VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SOUČÁSTI KLEC ECR 10 12
PRODUCTION OF COMPONENT THE CAGE ECR 10 12

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Josef Jílek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Ladislav Žák, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Josef Jílek**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Ladislav Žák, Ph.D.**
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba součásti Klec ECR 10 12

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem zadání bude zpracovat možnosti výroby zadané součásti, navrhnout technologii výroby a vypracovat konstrukční řešení postupového nástroje.

Cíle diplomové práce:

– Zhodnocení technologičnosti výroby součásti
– Literární studie vhodných technologií
– Vypracování technologického postupu výroby na základě potřebných výpočtů
– Konstrukční řešení nástroje
– Ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. Technológia tvárnenia, 1. vyd. Bratislava: Edícia vysokoškolských učebníc, 2010. 245 s. ISBN 978-80-227-3242-0.

BOLJANOVIC, Vukota. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. U.S. (USA) : Industrial Press Inc., 2005. ISBN 9780831132590.

BIRZER, Franz. Forming and fineblanking : cost-effective manufacture of accurate sheetmetal parts. 1st edition. Landsberg/Lech : Verl. Moderne Industrie, 1997. ISBN 3-478-93161-4.

DILLINGER, Josef, et al. Moderní strojírenství pro školu i praxi. Z něm. orig. Fachkunde Metall přeložil Jiří Handlíř. 55. vyd. Praha : Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-72-1-579-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

JÍLEK Josef: Výroba součásti Klec ECR 10 12.

Práce se zabývá návrhem technologie výroby součásti Klec ECR 10 12, která společně s maticí slouží jako montážní prvek při výrobě autobusů. Navržený plechový dílec z oceli 11 321 tloušťky 1,5 mm je vyráběn v roční sérii 10 000 ks. Pro výrobu součásti byla na základě literární studie navržena technologie výroby ve sdruženém postupovém nástroji, který v sobě kombinuje stříhání a ohýbání. Na základě technologických výpočtů byl navržen nástroj a podle celkové tvářecí síly zvolen stroj. Jako tvářecí stroj pro upnutí nástroje byl zvolen výstředníkový lis LEN 63 C se jmenovitou silou 630 kN.

Klíčová slova: Ocel 11 321, stříhání, ohýbání, plošné tváření, postupový nástroj

ABSTRACT

JÍLEK Josef: Production of component the Cage ECR 10 12.

The thesis focuses on the production concept of component Cage ECR 10 12, which is used as assembly element together with a nut during the bus production. Sheet metal part is made from 11 321 steel 1,5 mm thick in production 10 000 parts per year. Technology of production in progressive tool was selected based on literature study. Progressive tool combines technology of shearing and bending. Tool was designed after the technological calculations. Forming machine was selected after the stamping force calculation. Eccentric press LEN 63 C with 630 kN forming force was selected for production.

Keywords: 11 321 steel, shearing, bending, sheet metal forming, progressive tool

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JÍLEK, Josef. *Výroba součásti Klec ECR 10 12*. Brno, 2019. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117510. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ladislav Žák

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24.5.2019

……
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Ladislavu Žákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Také děkuji panu Ing. Jiřímu Kutlvašrovi a zaměstnancům společnosti ECOS Choceň s.r.o. za poskytnutí zadání diplomové práce. Také děkuji svojí rodině za podporu během studia.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah
ÚVOD **9**
1 ROZBOR ZADÁNÍ **10**
1.1 Výrobní možnosti 11
2 TECHNOLOGIE STŘÍHÁNÍ A OHÝBÁNÍ **14**
2.1 Technologie stříhání 14
2.1.1 Střižná vůle a plocha 15
2.1.2 Střižné síly 17
2.1.3 Technologičnost výstřižku 19
2.1.4 Střižné nástroje 22
2.2 Technologie ohýbání 25
2.2.1 Průběh ohýbání 25
2.2.2 Rozvinutý tvar polotovaru 26
2.2.3 Ohýbací síla a práce 29
2.2.4 Ohýbací nástroje a technologičnost 30
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY **33**
3.1 Rozvinutý tvar součásti 34
3.2 Rozložení na pásu 35
3.3 Rozvržení operací 40
3.4 Technologické výpočty 43
3.4.1 Střižná část 43
3.4.2 Ohybová část 47
3.4.3 Těžiště sil 49
3.5 Návrh nástroje 51
3.5.1 Spodní polovina nástroje 51
3.5.2 Horní polovina nástroje 53
3.5.3 Tvářecí stroj 55
3.6 Tahová zkouška 51
4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ **57**
5 ZÁVĚRY **60**
Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam příloh
Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6]

Většinu průmyslových produktů lze zařadit podle způsobu výroby do jedné z následujících skupin strojírenských technologií. Jsou to technologie tváření, obrábění, svařování a odlévání. V případě výrobků z různých kovových materiálů je technologie tváření vyzdvihována především z důvodu vysokého procenta využití materiálu. Často se však ve výrobě využívá kombinace více technologií společně. Jako příklad bych uvedl výrobu tvářecích nástrojů, které by bylo bez obrábění jen velmi obtížné vyrobit v požadované přesnosti, kvalitě a s rozumnými náklady.

Výhodou tváření je skutečnost, že při výrobě vzniká často jen velmi malé procento odpadu. Pořizovací cena nástrojů je vyšší a promítá se tak do ceny každého kusu. Proto se tváření uplatňuje především při velkosériové výrobě, kdy vznikají až stovky tisíc kusů ročně. Trendem je tedy snižování výrobních časů a zvyšování procenta využitého materiálu.

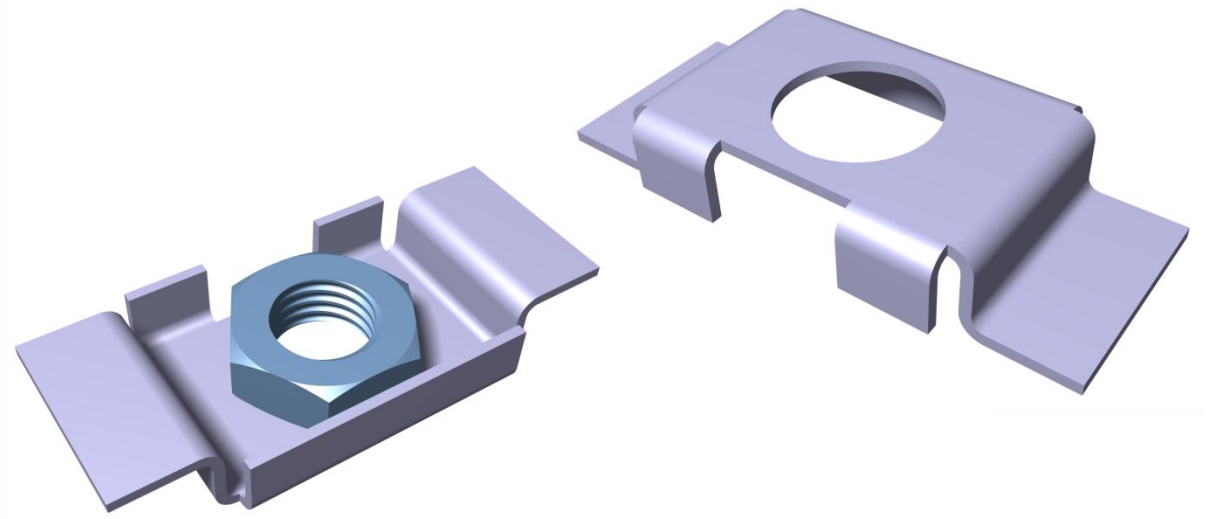
Při tváření působí nástroj na materiál s cílem dosažení jeho plastického přetvoření. Pokud nastává přetvoření v celém objemu materiálu ve třech hlavních směrech, pak hovoříme o objemovém tváření (pěchování, protlačování). Přetváří-li se materiál primárně ve dvou směrech, pak se jedná o plošné tváření (stříhání, ohýbání, tažení). Objemové tváření se provádí často za zvýšených teplot. Plošné tváření naopak probíhá nejčastěji za studena.

Výstupem tvářecích operací je velké spektrum výrobků (obr. 1).

Obr. 1 Výrobky vzniklé tvářením [7], [8], [9]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [10]

Předmětem řešení je součást Klec ECR 10 12 (obr. 2). Jedná se o ohýbaný plechový dílec pravoúhlého tvaru s otvorem o průměru 20 mm. Po navaření k rámové konstrukci slouží klec k vymezení polohy šestihranné nízké matice M16 podle ČSN EN ISO 4035. Klece s maticemi tvoří montážní body tam, kde je potřebné pevně uchytit matici k rámu při zachování určité vůle. Matice s klecí se využívá při montáži rozměrných svařovaných konstrukcí, kde je obtížné zajistit přesnost spasování. Matice se může v kleci pohybovat s určitou vůlí a lze tedy kompenzovat výrobní nepřesnosti, které vznikají při svařování.



Obr. 2 Klec ECR 10 12

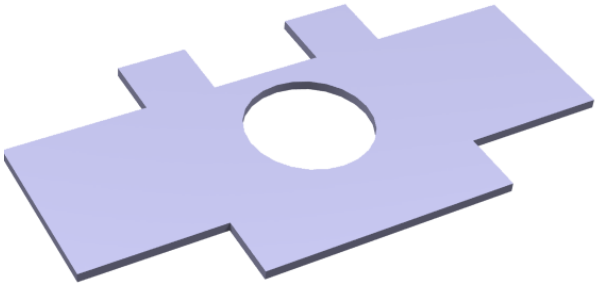
Klec se v současnosti vyrábí z ocelového plechu DC 01 (11 321) jejíž vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1. Jedná se o nelegovanou jakostní ocel vhodnou ke tváření za studena se zaručenou svařitelností. Vzhledem k mechanickým vlastnostem materiálu není potřeba hledat alternativu, jelikož současný materiál splňuje veškeré požadavky. Povrchová úprava není prováděna bezprostředně po výrobě součásti, protože dílec se dále připevňuje ke konstrukci svarem. Klece s maticemi jsou na vhodných místech svařeny s konstrukcí z ocelových profilů, která je dodávána výrobci autobusů Iveco. V závodě Iveco Bus se smontuje skelet autobusu, který pak obdrží povrchovou úpravu jako celek. Před lakováním odstínu dle přání zákazníka se celá konstrukce smáčí v kataforetické lázni.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu

Materiál	dle EN(DC01)	dle ČSN(11 321)	dle DIN(HX340LAD)	
Mechanické vlastnosti	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	
	340	410	28	
Chemické složení	C_{max} [%]	Mn_{max} [%]	P_{max} [%]	S_{max} [%]
	0,12	0,6	0,045	0,045
	Si_{max} [%]	Al_{min} [%]	Ti_{max} [%]	Nb_{max} [%]
	0,5	0,015	0,15	0,1

1.1 Výrobní možnosti [11], [12], [14], [16], [18], [20]

V prvé řadě je důležité zmínit, že se nejedná o nově navrženou součást, ale o součást již delší dobu vyráběnou. Smysl práce tedy spočívá v nalezení alternativy k současnému postupu výroby. Při prvním pohledu na součást lze usoudit, že vhodnou technologií je právě tváření za studena. Prvním krokem je však zhotovení rozvinutého tvaru součásti (obr. 3). Zde je na výběr hned několik možností v rámci konvenčních i nekonvenčních technologií dělení materiálu. Volba vhodné technologie je omezena především vybaveností podniku. Výroba bude probíhat za pomoci současného strojního vybavení, a proto je vhodné uvažovat s dostupnými možnostmi daného podniku. Nastane-li nutnost použití některé speciální technologie, která není součástí výrobního zařízení podniku, pak je vhodným řešením výroba v kooperaci s jinou firmou. Níže jsou popsány varianty výroby polotovaru a hotového výrobku včetně současného postupu.



Obr. 3 Rozvinutý tvar

V současnosti začíná výroba polotovaru dělením plechu laserovým paprskem. Dílce se dále ohýbají v nástroji na ohraňovacím lisu až do konečného tvaru. Postup zahrnuje mezioperační přepravu mezi pracovištěm řezání a pracovištěm ohýbání. Na ohraňovacím lisu je postupně provedeno šest ohybů na úhel 90°. Malé rozměry součásti komplikují práci obsluze.

Výroba zadané součásti lze tedy rozdělit na dvě základní operace. První operací vzniká tvarový přístřih (obr. 3) z polotovaru ve formě plechové tabule nebo svitku. Druhou operací dochází ke zhotovení ohýbané součásti z rozvinutého tvaru. Rozvinutý tvar lze zhotovit použitím koncentrovaného zdroje energie nebo některou z mnoha technologií stříhání. Konečný tvar je možné vytvořit ohnutím v nástroji na ohraňovacím lisu nebo ohýbáním v jednoúčelovém nástroji na lisu hydraulickém nebo klikovém. Celou součást by bylo možné zhotovit při sloučení obou operací stříhání a ohýbání do jednoho nástroje. Součást by tak byla vyrobena ve sdruženém postupovém nástroji upnutém v klikovém lisu. V několika operacích by z pásu plechu vznikl hotový výrobek.

- Řezání laserovým paprskem [11], [12]
  Princip laseru spočívá ve stimulované emisi fotonů v aktivním prostředí. Paprsek se zesiluje soustavou nepropustných a polopropustných zrcadel. Vhodnou optikou je pak usměrněn do místa řezu. Pro laserový paprsek (obr. 4) je charakteristická vysoká hustota energie. Podmínkou pro řezání materiálu je, že difuze tepla z místa řezu je menší než teplo vnesené ohřevem. Na řezání se podílí také řezný plyn, který má dvě hlavní funkce. Proud plynu odvádí natavený kov z místa řezu v případě tavného řezání nebo spaluje odebíraný materiál v případě oxidačního řezání. Zároveň proud řezného plynu chrání optiku přístroje před rozstřikem kovu.

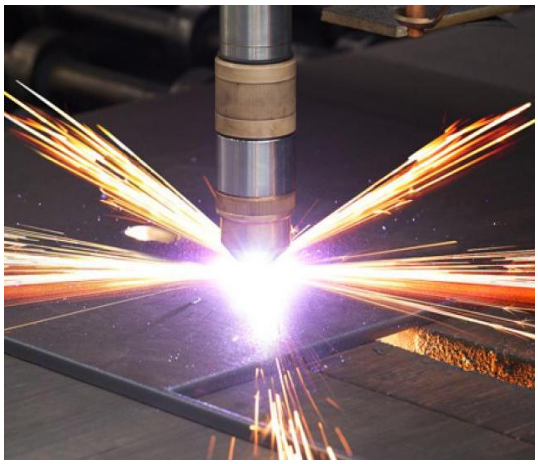
Obr. 4 Řezání laserem [13]

Pevnolátkový laser Nd:YAG pracuje s velice úzkým paprskem monochromatického světla o vlnové délce 1,064 μm. Aktivním prostředím je pevná látka ve formě krystalu (Y3Al5O12). Paprsek vzniká optickým buzením polovodičovými diodami.

CO2 laser vytváří paprsek monochromatického světla o vlnové délce 10,6 μm. Aktivní prostředí je plynného charakteru (CO2+N2+He). K buzení laserového paprsku dochází průchodem elektrického proudu měděnými elektrodami.

Výhodami řezání laserem jsou vysoká řezná rychlost, vysoká přesnost a kolmý řez za vzniku úzké řezné spáry. Díky dostatečné kvalitě řezné plochy odpadají dokončovací operace. Nevýhodou je tepelné ovlivnění okolí řezu. Laserový paprsek je vhodný pro řezání konstrukční oceli do tloušťky 25 mm. Propal lze provést v ploše materiálu. Při řezání ostrých tvarů hrozí natavení jejich hran.

- Řezání proudem plazmatu [14]
  Dalším metodou vhodnou k dělení kovových materiálů je řezání plazmatem (obr. 5). Jedná se o ionizovaný plyn, který je charakteristický svojí vysokou teplotou v řádu desítek tisíc °C. Proud plazmatu vystupuje z trysky a taví řezaný materiál. Dynamické účinky proudícího plynu odnášejí roztavený kov z místa řezu. Používá se pro kovové elektricky vodivé materiály do tloušťky až 160 mm. Jako řezný plyn slouží dusík, kyslík, argon, vodík nebo helium. K výhodám patří vysoká řezná rychlost a snadná automatizace procesu. Nevýhodou je proti řezání laserem širší řezná spára a velký vývin dýmu doprovázený vysokou hlučností. Propalování otvorů v ploše materiálu je obtížné nad 15 mm tloušťky plechu. Otvory pro začátek řezu je tak nutné předvrtávat. Povrch řezné spáry je méně kvalitní. Horní hrana je zaoblená a ve spodní části dochází k podřezání.



Obr. 5 Řezání plazmatem [15]

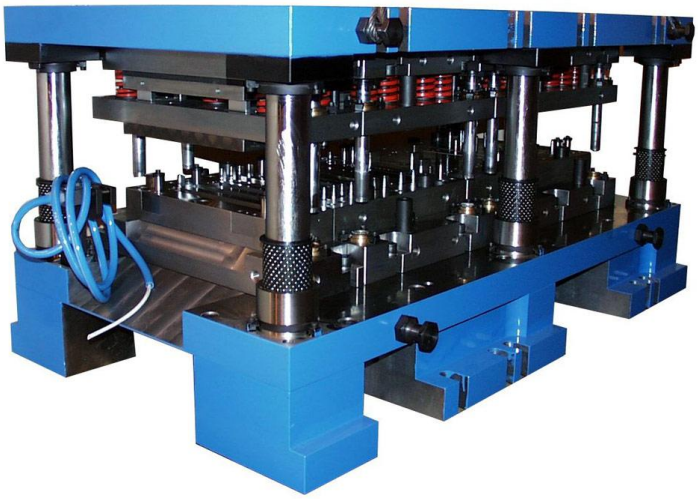
- Řezání vodním paprskem [16]
  Technologie používající jako zdroj koncentrované energie paprsek vody je vhodná k řezání jak kovových tak nekovových materiálů. Proud vody je přiváděn pod vysokým tlakem do trysky (obr. 6). Tlak se pohybuje v hodnotách mezi 800 – 4100 bar. Pro nekovové a měkké materiály není nutné zlepšovat řezné schopnosti paprsku, protože samotný tlak vody je dostatečně vysoký. Řezání kovových materiálů se však neobejde bez příměsi abraziva do proudu paprsku. Abrazivní prášek obsahuje krystalky granátu, které se do proudu vody přimíchávají vlivem podtlaku ve směšovací komoře. Řezná spára je široká asi 0,8 – 1,5 mm. Výhodou proti laseru a plazmatu je, že nedochází k tepelnému ovlivnění okolí řezu. Nevýhodou je přímý styk řezaného materiálu s vodou, která způsobuje korozi kovových materiálů nebo nasáknutí materiálů porézních.

Obr. 6 Řezání vodním paprskem [17]

- Ohraňování [18]
  Ohraňovací lis se používá pro zhotovení ohybů na plechovém polotovaru, připraveném např. pálením na laseru. Správnou hloubku založení plechu do lisu určují vnitřní programovatelné dorazy. K ohybu plechu dochází vlivem pohybu horního ohybníku nebo také razníku. Plech se ohýbá razníkem do spodního nástroje zvaného matrice (obr. 7). Razníky i matrice jsou dělené v určité řadě délek lišících se podle výrobce. Nástroje pro ohraňovací lisy Trumpf je možné pořídit v délkách od 25 mm do 500 mm. Tvar funkční části razníku a matrice závisí na požadovaném úhlu ohybu, poloměru ohybu a tloušťce ohýbaného materiálu. Důležitým parametrem při práci na ohraňovacím lisu je hodnota maximálního zatížení nástroje na jeden metr jeho délky. Pohybuje se od 200 kN/m do 2500 kN/m.

Obr. 7 Ohraňování [19]

- Postupový sdružený nástroj [20]
  Použitím sdruženého postupového nástroje (obr. 8) lze sloučit do jednoho procesu přípravu polotovaru a ohýbání finálního tvaru. Jedná se o speciálně navržený jednoúčelový nástroj, který v sobě kombinuje operace stříhání a ohýbání nebo tažení. Do nástroje vstupuje polotovar ve formě svitku nebo pásu plechu dané šířky. Posouvá se krok po kroku, přičemž na něm probíhají postupně všechny operace. Na konci nástroje pak odchází hotový výrobek. Technologie je vhodná pro jednoduché i složité výrobky z plechu. Uplatňuje se především u vysokých výrobních sérií v řádu stovek tisíc kusů ročně. U méně komplikovaných výrobků je možné dosáhnout úspory už od 10 000 kusů ročně.



Obr. 8 Sdružený postupový nástroj [21]

Z výše uvedených technologií výroby by bylo možné použít kombinaci dělení koncentrovaným zdrojem energie a následné ohýbání v ohraňovacím lisu nebo ve speciálním ohýbacím nástroji. Pro zadanou sérii je již možné uvažovat o výrobě ve sdruženém nástroji, který kombinuje rychlou produkci a jednoduchou obsluhu. Teoretická část práce se tedy zaměří na technologie spojené s výrobou v postupovém nástroji.

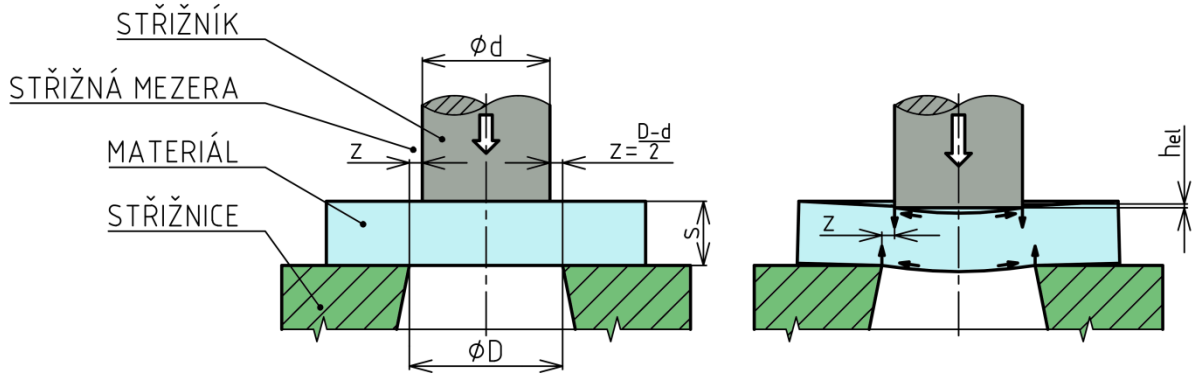
2 TECHNOLOGIE STŘÍHÁNÍ A OHÝBÁNÍ

Nástroj pro výrobu zadané součásti v sobě kombinuje dvě základní technologie, jejichž princip bude popsán v následujících podkapitolách. Jedná se o technologie stříhání a ohýbání, které jsou dále popsány základními vztahy. Tyto vztahy jsou použity dále pro výpočet.

2.1 Technologie stříhání [1], [2], [20], [22], [23]

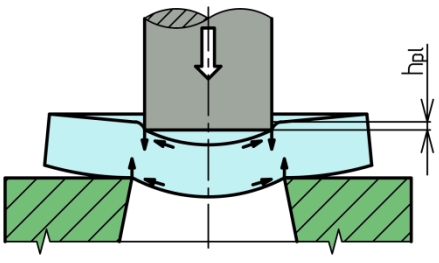
Stříhání se vyznačuje plastickou deformací materiálu, která pokračuje až do porušení. Porušení je v případě stříhání žádoucím procesem na rozdíl od jiných tvářecích operací, u kterých je překročení meze pevnosti nepřípustné. Používá se pro dělení materiálu dodaného od výrobce, jehož tvar je pro další zpracování nevhodný z hlediska velikosti rozměrů. Zpracovává se tak plošný materiál dodaný ve formě tabulí nebo svitků různých rozměrů. Dále je technologie vhodná pro dělení tyčí kruhového i nekruhového průřezu nebo profilů s různými tvary průřezu.

Postup stříhání lze rozdělit do tří hlavních fází. Fáze stříhání jsou popsány na příkladě, který lze zařadit buď jako vystřihování, kdy uzavřený obrys střihu tvoří výstřižek nebo jako děrování, kdy obrys střihu vytváří ve výrobku otvor a výstřižek je potom odpad.



Obr. 9 První fáze střihu [2]

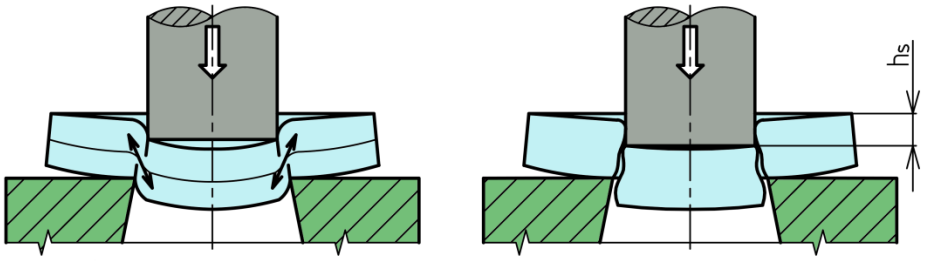
První fáze stříhání (obr. 9) nastává po dosednutí střižníku na povrch plechu. Po dosednutí na povrch je střižník vtlačován do materiálu a vyvolává v něm napětí. Napětí v první fázi je menší než mez kluzu a způsobuje tak pouze elastickou deformaci. Hloubka elastického vniknutí střižníku do materiálu závisí na mechanických vlastnostech stříhaného materiálu a dosahuje h_{el} = 5 – 8 % jeho tloušťky. Vlivem střižné mezery mezi střižníkem a otvorem ve střižnici vznikají dvojice sil v rovinách kolmých na střižné plochy. Působením silových dvojic po obvodu střižné mezery se materiál ohýbá. Vytlačením materiálu na straně střižnice a vtažením materiálu na straně střižníku dochází na povrchu výstřižku k tvorbě zaoblení.



Obr. 10 Druhá fáze střihu [2]

Druhá fáze stříhání nastává, když hodnota napětí ve výstřižku překročí hodnotu meze kluzu pro daný materiál (obr. 10). Hloubka plastického vniknutí závisí opět na mechanických vlastnostech stříhaného materiálu a dosahuje h_{pl} = 10 – 25 % jeho tloušťky. V této fázi je deformace trvalá díky plastickému přetvoření. Konec druhé fáze znamená dosažení meze pevnosti ve střihu.

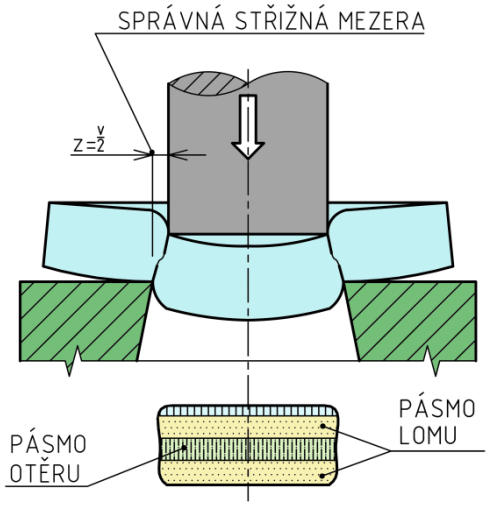
Třetí fáze stříhání nastává v okamžiku, kdy napětí v materiálu dosáhne hodnoty meze pevnosti ve střihu. Prvotním projevem třetí fáze je tvorba malých trhlinek. K rozvoji trhlinek dochází vlivem tahového normálného napětí ve směru vláken. Počátek třetí fáze se nazývá nástřih (obr. 11 - vlevo). Trhliny se rychle šíří, čímž dochází k oddělení výstřižku od základního materiálu (obr. 11 - vpravo). Rychlost šíření trhlin závisí na mechanických vlastnostech materiálu a průběh postupu trhlin je významně ovlivněn velikostí střižné mezery. K oddělení tvrdého a křehkého materiálu stačí pouze nepatrné vniknutí střižné hrany h_s = 10 % tloušťky materiálu. Materiál houževnatý a měkký brání rychlému rozvoji trhlin a odolává přestřižení až do hloubky vniknutí střižné hrany h_s = 60 % tloušťky materiálu.



