

Stanovenie strižnej sily pomocou experimentálneho nástroja

Borislav Melo, Ing., PhD.*

Viena International, spol. s r. o.,
Dolné Kráčiny 2, 036 01 Martin.
E-mail: melo@viena.sk

Determination of shear force using an experimental tool

Abstract: The contribution deals with the possibility of applying a special shearing tool, which could be used to determine the shearing forces of thinner sheets. The device is suitable for a wide range of presses. Both theoretical and practical knowledge from this issue is presented. The construction of the shearing tool is shown. In the experimental part, the correct solution of the tool was confirmed. The results of process simulations for cutting three types of materials are also published.

Keywords: shearing, sheet metal, press, tool, construction.

ÚVOD

Strihanie je beztrieskový spôsob oddelenia materiálu - najmä plechu v požadovanom rozmere, tvare a kvalite strihov. Pri strihaní sa v mieste deformácie prerušia vlákna materiálu a dôjde k oddeleniu častí materiálu. Strihanie môže byť:

- po otvorenom obryse,
- po uzavretom obryse.

Výstrižok je iba časťou východiskového materiálu, zvyšok je odpad. Výstrižok má úplne vyhovovať účelu – požiadavkám v prevádzke.

Príspevok sa venuje stanoveniu strižnej sily pri použití experimentálneho zariadenia.

1 TECHNOLÓGIE SPRACOVANIA PLECHU

1.1 Delenie materiálu

Okrem trieskového a nekonvenčného delenia sú známe dva spôsoby delenia materiálu: *lámanie* a *strihanie*.

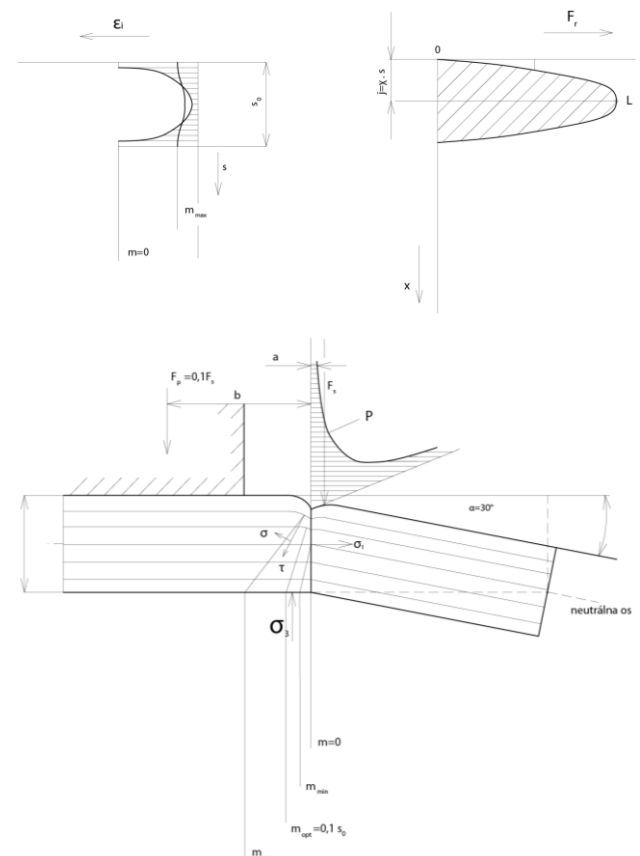
Delenie materiálu je buď prípravou operáciou pred ďalším spracovaním inými technologickými metódami, alebo sa strihaním môže realizovať konečný tvar výrobku.

Lámanie sa používa pri delení tvrdších, krehkých materiálov veľkej hrúbky. Lámaním sa pripravujú polovýrobky pre voľné kovanie, napr. veľkých hriadeľov [1-4].

1.1.1 Strihanie

Strihanie je základnou prácou delenia materiálov strihom. Pri kovocho začína elasticou, potom

plastickou deformáciou a po lokálnom vyčerpaní plasticity končí porušením (obr. 1).



Obr. 1. Proces strihu: vľavo - intenzita deformácií, vpravo - pracovný diagram: *M* - strižná medzera, *OE* - elastická oblasť, *EL* - plastická oblasť, *L* - lom, *p* - špecifický tlak noža

Rozdelenie materiálov pri strihaní sa uskutočňuje prostredníctvom vzájomného posuvu jeho susedných častí v smere hrúbky. Aby mohla vzniknúť lokalizácia plastickej deformácie v strižnej rovine, volíme hrany

strižníka a strižnice ostré s malou strižnou vôľou medzi nimi.

Rozloženie napätí a deformácie v ohnisku plastickej deformácie je charakterizované veľkou nerovnomernosťou v smere kolmom na strižnú plochu, ale aj v jej smere, čo veľmi sťažuje úlohu matematického riešenia (obr. 2).

