

KLINCSELT KÖTÉSEK EGYSZERŰSÍTETT MODELLEZÉSE

Jónás Szabolcs

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

Tisza Miklós

professor emeritus, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: tisza.miklos@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Ebben a cikkben a klincselte kötések egyszerűsített vége-sele-mes modellezési eljárásának egy lehetséges megoldása kerül bemutatásra. A modellezést anyagvizsgálatok előzték meg, amelyek alapján a modell kalibrációja megtörtént. A modell érzékenysége-ről röviden szó lesz. Jelen cikk az egyszerű, húzó terhelésnek kitett kötések vizsgálatával foglalkozik, de fontos megjegyezni, hogy további modellek felépítésével a jellemző terhelési irányok, igénybevételek esetére is felépíthető az eljárás. Az egyszerűsített modellezési eljárás az ipari gyakorlatban alkalmazható, több kötés szilárdságának egyszerre történő vizsgálata során. Ezen elemzések során nem a technológiai folyamatot, azaz a klincselés folyamatát vizsgáljuk, hanem már valós szerkezetben lévő kötések terhelésekre adott válaszát.

Kulcsszavak: klincselés, vége-sele-mes modellezés, egyszerűsített modell

Abstract

In this article a possible way of simplified modelling technique of clinched joints is presented. Material tests were performed prior to the model calibration procedure. The sensitivity of the model has been performed and briefly presented. In this article the simple tensile loaded clinched joint case is presented, but with further research it is possible to determine the parameters for the main loading conditions as well. The simplified modelling technique is applicable in the industry when multiple joints have to be analysed at the same time from the point of view of structural response instead of technological questions.

Keywords: clinching, FEA, simplified modelling

1. Bevezetés

A klincselés vékonylemezek között lokális képlékeny alakváltozás során, bélyeg-matrica szerszám-párral létrehozott oldhatatlan kötések technológiai folyamata. A klincs kötések-et főként az autói-parban alkalmazzák, de mobilkommunikációs iparban és a háztartási, irodai gépiparban is gyakran alkalmazott megoldás.

Az utóbbi néhány tíz évben intenzíven kezdték fejleszteni az eljá-rást, mivel a vevői igények megkövetelik, hogy kisebb legyen a termék tömege, kevesebb káros anyagot bocsássonak ki a gyártók stb.

A klincselés során, amely szempontok miatt fejlesztik, nem keletkeznek káros anyagok, alapesetben nincsenek járulékos gépelemek a kötésekben. A kötések olcsón és gyorsan előállíthatók. Ezzel

szemben a ponthegeztéshez képest a kötések statikus szilárdsága kisebb. Klincseléssel kapcsolatban számos szakirodalom foglalkozik. Az akadémiai kutatást Varis munkássága indította el (Varis, 2000), de klincselés kutatásának szempontjából számos mérnököt fel lehet sorolni (Coppieters, 2012 vagy Balawender et al., 2015), de Mucha munkássága is kiemelten fontos (Mucha, 2017). A klincselés magyarországi kutatása a Miskolci Egyetemhez köthető (Tisza et al., 2014, 2016, 2019 vagy éppen Kovács et al., 2020). Azonban ezek a kutatások a klincselés technológiájával és vizsgálatával foglalkoznak, ami a folyamat fejlesztésébe szempontjából kiemelten fontos, de összetett szerkezetek vizsgálatára nem alkalmasak.