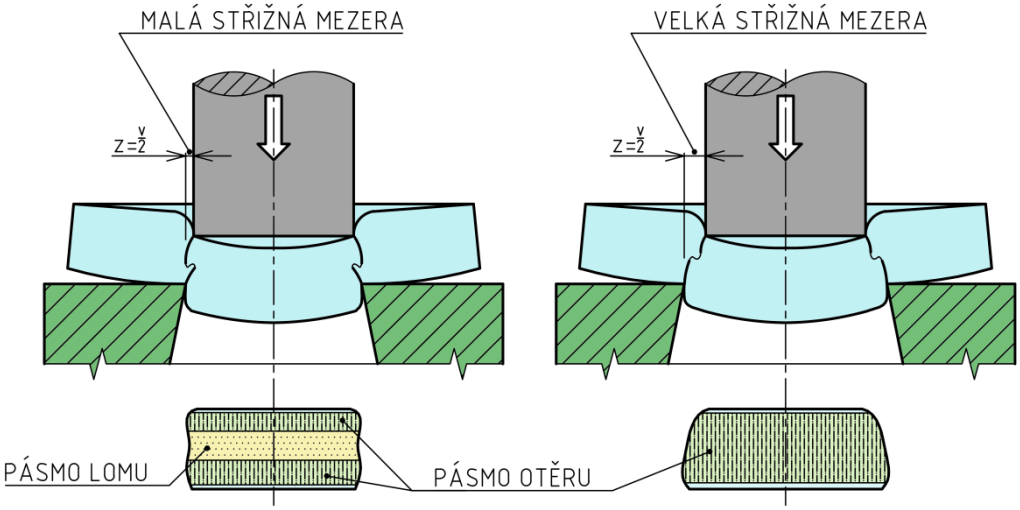
Obr. 11 Třetí fáze střihu [2]

2.1.1 Střižná vůle a plocha [1], [2], [20]

Proces stříhání je zásadním způsobem ovlivněn velikostí střižné vůle. Její vliv se odráží ve velikosti střižné síly, kvalitě střižných ploch, vykonané práci a trvanlivosti funkčních ploch nástroje. Je určena rozdílem mezi rozměrem střižníku a střižnice. Pro její vznik je tedy nutná změna rozměru střižníku nebo střižnice podle požadavků na výsledný tvar. Pokud je požadován přesný vnější rozměr výstřižku, pak vzniká střižná vůle zmenšením rozměru střižníku. Požaduje-li se přesný rozměr otvoru při vystřihování, pak rozměr střižníku zůstává nezměněn a stižná vůle tedy vzniká zvětšením rozměru střižnice. Vhodně zvolená střižná vůle (obr. 12) má za následek to, že se trhliny šířící se od hrany střižníku a střižnice ve třetí fázi střihu setkají. Výsledkem je pak správně usmýknutá střižná plocha. Snižováním velikosti střižné vůle může být dosaženo vyšší jakosti střižné plochy při nežádoucím zvýšení střižné síly. Malá nebo velká střižná vůle způsobí šíření trhlin, které se uprostřed nesetkají a komplikují tak průběh vzniku nové plochy na výstřižku. Oba případy jsou doprovázeny charakteristickým vzhledem střižné plochy (obr. 13). Pásmo otěru se přemisťuje na okraje střižné plochy u malé střižné vůle. V případě velké střižné vůle pokrývá pásmo otěru téměř celou plochu střihu. Rozložení střižné vůle by mělo být po obvodu čáry střihu rovnoměrné. Není-li tomu tak, vznikají povrchové vady a ostřiny, které snižují kvalitu plochy. Vznik ostřin zároveň souvisí s otupením střižné hrany. Otupení střižníku způsobuje vznik ostřin na obvodu vystřižené součásti. Otupení střižnice při děrování způsobuje vznik ostřiny na obvodu děrovaného otvoru. Otupení obou střižných hran pak způsobí kombinaci předešlých případů.



Obr. 12 Vhodná střižná mezera [2]



Obr. 13 Nevhodná střižná mezera [2]

Volba velikosti střižné vůle závisí na druhu materiálu a jeho tloušťce může být zvolena podle tabulek. Výběr probíhá podle druhu materiálu a stanoví se v procentech jeho tloušťky podle hodnot v tab. 2.

Tab. 2 Velikost střižné vůle [20]

Materiál	**Střižná vůle [% tloušťky materiálu]**	
	do 2,5 mm	2,5 ÷ 6 mm
ocel měkká	5	7 ÷ 8
ocel středně tvrdá	6	6 ÷ 8
ocel tvrdá	7 ÷ 9	7 ÷ 10

Tabulkové hodnoty jsou přibližné a proto je možné velikost střižné vůle stanovit také výpočtem.

Výpočet střižné vůle:

$$v_s = 2 \cdot z \text{ [mm]} \tag{2.1}$$

kde: z [mm] – střižná mezera

Výpočet střižné mezery pro plechy kde s ≤ 3 mm

$$z = 0{,}32 \cdot c \cdot s \cdot \sqrt{\tau_s} \text{ [mm]} \tag{2.2}$$

Výpočet střižné mezery pro plechy kde s ≥ 3 mm

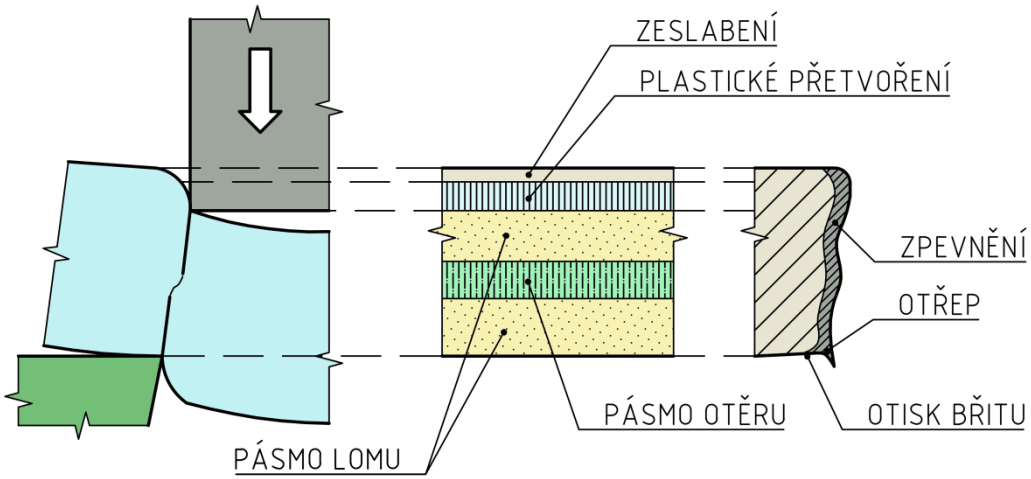
$$z = 0{,}32 \cdot (1{,}5 \cdot c \cdot s - 0{,}15) \cdot \sqrt{\tau_s} \text{ [mm]} \tag{2.3}$$

kde: s [mm] – tloušťka stříhaného materiálu
τ_s [MPa] – střižný odpor
c [-] (0,005 ÷ 0,035) – součinitel závislý na stupni střihu

Nižší hodnoty součinitele se volí pro dosažení vyšší kvality střižné plochy. Vyšší hodnoty součinitele se volí pro dosažení nižší střižné síly, při zhoršení kvality střižné plochy.

Velikost střižné vůle tedy přímo ovlivňuje kvalitu střižné plochy neboli povrchu střihu. Při běžných metodách stříhání není dosahováno zvláštní kvality této nově vzniklé plochy. Její povrch je drsný a zkosený pod určitým úhlem. Na spodní straně vzniká ostřina, která je často pro funkci stříhané součásti nežádoucí a musí být v navazujících operacích odstraněna. Běžně

dosahovaná hodnota drsnosti Ra leží v intervalu mezi 3,2 ÷ 6,3. Na obr. 14 jsou znázorněny dílčí oblasti, ze kterých se střižná plocha skládá. Zatlačením nástroje do materiálu vzniká na horní hraně výstřižku zaoblení viditelné v řezu, které se při pohledu na střižnou plochu projevuje zeslabením materiálu. Probíhající plastická deformace za sebou zanechává pásmo plastického přetvoření. Zbytek plochy tvoří pásmo vzniklé utržením materiálu, které se skládá z pásem lomu a pásma otěru. Na spodní straně, v místě kontaktu materiálu a nástroje, dochází k otisknutí břitu.



Obr. 14 Střižná plocha při normální vůli [2]

Kvalita střižné plochy kromě velikosti střižné mezery závisí také na vlastnostech stříhaného materiálu, konstrukci nástroje, kvalitě povrchu střižných hran, geometrickém tvaru střihu a rychlosti pohybu nástroje. Zpevnění nastává v důsledku plastické deformace materiálu v okolí střižné plochy. Odpor proti pokračující plastické deformaci narůstá a mechanické vlastnosti se v této oblasti mění. Změna vlastností je jevem nežádoucím, protože dochází ke zvýšení meze kluzu a snížení tažnosti v blízkém okolí střižné plochy. Obvykle dosahuje šířka zpevněné vrstvy $20 \div 30\,\%$ tloušťky materiálu. Pokles plasticity může v následujících tvářecích operacích způsobit vznik trhlin v této zpevněné vrstvě. Její šířku ovlivňuje také rychlost pohybu nástroje. Vysoká rychlost stříhání zanechává užší zpevněnou vrstvu než nízká rychlost. Zpevnění lze odstranit obrobením plochy nebo žíháním polotovaru.

2.1.2 Střižné síly [1], [2], [20], [22]

V procesu stříhání je možné popsat několik druhů sil. Jednou z nejdůležitějších sil je síla střižná. Její vyjádření závisí na střižném odporu zvaném též pevnost ve střihu nebo deformační odpor ve střihu. Střižný odpor závisí na podmínkách jako rychlost stříhání, velikost tření, stav střižných hran a především mechanické vlastnosti stříhaného materiálu. Střižný odpor se zvyšuje s rostoucí hodnotou pevnosti a s klesající tvárností. Pokles střižného odporu nastává s rostoucí tloušťkou materiálu a rostoucí velikostí a pravidelností křivky střihu. Vyšší rychlost stříhání má za důsledek nárůst střižného odporu. Snížení tření například použitím mazání má za důsledek naopak jeho pokles. Velikost střižného odporu lze přibližně určit násobkem meze pevnosti a pohybuje se u různých materiálů mezi $0{,}55 \div 0{,}90\ R_m$. Obecně lze určit ze vzorce.

Výpočet střižného odporu:

$$\tau_s = \frac{F_s}{S_s}\ [\mathrm{MPa}] \qquad (2.4)$$

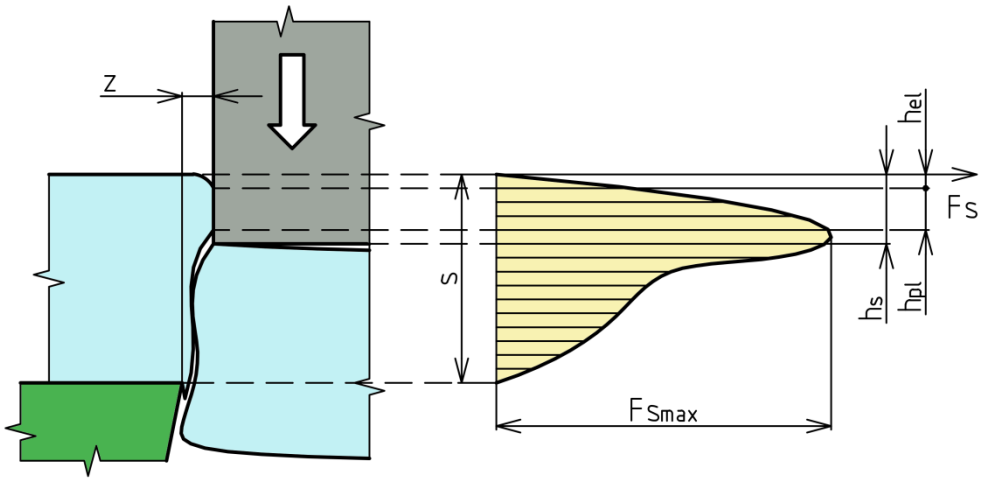
kde: F_s [N] – střižná síla
S_s [mm^2] – plocha střihu

Běžná hodnota střižného odporu používaná pro výpočty:

$$\tau_s = 0{,}8 \cdot R_m \text{ [MPa]} \tag{2.5}$$

kde: R_m [MPa] – mez pevnosti v tahu

Znalost velikosti střižné síly není důležitá jen pro konstrukci nástroje, ale také při výběru vhodného tvářecího stroje. Pokud by totiž střižná síla přesahovala možnosti daného lisu především pak jeho jmenovitou sílu, mohlo by dojít k jeho poškození. Průběh střižné síly v závislosti na dráze nástroje je znázorněn na obr. 15.



Obr. 15 Průběh střižné síly [2]

Výpočet střižné síly:

$$F_s = n_o \cdot S_s \cdot \tau_s = n_o \cdot l_s \cdot s \cdot \tau_s \text{ [N]} \tag{2.6}$$

kde: l_s [mm] – délka křivky střihu
n_o [-] (1,1 ÷ 1,3) – součinitel otupení břitu

Při střihu se spotřebovává určité množství práce, která se nazývá práce střižná a závisí na střižné síle a hloubce zatlačení střižníku do materiálu. Střižnou práci ohraničuje křivka na obr. 15 a je dána plochou pod touto křivkou zvýrazněnou barevně.

Výpočet střižné práce:

$$A_s = k_a \cdot F_s \cdot s \text{ [J]} \tag{2.7}$$

kde: k_a [-] – součinitel hloubky vtlačení dle tab. 3

Tab. 3 Součinitel hloubky vtlačení [20]

Materiál	**Tloušťka materiálu s [mm]**			
	do 1	1 ÷ 2	2 ÷ 4	nad 4
Ocel (250 ÷ 350 MPa)	0,70 ÷ 0,65	0,65 ÷ 0,60	0,60 ÷ 0,50	0,45 ÷ 0,35
Ocel (350 ÷ 500 MPa)	0,60 ÷ 0,55	0,55 ÷ 0,50	0,50 ÷ 0,42	0,40
Ocel (500 ÷ 700 MPa)	0,45 ÷ 0,42	0,42 ÷ 0,38	0,38 ÷ 0,33	0,30 ÷ 0,20
Hliník, měď (žíhané)	0,75 ÷ 0,70	0,70 ÷ 0,65	0,65 ÷ 0,55	0,50

Další síly, které se účastní procesu stříhaní a je tedy vhodné uvést jejich výpočet, jsou síly stírací a protlačovací. Materiál vlivem pružnosti ulpívá při stříhání na vnějším obvodu střižníku a je tedy zapotřebí vyvinout stírací sílu, která zajistí jeho odstranění ze střižníku.

Velikost stírací síly závisí na druhu materiálu, velikosti střižní vůle, způsobu mazání a tloušťce materiálu.

Výpočet stírací síly:

$$F_{st} = c_1 \cdot F_s \ [N] \tag{2.8}$$

kde: c_1 [-] – součinitel stírání dle tab. 4

Hodnota součinitele c_1 se volí nižší v případě, kdy je použit jednodušší střižník jednotlivě. Pro výpočet stírací síly v případě stříhání více střižníky se volí hodnota součinitele c_1 spíše vyšší. Obzvlášť v případech kdy jsou střižníky umístěny blízko sebe nebo je jejich tvar složitý. Dále je také nutné protlačit výstřižek nebo odpad otvorem ve střižnici. To vyžaduje vyvolání síly protlačovací, která je podobného charakteru jako síla stírací.

Výpočet protlačovací síly:

$$F_{pr} = c_2 \cdot F_s \ [N] \tag{2.9}$$

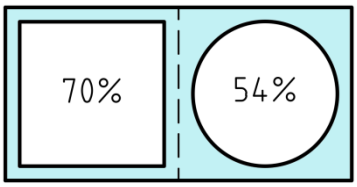
kde: c_2 [-] – součinitel protlačování dle tab. 4

Tab. 4 Hodnoty součinitele stírání a protlačování [20], [22]

Materiál	c_1	c_2
Ocel do 1 mm	0,02 ÷ 0,12	0,05 ÷ 0,08
Ocel 1 ÷ 5 mm	0,06 ÷ 0,16	0,05 ÷ 0,08
Ocel nad 5 mm	0,08 ÷ 0,20	0,05 ÷ 0,08
Mosaz	0,06 ÷ 0,07	0,04
Slitiny hliníku	0,09	0,02 ÷ 0,04

2.1.3 Technologičnost výstřižku [1], [2], [20], [22], [23]

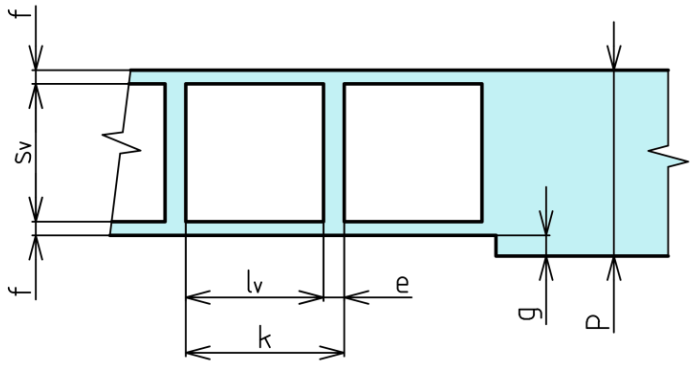
Obecně se uvádí, že plechový díl má být zhotoven z vhodného materiálu. Jeho rozměry a tvar by měli zaručit výrobu při nízkých nákladech v jednoduchém nástroji a krátkém čase, při dodržení všech technických požadavků kladených na součást.
Faktory mající vliv na technologičnost výroby jsou velikost výrobní série, strojní vybavení podniku, omezení střižného procesu, zkušenost pracovníků konstrukce i výroby a další. Snižování množství potřebného materiálu závisí také na zvyšování procenta využití plechu. Z hlediska spotřeby materiálu je výhodnější navržení výstřižku ve tvaru rovnoběžníku místo kruhu. Představu o využití materiálu obou variant dává obr. 16.



Obr. 16 Využitá plocha

- Nástřihový plán

Uspořádání výstřižků na pásu plechu má zásadní vliv na spotřebu materiálu. Pro jednoduché tvary výstřižků je možné stříhat bez mezery mezi jednotlivými díly a spotřeba materiálu je tak nižší. Pro dosažení dobré kvality výstřižků při postupovém stříhání je vhodné zachovat danou šířku mezer mezi výstřižky vzájemně a mezi výstřižky a okraji. Šířka zvolené mezery má vliv při výpočtu délky kroku v postupovém střižném nástroji (obr. 17).



Obr. 17 Nástřihový plán [20]

Výpočet délky kroku:

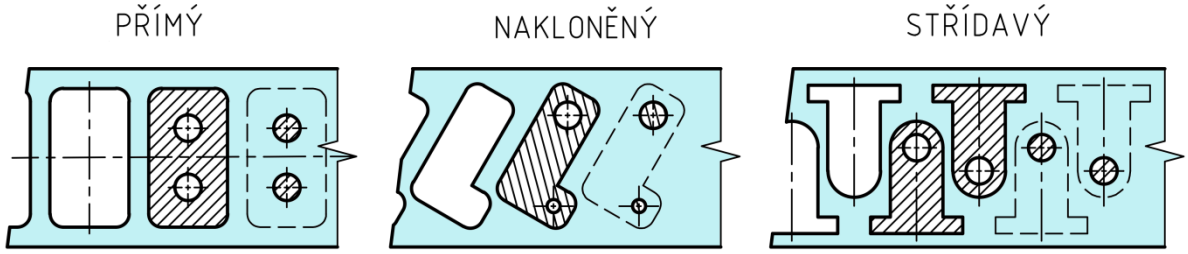
$$k = l_{vs} + e \text{ [mm]} \tag{2.10}$$

kde: l_{vs} [mm] – délka výstřižku
e [mm] – velikost můstku

Výpočet šířky pásu:

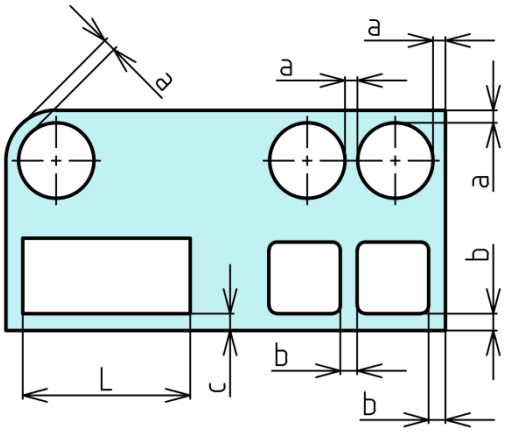
$$P = s_v + 2 \cdot f + g \text{ [mm]} \tag{2.11}$$

kde: s_v [mm] – šířka výstřižku
f [mm] – šířka okraje
g [mm] – okraj po ostřižení



Obr. 18 Uspořádání výstřižků [23]

Výstřižky na pásu plechu jsou uspořádány tak, aby bylo využití materiálu co nejlepší. Jako základní typy uspořádání výstřižků (obr. 18) lze použít přímé uspořádání pro součásti jednoduchých pravoúhlých tvarů. Pro složitější tvary a výstřižky tvaru písmene L je vhodné uspořádání nakloněné. Střídavé uspořádání je použito pro součásti tvaru písmene T a pro složitější součásti. Dále je možné vybrané typy uspořádání rozvíjet, tak aby bylo možné vyrábět například více stejných kusů v jednom kroku.



Obr. 19 Vzdálenosti otvorů [20]

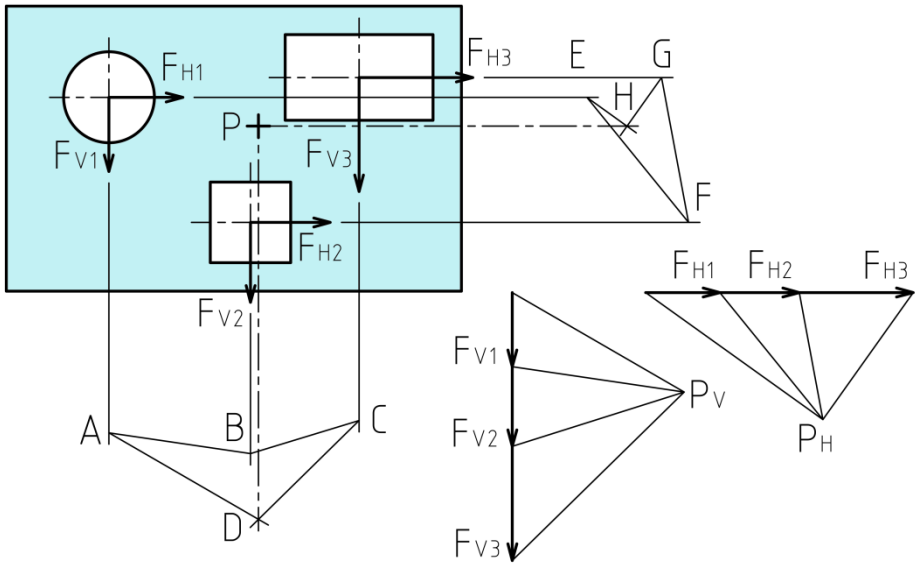
Množství spotřebovaného materiálu má se zvyšujícím se počtem kusů výrobní série rostoucí vliv na celkové náklady výroby. Ve velkosériové výrobě tvoří náklady na materiál až 80% nákladů celkových. Při tvorbě nástřihového plánu je nutné počítat se zásadami pro umísťování otvorů. Doporučuje se zachovat minimální vzdálenosti mezi otvory případně vzdálenosti otvorů od okraje výstřižku (obr. 19 a tab. 5).

Tab. 5 Vzdálenosti otvorů [20]

Tloušťka plechu [mm]	**Rozměr a [mm]**	**Rozměr b [mm]**	**Rozměr c [mm]**			
			Pro šířku otvoru L [mm]			
			5 ÷ 50	50 ÷ 100	100 ÷ 200	nad 200
do 1,0	1,5	2,5	3	8	13	20
1,0 ÷ 1,6	2,4	3,2	4,5	8	13	20
1,6 ÷ 2,0	3	4	6	10	14	25

- Těžiště střižných sil

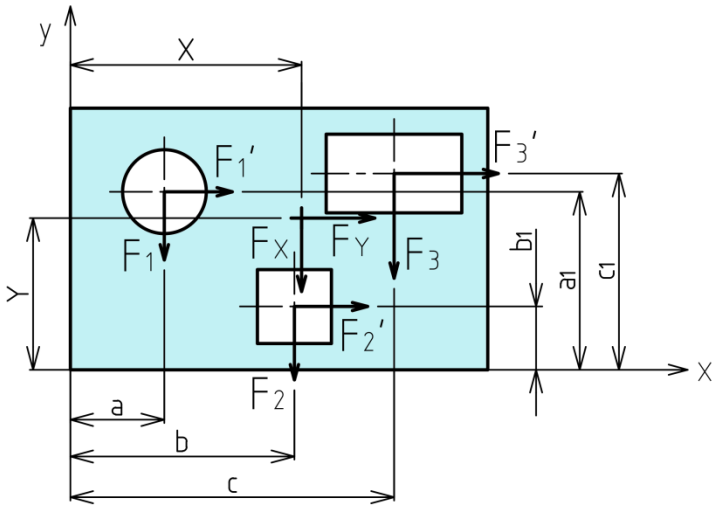
Postupový střižný nástroj používá více střižníků současně. Působiště střižných sil tedy není na první pohled zřejmé a je nutné jej vypočítat. Do působiště střižných sil se umisťuje stopka nástroje a prochází jím také osa beranu lisu. Při nevhodném umístění stopky mimo osu vznikají klopné momenty, které namáhají celou soustavu. Dochází k opotřebení nástroje i tvářecího stroje. Snižuje se přesnost výstřižku a kvalita střižné plochy. Pro výpočet působiště výslednice střižných sil je možné použít grafické řešení (obr. 20).



Obr. 20 Těžiště střižných sil graficky [23]

Postup spočívá ve vykreslení půdorysu nástroje, do kterého se v místech působišť jednotlivých sil nanesou horizontální a vertikální složky daných sil ve vhodném měřítku. Dále je vhodně zvolen pól P_V, který je následně propojen s vertikálními složkami sil seřazenými pod sebou. Spojnice tvoří pólový obrazec. Na prodloužené směry působících sil se nanesou postupně rovnoběžky s čárami z pólového obrazce. Průnikem první a poslední rovnoběžky z pólového obrazce dostáváme bod D, kterým prochází vertikální výslednice sil. Obdobně se pokračuje v hledání výslednice horizontální. Průnikem obou výslednic je působiště P.

Druhým způsobem zjištění těžiště střižných sil je metoda početní. Metoda vychází z podmínky rovnováhy momentů mezi jednotlivými silami a silou celkovou ke zvoleným osám x a y (obr. 21).