1.1.2 Všeobecné a zjednodušené výpočty pri strihaní

Ak sa pri výpočtoch vychádza z tvaru pracovného diagramu, dá sa získať riešenie aj pre najhrubšie zjednodušenia. Pracovný diagram strihania má tvar podľa obr. 2 vpravo a je charakteristický pomerne plynulým rastom sily až po maximálnu hodnotu, pri ktorej pre nízkoplastické kovy nasleduje prudký pokles sily a pre kovy za maximom sily sa ešte nachádza oblasť menšieho plynulého poklesu sily s nasledujúcim prudkým poklesom. Prudký pokles strižnej sily je spojený s porušením - lomom. Až do tohto maxima sila prekonáva deformačný odpor v oblasti ohniska plastickej deformácie. Dôležité je vedieť, čo spôsobuje plynulý rast strižnej sily až do maxima, keď súčasne od začiatku strihania sa strižná plocha monotónne znižuje. Predpokladá sa, že príčinou je spevnenie. Strižný proces v ohnisku plastickej deformácie sa považuje za šmykový, a teda na strižných hranách strižníka a strižnice pôsobia maximálne šmykové napätia, ktoré sú v podmienkach plastickej deformácie rovné hodnote konštanty plasticity $k = K = \frac{k_p}{2}$. Pri predpoklade malého uhla povrchu polotovaru k osi strižníka sa môže napísať:

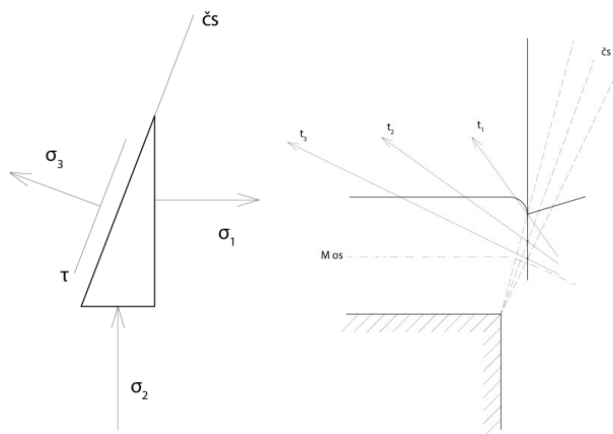
$$F_s = L \cdot (s - x) \cdot \frac{k_p}{2} \quad (1)$$

kde L - dĺžka čiary strihu,

s - hrúbka materiálu,

x - hĺbka vniknutia strižníka do plechu.

Strižný proces sa pokladá za rovinnú deformáciu podľa obr. 1.

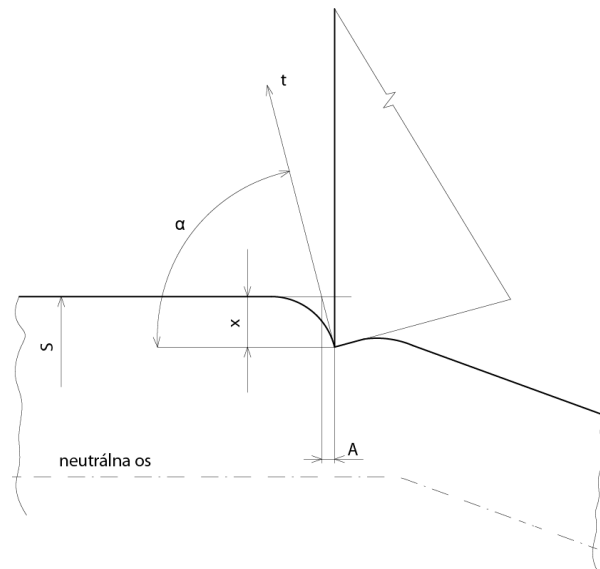


Obr. 2. Rovinná napätosť v neutrálnej osi

Rovinný stav napätosti pre ľubovoľnú hodnotu stredného hlavného napätia a pre podmienku $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ sa dá stanoviť pomocou zjednodušenej podmienky plasticity v tvare:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \pm \beta \cdot k_p \quad (2)$$

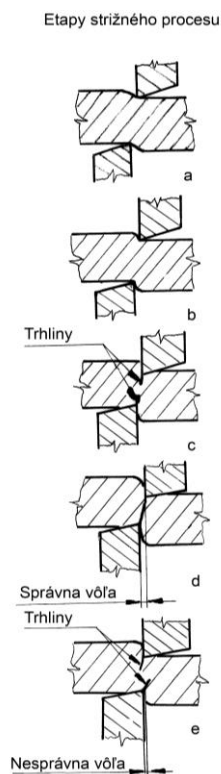
kde β je súčiniteľ v rozmedzí $1 \div 1,155$.



Obr. 3. Ohnisko plastickej deformácie pri strihaní

1.1.3 Technologický pohľad na proces strihania

Na obr. 4 sú zachytené schematicky fázy strižného procesu.



