



# HODNOTENIE A OPTIMALIZÁCIA VLASTNOSTÍ MECHANICKÝCH SPOJOV A SPÁJATEĽNOSTI MATERIÁLOV VYTVORENÝCH METÓDOU CLINCHING PROSTREDNÍCTVOM POČÍTAČOVEJ SIMULÁCIE

## THE EVALUATION AND OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CLINCHED JOINTS AND JOINABILITY OF MATERIALS VIA COMPUTER SIMULATION

René KUBÍK – Ľuboš KAŠČÁK

**Abstract:** The application of finite element analysis in the field of mechanical joining by means of Clinching is a powerful and effective way to identify their mechanical properties and subsequent reverse optimization of the joining process and its parameters. These results are utilized for the improvement of joining process. This contribution demonstrates the application of finite element method in the field of evaluation of mechanical properties of the mechanically clinched joints. These joints can be produced under various conditions. Most frequently, the results of the finite element method are utilized for reverse optimization of the joinability of materials.

**Abstrakt:** Aplikácia metódy konečných prvkov je v oblasti mechanického spájania Clinching rýchlym a efektívnym nástrojom pre identifikáciu ich mechanických vlastností a zároveň prostriedkom pre spätnú optimalizáciu parametrov procesu za účelom jeho zlepšenia. Tento príspevok demonštruje využitie metódy konečných prvkov pri hodnotení mechanických vlastností spojov, ktoré boli vyrobené metódou Clinching v rôznych prevedeniach. Výsledky počítačovej simulácie sú najčastejšie spätne využívané na zlepšenie spájateľnosti materiálov.

**Keywords:** Mechanical properties, evaluation, joints, joinability.

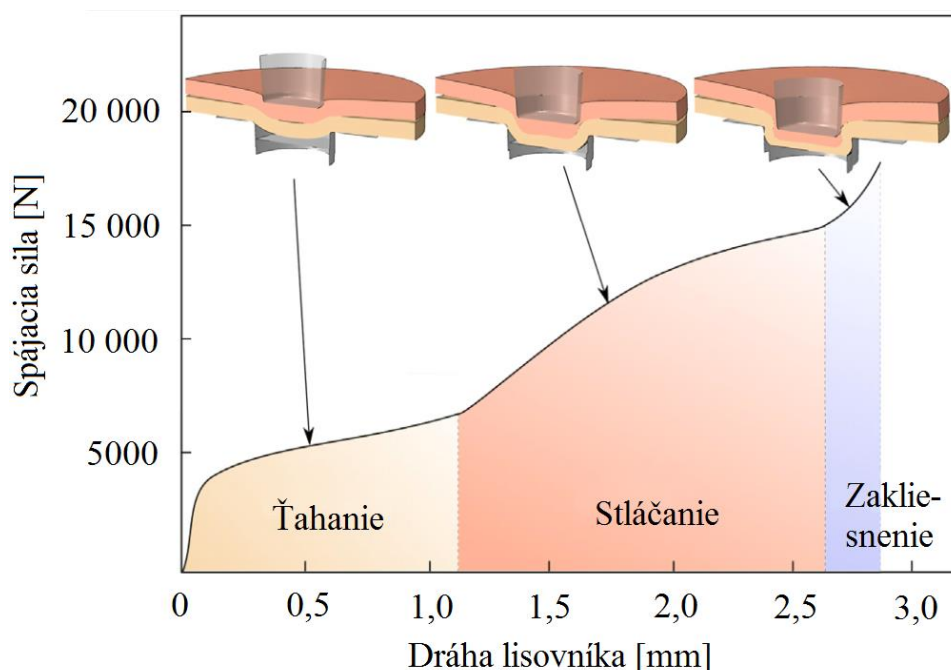
**Kľúčové slová:** Mechanické vlastnosti, hodnotenie, spoje, spájateľnosť.

