

Miskolci Egyetem

Gépészmérnöki és Informatikai Kar

Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Járműmérnöki alapszak



**Lemezvastagság hatásának vizsgálata
Deform vége-selelemes szoftver segítségével
klinc-selt kötések esetén**

Készítette:

Pásztor Marcell

3571 Alsózsolca, Deák Ferenc út 13.



SZAKDOLGOZAT FELADAT

Pásztor Marcell

Neptun kód: KQ3FCU

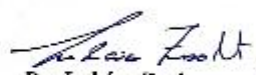
A tervezés tárgyköre: *Mechanikai technológiák – Képlékenyalakítás*
A szakdolgozat címe: *Lemezvastagság hatásának vizsgálata Deform végecselemes szoftver segítségével klincselte kötések esetén*
Tervezésvezető: *Dr. Kovács Péter Zoltán, egyetemi docens*

A szakdolgozat beadásának határideje: 2023. november 17.

A feladat részletezése:

1. Készítsen irodalmi áttekintést lemezek egyesítése témakörben!
2. A szakirodalom kutatás során kiemelten foglalkozzon a mechanikai kötések típusaival, azon belül is a klincs kötéssel!
3. Mutassa be a kötések virtuális környezetben történő vizsgálatára alkalmas Deform végecselemes szoftvert!
4. A kísérleti klincs kötések alapján készítsen végecselemes modellt az alakítási folyamat mélyebb megismerése céljából! Készítsen klincs kötések különböző lemezvastagságú alumínium anyagminőségű lemezpárokon!
5. Vizsgálja meg a modellezési eredményeket és értékelje a kapott eredményeket!

Miskolc, 2023. október 18.


Dr. Lukács Zsolt
egyetemi docens, intézetigazgató



EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott Póstor Mancel.....; Neptun-kód: K23FC4.....
a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős gépészmérnök szakos
hallgatója ezennel büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és
aláírással igazolom, hogy
temerítőanyag, hordozóanyag, vízszigetelő, Deform, végezők, szigetelő, klímák, szigetelő, klímák, szigetelő, klímák
című szakdolgozatom/diplomatervem saját, önálló munkám; az abban hivatkozott
szakirodalom
felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt.
Tudomásul veszem, hogy szakdolgozat esetén plágiumnak számít:
- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.
Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy
plágium esetén szakdolgozatom visszautasításra kerül.

Miskolc, 2024.....év04.....hó06.....nap

Póstor Mancel
.....
Hallgató

Tartalom

Bevezetés	- 1 -
1. Lemezkötési eljárások és technológiái	- 2 -
1.1. Oldható kötések	- 2 -
1.1.1. Csavarkötés	- 2 -
1.1.1. Csapszegkötés	- 3 -
1.2. Nem oldható kötések	- 4 -
1.2.1. Ragasztott kötés.....	- 4 -
1.2.2. Forrasztott kötés	- 5 -
1.2.3. Hegesztett kötések.....	- 6 -
1.2.4. Mechanikai kötések.....	- 12 -
2. Klincs kötés.....	- 15 -
2.1. Klincs kötés története.....	- 15 -
2.2. A klincs kötés létrehozásának folyamata	- 16 -
2.3. Az eljárás előnyei és hátrányai.....	- 17 -
2.4. Klincs kötések minőségbiztosítása.....	- 18 -
2.4.1. Gyártás közbeni állapotfelügyelet	- 19 -
2.4.2. Gyártás utáni vizsgálati lehetőségek.....	- 19 -
2.5. A klincs kötések fő korlátai	- 20 -
2.6. A technológia használata elektromos autók akkumulátoránál	- 21 -
2.7. További alkalmazási területek.....	- 22 -
3. Klincs kötés szimulációja a Deform szoftverrel.....	- 23 -
3.1. 5754 Alumínium szerepe az autóiparban.....	- 23 -
3.2. A végeselem-módszerről általánosságban	- 25 -
3.3. Deform szoftver bemutatása	- 27 -
4. A végeselemes modell vizsgálata	- 29 -
4.1. 1 mm vastagságú lemezpár szimulációja	- 29 -
4.2. 2 mm vastagságú lemezpár szimulációja	- 34 -
4.3. 4 mm vastagságú lemezpár szimulációja	- 35 -
4.4. 8 mm vastagságú lemezpár szimulációja	- 36 -
4.5. 12 mm vastagságú lemezpár szimulációja	- 37 -
4.6. 10 mm vastagságú lemezpár szimulációja	- 39 -

4.7. 9 mm vastagságú lemezpár szimulációja	- 40 -
4.8. Alakváltozás utáni méretek összehasonlítása.....	- 41 -
5. Klincs kötések vizsgálata	- 43 -
5.1. Alakításhoz szükséges erő vizsgálata.....	- 43 -
5.1.1. 1 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő	- 43 -
5.1.2. 2 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő	- 45 -
5.1.3. 4 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő	- 45 -
5.1.4. 8 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő.....	- 46 -
5.1.5. 9 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő.....	- 46 -
5.1.6. Szimulált bélyeg erő – elmozdulás diagramok összehasonlítása	- 47 -
5.2. A klincs kötés vizsgálata és készülékei	- 50 -
5.2.1. A kötések vizsgálata.....	- 50 -
5.2.2. Készülékek.....	- 54 -
Összefoglalás	- 57 -
Források / Irodalomjegyzék.....	- 61 -

Bevezetés

A szakdolgozatomban lemezek egyesítésénél alkalmazott klincs kötések kialakításával foglalkoztam. A vizsgálataim során kiemelten foglalkoztam azzal, hogy hány milliméter vastagságú lemezpárt lehet megfelelő módon összekapcsolni. Az irodalomkutatásom során felkeltette az érdeklődésemet, hogy mi lehet a maximális lemezvastagság, aminél még a kialakuló geometria arányaiban nem változik. Ehhez a vizsgálathoz nyilvánvalóan tartoznak bizonyos feltételek, például, hogy a lemezpár méreteit, illetve a szerszám méreteit arányosan növelem majd a kísérlet során, valamint a ráncgátló erőt is ezzel arányosan fogom emelni. Azért látom szükségét ennek a vizsgálatnak, mert a kutatás során talált források említenek maximális lemezvastagságot, amit még össze lehet kötni klincseléssel, de nem említenek hozzá anyagminőséget. A dolgozat megírása során fő célom még a klincs kötés folyamatának áttekintése. Végül pedig a szimulált kötések geometria és erő szerinti tanulmányozása következik, illetve szó esik még a kötés létrehozására alkalmazható készülékekről. Ahhoz, hogy ide eljussunk, fontos előtte feltérképezni a többi gépészetben és autógyártásban is széleskörűen használt kötési módszereket. A szimulációs vizsgálatokat megelőzően fogom bemutatni a használt szoftvert, és a kutatás során alkalmazott alapanyagot is. Szakdolgozatom témájának mindenképp olyan tárgykört szerettem volna, ami valamelyest kapcsolódik az autógyártáshoz, és bár ott nem feltétlen a lemezvastagság növelése a cél, de úgy érzem, hogy valóban sikerült ilyen kérdéskört választani, mert számos használatos kötésformát ismerhetek meg a kutatás során.

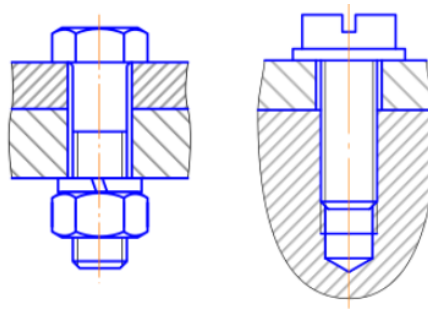
1. Lemezkötési eljárások és technológiái

A műszaki gyakorlatban sokszor kell kötéseket létrehozni. A kötés történhet oldható, illetve nem oldható módon. Először röviden az oldható kötések ismertetése következik.

1.1. Oldható kötések

1.1.1. Csavarkötés

A csavarkötés (1. ábra) két gépelem (jelen esetben lemez) összekötésére használatos oldható kötés. Csavarból, csavaranyából, alátétből és esetleg csavarbiztosításból áll. A csavarkötést általában olyan elemek összekapcsolására használunk, amelyek kapcsolatát időnként meg kell szüntetni például karbantartás elvégzésének céljából. A csavarkötés a leggyakrabban alkalmazott oldható kötés. [1]



1. ábra: Csavarkötés átmenő furattal; csavarkötés zsákfurattal [1]

„A csavar megfelelő előfeszítése szükséges nyomaték mérésével oldható meg. A csavar meghúzásához szükséges nyomaték a meneten és a csavarfej vagy anya felfekvő felületén ébredő súrlódás figyelembevételével:

$$M = \left(\frac{d}{2} \cdot \tan(\alpha + \rho) + \frac{d_1}{2} \cdot \tan \rho \right) \cdot F_e$$

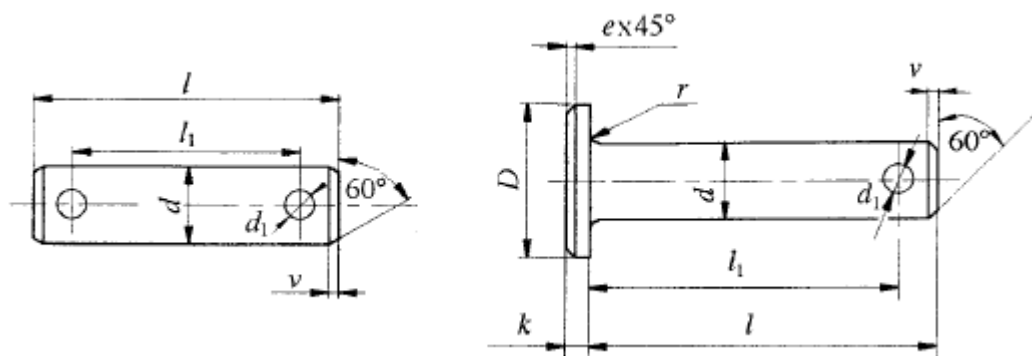
Ahol:

- d : csavarmenet közepes átmérője
- d_1 : a csavarfej vagy anya körgyűrű alakú felfekvő felületének közepes átmérője
- α : a menetprofil szöge
- $\tan \rho = \mu$: súrlódási tényező
- ρ : súrlódási kúpszög
- F_e : előfeszítési erő” [1]

Célunk a megfelelő szorító erő létrehozása a csavarozásnál, mivel ezzel biztosítjuk, hogy az összeszerelt részek a tervezettek szerint működnek. A csavar maximális meghúzási nyomatékát három tényező befolyásolja: csavarméret, csavarminőség, súrlódás. Minél nagyobb a csavar, annál nagyobb nyomatékra van szükség a megfelelő szorító erő eléréséhez. Csavarminőség alatt arra utalunk, hogy a csavarok különböző minőségű, tehát különböző tulajdonságú acélokból készülhetnek. Ez segít meghatározni, hogy mekkora nyomást és szakítószilárdságot bír el a csavar, mielőtt tönkremegy. Az utolsó tényező a nyomaték meghatározásakor a súrlódás. A súrlódásra szükség van, hogy megelőzzük a kötés lazulását, viszont a magasabb súrlódás azt jelenti, hogy magasabb nyomatékra van szükség a csavar meghúzásához is. [2]

1.1.1. Csapszegkötés

A csapszeg kör keresztmetszetű, átmérőjéhez képest viszonylag rövid. Csuklós szerkezetekben az erő átvitelén kívül lehetővé teszik a viszonylagos elfordulást, esetleg az együttmozgást is. A csapszgek az összekötendő elemeket lazán rögzítik egymáshoz. A legegyszerűbb verziója egy, a két végén furattal és letöréssel ellátott hengeres rúd, amely biztosító szeggel (pl. sasszeg) rögzíti az alkatrészeket. Egyirányú beszerelésre alkalmas változata a fejes csapszeg, amelynek csak az egyik oldalát kell biztosítószeggel rögzíteni. A két említett verziót a 2. ábra szemlélteti: [3][4]



2. ábra: Csapszeg; fejes csapszeg [3]

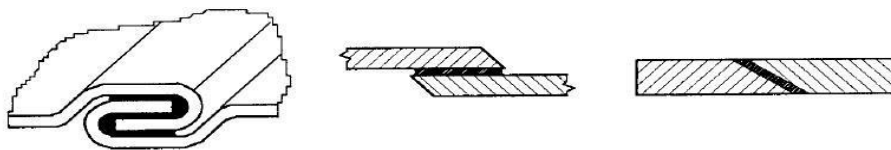
1.2. Nem oldható kötések

Nem oldható kötéseknek nevezzük azokat a kötési módokat, amelyeknél a kötést csak úgy tudjuk szétszerelni, ha az alkatrészeket mechanikai hatással bontjuk szét, például fűrészeléssel. Ellenben az oldható kötésekkel, a szétszerelés után a kötőelemek nem használhatók fel újra kötés kialakítására. Nem oldható kötések esetén tehát szétszereléskor az alkatrészek tönkremennek, roncsolódnak. [5]

1.2.1. Ragasztott kötés

A ragasztás egyre elterjedtebben használt kötési forma a járműiparban is. A fémragasztás használatos például a repülőgépjárművekben is, ahol vékony, fóliaszerű könnyűfémlemezek összeragasztásával állítanak elő különféle nagy szilárdságú héjszerkezeteket. A ragasztott kötések egyik nagy előnye, hogy ellentétben például a szegecselemekkel és a hegesztéssel, amelyek általában pont és vonalszerű kapcsolatot teremtenek, itt a teljes érintkező felületet egymáshoz rögzíthetjük. Elhagyhatók a szegecses számokra készített lyukak, amelyek helyi feszültségcsúcsot okozhatnak. Nincs szükség az anyagok helyi felmelegítésére. Akár fémes - nem fémes kapcsolat is létrehozható ragasztással. [3][6]

A ragasztási folyamat során fontos a ragasztandó felületeket tisztítani (zsírtalanítani), illetve csiszolással és homokszórással célszerű érdesíteni. Törekedni kell rá, hogy a ragasztó befedje a ragasztandó felületeket és a felületek egyenetlenségeit, a felületi érdesség mélypontjait is elérje a ragasztó anyag. A felületeket érdemes minél hosszabbra elnyújtani. A 3. ábrán látható néhány példa lemezek ragasztására. [3][6]



3. ábra: Lemezek ragasztott kötése [3]

1.2.2. Forrasztott kötés

Forrasztással oldhatatlan kötést lehet létrehozni fémek között. A forrasztás a hegesztéshez hasonlóan diffúziós kötés (anyagi részecskék áramlanak). Célja két vagy több alkatrész között elektromos vagy mechanikus kapcsolat létrehozása. A hegesztéstől abban különbözik, hogy az összekötendő alapanyagok megolvadása nélkül lehet anyagzáró kötést létrehozni. Éppen ebből adódik az egyik előnye: készremunkált alkatrészek lényeges alakváltozás nélkül köthetők össze. A forrasztás olyan forrasztóanyaggal történik, mely az alapanyagoktól eltér, és az olvadáspontja lényegesen kisebb. Biztonságos kötést akkor tudunk létrehozni, ha az összekötendő felületeket kellőképpen megtisztítottuk (oxid- és zsírméntesítettük), és így a forrasztóanyag be tud diffundálni az összekötendő anyagok külső rétegeibe. A forrasztáshoz a forrasztóanyagon kívül hőforrás is szükséges. Ez a hőforrás lehet például forrasztópáka vagy forrasztópisztoly. [3][6][7]

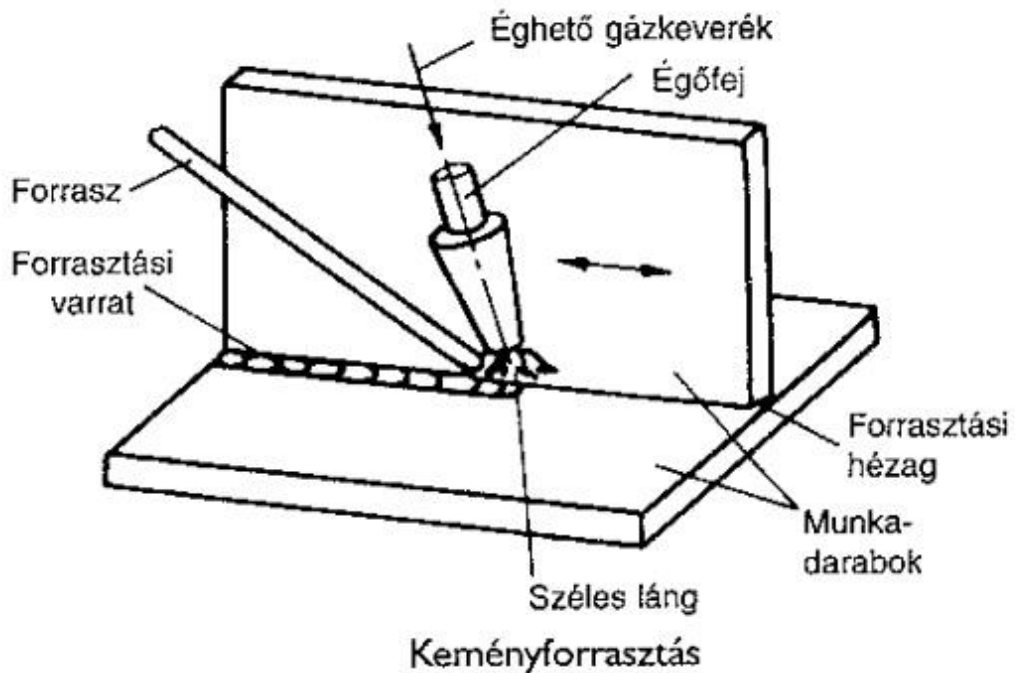
A forrasztásnak két fajtáját különböztetjük meg: lágyforrasztás és keményforrasztás.

1.2.2.1. Lágyforrasztás

A lágyforrasztás 450°C alatti olvasztási hőmérsékleten történik, kicsi a kötési szilárdsága. Elsősorban az elektronikában használatos, a vezetőképesség a fő szempont. Ehhez általában ónt, vagy például cinket használunk. Az alacsony olvadáspontjuk miatt lehetséges, hogy elektromos fűtésű forrasztópákával végezzük a forrasztást. [3][6]

1.2.2.2. Keményforrasztás

Keményforrasztáshoz általában a gázhegesztés eszközeit alkalmazzuk. Ennek oka, hogy viszonylag nagyobb szilárdságú kötést csak nagyobb olvadáspontú forrasztóanyag segítségével tudunk biztosítani. Ez általában $700 - 1100^{\circ}\text{C}$ közötti olvasztási hőmérsékleten történik. Használunk hozzá például ezüstöt, rezet. A keményforrasztás vázlata látható a 4. ábrán. [3][7]



4. ábra: Keményforrasztás vázlata [8]

1.2.3. Hegesztett kötések

A hegesztés egy oldhatatlan, anyagzáró kötési forma. Ez azt jelenti, hogy a kötésben résztvevő alkatrészek szétválasztásuk után újra nem használhatók fel újra. A járműalkatrészek többsége acéllemezéből készül. Megfelelő eljárással gyakorlatilag minden acél hegeszthető. Hegesztés során az egyesítendő részek anyagai között hő és/vagy nyomás hatására kohéziós kapcsolat jön létre. [6]

A gép-és járműiparban gyakran alkalmaznak különféle hegesztési technológiákat. Alkalmazzák például acélszerkezetek, csőszerkezetek, vagy éppen különféle alváz és karosszéria elemek, illetve városi és nagyvasúti sínek nem oldható kötéseinek kialakítására. Egy autóban rengeteg hegesztett kötés található.

