



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH VÝROBY NOSNÉHO PLECHU

PRODUCTION OF SUPPORTING PLATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Filip

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jiří Filip**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 bakalářské práce:

Návrh výroby nosného plechu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh technologie výroby dílce z pozinkovaného plechu, který je horním dílem vozíku. Součástka je prostorového tvaru s otvory a bude vyráběna technologií stříhání a ohýbání. Na tuto problematiku bude také zaměřena literární studie.

Cíle bakalářské práce:

- zhodnotit technologičnost nosného plechu,
- provést rozbor možných technologií výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti,
- vypracovat aktuální literární studii se zaměřením na zvolenou technologii,
- zpracovat návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty,
- navrhnout postup výroby a popsat tvářecí nástroje.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.

FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli (odborná kniha). 1. vyd. Brno: Dům techniky. 1994. 230 s.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, Redakce báňské a strojírenské literatury, 1980. 216 s.

HELLWIG, Waldemar a Erwin SEMLINGER. Spanlose Fertigung: Stanzen. 5th ed. Braunschweig Wiesbaden: Friedr Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, 1994. 289 p. ISBN 3-528-44042-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

FILIP Jiří: Návrh výroby nosného plechu.

Práce předkládá návrh technologie výroby nosného plechu, který je vrchní součástí servisního vozíku, sloužícího k manipulaci s vypínačem vysokého napětí. Nosný plech je vyráběn z nízkouhlíkové, hlubokotažné oceli DX51D+ZM tloušťky 2 mm a jakosti dle EN 10346. Roční série byla stanovena na 200 ks. Po zhodnocení výrobních možností byly zvoleny technologie vysekávání a ohraňování. Byl navržen rozvinutý tvar součásti o rozměrech 1068 x 900 mm a vytvořen vysekávací plán. Bylo zjištěno, že z tabule 2 x 2500 x 1000 je možné vystříhnout 2 kusy nosného plechu při 70% využití materiálu. Dále byly zvoleny vysekávací nástroje a navržen výrobní postup. Největší vyvinutá, vysekávací síla byla stanovena na 122,8 kN. Zvolený stroj je hydraulický CNC lis TruPunch 5000. Pro ohýbání byl vytvořen ohraňovací plán, podle kterého budou zhotoveny ohyby ve třinácti krocích. K tomu budou použity nástroje razník OW209/S a dva druhy matric EV005 + FWZ a EV006 + FWZ. Maximální vyvinutá ohraňovací síla je, podle výpočtu, 259,8 kN. Ohýbací operace budou provedeny na CNC lisu TruBend 5130. V technicko ekonomickém zhodnocení byly stanoveny náklady na materiál polotovaru, které činí 57 337,5 Kč.

Klíčová slova: ocel DX51D+ZM, nosný plech, tváření, vysekávání, ohraňování

ABSTRACT

FILIP Jiří: Návrh výroby nosného plechu.

The thesis presents a proposal of technology for production of supporting plate, which is a top part of a service trolley, serving for manipulation with switch of high voltage. The supporting plate is manufactured of low carbon, deep drawing steel DX51D+ZM thickness 2 mm and quality according to EN 10346. Annual serie was set for 200 pieces. In evaluation of production possibilities were chosen technologies of punching and bending. There was designed unfolded shape of the sheet metal with dimensions 1068 x 900 mm and created cutting plan. As was found, from one metal board is possible to cut out 2 pieces of the supporting plate, while 70% of material use. In the next step, punching tools were chosen and manufacturing process was made. The highest achieved cutting force was 122,8 kN. The chosen machine is hydraulic CNC press TruPunch 5000. For bending there was created a bending plan, according to which bends will be made in thirteen steps. Used bending tools are punch OW209/S and two types of matrix EV005 + FWZ and EV006 + FWZ. Maximal achieved bending force is, according to the calculation, 259,8 kN. Bending operations will be made on CNC press TruBend 5130. In a technical and economical evaluation was determined cost for the material, which is 57 337,5 Kč.

Keywords: DX51D+ZM steel, supporting plate, metal forming, punching, press-brake bending

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FILIP, Jiří. *Návrh výroby nosného plechu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124921>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26.6.2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat zaměstnancům společnosti ABB s.r.o. Brno za poskytnuté informace a odborné konzultace. V neposlední řadě děkuji své nejbližší rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD	9
1 ROZBOR SOUČÁSTI	10
1.1 Výrobní možnosti	12
2 TECHNOLOGIE VYSEKÁVÁNÍ A OHRAŇOVÁNÍ	15
2.1 Vysekávání	15
2.1.1 Střížná plocha a vůle	16
2.1.2 Síla a práce	17
2.1.3 Vysekávací plán	18
2.1.4 Nástroje	19
2.1.5 Stroje	21
2.2 Ohraňování	22
2.2.1 Napjatost, deformace a poloha neutrální osy	23
2.2.2 Poloměr ohybu a odpružení	24
2.2.3 Síla a práce	25
2.2.4 Nástroje	26
2.2.5 Stroje	27
2.3 Technologičnost	29
3 VÝROBA SOUČÁSTI	30
3.1 Stanovení rozvinutého tvaru	30
3.2 Vysekávací plán a volba polotovaru	32
3.3 Postup výroby vysekáváním a volba stroje	34
3.4 Postup výroby ohraňováním	36
3.5 Výpočet parametrů ohraňování a volba stroje	40
4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	43
5 ZÁVĚRY	44

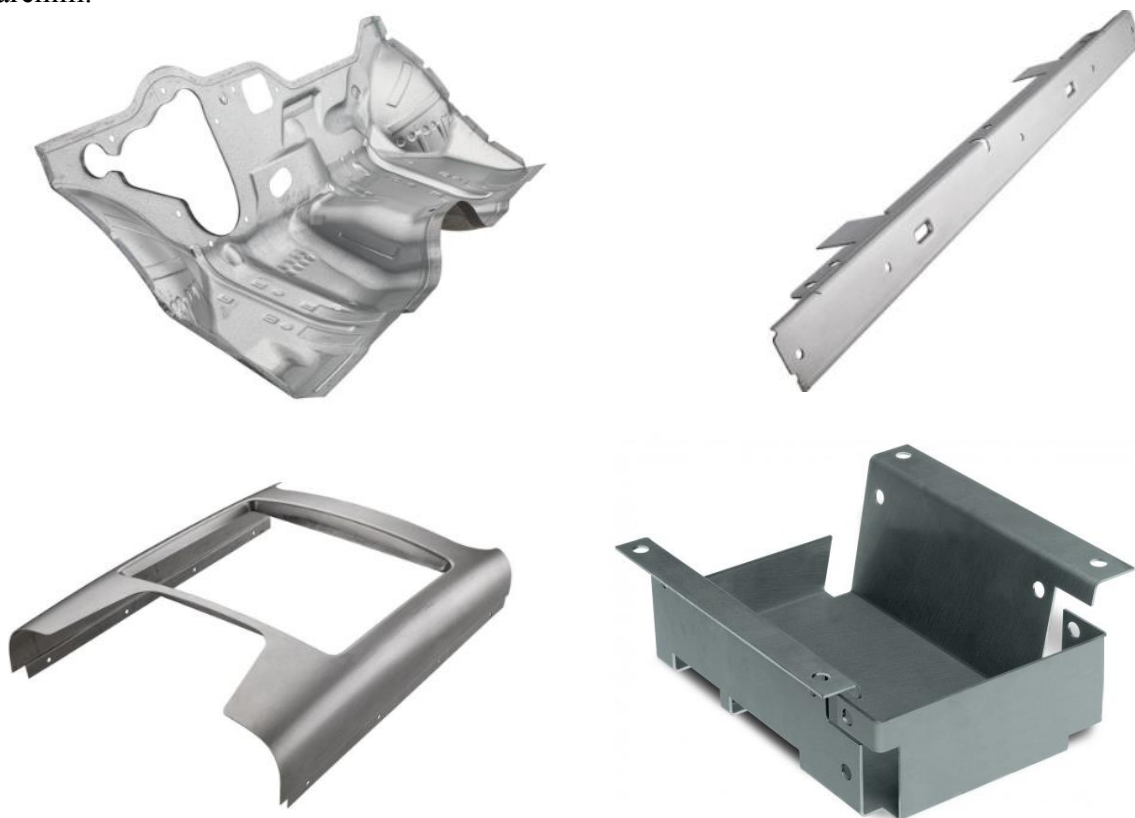
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	
Seznam výkresů	

ÚVOD [1] [2] [3] [4] [5]

Strojírenství je jedním z nejrozmanitějších oborů, který se opírá o všeobecné znalosti fyziky, vědy o materiálech a také ekonomiky. Úkolem strojního inženýra je dostat produkt od nápadu přes tvorbu modelu, výrobu a testování, až na trh. Přitom musí splňovat přísná kritéria a požadavky zákazníka zejména na funkčnost, estetiku a odolnost tak, aby byl zajištěn jeho bezproblémový provoz. To vše za konkurenceschopnou cenu. Pro zhotovení strojní součásti je klíčové zvolit vhodnou výrobní technologii. Tedy takovou, při níž bude dosažena dostatečná kvalita při nejkratším možném čase a nákladech.

Jednou z možností je technologie tváření. To je proces, při kterém se působením vnějších sil, plasticky formuje polotovar do konkrétního tvaru, přičemž nedojde k porušení materiálu. Vyplatí se především v hromadné a sériové výrobě, jelikož náklady na pořízení a provoz strojů i nástrojů bývají vysoké. Tváření se dělí na objemové a plošné. Při objemovém dochází k trojosému pretvoření, tedy k přeměně v celém objemu tělesa. Do této oblasti patří například operace protlačování, pýchování, kování a válcování.

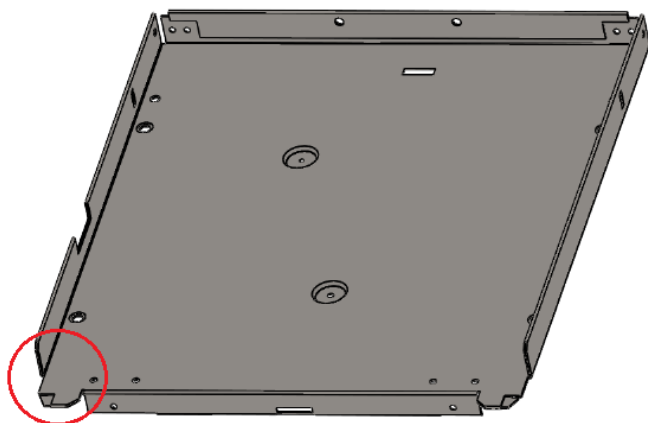
Při plošném tváření je materiál deformován pouze ve dvou osách. To znamená, že se nemění jeho tloušťka. Zpracovávaným polotovarem je zpravidla plech. Základními technologiemi jsou tažení, ohýbání a stříhání. Na obr. 1 jsou zobrazeny příklady součástí zhotovených plošným tvářením.



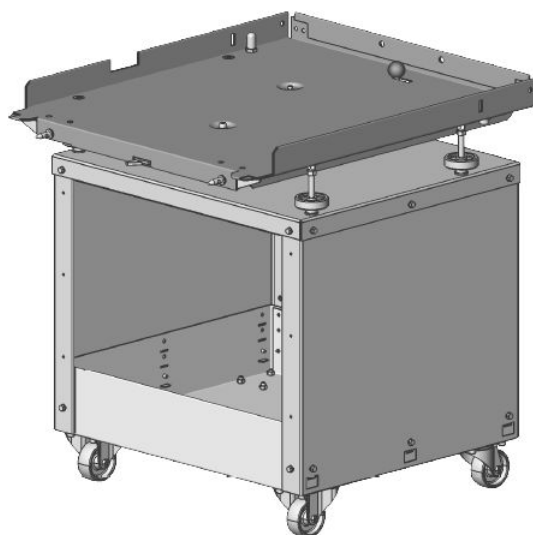
Obr. 1 Součásti vyrobené plošným tvářením [3] [4]

1 ROZBOR SOUČÁSTI [6] [7] [8] [9]

Řešený díl je nosný plech (obr. 2) připevněný k vrchní části servisního vozíku (obr. 3). Ročně se ho vyrobí několik stovek kusů a slouží pro manipulaci s vypínačem (z a do rozváděče vysokého napětí). Při vyjímání vypínače je tato pojízdná soustava přistavena k rozváděči (viz příloha 1), kde je pomocí dvou vodících šroubů a ovládací páky zajištěna její nehybná poloha. Vypínač se pak položí právě na plechovou součást, která plní funkci nosného plechu.

