



OPTIMALIZÁCIA GEOMETRIE NÁSTROJOV PRE MECHANICKÉ SPÁJANIE MATERIÁLOV METÓDOU CLINCHING S VYUŽITÍM MKP

THE UTILIZATION OF FEM FOR OPTIMIZATION OF GEOMETRY OF TOOLS FOR MECHANICAL JOINING OF MATERIALS BY MEANS OF CLINCHING

Ľuboš KAŠČÁK– René KUBÍK

Abstract: The main goal of this contribution is to describe the utilization of numerical methods, specifically finite element method, during optimization of the geometry of active parts of tool for mechanical joining of materials by means of Clinching - the punch and die. Finite element method is considered as very effective tool in cases when the tool's shape, its dimensions, or process parameters have to be optimized according to specific criteria. The most significant criterion in relation to the optimization of the tool's geometry is the load-bearing capacity of mechanically clinched joints.

Abstrakt: Cieľom tohto príspevku je popísať využitie simulačných prostriedkov, konkrétne metódy konečných prvkov pri optimalizácii geometrie aktívnych častí tvoriacich nástroj pre mechanické spájanie materiálov metódou Clinching - lisovníka a lisovnice. Metóda konečných prvkov je veľmi efektívnym nástrojom v prípade, že je nutné optimalizovať tvar, rozmery nástrojov, či parametre procesu a to na základe daných špecifických kritérií. Za najčastejšie a najvýznamnejšie kritérium ku ktorému je proces optimalizácie vzťahovaný je považovaná únosnosť mechanických spojov.

Keywords: Optimization, punch, die, geometry, FEM.

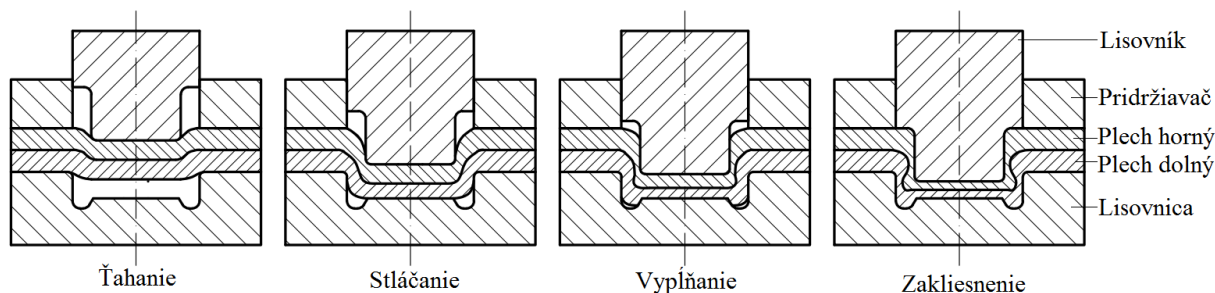
Kľúčové slová: Optimalizácia, lisovník, lisovnica, geometria, MKP.

Úvod

Automobilové karosérie sa postupným vývojom stávajú čoraz viac komplexnejšie konštrukcie z hľadiska použitých materiálov, pričom každý materiál v konštrukcii zohráva svoju špecifickú úlohu. Materiály pre automobilový priemysel sú taktiež predmetom intenzívnej vývoja, čoho výsledkom je aplikácia materiálov ako: vysokopevné ocele, hliník a jeho zliatiny, antikorózna oceľ, spevnené polyméry, či zliatiny horčíka. Spájať takéto materiály a ich kombinácie si vyžaduje nové, či modifikované už existujúce spájacie metódy a techniky. Jednou z takýchto metód je mechanické spájanie materiálov, ktoré nesie názov Clinching, pričom metóda zvykne byť označovaná aj ako tlakové spájanie materiálov, alebo spájanie plastickou deformáciou. Clinching (ďalej označované skratkou CL) je kombináciou ťahania a tvárnenia, kde dochádza k vzájomnému zakliesneniu spájaných materiálov, ktoré sú najčastejšie vo forme plechov. [1] Lisovník vťahuje oba materiály do dutiny lisovnice, pričom horná vrstva materiálu sa plasticky deformuje v tej spodnej vrstve tak, aby nedošlo k vytiahnutiu hornej vrstvy (plechu) zo spodnej vrstvy (spodného plechu). Najčastejším prevedením je spájanie dvoch vrstiev materiálu, avšak prostredníctvom metódy možno spájať aj viacero vrstiev. Spájané materiály by mali vykazovať dostatočnú úroveň húževnatosti, aby bol vytvorený mechanický spoj s požadovanými pevnostnými vlastnosťami. Postup spájania dvoch materiálov vo forme plechov je zobrazený v obr. 1. Tento postup zobrazuje prevedenie

