

HÁROMRÉTEGŰ KLINCSELT KÖTÉSEK LÉTREHOZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓS ÚTON

Jónás Szabolcs 

Doktorjelölt, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: szabolcs.jonas@gmail.com

Kovács Péter Zoltán 

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkpz@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A cikk a többrétegű klincselte kötések gyárthatóságának vizsgálatával foglalkozik. A kérdés, hogy lehetséges-e 3 lemezt (jelen esetben egy 1 mm vastag és két 0,5 mm vastag) úgy összekötni, hogy a kötés megfelelő legyen szilárdsági szempontból. A vizsgálódásainkat numerikus szimulációs úton hajtjuk végre, ehhez már a korábban elvégzett kísérleti eredményekkel igazolt modellt alkalmazzuk. A vizsgálat során szót ejtünk az eltérő vastagságú lemezek köthetőségéről, majd rátérünk a cikk témáját adó többrétegű kötés elemzésére.

Kulcsszavak: klincs kötés, végeelem, szimuláció, kísérlet

Abstract

The aim of this article is the clinchability of multi-layer structures. The question is the possibility of producing 3 layered clinched joints (in this particular case: 1 mm with two 0.5 mm sheets) without any failure. During our examination we have used an FE model previously validated by experimentally. We are dealing with the clinchability of different thickness sheets, and finally with the multi-layered joints.

Keywords: clinch joint, FEA, simulation, experiment

1. Bevezetés

A klincselés nem teljesen új technológia, hiszen az első szabadalmat 1897-ben adták be [1]. Az 1980-as évek végén kezdődött a kötéstechnológia gyártásban történő alkalmazása. A lassúnak tekinthető fejlődés annak tudható be, hogy klincselés több szempontból is bonyolult eljárás. Bonyolultság alatt értjük, hogy kevés kísérleti adat állt rendelkezésre, ezért összetett szerkezetek esetén kis pontatlanság is beláthatatlan következményekkel járhat. A szerszámokban történő kismértékű változtatás jelentős szilárdsági változást okoz a kötésben. Jelenleg is intenzíven folynak kutatások a témával kapcsolatban, ugyanakkor a kísérletet manapság megelőzik a numerikus vizsgálatok, hiszen jóval olcsóbban és gyorsabban juthatunk eredményre egy-egy változattal illetően. Főként a véges elemek módszere segítségével lehet könnyen vizsgálni a kötést.

Az akadémiai kutatások kezdetét J. P. Varis [2] disszertációjához köthetjük. Azóta, és különösen az elmúlt néhány évben különféle megközelítésekben születtek disszertációk a klincseléssel kapcsolatban

[3] [4] [5], ez is jelzi, hogy fontos ipari alkalmazásról beszélünk. A lényegesnek tekinthető értekezések közül különösen kiemelkedő Coppieters [3] munkája. Anyagvizsgálati szempontból izgalmas tanulmány, továbbá analitikus módszerei kiváló alapot biztosítanak a tovább fejlesztéshez. A klincseléshez kötődően Balawender könyve [6] számít mérföldkönek. A hazai kutatások közül pedig Tisza és munkatársai munkái emelendők ki ([7]–[10]).

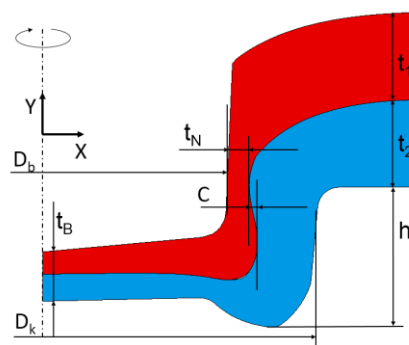
A klincs kötések alkalmazása vékony fémlemezek közötti kötések létrehozásában terjedt el leginkább. A rokontechnológiáknak számító (ponthegezés, szegecskötés, ragasztás) eljárásokkal szemben a klincselés során alapesetben tekintve nincs járulékos anyag, elem- vagy hőfelhasználás, hanem a szerszámok kialakításának következtében, helyi képlékeny alakváltozás hatására jön létre a kötés. A szerszámok egészen egyszerűnek tűnik, egy bélyeg- és matricapár, és ráncgátló. A folyamat során a bélyeget a matricába nyomva alakul ki, a szerszámok eltávolítása után pedig a maradék alakváltozások okán létrejön a klincselte kötés. A folyamat során a különleges kialakítású szerszámok miatt a bélyeghez közelebbi (felső) lemez a matricoldalra (alsó) lemezbe áramlik, ezáltal kialakítva a kötés szempontjából legfontosabb alakzást. A lemezek közötti súrlódás biztosítja az erőzárást, míg egyes esetekben anyagzárás is megvalósul, amely lényegesen növelni képes a teherviselőképességet.