Obr. 4. Etapy (fázy) strižného procesu

Prvá fáza (pružná) je stláčanie vlákien strihaného materiálu. V druhej fáze vnikajú ostria nástroja do materiálu a nasledovne v tretej fáze začína vlastné

strihanie, kedy sa vytvoria v okolí strižných hrán trhliny, ktoré sa pri správnej strižnej vôli musia stretnúť. V prípade nesprávnej strižnej vôle sa vytvorí zárodok trhlínok v opačnom smere, čo má za následok nekvalitný povrch strižnej plochy. Posledná fáza je oddelenie materiálu a vznik dvoch povrchov. Optimálna veľkosť strižnej vôle medzi strižníkom a strižnicou je dôležitá pre udržanie ostrosti strižných hrán a čistotu strihu. Veľkosť strižnej vôle sa riadi podľa druhu materiálu a jeho hrúbky [5-8].

1.2 Prehľad druhov strihania

Pri strihaní sa dajú pozorovať tri základné fázy:

1. Strižník vniká do materiálu a dochádza k pružnej deformácii materiálu. Táto fáza trvá až do dosiahnutia medze pružnosti.
2. V ďalšej fáze dochádza k tvárnej deformácii materiálu, ktorá je charakterizovaná prekročením medze sklzu. Strižník vniká do polovice strihanej hrúbky.
3. V poslednej fáze dôjde k oddeleniu materiálu, čo je prekročenie medze pevnosti v strihu.

Na zhl'ade strižnej plochy sú obe posledné fázy zrejme. Tvárna deformácia vytvára nízku, kovovo lesklú plôšku. Ušmyknutie spôsobí šikmú matnú plochu, niekedy aj s viditeľnými trhlinami [9-10].

Strihanie sa dá deliť takto:

- a) *strihanie jednoduché* - rozdeľovanie materiálu,
- b) *dierovanie* - vyhotovenie dier,
- c) *vystrihovanie* - obrys výstrižkov je uzavretý,
- d) *obstrihávanie* - oddelenie prebytočného materiálu,
- e) *pristrihovanie* - dosiahnutie presných tvarov,
- f) *nastrihovanie* - čiastočné nastrihnutie materiálu,
- g) *pretrhávanie* - pretrhnutie materiálu za účelom vytvorenia hrotu, výstupku a pod.

1.2.1 Strižná vôľa

Strižná vôľa má vplyv na strižnú silu, trvanlivosť ostria a na kvalitu strižných plôch. Jej vplyv na kvalitu strihu je zrejmy z obr. 4.

Správne zvolená strižná vôľa zaručuje i správny strižný pochod. Optimálna veľkosť strižnej vôle medzi strižníkom a strižnicou je dôležitá pre udržovanie ostrosti rezných hrán a čistotu strihu. Takisto má vplyv na udržiavacie náklady na strihadlá. Veľkosť strižnej vôle sa riadi podľa druhu materiálu a jeho hrúbky. Ak je pri strihaní rozhodujúci tlak, volíme väčšiu vôľu, ale ak ide o požiadavku zachovania čistoty strižnej plochy volíme menšiu vôľu. Strižná medzera sa stanoví výpočtom podľa Oehlera:

- pre plech hrúbky 3 mm:

$$m = \frac{v}{2} = 0,32 \cdot c \cdot t \cdot \sqrt{k_s} \quad (3)$$

pre plech nad hrúbku 3 mm:

$$m = \frac{v}{2} = 0,32 \cdot (1,5 \cdot c \cdot t - 1,5) \cdot \sqrt{k_s} \quad (4)$$

kde v - strižná vôľa [mm],

t - hrúbka strihaného materiálu [mm],

k_s - strižný odpor [MPa],

$c = 0,005 \div 0,025$ - súčiniteľ závislý od stupňa strihu,

m - strižná medzera [mm].

1.2.2 Strižná sila

Strižná sila, (tangenciálna sila), je typ silového účinku, ktorý pôsobí v materiáli alebo konštrukcii rovno v horizontálnom smere, teda rovno v priestore. Táto sila spôsobuje posun častí materiálu alebo konštrukcie jednu oproti druhej, čo vedie k deformácii alebo roztrhnutiu.

Pri výpočte strižnej sily sa zvyčajne používa základný princíp mechaniky: sila je rovná súčinu tlaku a plochy, na ktorú sa táto sila pôsobí. Pre strižnú silu platí podobný princíp, ale je dôležité zväžiť aj faktor tvaru a orientácie plochy:

$$F_s = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k \quad (5)$$

kde F_s - strižná sila,

R_m - medza pevnosti,

l - dĺžka strihu,

t - hrúbka materiálu,

k - koeficient opotrebenia.

2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEHO ZARIADENIA

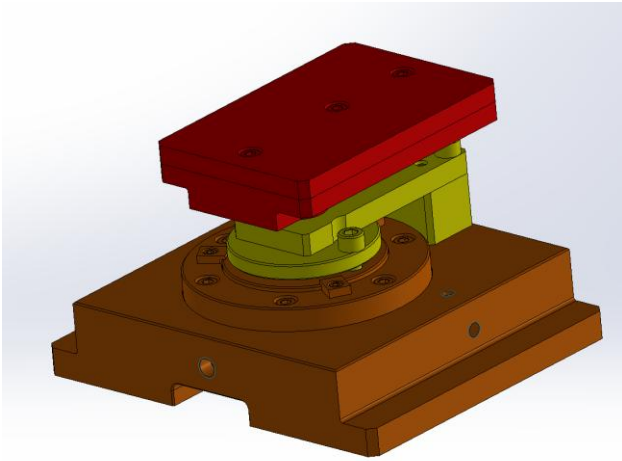
Experimentálne zariadenie sa skladá z 15 samostatných dielov, ktoré sa dajú spojiť do troch základných častí: *tela zariadenia*, *pridržiavača vzorky* a *strižníka* (obr. 5).