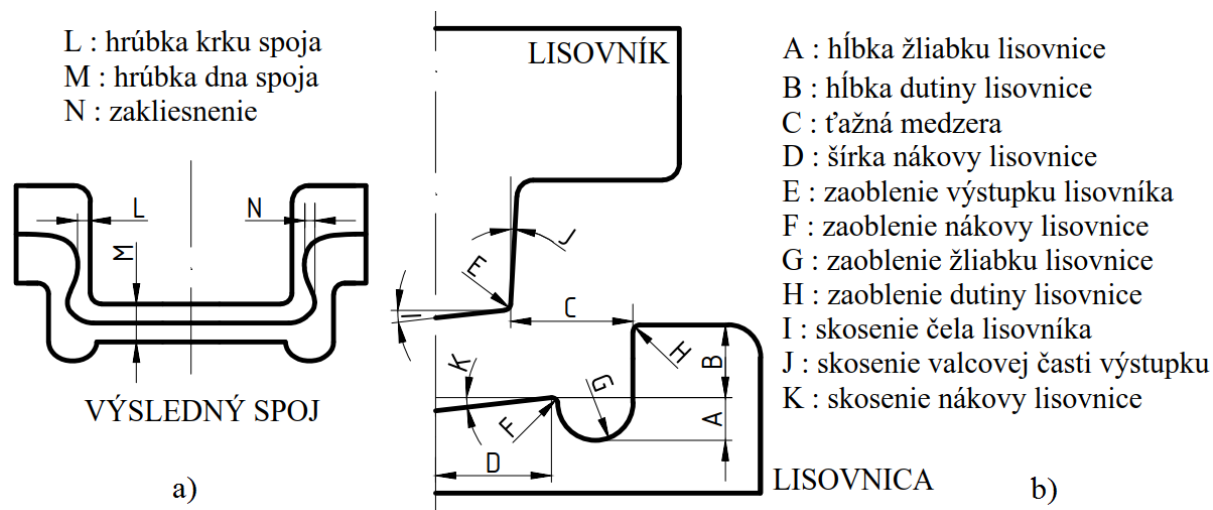


metódy na jeden zdvih lisovníka, s použitím pridržiavača plechov a tzv. pevnej lisovnice. Proces formovania spoja je rozdelený do štyroch charakteristických etáp: ťahanie, stláčanie, vyplňanie a zakliesnenie. Tieto etapy nesú názov na základe prevládajúcej charakteristickej deformácie spájaných materiálov.



Obr. 1 Postup spájania dvoch plechov pri mechanickom spájaní Clinching [2]

Spájanie plechov prostredníctvom metódy CL má tieto základné charakteristiky: proces prebieha za studena, resp. pri teplote okolia - v spájaných materiáloch nedochádza k zmene štruktúry, sú iba deformačne spevnené, zvyškové napätia vyvolané tepelnými účinkami v materiáli nie sú prítomné - v porovnaní so zváraním, spájané materiály môžu byť odlišného charakteru (napríklad oceľ a hliník) a zároveň hrúbky - vzniká veľký priestor pre možnosti kombinovania jednotlivých materiálov, pri tomto prevedení CL spájania nie je potrebné spájané materiály vopred upravovať, v prípade prítomnosti povrchovej vrstvy je táto vrstva po spájaní neporušená, proces formovania spoja je rýchly - jeho trvanie je približne 1 s. [3] Geometria aktívnych častí nástroja pre CL (ktorými sú lisovník a lisovnica) sú dôležitým faktorom ktorý priamo ovplyvňuje výslednú kvalitu spoja, ale najmä jeho únosnosť v rôznych typoch zaťaženia. Dôležité geometrické parametre lisovníka a lisovnice sú zobrazené v obr. 2b.