### Úvod

Výhody mechanického spájania Clinching voči konvenčnému bodovému odporovému zváraniu boli dokázané experimentmi a publikované vo veľkom množstve vedeckých prác. Avšak použitie tejto metódy pre nové, či progresívne materiály môže byť problematické, ak sa spájanie realizuje štandardnými nástrojmi, ktoré sú určené na použitie pre „bežné“ materiály. [1] V takých prípadoch nie je zabezpečené vytvorenie funkčného spoja s odpovedajúcimi vlastnosťami, či garantovaná životnosť samotných nástrojov (lisovníka a lisovnice). Problematickú kategóriu predstavujú najmä materiály s vyšším pevnostnými vlastnosťami, či nedostatočnou tvárnosťou alebo odlišným mechanizmom deformačného spevnenia za studena. V takých prípadoch dochádza k zmene parametrov procesu spájania, zvyšuje sa najmä spájacia sila, alebo zdvih lisovníka. Takého úpravy však vedú k zvýšenému opotrebovaniu činných častí nástroja, či vzniku trhliny v plechoch z dôvodu vzniku vysokého napätia v spájaných materiáloch. Samostatnou kapitolou v tomto prípade je spájanie materiálov na báze zliatin hliníka. [2] Výrobu kvalitných mechanických spojov ovplyvňuje a zároveň sťažuje aj kombinovanie obťažne spájateľných materiálov, ako napríklad

spomínané zliatiny hliníka a ocele s vyššími pevnostnými vlastnosťami, známe pod skratkou AHSS ocele. Preto je aplikácia metódy konečných prvkov v takýchto prípadoch nevyhnutná, aby sa mohli virtuálne hodnotiť mechanické vlastnosti vytvorených spojov a následne späť optimalizovať geometriu lisovníka a lisovnice, alebo parametrov procesu, ako napríklad zdvih lisovníka, spájacia sila, či pridržiavacia sila a pod. [3] Metóda konečných prvkov je často využívaná aj pre hodnotenie vlastností mechanických spojov, ktoré vznikli inovovaním konvenčného procesu Clinching (CL).

Mechanické spájanie materiálov Clinching je považované za vysoko flexibilnú techniku spájania aplikovateľnú pre široké spektrum materiálov. Spájanie dvoch alebo viacerých materiálov je realizované prostredníctvom vytvorenia ich vzájomného zakliesnenia pomocou aktívnych častí nástroja: lisovníka a lisovnice. Hlavné etapy spájania, ako aj vývoj sily spájania v závislosti od dráhy lisovníka sú zobrazené v obr. 1. V obrázku sú zároveň zobrazené deformované plechy v jednotlivých etapách spájania.