A többretegű klincselte kötésekéről szóló szakirodalom meglehetősen szűk, emiatt különösen izgalmas terület. Az elérhető, többretegű elrendezésekkel kapcsolatos tanulmányokban az azonos vastagságú lemezek vizsgálatával foglalkoznak főként, így Kađèák et al. [14] vagy Abe et al. [15]. Wiesenmayer et al. [16] tanulmányukban már figyelembe veszik az eltérő lemezvastagságok mellett az anyagminőségek hatását is, habár ebben a tanulmányban a hagyományostól eltérő, ún. nyíró klincselési variánsal készültek a kötések. Egy másik variánsal, az ún. sík klincselési eljárással három azonos minőségű és vastagságú lemez kötésével kapcsolatos kutatási eredményeket Chen et al. [17] cikkében olvashatunk. Lei et al. [18] tanulmányukban háromrétegű, körponti alakú kötések vizsgálatát végzik. Az összekötött alumíniumlemezek közé a fretting jelenségének elkerülése érdekében egy harmadik réteget helyeztek, ami rézből készült fémhab volt, itt tehát nem a többretegűség volt alapvetően a kérdés, hanem a kötés tulajdonságainak javítása. Érdekességképp meg lehet említeni az ún. lézersokk-klincselési eljárást is, amely alapvetően fóliák kötésére lett kifejlesztve. A Wang et al. [19] által írt tanulmányban egy új lézersokk klincselési variánsal, az ún. inkrementális lézersokk-klincselési eljárással acél-alumínium-réz anyagminőségeket kötnek össze, és vizsgálják a kötések jellemzőit kísérleti és szimulációs úton is.

Az **1. ábrán** a Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet laboratóriumában a két lemezből álló kísérletekhez használt TOX-gyártmányú körponti alakú kötést létrehozni képes klincselő szerszám látható.



1. ábra. A kötések létrehozásához alkalmazott TOX klincselő szerszám



2. ábra. Klincs kötés sematikus ábrázolása és jellemző méretei

A kötés geometriája összetett szerkezetek esetén alapvetően pontszerűként kezelhető, és mivel a leggyakoribbnak tekinthető eljárásvariáns kör alakú, a kötésre körpontként hivatkozunk. A 2. ábrán a két lemez összekapcsolásakor kialakuló körpont alakú kötés sematikus ábrája látható a főbb méretek feltüntetésével. A vizsgálataink célja egyrészt a kötés létrehozhatóságának vizsgálata, másrészt, ha sikerrel járunk, akkor annak elemzése, hogy kialakul-e kellő mértékű alámetszés (az ábrán C-vel jelölve). A 2. *ábra* jelölései a következők: t_N – nyakvastagság, C – alámetszés, t_B – maradó fenékvastagság, $t_{1,2}$ – felső és alsó kötésben lévő lemez vastagsága, $D_{k,b}$ – kötés pont külső és belső átmérője és h – dudor magassága mm-ben.

A vizsgálatok során DP600 minőségű acélt tételeztünk fel.

A cikk címében kitűzött vizsgálati célhoz jelenleg nem áll rendelkezésre kísérleti adat, így numerikus szimulációs úton, a már rendelkezésre álló adatok, mérések és számítások eredményére alapozva kezdjük el vizsgálódásainkat a többretegű esetek területén. Ahhoz, hogy alá tudjuk támasztani a számítási eredményeinket, szükséges először közölni azokat az eredményeket, amelyek alapján ki tudjuk jelenteni, megfelelő az alkalmazott végeelemes modell a további számítások végzésére.

2. Végeelem-modellezési kérdések

A cikkünkben vizsgálni kívánt esethez jelenleg nem áll rendelkezésre mérési adat, viszont a korábbi kutatásaink során felépítettünk egy olyan modellt, amely kétrétegű kötések elemzésére alkalmas. Mivel a korábbi eredményeink alapján a modell megfelelőnek tekinthető, feltételezhetjük, hogy a módosítások után is alkalmas lesz bizonyos fokú következtetések levonására, és egyben meg tudjuk alapozni a kísérleti elképzeléseinket, amelyeket a szimulációs eredmények alapján tervezünk elvégezni.

2.1. Végeelemmodell felépítése

Elsőként a végeelemmodellt ismertetjük. A szakirodalom szerint 2D tengelyszimmetrikus esetben elégséges a körpont alakú kötések vizsgálni. Ezért a következőkben az ezen alapuló modellt részletezem. Az alkalmazott végeelemes rendszer az MSC.Marc&Mentat 2019 [11] általános célú, nemlineáris végeelem rendszer. Ebben a programrendszerben a pre- és a postprocesszor, illetve a megoldó egy kezelői felületen érhető el.