Spodná časť zariadenia je nepohyblivá, ktorá v prevádzke stojí na mieste. Jej úlohou je poskytnúť stabilitu a pevnú podporu pre ďalšie časti zariadenia.

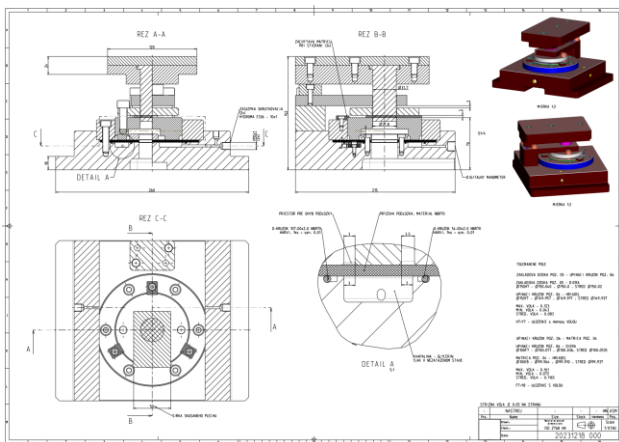
Pridržiavač vzorky zabezpečuje polohu a uchytenie vzorky. Takisto slúži aj ako dorazová plocha pre strižník, čím umožňuje presné a opakované strihanie vzorky.

Strižníková časť vykonáva pohyb a pohybuje sa vo vertikálnej osi a zabezpečuje presné a kontrolované strihanie vzorky podľa požadovaných parametrov.

Po tom čo bolo zariadenie navrhnuté sa vyhotovila výkresová dokumentácia (obr. 6), podľa ktorej bolo celé zariadenie vyrobené a skompletizované do finálnej formy určenej pre vykonávanie experimentu.



Obr. 4. Počítačový model experimentálneho zariadenia, strižník (červená časť), pridržiavač (žltá) a telo (oranžová)



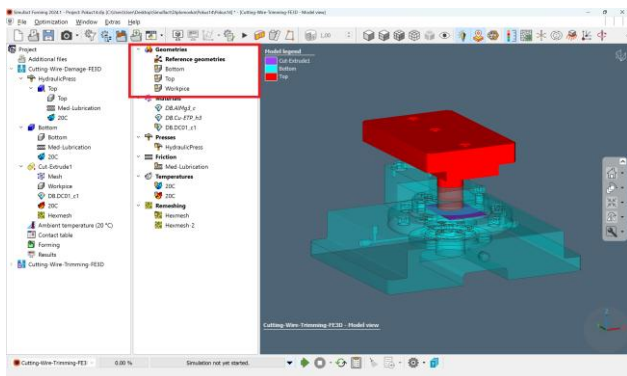
Obr. 5. Zostavný výkres

3 SIMULÁCIA

Simulácie boli vyhotovené v softvéri *Simufact Forming 2024.1* pomocou metódy konečných prvkov (MKP). Vďaka tejto metóde bolo možné ušetriť čas potrebný na vyhotovenie týchto simulácií, čo prispelo k efektívnosti a presnosti výsledkov.

3.1 Nastavenie simulácie

Pred tým, ako sa začne samotnou simuláciou a získaním výsledkov je nutné správne nastavenie simuláčného programu.



Obr. 6. Použité časti modelu pre simuláciu

Dôležité je mať k dispozícii čo najpresnejšie modely zariadení, ktoré sa používajú na strihanie vzoriek. Modely by mali zohľadňovať všetky relevantné faktory a parametre zariadenia, aby simulácie boli čo najpresnejšie. Z tohto dôvodu boli preto použité rovnaké modely ako pri technickom návrhu zariadenia (obr. 7).

3.2 Nastavenie materiálov

Použitie rovnakých materiálov a parametrov pre simuláciu ako pre reálny experiment je kľúčové pre dosiahnutie spoľahlivých výsledkov. Použité materiály boli *DC01*, *AlMg3* a *Cu-ETP*.

Každý z týchto materiálov má v knižnici materiálov v softvéri *Simufact Forming* veľké množstvo informácií, ktoré môžu zahŕňať mechanické vlastnosti, termodynamické parametre, správanie sa materiálu pri rôznych teplotách a rýchlostiach deformácie ako aj ďalšie relevantné údaje. Teplota simulácii bola určená na 20°C.

3.3 Vytvorenie mriežky pre materiál

Rozdelenie materiálu na minimálne časti pomocou metódy konečných prvkov (MKP) je jeden z kľúčových princípov tejto simulačnej techniky.