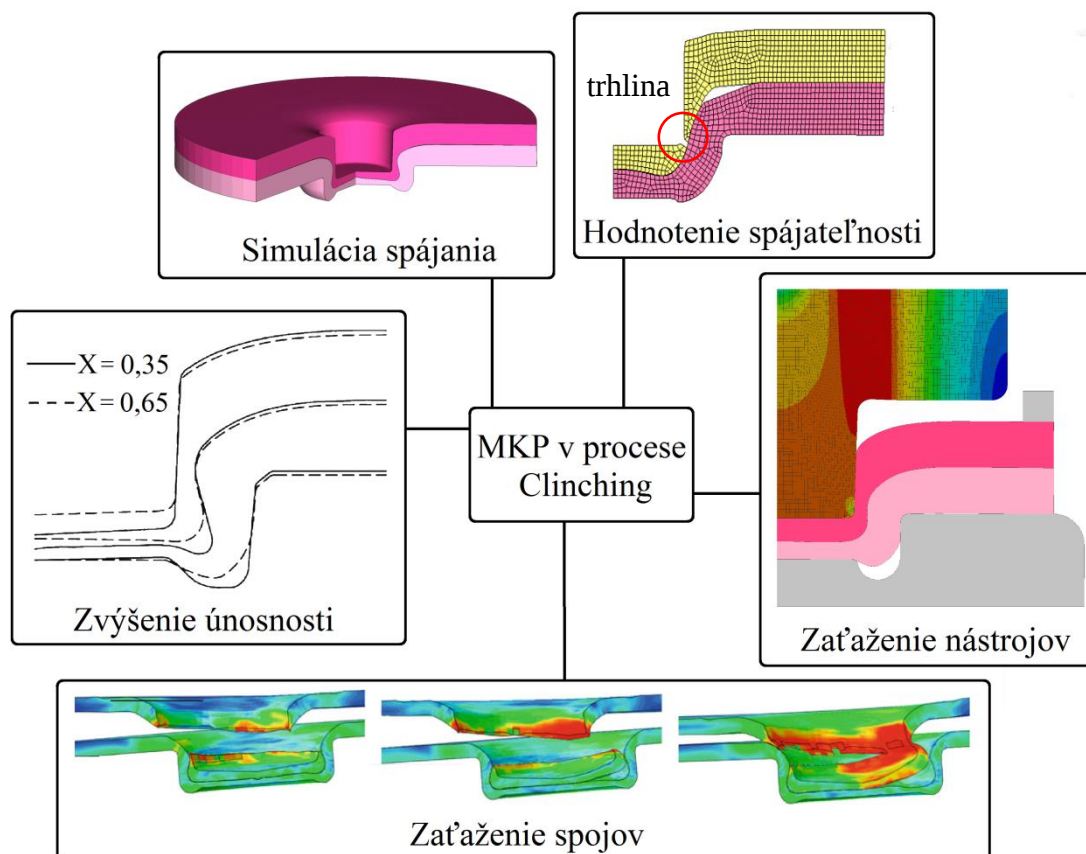


Obr. 1 Závislosť spájacej sily od dráhy lisovníka a hlavné etapy pri spájaní Clinching [4]

V počiatočnej fáze spájania sú (v tomto prípade) dva materiály vo forme plechov vťahované lisovníkom do dutiny lisovnice. V tomto prípade obrázok 1 zobrazuje etapy spájania s použitím pevnej lisovnice, lisovnica však môže byť v prevedení s pružnými (pohyblivými) segmentmi, kedy tieto segmenty sa pohybujú spolu s deformovaným materiálom v radiálnom smere. V etape stláčania dochádza k redukcii hrúbky oboch spájaných materiálov vplyvom tlakového účinku lisovníka na spájané materiály. V poslednej fáze spájania zvanej zakliesnenie sa medzi spájanými materiálmi formuje v zvislom smere tzv. zakliesnenie, pri ktorom obe plechy „prúdia“ v radiálnom smere v dutine lisovnice. Miesto, kde v zvislom smere oba plechy vytvoria charakteristický „S“ tvar nazývame krk spoja a v tomto mieste dochádza k výraznému stenčeniu plechu na strane lisovníka, čo v niektorých prípadoch môže viesť k jeho pretrhnutiu. Aj z tohto dôvodu je pri posudzovaní spájateľnosti jednotlivých



materiálov aplikovaná vo veľkej miere metóda konečných prvkov, v ktorej je implementovaný model pre iniciáciu a šírenie trhliny. Takáto simulácia následne poskytuje informáciu, či sa plech špecifického materiálu za daných podmienok spájania pretrhne. Na obr. 2 sú zobrazené hlavné oblasti využitia MKP pri simulácii procesu Clinching.



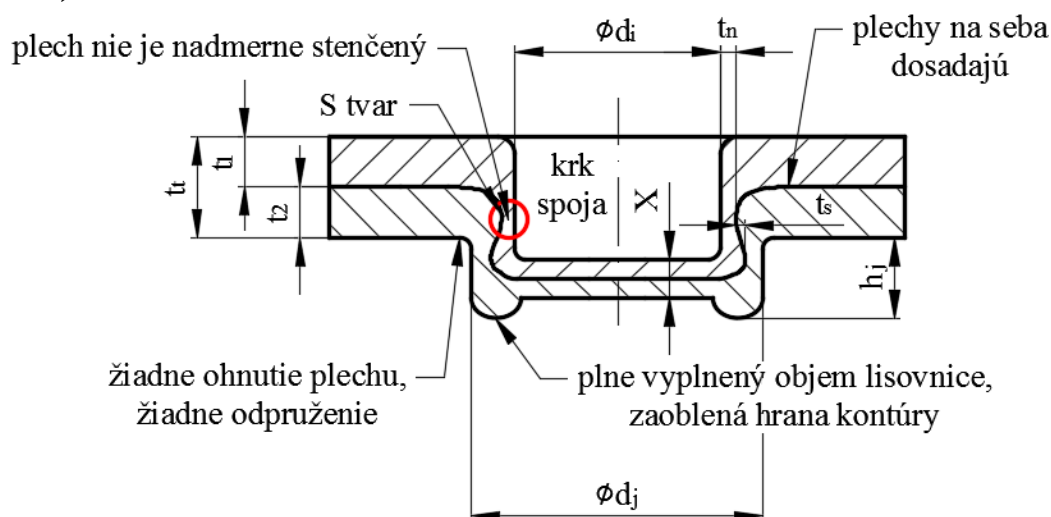
Obr. 2 Aplikácia metódy konečných prvkov v oblasti mechanického spájania Clinching [5,6]