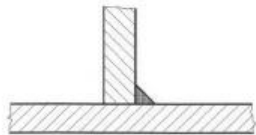
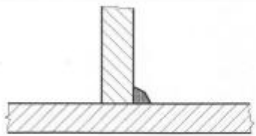
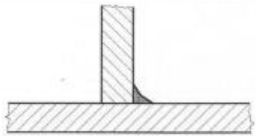
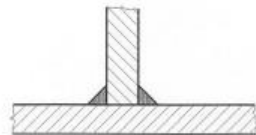
Szilárdsági szempontból kedvező, hogy az összekötendő elemeket furatok nem gyengítik, így a feszültségcsúcsok kialakulásának lehetősége csökken.

Gazdasági szempontból lényeges, hogy akár 15-20%-os súlymegtakarítást is elérhetünk az átlapolások elmaradásával. Bizonyos előgyártmányok is kiválthatók hegesztés segítségével. [3]

1.2.3.1. Hegesztett varratok fajtái

Hegesztett varratok fajtái:

- Tompavarrat (közel azonos síkban fekvő lemezeknél)
- Sarokvarrat (átlapoló vagy egymásra illesztett alkatrészeknél, 5.ábra)
- Élvarrat (éleikkel összeillesztett lemezek esetén)
- Háromlemez-varrat (három lemez közös élvarrata)
- Lyuk-és horonyvarrat (két egymásra helyezett alkatrész összekötésénél) [9]

Alak	Jelölés	Megnevezés
		sarkvarrat
		domború sarkvarrat
		homorú sarkvarrat
		kettős sarkvarrat

5. ábra: Sarokvarratok, és rajzi jelölésük [9]

1.2.3.2. A hegesztett kötések optimális kialakításának szempontjai

„Hegesztési varratok kialakításánál célszerű néhány tényezőt figyelembe venni, amelyek kedvezőtlenül befolyásolják a hegesztett szerkezetek igénybevételekkel szembeni ellenállását. Lényeges, hogy a hosszan tartó és nagy hőközlés nem csak a varrat közvetlen közelében okoz anyagszerkezeti átalakulást, feszültségeket, vetemedést.” [3]

- a hegesztési varrat mindig feszültséggyűjtő hely
- kerülni kell az egymást keresztező varratokat
- a hosszú vékony varratokat kell előnyben részesíteni a rövid és vastag varratokkal szemben
- a varrat közelében ébredő feszültségek nagyban függenek a hegesztési eljárástól, a varrat vonalvezetésétől, és a hegesztő gyakorlottságától
- lehetőleg olyan helyen kell a varratokat kialakítani, amelynek igénybevétele húzás vagy nyomás
- a varratvégek teherviselőképesége kisebb, mint a varrat egyéb helyein [3]

1.2.3.3. Hegesztő eljárások csoportosítása

Ömlesztő eljárások:

- Gáz, ill. lánghegesztés
- Ívhegesztési technológiák (bevont elektródás kézi ívhegesztés, védőgázos hegesztési eljárások, fedett ívű hegesztés)
- Plazmahegesztés (plazmaívhegesztés, plazmalánghegesztés)
- Sugárhegesztés (elektronsugaras hegesztés, lézersugaras hegesztés)

Ömlesztve sajtoló hegesztési eljárások:

- Ellenállás hegesztés (ponthegesztés, dudorhegesztés, csaphegesztés)

Sajtoló hegesztő eljárások:

- Dörzshegesztés, ultrahanghegesztés, zömítő tompahegesztés, hideghegesztés [6]

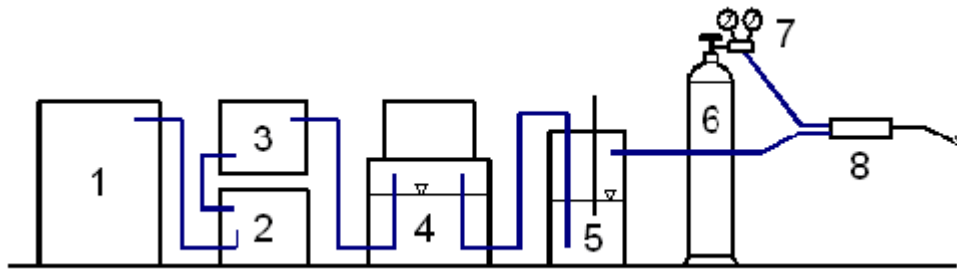
A továbbiakban sor kerül néhány járműiparban is használatos hegesztési eljárás bemutatására.

1.2.3.4. Gáz ill. lánghegesztés

„Minden ömlesztő hegesztési eljárásban koncentrált hőhatással kell dolgozni, hogy a hegesztendő felületek rövid idő alatt, vékony rétegben olvadjanak meg. Ilyen koncentrált hőhatást lehet elérni, ha valamilyen éghető gázt oxigénnel keverve égetnek

el erre alkalmas berendezéssel (6. ábra). Az égő gáz lehet hidrogén, acetilén, propán bután, világítógáz, stb. Az égető berendezés a hegesztőpisztoly.” [10]

„Az acélok és az öntöttvasak hegesztéséhez olyan gázok jöhetnek szóba, amelyek lánghőmérséklete magas (min 3000°C). Nagy égési sebességre és égési hőre van szükség, hogy időegység alatt nagy hőenergia szabaduljon fel.” [6] Így érjük el a korábban említett gyors felhevítést.



6. ábra: A berendezés, 1: gázfejlesztő; 2: nedves tisztító; 3: száraz tisztító; 4: gázgyújtó; 5: vízzár; 6: oxigénpalack; 7: reduktor; 8: hegesztőpisztoly [10]

Az égés akkor lesz tökéletes, amikor a levegő oxigénje is részt vesz benne. Ebből következik, hogy az égés lehet tökéletes vagy tökéletlen. Tökéletlen égéskor a lángban még el nem égett gázokat találunk, amelyek a lángot körülvevő levegőből oxigént vonnak el. Ez a redukáló láng. Ha a lángban a szükségesnél több az oxigén, akkor oxidáló lángról beszélünk. Az oxidáló láng (az öntöttvasat kivéve) minden anyag hegesztésekor káros, mert az oxigénfelesleges átadja a heganyagnak. Ugyancsak káros a láng akkor is, ha felesleges éghető gáz van benne.

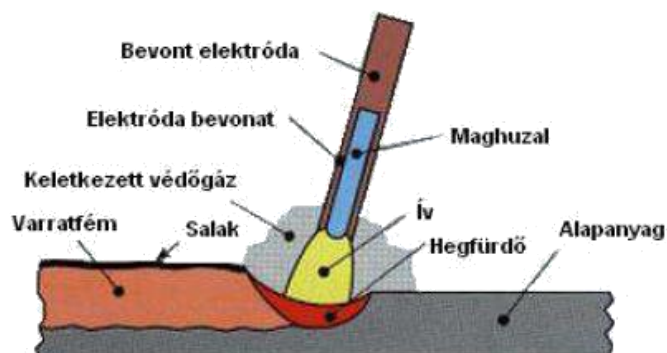
Semleges lángról beszélünk akkor, ha a heganyagra semmilyen hatást nem fejt ki. Ennek eléréséhez biztosítani kell az égőgáz és az oxigén helyes keverési arányát (1 m^3 égőgázhoz 1 m^3 oxigén szükséges, a hiányzó oxigént a levegőből vonja el). Semleges lánggal kell hegeszteni a következő anyagokat: acél, acélöntvény, rozsdá- és hőálló acél, alumínium, alumínium ötvözetek, horgany. [10]

1.2.3.5. Bevont elektródás kézi ívhegesztés

Az elektromos ívhegesztés a plazmakisülés hőhatását hasznosítja. A plazma hőmérsékletét és erősségét az elektronsűrűség és mennyiség határozza meg. Ez a modern hegesztő berendezéseken jól beállítható (áramerősség és feszültség). [11]

Az ív általában a munkadarab és egy leolvadó (fogyó) vagy egy nem leolvadó (volfrám) elektróda között jön létre. Az ívfeszültség 15-50 V között változhat.

A bevont elektróda adja a hegesztéshez szükséges hozaganyagot. A bevonata több funkciót lát el. Ívstabilizáló hatása van, így az ív viszonylag kis feszültség mellett is fenntartható. Védőgáz képződik, és ez megvédi a levegő oxigénjétől és nitrogénjétől az ívet és az ömledéket. Salakképzés lép fel, a megszilárdult salak védő az ömledéket a szennyeződésektől és a gyors hűtéstől is. Továbbá a bevonatból lehetséges akár ötvözők bevitele is a hegfürdőbe. A szóban forgó hegesztési mód vázlatja a 7. ábrán látható. [6]



7. ábra: Bevont elektródás ívhegesztés [12]

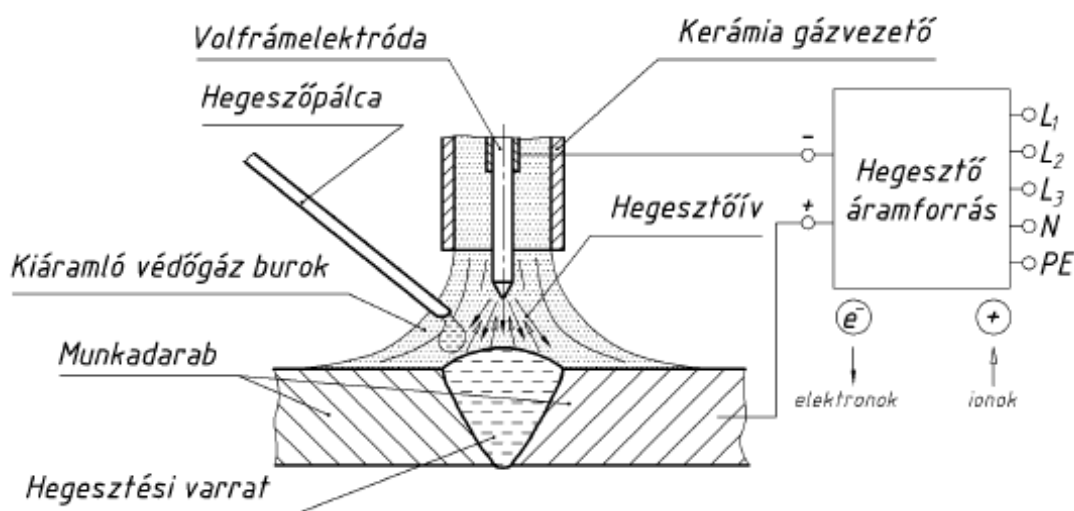
1.2.3.6. Védőgázos ívhegesztés

„Ívhegesztéskor a védőgáz feladata az oxigén és a nitrogén kiszorítása az olvasztótérből. A védőgázos hegesztést a kötések jó minősége, a fedőpor- és a salakeltávolítás elmaradása, semleges védőgáz alkalmazásakor a varrat kémiai összetételének állandósága, a koncentrált hőhatás következtében a keskeny hőhatásövezet, és ennek megfelelően a minimális elhúzódás jellemzi. Védőgázos ívhegesztéssel 0,5...100 mm

vastagsági tartományban hegeszthetők a lemezek. Az ívet szemmel meg lehet figyelni, nagy a termelékenysége, az eljárás jól automatizálható.

A védőgáztól függően ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött acélok, könnyű- és színesfémek, ill. ötvözetek, valamint különleges fémek és ötvözeik egyaránt jól hegeszthetők. A védőgázos hegesztés lehet fogyóelektródos és nemolvadó elektródos. A legelterjedtebb eljárások: az argon, a hélium és a széndioxid védőgázos hegesztés.” [13]

Elsősorban az argont használják, mint semleges gázt. Ennek oka, hogy olcsóbb, mint a hélium. A TIG (Tungstam Inert Gas), továbbiakban AWI (argon védőgázos volfrámelektrodás ívhegesztés, 8. ábra) esetén az elektróda volfrám alapú, magas olvadáspontú fém. Hegesztőpálcát is alkalmazhatunk a hegfürdő képzéséhez. [6]



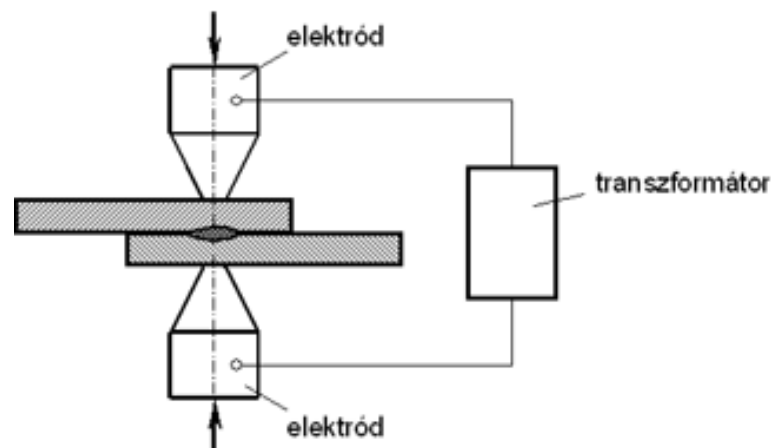
8. ábra: AWI hegesztés [6]

Az AWI hegesztés (és az argon gáz) alkalmazásának előnyei:

- az argon semleges gáz, nem lép kapcsolatba a hegfürdővel, nem oldódik benne
- stabilan ég, és elég alacsony feszültség (10-15 V)
- rossz a hővezető képessége, tehát koncentrált ívet szolgáltat
- teljes védelmet nyújt a levegő oxidáló hatása ellen
- a hegesztés könnyen elsajátítható
- könnyen automatizálható
- megfelelő technikával vékony anyagok is jól hegeszthetők [6]

1.2.3.7. Ponthegeztés

A ponthegeztés (9. ábra) az ellenálláshegeztések csoportjába sorolható be. Átlapolt lemezek összekötésére használjuk. Az összekötendő lemezeket pontszerűen összeszorítjuk és hegesztőáramot vezetünk át rajtuk. Jó vezetőképeségű réz, vagy rézötívzet elektródákat használunk. Az áram hatására kialakuló hő miatt a munkadarabok között egy lencse alakú tartományban megolvad az anyag, majd később lehűl és megdermed, így létrehozva a kötést. A jó minőségű kötéshez elengedhetetlen az áramerősség és a hegeztési idő összehangolása. Ezt az áramerősség-idő arányt figyelembe véve létezik kemény munkarend, illetve lágy munkarend. A kemény munkarendet nagy áramerősség és rövid hegeztési idő mellett kis hővesztés és elektródakopás jellemzi. A lágy munkarendnél kis áramerősség, hosszú hegeztési idő, széles hőhatásövezet és a beedződés veszélye áll fent. Fontos, hogy a dermedés közben térfogatcsökkenés zajlik aminek hatására a hegpont a lencse középső síkjában szétválna. Megfelelő kötés úgy hozható létre, ha megfelelő sajtoló erővel az anyagot „utána nyomjuk”. [6][14]



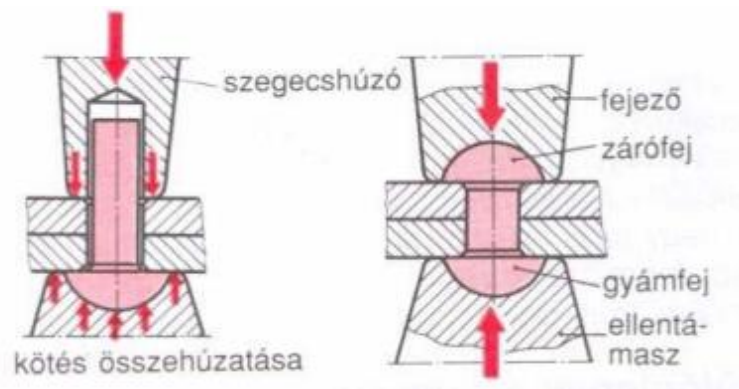
9. ábra: Ponthegeztés [15]

1.2.4. Mechanikai kötések

1.2.4.1. Szegecs kötés

A szegecs kötés leginkább acélszerkezeteknél és a gépgyártásban használatos kötési forma, de használják a repülőgépek lemezborításához is, mert a szegecs belesimulnak

a külső felületbe, így csökken a légellenállás. A szegecselés olyan esetekben a legjobb, amikor tartani kell a belső feszültségektől, vagy például, ha nagy hőtágulás várható az adott konstrukciónál. A szegecskötéseket már a bronzkorban a bronzkorban is használták. A hagyományos szegecselés folyamatánál az összekapcsolandó lemezeket lehetőleg együtt kifűrik, majd befűzik a szegecset. A szegecs egyik végén előre kialakított fej van, ezt a részt gyámfejnek nevezzük. A másik végén a zárófejet a szegecs szár képlékeny alakításával (zömítésével) érjük el. A szegecselés munkafolyamata a 10. ábrán látható. [16][17][18]



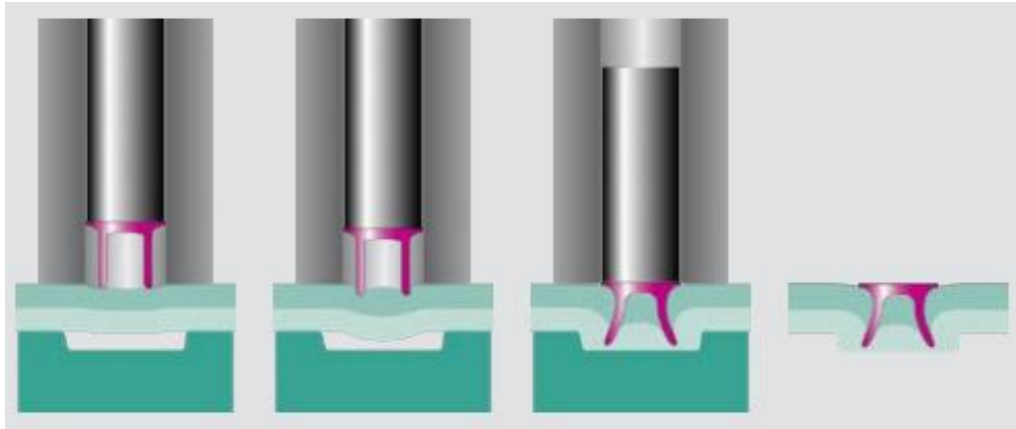
10. ábra: A szegecselés munkafolyamata [18]

1.2.4.2. Vágószegecs kötés

A vágószegecses kötéstechnológiának számos előnye lehet más megoldásokhoz képest. Például:

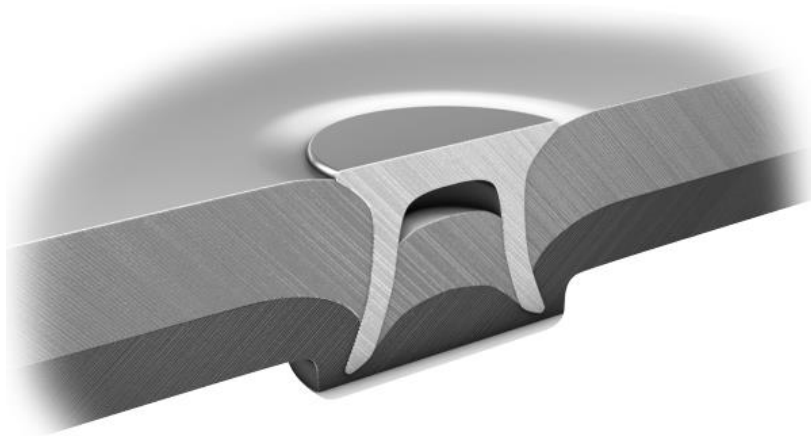
- nincs szükség előfűrésra, ezáltal időt lehet spórolni, illetve kevesebb az esélye, hogy az anyag megsérül
- erős, szivárgásmentes kötést lehet vele létrehozni
- biztonságosabb például a hegesztésnél, mivel nincs szükség hőre a kötés kialakításához
- különböző tulajdonságú összekapcsolására is képes [19]

A folyamat (11. ábra) során a vágószegecs átllyukasztja az első anyagréteget majd a második (vagy több lemez rögzítése esetén utolsó) rétegben szélesebbre nyílik. Eközben az összekötni kívánt lemezek kitöltik a vágószegecs üreges belsejét. Ez nagy szilárdságú, szoros kötést eredményez. [20]



11. ábra: a vágószegecselés folyamata [20]

A járműiparban előszeretettel használják ezt a kötéstechológiát, mivel sok területen az acél helyett próbálnak könnyebb alternatívákat alkalmazni. Ha egy jármű kisebb tömegű, akkor kevesebbet fog fogyasztani és így kevesebb káros anyag pl. CO₂ kibocsátás fog történni a használat során. Emiatt jön jól a járműiparnak a már korábban említett előny, hogy a vágószegecses kötéssel különböző fajtájú anyagok összekapcsolására is van lehetőség. A 12. ábrán látható a vágószegecs kötés nagyított keresztmetszete. [21]



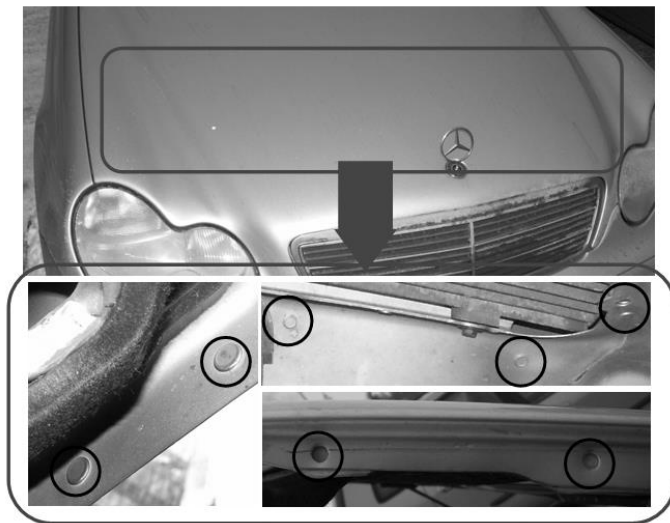
12. ábra: a vágószegecs kötés keresztmetszete [20]

2. Klincs kötés

A második fejezet a dolgozatom témája, tehát a klincselés köré épül. Ez a kötés is a nem oldható, mechanikus kötések közé tartozik. Azonban, mint mindennek, ennek a kötésformának is vannak előnyei és hátrányai. Bemutatásra kerülnek továbbá alkalmazási példák, a kötés létrehozásának folyamata, illetve a minőségbiztosítás lehetőségei.