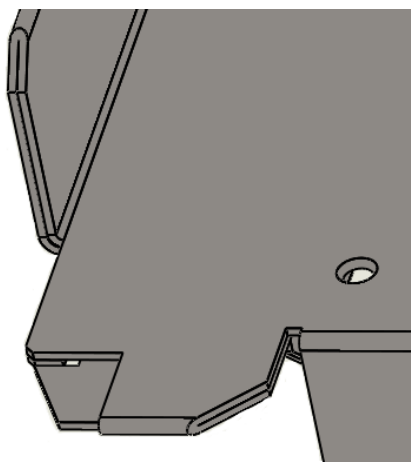


Obr. 2 Nosný plech

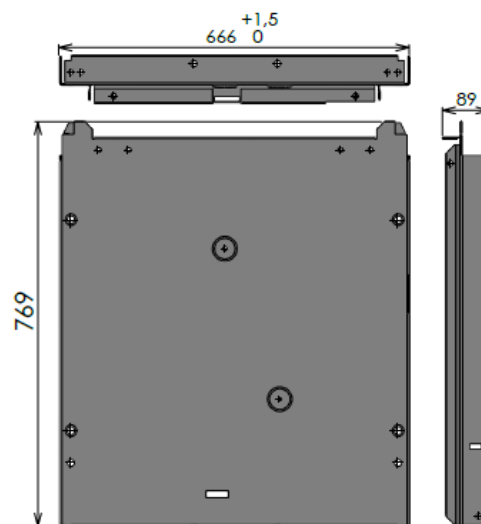


Obr. 3 Servisní vozík [7]

Vozík byl vyvinut ve firmě ABB s.r.o. v Brně. ABB je přední světová společnost zabývající se problematikou energetiky a automatizace. Organizačně se dělí na čtyři divize. Těmi jsou Elektrotechnické výrobky, Robotika a pohony, Průmyslová automatizace a Energetika. Firma sídlí v Curychu ve Švýcarsku a pobočky má ve 100 zemích světa. V České republice se nachází v 8 lokalitách. Nejvýznamnější výrobní závody a výzkumná centra jsou v Praze, Trutnově, Ostravě, Jablonci nad Nisou a Brně. Konkrétně brněnský závod se zabývá výrobou transformátorů, senzorů a rozváděčů vysokého napětí.



Obr. 4 Detailní pohled na dvojité ohyby

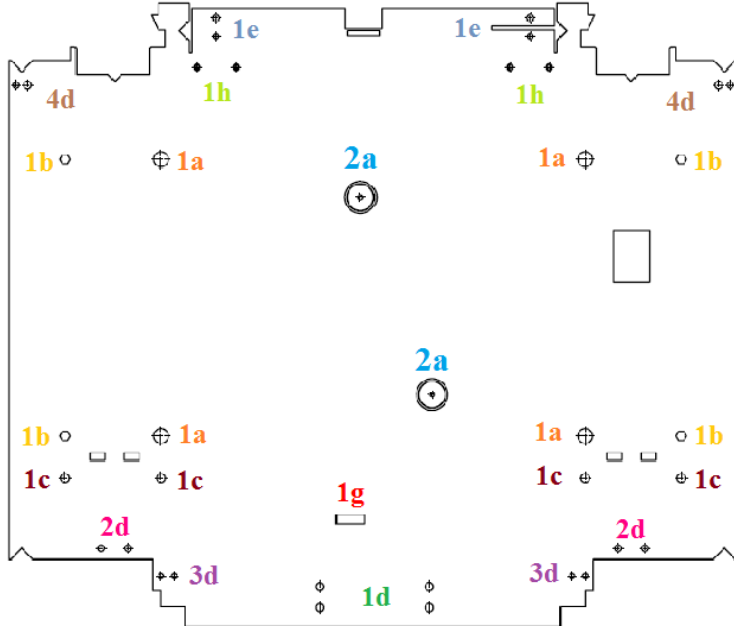


Obr. 5 Základní rozměry součásti

Nosný plech je výrobně složitý kvůli dvojitým ohybům, které jsou detailněji zobrazeny na obr. 4, jenž se odkazuje do červeného označení z obr. 2. Tyto jsou nezbytné pro zajištění dostatečné tuhosti a pevnosti.

Výhledovým cílem je vymyslet návrh, kterým by se výroba součásti zjednodušila a urychlila. Při změně konstrukce by však musely zůstat zachovány požadavky na tuhost a pevnost. Základní rozměry dílu (obr. 5) jsou 769 x 666 s tolerancí + 1,5 mm a s tloušťkou plechu 2 mm.

Na obr. 6 jsou označeny důležité otvory pro montáž. Díry s označením (1b) jsou šestihranného tvaru. Po ohnutí leží ve stejné ose nad kruhovými otvory (1a) a oběma prochází lisovací matice. Uprostřed součásti se nachází dva prolisy s průchozími dírami (2a), pomocí nichž je ze spodu dílu přišroubována ovládací páka. Označení (1c) mají díry, které jsou určeny pro zpevnění dna pomocí šroubů a matic. Páry otvorů s označením (1d-4d) slouží pro nýtové spojení bočnic. V (1e) jsou zašroubovány vodící šrouby a (1h) jsou pro nýty se zápusťnou hlavou, které drží vyztužovací lištu, zesponu dílce. (1g) je prostor pro rukojeť ovládací páky. Otvory jsou zhotoveny v toleranci podle ČSN ISO 2768 mK.



Obr. 6 Označení otvorů pro montáž

Nosný plech je vyráběn z nízkouhlíkové, hlubokotažné oceli určené k ohýbání a profilování. S ohledem na to, že uhlíkové oceli snadno podléhají korozi, jsou plechové tabule chráněny povrchovou úpravou. Ta se nanáší ponorem do roztavené lázně. Podle oblasti, ve které se ocel používá, jsou aplikovány různé druhy povlaků, nejčastěji ze slitin zinku a dalšího kovu. Povrch součásti nosného plechu je chráněn poměrně novým druhem povlaku, kterým je tzv. Magnelis® (označení ZM). Nanáší se v průmyslových žárových zinkovnách a lázních, kromě zinku, obsahuje 3,5 % hliníku a 3 % hořčíku, který je důležitý pro vytvoření stabilní a odolné vrstvy, poskytující lepší ochranu povrchu proti korozi. Další výhody a porovnání Magnelisu® oproti ostatním povlakům je uvedeno v příloze č. 2. Ocel, včetně povrchové úpravy, má podle normy EN 10346, označení DX51D+ZM. Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli [9]

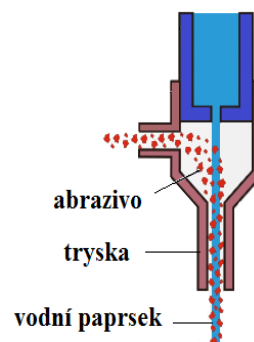
Materiál	DX51D + ZM (EN 10346)	
Mechanické vlastnosti	Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	270-500
	Tažnost A80 [%] min.	22
Chemické složení	Uhlík C [%] min.	0,180
	Mangan Mn [%] min.	1,200
	Fosfor P [%] min.	0,120
	Síra S [%] min.	0,045
	Křemík Si [%] min.	0,500
	Titan Ti [%] min.	0,300

1.1 Výrobní možnosti [2] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [44] [47] [48]

Pro výrobu dané součásti je důležité, z několika možných technologií, zvolit tu nejvhodnější. Nejdůležitějšími kritérii jsou v tomto případě, jakost dílu, výrobní čas a cena. Jelikož se jedná o součást, vyráběnou v kusové výrobě (tzn. několik set kusů za rok), dalším kritériem je i strojní vybavenost firmy.

Pro zhotovení výše uvedené součásti je zapotřebí vytvoření požadovaných otvorů a ohybů. S tímto ohledem budou níže popsány a zhodnoceny technologie dělení a ohýbání materiálu. Nejprve budou rozebrány metody výroby rozvinutého tvaru součásti:

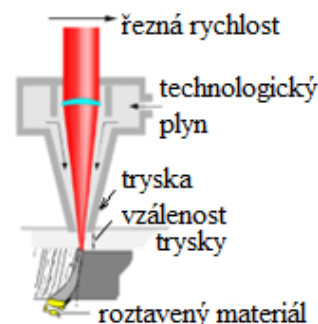
- Řezání vodním paprskem – metoda funguje na principu stlačení vody do velmi úzké trysky (obr. 7). Z ní vychází paprsek rychlostí vyšší, než je rychlost proudění zvuku. Takto je možné řezat různé druhy materiálů v rozmezí tloušťek 0,1 až 200 mm. Šířka spáry závisí na použité trysce a bývá 0,1 až 1 mm. Touto technologií je možné dělit materiál s přesností na desetinu milimetru a drsnost řezné plochy, při kvalitním řezu, se pohybuje okolo Ra 3,2. V místě řezu nedochází k tepelnému ovlivnění, a tedy ani k vzniku vnitřních pnutí. Mezi nevýhody patří nevyhnutelný styk zpracovávaného materiálu s vodou, s čímž souvisí následné sušení a také ochrana proti korozi. Dalšími, nevýhodami jsou vysoké pořizovací náklady a malá pracovní rychlost. Jedním z požadavků na výrobu nosného plechu je zvýšit produktivitu výroby, tím pádem je třeba zvolit metodu s možností vyšší pracovní rychlosti. Z těchto důvodů je použití vodního paprsku nevýhodné.
- Řezání plazmou (obr. 8) – principem je lokální natavování materiálu následované vyfukováním taveniny, z místa řezu, tzv. plazmovým plynem, kterým je, pro konstrukční oceli, nejčastěji kyslík v kombinaci se vzduchem. Při řezání se využívá vysoké teploty, a rychlosti paprsku plazmy, jenž je, mimo jiné, vhodný i pro dělení dvoumilimetrového ocelového plechu, určeného pro výrobu nosného plechu. Mezi výhody se řadí vysoká řezná rychlost pro malé tloušťky materiálu. Nevýhodami jsou velká šířka spáry, což znamená větší množství odpadu, čímž by docházelo k prodražení výroby. Další nepříznivé faktory jsou tepelně ovlivněná oblast, nízká kvalita řezné plochy, vznik zplodin, hluchost a v neposlední řadě také vysoké pořizovací náklady. Za těchto okolností je uvedená metoda nevhodná.
- Řezání laserem – je technologie využívající tenkého (0,1 až 0,3 mm) zaostřeného paprsku působícího na velmi malou plošku (obr. 9). Vzniklá energie vede k rychlému lokálnímu ohřátí, natavení a částečnému nebo úplnému vypařování materiálu. Páry, vzniklé odpařováním, jsou vyfukovány z místa řezu technologickým plynem. K výhodám tohoto způsobu dělení patří vysoká rychlost pracovního procesu, přesnost na desetiny milimetru, vhodnost pro řezání plechu tloušťky 2 mm nebo také to, že při řezání není přímý kontakt mezi řezaným povrchem a nástrojem, čímž nedochází k jejich vzájemnému



Obr. 7 Řezání vodním paprskem [15]



Obr. 8 Řezání plazmou [47]



Obr. 9 Laser [17]

poškození. Naopak nevýhody jsou nemožnost použití této metody na všechny kovy. V neposlední řadě jsou nevýhodné vysoké pořizovací i provozní náklady. Hlavním důvodem, pro označení laseru jako nevhodného je však fakt, že firma, kde se řešená součást vyrábí není touto technologií vybavena.

- Stříhání v nástroji – střížné nástroje mohou být buď jednoduché, nebo postupové (obr. 10). Jednoduchým se stříhají výstřižky, které lze vyrobit na jeden zdvih. Postupovými se vytváří složitější výlisky, ve dvou nebo více krocích. Principem je oddělování materiálu za působení smykového napětí v rovině stříhu, které vznikne od hran střížníku a střížnice. Běžně používaným materiálem, pro tuto technologii, je ocelový plech do tloušťky 3 mm, což by splňovalo jeden z předpokladů pro výrobu nosného plechu. Výhodami jsou dobrá přesnost a drsnost střížných ploch. Ovšem vzhledem k rozměrům a množství různorodých děr řešené součásti, by konstrukce nástroje byla velmi komplikovaná, náročná na výrobu a drahá. Z tohoto důvodu by se použití této metody nevyplatilo.



