

KLINCS KÖTÉSEK VIZSGÁLATÁNAK EGYSZERŰSÍTETT MODELLEZÉSI LEHETŐSÉGEI

SIMPLIFIED MODELLING TECHNIQUES OF CLINCH JOINT EXAMINATIONS

*Jónás Szabolcs, szabolcs.jonas@gmail.com
Prof. Dr. Tisza Miklós, tisza.miklos@uni-miskolc.hu
Dr. Kovács Péter Zoltán, metkpz@uni-miskolc.hu*

ÖSSZEFOGLALÁS

A klincselte kötések a járműipar által gyakran alkalmazott kötéstechnológia. A klincselte kötések vékonylemezek között, helyi képlékeny alakváltozások útján kialakított oldhatatlan kötések. A szerszámok vagy a kötések tervezésekor szükségszerűen tudni kell a teherviselőképeség határát, így anyagvizsgálatokat kell végezni. Numerikus szimulációk segítségével a vizsgálatok száma jelentősen csökkenthető. Jelen cikk a klincselte kötések numerikus vizsgálatának egyszerűsített modellezési technikáiba enged bepillantást.

ABSTRACT:

The clinch joints are commonly used by the automotive industry. The clinch joints are produced in between thin sheets by a punch and a die during local plastic deformations. During the design of tools or the joints material testing is necessary to determine the load bearing capacity of the joints. The benefit of the numerical simulations is the reduced numbers of material tests during the design phase. The present article is dealing with simplified examinations of the clinch joints.

1. BEVEZETÉS

Az ipari gyakorlatban gyakran nincs idő és költségfedezet arra, hogy számításgényes feladatokat oldjunk meg. A valós szerkezetekben több, esetenként százak nagyságrendben található klincselte kötés. Ahhoz, hogy ezeket a kötések tudjuk vizsgálni vagy 3D-s szimulációkat kellene végezni, amelyek esetlegesen az újrakészítés miatt le sem futnának vagy túlságosan is időigényesek lennének. Célszerűbb olyan egyszerűsítéseket

keresni, 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 ponthegesztett kötések modellezésére ez egy bevett gyakorlat, míg klincselte 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 a számítási költség minden értelemben csökken.

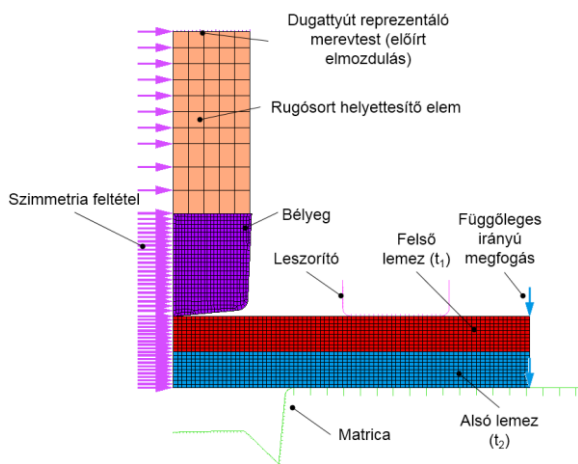
A klincselte kötések vizsgálatáról és modellezéséről korábbi tanulmányainkban olvashatnak [1-2].

2. DP600 KÖTÉSEK MODELLEZÉSE

Elsőként a végeelem modellt 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 [3] általános célú, nemlineáris végeelem rendszer. Ebben a programrendszerben a pre- és a postprocesszor, illetve a megoldó egy kezelői felületen érhető el.