2.1. Klincs kötés története

A klincs kötés története messzire nyúlik vissza. Az első ezzel kapcsolatos szabadalom 1897-ben íródott. Az Audi volt az első nagy ipari felhasználó, de később háztartási eszközök gyártása során is alkalmazták. Jelenleg használatos például az autóiparban, de a repülőgépiparban, és a háztartási gépeknél is. Egy konkrét példa az autóiipari felhasználásra a Mercedes Benz S-osztály karosszériája, ez a 13. ábrán látható.



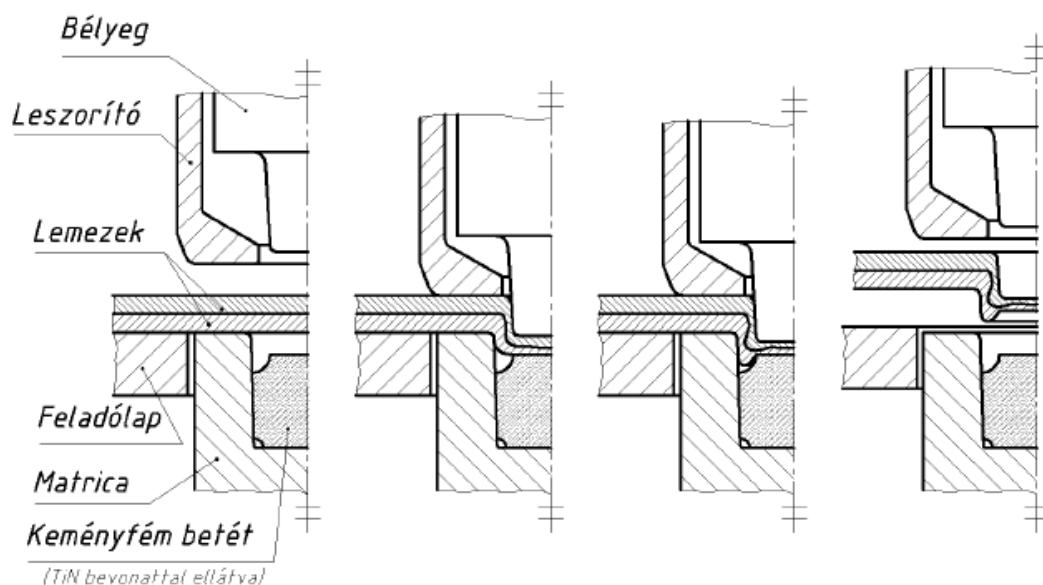
13. ábra: Klincs kötések egy Mercedes motorháztetején [23]

A fő oka a klincs kötés és a hasonló kötések (pl. vágószegecses kötés) térnyerésének, hogy a gyártóknál prioritást élvez a tömegcsökkentés. További ok lehet a gyártási folyamat esetleges egyszerűsödése, amely előnyös lehet pénzügyi szempontból is. Szempont még a gépiparban a kopásállóság (a túrések miatt), és az egyszerű cserélhetőség. Így maximalizálható a gyártási idő és minimalizálhatóak a költségek. [22]

2.2. A klincs kötés létrehozásának folyamata

A klincs kötés (amely a 14. ábrán látható) hívjuk sajtoló kötésnek is, ez a megnevezés a kötés létrehozásának folyamatát jól jellemzi. A mélyhúzáshoz hasonló módon kapcsoljuk össze az alkatrészeket. Klincs kötésnél két vagy több lemezt átlapolva egymásra helyezünk, majd képlékenyalakítással egyesítjük. A húzóművelet végén a bélyeg felütközik és kismértékben szétlapítja a fenékrészt, ezáltal oldhatatlan kötés jön létre a lemezek között. A lemezek keresztmetszetében „S” betűre hasonlító formát láthatunk, emiatt lesz oldhatatlan a kötés. Az „S” betű kialakításában segít a keményfém betét, amely két oldalán lekerekített rész található. Ez fontos mert a folyamat során oda is besajtoljuk a lemezeket. A matricába sajtoljuk be a bélyeg segítségével a lemezeket. A procedúra során szükség lehet ránc tartóra is, hogy a lemezek ne hullámosodjanak. [6][24]

Ennek az eljárásnak több változatával is találkozhatunk, de az egy lépésben történő körpontos klincselés a leggyakrabban alkalmazott fajta. Ennek a folyamata négy fázisból áll. Először a lemezeket benyomjuk a matricába, majd amikor az alsó rész eléri a matrica alját zömülés megy végbe, és az anyag radiális irányban megfolyik, ezt követően a matricaüreg „megtelik”, végül következhet a visszasajtolás. [24]



14. ábra: A klincs kötés létrehozásának folyamata [6]

2.3. Az eljárás előnyei és hátrányai

Mint mindennek, ennek az eljárásnak is megvannak az előnyei és a hátrányai. A klincselés a TOX kötéstechnológia néven is ismert innovatív kötőalakító eljárások közé tartozik. A megfelelő helyeken a gyártók a ponthegeztés kiváltására alkalmazzák ezt a technológiát, főképpen alumínium lemezek esetében. Rengeteg előny szól a klincs kötés mellett, ezek közül is kiemelkedik, hogy a környezetbarát technológiák közé sorolható. [24]

Az eljárás további előnyei:

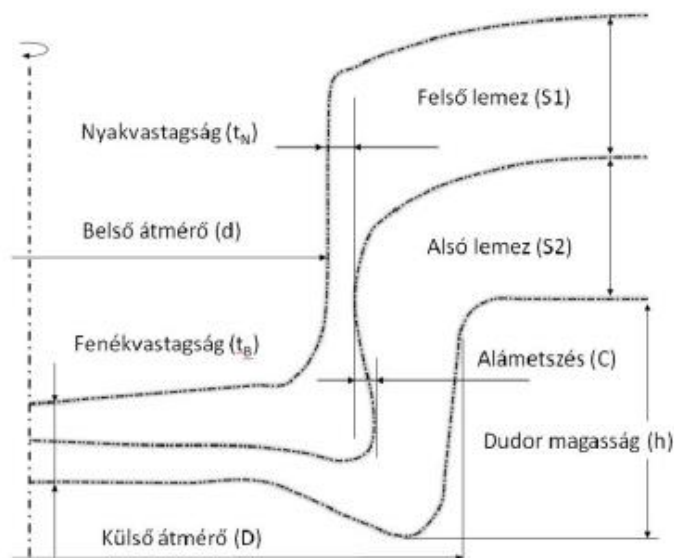
- „30 – 60%-os költségmegtakarítás a ponthegeztéshez képest;
- a TOX technológiával kialakított kötés közel 70 %-át eléri a pontkötéssel létrehozott kötés mechanikai tulajdonságainak;
- a TOX kötés dinamikus terheléssel szembeni ellenálló képessége nagyobb, mint az ellenállás hegeztéssel létrehozott kötéseké;
- az eljárás automatizálható, a folyamat kiválóan nyomon követhető, jól dokumentálható;
- egyszerű, roncsolás mentes minőség-ellenőrzés lehetséges;
- a kötés során semmilyen metallurgiai változás nem lép fel;
- a galvanizált, festett, illetve különböző felületvédő réteggel ellátott anyagok nem károsodnak, mert a réteg az anyaggal együtt alakváltozik;
- jó elektromos vezetőképesség;
- nincs magas hőmérséklet így például ragasztott kötéssel is párosítható;
- a lemezvastagság 0,1 mm és 12 mm között választható;
- közbenső rétegek is használhatók például papír, vagy ragasztó;
- mivel nincs szennyeződés, a kötés nem igényel utólagos megmunkálást;
- rendkívül környezetbarát eljárás;
- a lézeres hegeztésnél jóval olcsóbb” [24]

A klincs kötés hátrányai közé tartozik, hogy a mechanikai tulajdonságai gyengébbek, mint a ponthegeztésé. További hátrány, hogy törékeny lemezeknél a technológia nem alkalmazható, illetve hogy relatív nagy erőt igényel az alakítási folyamat. [24][25]

2.4. Klincs kötések minőségbiztosítása

A járműiparban nagyon fontos szerepe van a minőségbiztosításnak. Ha egy adott terméknek vagy gyártási folyamatnak nem tudjuk a minőségét megfelelő szinten tartani, az az üzleti partnerek, vagy végső soron a vásárlók és a profit elvesztéséhez vezet. Ebből következik, hogy minden termék és eljárás minőségbiztosítására jól bejáratott módszereket kell alkalmazni. Szakdolgozatom ezen része a klincs kötések minőségbiztosítását tárgyalja bővebben.

A kötés (amely a 15. ábrán látható) jóságának meghatározására több módszer is létezik. Ezek egy része roncsolásos vizsgálat, viszont ezek mellett léteznie kell olyan megoldásoknak is, amelyek a kötés jóságának becslésére alkalmasak, illetve képesek előírásoknak eleget tenni. Az eljárás során a nyomóerő-elmozdulás diagramok könnyen kinyerhetőek. [26]



15. ábra: Kötés keresztmetszete és főbb méretei [26]

2.4.1. Gyártás közbeni állapotfelügyelet

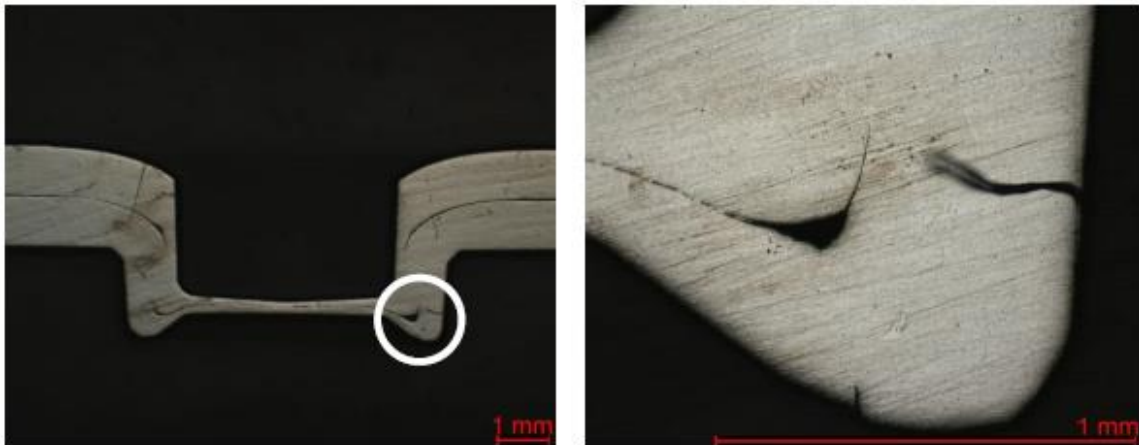
Tömeggyártás során nem lehetséges minden darabot, minden kötést külön-külön egyesével utólagosan vizsgálni. A gyártás közbeni felügyelettel azonban van lehetőség képet kapni minden kötés minőségéről, illetve a szerszám élettartamáról is. Ez esetben a művelet már korábban említett nyomóerő-elmozdulás diagramját vizsgáljuk. Sok esetben a gépek adott anyagpár és lemezvastagságpár esetére készülnek, így ismertek korábbi roncsolásos vizsgálatok paraméterei. Tudjuk, hogy milyen nyomóerő-elmozdulás értékekhez milyen fenékvastagság, alámetszés, nyakvastagság és dudor méretek tartoznak. Ezekből a korábbi roncsolásos vizsgálatokból ismerhetjük továbbá a statikus és a dinamikus szilárdságot. Ezek összességével meghatározható egy intervallum, ahol a kötés szilárdsága nem csökken a minimum határ alá, ugyanakkor nem szakad el az anyag és a szerszám sem károsodik. Azonban ügyelni kell rá, hogy a szerszám a gyártás során óhatatlanul is kopik, vagy akár meghibásodhat. Ezeket a változásokat a diagramokon is nyomon lehet követni, így, ahogy már korábban említettem, nyomon követhetjük a szerszám élettartamát. Ezzel a módszerrel a hibás anyagpár használata is felismerhető. [26]

2.4.2. Gyártás utáni vizsgálati lehetőségek

A legegyszerűbb a gyártás utáni vizsgálati lehetőségek közül a „GO – NO GO” nevű ellenőrzés. Az eljárás során a dudor méretét ellenőrizzük, ebből következtethetünk a kötés jóságára. Ehhez az ellenőrzéshez egy villás szerszámra van szükség, amely mindkét végén megfelelőséget kell kapnunk. A „GO” és a „NO GO” oldalon is az felel meg, ahol a dudor befér a szerszám villái közé.

A maradó fenékvastagság mérete is árulkodó a kötés minőségével kapcsolatban. A fenékvastagság mérete megmutatja, hogy milyen mértékben rugóztak vissza a kötésben résztvevő lemezek. Illetve lényeges, hogy az alámetszés, a fenékvastagság és a nyakvastagság között összefüggés van. Ezek közül a fenékvastagság mérhető roncsolás nélkül, így ellenőrizhető például végellenőrzéskor. Következtethetünk az értékéből a kötés szilárdságára.

A kötések ajánlott minden esetben szemrevételezni. A szemrevételezés gyakorlatilag kiegészíti az előzőleg bemutatott módszereket. Megfigyelhetünk repedéseket, aszimmetriát, vagy például nem megfelelő alakú dudort. Az eljárás során a bélyegoldali lemezen a benyomódás alakját érdemes figyelni. A matrica oldalán lévő lemezen szimmetrikusságot vizsgálunk. A repedések nem megengedhetőek. Megrepedt klincs kötésre láthatunk egy példát a 16. ábrán. [26]



16. ábra: Repedések a kötésben [26]

2.5. A klincs kötések fő korlátai

Ez a kötési technológia a lemezek képlékeny alakváltozásán alapul, így az adott anyag képlékeny alakíthatósága korlátozza az eljárást. A fémek alakíthatósága a hőmérséklet emelésével nő, emiatt fejlesztenek hővel támogatott klincs kötési eljárásokat. Az illesztési hőmérséklet növelése csökkenti az anyag folyáshatárát, így kevesebb illesztési erőre van szükség. A hőmérséklet növelésére használhatunk:

- Konvektív hőátadást (a felmelegedő részecskék tovább áramlásával zajlik)
- Induktív melegítés (elektromosan vezetőképes anyagoknál használható az elektromágneses indukció elvét kihasználva)
- Lángfűtés

A hosszan tartó hevítés növelheti a szemcseméretet és metallurgiai változásokat is okozhat. Emiatt megváltozhat az anyag mechanikai viselkedése a kötés helyén.

A forrás szerint az alakításhoz szükséges erő intervalluma: 5 – 50 kN. [27]

2.6. A technológia használata elektromos autók akkumulátoránál

Az elektromos járművek akkumulátora számos különálló cellából áll, amiket szerkezetileg összekötnek, és elektromosan összekapcsolnak. Ez az összekötési folyamat rengeteg kihívást rejt magában, mivel sokszor különböző vastagságú vagy nagy vezetőképességű anyagokkal kell dolgozni. Továbbá elvárt, hogy a kötés tartós legyen, illetve el kell kerülni a termikus, mechanikai, rezgési sérüléseket. Napjainkban az elektromos és plug-in hibrid járművek esetén a lítiumion-akkumulátor a favorit. Ezt a típust nagy energiasűrűség, alacsony önkisülés, jó hordozhatóság jellemzi. Ezeknek az akkumulátoroknak hierarchikusan három szintje van: cellaszint, modulszint, csomagszint. Cellaszinten egy egyedülálló celláról beszélünk. Modulszinten ezek a cellák sorosan vagy párhuzamosan kapcsolva vannak, és egy „szerkezetben” vannak elhelyezve. Csomagszinten sorosan vagy párhuzamosan kapcsolt modulok vannak vezérlőkkel és érzékelőkkel egy „ház szerkezetbe” szerelve. Az említett szerkezetek kialakítása során van szükség innovatív kötéstechnológiákra, mint például a klinics kötésre.

A legfőbb kihívásokat három pontba lehet szedni. Az első az elektromos és hőtani problémák. A túl nagy hő keletkezése az összekapcsolás során hátrányos lehet, mivel az megolvadást okozhat, ami például tönkreteheti a tömítést, vagy rövidzárlatot is okozhat. A második pont az anyag és metallurgiai kihívások. Fontos, hogy a lemezkötési eljárás képes legyen különböző tulajdonságú, vagy vastagságú anyagok összekapcsolására. Előfordulhat, hogy az akkumulátor szerkezetek esetében különböző törékenységgű vagy esetleg más elektromos ellenállással rendelkező anyagokat kell összekötni. Az elektromos ellenállással kapcsolatos probléma főként a hegesztési eljárások során jelenthet problémát. Le kell tudni küzdeni, hogy adott esetben több különböző vastagságú lap kerül összekapcsolásra. A harmadik kategória a mechanikai jellegű kihívások. Itt említhető a tartós kötészilárdság fontossága, illetve a mechanikai és

rezgési sérülések elkerülése az illesztés folyamata során. A tanulmányban klincs kötés mellett említve van például a ponthegeztés is. [28]

2.7. További alkalmazási területek

A korábbiakban szó esett már a klincs kötés autóiipari használatának lehetőségeiről, de most bemutatásra kerülnek további példák, más iparágakból is. Lemezek összekötésére számos területen van szükség, tehát nyilvánvaló, hogy nem csak a járművek gyártása során lehet hasznos ez a folyamat. Ezt támasztják alá a már előzőleg (2.3. bekezdésben) felsorolt előnyök is.