Voľba veľkosti jednotlivých prvkov je dôležitá, pretože ovplyvňuje presnosť výsledkov a výpočtovú náročnosť simulácie. V tomto prípade bola veľkosť dielika 0,45 milimetra, čo je relatívne malá hodnota a umožňuje dosiahnuť detailné a presné simulácie. Posun nástroja bol zvolený 8,0 milimetrov s obmedzením v kontakte s dorazom. Tento prístup umožňuje nástroju dostatočný pohyb na prestrihnutie materiálu a zároveň minimalizuje riziko kolízie.

3.4 Výsledky simulácie

3.4.1 DC01

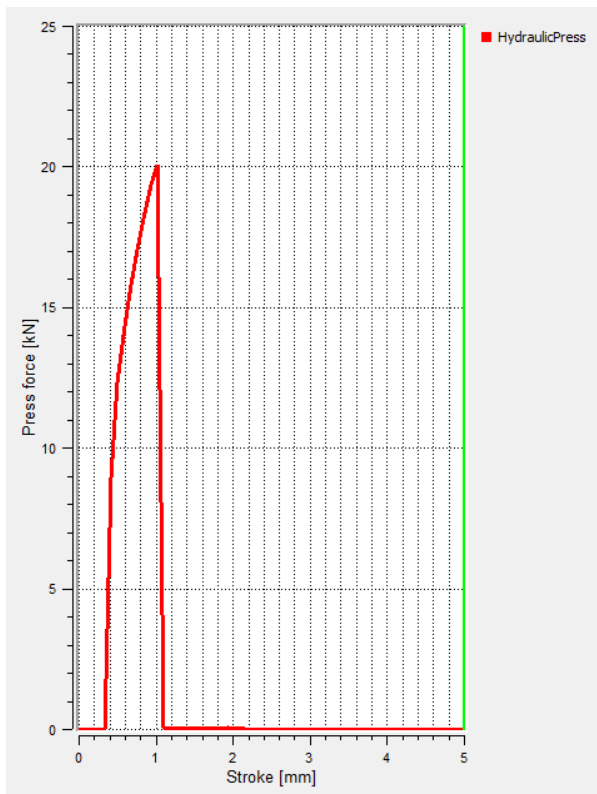
Výsledky simulácie sú v tab. 1 so silami v daných časoch a graf č. 8. sily pre oceľ *DC01*. Je vidieť, ako sa menia sily strihania v závislosti od dráhy, pretože to poskytuje pohľad na správanie sa materiálu počas procesu.

Tab. 1. Porovnanie teoretických síl a simulovaných

	Vypočítaná sila [kN]	Odsimulovaná sila [kN]	Rozdiel [%]
<i>DC01</i>	21 448	20 058	6,5
<i>AlMg3</i>	19 065	19 066	0,0
<i>Cu-EZP</i>	19 065	20 258	5,9

Ku kontaktu medzi strižníkom a materiálom dochádza po prejení dráhy 0,4 mm. Platí pre všetky tri prípady. Tento bod označuje začiatok kontaktu a začiatok procesu strihania. Potom, keď sa dráha zväčšuje na

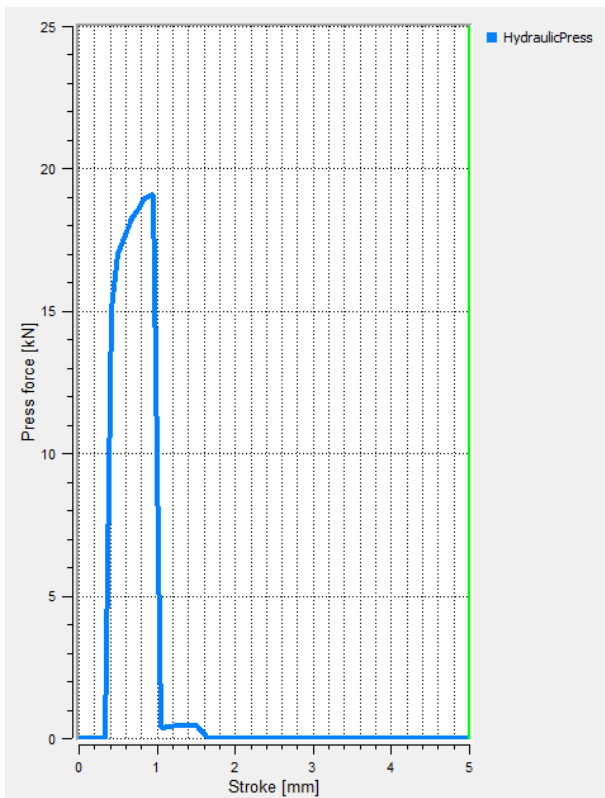
1,0 mm, dochádza k najväčšiemu nárastu síl (20 kN) ktorá sa dosiahla v tomto bode, naznačuje dokončenie procesu strihania.



Obr. 7. Priebeh sily pri simulácii strihu materiálu DC01

3.4.2 AlMg3

Výsledky simulácie sú v tab. 1 so silami v daných časoch a graf sily č. 9. pre hliník AlMg3.



