó, és kifejezetten a nemlineáris esetek megoldására lett kifejlesztve.

Az alkalmazott modell elmozdulás vezérelt és a probléma jellege lehetővé teszi, hogy tengelyszimmetrikusként legyen modellezve.

A vizsgálat tárgyát képező csövek ún. QUAD4-es típusú elemekből épültek fel, amelyek elsőrendű, négycsomópontú elemek, és rugalmas-képlékeny anyagként vannak figyelembe véve. A rugalmassági jellemzők az alumínium anyagoknál szokásos  $E=70$  GPa és  $\nu=0,33$ . A szerszámok ideálisan merevnek vannak feltételezve.

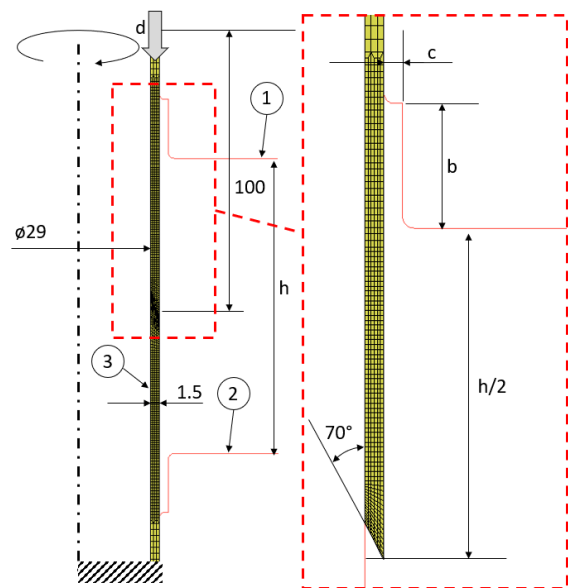
A kontaktok közötti súrlódási tényezők a Coulomb-féle leírást követik, első közelítésben  $\mu=0,1$  az összes kontakt esetén. A kontaktokat egyrészt a csövek és a merev szerszámok között értelmezzük, másrészt a csövek között, harmadrészt pedig, a belső cső egy adott alakítási határ után önmagával is összeér, így biztosítani szükséges, hogy önmagával is képes legyen kontaktba lépni.

A számítások során az összekötendő csövek rendre  $L=100$  mm hosszúságúak, belső átmérőjük  $d_b=29$  mm ( $d_k=32$  mm) és  $t=1,5$  mm falvastagsággal rendelkeznek. Első közelítésben a szerszám geometriájának kialakítása volt a kérdés, így az összes elvégzett számításban a csövek leélezése  $70^\circ$ .

A végeelem modellt a 3. ábra mutatja. A modellen a  $d$  az előírt elmozdulást jelöli, az alsó cső alsó éle meg van gátolva a szabad mozgásban.

A 1-gyel jelölt szerszámfél (felső) mozog, a 2-vel jelölt szerszámfél (alsó) áll, a 3-mal jelölt szerszám (támhenger) pedig a csövet belülről támasztja.

A vizsgálódás során az ábrán  $h$ ,  $b$  és  $c$  jelű paraméterek hatása volt kérdéses geometriai szempontból.



3. ábra Végeelemes modell

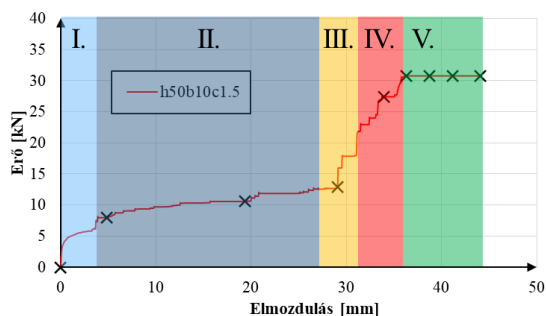
### 3. MODELL EREDMÉNYEK

A modellek jelölése a 3. ábra szerinti betűk alapján történik, például az első modell jele h50b10c1.5, ami azt jelenti, hogy a 1-gyel és 2-vel jelölt szerszámok közötti távolság  $h=50$  mm, a horony mélysége  $b=10$  mm és a horony szélessége  $c=1,5$  mm. A továbbiakban ezt a jelölést alkalmazzuk a modellekhez.