Az ipari gyakorlatban gyakran nincs idő és költség arra, hogy túlzottan számításigényes feladatokat oldjunk meg. A valós szerkezetekben több, esetenként száz nagyságrendben található klincseltek kötés. Ahhoz, hogy ezeket a kötések tudjuk vizsgálni olyan 3D-s szimulációkat kellene végezni, amelyek esetlegesen az újrakalkuláció miatt le sem futnának, illetve túlságosan is időigényesek. Célszerűbb olyan egyszerűsítéseket találni, amelyek megkönnyítik a munkát, és könnyen be lehet illeszteni egy ipari szimulációs munkakörnyezetbe. Ezeket a technikákat több helyen alkalmazzák, annak ellenére, hogy az elmúlt évtizedekben a számítási teljesítmény, ezzel együtt a szimulációs mérnöki feladatok megoldása is nagyságrendekkel gyorsabb, ugyanakkor jóval összetettebb feladatok elvégzése lehetséges. Például csavarkötések vagy ponthegeztett kötések modellezésére ez egy bevett gyakorlat, míg klincseltek kötésekre ezek az egyszerűsítések jelenleg nem teljesen kiforrottak vagy nem igazán jól és egyértelműen tárgyalt pontok. Ezekkel a módszerekkel lényegesen kevesebb végeelemet kell a modellben alkalmazni, azaz csökken a számítási idő, egyszerűsödnek az egyébként rendkívül komplex modellek, és mivel rövidebb idő alatt eredményre vezetnek, a szimulációkhoz kötődő költségek is csökkenhetnek.

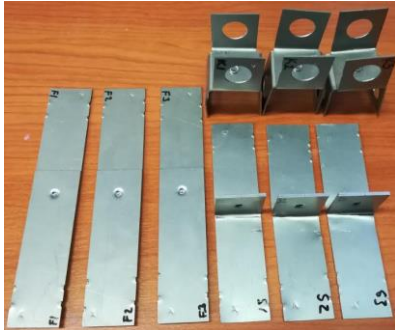
A szakirodalomban főként ponthegeztésre találni példát, így (Khandoker et al., 2014, Zhang 2014) vagy (Xu et al. 2004) Klincseltek kötések egyszerűsített modellezésével Breda foglalkozott több tanulmányában (Breda et al., 2017, 2018, 2019). Az itt bemutatott modell Breda munkájához hasonlóan épül fel, de más leírást használ.

A modellezés során a megfelelő paraméterek figyelembevételével létre lehet hozni olyan kötést helyettesítő leképezést, amely ugyan a helyi alakváltozásokat nem veszi figyelembe, amelyek az alakításból származnak, de a vizsgált rendszerben egyenértékű viselkedést mutat a valós kötésekkel. Ezáltal a valós igénybevételekre adott választ képesek vagyunk vizsgálni, azaz egy szerkezet tönkremenetelét, határterheléseit meg tudjuk határozni.

2. DP600 lemezek anyagvizsgálatai

A klincseltek kötések statikus vizsgálatai megegyeznek a ponthegeztett kötések vizsgálataival. Jelen vizsgálatokhoz alkalmazott lemez alakú próbatestek DP600 jelű acélból készültek, és $100 \times 30 \times 1$ mm³ méretűek voltak. A nyíró-szakító és nyakhúzó vizsgálatokhoz a próbatestek átfedése 30 mm volt. A fejhúzó vizsgálatokhoz a befogó szerszám csapjainak 16 mm átmérőjű furatok készültek.

A kísérleti munka a Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék anyagvizsgáló laboratóriumában MTS 250 jelű elektro-hidraulikus univerzális anyagvizsgáló gépen került elvégzésre. A próbatesteket az **1. ábra** mutatja, már vizsgálathoz előkészítve. A befogópofák közé helyezett lemezek széleit kicsúszás ellen horonyolni szükséges. A hornyok létrehozásához egyszerű kalapács is megfelelő célszerszám. A **2. ábrán** a három vizsgálati eljárás látható. A nyíró-szakító és fejhúzó vizsgálatokhoz ugyanaz a befogó megfelelő, míg a nyakhúzó vizsgálatokhoz egy csapos szerszámot kell alkalmazni.



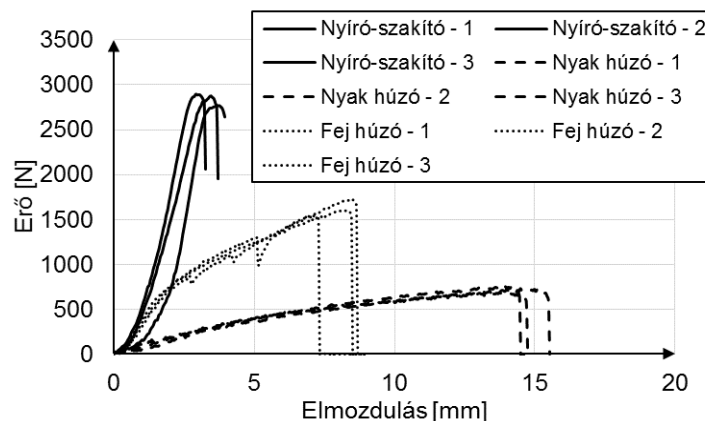
1. ábra. Próbatetek (F: nyíró-szakító; S: nyakhúzó; K: fejhúzó)