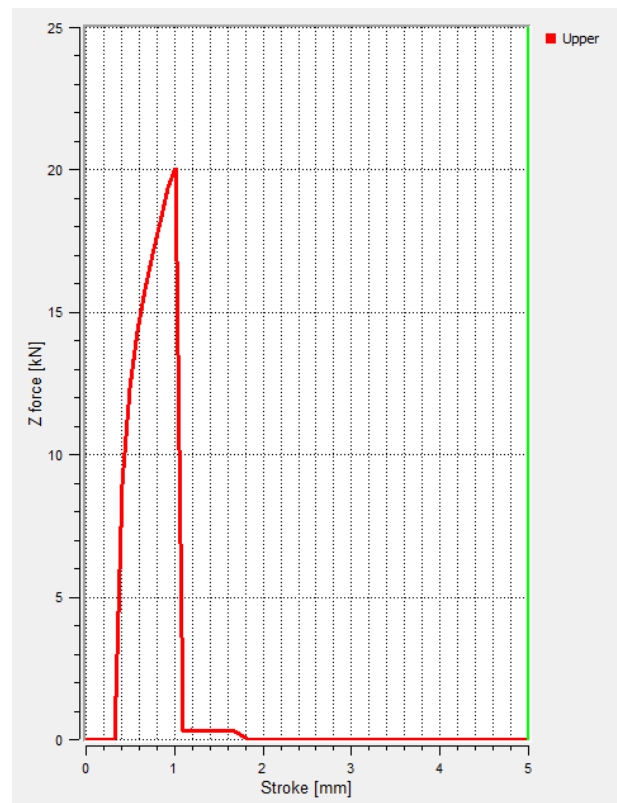
Obr. 8. Priebeh sily pri simulácii strihu materiálu AlMg3

Je vidieť, ako sa menia sily strihania v závislosti od dráhy, pretože to poskytuje pohľad na správanie sa materiálu počas procesu. Pri zväčšení dráhy na 0,9 mm, dochádza k maximálnemu nárastu síl (19 kN) ktorá sa dosiahla v tomto bode, naznačuje dokončenie procesu strihania.

3.4.3 Cu-ETP

Výsledky simulácie sú v tab. 1 so silami v daných časoch a graf sily č. 10 pre meď Cu-ETP. Je zrejme, ako sa menia sily strihania v závislosti od dráhy, pretože to poskytuje pohľad na správanie sa materiálu počas procesu.

Ku kontaktu medzi strižníkom a materiálom dochádza po prejdení dráhy 0,4 mm. Tento bod označuje začiatok kontaktu a začiatok procesu strihania. Pri zväčšení dráhy na 0,9 mm, dochádza k najväčšiemu nárastu síl (19 kN) ktorá sa dosiahla v tomto bode, naznačuje dokončenie procesu strihania.



Obr. 9. Priebeh sily pri simulácii strihu materiálu Cu-ETH

3.5 Porovnanie teoretických a simulovaných síl

Porovnaním teoretických výpočtov pre jednotlivé materiály a výsledky simulácií sa dá posúdiť, že sa mierne nezhodujú.

- **DC01**

- výpočet:

$$F_S = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k,$$

$$F_S = 0,8 \cdot 270 \text{ MPa} \cdot 99,3 \text{ mm},$$

$$F_S = 21\,448 \text{ N},$$

- simulácie:

$$F_S = 20\,058\text{ N,}$$

• **AlMg3**

- vypočítaná:

$$F_S = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k,$$

$$F_S = 0,8 \cdot 240\text{ MPa} \cdot 99,3\text{ mm,}$$

$$F_S = 19\,065\text{ N,}$$

- simulácie:

$$F_S = 19\,066\text{ N,}$$

• **Cu-ETP**

- vypočítaná:

$$F_S = 0,8 \cdot R_m \cdot l \cdot t \cdot k,$$

$$F_S = 0,8 \cdot 240\text{ MPa} \cdot 99,3\text{ mm,}$$

$$F_S = 19\,065\text{ N,}$$

- simulácie:

$$F_S = 20\,058\text{ N.}$$

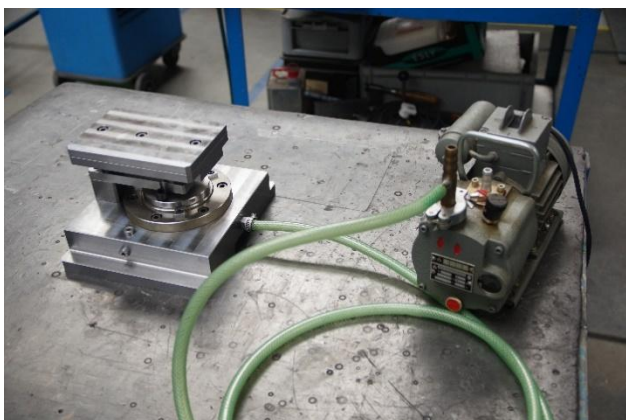
Tieto rozdiely hodnôt sa dajú vysvetliť tým že obe metódy používajú iný druh výpočtu a ich presnosť výpočtu je rozdielna. Určenie toho ktorá metóda je presnejšia a ktorá sa zhoduje viac s realitou sa dá určiť iba tým že sa vykoná experiment v reálnom prostredí.

