



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH VÝROBY KRYTU

DESIGN FOR MANUFACTURING OF A COVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marie Rusková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Marie Rusková**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh výroby krytu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o výrobu dílce pomocí technologie plošného tváření, a to hlubokého tažení. Na tuto oblast bude rovněž vypracována literární rešerše. Dále bude práce obsahovat návrh technologického postupu výroby součásti, technicko – ekonomické hodnocení a závěry se zhodnocením navrhované technologie.

Cíle diplomové práce:

- vypracování aktuální literární rešerše,
- zhodnocení možností výroby,
- návrh výroby součásti,
- provedení technologických a kontrolních výpočtů,
- vypracování výkresové dokumentace vybraných částí výrobního nástroje.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William a CADDELL, Robert. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

LOGAN, Daryl. A first course in the finite element method. United States: Cengage Learning, 2007, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-6.

MARCINIAK, Zdislaw; DUNCAN, John a HU, Jack. Mechanics of Sheet Metal Forming. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

SCHULER GMBH. Metal forming handbook. New York: Springer-Verlag, 1998, 563 s. ISBN 35-40-1185-1.

TSCHATSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem krytu klimatizace, která bude umístěna na střeše autobusu. Jelikož se díl bude nacházet ve venkovním prostředí, je vyroben z korozivzdorné oceli 17 240, vhodné k tváření za studena. Po posouzení možných technologií výroby je jako optimální zvoleno hluboké tažení. Dále je navrhnout nejvhodnější tvar polotovaru a provedeny potřebné výpočty, které jsou ověřeny numerickou simulací. Tažení proběhne na jednu operaci. Na základě potřebné síly 554,5 kN je zvolen hydraulický lis CTH 250.

Klíčová slova

hluboké tažení, kryt, ocel 17 240, výtáček, hydraulický lis

ABSTRACT

The thesis deals with the design of the air conditioning cover, which will be placed on the roof of the bus. The part is made of 17 240 stainless steel, which is suitable for cold forming, due to its outdoor environment. Deep drawing is chosen as optimal after assessing possible production technologies. Furthermore, the most suitable shape of the blank is proposed and the necessary calculations are carried out, which are verified by numerical simulation. The deep drawing will take place in one operation. Hydraulic press CTH 250 is chosen based on the required force 554.5 kN.

Keywords

deep drawing, cover, 17 240 steel, drawing component, hydraulic press

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RUSKOVÁ, Marie. *Návrh výroby krytu*. Online. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157141>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh výroby krytu vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 23. 5. 2024

místo, datum

Bc. Marie Rusková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Také děkuji mému snoubenci, mladšímu bratrovi i ostatním členům mé rodiny za jejich podporu při studiu.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod.....	9
1 Rozbor zadání.....	10
1.1 Variantní řešení výroby.....	11
2 Hluboké tažení.....	15
2.1 Návrh polotovaru.....	16
2.2 Určení počtu operací.....	18
2.3 Tažná mezera a tažný poloměr.....	20
2.4 Použití přidržovače.....	21
2.5 Tažná síla, práce a rychlost.....	22
2.6 Konstrukce nástrojů.....	23
2.6.1 Tažníky a tažnice.....	25
2.6.2 Přidržovače.....	26
2.6.3 Brzdící žebra, stírače a vyhazovače.....	27
2.6.4 Kontrola částí nástrojů na vzpěr.....	28
2.7 Tažení korozivzdorných ocelí.....	29
2.8 Stroje.....	30
2.9 Tření a mazání.....	32
2.10 Numerické simulace.....	32
3 Návrh výroby.....	36
3.1 Návrh tvaru polotovaru.....	37
3.2 Počet operací, tažná mezera a základní rozměry nástrojů.....	41
3.3 Výpočet sil a práce.....	44
3.4 Ověření výsledků numerickou simulací.....	45
3.4.1 Určení nejvhodnějšího polotovaru.....	47
3.5 Výroba polotovaru.....	51
3.6 Volba lisu a konstrukce nástroje.....	56
Závěr.....	62

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

V dnešní době se kladou požadavky na rychlou a přesnou výrobu součástí. Jednou z nejvýznamnějších technologií, díky které lze vyrábět díly s vysokými požadavky na přesnost a mechanické vlastnosti je tváření kovů. Dosahuje se vysoké produktivity při malé spotřebě energie a dochází k velké úspoře materiálu. Pomocí vnějších sil, které působí na polotovar, dochází ke změně tvaru bez porušení jeho soudržnosti. Dělí se na objemové a plošné, při kterém se mění tvar polotovaru bez výrazné změny tloušťky. [1; 2]

Jednou z metod plošného tváření za studena je hluboké tažení, kdy je rovinný přístřih z plechu přetvořen v duté těleso. Podle požadavků zákazníka a konstrukce nástroje proces probíhá bez výrazného zeslabení stěny nebo se zeslabením v jedné nebo více operacích. Mezi výhody patří vysoká produktivita při dosažení požadované přesnosti a rychlost výroby. Lze tak zhotovit nádoby různých tvarů, součásti karosérií i miniaturní součásti pro elektrotechniku. Příklady výtažků jsou na obr. 1. [1; 3; 4]



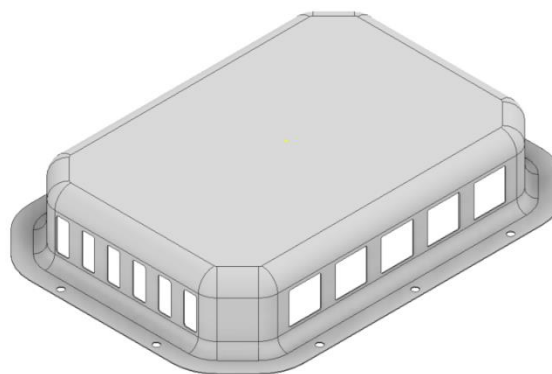
Obr. 1 Příklady výtažků [5; 6; 7; 8].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Zadanou součástí je plechový kryt klimatizace a elektroniky, nacházející se na střeše autobusu. Příklad umístění obdobného dílu je uveden na obr. 2. Má obdélníkový půdorys se zkosenými rohy. Zepředu a po bocích se nachází větrací otvory a na spodní části příruba s deseti otvory po obvodě, které slouží k uchycení. Model krytu je zobrazený na obr. 3. Díl se bude vyrábět v sérii 200 000 ks·rok⁻¹.

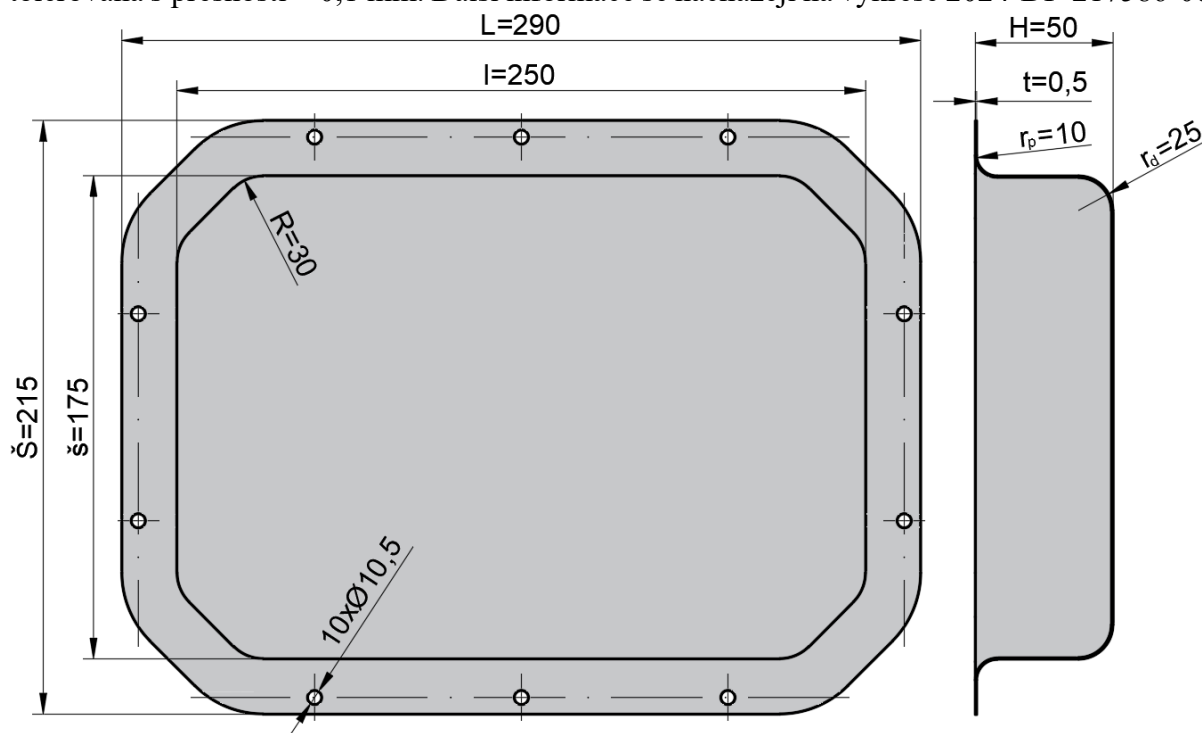


Obr. 2 Kryt na střeše autobusu [9].



Obr. 3 Model krytu.

Základní rozměry součásti jsou zobrazeny na obr. 4. Díl má konstantní tloušťku 1 mm. Délka krytu bez příruby je 500 mm, jeho šířka je 350 mm a výška 100 mm. Mezi přírubou a pláštěm je zaoblení o poloměru 10 mm, mezi pláštěm a horní částí krytu 25 mm a v rozích 30 mm. Po obvodu příruby, která má šířku 40 mm se nachází 10 otvorů pro šrouby M10. Jejich poloha je tolerována s přesností $\pm 0,1$ mm. Další informace se nacházejí na výkrese 2024-DP-217586-00.



Obr. 4 Základní rozměry součásti.

Kryt se bude nacházet ve venkovním prostředí a je důležitá jeho odolnost proti atmosférickým vlivům. Z tohoto důvodu bude vyrobena ze základní korozivzdorné austenitické oceli 17 240 (označení dle EN X5CrNi18-10), která má dobrou odolnost při normálních teplotách. Má zaručenou svařitelnost a je vhodná pro tváření. Využívá se například pro stavbu chemických zařízení, v potravinářském průmyslu, karoserie, kryty a lehké statické konstrukce. Její chemické složení je uvedeno v tab. 1 a základní vlastnosti v tab. 2. [10; 11]

Tab. 1 Chemické složení oceli 17 240 [11].

C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	Cr [hm. %]
max. 0,07	max. 2,0	max. 1,0	17,0 až 20,0
Ni [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	
9,0 až 11,5	max. 0,045	max. 0,030	

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 17 240 [11].

Mez kluzu R_e [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
min. 210	500 až 700	min. 45

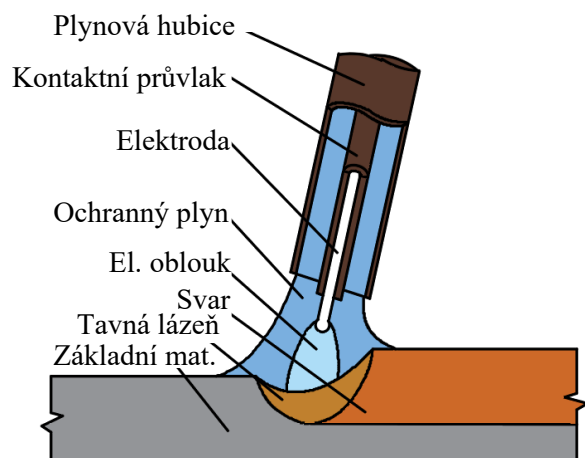
1.1 Variantní řešení výroby

Součást lze vyrobit různými metodami. Volba výrobní technologie je ovlivněna výrobní sérií, požadovanou přesností, tvarem dílu a jeho materiálem a požadovanými vlastnostmi. Nejprve se vytvoří základní tvar a následně do něj budou zhotoveny otvory. Při návrhu základního tvaru byly uvažovány technologie:

- Svařování – nerozebíratelné spojování dvou či více součástí za působení tepla, tlaku nebo obojího (obr. 5 a obr. 6). Lze svařovat kovové i nekovové materiály. Ocel 17 240 má zaručenou svařitelnost. Mezi nevýhody patří potřeba kvalifikovaných zaměstnanců, vnášení tepla a s tím související vznik deformací a vnitřního pnutí. Svařování tedy nebude použito k výrobě základního tvarů. [12; 13; 14]

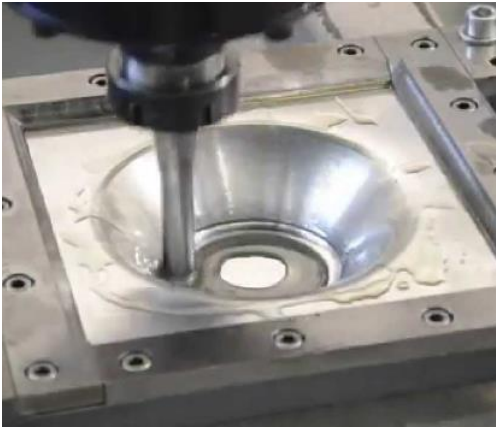


Obr. 5 Svařování [15].

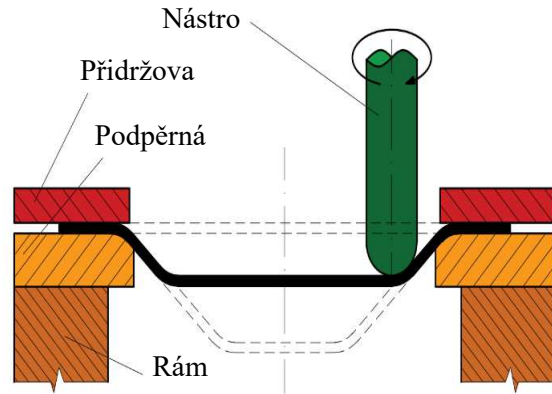


Obr. 6 Princip svařování [14].

- Inkrementální jednobodové tváření – nástroj má s plechem bodový dotyk a deformace vzniká postupně kontinuálním vtlačováním nástroje po jednotlivých přírůstcích (obr. 7). Princip metody je na obr. 8. Materiál má malé deformační odpory a tudíž jsou i nízké hodnoty tvářecích sil. Touto metodou lze tvářet široké spektrum materiálů, včetně oceli 17 240. Nevýhodou je dlouhá doba tváření, takže není vhodná pro 200 000 kusů. Navíc nelze zhotovit hrany kolmé ke dnu nádoby, proto není tato metoda vhodná k vyrobení základního tvaru. [16; 17; 18]



Obr. 7 Inkrementální jednobodové tváření [19].

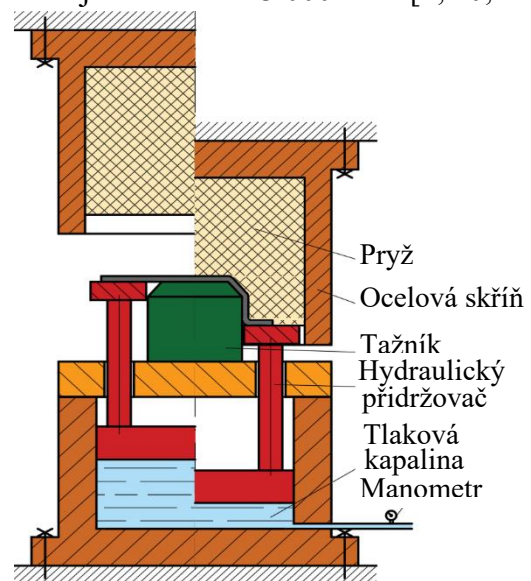


Obr. 8 Princip inkrementálního jednobodového tváření [18].

- Tváření elastomerem – existuje více metod (obr. 9). Jedním z představitelů je metoda Marform, viz obr. 10. Tažník je upevněn a polotovár, který je podepřen přídržovačem, se lisuje tlakem elastomeru, umístěného v pohyblivém kontejneru. Díky vysokým, rovnoměrně rozloženým tlakům, se vyrábí hladké, nezvrásněné dílce s nulovým odpružením. Metodu lze použít pro tenké ocelové i neželezné plechy, takže zadanou součást o tloušťce 1 mm lze vyrobit. Nevýhodou je velká tvářecí síla, potřebná na přetvoření elastomeru, a tudíž potřeba těžkotonážního lisu. Dále dochází k rychlému opotřebení elastomeru, jehož životnost je maximálně 3 000 tahů. [4; 20; 21]



Obr. 9 Tváření elastomerem [22].

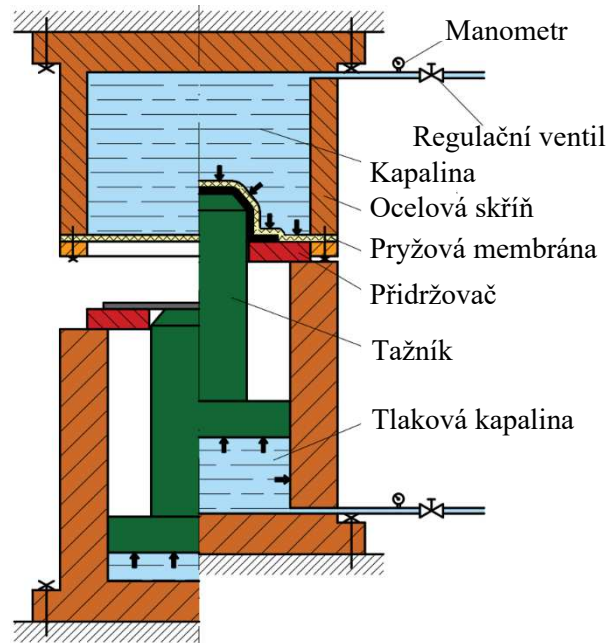


Obr. 10 Marform [21].

- Tváření kapalinou – existuje více metod tváření kapalinou (obr. 11). Jedním z představitelů je hydroform, jehož schéma je zobrazeno na obr. 12. Tažnicí je kapalina v kontejneru, jenž je uzavřen pryžovou membránou, která má životnost 5 000 až 10 000 kusů. Kapalina tvaruje polotovár podle tažníku a zároveň slouží také k jeho přidržení. Pomocí ventilu lze regulovat její tlak. Používá se k tváření běžné i ušlechtilé oceli, včetně 17 240. Lze zpracovávat polotovary od 0,2 do 10 mm, takže zadaný díl, který má tloušťku 1 mm by šel vyrobit. Z důvodů nutnosti speciálního zařízení s vysokými požadavky na těsnost, které má vysoké pořizovací náklady, a delších výrobních časů kvůli prodlevy při zvyšování tlaku v komoře nebude tato metoda použita. [4; 20; 21]



Obr. 11 Tváření kapalinou Triform [23]

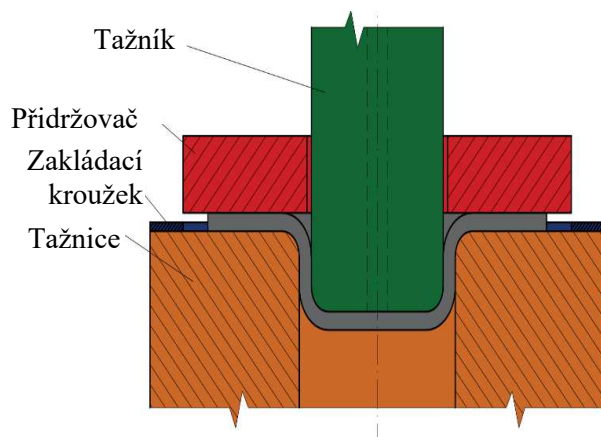


Obr. 12 Hydroform [21].

- Hluboké tažení – proces, kdy se vytváří z plechu duté těleso pomocí pevných nástrojů, jak je zobrazeno na obr. 13 a obr. 14. Lze vyrobit součásti různých tvarů a velikostí z legovaných i nelegovaných ocelí a neželezných kovů. Ocel 17 240 je vhodná pro hluboké tažení. Oproti předchozím metodám jsou potřebné krátké výrobní časy, takže je proces pro výrobní sérii 200 000 kusů vhodný. [2; 3; 11; 24]



Obr. 13 Hluboké tažení [25].

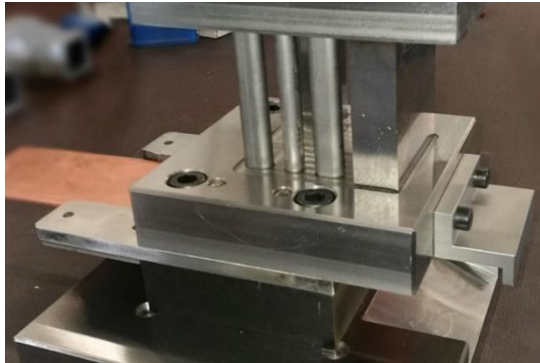


Obr. 14 Princip hlubokého tažení [2].

Po vytvoření základního tvaru je potřeba zhotovit otvory pro šrouby a větrání. Při návrhu výroby děr byly uvažovány technologie:

- Stříhání v nástroji – oddělování materiálu smykovým působením nástroje podél křivky stříhu. Příklad střížného nástroje se nachází na obr. 15. Na spodní hraně střížné plochy vzniká ořep. Ocel 17 240 s tloušťkou 1 mm lze tímto způsobem zpracovávat. Vzhledem k tomu, že se otvory nachází také na plášti a mají rozdílné tvary a rozměry, bylo by potřeba více složitých nástrojů, které by dokázaly převést pohyb střížníku na vodorovný. Jejich výroba by však byla příliš drahá. [26]

- Řezání vodním paprskem – k oddělování materiálu je využívána kinetická energie vysokotlakého proudu vodního paprsku s rychlostí 600 až 900 m·s⁻¹ (obr. 16). Obvykle se přidává také abrazivo. Je vhodný pro řezání kovových i nekovových materiálů, včetně oceli 17 240. Lze řezat do tloušťky 20 mm a přesností až 0,2 mm na metr délky, takže plech o tloušťce 1 mm lze zpracovat. Nevýhodami je vysoká spotřeba abraziva a delší výrobní časy, takže není tato metoda pro sérii 200 000 ks za rok vhodná. Navíc nelze řezat otvory na plášti kolmé k přírubě. [27; 28]

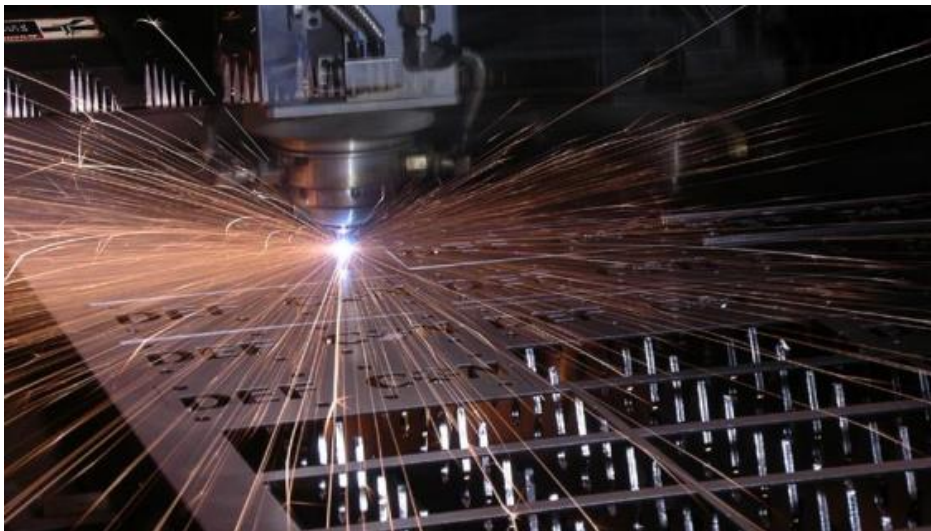


Obr. 15 Střižný nástroj [29].



Obr. 16 Řezání vodním paprskem [28].

- Řezání laserem – laserový svazek ohřeje materiál, který se v místě dopadu nataví. Ten je pak z místa řezu odveden pomocí pracovního plynu, který proudí pod velkým tlakem z trysky (obr. 17). Lze řezat téměř všechny technické materiály, mezi které patří také ocel 17 240. Používá se pro tloušťky až 25 mm. Řezné plochy dosahují drsnosti Ra = 1,6 μm a přesnost řezání je 0,05 až 0,1 mm je jeden metr délky řezu. Lze provádět rovinné i prostorové řezy, takže díry v součásti lze touto metodou zhotovit. [13; 27]



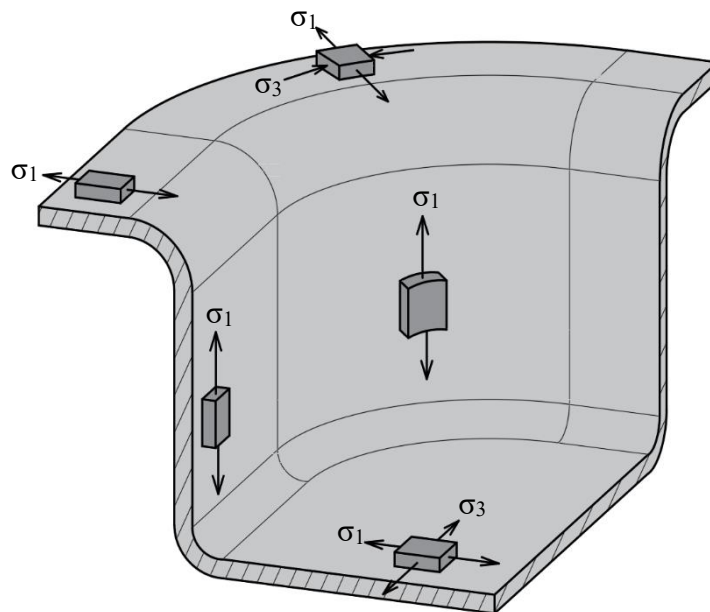
Obr. 17 Řezání laserem [13].

Po posouzení výhod a nevýhod všech metod se jako nejvhodnější pro výrobu základního tvaru jeví hluboké tažení krabicových výtažků bez ztenčení stěny, na což bude také zaměřena literární rešerše i praktická část. Pro otvory se jako nejvhodnější jeví technologie řezání laserem.

2 HLUBOKÉ TAŽENÍ

Proces hlubokého tažení je trvalé přetvoření rovinného přístřihu plechu na duté prostorové těleso. Jedná se o prostorový ohyb do nerozvinutelného tvaru. Lze vytvářet velké i malé díly válcových, kuželových, krabicových i nepravidelných tvarů s přírubou nebo bez ní. Jestliže během procesu nedochází k výraznému zeslabení tloušťky plechu, jedná se o tažení bez ztenčení stěny. Pokud je požadovaná rozdílná tloušťka dna a pláště, využívá se tažení se ztenčením stěny. [2; 3]

Schéma napjatosti při tažení čtvercových nádob je na obr. 18. Při tažení se materiál v přírubě intenzivně pěchuje ve směru tečného napětí σ_3 a zároveň dochází k prodloužení ve směru tahového napětí σ_1 . U hranatých výtažků je tento stav napjatosti pouze v rozích nádoby a na rovných stěnách se uvažuje podobný jako při ohybu. Tahové napětí dosahuje největší hodnoty v poloměrech zaoblění a nejmenší na stěnách. [1; 30]



Obr. 18 Schéma napjatosti při tažení čtvercových nádob [30].

Při konstruování výtažků by se mělo počítat s nedokonalostmi procesu, které ovlivňují jeho přesnost. Patří mezi ně [20; 30]:

- Tloušťka stěny – na vnějším obvodu příruby je největší a v přechodu dna a pláště nejmenší. V obou směrech se může lišit o 20 až 30 % oproti výchozí tloušťce.
- Kuželovitost pláště – vzniká vlivem tažné mezery a odpružení. Úhel bývá 1 až 3°. Patrné je to obzvláště u nízkých výtažků s velkou tloušťkou stěny.
- Mírné rozevření okrajů – u výtažků z tlustých a tvrdších plechů vlivem tažné mezery a odpružení.
- Nerovný okraj výtažků – vzniká vlivem anizotropie, nestejněměrné tloušťky plechu a špatného přidržení. Je potřeba počítat s ostřížením.
- Zaoblění mezi dnem, pláštěm a přírubou – je potřeba pro proces tažení. Pro jejich zmenšení je potřeba přidat další operaci nebo použít dražší nástroj. [30]

Existují způsoby, kterými lze nedokonalosti podstatně omezit. Mezi ně patří například kalibrování, jemnější odstupňování tahů, kombinace tažení se ztenčením stěny nebo protlačováním. Je však potřeba přidat další operaci nebo použít dražší nástroj. [30]

Tvar výtažku by měl být z hlediska kvality a ekonomičnosti výroby co nejjednodušší. Pro složitý tvar je potřeba více operací a taktéž se snižuje trvanlivost nástroje. Proto je potřeba dodržet zásady technologičnosti, kterými jsou [30]:

- Materiál – ideálně by měl být hlubokotažný, odolný proti stárnutí, mít rovnoměrnou tloušťku a necitlivý ke směru vláken, nepotřebuje žíhat.
- Nepředepisovat toleranci tloušťky.
- Nepřidávat na výšku výtažku.
- Nerozšiřovat nadměrně přírubu – musí se dodržet pravidlo nejmenší příruby:

$$D_p \geq d + 12 \cdot t \text{ [mm]} \tag{2.1}$$

kde: D_p – vnější průměr příruby [mm],
 d – průměr výtažku [mm],
 t – tloušťka stěny [mm].

- Maximální výška hranatých výtažků zhotovitelná jedním tahem – závisí na velikosti zaoblení v rozích a vypočte se podle tab. 3.

Tab. 3 Maximální výška nerotačního výtažku dosažitelná v prvním tahu [3].

Velikost zaoblení R	Maximální výška výtažku
do 5 mm	$8 \cdot R$
přes 5 do 10 mm	$7 \cdot R$
přes 10 do 13 mm	$6 \cdot R$
přes 13 do 19 mm	$5 \cdot R$
přes 19 mm	$4 \cdot R$

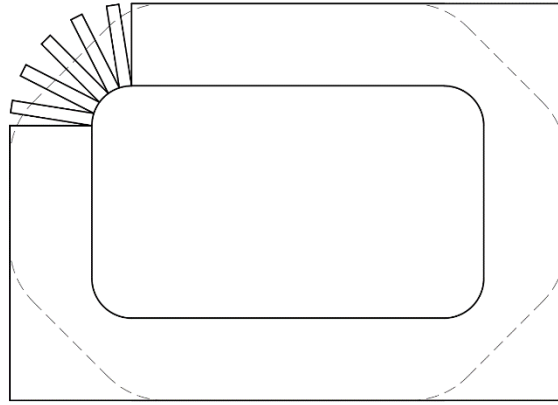
- Zaoblení přechodů dna, pláště a příruby – nemohou být příliš malé. Pokud je požadován menší poloměr, je potřeba zařadit operaci kalibrování.
- Přesnost rozměrů výtažku – závisí na jakosti práce v lisovně, jakosti a vlastnostech materiálu a na tloušťce plechu. Výtažky z tvárného a tlustšího materiálu lze vyrábět přesněji. V případě požadavku na vyšší přesnost je zapotřebí zhotovit dílec na více tahů.
- Příruba výtažků zhotovených jedním tahem má být rovinná.

2.1 Návrh polotovaru

Protože u hranatých výtažků není materiál deformován rovnoměrně podél celého obvodu, je náročnější určit správný tvar polotovaru. Pokud by byl navrhnut špatně, mohlo by docházet k větší spotřebě materiálu, kov by byl nadměrně namáhán a zvyšoval by se počet operací. Tvar lze určit pomocí simulačních programů, zkusmo, graficky nebo pomocí výpočtu. [3; 20]

Na obr. 19 je znázorněn teoretický tvar polotovaru, který by vznikl přidáním stejného množství materiálu na každou stranu. Přebytný kov v rozích by se vystříhal a dílec by byl zhotoven pouhým ohýbáním. U hranatých výtažků však dochází k ohybu pouze na rovných stěnách a v rozích k tažení, při kterém dochází k přemístování kovu do výšky. Proto je potřeba přebytný materiál v rozích ubrat, čímž vznikne přibližný tvar polotovaru, který je znázorněný čárkovanou čarou. [3]

Ideální tvar přístřihu se určuje graficko-početní metodou. Vychází se z předpokladu, že hrany výtažku jsou zaoblené v rozích i u dna, takže celkové množství kovu potřebné k zhotovení všech rohů je stejné jako u válcového výtažku stejného poloměru a výšky. Dále se předpokládá, že se tloušťka stěny nemění. [3; 31]



Obr. 19 Teoretický a přibližný výchozí tvar polotovaru [3].

Před konstruováním ideálního tvaru přístříhu je potřeba provést potřebné výpočty. Nejprve se vypočte délka ohýbaných stěn L_c . Z důvodu anizotropie je nutno zvětšit výšku o přídavek na ostřížení, který se určí na základě tloušťky plechu a maximálního rozměru podle tab. 4. Pokud má výtažek přírubu, je s ní také potřeba počítat. Celková délka rovných stěn včetně zaoblení, příruby a přídavku na ostřížení se vypočte [3; 31]:

$$L_s = h_s^* + R + 0,57 \cdot r_d + L_p, \quad (2.2)$$

kde: h_s^* – délka rovné části stěny včetně přídavku na ostřížení [mm],

$$h_s^* = h_s + \Delta c \quad (2.3)$$

kde: h_s – délka rovné části stěny [mm],

$$h_s = H - r_d - r_p - t, \quad (2.4)$$

kde: H – výška výtažku [mm],

r_d – poloměr zaoblení mezi dnem a pláštěm [mm],

r_p – poloměr zaoblení mezi přírubou a pláštěm [mm],

t – tloušťka stěny [mm],

Δc – přídavek na ostřížení [mm],

R – poloměr zaoblení v rozích [mm],

L_p – délka příruby včetně zaoblení [mm],

$$L_p = z_p + l_p, \quad (2.5)$$

kde: z_p – délka zaoblení mezi přírubou a pláštěm [mm],

$$z_p = \frac{\pi \cdot \left(r_p + \frac{t}{2} \right)}{2}, \quad (2.6)$$

l_p – šířka příruby [mm].

Tab. 4 Přídavky na ostřížení, hodnoty jsou uvedeny v mm [30].

Tloušťka materiálu t	Maximální rozměr výtažku			
	do 100	100 až 200	200 až 300	nad 300
do 2	2,0 až 2,5	2,5 až 3,0	3,0 až 3,5	3,5 až 4,0
2 až 3	3,0 až 3,5	3,5 až 4,0	3,5 až 4,0	4,0 až 4,5
3 až 5	4,0 až 5,0	4,0 až 5,0	4,5 až 5,5	5,0 až 6,0
5 až 8	4,5 až 6,5	5,0 až 7,0	5,5 až 7,0	6,0 až 7,5

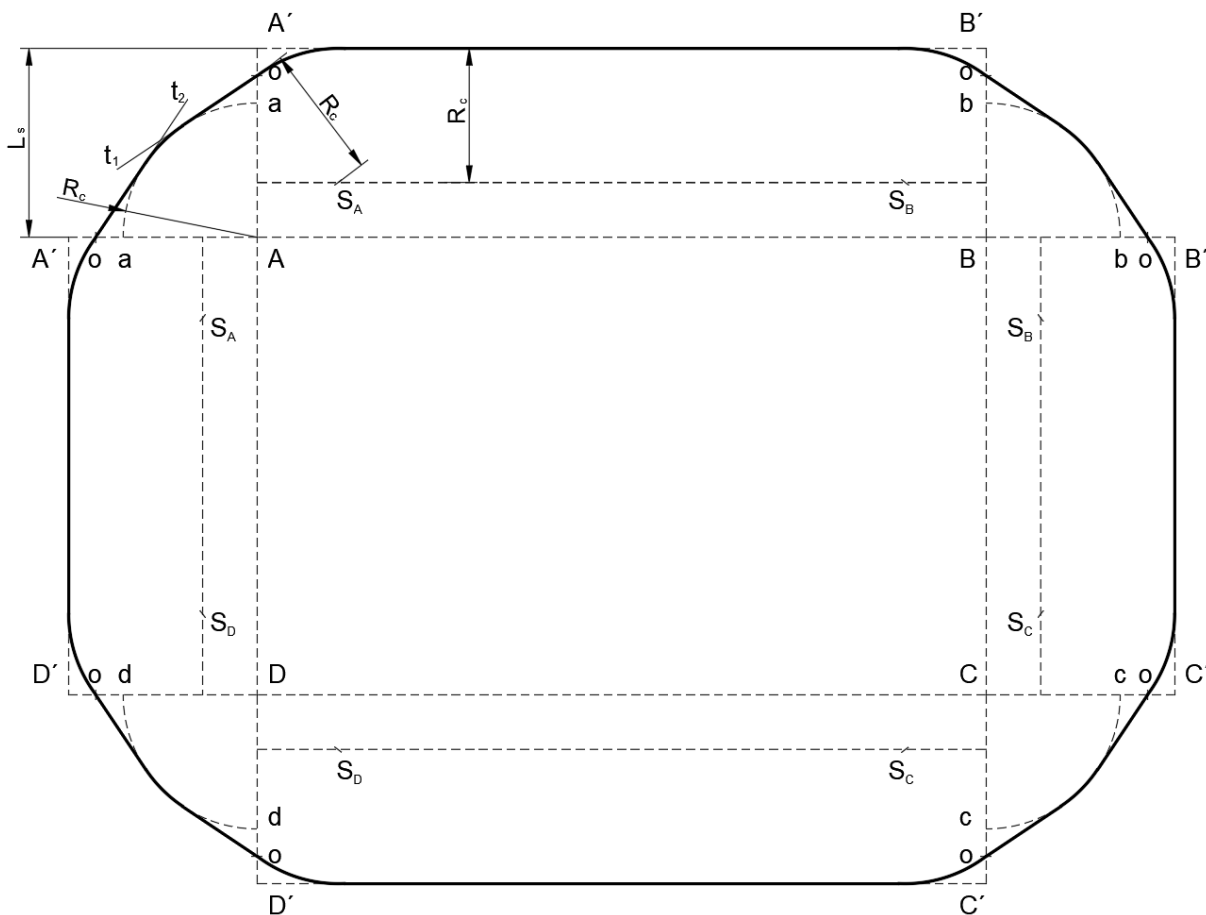
Druhým důležitým výpočtem je určení redukovaného poloměru R_c , což je poloměr kruhového přístřihu potřebného pro tažení teoretické válcové nádoby, složené z rohů krabicového výtažku. Jeho velikost se vypočte [3]:

$$R_c = R'_c + L_p, \quad (2.7)$$

kde: R'_c – redukovaný poloměr výtažku bez příruby [mm],

$$R'_c = \sqrt{2 \cdot R \cdot h_s^* + R^2 + 1,14 \cdot R \cdot r_d} \quad (2.8)$$

Princip konstruování ideálního tvaru přístřihu je vysvětlen na obr. 20 na nejjednodušším výlisku s obdélníkovým půdorysem. Plochá část dna je nakreslena tenkou čárkovanou čarou a je označena body **A** až **D**. Na každou stěnu jsou vyneseny kolmice o délce L_s a koncové body jsou označeny **A'** až **D'**. Vzniklé části polotovaru jsou potřebné k ohybu rovných stěn výtažku. Čtvrtkružnice se středy v bodech **A** až **D** mají poloměr R_c , a představují materiál potřebný k tažení rohů. Rohy rovných stěn je potřeba zaoblit pomocí kružnic o poloměru R_c , které mají středy v bodech S_A až S_D a prochází body **o**, které jsou středy úseček **aA'** až **dd'**. Ze středů **o** jsou vedeny tečny na čtvrtkružnice v rozích. Ostrý roh vniklý průnikem tečen je zaoblen poloměrem R_c . Výsledný tvar ideálního tvaru přístřihu je vyznačen tlustou čarou. [3; 20; 32]



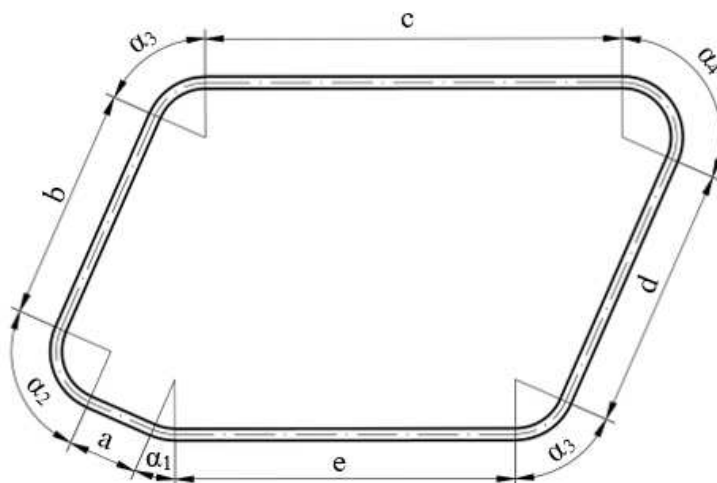
Obr. 20 Princip konstrukce ideálního přístřihu [3].