Obr. 2 Základné parametre aktívnych častí nástroja (lisovníka a lisovnice) (b) a spoja (a) [4]

Geometrické parametre uvedené v obr. 2b priamo ovplyvňujú aj výsledné geometrické parametre mechanického spoja, z ktorých medzi najdôležitejšie patrí hrúbka tzv. krku spoja, v miera vzájomného zakliesnenia plechov a hrúbka dna spoja. Najdôležitejšie parametre

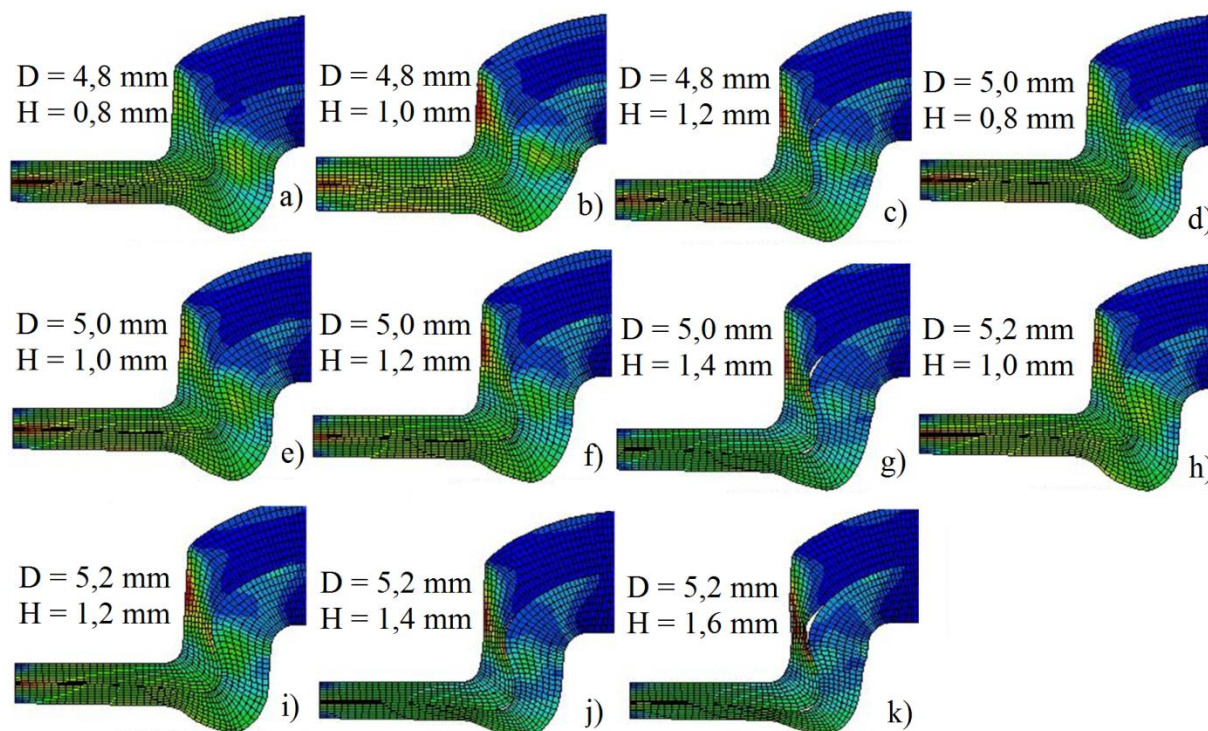


mechanického spoja sú zobrazené v obr. 2a. V závislosti od zvolených geometrických parametrov lisovníka a lisovnice budú vyššie uvedené parametre spoja priamo vplyvať na jeho únosnosť. Preto je nutné geometriu lisovníka a lisovnice optimalizovať tak, aby sa výsledný mechanický spoj vyznačoval čo najvyššou únosnosťou a zároveň bola zachovaná efektívnosť a hospodárnosť procesu spájania.