Obr. 10 Postupový střížný nástroj [44]

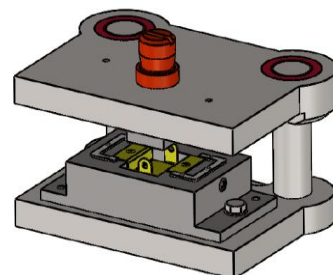
- Vysekávání – principem je prorážení otvorů, různých tvarů, do tabule, nebo pásu plechu, speciálními nástroji. To se provádí převážně na počítačem řízených CNC strojích (obr. 11). Přitom dochází k přímému kontaktu tvářeného polotovaru a nástroje, z čehož pramení nevýhody jako je jejich opotřebení a také hluk při práci. Přednostmi jsou rychlá, automatizovaná výměna nástroje, který nemusí nutně sloužit pouze k děrování, ale také například k vytváření prolisů i jednoduchých ohybů. Tloušťka ocelového plechu, vhodná pro vysekávání je v rozmezí 0,4 až 8 mm. Přesnost otvorů se pohybuje v řádu setin milimetru. Metodu lze využít jak pro kusovou, tak velkosériovou výrobu. Vzhledem k nízké roční produkci součástí by se pořizování vysekávacího centra, pouze pro jeden účel, nevyplatilo. Ve firmě se však vyrábí celé série plechových součástí, tím pádem jsou stroje plně vytíženy. Vysekávání je tedy vhodná metoda pro výrobu rozvinutého tvaru nosného plechu.



Obr. 11 Vysekávání [12]

Po zhotovení rozvinu přichází na řadu ohýbání součásti do finální podoby. K tomu je potřeba zvolit metodu, kterou toho bude možno docílit při nejkratším možném výrobním čase a při minimálních nákladech. Dále tedy budou porovnány technologie, sloužící k vytváření ohybů:

- Ohýbací nástroj – jedná se o vytváření ohybů menších či větších poloměrů pomocí pohyblivého ohybníku a pevné ohybnice (obr. 12). Tohoto způsobu ohýbání je výhodné využít tam, kde se ve velké sérii vytváří jeden typ ohybů. Nejčastější použití je pro ocelové plechy do tloušťky 6 mm. Nevýhody jsou, výrobní časy prodloužené ustavováním polotovaru na dorazy zvláště pro každou operaci, složitá montáž, nebo nevhodné použití pro velmi rozměrné díly. Nosný plech je tvořen dvojími ohyby, což by konstrukci nástroje, přinejmenším, velmi zkomplikovalo. Navíc počet vyrobených kusů za rok je pouze několik stovek. Z těchto důvodů není ohýbací nástroj ideálním řešením.



Obr. 12 Ohýbací nástroj

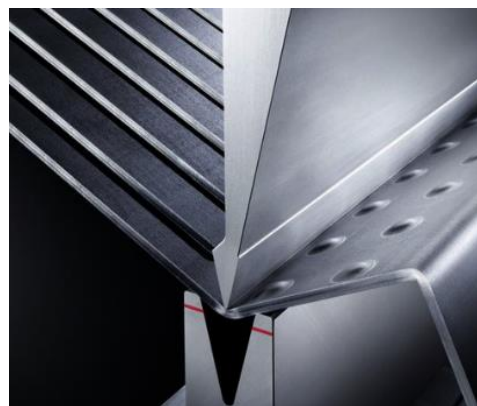
- Ohýbačka – nejprve se polotovar přesně ustaví a sevře mezi čelisti (obr. 13). Následuje ohyb, který je proveden ručně pomocí páky, eventuálně hydraulicky nebo elektricky. Na ohýbačce se nachází stupnice, ukazující úhel ohybu. Po dokončení operace je sevření povoleno a díl se vyjme. Metoda je vhodná pro rozměrově větší součásti v kusové výrobě, pro plechy o maximální tloušťce 3 mm. Nevýhody spočívají v nižší přesnosti, při manuálním ovládání, fyzické náročnosti na obsluhu a dlouhému výrobnímu času. Na nosném plechu je potřeba zhotovit i dvojité ohyby, což by, i při výrobě několika stovek kusů ročně, bylo, minimálně, velmi náročné. Proto je použití téhle varianty nevhodné.
- Ohýbací centrum – principem je ohýbání pomocí pohyblivého horního i spodního nástroje, přídržovací lišty a rotačního, dvouosého, manipulátoru, který, podle potřeby, pohybuje s vyráběnou součástí (obr. 14). S ohledem na nosný plech, je metoda vhodná pro ocelový, plechový materiál tloušťky 2 mm, přičemž lze zhotovit různé druhy ohybů, včetně dvojitých. Využití je jak pro velké, tak i malé výrobní série. Proces upínání a ohýbání je plně automatický, což znamená menší nároky na obsluhu. Nevýhodou je, že se popisovaná technologie, hodí spíše pro rozměrově menší součásti, než jaké má řešený dílec. Navíc pořizovací cena je vysoká. Proto, tento způsob výroby, není použit.
- Ohraňování – je vytváření ohybů pomocí dvou vyměnitelných nástrojů, razníku a matrice (obr. 15). Prvně zmíněný koná svislý pohyb, přičemž tlačí, předem ustavený, materiál do dutiny nepohyblivé matrice. Ohraňování se provádí na počítačem řízených lisech, které jsou vybaveny senzory pro kontrolu velikosti úhlu ohybu a také programovatelnými dorazy. Použití je vhodné pro rozměrnější dílce, o tloušťkách plechu do 6 mm, v malosériové a kusové výrobě. Takto lze vytvářet různé typy ohybů, včetně dvojitých, na jedné součásti ve sledu operací až do finální podoby. Vzhledem k výrobním možnostem, počtu vyráběných kusů a strojního vybavení firmy, je tato metoda vhodná pro zhotovení konečného tvaru nosného plechu.



Obr. 13 Ruční ohýbací nástroj [19]



Obr. 14 Ohýbací centrum [14]



Obr. 15 Ohraňování [11]

Po zhodnocení výrobních metod se ukázalo, že operace děrování bude nejvhodnější realizovat vysekáváním na CNC stroji, který zvládne kompletní výrobu rozvinu. Ohyby budou zhotoveny ohraňováním na CNC lise. Na tyto metody bude zaměřena teoretická a návrhová část práce.

2 TECHNOLOGIE VYSEKÁVÁNÍ A OHRAŇOVÁNÍ [11] [20] [14]

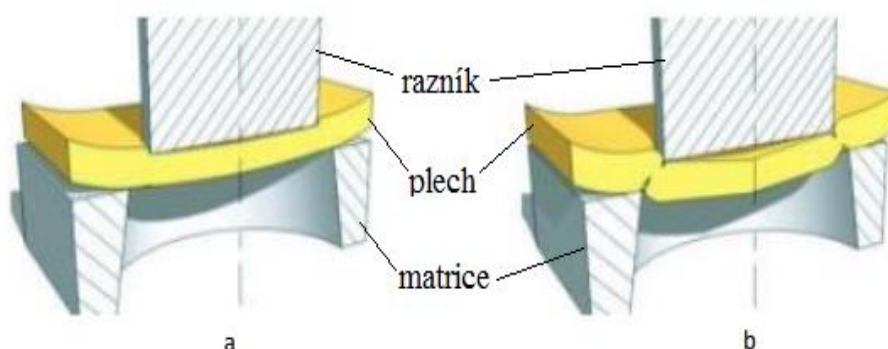
Procesy vysekávání a ohraňování se řadí do technologie plošného tváření. Tyto stále poměrně nové technologie se pro společnosti, zabývajícími se zpracováním plechových dílů, stávají nenahraditelnými z mnoha důvodů. Největší přínos mají při vytváření téměř neomezeného množství různých tvarů, i o velkých rozměrech, s vysokými přesnostmi. Tvářeným polotovarem je převážně tabule nebo pás plechu, který je zpracováván za studena. Při tomto procesu se mění původní tvar polotovaru na tvářenou součást. Vysekávání a ohraňování jsou moderní obdoby stříhání a ohýbání a platí pro ně stejné principy a zásady.

Výrobu významně ovlivňují automatická CNC centra. Díky těm je eliminována řada manuálních operací, na které by obvykle bylo potřeba pomocných pracovníků. K vytvoření ohybů a otvorů tak v podstatě stačí na počítači vytvořit 3D model, který je převeden do formátu, jenž stroj dokáže zpracovat.

2.1 Vysekávání [12] [21] [22] [23] [24]

Principem je oddělování materiálu břity dvou nástrojů, přičemž jeden se pohybuje vůči druhému. Je to beztržková technologie, probíhající výhradně za studena, která se zabývá zhotovováním různých kruhových i tvarových otvorů pomocí speciálních děrovacích nástrojů, razníků a matic. Oddělování materiálu je možné popsat ve třech fázích. První je pružné vnikání do povrchu (obr. 16 a), objevující se při dosednutí razníku na polotovar. Hloubka vniku je ovlivněna mechanickými vlastnostmi kovu a její hodnota se pohybuje v rozmezí 5 až 8 % jeho tloušťky. Razník tlačí vysekávaný materiál do matrice (která se nachází pod plechovou tabulí) a tím, mezi nástroji, vznikají silové dvojice, ježž důsledkem dochází k nežádoucímu ohybu. Druhou fází je plastická deformace. Napětí ve směru vnikání je vyšší než mez kluzu materiálu. Podle mechanických vlastností kovu je hloubka vniknutí 10 až 25 % tloušťky. Při třetí fázi (obr. 16 b) dosáhne napětí na mezí pevnosti ve stříhu a začínají vznikat mikrotrhliny. Ty se postupně šíří tak dlouho, až je výstřížek oddělen. Rychlost vzniku a šíření trhlin určují nejen mechanické vlastnosti, ale i velikost střížné vůle.

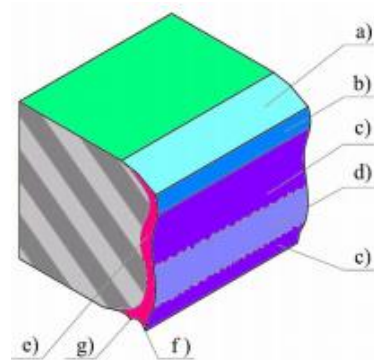
Na vysekávacích strojích je možné provádět i další operace, jako vytváření kontur, zhotovování jednoduchých ohybů nebo i operace popisování a značení. Výhodami jsou zejména rychlost, vysoká přesnost, drsnost střížné plochy, malé deformace na plechovém dílu a v neposlední řadě možnost částečné, či úplné automatizace výroby.



Obr. 16 Fáze stříhu [24]

2.1.1 Střížná plocha a vůle [2] [13] [24] [25] [26]

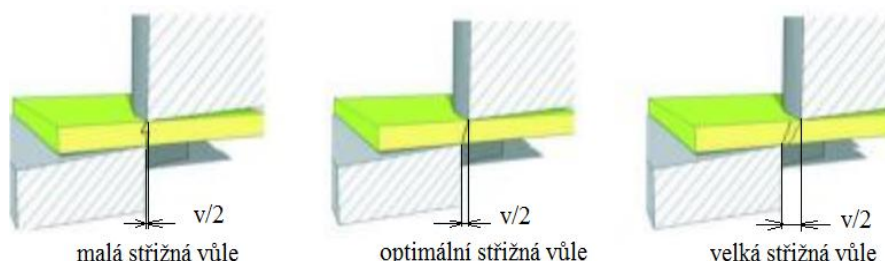
Na kvalitu a tvar střížné plochy, která má tvar „S“, má vliv několik faktorů. Jsou to mechanické vlastnosti vysekávaného materiálu, přičemž u tvrdších materiálů je kvalita povrchu nižší. Při průchodu razníku materiálem je výlisek oddělen dříve, než razník projde celou tloušťkou tvářeného plechu. Dále pak už dochází jen k jeho vytlačování. To zapříčiní, že okraje střížných ploch jsou částečně zdeformované. V oblasti výskytu prvních trhlin má střížná hrana větší drsnost než na dalších plochách. Plochu stříhu lze rozdělit do několika pásem, které jsou označeny na obr. 17. V prvním úseku (a) dochází k zeslabení, objevující se v první fázi pružného vníkaní čela razníku do materiálu. Oblast plastického stříhu (b) vzniká při plastickém deformování břitem nástroje. Tato plocha je nejhladší částí. Písmenem (c) jsou označeny dvě pásma. Vrchní se prohlubuje a spodní vystupuje. Tím vzniká křivka lomu ve tvaru „S.“ Mezi těmito, se nachází místo otěru (d), které je příčinou protlačování materiálu razníkem přes matrici. V blízkosti oblasti oddělení vzniká zpevnění (e), které zasahuje zhruba do 20 až 30 % tloušťky plechu. Na spodní straně vzniká otřep (f), který se zvětšuje s otupením břitu spodního nástroje a při vyšší tvárnosti materiálu. Otlacení (g) vzniká při tlačení plechu do matrice.



Obr. 17 Pásma střížné plochy [25]

Důležitou roli na kvalitu střížné plochy, ale také na životnost nástroje a spotřebu energie, hraje správná volba velikosti střížné vůle. To je vzdálenost mezi pracovní částí razníku a matrice. Vůle musí být rovnoměrná na obou stranách. Pokud tomu tak není, dochází, na ploše stříhu, ke vzniku otřepů a povrchových vad. Její volba závisí hlavně na tloušťce a vlastnostech stříhaného materiálu. Čím je vyšší jeho pevnost, tím větší je volena vůle.