2.2 Určení počtu operací

Při navrhování výroby je potřeba určit, na kolik tahů bude výtažek zhotoven. Každá operace vyžaduje speciální nástroj, čímž se zvyšují náklady na výrobu a potřebný čas. Je-li však požadována velká přesnost rozměrů dílce nebo velmi malé poloměry zaoblení, je nezbytné přidat jako závěrečnou operaci kalibrování. [3; 30]

Největší vliv na počet operací má poloměr zaoblení výtažku v rozích **R**, který určuje výšku, jež lze v prvním tahu zhotovit. Pokud je materiál hlubokotažný, lze na jednu operaci vytvořit výtažky o maximální výšce uvedené v tab. 3. U běžných materiálů se však musí hodnoty uvedené v tabulce snížit o $1 \cdot R$. Největší výšky se dosáhne tam, kde je délka ohýbané části rovna aspoň šestinásobku poloměru zaoblení. Kromě geometrie a materiálu výtažku má na počet operací vliv také tažná rychlost, mazání a konstrukce nástroje. Jestliže se táhne bez přidržovače, je maximální výška mnohem nižší. [3]

Počet operací lze určit také pomocí součinitele tažení **m**. Jestliže stěny výtažku nejsou kolmé, jako je tomu např. na obr. 21, každý úhel vyžaduje jiný stupeň deformace a má rozdílné součinitele tažení. Jeho velikost je závislá na úhlu a délkách rovných stěn, které ho svírají. Stanovuje se pomocí tab. 5. [20; 30; 33]



Obr. 21 Schéma výtažku, který nesvítá pravé úhly [30]

Tab. 5 Hodnoty součinitele m_1 pro tažení nádob s různými úhly [30].

Délky přiléhající k úhlu α		Úhel rohu nádoby α [°]							
menší	větší	150	120	90	60	45	30	15	0
R	$(1 \div 1,5) \cdot R$	0,56	0,55	0,54	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48
R	$2 \cdot R$	0,55	0,54	0,53	0,51	0,50	0,49	0,48	0,47
R	$3 \cdot R$	0,53	0,53	0,51	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45
R	$5 \cdot R$	0,52	0,51	0,49	0,47	0,45	0,44	0,42	0,40
R	$8 \cdot R$	0,50	0,49	0,46	0,42	0,40	0,37	0,35	0,32
R	$10 \cdot R$	0,49	0,47	0,43	0,37	0,34	0,31	0,27	0,23
$2 \cdot R$	$(2 \div 3) \cdot R$	0,53	0,52	0,50	0,47	0,45	0,43	0,41	0,38
$2 \cdot R$	$4 \cdot R$	0,52	0,51	0,49	0,46	0,44	0,42	0,40	0,37
$2 \cdot R$	$6 \cdot R$	0,51	0,50	0,47	0,43	0,41	0,38	0,36	0,33
$2 \cdot R$	$10 \cdot R$	0,48	0,46	0,42	0,36	0,33	0,30	0,26	0,22
$3 \cdot R$	$6 \cdot R$	0,50	0,49	0,46	0,42	0,37	0,35	0,35	0,32
$3 \cdot R$	$9 \cdot R$	0,48	0,46	0,42	0,36	0,33	0,30	0,28	0,22
$3 \cdot R$	$10 \cdot R$	0,47	0,44	0,40	0,34	0,30	0,26	0,22	0,17

Po zjištění součinitele tažení se počítá redukce poloměrů v rozích. Po první operaci bude mít poloměr v rozích velikost podle [31]:

$$R_1 = m_1 \cdot R_c, \quad (2.9)$$

kde: m_1 – součinitel tažení pro první tah [mm].

Je-li splněna podmínka $R_1 < R$, lze zhotovit výtažek na jednu operaci. V opačném případě bude potřeba počítat dál až do dosažení požadovaného poloměru v rohu nádoby [31]:

$$R_i = m_i \cdot R_{i-1}, \quad (2.10)$$

kde: m_i – součinitel tažení pro i-tý tah [-],

R_{i-1} – poloměr zaoblení v rozích zhotovený v předcházející operaci [mm].

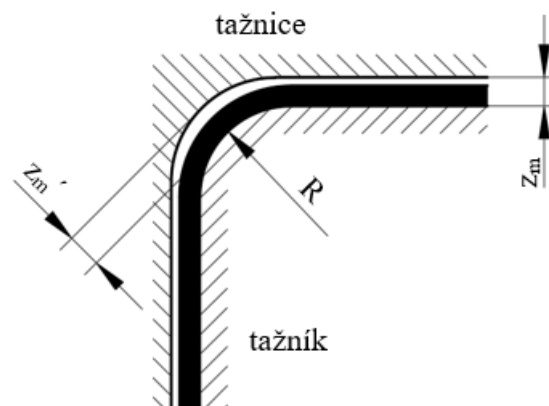
2.3 Tažná mezera a tažný poloměr

Aby se mohl přebytečný materiál přemísťovat a nedocházelo k jeho pěchování, musí být mezi tažníkem a tažnicí tažná mezera, která je větší než tloušťka plechu. Jestliže by byla příliš velká, způsobovala by zvlnění pláště. Při víceoperačním tažení se postupně zmenšuje až do posledního tahu, ve kterém může být rovna tloušťce plechu. Při kalibraci může být dokonce i menší. Jelikož v rovných částí výtažku dochází pouze k ohybu, bývá tažná mezera v podélných stranách menší než v rozích, viz obr. 22 [31; 33; 34]:

$$z_m = (1,15 \div 1,30) \cdot t. \quad (2.11)$$

V rozích se volí tažná mezera [31]:

$$z_m' = (1,30 \div 1,40) \cdot t. \quad (2.12)$$



Obr. 22 Tažná mezera [31].

Tažný poloměr bývá pro první tahy u nerotačních výtažků stejný jako u tažnic rotačních. Závisí na materiálu a jeho tloušťce. V případě tenčího plechu jsou okraje výtažku rovnější, avšak za cenu většího namáhání plechu. Bude-li tažný poloměr podél rovných stran tažnice menší oproti tažnému poloměru v rozích, zvětší se radiální napětí a dosáhne se částečné rovnováhy ve stupni zpevnění a výsledném pnutí v materiálu. Tím se také zabrání vzniku vrásek na povrchu výtažku. Jestliže se poloměr zaoblení tažnice zvětší, zvětší se také výška dosažitelná na jednu operaci a zmenší se plocha pod přídržovačem, z čehož vyplývá riziko zvlnění. V prvním tahu bývá tažný poloměr tažnice největší a dosahuje hodnot [3; 33; 34; 35]:

$$R_{t1} = (8 \div 10) \cdot t. \quad (2.13)$$

U dalších tahů se postupně zaoblení tažné hrany zmenšuje na hodnoty [31]:

$$R_{tn} = (6 \div 8) \cdot t. \quad (2.14)$$

Poloměry zaoblení tažníku jsou stejné nebo větší než poloměry tažných hran tažnice. U tlustých plechů se z důvodu zabránění trhání volí poloměr zaoblení dna v rozích až dvojnásobný oproti zaoblení dna podél bočních stěn výtažku. V poslední operaci musí mít tažník poloměr zaoblení předepsaný na výkrese výtažku. [31; 33; 34]

2.4 Použití přidržovače

Tažení může probíhat s přidržovačem nebo bez něj. Zda-li bude potřeba, závisí na tloušťce materiálu, tažné vůli, zaoblení tažné hrany a redukci. U nízkých výtažků z poměrně tlustého materiálu není potřeba. Bez přidržovače lze táhnout při redukci do 10 %, jinak se začne okraj přístřihu vlnit. S přidržovačem se převážně táhnou hlubokotažné plechy, které mají tloušťku menší než 0,5 mm. Přidržovač se použije [3; 36]:

- Zjistí-li se výpočtem, že platí nerovnost:

$$k_p > \frac{100 \cdot d_1}{D_0}, \quad (2.15)$$

kde: k_p – součinitel určující nutnost použití přidržovače [-],

$$k_p = 50 \cdot Z - \left(\frac{\sqrt{t}}{\sqrt[3]{D_0}} \right), \quad (2.16)$$

kde: Z – materiálová konstanta, jejíž hodnoty jsou v tab. 6,

D_0 – redukovaný průměr [mm],

d_1 – průměr v rozích po první operaci [mm].

- Při druhém a dalším tahu v případě, jestliže je koeficient tažení menší než 0,9.

Tab. 6 Hodnota materiálové konstanty Z pro určení nutnosti přidržovače [36].

Materiálová konstanta	Ocelový hlubokotažný plech	Mosazný plech	Hliníkový plech
Z [-]	1,90	1,95	2,00

Tlak přidržovače by měl být natolik velký, aby nedocházelo k tvoření záhybů a vrásek na okrajích pláště výtažku. Při druhém a dalších tazích má navíc za úkol středění oproti tažnici. Tlak na styčné ploše se volí podle použitého materiálu a jeho tloušťky z tab. 7. [3; 34; 35]

Tab. 7 Doporučená velikost přidržovacího tlaku v MPa [3].

Tloušťka [mm]	Ocelový plech tvrdý	Ocelový plech hlubokotažný	Mosaz	Hliník
0,2	3,0	2,1 až 2,5	2,0	1,5
0,4	2,9	2,0 až 2,4	1,9	1,5
0,6	2,8	2,0 až 2,4	1,9	1,45
0,8	2,8	1,9 až 2,3	1,8	1,45
1	2,7	1,8 až 2,3	1,8	1,4
1,5	2,7	1,8 až 2,2	1,7	1,35
2	2,6	1,8 až 2,1	1,7	1,3
2,5	2,5	1,8 až 2,1	1,6	1,25
3	2,5	1,9 až 2,1	1,6	1,2
3,5	2,4	1,9 až 2,0	1,5	1,2

Přidržovací síla se vypočte pomocí přidržovacího tlaku, který se volí podle tvářeného materiálu a ploše, na které působí [35]:

$$F_p = S_p \cdot p_i, \quad (2.17)$$

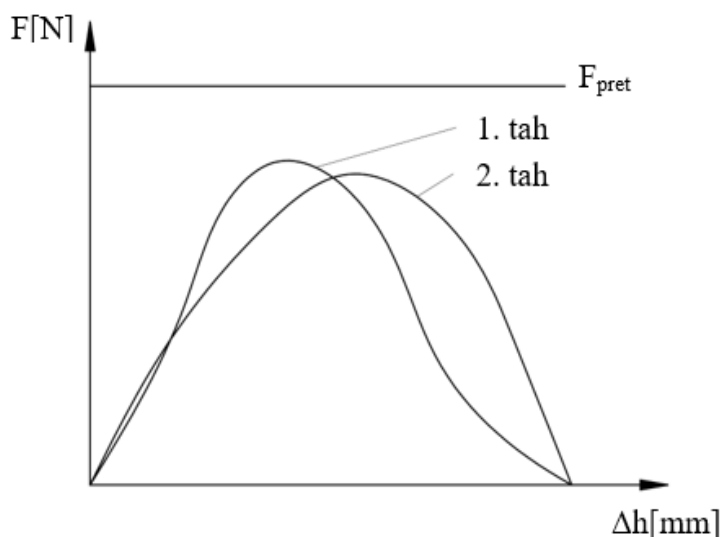
kde: S_p – plocha na které působí přidržovač [mm²],
 p_i – tlak přidržovače [MPa].

2.5 Tažná síla, práce a rychlost

Výpočet tažné síly je potřebný k určení vhodného lisu. Využívají se praktické vzorce, vycházející z přípustného napětí ve výtažku. Nedávají však nahlédnout do podstaty tvářecího procesu. Průběh tažné síly je zobrazen na obr. 23. Síla, při které dojde k utržení dna se vypočte podle vzorce [3; 20]:

$$F_{pret} = o_v \cdot t \cdot R_m, \quad (2.18)$$

kde: o_v – obvod výtažku [mm],
 R_m – mez pevnosti materiálu [MPa].



Obr. 23 Průběh tažné síly [20].

Praktické vzorce se používají k přibližnému určení síly. Ve skutečnosti je třecí síla přenášena také třením mezi výtažkem a tažníkem. U tažení nádob nerotačního tvaru se vychází z předpokladu, že k tažení dochází pouze v rozích a v rovných částech dochází k ohybu. Celková síla potřebná k tažení je součtem síly tažné a ohybové [3; 33]:

$$F_{ct} = F_t + F_o, \quad (2.19)$$

kde: F_t – síla pro tažení rohů [N],

$$F_t = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot t \cdot R_m \cdot C_1, \quad (2.20)$$

kde: C_1 – konstanta závislá na hloubce tahu [-]:

$C_1 = 0,5$ pro mělké výtažky,

$C_1 = 2$ pro hlubší tahy $H = (5 \text{ až } 6) \cdot R$,

F_o – síla pro ohyb rovných stran [N],

$$F_o = L_v \cdot t \cdot R_m \cdot C_2, \quad (2.21)$$

kde: L_v – délka rovných stran výtažku [mm],

C_2 – konstanta závislá na přidržovacím tlaku [-]:

$C_2 = 0,2$ pro nulový přidržovací tlak,

$C_2 = 0,3$ pro normální přidržovací tlak.

Celková síla při tažení je součtem sil tažné, přidrřovací a vyhazovací, která se v praxi počítá tak, aby odpovídala přibližně 10 % ze síly tažné [3; 30]:

$$F_c = F_{ct} + F_p + F_v, \quad (2.22)$$

kde: F_{ct} – celková síla potřebná k tažení [N],

F_p – přidrřovací síla [N],

F_v – vyhazovací síla [N].

Pro kontrolu velikosti použitého lisu se provádí výpočet práce. Ta se vypočte ze vzorce [35]:

$$A = \frac{C \cdot F_c \cdot H_L}{1\,000}, \quad (2.23)$$

kde: H_L – zdvih beranu lisu [mm],

C – součinitel [-], který bývá:

$C = 0,66$ pro tažení bez kalibrování dna,

$C = 0,8$ pro tažení s kalibrováním dna.

Tažná rychlost je rychlost průběhu tažné operace. Volí se podle tvářeného materiálu. U modernějších lisů se dá na rozdíl od těch starších měnit. Neměla by však překročit určitou hodnotu, aby nedošlo k porušení výtažku. Hodnoty doporučených tažných rychlostí jsou uvedeny v tab. 8. [3]

Tab. 8 Doporučené rychlosti tažení kovů [3].

Materiál	Tažná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Austenitická korozivzdorná ocel	7
Nelegovaná ocel	17
Hliník a jeho slitiny	25
Měď a její slitiny	66

U výstředníkových lisů se tažná rychlost mění během tažení. Nejnížší, tj. nulová, je v okamžiku dosažení spodní polohy výstředníku. Maximální hodnoty, která je téměř shodná s obvodovou rychlostí tažníku, je dosaženo v okamžiku dosednutí tažníku na materiál. Její přibližnou hodnotu, která však dostačuje pro praxi, lze vypočítat pomocí následujícího vzorce [3]:

$$v = 0,0063 \cdot n_L \cdot \sqrt{z_L \cdot p - p^2}, \quad (2.24)$$

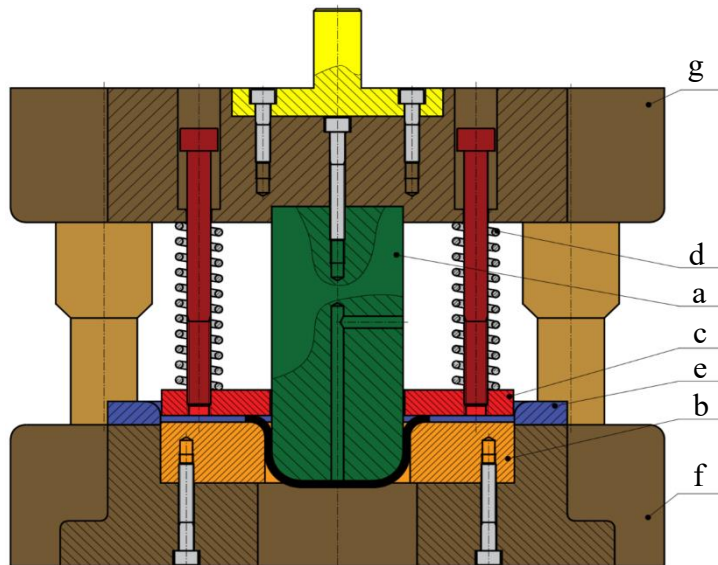
kde: n_L – počet otáček lisu [min^{-1}],

z_L – celkový zdvih beranu lisu [mm],

p – pracovní pohyb tažníku (od okamžiku dosednutí na materiál až po dosažení spodní polohy) [mm].

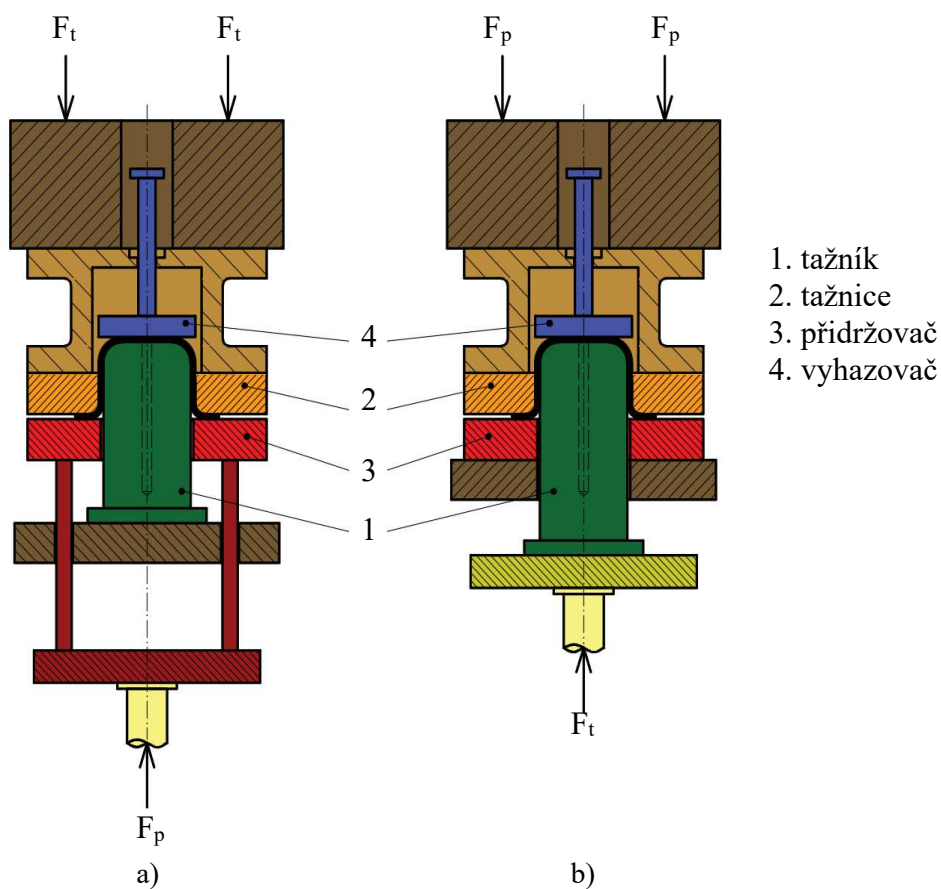
2.6 Konstrukce nástrojů

Hlavní činné části tažného nástroje jsou tažník a tažnice. Patří mezi ně také přidrřovač, ale v určitých případech lze táhnout i bez něj. Konstrukce nástroje se liší podle stroje. V případě užití jednočinných lisů, viz obr. 24, se polotovar ustavuje pomocí středícího kroužku (e) na tažnici (b), která je zapuštěna a přišroubována do spodní části vodicího stojánku (f). Horní část vodicího stojánku (g) je upevněna do beranu lisu pomocí upínací stopky. Přidrřovač (c) vytváří tlak na polotovar pomocí pružiny (d), která se stlačuje horní částí vodicího stojánku a zároveň tažník (a) tvaruje plech. [3]



Obr. 24 Nástroj pro první tah s přidržovačem pro jednočinný lis [3].

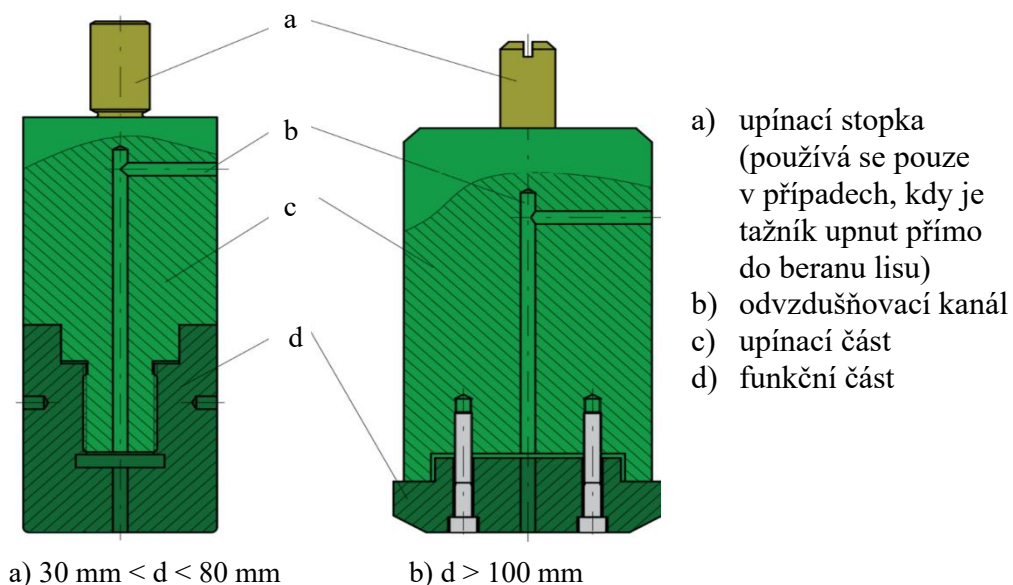
Při použití vícečinných lisů může být tažník pohyblivý, umístěný v horní části, a tažnice je upevněna na stole lisu. Nevýhodou je potřeba přidavného zařízení nebo dalšího samostatně ovládaného beranu pro přidržovač. V praxi se často používá obrácená koncepce (obr. 25a), kdy tažník je nepohyblivě upevněn na stole a tažnice se pohybuje dolů. Přidržovač je ovládán spodním beranem a slouží zároveň také jako vyhazovač. Další možností je tzv. reverzní tažení (obr. 25b), kdy je přidržovač upevněn na stole lisu a tlakem tažnice, umístěné v horním beranu, je vyvozena přidržovací síla. Tažník je ovládán spodním beranem a pohybuje se nahoru. [3; 24]



Obr. 25 Příklad nástrojů pro dvojčinný lis [24].

2.6.1 Tažníky a tažnice

Funkčními částmi tažníků jsou čelo a poloměr zaoblení. Nejčastěji se vyrábí z ocelí 19 191, 19 436 nebo 19 437, která je kalená a popuštěná na 61 až 63 HRC. Pokud největší strana výtažku je delší než 80 mm, vyrábí se tažník z šedé litiny 42 2432. Pro tažení korozivzdorných ocelí jsou zhotoveny z hliníkových bronzů. Z důvodu snadného stažení výtažku má být povrch tažníku hladký. Plochy, které přichází do styku s materiálem musí být broušeny na drsnost $Ra = 0,8 \mu\text{m}$. Podle velikosti výtažku mohou mít tažníky různou konstrukci. V případě velkých součástí jsou složeny ze dvou dílů, kdy funkční části jsou vyrobeny z nástrojové oceli a přišroubovány, případně připájeny k držáku s upínací částí z levnější konstrukční oceli třídy 11. Všechny tažníky musí mít odvodušňovací kanál, sloužící k zabránění vzniku podtlaku pod čelem tažníku a pro snadnější odstraňování výtažků. Kanál má průměr 5 až 10 mm a jeho boční vývod se umísťuje nad obvodem hotového výtažku. Příklady konstrukce tažníků včetně popisu jejich částí jsou na obr. 26. Tažníky jsou namáhané na vzpěr. [3; 31; 34; 35; 37]

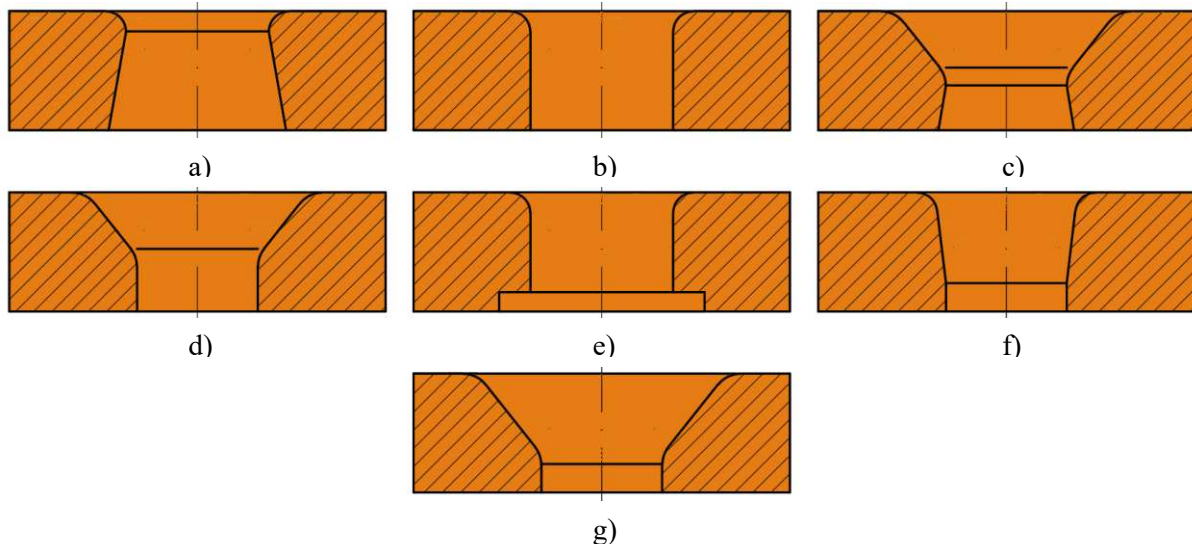


Obr. 26 Příklady konstrukce tažníků [34].

Tažnice bývají celistvé, ale lze je zhotovit také dělené. Nejčastěji se vyrábí z ocelí 19 191, 19 436 nebo 19 437, kalené a popuštěné na 58 až 63 HRC. V případě velkých tažnic lze zhotovit z obyčejné konstrukční oceli a funkční části vyvločkovat nástrojovou ocelí, čímž dojde k úspoře drahého materiálu. Mohou se také vyrábět jako odlitky z šedé litiny 42 2432 nebo v případě tažení korozivzdorných ocelí z hliníkových bronzů. [3; 31; 34; 37]

Hlavními částmi jsou poloměry zaoblení a funkční otvory v tažnici. Zaoblení ovlivňuje velikost tažné síly, napětí v materiálu a vznik vad. Výška funkčních otvorů má být z důvodu velikosti tvářecích sil a kvality povrchu malá. Na druhou stranu, aby byla životnost tažnice co největší, bylo by vhodné, aby výška byla co největší. Z těchto důvodů se doporučuje volit výšku 2 až 8krát větší, než je tloušťka plechu. Poloměry zaoblení a funkční otvory je potřeba leštit na hodnotu drsnosti $Ra = 0,05 \mu\text{m}$. Horní část tažnice, na kterou se pokládá polotovár, má mít drsnost $Ra = 0,1 \mu\text{m}$. Funkční otvory v tažnici lze zhotovit několika způsoby [34; 35; 36; 37]:

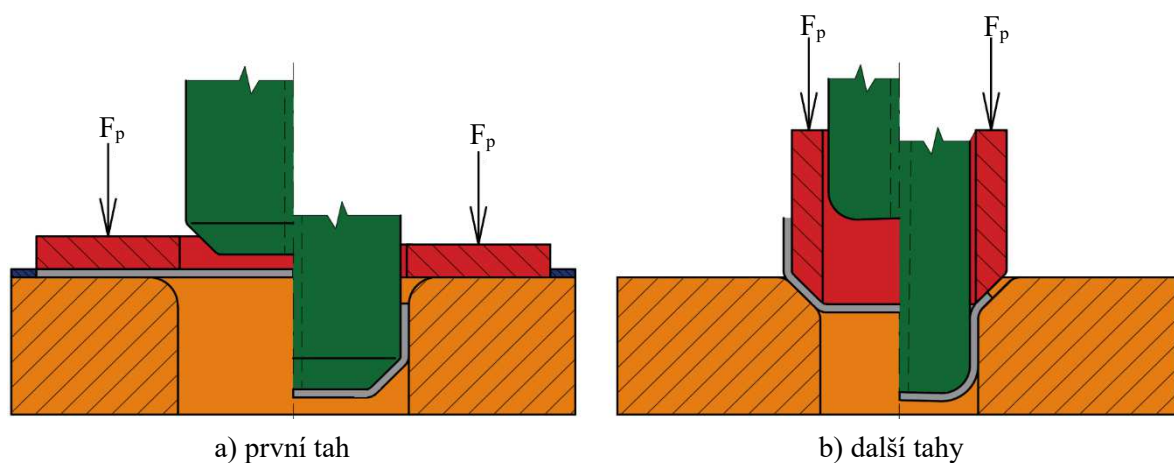
- výtažek se vrací nad povrch a je setřen z tažníku (obr. 27a),
- výtažek propadá tažnicí a je setřen ostrou hranou nebo zvláštním stíračem (obr. 27b),
- pro druhý tah, popř. další tahy kdy se výtažek vrací nad tažnici (obr. 27c),
- pro druhý, popř. další tah, kdy výtažek propadá (obr. 27d),
- tažný otvor dole odlehčený (obr. 27e),
- tažný otvor mírně kuželový, výtažek propadá, pro tažidla bez přidržovače (obr. 27f),
- tažný otvor pro tlustší plechy (obr. 27g).



Obr. 27 Funkční otvory v tažnici [36].

2.6.2 Přidržovače

Přidržovač brání vzniku zvlnění tím, že funkční plochou přitlačuje plech k tažnici. Obvykle se vyrábí z ocelí 19 191 nebo 19 436, zakalené a popuštěné na 61 až 63 HRC, případně z šedé litiny. Jeho tvar se liší pro první tah, kdy je rovinný, a pro další tahy. Na obr. 28 je červenou barvou označen přidržovač a lze vidět, že v dalších tazích se jeho dosedací plocha přizpůsobuje tvaru výtažku z předchozí operace. Úhel sklonu plochy přidržovače je 30 až 45°. [3; 31; 34; 35]



Obr. 28 Tvar přidržovače pro první a další tahy [20].

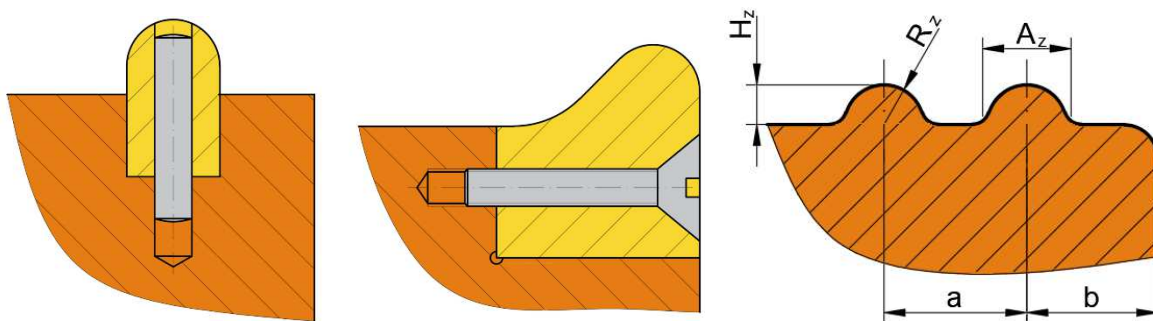
Pro tažení s přidržovačem se využívají speciální dvoučinné lisy, které mají dva berany. Vnitřní vykonává tažení a vnější slouží pro ovládání přidržovače. Při tažení malých a středně velkých výtažků lze použít i lis jednočinný. Přidržovač je pak ovládán pomocí pružin, mechanicky, pneumaticky, či hydraulicky. [3; 35]

Pružinové přidržovače bývají gumové nebo ocelové, stlačované pohybem přítlačné desky. Mají nevýhodu, že přidržovací síla během tažení stoupá. To vede ke zhoršení toku materiálu do tažnice, zeslabení stěny výtažku a v některých případech i k utržení dna. Jsou vhodné pro mělké tahy. Při použití mechanických přidržovačů je obtížné zakládání polotovarů, protože je potřeba přistříhy pokaždé zajišťovat přitážením šroubů. U složitějších pneumatických nebo hydraulických přidržovačů, využívaných pro hlubší tahy, lze snadno měnit sílu a tím dosáhnout rovnoměrného přidržovacího tlaku. [3; 30; 35]

2.6.3 Brzdící žebra, stírače a vyhazovače

Při výrobě velkých a nepravidelných výtažků může docházet k tvorbě vln. Tomu lze zabránit přibrzděním nebo urychlením toku materiálu. Nejčastěji se využívá zvětšení tlaku přidržovače, čímž se zvětší tření a materiál se zbrzdí. Lze také zvětšit plochu taženého materiálu pod přidržovačem zvětšením výchozího polotovaru. To má za následek zvýšenou spotřebu materiálu. Tyto způsoby ne vždy vyhovují, a proto je efektivnější upravit tažnici vestavěním brzdících žebor, která mohou fungovat na vtahovacím nebo brzdícím způsobu. [33; 34]

U vtahovacího způsobu je kolem tažnice zaoblený výstupek o poloměru 3 až 10krát větším, než je tloušťka plechu. Využívá se obvykle pro kruhové výtažky. U nepravidelných dílů se využívá způsob brzdící. Žebro není umístěné po celém obvodu tažnice, ale pouze v rovných částech. Příklady konstrukce jsou na obr. 29. Z důvodu většího brzdění materiálu mají výlisky minimální technologické přídávky, malé pružné deformace a lepší jakost povrchu. [32; 34]

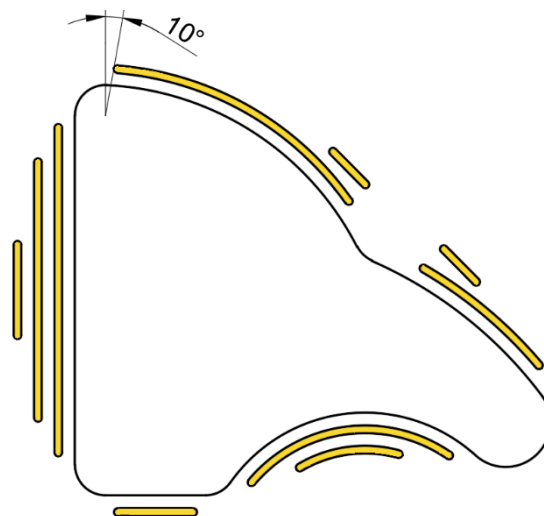


Obr. 29 Konstrukce brzdících žebor [34].

Počet a rozložení brzdících žebor se obvykle stanovuje orientačně odhadem a také pomocí numerických simulací. Na obr. 30 je zobrazeno, jak se umisťují. Rozměry se doporučují volit podle obr. 29 a tab. 9. Při výrobě výtažků typů karosérie se nejčastěji využívají žebra s výškou 6 mm a při těžkých pracovních podmínkách se využívají žebra s největšími rozměry. [30]

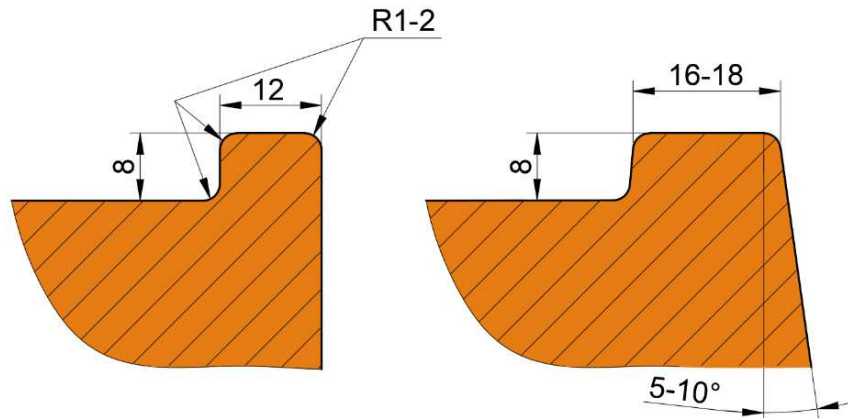
Tab. 9 Doporučené rozměry brzdících žebor [30].

A_z [mm]	H_z [mm]	b [mm]	a [mm]	R_z [mm]
14	6	25 až 35	26 až 30	7
16	7	25 až 35	28 až 32	8
20	8	32 až 38	32 až 38	10



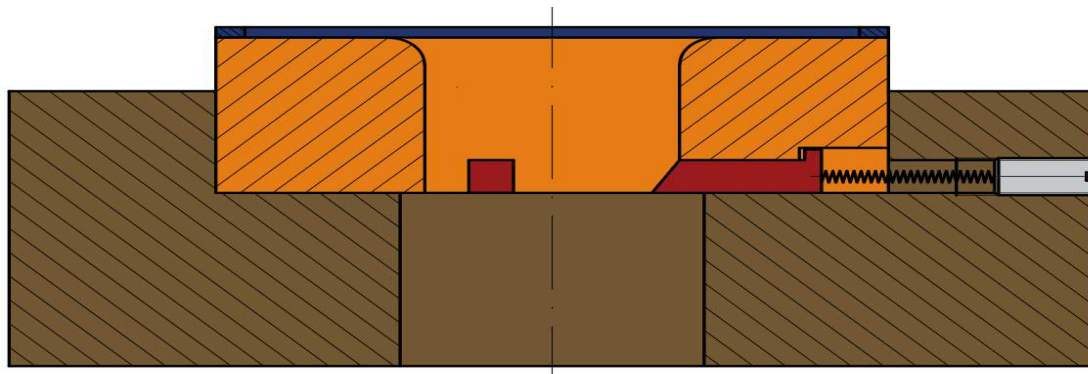
Obr. 30 Rozmístění brzdících žebor do řady [32].

V některých případech se využívají pravoúhlá brzdící žebra. Obvykle se používají v tažidlech pro nehluboké výtažky do hloubky 100 mm. Intenzita brždění taženého materiálu je větší než v případě použití oblých žeber. Závisí na poloměru zaoblení žeber, jejich výšce a počtu. Čím je menší poloměr a větší počet, tím je větší intenzita přibrzdění. Po celém obvodu výtažku se dosahuje rovnoměrného tahového napětí a zvýšení jeho jakosti. Rozměry žeber závisí na hloubce výtažku. Do hloubky 25 mm se doporučuje žebro s poloměrem zaoblení 1 až 2 mm a šířkou 12 mm a při větších hloubkách by měl být poloměr 3 až 5 mm a šířka 15 mm. Tvary a rozměry používaných žeber jsou zobrazeny na obr. 31. [30]



Obr. 31 Pravoúhlá brzdící žebra [30].

Dalšími důležitými prvky nástroje bývají stírače a vyhazovače, které slouží k odstraňování výlisků. Vyhazovače se umísťují ve spodní i v horní části nástroje. Mohou být mechanické, vzduchové a kombinované. Spodní vyhazovač může být nahrazen přidržovačem. Funkci stírače může mít ostrá hrana tažnice v případě, že výtažek propadáva tažnicí. Z důvodu cípatosti může docházet k zadírání výtažku, a proto se využívají také palcové stírače, umístěné na obvodu tažnice. Obvykle bývají tři a jsou ovládány pružinou, viz červená barva na obr. 32. Pro menší válcové výtažky se využívají kroužkové stírače. [3; 30; 34]



Obr. 32 Palcové stírače umístěné v tažnici [34].

2.6.4 Kontrola částí nástrojů na vzpěr

Dlouhé a tenké části nástrojů, které jsou namáhány tlakem, je potřeba kontrolovat na vzpěrnou stabilitu. Patří mezi ně tlačné kolíky přidržovačů nebo některé tažníky. Kontrola se provádí v případě, jsou-li splněny následující předpoklady [39]:

- díl je tenký, přímý a nešroubovitý,
- síla je tlaková a působit v těžišti čel dílů,
- díly jsou během namáhání neomezeně pružné.