Aplikácia MKP pre optimalizáciu nástrojov pre CL

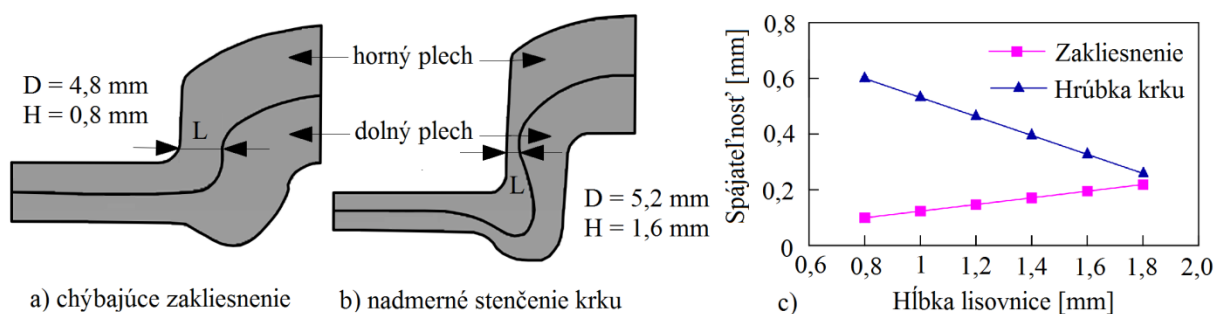
Metóda konečných prvkov je praktickým a efektívnym nástrojom pre simulovanie procesu spájania, hodnotenia mechanických vlastností spojov a to za účelom spätnej optimalizácie geometrie nástrojov, alebo parametrov procesu spájania. Tieto simulácie môžu byť realizované prostredníctvom implicitnej alebo explicitnej metódy. Výhodou metódy CL je rotačná povaha nástrojov, ako aj výsledného spoja, preto celý proces možno simulovať v podmienkach 2D prostredia. Nakoľko v priebehu výpočtu dochádza k veľkým deformáciám spájaných materiálov, kontaktu niekoľkých plôch súčasne (nástroj - spájaný materiál, spájané materiály vzájomne), treniu a zmene stavu kontaktu (kontakt lisovníka s horným plechom sa prerušuje v momente, kedy nástroj odchádza do svojej východiskovej polohy) preto je simulácia takéhoto typu považovaná za vysoko nelineárnu a vyžaduje si aplikáciu pokročilých techník simulácie.

Jednou z najčastejšie riešených problematík (s využitím prostriedkov počítačovej simulácie) je zlepšenie spájateľnosti materiálov, ktoré nemajú dostatočnú tvárnosť a nemôžu byť spájané metódou Clinching tzv. „bežnými“ nástrojmi. Medzi takéto materiály patria najmä materiály na báze zliatiny hliníka a horčíka. V takom prípade sa MKP využíva na zabezpečenie optimálneho toku materiálu v priebehu procesu spájania, čiže aby došlo k vzájomnému zakliesneniu spájaných materiálov a nedošlo k vzniku trhliny v kritickej oblasti (krku) mechanického spoja.



Obr. 3 Optimalizácia priemeru (D) a hĺbky dutiny lisovnice (H) [5]