Más alkalmazási területek:

- Elektronikák és kiegészítő elemei: Fémházak vagy burkolatok, esetlegesen hűtőbordák összekapcsolásánál lehet jól hasznosítani a klincselés előnyeit. A hőkezelési tulajdonságok miatt lehet ideális választás.
- Bútorok és polcok: Bútorok és polcok fémkereteinél is használjuk ezt a technológiát a stabilitás és a tartósság biztosítása miatt. Ebben az esetben előnyös a kötés letisztult megjelenése is, hiszen így a termékek esztétikai vonzereje is fenntartható.
- Épületgépészet: Különböző hűtő, fűtő vagy légkondicionáló berendezéseknél, illetve csatornák illesztéseinél is találkozhatunk a klincs kötéssel. Biztonságos, és szivárgásmentes csatlakozásokat biztosít. [29]

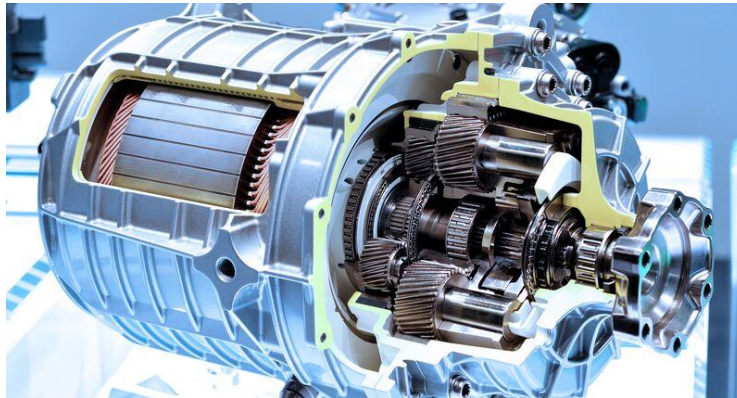
3. Klincs kötés szimulációja a Deform szoftverrel

A fejezetet a modellezéshez használt 5754-es alumínium bemutatásával kezdem, mivel fontosnak tartom bemutatni a választott alapanyag szerepét az autóiparban. Ezután bemutatásra kerül a végeselemes módszer, illetve a kísérlethez használt szoftver, a Deform is.

3.1. 5754 Alumínium szerepe az autóiparban

A DEFORM programban szimulált klincs kötésekhez az 5754 alumínium anyagot használtam. Ennek okait tárgyalja ez a fejezet.

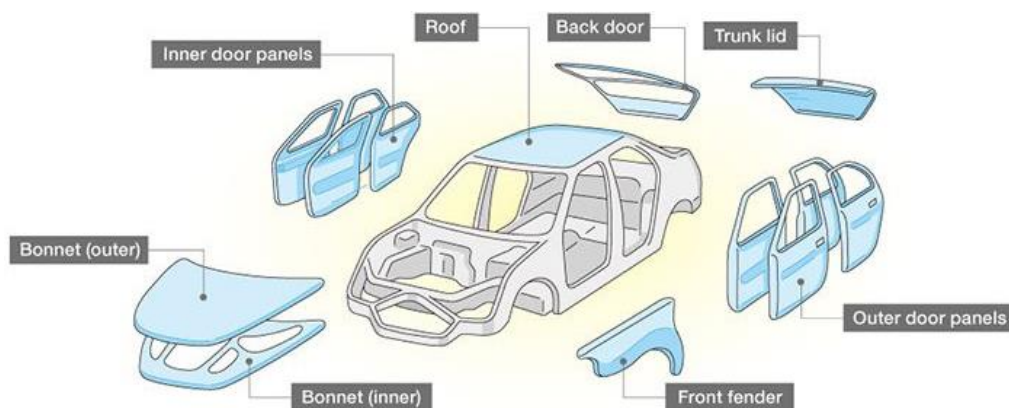
Az autógyártás nagy átalakuláson megy keresztül. A legújabb normákat csak úgy lehet teljesíteni, ha csökkentik az autók súlyát, vagy csökkentik a lökettérfogatot, ezáltal kevesebb káros anyag kerül a környezetbe. A lökettérfogat csökkentését egyre inkább felválthatja az elektromos hajtáslánccal felszerelt járművek gyártása. A tisztán elektromos járműveknél kevesebb fémre van szükség, mint a belső égésű motorral felszereltek esetén. Ez abból adódik, hogy ha a hagyományos hajtásláncot vizsgáljuk, a belső égésű motor rengeteg kisebb-nagyobb alkatrészből áll össze, és ezek javarészt fémes anyagokból készülnek. Az elektromos hajtáslánc akár 60%-kal kevesebb alkatrészt is tartalmazhat a hagyományoshoz képest, illetve a karbantartásuk is egyszerűbb. Az alumínium rendkívül fontos anyag az elektromobilitás kapcsán is, ugyanis az akkumulátorházak építésére gyakran használják. A másik módszer a károsanyag-emisszió csökkentésére a már sokszor emlegetett súlycsökkentés. Ennek eléréséhez használnak egyre több könnyűfémeket, főképp alumíniumot. Az elektromos hajtáslánc a 17. ábrán megfigyelhető. [30][31][32][33]



17. ábra: Elektromos hajtáslánc [34]

Korábban említésre került az akkumulátorház példaként az autóipar alumínium felhasználásra. A karosszéria az alumínium fő felhasználási területének számít, ezt a 18. ábrán is láthatjuk. További konkrét példák következnek, ahol az 5754 alumínium is felhasználásra kerül.

- Tető: Autók esetén mindig fontos volt a tető tömegének csökkentése, tehát egyúttal a súlypont csökkentése.
- Motor védőlemez: Ennek az alkatrésznek két funkciója is van, az első a motor védelme, a másik pedig az autó alatti áramlás javítása.
- Ajtó: Sok karosszéria elemhez hasonlóan az ajtók esetében is népszerű az alumínium használata. Itt alapvető elvárás az anyaggal szemben a fáradásállóság és a korrózióállóság.
- Üzemanyagtartály: 3003, 5052, és 5754 a leggyakrabban felhasznált alumínium lemezek hozzá. [31]



18. ábra: Néhány alumíniumból is készülő karosszéria elem [31]

Felmerülhet azonban a kérdés, hogy pontosan milyen tulajdonságokat várnak el a gyártók a könnyűfémektől. Fontos, hogy az anyag legyen képlékenyen alakítható, és könnyen megmunkálható legyen. Legyen továbbá hegeszthető, de az öntéshez is megfelelő tulajdonságokkal rendelkezzen, tehát például legyen kicsi a zsugorodása. Öntéssel tudnak a gyártók komplex geometriájú alkatrészeket létrehozni. Ezeknek a tulajdonságoknak az 5754 is megfelel. Alkalmas a hideg megmunkálásra is, az általam készített szimulációkban is ez a felhasználás történik. [30][31][35]

A járműiparban is használatos 5754 alumínium kémiai összetétele található meg az 1. táblázatban.

Szilikon	Vas	Réz	Mangán	Magnézium	Króm	Cink	Titán
0.4%	0.4%	0.1%	0.5%	2.6%-3.6%	0.3%	0.2%	0.15%

1. táblázat: 5754 alumíniumlemez specifikációi [35]

A táblázatból is látszik, hogy a magnézium a fő ötvöző elem. Ezt az anyagot alacsony olvadáspont és alacsony sűrűség mellett magas kémiai reakcióképesség jellemzi. Levegővel kapcsolatba lépve magnézium-oxidot képez, amely gátolja a fém korrózióját. Az alacsony sűrűségéből következik, hogy kicsi a tömege, tehát a könnyűfémek közé sorolható. Könnyű és erős ötvözetekben alkalmazzák főképp alumíniummal. [36]

3.2. A végeelem-módszerről általánosságban

Az utóbbi évtizedekben látványosan terjed egy nagy hatékonyságú számítástechnikai módszer, a végeelem-módszer (VEM). A módszer alkalmas mérnöki problémák költséghatékony, és időhatékony megoldására. Elterjedését segíti a számítógépek kapacitásának és sebességének növekedése. Alkalmazható például komplex mechanikai számítások elvégzésére, vagy a villamosmérnöki gyakorlatban mezőszimuláció során. A VEM hatékony módszer, viszont a mérnököknek muszáj a mechanikai ismeretekre alapozva helyesen értékelni a kapott eredményeket. A modellezés során sok tényezőt kell mérlegelni: a környezeti hatást, a testek kölcsönhatását, az anyag szerkezetét, a kialakuló alakváltozást, elmozdulást, a geometriai alakot vagy például a megfogásokat.

A végeselemes analízist három szakaszra szokták bontani: előkészítés (pre-process), megoldás (process), kiértékelés (post-process). Ezeket megelőzi egy döntési szakasz, ahol már mérlegelnünk kell például:

- a fizikai probléma jellegét (mechanikai, hőtani, elektromágneses),
- az alkalmazott modell típusát (3D-s vagy egyszerűsített 2D-s modell),
- a szimmetria feltételek alkalmazhatóságát
- hálósűrűséget
- peremfeltételeket (alkatrészek kiváltása kényszerekkel)

A pre-processing során végezzük el a számítások előkészítését, tehát a geometriai modell felépítését, a peremfeltételek megadását, és a végeselemes háló generálását. A geometriai modelleket egyszerűbb esetben megalkothatjuk a VEM szoftverben is, én is ezt a módszert alkalmazom majd a feladatom során. Lehetőség van azonban CAD (computer-aided design) program alkalmazására is a modell létrehozásához, amelyet ezután importálunk be a VEM szoftverbe. Illetve a nagyon egyszerű problémákat sokszor már magában a CAD szoftverben is lehetőségünk van analízálni, én is találkoztam ilyen esettel az eddigi gyakornoki munkáim során. A háló generálása során a geometriai testet véges számú elemre bontjuk. Ahol az eredmény kritikus lehet a megoldás szempontjából, ott érdemes növelni a háló sűrűségét, tehát csökkenteni a hálóelemek méretét, ezáltal pontosabb eredményt kaphatunk. A peremfeltételeket tekintve beszélhetünk definiált kényszerekről (pl. megtámasztás, elmozdulás kényszer) vagy más alkatrészekkel való érintkezésről (kontaktokról). Mechanikai oldalról szóba jöhet például elmozdulás, elfordulás, sebesség kényszer vagy fix megtámasztás is.

A process (megoldás) gyakorlatilag a tényleges végeselemes számítások elvégzését jelenti. Ez a szakasz marad leginkább rejtve a felhasználó elől. A szoftver ilyenkor létrehozza a transzformációs mátrixot, majd a csomóponti terhelések és peremfeltételek felvétele után megoldja az egyenletrendszer. A kapott elmozdulás mezőből számol a program alakváltozást és mechanikai feszültséget.

A post-processing alatt az eredmények megtekintését és kiértékelését értjük. Összevethetjük a kapott eredményeket a várt eredményekkel. A modern szoftverekben

sok lehetőségünk van az eredmények szemléltetésére. A testen színsávokat vagy vektor mezőt ábrázolhatunk, de lehetőségünk van például az alakváltozást megtekinteni animációsan lépésről lépésre, illetve diagramok előállítására is. [37][38][39]

Mint már korábban is említésre került, nélkülözhetetlen az eredmények megfelelő értelmezése. A helyes kiértékelést segíti a 2. táblázat.

Analízis típus	Elsődleges adat	Származtatott adatok
Szerkezeti	Elmozdulás	Feszültség, fajlagos nyúlás, reakcióerő
Termikus	Hőmérséklet	Hőáram, hőmérsékleti gradiens
Mágneses	Mágneses potenciál	Mágneses fluxus, áramsűrűség
Elektromos	Elektromos potenciál	Elektromos térerősség, indukció
Folyadék	Sebesség, nyomás	Nyomásgradiens, hő fluxus

2. táblázat: Néhány analízis típushoz tartozó elsődleges és másodlagos mennyiségek [39]

Az elsődlegesen kiszámolt mennyiségek az egyes csomópontok szabadságfokainak megoldása. A csomópontok az elemek találkozási pontjai. A származtatott mennyiségek az elsődlegesen kiszámolt mennyiségekből kerülnek kiszámításra. [39]

3.3. Deform szoftver bemutatása

A DEFORM szoftver mérnöki alkalmazásra készült. Lehetővé teszi a tervezők számára, hogy a fémalakítási, hőkezelési, megmunkálási és mechanikai illesztési folyamatokat számítógép segítségével tesztelhessék, ezzel rövidítve az egyébként hosszadalmas és költséges műhelyben történő „trial and error” kísérletezést. A program kutatási és ipari alkalmazásban is hatékonnak bizonyult. [40]

A DEFORM 2D egy végelelem módszeren alapuló folyamatszimulációs rendszer, amelyet a kétdimenziós viselkedés elemzésére terveztek. Használható összetett fémalakítási folyamatokban. Fontos információkat nyújt az anyag és hőáramlásról amely az alakítási folyamat során végbemegy. Képes több deformálódó objektum komplex kölcsönhatásainak elemzésére akár különböző anyagtulajdonságok mellett is.

Optimalizált hálórendszer létrehozására is van lehetőség, amely ott „finomabb” ahol nagyobb pontosságra van szükségünk, így lerövidítve a számítási időt. Az eredmények vizsgálata könnyen elvégezhető. Egyedi műveleteket akár folyamatsorozatokká is kombinálhatunk, amelyeket később egyenként, vagy folytatólagosan is futtathatunk.

[41]

A DEFORM 3D segítségével háromdimenzióban végbemenő alakítási eljárásokat modellezhetünk. Ez a szoftver hatékony eszköz az anyagáramlás és a hőátadás előrejelzésére amely a modellezett folyamat közben végbe megy. Optimalizált, de testreszabható hálót hozhatunk létre a program segítségével. A program tipikus alkalmazási köre a meleg- és hidegalakítás, fogazás, hengerlés, húzás, extrudálás, hevítés és mechanikai összeillesztés. Ebből is látható, hogy a DEFORM megfelelő szoftver lesz a klincs kötések vizsgálatához. A gyártási műveletek modellezésével sok időt és költséget lehet megspórolni. A program felülete a leírás szerint intuitív és könnyen megtanulható. **[42]**

4. A végeselemes modell vizsgálata

Ebben a fejezetben a technológia alaposabb megismerése érdekében a klincselés modellezését is bemutatom az 1 mm vastagságú lemezpáron. A kísérletezés során a fő célom az, hogy képet kapjak róla, hogy ezzel a kötés technológiával hány milliméter vastagságú lemezpárt lehet megfelelő minőségben összekapcsolni. Geometriai vizsgálattal fogom meghatározni, hogy mi lehet a maximális elérhető lemezvastagság.

4.1. 1 mm vastagságú lemezpár szimulációja

A modellezés során első lépésként a geometriát hozom létre. Mivel a Deform 2D használatával készül a szimuláció, ezért elég a pontok koordinátáit megadni a geometria felépítéséhez. A koordináták az 1-1 mm vastagságú lemezpár esetén rendelkezésemre állnak. Vastagabb lemezek esetére Excel használatával kiszámoltam az oldalhosszakat, majd ezek, és a már meglévő koordináták segítségével megkaptam a megfelelő pontokat a nagyobb geometriákhoz. A 19. ábrán látható az Excel egy részlete.

1 mm - 1 mm					2 mm - 2 mm			
pont	x	y	R		pont	x	y	R
1.	15,00	79,00	-		1.	30,00	79,00	-
2.	3,10	79,00	0,25		2.	6,20	79,00	0,50
3.	3,00	76,80	-		3.	6,00	74,60	-
4.	1,90	77,74	0,25		4.	3,80	76,48	0,50
5.	0,00	77,70	-		5.	0,00	76,40	-
6.	0,00	74,00	-		6.	0,00	69,00	-
7.	15,00	74,00	-		7.	30,00	69,00	-
8.	15,00	79,00	-		8.	30,00	79,00	-
					Y nominál:		79,00	

Oldalhossz [mm]	
1;8 - 7 (y)	5,00
2 - 3 (y)	2,20
4 - 3 (y)	0,94
4 - 5 (y)	0,04
5 - 6 (y)	3,70
1;8 - 2 (x)	11,90
2 - 3 (x)	0,10
3 - 4 (x)	1,10
4 - 5 (x)	1,90
7 - 6 (x)	15,00

19. ábra: 1 mm és 2 mm-es lemezvastagsághoz tartozó matrica koordinátái

Ezen vizsgálat alkalmával az a tervem, hogy az alábbi tényezőket arányosan növelem a lemezpár méretének növekedésével:

- bélyeg mérete
- matrica mérete
- ráncgátló mérete
- ráncgátló erő

Nem tervezem változtatni:

- súrlódás mértéke a kapcsolódó felületek között

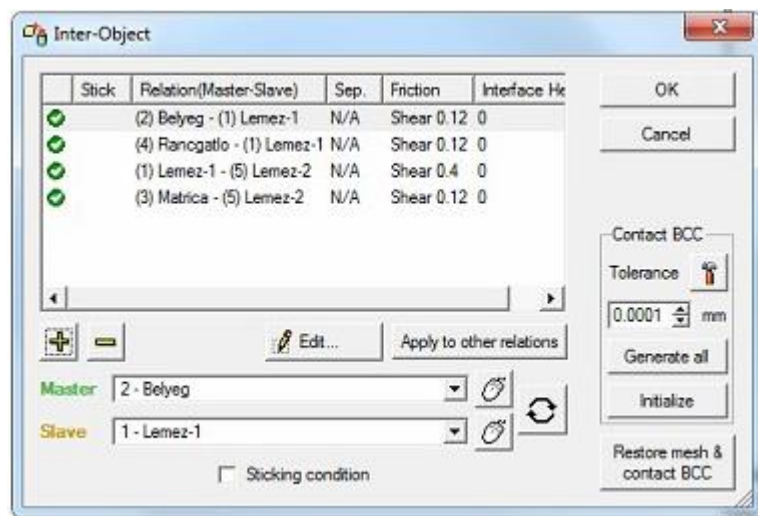
Változhat, de nem arányosan:

- hálózás sűrűsége
- lépések száma, ezáltal a bélyeg lépésenkénti mozgásának mértéke

A hálózás sűrűségének változására azért kerülhet sor, mert a számolási időt növeli, és a nagyobb méreteknél ez szükségtelenül időigényessé teheti a szimulációt. Továbbá legjobb tudomásom szerint, ha megfelelő elem van a lemezen a vastagság irányban, akkor az eredmény már kellő pontosságú lesz. A lépések száma és a bélyeg mozgásának mértéke szintén befolyásolja a szimuláció időtartamát. A lépések száma nem következetesen növekszik vagy csökken a geometriához viszonyítva, ezért az erő – elmozdulás diagram vizsgálatára kerül majd sor, nem pedig erő – lépésszám diagramra, mivel így nem lehetne megfelelően összehasonlítani egymással a különböző szimulációs futásokat.