Ke ztrátě vzpěrné stability dojde, překročí-li tlaková síla, působící na součást kritickou hodnotu síly. Následně začne být díl ohýbán a dojde k jeho vybočení. Kritická síla se určí dle [38; 39]:

$$F_{kritvz} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_s}{L_{vz}^2}, \quad (2.25)$$

kde: E – modul pružnosti [MPa],

L_{vz} – vzpěrná délka [mm],

J_s – kvadratický moment setrvačnosti [mm⁴], má-li součást kruhový průřez:

$$J_s = \frac{\pi \cdot D_{Sl}^4}{64}, \quad (2.26)$$

kde: D_{Sl} – průměr součásti [mm].

Kvadratický moment setrvačnosti dosazován do vztahu (2.25) je menší z dvojice kvadratických momentů k osám v rovině průřezu. Vzpěrná délka je odlišná od délky součásti l_{Sl} a je závislá na jejím upnutí, viz tab. 10 Zároveň popisuje vzdálenost bodů s minimálním ohybovým momentem. [38; 39]

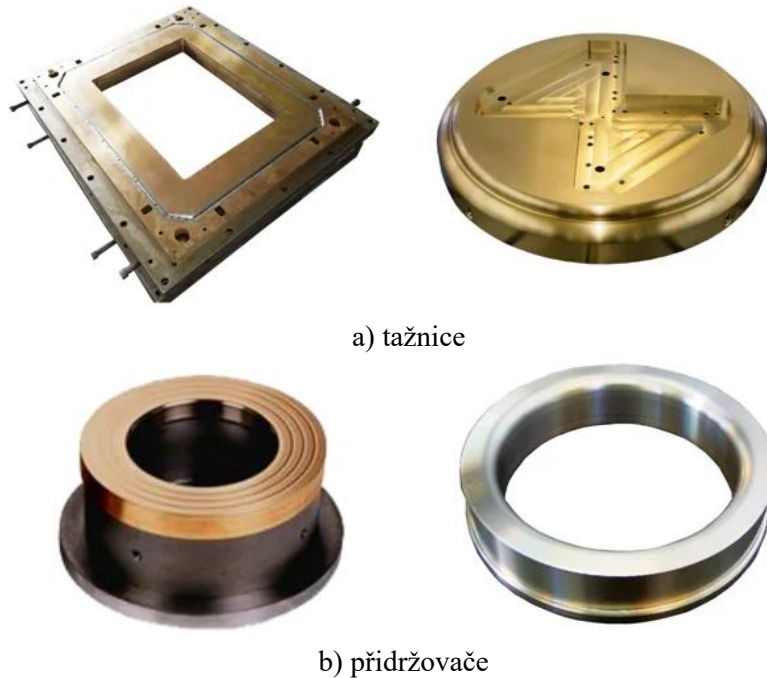
Tab. 10 Určení vzpěrné délky [38].

Způsob uložení jednoho konce	Upnutý			Kloubově
Způsob uložení druhého konce	Volný	Vedený v ose tyče	Upnutý	Kloubově
Vzpěrná délka	$L_{vz} = 2 \cdot l_{Sl}$	$L_{vz} = \frac{l_{Sl}}{\sqrt{2}}$	$L_{vz} = \frac{l_{Sl}}{2}$	$L_{vz} = l_{Sl}$
Schéma				

2.7 Tažení korozivzdorných ocelí

Jedním z materiálů pro hluboké tažení jsou korozivzdorné oceli, z nichž nejvhodnější jsou austenitické, které mají vysokou tažnost, ale také vysokou pevnost. Protože při tváření rychle zpevňují, je potřeba je žíhat. Oproti tažení ocelí obvyklých jakostí je tažná mezera větší a dosahuje hodnot 1,4 až 1,5 tloušťky materiálu. Tažná síla dosahuje také větších hodnot. V prvním tahu se používá redukce 40 % a v následujícím tahu 20 až 25 %. [3]

Nástroje pro tažení korozivzdorných ocelí musí být pevnější a přidržovače musí působit alespoň dvakrát větším tlakem než při tažení ocelí obvyklých jakostí. Aby nedocházelo k zadírání výtažku, jsou nástroje vyrobeny z tvrdých bronzů (obr. 33), tvrdých chromových nástrojových ocelí nebo ze slinitých karbidů či keramiky. Obvykle se využívá bronz s obsahem hliníku větším než 6,5 % a zároveň menším než 11 %, který je označen CuAl9Ni5Fe1Mn1 a definován normou ČSN 42 3048. Z úsporných důvodů se někdy vyrábí z bronzu pouze vložka a ostatní části nástroje jsou vyrobeny z kalené nástrojové oceli. [3]



Obr. 33 Nástroje pro hluboké tažení korozivzdorných ocelí [40].

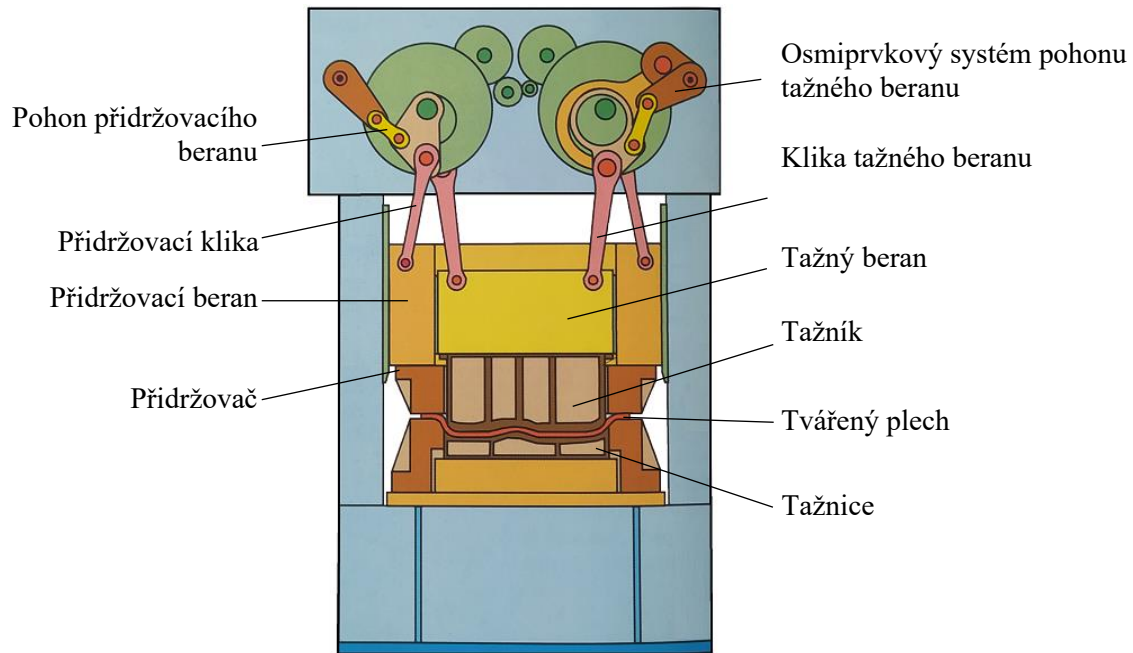
Bronz má nestejnorodou strukturu, která se skládá z malých a velice tvrdých částic rovnoměrně rozptýlených v základní hmotě. Jakost povrchu bronzových nástrojů se zlepšuje používáním, a proto je potřeba dát tažidla nejprve zaběhnout. Po zhotovení se nástroj namaže směsí běloby olověné a řepkového oleje nebo sirného květu a oleje. Po výrobě několika výtažků se tažnice vyleští a na povrchu se vytvoří tenká vrstva odolná proti otěru. [3]

2.8 Stroje

Stroje pro hluboké tažení se nazývají tažné lisy. Podle druhu mechanismu použitého k přenosu energie se dělí na mechanické a hydraulické. Podle jejich konstrukce je lze dělit na jednočinné, dvojčinné, trojčinné a postupové. [30; 41]

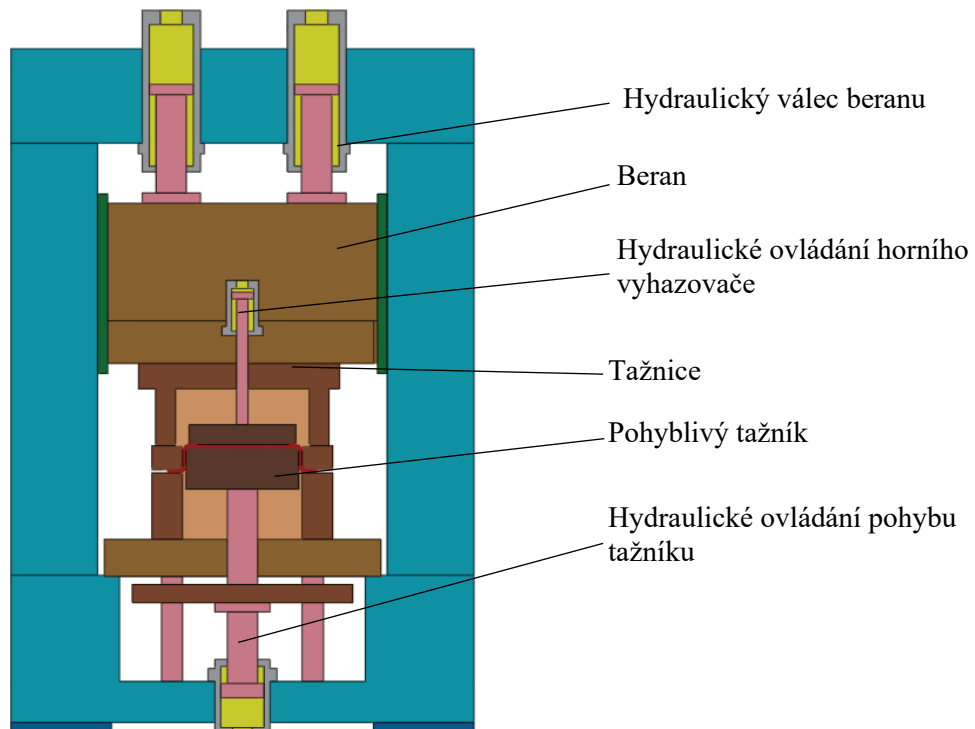
Mechanické lisy se podle poháněcího mechanismu dělí na klikové, výstředníkové, kolenové nebo vačkové. Jsou poměrně jednoduché a mají velkou výrobnost. Nevýhodou je proměnná tvářecí síla, která dosahuje maxima těsně před dolní úvrati. Používají se pro mělké i hluboké tažení tenkých plechů. Výstředníkové lisy se využívají pro tažení drobných a středně velkých výtažků. Během procesu mají proměnlivou tažnou rychlost. [3; 41]

Jednočinné klikové tažné lisy mají oproti univerzálním větší zdvih a mohutnější pohon. Dvojčinné lisy (obr. 34) mají dva berany. Vnitřní slouží pro vlastní tažení a vnější přidržuje materiál a zabraňuje jeho zvlnění. Po dosednutí přidržovače na materiál se musí přidržovací beran zastavit a začít pracovat vnitřní. Průběh zdvihů jednotlivých beranů závisí na úhlu pootočení kliky. Stůl s nástrojem musí být odpružený, aby mohl ustupovat podle zdvihu přidržovače. Při výrobě velmi složitých výtažků se používají lisy trojčinné, které mají navíc třetí beran umístěný vespodu. Pohyby všech mechanismů musí být synchronizovány. [24; 41]



Obr. 34 Dvojčinný klikový tažný lis [24].

Hydraulické lisy pracují na základě Pascalova zákona o rovnoměrném šíření tlaku v kapalinách všemi směry. Zdrojem energie je tlak pracovní kapaliny, který jí je udělen pomocí generátoru, sloužícího také k dodání kinetické energie potřebné pro její dopravu. Tlak bývá navýšen pomocí multiplikátorů a může dosáhnout až 120 MPa. K nastrádání určitého množství energie, kterou je možno v určitém okamžiku odebrat, slouží akumulátory. Nástroje se upevňují do beranu, jehož rychlost lze nastavovat až do $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Mezi výhody patří možnost plynule regulovat rychlost a sílu dosahující velikosti až 10^3 MN . Oproti mechanickým lisům jsou však složitější, mají horší účinnost a pomalejší chod beranu. Využívají se pro hluboké tažení a mohou být jednočinné i vícečinné, viz obr. 35. [24; 41]



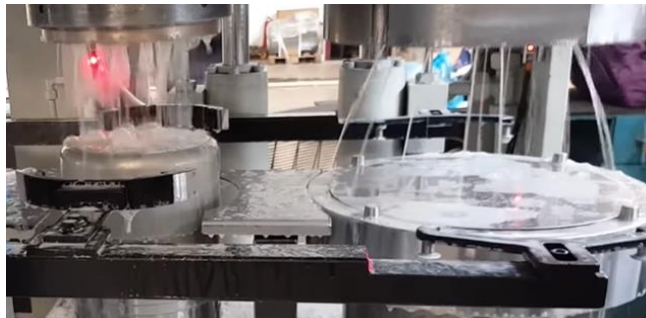
Obr. 35 Dvojčinný hydraulický tažný lis [24].

2.9 Tření a mazání

Na průběh tažení i ekonomii procesu má vliv tření. Čím je větší poměr plochy styku polotovaru s nástrojem k ploše tvářeného polotovaru, tím je vliv větší. Tažení bez mazání může vyvolat navýšení potřebných sil o 40 až 45 %. Při velkém zatížení třecích ploch dochází k jejich svaření, takzvanému zadírání. Zdali bude k zadírání docházet, závisí na dvojici kovů. Aby k zadírání nedocházelo, musí se použít mazivo. Polotovar se maže pouze ze strany tažnice, protože na tažníku je výhodné, aby bylo tření co největší. Při tažení se součinitel tření f obvykle pohybuje v rozmezí 0,04 až 0,2. [30; 35]

Při tažení se požívá velké množství maziv, které mají svou funkci plnit dokonale. Musí snížit tření natolik, aby nedocházelo k porušení materiálu, zadírání a poškrábání povrchu a aby se snížilo opotřebení tažidel. Musí dokonale pokrýt plochu výtažku a vytvořený mazací film se nesmí porušit ani při vysokých tlacích, při kterých se k mazivu používá i plnidlo, které se dokonale spojuje s povrchem kovu a je odolné proti teplu. Nejběžnějšími plnidly jsou mastek, plavená křída, oxid zinečnatý a zejména grafit. Maziva lze dělit na: [3; 30]

- Kapalná – patří mezi ně minerální, organické, zušlechtěné a syntetické oleje nebo emulze. Pro tažení kovů jsou vhodné syntetické oleje. Využití olejů v této implementaci má nevýhody, že se musí po jejich použití dílec odmastit a že jsou vhodné pro mazání méně náročných tahů. Výhodnější jsou olejové emulze, které se snadněji odstraňují, a navíc mají i chladicí účinek. Pro nejnáročnější tahy se z kapalných maziv využívá chlórparafin ředěný v oleji. Na polotovar se nanáší máčením, mazáním štětcem, nástříkem nebo automaticky (obr. 36). [3; 30; 35]



Obr. 36 Nanášení kapalného maziva [42].

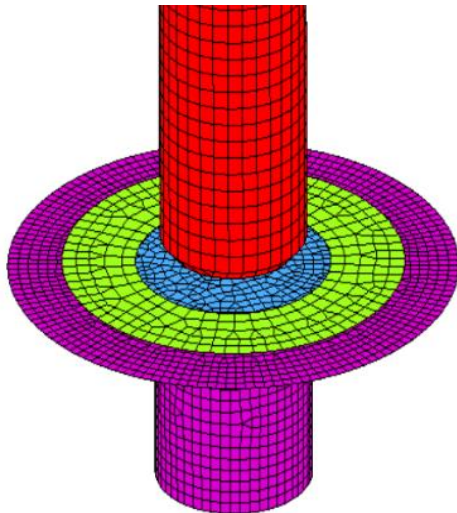
- Konzistenční – jedná se o mazací tuky, které mohou být rostlinné, živočišné a vyráběné z olejů a mýdel. Minerální olej má mazací vlastnosti a mastná přísada má dobrou přilnavost. Používají se pro nenáročné tahy a pro tažení barevných kovů. [3; 30; 35]
- Tuhá – mají malou smykovou pevnost a tvrdost. Používají se jako přísady k běžným mazivům pro hluboké a složité výtažky. Patří mezi ně siřič molybdeničitý, který se může využívat do 400 °C. Jedním z kvalitních tuhých maziv je grafit, který se využívá pro teploty do 800 °C. Jeho nevýhodou je však složité odstraňování z výtažku. Pro složité tahy se využívají také kovové povlaky, které slouží jako nasávací podložky pro další maziva, a navíc samy svými vlastnostmi snižují tření. Jejich nevýhodou je složité odstraňování z výtažků. [3; 30; 35]

2.10 Numerické simulace

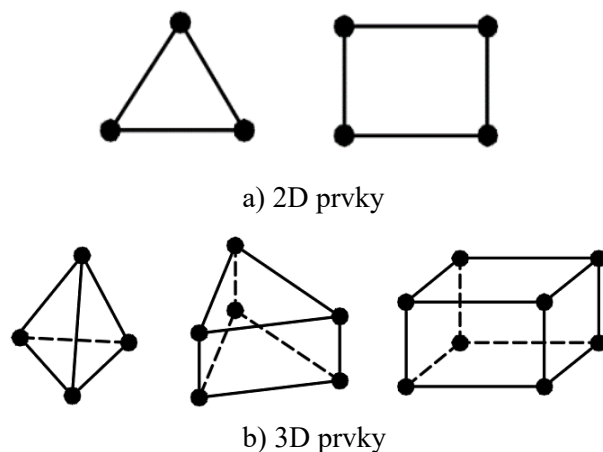
Ve tváření se při návrhu procesu hlubokého tažení využívají numerické simulace pro optimalizaci procesu, tvaru nástroje a výlisku, ověření vyrobitelnosti produktů a predikci defektů. Hlavními výhodami jsou úspora času a peněz, potřebných k provedení mnoha experimentů. Pro zdárné provedení simulace je potřeba důkladná znalost všech proměnných, které do procesu vstupují, a jejich vliv na proces, aby bylo možno dosáhnout přibližně správných výsledků. [43; 44]

Pro simulace hlubokého tažení se nejčastěji používá metoda konečných prvků (MKP). Základní myšlenkou této metody je diskretizace, čímž se rozumí pokrytí řešeného kontinua sítí prvků konečných rozměrů, viz obr. 37, které mají ve 2D tvar trojúhelníků nebo čtyřúhelníků a ve 3D čtyřstěňů, pětistěňů nebo šestistěňů (obr. 38). V jejich uzlech se hledají neznámé parametry. Při práci se simulačním softwarem se rozlišují tři základní etapy [43; 45; 46]:

- Preprocessing – import CAD modelu, definice materiálu, diskretizace, okrajové podmínky, silové působení, kinematika.
- Processing – definice matice tuhosti \mathbf{K} , sestavení maticových rovnic a jejich řešení, určení posuvů, přetvoření a napětí.
- Postprocessing – zobrazení výsledků, import výsledků, optimalizace.



Obr. 37 Síť na modelu pro hluboké tažení [47].



Obr. 38 Příklady prvků sítě pro MKP [43].

Pro řešení diferenciálních rovnic se využívá Lagrangeův variační princip, který říká, že se ze všech definovaných funkcí posuvů, které vyhovují okrajovým podmínkám a podmínkám spojitosti tělesa, uskuteční ty, pro které dosahuje celková potenciální energie minima. Toho se dosáhne, když se parciální derivace potenciální energie podle složek posuvu rovná nule. Tím se získá základní rovnice v MKP [46]:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}, \quad (2.27)$$

kde: \mathbf{K} – globální matice tuhosti [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$],
 \mathbf{U} – globální matice posuvů [mm],
 \mathbf{F} – matice zatížení [N].

Do numerické simulace je nutné správně zadat materiálový model. Pro jeho definici je potřeba znát minimálně modul pružnosti \mathbf{E} , Poissonův poměr μ , mez kluzu \mathbf{R}_e , mez pevnosti \mathbf{R}_m a homogenní tažnost \mathbf{A}_g , které lze zjistit ze základní tahové zkoušky. Pro popis mechanických vlastností se využívají zjednodušené modely, mezi které patří například aproximace dle Ludwig-Hollomona anebo Krupkowského vztahu, který pro výpočet napětí využívá následující vzorec [48; 49; 50]:

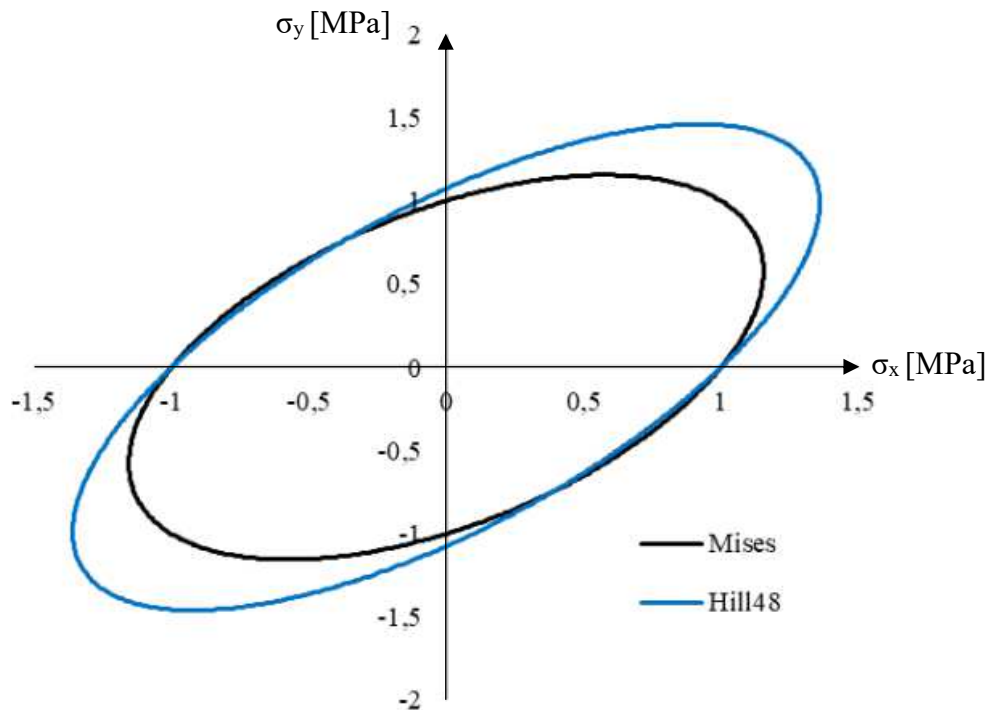
$$\sigma = K \cdot (\varphi_p + \varphi_0)^n, \quad (2.28)$$

kde: K – materiálová konstanta [MPa],
 φ_p – plastické přetvoření [-],
 φ_0 – posunutí plastického přetvoření [-],
 n – exponent deformačního zpevnění [-].

V plošném tváření také hraje důležitou roli anizotropie, která má u hlubokého tažení za následek cípatost okrajů. V MKP je definována modifikací podmínek plasticity (obr. 39). Mezi používané anizotropní materiálové modely patří např. Hill 1948, Hill 1990, Barlat 1989, Barlat 2000, Corus-Vegter, Vegter 2017 nebo Youshida. Nejjednodušším a nejrozšířenějším modelem je Hill 1948, který má tvar [48; 51; 52; 53]:

$$\bar{\sigma}^2 = (G_A + H_A) \cdot \sigma_x^2 - 2 \cdot H_A \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + (H_A + F_A) \cdot \sigma_y^2 + 2 \cdot N_A \cdot \tau_{xy}^2, \quad (2.29)$$

kde: σ_x – normálové napětí ve směru válcování [MPa],
 σ_y – normálové napětí v příčném směru [MPa],
 τ_{xy} – smykové napětí [MPa],
 F_A, G_A, H_A, N_A – materiálové parametry [-].



Obr. 39 Modifikace podmínky plasticity Von Mises podmínkou anizotropie Hill 1948 [54].

Pokud by materiálové parametry měli hodnoty $F_A = G_A = H_A = 1$ a $N_A = 3$, podmínka Hill 1948 by se redukovala na von Misesovu podmínku plasticity. Hodnoty materiálových parametrů potřebných ve výpočtu lze dopočítat dvěma metodami. První z nich využívá rozdílnou mez kluzu v různých směrech válcování [52; 53]:

$$F_A = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - 1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right), \quad (2.30)$$

kde: σ_0 – mez kluzu ve směru válcování [MPa],
 σ_{90} – mez kluzu v příčném směru [MPa],
 σ_b – vyvážené biaxiální napětí [MPa],

$$G_A = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right), \quad (2.31)$$

$$H_A = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right), \quad (2.32)$$

$$N_A = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{2 \cdot \sigma_0}{\sigma_{45}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right), \quad (2.33)$$

kde: σ_{45} – mez kluzu ve směru 45° ke směru válcování [MPa].

Druhá metoda dopočítání materiálových parametrů potřebných v modelu Hill 1948 využívá součinitele normálové anizotropie, které lze získat poměrem plastických deformací šířky a tloušťky zkušební tyče z tahové zkoušky [52]:

$$F_A = \frac{r_0}{(1 + r_0) \cdot r_{90}}, \quad (2.34)$$

kde: r_0 – součinitel normálové anizotropie ve směru válcování [-],
 r_{90} – součinitel normálové anizotropie v příčném směru [-],

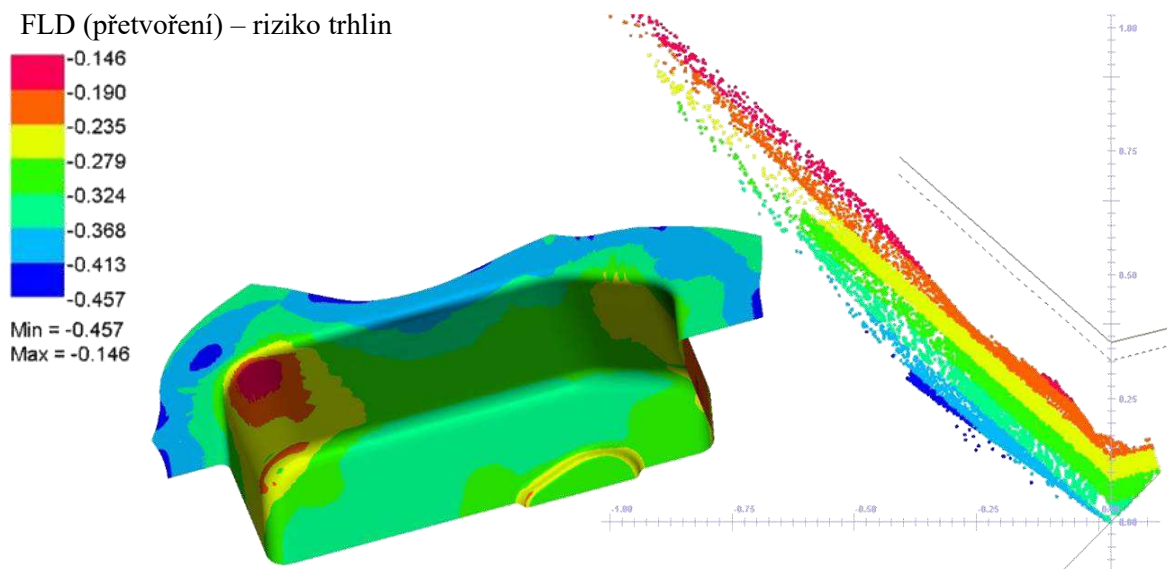
$$G_A = \frac{1}{(1 + r_0)}, \quad (2.35)$$

$$H_A = \frac{r_0}{(1 + r_0)}, \quad (2.36)$$

$$N_A = \frac{(1 + 2 \cdot r_{45}) \cdot (r_0 + r_{90})}{2 \cdot (1 + r_0) \cdot r_{90}}, \quad (2.37)$$

kde: r_{45} – součinitel normálové anizotropie ve směru 45° ke směru válcování [-].

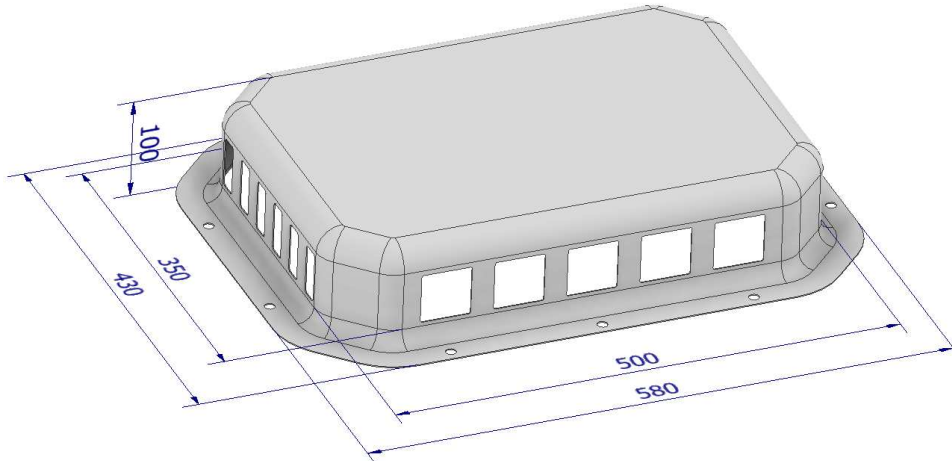
Z numerických simulací hlubokého tažení lze získat velké množství výstupů. Patří mezi ně tvářecí síla, ztenčení stěny, napětově deformační stav, predikce porušení, odpružení, tvorba zvlnění a přeložek a predikce porušení pomocí Keeler-Goodwinova diagramu (obr. 40). Na základě získaných výsledků se pak provádí optimalizace, např. přidání brzdných žebër, změna geometrie nástroje či výchozího polotovaru. [50]



Obr. 40 Predikce porušení pomocí Keeler-Goodwinova diagramu [55].

3 NÁVRH VÝROBY

Řešenou součástí je kryt klimatizace z oceli 17 240, který má obdélníkové dno se zkosenými rohy a přírubu. Hlavní rozměry jsou zobrazeny na obr. 41. Základní tvar se bude vyrábět technologií hlubokého tažení a následně budou zhotoveny otvory pomocí řezání laserem.



Obr. 41 Model krytu.

Aby bylo možno díl zhotovit bez vad, je potřeba nejprve zkontrolovat technologičnost. U návrhu procesu hlubokého tažení bylo zkontrolováno:

- Materiál – ocel 17 240 je vhodná pro hluboké tažení. [11]
- Tolerance tloušťky stěn – na výtažku není předepsána.
- Přesnost rozměrů – není předepsána, řídí se normou pro všeobecné tolerance ISO 2768.
- Maximální výška nerotačního výtažku v prvním tahu – pro poloměr zaoblení v rozích $R = 30$ mm se určí dle tab. 3:

$$H_{1max} = 4 \cdot R = 4 \cdot 30 = 120 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Maximální výška v prvním tahu je 120 mm. Zadaná výška krytu je 100 mm. Výtažek by měl jít zhotovit na jednu operaci. Počet operací bude déle ověřen pomocí výpočtu součinitele tažení a numerickou simulací.

- Zaoblení přechodu pláště a příruby – vypočte se podle vzorce (2.13). Při výpočtu bylo počítáno s maximální hodnotou:

$$R_{t1} = (8 \div 10) \cdot s = 10 \cdot 1 = 10 \text{ mm}$$

Maximální zaoblení tažných hran na tažnici je 10 mm, což je také požadovaná hodnota zaoblení mezi pláštěm a přírubou. Lze jej tedy vyrobit.

- Tvar příruby – rovinný tvar, který lze vyrobit jedním tahem.
- Pravidlo nejmenší příruby – určí se podle vzorce (2.1):

$$D_p \geq d + 12 \cdot t,$$

$$D_p \geq 60 + 12 \cdot 1,$$

$$D_p \geq 72 \text{ mm.}$$

Příruba má poloměr zaoblení 70 mm a průměr zaoblení příruby je 140 mm. $140 \geq 72$, takže je dodrženo pravidlo nejmenší příruby.

Součást splňuje podmínky technologičnosti. Lze jí zhotovit technologií hlubokého tažení bez změny geometrie.

3.1 Návrh tvaru polotovaru

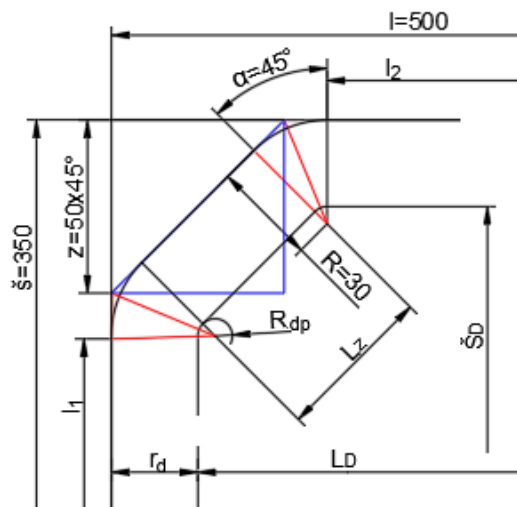
Polotovarem bude přístřih z tabule pechu o tloušťce 1 mm. Tvar lze určit graficky, pomocí výpočtů, zkusmo nebo pomocí simulačních programů. Nejprve bude určen tvar ideálního přístřihu graficko-početní metodou. Při využití této metody se vychází z rozměrů dna, které se zjistí výpočtem pomocí náčrtu na obr. 42:

- Délka dna:

$$L_D = l - 2 \cdot r_d = 500 - 2 \cdot 25 = 450 \text{ mm}, \quad (3.2)$$

kde: l – délka výtažku bez příruby; $l = 500$ mm,

r_d – poloměr zaoblení mezi dnem a pláštěm; $r_d = 25$ mm.



Obr. 42 Náčrt sloužící k určení rozměrů dna.

- Šířka dna:

$$\check{s}_D = \check{s} - 2 \cdot r_d = 350 - 2 \cdot 25 = 300 \text{ mm}, \quad (3.3)$$

kde: \check{s} – šířka výtažku bez příruby; $\check{s} = 350$ mm.

- Délka kratší stěny dna:

$$l_1 = \check{s} - 2 \cdot \left(z + R \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) = 350 - 2 \cdot \left(50 + 30 \cdot \operatorname{tg} \frac{45}{2} \right) = 225,147 \text{ mm}, \quad (3.4)$$

kde: z – zkosení; $z = 50$ mm,

α – úhel zkosení; $\alpha = 45^\circ$ mm.

- Délka delší stěny dna:

$$l_2 = l - 2 \cdot \left(z + R \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) = 500 - 2 \cdot \left(50 + 30 \cdot \operatorname{tg} \frac{45}{2} \right) = 375,147 \text{ mm}. \quad (3.5)$$

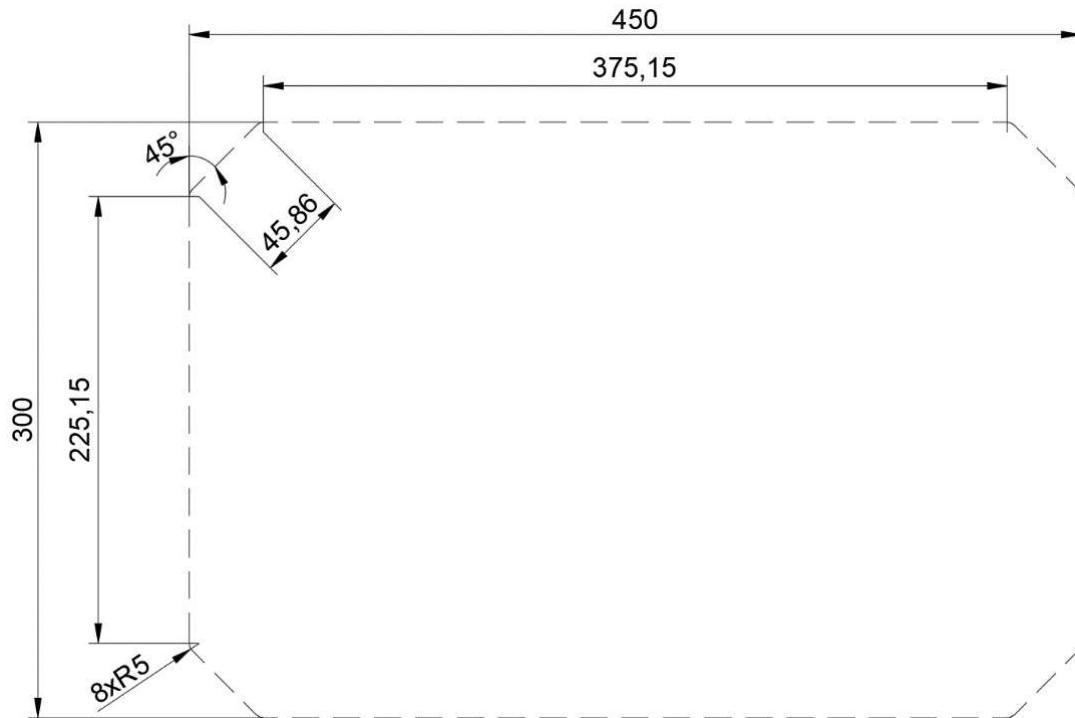
- Délka zkosení dna:

$$L_z = \sqrt{2 \cdot z^2} - 2 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{2 \cdot 50^2} - 2 \cdot 30 \cdot \operatorname{tg} \frac{45}{2} = 45,858. \quad (3.6)$$

- Zaoblení dna:

$$r_{dp} = R - r_d = 30 - 25 = 5 \text{ mm}. \quad (3.7)$$

Maximální rozměry dna výtažku jsou 300 mm a 450 mm. Kratší i delší stěny dna a délka zkosení bude stejná jako na výtažku. Jakmile jsou tyto hodnoty vypočteny, nakreslí se čárkovanou čarou, viz obr. 43.



Obr. 43 Dno výtažku s rozměry.

Dále je potřeba provést výpočty potřebné k narýsování pláště výtažku. Při výpočtu délky ohýbaných stěn L_c a redukovaného poloměru R_c je počítáno s přídavkem na ostřížení, který byl zvolen pro tloušťku materiálu 1 mm a maximální rozměr výtažku 500 mm pomocí tab. 4 jako $\Delta c = 4$ mm:

- Délka rovné části stěny podle vzorce (2.4):

$$h_s = H - r_d - r_p - t = 100 - 25 - 10 - 1 = 64 \text{ mm},$$

kde: H – výška výtažku; $H = 100$ mm,

r_p – poloměr zaoblení mezi přírubou a pláštěm; $r_p = 10$ mm,

- Délka rovné části stěny včetně přídavku na ostřížení dle (2.3):

$$h_s^* = h_s + \Delta c = 64 + 4 = 68 \text{ mm},$$

kde: Δc – příravek na ostřížení; $\Delta c = 4$ mm.

- Délka zaoblení přechodu dna a pláště:

$$z_d = \frac{\pi \cdot \left(r_d - \frac{t}{2} \right)}{2} = \frac{\pi \cdot \left(25 - \frac{1}{2} \right)}{2} = 38,485 \text{ mm}.$$

- Délka zaoblení mezi přírubou a pláštěm dle (2.6):

$$z_p = \frac{\pi \cdot \left(r_p + \frac{t}{2} \right)}{2} = \frac{\pi \cdot \left(10 + \frac{1}{2} \right)}{2} = 16,493 \text{ mm}.$$

- Délka příruby včetně zaoblení dle vzorce (2.5):

$$L_p = z_p + l_p = 16,493 + 40 = 56,493 \text{ mm},$$

kde: l_p – šířka příruby; $l_p = 40$ mm.