4 EXPERIMENTY

Počas experimentu boli použité tri materiály s tromi vzorkami, aby sa dal presnejšie určiť tlak pri strihaní a vylúčiť prípadne chyby meraní.

Vzorky pre všetky tri skúšané materiály boli z plechu hrúbky 1 mm. Pre každý materiál boli tri vzorky s rozmermi 49x140 mm.

Po tom čo bolo zariadenie skontrolované a pripravené bol vývevou odsatý vzduch. Nástroj sa naplnil olejom pre presnejšie meranie tlaku pri strihaní testovaných vzoriek. Po dokončení príprav bol skontrolovaný tlak pre istotu že všetko prebehlo tak ako malo. Zariadenie bolo upnuté do hydraulického lisu *Raster Zeulenroda* (Typ: *GHP 500 H/J - 10*).



Obr. 10. Príprava zariadenia

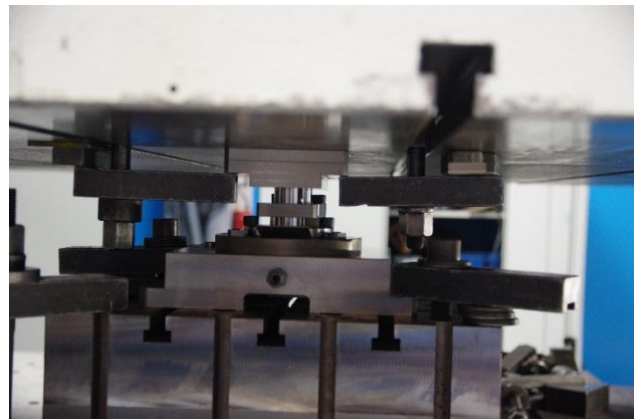
Počas celého procesu bol meraný tlak a následne sa určila sila pomocou jednoduchého vzorca:

$$F = p \cdot S \tag{1}$$

kde p - tlak [Pa],

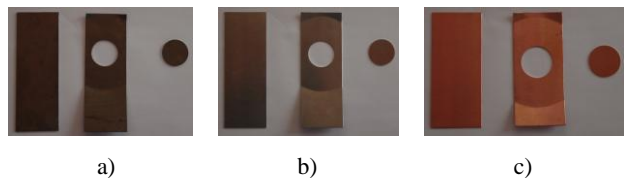
S - plocha [mm²],

F - sila [N].



Obr. 11. Strihací nástroj v tvárniacom stroji

Takto sa dá pomocou experimentálneho zariadenie určiť potrebnú sila pre skúšaný materiál bez nutnosti ostatných silomerov. Boli strihané kruhové výstrižky s priemerom 31,6 mm.



Obr. 12. Vzorka: a) DC01, b) AlMg3, c) Cu-ETP

4.1 Namerané hodnoty

Lis mal zabudovaný silomer, teda sa dali porovnávať výsledky merania s ďalšími dodatočnými informáciami v podobe sily.

Tab. 2. Namerané výsledky pre materiál DC01

DC01	Sila [kN]	Tlak [MPa]
Strih 1	20,7	26,0
Strih 2	20,8	27,0
Strih 3	20,1	26,0

Tab. 3. Namerané výsledky pre materiál AlMg3

AlMg3	Sila [kN]	Tlak [MPa]
Strih 1	19,3	24,0
Strih 2	19,2	24,0
Strih 3	19,2	24,0

Tab. 4. Namerané výsledky pre materiál Cu-ETP

Cu-ETP	Sila [kN]	Tlak [MPa]
Strih 1	19,5	25,0
Strih 2	19,7	25,0
Strih 3	19,9	25,0

4.2 Porovnanie hodnôt

Porovnaním hodnôt teoretických, simulovaných a reálnych sa dá posúdiť presnosť teoretických hodnôt s hodnotami reálne získanými a môže sa určiť s akou presnosťou pracujú teoretické vzorce a simulácie.

Jednou z premenných hodnôt pri teoretických výpočtoch je koeficient opotrebenia nástroja, ktorý sa nedá presne merať a stanoviť v akom momente a kedy dôjde ku známemu opotrebeniu. Postupné opotrebenie sa dá sledovať pri raste sily ktorá je potrebná pre odstrihnutie materiálu v podobe postupného nárastu ako sa nástroj postupne pri každom strihu mierne opotrebil. Sily potrebné na strih boli nižšie v prípade strihania ocele DC01 ktorá sa strihala ako prvá. V prípade medi Cu-ETH ktorá sa strihala posledná sa dá pozorovať nárast potrebnej sily na vykonanie strihu. Rozdiel pozorovaných síl nie je signifikantne veľký. Z výsledkov merania možno stanoviť, že teoretické výpočty pomocou vzorcov sú dostačujúce pre návrh strihacích zariadení.