A geometria létrehozása után hálót rakok a két lemezre, hogy a szoftver tudjon számolni a deformációjukkal. A háló jelen esetben 2500 kis darabból fog állni lemezenként, ami ennél a vastagságnál nagyon részletesnek mondható. A matrica, a ráncgátló, és a bélyeg „rigid”, tehát merev elemként jelennek meg. Ez azt jelenti, hogy a szimuláció során ők nem lesznek képesek deformációra, csak a két lemez. A különböző elemeket az „Object positioning” beállításánál a „drag” funcióval szét tudjuk húzni

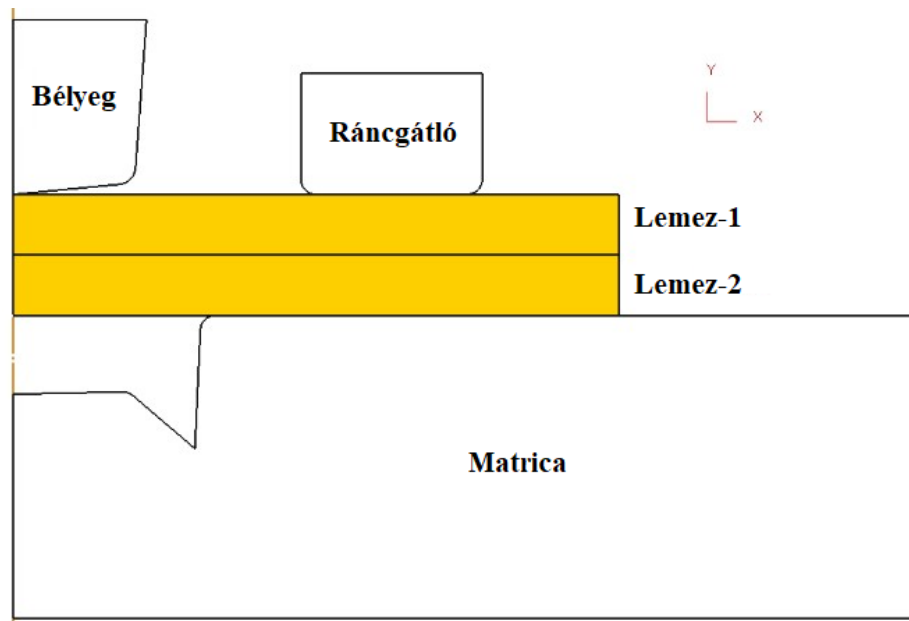
egymástól. Ennek az az értelme, hogy bizonyos esetekben azt hihetnénk hogy a kontaktus már fennáll az elemek között, mivel látszólag érintkeznek. Azonban ezt akkor tudjuk bebiztosítani, ha ezek után az „interference” opcióval egymásra ejtjük a darabokat. Ilyenkor a szoftver úgy helyezi el őket, hogy azok pont érintkezzenek. Miután ez is megtörtént fontos meggyőződni róla, hogy a Deform felismerte a kialakuló kapcsolatokat. Ezt a 20. ábrán is látható „Inter-Object” beállítási opciónál tehetjük meg.



20. ábra: Inter-Object beállítás, kapcsolódási pontok

Itt állíthatjuk be, hogy az egyes érintkezéseknél melyik test vagy felület legyen a „master” és melyik a slave”. Ennél az a lényeg, hogy előbbi alakítja utóbbit, tehát a master mindig a merev test lesz, tehát a matrica, a belyeg és a ráncgatló. Ezek a merev testek nem érintkeznek egymással, hanem a deformálható lemezeket alakítják. Van kapcsolat a fenti lemez, tehát „Lemez-1” és a lenti lemez, tehát „Lemez-2” között is. Ebben az esetben a fenti lemezt választottam elsődleges testként. Továbbá ennél az ablaknál jelenik meg a súrlódás beállítása, ez nálam a két alumínium lemez érintkezésénél 0,4 lesz, a többi esetben 0,12. Ha ezeket beállítottuk rá kell menni a kis kalapács ikonra, ott generál a szoftver egy tűrést.

Nem esett még szó a „Simulation controls” beállítási lehetőségekről. Itt állíthatjuk be a lépések számát, a bélyeg mozgásának mértékét, az újrarahálózás gyakoriságát, vagy akár olyan kritériumokat is megadhatunk, amik teljesülése esetén azt szeretnénk, hogy a számolást a Deform állítsa meg.



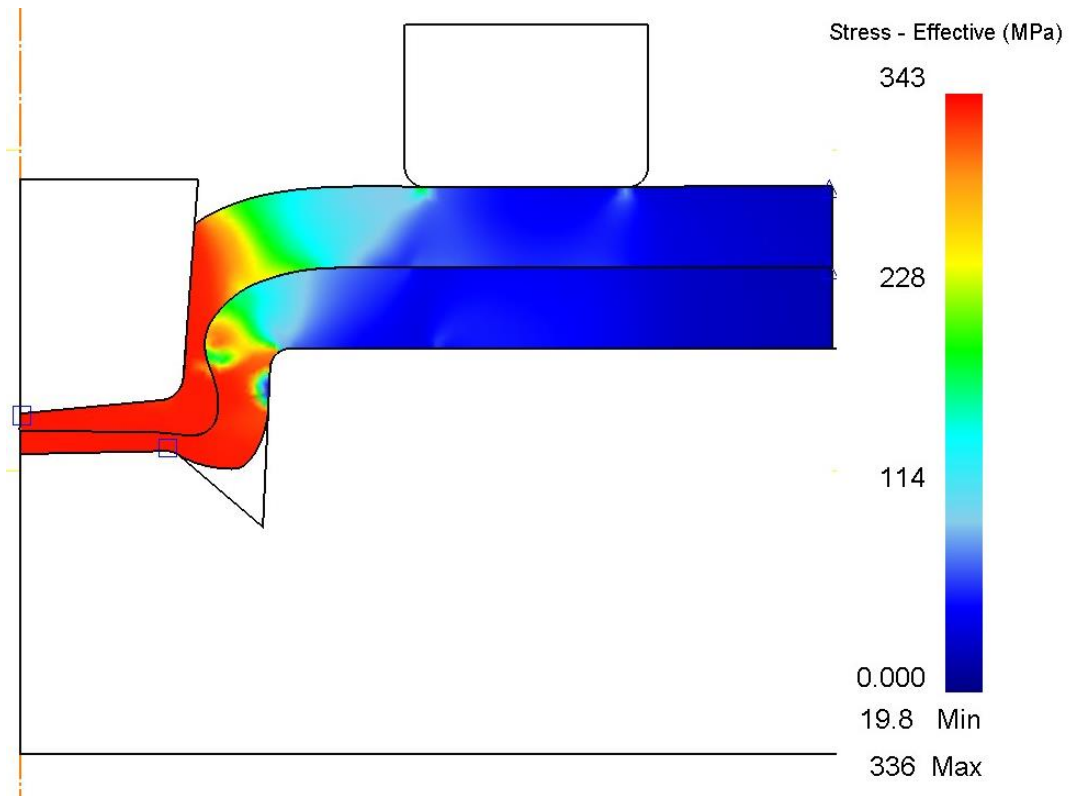
21 .ábra: A klincselési modell geometriája

A 21. ábrán látható a modell geometriája. Az itt elhelyezett koordináta rendszer szerinti Y irányba fog mozogni a bélyeg, míg a matrica helyzete változatlan marad. A ráncgátló ennek megfelelően Y irányba tart ellen a lemezek esetleges elemelkedésének. A ráncgátló konstans erőt fejt ki -Y irányba, 1 mm-es lemezpár esetén 6000 N értékben. A korábban említett erő – elmozdulás diagramon majd a bélyeg Y irányú ereje lesz vizsgálva, abból kiderül, hogy mekkora erőre van szükség a kötés létrehozásához.

Összefoglalás az adatokról 1-1 mm-es lemezpár esetén:

- Lemezek anyaga: Al5754
- Háló elemszám egy lemezen: 2500
- Lemezek vastagsága: 1 mm (összesen 2 mm)
- Ráncgátló erő: 6000 N
- Súrlódási tényező az alumínium lemezek között 0,4; máshol 0,12

Az első szimuláció eredménye a 22. ábrán látható, ezen látszik a feszültség eloszlás is.



22. ábra: 1 mm-es lemezpár esetén az alakítás utáni feszültség eloszlás

Magát a kötést jelentő „S” forma létrejött, a kívánt fenékvastagságot is elérték a lemezek anélkül, hogy károsodtak volna. Ezt a modellt sikeresnek tekinthetjük. Az alakváltozás utáni méretek is összehasonlításra kerülnek majd a különböző geometriájú szimulációk között. Ebben segít korábbról a 15. ábra is, ahol jelölve vannak a jellegzetes méretek.

Alakváltozás utáni méretek:

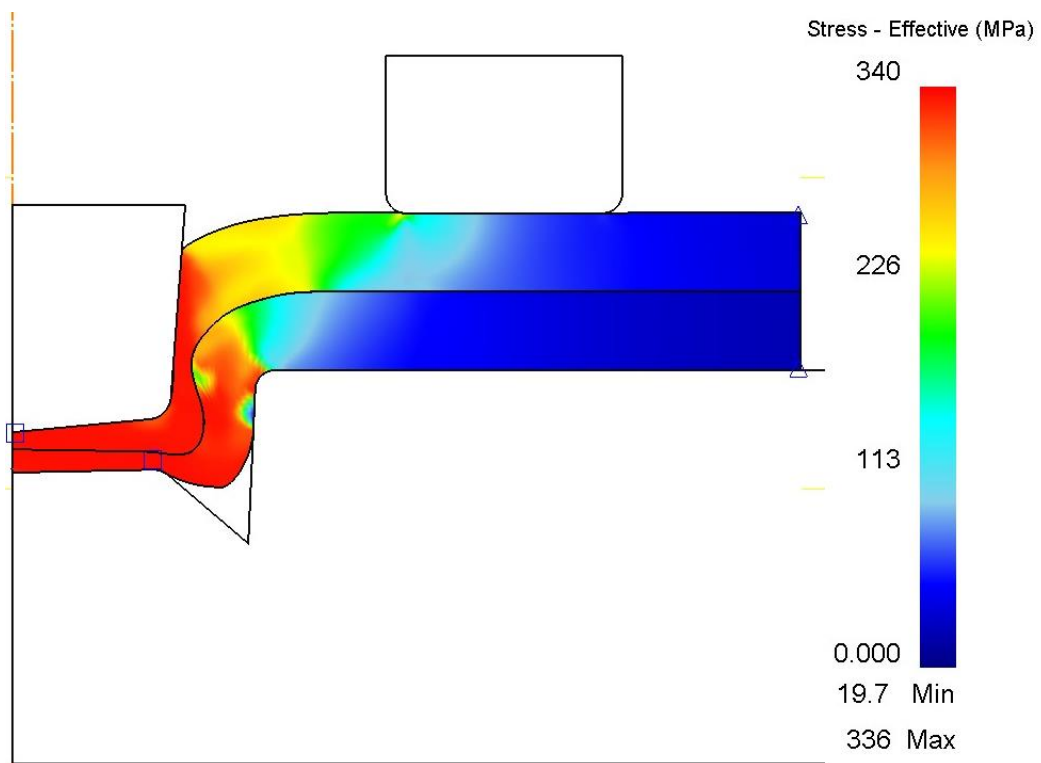
- Fenékvastagság: 0,5 mm
- Nyakvastagság₁: 0,23 mm
- Nyakvastagság₂: 0,62 mm
- Alávágási mélység: 0,2 mm

4.2. 2 mm vastagságú lemezpár szimulációja

Összefoglalás az adatokról 2-2 mm-es lemezpár esetén:

- Lemezek anyaga: Al5754
- Háló elemszám egy lemezen: 3000
- Lemezek vastagsága: 2 mm (összesen 4 mm)
- Ráncgátló erő: 12000 N

A szimuláció feszültség eloszlását szemléltető 23. ábrán is jól látszik, hogy az „S” forma itt is létrejött. Az alakváltozás a lemezek károsodása nélkül jött létre, tehát a modellt sikeresnek tekinthetjük.



23. ábra: 2 mm-es lemezpár esetén az alakítás utáni feszültség eloszlás

Alakváltozás utáni méretek:

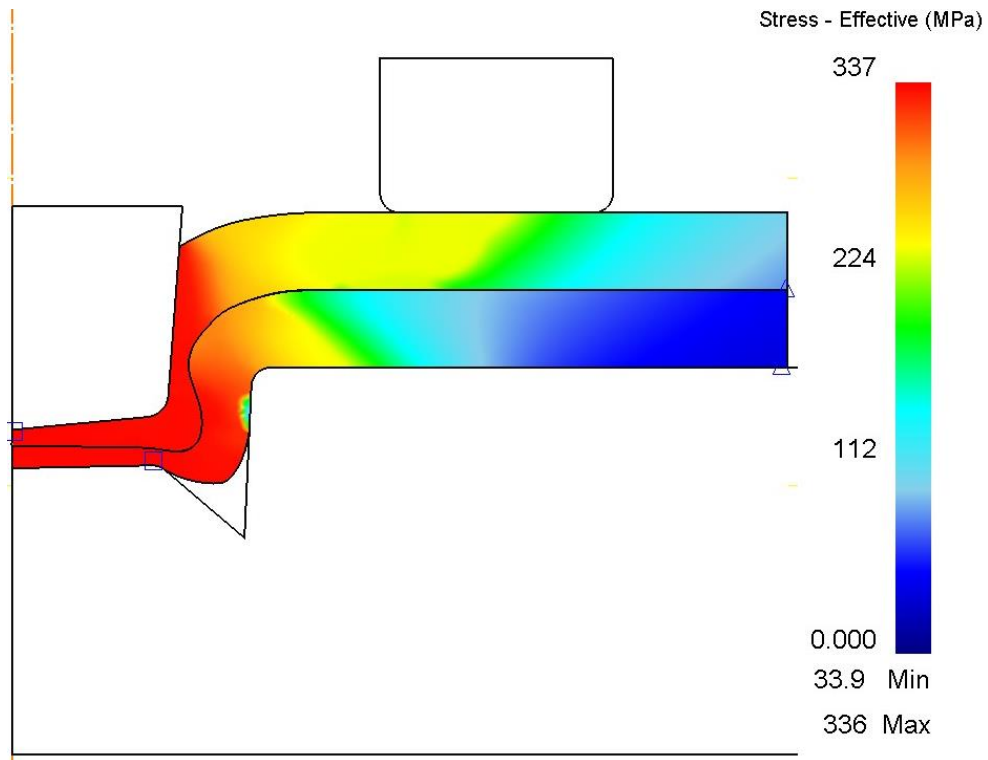
- Fenékvastagság: 1 mm
- Nyakvastagság₁: 0,46 mm
- Nyakvastagság₂: 1,26 mm
- Alávágási mélység: 0,35 mm

4.3. 4 mm vastagságú lemezpár szimulációja

Összefoglalás az adatokról 4-4 mm-es lemezpár esetén:

- Lemezek anyaga: Al5754
- Háló elemszám egy lemezen: 3500
- Lemezek vastagsága: 4 mm (összesen 8 mm)
- Ráncgátló erő: 24000 N

Az „S” forma a lemezek károsodása nélkül létrejött, tehát a modellt sikeresnek tekinthetjük. A feszültség eloszlás a 24. ábrán látható.



24. ábra: 4 mm-es lemezpár esetén az alakítás utáni feszültség eloszlás

Alakváltozás utáni méretek:

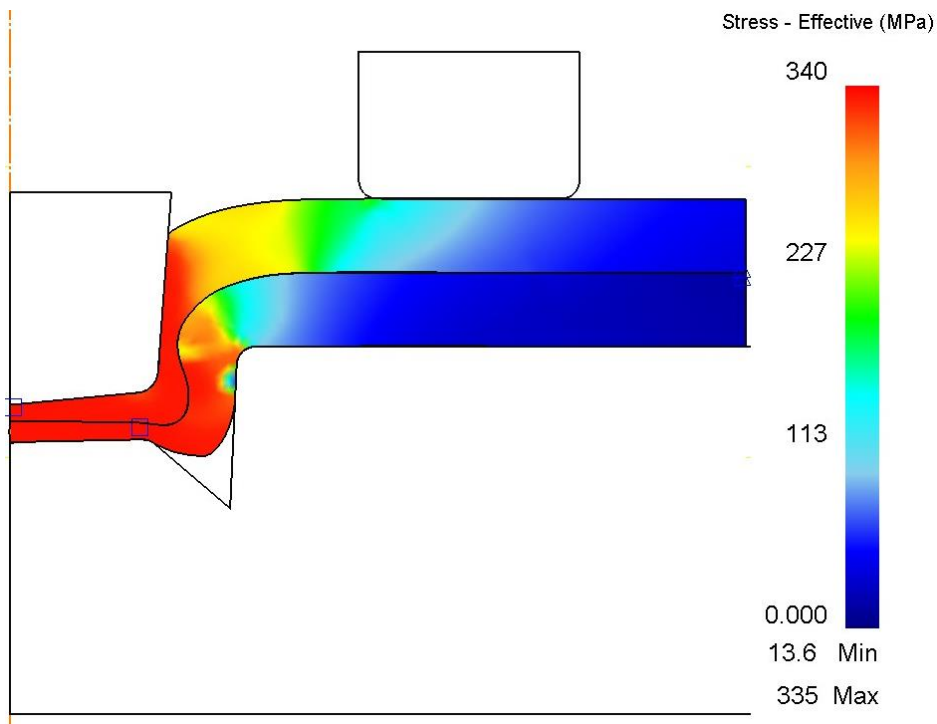
- Fenékvastagság: 2 mm
- Nyakvastagság₁: 0,92 mm
- Nyakvastagság₂: 2,46 mm
- Alávágási mélység: 0,7 mm

4.4. 8 mm vastagságú lemezpár szimulációja

Összefoglalás az adatokról 8-8 mm-es lemezpár esetén:

- Lemezek anyaga: Al5754
- Háló elemszám egy lemezen: 1000
- Lemezek vastagsága: 8 mm (összesen 16 mm)
- Ráncgátló erő: 48000 N

Az „S” alak jelen esetben is létrejött a lemezek károsodása nélkül. A ráncgátló erő geometriával arányos növelése is sikeresnek bizonyul, ugyanis a lemezek alakítás közben nem emelkedtek el, de károsodást sem szenvednek. A modellt sikeresnek tekinthetjük, a feszültség eloszlás a 25. ábrán látható.



25. ábra: 8 mm-es lemezpár esetén az alakítás utáni feszültség eloszlás

Alakváltozás utáni méretek:

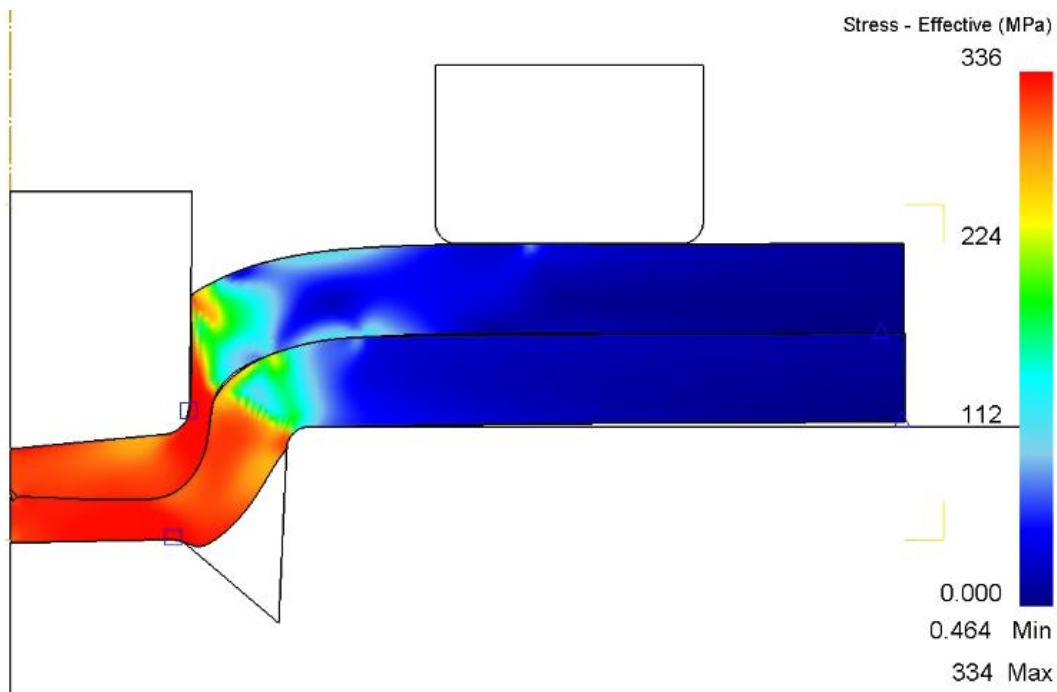
- Fenékvastagság: 4 mm
- Nyakvastagság₁: 1,9 mm
- Nyakvastagság₂: 5 mm
- Alávágási mélység: 1,4 mm

4.5. 12 mm vastagságú lemezpár szimulációja

Összefoglalás az adatokról 12-12 mm-es lemezpár esetén (1. próba):

- Lemezek anyaga: Al5754
- Hálósám egy lemezen: 3000
- Lemezek vastagsága: 12 mm (összesen 24 mm)
- Ráncgátló erő: 72000 N

Az első próbálkozás nem sikerült, a 26. ábrán is látható, hogy az „S” forma nem alakul ki. Ennek oka, hogy nem is futott végig a szimuláció. 12,2 mm vastagságúak a lemezek az utolsó lépésnél, ott ahol a fenékvastagságot kellene mérni. További probléma, hogy a ráncgátló erő sem volt elég, ugyanis a lemezek elemelkedtek.