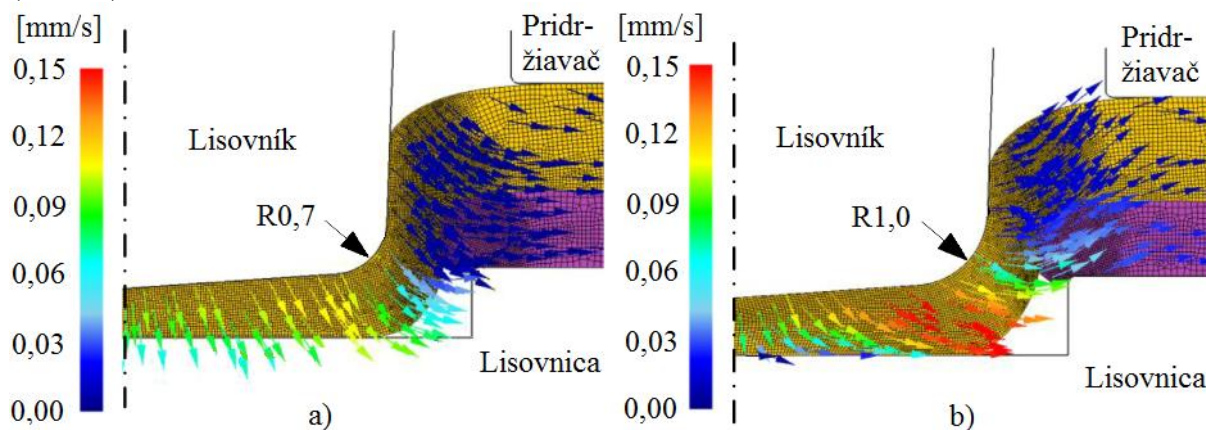
Obrázok 3 zobrazuje využitie MKP pri determinovaní optimálnej geometrie lisovnice z pohľadu dvoch parametrov: priemeru dutiny lisovnice (D) a hĺbky dutiny lisovnice (H). Spájaným materiálom bola uhlíková oceľ o hrúbke 1,0 mm. Na virtuálnych spojoch zobrazených v obr. 3 bolo následne vykonané meranie hrúbky zakliesnenia (obr. 2a, parameter N), pričom referenčná (minimálna) hodnota vzájomného zakliesnenia plechov bola stanovená vo vzťahu k únosnosti spoja na 0,30 mm. Výsledky počítačovej simulácie ukázali, že pri použití „nízkej“ hĺbky lisovnice a priemeru dutiny lisovnice v prípade zobrazenom v obr. 3a dochádza k nedostatočnému zakliesneniu spájaných plechov, pričom hodnota zakliesnenia medzi plechmi je veľmi nízka (0,11 mm). Naopak, pri „veľkej“ hĺbke lisovnice a priemeru dutiny lisovnice v prípade zobrazenom v obr. 3b dochádza k nadmernému stenčeniu krku spoja (horného plechu). Aj napriek vysokej miere vzájomného zakliesnenia plechov rovnaj 0,35 mm je toto prevedenie rizikové najmä z toho dôvodu, že stúpa riziko pretrhnutia horného plechu už v procese spájania z dôvodu nadmerného oslabenia jeho prierezu v mieste krku spoja. Simulácia vykazovala optimálne hodnoty zakliesnenia plechov pri použití hĺbky lisovnice v rozmedzí 1,2 až 1,4 mm a priemere dutiny lisovnice v rozmedzí 5,0 až 5,2 mm. Obrázok 4 zobrazuje dva okrajové výsledky simulácie: spoj u ktorého vplyvom geometrie lisovnice nedošlo k vzájomnému zakliesneniu spájaných materiálov (obr. 4a) a spoj u ktorého došlo k nadmernému stenčeniu horného plechu v oblasti krku spoja. Tento obrázok zároveň zobrazuje vývoj parametrov zakliesnenia a hrúbky krku spoja v závislosti na hĺbke dutiny lisovnice (4c).