- Délka rovných stěn včetně zaoblení a příruby dle (2.2):

$$L_s = h_s^* + R + 0,57 \cdot r_d + L_p = 68 + 30 + 0,57 \cdot 25 + 56,493 = 168,743 \text{ mm}$$

- Redukovaný poloměr dle výrazu (2.8):

$$R'_c = \sqrt{2 \cdot R \cdot h_s^* + R^2 + 1,14 \cdot R \cdot r_d} =$$

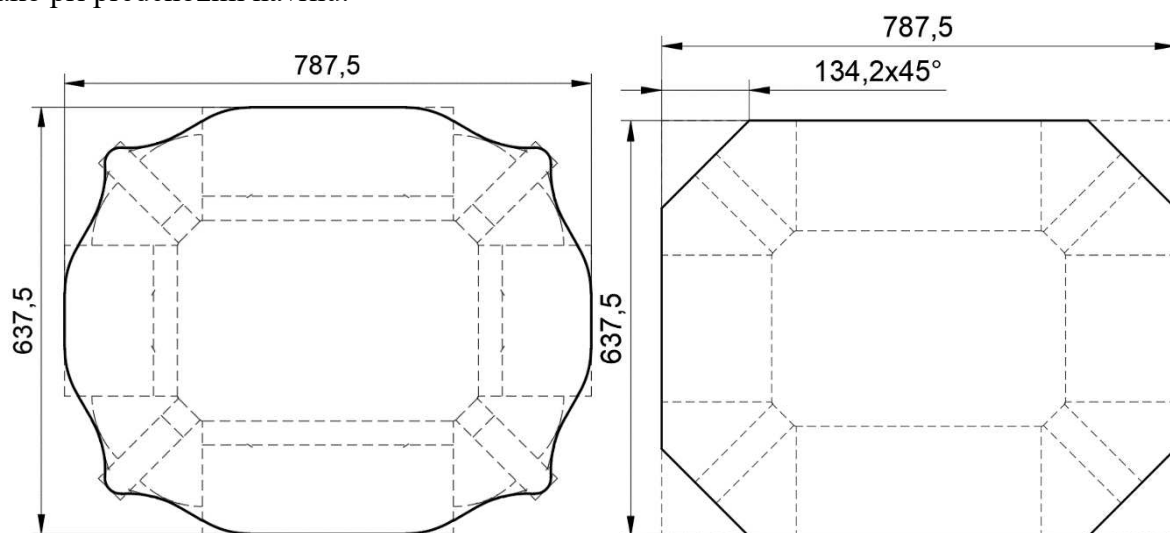
$$= \sqrt{2 \cdot 30 \cdot 68 + 30^2 + 1,14 \cdot 30 \cdot 25} = 76,387 \text{ mm.}$$

- Redukovaný poloměr včetně příruby dle (2.7):

$$R_c = R'_c + L_p = 76,387 + 56,493 = 132,880 \text{ mm.}$$

Z koncových bodů rovných stran dna se vynesou kolmice o délce $L_s = 168,74$ mm. Z poloměru zaoblení ve dně se vynesou redukovaný poloměr $R_c = 132,88$ mm. Vzniklé části se propojí a zaoblí, čímž vznikne ideální přístřih, který je na obr. 44. Jeho tvar je však složitý a při jeho výrobě by bylo potřeba použít speciální střížný nástroj nebo laser.

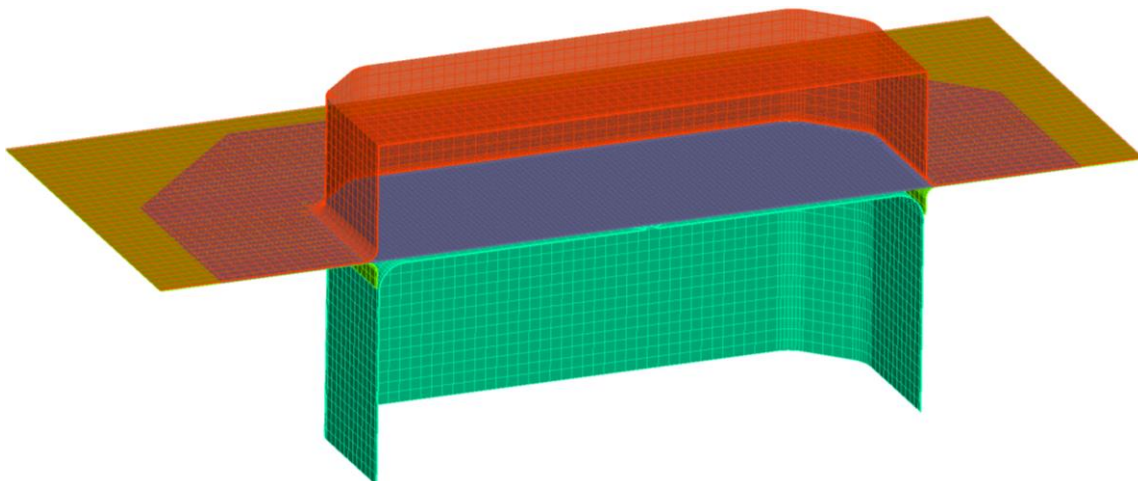
Při návrhu zjednodušeného tvaru se vycházelo z ideálního přístřihu. Z tabule plechu se vystřihne obdélník s rozměry 637,5 a 787,5 mm a zkosí se mu hrany, viz obr. 45. Pro výrobu tohoto tvaru stačí pouze pákové nůžky na plech a není potřeba drahý střížný nástroj nebo laser jako při předchozím návrhu.



Obr. 44 Ideální přístřih.

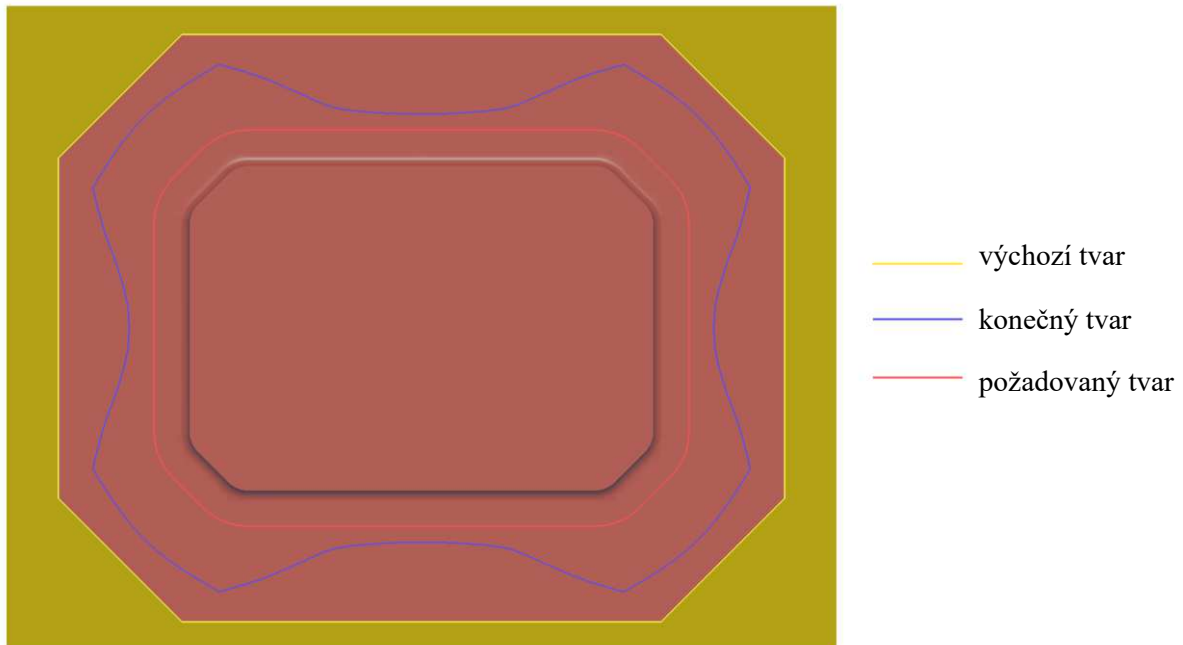
Obr. 45 Zjednodušený tvar přístřihu.

Další možností určení tvaru polotovaru je s využitím softwaru pro numerickou simulaci. Při návrhu se využíval program PAM-STAMP, do kterého se vložil model, viz obr. 46. Zelenou barvou je znázorněn tažník, průhledně červenou tažnice, oranžovou přidržovač a šedou výchozí polotovar, kterým byl zjednodušený tvar přístřihu.



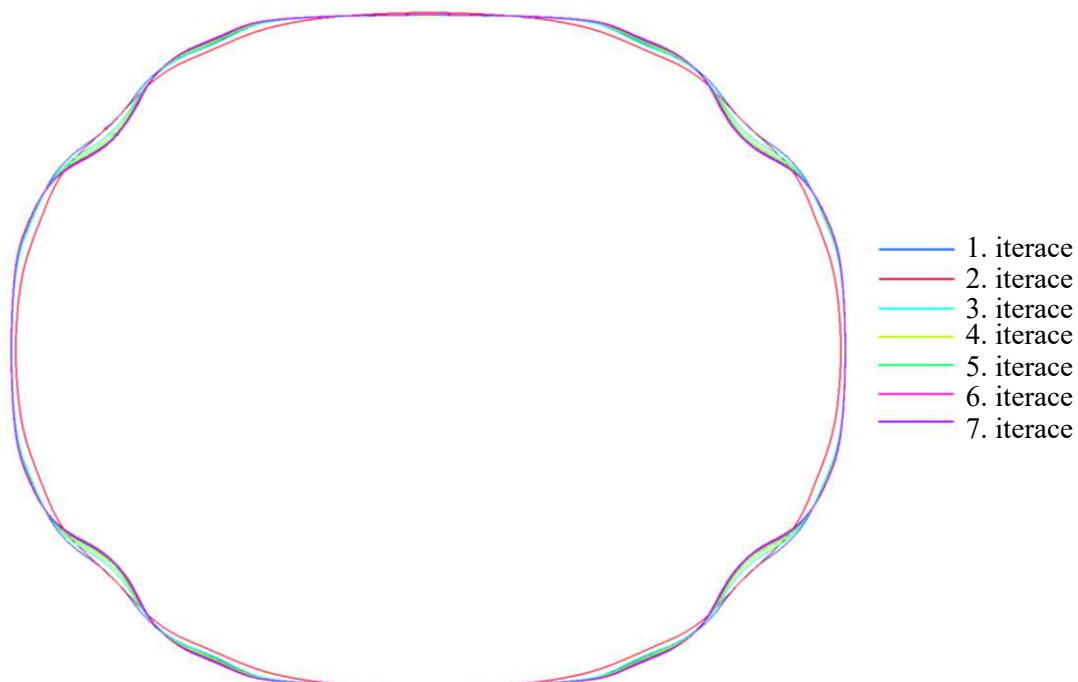
Obr. 46 Geometrický model pro určení nejvhodnějšího tvaru polotovaru.

Princip výpočtu nejvhodnějšího tvaru numerickou simulací je znázorněn na obr. 47. Vychází se ze zjednodušeného tvaru přístříhu, jehož obvod je na obrázku nakreslen žlutou čarou. Po skončení simulace bude mít příruba výtažku tvar, znázorněný na obr. 47 modrou barvou, který se porovná s požadovaným tvarem, nakresleným červenou čarou. Na základě porovnání si program přepočte výchozí tvar a opět provede simulaci. Tyto kroky se opakují tak dlouho, dokud se konečný tvar nepřiblíží s určitou přesností k požadovanému.

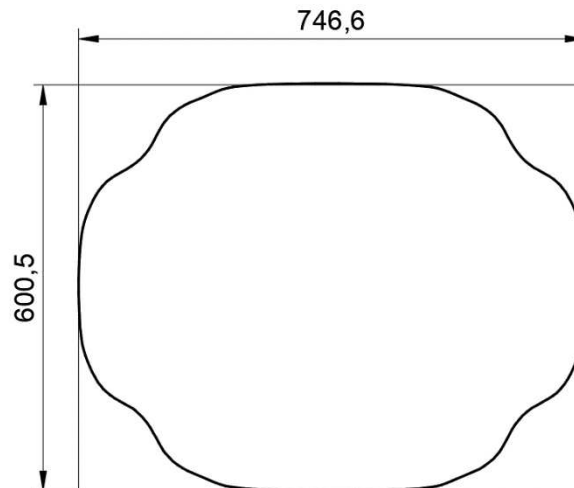


Obr. 47 Princip návrhu nejvhodnějšího tvaru polotovaru programem.

Výpočet nejvhodnějšího tvaru polotovaru numerickou simulací byl proveden v 7 krocích, viz obr. 48. Kritérium ukončení výpočtu je, aby minimálně 95 % obvodu příruby po vytažení leželo maximálně 0,7 mm od požadovaného tvaru. Konečný tvar, který je dále uvažován jako nejvhodnější tvar přístříhu vypočítaného programem, je zobrazen na obr. 49.



Obr. 48 Postup návrhu nejvhodnějšího tvaru polotovaru programem.



Obr. 49 Tvar přístřihu vypočítán programem.

Pro všechny navržené polotovary budou provedeny potřebné výpočty a numerické simulace. Výsledky se porovnají a na jejich základě bude vybrán nejvhodnější tvar přístřihu. Pro něj bude navrhnout nástroj. Pro výpočty je potřeba znát plochy všech polotovarů, které byly zjištěny pomocí programu AutoCAD:

- ideálního přístřihu: $S_{pi} = 424\,880,591 \text{ mm}^2$,
- zjednodušeného tvaru přístřihu: $S_{pz} = 465\,990,571 \text{ mm}^2$,
- tvaru přístřihu vypočteného programem: $S_{pv} = 369\,632,733 \text{ mm}^2$.

3.2 Počet operací, tažná mezera a základní rozměry nástrojů

Již při kontrole technologičnosti bylo zjištěno, že maximální výška výtažku v prvním tahu je 120 mm. Jelikož zadaná výška výtažku je 100 mm, lze ho zhotovit na jednu operaci. Pro ověření je provedena také kontrola pomocí součinitele tažení, který je závislý na poloměru zaoblení v rohu, délce navazujících stěn a úhlu, který svírají. Na základě poměru délek a poloměru se z tab. 5 určí součinitel. Na výtažku se střídají dvě kombinace, viz obr. 50:

- a) Úhel $\alpha = 45^\circ$, poloměr zaoblení v rohu $R = 30 \text{ mm}$, menší délka = $L_z = 45,858 \text{ mm}$, větší délka = $l_1 = 225,147 \text{ mm}$:

$$\frac{L_z}{R} = \frac{45,858}{30} = 1,528 \rightarrow L_z = 2 \cdot R, \quad (3.8)$$

$$\frac{l_1}{R} = \frac{225,147}{30} = 7,505 \rightarrow L_z = 8 \cdot R. \quad (3.9)$$

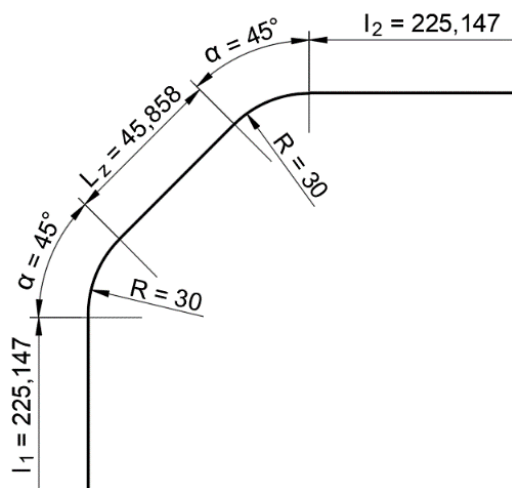
V tab. 5 není definován součinitel pro menší délku přiléhající k úhlu $2 \cdot R$ a větší délku $8 \cdot R$. Součinitel tažení byl odečten pro nejbližší vyšší hodnoty $2 \cdot R$ a $10 \cdot R$, který má hodnotu $m_{11} = 0,33$.

- b) Úhel $\alpha = 45^\circ$, poloměr zaoblení v rohu $R = 30 \text{ mm}$, menší délka = $L_z = 45,858 \text{ mm}$, větší délka = $l_2 = 375,147 \text{ mm}$:

$$\frac{L_z}{R} = \frac{45,858}{30} = 1,528 \rightarrow L_z = 2 \cdot R, \quad (3.10)$$

$$\frac{l_2}{R} = \frac{375,147}{30} = 12,505 \rightarrow L_z = 13 \cdot R. \quad (3.11)$$

V tab. 5 není definován součinitel pro menší délku přiléhající k úhlu $2 \cdot R$ a větší délku $13 \cdot R$. Součinitel tažení byl odečten pro nejbližší hodnoty $2 \cdot R$ a $10 \cdot R$, který má hodnotu $m_{12} = 0,33$.



Obr. 50 Pomocný obrázek pro určení součinitele tažení.

Součinitel tažení vychází pro obě varianty stejný $m_{11} = m_{12} = m_1 = 0,33$. Dále je potřeba vypočítat maximální redukci poloměru v rozích pomocí vzorce (2.9):

$$R_1 = M_1 \cdot R'_c = 0,33 \cdot 76,387 = 25,208 \text{ mm.}$$

Vypočtený poloměr, který lze v první operaci zhotovit je $R_1 = 25,208$ mm. Zadaný poloměr zaoblení v rozích R je 30 mm. Protože platí nerovnost $R_1 < R$, lze zhotovit výtažek na jednu operaci. Jelikož však nebyl odečten součinitel tažení přesně, bude ještě výpočet ověřen numerickou simulací. Skutečná redukce, ke které při tažení dojde se vypočte podle vzorce:

$$Red = \frac{R}{R'_c} \cdot 100 = \frac{30}{76,387} \cdot 100 = 39,27 \% \quad (3.12)$$

Při tažení korozivzdorných ocelí má být redukce v prvním tahu 40 %. Redukce při tažení však vyšla 39,27 %, což je velmi blízko u požadované hodnoty. Pro ověření vyrobiteľnosti budou zhotoveny numerické simulace.

Při tažení hranatých výtažků nedochází k rovnoměrné deformaci, a proto bude mít tažná mezera v rovných částech jinou hodnotu než v rozích. Při tažení korozivzdorných ocelí mívá hodnotu 1,4 až 1,5násobek tloušťky stěny. V rovných částech obvykle bývá menší, a proto bylo ve výpočtu počítáno s hodnotou 1,4:

$$z_m = 1,4 \cdot t = 1,4 \cdot 1 = 1,4 \text{ mm.}$$

Mezera mezi tažníkem a tažnicí bude mít 1,4 mm. Protože na výkresu 2024-DP-217586-00 jsou rozměry kótované k vnějšímu povrchu, je potřeba hodnotu tažné mezery zmenšit o tloušťku plechu a o délce zvětšit otvor tažnice o dvojnásobek výsledné hodnoty. Délka otvoru bude tedy 500,8 mm a jeho šířka 350,8 mm. Tažná mezera v rozích nabývá větších hodnot než v rovných částí. Ve výpočtu se proto počítá s hodnotou 1,5násobku tloušťky polotovaru:

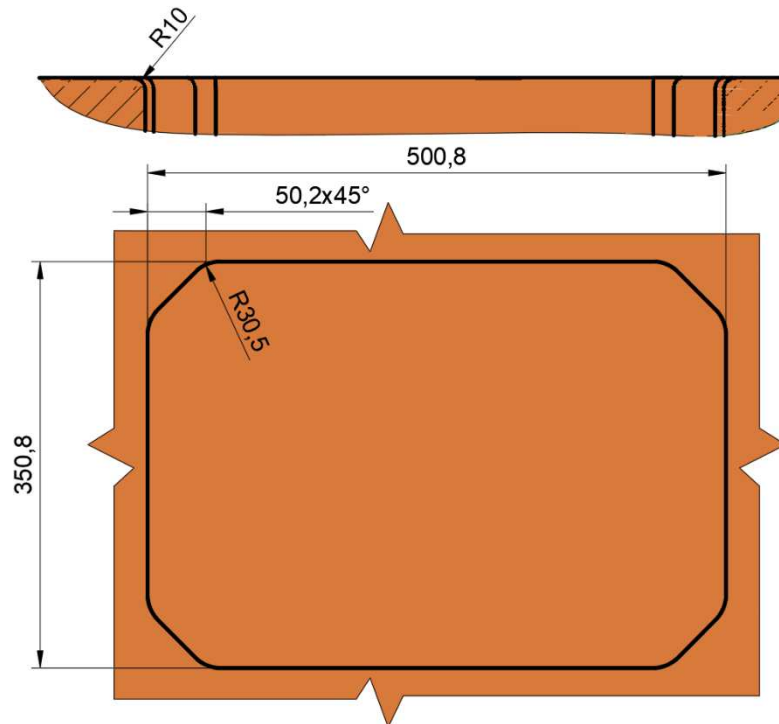
$$z_m' = 1,5 \cdot t = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ mm.}$$

Tažná mezera v rozích vyšla 1,5 mm. Protože dle výkresu 2024-DP-217586-00 má být poloměr v rozích na vnější straně výtažku 30 mm, musí mít poloměr zaoblení v tažnici 30,5 mm.

Zaoblení hran na tažnici se volí v závislosti na tloušťce plechu a bývá 8 až 10krát větší. Má vliv na zaoblení mezi pláštěm a přírubou, které je dle zadání 10 mm. Při výpočtu je ve vzorci (2.13) počítáno s maximální hodnotou:

$$R_t = (8 \div 10) \cdot t = 10 \cdot 1 = 10 \text{ mm.}$$

Největší možný poloměr zaoblení mezi pláštěm a přírubou je 10 mm. To je také požadovaná hodnota. Zaoblení hran na tažnici bude mít 10 mm. Základní rozměry tažnice jsou na obr. 51.

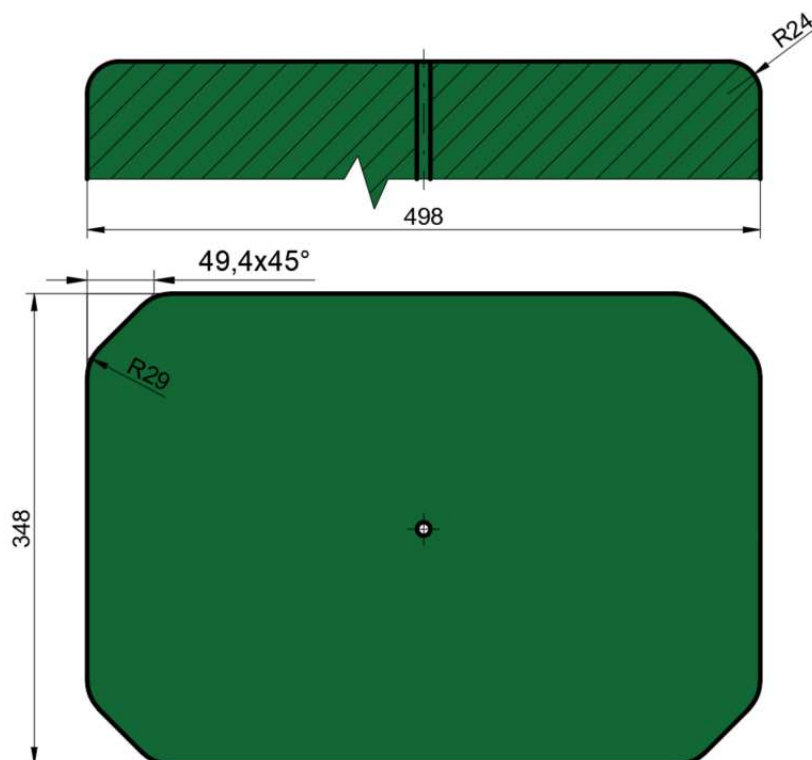


Obr. 51 Základní rozměry tažnice.

Na výkrese součásti číslo 2024-DP-217586-S jsou rozměry kótovány ke vnějšímu povrchu, takže rozměry tažníku musí být menší o tloušťku plechu. Poloměr tažníku se volí stejný nebo větší než na tažnici. Jelikož výtažek bude zhotoven na jednu operaci, bude zaoblení na tažníku rovno zaoblení mezi dnem a stěnou výtažku bez hodnoty tloušťky plechu:

$$R_p = r_d - t = 25 - 1 = 24 \text{ mm.} \quad (3.13)$$

Přechodový poloměr tažníku bude mít 24 mm. Všechny základní rozměry tažníku jsou zobrazeny na obr. 52.



Obr. 52 Základní rozměry tažníku.

3.3 Výpočet sil a práce

Výpočet tažné síly je potřebný k určení velikosti potřebného lisu. Při výpočtu budou využity praktické vzorce. Celková síla při tažení se skládá z tažné síly, síly přidržovače a vyhazovače. Jelikož jsou některé výsledky závislé na ploše polotovaru, je potřeba provést výpočty pro všechny tvary navržených přístřihů. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny v tab. 11. Příklad výpočtu je proveden pro ideální tvar přístřihu.

Prvním krokem výpočtu je zjištění síly pro tažení. Protože výtažek má krabicovitý tvar, nedochází k rovnoměrné deformaci, skládá se ze síly pro tažení rohových částí a síly pro ohyb na rovných stranách. Vypočte se podle vzorce (2.19):

$$F_{ct} = F_t + F_o = 263\,893,78 + 290\,644,2 = 554\,537,92 \text{ N},$$

kde: F_t – síla pro tažení rohů:

$$F_t = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot t \cdot R_m \cdot C_1 = 2 \cdot \pi \cdot 30 \cdot 1 \cdot 700 \cdot 2 = 263\,893,78 \text{ N},$$

kde: R_m – mez pevnosti materiálu; $R_m = 700 \text{ MPa}$,

C_1 – konstanta, pro hluboké tahy $C_1 = 2$,

F_o – síla pro ohyb rovných stran:

$$F_o = L_v \cdot t \cdot R_m \cdot C_2 = 1\,384,02 \cdot 1 \cdot 700 \cdot 0,3 = 290\,644,2 \text{ N},$$

kde: C_2 – konstanta, pro normální přidržovací tlak $C_2 = 0,3$,

L_v – délka rovných stran výtažku:

$$\begin{aligned} L_v &= 2 \cdot (l_1 + l_2) + 4 \cdot L_z = \\ &= 2 \cdot (225,147 + 375,147) + 4 \cdot 45,858 = 1\,384,02 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Tažná síla vyšla 554,54 kN. Při výpočtu je potřeba udělat kontrolu, že během procesu nedojde k nepřekročení kritické hodnoty síly k utržení dna. Ta se vypočte podle vzorce (2.18):

$$F_{pret} = o_v \cdot t \cdot R_m = 1\,569,37 \cdot 1 \cdot 700 = 1\,098\,559 \text{ N},$$

kde: o_v – obvod výtažku:

$$o_v = L + 2 \cdot \pi \cdot \left(R - \frac{t}{2} \right) = 1\,384,02 + 2 \cdot \pi \cdot \left(30 - \frac{1}{2} \right) = 1\,569,37 \text{ mm}.$$

Kritická hodnota síly je 1 098,56 kN. Jelikož platí že $F_{ct} < F_{pret}$, nedojde k utržení dna. Jelikož se při výpočtu tažné i kritické síly vycházelo z koncových rozměrů výtažku, budou stejné pro všechny tvary polotovarů. Dalším krokem výpočtu je kontrola, zda je při tažení potřeba využít přidržovač. Ten se použije v případě, pokud platí nerovnost (2.15):

$$k_p > \frac{100 \cdot d_1}{D_0},$$

kde: k_p – součinitel určující nutnost použití přidržovače:

$$k_p = 50 \cdot Z - \left(\frac{\sqrt{t}}{\sqrt[3]{D_0}} \right) = 50 \cdot 1,9 - \left(\frac{\sqrt{1}}{\sqrt[3]{152,774}} \right) = 94,813$$

kde: Z – materiálová konstanta, pro ocelový plech $Z = 1,90$,

D_0 – redukovaný průměr:

$$D_0 = 2 \cdot R_c = 2 \cdot 76,387 = 152,774 \text{ mm},$$

d_1 – průměr v rozích po první operaci:

$$d_1 = 2 \cdot R = 2 \cdot 30 = 60 \text{ mm},$$

$$94,813 > \frac{100 \cdot 60}{152,774}$$

$$94,813 > 39,274.$$

Jelikož nerovnost platí, je potřeba použít přidržovač. Síla, kterou bude na plech působit je závislá na ploše polotovaru a přidržovacím tlaku. Protože jsou navrženy tři varianty polotovaru, bude ve všech případech odlišná přidržovací síla. Výsledky pro všechny případy jsou uvedeny v tab. 11. Příklad výpočtu je proveden pro variantu použití ideálního přístřihu:

$$F_p = S_p \cdot p_i = 238\,482,22 \cdot 2,1 = 500\,812,662 \text{ N},$$

kde: S_p – plocha na které působí přidržovač:

$$S_p = S_{pi} - S_{pp} = 424\,880,591 - 186\,398,371 = 238\,482,22 \text{ mm}^2,$$

kde: S_{pi} – plocha ideálního přístřihu, vypočteno pomocí programu AutoCAD; $S_{pi} = 424\,880,591 \text{ mm}^2$.

S_{pp} – plocha otvoru v tažnici včetně zaoblení, vypočteno pomocí programu AutoCAD; $S_{pp} = 186\,398,371 \text{ mm}^2$,

p_i – tlak přidržovače, zvolen dle tab. 7 pro ocelový plech; $p_i = 2,1 \text{ MPa}$.

Jelikož bude pro snadnější vyjímání výtazku použit vyhazovač, je potřeba taktéž vypočítat sílu vyhazovací. Její hodnota bude uvažována jako 10 % z tažné síly a je stejná pro všechny tvary polotovaru:

$$F_v = 0,1 \cdot F_{ct} = 0,1 \cdot 554\,537,92 = 55\,453,79 \text{ N}.$$

Celková síla je součtem sil tažné, přidržovací a vyhazovací, příklad pro ideální tvar přístřihu:

$$F_c = F_{ct} + F_p + F_v = 554\,537,92 + 500\,812,662 + 55\,453,79 = 1\,110\,804,37 \text{ N}.$$

Celková síla při tažení z ideálního tvaru přístřihu je 1 107,90 kN. Výsledky pro všechny polotovary jsou uvedeny v tab. 11. Pro stanovení velikosti lisu je však potřeba také znát práci při tažení, která se vypočte podle vzorce (2.23). Příklad výpočtu je pro ideální tvar přístřihu:

$$A = \frac{C \cdot F_c \cdot H_L}{1\,000} = \frac{0,8 \cdot 1\,110\,804,37 \cdot 100}{1\,000} = 88\,864,35 \text{ J},$$

kde: C – součinitel, pro tažení s kalibrováním dna $C = 0,8$.

Práce, kterou během celého procesu lis vykoná, je pro tvar ideálního přístřihu 88,59 kJ. Pro ostatní polotovary jsou výsledky uvedeny v tab. 11.

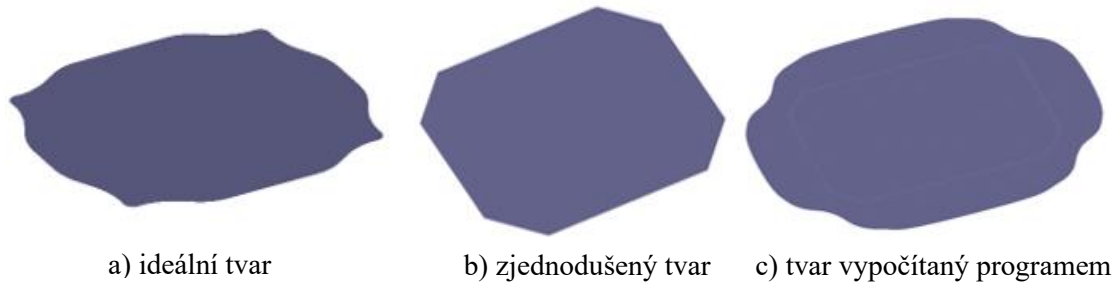
Tab. 11 Výsledky sil a práce při použití různých tvarů přístřihu.

	Ideální přístřih	Zjednodušený tvar	Tvar vypočten programem
Síla pro tažení F_{ct}	554,54 kN	554,54 kN	554,54 kN
Kritická síla F_{pret}	1 098,56 kN	1 098,56 kN	1 098,56 kN
Přidržovací síla F_p	500,81 kN	587,14 kN	384,79 kN
Vyhazovací síla F_v	55,46 kN	55,46 kN	55,46 kN
Celková síla F_c	1 110,80 kN	1 197,14 kN	994,79 kN
Celková práce A	88,66 kJ	95,77 kJ	79,58 kJ

V tab. 11 lze vidět, že v žádném případě tažná síla nepřekračuje kritickou, takže nedojde k utržení dna. Přidržovací síla je závislá na ploše, na které působí přidržovač, a proto je při použití různých tvarů přístřihů odlišná. Nejmenší je v případě použití tvaru vypočítaného programem, který má neméně plochu. Celková síla vykoná lisem je součtem sil tažné, přidržovací a vyhazovací. Je největší při použití zjednodušeného tvaru přístřihu, protože je zde také největší přidržovací síla. Naopak při užití tvaru vypočteného programem je celková síla nejmenší.

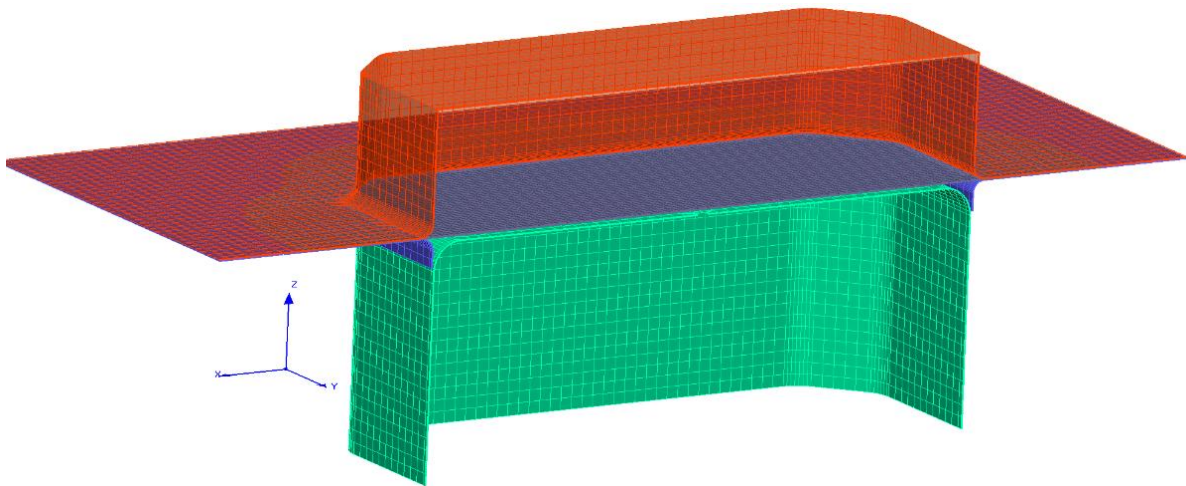
3.4 Ověření výsledků numerickou simulací

Pro ověření správnosti vypočtených výsledků a výrobitelnosti součásti byly provedeny numerické simulace v programu PAM-STAMP. Celkem byly provedeny tři simulace s různými tvary polotovarů. V první byl použit navržený ideální přístřih (obr. 53a), ve druhé byl polotovarem zjednodušený tvar (obr. 53b) a ve třetí byl vypočítán nejvhodnější tvar programem (obr. 53c). V každé simulaci byly nastaveny dvě operace. První je tažení, kde tažník je pevný a tažnice se pohybuje ve směru osy z dolů. Druhou operací je ostřížení přebytečného materiálu.



Obr. 53 Tvary polotovarů.

Prvním krokem přípravy numerické simulace je import geometrického modelu, zobrazeného na obr. 54. Je složen ze čtyř částí. Tažník, který je na obrázku označený zelenou barvou, tažnice, která je červená, modrého přidržovače a šedého polotovaru, který měl v každé simulaci jiný tvar. Cílem simulace je ověření, zda bude výtažek zhotoven a jestli bude bez defektů. Není zkoumán vliv procesu na nástroje, tzn. otlačení, posuv a deformace nástrojů. Proto je brán nástroj jako ideálně tuhý a jsou naimportované pouze plochy, definující kontakty mezi nástrojem a polotovarem. Tím pádem dojde k úspoře času, protože se nemusí počítat síť pro celý nástroj.



Obr. 54 Geometrický model.

Druhým krokem je nastavení polotovaru. Ten je počítán pomocí skořepinových prvků sítě, které si sice nesou informace o tloušťce, ale fyzicky počítá s polotovarem jako by to byla pouze plocha. To je výhodnější zejména u složitějších a rozměrnějších výlisků, kdy dojde k velké úspoře času. Geometrie polotovaru (obr. 53) je definována pomocí drátového modelu. Materiálem je ocel 17 240, která je dána mezi pevností R_m , mezi kluzu R_e a homogenní tažností A_g . Pomocí programu MCE Tool od ESI Group byly dopočítány materiálové parametry n , K a ϕ_0 , uvedené v tab. 12 a získána křivka závislosti napětí na přetvoření na obr. 55. Materiálový model byl zadán pomocí Krupkovského vztahu, který je uveden v rovnici (2.28).

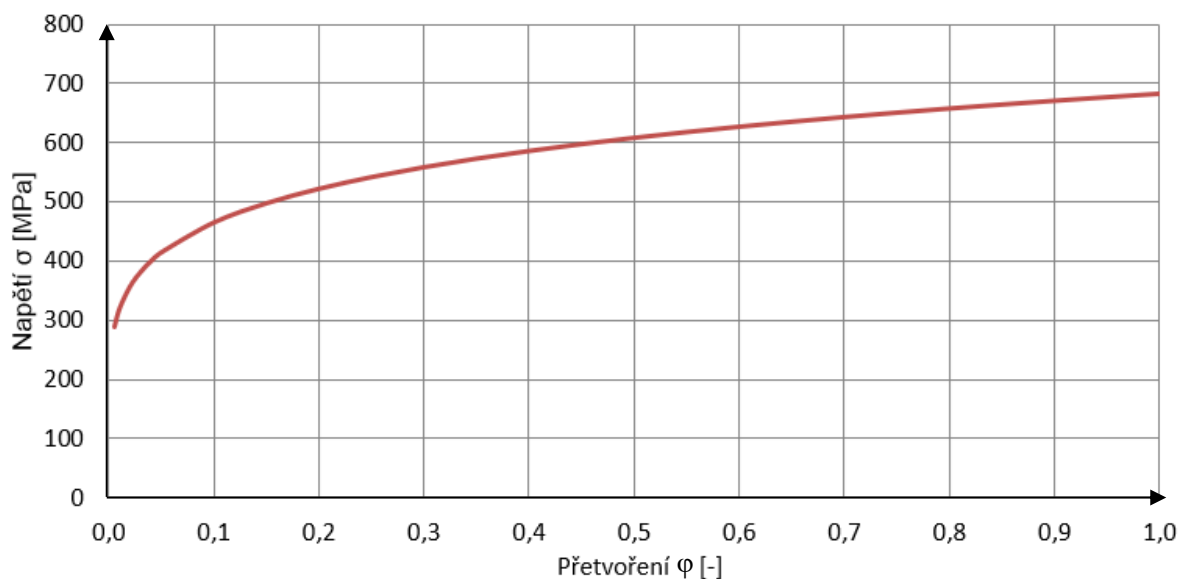
Tab. 12 Materiálové parametry pro ocel 17 240.

R_m [MPa]	R_e [MPa]	A_g [%]	n [-]	K [MPa]	φ_0
700	210	18	0,166	681,5	0,00084

V simulacích hlubokého tažení je potřeba popsat odlišné chování plechu v různých směrech, tzv. anizotropii. Modelem anizotropie použitým v simulacích je Hill 1948, který je dán rovnicí (2.29) a definován pomocí součinitelů normálové anizotropie, viz tab. 13.

Tab. 13 Součinitele normálové anizotropie.

r_0 [-]	r_{45} [-]	r_{90} [-]
0,81	1,19	0,96



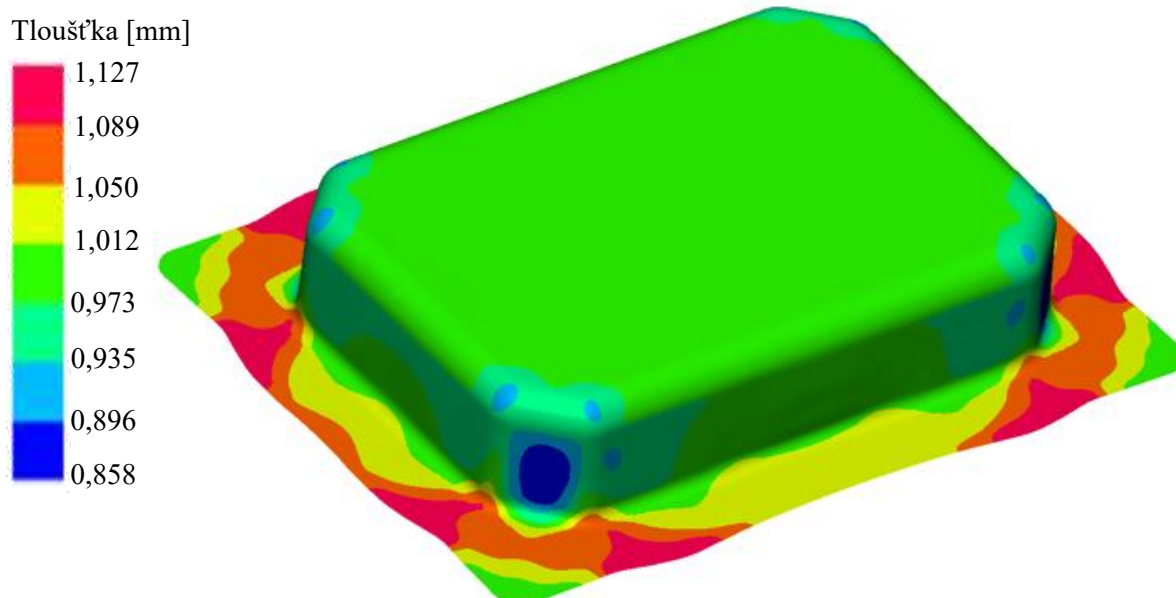
Obr. 55 Závislost napětí na deformaci pro ocel 17 240.