A végeelem modell az 1. ábrán látható. Az ábra szerinti rugósort helyettesítő elem a mérésekhez használt TOX gyártmányú szerszám felépítése és az első számítási eredmények alapján lett feltételezve. A rugalmassága egy kalibrációs folyamat alapján került meghatározásra. A bélyeg anyaga rugalmas, de a rugalmassági modulusa nagyobb, mint az acélé

($E=20000$ GPa), így tulajdonképpen kvázi-merev. A szerszám többi része (matrica, leszorító és a dugattyút képviselő görbék) ideálisan merevnek tekinthető. A lemezek viselkedését rugalmas-képlékeny anyagtörvény szerint vesszük figyelembe. Az egyes elemek között súrlódást tételezünk fel. A végelem hálót négycsomópontú, lineáris négyszög (QUAD4, [3]) elemek alkotják. A kezdeti háló csak a bélyeg esetén automatikus. A lemezeket az alakítás során a kedvezőtlen háló torzulások miatt újraképezjük. Az újraképezés feltételei a szögtorzulás nagysága és az elemek penetrációja alapján lettek megállapítva, és a folyamat során csak négyszögelemek keletkeznek.



1. ábra. Végelem modell felépítése

A modellben a forgástengely mentén vízszintes megfogást alkalmaztam a csomópontokon, és a lemezek szélén egy-egy csomópontra adtam függőleges elmozdulás kényszert. A dugattyút szimbolizáló görbére előírt elmozdulást állítottam be, amely azonos a mérésekben tapasztaltakkal.

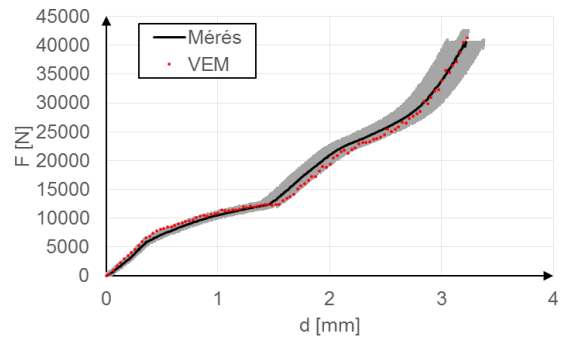
3D-s modell vizsgálata annak óriási számítási igénye miatt nem történt.

2.1. Modell helyességének igazolása

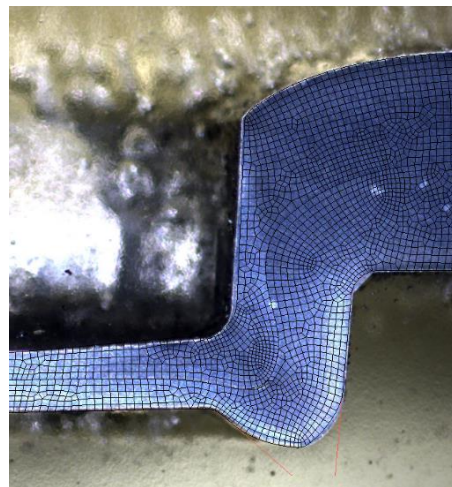
A 2. ábrán látható erő-elmozdulás (F-d) görbék összehasonlítása jó egyezést mutat. A mérési adatsort kibővítettem az adatpontok 5%-os hibaszámjával, amely területtel figyelembe tudjuk venni az esetleges pontatlanságokat mind a mérésben, mind a szimulációban.

A szimuláció eredményeként kapott pontozott görbe ezen a tartományon belül esik, tehát erőtan szempontból helyes. A 3. ábrán egy elkészült kötés keresztmetszete látható, amelyre az alakítást követő pillanatban kapott, már

deformálódott hálót illesztettem. Amint az látható, jó közelítéssel ráillik a csiszolatra.



2. ábra. Erő-elmozdulás összehasonlítása



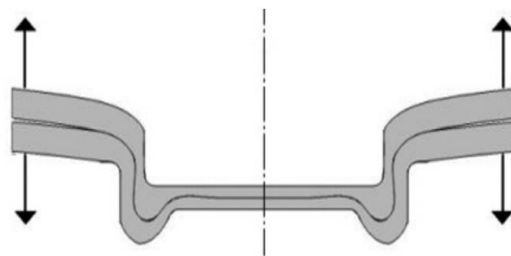
3. ábra. Mért és számított geometria összehasonlítása

3. EGYSZERŰSÍTETT VIZSGÁLATOK

Jelen cikkben az ún. fejhúzó vizsgálat és a nyírószaktó vizsgálat numerikus modellezését ismertetjük.