Obr. 21 Těžiště střižných sil matematicky [23]

Vzorce pro výpočet těžiště střižných sil:

$$F_x \cdot X = F_1 \cdot a + F_2 \cdot b + F_3 \cdot c \tag{2.12}$$

kde: $F_x = F_1 + F_2 + F_3$ [N] – jednotlivé síly
X, a, b, c [mm] – jejich ramena

$$F_y \cdot Y = F_1' \cdot a_1 + F_2' \cdot b_1 + F_3' \cdot c_1 \tag{2.13}$$

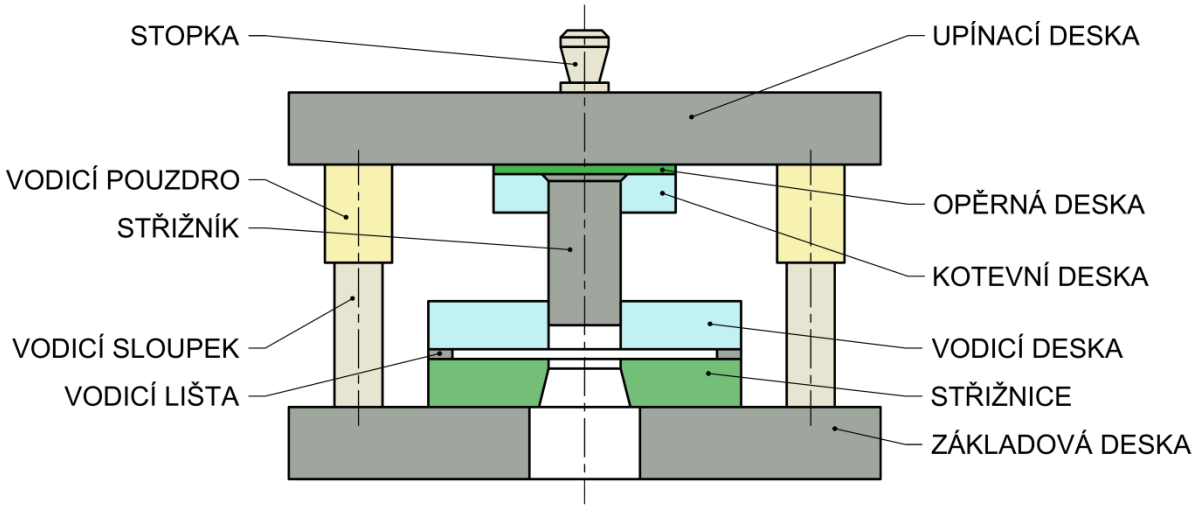
kde: $F_y = F_1' + F_2' + F_3'$ [N] – jednotlivé síly
Y, a_1, b_1, c_1 [mm] – jejich ramena

$$X = \frac{F_1 \cdot a + F_2 \cdot b + F_3 \cdot c}{F_1 + F_2 + F_3} \tag{2.14}$$

$$Y = \frac{F_1' \cdot a_1 + F_2' \cdot b_1 + F_3' \cdot c_1}{F_1' + F_2' + F_3'} \tag{2.15}$$

2.1.4 Střižné nástroje [20], [23], [24], [25]

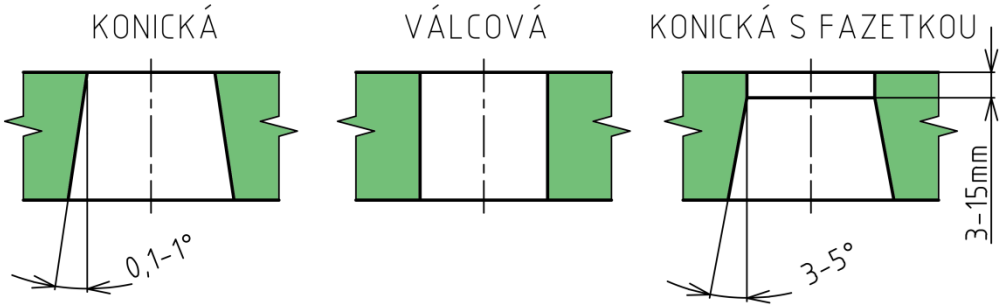
Nástroje pro výrobu výstřižků lze rozdělit do několika skupin podle požadavků kladených na výsledný produkt. Pro výstřižky jednoduchých tvarů bez speciálních požadavků na jejich přesnost se používají jednoduché střižné nástroje s vedením nebo bez vedení. Pro složitější výstřižky s tolerovanými rozměry vyráběné ve více krocích se používají nástroje postupové. V případě kombinace technologií stříhání a ohýbání v jednom nástroji je zapotřebí zvolit nástroj sdružený. Základními prvky střižných nástrojů jsou činné části, kterými jsou myšleny střižníky a střižnice. Neméně důležité je však zajištění jejich vzájemné pozice vůči sobě. To zajišťuje vodící deska nebo vodící sloupky (obr. 22). Upnutí nástroje k horní části klikového lisu je realizováno pomocí normalizované upínací stopky. Spodní část nástroje je upnuta přímo přes základovou desku upínkami.



Obr. 22 Střižný nástroj s vedením [25]

- Střižnice

  Činná část nástroje, která se nachází v jeho spodní části, se nazývá střižnice. Může být upevněna přímo na základové desce. Pro součásti jednodušších tvarů je vhodná střižnice celistvá, vyrobená z jednoho kusu materiálu. Střižnice skládaná je vhodná pro složitější tvary výstřižků. Je složena z více kusů, které jsou upnuty v nekalené desce nebo přímo na základové desce.



Obr. 23 Vnitřní geometrie střižnice [25]

Vnitřní geometrie střižnice může být válcová u kruhových otvorů nebo u obecných tvarů s kolmou stěnou. Používá se u přesného stříhání s nátlačnou hranou nebo za použití vyhazovače (obr. 23). Dalším příkladem je tvar konický nebo zkosený pro stříhání součástí malých rozměrů a střední přesnosti. Při přebrušování se však zvětšuje její průměr. Pro přesné tvarově složité součásti je určena střižnice tvaru konického s fazetkou. Díky fazetce lze střižnici opakovaně přebrušovat bez změny rozměru. Nevýhodou může být proti ryze konickému tvaru vyšší hodnota protlačovací síly. Tloušťka střižnice se obvykle pohybuje mezi 18 a 30 mm. Její hodnotu lze předběžně odhadnout ze vzorce.

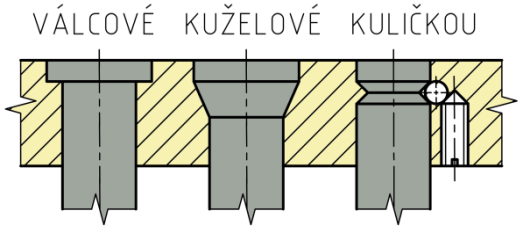
Odhad tloušťky střižnice:

$$H = \sqrt[3]{0{,}1 \cdot F_{s\,max}}\ [\text{mm}] \qquad (2.16)$$

kde: F_s [N] – střižná síla

- Střižník

Součást nástroje, která se účastní střižného procesu, je střižník. Jedná se o protikus střižnice, do které vniká se střižnou vůlí. K uchycení střižníků v horní části nástroje se používá kotevní deska, která je opatřena otvory pro umístění střižníků a brání jejich vytažení stírací silou. Otvory v kotevní desce jsou zhotoveny podle jednotlivých druhů střižníků. Ukotvení střižníků lze docílit kuželovou nebo válcovou hlavou (obr. 24). Složitější střižníky je možné ukotvit zalitím do pryskyřice. Střižníky jednoduchých tvarů se kotví šroubem, kuličkou nebo roznýtováním. Střižníky nevedené lze umisťovat samostatně bez přítomnosti vodící desky. Vedené střižníky se umisťují společně s vodící deskou, která zvyšuje vzpěrnou stabilitu střižníku. Zvýšení vzpěrné stability lze docílit také zesílením střižníku v horní části. Dále se používají střižníky skládané z více částí, kdy funkční část tvoří kvalitnější materiál. Základním výpočtem pro posouzení střižníku běžné délky je kontrola namáhání v tlaku



Obr. 24 Kotvení střižníku [25]

Namáhání střižníku v tlaku:

$$\sigma_d = \frac{F_s}{S_{st}} [MPa] \tag{2.17}$$

kde: S_{st} [mm^2] – plocha průřezu střižníku

Otlačení střižníku do upínací desky brání opěrná deska, která je kalená na vyšší tvrdost. Její použití je vhodné v případech, kdy je tlak od střižníku vyšší než $50 \div 100$ MPa. V případě konstrukce dlouhých a štíhlých střižníků lze dosáhnout ztráty vzpěrné stability při zatížení střižnou silou. Tento jev je ale nežádoucí, proto musí být skutečná délka střižníku menší než jeho vypočtená kritická délka.

Kritická délka nevedeného střižníku:

$$l_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{k_b \cdot F_s}} [mm] \tag{2.18}$$

kde: E [MPa] – modul pružnosti v tahu
I [mm^4] – moment setrvačnosti průřezu
k_b [-] (1,5 ÷ 2) – koeficient bezpečnosti

Kritická délka vedeného střižníku:

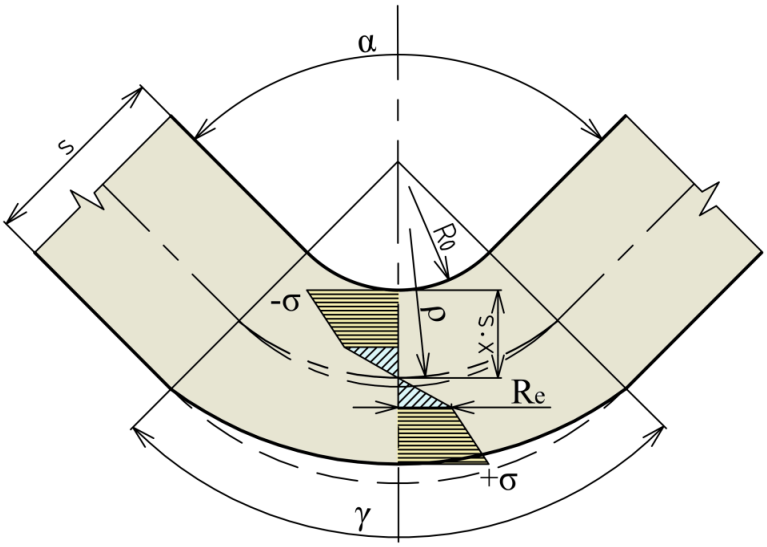
$$l_k = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{k_b \cdot F_s}} [mm] \tag{2.19}$$

2.2 Technologie ohýbání [2], [25], [26], [27], [28], [29], [30]

Při procesu ohýbání dochází k trvalé plastické deformaci tvářeného materiálu působením vnějších sil nebo momentů. Změny tvaru polotovaru se dosahuje bez výrazné změny průřezu, a proto se jedná o tváření plošné. Ohýbání se provádí nejčastěji za studena nebo ve zvláštních případech za tepla. Deformace materiálu při ohýbání přechází přes elastickou oblast do oblasti plastické deformace. Po odtížení nástroje zůstává materiál plasticky deformován, ale elastická deformace se mění na odpružení.

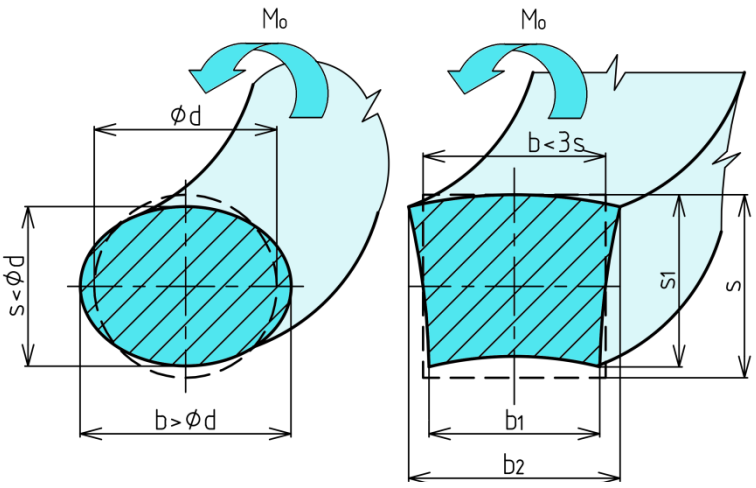
2.2.1 Průběh ohýbání [2], [26], [27], [28]

Důsledkem procesu ohýbání je deformace určité části polotovaru, která je vymezena na obr. 25 úhlem ohnutého úseku γ. Ramena navazující na část ohybu se již nedeformují a jejich délka zůstává původní. V místě ohnutého úseku lze pozorovat hned několik dějů. Materiál se v daném úseku ztenčuje a dochází k posunu neutrální vrstvy směrem k vnitřní straně ohybu. Pro dosažení trvalé plastické deformace je nutné překročení hodnoty meze kluzu Re v daném materiálu. Vlivem tlakových napětí na vnitřní straně ohybu dochází k trvalé plastické deformaci a stlačení materiálu. Ve středním pásmu průřezu v okolí neutrální vrstvy dosahují napětí nižší hodnoty než meze kluzu. Elastická deformace v okolí neutrální vrstvy je pouze dočasná. Přechodem přes neutrální vrstvu se napětí mění z tlakového na tahové. Vlivem tahového napětí na vnější straně ohybu se materiál prodlužuje a jeho deformace je opět trvalá. Právě na vnější straně ohybu hrozí za určitých podmínek zvýšení tahového napětí nad mez pevnosti v tahu daného materiálu. Následkem je porušení a vznik trhlin. Poloha neutrální vrstvy a kvalita ohybu závisí na tloušťce materiálu s, poloměru ohybu R_0, úhlu ohybu α a mechanických vlastnostech ohýbaného materiálu.



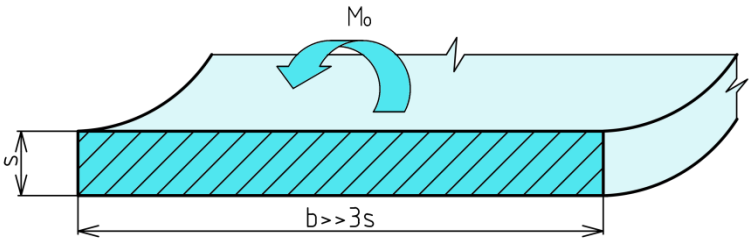
Obr. 25 Schéma ohybu [27]

Průvodním jevem ohýbání může být tedy deformace průřezu polotovaru v místě ohybu. Tvar průřezu se mění vlivem rozložení napětí a deformací po průřezu. Základní rozdíl spočívá v poměru tloušťky průřezu vůči jeho šířce. Podle poměru rozměrů lze rozdělit ohýbání na dvě kategorie a to ohýbání úzkých tyčí a ohýbání širokých pásů. Pro ohýbání tyčí platí předpoklad, že šířka polotovaru je menší než trojnásobek jeho



Obr. 26 Deformace průřezu při ohýbání tyčí [27]

tloušťky (obr. 26). Při ohýbání nastává na vnitřním poloměru tyče jednoosé tlakové napětí a šířka tyče se pod daným namáháním zvětšuje. Naopak na vnějším poloměru ohybu je materiál namáhán jednoosým tahovým napětím a šířka tyče se zmenšuje. Popsanou deformaci lze sledovat na průřezu tvaru čtvercovém nebo obdélníkovém při zachování výše uvedených podmínek poměru stran. Ohýbání kruhových tyčí při malém poloměru ohybu doprovází deformace průřezu na tvar elipsy. Pro ohýbání širokých pásů platí, že šířka průřezu je často mnohonásobně větší než trojnásobek jeho tloušťky (obr. 27). Přetvoření průřezu je v příčném směru zanedbáno. V krajních vláknech nastává na vnitřním poloměru ohybu rovinná napjatost tlaková a na vnějším poloměru ohybu rovinná napjatost tlaková.



Obr. 27 Ohýbání širokých pásů [27]

2.2.2 Rozvinutý tvar polotovaru [2], [25], [26], [27], [28], [29]

Stanovení rozměrů rozvinutého tvaru polotovaru závisí na poloze neutrální vrstvy. Její vliv na celkovou délku rozvinutého tvaru je často zanedbatelný a ovlivňuje ho tím méně, čím vyšší je poměr poloměru ohybu vůči tloušťce plechu. Její vliv je procentuálně nižší také při velkém poměru délky přímých neohnutých ramen vůči délce oblouku ohybu. Neutrální vrstva rozděluje průřez na část stlačovanou a část prodlužovanou. Při ohýbání polotovaru za malých plastických deformací, kdy je poloměr zaoblení větší, lze předpokládat, že poloha neutrální vrstvy je totožná s vrstvou ležící uprostřed tloušťky materiálu.

Poloměr neutrální vrstvy pro poměr r/s ≥ 12

$$\rho = R_0 + \frac{s}{2} \text{ [mm]} \tag{2.20}$$

kde: R_0 [mm] – poloměr ohybu

Poloměr neutrální vrstvy pro poměr r/s ≤ 6

$$\rho = \left(R_0 + \frac{s}{2}\right) \cdot z_z \cdot z_r \text{ [mm]} \tag{2.21}$$

kde: z_z [-] $= s_1/s$ – součinitel ztenčení
z_r [-] $= b_1/b$ – součinitel rozšíření průřezu
s_1 [mm] – šířka materiálu po ohnutí
b [mm] – šířka materiálu výchozí
b_1 [mm] – šířka materiálu po ohnutí

Pro výpočet polohy neutrální vrstvy u ohýbání širokých pásů (b>>3s) se využívá koeficient vyjadřující posunutí neutrální vrstvy.

Poloměr neutrální vrstvy u širokých pásů

$$\rho = R_0 + x \cdot s \text{ [mm]} \tag{2.22}$$

kde: x [-] – součinitel ztenčení dle tab. 6

Tab. 6 Hodnoty koeficientu x [28]

R_0/s	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3	4	5	6
x	0,32	0,35	0,38	0,42	0,445	0,47	0,475	0,478	0,48

Poloměr neutrální vrstvy je dále použit pro výpočet délky ohnutého úseku. V praxi se na součásti vyskytuje více ohybů pod stejným nebo různým úhlem. Celková rozvinutá délka je pak součtem délek ohnutých úseků a úseků rovných.

Délka ohnutého úseku

$$l_o = \frac{\pi}{180} \cdot \gamma \cdot \rho = \frac{\pi}{180} \cdot \gamma \cdot (R_0 + x \cdot s) \text{ [mm]} \quad (2.23)$$

kde: γ [°] = (180° – α) – úhel ohnutého úseku
α [°] – úhel ohybu

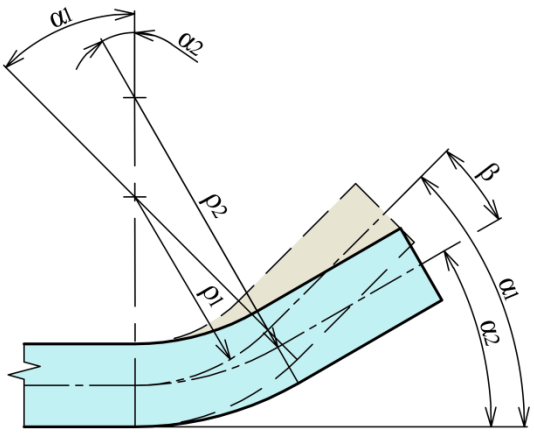
Celková délka rozvinutého tvaru součásti

$$l_c = \sum_{i=1}^{n} l_i + \sum_{i=1}^{n-1} l_{oi} \text{ [mm]} \quad (2.24)$$

kde: l_i [mm] – délka rovného úseku
l_{oi} [mm] – délka ohnutého úseku

- Odpružení

Součástí procesu ohýbání je odpružení, které se projevuje změnou úhlu ohybu po odtížení. Příčinou tohoto jevu je podíl elastické deformace na celkové deformaci materiálu. Elastická deformace se tedy po odtížení projeví odpružením součásti. Velikost úhlu, o který ohýbaná součást odpruží, závisí na mechanických vlastnostech materiálu. Dále úhel odpružení klesá s rostoucí tloušťkou ohýbaného materiálu a zmenšujícím se poloměrem ohybu. Ohnutí součásti o úhel α_1 se po odtížení vlivem uvolnění elastické deformace projeví změnou na úhel α_2 (obr. 28). Rozdíl mezi úhly se nazývá úhel odpružení β. Poloměr ohybu před odtížením ρ_1 se po odpružení zvětší na poloměr ρ_2.



Obr. 28 Odpružení po ohybu [29]

Pro zjištění úhlu odpružení u různých materiálů je možné využít zpracované diagramy závislosti úhlu odpružení na poměru poloměru ohybu k tloušťce materiálu. Úhel odpružení lze také zjistit výpočtem, při kterém záleží na tvaru ohybu (obr. 29).

Úhel odpružení pro ohyb do tvaru V

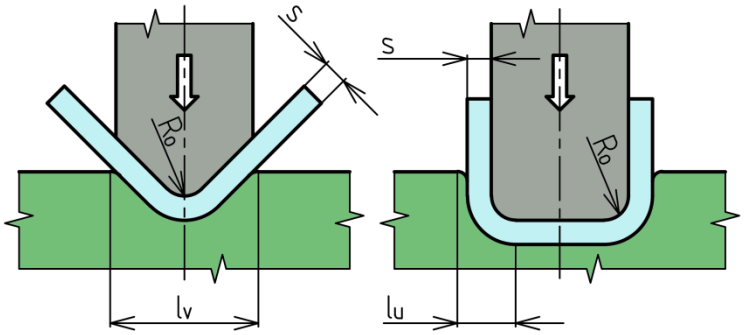
$$\operatorname{tg} \beta = 0{,}375 \cdot \frac{l_v}{k_o \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} \quad (2.25)$$

kde: l_v [mm] – vzdálenost mezi opěrami ohybnice
k_o [-] – koeficient odpružení dle tab. 7
R_e [MPa] – mez kluzu

Úhel odpružení pro ohyb do tvaru U

$$\operatorname{tg} \beta = 0{,}75 \cdot \frac{l_u}{k_o \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} \quad (2.26)$$

kde: l_u [mm] – vzdálenost mezi opěrami

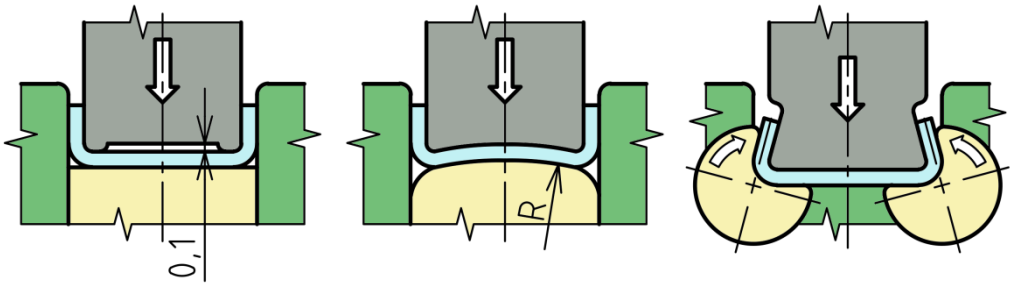


Obr. 29 Ohyb do tvaru V nebo U [28]

Tab. 7 Hodnoty součinitele pro výpočet odpružení [25]

R_0/s	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3	4	5	6
k_o	0,68	0,65	0,62	0,58	0,54	0,53	0,52	0,52	0,52

Odpružení je v mnohých případech ohýbání nežádoucí a je nutné provést vhodnou konstrukční úpravu ohýbacího nástroje k jeho omezení nebo úplnému odstranění. Jako základní metodu eliminace odpružení používanou obzvlášť při ohýbání na ohraňovacích lisech lze označit ohýbání o úhel, který je zvětšen o předem známou hodnotu odpružení. Dále je možné potlačit odpružení ohýbáním s kalibrací. Při kalibrování se v závěrečné fázi



Obr. 30 Konstrukční úpravy pro eliminaci odpružení [25]

ohybu zvýší ohýbací síla a odpružení od ohybu a rovných částí se vzájemně vyruší. Vhodná konstrukce funkčních částí nástroje vede také k eliminaci nežádoucího odpružení (obr. 30). Vybráním čela ohybníku je dosaženo ztenčení a většího zpevnění materiálu v rozích blízko ohybu. Další konstrukční úpravou je zaoblení čela ohybníku a vyhazovače tak, aby bylo po odtížení vyrovnáno odpružení dna a ramen součásti. Konstrukčně složitější je mechanismus otočných bočních čelistí, které tlakem ohybníku přehnou ramena součásti o úhel odpružení.

- Vůle při ohýbání
  Mezi činnými částmi ohýbadla je nutné vytvořit vhodnou vůli. Jedná se o mezeru mezi pevnou a pohyblivou částí nástroje tedy ohybnicí a ohybníkem. Její velikost odpovídá nejčastěji tloušťce ohýbaného materiálu v případě ohybu do tvaru V. Dosažení správné velikosti vůle je možné seřízením sevření lisu. Pro ohyb do tvaru U se stanoví ohýbací vůle v závislosti na toleranci tloušťky ohýbaného materiálu. Přibližné stanovení ohýbací vůle pro ocel lze určit jako 1,05 ÷ 1,15 násobek tloušťky materiálu.

- Minimální a maximální poloměr ohybu
  Ohyb je definován jeho poloměrem, který musí být v rozmezí jeho minimální a maximální vypočtené hodnoty pro daný materiál. Maximální poloměr ohybu je takový poloměr, při kterém dojde v krajních vrstvách ohýbaného materiálu k trvalé plastické deformaci. Pokud by byl poloměr větší než maximální, tak by v žádném místě průřezu nedošlo k překročení meze kluzu a došlo by tak k odpružení do původního tvaru.

  Maximální poloměr ohybu

$$R_{max} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \cong \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_e} \text{ [mm]} \tag{2.27}$$

  U malých poloměrů ohybu hrozí překročení meze pevnosti v krajních vrstvách materiálu. Minimální poloměr ohybu se tedy navrhuje tak, aby bylo v krajních vrstvách protažení materiálu menší, než je mezní prodloužení. Na jeho velikost má vliv tloušťka materiálu, plastičnost materiálu, kvalita povrchu, úhel ohybu a šířka ohýbaného polotovaru.

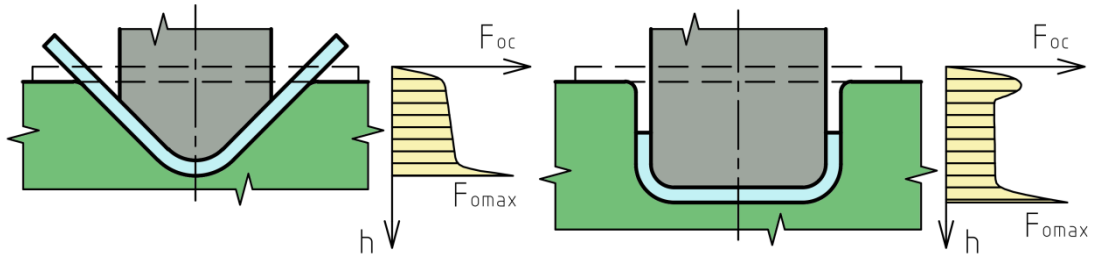
  Minimální poloměr ohybu

$$R_{min} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{max}} - 1 \right) = c_m \cdot s \text{ [mm]} \tag{2.28}$$

  kde: ε_{max} [-] – mezní prodloužení v krajních vláknech
  c_m [-] – součinitel vlivu materiálu pro měkkou ocel = 0,5 ÷ 0,6

2.2.3 Ohýbací síla a práce [2], [25], [26], [27], [28]

Stanovení ohýbací síly je rozdílné pro ohyb do tvaru V a tvaru U. Rozdílný je u obou způsobů i průběh ohýbací síly (obr. 31). Velikost ohýbací síly v závislosti na dráze nástroje je znázorněna v grafu vedle příslušného typu ohybu. V případě ohybu do tvaru V dochází z počátku k rychlému nárůstu síly a poté pokračuje plastická deformace. Probíhá-li ohýbání s kalibrací, pak ke konci dráhy dochází k výraznému nárůstu ohýbací síly. Průběh síly při ohýbání do tvaru U je podobný, jako do V. Pokles síly ve střední části je následován opět výrazným nárůstem síly z důvodu kalibrace.