26. ábra: 12 mm-es lemezpár esetén feszültség eloszlás az utolsó lépésnél (sikertelen próbálkozás)

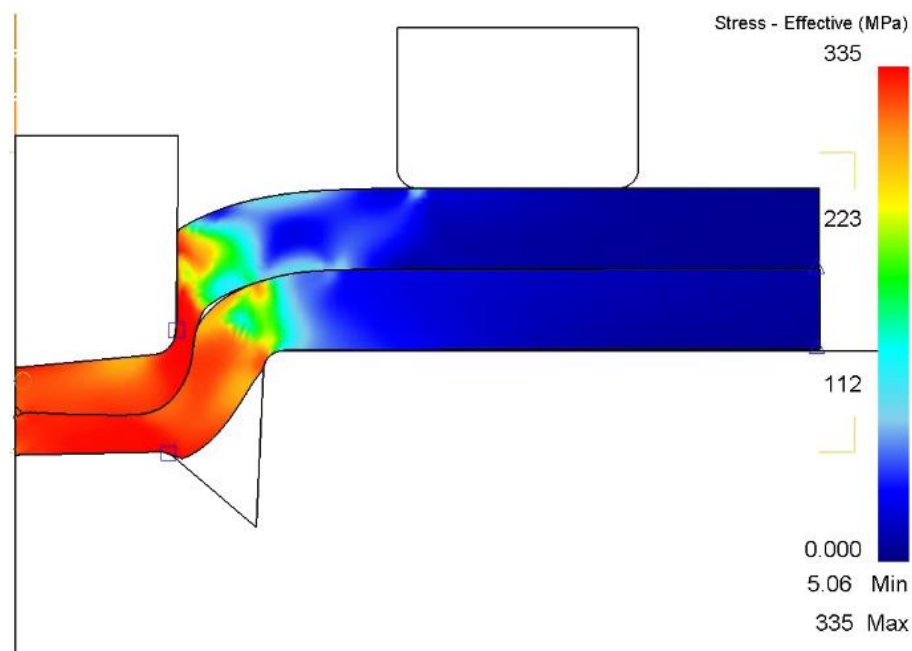
Alakváltozás utáni méretek:

- Fenékvastagság: 12,2 mm (de nem futott végig a szimuláció)
- Nyakvastagság₁: nem értelmezhető
- Nyakvastagság₂: nem értelmezhető
- Alávágási mélység: nem értelmezhető

Összefoglalás az adatokról 12-12 *mm*-es lemezpár esetén (2.próba):

- Lemezek anyaga: Al5754
- Hálósám egy lemezen: 2000
- Lemezek vastagsága: 12 *mm* (összesen 24 *mm*)
- Ráncgátló erő: 100000 *N*

A 27. ábrán látható, hogy a második próbálkozás sem volt sikeres. A ráncgátló erő növelésének van eredménye, ugyanis most nem emelkedtek el a lemezek sem egymástól a ráncgátló vonalában, sem a matricától. Azonban a szimuláció ezúttal sem futott végig, lehetséges, hogy túl nagy alakváltozás következik be, amivel már nem bír a szoftver. A fenékvastagságnál most 13 *mm* vastagságot lehet mérni az utolsó lépésnél. Nem alakult ki „S” forma.



27. ábra: 12 *mm*-es lemezpár estén feszültség eloszlás az utolsó lépésnél (sikertelen próbálkozás)

Alakváltozás utáni méretek:

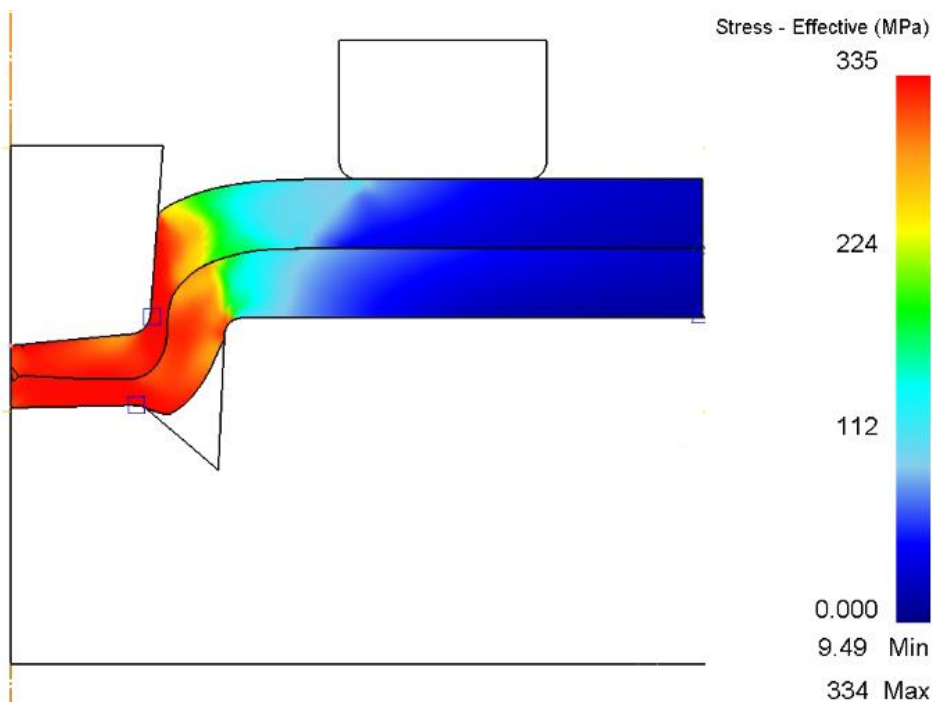
- Fenékvastagság: 13 *mm* (de nem futott végig a szimuláció)
- Nyakvastagság₁: nem értelmezhető
- Nyakvastagság₂: nem értelmezhető
- Alávágási mélység: nem értelmezhető

4.6. 10 mm vastagságú lemezpár szimulációja

Összefoglalás az adatokról 10-10 mm-es lemezpár esetén

- Lemezek anyaga: Al5754
- Hálósám egy lemezen: 1500
- Lemezek vastagsága: 10 mm (összesen 20 mm)
- Ráncgátló erő: 60000 N

A 28. ábrán tekinthetjük meg az eredményt. A szimuláció nem sikeres, az elvárt forma nem alakul ki. Ez a szimuláció sem futott végig probléma mentesen, a fenékvastagság 8,8 mm az elvárt 5 mm körüli érték helyett. A ráncgátló erő megfelelő volt.



28. ábra: 10 mm-es lemezpár estén kialakuló feszültség eloszlás (sikertelen próbálkozás)

Alakváltozás utáni méretek:

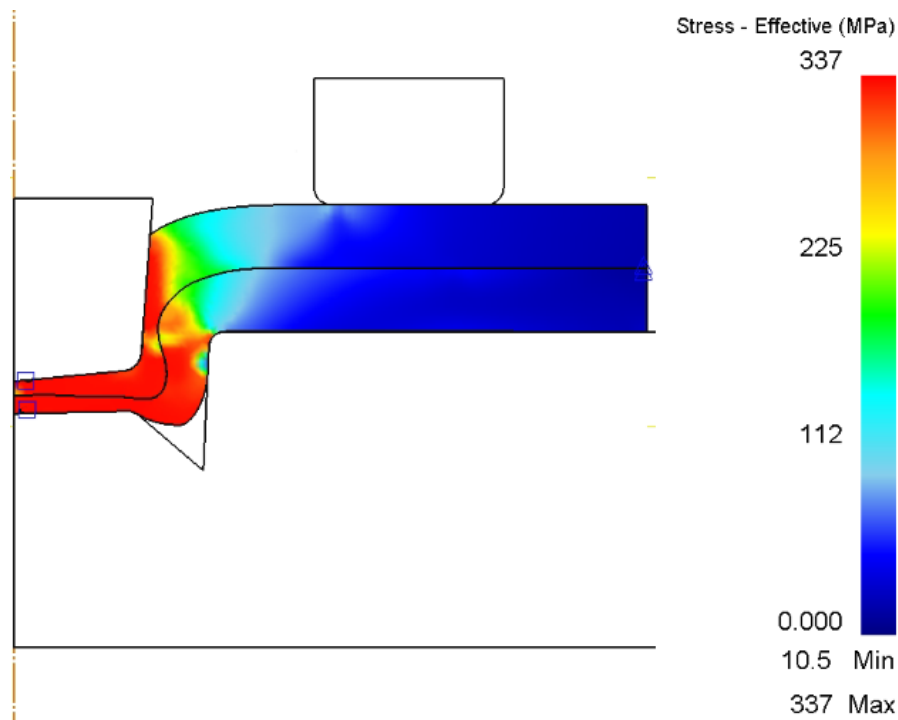
- Fenékvastagság: 8,8 mm (de nem futott végig problémamentesen a szimuláció)
- Nyakvastagság₁: nem értelmezhető
- Nyakvastagság₂: nem értelmezhető
- Alávágási mélység: nem értelmezhető

4.7. 9 mm vastagságú lemezpár szimulációja

Összefoglalás az adatokról 9-9 mm-es lemezpár esetén

- Lemezek anyaga: Al5754
- Hálósám egy lemezen: 1000
- Lemezek vastagsága: 9 mm (összesen 18 mm)
- Ráncgátló erő: 54000 N

A szimuláció ezúttal végig futott, és látszólag sikeresnek is tűnhet, de a geometriai adatokat vizsgálva látható lesz, hogy ennél a méretnél már nem arányos az eddigiekhez képest a kialakult „S” forma. Erről bővebb információt tartalmaz a következő alfejezet.



29. ábra: 9 mm-es lemezpár estén kialakuló feszültség eloszlás

Alakváltozás utáni méretek:

- Fenékvastagság: 4,6 mm
- Nyakvastagság₁: 2,1 mm
- Nyakvastagság₂: 5,84 mm
- Alávágási mélység: 1,19 mm

4.8. Alakváltozás utáni méretek összehasonlítása

-	1 – 1 mm	2 – 2 mm	4 – 4 mm	8 – 8 mm	9 – 9 mm
Fenekvastagság [mm]	0,5	1	2	4	4,6
Nyakvastagság ₁ [mm]	0,23	0,46	0,92	1,9	2,1
Nyakvastagság ₂ [mm]	0,62	1,26	2,46	5	5,84
Alávágási mélység [mm]	0,2	0,35	0,7	1,4	1,19

3. táblázat: Alakváltozás utáni méretek összefoglalása

A 3. táblázatban összefoglalt eredményekből látható, hogy a fenékvastagság a mérettel arányosan növekedett. Ez cél is volt a kísérlet során, tehát ebben nincs meglepetés. Szintén kiolvasható a táblázatból, hogy a nyakvastagság₁, a nyakvastagság₂ és az alávágási mélység is arányosan változott. A legtöbb eredmény pontosan kétszerese az előző méretnek, mivel 1,2,4 és 8 mm esetén is kétszeresére növekedik a geometria (bélyeg, matrica, ráncgátló, lemezek) az előzőhöz képest.

Ez a konklúzió sem meglepetés. A „Gyártás utáni vizsgálati lehetőségek” címet viselő fejezetben volt róla szó, hogy az alámetszés, a fenékvastagság és a nyakvastagság között összefüggés van. Mivel a fenékvastagság mérhető roncsolás nélkül, ezért annak vastagsága könnyen ellenőrizhető végellenőrzéskor, és a szilárdásgra vonatkozó következtetéseket lehet levonni belőle. [26]

Azonban nem véletlenül nem lett eddig megemlítve a 9 mm-es lemezpár. A nyakvastagság₂, tehát a lenti lemez nyakvastagsága az eddigiekhez viszonyítva kiugróan eltér az arányos változástól. Itt 5,58 mm körüli értéknek kellene lennie, ehelyett 5,84 mm mérhető. Ebből következik, hogy az alávágási (vagy alámetszési) mélység értéke sem kielégítő. Nem elég, hogy nem arányos a változása ennek a méretnek, de még jóval

kisebb is, mint a 8 *mm*-es lemezpárnál. Ez problémás, mert így a kialakult kötés minden bizonnyal kevesebb erőhatásnak tud ellenállni. Mivel az eddigi kritériumok alapján ez az első eset, ahol a geometria „felborult”, így úgy gondolom, hogy az általam alkalmazott feltételek és anyagminőség mellett két darab 8 *mm* vastagságú lemezpár kapcsolható megfelelően össze klincs kötés segítségével. Ez tehát összesen 16 *mm* teljes lemezvastagságot jelent. Korábban, az irodalomkutatás során több forrásból is azt találtam, hogy 12 *mm* a maximális lemezvastagság. Természetesen ahhoz, hogy teljes bizonyossággal kijelenthető legyen, hogy 16 *mm* összvastagságú lemezeket is össze tudunk így kötni, számos valós vizsgálatnak kellene alávetni mintákat. Kérdéses az is, hogy például a TOX nevű gyártó, ami ezt az információt feltünteti, milyen anyagminőség mellett jutott a 12 *mm*-es összvastagságra. Már korábban, a 3.1.-es pontnál is kifejtettem, hogy miért az 5754-es alumíniumot választottam alapanyagként. Röviden azért, mert használatos anyag az autóiparban. Egy ilyen szerszám gyártó viszont értelemszerűen nem csak egy adott iparágra próbál megoldásokat kínálni, tehát valószínűleg rengeteg anyagminőséggel találkoztak már.

Tanulság tehát, hogy a geometriai méretek összehasonlítása alapján arra jutottam, hogy a legnagyobb klincs kötéssel még összekapcsolható lemezvastagság 16 *mm*, tehát lemezpárként értelmezve 8-8 *mm*.

5. Klincs kötések vizsgálata

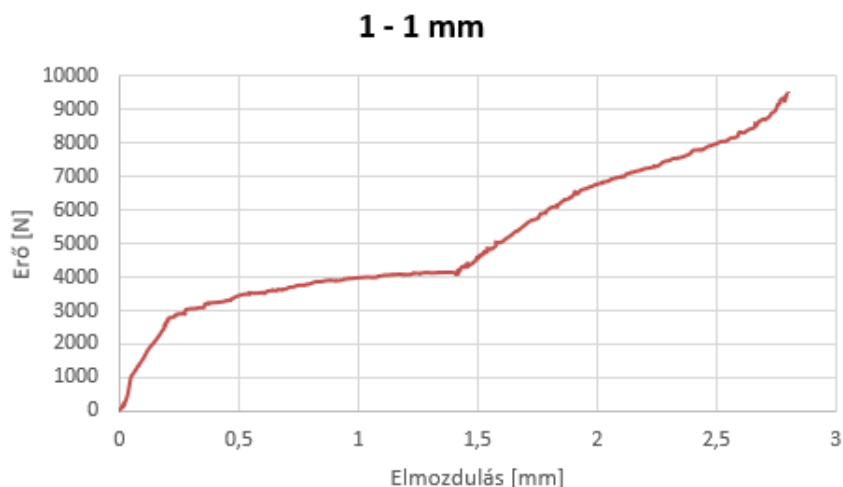
A Deform programból kinyerhető adatokat mindegyik lemezpár esetén Excelbe importáltam, és szemléltető diagramot készítettem általuk. Erő – elmozdulás diagramokról van szó, és a bélyeg erejét vettem figyelembe. A matricára ható erők is könnyedén számolhatók ebből, mivel az a függvény ugyan így néz ki, csak konstans el van tolva a ráncgátló erővel. Tehát a matricára ható erőt úgy számolhatnánk, hogy vesszük a bélyeg erejét, és hozzáadjuk a ráncgátló konstans erejét. A fejezetben szó esik még a klincs kötések vizsgálatáról vagy teszteléséről, illetve a szerszám választás lehetőségeiről is.

5.1. Alakításhoz szükséges erő vizsgálata

Az erő – elmozdulás diagramok bemutatásáról, és ezek elemzéséről lesz szó.

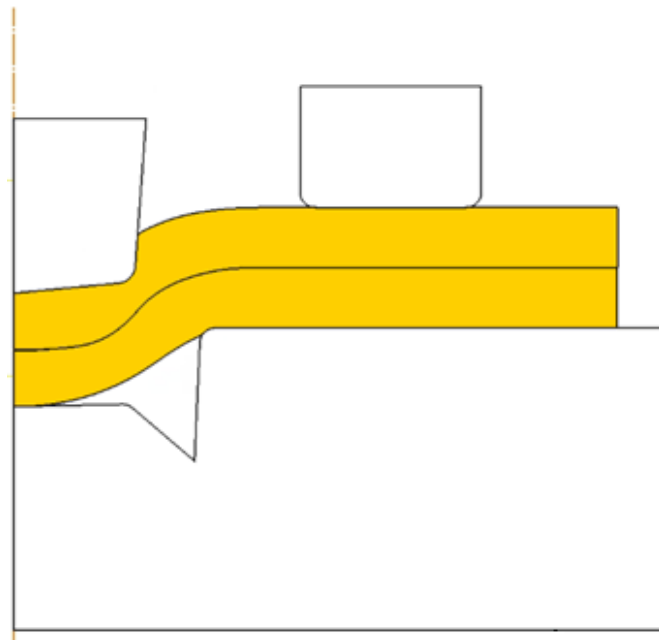
5.1.1. 1 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő

Az 1 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó maximális erő értéke a bélyegen 9497 N és az ehhez tartozó bélyeg elmozdulás értéke pedig 2,8 mm. Az erő – elmozdulás diagram a 30. ábrán látható.



30. ábra: Bélyeg erő – elmozdulás diagram, 1 mm-es lemezpár esetén

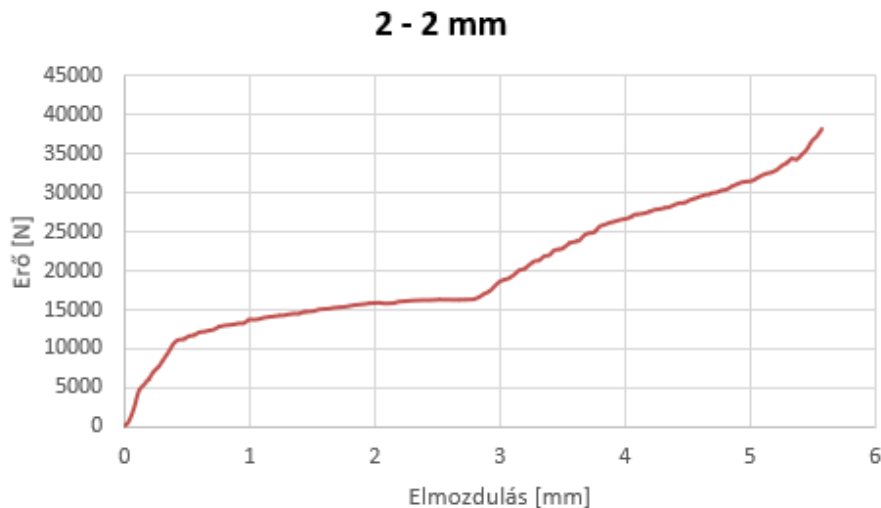
Az előbbi ábrán az 1,5 mm-es bélyeg elmozdulás előtt látható egy markáns meredekség változás a görbén. Ennek az az oka, hogy itt érintkezik először a bélyeg, a két lemez, és a matrica, tehát itt kezd el egymásba „préselődni” a két lemez. Ezen a ponton így nyilvánvalóan megugrik az erő szükséglet. Ezt a 31. ábrán szemléltetem. Ezen kívül a grafikon legelején is hasonlóan meredek a görbe, mint az előbb említett ponton. Ennek több oka is lehet. Eddigi tanulányaim alapján arra tudok következtetni például, hogy a folyamat elején a rugalmas alakváltozás zónáján is át kell esni a lemezeknek. Egy tipikus feszültség – alakváltozás (szakító) diagramon is az első, tehát rugalmas szakaszhoz kis alakváltozás, de ahhoz mérten nagy feszültség érték tartozik. A képlékeny alakváltozás szakaszában viszont már kisebb feszültség növekedés is elég nagyobb alakváltozás eléréséhez. Jelenleg állandó a súrlódási tényező az elemek között, de a való életben akár az is befolyásoló tényező lehet, hogy a statikus súrlódási tényező értéke nagyobb szokott lenni, mint a dinamikus súrlódási tényezőé. Tehát a mozgást elkezdeni súrlódási szempontból nehezebb, mint utána folytatni.