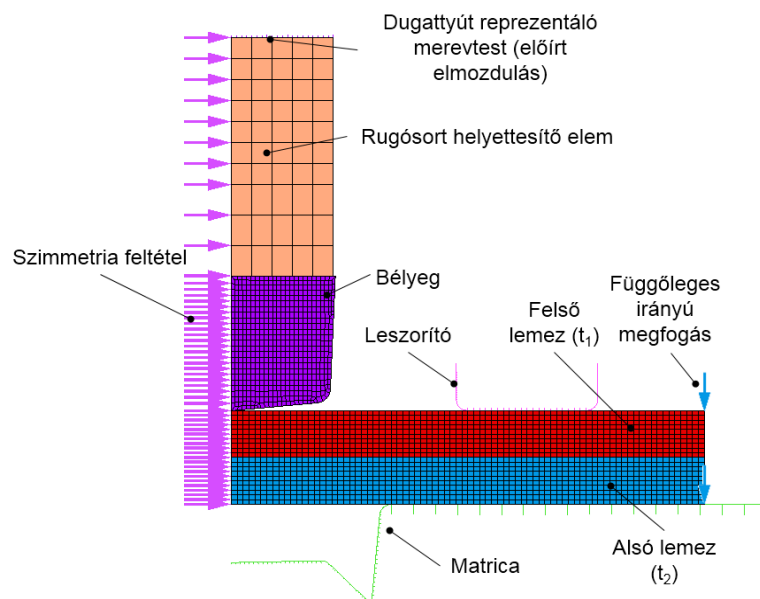
A végeelemmodell a 3. *ábrán* látható. A 3. *ábra* szerinti rugósort helyettesítő elem a mérésekhez használt TOX gyártmányú szerszám (1. *ábra*) felépítése és az első számítási eredmények alapján lett feltételezve. A rugalmassága egy kalibrációs folyamat alapján került meghatározásra ($E = 25$ GPa). A bélyeg anyaga rugalmas, de a rugalmassági modulusa lényegesen nagyobb, mint az acélé ($E = 20\,000$ GPa-t figyelembe véve), így tulajdonképpen kvázi merev. A szerszám többi része (matrica, leszorító és a dugattyút képviselő görbék) ideálisan merevnek tekinthető. A lemezek viselkedését rugalmasképlékeny anyagtörvény szerint vesszük figyelembe, korábbi kísérletek eredményére illesztett Nádai-féle leírást alkalmazó anyagtörvény szerint. Az anyagot a $K = 1013$ MPa és $n = 0,1329$ illesztési paraméterekkel írjuk le.

Az egyes elemek között Coulomb-féle súrlódást tételezünk fel. A súrlódási tényezők értéke a következő: $\mu_{\text{lemez-lemez}} = 0,12$, $\mu_{\text{bélyeg-lemez}} = 0,12$, $\mu_{\text{leszorító-lemez}} = 0,1$, $\mu_{\text{lemez-matrica}} = 0,12$. Ezeket az értékeket a modell kalibrációs folyamata során vettük fel, és felhasználásukkal kaptuk a legjobb egyezéseket a mérések és a számítások között.

A végeelemhálót négycsomópontú, lineáris négyszög (QUAD4) elemek alkotják. A kezdeti háló csak a bélyeg esetén automatikus. A lemezek 0,125 mm élhosszúságú elemekkel lettek a kezdeti

konfigurációban hálózva. A lemezeket az alakítás során a kedvezőtlen hálótorzulások miatt újraképezzük. Az újraképezés feltételei a szögtorzulás nagysága (40° -nál nagyobb torzulás) és az elemek penetrációja (auto) alapján lettek megállapítva, és a folyamat során csak négyszögelemek (min. elemméret 0,07 mm, Advanced Front Quad algoritmus) keletkeznek.

A modell elmozdulásvezérelt, és a méréseknek megfelelően $d = 3,23$ mm-t mozdul el a dugattyút reprezentáló merevtest (előírt elmozdulás). Ránctartó erőt nem alkalmaztunk ebben a modellben, a leszorító itt, mint támasz jelenik meg. A lemezek végein alkalmazott függőleges irányú megfogások a modell stabilizálására szolgálnak, annak érdekében, hogy ne csak a súrlódás tartsa helyén az egyes alkatrészeket.



3. ábra. Végeselemmodell felépítése

A modellben a forgástengely mentén vízszintes megfogást alkalmaztunk a csomópontokon. A dugattyút szimbolizáló görbére előírt elmozdulást állítottam be, amely azonos a mérésekben tapasztaltakkal.

3D-s modell vizsgálata annak óriási számítási igénye miatt nem történt.

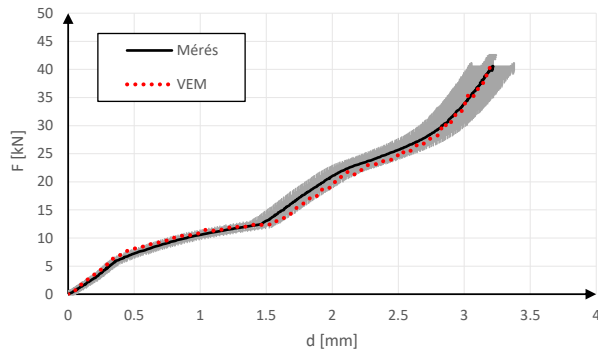
2.2. Két lemez modellezése és kísérleti vizsgálatokkal történő összehasonlítása

Annak érdekében, hogy a háromrétegű kötésre vonatkozó következtetéseket kísérleti eredmények nélkül is elfogadhatónak tekintsük, szót kell ejtenünk a korábbi munkánkról, amelyben két lemezt kötöttünk össze. Ebben az esetben rendelkezésre állnak mérési adatok, és a méréssel jó egyezést mutató számítási adatok. Az alábbiakban tehát a modell megfelelőségét igazoljuk annak érdekében, hogy a virtuális kísérleti esetre is kiterjeszhetővé váljon a megoldás.