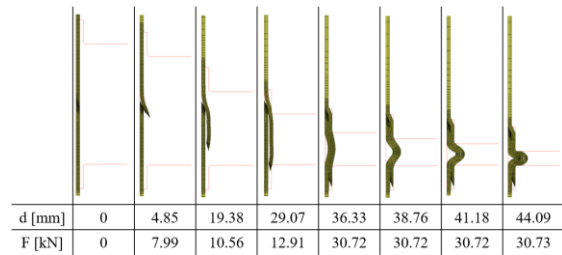
Az első közelítésben felvett paraméterekkel elvégzett számítás eredményei a következők. Az elvégzett számítás erő-elmozdulás jelleggörbéjét a 4. ábra mutatja, amelyen 5 zónát lehet elkülöníteni. Az I. zónában indul meg a felső cső tágulása, amely a II. zónában, amely a folyamat leghosszabb szakasza, közel állandó szinten zajlik egészen a III. zónáig, ahol a felső cső az alsó szerszámféllal már érintkezésbe kerül, a felső szerszámfél pedig már gátolni kezdi a tiszta csőtágítási szakaszt. A IV. zónában a csövek kihajlása zajlik, egyben a kötés kialakulását is magában foglalja. Az V. zónában a kialakult kötés végső alakjának kialakulása zajlik, ekkor az erő értéke nem nő tovább.

A kötés kialakulását követően (V. zóna után), a további összenyomás hatására a kötésben lévő csőszakaszok zömölteni kezdenek, az tovább növelné az erő értékét, viszont az elmozdulás mértéke lényegesen kisebb lenne. Ez a határ tekinthető a kötés kialakulásának végéhez, tehát a hirtelen ugrás az erő értékében jelzi, hogy a kötés elkészült, további alakításra nincsen szükség.

A görbén keresztekkel jelzett pontok az egyes szakaszhoz tartozó, a folyamat jellegzetesnek tekinthető pillanatai (4. ábra), az ezhez tartozó alakváltozási állapotokat az 5. ábra szemlélteti, az egyes  $d$  elmozdulásokhoz tartozó  $F$  erő értékek feltüntetése mellett, így végig követhető, hogyan alakul ki a kötés a folyamat során.

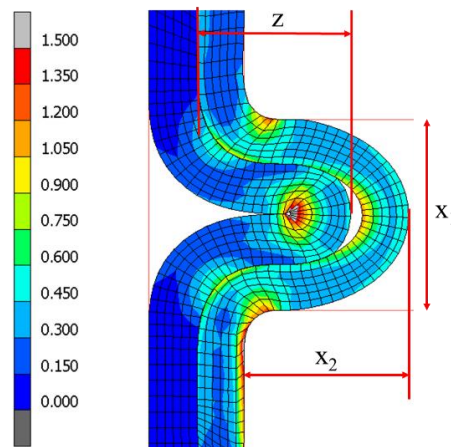


4. ábra Erő-elmozdulás jelleggörbe



5. ábra Erő-elmozdulás jelleggörbe

A h50b10c1.5 jelű modell kialakult kötését szemlélteti a 6. ábra, amely egyben a maradó alakváltozásokat is bemutatja, illetve azokat a vizsgált méreteket, amelyek a további számítások során az összehasonlítás alapját képezik. Az  $x_1$  és  $x_2$  méretek a későbbiekben mérésrel is vizsgálhatók, a  $z$ -vel jelölt méret, a tulajdonképpeni alámetszés, viszont roncsolásmentesen nem, azonban a modellben könnyen mérhető, és a tervezést segíti, hiszen minél nagyobbra adódik a számítások során, annál biztosabb, hogy az alsó cső anyaga megfelelő mértékben áramlik be a felső csőbe, így biztosítva megfelelőbb kötés.