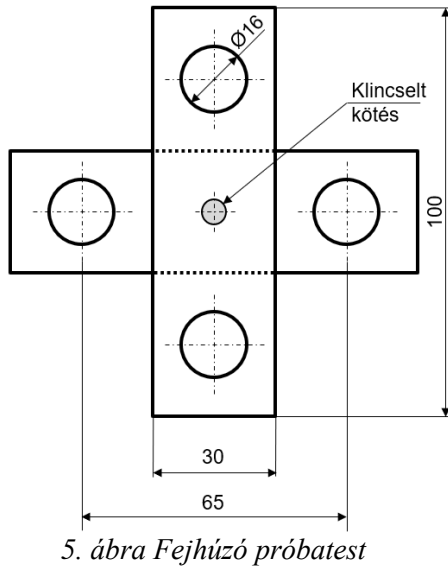
3.1. Fejhúzó vizsgálat modellezése

Számos kutatásban foglalkoznak a fejhúzó vizsgálat szimulációjával, mint numerikus anyagvizsgálati lehetőséggel, így például Coppieters [4] és de Paula és munkatársai [5]. A fejhúzás sematikus ábrázolását a 4. ábra mutatja.



4. ábra. Egyszerűsített fejhúzás sematikus ábrázolása [2]

A méréshez használt próbatest elrendezését sematikusan az 5. ábra mutatja. A két lemez ebben a helyzetben kereszt formában lett összekötve, és a furatokon keresztül történik a húzás, ehhez a lemezeket páronként meg kellett hajlítani.



5. ábra Fejhúzó próbatest

A 6. ábra a mérési elrendezést mutatja.



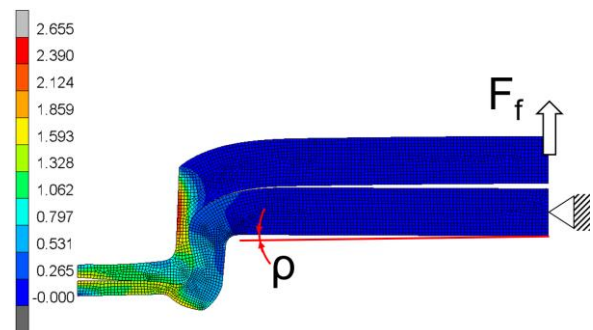
6. ábra Fejhúzás kísérleti elrendezése

Az alkalmazott modell mivel tengelyszimmetrikus, ezért korlátozott lehetőségek vannak az anyagvizsgálatok numerikus vizsgálatára. A fejhúzó vizsgálat jellegét tekintve azonban viszonylag hasonló elrendezésben történik.

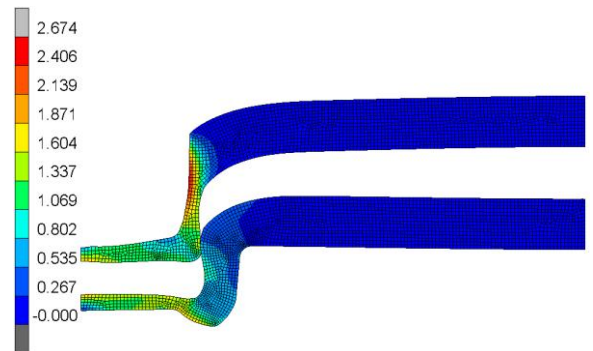
A végelem modell a kalibrált modellhez képesti eltérései a következők. Az összes szerszám a kötés létrejöttét követően

eltávolodik, azaz megszűnik közöttük az érintkezés. A függőleges irányú elmozdulást csomópontokon értelmezett elmozdulás kényszer helyett újabb merevtestekkel vettük figyelembe. A merev testek a lemezek függőleges élén állnak egymással ún. ragasztott kötésben. A felső lemezhez kötött merev test a szerszámok eltávolítását követően elkezdi eltávolodni függőlegesen fel, ezzel együtt magával vonszolva a lemezt. Az alsó lemez pedig egyhelyben marad az egész folyamat idején a 7. és 8. ábrák szerint.