2. ábra. Próbatetek vizsgálati elrendezése (balról jobbra: nyíró-szakító, fejhúzó, nyakhúzó)

A 3. ábra a három vizsgálati eljárás során regisztrált erő-elmozdulás diagramok láthatók. A vizsgálatok közül a nyíró-szakító vizsgálat során mérhető a legnagyobb erő, míg a legkisebb a fejhúzó vizsgálat esetén. Az elmozdulások esetén a legkisebb elmozdulás a nyíró-szakító vizsgálatnál mérhető, míg a legnagyobb a vizsgálat kényszerei miatt a nyakhúzó vizsgálat során mérhető.

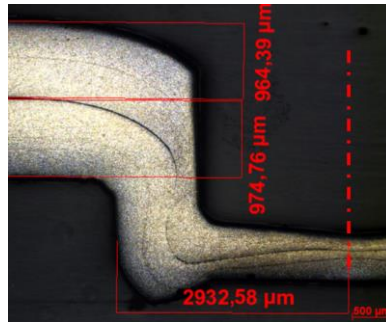
Az egyes görbék az igénybevétel irányától függően jellegzetesnek mondhatók, azaz a szakirodalomban fellelhető más mérések is hasonlóak.



3. ábra. Elvégezett statikus vizsgálatok erő-elmozdulás diagramjai

3. DP600 lemezek szakítóvizsgálatának egyszerűsített végelelemes modellezése

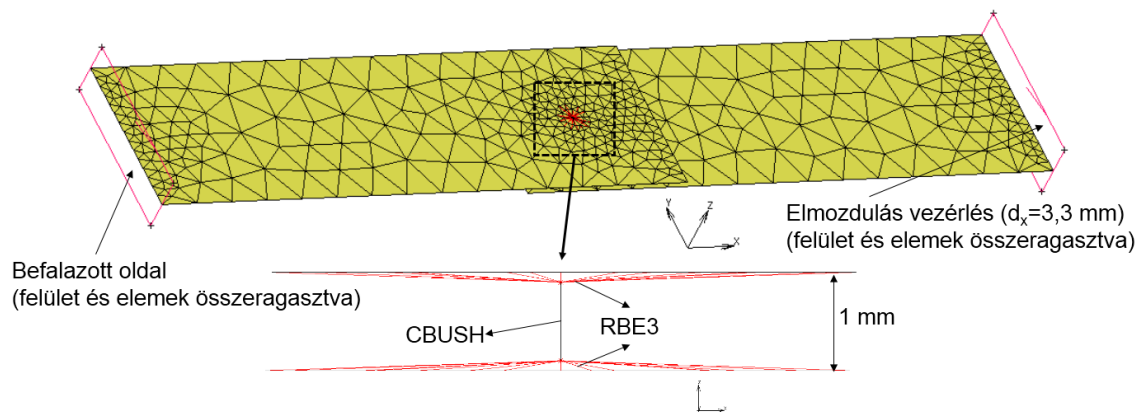
A modellezéshez MSC.Marc&Mentat végelelemes rendszert alkalmaztuk. Az egyszerűsített, 3D-s végelelemes modell felépítését az 5. ábra mutatja. A lemezek héj elemekből épültek fel, háromszögelemekkel behálózva. A lemezek anyagjellemzői lineárisan rugalmas esetben $E=200$ GPa és $\nu=0,3$, míg nemlineáris esetben a korábbi tanszéki mérések alapján felvett folyásgörbék szerint vannak figyelembe véve. A modell elmozdulás vezérelt, a globális koordináta-rendszer szerinti X irányban (húzás irányú) 3,3 mm-t mozdul a befogópófát modellező merevtest, míg a másik merevtest helyben marad (befalazott oldal). A befalazásért és az elmozdulásért felelős merevtest a lemezekhez hozzá van „ragasztva”, azaz nem képesek elválni egymástól a felületek a húzás során. A két lemez között Coulomb-féle súrlódást tételeztünk fel, a súrlódási tényező értéke $\mu=0,1$ -re lett megválasztva.