Z obr. 2 vyplýva, že MKP sa v oblasti simulovania mechanického spájania Clinching využíva najmä na: simuláciu spájania, kde sa následne sledujú v spájaných materiáloch vybrané parametre (napríklad napätie, deformácia, materiálový tok a pod.); hodnotenie spájateľnosti, kde je do materiálového modelu spájaných materiálov zakomponovaný model pre iniciáciu a následné šírenie trhliny (pre materiály ktoré sú rizikové z pohľadu spájania metódou CL); zaťaženie nástrojov, kde napätie a deformácie sa sledujú nie v spájaných materiáloch, ale v nástrojoch ktoré sú modelované ako deformovateľné telesá; zaťaženie spojov, kde sa na tzv. virtuálnych spojoch realizujú tzv. virtuálne skúšky spojov, ktoré umožňujú hodnotenie mechanických vlastností spojov bez nutnosti ich reálnej výroby (postup by však mal byť verifikovaný reálnym experimentom pred jeho aplikáciou do praxe); zvýšenie únosnosti, ktoré sa týka priamo geometrie spojov samotných, alebo nástrojov prostredníctvom ktorých sú spoje vytvorené, pričom simuláciou sa determinuje vplyv jednotlivých parametrov na výslednú únosnosť mechanického CL spoja. V obr. 2 sú zobrazené hlavné oblasti aplikácie metódy konečných prvkov v oblasti mechanického spájania Clinching, pričom prostriedky

počítačovej simulácie môžu byť využité aj napríklad na simulovanie (testovanie) nových prevedení metódy Clinching, alebo zmeny parametrov procesu (veľkosť spájacej sily, pridržiavacej sily, či zdvih lisovníka a pod.), či napríklad sledovanie zaťaženia rámu stroja.

### Aplikácia MKP pre optimalizáciu geometrie mechanických CL spojov a spájateľnosti materiálov

Aj keď sa na prvý pohľad jedná o dve odlišné oblasti, v niektorých prípadoch sú simulácie týchto dvoch oblastí úzko spojené, nakoľko spájateľnosťou materiálov (vo vzťahu k spájaniu Clinching) rozumieme schopnosť špecifických materiálov vytvoriť kvalitný CL spoj s požadovanými mechanickými a vizuálnymi vlastnosťami, ale najmä s požadovanou únosnosťou pri špecifickom type zaťaženia. Geometria tzv. ideálneho mechanického CL spoja a zároveň jeho hlavné charakteristické rozmery sú zobrazené v obr. 3 (prevedenie s pevnou lisovnicou).



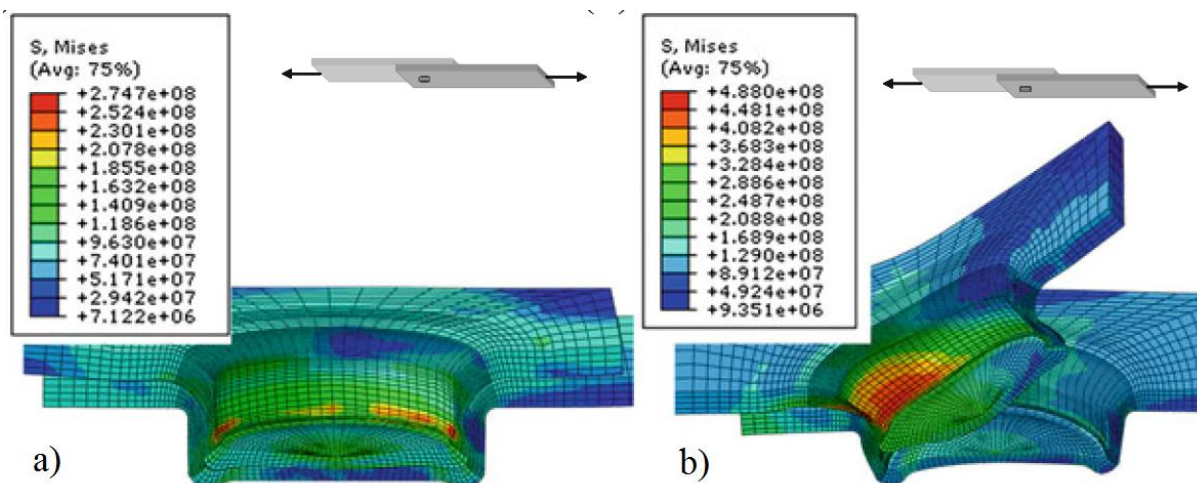
Obr. 3 Geometria ideálneho CL spoja a jeho základné parametre