A 7. ábrán ρ -val jelölt szög növekedése egészen a tönkremenetelig tart, mivel a felső lemez az F_f erő hatására igyekszik kigömbölni, és húzza magával az alsót.



7. ábra. Egyszerűsített fejhúzás végeelemes vizsgálata I.

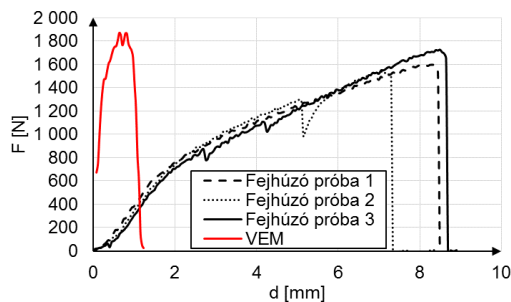


8. ábra. Egyszerűsített fejhúzás végeelemes vizsgálata II.

A modellezési elrendezés feltételezése szerint két tárcsát egy kör mentén megoszló erővel húzunk szét, ezzel szemben a kísérleti elrendezés lényegesen másabb. A valós mérés és a modell között fennálló különbségek hatása nem hanyagolható el, így tehát nem várható el, hogy a két eredmény erő-elmozdulás függvénye azonos legyen, azonban a kalibrált modell anyagának jellemzői és a kötés geometriai nagyfokú egyezése alapján jogos elvárás, hogy a

számított erő értéke jól közelítse a mérésből származót.

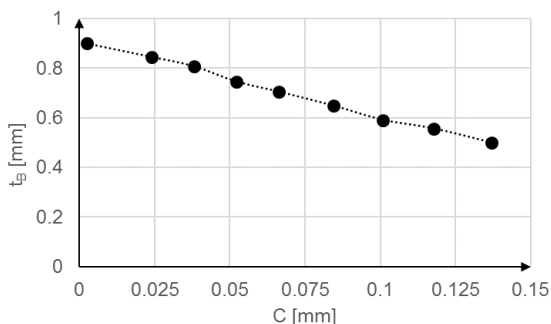
A méréssel összevetve igazolódik, hogy a modell és a kísérleti eredmények ebben az esetben nem teljesen hasonlíthatók össze, ugyanakkor a maximális erők értéke közel azonos, tehát a kötésre merőleges irányú teherviselőképesség becslésre ez a modell is alkalmas (9. ábra). A különbség $\sim 100\text{N}$, ami figyelembe véve a mérések közötti különbségeket, elfogadható mértékű. Coppieters [4] hasonló megfigyelést tett.



9. ábra Egyszerűsített fejhúzás és mérés összehasonlítása

Különböző fenékvastagságok esetén eltérő alámetszésekre jutunk, amely méret ebben a terhelési esetben különösen fontos geometriai jellemző. A kisebb alámetszés úgy valósítható meg, ha kisebb előírt elmozdulást írunk elő a dugattyút vezérlő elemre.

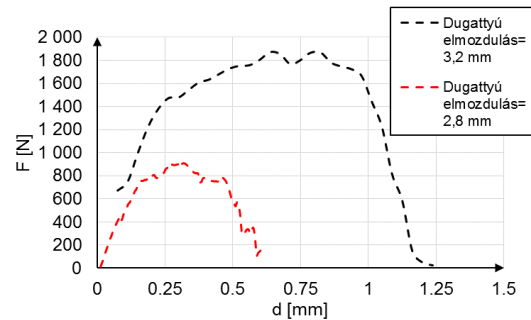
A maradó fenékvastagság és az alámetszés közötti közel lineáris összefüggés könnyen kihasználható a minőségi kérdések vizsgálatakor. A két mérőszám közötti kapcsolatot a 10. ábra mutatja. A kapcsolat előrejelzése várakozásaink szerint a szétgombolódáshoz szükséges erő értékének, azaz a teherviselőképességnek a csökkenése.



10. ábra Fenékvastagság és alámetszés kapcsolata

Ezt az állítást alátámasztja a következő numerikus vizsgálat, miszerint kisebb dugattyú

elmozdulást írunk elő a modellben, azaz nagyobb lesz a maradó fenékvastagság, ezáltal kisebb az alámetszés, tehát a kritikusnak értelmezett erő értéke is (11. ábra).