4. ábra. Próbatétel keresztmetszete

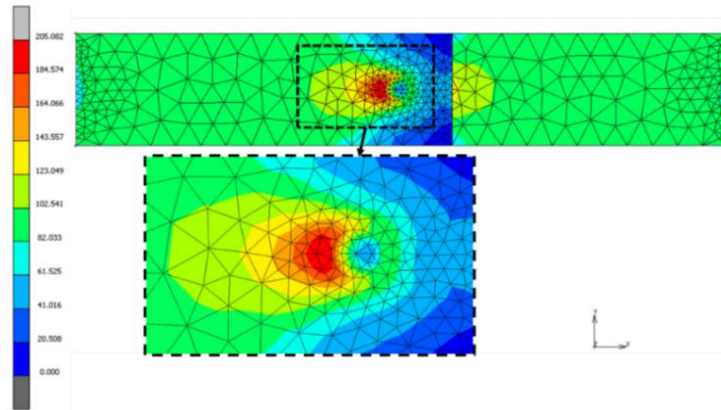
A 4. ábrán látható csiszolat alapján a modellben egy-egy 6 mm átmérőjű körlapot tételeztünk fel a kötés méretének.

A lemezek vastagsága 1 mm, és a középfelületeikkel vannak figyelembe véve. A két lemezt az egyszerűsített klincs kötésként feltételezett elemekkel kötjük össze. Ez egy, a lemezekre merőleges irányú CBUSH típusú elem, amelyet RBE3 típusú elemekkel kötünk a lemezekhez. A CBUSH típusú elem egy OD-s elemtípus, amelynek 6 szabadságfoka van, és minden szabadságfokhoz külön merevséget lehet megadni, így az eltérő irányok hatását könnyen figyelembe lehet venni. A CBUSH elemet RBE3 típusú merev elemek kötik a klincs kötésnek megfelelő átmérőjű hálórészletének csomópontjaihoz, ezzel átadva a terheléseket. A terhelés átadás kedvezőbb, mint RBE2 típus esetén. Az RBE2 típusú elemek alkalmazása során az elemek végtelenül merevek, tehát az összekötött elemek elmozdulása azonos (kinematikus kapcsolat), míg az RBE3 típusú elemek alkalmazása során az erő adódik át, amelyek az egyes kapcsolódó csomópontokon oszlik meg, azaz a modell merevsége sem lokálisan, sem globálisan nem változik.



5. ábra. Egyszerűsített nyíró-szakítóvizsgálati modell

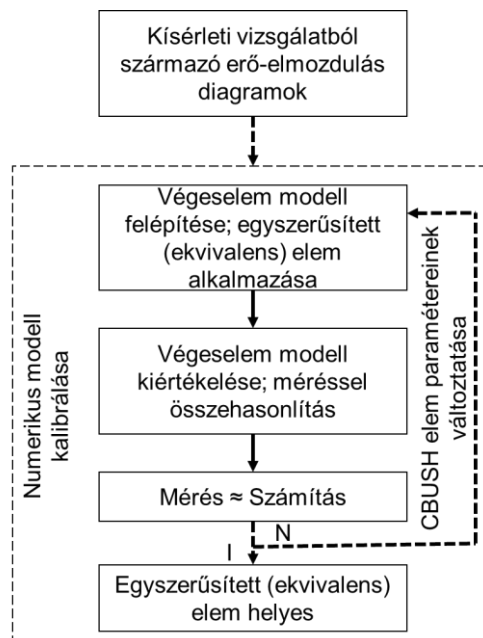
Az egyszerűsített modell redukált feszültségeloszlását a 6. ábra szemlélteti. A kinagyított részleten jobban látható, hogy a legnagyobb ébredő redukált feszültség a kötés középpontja mellett alakul ki. Ez az elhelyezkedés jó egyezést mutat korábbi (Carboni et al., 2004) fárasztó vizsgálatok eredményével, amelyekben a repedések a kötéspont és az alakítatlan lemez határán keletkeztek és terjedtek a lemezek szélei felé.