6. ábra h50b10c1.5 modell kialakult kötése és maradó alakváltozás eloszlása

#### 3.1. Geometriai paraméter vizsgálatok

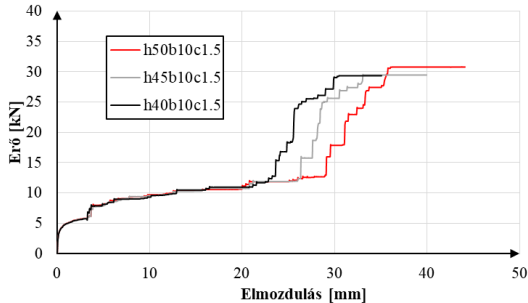
Az első számítások során a három méret ( $h$ ,  $b$  és  $c$ ) hatásának elemzése lett kitűzve célul. Az alábbiakban az elvégzett számítások eredménye olvasható.

A paraméterek hatását a következő diagramok és ábrák mutatják (7. ábra-12. ábra). A  $h$  méret hatása a III. és IV. zónákra gyakorol hatást, azaz hamarabb kezdődik el a csövek kihajlása, mivel rövidebb utat kell a szerszámnak megtennie.

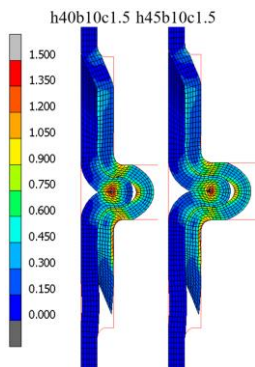
A  $b$  paraméter minél rövidebb, annál hamarabb éri el az erő a platót, azaz a kötés

hamarabb kialakulhat, de a kötés mérete nagyban eltérhet.

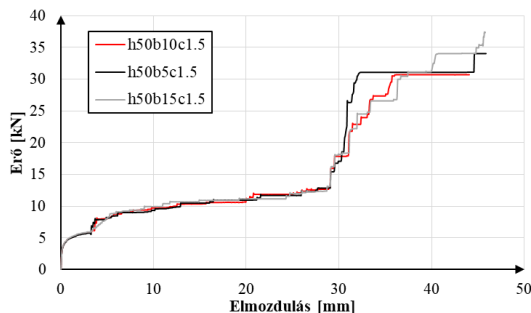
A  $c$  paraméter növelése a kihajlásra gyakorol jelentős hatást, és adott értékek mellett nem alakul ki kötés.



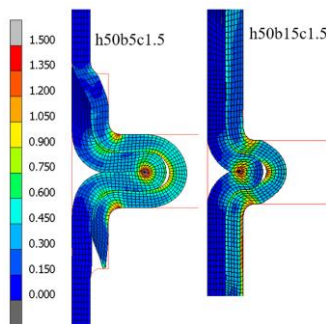
7. ábra A  $h$  méret hatása az erő-elmozdulás görbére



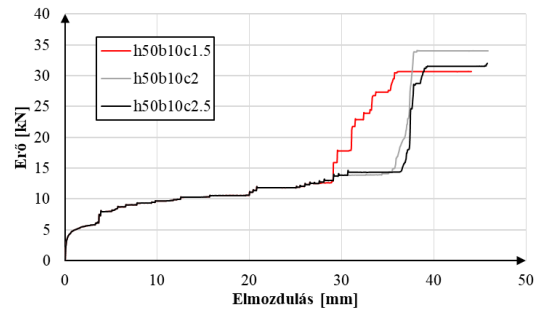
8. ábra A  $h$  méret hatása a kötésre – képlékeny alakváltozás eloszlása



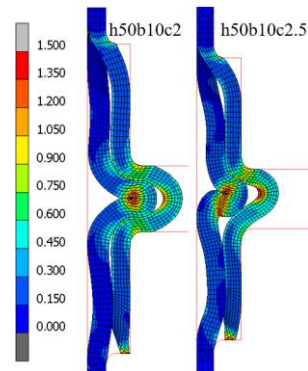
9. ábra A  $b$  méret hatása az erő-elmozdulás görbére