Kde:  $t_n$  hrúbka krku spoja,  $d_j$  priemer spoja,  $X$  hrúbka dna spoja,  $t_r$  celková hrúbka plechov,  $t_s$  hrúbka zakliesnenia,  $h_j$  výška spoja,  $t_1$  a  $t_2$  hrúbka spájaných plechov.  $d_i$  vnútorný priemer spoja. U simulácií ktoré sú realizované za účelom optimalizácie geometrie spoja, či hodnotenia mechanických vlastností sa najčastejšie sledujú parametre  $X$ ,  $t_n$  a  $t_s$ , pretože tieto parametre priamo ovplyvňujú výslednú únosnosť spoja a vlastnosti spoja. Tieto vybrané parametre však úzko súvisia s geometriou použitých nástrojov (lisovníka a lisovnice).

Jedným z prípadov, kde sa kombinuje simulovanie spájateľnosti materiálov a zároveň hodnotenie vlastností mechanických spojov je prípad, kedy sa overuje spájanie nových kombinácií materiálov. Takýto typ simulácie si vyžaduje kompletnú predošlú simuláciu spájania, pretože do nasledujúcej simulácie hodnotenia mechanických vlastností spoja je nutné zadať informácie o predošlom deformačnom spevnení spájaných materiálov v priebehu vytvárania mechanického spoja. Na obr. 4 sú zobrazené výsledky simulácie ťahovej skúšky mechanických spojov, kedy boli spájané materiály antikoročná oceľ a mosadz. Oceľový plech bol situovaný na strane lisovníka a plech z mosadze na strane lisovnice. Spájané materiály boli o hrúbke 1 mm, bola použitá lisovnica s pohyblivými

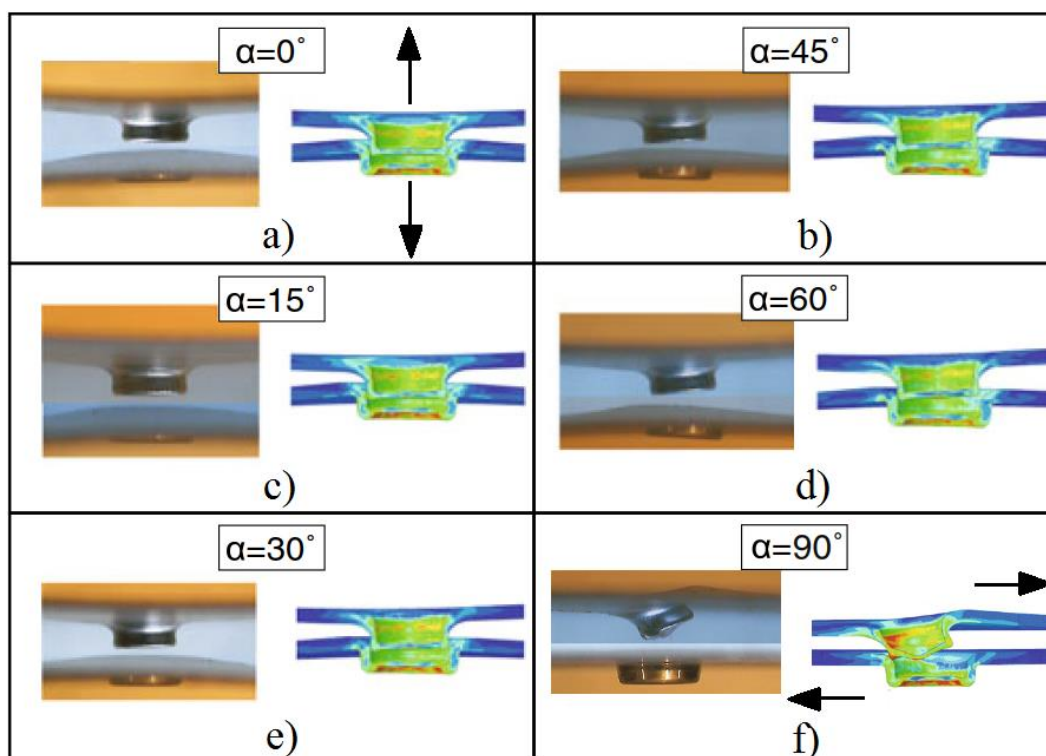


segmentmi. Obrázok 4a zobrazuje rozloženie napätí v plechoch pri posunutí (dráhe) 0,16 mm a obr. 4b pri posunutí 3,16 mm.