Obr. 18 zobrazuje křivky lomu při špatné i optimálně zvolené střížné vůli. Její velikost pro různé druhy materiálů, lze zvolit podle normy ČSN 22 6015. Přesněji ji lze určit pomocí výpočtu. Pro materiály o tloušťce do 3 mm slouží vzorec:



Obr. 18 Vliv střížné vůle na kvalitu střížné plochy [24]

$$v = 2 \cdot z = 2 \cdot 0,32 \cdot c_s \cdot s \cdot \sqrt{\tau_s} \text{ [mm]}, \quad (2.1)$$

kde: v střížná vůle [mm]

z střížná mezera ($z = \frac{v}{2}$) [mm]

c_s součinitel střížné vůle (0,005 až 0,035 [-])

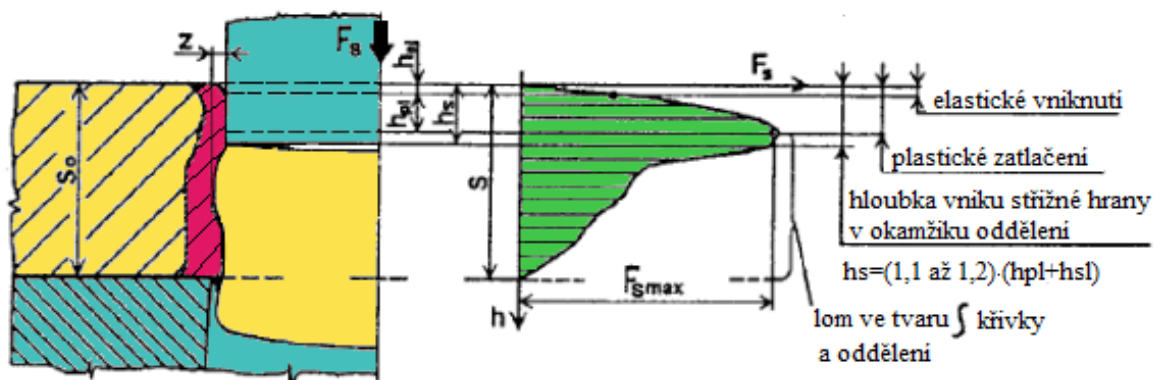
s tloušťka materiálu [mm]

τ_s pevnost materiálu ve smyku [MPa]

2.1.2 Síla a práce [13] [24] [27]

Střížná síla je důležitým parametrem, který je nezbytné znát zejména při volbě vhodných střížných nástrojů a stroje.

Při stříhání dochází ke kombinovanému namáhání. Kromě smykových, vznikají další přídatná namáhání, kvůli čemuž se výsledná síla volí o 20-50 % větší.



Obr. 19 Závislost střížné síly na hloubce vniknutí střížného nástroje [27]

Na obr. 19 je znázorněno, jak se mění velikost síly při vnikání nástroje do povrchu tvářené součásti. Nejprve při malém posuvu dochází k přechování pod břitem, za neúměrného nárůstu síly. Po překonání elastické deformace síla dále roste a dochází k deformaci plastické vlivem které se oblast stříhu zpevňuje. Poté, co se objeví první trhliny, síla mírně poklesne. V bodě h_s – hloubka vniknutí, dojde k lomu a oddělení výlisku od zbytku tabule. Mezi plochou lomu a střížným nástrojem vzniká třecí síla, kterou musí ještě nástroj překonat. To vysvětluje, proč křivka v grafu (obr. 19) klesá k nule pozvolna.

Aby došlo k odlomení materiálu ve střížné ploše, musí odpor proti ustřížení dosáhnout meze pevnosti v tahu. To se vypočítá jako:

$$\tau_s = 0,8 \cdot R_m \text{ [MPa]}, \quad (2.2)$$

kde: R_m mez pevnosti v tahu [MPa]

Vzorec (2.2) se následně použije při výpočtu střížné síly, který je:

$$F_s = S \cdot n \cdot \tau_s \text{ [N]}, \quad (2.3)$$

kde: F_s střížná síla [N]

S střížná plocha [mm^2]

n koeficient opotřebení hran nástroje (1 až 1,3) [-]

Aby byl vzorec (2.3) kompletní, je nutné ještě určit výpočet střížné plochy. Ta je dána délkou střížné hrany a tloušťkou materiálu:

$$S = l_s \cdot s \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (2.4)$$

kde: l_s délka střížné hrany (obvod střížníku) [mm]

Velikosti střížné práce odpovídá plocha pod křivkou průběhu síly (obr. 19). Její výpočet je dán vztahem:

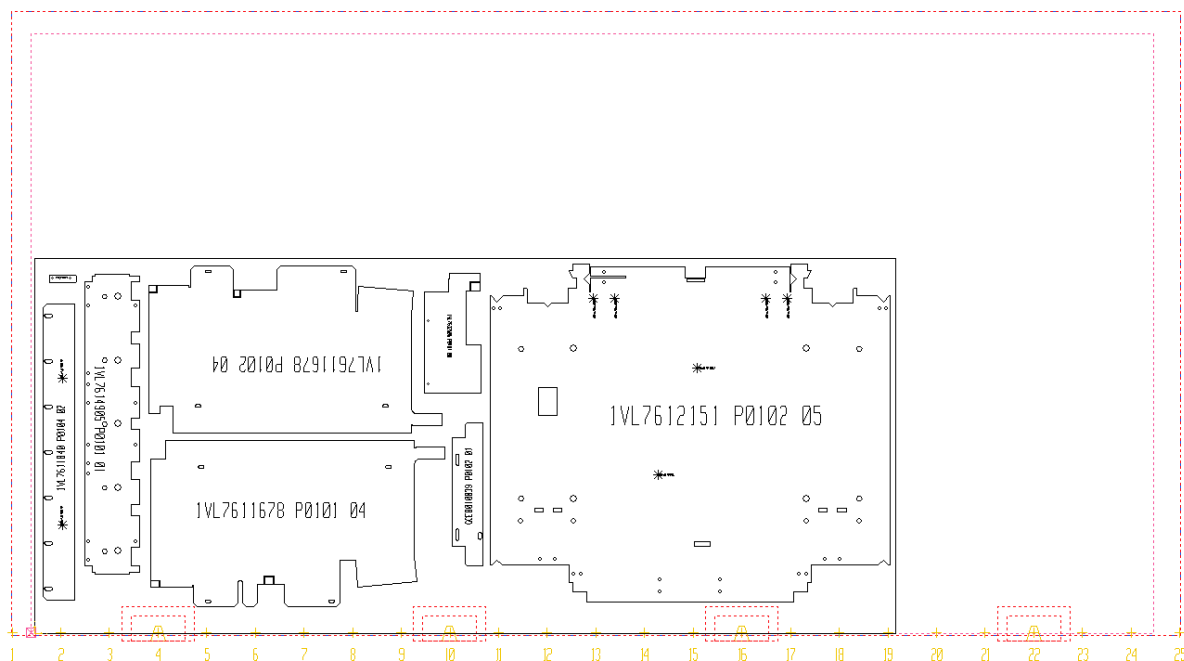
$$A_s = F_s \cdot h \cdot k_p \text{ [J]}, \quad (2.5)$$

kde: h hloubka vniknutí nástroje [mm]

k_p součinitel plnosti (0,2 až 0,8) [-]

2.1.3 Vysekávací plán [7] [13] [24] [28]

Vysekávací plán slouží pro vhodné uspořádání výstřižků na pásu, nebo tabuli plechu. Z ekonomických důvodů (materiál představuje největší podíl nákladů na výrobu) se provádí za účelem snížení odpadu na minimum a co nejefektivnějšímu využití celé tabule. Vzniklý odpad je vysekaný obrys, označen jako technologický. Části plechu oddělené pomocí nástrojů, které v průběhu vysekávání odpadávají pod pracovní stůl do přepravek nebo na pásový dopravník, se nazývají odpadem konstrukčním.



Obr. 20 Vysekávací plán [7]

Procentuální využití tabule plechu se vypočte jako:

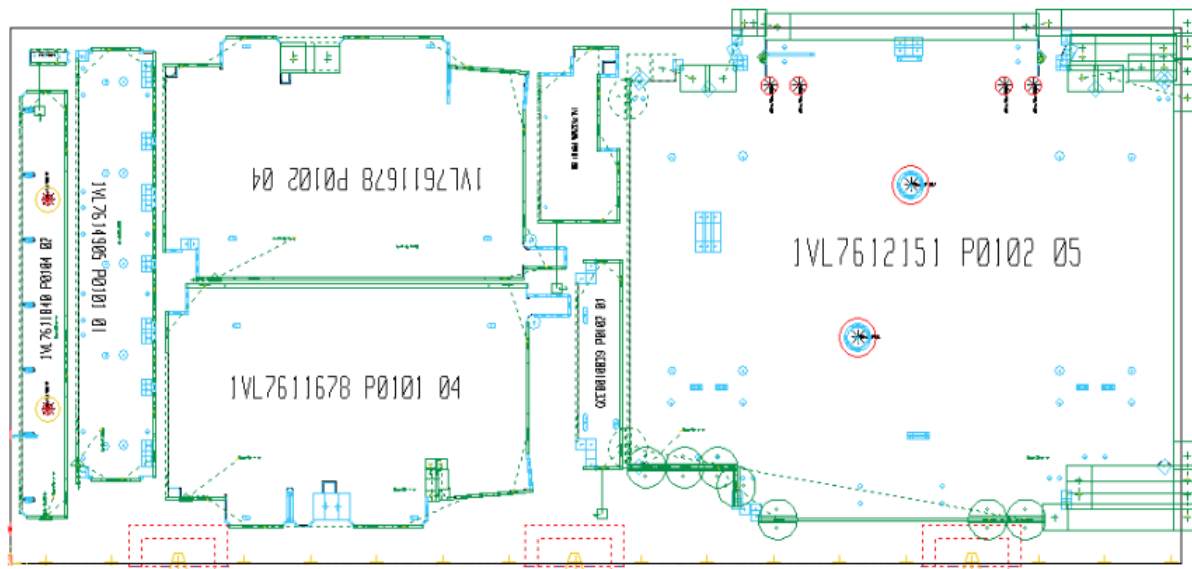
$$k_{mat} = \frac{S_{sou} \cdot n_{sou}}{L_t \cdot M_t} \cdot 100 [\%], \quad (2.6)$$

kde: k_{mat} součinitel využití tabule [%]
 S_{sou} plocha součásti bez otvorů [mm^2]
 n_{sou} počet kusů na jedné tabuli [-]
 L_t délka tabule plechu [mm]
 M_t šířka tabule plechu [mm]

Volbu vysekávacího plánu je nutno provádět s ohledem na technologické zásady. Vyhýbat se předepisování některých geometrických tolerancí, jako jsou kolmost střížné plochy a rovinnost výstřižků, které lze jen těžko dodržet, volit spíše kruhové, před nekruhovými otvory a také dbát na minimální vzdálenosti mezi nimi a vnějšími okraji.

Nástříhový plán pro vysekávací CNC centra je vytvářen pomocí počítačového programu, který je do firmy pořizován společně se strojem. Programátor navrhne optimální rozložení dílů, zvolí parametry tabule a používané nástroje. Program pak spočítá využití materiálu, výrobní čas operace nebo i počet zdvihů jednotlivých nástrojů. Obr. 20 ukazuje vysekávací plán vytvořený v programu TruTops od výrobce TRUMPF, který je dodavatelem strojů pro firmu ABB. Na něm lze vidět tabuli plechu, na ní rozmístěné výstřižky, 25 pozic pro nástroje, 4 upínací klapky, ochranné zóny kolem upínek a maximální rozsah pohybu hlavy kolem celého prostoru.

Vysekávací plán, z obrázku, byl vytvořen pro stroj TruPunch 5000 s pracovním rozsahem 3050 x 1550 mm a silou beranu 220 kN. Na obr. 21 je stejný vysekávací plán s pohledem na rozložení dílů na tabuli a se zobrazenými vysekávacími nástroji. Začíná se od nejmenších postupně po největší nástroje, a nakonec oddělení hotového dílu od zbytku tabule.



Obr. 21 Vysekávací plán se zobrazenými nástroji [7]

2.1.4 Nástroje [14] [25] [29]

Základními nástroji pro vysekávání jsou razník a matrice. Ty jsou doplněny ustavovacím kroužkem a stěračem. Všechny tyto části jsou upnuty ve speciální kazetě a dohromady tvoří nástrojovou sestavu (obr. 22).