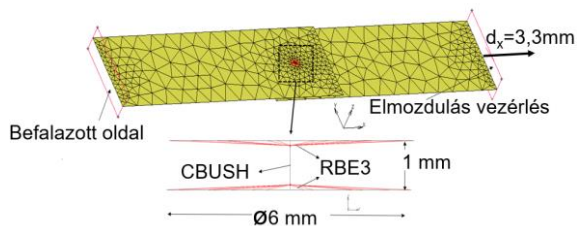
11. ábra Alámetszés csökkenésének hatása a fejhúzási erő értékére

3.2. Nyíró-szakító vizsgálat modellezése

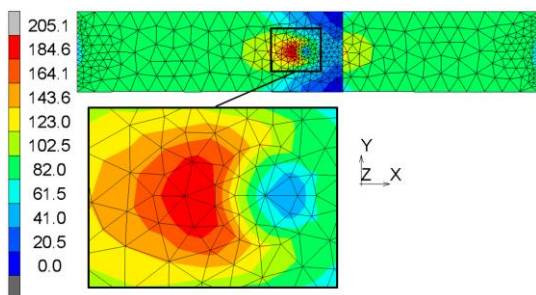
A kötések nyíró-szakító vizsgálata tengelyszimmetrikus esetben már nem értelmezhető, ezért szükségszerűen át kell térni 3D-ra, ezzel együtt az egyszerűsítés módjában is változtatni kell. A szakirodalomban főként ponthegesztésre találni példát, így [6-8]. Klincselte kötések egyszerűsített modellezésével Breda foglalkozott több tanulmányában [9-11].

Az itt bemutatott modell Breda munkájához hasonlóan épül fel, de más leírást használ. A modell a 12. ábra szerinti módon épült fel. A lemezek héj elemekből épültek fel, háromszögelemekkel behálózva. A lemezek anyagjellemzői rugalmas esetben $E=200\text{ GPa}$ és $\nu=0,3$, míg nemlineáris esetben a korábbi mérések alapján felvett folyásgörbék szerint vannak figyelembe véve. A modell elmozdulás vezérelt. Az egyszerűsített kötés 6 mm átmérőjű, a kötések külső átmérője alapján.

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 0D-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 [3].



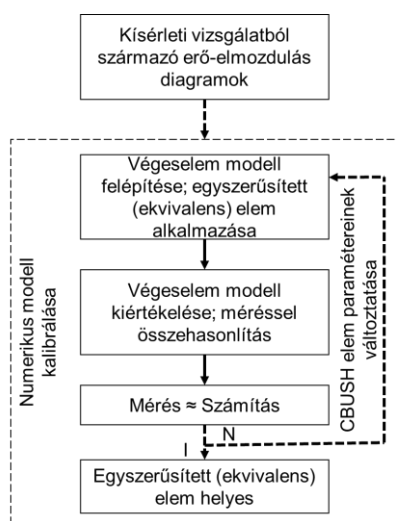
12. ábra Egyszerűsített nyíró-szakítóvizsgálati modell



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

Az egyszerűsített modell redukált feszültségeloszlását a 13. 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 Carboni et al. [12] fárasztó vizsgálatának eredményével, amelyekben a repedések a kötéspontra és az alakítatlan lemez határán keletkeztek és terjedtek a lemezek szélei felé.

Jelen modell kalibrálásának folyamatát a 14. ábra mutatja.