Obr. 4 Spoje získané počítačovou simuláciou (a,b), závislosť spáratelnosti od hĺbky lisovnice (c) [5]

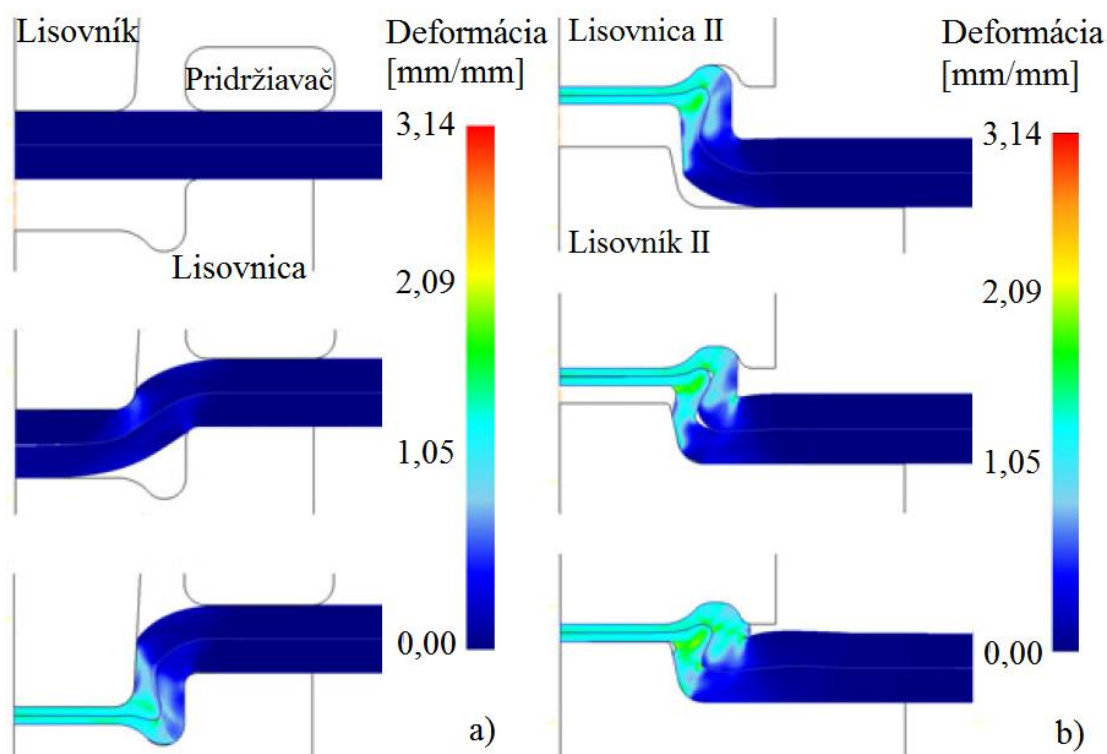
Jedným z dôležitých procesov u tejto metódy spájania je tok spájaných materiálov do dutiny lisovnice. Nesprávnym návrhom geometrie lisovníka a lisovnice nie len že môže viesť k vytvoreniu spoja ktorý nemá dostatočnú hodnotu zakliesnenia, ale aj k poškodeniu spájaných materiálov už v priebehu vytvárania spoja. Dochádza k vzniku trhliny, ktorá sa môže vplyvom vonkajšieho zaťaženia ďalej šíriť a viesť k deštrukcii samotného spoja. Jedným z parametrov ktorý vplyva na materiálový tok v priebehu spájania je aj polomer zaoblenia čela výstupku lisovníka. Výsledky simulácie s cieľom optimalizovať polomer zaoblenia čela lisovníka sú zobrazené v obr. 5. Cieľom tejto simulácie bolo zmeniť polomer zaoblenia čelnej plochy lisovníka tak, aby tok okolo kontúry lisovníka bol možno čo najplynulejší, nakoľko na strane lisovníka bol situovaný materiál zvaný CRFP, čo je polymér vystužený uhlíkovými vláknami. Druhým materiálom (na strane lisovnice) bola hliníková zliatina. Hrúbka materiálu na strane lisovníka bola 1,4 mm a materiálu na strane lisovnice 1,0 mm. Pri „tupých“ polomeroch zaoblenia dochádza k poškodeniu jednotlivých vrstiev materiálu CRFP. Pôvodný polomer zaoblenia čelnej plochy lisovníka bol rovný 0,7 mm. Tento polomer zaoblenia čelnej plochy lisovníka bol následne zmenený na hodnotu 1,0 mm

a výpočet bol realizovaný znovu. Obrázok 5 zobrazuje materiálový tok oboch spájaných materiálov počas spájania Clinching v prevedení s vopred pripraveným otvorom v spodnom plechu. Zobrazený je tok materiálu s pôvodným polomerom zaoblenia čelnej plochy lisovníka R0,7 mm (obr. 5a) a s upraveným polomerom zaoblenia čelnej plochy lisovníka R1,0 mm (obr. 5b).