Obr. 4 Rozloženie napätí v plechoch v priebehu ťahovej skúšky spoja [7]

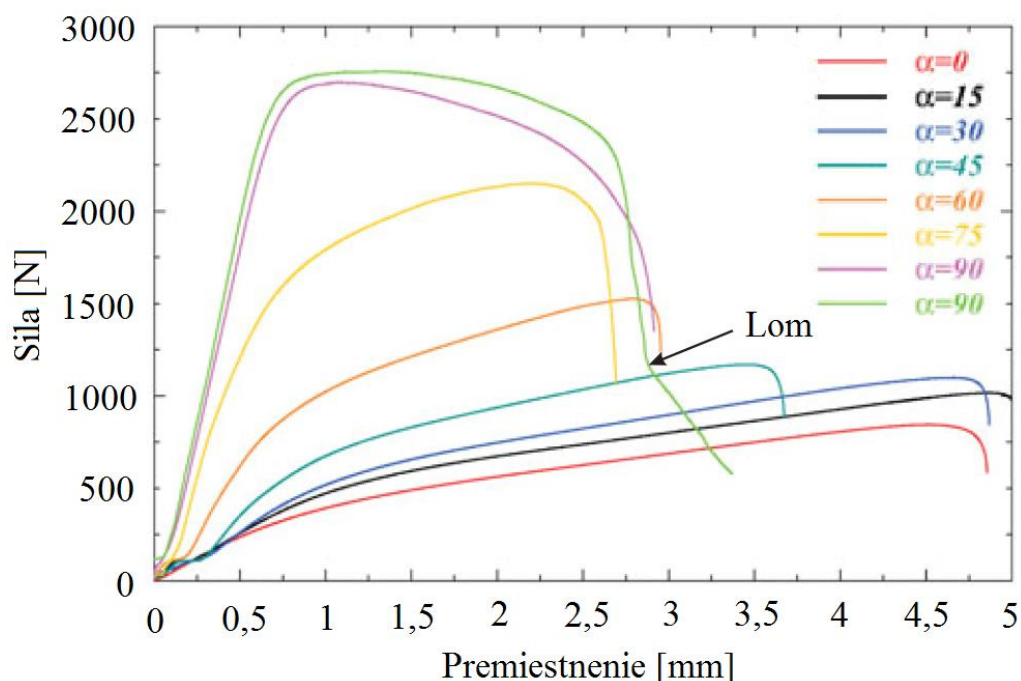
Za účelom verifikácie modelu pre počítačovú simuláciu sú následne sledované a porovnávané krivky únosnosti spojov, teda veľkosť zaťaženia potrebného na porušenie spoja v závislosti od dráhy. Výsledné hodnoty síl a tvar kriviek (získanej experimentom a simuláciou) by sa mali zhodovať v rámci dovolených odchýlok. V prípade zobrazenom v obr. 4 bol rozdiel medzi silami v krivkách získaných experimentom a simuláciou 5%.



Obr. 5 Výsledky experimentu a simulácie pri rôznych smeroch zaťaženia CL spoja [6]



Vlastnosti mechanických CL spojov možno hodnotiť aj v rôznych smeroch zaťaženia. Obr. 5 zobrazuje výsledky simulácie statického zaťaženia mechanického spoja v rôznych smeroch zaťaženia (premenlivý parameter  $\alpha$ ), pričom uhol pôsobiacej sily (zaťaženia) ( $\alpha$ ) bol menený v smere kolmom na rovinu plechu. Ako spájané materiály bola použitá hlbokoŕažná oceľ akosti DC05 o hrúbke 1 mm. Uhol bol menený od  $0^\circ$  (namáhanie spoja na ťah, obr. 5a) do  $90^\circ$  (namáhanie spoja na strih, obr. 5f) v intervaloch po  $15^\circ$ . V priebehu každej simulácie (obr. 5a - 5f) bola zaznamenávaná sila potrebná na porušenie spoja. Priebehy síl pre jednotlivé smery pôsobenia zaťaženia sú zobrazené v obr. 6.