6. ábra. Redukált feszültség (Mises-féle) eloszlás (rugalmas-képlékeny kalibrált modell)

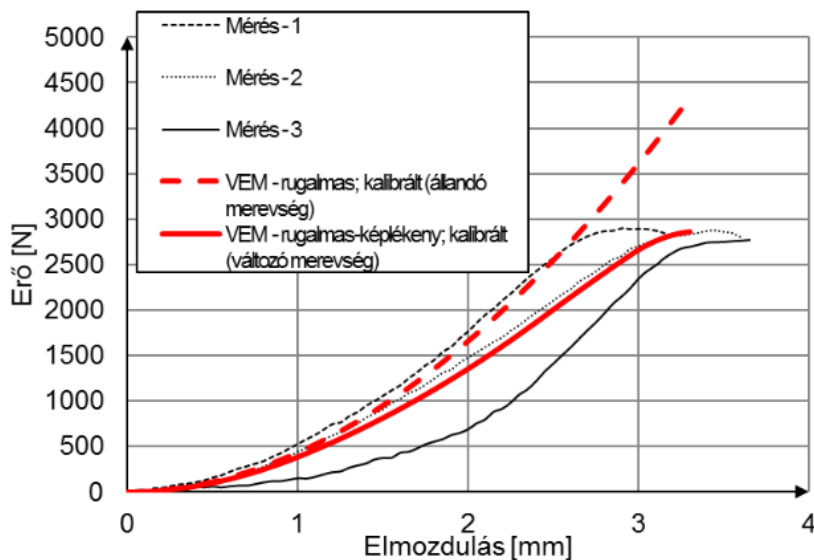
A kalibrálási folyamatot az 7. ábra mutatja. A modell kalibrálásához a kísérleti nyíró-szakító vizsgálatok erő-elmozdulás eredményeit használjuk, mint referencia, és a CBUSH elemek merevsége változik addig, amíg elfogadható mértékűre csökken a különbség a mérés és a szimulációval nyert erő-elmozdulás görbe között.

A kalibrálást minden szerszám-párhoz, maradó fenékvastagsághoz és vizsgálni kívánt anyagpárhoz el kell végezni, annak érdekében, hogy megfelelő becslést lehessen adni. Ugyan ez időigényes folyamat, de a gyakorlati életben többnyire egy adott gyártó előírt lemezvastagságokkal, anyagpárosításokkal, szerszámokkal dolgozik, tehát az alkalmazott kötésekre kell a paramétereket meghatározni. Az iteratív paraméter meghatározást követően tehát el lehet végezni az összetett szerkezetek elemzését is. A folyamat automatizálható.



7. ábra. Egyszerűsített modell kalibrálása

A lemezanyagok viselkedése szempontjából lineáris és a nemlineáris esetre ugyanazon CBUSH paraméter értékek mellett lett (**1. táblázat**) felvéve az erő-elmozdulás diagram. A méréssel összevetve kis különbség látható nemlineáris esetben, míg a lineáris modell lényegesen nagyobb erőt eredményezett, mint ami a mérésekből származik (**8. ábra**). Azaz, ha pontosabb eredményeket szeretnénk meghatározni a számítás során, akkor érdemes a nemlineáris megoldást választani, ha azonban elégséges a közelítés is, akkor a rugalmas megoldás is elégséges lehet. A mérések során tapasztalható volt némi pontatlanság az elmozdulás mérésében, ennek lehetséges magyarázata, hogy a befogópofákból kismértékben kicsúsztak a lemezek a húzás hatására. Ez a hatás leginkább a 3. mérésnél látható, az ott tapasztalt „hasasodás” ennek következménye. Az erő értékek ezzel szemben közel azonosak. Az 1. és 2. mérés közötti eltérés elfogadható mértékű, jellegükben azonosak. A többi mérés során ez a különbség kevésbé látványos, tekintve, hogy a mért elmozdulás ebben az esetben mindösszesen ~3,3mm volt, míg a fejhúzás esetén ~8 és nyakhúzás esetén pedig ~15mm.