31. ábra: A bélyeg, a lemezek, és a matrica közös találkozási pontja, amikortól már a lemezek egymásba „préselése” következik

5.1.2. 2 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő

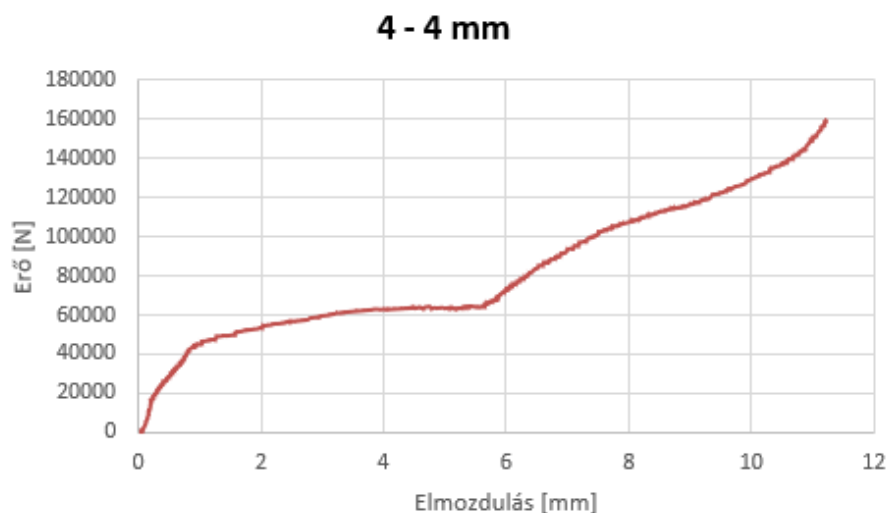
A 2 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó maximális erő értéke a bélyegen 38336 N és az ehhez tartozó bélyeg elmozdulás értéke pedig 5,57 mm. Az erő – elmozdulás diagram a 32. ábrán látható.



32. ábra: Bélyeg erő – elmozdulás diagram, 2 mm-es lemezpár esetén

5.1.3. 4 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő

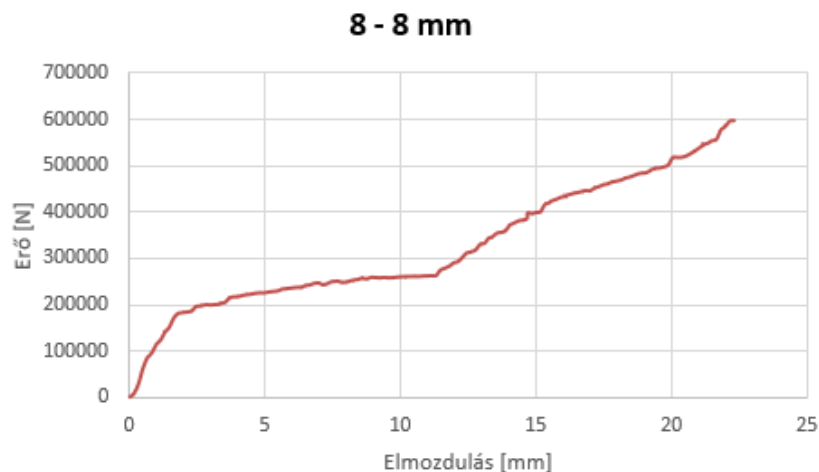
A 4 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó maximális erő értéke a bélyegen 159371 N és az ehhez tartozó bélyeg elmozdulás értéke pedig 11,2 mm. Az erő – elmozdulás diagram a 33. ábrán látható.



33. ábra: Bélyeg erő – elmozdulás diagram, 4 mm-es lemezpár esetén

5.1.4. 8 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő

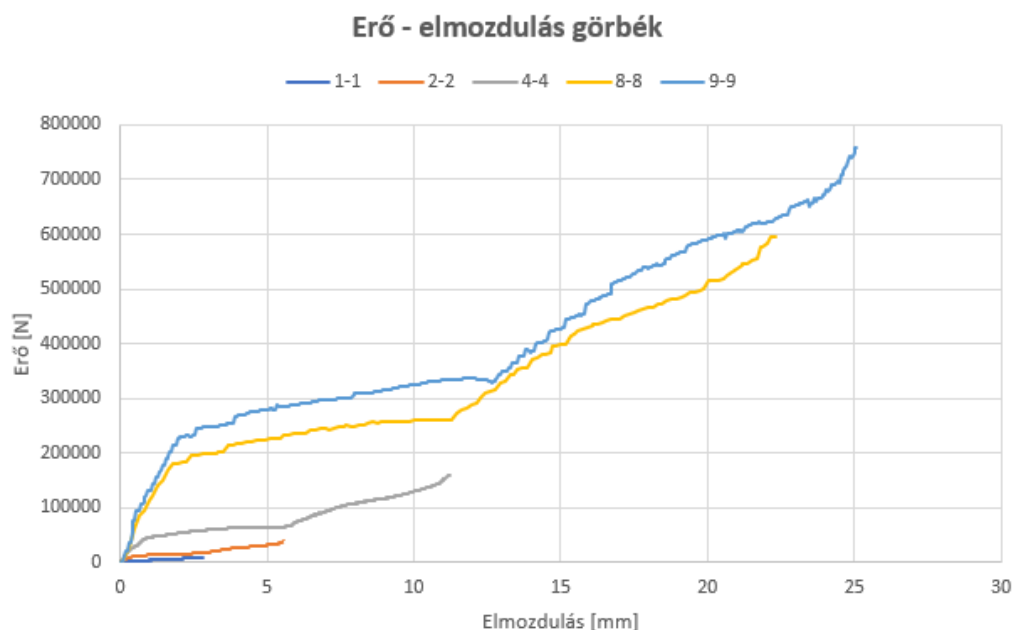
A 8 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó maximális erő értéke a bélyegen 595913 N és az ehhez tartozó bélyeg elmozdulás értéke pedig 22,3 mm. Az erő – elmozdulás diagram a 34. ábrán látható.



34. ábra: Bélyeg erő – elmozdulás diagram, 8 mm-es lemezpár esetén

5.1.5. 9 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő

A 9 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó maximális erő értéke a bélyegen 759832 N és az ehhez tartozó bélyeg elmozdulás értéke pedig 25,08 mm. Az erő – elmozdulás diagram a 35. ábrán látható. Mivel ez az utolsó ilyen jellegű diagram, ezért megtalálhatók rajta az előzőekben bemutatott lemezpárok görbéi is. Jól látható, hogy a kisebb lemezpárok erőben és elmozdulásban is eltörpülnek az ábrán a nagyobbakhoz képest. Sötét kék színnel látszik az 1 mm-es, pirossal a 2 mm-es, szürkével a 4 mm-es, sárgával a 8 mm-es, és végül halvány kékkel a 9 mm-es lemezpárhoz tartozó görbe.



35. ábra: Bélyeg erő – elmozdulás görbék (1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 9 mm)

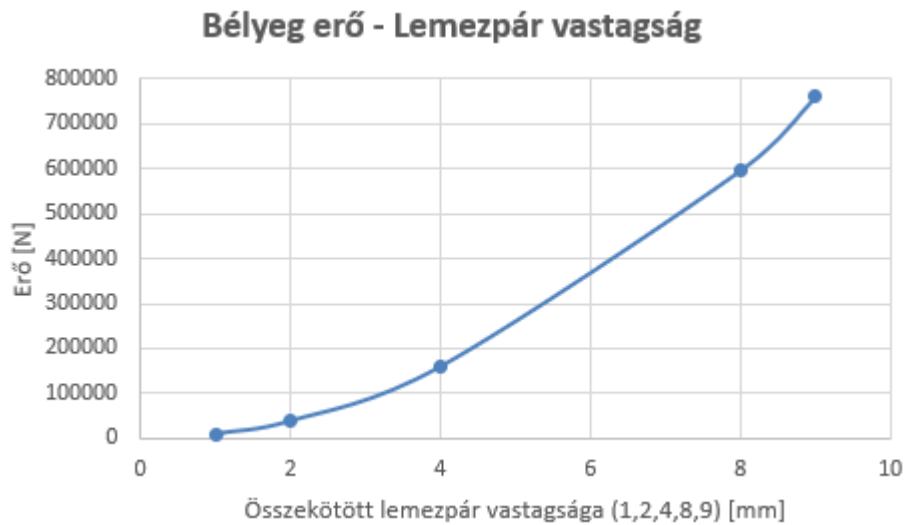
5.1.6. Szimulált bélyeg erő – elmozdulás diagramok összehasonlítása

Ahhoz, hogy érdemleges összehasonlítás történhessen a fellépő erőkkel kapcsolatban, előbb egy összefoglaló táblázatot készítettem. Az összefoglaló táblázat adatainak segítségével pedig két diagram kerül bemutatásra. A 4. táblázatban a különböző lemezvastagságokhoz tartozó bélyeg erő és elmozdulás értékek szerepelnek.

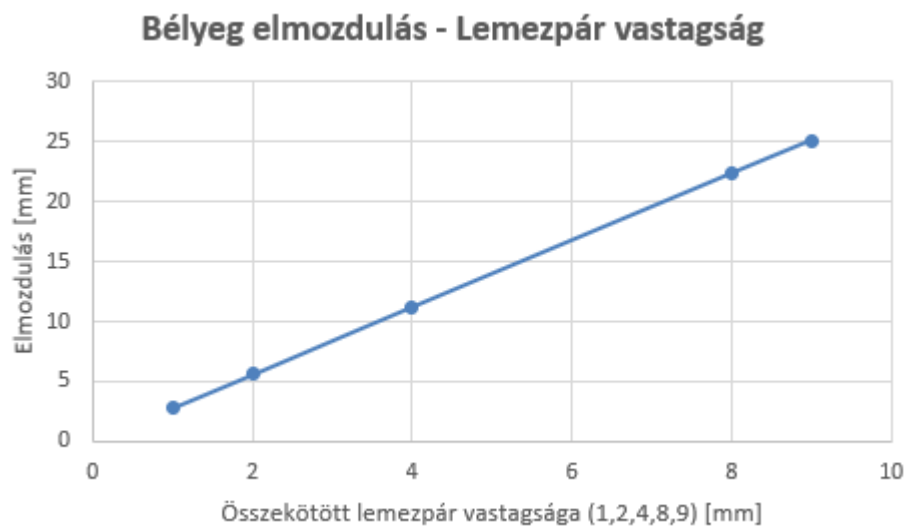
Lemezpár:	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm	9 mm
Erő [N]	9497 N	38336 N	159371 N	595913 N	759832 N
Elmozdulás [mm]	2,8 mm	5,57 mm	11,2 mm	22,3 mm	25,08 mm

4. táblázat: Bélyeg erő – elmozdulás adatainak összefoglalása különböző vastagságú lemezpárok esetén

Az adatok felhasználásával készített „bélyeg erő – lemezpár vastagság” és „bélyeg elmozdulás – lemezpár vastagság” diagramokat a 36. és a 37. ábrán tekinthetjük meg. Mindkét esetben a vízszintes tengelyen az összekötött lemezpár vastagsága szerepel, így analizálható, hogy más jellegű görbét kapunk-e csupán az alapján, hogy az erőt vagy az elmozdulást figyeljük meg.



36. ábra: Bélyeg erő – lemezpár vastagság diagram



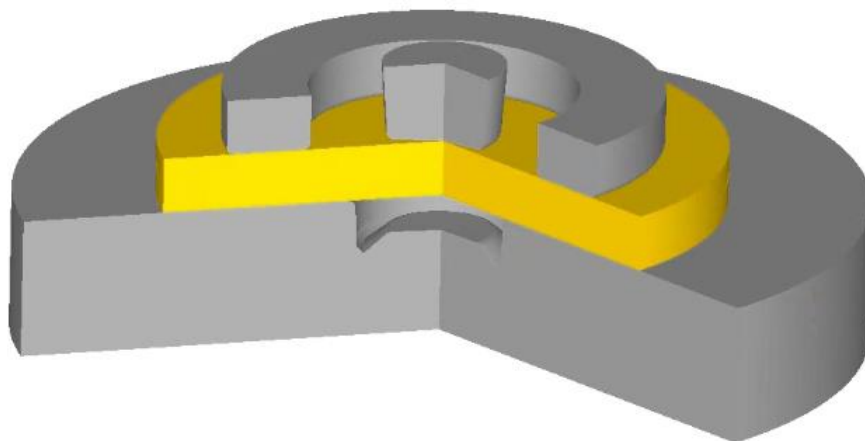
37. ábra: Bélyeg elmozdulás – lemezpár vastagság diagram

A két ábrán látható, hogy ha a bélyeg erő változását nézzük a lemezpár vastagság függvényében, akkor inkább egy exponenciális görbét, ha pedig a bélyeg elmozdulás változását tekintjük a lemezpár vastagság függvényében akkor egy lineáris görbét kapunk. A második esetben, tehát a bélyeg elmozdulás tekintetében azért lineáris a görbe, mert a geometria mindig arányosan növekedett, emiatt a bélyegnek mindig ezzel arányosan többet kellett mozognia az előző alkalomhoz képest. A másik esetben az erő függvény exponenciális, tehát a szükséges erő nem a geometria változásával arányosan

növekszik. Mindig lényegesen több erőre van szükség, mint amire az előző esetben szükség volt. Ennek több oka is lehet.

Megfigyelhető például a már korábban, az 1 mm vastagságú lemezpárhoz tartozó erő vizsgálatánál is tárgyalt rugalmas alakváltozási zónán is, hogy nem lineáris lesz az erő függvény. Ha visszatekintünk a korábbi diagramokra, például a 30. és a 32. ábrára, ott is látható az 1 mm vastagságú lemezpár görbéjén, hogy nagyságrendileg 3000 N környékén kezdi elérni a „vízszintesebb” szakaszt. Tehát azon a ponton esik vissza a görbe meredeksége, ami arra utal, hogy ott a lemezek átlépték a rugalmas alakváltozás zónáját. Azonban, ha megnézzük a 32. ábrát, tehát a 2 mm lemezvastagsághoz tartozó erő – elmozdulás diagramot, akkor azt figyelhetjük meg, hogy ez a pont csak nagyságrendileg 12000 N környékén jön el.

Az egyszerűség kedvéért kétdimenziós nézetben lett lemodellezve a folyamat, de a Deform szoftverben a „Post Processor” menüben könnyedén át lehet váltani háromdimenziós nézetre, mivel forgástesteket alkottunk. Egy háromdimenziós nézetre átváltott, 240° -os körcikk mentén elmetsett klincselési modell tekinthető meg a 38. ábrán.



38. ábra: A három dimenziós modell

Mindez azért volt fontos, mert ezáltal könnyebben megérthető, hogy attól, hogy a lemezvastaságot a kétszeresére növelem, az alakítandó térfogat nem a kétszeresére, hanem a többszörösére fog nőni. Az erő exponenciális növekedésének egyik oka tehát, hogy a térfogat nem lineárisan változik. A henger térfogata a következő egyenlettel számítható:

$$V_{\text{henger}} = \pi \cdot r^2 \cdot h ; \text{ ahol } r: \text{ henger sugár és } h: \text{ henger magasság [43]}$$

$$V_{\text{lemez;1mm}} = \pi \cdot (10 \text{ mm})^2 \cdot 1 \text{ mm} = 314,16 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{lemez;2mm}} = \pi \cdot (20 \text{ mm})^2 \cdot 2 \text{ mm} = 2513,27 \text{ mm}^3$$

Az előbbi egyszerű számításból is jól kivehető, hogy az alakítandó térfogat a 2 mm-es vastagság esetén nem kétszeresére, hanem nyolcszorosára nőtt az 1 mm-es lemezvastagsághoz viszonyítva. Sőt, ennél a példánál csak 1-1 darab lemez térfogata lett kiszámolva, de a szimuláció során mindig két lemez összekötése volt a cél.

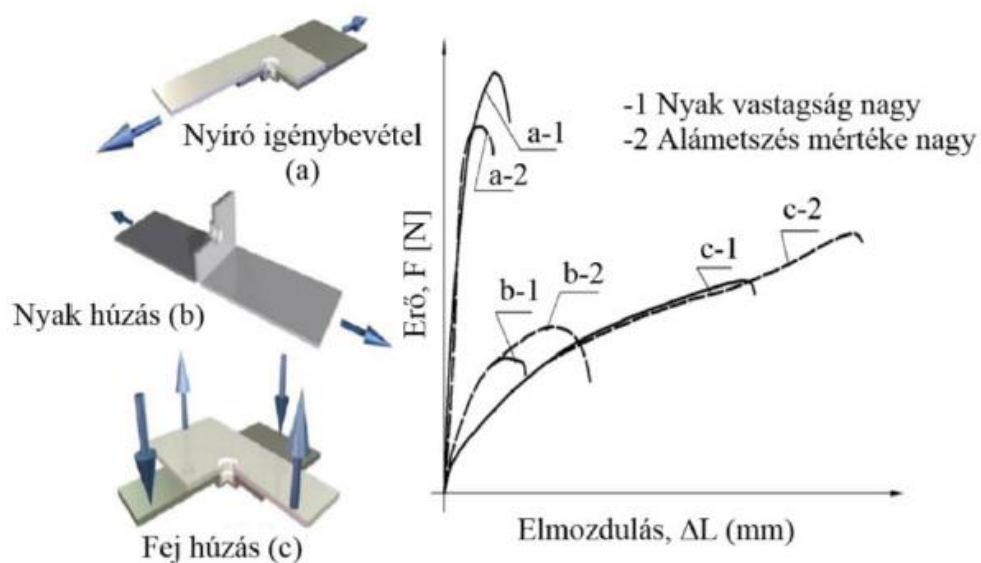
5.2. A klincs kötés vizsgálata és készülékei

Ebben a fejezetben szó lesz a klincs kötések vizsgálatáról, továbbá bemutatok néhány készüléket a kötés létrehozására.

5.2.1. A kötések vizsgálata

A vizsgálat bemutatása előtt ismétlésképpen, röviden ismertetem a kötés kialakításának folyamatát. Az eljárás során két vagy három lemezt átlapolva egymásra helyezünk. A lemezeket a bélyeg fogja belenyomni egy speciális alakú matricába. Ennek a kialakításnak köszönhetően egy oldhatatlan kötést kapunk. Több változat is van, azonban leggyakrabban az egy lépésben történő körpontos klincselést alkalmazzák.