10. ábra A  $b$  méret hatása a kötésre – képlékeny alakváltozás eloszlása

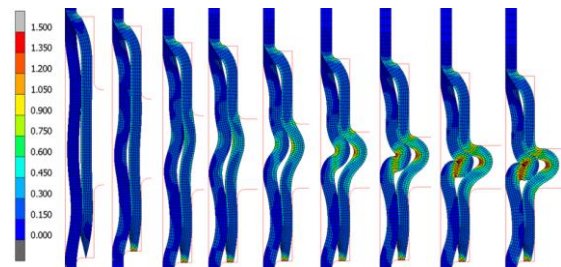


11. ábra A  $c$  méret hatása az erő-elmozdulás görbére



12. ábra A  $c$  méret hatása a kötésre – képlékeny alakváltozás eloszlása

A 12. ábra alapján kijelenthető, hogy a kötés nagymértékben függ a horony szélességétől, és az eddigi számítások alapján kijelenthető, hogy annak meg kell egyeznie a cső falvastagságával, hogy az kellőképpen meg tudja támasztani a csövet, így a kihajlás irányított módon következik be. A  $c=2$  mm esetben kötés ugyan létrejön, de az alsó csőben több hullám is keletkezik, míg a  $c=2,5$  mm esetben kötésről kevésbé lehet beszélni a kialakult hullámok miatt (13. ábra).



13. ábra Hullámosodás kialakulása h50b10c2.5 esetben – képlékeny alakváltozás eloszlása

A A cikkben bemutatunk egy képlékeny alakítással létrehozható csökötési eljárást, és a későbbi kísérleti vizsgálatokhoz szükséges



szerszám előzetes tervezéséhez szükséges számításokat.

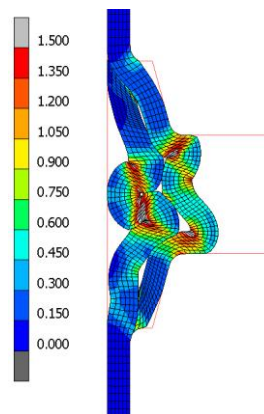
Bemutattuk a szerszám geometriájának kötésre gyakorolt hatását, ezáltal közelebb kerültünk a megfelelő geometria kialakításához. Sikertelenül meghatározni a kötés szempontjából leginkább kritikus elemét a szerszámnak, így a horony szélességi méretére vonatkozóan tudunk megállapításokat levonni az eredményekből. Másrészt megvizsgáltuk a súrlódás hatását is, amelyet a későbbiekben pontosítani szükséges, mivel jelen tanulmányban minden érintkező felületen azonosnak tételeztük fel annak értékét. tartalmazza az egyes vizsgált geometriákból származó összehasonlító méreteket és az  $F_{max}$ -szal jelölt erő értéket, amely a plátón számolt átlagos legnagyobb erő értéke.

2. táblázat Számítási eredmények összefoglalása – geometria hatása

	$x_1$ [mm]	$x_2$ [mm]	$z$ [mm]	$F_{max}$ [kN]
<b>h50b10c1.5</b>	5.91	5.17	4.83	30.7
<b>h45b10c1.5</b>	5.27	4.63	4.16	29.4
<b>h40b10c1.5</b>	4.97	3.70	3.26	27.3
<b>h50b5c1.5</b>	<b>6.05</b>	<b>6.46</b>	<b>6.27</b>	<b>31.1</b>
<b>h50b15c1.5</b>	5.39	5.40	3.06	33.06
<b>h50b10c2</b>	5.42	4.32	4.19	31.8
<b>h50b10c2.5</b>	4.32	3.36	2.08	31.9

A táblázatban szürkével jelölve a h50b10c2.5 modell, amely nem szolgált megfelelő geometriával, és a zölddel jelölt h50b5c1.5-ös modell, amely a kérdéses geometriai jellemzőket tekintve a legkedvezőbb.

A horonynak nem szabad kúpos kialakítást választani, ez egy modell alapján belátható, ugyanis a kihajlás következtében a csövek túlzottan eltorzulva képesek alakváltozni, ezáltal nem megfelelő módon metszenek egymásba.