Obr. 31 Průběh ohýbací síly [27]

Pro zjednodušené určení ohýbací síly při ohýbání do pravého úhlu a poloměru ohybu 0,8 ÷ 3 násobek tloušťky materiálu lze použít následující vztah

Ohýbací síla pro V ohyb

$$F_o = \frac{1{,}2 \cdot R_m \cdot b \cdot s^2}{l_v} \text{ [N]} \tag{2.29}$$

Ohýbací síla pro V ohyb podle Oehlera

$$F_o = \frac{C \cdot R_m \cdot b \cdot s^2}{l_v} \text{ [N]} \quad (2.30)$$

kde: C [-] – součinitel geometrie ohybu

$$C = 1 + \frac{4 \cdot s}{l_v}$$

Ohýbací síla pro U ohyb

$$F_o = \frac{R_m \cdot b \cdot s^2}{2} \text{ [N]} \quad (2.31)$$

Výslednou ohýbací sílu dále ovlivňují faktory jako tření materiálu o funkční části ohýbadla, nebo zvýšení ohýbací síly na konci dráhy nástroje vlivem síly potřebné pro kalibrování ohybu. Při použití přidržovače obzvláště v případě ohybu do tvaru U je celková ohýbací síla zvýšena o odpor přidržovače.

Kalibrační síla

$$F_k = (1 \div 1{,}75) \cdot F_o \text{ [N]} \quad (2.32)$$

Přidržovací síla

$$F_p = (0{,}25 \div 0{,}33) \cdot F_o \text{ [N]} \quad (2.33)$$

Celková ohýbací síla

$$F_{oc} = F_o + F_k + F_p \text{ [N]} \quad (2.34)$$

Pro zjednodušení se většinou celková ohýbací síla volí jako dvojnásobek síly vypočtené. Poté není nutné uvažovat s výpočtem síly kalibrační a přidržovací, jelikož tyto síly jsou již započteny. Celková práce ohýbání závisí na celkové ohýbací síle a dráze nástroje. Její velikost se rovná ploše pod křivkou dané závislosti.

Ohýbací práce

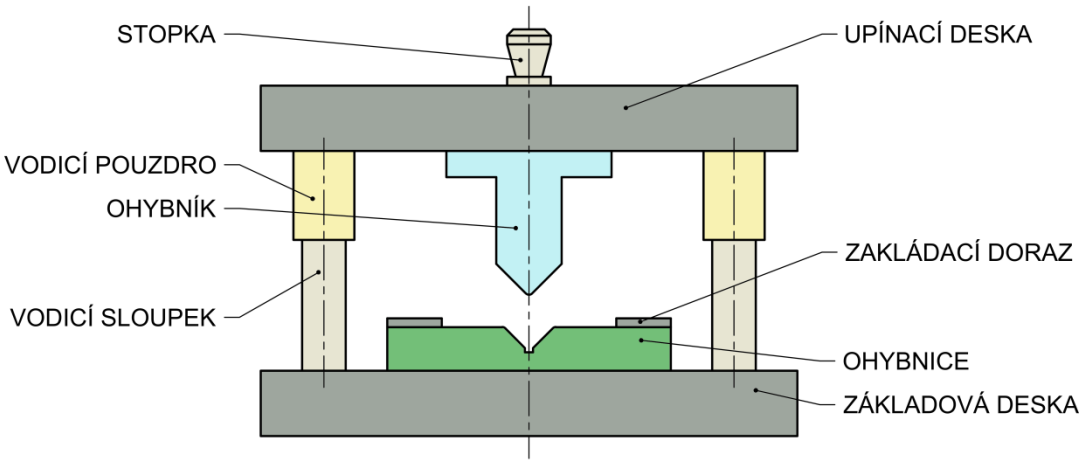
$$A_o = F_{oc} \cdot h_o \cdot k_{v,u} \text{ [J]} \quad (2.35)$$

kde: h_o [mm] – zdvih nástroje

$k_{v,u}$[-] = 0,33 (V ohyb), 0,66 (U ohyb) – koeficient zaplnění diagramu

2.2.4 Ohýbací nástroje a technologičnost [24], [25], [26], [27]

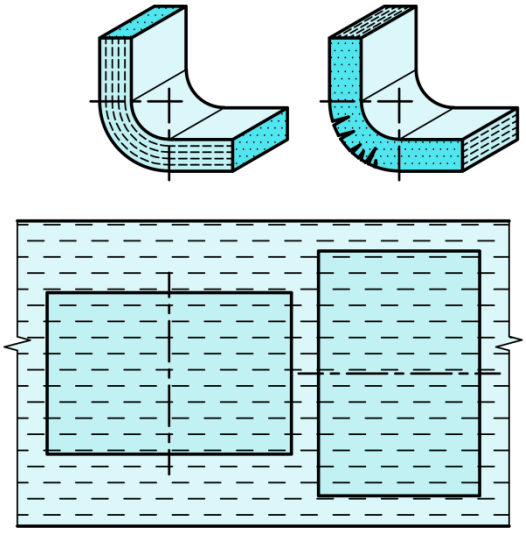
Hlavními činnými částmi ohýbacích nástrojů (obr. 32) jsou ohybníky a ohybnice. Jejich konstrukce závisí na velikosti tvářené součástky, mechanických vlastnostech, složitosti tvaru součásti nebo velikosti výrobní série. Ostatní části ohýbacích nástrojů jako vodící sloupky a pouzdra nebo základové desky lze použít pro nástroje střižné i ohybové. Pro běžné ohýbací nástroje se však vedení nenavrhuje. Ohybníky se vyrábí z jednoho kusu materiálu ve tvaru příslušného ohybu s tvarovými odlehčeními pro ohraňovací lisy. Složitější ohybníky a ohybníky velkých rozměrů lze vyrábět dělené, vložkované kalenými lištami. Poloměr ohybníku odpovídá vnitřnímu poloměru ohybu součásti. Ohyby kolmo na směr pohybu beranu lisu lze realizovat za pomoci bočních klínů. Konstrukce ohybnice je celistvá nebo vložkovaná. Jako doplněk ohybnice se často navrhuje vyhazovač, který má funkci jak vyhazovací tak přidržovací. Při pohybu horní pohyblivé části nástroje směrem dolů se materiál zatlačí do ohybnice a obzvlášť při ohybu do tvaru U by mohl vlivem odpružení v ohybnici ulpívat. Současně plní vyhazovač funkci přidržovače, kdy při tlaku na materiál brání jeho posunu.



Obr. 32 Ohýbací nástroj [24]

Tvářecí nástroj by měl být navržen s ohledem na technologičnost ohýbaných součástí. Kvalitu ohybu ovlivňuje celá řada vlivů. Odpružení materiálu způsobuje to, že výsledný úhel ohybu nemusí odpovídat úhlu požadovanému. Ohýbání širokých pásů způsobuje deformaci průřezu ve směru tloušťky materiálu. Při ohybu úzkých pásů a profilů dochází zase k deformaci ve směru šířky materiálu.

Vhodná orientace ohybu vůči směru vláken v kovu zabrání vzniku trhlin v tažené části průřezu (obr. 33). Osa ohybu by měla být správně natočena kolmo na směr vláken. V případě orientace osy rovnoběžně se směrem vláken je možné zabránit vzniku trhlin zvětšením poloměru ohybu. Další způsoby snížení náchylnosti ke vzniku trhlin jsou spojené s kvalitou hrany na vnější straně ohybu. Orientace otřepu po stříhání na vnitřní stranu ohybu nebo jeho úplné odstranění případně sražení nebo zaoblení snižuje riziko výskytu trhlin.



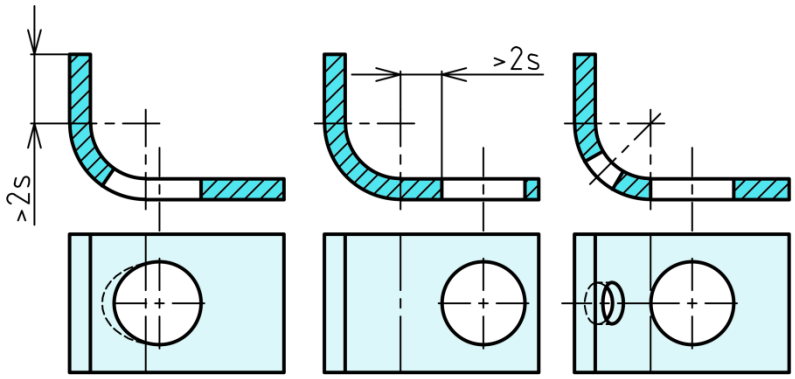
Obr. 33 Vliv směru vláken [26]

Úhel odpružení nabývá vyšších hodnot v případě ohýbání s velkým poloměrem ohybu. Volí se tedy ohyb s malou hodnotou jeho poloměru. Velice malý poloměr ohybu zvaný ostrý ohyb není však při tváření za studena realizovatelný ani pro nejtvárnější materiály. Volí se tak poloměr o něco vyšší hodnoty než minimální poloměr ohybu. Rozměry jsou často netolerované, nebo se řídí tabulkovými hodnotami v závislosti na poloměru ohybu (tab. 8).

Tab. 8 Tolerance poloměru ohybu [26]

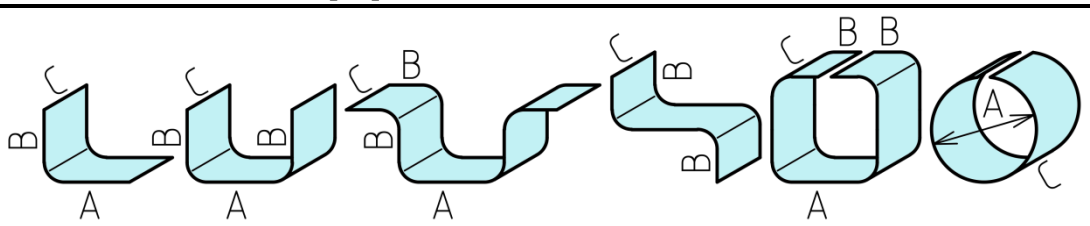
Poloměr ohybu r [mm]	<3	3 ÷ 6	6 ÷ 20	>20
Tolerance ± [mm]	0,5	1	2	3

Vlivem ohybu dochází v jeho blízkém okolí k deformaci materiálu. Pokud jsou v jeho blízkosti konstrukční prvky jako třeba otvory, tak by docházelo ke změně jejich geometrie. Není-li tato deformace přípustná, pak musí být otvor v minimální vzdálenosti dvojnásobku tloušťky materiálu od počátku ohybu (obr. 34). Pokud je potřeba umístit otvor v menší vzdálenosti od ohybu, pak může být přímo v oblasti ohybu zhotoven otvor odlehčovací, na kterém se projeví deformace. Další možností je zhotovení otvoru v blízkosti ohybu až po ohnutí. Ohyb lze provést bez zvláštních opatření pouze za podmínky, že neleží příliš blízko okraji materiálu. Musí být zachována nejmenší délka ramene, která je rovna dvojnásobku tloušťky materiálu nebo minimálně 2 mm. Tolerování délek ramen závisí na tloušťce materiálu a geometrii ohybu (tab. 9).



Obr. 34 Vzdálenost otvoru a délka ramene [26]

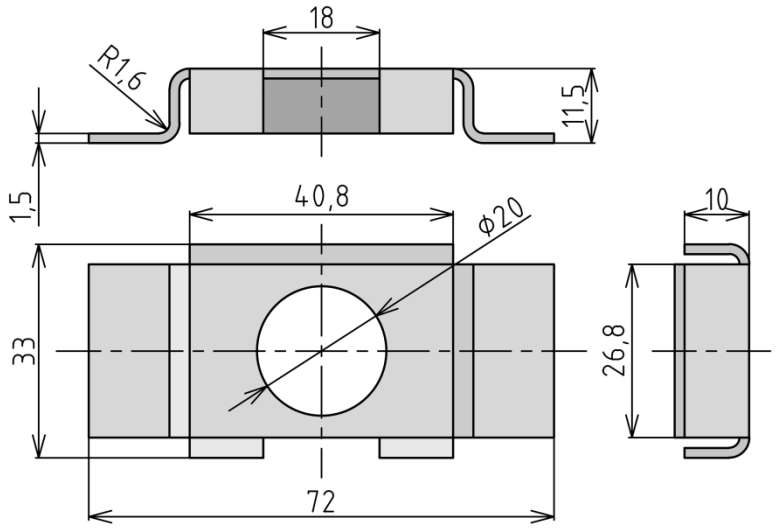
Tab. 9 Tolerance délek ramen [26]



C [mm]	S [mm]	A [mm]			B [mm]		
		< 50	50÷100	100÷150	< 50	50÷100	100÷150
100	< 1	0,3	0,4	0,5	0,5	0,8	1,0
	1 ÷ 3	0,4	0,6	0,8	0,8	1,0	1,5
	3 ÷ 6	0,6	0,8	1,0	1,0	1,5	1,5
100÷200	< 1	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5
	1 ÷ 3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5	1,5
	3 ÷ 6	0,6	0,8	1,0	1,0	1,5	2,0
200÷400	< 1	0,5	0,6	0,8	0,8	1,0	1,5
	1 ÷ 3	0,6	0,8	1,0	1,0	1,5	1,5
	3 ÷ 6	0,8	1,0	1,2	1,0	1,5	2,0
400÷800	< 1	0,6	0,8	1,0	1,0	1,5	1,5
	1 ÷ 3	0,8	1,0	1,2	1,0	1,5	2,0
	3 ÷ 6	1,0	1,2	1,5	1,5	2,0	2,5

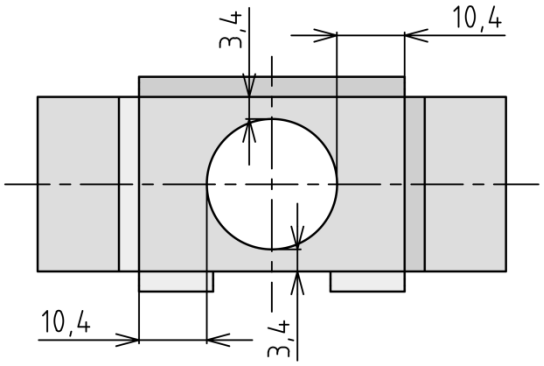
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY

Součást klec ECR 10 12 je navržena jako ohýbaná součást z plechu tloušťky 1,5 mm. Jedná se o ocelový plech DC01 (11 321) vhodný ke tváření za studena. Následujícím krokem je tedy posouzení technologičnosti výroby. Na rozměry součásti nejsou vztaženy žádné konkrétní požadavky ve formě tolerancí rozměrů, proto lze usoudit, že po stránce rozměrové přesnosti nebude problém vybranou technologií součást vyrobit. Pro následující úvahy jsou na obr. 35 vyznačeny základní rozměry hotové součásti.



Obr. 35 Klec ECR 10 12

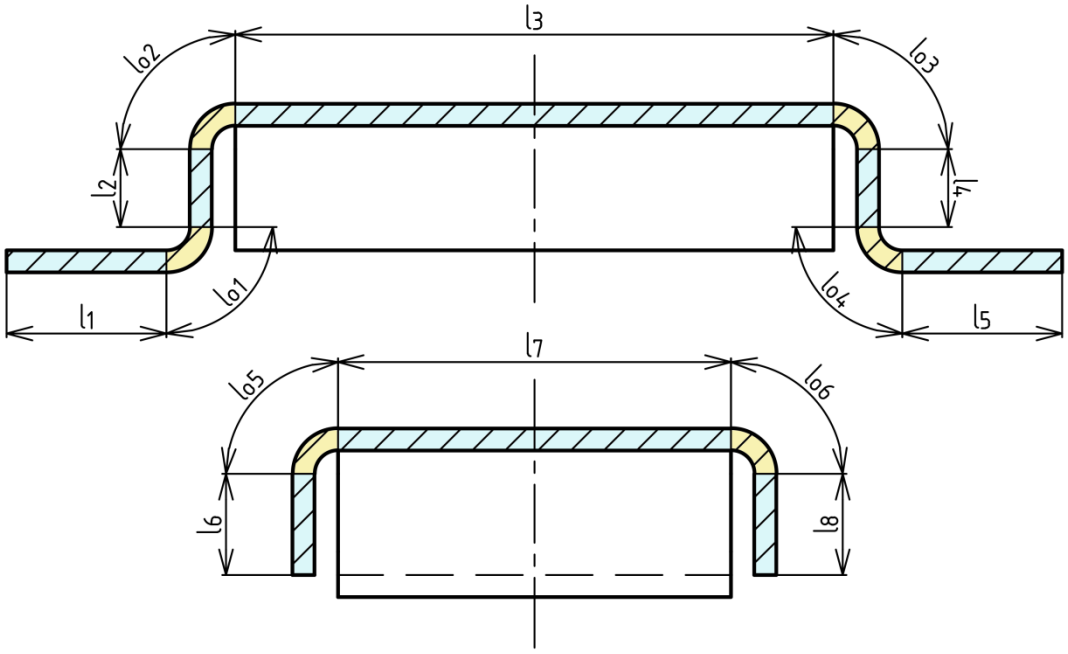
Otvor ve středu součásti není spasován s žádným protikusem a slouží pouze pro přístup šroubu k matici. Vzdálenost otvoru od kraje součásti a od hrany ohybu je jedním z kontrolovaných parametrů. Podle tab. 5 je minimální přípustná hodnota pro vzdálenost kruhového otvoru od hranice střihu pro tloušťku materiálu 1,5 mm rovna hodnotě 2,4 mm. Také je vhodné určit minimální vzdálenost otvoru od okraje ohybu, aby nedocházelo k deformaci geometrie otvoru. Podle obr. 34 dosahuje vhodná vzdálenost minimálně dvojnásobku tloušťky ohýbaného materiálu. Pro tloušťku materiálu 1,5 mm to odpovídá tedy nejméně 3 mm od hrany ohybu. Výše uvedené podmínky jsou na navržené součásti splněny, jak dokazuje obr. 36.



Obr. 36 Vzdálenost otvoru

3.1 Rozvinutý tvar součásti

Pro výrobu součásti byla zvolena technologie postupového sdruženého nástroje, který v sobě kombinuje přípravu rozvinutého tvaru stříháním a ohyb rozvinutého tvaru do finálního vzhledu. Nejprve je tedy nutné daný rozvinutý tvar definovat. Veškeré rozměry a rozvinuté délky lze zakótovat ve dvou kolmých řezech (obr. 37). Výpočet délek rovných úseků je proveden podle známých rozměrů ze zadání. Dále jsou rozměry ověřeny také podle modelu součásti v programu Catia V5. Výpočet jednotlivých délek rovných úseků a délek ohnutých částí je zjednodušen díky symetrii součásti.



Obr. 37 Délky ramen a oblouků

- Rovné úseky

$$l_1 = l_5 = (72 - 40{,}8 - 2 \cdot 1{,}5 - 4 \cdot 1{,}6)/2 = 10{,}9 \text{ mm}$$

$$l_2 = l_4 = 11{,}5 - 2 \cdot (1{,}5 + 1{,}6) = 5{,}3 \text{ mm}$$

$$l_3 = 40{,}8 \text{ mm}$$

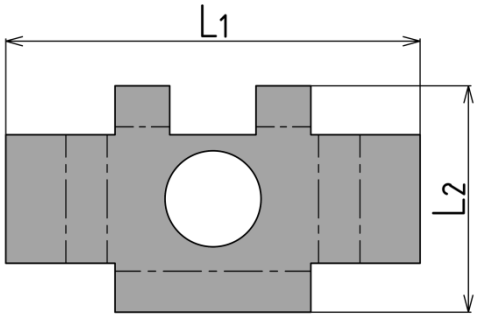
$$l_6 = l_8 = 10 - 1{,}5 - 1{,}6 = 6{,}9 \text{ mm}$$

$$l_7 = 26{,}8 \text{ mm}$$

- Ohnuté úseky

$$R_o/s = 1{,}6/1{,}5 = 1{,}066 \cong 1$$

Volba součinitele ztenčení podle tabulky 6



Obr. 38 Rozvinuté délky

$$x = 0{,}42$$

$$l_{o1} = \frac{\pi}{180} \cdot \gamma \cdot (R_0 + x \cdot s) = \frac{\pi}{180} \cdot 90 \cdot (1{,}6 + 0{,}42 \cdot 1{,}5) = 3{,}5 \text{ mm}$$

$$l_{o1} = l_{o2} = l_{o3} = l_{o4} = l_{o5} = l_{o6}$$

- Celková rozvinutá délka v obou řezech (obr. 38)

$$L_1 = \sum_{i=1}^{n} l_i + \sum_{i=1}^{n-1} l_{oi} = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_{o1} + l_{o2} + l_{o3} + l_{o4}$$
$$= 10{,}9 + 5{,}3 + 40{,}8 + 5{,}3 + 10{,}9 + 4 \cdot 3{,}5 = 87{,}2 \text{ mm}$$

$$L_2 = \sum_{i=1}^{n} l_i + \sum_{i=1}^{n-1} l_{oi} = l_6 + l_7 + l_8 + l_{o5} + l_{o6} = 6{,}9 + 26{,}8 + 6{,}9 + 2 \cdot 3{,}5 = 47{,}6 \text{ mm}$$

Společně se zadáním byl firmou dodán výkres součásti, podle kterého byl vytvořen její model ve 3D programu. Proběhlo zpracování modelu pomocí nástroje na tvorbu součástí z plechu. Nástroj obsahuje vhodnou funkci, kterou lze z rozvinutého tvaru vytvořit ohnutou součást nebo lze zpětně získat rozvinutý tvar součásti, pokud je modelována ve finálním tvaru. Byla použita druhá možnost, kdy došlo ke stanovení rozvinuté délky L_1 = 86,4 mm a L_2 = 47,2 mm. Hodnoty budou použity pro další postup.

3.2 Rozložení na pásu

Většinou existuje více možností umístění rozvinutého tvaru na pásu plechu. Zhodnocení jednotlivých možností dává bližší představu o tom, jaká orientace je v daném případě nejvhodnější. Zároveň však do úvahy o volbě vstupního polotovaru a umístění rozvinutého tvaru vstupují možnosti výroby pro daný průmyslový podnik. Pro výrobky ve velkých sériích se často nabízí výhodnější použití svitku plechu před pásy stříhanými z tabulí plechu. Pro svitek je ale nutné, aby výrobní linka zahrnovala odvíjecí zařízení. Tímto typem stroje však výrobní podnik nedisponuje. Úvaha se tedy zužuje na pásy plechu konečné délky ustřižené z tabule. Vstupním materiálem je plech o rozměrech 3000 mm x 1500 mm. Dělení tabule je možné ve dvou směrech, kdy vznikají delší nebo kratší pásy. Rovněž mohou být zvoleny dvě varianty orientace přístřihu na pásu plechu a to podélně nebo příčně. Na vnějších rozměrech rozvinutého tvaru závisí velikost technologických přídavků na velikosti okrajů a velikosti můstků (tab. 10). Můstky se přidávají mezi jednotlivé výstřižky, aby pomáhali s jejich vedením, ale zvyšují procento nevyužitého materiálu.

Tab. 10 Doporučené velikosti okrajů a můstků [22]

Tloušťka materiálu	**Šířka pásu**							
	do 15		15 ÷ 50		50 ÷ 100		100 ÷ 200	
	e	**f**	**e**	**f**	**e**	**f**	**e**	**f**
0,1 ÷ 0,9	1,2	1,5	1,5	1,8	1,8	2,2	2,5	3,1
1	1,3	1,6	1,6	2	2	2,5	3	3,7
1,3	1,4	1,7	2	2,5	2,5	3,1	3,5	4,3
1,5	1,5	1,8	2,2	2,7	2,5	3,1	3,5	4,3
1,8	1,8	2,2	2,2	2,8	2,5	3,1	3,5	4,3
2	2	2,5	2,5	3,1	3	3,7	4	5
2,2	2,2	2,7	2,6	3,2	3,2	4	4,2	5,2
2,5	2,5	3,1	2,8	3,5	3,2	4	4,2	5,2
2,8	2,8	3,5	3	3,7	3,2	4	4,2	5,2
3	3	3,7	3,2	4	3,5	4,3	5	5,5

- Varianta 1
  Uspořádání výstřižků na pásu plechu podélně (obr. 39).

  Délka výstřižku l_{vs}

  $l_{vs} = 86{,}4\ \text{mm}$

  Šířka výstřižku s_v

  $s_v = 47{,}2\ \text{mm}$

  Můstek e

  $e = 2{,}5\ \text{mm}$

  Šířka okraje f

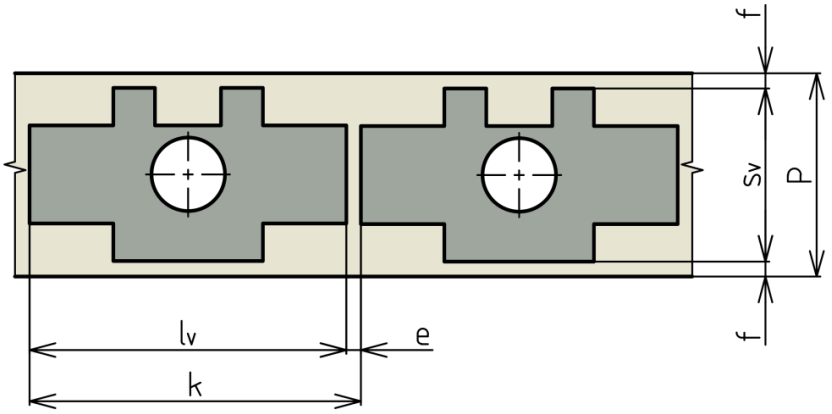
  $f = 3{,}1\ \text{mm}$

  Délka kroku k

  $k = l_v + e = 86{,}4 + 2{,}5 = 88{,}9\ \text{mm}$

  Šířka pásu P

  $P = s_v + 2 \cdot f = 47{,}2 + 2 \cdot 3{,}1 = 53{,}4\ \text{mm}$



Obr. 39 Podélné uspořádání

- Varianta 2
  Uspořádání výstřižků na pásu plechu příčně (obr. 40).

  Délka výstřižku l_{vs}

  $l_{vs} = 47{,}2\ \text{mm}$

  Šířka výstřižku s_v

  $s_v = 86{,}4\ \text{mm}$

  Můstek e

  $e = 2{,}5\ \text{mm}$

  Šířka okraje f

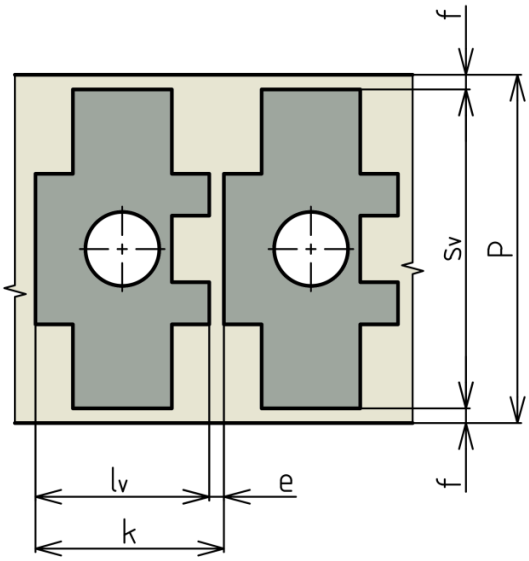
  $f = 3{,}1\ \text{mm}$

  Délka kroku k

  $k = l_v + e = 47{,}2 + 2{,}5 = 49{,}7\ \text{mm}$

  Šířka pásu P

  $P = s_v + 2 \cdot f = 86{,}4 + 2 \cdot 3{,}1 = 92{,}6\ \text{mm}$



Obr. 40 Příčné uspořádání

- Využití materiálu

  Vstupní veličinou výpočtu procentuálního využití materiálu je plocha výstřižku. Součástí plochy výstřižku je i plocha otvorů, které tak nesnižují procento využití materiálu. Plocha součásti byla zjištěna softwarem a ověřena výpočtem. Nejvýhodnější se často jeví použití dlouhého svitku plechu, ze kterého lze vyrobit mnohonásobně větší množství součástí na jedno zavedení do nástroje, než lze vyrobit z pásů plechu stříhaných z tabule.