8. ábra. Kalibrált végeses elemes modellek és a mérések összehasonlítása

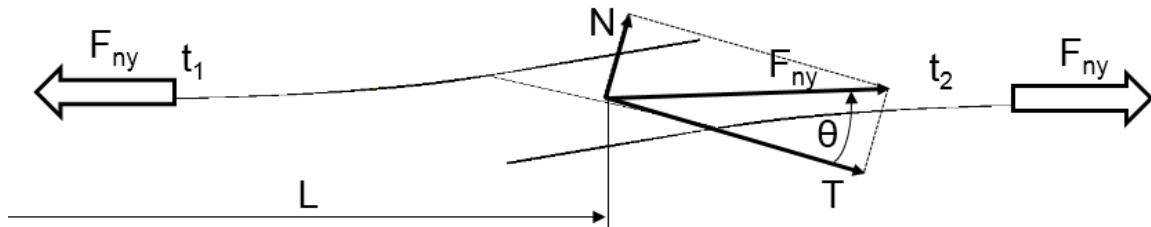
1. táblázat. CBUSH elem merevsége

Szabadságfok	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
K [N/mm]	950	950	950	10	10	10

3.1. A modell érzékenységeinek vizsgálata

Néhány, a modellezési eljárás során felmerülő kérdésre röviden kitérünk ebben az alfejezetben. Fontos kérdés, hogy mennyire tud elfordulni a két lemez egymáshoz képest, és az mennyire függ attól, hogy milyen széles a vizsgálat tárgyát képező lemez. A befogási hosszok kritikusnak tekinthetők olyan szempontból, hogy miként lehet az eredményeket ipari használatra átváltani, illetve a modell paramétereinek hatását is elemeztük.

A **9. ábra** a kötést oldalról mutatja, a nagyításnak köszönhetően jól látható, hogy a kötésben lévő lemezek hogyan viselkednek húzás hatására.



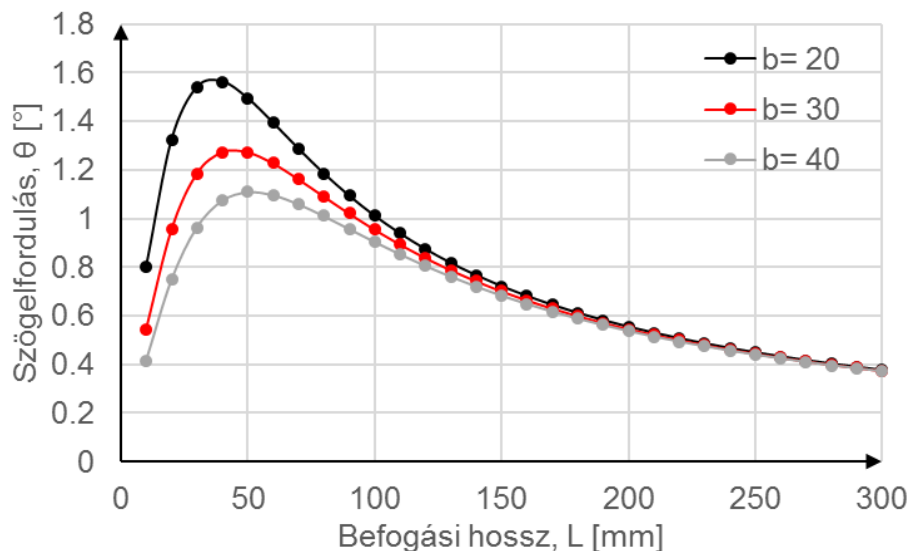
9. ábra. Deformált alak (5x-ös nagyítás) – kötéspont környezete és erőkomponensek magyarázata

A lemezek elforgását a befogás excentricitása okozza. Így itt érdemes megvizsgálni a próbatestek befogási hosszát szögelfordulás szempontjából (Coppieters, 2012).