Matrice je část sestavy, která se při pracovním procesu nachází pod tabulí plechu. Skrze ni vede průchozí otvor, který má negativní tvar razníku. Rozměr otvoru v matici je o střížnou vůli větší, než je rozměr razníku. Vysekaný materiál propadává tímto otvorem dolů pod pracovní stůl stroje na pásový dopravník. Ustavovací kroužek slouží k zajištění přesné polohy razníku vůči matici a k jeho upnutí v nástrojové kazetě. Razník je s ustavovacím kroužkem na pevně spojen upínacím mechanismem, aby mezi nimi nedošlo k pohybu. Stěrač je součástí, která je uprostřed opatřena průchozím otvorem pro průchod razníku. Může sloužit ke stírání tabule plechu z razníku, na jehož obvodě se zachytí při pohybu ven z řezu. Při tomto využití se stěrač nepohybuje a je umístěn těsně nad povrchem vysekávané tabule.



Obr. 22 Nástrojová sestava pro vysekávání [14]



Obr. 23 Multitool [30]

Další využití spočívá v přidržování tabule, která je vlivem síly stěrače přitlačena k matrici, zatímco probíhá pracovní zdvih razníku. V tomto případě nedochází k zachytávání tabule o razník a proces ražení je přesnější.

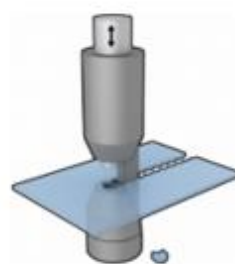
Pro vyšší produktivitu práce byl výrobcem vyvinut takzvaný Multitool (obr. 23). To je nástrojová hlava, do které je možné upnout více razníků a matic pro různé operace (podle výrobce TRUMPF až 10). Díky tomu dojde ke zkrácení časů na výměnu nástrojů. Při změně operace (například vysekávání kruhového obvodu za obdélníkový) si stroj v této hlavě vybere příslušnou kombinaci razníku a matrice a plynule pokračuje v práci.

Velkou úsporou pracovního času je vhodně zvolený nástroj, který může být použit na co nejvíce operací při jednom vysekávacím procesu. Využívá se jeho rotace okolo své osy, čímž je možné jedním nástrojem zhotovit stejné otvory, které jsou na dílci třeba různě pootočené.

Základní rozdělení nástrojů je na:

- děrovací – těmi se zhotovují vnitřní tvary jedním úderem, nebo sérií rychle opakujících se rázů při kterém se do místa řezu postupně posouvá plechová tabule. Vysekávané díry se částečně překrývají a vytvářejí tak otvor větší, než je rozměr nástroje. Tato metoda se nazývá niblování (obr. 24 a).

- dělicí – používají se pro vytvoření vnějších tvarů nebo oddělování hotových dílů od tabule. Tyto nástroje dokážou na jeden zdvih, při velkých pracovních posuvech, vytvářet vnější obrysy. Obr. 24 b) ukazuje nástroj s vyměnitelnými lištami na razníku i matrici, které jsou usazeny ve speciálním držáku. Lišta na razníku má vybroušenou hranu do tvaru střechy.



a) niblování



b) dělicí nástroj

Obr. 24 Děrovací a dělicí nástroje [14] [29]

Dalším typem nástroje je tzv. MultiShear, který je specifický zkoseným tvarem razníku. Jeho výhodou je vytváření ostří ve vysoké kvalitě, rychlost oddělování 12 m/min a kartáčkové vložky v matrici, které zabráňují odření a redukují hluk.

- tvářecí – pomocí speciálních nástrojů (obr. 25 a) lze, na vysekávacím stroji, vytvářet základní tvářecí operace, které zvyšují jeho výrobní možnosti. Mezi ty patří například lemování, závitování, protahování, vytváření žeber a také prolisy.
- válečkovací – těchto nástrojů je více druhů a slouží pro různé operace (obr. 25 b). Tímto nástrojem je možné, kontinuálním pohybem, vytvářet dlouhé odsazení, prolisy a drážky. Plech je protahován a tvarován mezi dvěma válečky – jedním v razníku a druhým v matrici. Další využití je pro odjehlování, které se provádí válečkovacími odhroťovacími, respektive uštipovacími nástroji. Těchto se využívá zejména pro zaoblování hran na velkoplošných obrysech. Nástroje pracují na jeden zdvih, čímž jsou při práci daleko méně hlučné než při operacích, kde jsou nutné opakující se rázy mezi razníkem a matricí.



a) tvářecí nástroj

b) válečkovací nástroj

c) popisovací nástroj

Obr. 25 Tvářecí, válečkovací a popisovací nástroje [14]

- značící – slouží, ke stále více důležitým operacím, značení plechů, ať už z důvodů technických, kvalitativních nebo právních. Speciálními razíci nástroji (obr. 25 c) se, na jeden zdvih, vyrazí, do povrchu plechového dílu, symbol nebo znak o hloubce několika desetin milimetru. Dalšími používanými jsou gravírovací jehly, kterými lze do povrchu vytvářet i složitější tvary a symboly.

2.1.5 Stroje [7] [14] [23] [25] [31] [32]

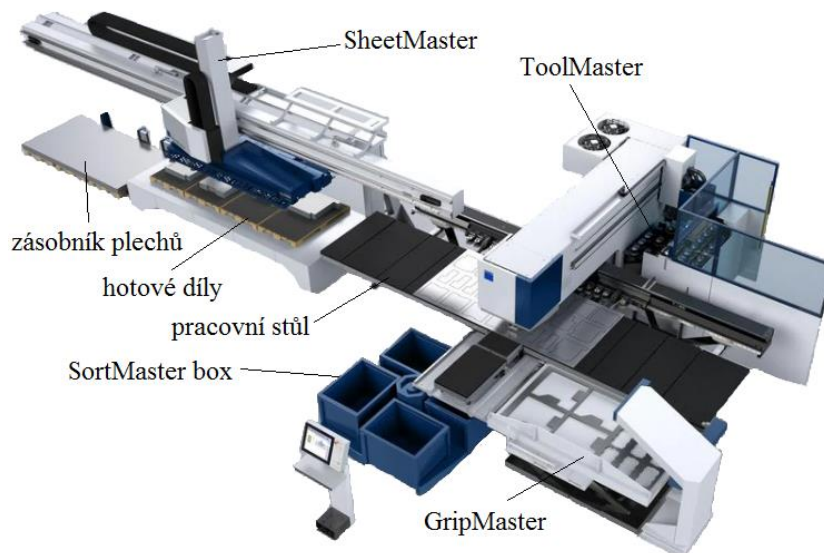
Základní rozdělení je na manuálně ovládané a CNC. U manuálně ovládaných je obrobek mezi razník a raznici vkládán ručně. Pracovní zdvih je prováděn buď hydraulicky, nebo ručně za pomoci ovládacích pák.

Principem CNC vysekávání je naprogramovat počítačem řízený stroj tak, aby pohyboval tabulí plechu v osách x a y a umísťoval ji v daném čase přesně pod děrovací beran, který je nastaven na proražení díry nebo tváření. Většina CNC vysekávacích center dokáže zpracovávat řadu materiálů jako ocel, hliník, zinek nebo korozivzdorná ocel, v rozmezí tloušťky od 0,5 do 6 mm. Pokyny pro řízení, a tím vytváření požadované geometrie součásti, jsou stroji zadávány počítačem formou NC programu.



Obr. 26 Konstrukce stroje s C-rámem [23] Obr. 27 Konstrukce stroje s O-rámem [14]

Stavba vysekávacího centra se musí zabývat zejména požadavky na tuhost, dobrou přístupnost obsluhy a prostor pro manipulaci s tabulí plechu. Podle těchto kritérií jsou konstruovány rámy strojů. Nejrozšířenější typy jsou C-rám a O-rám. Rám ve tvaru C (obr. 26) se vyznačuje výbornou přístupností obsluhy ze tří stran a možností tvářet a manipulovat s rozměrnými tabulemi plechu. Konstrukce s O-rámem (obr. 27) jsou méně rozměrné a disponují daleko větší tuhostí. Zato přístup do pracovního prostoru je obsluze umožněn pouze ze dvou stran. Navíc zde není možnost zpracovávat tabule příliš velkých rozměrů.



Obr. 28 Vysekávací centrum TruPunch 5000 [14]

Při rozhodování o volbě stroje jsou, mimo zmíněných, významné především jeho technické parametry, jako rozměr pracovního prostoru, maximální nosnost a maximální vysekávací síla, která nesmí být překročena. V opačném případě dojde k jeho poškození. Na druhou stranu volba stroje s parametry o mnoho většími, než je potřeba, se nevyplatí, jak z důvodu ekonomiky výroby, tak například i zabráním velké plochy v dílně.

Část stroje, na který je položena a po kterém se při procesu pohybuje plechová tabule se nazývá pracovní stůl. Ten může být pevný, nebo pohyblivý v ose Y. Na jeho povrchu se nachází kartáčky a kuličky, které fungují jako ochrana plechové tabule proti poškrábání.

Manipulace s plechovým polotovarem na pracovní stůl a poté odebrání hotového kusu může probíhat různými způsoby, například ručně, nebo pomocí robotického ramene s přísavkami. Stroje TruPunch, dodávané německou společností TRUMPF (obr. 28) jsou vybaveny automatizovaným systémem SheetMaster. To je zařízení, naprogramované pro nakládání plechových tabulí a vykládání větších hotových dílů na europalety, pomocí vakuových přísavek. Menší součásti propadávají skluzem pod pracovní stůl do čtyř otočných přepravek, které slouží pro jejich třídění. Tento systém se nazývá SortMaster box. K tomu jsou na stroji sensory, které ho, v takovém případě zastaví. Obsluha pak musí v řídicím systému, nastavit ruční odběr dílu, který z pracovního prostoru odstraní. Poté je pokračováno v programu. Odpad, propadávající matricí, je odváděn na dopravníkový pás, který ho dopraví do kontejneru za strojem. Zbytková mříž je automaticky odebrána a stohována, na zdvižném stole, zařízením GripMaster.

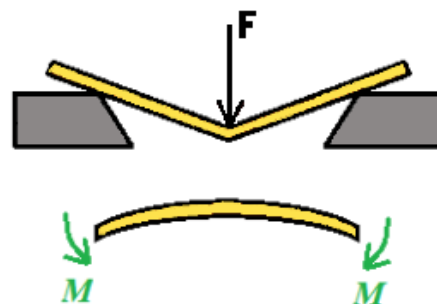
O upnutí materiálu na pracovním stole se starají tzv. programovatelné klapky, které navíc zajišťují i jeho pohyb. Tyto klapky se nachází, stejně jako nástrojové kazety, v lineárním zásobníku nástrojů (obr. 29). V zásobníku ToolMaster je místo až pro 90 nástrojů. Jejich usazení do zásobníku obsluha zvládne v řádu několika sekund. Každý má svůj kód, podle něhož je stroj schopen rozpoznat, jaký si má upnout a na jakou pozici jej poté správně zpět umístit.



Obr. 29 Zásobník nástrojů [14]

2.2 Ohraňování [13] [27] [34]

Ohýbání plechů na ohraňovacích lisech za pomoci speciálních, nástrojů, razníků a matric. Působením sil nebo ohybových momentů (obr. 30) dochází k deformování materiálu. Princip spočívá v tlačení materiálu pohyblivým razníkem do dutiny nepohyblivé matrice, přičemž dochází k jeho trvalému přetvoření. Při vytváření požadovaných ohybů větších či menších úhlů je překračována mez kluzu a v místě ohybu tedy dochází k plastické deformaci. Spolu s touto vzniká také elastická, která způsobuje nežádoucí odpružení. Od prostého ohýbání se liší jak větší délkou stroje, umožňující ohraňovat i rozměrné tabule plechu, tak možností vyrábět složité a přesné ohyby, díky univerzálním a snadno vyměnitelným nástrojům. Finálního tvaru součásti se většinou dosahuje sérií po sobě následujících ohybových operací.