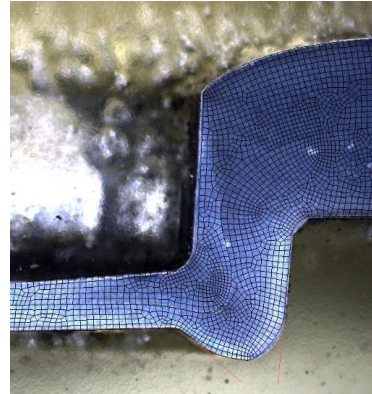
A 4 ábrán látható erő-elmozdulás (F-d) görbék összehasonlítása jó egyezést mutat. A mérési adat-sort kibővítettük az adatpontok 5%-os hibaszámjával, amely területtel figyelembe tudjuk venni az esetleges pontatlanságokat mind a mérésben, mind a szimulációban.

A szimuláció eredményeként kapott pontozott görbe ezen a tartományon belül esik, tehát erőtanilag szempontból helyes. Az 5. ábrán egy elkészült kötés keresztmetszete látható, amelyre az alakítást

követő pillanatban kapott, már deformálódott hálót illesztettük. Amint az látható, jó közelítéssel ráillik a csiszolatra.



4. ábra. Erő-elmozdulás összehasonlítása



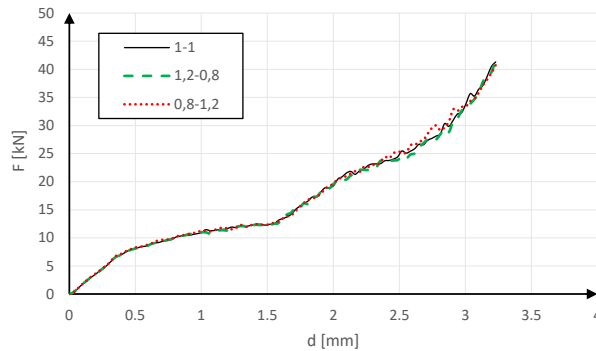
5. ábra. Mért és számított geometria összehasonlítása

2.3. Két eltérő vastagságú lemez modellezése

A különböző vastagságú lemezek vizsgálatára szükséges kitérni, ugyanis jelen elképzelés mellett és a rendelkezésre álló TOX szerszám 2 mm teljes átfogott lemezvastagság melletti kötések létrehozására alkalmas. A háromrétegű eltérő lemezvastagságú kötések esetén ehhez az szükséges, hogy ismerjük fel lehetőség szerint az optimális elrendezést.

A klincselés egyik kedvező tulajdonsága, hogy nemcsak azonos méretű lemezeket lehet összekötni, hanem eltérő vastagságúakat is. Israel et al [12] tanulmányában az átlagosnak tekinthető (1-2 mm) lemezpárokhoz képest vastagabb lemezek közötti kötésekkel foglalkozik. Az alkalmazott összelemezvastagság 10 mm és a lemezek eltérő vastagságúak. A leírtak alapján, amit mások is, például Chen et al. [13] megfigyeltek, a kedvezőbb elrendezés, ha a vastagabb lemez kerül felülre, a bélyeghez közelebb, illetve a nagyobb szilárdságú lemez legyen felül. Az alakítóerő a lemezvastagsággal együtt nő, akár 1000 kN-t is elérheti klincseléskor. Az alakítóerő a körpont méretének növekedésével együtt szintén növekvő tendenciát mutat, ami ezzel együtt kedvezően hat a statikus szilárdságra.

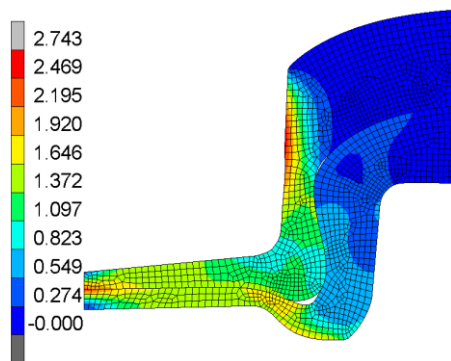
Itt 0,8–1,2 mm és 1,2–0,8 mm lemezek között vizsgáltuk a kötések szimulációs úton. A teljes közrefogott lemezvastagság $t_{össz}=2\text{mm}$, akárcsak az eredetileg használt kötések esetén. Az összehasonlíthatóság miatt azonos mértékben nyomtuk össze a lemezeket. Az erő-elmozdulás diagramok közel azonosakra adódtak (6. ábra), és az eredetileg alkalmazott 1-1 mm vastagságú lemezpárral is azonosnak tekinthetjük az eredményt. Tehát a teljes lemezvastagság van hatással a kötés létrehozásához szükséges erőre, ha a lemezek anyaga azonos, azonban ez félrevezető információkkal szolgálhat, a sorrendiségnek tehát lényegi szerepe van. A 7–8. ábrákon a képlékeny alakváltozás eloszlását láthatjuk; összehasonlítva a kötések, jól látható módon eltérő geometriákra jutunk, elsődleges különbségek a nyak zónájában tapasztalhatók, amelyek a nyíró jellegű igénybevételeknél kifejezetten kritikus pontok.