Az F_{ny} erőt két komponensre bontva (N és T), felhasználva a rúdmeleletet, egyszerűen meghatározható a θ szög, amennyiben a két lemez azonos szélességű. Jelen esetben mindkét lemez 30 mm széles, így a szögelfordulás megadható a (1) összefüggés szerint.

$$\theta = \frac{6F_{ny}(t_1 + t_2)L}{Eb t_1^2 + 6F_{ny}L^2} \quad (1)$$

ahol L a befogási hossz, b a lemez szélessége. A **10. ábra** szemlélteti a befogási hosszok és a lemezek szélességének hatását a szögelfordulásra. Ahogy az várható volt, a növekvő keresztmetszet, növekvő másodrendű nyomatékkal jár, azaz csökkenti a szögelfordulás mértékét.



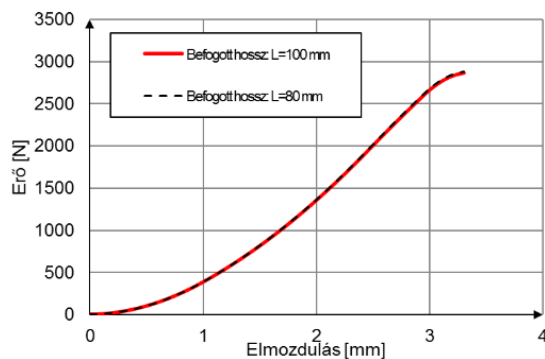
10. ábra. Szögelfordulás mértéke eltérő befogási hosszokkal és lemezszélesség mellett

Az egyszerűsített modellen két további vizsgálatot végeztünk el. Az egyik vizsgálat a próbatest szabad hosszának hatását, azaz mekkora része van a befogóban, vizsgálja. Az eredetinek tekintett kalibrált érték 100 mm. Ehhez képest rövidebb befogást alkalmazva nem találunk lényeges eltérést. Ek-

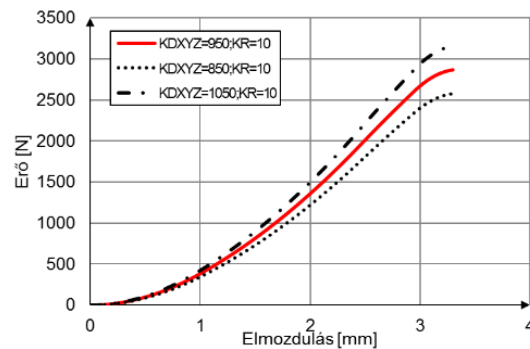
kor a lemezek szabad hossza 80 mm volt. Az összehasonlítást a **11. ábra** mutatja. A számítás szerint a szabad hosszra kevésbé érzékeny a kötés modell, ezt kísérleti úton még nem igazoltuk. A valós szerkezetekben ezt a tulajdonságot a kötések tervezésekor, azok számának, elrendezésének meghatározásakor lehet alkalmazni.

A **12. ábrán** a CBUSH elemtípus különböző beállításainak hatásának vizsgálatát mutatja. Ebben az esetben az elem merevségét elemeztük. Az ábrán KXYZZ-vel jelölt értékek a translációs merevségek, míg a KR a rotációs szabadságfokokhoz tartozó merevségeket jelölik. Ez utóbbi minden esetben azonos volt. A merevség ~10%-nyi változása az erőben is ~10%-nyi változást okozott.

A szimulációs feladatok megoldása során egyre nagyobb teret nyer az a felfogás, hogy az anyagok jellemzőit, terheléseket valószínűségi változóként kezeljük, ezáltal pontosabban meg lehet határozni a várható élettartamot vagy más kérdéses jellemzőt. Ehhez a modellezési módhoz nyújthat bemenő paramétert a CBUSH elem merevség változásának vizsgálata.