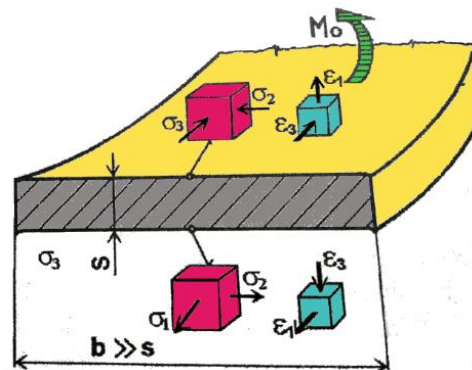


Obr. 30 Ohýbání osamělou silou a momentem [27]

2.2.1 Napjatost, deformace a poloha neutrální osy [2] [13] [27] [34]

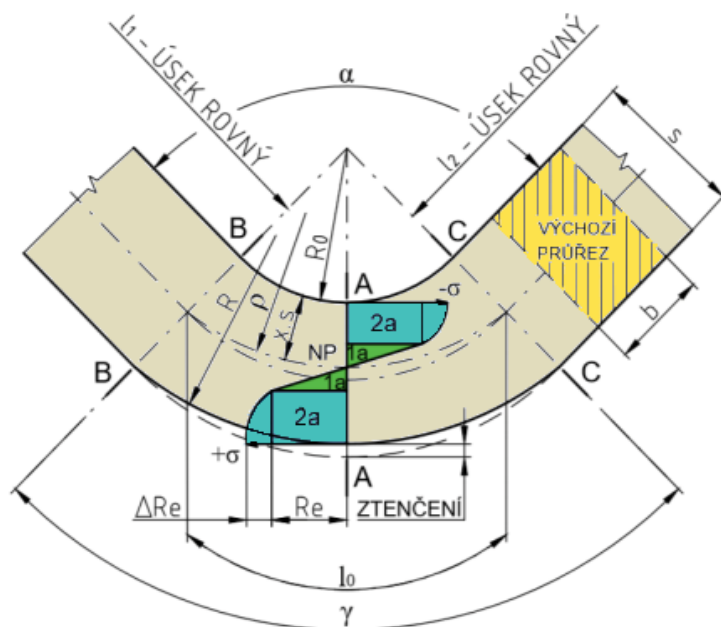
Napětí a deformace příčného průřezu se mění s poměrem jeho stran. Při ohýbání součásti, jejíž šířka je několikanásobně větší než tloušťka (obr. 31), nevzniká žádné přetvoření v příčném směru. ($\varepsilon_2=0$). Vzniklý rovinný stav říká, že jednotlivé složky působící ve stejném směru, jsou opačně orientovány. To znamená, že deformace v tahové oblasti jsou rovny deformacím v oblasti tlakové ($\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$) a naopak ($-\varepsilon_1 = \varepsilon_3$).

Ohýbáním dochází k tahovým napětím na vnější straně a k tlakovým na vnitřní straně ohýbané součásti. Mezi natahovanou a stlačovanou oblastí leží neutrální osa, v níž jsou tahová i tlaková napětí nulová. Tato osa se nachází, na začátku ohýbání, ve středu, mezi natahovanou a stlačovanou oblastí, a postupně se posouvá směrem dovnitř mimo těžiště.



Obr. 31 Napjatost a deformace v ohybu [27]

Při posouvání neutrální vrstvy jsou uvažovány případy pro ohýbání s velkým poloměrem zaoblení, kdy vznikají jen malé pružně-plastické deformace. Tam lze předpokládat neutrální osu procházející středem tloušťky polotovaru. V opačném případě, kdy je součást ohýbána velmi malým poloměrem zaoblení (vytváření ostrých hran), se neutrální vrstva posouvá ke stlačovaným vláknům, přičemž nastává změna průřezu. Na základě této znalosti je možné vypočítat vstupní rozměry polotovaru, jenž jsou dány součtem délek rovinných úseků a neutrální osy v ohybech (obr. 32)



1a, 1b – oblast pružné deformace
2a, 2b – oblast plastické deformace se zpevněním ΔRe
 R_0 – poloměr ohybu
 L_0 – délka ohnutého úseku v neutrální ploše
 x – součinitel neutrální plochy
 α – úhel ohybu
 γ – úhel ohnutého úseku ($\gamma = 180 - \alpha$)
 ρ – poloměr neutrální osy

Obr. 32 Schéma ohybu [2]

Délka ohnuté části se určí vzorcem:

$$L_0 = \frac{\pi \cdot \rho \cdot \alpha}{180} [\text{mm}], \quad (2.7)$$

kde: L_0 délka oblouku ohybu [mm]
 ρ poloměr neutrální osy [mm]
 α úhel ohybu [°]

Poloha neutrální osy se vypočte jako:

$$\rho = R_o + x \cdot s \text{ [mm]}, \quad (2.8)$$

kde: R_o poloměr zaoblení [mm]

x součinitel polohy neutrální osy viz tab. 2. [-]

Tab. 2 Hodnoty součinitele x [2]

R_o/s	0,1	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
x	0,23	0,35	0,38	0,42	0,46	0,47	0,48	0,48	0,48	0,42	0,49	0,49	0,5

2.2.2 Poloměr ohybu a odpružení [13] [27] [34] [35]

Minimální poloměr ohybu je takový, při němž ještě, na vnější ohybové straně, nedojde k překročení meze pevnosti v tahu. Vzhledem k odpružení je vhodné jej volit co nejmenší, ale ne méně než $R_{1 \min}$, kdy by došlo k porušení. Jeho výpočet se provede jako:

$$R_{1 \min} = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\max}} - 1 \right) = c \cdot s \text{ [mm]} \quad (2.9)$$

kde: $R_{1 \min}$ minimální poloměr ohybu [mm]

$\varepsilon_{\max}$ mezní prodloužení [mm]

c materiálový koeficient, (0,5 až 0,6 pro měkkou ocel) [-]

Maximální poloměr ohybu je ten, při němž, v místě namáhaném tahem v krajních vláknech, dojde k nevratné plastické deformaci. Z hlediska tloušťky a tvárnosti se volí co největší. Vypočte se jako:

$$R_{1 \max} = \frac{s}{2} \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \text{ [mm]}, \quad (2.10)$$

kde: $R_{1 \max}$ maximální poloměr ohybu [mm]

E modul pružnosti v tahu [MPa]

R_e mez kluzu [MPa]

Odpružením se myslí částečné vrácení ohýbaného materiálu, které vznikne po odlehčení tvářecích sil. To znamená, že po ohraňování finální ohyb není totožný s geometrií razníku, ale liší se o úhel γ_o . Na jeho velikost má vliv tloušťka a tvárnost zpracovávaného materiálu, poloměr ohybu a také způsob jakým je ohýbán. V závislosti na popsanych vlastnostech se pohybuje v rozmezí 3° až 15° . Lze vypočítat ze vztahu:

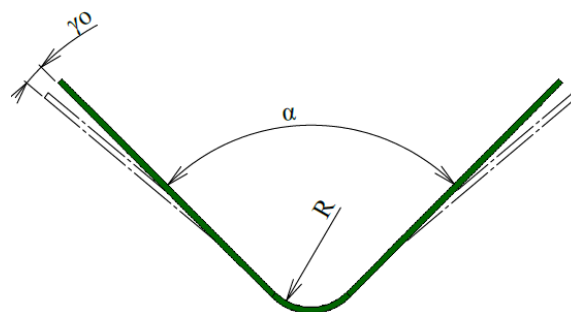
$$\tan \gamma_o = 0,375 \cdot \frac{l_v}{x \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} [-], \quad (2.11)$$

kde: γ_o úhel odpružení [$^\circ$]

l_v rozevření matrice [mm]

Odpružení je nutné řešit již při samotné konstrukci nástrojů a ty navrhnout tak, aby při ohýbání byla odchylka γ_o (obr. 33) eliminována. Při ohýbání s dotlačením se tento problém řeší zvětšením ohraňovací síly na konci operace. Síla je zvětšena tak, že v místě ohybu vznikne lokální plastická deformace. Toto provedení se označuje jako kalibrace.

Moderní ohraňovací lisy dokážou měřit odchýlení od požadovaného úhlu přímo při procesu, díky laserovým snímačům. Po odlehčení tak změří výsledný úhel, který je porovnám s tím naprogramovaným. Při neshodě je strojem provedena korekce ohybu.



Obr. 33 Schéma odpružení [13]

2.2.3 Síla a práce [2] [13] [25] [27]

Stanovení velikosti síly je významné zejména při volbě vhodného lisu, určeného k vytváření ohybů. Základními způsoby ohýbání v praxi jsou do U a do V. Vzhledem k tomu, že daná součást je řešena ohraňováním, dále bude popisována pouze varianta do V.

Vstupní polotovár je ustaven na dvě podpěry, mezi kterými působí razník, jenž vytváří ohybovou sílu. Ta se, podle normy ČSN 22 7340, spočítá následovně:

$$F_{ov} = \frac{b \cdot s^2 \cdot R_m}{l_v} \cdot C_o \text{ [N]}, \quad (2.12)$$

kde: F_{ov} ohýbací síla do V [N]

b šířka ohýbaného materiálu [mm]

C_o Caliho konstanta, volí se od 1,15 do 1,45 [-]

Obr. 34 ukazuje závislost dráhy pohyblivé čelisti na ohybové síle ve třech fázích ohraňování. První fáze je volný ohyb. Razník vniká do materiálu, přičemž síla lineárně roste.

V této oblasti jsou pouze pružné deformace. Ty se však, po překročení meze kluzu, začínají měnit na deformace plastické a součást se začíná trvale přetvářet. V dalším průběhu síla postupně narůstá až se, přes oblast dohnutí, dostane do třetí fáze, označené jako kalibrace, jejíž velikost je $F_k = (2 \text{ až } 2,5) \cdot F_{ov}$. Kalibrace se provádí pro vytvoření lokální plastické deformace, čímž je eliminováno odpružení.

Celková ohybová síla je vyjádřena vztahem:

$$F_{cov} = F_{ov} + F_k \text{ [N]}, \quad (2.13)$$

kde: F_{cov} celková ohybová síla [N]

F_k kalibrační síla [N]

Rychlé určení ohraňovací síly, pro volný ohyb, se v praxi provede pomocí vzorce:

$$F_{ohr} = \frac{s^2 \cdot R_m}{l_v} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot s}{l_v}\right) \text{ [kN} \cdot \text{m}^{-1}\text{]}, \quad (2.14)$$

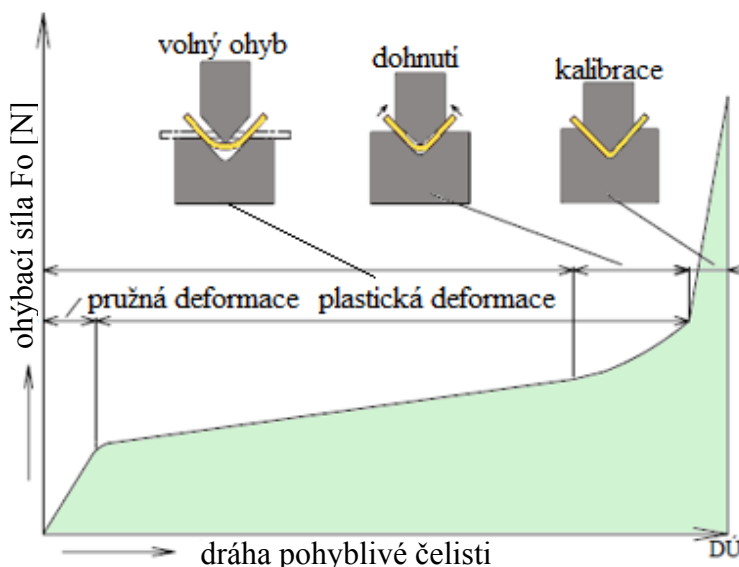
kde: F_{ohr} ohraňovací síla [$\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$]

Při fázi kalibrování je však nutné tuto sílu (2.14) výrazně zvětšit, a to šestkrát až dvanáctkrát. Výsledná hodnota vyjde v kN vztažených na jeden metr ohybu. Výsledná plocha pod křivkou (obr. 34) se rovná celkové práci vykonané nástrojem na ohýbané součásti. Její hodnota se stanoví jako:

$$A_{ov} = m_v \cdot F_{ov} \cdot h \text{ [J]}, \quad (2.15)$$

kde: A_{ov} práce při ohybu do V [J]

m_v opravný koeficient pro ohyb do V ($m_v=1/3$) [-]



Obr. 34 Závislost ohýbací síly na dráze razníku [13]

2.2.4 Nástroje [2] [35] [36] [37] [38] [39]

Základními nástroji pro operace ohraňování jsou razník (obr. 35) a matrice (obr. 36). Tyto jsou konstruovány do nejrůznějších tvarů tak, aby vyhověli technologii výroby a parametrům ohybu ohraňované součásti. Konstrukci obou nástrojů lze rozdělit na tři části. Jsou to upínací část, tělo a pracovní část. Razníky i matrice jsou snadno vyměnitelné a vyrábí se jak celistvě (délky nástrojů mohou dosahovat až 6 m) po celé délce lišty stroje, tak i dělené.

Razníky se upínají do beranu v horní liště ohraňovacího lisu. Polotovár je položen na matrici, která je upnuta ve spodní liště lisu. Při ohraňování se beran posouvá směrem dolů a razník tlačí materiál do otvoru matrice.

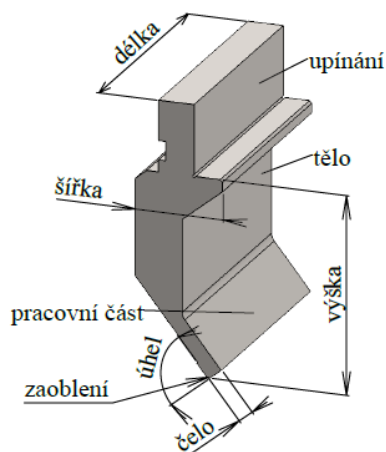
Horní i spodní nástroje se vyrábějí z nástrojových ocelí frézováním a broušením.