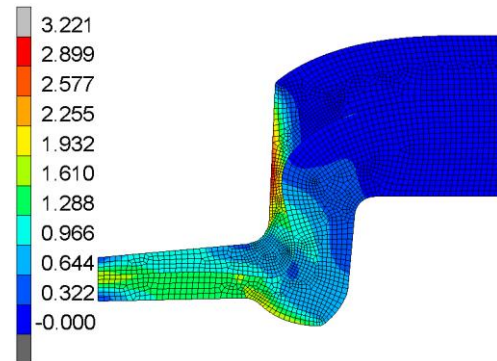
6. ábra. Eltérő lemezek hatása ($t_{össz} = 2$)¹

Az azonosnak tekinthető erő-elmozdulás diagramok minőségbiztosítási szempontból kedvezőtlennek mondhatók, mivel gyártásközi monitorozás során ezen esetek alapján nem lehet eldönteni, hogy megfelelően történik-e a kötések létrehozása. Ezekben az esetekben egyéb vizsgálati módokat is célszerű a folyamatba beépíteni.

A szimulációk eredménye szerint és az irodalommal összhangban azonos minőségű lemezek esetén a kedvezőbb az elrendezés, ha a felső lemez vastagabb, mivel a nyakvastagság nagyobbra fog adódni a gyártás során, tehát nagyobb teherviselő képességgel rendelkeznek. Kísérleti úton igazolni ezt nem tudtuk, de az intenzív vékonyodás és a nagyobb alakváltozási mérték feltételezi, hogy a tönkremenetel korábban bekövetkezik.



7. ábra. 1,2–0,8 mm elrendezés²



8. ábra. 0,8–1,2 mm elrendezés

3. Három lemez köthetőségének modellezése

3.1. Három réteg kötésének modellezése

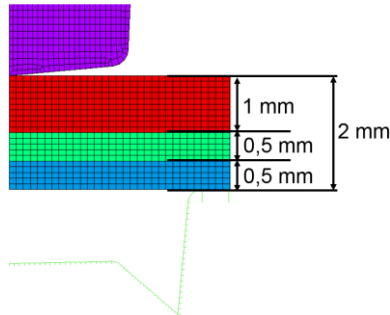
Jelen tanulmány központi témája egyelőre a különböző vastagságú lemezek klincselhetősége. Itt a korábbi fejezetpontban bemutatott DP600 minőségű lemezanyagok felhasználásával, de eltérő vastag-

¹ A diagramokon az erő-elmozdulás görbéket F-d jelöli (F = Force, d = displacement).

² A VEM-es eredmények, ahol nincs külön feltüntetve, a képlékeny alakváltozás eloszlását mutatják, dimenziótlan mértékegységgel.

ságokat vizsgáljuk. A 2.3. fejezetben láthattuk, hogy a kedvezőbb elrendezés az, ha a bélyeghez közelebb a vastagabb lemez helyezkedik el, ezáltal a nyak túlzott elvékonyodása kerülhető el.

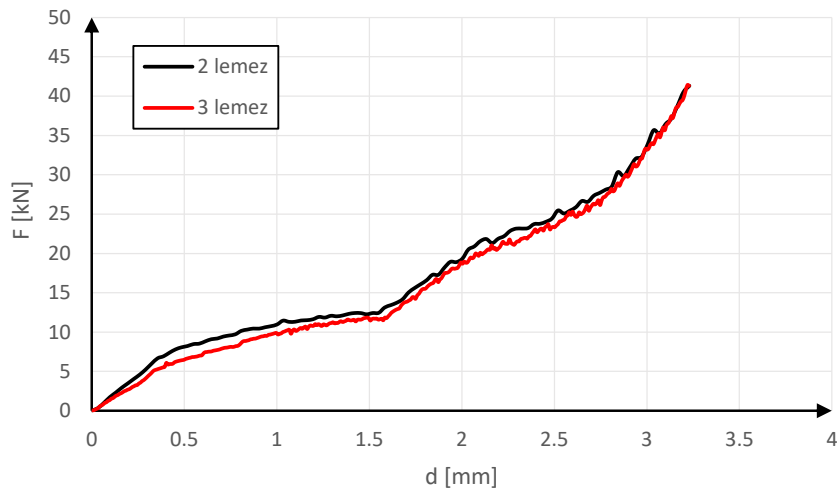
Az itt bemutatott elrendezés teljes közrefogott lemezvastagsága is 2 mm. Mivel a szerszám dedikáltan két 1 mm vastag DP600 minőségű acéllemez kötésére készült, azonban vizsgáljuk az ettől eltérő kötések viselkedését is, szükségszerűen ezt a 2 mm-t vettük alapul, így 1 mm és két 0,5 mm vastag lemezt használtunk fel a szimulációs vizsgálathoz (9. ábra).