11. ábra. Befogási hossz hatása a nyíró-szakító vizsgálatra



12. ábra. A CBUSH elem merevsége a modellezett görbe alakjára

4. Összefoglalás

A cikkben bemutatásra került egy egyszerűsített modellezési eljárás, amelyet az ipari gyakorlatban alkalmazni lehet. Jelen tanulmányban az 1 mm vastag DP600 minőségű acéllemezek között alkalmazható egyszerűsített kötésekre érvényes paraméterek meghatározása megtörtént. A modellezési eljárás viszonylag egyszerű, ámbar iteratív módon határozhatók meg a modell paraméterei. A kísérleti eredményekkel összevetve a modellt, jó egyezést látunk. További vizsgálatok során meghatározható az egyszerűsített modell a többi, fő igénybevételi módra is. A cikkben néhány főbb paraméter hatását vizsgáltuk, amelyek szerint leginkább a CBUSH elem merevsége okozhat eltéréseket az ideálisnak tekintett állapothoz képest.

Az ipari gyakorlatban az egyszerűsített modellezés összetett szerkezetek vizsgálatára alkalmas. Azonban az összetett szerkezetek vizsgálatához szükség van az eltérő irányú egyszerűsített modellek meghatározására.

A modell érzékenységének meghatározásához további vizsgálatok szükségesek, egyrészt más anyagokra, anyagpárookra, eltérő kötésekre való paraméter meghatározás okán, másrészt összetett szerkezetek, kisminták vizsgálatával igazolható a modell helyessége.

További vizsgálatok és számítások elvégzésével a dinamikus behatások is vizsgálhatóvá válnak.

Irodalom

- [1] Varis, J. P. (2000). *A novel procedure for establishing clinching parameters for high strength steel*. Lappeenranta University of Technology, PhD disszertáció
- [2] Coppieters, S. (2012). *Experimental and numerical study of clinched connections*. KU Leuven, PhD disszertáció
- [3] 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*, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14902-8>
- [4] Mucha, J. (2017). Clinching technology in the automotive industry. *The Archives of Automotive Engineering*, 76(2), 75-94.
- [5] Tisza, M., Gál, G., Kiss, A., Kovács, P. Z., Lukács, Zs. (2014). Alakítható nagyszilárdságú lemezanyagok klincs kötése. *Multidiszciplináris tudományok*, 4(I), 49-58.
- [6] Kovács, P. Z., Tisza, M. (2016). Klincs kötés technológiai paramétereinek vizsgálata vége-selemes modellezéssel. *Anyagmérnöki Tudományok*, 39(1), 7-18.
- [7] Jónás, Sz., Kovács, P. Z. (2020). Klincs kötések kísérleti és szimulációs vizsgálatai – A bélyeg geometriájának hatása a kötésekre. *GÉP*, 61(1), 35-39.
- [8] Jónás, Sz., Tisza, M., Kovács, P. Z., Felhős, D.: *Experimental and numerical study of dissimilar sheet metal clinching*, 2019 AIP Conference Proceedings 2113, <https://doi.org/10.1063/1.5112585>
- [9] Khandoker, N., Takla, M. (2014). Tensile strength and failure simulation of simplified spot weld models. *Materials & Design*, (54), 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.070>
- [10] Zhang, S. (2004). *A simplified spot weld model for finite element analysis*. SAE Technical Paper Series, ISBN 0 7680 1424-7, <https://doi.org/10.4271/2004-01-0818>
- [11] Xu, S., Deng, X. (2004). An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joint. *Finite Elements in Analysis and Design*, (40), 1175-1194. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2003.08.006>
- [12] Breda, A., Coppieters, S., Debruyne, D. (2017). Equivalent modelling strategy for a clinched joint using a simple calibration method. *Thin-Walled Structures*, (113), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.002>
- [13] Breda, A., Coppieters, S., Kuwabara, T., Debruyne, D. (2018). The effect of sheet metal anisotropy on the calibration of an equivalent model for clinched connections. *OP Conf, Series: Journal of Physics: Conf, Series 1063, NUMISHEET2018* <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1063/1/012079>
- [14] Breda, A., Coppieters, S., Kuwabara, T., Debruyne, D. (2019). The effect of plastic anisotropy on the calibration of an equivalent model for clinched connections. *Thin-Walled Structures*, (145), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106360>
- [15] Carboni, M., Beretta S., Monno, M. (2004). Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(2), 178-190. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2005.04.004>