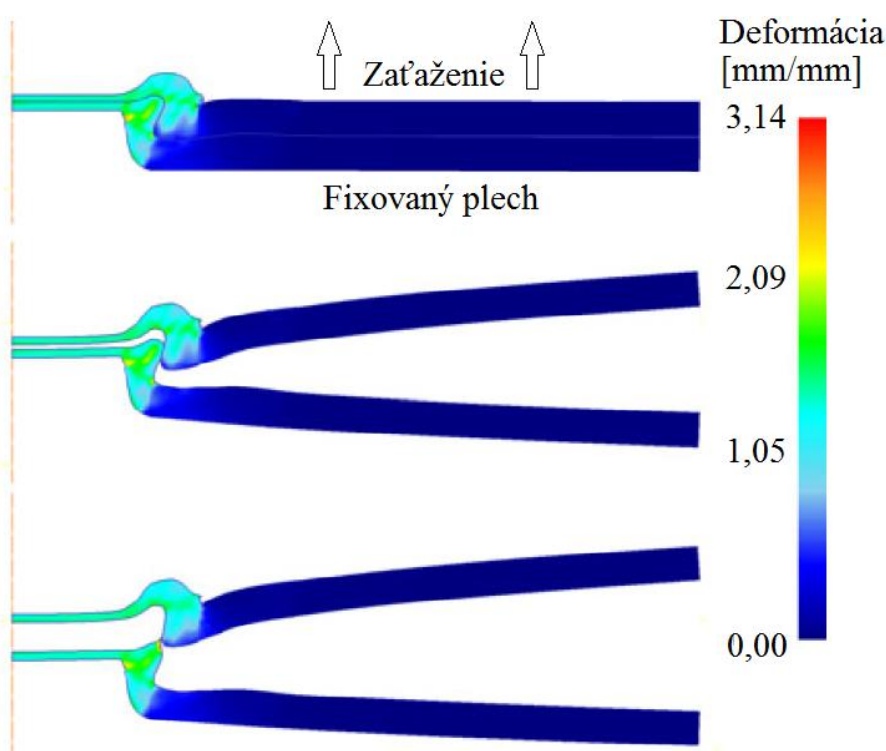
Obr. 5 Optimalizácia polomeru zaoblenia čelnej plochy lisovníka: východiskový stav (a), po úprave (b) [6]

Úpravou polomeru zaoblenia čelnej plochy lisovníka sa podarilo nielen zlepšiť prúdenie materiálu na strane lisovníka v radiálnom smere, ale aj znížiť ohýbanie materiálu v kontakte s upravovaným polomerom, kde dochádzalo k vzniku tlakových napätí v hornom plechu a následnej iniciácii a šíreniu trhliny. Materiálový tok (rovnako ako v predošlom prípade) priamo vplýva na únosnosť výsledného CL spoja, ale aj na fakt, či dva materiály budú navzájom spojitelné za daných podmienok (geometrie nástrojov).



Obr. 6 Optimalizácia s použitím dodatočnej etapy v podobe opätovného tvárnenia spoja [7]

Proces optimalizácie možno realizovať aj pridaním ďalšej etapy do procesu spájania, ktorej úlohou je už vytvorený spoj dodatočne spevniť prostredníctvom špeciálne navrhnutých nástrojov. Lisovník a lisovnica v druhej etape majú nielen za úlohu zvýšiť deformačné spevnenie spájaných materiálov, ale aj zvýšiť mieru ich vzájomného zakliesnenia. Prvou etapou spájania je tzv. konvenčný CL, kde sa vytvorí štandardný kruhový spoj (obr. 6a) a tou druhou opätovné tvárnenie mechanického spoja, kde už vytvorený spoj je zalisovaný takmer do roviny plechu (obr. 6b). Účinnosť navrhnutých nástrojov bola následne verifikovaná prostredníctvom virtuálneho skúšania mechanického spoja. Spoj bol po opätovnom tvárnení namáhaný ťahom, pričom sa v priebehu skúšky zaznamenávala sila potrebná na porušenie CL spoja mechanizmom zvaným „pull-out.“ Výsledky simulácie sú zobrazené v obr. 7.