Obr. 6 Ťahové diagramy jednotlivých spojov pre jednotlivé smery zaťaženia [6]

Simuláciou bolo zistené, že mechanické CL spoje majú najvyššiu únosnosť pri statickom zaťažení spoja strihom (obr. 6 -  $90^\circ$ ). Únosnosť mechanického spoja o vonkajšom priemere 10 mm a smere zaťaženia  $90^\circ$  (strih) sa pohyboval na úrovni 2750 N. U spomínaného spoja došlo ako u jediného k jeho porušeniu. Spoj zaťažený ťahom (obr. 6 -  $0^\circ$ ) dosiahol v porovnaní so spojom s najvyššou únosnosťou približne 50% jeho únosnosti. Na základe výsledkov počítačovej simulácie možno následne vybrať optimálny spoj pre daný typ zaťaženia, či výsledky použiť ako podklad pre ďalšie simulácie s cieľom optimalizovať tvar a rozmery spoja, či procesné parametre pre zvýšenie únosnosti spoja pre špecifický typ (smer) zaťaženia.

## Záver

Metóda konečných prvkov je veľmi efektívnym a užitočným nástrojom pri návrhu, optimalizácii a hodnotení vlastností mechanických spojov, ktoré vznikli spájaním Clinching. V príspevku boli prezentované hlavné oblasti využitia a ukážky využitia prostriedkov počítačovej simulácie so zreteľom na hodnotenie a optimalizáciu vlastností mechanických spojov. Výsledky počítačovej simulácie sú často doplnené výsledkami experimentov, aby mohli byť simulácie verifikované priamym porovnaním vybraných sledovaných



parametrov simulácie a experimentu. Výsledky simulácií môžu byť použité ako podklad pre ďalšie simulácie za účelom optimalizácie (vo väčšine prípadoch) najmä únosnosti spojov.

### **Použitá literatúra**

- [1] ABE, Y. et al: Improvement of Joinability in Mechanical Clinching of Ultra-High Strength Steel Sheets Using Counter Pressure with Ring Rubber. In: Procedia Engineering. Vol. 81, No. 11 (2014). ISSN 1877-7058, p. 2056-2061.
- [2] ABE, Y. - MORI, K. - KATO, T.: Joining of High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Mechanical Clinching with Dies for Control of Metal Flow. In: Journal of Materials Processing Technology. Vol. 212, No. 2 (2012), p. 884-889.
- [3] DE PAULA, A. A. et al: Finite Element Simulations of the Clinch Joining of Metallic Sheets. In: Journal of Materials Processing Technology. Vol. 182, No. 1 (2007). ISSN 0924-0136, p. 352-357.
- [4] LAMBIASE, F.: Clinch Joining of Heat-Treatable Aluminium AA6082-T6 Alloy Under Warm Conditions. In: Journal of Materials Processing Technology. Vol. 225, No. 17 (2015). ISSN 0924-0136, p. 421-432.
- [5] KAMBLE, P. - MAHALE, R.: Simulation and Parametric Study of Clinched Joint. In: International Research Journal of Engineering and Technology. Vol. 3, No. 5 (2016). ISSN 2395-0056, p. 2730-2734
- [6] COPPIETERS, S. et al: Numerical and Experimental Study of the Multi-Axial Quasi-Static Strength of Clinched Connections. In: International Journal of Material Forming. Vol. 6, No. 11 (2013). ISSN 1960-6214, p. 437-451.
- [7] SADOWSKI, T. - BALAWENDER, T. - GOLEWSKI, P.: Technological Aspects of Manufacturing and Numerical Modeling of Clinch-Adhesive Joints. Lublin: Springer International Publishing, 2015, ISBN 978-3-319-14902-8.

### **Kontakt**

doc. Ing. Ľuboš Kaščák, PhD.

Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra počítačovej podpory technológií, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, Slovensko  
e-mail: lubos.kascak@tuke.sk

Ing. René Kubík

Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra počítačovej podpory technológií, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, Slovensko  
e-mail: rene.kubik@tuke.sk