Následně pro zvýšení tvrdosti jsou kaleny a popouštěny na HRC 58 až 60. V další fázi se laserem provádí popisování bočních stran, při kterém se uvádí informace o rozměrech, maximálním možném zatížení a také logo výrobce. Jednotlivé společnosti se, při návrhu, odlišují jak rozměry a tvary vyráběných nástrojů, tak způsoby jejich upínání, které se nejčastěji dělá mechanické, pneumatické a hydraulické.

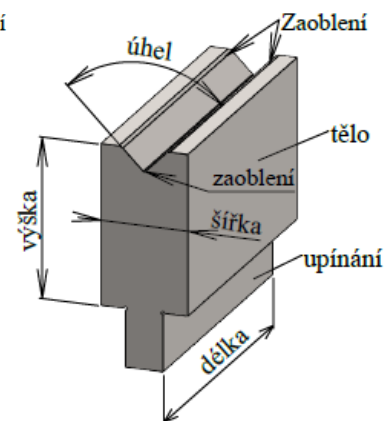
Dobrý upínací systém nejen že šetří čas, ale také zabraňuje nepřesnostem a může snížit potřebu zkušebních ohybů. Dělí se na manuální a automatické. Manuální jsou nejzákladnější a časově náročnější metody, u kterých je potřeba obsluhy, aby ručně utáhla nástroje do lišty. Takovýto systém lze používat, pokud nedochází k časté výměně. V případě, že je nástroj vyměňován více než jednou za směnu, vhodnější je použití automatického, které se na rozdíl od namáhavého ručního upínání, aktivují pouhým stisknutím tlačítka.

Nejčastější je hydraulický mechanismus (obr. 37), který je ovládán pomocí kapaliny. Při upínání se razník nejprve nasadí do horní lišty beranu, stlačením bezpečnostní pojistky, která se nachází ve vrchní části nástroje. Nyní se s ním dá v liště posouvat a pojistka ho chrání před pádem. Takto je do beranu možné upnout několik nástrojů, případně z více částí složit jeden. Po jejich sestavení a umístění do potřebných poloh se zapne hydraulický systém, při čemž dojde ke zvýšení tlaku kapaliny, která zatlačí pohyblivý kolík do drážky v razníku. Tím se zajistí správné vystředění a pevné sevření. Při ustavování matrice je princip obdobný, zde ale není potřeba bezpečnostní pojistky pro zajištění, protože, na rozdíl od razníku, nehrozí její pád.

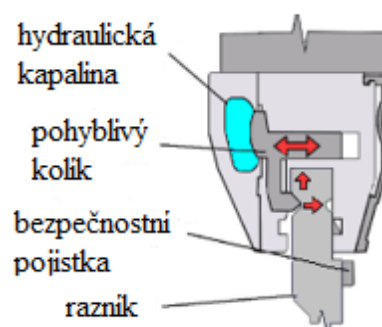
Některé společnosti, jako například firma UKB, spolu s ohraňovacími nástroji dodává i skříně pro jejich uskladnění. Ty jsou vybaveny výškově nastavitelnými, pozinkovanými policemi, uzamykatelnými šuplíky, a navíc také přepravními příčkami na spodu skříně, pomocí kterých je možná manipulace použitím vysokozdvižného vozíku. Hlavní výhodou jsou ochrana nástrojů před poškozením a nečistotami, což prodlužuje jejich životnost.



Obr. 35 Razník [36]



Obr. 36 Matrice [36]

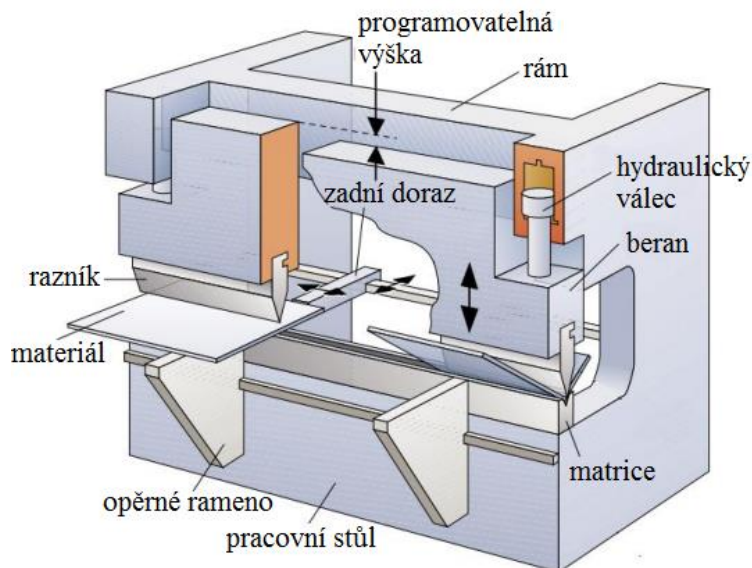


Obr. 37 Hydraulické upínání [38]

2.2.5 Stroje [2] [14] [25] [40] [41] [42] [43]

Stroje pro ohraňování se nazývají ohraňovací lisy. Jejich výhody spočívají v možnosti zpracovávat jak malé, tak i velmi rozměrné polotovary o délce až 8 m, ohraňovat tenkostěnné plechy, ale i dílce o tloušťce až 20 mm, nebo vytvářet různé druhy ohybů na jednom stroji, díky možnosti snadné a rychlé výměny nástrojů. Každá ohraňovací operace probíhá na jeden zdvih lisu.

Ohraňovací stroje se dělí, stejně jako vysekávací, podle typu konstrukce, která je buď s C-rámem nebo s O-rámem. Dále dle způsobu pohonu. Nejrozšířenější jsou hydraulické lisy (obr. 38), které jsou charakteristické dvěma hydraulickými válci, jenž zajišťují pohon beranu. Jejich výhodami jsou snadná regulace tvářecí síly a velké posuvové rychlosti. Nevýhodami jsou složitá konstrukce, náročnější opravy a vyšší cena, oproti mechanickým.

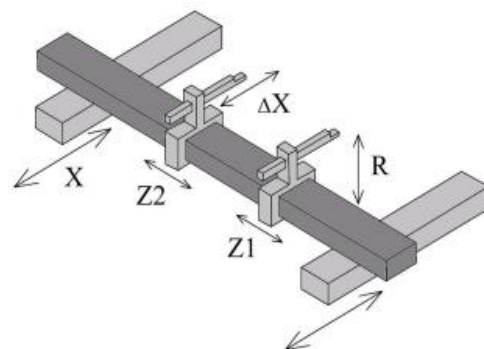


Obr. 38 Hydraulický ohraňovací lis [40]

Nejmodernější CNC ohraňovací lisy mají 8 a více programovatelných os. Tyto stroje jsou vybaveny hydraulickým nebo pneumatickým upínáním nástrojů, jejich automatickou výměnou a laserovými systémy pro měření tloušťky plechu, odpružení a úhlu ohybu. Informace o naměřených hodnotách putují do řídicího systému stroje, odkud přichází zpětná vazba o provedení korekce. Programování v kusové nebo malosériové výrobě probíhá přímo na stroji přes dotykovou obrazovku.

Ve velkosériové je prováděno na počítači. Do programu jsou zadávány parametry jako tloušťka plechu, kód horního i spodního nástroje, jejich umístění, velikosti a pořadí ohybů, vysunutí hydraulických podpěr a další. Pokud je zvolen nástroj, který nedokáže provést ohyb na dané tloušťce materiálu, zobrazí se na obrazovce chybová hláška a je potřeba jeho volbu provést znovu. Program pak vypočítá korekce ohýbaných úhlů, dorazů a rozvinutou délku součástí. Dále se provádí simulace jednotlivých kroků ohýbání. Pokud je vše v pořádku, odladěný program se nahraje do operačního systému lisu a zahájí se výroba.

Důležitým vybavením CNC lisu jsou zadní programovatelné dorazy, díky kterým je polotovar ustaven k vytváření přesných ohybů v požadovaném místě. Dorazy jsou umístěny na liště, díky níž se mohou pohybovat ve směrech naznačených na obr. 39. Pohybují se vysokou rychlostí společně, nebo každý zvlášť. Hrana materiálu je přitlačována v ose X na vrchní část zadního dorazu, tzv. palce (mohou se vysouvat ve směru ΔX). Manipulaci a vkládání plechových polotovarů mezi razníky a matrice je nejčastěji prováděno obsluhou, podle velikosti ohýbané součásti, i vícečlennou. Pro lepší automatizaci je používáno externích robotických systémů, které se dají spojit s ohraňovacím lisem. Jedná se o pěti-osé, pohyblivé, programovatelné rameno (obr. 40), které,



Obr. 39 Zadní programovatelné dorazy [25]

pomocí chapadla s přísavkami, řízených vzduchem, vakuem a elektrickými signály, nejprve uchopí plechový polotovar, připravený na zemi na europaletě.

Ten pak dopraví k lisu, kde ho vkládá na dorazy mezi razníky a matrice, přičemž s ním, podle potřeby, v každé operaci otáčí tak, aby byla vytvořena součást s ohyby na požadovaných místech. Po skončení ohraňování díl přepraví a uloží na paletu určenou pro hotové kusy. Výrobou těchto robotů s portálovou konstrukcí se zabývá například italská firma Antil.



Obr. 40 Robotické rameno [42]

Pro rozměrné a těžké díly se při ohraňování používají hydraulické podpěry, které bývají součástí lisů. Jejich použití je nutné pro zabránění prohnutí výrobku a také zničení nástroje vlivem velkých bočních sil. Podpěry se automaticky vysouvají a zvedají s polotovarem.

U hydraulických lisů je beran tlačén dolů, do materiálu, dvěma hydraulickými válci, které jsou umístěny po stranách rámu. Tím je vyvinutá síla po stranách stroje větší než uprostřed. Zejména při tváření dlouhých, tlustších plechů, u kterých je větší odpor proti vniknutí, nastává problém pružného deformování uprostřed beranu, který se prohýbá směrem nahoru. To má vliv na ohýbanou součást, u které je po stranách vytvořen správný ohyb, ale v jejím středu je úhel větší (obr. 41). Tento problém se řeší takzvaným bombírováním. To je operace, jíž se kompenzuje pružná deformace beranu. U počítačem řízených strojů se používá klínového bombírovacího systému, kterým se zajišťuje prohýbání pracovního stolu směrem nahoru, negativně k průhybu beranu.

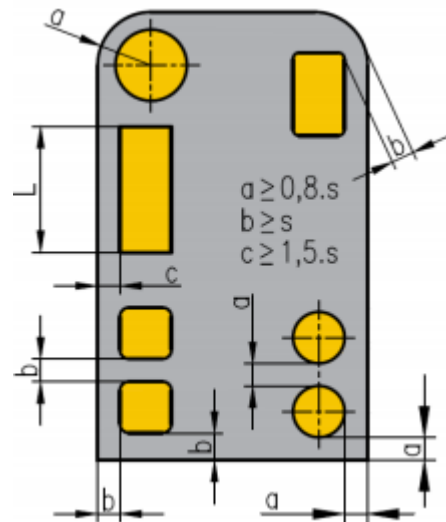


Obr. 41 Důsledek pružné deformace beranu na ohýbanou součást [43]

2.3 Technologičnost [24] [44] [45]

Technologičnost konstrukce dílu má zásadní vliv na tvorbu technologického postupu a hospodárnost celé výroby. Aby byla zaručena správná funkčnost součásti, jednoduchá, plynulá a ekonomicky výhodná výroba, je nutné dodržovat určité zásady. Pro výrobu vysekáváním platí:

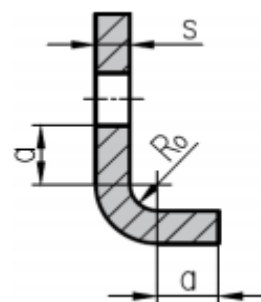
- navrhnout výstřižek výrobně jednoduchý s malou spotřebou materiálu
- nepředepisovat rovinnost, která se kvůli působení ohybových momentů těžko dodržuje, stejně tak se vyvarovat dalším obtížně splnitelným tolerancím
- nepředepisovat zbytečně malou drsnost povrchu (ideální je 3,2 až 6,3)
- přednostně volit kruhové otvory před nekruhovými
- dodržovat minimální rozměry mezi otvory a krajem součásti (obr. 42)
- zaoblit nebo zkosit rohy a ostré hrany



Obr. 42 Minimální vzdálenost otvorů od okrajů [44]

Při ohraňování součásti platí následující technologické zásady:

- dodržovat minimální vzdálenosti okraje otvoru od ohybu $a \geq 2s$ (obr. 43)
- u poloměru ohybu $R_o \leq 1 \text{ mm}$ dodržovat minimální délku ramene $a \geq 3(s + R_o)$ (obr. 43)
- upřednostnit ohyb s kalibrací před volným ohybem
- osu ohybu volit ideálně kolmo na směr vláken, v opačném případě je nutné zvětšit minimální poloměr ohybu
- u ostrých ohybů musí být nejprve, v místě ohybu, vytvořen potřebný objem kovu, až poté kalibrovat
- pokud to není nutné, nepředepisovat příliš přesné tolerance rozměrů

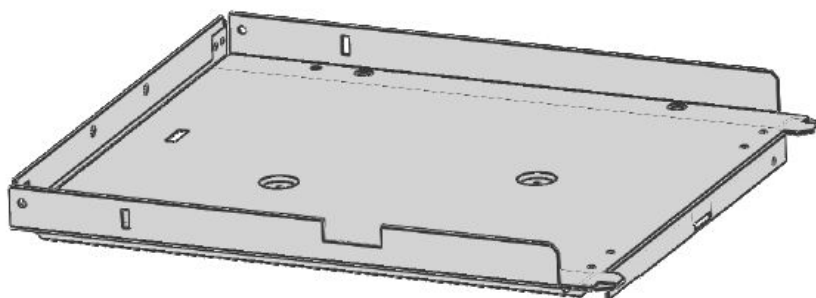


Obr. 43 Technologičnost ohýbané součásti [44]

3 VÝROBA SOUČÁSTI [7]

Nosný plech je vyráběn z ocelového materiálu, s označením DX51D+ZM (EN 10346), o tloušťce polotovaru 2 mm. Vnější rozměry jsou 769 x 666 x 89 mm. Výroba je prováděna technologiemi vysekávání a ohraňování.