  Plocha výstřižku ze softwaru $S_v = 2\,964\ mm^2$

  Počet výstřižků za rok $n_v = 10\,000\ ks$

  Délka tabule $l_t = 3\,000\ mm$

  Šířka tabule $s_t = 1\,500\ mm$

- Varianta 1A (obr. 41)

  Počet pásů

  $$n_p = \frac{l_t}{P} = \frac{3\,000}{53{,}4} = 56{,}18 \Rightarrow 56\ ks$$

  Počet výstřižků na jeden pás

  $$n_{vp} = \frac{s_t}{k} = \frac{1\,500}{88{,}9} = 16{,}87 \Rightarrow 16\ ks$$

  Počet výstřižků na jedné tabuli

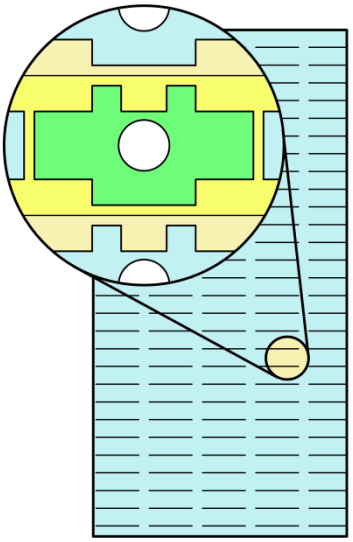
  $$n_{vt} = n_p \cdot n_v = 56 \cdot 16 = 896\ ks$$

  Počet tabulí

  $$n_t = \frac{n_v}{n_{vt}} = \frac{10\,000}{896} = 11{,}16 \Rightarrow 12\ ks$$

  Procentuální využití tabule

  $$\eta_t = \frac{S_v \cdot n_{vt}}{l_t \cdot s_t} \cdot 100 = \frac{2\,964 \cdot 896}{3\,000 \cdot 1\,500} \cdot 100 = 59{,}02\ \%$$



Obr. 41 Varianta 1A

- Varianta 1B (obr. 42)

  Počet pásů

  $$n_p = \frac{s_t}{P} = \frac{1\,500}{53{,}4} = 28{,}09 \Rightarrow 28\ ks$$

  Počet výstřižků na jeden pás

  $$n_{vp} = \frac{l_t}{k} = \frac{3\,000}{88{,}9} = 33{,}75 \Rightarrow 33\ ks$$

  Počet výstřižků na jedné tabuli

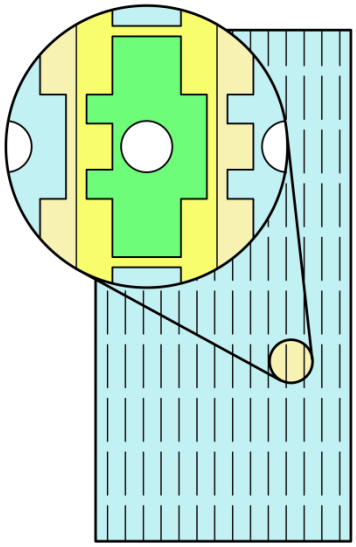
  $$n_{vt} = n_p \cdot n_v = 28 \cdot 33 = 924\ ks$$

  Počet tabulí

  $$n_t = \frac{n_v}{n_{vt}} = \frac{10\,000}{924} = 10{,}82 \Rightarrow 11\ ks$$

  Procentuální využití tabule

  $$\eta_t = \frac{S_v \cdot n_{vt}}{l_t \cdot s_t} \cdot 100 = \frac{2\,964 \cdot 924}{3\,000 \cdot 1\,500} \cdot 100 = 60{,}86\ \%$$



Obr. 42 Varianta 1B

- Varianta 2A (obr. 43)

  Počet pásů

  $$n_p = \frac{l_t}{P} = \frac{3\,000}{92{,}6} = 32{,}40 \Rightarrow 32 \text{ ks}$$

  Počet výstřižků na jeden pás

  $$n_{vp} = \frac{s_t}{k} = \frac{1\,500}{49{,}7} = 30{,}18 \Rightarrow 30 \text{ ks}$$

  Počet výstřižků na jedné tabuli

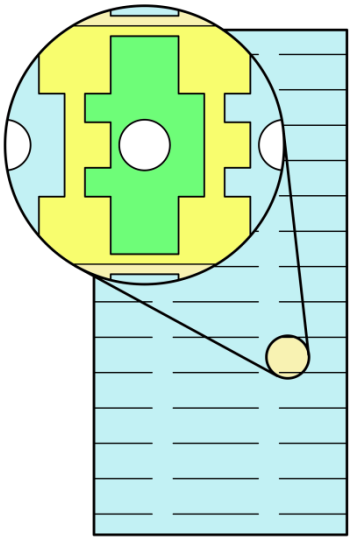
  $$n_{vt} = n_p \cdot n_v = 32 \cdot 30 = 960 \text{ ks}$$

  Počet tabulí

  $$n_t = \frac{n_v}{n_{vt}} = \frac{10\,000}{960} = 10{,}42 \Rightarrow 11 \text{ ks}$$

  Procentuální využití tabule

  $$\eta_t = \frac{S_v \cdot n_{vt}}{l_t \cdot s_t} \cdot 100 = \frac{2\,964 \cdot 960}{3\,000 \cdot 1\,500} \cdot 100 = 63{,}23\ \%$$



Obr. 43 Varianta 2A

- Varianta 2B (obr. 44)

  Počet pásů

  $$n_p = \frac{s_t}{P} = \frac{1\,500}{92{,}6} = 16{,}20 \Rightarrow 16 \text{ ks}$$

  Počet výstřižků na jeden pás

  $$n_{vp} = \frac{l_t}{k} = \frac{3\,000}{49{,}7} = 60{,}36 \Rightarrow 60 \text{ ks}$$

  Počet výstřižků na jedné tabuli

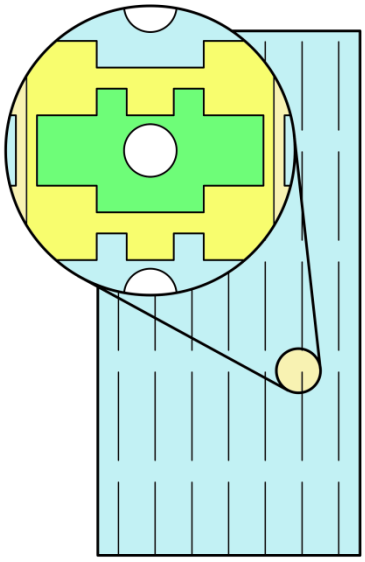
  $$n_{vt} = n_p \cdot n_v = 16 \cdot 60 = 960 \text{ ks}$$

  Počet tabulí

  $$n_t = \frac{n_v}{n_{vt}} = \frac{10\,000}{960} = 10{,}42 \Rightarrow 11 \text{ ks}$$

  Procentuální využití tabule

  $$\eta_t = \frac{S_v \cdot n_{vt}}{l_t \cdot s_t} \cdot 100 = \frac{2\,964 \cdot 960}{3\,000 \cdot 1\,500} \cdot 100 = 63{,}23\ \%$$



Obr. 44 Varianta 2B

Procentuální využití materiálu je nejvyšší v obou případech příčného uspořádání výstřižků na pásu plechu (varianta 2A a varianta 2B). Hodnota využití se tedy v obou případech rovná 63,23 %. Počet výstřižků na jedné tabuli dosahuje hodnoty 960 kusů. Celá roční výrobní série je zhotovitelná za použití jedenácti tabulí plechu. S ohledem na výrobní možnosti podniku je nejvhodnějším řešením varianta 2A.

- Konečné stanovení parametrů
  Součást se skádá z prvků o velice malých rozměrech, proto jsou dále přehodnoceny navržené velikosti můstků a šířky okrajů. Zvětšení těchto rozměrů zajišťuje lepší vedení výstřižku v nástroji a umožňuje úspornější uspořádání výrobních kroků. Za nepříznivý důsledek zvětšení rozměrů lze označit výrazné snížení procenta využitého materiálu.

  Uspořádání výstřižků na pásu plechu

  Délka výstřižku lv

  $$l_v = 47{,}2 \text{ mm}$$

  Šířka výstřižku sv

  $$s_v = 86{,}4 \text{ mm}$$

  Můstek e

  $$e = 4 \text{ mm}$$

  Šířka okraje f

  $$f = 11{,}8 \text{ mm}$$

  Délka kroku k

  $$k = l_v + e = 47{,}2 + 12{,}8 = 60 \text{ mm}$$

  Šířka pásu P

  $$P = s_v + 2 \cdot f = 86{,}4 + 2 \cdot 11{,}8 = 110 \text{ mm}$$

  Počet pásů

  $$n_p = \frac{l_t}{P} = \frac{3\,000}{110} = 27{,}27 \Rightarrow 27 \text{ ks}$$

  Počet výstřižků na jeden pás

  $$n_{vp} = \frac{s_t}{k} = \frac{1\,500}{60} = 25 \text{ ks}$$

  Počet výstřižků na jedné tabuli

  $$n_{vt} = n_p \cdot n_v = 27 \cdot 25 = 675 \text{ ks}$$

  Počet tabulí

  $$n_t = \frac{n_v}{n_{vt}} = \frac{10\,000}{675} = 14{,}81 \Rightarrow 15 \text{ ks}$$

  Procentuální využití tabule

  $$\eta_t = \frac{S_v \cdot n_{vt}}{l_t \cdot s_t} \cdot 100 = \frac{2\,964 \cdot 675}{3\,000 \cdot 1\,500} \cdot 100 = 44{,}46\,\%$$

  Výsledné reálné procentuální využití materiálu 44,46 % je proti předchozí návrhové hodnotě asi o jednu třetinu nižší. Geometrie součásti neumožňuje posun součástí za středový můstek, protože ohyby jsou vyžadovány podél všech čtyř okrajů. Pro vedení výstřižku byl tedy zvolen vnější vodící rámeček, se kterým je součást spojena pouze jedním můstkem, který je nutné v závěrečném kroku přerušit, aby mohl být proveden ohyb. Ohyby jsou provedeny ve dvou vzájemně kolmých směrech a nelze se tak vyhnout orientaci osy ohybu rovnoběžně s vlákny plechu po válcování. Úhel ohybu má ve všech šesti případech velikost 90° a nemělo by tak docházet k tvorbě trhlin. Délka jednoho kroku byla stanovena na 60 mm a šířka pásu na 110 mm.

3.3 Rozvržení operací

V předchozí kapitole bylo zvoleno příčné uspořádání výstřižků na pásu plechu. Předběžně došlo k navýšení některých rozměrů, tak aby bylo možné výstřižky posouvat z jednoho kroku do dalšího. Zvětšení rozměrů můstku a šířky okraje umožňuje obstřižení vnějších okrajů součásti. Zajištění vyrobitelnosti závisí na vhodné kombinaci tvářecích operací stříhání a ohýbání. Přesného navázání jednotlivých střižných operací lze docílit použitím hledáčků, které procházejí přes již vytvořený otvor.

- Varianta 1 (obr. 45)

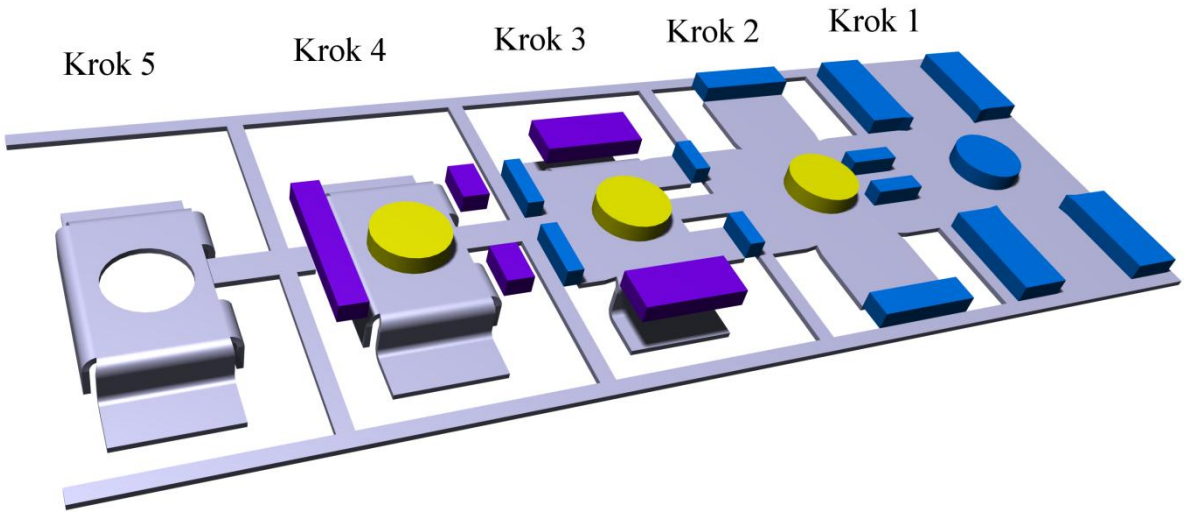
  Krok 1 – vystřižení čtyř obdélníkových otvorů 30 x 14 mm
  – vystřižení kruhového otvoru Ø 20 mm

  Krok 2 – zahledání na otvor Ø 20 mm
  – vystřižení dvou obdélníkových otvorů 14,6 x 5 mm
  – vystřižení dvou obdélníkových otvorů 28 x 7,8 mm

  Krok 3 – zahledání na otvor Ø 20 mm
  – vystřižení dvou obdélníkových otvorů 12 x 4,4 mm
  – vystřižení dvou obdélníkových otvorů 17 x 4,4 mm
  – ohnutí ramen podélně

  Krok 4 – zahledání na otvor Ø 20 mm
  – ohnutí ramen příčně

  Krok 5 – odstřižení součásti



Obr. 45 Varianta 1

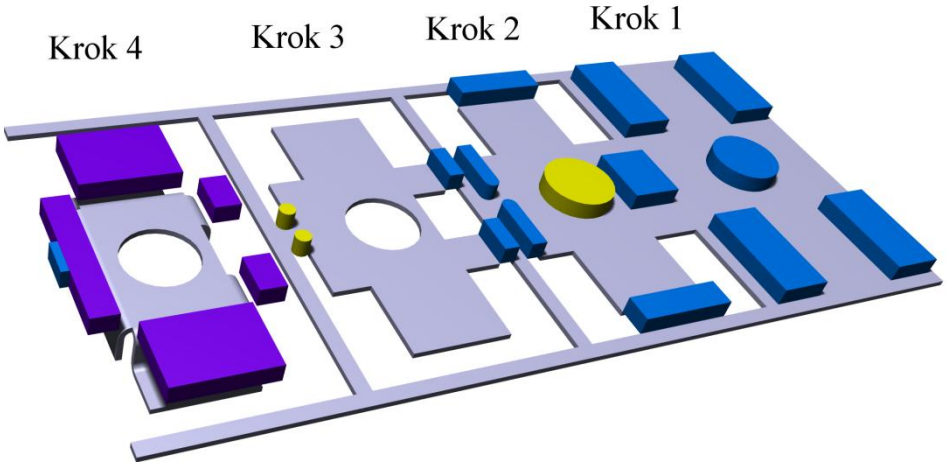
- Varianta 2 (obr. 46)

  Krok 1 – vystřižení obdélníkových otvorů 30,6 x 14,6 mm
  – vystřižení kruhového otvoru Ø 20 mm

  Krok 2 – zahledání na otvor Ø 20 mm
  – vystřižení obdélníkového otvoru 18 x 14,6 mm
  – vystřižení obdélníkových otvorů 28 x 7,8 mm
  – vystřižení otvorů 17,6 x 4,4 mm

Krok 3 – zahledání na otvory Ø 4,4 mm
– vystřižení obdélníkových otvorů 11,4 x 4,4 mm

Krok 4 – ohnutí ramen příčně i podélně
– odstřižení součásti



Obr. 46 Varianta 2

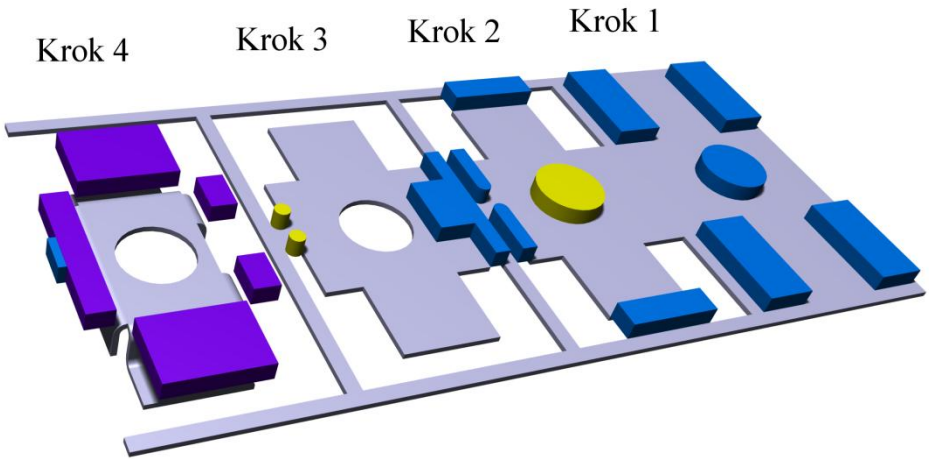
- Varianta 3 (obr. 47)

Krok 1 – vystřižení obdélníkových otvorů 30,6 x 14,6 mm
– vystřižení kruhového otvoru Ø 20 mm

Krok 2 – zahledání na otvor Ø 20 mm
– vystřižení obdélníkových otvorů 26,8 x 7,8 mm
– vystřižení otvorů 17,6 x 4,4 mm

Krok 3 – zahledání na otvory Ø 4,4 mm
– vystřižení tvarového otvoru 14,6 x 40,8 mm

Krok 4 – ohnutí ramen dolů příčně i podélně
– odstřižení součásti



Obr. 47 Varianta 3

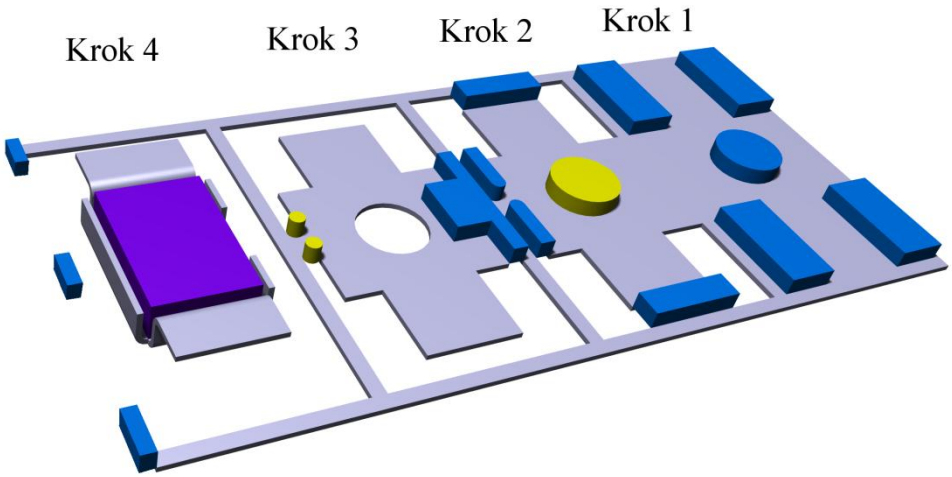
- Varianta 4 (obr. 48)

  Krok 1 – vystřižení obdélníkových otvorů 30,6 x 14,6 mm
  – vystřižení kruhového otvoru Ø 20 mm

  Krok 2 – zahledání na otvor Ø 20 mm
  – vystřižení obdélníkových otvorů 26,8 x 7,8 mm
  – vystřižení otvorů 17,6 x 4,4 mm

  Krok 3 – zahledání na otvory Ø 4,4 mm
  – vystřižení tvarového otvoru 14,6 x 40,8 mm

  Krok 4 – ohnutí ramen nahoru příčně i podélně
  – odstřižení součásti a rozstřižení odpadu



Obr. 48 Varianta 4

První varianta rozvržení operací používá více jednodušších střižníků a ohybníků. Ohyby jsou provedeny ve dvou po sobě následujících krocích. Toto uspořádání obsahuje zbytečný pátý krok, který je téměř prázdný a slouží pouze k odstřižení hotové součásti. Uspořádání zároveň nedovoluje použití jednodušší pevné vodící desky. Vedení střižníků by muselo být zajištěno odpruženou vodící deskou v horní části nástroje. Vedení pásu plechu by muselo probíhat pomocí pružných vodících kolíčků.

Druhá varianta je již logičtěji uspořádána na tři kroky čistě střižných operací a čtvrtý krok operace ohýbací s odstřižením hotové součásti. V jejím druhém kroku probíhá zahledání na kruhový otvor a střih čtvercového otvoru. Mezi těmito operacemi však vzniká příliš malá mezera, která by vedla k nadměrnému namáhání střižnice v daném místě.

Třetí varianta odstraňuje výše zmíněné nedostatky sdružením dvou střižných operací ve třetím kroku. Střižník ve tvaru písmene T má kolem sebe více prostoru. Zahledání ve třetím kroku však nesmí probíhat na středový otvor.

Čtvrtá varianta uvažuje změnu směru ohýbání, kdy ohybník působí shora. Vedení střižníků je možné zajistit pomocí pevné vodící desky, která je součástí spodní části nástroje. Vedení pásu plechu je možné realizovat bez nadzvedávání, protože operace ohýbání probíhá v posledním kroku a součást se z nástroje vymístí pomocí vyhazovačů. Na obrázku jsou znázorněny tři střihy na konci pásu plechu, kterými bude oddělena součást před ohybem a rozstřižen odpad. Pro konstrukci nástroje byla zvolena varianta 4.

3.4 Technologické výpočty

Pro konstrukci postupového nástroje je nezbytné provést následující výpočty, které vychází převážně ze vzorců stanovených v předešlých kapitolách. Výpočty se vztahují na operace stříhání a ohýbání. Bude uvažováno se zvolenou variantou nástřihového plánu.

3.4.1 Střižná část

- Výpočet střižného odporu
  Pro následující výpočty je nutné stanovit střižný odpor nebo také mez pevnosti ve střihu. Hodnota střižného odporu závisí na mezi pevnosti v tahu pro daný materiál a vypočte se dle vzorce (2.5). Materiál dle tab. 1 vykazuje velikost meze pevnosti v tahu 410 MPa.

  $$\tau_s = 0{,}8 \cdot R_m = 0{,}8 \cdot 410 = 328 \text{ MPa}$$

- Výpočet střižné vůle
  Stanovení hodnoty střižné vůle předchází výpočet střižné mezery. Střižná mezera by měla být po celém obvodu čáry střihu stejná. Střižná vůle je pak pouze jejím dvojnásobkem.

  Výpočet střižné mezery pro plechy kde s ≤ 3 mm dle vzorce (2.2)

  $$z = 0{,}32 \cdot c \cdot s \cdot \sqrt{\tau_s} = 0{,}32 \cdot 0{,}023 \cdot 1{,}5 \cdot \sqrt{0{,}8 \cdot 410} = 0{,}2 \text{ mm}$$

  Výpočet střižné vůle podle vzorce (2.1)

  $$v_s = 2 \cdot z = 2 \cdot 0{,}2 = 0{,}4 \text{ mm}$$

- Výpočet střižné síly
  Celková hodnota střižné síly se skládá z dílčích hodnot střižných sil jednotlivých střižníků a dále síly protlačovací a stírací. Rozměry střižníků jsou odměřeny ve 3D modelu. U několika střižníků se délka střihu rovná jejich obvodu. U dalších střižníků je funkční pouze část hrany. Jednotlivé složky sil jsou vypočteny dle vzorce (2.6). Hodnota součinitele otupení byla zvolena n=1,1.

  Střižná síla pro obdélníkový střižník 30,6 x 14,6 mm

  $$F_{s1} = n_o \cdot l_{s1} \cdot s \cdot \tau_s = 1{,}1 \cdot 90{,}4 \cdot 1{,}5 \cdot 328 = 48\,924 \text{ N}$$

  Střižná síla pro kruhový střižník Ø 20 mm

  $$F_{s2} = n_o \cdot l_{s2} \cdot s \cdot \tau_s = 1{,}1 \cdot 62{,}832 \cdot 1{,}5 \cdot 328 = 34\,006 \text{ N}$$

  Střižná síla pro oválný střižník 37,6 x 7,8 mm

  $$F_{s3} = n_o \cdot l_{s3} \cdot s \cdot \tau_s = 1{,}1 \cdot 53{,}6 \cdot 1{,}5 \cdot 328 = 29\,008 \text{ N}$$

  Střižná síla pro oválný střižník 20,4 x 4,4 mm

  $$F_{s4} = n_o \cdot l_{s4} \cdot s \cdot \tau_s = 1{,}1 \cdot 37{,}716 \cdot 1{,}5 \cdot 328 = 20\,412 \text{ N}$$

  Střižná síla pro tvarový střižník 14,6 x 40,8 mm

  $$F_{s5} = n_o \cdot l_{s5} \cdot s \cdot \tau_s = 1{,}1 \cdot 102 \cdot 1{,}5 \cdot 328 = 55\,202 \text{ N}$$

  Střižná síla pro ostřihovací střižník 12 x 7,8 mm

  $$F_{s6} = n_o \cdot l_{s6} \cdot s \cdot \tau_s = 1{,}1 \cdot 10 \cdot 1{,}5 \cdot 328 = 5\,412 \text{ N}$$

  Střižná síla pro rozstřihovací střižník 12 x 7,8 mm

  $$F_{s7} = n_o \cdot l_{s7} \cdot s \cdot \tau_s = 1{,}1 \cdot 4 \cdot 1{,}5 \cdot 328 = 2\,165 \text{ N}$$

Střižná síla

$$F_s = 4 \cdot F_{s1} + F_{s2} + 2 \cdot F_{s3} + 2 \cdot F_{s4} + F_{s5} + F_{s6} + 2 \cdot F_{s7}$$
$$= 4 \cdot 48\,924 + 34\,006 + 2 \cdot 29\,008 + 2 \cdot 20\,412 + 55\,202 + 5\,412 + 2 \cdot 2\,165$$
$$= 393\,486 \text{ N} \cong 393{,}5 \text{ kN}$$

- Odhad minimální tloušťky střižnice
  Z vypočtených střižných sil lze také odvodit návrhovou hodnotu minimální tloušťky střižnice. Daný rozměr se stanoví podle maximální hodnoty střižné práce, která činí 55 202 N. Odhad je proveden dle vzorce (2.16).

$$H = \sqrt[3]{0{,}1 \cdot F_{s\,max}} = \sqrt[3]{0{,}1 \cdot 55\,202} = 17{,}67 \text{ mm}$$

  Tloušťky střižnice je vhodné zvolit o něco málo vyšší v rozměru celých milimetrů. V konstrukci nástroje je navržena střižnice o tloušťce 20 mm.