3.4.1 Určení nejvhodnějšího polotovaru

Po provedení všech simulací s různými výchozími polotovary byly zobrazeny výsledky. Nejprve byla provedena kontrola tloušťky stěny, a to před i po ostřížení. Hodnoty maximálních a minimálních tloušťek v jednotlivých simulacích jsou zobrazeny v tab. 14. K největšímu nárůstu dochází v přírubě, kde se materiál napěchuje až o 0,257 mm. Největší ztenčení, které je v nejhorším případě až o 0,144 mm, se nachází v nejkratších stěnách. Příklad rozdílné tloušťky stěny na výtažku před ostřížením taženého z ideálního tvaru přístříhu je na obr. 56. V přílohách 1 až 3 jsou obrázky rozložení tloušťky stěny na výtažku pro všechny polotovary před i po ostřížení.

Tab. 14 Tloušťka stěny zjištěná při použití různých tvarů polotovarů.

Polotovar	Min. tloušťka [mm]	Max tloušťka před ostřížením [mm]	Max. tloušťka po ostřížení [mm]
Ideální přístříh	0,858	1,127	1,104
Zjednodušený tvar	0,856	1,141	1,092
Vygenerován programem	0,871	1,257	-



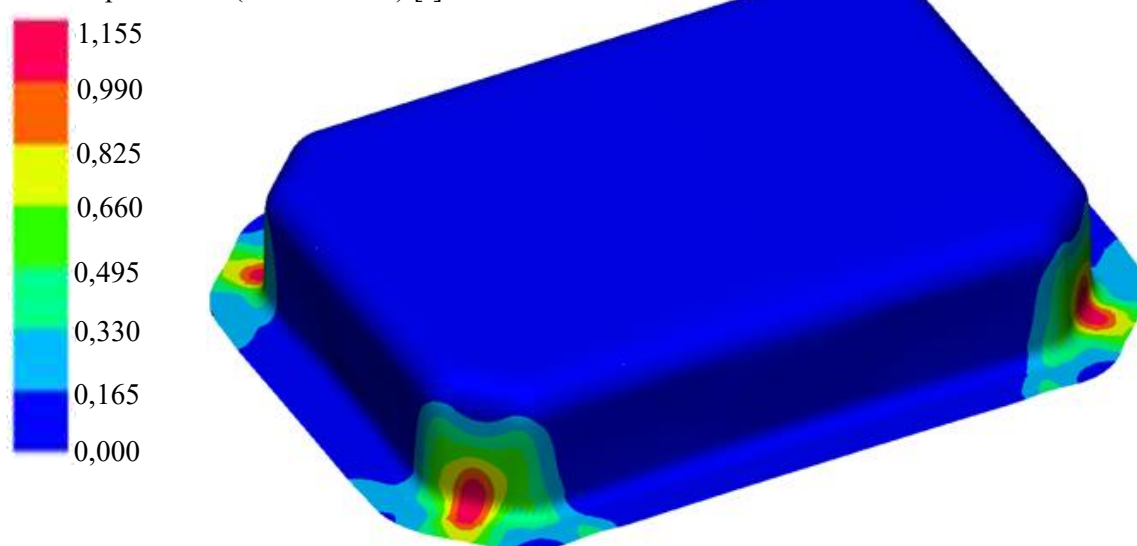
Obr. 56 Tloušťka stěny na výtažku taženého z ideálního tvaru přístříhu.

Druhým výsledkem simulací je plastické přetvoření. Maximální hodnoty při použití různých tvarů polotovaru jsou uvedeny v tab. 15. K největšímu přetvoření, které je při použití automaticky vygenerovaného nejvhodnějšího tvaru polotovaru 1,155, dochází v nejkratších stranách v přechodu příruby a pláště, viz obr. 57. V oblasti dna a rovných ohnutých stěn k přetvoření nedochází. V přílohách 1 až 3 jsou zobrazeny rozložení plastického přetvoření na výtažku pro všechny polotovary před i po ostřížení.

Tab. 15 Maximální hodnoty plastického přetvoření.

Polotovar	Maximální plastické přetvoření [-]
Ideální tvar přístříhu	0,769
Zjednodušeného tvaru přístříhu	0,694
Tvar přístříhu vypočítaný programem	1,155

Plastické přetvoření (membránové) [-]



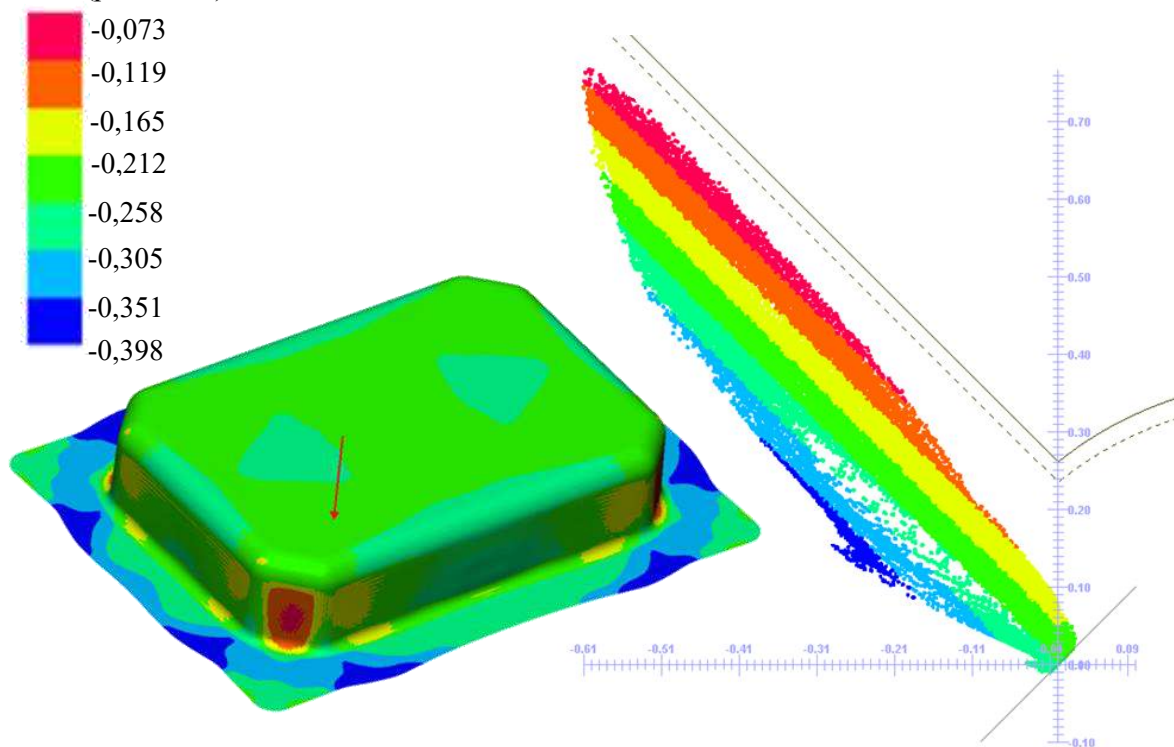
Obr. 57 Plastické přetvoření na výtažku taženého z tvaru přístříhu vygenerovaného programem.

Důležitým výsledkem numerických simulací je získání Keeler-Goodwinova diagramu. Stupnice na obrázku ukazuje, jak jsou vzdáleny jednotlivé body na výtažku od mezní křivky. Po překročení této křivky dojde k trhlině. Z důvodu bezpečnosti je v diagramu mezní křivka o 10 % odsazena a zobrazena čárkovanou čarou. V přílohách 1 až 3 jsou mezní křivky pro všechny polotovary pro střední, horní a spodní vrstvy. V tab. 16 jsou uvedeny vzdálenosti od mezní křivky pro jednotlivé polotovary a vrstvy. Největší riziko porušení je v horní vrstvě při použití ideálního tvaru přístřihu, viz obr. 58. V žádném případě nebyla křivka překročena, takže lze konstatovat, že výtažek je možno zhotovit na jednu tažnou operaci bez porušení.

Tab. 16 Vzdálenosti od mezní křivky.

Tvar přístřihu		Ideální	Zjednodušený	Vypočítaný programem
Horní vrstva	max.	0,073	0,076	0,084
	min.	0,398	0,411	0,550
Střední vrstva	max.	0,095	0,096	0,102
	min.	0,398	0,411	0,549
Spodní vrstva	max.	0,102	0,102	0,114
	min.	0,420	0,411	0,549

FLD (přetvoření) – riziko trhlín – horní vrstva

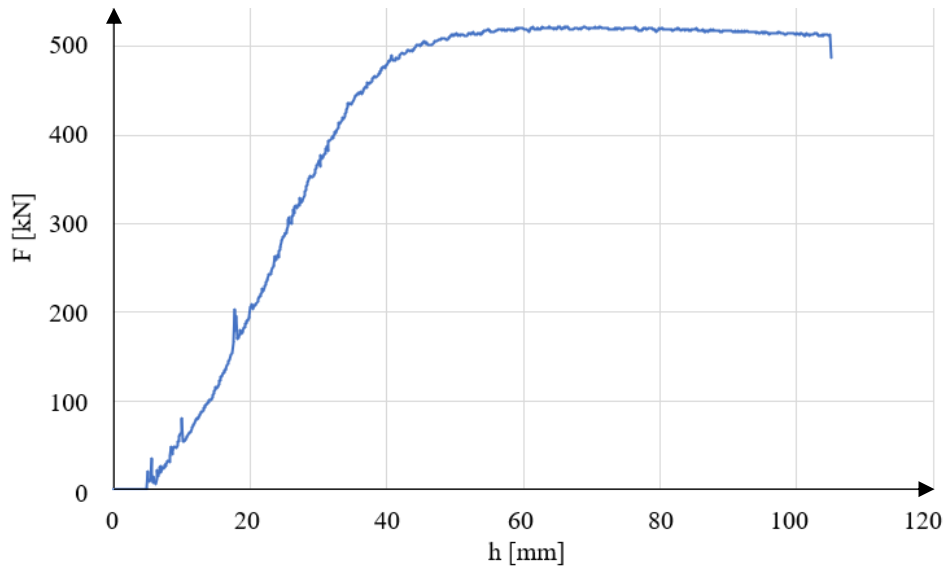


Obr. 58 FLD pro horní vrstvu při tažení z ideálního tvaru přístřihu.

Dalším důležitým výsledkem je potřebná tažná síla, která byla porovnána s vypočtenou hodnotou. Jelikož se do manuálního výpočtu dosazují rozměry hotového výtažku, je stejná pro všechny tvary polotovarů. Síly vypočtené pomocí programu PAM-STAMP jsou při použití různých tvarů přístřihu rozdílné. Největší je při tažení ze zjednodušeného tvaru a nejmenší při tažení z nevhodnějšího tvaru vygenerovaného programem. Hodnoty maximálních sil jsou uvedeny v tab. 17. Průběhy sil jsou v přílohách 1 až 3. Na obr. 59 je zobrazena závislost tažné síly na zdvihu nástroje pro zjednodušený tvar přístřihu.

Tab. 17 Maximální tvářecí síly.

Síla při použití ideálního tvaru přístříhu	479,07 kN
Síla při použití zjednodušeného tvaru přístříhu	523,13 kN
Síla při použití tvaru přístříhu vypočítaného programem	369,05 kN
Vypočítaná síla	554,54 kN



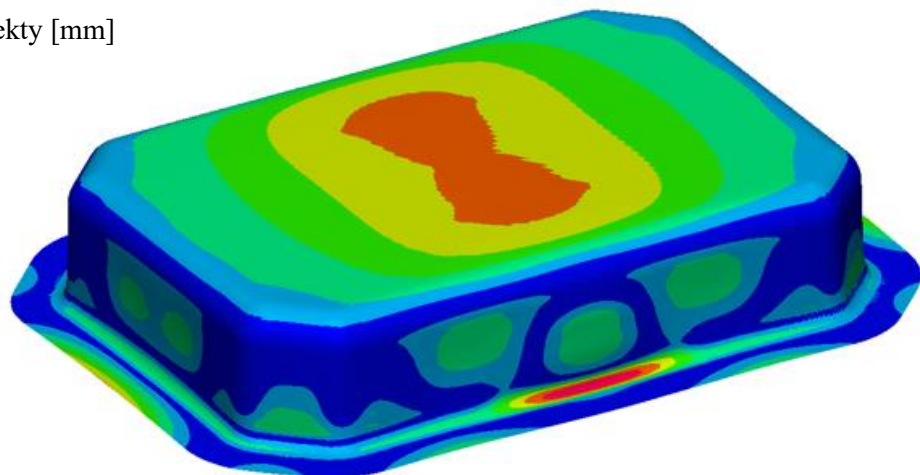
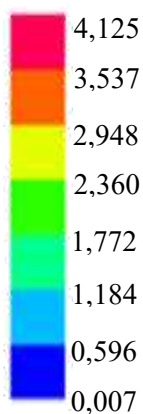
Obr. 59 Závislost síly na zdvihu při tažení výtažku ze zjednodušeného tvaru

Po nasimulování ostřížení a následného odpružení dílce bylo kontrolováno, jak moc se liší konečný tvar od požadovaného. Největší odchylka 4,125 mm byla naměřena na dně výtažku při použití zjednodušeného tvaru přístříhu, viz obr. 60. Jelikož rozměry dna jsou 350×500 mm, jedná se v nejhorším případě o průhyb 1,18 % délky. Odchyly při použití různých tvarů přístříhů jsou v přílohách 1 až 3. Maximální hodnoty jsou uvedeny v tab. 18.

Tab. 18 Největší odchyly vyrobeného tvaru od ideálního.

Polotovar	Největší odchylka [mm]
Ideální tvar přístříhu	3,435
Zjednodušeného tvaru přístříhu	4,125
Tvar přístříhu vypočítaný programem	2,773

Vzdálenost mezi objekty [mm]

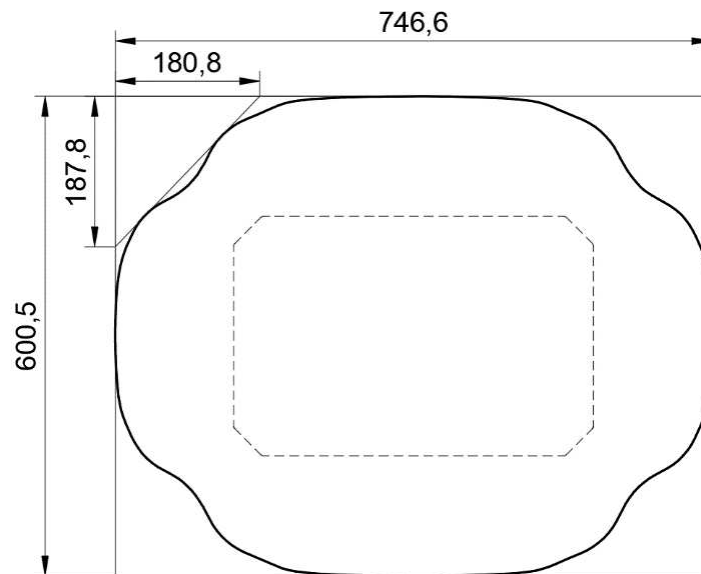


Obr. 60 Odchylka konečného tvaru od požadovaného, při použití zjednodušeného tvaru přístříhu.

Ze simulací vyplývá, že zadaný dílec lze vyrobit na jednu tažnou operaci bez vzniku trhlin. Nejvhodnější polotovár je dle výsledků tvar vygenerován programem, protože při jeho použití dochází k nejmenšímu ztenčení plechu, maximálně o 0,129 mm, a je nejmenší riziko vzniku trhlin. Potřebná tvářecí síla, která je dle simulací nejnižší, má 369 kN. Také je nejmenší odchylka od požadovaného tvaru, která je maximálně 2,773 mm.

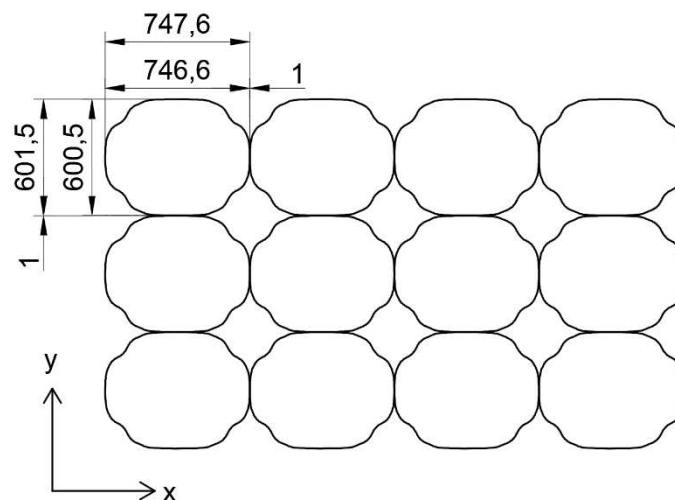
3.5 Výroba polotovaru

Polotovár, zobrazen na obr. 61, se bude vyrábět řezáním laserem z tabule plechu o tloušťce 1 mm, které se dodávají v rozměrech 1 000 × 2 000 mm, 1 250 × 2 500 mm a 1 500 × 3 000 mm. Z ekonomických důvodů je potřeba vypočítat nejvhodnější rozložení výpalků tak, aby byla tabule co nejvíce využita.



Obr. 61 Polotovár pro výrobu krytu.

Pro výpočet jsou navrženy tři rozložení na tabuli plechu. Ve všech variantách je vzdálenost mezi výpalky 1 mm a vzdálenost od okraje 2 mm. V prvním návrhu jsou výpalky kladeny do řad a sloupců, viz obr. 62. Krok ve směru osy x K_{r1x} je 747,6 mm a ve směru osy y K_{r1y} je 601,5 mm. Výsledky využití tabule plechu je zobrazeno v tab. 19.



Obr. 62 První varianta rozložení výpalků na tabuli plechu.

Tab. 19 Využití tabulí plechu při první variantě rozvržení výpalků na tabuli plechu.

X_T [mm]	1 000	2 000	1 250	2 500	1 500	3 000
Y_T [mm]	2 000	1 000	2 500	1 250	3 000	1 500
n_x [sloupců]	1	2	1	3	2	4
n_y [řádků]	3	1	4	2	4	2
n_c [ks]	3	2	4	6	8	8
V [%]	55,4	37,0	47,3	71,0	65,7	65,7

Příklad výpočtu využití tabule plechu o rozměrech $X_T = 2\,500$ mm a $Y_T = 1\,250$ mm:

- Počet sloupců výpalků na tabuli:

$$n_x = \frac{X_T}{K_{r1x}} = \frac{2\,500}{747,6} = 3,34 \text{ sloupců.} \quad (3.14)$$

Výpočtem vyšlo, že na tabuli plechu bude 3,34 sloupců. Protože počet musí být celé číslo, bude tato hodnota zaokrouhlena na 3 sloupce.

- Počet řádků výpalků na tabuli:

$$n_y = \frac{Y_T}{K_{r1y}} = \frac{1\,250}{601,5} = 2,08 \text{ řádků.} \quad (3.15)$$

Výpočtem vyšlo, že na tabuli plechu bude 2,08 řádků. Protože počet musí být celé číslo, bude tato hodnota zaokrouhlena na 2 řádky.

- Počet výpalků na tabuli:

$$n_c = n_x \cdot n_y = 3 \cdot 2 = 6 \text{ ks.} \quad (3.16)$$

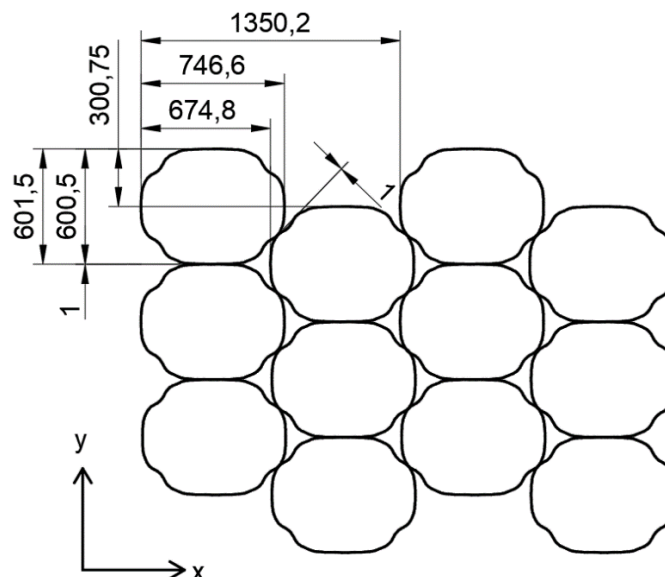
Na tabuli plechu s rozměry $2\,500 \times 1\,250$ mm bude celkem 6 výpalků.

- Využití tabule plechu:

$$V = \frac{n_c \cdot S_{pv}}{X_T \cdot Y_T} \cdot 100 = \frac{6 \cdot 369\,632,733}{2\,500 \cdot 1\,250} \cdot 100 = 70,97 \%. \quad (3.17)$$

Tabule plechu bude využita na 70,97 %.

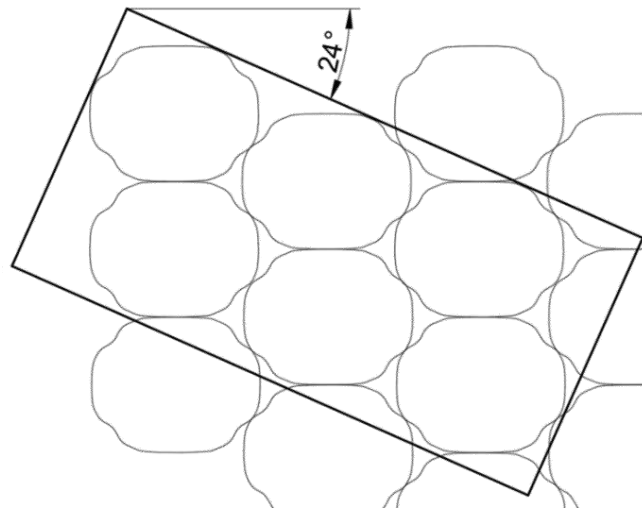
Na tabuli plechu s rozměry $2\,500 \times 1\,250$ mm se vejde celkem 6 výpalků, které budou ve třech sloupcích a 2 řádcích. Tabule plechu bude využita na 70,97 %.



Obr. 63 Druhá varianta rozložení výpalků na tabuli plechu.

V druhém návrhu rozložení výpalků na tabuli plechu je každý druhý sloupec posunut ve směru osy y o polovinu součtu šířky výpalku L_v a můstku, takže celková hodnota posunutí o_{s2y} činí 300,75 mm. Následně je sloupec přiblížen k vedlejšímu tak, aby byla mezera mezi výpalky 1 mm, viz obr. 63. Krok mezi sloupci K_{r2x} je 1 350,2 mm a mezi řádky K_{r2y} je 601,5 mm. Každý druhý sloupec je oproti předchozímu posunut v ose x o hodnotu $o_{s2x} = 674,8$ mm.

Výpočty využití tabule plechu byly provedeny pro úhel natočení 0 a 90° a výsledky zaznamenány do tab. 20. Jelikož jsou výpalky rozměrné a na tabuli se jich vleze maximálně 8, byly pro ověření správnosti výpočtů v programu AutoCAD jednotlivá rozvržení nakreslena v měřítku, viz příloha 4. Po grafickém zobrazení byla navrhována také varianta, kdy je tabule plechu natočena tak, aby byly všechny sloupce stejně daleko od horního okraje, viz obr. 64. V tomto případě se jedná o úhel $\alpha_T = 24^\circ$. Spočítal se počet výpalků na tabuli, její využití a výsledky byly také přidány do tab. 20.



Obr. 64 Natočení tabule plechu.

Tab. 20 Využití tabulí plechu při druhé variantě rozvržení výpalků na tabuli plechu.

Tabule	2 000 × 1 000			2 500 × 1 200			3 000 × 1 500		
	0	24	90	0	24	90	0	24	90
n_{x1} [ks]	1	-	1	2	-	1	2	-	1
n_{y1} [ks]	1	-	3	2	-	4	2	-	4
n_{x2} [ks]	1	-	0	1	-	0	2	-	1
n_{y2} [ks]	1	-	0	1	-	0	1	-	4
n_c [ks]	2	2	3	5	6	4	6	7	8
V [%]	37,0	37,0	55,4	59,1	71,0	47,3	49,3	57,5	65,7

Příklad výpočtu využití tabule plechu o rozměrech 2 500 × 1 200 mm a úhel natočení $\alpha_T = 0^\circ$:

- Počet lichých sloupců výpalků na tabuli:

$$n_{x1} = \frac{X_T + K_{r2x} - L_v}{K_{r2x}} = \frac{2\,500 + 1\,350,2 - 746,6}{1\,350,2} = 2,30 \text{ sloupců.} \quad (3.18)$$

Výpočtem vyšlo, že na tabuli plechu bude 2,30 sloupců, začínajících u horního kraje. Protože počet musí být celé číslo, bude tato hodnota zaokrouhlena na 2 sloupce.

- Počet řádků výpalků v lichých sloupcích:

$$n_{y1} = \frac{Y_T}{K_{r2y}} = \frac{1\,250}{601,5} = 2,08 \text{ řádků.} \quad (3.20)$$

Výpočtem vyšlo, že v lichých sloupcích bude 2,08 řádků výpalků. Protože počet musí být celé číslo, bude tato hodnota zaokrouhlena na 2 řádky.

- Počet posunutých sloupců výpalků na tabuli:

$$n_{x2} = \frac{X_T - o_{s2x} + K_{r2x} - L_v}{K_{r2x}} = \frac{2\,500 - 674,8 + 1\,350,2 - 746,6}{1\,350,2} = 1,80 \text{ sloupců.} \quad (3.21)$$

Výpočtem vyšlo, že na tabuli plechu bude 1,80 posunutých sloupců. Protože počet musí být celé číslo, bude tato hodnota zaokrouhlena na 1 sloupec.

- Počet řádků výpalků v posunutých sloupcích:

$$n_{y2} = \frac{Y_T - o_{s2x}}{\check{S}_{r2}} = \frac{1\,250 - 300,74}{601,5} = 1,58 \text{ řádků.} \quad (3.22)$$

Výpočtem vyšlo, že v posunutých sloupcích bude 1,58 řádků výpalků. Protože počet musí být celé číslo, bude tato hodnota zaokrouhlena na 1 řádek.

- Počet výpalků na tabuli:

$$n_c = n_{x1} \cdot n_{y1} + n_{x2} \cdot n_{y2} = 2 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 5 \text{ ks.} \quad (3.23)$$

Na tabuli plechu s rozměry 2 500 x 1 250 mm bude celkem 5 výpalků.

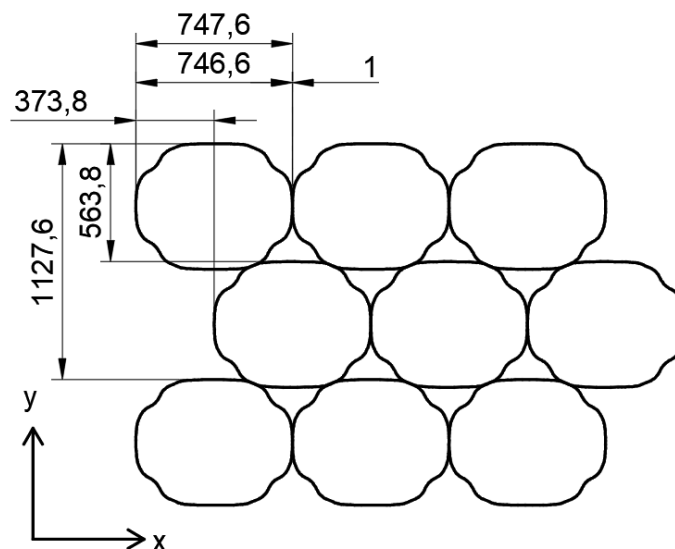
- Využití tabule plechu:

$$V = \frac{n_c \cdot S_{pv}}{X_T \cdot Y_T} \cdot 100 = \frac{5 \cdot 369\,632,733}{2\,500 \cdot 1\,250} \cdot 100 = 59,14 \%. \quad (3.17)$$

Tabule plechu bude využita na 70,97 %.

Na tabuli plechu s rozměry 2 500 x 1 250 mm se vejde celkem 5 výpalků. V prvním a třetím sloupci budou 2 řádky a ve druhém bude 1 řádek. Tabule plechu bude využita na 70,97 %.

Třetí varianta rozložení výpalků na tabuli plechu je obdobná jako druhá. Rozdíl je v tom, že se odsazují řádky místo sloupců, viz obr. 65. Hodnota osazení činní 373,8 mm. Výpočet se provádí stejně jako ve variantě 2. Výsledky využití tabule plechu jsou zobrazeny v tab. 21 a grafické znázornění v příloze 4. Natočení tabule plechu tak, aby všechny řádky začínaly ve stejné vzdálenosti od okraje, je rovno úhlu $\alpha_T = 56^\circ$.



Obr. 65 Třetí varianta rozložení výpalků na tabuli plechu.

Tab. 21 Využití tabulí plechu při třetí variantě rozvržení výpalků na tabuli plechu.

Tabule	2 000 × 1 000			2 500 × 1 250			3 000 × 1 500		
α_T [°]	0	56	90	0	56	90	0	56	90
n_{x1} [ks]	2	-	1	3	-	1	4	-	2
n_{y1} [ks]	1	-	2	1	-	2	1	-	3
n_{x2} [ks]	0	-	0	2	-	1	3	-	1
n_{y2} [ks]	0	-	0	1	-	2	1	-	2
n_c [ks]	2	2	2	5	3	4	7	8	8
V [%]	37,0	37,0	37,0	59,1	35,5	47,3	57,5	65,7	65,7

Porovnáním výsledků z tab. 19, tab. 20 a tab. 21 lze zjistit, že největší využití tabule plechu je 71 %, a to v případě rozložení výpalků podle varianty 1 na tabuli plechu 2 500 × 1 250 mm a v případě rozložení podle varianty 2 na tabuli o rozměrech 2 500 × 1 250 mm natočenou o úhel 24°. Z těchto dvou možností byla zvolena varianta 1, protože po vyřezání polotovaru bude mít odpad vhodnější rozměry tvar pro možnost následného využití při výrobě jiného dílu.

Pro řezání byl zvolen pětiosý laser od firmy TRUMPF TruLaser Cell 5030 (obr. 66), který se využívá pro 2D i 3D aplikace, takže kromě výroby polotovaru se využije také pro dokončující operace. Jeho technické údaje jsou uvedeny v tab. 22. [56]

Tab. 22 Technické údaje TruLaser Cell 3000 [56].

Pojezd v ose x	3 000 mm
Pojezd v ose y	1 500 mm
Pojezd v ose z	700 mm
Max. rychlost v osách x, y a z	60 m·min ⁻¹
Přesnost polohování v osách x, y a z	0,08 mm
Výkon laseru	3 000 W až 4 000 W



Obr. 66 TruLaser Cell 5030 [56].

3.6 Volba lisu a konstrukce nástroje

Nástroj bude konstruován pro tvar přístříhu vypočtený programem. Podle potřebné tvářecí síly, která je dle numerické simulace 369 kN a podle výpočtu 554,54 kN je zvolen potřebný stroj, pro který bude navržen nástroj. Tažení bude probíhat na univerzálním hydraulickém lisu CTH 250 (obr. 67) od firmy Žďas. Je vybaven spodním přidržovačem a horním vyhazovačem. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tab. 23. [57]

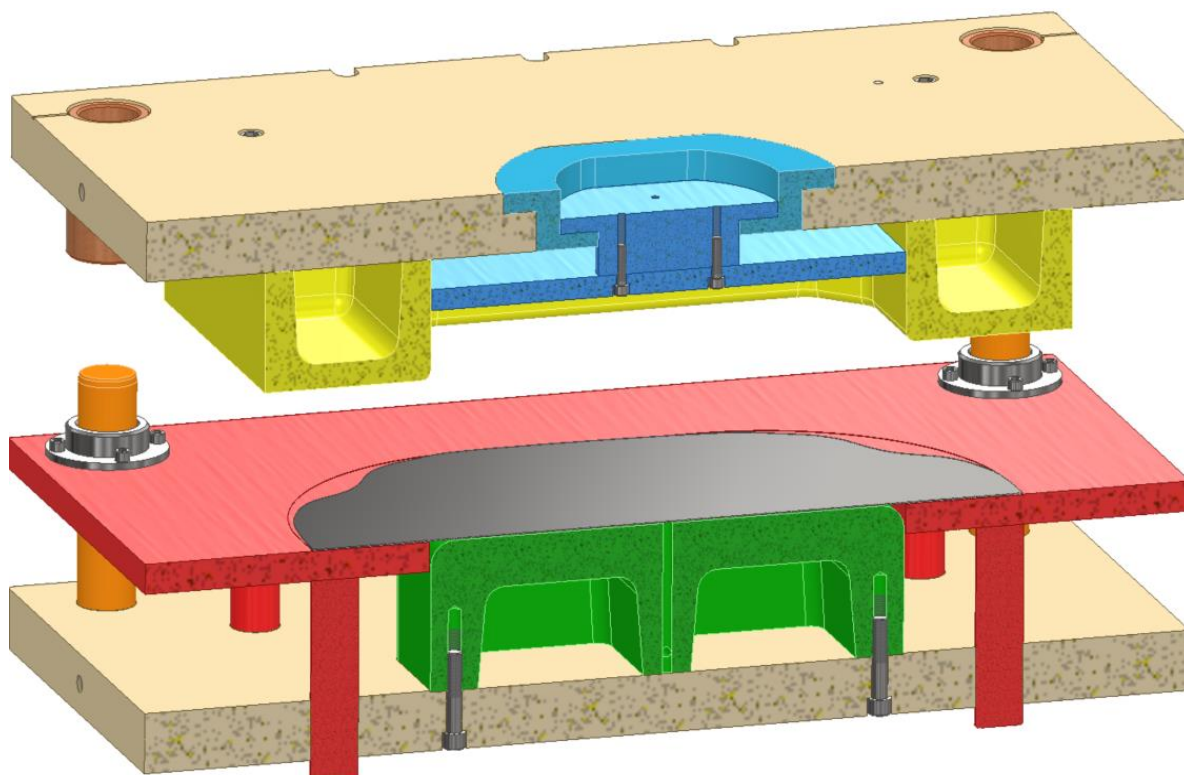


Obr. 67 Hydraulický univerzální lis CTH 250 [57].

Tab. 23 Parametry lisu CTH 250 [57].

Jmenovitá síla [kN]	2 500
Sevřená výška [mm]	800
Zdvih [mm]	800
Maximální pracovní rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	70
Minimální pracovní rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	20
Upínací plocha stolu [mm]	1 000 × 1 250
Upínací ploch beranu [mm]	1 000 × 1 250
Síla přidržovače [kN]	1 000
Zdvih přidržovače [mm]	320
Síla horního vyhazovače [kN]	100
Zdvih horního vyhazovače [mm]	330
Výkon hlavního motoru [kW]	55

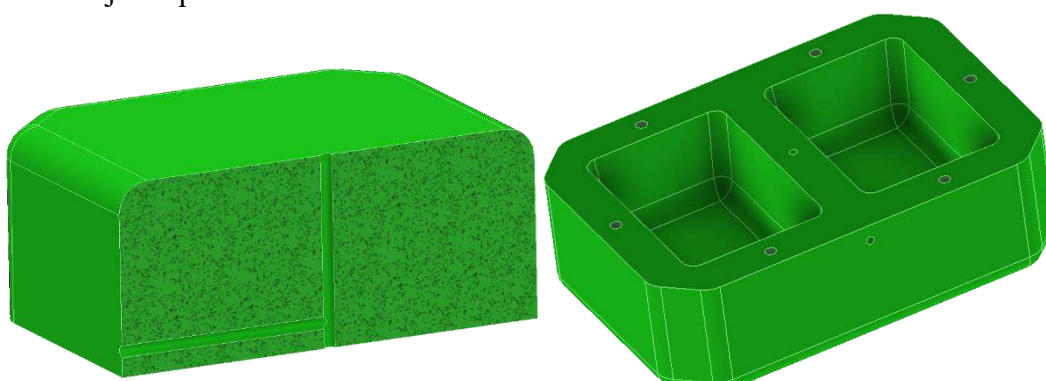
Sestava nástroje je zobrazena na obr. 68. Tažník (zelená) je nepohyblivě upevněn ve spodní části a tažnice (žlutá) se pohybuje směrem dolů. Pohyblivý přidržovač (červená), který je zároveň spodním vyhazovačem, slouží také k zakládání polotovaru. Ve vrchní části se nachází horní vyhazovač (modrá). Upínání je zajištěno pomocí šroubů, které se vloží do T drážek stolu a utáhnou se maticí.



Obr. 68 Sestava nástroje.

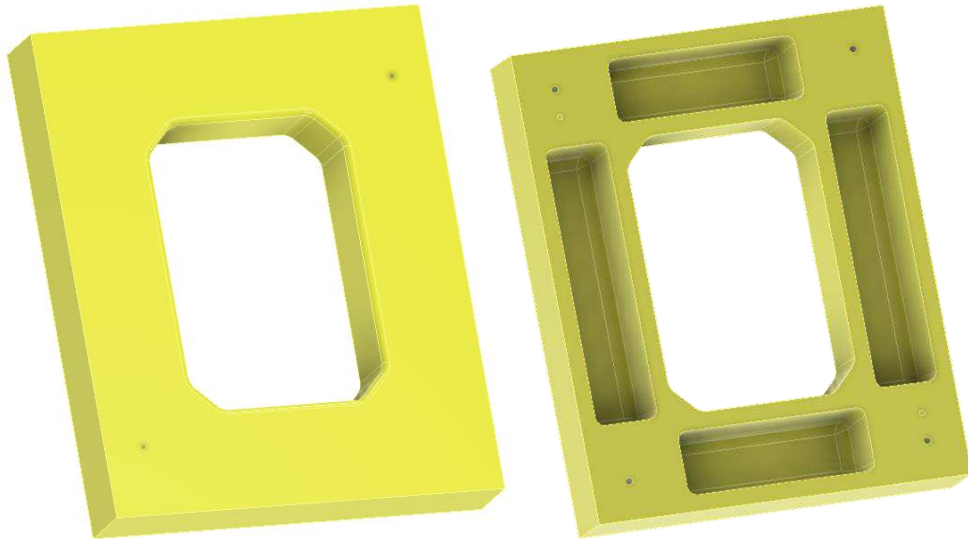
Nástroj má půdorys o rozměrech $1\ 100 \times 950$ mm a v sevřeném stavu má výšku 290,5 mm. Jelikož má lis sevřenou výšku 800 mm, bude potřeba nástroj zespona vypodložit. Skládá se z následujících částí:

- Tažník – protože má velké rozměry a slouží k tažení korozivzdorné oceli, je vyroben jako odlitek z hliníkového bronzu (obr. 69). Plochy, které přijdou do kontaktu s materiálem jsou broušeny na $Ra = 0,4\ \mu\text{m}$. Uprostřed čela tažníku se nachází odvětrávací kanál s průměrem 20 mm. K základové desce je připevněn pomocí šesti šroubů M16 a jeho poloha je zajištěna zahloubením v základové desce. Pro snížení jeho hmotnosti je zespona odlehčení.



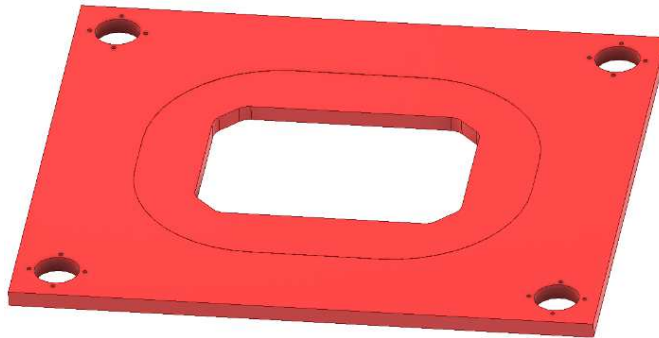
Obr. 69 Tažník.

- Tažnice – stejně jako tažník je z důvodu velkých rozměrů vyrobena z hliníkového bronzu (obr. 70). Funkční části a horní část tažnice, přicházející do styku s polotovarem, jsou leštěny na hodnotu drsnosti $Ra = 0,4\ \mu\text{m}$. Pro snížení hmotnosti tažnice odlehčena. K základové desce se upíná pomocí čtyř šroubů M16 a její poloha je zajištěna pomocí dvou kolíků o průměru 10 mm.