9. ábra. Háromrétegű elrendezés részlete (1–0,5–0,5 mm)

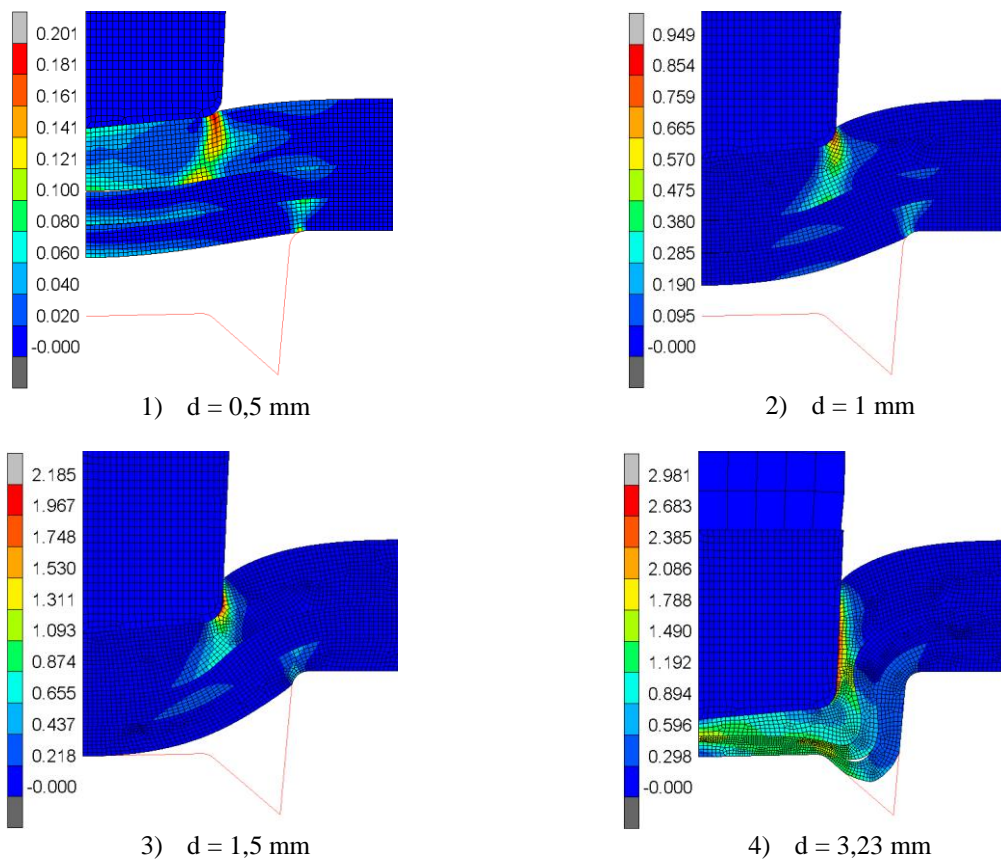
Az előírt elmozdulás a dugattyút reprezentáló elemen azonos a korábbi modellek esetén alkalmazottal, és minden egyéb paraméterében megegyezik azokkal (súrlódás, újrarahálózás beállításai, anyagminőség stb.).

A 10. ábrán látható görbék jellegre hasonlóak, és közel futnak egymáshoz, így az eltérő vastagságú lemezek kötéseinek vizsgálatából megfigyelhető megállapítás itt is él, habár ebben az esetben a kezdeti tiszta hajlítás szakaszában némi különbség megfigyelhető (F-d görbe 0–1 mm közötti szakasza).



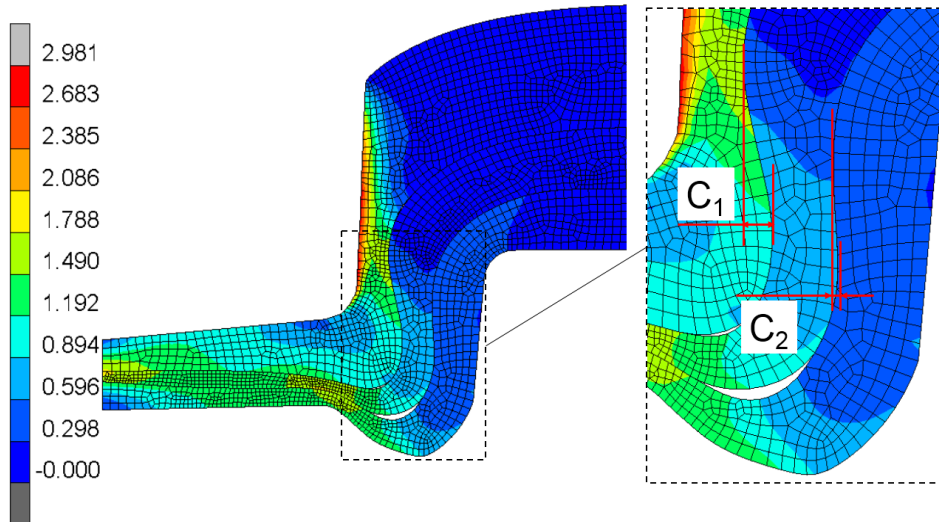
10. ábra. Háromrétegű elrendezés erő-elmozdulás görbéje a két lemezes elrendezéssel összehasonlítva