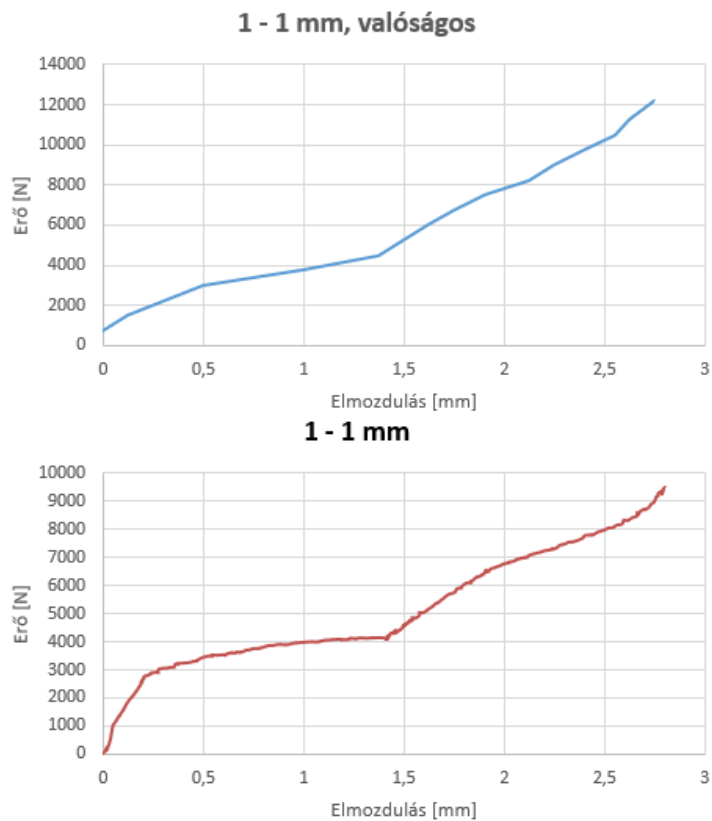
Egy gyártási folyamat elkezdéséhez rengeteg költséges vizsgálatra van szükség. Elkerülhetetlen, hogy előbb utóbb ténylegesen összekötött darabok kerüljenek tesztelésre a valóságban, azonban például az alakítási erő nagyságát vagy a geometria megfelelő kialakulását számítógépes vizsgálatokkal is lehetséges előszűrni. Előbbi, tehát az alakítási erő nagysága hasznos információ lehet a megfelelő készülék kiválasztásához. Erről a következő fejezetben lesz majd szó. Visszatérve azonban a tesztekhez, a már valóságban létrehozott kötéseket nyíró, húzó és szakító vizsgálatoknak vetjük alá. Ez megegyezik a ponthegesztett kötések roncsolásos vizsgálataival. A vizsgálatok során mérjük a geometriai jellemzőket (például a nyakvastagságot és az alámetszést), és figyeljük ezek hatását a kötés szilárdságára. Ez a vizsgálati módszer látható a 39. ábrán. [24]



39. ábra: Nyíró, nyak- és fejhúzás ábrája, az előforduló hibák okai [24]

5.2.1.2. Valóságos és szimulált kötések összehasonlítása

Felmerülhet az a gondolat, hogy a bemutatott szimulációk, hogy viszonyulnak egy valóságban is létrehozott klincks kötéshez. Ebben a részben ez kerül bemutatásra. Először az általam szimulált 1 mm-es lemezpár, illetve egy rendelkezésemre bocsátott valóságos 1 mm-es lemezpár klinckeléséből származó erő elmozdulás diagram összehasonlítása tekinthető meg a 40. ábrán.



40. ábra: Valóságos és szimulált 1 mm vastagságú lemezpár erő – elmozdulás diagramok

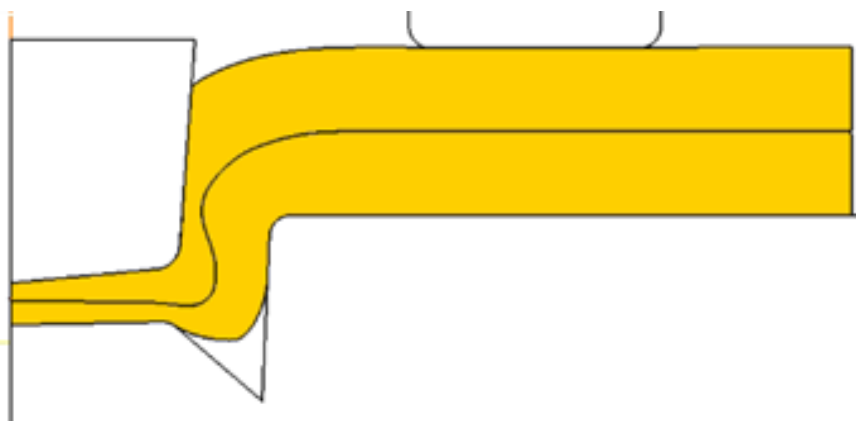
Látható, hogy a valóságos esetben magasabb erő szükséges a 0,5 mm-es fenékvastagság eléréséhez. Ennek több oka is lehet. Az egyik, hogy a valóságban fellépő súrlódási viszonyokat nehéz lenne teljesen pontosan szimulálni. A másik pedig, hogy különböző gyártók esetén minimális kémiai összetételbeli változások lehetnek, és az adatbázisban valószínűleg nem teljes mértékben ugyan az az anyagmodell szerepel, mint a valóságos esetben. Esetlegesen felmerülhet még, hogy a valóságban olyan jellegű

regzések és dinamikus hatások lépnek fel, amit a végeselemes szoftver nem képes teljes mértékben szimulálni.

Érdekes lehet, hogy a modellezett és egy valóságos klincselt kötés keresztmetszeti képe mennyiben tér el egymástól. Ahhoz, hogy vizuálisan össze tudjuk őket hasonlítani, a 41. és a 42. ábra lesz a segítségünkre. Előbbin egy (DP 600 anyagminőségű) 1 mm lemezvastagságú valóságos klincselt lemezpár keresztmetszeti képe tekinthető meg. Utóbbin pedig az általam szimulált (alumínium anyagminőségű) 1 mm lemezvastagságú klincselt lemezpár keresztmetszeti ábrája látható. Véleményem szerint a két keresztmetszet vizuális hasonlósága egyértelmű.



41. ábra: 1 mm lemezvastagságú valóságos lemezpár keresztmetszeti képe (0,51 mm fenékvastagság) [24]



42. ábra: 1 mm lemezvastagságú lemezpár szimulált keresztmetszeti képe (0,5 mm fenékvastagság)

5.2.2. Készülékek

Klincs kötések létrehozásához lehetőségünk van különböző fajta berendezések használatára. Ebben a fejezetben TOX-technológiák kerülnek bemutatásra.

5.2.2.1. Egyetemi készülékek

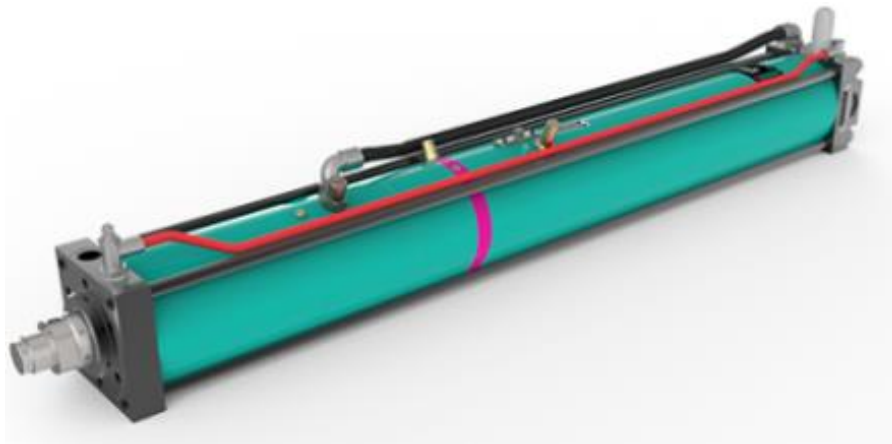
A Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet műhelyében van lehetőség lemezek összekapcsolására klincs kötés által. Ehhez egy TOX szerszámpár áll rendelkezésünkre, amely körpontos klincs kötés létrehozására alkalmas. A szerszámpárt egy MTS típusú elektro-hidraulikus, számítógép vezérlésű gépbe lehet beépíteni. A berendezés maximum nyomóereje 250 kN. Erről az összeállításról látható egy kép a 43. ábrán. [24]



43. ábra: MTS elektro-hidraulikus prés klincselő készülékkel [24]

5.2.2.2. Hidropneumatikus munkahengerek

Különböző kialakítások vannak a kategórián belül. Közös bennük, hogy hidropneumatikus működtetésűek, és ebből a működésből kifolyólag közegeket (levegő – olaj) elválasztó rendszerrel rendelkeznek. Alapfelszereltségük a visszatérítéskori hidraulikus csillapítás. Az előállítható nyomóerő 2 és 2000 kN közé esik. A löket hossz akár 400 mm -ig is terjedhet. Alacsony energiafogyasztás jellemző rájuk, és alkalmazzák őket az autópárházban is. A 44. ábrán tekinthető meg egy hidropneumatikus munkahenger. [44]



44. ábra: TOX hidropneumatikus munkahenger [44]

5.2.2.3. Kézi fogó

Kompakt egység, ami klincselési vagy lyukasztási feladatokra lett tervezve. Kisebb, egyszerű munkadarabok összekapcsolásához lehet jó választás. A terhelhetősége maximum 75 kN . Automatizált gyártásra kialakított egység is rendelkezésre áll. Az automatizálás fontos a termelékenység növeléséhez. Kézi fogó látható a 45. ábrán. [44]



45. ábra: TOX kézi fogó [44]

5.2.2.4. Kisprések

Rugalmasan bővíthető asztali prések. Olyan problémák megoldására a legalkalmasabb, ahol a termelékenység növelése a cél, de költséghatékony beruházás kell. Különböző változatok léteznek TOX kisprésekből, de a maximális kifejthető erő értéke 56 kN . Kedvező ár-érték arány, széleskörű felhasználhatóság, és gyors szerszámcsere jellemzi őket. Természetesen a kisprések esetén is alkalmazhatunk klincselő szerszámot. Egy kisprés figyelhető meg a 46. ábrán. [44]



46. ábra: TOX kisprés [44]

Összefoglalás

A szakdolgozat keretein belül bemutatásra kerültek széleskörűen elterjedt kötési formák. Fő fókuszban a klincselés állt, amelyhez valamelyest hasonló eljárás is bemutatásra került, mint például a vágószegecs kötés. Volt szó azonban technológiailag másabb felépítésű eljárásokról is, például a hegesztésről. A szimuláció, és a dolgozat készítése során megismertem számos eljárást, szempontot, összehasonlítási alapot. Ezen ismeretek felhasználásával eljött az ideje levonni a konklúziót.

A célom az volt, hogy kiderítsem, hogy virtuális keretek között mekkora vastagságú lemezpár kapcsolható össze klincs kötés segítségével. A szimulációk során a legnagyobb vastagságú lemezpár amit sikerült összekapcsolnom 8 mm-es volt. Mivel mindig két darab lemezt kötöttem össze, ezért ez összesen 16 mm lemezvastagságot jelent. Az irodalomkutatás során az interneten fellelhető információk alapján 12 mm-es összvastagságú lemezek összekötésével bezárólag ajánlották ezt a kötési formát. Nem könnyű választ adni arra a felvetésre, hogy az általam kapott eredmény a valóságban is megállná-e a helyét. Ennek kiderítésére számos valós, roncsolásos vizsgálatra lenne szükség, ahol elemezni kellene a kötés mechanikai tulajdonságait is, illetve még pontosabban lehetne szemrevételezni a kötés geometriáját, és hogy megfelelő minőségű-e a kötés. Ez rengeteg időt, és pénzt igényelne. További kérdéseket vet fel, hogy megéri-e egyáltalán vastagabb lemezeket ezzel az eljárással összekötni. Lehetséges, hogy más eljárással kisebb energia befektetéssel is össze lehetne kapcsolni ezeket a lemezeket. Ráadásul az is lényeges szempont lehet, hogy az erők vizsgálata során a bélyegen fellépő erőre koncentráltam, tehát ha még azokhoz hozzávesszük a ráncgátló által a lemezekre és így a matricára is kifejtett konstans erőt, akkor még nagyobb számokat kapunk. A kutatás során szerzett információmnak megfelelő általánosságban használt erő intervallumba (5 – 50 kN) az én kísérleteim közül a 2 mm vastagságú lemezpár lenne a legvastagabb, ami még létrehozható a valóságban. Ez összesen 4 mm lemezvastagság.

Tovább fokozza a komplexitást, hogy milyen alapanyaggal dolgozunk. Én a dolgozat készítése során alumíniumot használtam, de az is egy érdekes vizsgálat lehetne a jövőben, hogy különböző anyagminőségű lemezek összekötésénél milyen eredményeket lehet elérni ezzel a technológiával. Vagy például hogyan változna a geometria és a szükséges erő, ha acéllemezeket kötnénk össze. Összességében tekintve biztos vagyok benne, hogy egy ilyen dolgozat elkészítése során sok ismeretre, tudásra és képességre lehet szert tenni. Az irodalomkutatás során különböző eljárásokba nyertem részletesebb betekintést. A szimuláció készítése során megtapasztalhattam, hogy milyen hasznos, hogy napjainkban virtuális keretek között is rengeteg adatot lehet összegyűjteni. A kutatásokat és fejlesztéseket nagyban felgyorsítják, olcsóbbá teszik, és leegyszerűsítik a különböző végelem módszert használó szoftverek.

Summary

Within this thesis, a number of widely used bonding forms were presented. The main focus was on the clinching process. There are similar processes, for example the self-pierce riveting. However, there are processes that are operating on different principles, such as welding. Both of them were discussed. During the simulation and the preparation of the thesis, I became familiar with a number of procedures, aspects and points of comparison. It is time to draw the conclusion.

During the project, my main goal was to find out the total layer of sheet thickness that can be clinched together, based on the finite element method. In the simulations, the largest pair of sheets I could successfully join was 8 *mm* thick. Since I always connected two sheets, this gives a total plate thickness of 16 *mm*. Based on the information I have found during the literature search, this bonding method is recommended for a total layer thickness of 12 *mm*. It is not self-explanatory that the result I obtained would work properly in reality as well. To find this out, a number of real life destructive tests would be needed to analyse the mechanical properties of the bond, and to get a more accurate visual inspection of the geometry of the bond. This requires a lot of time and money. There are even more questionable topics. For instance, is it even worth bonding thicker sheets using the clinching method. It is possible that other methods would require less energy investment to create the bond. In addition, it is important to consider that I have concentrated on the force acting on the punch. To get the full required force to form, you have to add the force of the punch to the constant force exerted by the blank holder on the sheets, and therefore on the sticker as well. That way you get even higher numbers. During my research I got to know a general force interval (5 – 50 *kN*) that are commonly used to clinch work pieces together. Based on that information, and my simulations the thickest pair of sheets that could be created in real life as well would be 2 *mm*. That means a total layer thickness of 4 *mm*.

The complexity does not end there. The material used for the sheets is very important. In the simulations I have used aluminium as the material. However, it could also be an interesting study in the future, that what results can be achieved by joining sheets out of different materials using the clinching process. Or, for example, how the geometry and the required force would change if we used steel sheets instead of aluminium. All in all, I am sure that a lot of knowledge, skills and abilities can be acquired by doing such a project or research. During the literature search I gained more detailed insight into different processes. By creating the simulations, I was able to experience the usefulness of the virtual world. Nowadays there is the opportunity to collect a lot of data virtually. Research and development is cheaper, simplified and requires less time by using - for instance - finite element method softwares.

Források / Irodalomjegyzék

- [1] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Csavark%C3%B6t%C3%A9s>
- [2] <https://www.atlascopco.com/hu-hu/itba/expert-hub/articles/what-is-the-recommended-maximum-torque-for-your-bolt>
- [3] Szabó István – Gépelemek (Nemzeti Tankönyvkiadó, 2003.)
- [4] <https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/mezogazdasag/muszaki-%20alapismeretek/szegek-csapszegek-abrazolasa/szeg-csapszeg-kotes>
- [5] Szabó László – Nem oldható kötések alkalmazása, szerszámai, technológiája
- [6] Dr. Danyi József, Dr. Végvári Ferenc – Gépjárműgyártás, fenntartás (Kecskeméti Főiskola, 2011.)
- [7] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Forraszt%C3%A1s>
- [8] http://cms.sulinet.hu/get/d/5109f618-6707-4b2e-84e3-2c254d21209e/1/4/b/Normal/b13103a_kemenyforrasztas.jpg
- [9] Vincze István – Munkadarab előkészítése hegesztéshez, a hegesztés rajzi jelölése (Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.)
- [10] <https://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forg7.htm>
- [11] [https://hu.wikipedia.org/wiki/Hegeszt%C3%A9s_\(f%C3%A9m\)#Villamos_%C3%ADvhegeszt%C3%A9s](https://hu.wikipedia.org/wiki/Hegeszt%C3%A9s_(f%C3%A9m)#Villamos_%C3%ADvhegeszt%C3%A9s)
- [12] https://www.hegesztестехника-warehouse.hu/_data/VFS_d666236fd5a98d2f6d74f3d3d3a5dc8c.png
- [13] <https://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forg8.htm>
- [14] <https://autotechnika.hu/cikkek/karosszeria/12205/az-ellenallasos-ponthegezes>
- [15] <https://autotuning.lapunk.hu/kepek/ab2015.gif>
- [16] Göndöcs Balázs – Szerelés, minőségbiztosítás (BME, 2011)
- [17] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Szegecs>
- [18] Kún Csaba – Szegecskötések fajtái, szerelése, szerszámai, munkabiztonsági előírásai (Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet)

- [19] <https://www.linkedin.com/pulse/advantages-self-piercing-riveting-technologies-wilson-lee>
- [20] https://jp.tox-pressotechnik.com/assets/countries/EN/pdf/TOX_Riveting-Technology_83_en.pdf
- [21] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845695354500109>
- [22] Jónás Szabolcs, Tisza Miklós - Klincs kötés vizsgálata kísérleti és szimulációs úton (Miskolci Egyetem, 2018.)
- [23] <https://www.researchgate.net/publication/310759174/figure/fig1/AS:514844824092673@1499759979386/Clinch-joints-marked-by-the-circles-in-a-car-bonnet.png>
- [24] Tisza Miklós, Gál Gaszton, Kiss Antal, Kovács Péter Zoltán, Lukács Zsolt – Alakítható nagyszilárdságú lemezanyagok klincs kötése (Miskolci Egyetem, Multidiszciplináris tudományok 4. kötet, 2014)
- [25] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5468947/>
- [26] Jónás Szabolcs, Tisza Miklós – Klincs kötések minőségi kérdései (Miskolci Egyetem, 2018.)
- [27] <https://en.wikipedia.org/wiki/Clinching>
- [28] <https://www.mdpi.com/2032-6653/9/2/22>
- [29] <https://clinchsystems.com/how-it-works/>
- [30] <https://www.techmonitor.hu/tudastar/nagy-szilardsagu-aluminiumotvozetek-a-gepjarmuipar-szamara-20190112>
- [31] <https://www.autoaluminumsheet.com/product/5754-automotive-aluminum-sheet.html>
- [32] <http://www.plasmatech.hu/femek-amelyek-nelkul-nem-kepzelhető-el-a-jovo-autoipara.html>
- [33] <http://elektromos-autozas.hu/az-elektromos-hajtaslanc-elonyei/>
- [34] http://elektromos-autozas.hu/wp-content/uploads/2022/03/eMobility_Electric-drivetrain.jpg

- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/5754_aluminium_alloy
- [36] <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium>
- [37] https://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9geselemes_m%C3%B3dszer
- [38] Dr. Páczelt István, Dr. Szabó Tamás, Dr. Baksa Attila - A végeselem-módszer alapjai (2007)
- [39] https://mogi.bme.hu/TAMOP/vegeselem_modszerek/index.html
- [40] <https://www.deform.com/>
- [41] <https://www.deform.com/wp-content/uploads/2017/09/DEFORM-2D.pdf>
- [42] <https://www.deform.com/wp-content/uploads/2017/09/DEFORM-3D.pdf>
- [43] <https://hu.wikipedia.org/wiki/T%C3%A9rfogat>
- [44] <https://langtool.hu/termekek/tox-technologiak/>