Obr. 70 Tažnice.

- Přidržovač – skládá se z desky (obr. 71) a osmi tlačných kolíků, pomocí kterých dochází k jeho pohybu. Ty jsou vyrobeny z oceli 11 600. Na horní straně desky, vyrobené z hliníkového bronzu, je vyfrézováno zahloubení, sloužící k založení polotovaru. V rozích desky jsou otvory pro vodící pouzdra, která budou připevněna pomocí čtyř šroubů M16.



Obr. 71 Přidržovač.

Tlačné kolíky přidržovače jsou namáhány na vzpěr a je potřeba zkontrolovat, jestli nedojde k jejich vybočení pomocí výpočtu kritické síly dle (2.25):

$$F_{kritvz} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_S}{L_{vz}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 306\,796,16}{238^2} = 11\,225\,741,71 \text{ N}$$

kde: E – modul pružnosti; $E = 210\,000 \text{ MPa}$,

J_S – kvadratický moment setrvačnosti [mm^4]:

$$J_S = \frac{\pi \cdot D_{Sl}^4}{64} = \frac{\pi \cdot 50^4}{64} = 306\,796,16 \text{ mm}^4,$$

kde: D_{Sl} – průměr sloupku; $D_{Sl} = 50 \text{ mm}$,

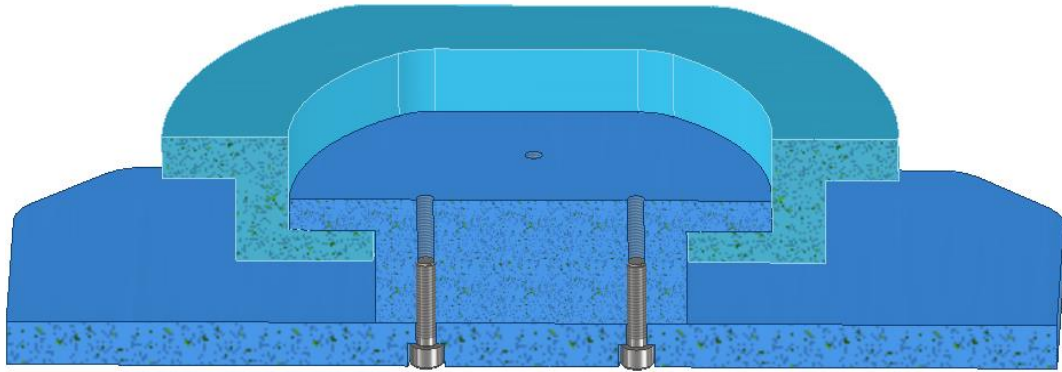
L_{vz} – vzpěrná délka, pro jeden konec upnutý a druhý volný:

$$L_{vz} = 2 \cdot l_{Sl} = 2 \cdot 119 = 238 \text{ mm},$$

kde: l_{Sl} – délka sloupku mezi základní deskou a přidržovačem; $l_{Sl} = 119 \text{ mm}$.

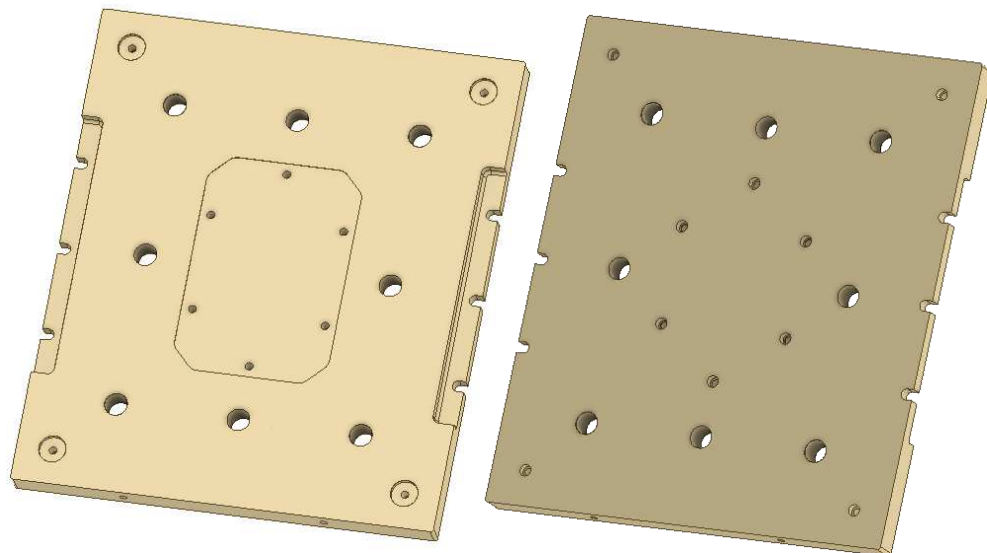
Kritická hodnota síly, při které dojde ke ztrátě vzpěrné stability tlačného kolíku je 11 225,8 kN. Přidržovací síla je 384,79 kN, která se však rozloží mezi všech osm kolíků, takže na jeden sloupek působí síla 48,1 kN. Jelikož je menší než kritická hodnota, nedojde ke vzpěru.

- Vyhazovač – skládá se ze tří částí (obr. 72). Hlavní část, vyrobená z oceli 12 050, tvoří dno výtažku. Pomocí čtyř šroubů je připevněna k čepu, pohybujícího se ve vrchní části. Aby nemohlo dojít k pootočení dna a následné kolizi vyhazovače s tažnicí, je osazení čepu seříznuté a otvor v horní části je tomu tvarově přizpůsoben. Vrchní část vyhazovače je zalisována do horní základové desky. Z důvodu správného zalisování je opět osazení seříznuté. Vyhazovací síla je zajištěna pomocí vyhazovače v lisu, který při zpětném chodu zatlačí na čelo vnitřního čepu.



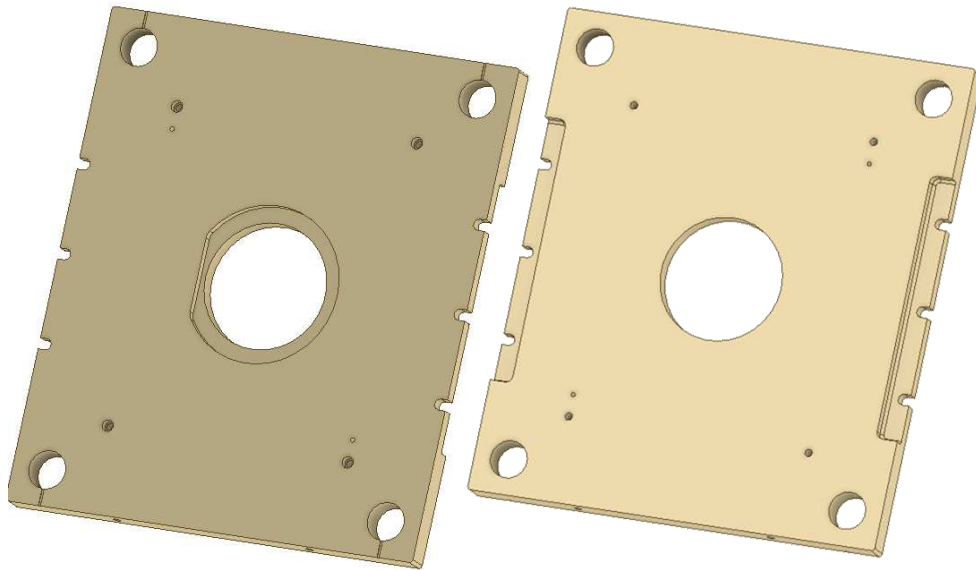
Obr. 72 Vyhazovač.

- Základové desky – jsou vyrobeny jako odlitky z litiny 42 2456. Jejich půdorys má rozměry 950×1100 mm a výška 60 mm. Podél delší strany je osazení s vybráním pro šrouby, pomocí kterých se nástroj upne do lisu. Na kratší straně jsou dvě díry se závitem M20 pro přepravní očka. V nástroji se nachází dvě varianty:
 - Spodní – uprostřed se nachází vyfrézování, sloužící k přesnému určení polohy tažníku (obr. 73). V něm je šest otvorů se zahloubením pro šrouby M16. Dále se v desce nachází osm otvorů s průměrem 50 mm, ve kterých se pohybují sloupky přidržovače. V rozích jsou seshora díry pro vložení vodicích sloupek, které se zespoda přišroubují pomocí šroubů M16.



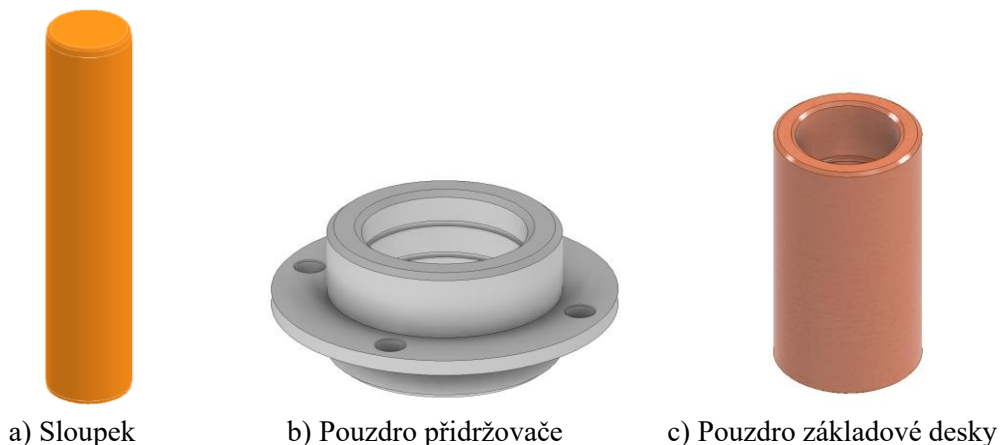
Obr. 73 Spodní základová deska.

- Horní – uprostřed je kruhový otvor s osazením, které je tvarově upraveno pro správné zalisování horního vyhazovače (obr. 74). Dále se na desce nachází čtyři otvory se zahloubením pro šrouby M16 a dva pro kolíky o průměru 10 mm, sloužící k přesnému upevnění tažnice. V rozích jsou díry pro zalisování vodicích pouzder, ze kterých jsou vyfrézovány drážky pro umožnění průchodu vzduchu.



Obr. 74 Horní základová deska.

- Vodicí prvky – vyrobeny z oceli 12 050, viz obr. 75, slouží k zpřesnění vedení nástroje a tím k zpřesnění výroby. Na nástroji se využívají tři druhy:
 - Sloupečky – na nástroji se nachází čtyři. Mají průměr 60 mm a délku 240 mm. Jeden konec je vložen do spodní základové desky a přišroubován pomocí šroubu M16. Druhý je volný.
 - Pouzdra přídržovače – jsou přišroubované k desce přídržovače pomocí čtyř šroubů M10. Na vnitřním průměru jsou tři mazací drážky.
 - Pouzdra základové desky – jsou zalisované v horní základové desce. Vnější průměr je 80 mm a délka 140 mm. Na vnitřním průměru se nachází dvě mazací drážky.



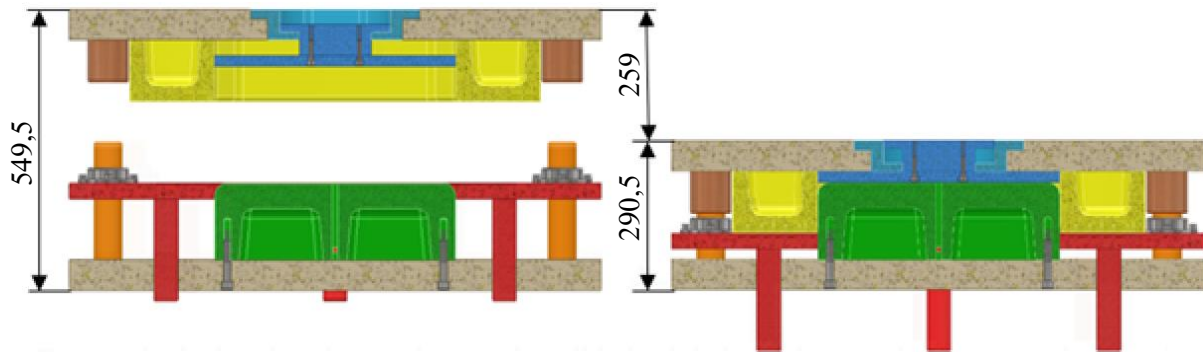
a) Sloupek

b) Pouzdro přídržovače

c) Pouzdro základové desky

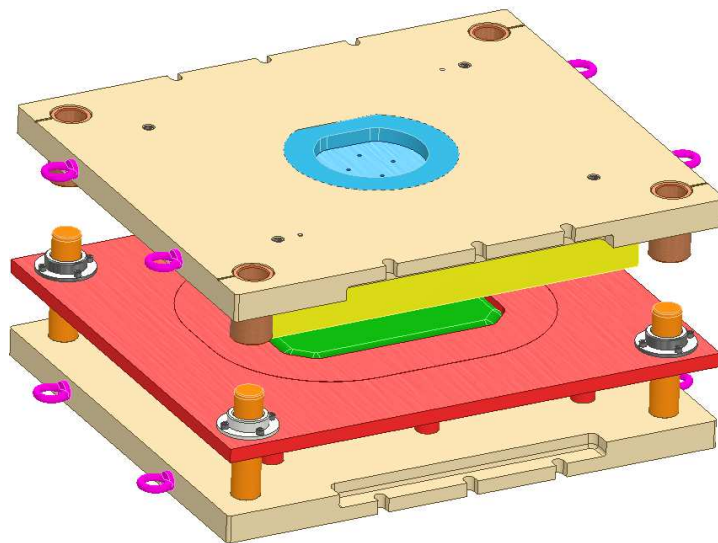
Obr. 75 Vodicí prvky.

Nástroj má zdvih 259 mm, v otevřeném stavu 549,5 mm a v sevřeném 290,5 mm, viz obr. 76. Do otevřeného nástroje se do zahlobení v přídržovači založí polotovár, který byl zhotoven technologií řezání laserem. Po zapnutí stroje sjede horní část o 160 mm dolů a dojde ke kontaktu tažnice s polotovarem a k vyvození přídržovacího tlaku. V dalších krocích se spolu s tažnicí pohybuje směrem dolů i přídržovač a jakmile sjedou o 69 mm, dosedne na polotovár také horní vyhazovač. Po celkovém pohybu horní části o 259 mm a přídržovače o 99 mm dojde k dosažení koncové polohy a zhotovení výlisku. Následuje zpětný pohyb tažnice. Pomocí horního vyhazovače lisu dojde k vyvození vyhazovací síly, která zabráni ulpění výtažku v tažnici. Zároveň se také vrací přídržovač, který napomáhá stírání výtažku z tažníku.

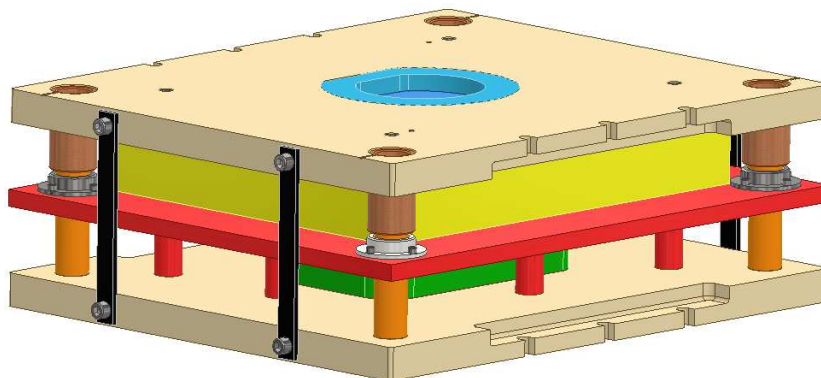


Obr. 76 Výškové rozměry nástroje v otevřeném a sevřeném stavu.

Pro manipulaci s nástrojem se do otvorů v základových deskách zašroubují přepravní očka, viz obr. 77 fialová, definovaná normou DIN 580, která mají závit M20. Při skladování nebo přepravě se nástroj zajistí v uzavřené poloze pomocí lišt a šroubů M20, které se přišroubují na místo přepravních ok, viz obr. 78 černá barva.



Obr. 77 Nástroj s přepravními oky pro manipulaci.



Obr. 78 Nástroj připravený k přepravě nebo skladování.

Po vylisování základního tvaru je potřeba odstranit přebytečný materiál okolo příruby, zhotovit větrací otvory, nacházející se na plášti, a otvory pro šrouby na přírubě. Toto se provede technologií řezáním laserem TruLaser Cell 5030, který je vhodný pro 2D i 3D řezání a využije se také pro výrobu polotovaru.

ZÁVĚR

Zadanou součástí byl kryt klimatizace, nacházející se na střeše autobusu. Protože díl bude vystaven atmosférickým vlivům, bude vyráběn z korozivzdorné oceli 17 240. S ohledem na velikost výrobní série 200 000 ks·rok⁻¹, tvar a složitost součásti byla zvolena výrobní metoda hlubokého tažení s následným řezáním otvorů laserem.

Před návrhem výroby byly kontrolovány podmínky technologičnosti. Materiál je vhodný k hlubokému tažení a nejsou předepsány tolerance tloušťky ani rozměrů. Maximální výška, kterou lze zhotovit na jeden tah byla vypočtena jako 120 mm, což je větší než požadovaná výška. Zaoblení přechodu dna a pláště může být maximálně 10 mm, což je také hodnota předepsána výkresem. Součást splňuje podmínky technologičnosti a lze jí zhotovit technologií hlubokého tažení bez úpravy geometrie.

Pomocí výpočtu maximální výšky, kterou lze zhotovit prvním tahem, bylo zjištěno, že součást lze zhotovit na jednu tažnou operaci. To bylo také ověřeno výpočtem pomocí součinitele tažení, který byl zjištěn $m_1 = 0,33$. Minimální poloměr zaoblení v rozích, který lze v první operaci zhotovit vyšel 25,2 mm, což je menší hodnota než požadovaná. Skutečnost, že lze zhotovit díl na jednu operaci, byla ověřena také numerickou simulací.

Tažná mezera v rovných částech byla stanovena jako $z_m = 1,4$ mm. Jelikož při tažení hranatých výtažků nedochází k rovnoměrné deformaci, musí být zvolena v rozích větší mezera 1,5 mm. Zaoblení hrany na tažnici bude 10 mm a zaoblení tažníku musí být shodné, jako požadované zaoblení dna výtažku, což činí 24 mm.

Jako polotovar byl navrhnut tvar ideálního přístříhu a z něj byl odvozen zjednodušený tvar. Pomocí programu PAM-STAMP byl spočten další tvar přístříhu. Pomocí numerických simulací byl jako nejvhodnější zvolen tvar vypočtený programem, protože při jeho použití dochází k nejmenšímu ztenčení o maximálně 0,129 mm, je nejmenší riziko vzniku trhlin a je také nejmenší odchylka od požadovaného tvaru.

Kritická síla na utržení dna byla vypočtena jako 1 098,56 kN. Výpočtem vyšla tažná síla 554,54 kN a z numerické simulace vyšla 369 kN. Obě síly jsou menší než kritická, takže k utržení dna nedojde. Přidržovací síla vyšla výpočtem 384,79 kN a vyhazovací 55,46 kN. Celková práce, kterou musí stroj vykonat je 79,58 kJ. Na základě potřebných sil a rozměrů upínací plochy byl zvolen univerzální hydraulický lis CTH 250.

Pro výrobu polotovaru, odstranění přebytečného materiálu po vylisování a zhotovení větracích otvorů a děr pro šrouby byl zvolen laser TruLaser Cell 5030, který je vhodný pro 2D i 3D řezání. Polotovar se bude vyrábět z tabule plechu o rozměrech 2 500 × 1 250 mm a výpalky budou na tabuli kladeny za sebe do řad a sloupců s mezerami mezi výpalky 1 mm. Využití tabule vyšlo 71 %. Před zavedením do výroby je potřeba navržený postup otestovat na ověřovací sérii.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Forejt, Milan. *Technologie tváření*. Druhé vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
 2. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. První vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 3. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a MÁDLE, Luděk. *Hluboké tažení plechu na lisech*. První vydání. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00221-4.
 4. ODEHNAL, Josef. *Hluboké tažení*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1963.
 5. *Plechové misky pro psy pro vodní jídlo*. Online. Merkandi, Dostupné z: <https://merkandi.cz/products/plechove-misky-pro-psy-pro-vodni-jidlo/316378>. [cit. 2024-02-03].
 6. *Dřez Quadron EDDIE111 satin HD111SAT6642*. Online. Favi, Dostupné z: <https://favi.cz/produkty/p/drez-quadron-eddie111-linen-hd111len6642?v=19902046>. [cit. 2024-02-03].
 7. *Olejová Vana 0301F3 Citroen Peugeot 1,6 1,8 1,9 D*. Online. Eurofance. Dostupné z: Dostupné z: <https://eurofrance.cz/olejova-vana-0301f3-citroen-peugeot-1-6-1-8-1-9-d.html>. [cit. 2024-02-09].
 8. *400 Tons Auto Car Body Parts Deep Drawing Making Hydraulic Press Machine with Servo PLC*. Online. Made-in-China. Dostupné z: <https://china-hydraulicpress.en.made-in-china.com/product/jCsJqkBESVcv/China-400-Tons-Auto-Car-Body-Parts-Deep-Drawing-Making-Hydraulic-Press-Machine-with-Servo-PLC.html>. [cit. 2024-02-14].
 9. *Po Ostravě jezdí už jen nízkopodlažní autobusy, starší začal rozprodávat za 91 tisíc korun: Autobus Solaris Urbino 12 v barvách DPO*. Online. In: ZDOPRAVY.CZ. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/po-ostrave-jezdi-uz-jen-nizkopodlazni-autobusy-staci-zacal-rozprodavat-za-91-tisic-korun-66358/>. [cit. 2023-11-25].
 10. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN 41 7240, *Ocel 17 240 CrNi*. Praha, 1972.
 11. *Materiály nerez*. Online. Management of inquiry. 2023. Dostupné z: <https://management.wbs.cz/MATERIALY-NEREZ.html>. [cit. 2024-02-27].
 12. RAYNOCH, Jindřich. *Svařování*. Online. Ostrava: Střední průmyslová škola Ostrava – Vítkovice, 2012. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/SVA%C5%98OV%C3%81N%C3%8D-UT.pdf>. [cit. 2024-02-23].
 13. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II část svařování*. Online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf. [cit. 2024-02-23].
 14. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II část svařování – I*. Online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_I_kubicek.pdf. [cit. 2024-02-23].
 15. *Svařování kovů*. Online. CENTES. Dostupné z: <https://centes.cz/svarovani-kovu/>. [cit. 2024-02-23].
 16. PETERKOVÁ, Eva. *Inkrementální tváření* [přednáška]. Brno: VUT v Brně, 21. listopadu 2022.
-

-
17. JESWIET, Jacob J.; MICARI, Fabrizio; HIRT, Gerhard Kurt Peter; BRAMLEY, Alan N.; DUFLOU, Joost R a ALLWOOD, Julian M. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. Online. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2005, č. 54(2), s. 88-114.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60021-3. ISSN 0007-8506.
Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3). [cit. 2023-11-25].
 18. MARTINS, Paulo António Firme; BAY, Niels; SKJOEDT, Martin a SILVA, Maria Beatriz. Theory of single point incremental forming. Online. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*. 2008, č. 57(1), s. 247-252. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.047. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.047>. [cit. 2023-11-25].
 19. SPIFA Aveiro. *Single Point Incremental Forming at University of Aveiro – SPIF-A Project*. Online. 2013. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=N2Ntxb98-Ak>. [cit. 2023-11-25].
 20. BAČA, Josef a BÍLIK, Josef. *Technológia tvárnenia*. První vydání. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1339-2.
 21. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC, FAKULTA STROJNÍ. *Technologie II*. Online. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm. [cit. 2023-11-26].
 22. Mike B. *Rubber perss forming of rib*. Online. 2016. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=-QNM0JUUYEY>. [cit. 2024-02-28].
 23. TriformPress. *Triform Deep Draw Sheet Hydroforming*. Online. 2016. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=WPF1kWvcVaI>. [cit. 2024-02-28].
 24. SCHULER GMBH. *Metal forming handbook*. New York: Springer-Verlag, 1998. ISBN 35-40-1185-1.
 25. KLT Machinetool. *Stainless steel pot making machine, cookware hydraulic press machine*. Online. 2018. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=YaHOr2JoNZo>. [cit. 2024-02-28].
 26. ČADA, Radek. *Technologie I*. Online. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1507-7. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>. [cit. 2024-02-23].
 27. HUMÁR, Antonín. *Technologie I, technologie obrábění - 3. část*. Online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf. [cit. 2024-02-23].
 28. *Řezání vodním paprskem*. Online. Gumex. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzba/rezani-vodnim-paprskem-46>. [cit. 2024-02-23]
 29. *Střížný nástroj pro kovovýrobu*. Online. H2P Bohemia. Dostupné z: <https://www.h2p-bohemia.cz/reference/>. [cit. 2024-02-24].
 30. BAREŠ, Karel a kolektiv. *Lisování*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1971. ISBN 04-234-71.
 31. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN 22 7303, *Tažení dutých čtyřhranných výtahů*. Praha, 1967. [ČSN227303]
 32. TSCHATSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes - machines - tools*. New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.
-

-
33. DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Páté vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.
 34. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. První vydání. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0401-9.
 35. ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání – teoretický základ*. Online. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_004/Technologie%20tv%C3%A1%C5%99en%C3%AD%20a%20sl%C3%A9v%C3%A1n%C3%AD%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad.pdf. [cit. 2024-02-21].
 36. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN 22 7301, *Tažení dutých válcových výtažků*. Praha, 1969.
 37. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN 22 7309, *Tažidla bez přidržovače, rozměry*. Praha, 1990.
 38. LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Páté vydání. Úvaly: ALBRA – pedagogické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
 39. *Vzpěrná stabilita prutů*. Online. OnlineSchool.cz. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/pruznost-pevnost/vzperna-stabilita-prutu/>. [cit. 2024-03-19].
 40. *AMPCO METAL deep drawing tools*. Online. In: AMPCO. Dostupné z: <https://academy.ampcometal.com/metal-forming-deep-drawing-of-sheet-metal>. [cit. 2024-03-26].
 41. NOVOTNÝ, Karel. *Výrobní stroje část I – tváření*. Druhé vydání. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1987.
 42. Özkoç Hidrolik Makina. *Özkoç Hydraulický přenosový lis – výroba konvice*. Online. 2018. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=Y6tDEtbyFfA>. [cit. 2024-03-12].
 43. FABÍK, Richard. *Modelování tvářecích procesů*. Online. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. Dostupné z: <https://docplayer.cz/31806764-Modelovani-tvarecich-procesu-studijni-opora.html>. [cit. 2024-02-21].
 44. DIXIT, Prakash M. a DIXIT, Uday S. *Modeling of Metal Forming and Machining Processes*. Londýn: Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-188-6.
 45. LOGAN, Daryl L. *A First Course in the Finite Element Method*. Čtvrté vydání. USA: Cengage Learning, 2007. ISBN 0-534-55298-6.
 46. PETRUŠKA, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II*. Online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. Dostupné z: <https://dokumen.tips/documents/potaov-metody-mechaniky-ii-oldkvmtulczoldkvmtulczstudentitextyaipms2p.html?page=1>. [cit. 2024-02-21].
 47. RAMESH, Gyadari a REDDY, Chandra Mohan. Analysis of Optimization of Blank Holding Force In Deep Drawing By Using LS DYNA. Online. *International Journal Of Engineering Research and Applications*. 2013, č. 3(4), s. 1975-1995. ISSN 2248-9622. Dostupné z: https://www.ijera.com/papers/Vol3_issue4/LA3419751995.pdf. [cit. 2024-02-23].
 48. Řiháček, Jan. *Materiálové modely v MKP [přednáška]*. Brno: VUT v Brně, 31. října 2022.
 49. TOMÁŠ, Miroslav; EVIN, Emil; KEPIČ, Ján a HUDÁK, Juraj. *Physical Modelling and Numerical Simulation of the Deep Drawing Process of a Box-Shaped Product Focused on Material Limits Determination*. Online. *Metals*. 2019, č. 9(10). DOI:
-

-
- 10.3390/met9101058. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/10/1058>. [cit. 2024-02-21].
50. ELVIN, Emil; ÉLESZTOS, Pavel; PETRMICHL, Rudolf a KMEC, Josef. *CAE podpora pri navrhovaní výroby výliskov*. Online. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2006. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/9-2006/pdf/73-76.pdf>. [cit. 2024-02-21].
51. MAHALLE, Gauri; MORCHHALE, Ayush; KOTKUNDE, Nitin a GUPTA, Amit Kumar. Forming and fracture limits of IN718 alloy at elevated temperatures: Experimental and theoretical investigation. Online. *Journal of Manufacturing*. 2020, č. 56(625), s. 482-499. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.070. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/341551377_Forming_and_fracture_limits_of_IN718_alloy_at_elevated_temperatures_Experimental_and_theoretical_investigation. [cit. 2024-03-18].
52. YAN, Yu; WANG, Haibo a LI, Qiang. The inverse parameter identification of Hill 48 yield criterion and its verification in press bending and roll forming process simulations. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015, č. 20(1), s 46-53. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.09.009. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612515001061>. [cit. 2024-03-18].
53. DASAPPA, Prasad; INAL, Kaan a MISHRA, Raja. The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams. Online. *International Journal of Solids and Structures*. 2012, č. 48(25), s 3528-3550. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.04.021. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768312001680>. [cit. 2024-03-18].
54. AKSEN, Arda; ŞENER, Bora; ESENER, Emre a FIRAT, Mehmet. *Prediction of earing profile in cup drawing test using Hill48 criterion: Yield locus of von Mises and Hill48 criteria*. Online. In: ResearchGate. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Yield-locus-of-von-Mises-and-Hill48-criteria_fig1_356068208. [cit. 2024-03-29].
55. RUSKOVÁ, Marie. *Projekt DPP*. Projekt do předmětu počítačová podpora technologií. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2021.
56. TRUMPF. *Zařízení pro svařování laserovým paprskem TruLaser Cell 3000*. Online. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/3d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-cell-5030/. [cit. 2024-04-02].
57. ŽĎAS. *Hydraulické lisy*. Online. Dostupné z: <https://www.industry-eu.cz/files/companies/890388.pdf>. [cit. 2024-03-04].
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A	celková práce	[J]
A ₈₀	tažnost	[%]
A _g	homogenní tažnost	[%]
A _z	šířka brzdného žebra	[mm]
a	vzdálenost mezi středy brzdných žeber	[mm]
b	vzdálenost brzdného žebra od okraje tažnice	[mm]
C	součinitel	[-]
C ₁	konstanta závislá na hloubce tahu	[-]
C ₂	konstanta závislá na přidržovacím tlaku	[-]
D ₀	redukovaný průměr	[mm]
D _p	nejmenší průměr příruby	[mm]
D _{Sl}	průměr sloupku	[mm]
d	průměr rohu výtažku	[mm]
d ₁	průměr v rozích výtažku po první operaci	[mm]
E	modul pružnosti	[MPa]
F	matice zatížení	[N]
F _A	materiálový parametr	[-]
F _c	celková síla při tažení	[N]
F _{ct}	Celková síla potřebná k tažení	[N]
F _{kritvz}	kritická síla, při které dojde ke ztrátě vzpěrné stability	[N]
F _o	síla pro ohyb rovných stran	[N]
F _p	přidržovací síla	[N]
F _{pret}	síla na přetržení dna	[N]
F _t	síla pro tažení rohů	[N]
F _v	vyhazovací síla	[N]
f	součinitel tření	[-]
G _A	materiálový parametr	[-]
H	výška výtažku	[mm]
H _{1max}	maximální výška výtažku v prvním tahu	[mm]
H _A	materiálový parametr	[-]
H _L	zdvih beranu lisu	[mm]
H _z	Výška brzdného žebra	[mm]
h _s	délka rovné části stěny	[mm]
h _s *	délka rovné části stěny včetně přídatku na ostřížení	[mm]
J _S	kvadratický moment setrvačnosti	[mm ⁴]
K	materiálová konstanta	[MPa]
K _{r1x}	krok ve směru x při rozložení 1	[mm]
K _{r1y}	krok ve směru y při rozložení 1	[mm]
K _{r2x}	krok ve směru x při rozložení 2	[mm]
K _{r2y}	krok ve směru y při rozložení 2	[mm]
K	globální matice tuhosti	[N·mm ⁻¹]
k _p	součinitel určující nutnost použití přidržovače	[-]
L	délka výtažku s přírubou	[mm]
L _D	délka dna	[mm]
L _p	délka příruby se zaoblením	[mm]
L _s	délka rovných stěn se zaoblením i přírubou	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
L_v	délka rovných stran výtažku	[mm]
L_{vz}	vzpěrná délka	[mm]
L_z	délka zkosení dna	[mm]
l	délka výtažku bez příruby	[mm]
l_1	délka kratší stěny dna	[mm]
l_2	délka delší stěny dna	[mm]
l_p	šířka příruby	[mm]
l_{s1}	délka sloupku mezi základní deskou a přídržovačem	[mm]
m	součinitel tažení	[-]
m_1	součinitel tažení v první operaci	[-]
m_{11}	součinitel tažení v první operaci pro první variantu	[-]
m_{12}	součinitel tažení v první operaci pro druhou variantu	[-]
m_i	součinitel tažení pro i-tý tah	[-]
N_A	materiálový parametr	[-]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
n_c	počet výpalků na tabuli	[ks]
n_x	počet sloupců výpalků na tabuli	[ks]
n_{x1}	počet lichých sloupců výpalků na tabuli	[ks]
n_{x2}	počet sudých sloupců výpalků na tabuli	[ks]
n_y	počet řádků výpalků na tabuli	[ks]
n_{y1}	počet řádků výpalků v lichých sloupců	[ks]
n_{y2}	počet řádků výpalků v sudých sloupců	[ks]
n_L	počet otáček lisu	[min ⁻¹]
o_{s2x}	odsazení druhého sloupce v souřadnici x	[mm]
o_{s2y}	odsazení druhého sloupce v souřadnici y	[mm]
o_v	obvod výtažku	[mm]
p	pracovní pohyb tažníku	[mm]
p_i	tlak přídržovače	[MPa]
R	poloměr zaoblení v rozích	[mm]
R_1	redukce poloměru v rohu po první operaci	[mm]
R_c	redukovaný poloměr	[mm]
R_c'	redukovaný poloměr výtažku bez příruby	[mm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_i	redukce poloměru v rohu po i-té operaci	[mm]
R_{i-1}	redukce poloměru v rohu zhotoveného v předcházející operaci	[mm]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_p	poloměr zaoblení tažníku	[mm]
R_t	poloměr zaoblení tažnice	[mm]
R_{t1}	tažný poloměr tažnice z první operaci	[mm]
R_{tn}	tažný poloměr tažnice v n-té operaci	[mm]
R_z	poloměr zaoblení brzdného žebra	[mm]
Red	redukce	[%]
r_0	součinitel normálové anizotropie ve směru válcování	[-]
r_{45}	součinitel normálové anizotropie ve směru 45° ke směru válcování	[-]
r_{90}	součinitel normálové anizotropie v příčném směru	[-]
r_d	poloměr zaoblení mezi dnem a pláštěm	[mm]
r_{dp}	zaoblení hran dna	[mm]
r_p	poloměr zaoblení mezi pláštěm a přírubou	[mm]
S_p	plocha, na které působí přídržovač	[mm ²]

Označení	Legenda	Jednotka
S_{pi}	plocha ideálního přístřihu	[mm ²]
S_{pp}	plocha otvoru v tažnici včetně zaoblení	[mm ²]
S_{pv}	plocha tvaru přístřihu vypočteného programem	[mm ²]
S_{pz}	plocha zjednodušeného tvaru přístřihu	[mm ²]
\check{S}	šířka výtažku s přírubou	[mm]
\check{S}_D	šířka dna	[mm]
\check{s}	šířka výtažku bez příruby	[mm]
t	tloušťka stěny	[mm]
U	globální matice posuvů	[mm]
V	využití tabule plechu	[%]
X_T	délka tabule plechu	[mm]
Y_T	šířka tabule plechu	[mm]
v	Tažná rychlost	[mm·min ⁻¹]
Z	materiálová konstanta	[-]
z	zkosení	[mm]
z_d	délka zaoblení přechodu dna a pláště	[mm]
z_L	zdvih beranu lisu	[mm]
z_m	tažná mezera v rovných stěnách	[mm]
z_m'	tažná mezera v rozích	[mm]
z_p	délka zaoblení mezi přírubou a pláštěm	[mm]
α	úhel rohu nádoby	[°]
α_T	úhel natočení tabule plechu	[°]
Δc	přídavek na ostřížení	[mm]
μ	poissonův poměr	[-]
σ	napětí získané z Krupkowského vztahu	[MPa]
σ_0	mez kluzu ve směru válcování	[MPa]
σ_1	tahové napětí	[MPa]
σ_3	tečné napětí	[MPa]
σ_{45}	mez kluzu ve směru 45° ke směru válcování	[MPa]
σ_{90}	mez kluzu v příčném směru	[MPa]
σ_b	vyvážené biaxiální napětí	[MPa]
σ_x	normálové napětí ve směru válcování	[MPa]
σ_y	normálové napětí v příčném směru	[MPa]
$\bar{\sigma}$	Napětí získané ze vztahu Hill 1948	[MPa]
τ_{xy}	smykové napětí	[MPa]
φ_0	posunutí plastického přetvoření	[-]
φ_p	plastické přetvoření	[-]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výsledky numerické simulace s ideálním tvarem přístříhu
Příloha 2	Výsledky numerické simulace se zjednodušeným tvarem přístříhu
Příloha 3	Výsledky numerické simulace s programem vypočítaným tvarem přístříhu
Příloha 4	Rozložení výpalků na tabuli plechu

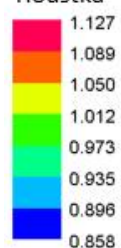
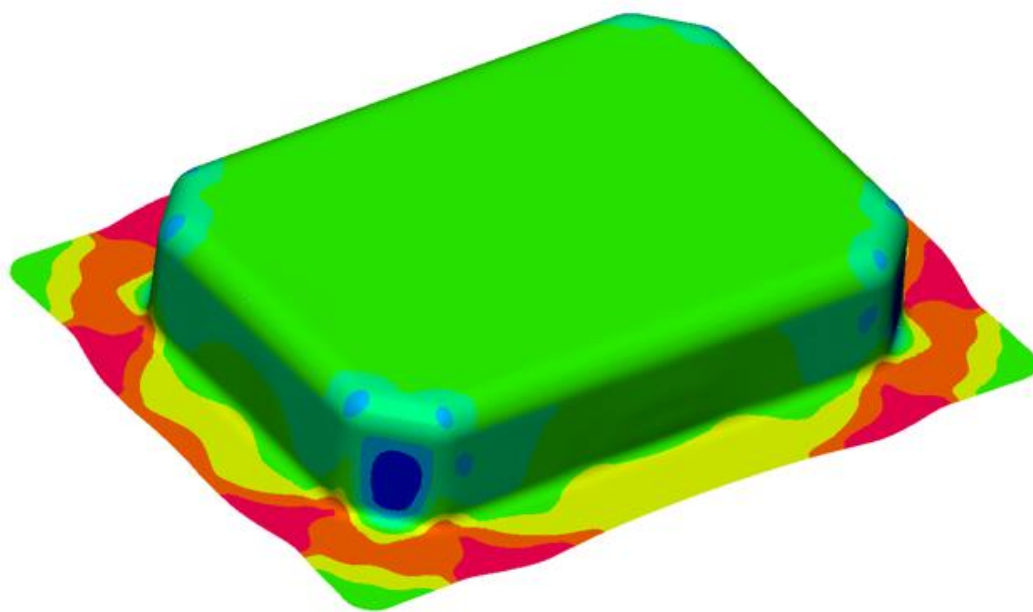
SEZNAM VÝKRESŮ

Kryt	2024-DP-217586-00
Tažnice	2024-DP-217586-03
Tažník	2024-DP-217586-04
Tažný nástroj	2024-DP-217586-S01
Kusovník	2024-DP-217586-K01

Výsledky z numerické simulace s ideálním tvarem přístřihu

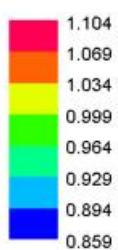
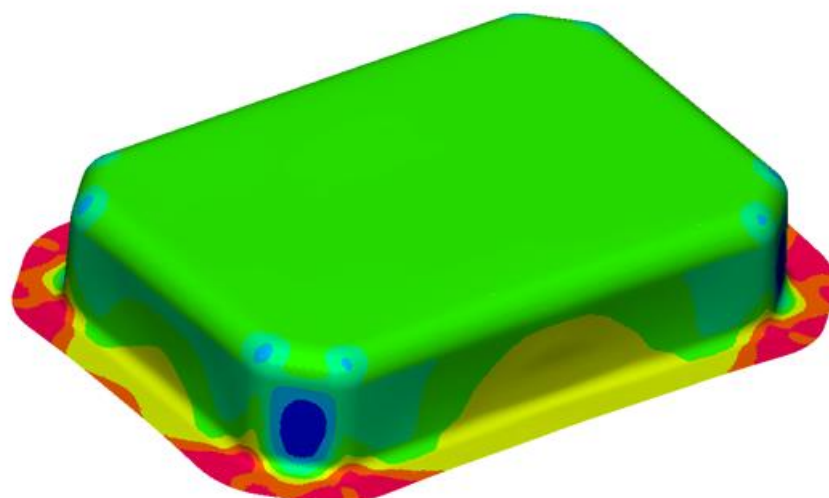
Tloušťka stěny na výtažku před ostřížením v mm.