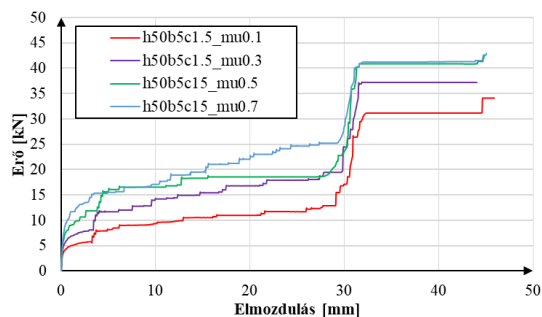


14. ábra Kúpos horony hatása a kötésre (h50b10c1.5 és  $\alpha=15^\circ$ ) – képlékeny alakváltozás eloszlása

### 3.2. Súrlódás hatásának vizsgálata

Jól ismert jelenség, hogy az érintkező felületek közötti súrlódás nagymértékben hat a folyamat munkaszükségletére, így meg kell vizsgálni, hogy szükséges lehet-e valamilyen kenés alkalmazására. Mivel alumínium csövek kötését tűztük ki elsődlegesen célul, így várhatóan magasabb súrlódásokkal kell számolnunk majd, mind a csövek között, mind pedig a csőszerszám érintkező felületein.

Az előző számításokból kiderült, hogy a h50b5c1.5 jelű szerszám lehet megfelelő, ezért a súrlódással kapcsolatos számításokat már ezzel a geometriával végeztük.



15. ábra Súrlódási tényező hatása

A diagramról (15. ábra) leolvasható, hogy a növekvő súrlódási tényező a csőtágítási szakaszra ( $F_c$ ) és a maximális erő szakaszra is hatással van. A növekvő súrlódás a maximális erőben nem okoz nagymértékű változást a  $\mu=0,5$  felett a diagram tanúsága szerint.

A 3. táblázatban az egyes számítások eredményei vannak összefoglalva. A  $\mu=0,3-0,7$  eseteket külön vizsgálva a  $\mu=0,1$  referencia esettől, látszódik egyféle trend a  $z$  paraméter méretében, a súrlódás növekedésével együtt csökken.

3. táblázat Számítási eredmények összefoglalása – súrlódás hatása

$\mu$	$x_1$ [mm]	$x_2$ [mm]	$z$ [mm]	$F_c$ [kN]	$F_{max}$ [kN]
0.1	6.05	6.46	6.27	11.2	31.1
0.3	6.15	6.40	6.88	16.8	37.2
0.5	6.15	6.40	6.43	18.5	40.9
0.7	6.15	6.39	6.42	22.1	41.3

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatunk egy képlékeny alakítással létrehozható csökötési eljárást, és a későbbi kísérleti vizsgálatokhoz szükséges szerszám előzetes tervezéséhez szükséges számításokat.

Bemutattuk a szerszám geometriájának kötésre gyakorolt hatását, ezáltal közelebb kerültünk a megfelelő geometria kialakításához. Sikertült meghatározni a kötés szempontjából leginkább kritikus elemét a szerszámnak, így a horony szélességi méretére vonatkozóan tudunk megállapításokat levonni az eredményekből. Másrészt megvizsgáltuk a súrlódás hatását is, amelyet a későbbiekben pontosítani szükséges, mivel jelen tanulmányban minden érintkező felületen azonosnak tételeztük fel annak értékét.

További lépések a szerszámtervezéshez a következők:

- kisebb horonymélységgel kialakított szerszámok vizsgálata,

- a csövek leélezésének vizsgálata,
- csövek tűrésének figyelembevétele,
- támhenger hosszának meghatározása,
- súrlódási tényezők pontosítása.

A kutatómunka további lépéseiben a modell kalibrációját szükséges lesz elvégezni mérések alapján a szerszám továbbfejlesztéséhez, illetve a kötések minősítéséhez szükséges vizsgálati eljárások kidolgozása is cél.

A tervezési fázist követően el fogjuk készíteni a szerszámot, és létrehozuk az első kísérleti darabokat.

A kötések létrehozását követően a kötés teherviselő, és egyéb képességeit fogjuk vizsgálni.

#### 5. IRODALOM

- [1] Alves, L.M., Silva, C.M.A., Martins, P.A.F.: Joining of tubes by internal mechanical locking, *Journal of Materials Processing Technology* 242 (2017) 196-204
- [2] Goncalves, A., Alves, L.M., Martins, P.A.F.: Tube joining by asymmetric plastic instability, *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 132-140
- [3] Agrawal, A.K., Narayan, R.G: Experimental and numerical studies on joining steel tubes by end forming, *Journal of Construction Steel Research* 167 (2020) 105792