- Výpočet střižné práce
  Celková hodnota střižné práce dle vzorce (2.7) a součinitel hloubky vtlačení dle tab. 3 pro danou tloušťku materiálu a mez pevnosti je zvolen 0,55.

$$A_s = k_a \cdot F_s \cdot s = 0{,}55 \cdot 393\,486 \cdot 0{,}0015 = 324{,}6 \text{ J}$$

- Výpočet stírací a protlačovací síly
  Stírací síla dle vzorce (2.8) a součinitel stírání dle tab. 4 je zvolen 0,16

$$F_{st} = c_1 \cdot F_s = 0{,}16 \cdot 393\,486 = 62\,958 \text{ N} \cong 63{,}0 \text{ kN}$$

  Protlačovací síla dle vzorce (2.9) a součinitel protlačování dle tab. 4 je zvolen 0,08.

$$F_{pr} = c_2 \cdot F_s = 0{,}08 \cdot 393\,486 = 31\,479 \text{ N} \cong 31{,}5 \text{ kN}$$

- Výpočet celkové střižné síly

$$F_{sc} = F_s + F_{st} + F_{pr} = 393{,}5 + 63{,}0 + 31{,}5 = 488 \text{ kN}$$

- Namáhání střižníku v tlaku
  Kontrola tlakového namáhání slouží hlavně pro zjištění, zda se nebude střižník z materiálu o vyšší tvrdosti otlačovat do upínací desky o menší tvrdosti. Při překročení 50 ÷ 100 MPa namáhání v tlaku je doporučeno použít opěrnou desku. Rozměry střižníků vztažené k upínací desce jsou zvětšeny o velikost jejich osazení. Výpočet dle vzorce (2.17).

  Namáhání v tlaku pro obdélníkový střižník 30,6 x 14,6 mm

$$\sigma_{d1} = \frac{F_{s1}}{S_{st1}} = \frac{48\,924}{640{,}13} = 76{,}4 \text{ MPa}$$

  Namáhání v tlaku pro kruhový střižník Ø 20 mm

$$\sigma_{d2} = \frac{F_{s2}}{S_{st2}} = \frac{34\,006}{452{,}39} = 75{,}2 \text{ MPa}$$

  Namáhání v tlaku pro oválný střižník 37,6 x 7,8 mm

$$\sigma_{d3} = \frac{F_{s3}}{S_{st3}} = \frac{29\,008}{489{,}81} = 59{,}2 \text{ MPa}$$

  Namáhání v tlaku pro oválný střižník 20,4 x 4,4 mm

$$\sigma_{d4} = \frac{F_{s4}}{S_{st4}} = \frac{20\,412}{201{,}53} = 101{,}3 \text{ MPa}$$

Namáhání v tlaku pro tvarový střižník 14,6 x 40,8 mm

$$\sigma_{d5} = \frac{F_{s5}}{S_{st5}} = \frac{55\ 202}{540{,}44} = 102{,}4\ \text{MPa}$$

Namáhání v tlaku pro ostřihovací střižník 12 x 7,8 mm

$$\sigma_{d6} = \frac{F_{s6}}{S_{st6}} = \frac{5\ 412}{108{,}57} = 49{,}8\ \text{MPa}$$

Namáhání v tlaku pro rozstřihovací střižník 12 x 7,8 mm

$$\sigma_{d7} = \frac{F_{s7}}{S_{st7}} = \frac{2\ 165}{108{,}57} = 19{,}9\ \text{MPa}$$

Hodnoty napětí při styku střižníků a upínací desky se pohybují v intervalu nebo mírně nad intervalem, kdy už je vhodné uvažovat nad použitím opěrné desky. Některá literatura uvádí mez pro použití opěrné desky nad 180 MPa. Z důvodu bezpečnosti však bude s opěrnou deskou uvažováno. Opěrná deska je vyrobena z kalené oceli tloušťky 4 mm.

- Vzpěrná stabilita střižníku

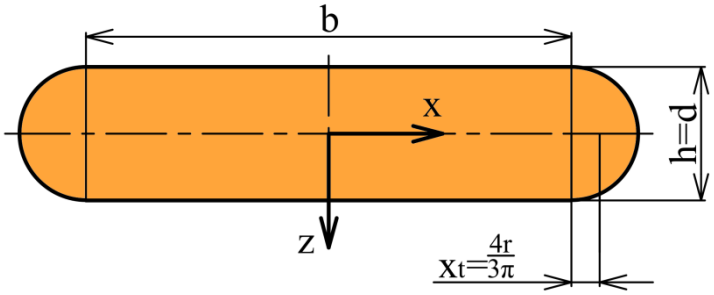
U střižníků lze vypočítat jejich kritickou délku, při které dojde ke ztrátě vzpěrné stability. Konstrukce střižníků musí být tedy taková, aby jejich délka nepřekročila kritickou hodnotu. Konstrukce nástroje bude uvažována s vedením střižníků. Výpočet kritické délky pro střižníky s vedením je možné stanovit dle vzorce (2.19). V případě, že střižník nevyhoví, je možné zvětšit jeho průřez nebo změnit konstrukci rozšířením nad vodící deskou. Největší riziko ztráty vzpěrné stability je u úzkých střižníků. U nepravidelných průřezů hrozí ztráta vzpěrné stability ve směru menší hodnoty momentu setrvačnosti daného průřezu.

Moment setrvačnosti oválného průřezu (obr. 49)

$$I_x = \frac{h \cdot b^3}{12} + 2 \cdot \left[\frac{\pi \cdot d^4}{128} + \frac{\pi \cdot d^2}{8} \cdot \left(\frac{b}{2} + \frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi}\right)^2\right]$$

$$= \frac{4{,}4 \cdot 16^3}{12} + 2 \cdot \left[\frac{\pi \cdot 4{,}4^4}{128} + \frac{\pi \cdot 4{,}4^2}{8} \cdot \left(\frac{16}{2} + \frac{4 \cdot 2{,}2}{3 \cdot \pi}\right)^2\right] = 2\ 733{,}818\ \text{mm}^4$$

$$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12} + \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{16 \cdot 4{,}4^3}{12} + \frac{\pi \cdot 4{,}4^4}{64} = 131{,}977\ \text{mm}^4$$



Obr. 49 Oválný průřez

Kritická délka pro oválný střižník 20,4 x 4,4 mm

$$l_{k1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{k_b \cdot F_s}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 131{,}977}{2 \cdot 20\ 415}} = 115{,}75\ \text{mm}$$

Těžiště obdélníkového průřezu se zaoblením (obr. 50)

Tvar složeného obrazce je symetrický podle osy z, proto souřadnice těžiště ve směru osy x je rovna polovině celkové šířky průřezu.

$$x_t = \frac{b_1}{2} = \frac{12}{2} = 6 \text{ mm}$$

Poloha těžiště ve směru druhé osy je vypočtena dle následujícího vzorce.

$$z_t = \frac{\sum S_i \cdot z_{ti}}{\sum S_i} = \frac{\frac{\pi \cdot r^2}{2} \cdot \left(h_1 + \frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi}\right) + \frac{{h_1}^2}{2} \cdot b_1 + h_2 \cdot b_2 \cdot \left(h_1 + \frac{h_2}{2}\right)}{\frac{\pi \cdot r^2}{2} + h_1 \cdot b_1 + h_2 \cdot b_2} =$$

$$= \frac{\frac{\pi \cdot 2^2}{2} \cdot \left(5{,}8 + \frac{4 \cdot 2}{3 \cdot \pi}\right) + \frac{5{,}8^2}{2} \cdot 12 + 2 \cdot 8 \cdot \left(5{,}8 + \frac{2}{2}\right)}{\frac{\pi \cdot 2^2}{2} + 5{,}8 \cdot 12 + 2 \cdot 8} = 3{,}835 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti obdélníkového průřezu se zaoblením

Z předchozího výpočtu momentu setrvačnosti lze odvodit, že význam pro výpočet kritické délky má moment setrvačnosti ve směru menšího rozměru. Dále je tedy vypočten pouze moment setrvačnosti ve směru osy z.

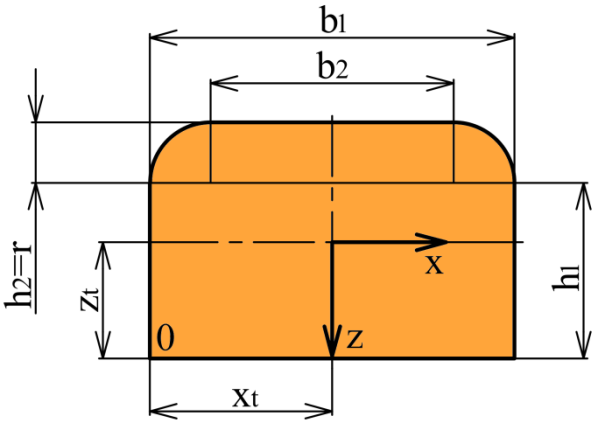
$$I_z = \frac{b_1 \cdot {h_1}^3}{12} + b_1 \cdot h_1 \cdot \left(z_t - \frac{h_1}{2}\right)^2 + \frac{b_2 \cdot {h_2}^3}{12} + b_2 \cdot h_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + h_1 - z_t\right)^2 + \frac{\pi \cdot r^4}{8}$$
$$+ \frac{\pi \cdot r^2}{2} \cdot \left(h_1 - z_t + \frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi}\right)^2$$

$$= \frac{12 \cdot 5{,}8^3}{12} + 12 \cdot 5{,}8 \cdot \left(3{,}835 - \frac{5{,}8}{2}\right)^2 + \frac{8 \cdot 2^3}{12} + 8 \cdot 2 \cdot \left(\frac{2}{2} + 5{,}8 - 3{,}835\right)^2$$
$$+ \frac{\pi \cdot 2^4}{8} + \frac{\pi \cdot 2^2}{2} \cdot \left(5{,}8 - 3{,}835 + \frac{4 \cdot 2}{3 \cdot \pi}\right)^2 = 457{,}982 \text{ mm}^4$$

Kritická délka pro ostřihovací střižník 12 x 7,8

$$l_{k2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{k_b \cdot F_s}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 457{,}982}{2 \cdot 5\,412}} = 418{,}79 \text{ mm}$$

Reálná maximální volná délka střižníků je 66 mm. Kritická délka pro oválný střižník je přibližně dvojnásobná, proto nehrozí ztráta vzpěrné stability. Pro ostřihovací střižník byla vypočtena kritická délka asi šestinásobná, než je jeho skutečná volná délka. V případě ostřihovacího střižníku by bylo možné použít subtilnější průřez, ale vedlo by to pouze k mírné úspoře nástrojového materiálu.



Obr. 50 Obdélníkový průřez se zaoblením

3.4.2 Ohybová část

V předcházejících kapitolách byl definován tvar součásti a navržen postup výroby. Následujícím krokem po stříhání je ohýbání výsledného tvaru součásti. Ve směru menšího rozměru součásti je proveden ohyb do tvaru U. Ve směru kolmém je pak proveden složitější ohyb nejprve do tvaru U, který přechází na obou ramenech do ohybu tvaru V. Na ohraňovacím lisu jsou veškeré ohyby prováděny jako V ohyb do pravého úhlu. Postupový nástroj tyto ohyby vytváří všechny současně.

- Ohybová vůle
  Pro následující výpočet a konstrukci nástroje je nutné stanovit ohybovou vůli, která v případě ohybu do tvaru U odpovídá násobku tloušťky materiálu dle vzorce.

  $$v_o = (1{,}05 \div 1{,}15) \cdot s = 1{,}066 \cdot 1{,}5 = 1{,}6 \text{ mm}$$

- Odpružení při ohybu
  Výpočet odpružení se liší podle tvaru ohybu. Součinitel odpružení závisí na poměru poloměru ohybu vůči tloušťce ohýbaného materiálu a stanoví se podle tab. 7. Úhel odpružení pro oba ohyby do tvaru U by měl být stejný, protože jsou stejné poloměry ohybu, tloušťka materiálu i poloměr zaoblení ohybnice.

  Součinitel odpružení

  $$\frac{R_0}{s} = \frac{1{,}6}{1{,}5} = 1{,}067 \cong 1 \Rightarrow k_o = 0{,}58$$

  Úhel odpružení pro ohyb do tvaru U dle vzorce (2.26)

  $$l_u = r_o + v_o + R_0 = 1{,}6 + 1{,}6 + 1{,}6 = 4{,}8 \text{ mm}$$

  $$\operatorname{tg} \beta_1 = 0{,}75 \cdot \frac{l_u}{k_o \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} = 0{,}75 \cdot \frac{4{,}8}{0{,}58 \cdot 1{,}5} \cdot \frac{340}{2{,}1 \cdot 10^5} = 8{,}933 \cdot 10^{-3}$$

  $$\beta_1 = \operatorname{arctg}(8{,}933 \cdot 10^{-3}) = 0°30'42''$$

  Úhel odpružení pro ohyb do tvaru V dle vzorce (2.25)

  $$l_v = 16{,}33 \text{ mm} \quad \text{(odměřeno ze 3D modelu)}$$

  $$\operatorname{tg} \beta_2 = 0{,}375 \cdot \frac{l_v}{k_o \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} = 0{,}375 \cdot \frac{16{,}33}{0{,}58 \cdot 1{,}5} \cdot \frac{340}{2{,}1 \cdot 10^5} = 11{,}396 \cdot 10^{-3}$$

  $$\beta_2 = \operatorname{arctg}(11{,}396 \cdot 10^{-3}) = 0°39'11''$$

  Maximální poloměr ohybu, který lze vytvořit, je vypočten dle vzorce (2.27)

  $$R_{max} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{R_e} - 1\right) \cong \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_e} = \frac{1{,}5 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5}{2 \cdot 340} = 463 \text{ mm}$$

  Minimální poloměr ohybu se stanoví dle vzorce (2.28)

  $$R_{min} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{max}} - 1\right) = c_m \cdot s = 0{,}5 \cdot 1{,}5 = 0{,}75 \text{ mm}$$

  Navržená součást splňuje požadavky na velikost poloměru ohybu, který se musí nacházet v intervalu mezi maximálním a minimálním poloměrem ohybu. Všechny ohyby na součásti mají poloměr roven 1,6 mm a zadanou podmínku tak splňují. Odpružení součásti nemá vliv na její funkci a není jej tak nutné redukovat. Velikost odpružení by však způsobovala ulpívání součásti v ohybnici. Je tedy nutné použít vyhazovač.

- Výpočet ohýbací síly a práce

  V jedné operaci je provedeno několik ohybů současně. Výsledná ohýbací síla je tak složena z dílčích složek jednotlivých ohybů. Dále je zvětšena o účinek síly kalibrační a o sílu potřebnou k překonání odporu pružiny přidržovače.

  Síla pro ohyb do tvaru U ve směru menšího rozměru dle vzorce (2.31)

  $$F_{o1} = \frac{R_m \cdot b \cdot s^2}{2} = \frac{410 \cdot 40{,}8 \cdot 1{,}5^2}{2} = 18\,819 \text{ N}$$

  Kalibrační síla pro ohyb ve směru menšího rozměru dle vzorce (2.32)

  $$F_{k1} = (1 \div 1{,}75) \cdot F_o = 1{,}75 \cdot 18\,819 = 32\,933 \text{ N}$$

  Přidržovací síla pro ohyb ve směru menšího rozměru dle vzorce (2.33)

  $$F_{p1} = (0{,}25 \div 0{,}33) \cdot F_o = 0{,}33 \cdot 18\,819 = 6\,210 \text{ N}$$

  Celková ohýbací síla pro první ohyb dle vzorce (2.34)

  $$F_{oc1} = F_{o1} + F_{k1} + F_{p1} = 18\,819 + 32\,933 + 6\,210 = 57\,962 \text{ N} \cong 58{,}0 \text{ kN}$$

  Síla pro ohyb do tvaru U ve směru kolmém dle vzorce (2.31)

  $$F_{o2} = \frac{R_m \cdot b \cdot s^2}{2} = \frac{410 \cdot 26{,}8 \cdot 1{,}5^2}{2} = 12\,362 \text{ N}$$

  Kalibrační síla pro ohyb ve směru kolmém dle vzorce (2.32)

  $$F_{k2} = (1 \div 1{,}75) \cdot F_o = 1{,}75 \cdot 12\,362 = 21\,633 \text{ N}$$

  Přidržovací síla pro ohyb ve směru kolmém dle vzorce (2.33)

  $$F_{p2} = (0{,}25 \div 0{,}33) \cdot F_o = 0{,}33 \cdot 12\,362 = 4\,079 \text{ N}$$

  Celková ohýbací síla pro druhý ohyb dle vzorce (2.34)

  $$F_{oc2} = F_{o2} + F_{k2} + F_{p2} = 12\,362 + 21\,633 + 4\,079 = 38\,074 \text{ N} \cong 38{,}1 \text{ kN}$$

  Síla pro ohyb do tvaru V dle vzorce (2.29)

  $$F_{o3} = \frac{1{,}2 \cdot R_m \cdot b \cdot s^2}{l_v} = \frac{1{,}2 \cdot 410 \cdot 26{,}8 \cdot 1{,}5^2}{16{,}33} = 1\,816 \text{ N}$$

  Kalibrační síla pro V ohyb dle vzorce (2.32)

  $$F_{k3} = (1 \div 1{,}75) \cdot F_o = 1{,}75 \cdot 1\,816 = 3\,178 \text{ N}$$

  Celková ohýbací síla pro třetí ohyb dle vzorce (2.34)

  $$F_{oc3} = F_{o3} + F_{k3} = 1\,816 + 3\,178 = 4\,994 \text{ N} \cong 5{,}0 \text{ kN}$$

  Výsledná ohýbací síla je stanovena jako součet všech dílčích složek jednotlivých ohybů. Její velikost je tedy složena ze samotných ohýbacích sil, kalibračních sil a síly potřebné k překonání přidržovače.

  $$F_{oc} = F_{oc1} + F_{oc2} + 2 \cdot F_{oc3} = 58{,}0 + 38{,}1 + 2 \cdot 5{,}0 = 106{,}1 \text{ kN}$$

  Práce pro ohyb do tvaru U ve směru menšího rozměru dle vzorce (2.35)

  $$A_{o1} = F_{oc1} \cdot h_{o1} \cdot k_{v,u} = 10^{-3} \cdot 57\,962 \cdot 10 \cdot 0{,}66 = 382{,}5 \text{ J}$$

  Práce pro ohyb do tvaru U ve směru kolmém dle vzorce (2.35)

  $$A_{o2} = F_{oc2} \cdot h_{o2} \cdot k_{v,u} = 10^{-3} \cdot 38\,074 \cdot 10 \cdot 0{,}66 = 251{,}3 \text{ J}$$

  Práce pro ohyb do tvaru V dle vzorce (2.35)

  $$A_{o3} = F_{oc3} \cdot h_{o3} \cdot k_{v,u} = 10^{-3} \cdot 4\,994 \cdot 6{,}05 \cdot 0{,}33 = 10{,}0 \text{ J}$$

  Výsledná ohýbací práce je stanovena jako součet všech dílčích prací jednotlivých ohybů.

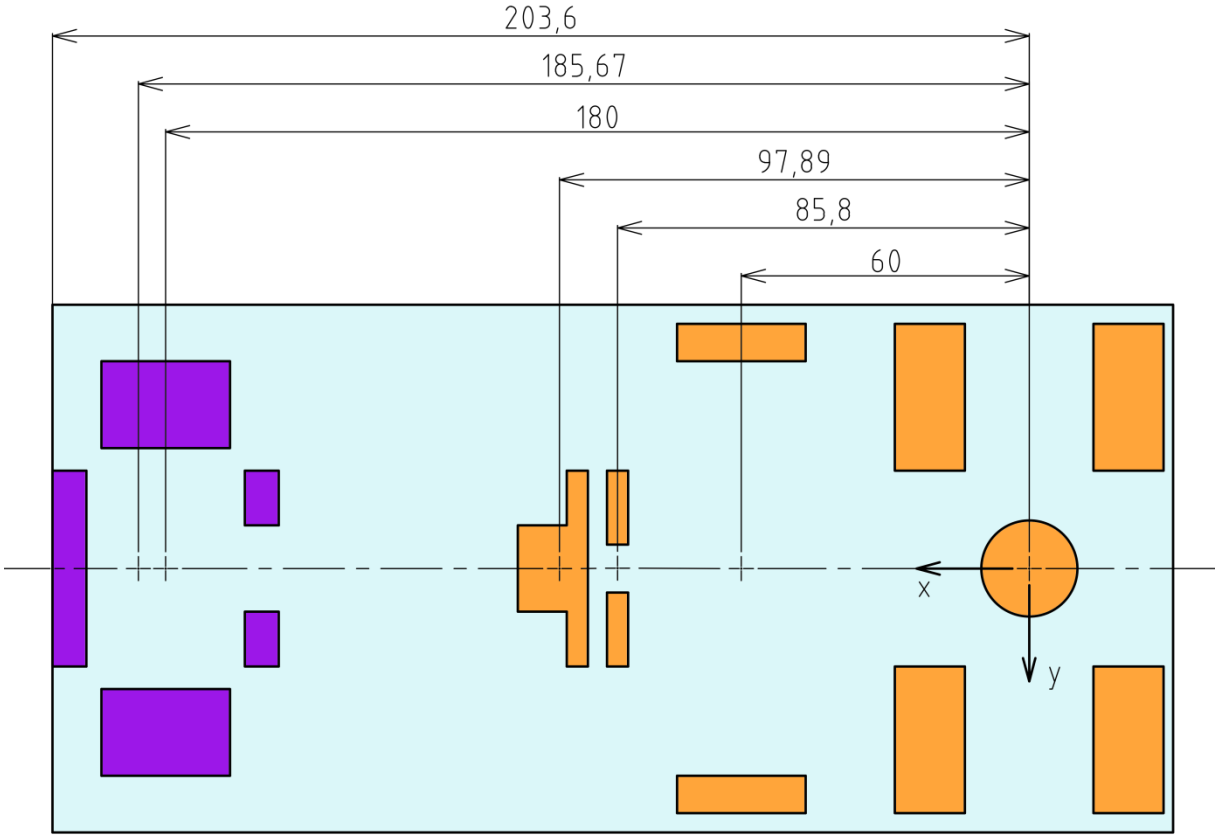
  $$A_{oc} = A_{o1} + A_{o2} + 2 \cdot A_{o3} = 382{,}5 + 251{,}3 + 2 \cdot 10 = 653{,}8 \text{ J}$$

3.4.3 Těžiště sil

Po stanovení všech tvářecích sil je možné přikročit ke kroku stanovení jejich společného těžiště. Znalost působiště výsledné síly je důležitá kvůli umístění stopky nástroje do vhodné polohy. Pro nalezení těžiště je možné vybírat ze dvou metod. Grafická metoda je vhodná pro jednodušší případy. Pro výpočet těžiště je zvolena tedy výpočtová metoda, která vychází z momentové rovnováhy. Působiště jednotlivých sil jsou uvažována v těžištích příslušných obrazců a v případě složitějších tvarů musí být vypočtena. Vzhledem k symetrii nástřihového plánu podle osy x není nutné hledat polohu těžiště sil ve směru osy y, protože leží přímo na ose symetrie.

Momentová rovnováha se neobejde bez znalosti celkové tvářecí síly, která se skládá ze sil potřebných k vystřižení všech otvorů a sil potřebných k ohnutí všech ohybů. Dále zahrnuje síly stírací, protlačovací, kalibrovací a přidržovací. Veškeré silové zatížení zastupují vypočtené celkové síly střižné a ohýbací.

Určení působiště sil pro jednoduché geometrické obrazce jako obdélník nebo kruh není příliš složité, jelikož se nachází vždy v průsečíku os nebo ve středu. Těžiště složitějších tvarů byla vypočtena v programu Autocad. Byl zvolen počátek souřadného systému tak, že momenty od střižníků v prvním kroku se vyruší a není nutné s nimi dále počítat. Vzdálenosti od zvoleného počátku jsou schematicky znázorněny (obr. 51).



Obr. 51 Poloha působišť sil

Celková tvářecí síla se stanoví dle následujícího vzorce

$$F_c = F_{sc} + F_{oc} = 488 + 106{,}1 = 594{,}1 \text{ kN}$$

Momentová rovnováha k počátku x; y

$$F_c \cdot X = 2 \cdot F_{s3} \cdot 60 + 2 \cdot F_{s4} \cdot 85{,}8 + F_{s5} \cdot 97{,}9 + (F_{oc2} + 2 \cdot F_{oc3}) \cdot 180$$
$$+F_{oc1} \cdot 185{,}7 + (F_{s6} + 2 \cdot F_{s7}) \cdot 203{,}6$$

Dosazení hodnot příslušných sil

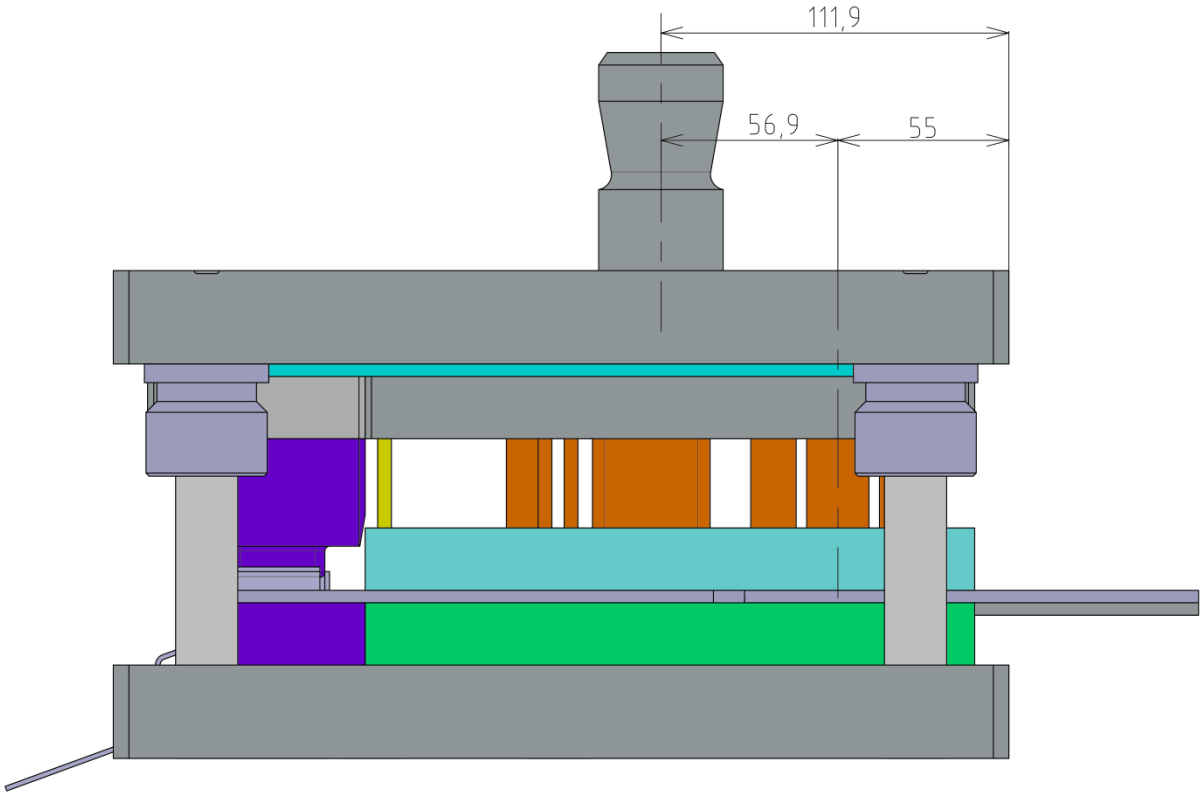
$$594{,}1 \cdot X = 2 \cdot 29 \cdot 60 + 2 \cdot 20{,}4 \cdot 85{,}8 + 55{,}2 \cdot 97{,}9 + (38{,}1 + 2 \cdot 5) \cdot 180$$
$$+58 \cdot 185{,}7 + (5{,}4 + 2 \cdot 2{,}2) \cdot 203{,}6$$

Poloha působiště celkové tvářecí síly

$$X = \frac{33\,808{,}6}{594{,}1} = 56{,}9 \text{ mm}$$

Výsledná vzdálenost stopky od hrany upínací desky je určena jako součet vzdálenosti osy kruhového otvoru od hrany upínací desky a vzdálenosti osy kruhového otvoru od působiště celkové tvářecí síly (obr. 52).

$$T = 56{,}9 + 55 = 111{,}9 \text{ mm}$$



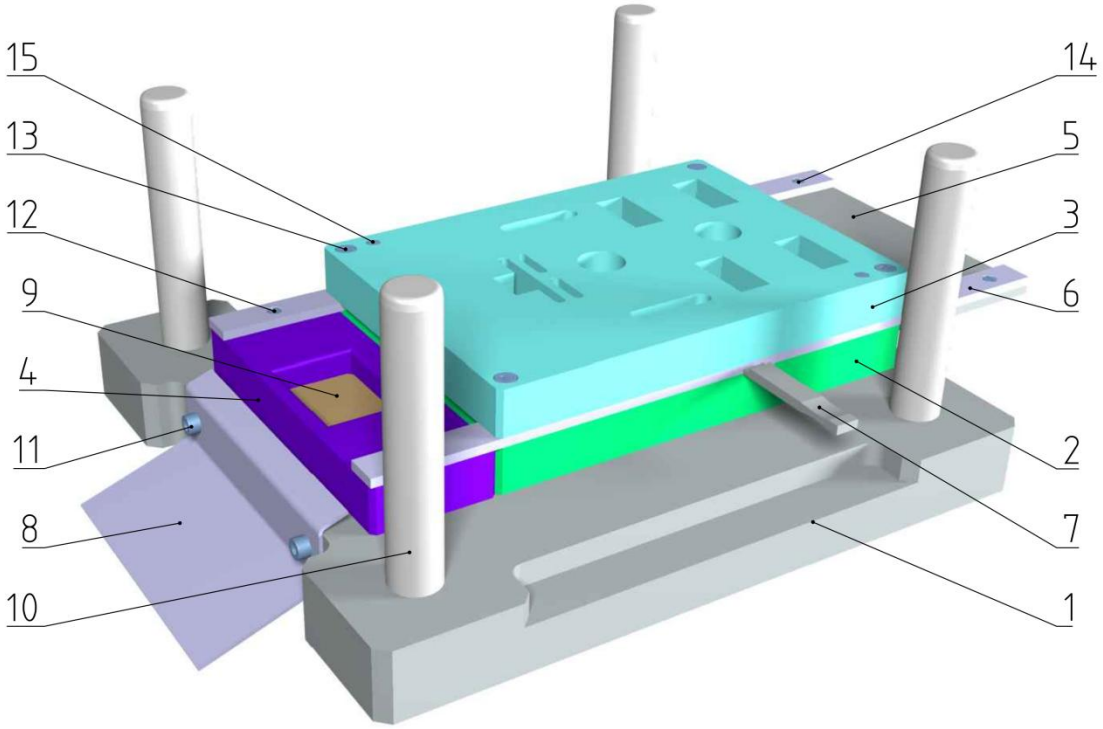
Obr. 52 Poloha stopky

3.5 Návrh nástroje

Na základě informací a výpočtů z předcházejících kapitol byl vypracován konstrukční návrh nástroje pro výrobu zadané součásti. Pro tvorbu 3D modelu byl použit program pro parametrické modelování Catia V5. Součástí práce jsou dále v přílohách výkresy zpracované v programu Autocad 2018. Pro tvorbu 3D modelu a 2D výkresové dokumentace byly použity rozdílné počítačové programy z důvodu obtížného zajištění všech požadavků na náležitosti výkresové dokumentace v programu Catia. Mezi oběma programy je zajištěna kompatibilita prostřednictvím souboru s příponou .dwg nebo .dxf. Nevýhodou je ale ztráta propojení mezi výkresem a modelem sestavy. Nástroj byl navržen ze dvou polovin. Horní a spodní polovina nástroje je popsána podrobněji na následujících stranách.