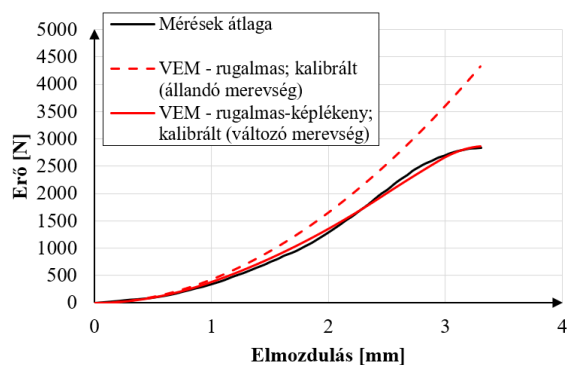
14. ábra Egyszerűsített modell kalibrálása

A modell kalibrálásához a kísérleti nyíró-szakító vizsgálatok erő-elmozdulás eredményeit használjuk, mint referencia, és a CBUSH elemek merevségét változtatva addig, amíg elfogadhatóan kicsiny mértékűre csökken a különbség a mérésből és a számításból kapott erő-elmozdulás görbék között. A számítás két változatban lett elvégezve, egy lineáris és egy nemlineáris esetre. A két számítás eredményeként kapott jelleggörbe a 15. ábrán a mérések átlagával összevetve látható.

A két számítás ugyanazon CBUSH merevségi értékek mellett lett (1. táblázat) elvégezve. A mérésrel összevetve kis különbség látható nemlineáris esetben, míg a lineáris modell lényegesen nagyobb erőt eredményezett. 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 megfelelő lehet.

1. táblázat. CBUSH elem merevsége

Szabadságfok	$D_x=D_y=D_z$	$R_x=R_y=R_z$
K [N/mm]	950	10



15. ábra Kalibrált végeelemes modellek és a mérések összehasonlítása

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az egyszerűsített modellezés segítségével a költséges kísérletek számát lehet csökkenteni. A modellezés során azonban óhatatlanul szükség van olyan bemeneti paraméterekre, amelyeket kizárólag kísérleti úton lehet meghatározni. A megfelelő egyszerűsítéseknek köszönhetően a módszer hatékony, és viszonylag gyorsan meg lehet határozni azokat az értékeket (erők, elmozdulások vagy éppen kötésgeometriai méretek), amelyekre szükség van a felmerülő probléma vizsgálatához.

Továbbfejlesztési lehetőség, hogy 3D-ban a jellegzetes terhelések vizsgálati módszereit modellezzük, illetve összetett szerkezetekre is igazoljuk a modellezési eljárás hatékonyságát, és helyességét.

5. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

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

6. IRODALOM

- [1] Jónás Sz., Tisza M.: Experimental study on DP600 clinched joints, *Metallurgy and Foundry Engineering*, 2018, 44:1 pp.31-40
- [2] Jónás Sz., Tisza M.: Finite Element Modelling of Clinched Joints, *Advanced Technologies & Materials*, 2018, 43:1
- [3] MSC.Marc&Mentat 2019 – User’s Guide
- [4] Coppieters, S.: Experimental and numerical study of clinched connections, KU Leuven, PhD disszertáció, 2012
- [5] de Paula, A. A., Aguilar, M. T. P., Pertence A. E. M., Cetlin, P. R.: Finite element simulation of the clinch joining of metallic sheets, *Journal of Material Processing Technology* 182, 2007 pp. 352-357
- [6] Khandoker, N., Takla, M.: Tensile strength and failure simulation of simplified spot weld models, *Materials & Design*, 2014, vol. 54. pp. 323-330.
- [7] Zhang, S.: A simplified spot weld model for finite element analysis, *SAE Technical Paper Series*, 2004, ISBN 0 7680 1424-7
- [8] Xu, S., Deng, X.: An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joint, *Finite Elements in Analysis and Design* 40., 2004, pp. 1175-1194
- [9] Breda, A., Coppieters, S., Debruyne, D.: Equivalent modelling strategy for a clinched joint using a simple calibration method, *Thin-Walled Structures* 113., 2017, pp. 1-12
- [10] Breda, A., Coppieters, S., Kuwabara, T., Debruyne, D.: 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, 2018
- [11] Breda, A., Coppieters S., Kuwabara, T., Debruyne, D.: The effect of plastic anisotropy on the calibration of an equivalent model for clinched connections, *Thin-Walled Structures*, 2019, Vol. 145

- [12] Carboni, M., Beretta, S., Monno, M.: Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, Vol. 73., Iss. 2, pp.178-190