Az alakítás folyamatának 4 stádiumát a következő, **11. ábrán** szemléltethetjük. A számítási eredmények az MSC.Marc&Mentat-ból származnak, amely program a tizedesjegyek jelölésére alapbeállítás-ként pontot használ.

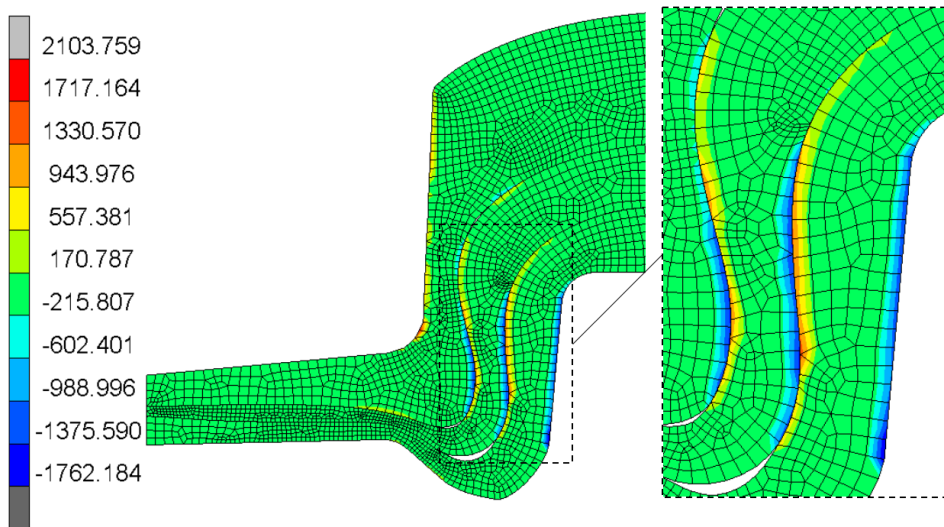


11. ábra. A kötés kialakulásának folyamata alakítás során

A **11. ábra** 4) jelű részletén látható az előírt elmozdulás hatására kialakult kötés geometriája. Ezt részletesebben (**12. ábra**) vizsgálva észrevehető, hogy a felső (1 mm vastag) és a középső (0,5 mm vastag) lemezek között kialakult az alámetszés, azonban a középső és alsó (0,5-0,5 mm vastag) lemezek között a gyakorlat szempontjából elhanyagolhatónak tekinthető mértékben valósult meg. A $C_1 = 0,113$ mm, a $C_2 = 0,018$ mm. A C_1 méret kielégítő lehet kigombolódás szempontjából, de a C_2 méret viszont kismértékben gátolja csak meg, hogy a felső két lemez kigombolódjon az alsó lemezből, tehát relatíve kis terhelés hatására be tud következni a kötés tönkremenetele. Ez elkerülhetővé válhat, ha kisebb fenékvastagságot, azaz nagyobb dugattyúelmozdulást írunk elő a gyártás során, habár fennáll annak a veszélye, hogy nagyon elvékonyodik a fenékrészen a kötés, és bekövetkezik a tönkremenetel.



12. ábra. A kialakított háromrétegű kötés



13. ábra. Radiális irányú kontakt erők eloszlása [N]

Az érintkező felületek további vizsgálata során megfigyeltük, hogy a két vékonyabb lemez között (**13. ábra**) ébredő radiális irányú kontakterők értéke és eloszlása viszont kedvez a kötésnek. Számszerűen közel duplája a kedvező alámetszéssel rendelkező kötésrésznél számolhatónál, azaz a felső lemez nyak részén számolt ~ 800 N és a középső lemez nyak részénél számolt ~ 1500 , mivel így a kigombolódáskor nagy szerepet játszó súrlódási erő nagyobb mértékben képes ellenállni a kötést szét húzni akaró terhelőerőnek.

Ahhoz, hogy meg tudjuk határozni a kigombolódáshoz tartozó erőt, el kell végezni numerikusan a fejhúzó vizsgálatot, amely vizsgálat során figyelembe kell venni a lemezek sorrendiségét, azaz, vagy

csak a felső lemezt, vagy a felső két lemezt igyekszünk távolítani. A vizsgálat nem témája jelen cikkünknek, de későbbi vizsgálatok alapját képezi.