Obr. 7 Zaťaženie mechanického spoja ťahom [7]

Priemerná hodnota sily potrebná na porušenie spoja bola na úrovni 320 N. Aplikáciou nových nástrojov a pridaním dodatočnej etapy v podobe opätovného tvárnenia mechanického spoja došlo k približne 40% nárastu únosnosti spoja pri jeho namáhaní ťahom. Pri namáhaní spoja na strih došlo k zvýšeniu únosnosti mechanického spoja približne o 20%. Z estetického (a v niektorých prípadoch i funkčného) hľadiska bola zredukovaná výška pretŕčajúcej časti spoja (zo strany lisovnice) takmer o 60%.

Záver

V príspevku boli prezentované aplikácie metódy konečných prvkov pri optimalizácii geometrie a návrhu lisovníka a lisovnice pre mechanické spájanie materiálov metódou Clinching. Na základe jednotlivých výsledkov simulácie možno optimalizovať jednotlivé parametre lisovníka a lisovnice tak, aby došlo k nárastu únosnosti výsledného mechanického spoja pri špecifických druhoch namáhania a to prostredníctvom optimalizácie toku materiálu



v priebehu formovania mechanického spoja. Ďalšou aplikáciou metódy konečných prvkov pri návrhu a optimalizácii nástrojov pre Clinching je možnosť zvýšiť možnosti spájateľnosti materiálov s nedostatočnou plasticitou. V takom prípade musia byť nástroje optimalizované pre špecifický materiál a jeho mechanické vlastnosti. Aplikáciou simulačných prostriedkov je možné v konečnom dôsledku navrhovať geometriu nástrojov tak, aby metódou Clinching bolo možné spájať široké spektrum materiálov a aj tie, ktoré sú pre túto metódu vyslovene nevhodné.

Použitá literatúra

- [1] COPPIETERS, S. et al: Process-induced Bottom Defects in Clinch Forming: Simulation and Effect on the Structural Integrity of Single Shear Lap Specimens. In: Materials and Design. Vol. 130, No. 2 (2017), ISSN 0264-1275, p. 336-348.
- [2] MUCHA, J. - WITKOWSKI, W.: The Clinching Joints Strength in the Aspects of Changes in the Forming Technology and Load Conditions. In: Thin-Walled Structures. Vol. 82, No. 7 (2014), ISSN 0263-8231, p. 55-66.
- [3] GROCHE, P. et al: Joining by Forming - A Review on Joint Mechanisms, Applications and Future Trends. In: Journal of Materials Processing Technology. Vol. 10, No. 214 (2014), p. 1972-1994.
- [4] KIM, J. Y. et al: Effect of Shape Parameters of Tool on Improvement of Joining Strength in Clinching. In: Transactions of Materials Processing. Vol. 18, No. 5 (2009), ISSN 2287-6359, p. 392-400.
- [5] SHI, B. et al: Design Method of the Parameters of Tools for Clinching Technology. In: Advanced Materials Research. Vol. 5, No. 6 (2012), ISSN 1662-8985, p. 1491-1496.
- [6] LEE, CH.-J. et al: Improvement of Joinability in a Hole Clinching Process with Aluminium Alloy and Carbon Fiber Reinforced Plastic Using a Spring Die. In: Composite Structures. Vol. 173, No. 6 (2017), ISSN 0263-8223, p. 58-69.
- [7] WEN, T. et al: On a Reshaping Method of Clinched Joints to Reduce the Protrusion Height. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 10, No. 2 (2014), ISSN 1433-3015, p. 1-7.

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