3.5.1 Spodní polovina nástroje

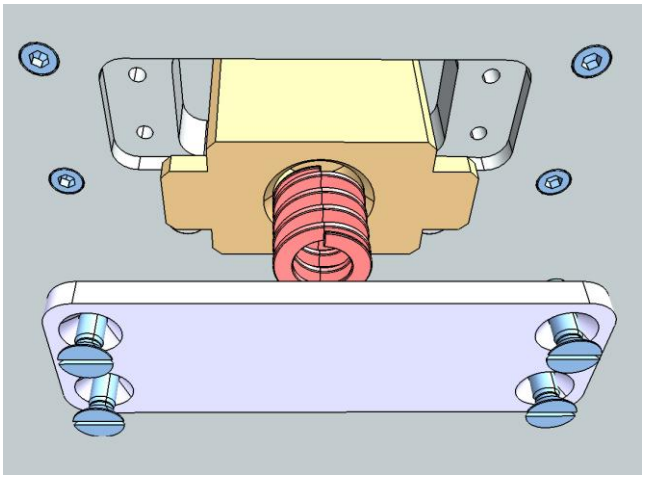
Hlavním nosným prvkem spodní poloviny nástroje (obr. 53) je základová deska (1). Slouží k upnutí celé spodní poloviny nástroje ke stolu lisu pomocí upínek, které ji přidržují za volný okraj. Velikost základové desky musí být taková, aby došlo k překrytí propadového otvoru ve stole lisu. Otvory v desce jsou zvětšeny vůči otvorům ve střižnici (2) tak, aby odpad mohl volně propadávat. Střižná deska je vyhotovena z jednoho kusu materiálu a střižné otvory se po kolmé části rozšiřují pod určitým úhlem, aby nedocházelo k ulpívání odpadu ve střižnici. Přesné vedení střižníků a hledáčků zajišťuje vodící deska (3), která je pevnou částí spodní poloviny nástroje a slouží zároveň ke stírání pásu plechu ze střižníku při jejich zpětném pohybu. Ohybnice (4) je navržena jako celistvá. Boční vedení pásu plechu je zajištěno pomocí vodících lišt (6). Na začátku nástroje jsou prodlouženy a pomocí šroubů se zápustnou hlavou s drážkou (14) spojeny s podpěrným plechem (5). Na druhém konci jsou zarovnány a spojeny s ohybnicí opět šrouby se zápustnou hlavou s drážkou (12). První zavedení materiálu do nástroje je omezeno neodpruženým načínacím dorazem (7).



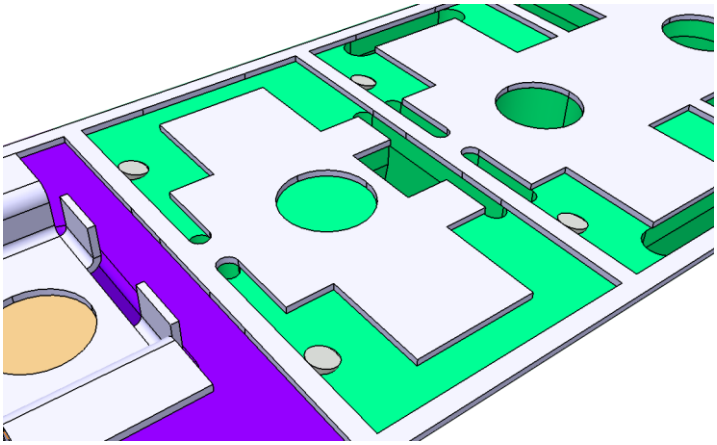
Obr. 53 Spodní polovina nástroje

Pro vzájemné spojení a slícování všech desek spodní poloviny nástroje slouží válcové kolíky (13) a šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (13). Na konci nástroje je pro snazší odvod součástí umístěn skluz (8), který je připevněn šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (11) k základové desce. Součástí spodní poloviny nástroje je také přidržovač (9) plnící zároveň vyhazovací funkci. Vzájemné vedení horní a spodní poloviny nástroje je zajištěno nalisovanými vodícími kolíky.

Spodní polovina nástroje je osazena přidržovačem (obr. 54), který zároveň plní funkci vyhazovače. Vyfrézovaný otvor v základové desce kopíruje tvar přidržovače a zajišťuje tak jeho vedení. Osazení na přidržovači a na základové desce omezuje vysunutí tak, aby horní plocha přidržovače nepřesahovala přes horní plochu ohybnice. Při posuvu ohybníku dolů se součást vtlačuje do ohybnice a současně dochází ke stlačování pružiny, která po odtížení ohybníku vytlačuje součást z ohybnice ven. Pružina se opírá ve spodní části o víko připevněné šrouby se zápustnou hlavou s drážkou.



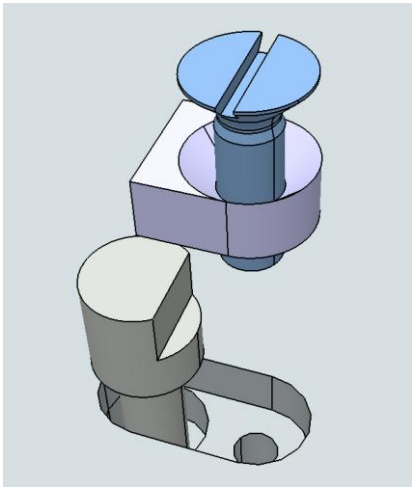
Obr. 54 Detail přidržovače



Zavedení pásu plechu do nástroje omezuje v prvním kroku načínací doraz. V případě, že nebude načínací doraz použit, může dojít ke kolizi hledáčku s plechem a poškození nástroje. V dalších krocích slouží k vymezení pozice pásu plechu ve směru posuvu dorazy pevné. Čtveřice pevných dorazů (obr. 55) používá k vymezení pozice můstek, který byl vystřižen v první operaci.

Obr. 55 Pevné dorazy

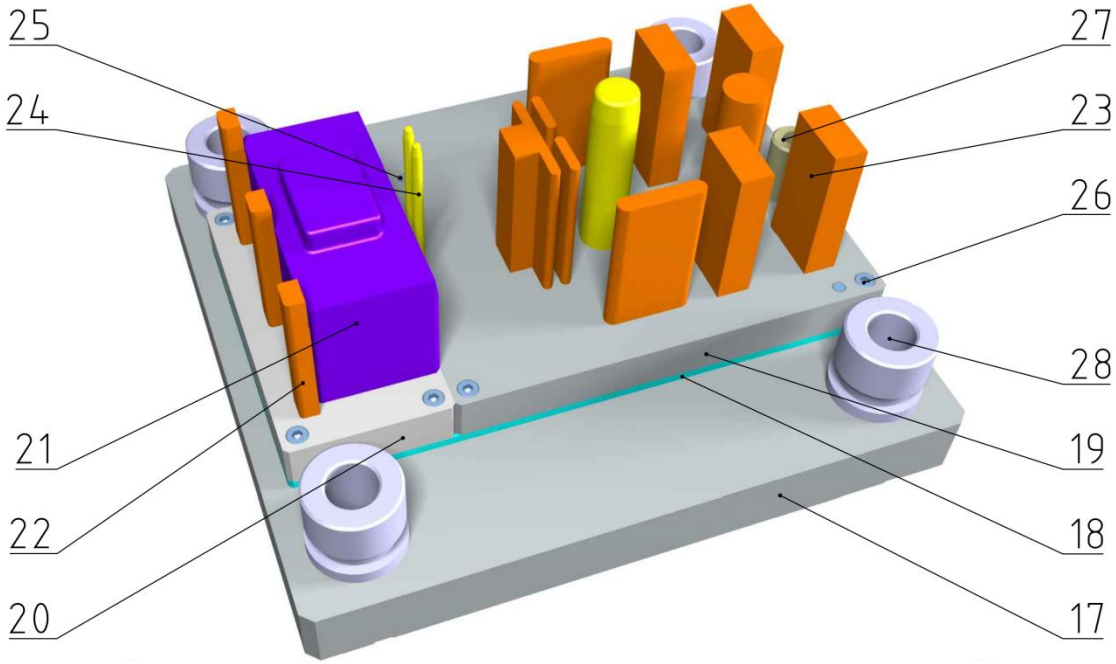
Dorazy jsou z jedné strany zkosené, aby na ně bylo možné plynule nasunout pás plechu. Pozice se vymezí až zpětným zatažením za pás plechu. Dorazy jsou navrženy jako rotační součást. Vzhledem k jejich geometrii by mohlo docházet k jejich pootočení, což by bylo nežádoucí. Součást je ve spodní části opatřena osazením a frézovanou ploškou (obr. 56). Protikusem je tvarová podložka, která brání zároveň otočení dorazu i jeho vypadnutí z upínací desky.



Obr. 56 Kotvení dorazu

3.5.2 Horní polovina nástroje

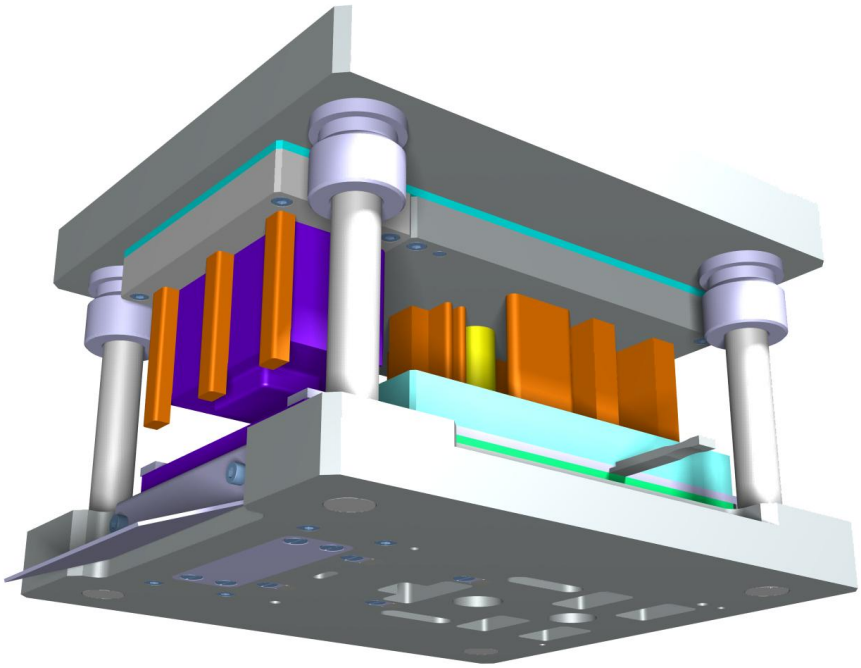
Hlavní nosnou součástí horní poloviny nástroje (obr. 57) je upínací deska (17). Plní funkci ukotvení všech prvků horní poloviny nástroje a zároveň pomocí stopky v těžišti tvářecích sil ukotvení horní poloviny nástroje k beranu výstředníkového lisu. Kotevní deska (19) slouží k zajištění střižníků (23) a hledáčků (24) proti vysunutí působením stírací síly. Opěrná deska (18) je umístěna mezi kotevní a upínací deskou. Je vyrobena z kalené oceli a brání otlačování střižníků do upínací desky. Desky jsou smontovány pomocí šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (26). Jejich přesnou pozici zajišťují válcové kolíky (25).



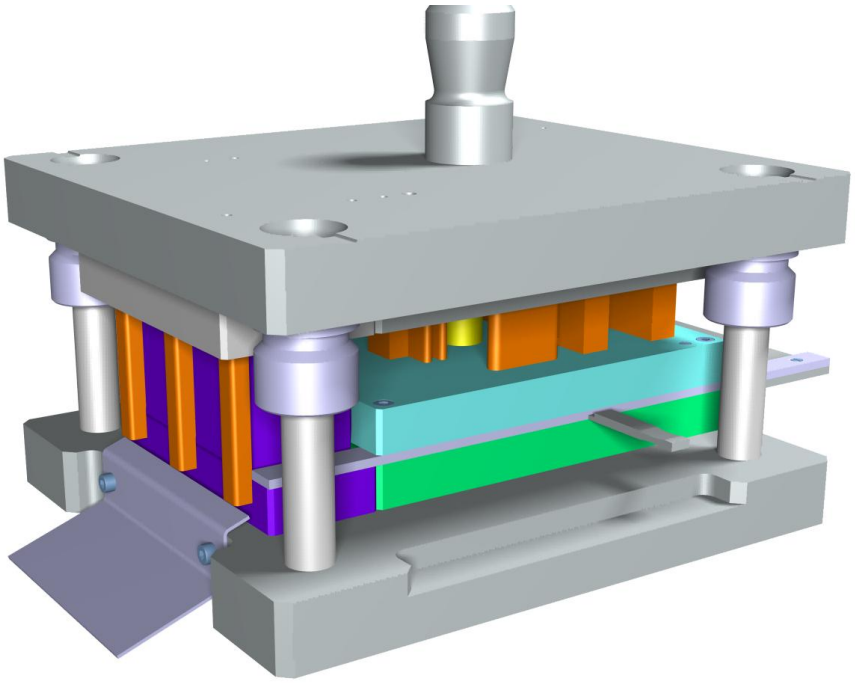
Obr. 57 Horní polovina nástroje

Druhá kotevní deska (20) obsahuje otvory pro umístění rozstřihovacích střižníků (22), které oddělují plech od můstku bezprostředně před ohnutím a zároveň rozstřihují odpad na menší části, aby mohl být snáze skladován. Ohybník (21) je ke kotevní desce připevněn šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem z opačné strany a musí být na svém místě ještě před připevněním kotevní desky k desce upínací. Vzájemné vedení horní a spodní poloviny nástroje je realizováno pomocí vodících kolíků a vodících pouzder (28). Zároveň jsou obě poloviny nástroje vedeny pomocí střižníků a vodící desky. Při skladování je možné položit horní polovinu nástroje na tu spodní tak, že ohybník bude ležet plochou na ohybnici a na druhé straně se výškový doraz (27) zastaví o vodící desku.

Spodní polovinu nástroje je možné pomocí upínek připevnit ke stolu lisu s T drážkami. Vzhledem k rozměrům pracovního prostoru lisu bude nutné nástroj podložit. Horní polovina nástroje je osazena normalizovanou stopkou, která přísluší upínací dutině tvářecího stroje. Vedení horní a dolní poloviny nástroje je realizováno vodícími sloupky, které jsou nalisovány v základové desce a vodícími pouzdry, která jsou nalisována v desce upínací. Sestavený nástroj v horní úvrati (obr. 58) a v dolní úvrati (obr. 59) je navržen pro konkrétní tvářecí stroj.



Obr. 58 Nástroj v horní úvrati



Obr. 59 Nástroj v dolní úvrati

3.5.3 Tvářecí stroj

Volba tvářecího stroje ovlivňuje konstrukci nástroje a naopak. Základním parametrem tvářecího stroje je jmenovitá síla, která nesmí být překročena. Vypočtená celková tvářecí síla musí být tedy nižší než jmenovitá síla vybraného stroj. Pro konstrukci nástroje jsou také důležité rozměry pracovního prostoru lisu, zejména pak zdvih beranu a rozměry upínací plochy pro horní a dolní polovinu nástroje. Volba tvářecího stroje se vzhledem k požadavkům firmy zúžila na dostupné strojní vybavení. Hodnota celkové tvářecí síly je 594,1 kN. Podmínku vyšší jmenovité síly lisu splňuje výstředníkový lis LEN 63 C výrobce Šmeral Trnava (obr. 60). Jeho parametry jsou uvedeny v tab. 11. Vzhledem k absenci podávacího zařízení bude stroj a nástroj obsluhován jedním pracovníkem. Zavádění pásu plechu je možné za použití dorazů.

Obr. 60 LEN 63 C [31]

Tab. 11 Parametry lisu LEN 63 C

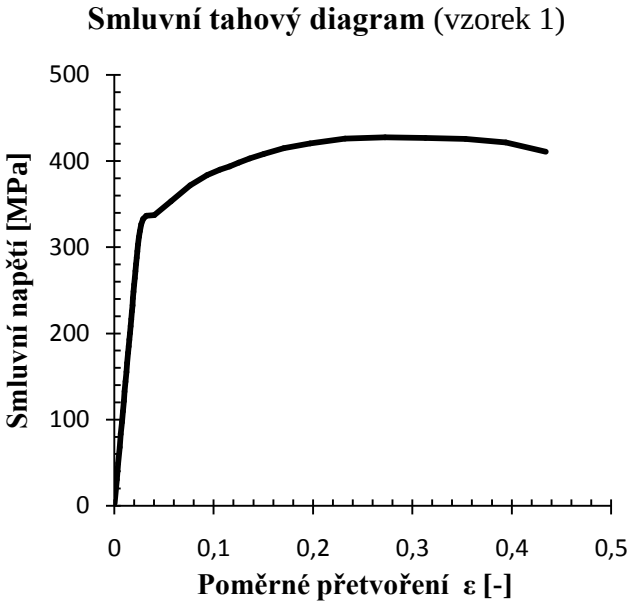
Parametr	**Jednotka**	**Hodnota**
Jmenovitá tvářecí síla	[kN]	630
Maximální počet zdvihů	[min^{-1}]	65 ÷ 130
Jednotlivé zdvihy	[min^{-1}]	45 ÷ 50
Zdvih beranu	[mm]	10 ÷ 105
Přestavitelnost beranu	[mm]	70
Vyložení	[mm]	315
Sevření	[mm]	335
Rozměry stolu	[mm]	800 x 630
Rozměr beranu	[mm]	460 x 280
Rozměry lisu (d x š x v)	[mm]	1425 x 1790 x 2550
Příkon	[kW]	7,5
Hmotnost	[kg]	5 850

3.6 Tahová zkouška

Součástí práce bylo ověření mechanických vlastností dodaného materiálu. Pro tahovou zkoušku byla vyrobena série deseti zkušebních těles, přičemž polovina z nich je orientována ve směru válcování plechu a druhá polovina vzorků je orientována kolmo na směr válcování. Jedná se o plech H340LA tloušťky 1,5 mm ve formě zkušebních těles (obr. 61). Tahová zkouška byla provedena na hydraulickém zkušebním stroji ZD40, který je propojen s programem M-Test v1.7 sloužícím pro zapisování hodnot a vyhodnocení závislostí v průběhu měření.

Obr. 61 Zkušební těleso před a po tahové zkoušce

Zkouška proběhla na hydraulickém zkušebním stroji, kde byla nastavena rychlost zatěžování na hodnotu 8 MPa·s^{-1}. Doba zatěžování se u jednotlivých vzorků pohybovala od 59 do 60 sekund. Materiál vykazuje chování s výraznou mezí kluzu (obr. 62). Pro vzorky ve směru válcování a kolmo na směr válcování byly vypočteny průměrné hodnoty vždy z pěti vzorků. Výsledné mechanické vlastnosti se v jednotlivých případech liší jen minimálně. Největší rozdíl je pozorován mezi hodnotami meze kluzu v závislosti na směru válcování. U vzorků kolmo na směr válcování je mez kluzu asi o 5 % vyšší než u vzorků ve směru válcování. Přehled mechanických vlastností je v tab. 12.



Obr. 62 Smluvní tahový diagram

Tab. 12 vyhodnocení tahové zkoušky

Mechanické vlastnosti	Mez kluzu [MPa]	Mez Pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
Ve směru válcování	334,96	425,85	32,3
Kolmo na směr válcování	351,49	431,19	29,6

4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [32]

Zhodnocení výroby po stránce technicko – ekonomické by mělo poskytnout odpověď na otázku, zda se výroba zadané součásti za zvolených technologických podmínek vůbec vyplatí. Navržený výrobní postup se zabývá výrobou součásti na lisu LEN 63 C, který je součástí výrobního zařízení vybrané firmy. Pořizovací náklady stroje tak do výpočtu nevstupují. Naopak bude nutné navrhnout cenu sdruženého nástroje. Daný typ nástroje je vhodný již pro série od 10 000 ks ročně. Roční výrobní série součásti Klec ECR 10 12 je přibližně 10 000 ks.

- Náklady na materiál
  Součást bude vyráběna z oceli DC01 nebo jejích ekvivalentů v závislosti na aktuálních možnostech oddělení nákupu. Tabule plechu o rozměrech 3 000 x 1 500 mm tloušťky 1,5 mm se rozdělí na pásy plechu o šířce 110 mm a délce 1 500 mm. Celkový počet tabulí potřebný pro výrobu celé série je 15 ks.

  Hmotnost jedné tabule

$$m_t = \rho_t \cdot s_t \cdot l_t \cdot s = 7\,850 \cdot 1{,}5 \cdot 3 \cdot 0{,}0015 = 53 \text{ kg} \quad (4.1)$$

  kde: ρ_t [kg·m^{-3}] – objemová hmotnost oceli

  Celková hmotnost materiálu

$$m_{tc} = n_t \cdot m_t = 15 \cdot 53 = 795 \text{ kg} \quad (4.2)$$

  Hmotnost jednoho výrobků

$$m_v = \rho_t \cdot s \cdot S_v = 7\,850 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,650 \cdot 10^{-6} = 0{,}0312 \text{ kg} \quad (4.3)$$

  Celková hmotnost výrobků

$$m_{vc} = n_v \cdot m_v = 10\,000 \cdot 0{,}0312 = 312 \text{ kg} \quad (4.4)$$

  Celková hmotnost odpadu

$$m_{oc} = m_{tc} - m_{vc} = 795 - 312 = 483 \text{ kg} \quad (4.5)$$

  Cena materiálu byla stanovena na základě informací oddělení nákupu na 24,80 Kč·kg^{-1}. Aktuální výkupní cena kovového odpadu dosahuje 4,50 Kč·kg^{-1}.

  Náklady na materiál

$$N_{tc} = C_t \cdot m_{tc} = 24{,}8 \cdot 795 = 19\,716 \text{ Kč} \quad (4.6)$$

  kde: C_t [Kč·kg^{-1}] – cena materiálu

  Zisk z prodeje odpadu

$$N_{oc} = C_o \cdot m_{oc} = 4{,}5 \cdot 483 = 2\,174 \text{ Kč} \quad (4.7)$$

  kde: C_o [Kč·kg^{-1}] – výkupní cena odpadu

  Celkové náklady na materiál

$$N_m = N_{tc} - N_{oc} = 19\,716 - 2\,174 = 17\,542 \text{ Kč} \quad (4.8)$$

  Materiálové náklady na jednu součást

$$N_{ms} = \frac{N_m}{n_v} = \frac{17\,542}{10\,000} = 1{,}75 \text{ Kč} \quad (4.9)$$

- Náklady na mzdy
  K zajištění výroby na lisu je zapotřebí jeden pracovník, který zajišťuje podávání materiálu do nástroje případně výměnu přepravek na hotové výrobky a odpadní materiál. Celková doba pracovní směny je 7,5 hodiny. Při započtení času na přípravné práce lze uvažovat s využitelnou dobou práce 6 hodin za směnu. Hodinová hrubá mzda pracovníka vstupuje do výpočtu hodnotu 150 Kč·hod^{-1}. Dle aktuální legislativy je zaměstnavatel povinen odvádět sociální pojištění ve výši 25% hrubé mzdy a zdravotní pojištění 9% hrubé mzdy.