Tloušťka

Min = 0.858
Max = 1.127

Tloušťka stěny na výtažku po ostřížení v mm.

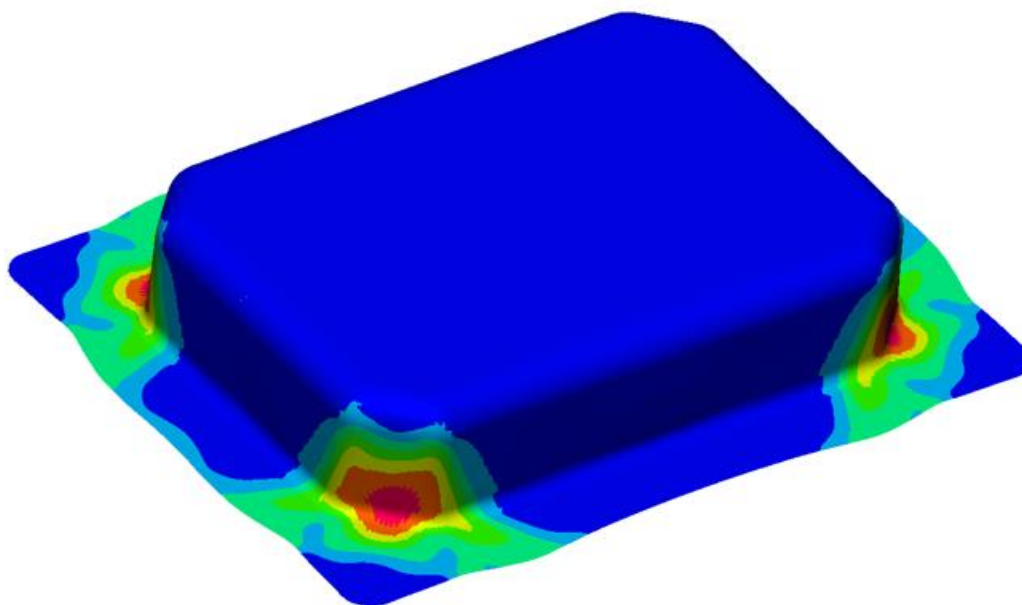
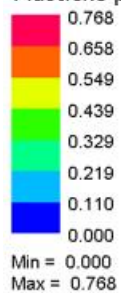
Tloušťka

Min = 0.859
Max = 1.104

Výsledky z numerické simulace s ideálním tvarem přístřihu

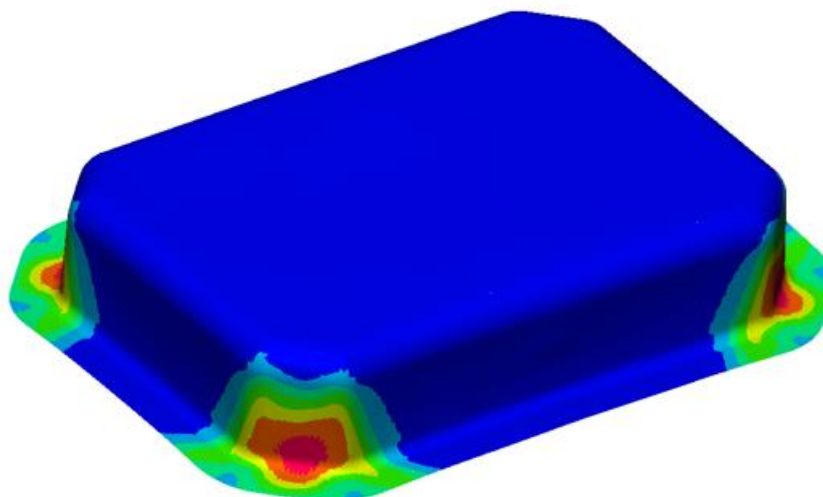
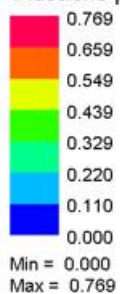
Plastické přetvoření na výtažku před ostřížením.

Plastické přetvoření (membránové)



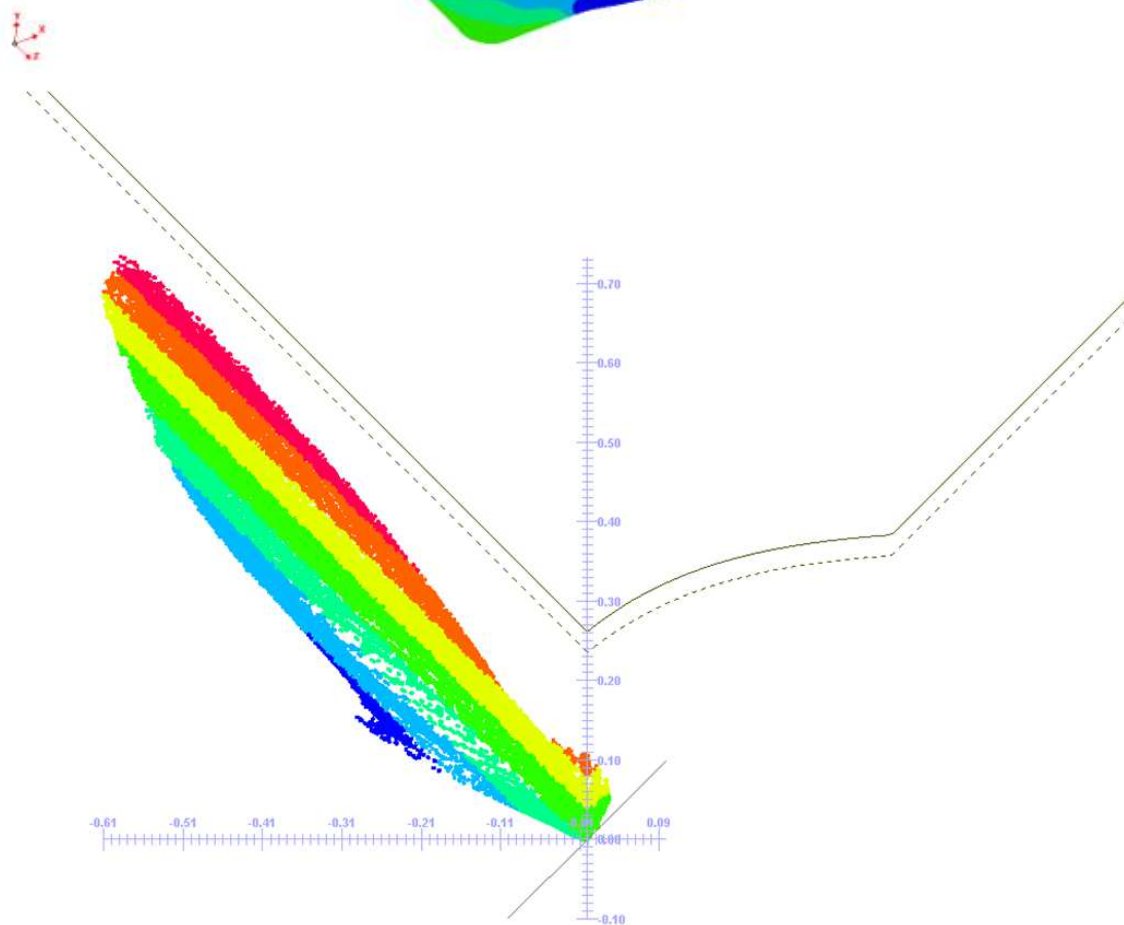
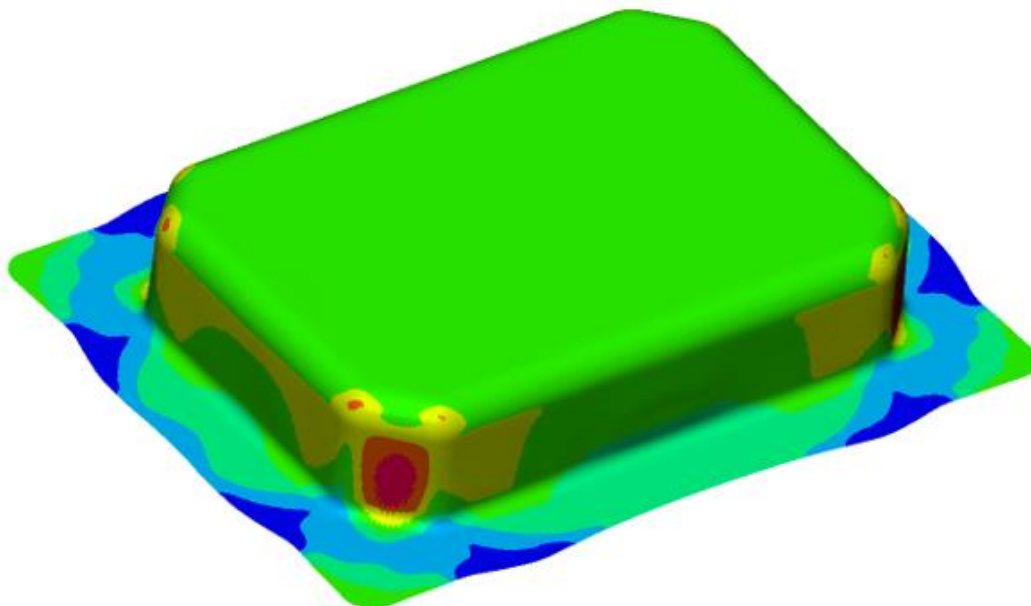
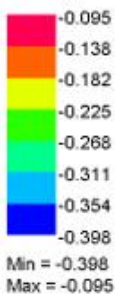
Plastické přetvoření na výtažku po ostřížení.

Plastické přetvoření (membránové)



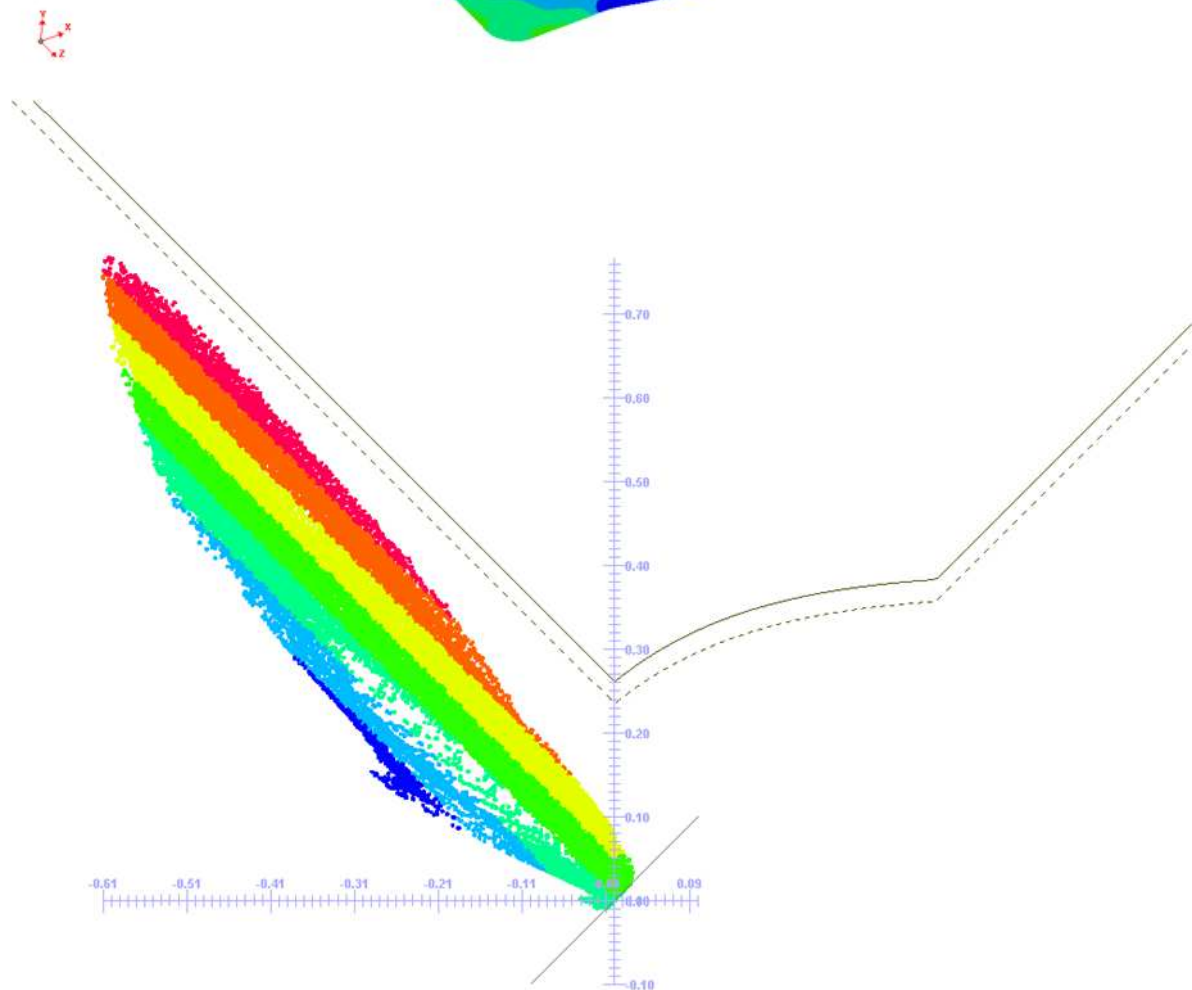
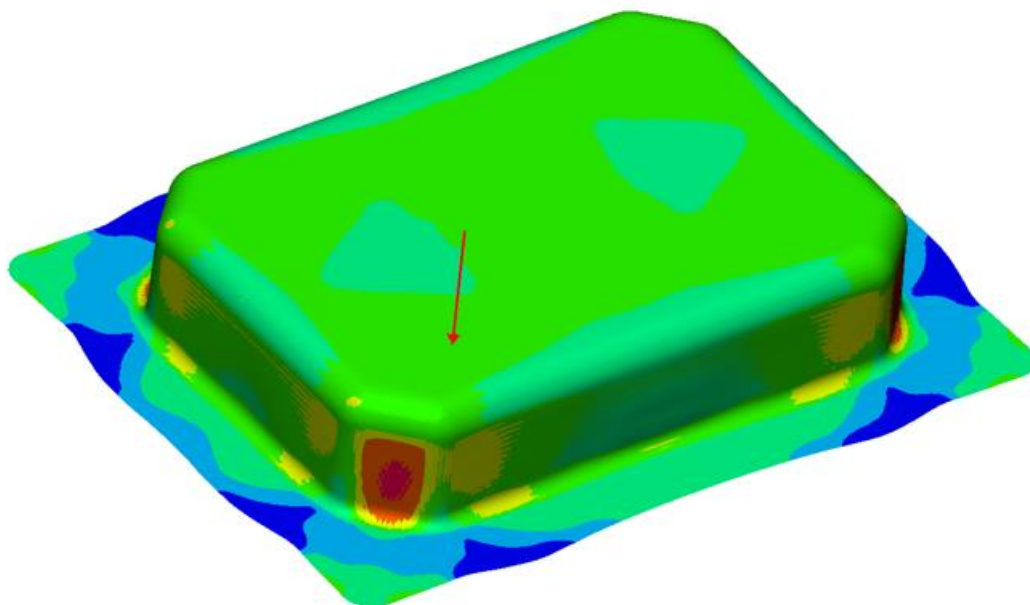
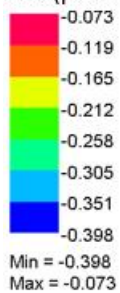
Výsledky z numerické simulace s ideálním tvarem přístřihu
FLD pro střední vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – střední vrstva



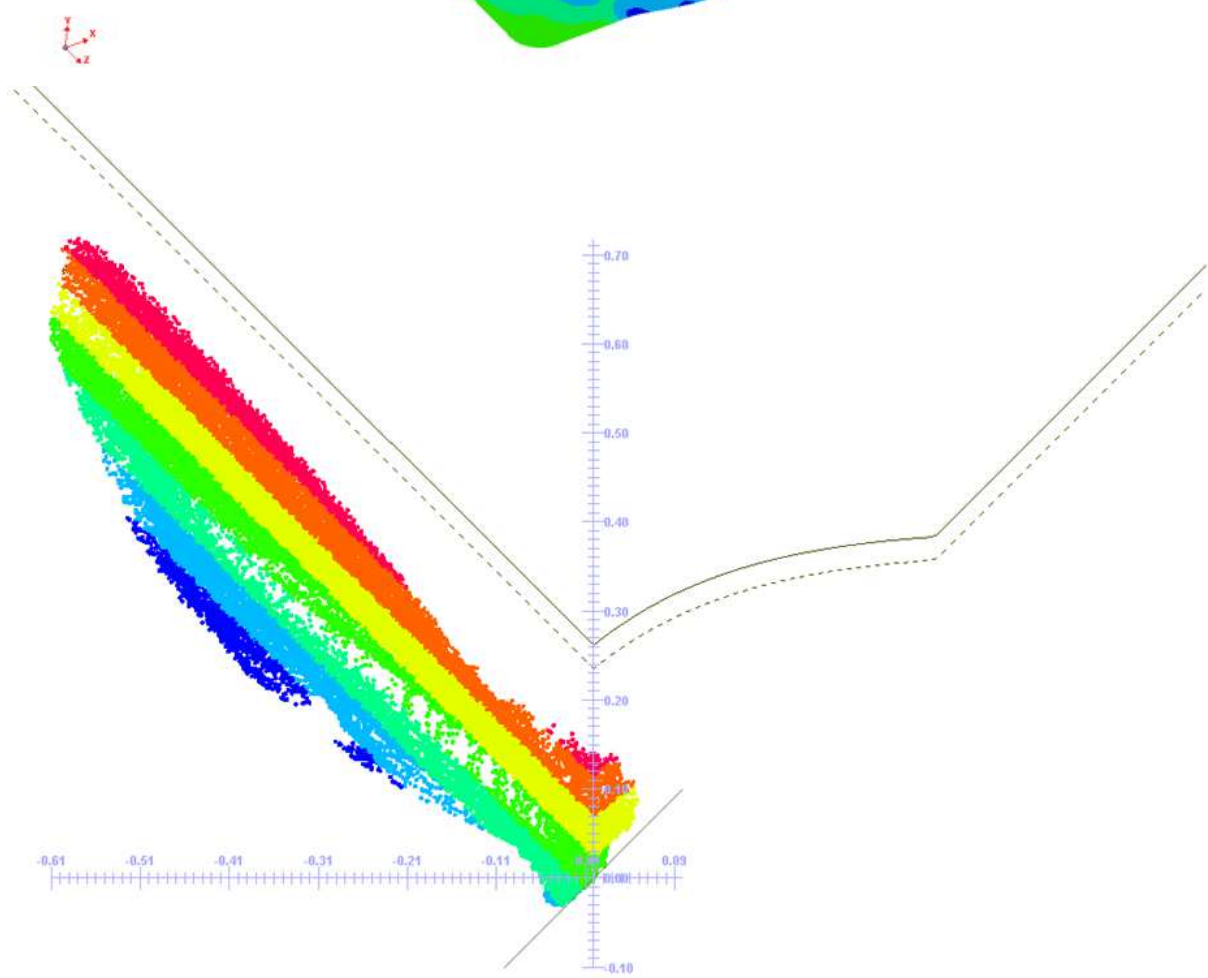
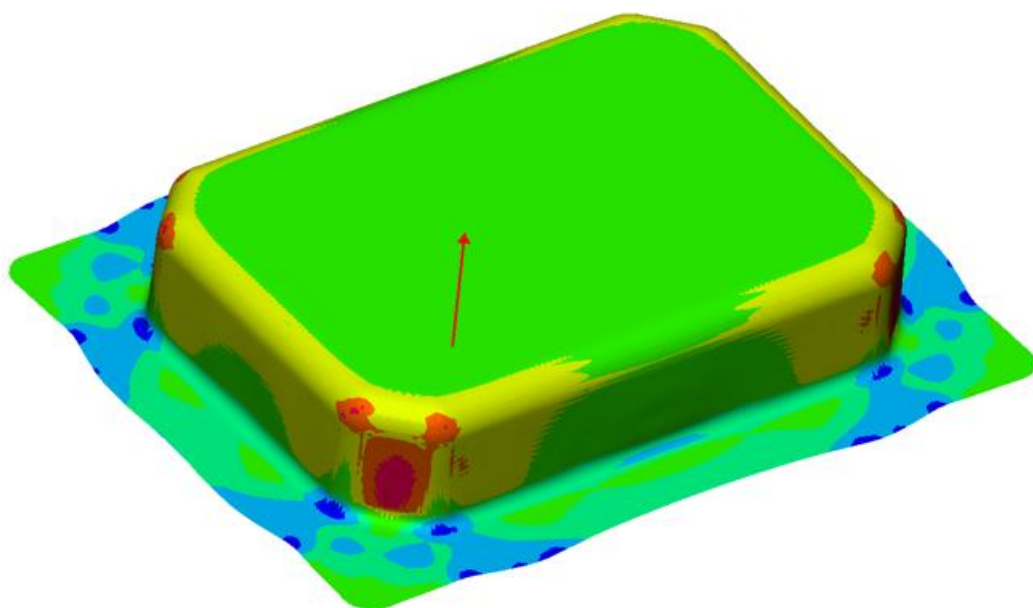
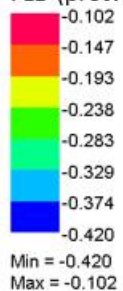
Výsledky z numerické simulace s ideálním tvarem přístřihu
FLD pro horní vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – horní vrstva



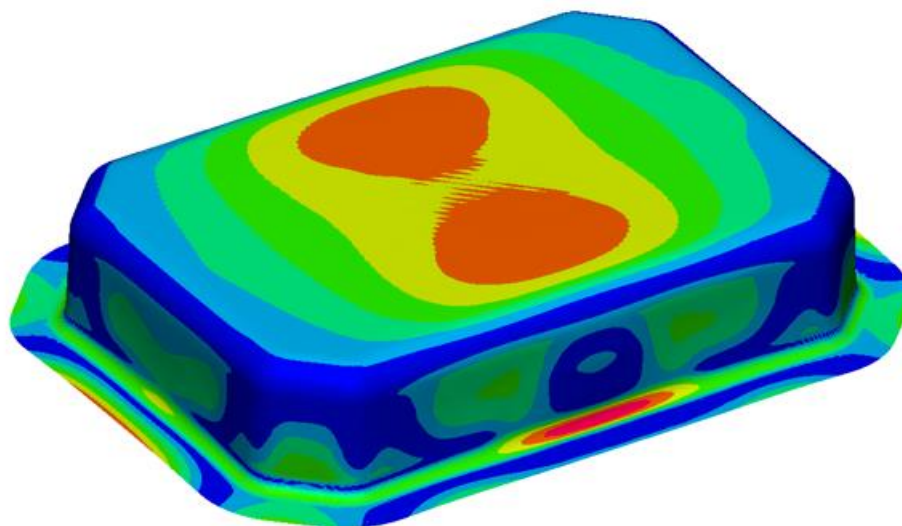
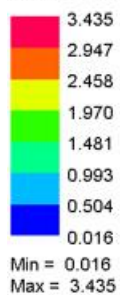
Výsledky z numerické simulace s ideálním tvarem přístřihu
FLD pro spodní vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – spodní vrstva

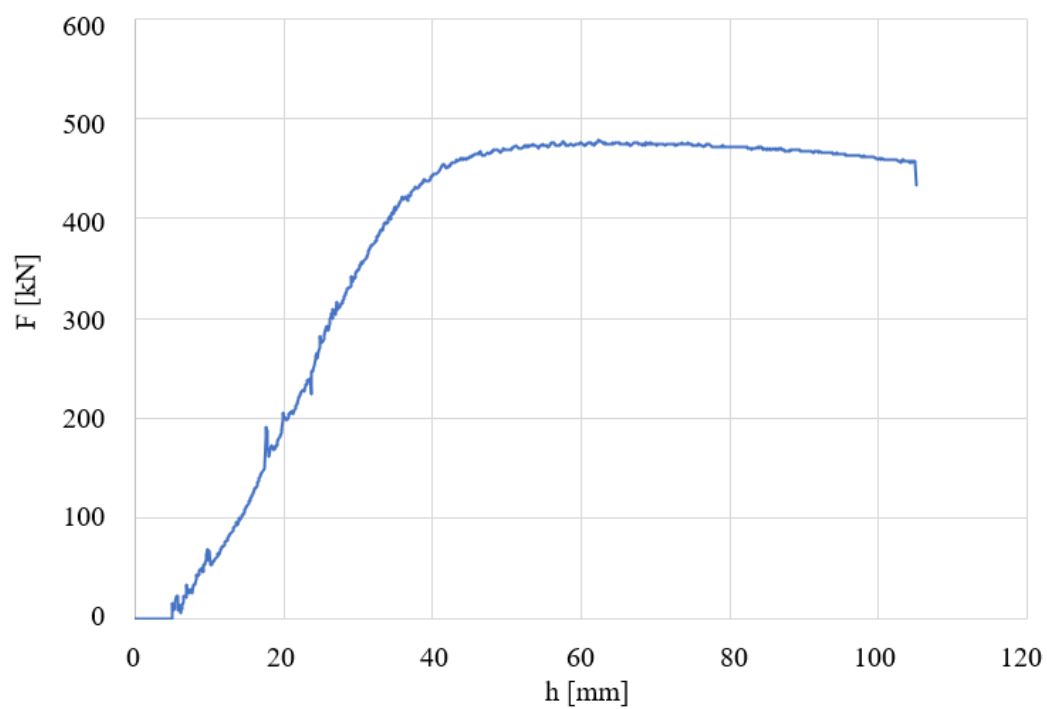


Výsledky z numerické simulace s ideálním tvarem přístřihu
Porovnání vytaženého tvaru s navrhnutým, odchylky v mm.

Vzdálenost mezi objekty

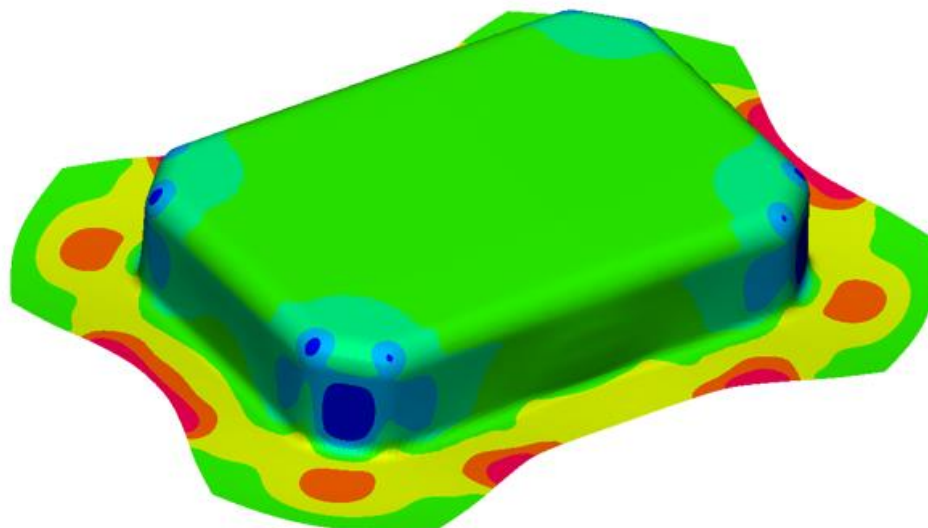
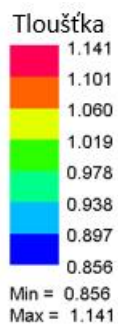


Průběh síly

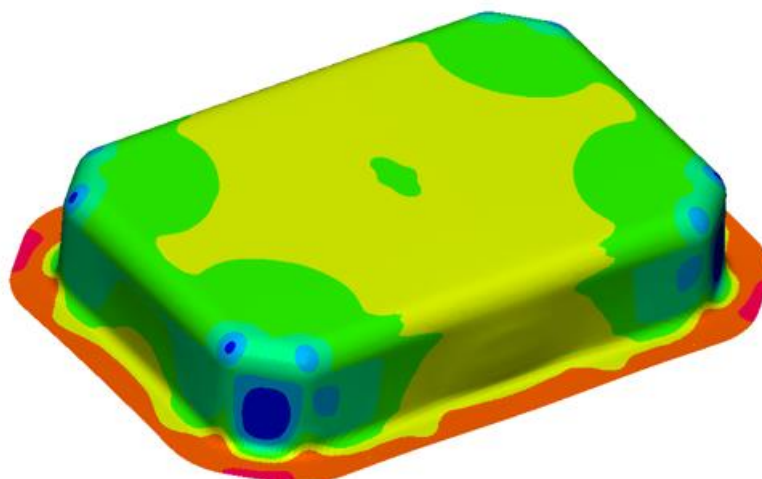


Výsledky z numerické simulace se zjednodušeným tvarem přístřihu

Tloušťka stěny na výtažku před ostřížením v mm.

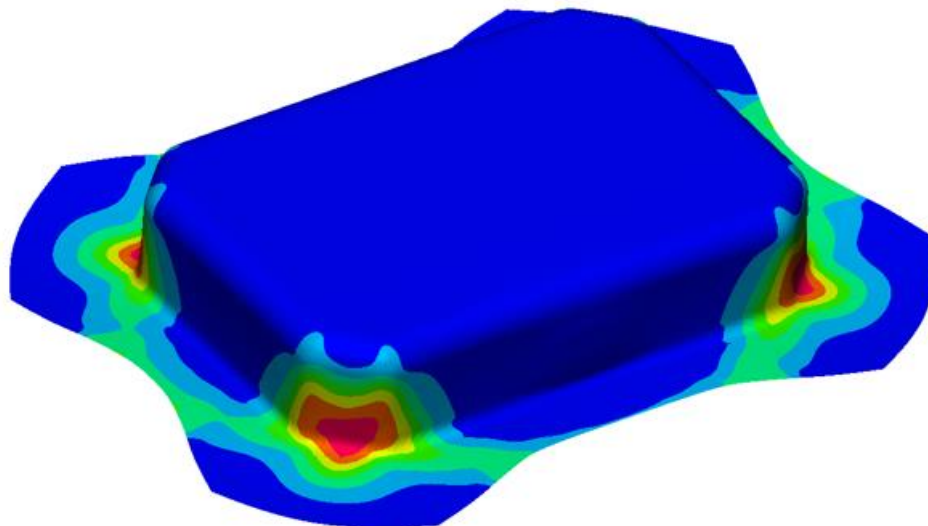
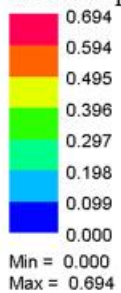


Tloušťka stěny na výtažku po ostřížení v mm.



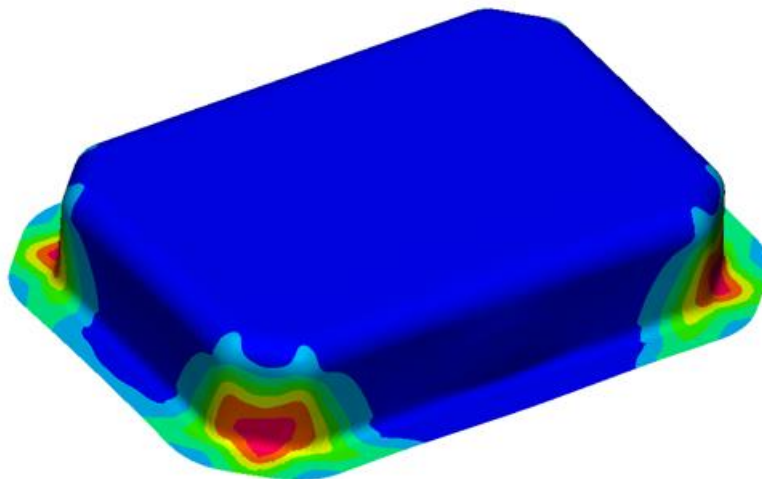
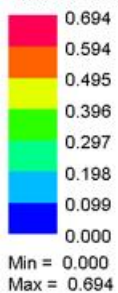
Výsledky z numerické simulace se zjednodušeným tvarem přístřihu
Plastické přetvoření na výtažku před ostřížením.

Plastické přetvoření (membránové)



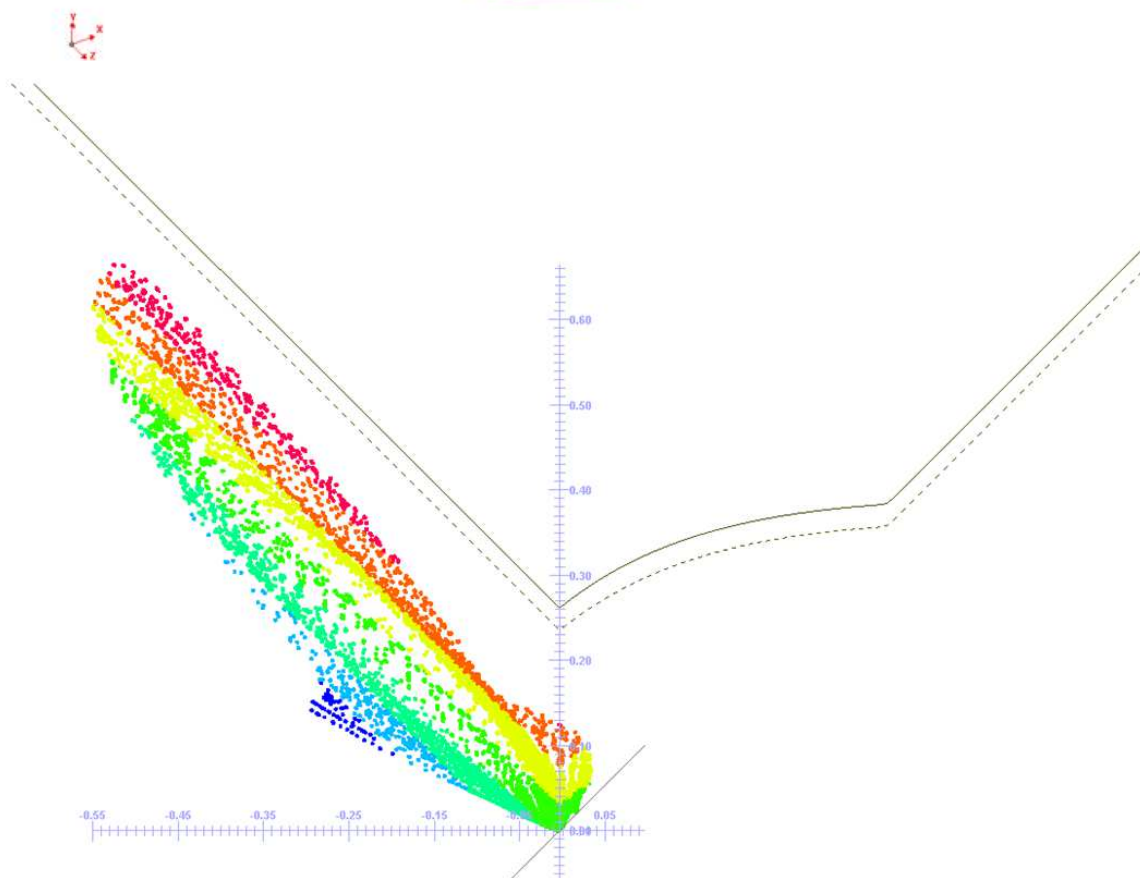
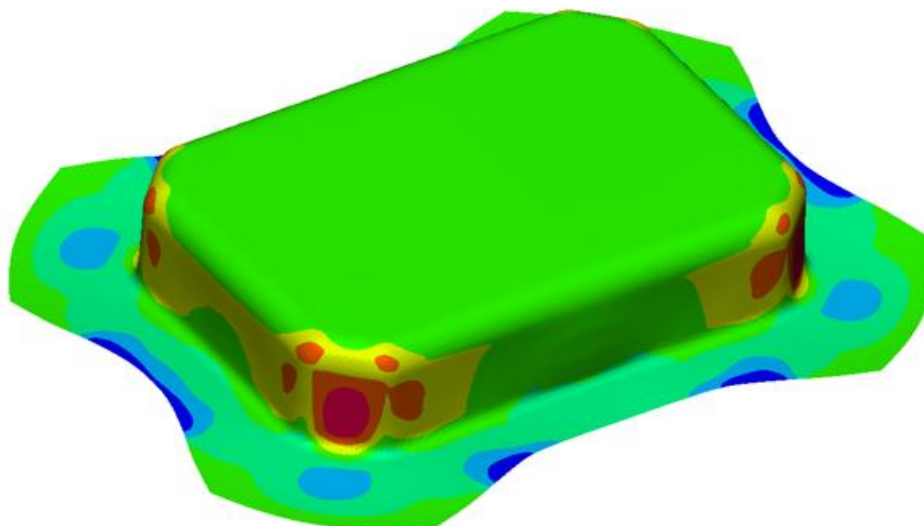
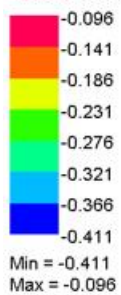
Plastické přetvoření na výtažku po ostřížení.