Tab. 5. Rozdiel síl nameraných voči vypočítaným pre materiál DC01

DC01	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	20,7	21,4	-3,2
Strih 2	20,8	21,4	-2,8
Strih 3	20,1	21,4	-6,1

Tab. 6. Rozdiel síl nameraných voči vypočítaným pre materiál AlMg3

AlMg3	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,3	19,1	+1,0
Strih 2	19,3	19,1	+1,0
Strih 3	19,2	19,1	+0,5

Tab. 7. Rozdiel síl nameraných voči vypočítaným pre materiál Cu-ETP

Cu-ETP	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,5	19,1	+2,1
Strih 2	19,7	19,1	+3,0
Strih 3	19,9	19,1	+4,0

4.3 Výsledky získané simuláciou v porovnaní s reálnymi výsledkami

Ako sa odsimuloval proces strihania a získali sa počítačom určené sily, je možnosť porovnania síl voči reálne odmeraným silám.

Pri MKP simuláciách je veľké množstvo premenných

ktoré sa dajú nastaviť alebo upraviť, ako napríklad teplota, sily, model poškodenia a podľa potreby výpočtových možností ktoré sú k dispozícii v podobe presnosti s akou sa rozloží simulovaný materiál na časti (ich veľkosť). Problémom pri simuláciách je že sa pracuje s ideálnymi podmienkami a je veľmi ťažké zahrnúť všetky premenné a nedokonalosti z reálneho prostredia či už z dôvodu ich náročnosti merania alebo jednoducho z nemožnosti merania takýchto veličín. Aj napriek týmto problémom sú výsledky v simulácii v porovnaní s reálne nameranými výsledkami presné a signifikantne sa nelíšia. Je možné použiť simulácie ako veľmi presný prostriedok pri technologickom návrhu iných zariadení a týmto ušetriť čas pri výrobe.

Tab. 8. Rozdiel síl nameraných voči odsimulovaným pre materiál DC01

DC01	Sila odmeraná [kN]	Sila odsimulovaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	20,7	20,0	+3,4
Strih 2	20,8	20,0	+3,8
Strih 3	20,1	20,0	+0,5

Tab. 9. Rozdiel síl nameraných voči odsimulovaným pre materiál AlMg3

AlMg3	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,3	19,1	+1,0
Strih 2	19,3	19,1	+1,0
Strih 3	19,2	19,1	+0,5

Tab. 10. Rozdiel síl nameraných voči odsimulovaným pre materiál Cu-ETH

Cu-ETP	Sila odmeraná [kN]	Sila vypočítaná [MPa]	Rozdiel v sile [%]
Strih 1	19,5	20,0	+2,5
Strih 2	19,7	20,0	+1,5
Strih 3	19,9	20,0	+0,5

ZÁVER

Experimentálne zariadenie bolo konštrukčne navrhnuté tak aby sa dalo použiť na akomkoľvek lise, kedy nie je na silovom zariadení žiaden silomer ale manometer. Na experimentálnom zariadení je možnosť pripojenia tlakomeru ktorý umožní jednoduché meranie a dá sa jednoduchým výpočtom určiť sila strihaného materiálu.

Experimentálne zariadenie tak isto poslúžilo pre porovnanie teoretických výpočtov simulácií a určenie ich presností, kedy sa zistilo že obe teoretické metódy výpočtov sú veľmi presné.

LITERATÚRA

- [1] BAČA, J. - TITTEL, V. - BÍLIK, J. (2004): *Technológia tvárnenia, časť plošné tvárnenie*. STU v Bratislave, 97 str., ISBN 80-227-2156-5.
- [2] BOLJANOVIC, V. (2005): *Sheet Metal forming processes and die Design*. ISBN 0-8311-3182-9.
- [3] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [4] KUMAR, S. (2008): *Technology of Metall Forming Processes*, New Delhi, India, 358 p., ISBN 978-81-208-3425-0.
- [5] MARCINIAK, Z. - DUNCAN, J. L. - HU, S. J. (2002): *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, Jordan hill, Oxford, UK, 221 p., ISBN 0-7506-5300-9.
- [6] MORAVEC, J. - STROKA, R. (2009): *Vybrané kapitoly z technológie tvárnenia*. Vydalo EDIS - vyd. ŽU v Žiline, ISBN 978-80-8070-980-8.
- [7] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. (2015): *Teória a technológia lisovania plechu*. EDIS ŽU Žilina, 185 s., ISBN 978-80-554-0986-3.
- [8] BAČA, J. - BÍLIK, J. - TITTEL, V. (2010): *Technológia tvárnenia*. STU v Bratislave, 245 s., ISBN 978-80-227-3242-0.
- [9] BÍLIK, J. - KAPUSTOVÁ, M. - RIDZOŇ, M. (2015): *Teória tvárnenia*. Trnava, Alumni Press CD-ROM, 262 s., ISBN 978-80-8096-9.
- [10] MIELNIK, M. E. (1991): *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw - Hill Book Company, New York.