4. Összefoglalás

Mivel a kísérletek végrehajtásához egy klincselő szerszám áll rendelkezésre, így csak a numerikus eredményekre tudunk támaszkodni a klincselés bizonyos kérdéseinek vizsgálatakor. A számításaink eredményeként látható, hogy a kötés ugyan létrehozható, azonban a megfelelő geometriai jellemzők kialakulása kísérleti úton nem alátámasztott. További számítások, és nem utolsósorban fizikai vizsgálatok is szükségesek ahhoz, hogy az itt bemutatott eredményekről, úgymint a kedvezőbb elrendezés vagy a C₂ alámetszés értéke, és nem utolsósorban a valós köthetőség az adott szerszámmal, teljes bizonyossággal meggyőződjünk. Emiatt további kutatásokra van szükség a többrétegű klincselő kötések területén, például kísérleti és numerikus úton történő fejhúzó vizsgálattal a kigombolódáshoz tartozó erő értékének meghatározása és az eltérő anyagminőségű lemezek kötésével kapcsolatos vizsgálatok.

5. Köszönetnyilvánítás

A kutató munka a Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program (FIKP) keretében valósult meg.

Irodalom

- [1] *Deutsches Reichspatent* (1897). DRP-No. 98517.
- [2] Varis, J. P. (2000): *A novel procedure for establishing clinching parameters for high strength steel*. Lappeenranta University of Technology, PhD-disszertáció.
- [3] Coppieters, S. (2012): *Experimental and numerical study of clinched connections*. KU Leuven, PhD-disszertáció.
- [4] Sabra, M. K. (2017): *Clinching of AA7075 Aluminum Sheets*. McMaster University, PhD-disszertáció.
- [5] Chao, C. (2018): *Investigation of two-steps clinching process for joining aluminum alloy sheets*. Tokushima University, PhD-disszertáció.
- [6] Balawender, T., Sadowski, T., Golewski P. (2015): *Technological Aspects of Manufacturing and Numerical Modelling of Clinch-Adhesive Joints*. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology – Computational Mechanics.
- [7] Tisza M., Gaszton G., Kiss A., Kovács P. Z., Lukács Zs. (2014): Alakítható nagyszilárdságú lemezanyagok klincs kötése. *Multidiszciplináris tudományok*, 4. kötet, I. sz., pp, 49–58.
- [8] Kovács P. Z., Tisza M. (2016): Klincs kötés technológiai paramétereinek vizsgálata végelemes modellezéssel. *Anyagmérnöki Tudományok*, 39/1, pp, 7–18.
- [9] Jónás, Sz., Tisza, M. (2018): Experimental study on DP600 clinched joints. *Metallurgy and Foundry Engineering*, 44, 1, pp. 31–40, <https://doi.org/10.7494/mafe.2018.44.1.31>.
- [10] Jónás, Sz., Tisza, M. (2018): Finite Element Modelling of Clinched Joints. *Advanced Technologies & Materials*, 43, 1, <https://doi.org/10.24867/ATM-2018-1-0016>.
- [11] *MSC.Marc&Mentat*. 2019 – User’s Guide.
- [12] Israel, M., Mauermann, R., Scheellnock, J. (2013): Thick Sheet Clinching – Joining up to 20 mm Total Thickness. *Advanced Shipping and Ocean Engineering*, Vol. 2, Issue 1, pp. 1–10.

- [13] Chen, C., Han, X., Zhao, S., Xu, F., Zhao, X., T. Ishida, T. (2017): Influence of sheet thickness on mechanical clinch-compress joining technology, *Journal of Process Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/0954408917735717>
- [14] Kaďeák, L., Spiďák, E., Kubík, R. et al. (2017): Finite Element Calculation of Clinching with Rigid Die of Three Steel Sheets. *Strength Mater*, 49, pp. 488–499. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9892-2>
- [15] Abe, Y., Maeda, T., Yoshioka, D. (2020): Mori, K.-i. Mechanical Clinching and Self-Pierce Riveting of Thin Three Sheets of 5000 Series Aluminium Alloy and 980 MPa Grade Cold Rolled Ultra-High Strength Steel. *Materials*, 13, p. 4741, <https://doi.org/10.3390/ma13214741>
- [16] Wiesenmayer, S., Merklein, M. (2021): Potential of shear-clinching technology for joining of three sheets. *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 3. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100043>
- [17] Chen, C., Zhang, H., Xu, Y., Wu, J. (2020): Investigation of the flat-clinching process for joining three-layer sheets on thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 157, p. 107034. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107034>
- [18] Lei, L., He., X., Xing, B., Zhao, D., Gu, F., Ball, A. (2019): Effect of foam copper interlayer on the mechanical properties and fretting wear of sandwich clinched joints. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 274, p. 116285, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116285>.
- [19] Wang, J., Wang., Y., Wang, S., Lu, G., Zheng, C. Ji, Z. (2021): Experimental and numerical investigation on incremental laser shock clinching for joining three sheets of copper/aluminum/stainless steel. *Optics & Laser Technology*, Vol. 141, p. 107141. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107141>