Plastické přetvoření (membránové)



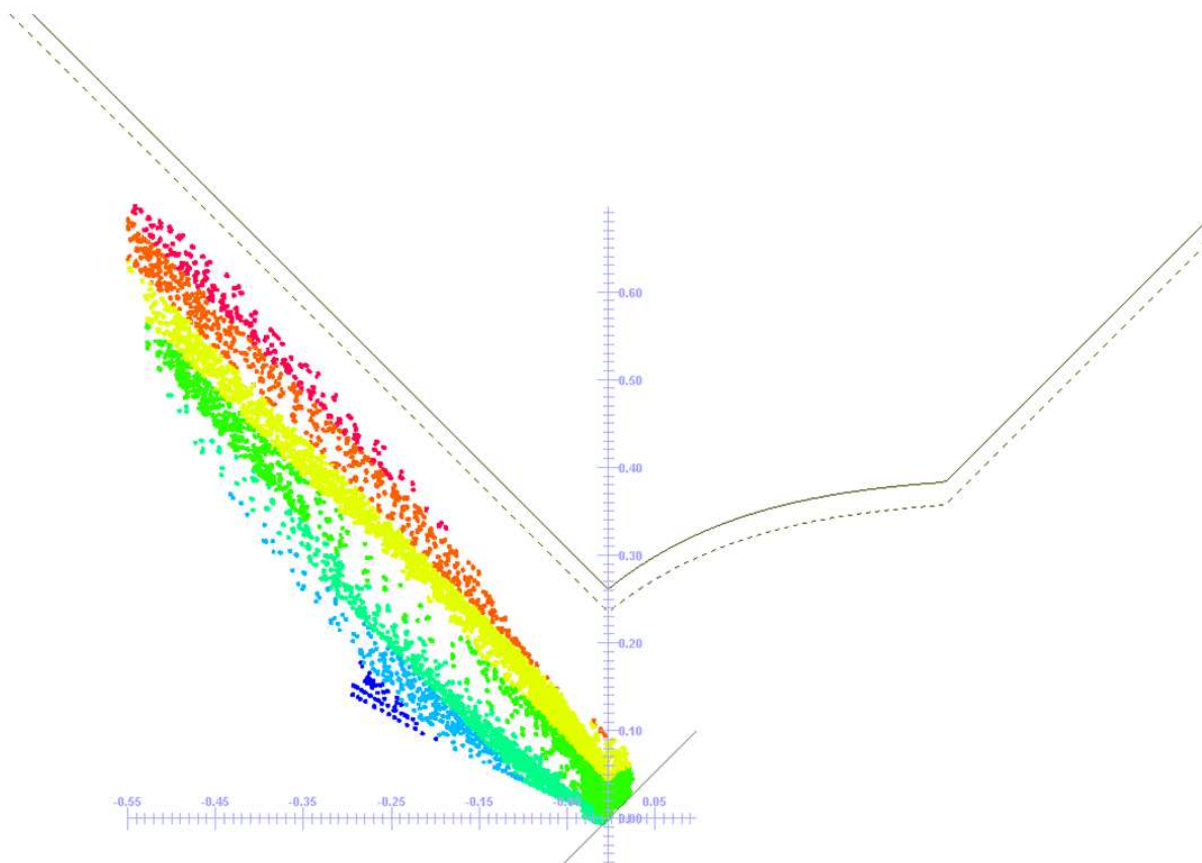
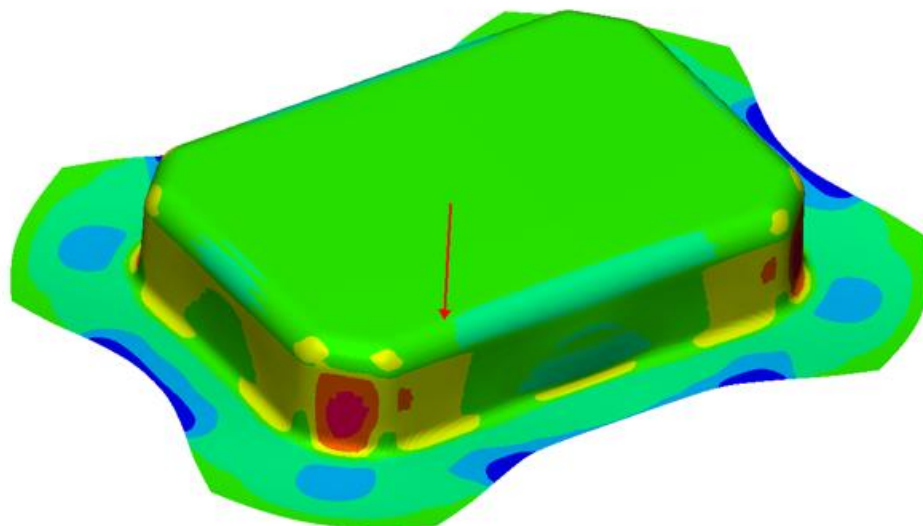
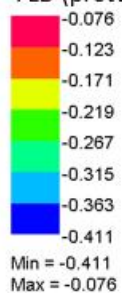
Výsledky z numerické simulace se zjednodušeným tvarem přístřihu
FLD pro střední vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – střední vrstva



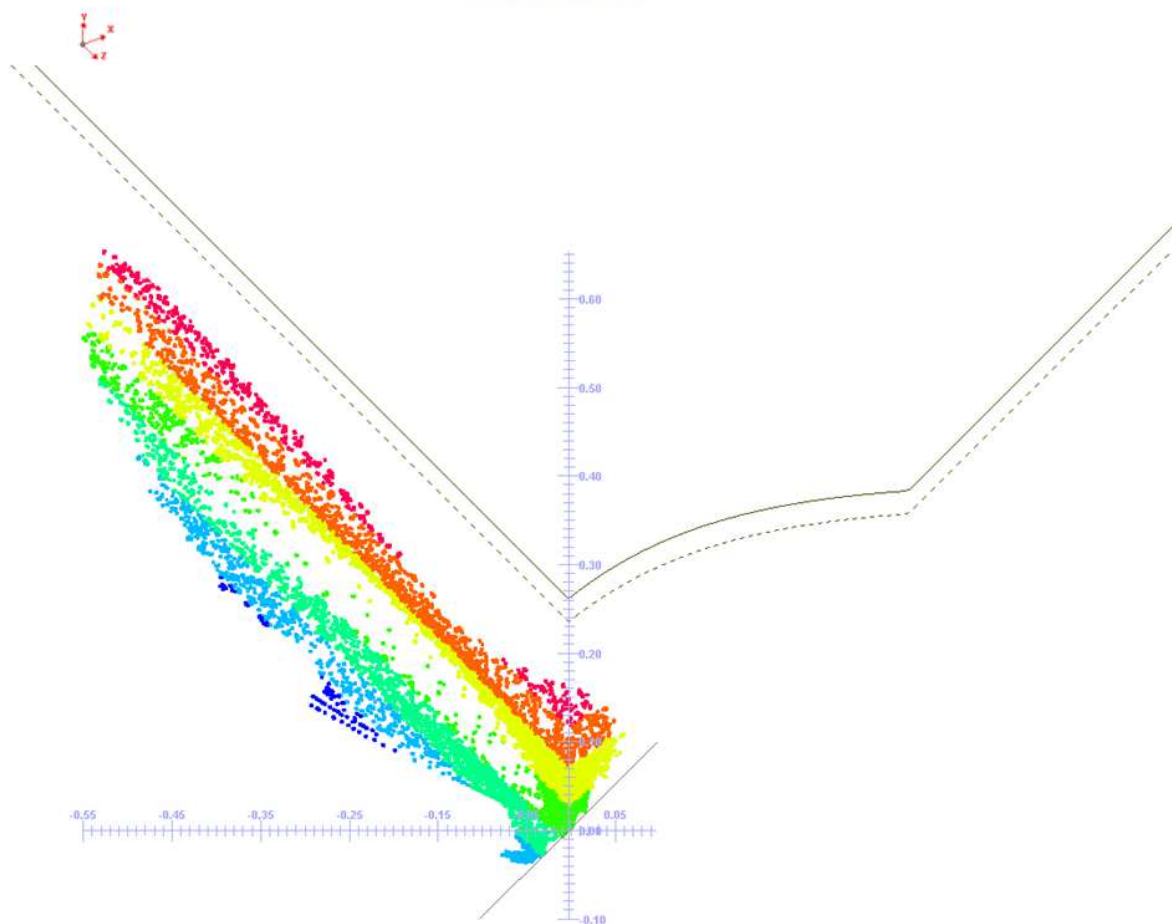
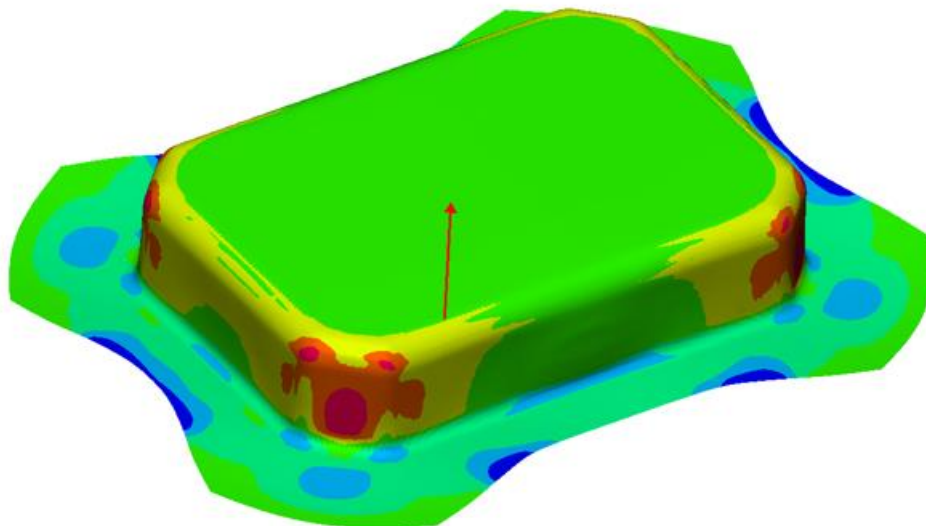
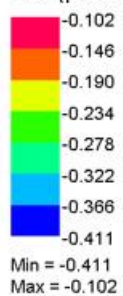
Výsledky z numerické simulace se zjednodušeným tvarem přístřihu
FLD pro horní vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – horní vrstva



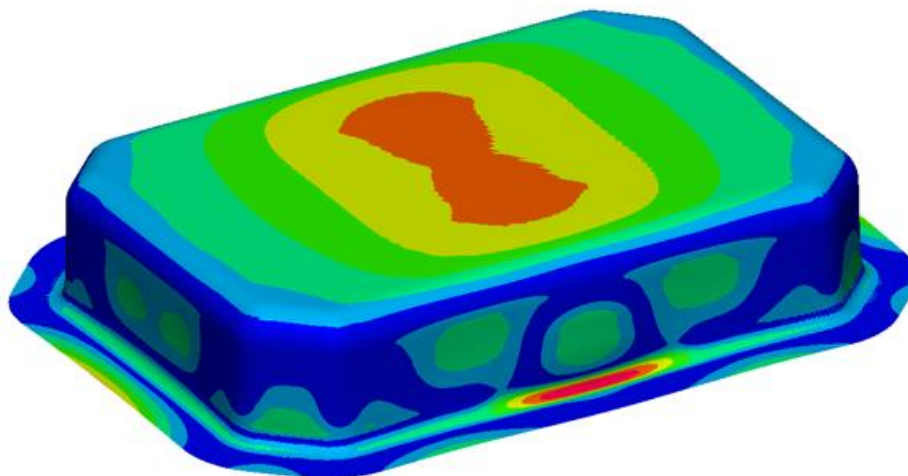
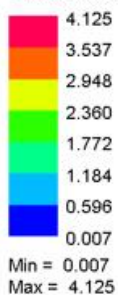
Výsledky z numerické simulace se zjednodušeným tvarem přístřihu
FLD pro spodní vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – spodní vrstva

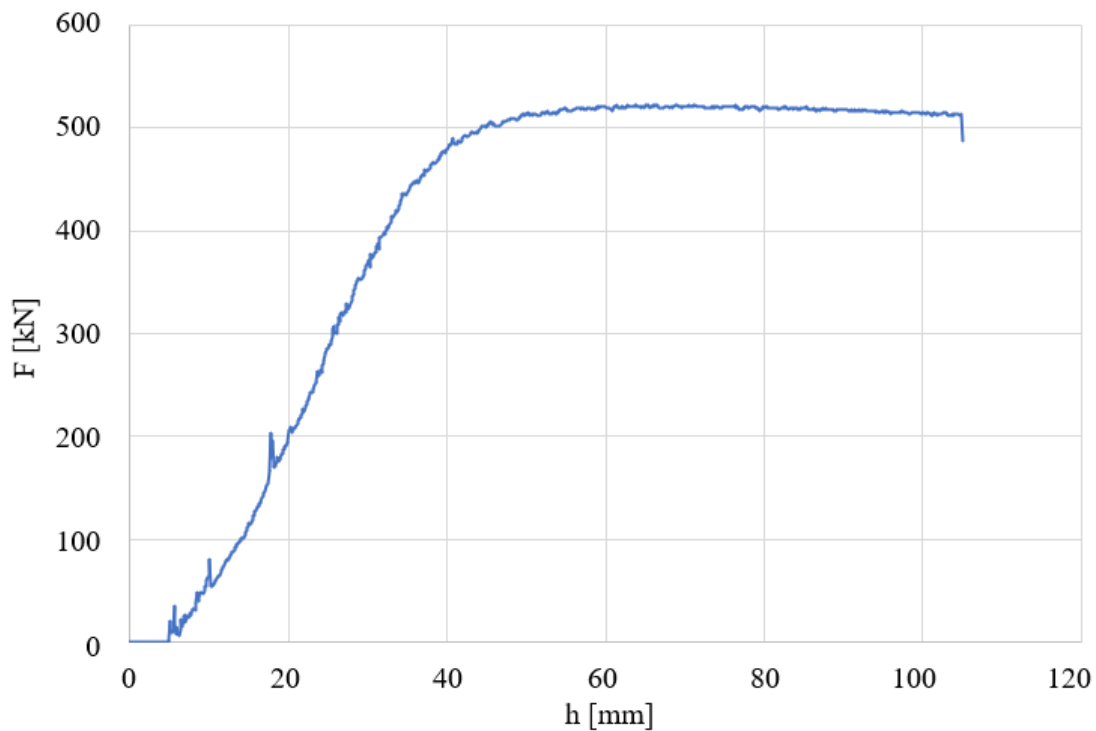


Výsledky z numerické simulace se zjednodušeným tvarem přístřihu
Porovnání vytaženého tvaru s navrhnutým, odchylky v mm.

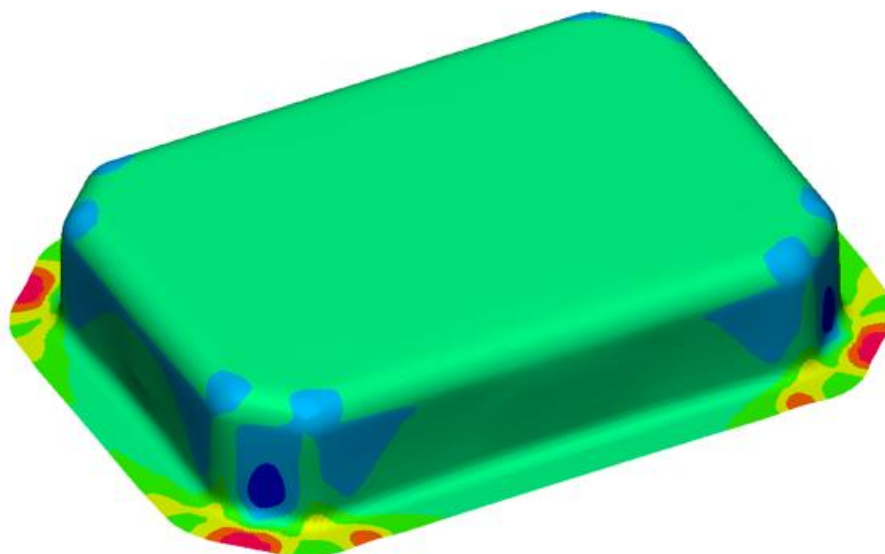
Vzdálenost mezi objekty



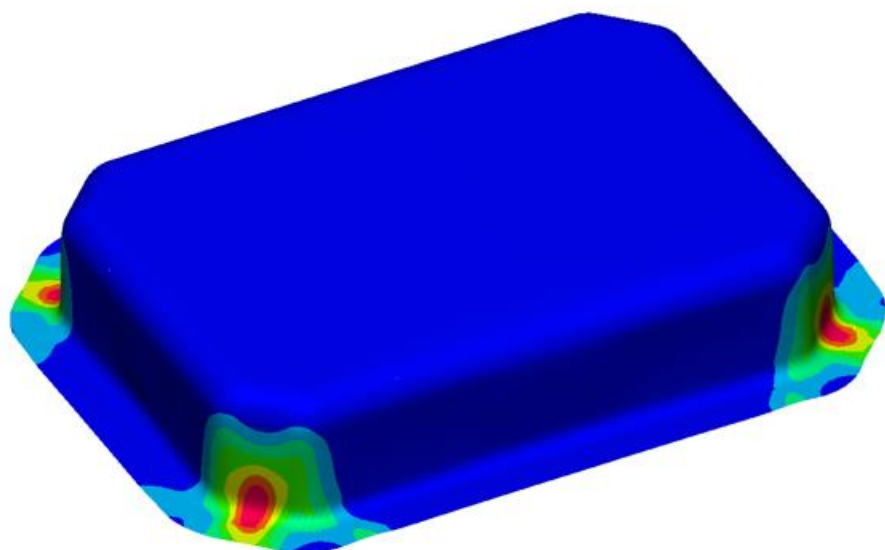
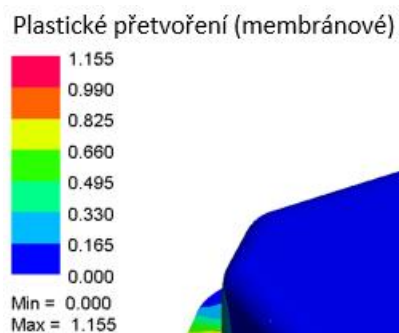

Průběh síly



Výsledky z numerické simulace s programem vypočítaným tvarem přístřihu
Tloušťka stěny na výtažku v mm.

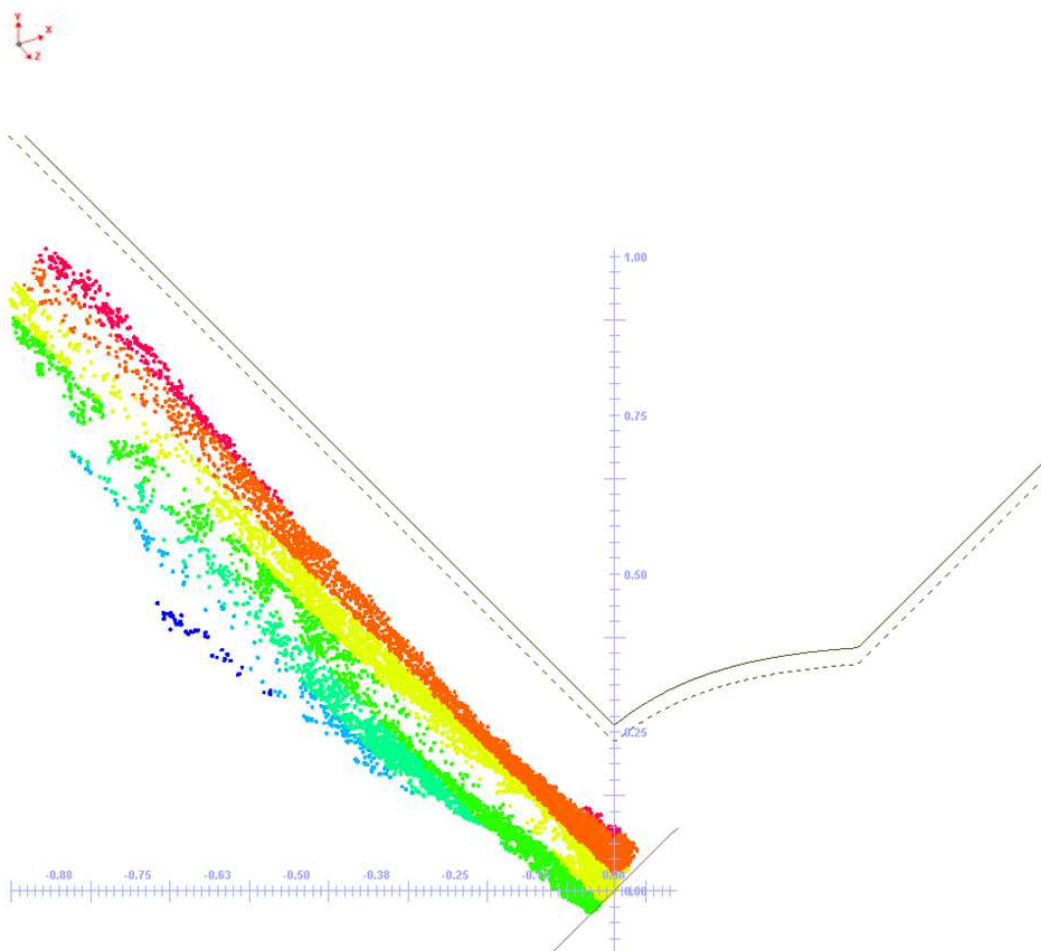
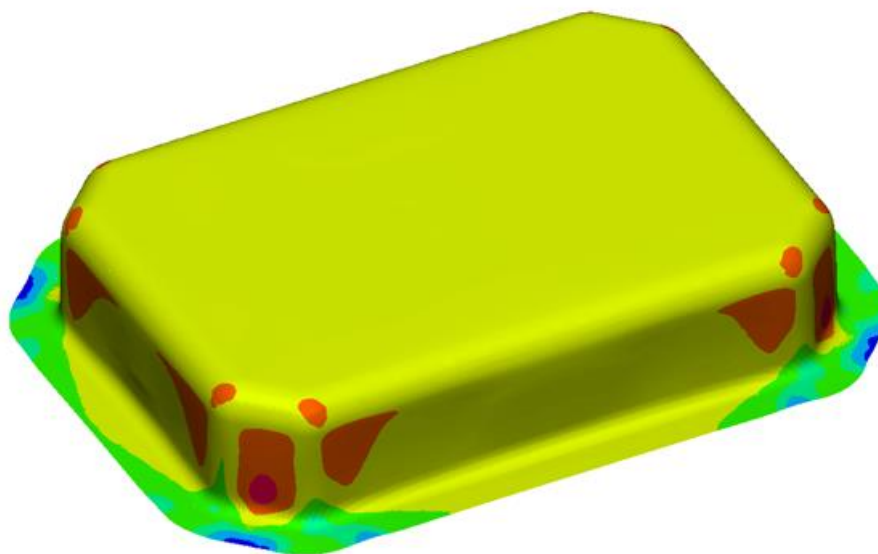
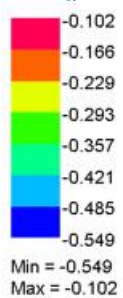


Plastické přetvoření na výtažku.



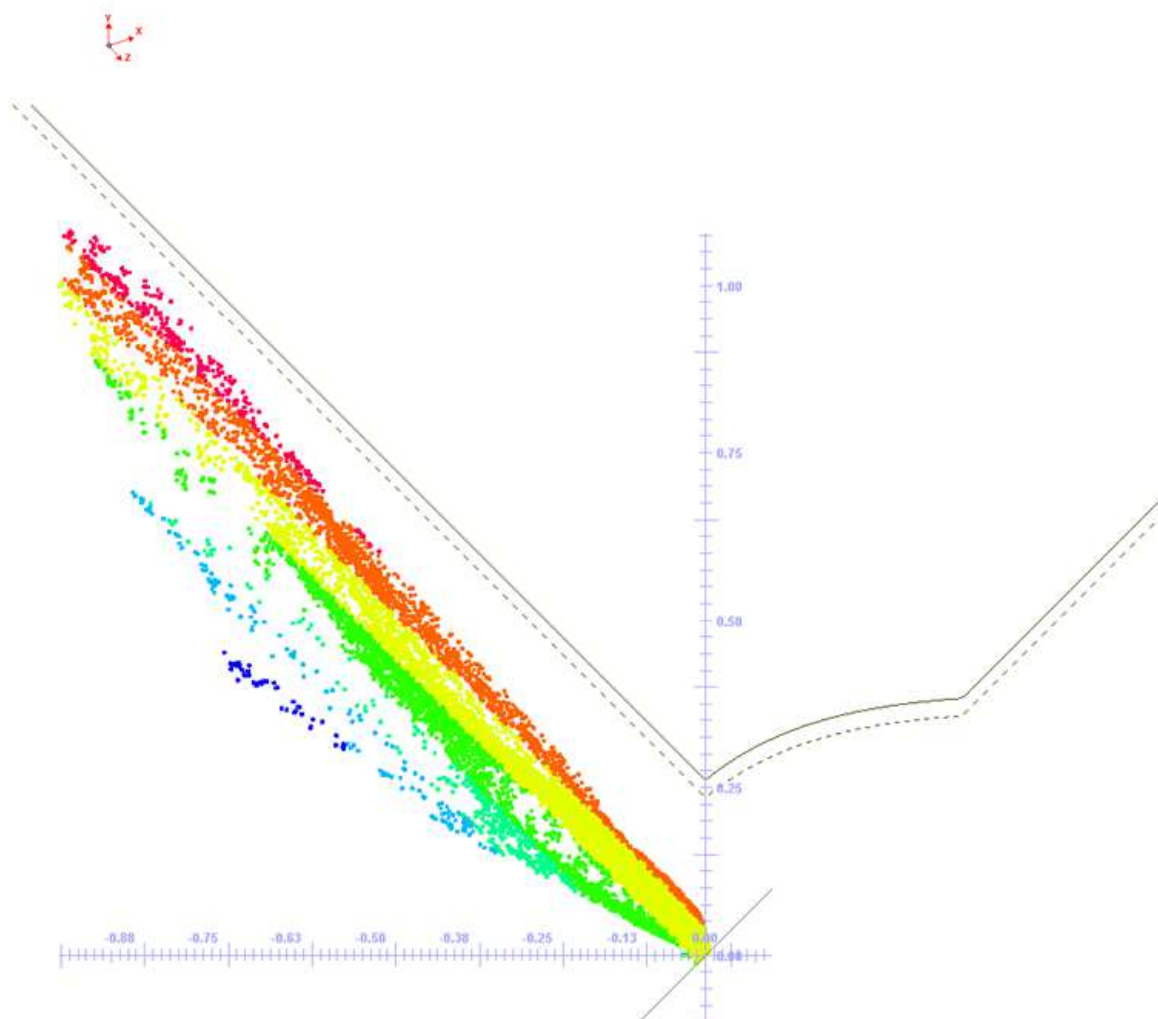
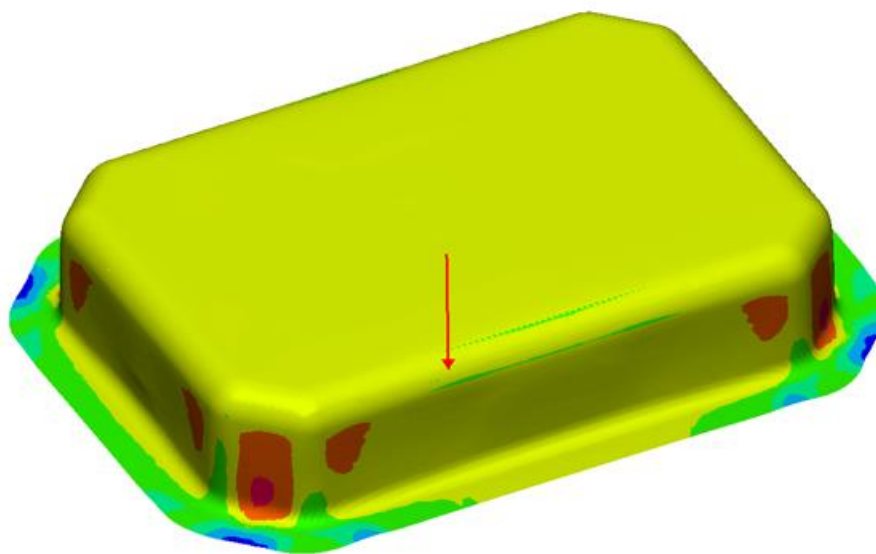
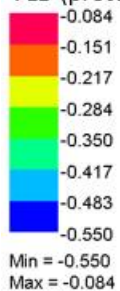
Výsledky z numerické simulace s programem vypočítaným tvarem přístřihu FLD pro střední vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – střední vrstva

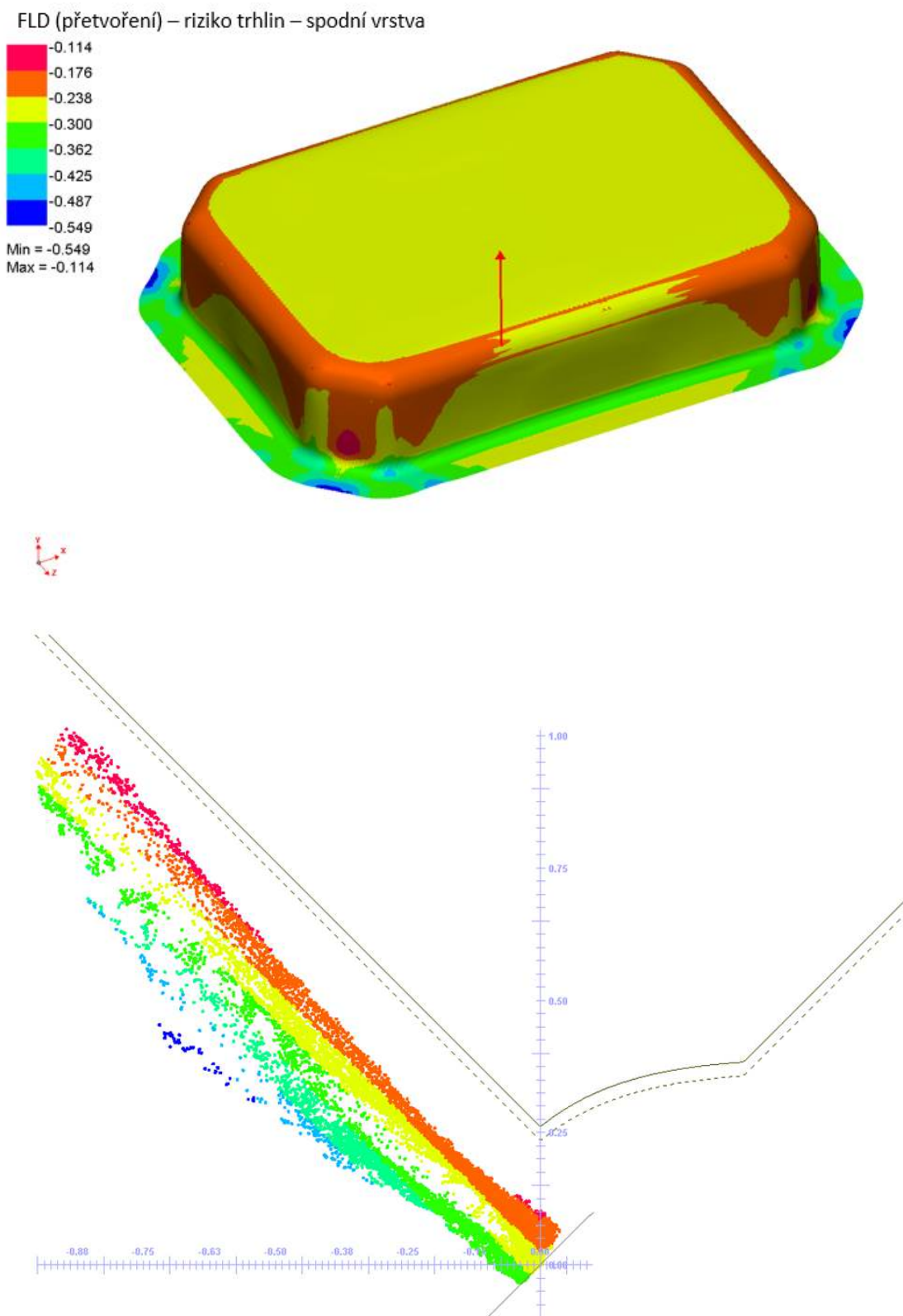


Výsledky z numerické simulace s programem vypočítaným tvarem přístřihu FLD pro horní vrstvu.

FLD (přetvoření) – riziko trhlin – horní vrstva

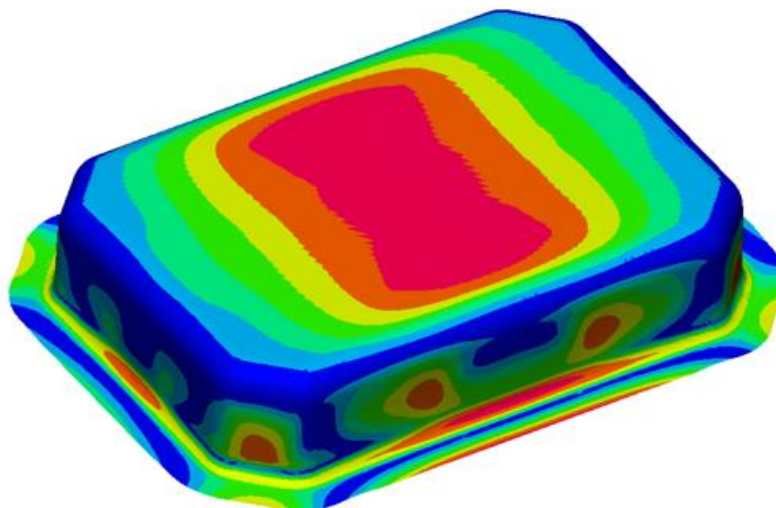
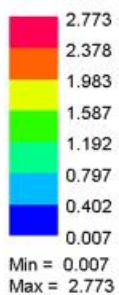


Výsledky z numerické simulace s programem vypočítaným tvarem přístřihu FLD pro spodní vrstvu.

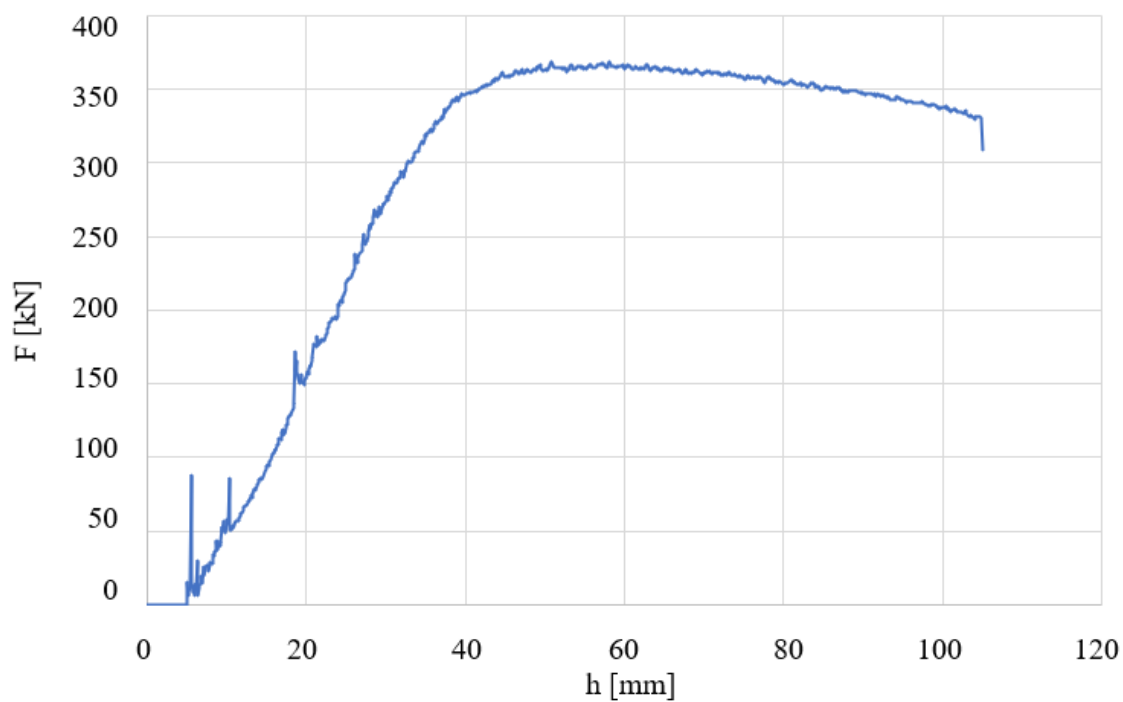


Výsledky z numerické simulace s programem vypočítaným tvarem přístřihu
Porovnání vytaženého tvaru s navrhnutým, odchylky v mm.

Vzdálenost mezi objekty

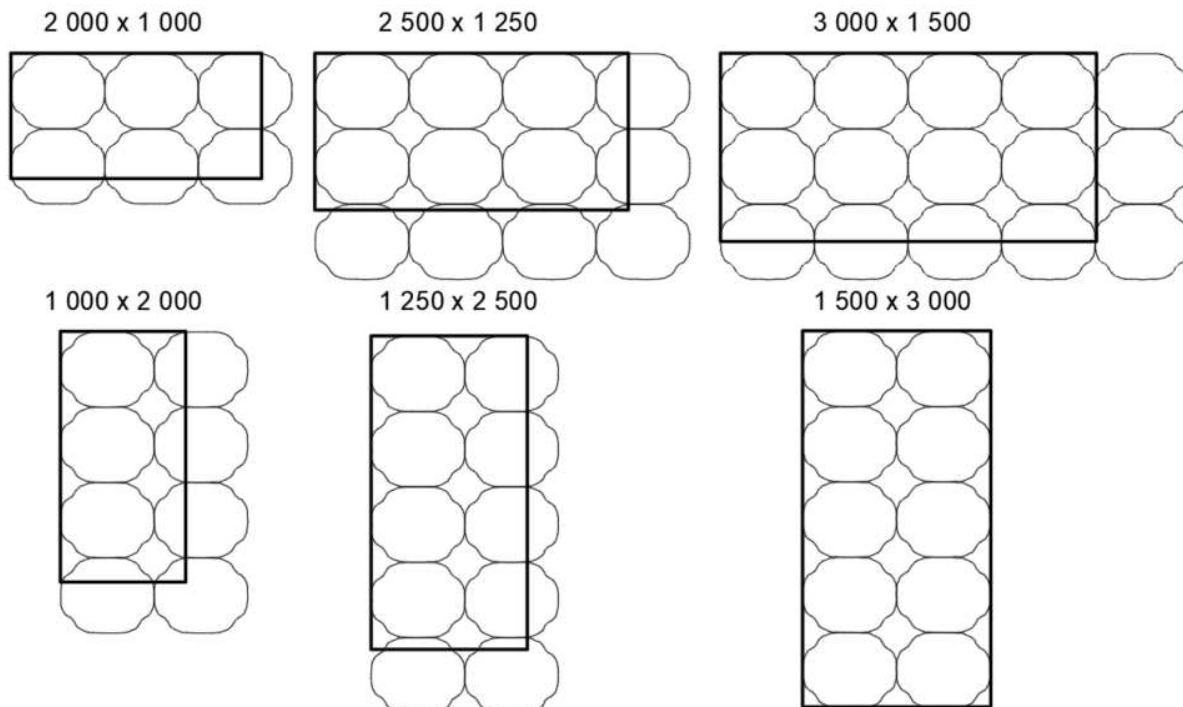


Průběh síly

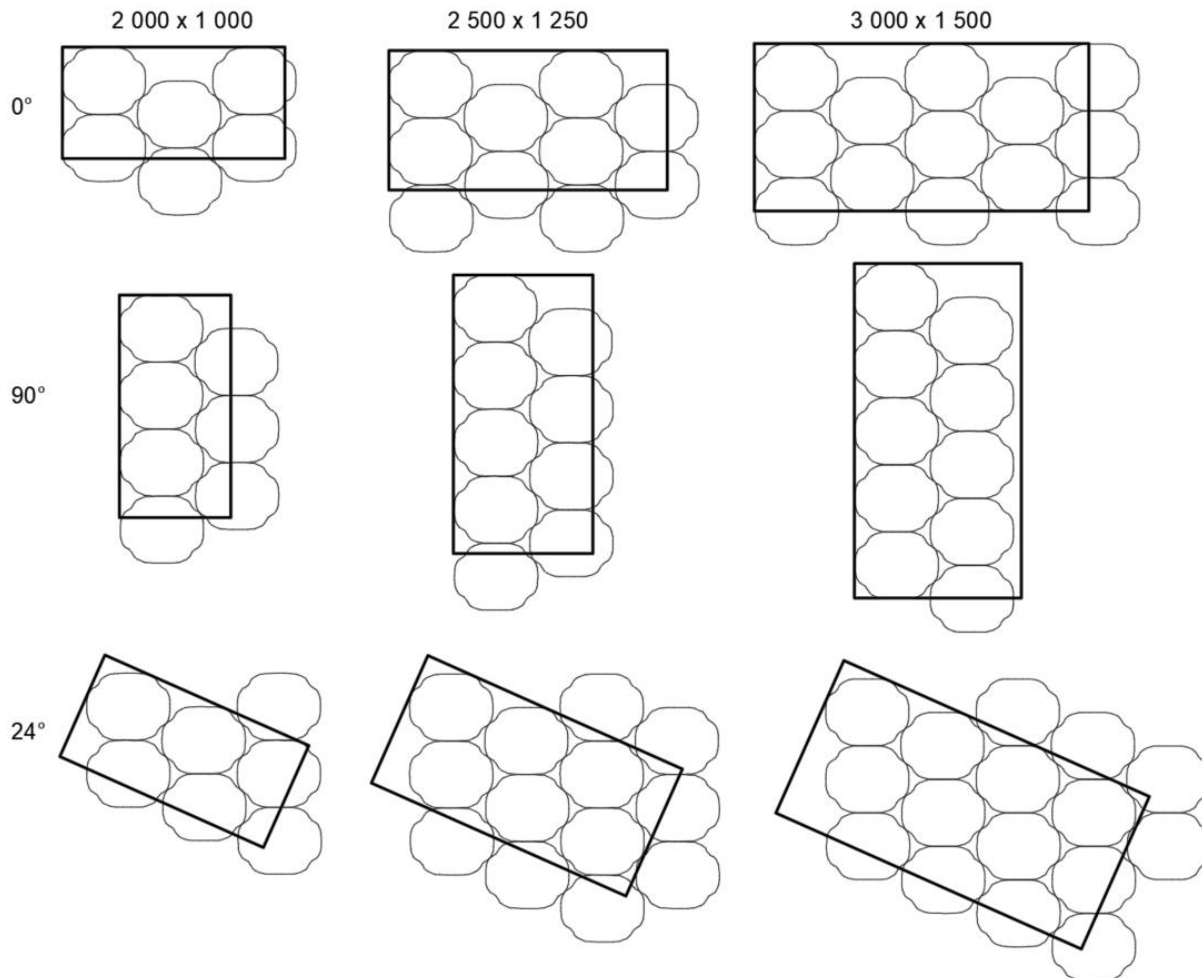


Rozložení výpalků na tabuli plechu

Rozvržení 1



Rozvržení 2



Příloha 4
Rozložení výpalků na tabuli plechu
Rozvržení 3