  Počet součástí vyrobených za hodinu

  $$n_h = n_z \cdot 60 = 45 \cdot 60 = 2\,700 \text{ ks} \quad (4.10)$$

  Počet součástí vyrobených za jednu směnu

  $$n_{sm} = n_h \cdot t_s = 2\,700 \cdot 6 = 16\,200 \text{ ks} \quad (4.11)$$

  kde: t_s [hod] – využitelný čas směny

  Počet směn pro vyrobení celé série

  $$N_{sm} = \frac{n_v}{n_{sm}} = \frac{10\,000}{16\,200} = 0{,}62 \text{ směny} \quad (4.12)$$

  Počet hodin pro vyrobení celé série

  $$N_h = N_{sm} \cdot t_p = 0{,}62 \cdot 7{,}5 = 4{,}65 \Rightarrow 5 \text{ hod} \quad (4.13)$$

  kde: t_p [hod] – čas směny včetně příprav

  Náklady na hrubou mzdu pracovníka

  $$N_{pmz} = N_h \cdot C_h = 5 \cdot 150 = 750 \text{ Kč} \quad (4.14)$$

  kde: C_h [Kč·hod^{-1}] – hodinová hrubá mzda

  Náklady na sociální a zdravotní pojištění odvedené zaměstnavatelem

  $$N_{psz} = N_{pmz} \cdot (0{,}09 + 0{,}25) = 750 \cdot 0{,}34 = 255 \text{ Kč} \quad (4.15)$$

  Celkové náklady na mzdu pracovníka

  $$N_{pmzc} = N_{pmz} + N_{psz} = 750 + 255 = 1\,005 \text{ Kč} \quad (4.16)$$

  Mzdové náklady na jednu součást

  $$N_{ps} = \frac{N_{pmzc}}{n_v} = \frac{1\,005}{10\,000} = 0{,}10 \text{ Kč} \quad (4.17)$$

- Režijní náklady a energie
  Další položkou celkové ceny za výrobek jsou náklady spojené nepřímo s jeho výrobou. Režie pokrývá náklady na další pracovníky podniku, kteří jsou nezbytní pro jeho správné fungování. Jedná se o vedoucí pracovníky, konstruktéry, technology, ale i uklízečky. Dále sem spadá spotřební materiál jako ochranné pomůcky nebo spotřeba elektrické energie. Konktétní spotřeba elektrické energie lze ale stanovit přímo u tvářecího stroje.

  Režijní náklady

  $$N_r = N_{pmzc} \cdot t_r = 1\,005 \cdot 5 = 5\,025 \text{ Kč} \quad (4.18)$$

  kde: t_r [-] – koeficient režijních nákladů

Náklady na spotřebu elektrické energie stroje

$$N_e = P_s \cdot N_h \cdot C_e = 7{,}5 \cdot 5 \cdot 4 = 150 \text{ Kč} \tag{4.19}$$

kde: P_s [kW] – příkon stroje
C_e [Kč·kWh^{-1}] – cena elektrické energie

- Náklady na výrobu nástroje
  Největší položkou z celkových nákladů jsou při dané výrobní sérii náklady na konstrukci a výrobu tvářecího nástroje. Cena nástroje byla stanovena na základě porovnání cen podobných nástrojů a odhadu nástrojařské dílny.

$$N_n = 95\,800 \text{ Kč} \tag{4.20}$$

- Celkové náklady na zhotovení jedné součásti

$$N_c = \frac{N_m + N_{pmzc} + N_r + N_e + N_n}{n_v} = \frac{17\,542 + 1\,005 + 5\,025 + 150 + 95\,800}{10\,000} = 11{,}95 \text{ Kč} \tag{4.21}$$

Tržní cena jednoho výrobku

$$N_{tv} = N_c \cdot t_t = 11{,}95 \cdot 1{,}4 = 16{,}73 \text{ Kč} \tag{4.22}$$

kde: t_t [-] – koeficient navýšení tržeb

Celkové tržby

$$T_c = N_{tv} \cdot n_v = 16{,}73 \cdot 10\,000 = 167\,300 \text{ Kč} \tag{4.23}$$

Fixní náklady

$$N_{fix} = N_r + N_n = 5\,025 + 95\,800 = 100\,825 \text{ Kč} \tag{4.24}$$

Variabilní náklady

$$N_{var} = \frac{N_m + N_{pmzc} + N_e}{n_v} = \frac{17\,542 + 1\,005 + 150}{10\,000} = 1{,}87 \text{ Kč} \tag{4.25}$$

Bod zvratu

$$Q_b = \frac{N_{fix}}{N_{tv} - N_{var}} = \frac{100\,825}{16{,}73 - 1{,}87} = 6\,784 \text{ ks} \tag{4.26}$$

Pokud bude uvažováno s výše uvedenými hodnotami celkových nákladů a prodejní cenou hotového výrobku, pak se výroba stane ziskovou po překročení vyrobených 6 784 ks. Výroba by se mohla stát více ziskovou po rozložení nákladů na nástroj do delšího časového úseku. Prodejní cena součásti vyrobené stávajícím technologickým postupem je 17,80 Kč. Náklady na výrobu jedné součásti stávajícím postupem jsou 11,50 Kč. Lze tedy usoudit, že výroba oběma postupy vykazuje podobnou ekonomickou náročnost.

5 ZÁVĚRY

Řešenou součástí byla Klec ECR 10 12, která slouží v sestavě společně s maticí jako kotevní bod při montáži autobusů Iveco. Materiál pro výrobu součásti je běžně dostupná konstrukční ocel DC01 (11 321) vhodná ke tváření za studena. Jedná se o ohýbaný plechový dílec tloušťky 1,5 mm o vnějších rozměrech 72 x 33 x 11,5 mm. Celková roční výrobní série čítá 10 000 kusů. Po zhodnocení dostupných výrobních technologií bylo následně přikročeno k volbě technologie výroby ve sdruženém nástroji, který je vhodný pro vyšší výrobní série, ale podle literatury se může vyplatit již od zmíněných deseti tisíc kusů ročně.

V rámci technologických výpočtů byl stanoven rozvinutý tvar polotovaru, podle kterého se následně stanovilo vhodné rozvržení výstřižků na pásu plechu. Jako vstupní polotovar byla zvolena tabule plechu dělená na pásy o šířce 110 mm. Počet kroků potřebných ke zhotovení všech operací byl stanoven na čtyři. V prvních třech krocích probíhá vystřižení kruhového otvoru a vnějšího tvaru součásti. V posledním kroku je součást ohnuta. Zároveň je v posledním kroku odstřižena a rozstřižen odpad. Výsledná hodnota tvářecí síly byla stanovena na 594,1 kN. Na základě této hodnoty byl pro výrobu součásti zvolen excentrický lis LEN 63 C. Konstrukce sdruženého nástroje odpovídá pracovnímu prostoru zvoleného lisu.

Z technicko-ekonomického zhodnocení vychází pro dané vstupní podmínky téměř shodná cena jedné součásti vyrobené stávajícím i nově navrženým výrobním postupem. Výroba ve sdruženém nástroji by byla pro podnik výhodná především z důvodu uvolnění kapacity na ohraňovacích lisech.

Dalším možným řešením by mohla být příprava rozvinutého tvaru součásti pálením na laseru a zhotovení všech ohybů současně v jednoduchém ohýbacím nástroji. Cena ohýbacího nástroje by byla v porovnání s cenou nástroje sdruženého výrazně nižší. Touto variantou se však tato práce nezabývá.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [33]

1. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 245s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
2. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 167s. ISBN 80-214-2764-7.
3. BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9.
4. BIRZER, Franz. *Forming and fineblanking: cost effective manufacture of accurate sheetmetal parts*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 1997. ISBN 34-789-3161-4.
5. DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
6. Technologie tváření. *Technická univerzita Liberec* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
7. Stamped Parts. *Vicount* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: http://vicount.net/wp-content/uploads/Stamped-Parts-51.jpg
8. Bent Sheet Metal Part. *Meliorlaser* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://www.meliorlaser.hu/images/galeria/lezervagas_elhajlitas/80-hajlitott-lemezalkatresz-1.JPG
9. Forged Tie Rod End. *Tradeindia* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://tiimg.tistatic.com/fp/1/001/673/forged-tie-rod-end-series-092.jpg
10. Mechanické vlastnosti oceli. *Alfun metal* [online]. [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: http://www.alfun.cz/ocel
11. Princip laseru. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: http://www.lt.cz/e-learning/laser
12. Řezání laserem. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. 2013 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_rezani_laserem_2013_mrna.pdf
13. Laser cutting. *Engineersjournal* [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: http://www.engineersjournal.ie/wp-content/uploads/2014/03/Metal-cutting.jpg
14. Dělení a svařování plazmou *Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. 2013 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf
15. Plasma cutting. *Dagomet.* [online]. [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: http://www.dagomet.cl/wp-content/uploads/2017/05/47-1.jpg
16. Vodní paprsek. *HomeN VŠB.* [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf
17. Water jet cutting. *Ant-ag* [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: https://ant-ag.com/files/content/home/flexslider/1-hero-slider-unternehmen.jpg

18. Nástroje pro ohraňovací lisy. *Trumpf* [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-bending-tools-catalog-EN.pdf

19. Ohraňování. *CTS-Moravia.* [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: http://files.cts-moravia.webnode.cz/200000159-0157a034b3/ohranovani.jpg

20. BOBČÍK, Ladislav. *Střižné nástroje pro malosériovou výrobu.* Praha: SNTL, 1983, 213 s.

21. Postupový nástroj. *FaM Tools* [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: http://www.famtools.cz/img/sluzby/postupove/img06.jpg

22. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Ladislav ŽÁK. *Technologie tváření: návody do cvičení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 103 s. ISBN 80-214-2881-3.

23. NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980, 216 s.

24. KOTOUČ, Jiří, Jan ŠANOVEC, Jan ČERMÁK a Luděk MÁDLE. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 349 s. ISBN 80-010-01003-1.

25. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.

26. BAREŠ, Karel. Lisování: *Určeno [také] stud. na stř. a vys. odb. školách*. Praha: SNTL, 1971, 542 s.

27. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7

28. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 4., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7

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

30. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. Brno: Univerzita obrany, 2008, 112 s. ISBN 978-80-7231-579-6.

31. Výstředníkový lis LEN 63 C. *Hyperinzerce.cz* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: https://img2.hyperinzerce.cz/x-cz/inz/11974/11974511-lis-vystrednikovy-len-63-c-1.jpg

32. Mzdová kalkulačka. *Keloc* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: https://www.keloc-software.cz/mzdova-kalkulacka

33. Citace. *CitacePRO* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://citace.lib.vutbr.cz

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A_o	ohybová práce	[J]
A_s	střižná práce	[J]
b	šířka materiálu	[mm]
c	součinitel závislý na stupni střihu	[-]
C	součinitel geometrie ohybu	[-]
c_1	součinitel stírání	[-]
c_2	součinitel protlačování	[-]
C_e	cena elektrické energie	[Kč]
C_h	hodinová hrubá mzda	[Kč·hod^{-1}]
c_m	součinitel vlivu materiálu	[-]
C_o	výkupní cena odpadu	[Kč·kg^{-1}]
C_t	cena materiálu	[Kč·kg^{-1}]
e	velikost můstku	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
f	šířka okraje	[mm]
F_c	celková síla	[N]
F_k	kalibrační síla	[N]
F_o	ohýbací síla	[N]
F_{oc}	celková ohýbací síla	[N]
F_p	síla přidržovací	[N]
F_{pr}	protlačovací síla	[N]
F_s	střižná síla	[N]
F_{sc}	celková střižná síla	[N]
F_{st}	stírací síla	[N]
g	okraj po ostřižení	[mm]
H	tloušťka střižnice	[mm]
h_{el}	hloubka elastického vniknutí	[mm]
h_o	zdvih nástroje	[mm]
h_{pl}	hloubka plastického vniknutí	[mm]
h_s	hloubka vniknutí střižných hran	[mm]
I	moment setrvačnosti průřezu	[mm^4]
k	délka kroku	[mm]
k_a	součinitel hloubky vtlačení	[-]
k_b	koeficient bezpečnosti	[-]
k_o	koeficient odpružení	[-]
$k_{v,u}$	koeficient zaplnění diagramu	[-]
l_c	celková rozvinutá délka	[mm]
l_i	délka rovného úseku	[mm]
l_k	kritická délka střižníku	[mm]
l_o	délka ohnutého úseku	[mm]
l_{oi}	délka ohnutého úseku	[mm]
l_p	délka pásu	[mm]
l_t	délka tabule	[mm]

l_u	vzdálenost mezi opěrami	[mm]
l_v	vzdálenost mezi opěrami ohybnice	[mm]
l_{vs}	délka výstřižku	[mm]
m_{oc}	celková hmotnost odpadu	[kg]
m_t	hmotnost tabule	[kg]
m_{tc}	celková hmotnost materiálu série	[kg]
m_v	hmotnost výrobku	[kg]
m_{vc}	celková hmotnost výrobků	[kg]
N_c	celkové náklady na jednu součást	[Kč]
N_e	náklady na spotřebu energie	[Kč]
N_{fix}	fixní náklady	[Kč]
n_h	počet součástí za hodinu	[ks]
N_h	počet hodin pro vyrobení série	[-]
N_n	náklady na výrobu nástroje	[Kč]
N_m	celkové náklady na materiál	[Kč]
N_{ms}	materiálové náklady na jednu součást	[Kč]
n_o	součinitel otupení břitu	[-]
N_{oc}	náklady na materiál	[Kč]
n_p	počet pásů	[ks]
N_{pmz}	náklady na hrubou mzdu	[Kč]
N_{ps}	mzdové náklady na jednu součást	[Kč]
N_{psz}	náklady na sociální a zdravotní pojištění	[Kč]
N_r	režijní náklady	[Kč]
n_{sm}	počet součástí za směnu	[ks]
N_{sm}	počet směn pro vyrobení série	[-]
n_t	počet tabulí	[ks]
N_{tc}	náklady na materiál	[Kč]
N_{tv}	tržní cena jedné součásti	[Kč]
n_v	počet výstřižků za rok	[ks]
N_{var}	variabilní náklady	[Kč]
n_{vp}	počet výstřižků na jeden pás	[ks]
n_{vt}	počet výstřižků na jedné tabuli	[ks]
P_s	příkon stroje	[kW]
Q_b	bod zvratu	[ks]
R_0	poloměr ohybu	[mm]
R_a	střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_{max}	maximální poloměr ohybu	[mm]
R_{min}	minimální poloměr ohybu	[mm]
r_o	poloměr ohybnice	[mm]
s	tloušťka materiálu	[mm]
S_p	plocha pásu	[mm^2]
S_s	plocha střihu	[mm^2]
S_{st}	plocha průřezu střižníku	[mm^2]
s_t	šířka tabule	[mm]

s_v	šířka plechu	[mm]
S_v	plocha výstřižku	[mm^2]
T_c	celkové tržby	[Kč]
t_p	čas směny včetně příprav	[hod]
t_r	koeficient režijních nákladů	[-]
t_s	využitelný čas směny	[hod]
t_t	koeficient navýšení tržeb	[-]
v_o	ohybová vůle	[mm]
v_s	střižná vůle	[mm]
X	souřadnice polohy stopky	[mm]
x_t	souřadnice těžiště	[mm]
z	střižná mezera	[mm]
z_r	součinitel rozšíření	[-]
z_t	souřadnice těžiště	[mm]
z_z	součinitel ztenčení	[-]

α	úhel ohybu	[°]
β	úhel odpružení	[°]
γ	úhel ohnutého úseku	[°]
ε_{max}	mezní prodloužení v krajních vláknech	[-]
η	procentuální využití tabule	[%]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ	poloměr neutrální vrstvy	[mm]
ρ_t	objemová hmotnost oceli	[$kg \cdot m^{-3}$]
σ_d	napětí v tlaku	[MPa]
τ_s	střižný odpor	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Výrobky vzniklé tvářením 9
Obr. 2 Klec ECR 10 12 10
Obr. 3 Rozvinutý tvar 11
Obr. 4 Řezání laserem 11
Obr. 5 Řezání plazmatem 12
Obr. 6 Řezání vodním paprskem 12
Obr. 7 Ohraňování 13
Obr. 8 Sdružený postupový nástroj 13
Obr. 9 První fáze střihu 14
Obr. 10 Druhá fáze střihu 14
Obr. 11 Třetí fáze střihu 15
Obr. 12 Vhodná střižná mezera 15
Obr. 13 Nevhodná střižná mezera 16
Obr. 14 Střižná plocha při normální vůli 17
Obr. 15 Průběh střižné síly 18
Obr. 16 Využitá plocha 19
Obr. 17 Nástřihový plán 20
Obr. 18 Uspořádání výstřižků 20
Obr. 19 Vzdálenosti otvorů 20
Obr. 20 Těžiště střižných sil graficky 21
Obr. 21 Těžiště střižných sil matematicky 22
Obr. 22 Střižný nástroj s vedením 23
Obr. 23 Vnitřní geometrie střižnice 23
Obr. 24 Kotvení střižníku 24
Obr. 25 Schéma ohybu 25
Obr. 26 Deformace průřezu při ohýbání tyčí 25
Obr. 27 Ohýbání širokých pásů 26
Obr. 28 Odpružení po ohybu 27
Obr. 29 Ohyb do tvaru V nebo U 28
Obr. 30 Konstrukční úpravy pro eliminaci odpružení 28
Obr. 31 Průběh ohýbací síly 29
Obr. 32 Ohýbací nástroj 31
Obr. 33 Vliv směru vláken 31
Obr. 34 Vzdálenost otvoru a délka ramene 32
Obr. 35 Klec ECR 10 12 33
Obr. 36 Vzdálenost otvoru 33
Obr. 37 Délky ramen a oblouků 34
Obr. 38 Rozvinuté délky 34
Obr. 39 Podélné uspořádání 36
Obr. 40 Příčné uspořádání 36
Obr. 41 Varianta 1A 37
Obr. 42 Varianta 1B 37
Obr. 43 Varianta 2A 38
Obr. 44 Varianta 2B 38
Obr. 45 Varianta 1 40
Obr. 46 Varianta 2 41
Obr. 47 Varianta 3 41
Obr. 48 Varianta 4 42

Obr. 49 Oválný průřez 45
Obr. 50 Obdélníkový průřez se zaoblením 46
Obr. 51 Poloha působišť sil 49
Obr. 52 Poloha stopky 50
Obr. 53 Spodní polovina nástroje 51
Obr. 54 Detail přidržovače 52
Obr. 55 Pevné dorazy 52
Obr. 56 Kotvení dorazu 52
Obr. 57 Horní polovina nástroje 53
Obr. 58 Nástroj v horní úvrati 54
Obr. 59 Nástroj v dolní úvrati 54
Obr. 60 LEN 63 C 55
Obr. 61 Zkušební těleso před a po tahové zkoušce 56
Obr. 62 Smluvní tahový diagram 56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu 10
Tab. 2 Velikost střižné vůle 16
Tab. 3 Součinitel hloubky vtlačení 18
Tab. 4 Hodnoty součinitele stírání a protlačování 19
Tab. 5 Vzdálenosti otvorů 21
Tab. 6 Hodnoty koeficientu x 26
Tab. 7 Hodnoty součinitele pro výpočet odpružení 28
Tab. 8 Tolerance poloměru ohybu 31
Tab. 9 Tolerance délek ramen 32
Tab. 10 Doporučené velikosti okrajů a můstků 35
Tab. 11 Parametry lisu LEN 63 C 55
Tab. 12 vyhodnocení tahové zkoušky 56

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Materiálový list ocel HX340LAD
Příloha 2	Vodící sloupky Fibro DIN 9825/ISO 9182-2
Příloha 3	Technologický postup
Příloha 4	Výsledky tahové zkoušky

SEZNAM VÝKRESŮ

Sdružený nástroj	výkres sestavy	170470_DP_01
Sdružený nástroj	kusovník	170470_DP_01_K
Klec ECR 10 12	výkres součásti	170470_DP_01_00
Střižnice	výkres součásti	170470_DP_01_03
Ohybnice	výkres součásti	170470_DP_01_05
Ohybník	výkres součásti	170470_DP_01_07
Přidržovač	výkres součásti	170470_DP_01_13
Střižník	výkres součásti	170470_DP_01_16
Hledáček	výkres součásti	170470_DP_01_22

Příloha 1

ABNAHMEPRUEFZEUGNIS EN 10204-3.1

A02 — N° 8730316800 — Seite 1 — A09/A03

ArcelorMittal

ARCELORMITTAL ATLLOR MARDYCK
ROUTE DE SPYCKER
BP 129 F-59760 GRANDE SYNTHE
A01

Herstellerzeichen: **MK** (A04)

Feuerverz. Coils galvannealed — B03

Abmessung in mm	Länge	Breite	Dicke
	B09	B10	B11
		1500,00	1,50

CDC: Gem. vereinb. Vorschriften
BL : Warmgewalt unbehandelt
D : Spannugsfrei geglüht
R : Vergütet

Überwaschungs-Organisation: METALLURGIE QUALITE (A05)

Besteller und/oder Empfänger (A06):
Ferona,a.s. SSC Hradec Kralove
Vazni 847
500 03 Hradec Kralove Czech Republic

Kundenbestell nummer (A07): 627599/2

Werksauftragsnummer (A08): FD8GFRZ002 000001

Qualität und techn. Lieferbedingungen (B01/B02)

Qualität : HX340LAD+ZF EN10346 2015 — Standard : EN10346:2015

	Beschichtung	Menge	chemische Behandlung	Struktur	Aussehen	Schutz
Seite 1	Z-Eisen(feuerve	110,00 G/M2	ohne passivieru	Mattgrau(ZE Leg	B	Werksstandard
Seite 2		110,00 G/M2	ohne passivieru		B	Werksstandard

Artikel nummer :

Lieferzustand: CDC (B04)

Probestreifenbehandlung: CDC (B05)

	Längs Zugversuch Re	Rm	A% (2)	Quer Zugversuch Re	Rm	A% (2)	Rauhigkeit (3) Ra µm	Pics	C	Mn	P	S	Si	Al	N	Ti	Nb	Überzug (4) UNTEN SEITE Rand	Mitte	Rand	Mittel werte	OBEN SEITE Rand	Mitte	Rand	Mittel werte	Mittel werte	Eisen-anteil in galv. 1	Eisen-anteil in galv. 2
Untere Grenze				340	410	19			0,1200	1,4000	0,0300	0,0250	0,5000	0,0150		0,1500	0,1000	38,0		38,0		38,0		38,0				
Obere Grenze				420	510																						

Walznummer	Schmeiz Nr	P (1)	Netto-gewicht Kg	Re	Rm	A% (2)	Re MPA	Rm MPA	A% 1 (2)	Ra µm	Pics	C	Mn	P	S	Si	Al	N	Ti	Nb	UNTEN SEITE Rand	Mitte	Rand	Mittel werte	OBEN SEITE Rand	Mitte	Rand	Mittel werte	Mittel werte	Eisen-anteil in galv. 1	Eisen-anteil in galv. 2
B07	C00	C01		C11	C12	C13	C11	C12	C13			C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79										
36028500	8648062338	F	26500				345	427	32			0,0658	0,3442	0,0126	0,0078	0,0084	0,0359	0,0035	0,0005	0,0324	56,0	65,5	60,5	61,5	61,4	51,6	56,2	56,1		10,0	9,6

(1) Position D : Anfang M : Mitte F : Ende — C01

(2) 1: LO = 80mm 2: LO = 5.65√SO 3: JIS 25x50 — C10

(3)

(4) G/M2

(5)

Wir bestätigen hiermit die obegenannten Erzeugnisse den Bestellvorschriften sowie den gültigen Normen entsprechen. — Z01

Bezeichnung, Besichtigung und Abmessung : ohne Beanstandung. — D01

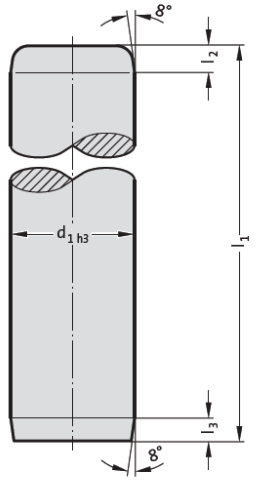
Datum 23/07/18
Name S.MATEOS

204 — Z02/Z03

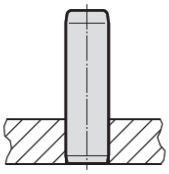
Příloha 2

Guide pillar DIN 9825/ISO 9182-2

202.19.



Mounting example



Material:

Steel, (Core strength: ≥ 900 N/mm²) surface hardened
Surface hardness: 60 + 3 HRC, Hardness penetration ≥ 1,8 mm (up to Ø 12, troughhardened)

Execution:

fine-ground and superfinished
Method of manufacturing entails that centre holes are not concentric with O.D.

Note:

Ø 3 to Ø 8 are not supplied classified.
Ø 10 to Ø 12 only available in tolerance range yellow = .10
Bearing clearance / Preloading see pairing classification at the beginning of chapter D.
Matching guide combinations, see selection matrix at the beginning of chapter D.
Assembly guide lines / Dimensional requirements and tolerances at the end of chapter D.
Tolerance range:
yellow = .10; green = .20; red = .30

202.19. Guide pillar DIN 9825/ISO 9182-2

d_1	3	4 5	6	8	10	11 12	15 16	19 20	24 25	30 32	38 40	48 50	60 63	80
l_2	2	2	2	3	3	3	4	4	6	6	6	8	8	8
l_3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
l_1														
30	●													
40	●	●	●											
50	●	●	●	●										
60	●	●	●	●										
80	●	●	●	●		●								
90					●	●	●							
100		●	●	●	●	●	●	●	●					
112					●	●	●	●	●					
125			●	●	●	●	●	●	●	●				
140			●	●	●	●	●	●	●	●				
160			●	●		●	●	●	●	●	●			
180							●	●	●	●	●	●		
200							●	●	●	●	●	●		
224							●	●	●	●	●	●		
250							●	●	●	●	●	●	●	
280							●	●	●	●	●	●	●	●
315							●	●	●	●	●	●	●	●
355							●	●	●	●	●	●	●	●
400								●	●	●	●	●	●	●
450									●	●	●	●	●	●
500									●	●	●	●	●	●
550											●	●	●	●
600											●	●	●	●
700											●	●	●	●
800											●	●	●	●

Ordering Code (example):

Guide pillar DIN 9825/ISO 9182-2		=202.19.	
Guide diameter d_1	3 mm	=	003.
Length l_1	30 mm	=	030.
Classification TOL	without	=	(0)
Order No		=202.19.	003. 030. (0)

Příloha 3

Technologický postup

Číslo dokumentu:	170470_DP_01_TP	**Výrobní zakázka:**	
Výrobek:	Klec ECR 10 12	**Číslo výkresu:**	170470_DP_01_00
Počet kusů:	10 000	**Skladové číslo:**	

Číslo operace	**Činnost / operace**	**Datum provedení**	**Osobní číslo**	**Poznámky**
10	Stříhat na padacích nůžkách (ocel 11 321) tloušťky 1,5 mm, pásy 1500 mm x 110 mm			15 tabulí po 27 pásech
20	Paleta 13022015-120 405 ks			
30	Vyrobit v nástroji 170470_DP_01 na lisu LEN63C 10 000 ks			
40	Paleta 13022015-060 10 000 ks			
50				
60				
70				
80				

Příloha 4

Vzorek	Směr válcování	a	b	S0	Fm	Rp02	ReH	ReL	Rm	A	T	Vt	Vt1
		[mm]	[mm]	[mm^2]	[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[s]	[mm/min]	[MPa/s]
1	0°	1,5	19,957	29,936	12828,4	336,785	338,362	337,106	428,528	31,875	60,1	3,02	7,95
2	0°	1,5	19,955	29,932	12772,0	332,434	337,151	334,946	426,701	32,500	60,0	2,96	7,89
3	0°	1,5	19,950	29,925	12734,4	329,063	336,281	334,717	425,544	32,500	59,9	4,31	8,00
4	0°	1,5	19,956	29,934	12772,0	332,732	338,692	337,128	426,672	31,875	59,8	5,79	8,03
5	0°	1,5	19,962	29,943	12630,8	319,126	327,596	327,596	421,828	32,500	59,4	5,95	8,05
6	90°	1,5	19,968	29,952	12941,2	353,245	353,245	351,990	432,065	29,375	59,4	4,45	8,01
7	90°	1,5	19,975	29,963	12932,0	350,606	354,691	353,436	431,599	30,000	59,8	4,93	8,03
8	90°	1,5	19,980	29,970	12866,0	349,269	346,760	345,826	429,296	30,000	59,2	2,53	7,90
9	90°	1,5	19,969	29,953	12960,0	353,233	353,554	351,671	432,678	30,000	59,8	4,53	7,99
10	90°	1,5	19,975	29,963	12894,0	350,299	353,436	350,299	430,331	28,750	59,4	5,03	8,01