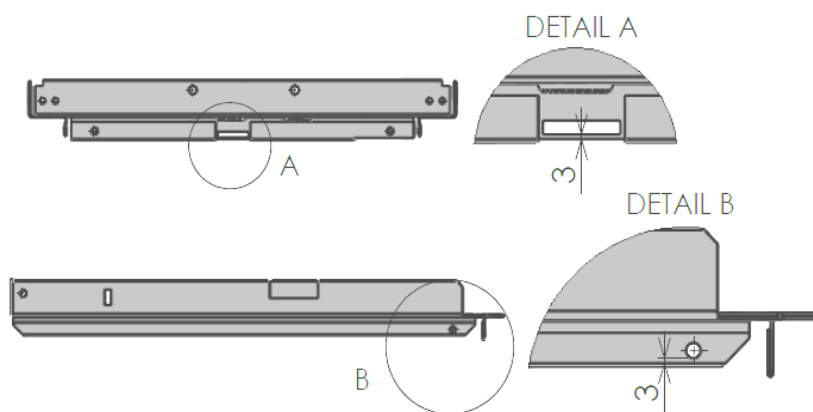
Celý proces začíná tvorbou 3D modelu (obr. 44), v programu Solidworks, který je následně uložen do formátu DXF. V této podobě je technologem, převeden do softwaru TruTops, ve kterém se vytvoří vysekávací plán, zvolí nástroje a provede simulace vysekávání. Pokud je vše v pořádku, přejde se do programu pro ohraňování, kde se opět provede volba nástrojů, určí se pořadí ohybů, a nakonec se vše zkontroluje simulací. Poté



Obr. 44 Model nosného plechu

jsou data převedena, nejprve do operačního systému vysekávacího stroje, který vytvoří kompletní obrys dílu včetně všech otvorů, prolisů a oddělení od zbytku tabule. V takovém tvaru je díl přepraven k ohraňovacímu lisu, do nějž je rovněž nahrán program odladěný pro výrobu. Před lisem je postaveno robotické rameno (podobně jako na obr. 40), které při ohýbání manipuluje se součástí. Kromě robotu je zapotřebí i dvoučlenné obsluhy.

Na nosném plechu se nachází dva otvory, u nichž je posuzována správná technologičnost. V prvním případě, viz detail A na obr. 45, má být minimální vzdálenost od okraje stejná, jako je tloušťka materiálu, což je splněno. Dále je zkoumána délka ramene mezi krajem kruhového otvoru a ohybem (obr. 45, detail B), jehož poloměr R_0 je 0,2 mm. Z následné kontroly $a \geq 3(s + R_0)$ je zjištěno, že by tato vzdálenost měla být alespoň 6,6 mm, což neodpovídá skutečné hodnotě 3 mm. Přesto, že vzdálenosti od okraje,



Obr. 45 Technologičnost nosného plechu

podle teorie nevyhovují, ve společnosti ABB je otestováno, že součást je, k požadovaným účelům, funkční. Dalším bodem je určení minimálního poloměru ohybu ze vztahu (2.9):

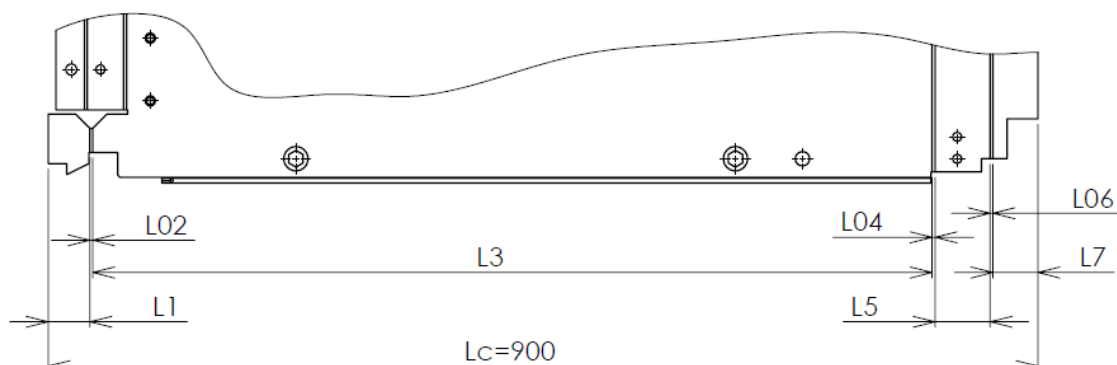
$$R_{1min} = c \cdot s = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ mm}$$

Výpočet ukázal, že, pro tloušťku materiálu 2 mm, by nejmenší ohybový rádius měl být 1 mm, což ve skutečnosti není splněno. Reálná hodnota rádiusu po ohnutí je 0,2 mm.

3.1 Stanovení rozvinutého tvaru

Nosný plech má obdélníkový tvar, který je po celém obvodu ohraničen ohyby. Výpočet rozvinu tak musí být proveden v podélném i příčném směru. V praxi konstruktér vytvoří model v programu Solidworks a tento software poté provede výpočet rozměrů polotovaru na základě daného poloměru ohybu, úhlu, tloušťky materiálu a tzv. k-faktoru (koeficient x), který navrhuje, a podle potřeb upravuje, technolog.

Dále bude provedena ukázka výpočtů. Na obr. 46 jsou zakótované jednotlivé úseky v podélném směru.



Obr. 46 Rozvinutá délka součásti

Pro délky oblouků, jejichž hodnoty jsou stejné, bude výpočet proveden pouze jednou. V celkovém součtu je však započten každý zvlášť. Výsledné hodnoty jsou získány po dosazení do vzorců (2.7) a (2.8):

➤ Výpočet délky oblouků L02 a L06:

$$L_{o2,o6} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot (R_{o2,6} + x_{2,6} \cdot s) = \frac{\pi \cdot 180}{180} \cdot (0,2 + 0,23 \cdot 2) = 2,07 \text{ mm}$$

$$\frac{R_{o2,6}}{s} = \frac{0,2}{2} = 0,1$$

kde: x_2 bylo určeno 0,23 z tab. 2

➤ Výpočet délky oblouku L04:

$$L_{o4} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot (R_{o4} + x_4 \cdot s) = \frac{\pi \cdot 90}{180} \cdot (1 + 0,38 \cdot 2) = 2,76 \text{ mm}$$

$$\frac{R_{o4}}{s} = \frac{1}{2} = 0,5$$

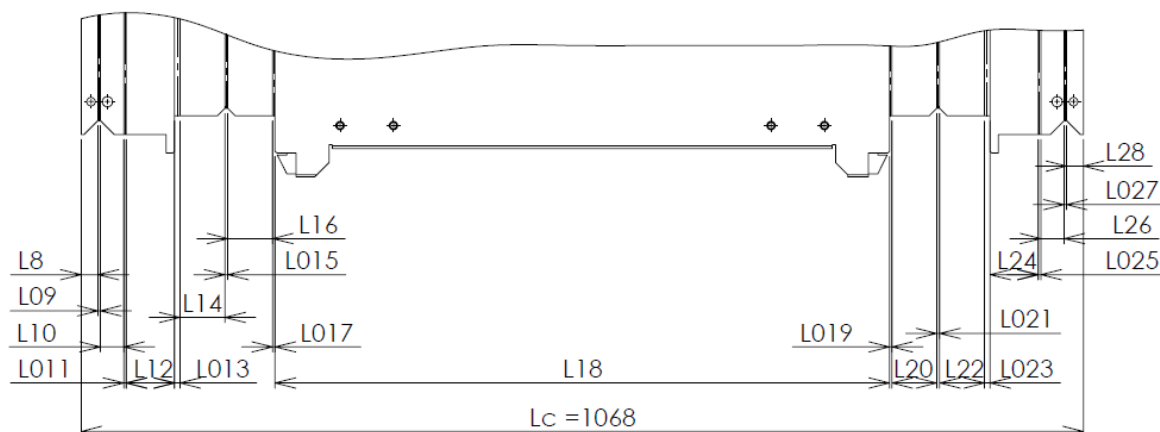
kde: x_4 bylo určeno 0,38

➤ Výpočet celkové rozvinuté délky polotovaru v podélném směru:

$$L_{C1} = \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{j=1}^k L_{oj} = L_1 + L_3 + L_5 + L_7 + L_{o2} + L_{o4} + L_{o6}$$

$$= 37,95 + 763,95 + 50 + 40,95 + 2,07 + 2,76 + 2,07 = 899,75 \text{ mm}$$

Z důvodu přesnosti výroby bude hodnota L_{C1} zaokrouhlena na 900 mm.



Obr. 47 Rozvinutá šířka součásti

Stejným způsobem, jsou na obr. 47 znázorněny, a následně vypočítány, jednotlivé rozvinuté úseky v příčném směru nosného plechu.

➤ Výpočet délky oblouků L09, L015, L021, L027:

$$L_{o9,015,021,027} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot (R_{o9,15,21,27} + x_{9,15,21,27} \cdot s) = \frac{\pi \cdot 180}{180} \cdot (0,2 + 0,23 \cdot 2) \\ = 2,07 \text{ mm}$$

$$\frac{R_{o9,15,21,27}}{s} = \frac{0,2}{2} = 0,1$$

kde: $x_{9,15,21,27}$ bylo určeno 0,23

➤ Výpočet délky oblouků L011, L017, L019, L025:

$$L_{o11,017,019,025} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot (R_{o11,17,19,25} + x_{11,17,19,25} \cdot s) = \frac{\pi \cdot 90}{180} \cdot (1 + 0,38 \cdot 2) \\ = 2,76 \text{ mm}$$

$$\frac{R_{o11,17,19,25}}{s} = \frac{1}{2} = 0,5$$

kde: $x_{11,17,19,25}$ bylo určeno 0,38

➤ Výpočet délky oblouků L013, L023:

$$L_{o13,023} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot (R_{o13,23} + x_{13,23} \cdot s) = \frac{\pi \cdot 90}{180} \cdot (3 + 0,44 \cdot 2) = 6,09 \text{ mm}$$

$$\frac{R_{o13,23}}{s} = \frac{3}{2} = 1,5$$

kde: $x_{13,23}$ bylo určeno 0,44

➤ Výpočet celkové rozvinuté délky v příčném směru:

$$L_{C2} = \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{j=1}^k L_{oj} \\ = L_8 + L_{10} + L_{12} + L_{14} + L_{16} + L_{18} + L_{20} + L_{22} + L_{24} + L_{26} + L_{28} + L_{o8} + L_{o11} \\ + L_{o13} + L_{o15} + L_{o17} + L_{o19} + L_{o21} + L_{o23} + L_{o25} + L_{o27} \\ = 17,95 + 24,9 + 51,5 + 47,95 + 47,85 + 655,8 + 47,85 + 47,95 + 51,5 \\ + 24,9 + 17,95 + 2,07 + 2,76 + 6,09 + 2,07 + 2,76 + 2,76 \\ + 2,07 + 6,09 + 2,76 + 2,07 \\ = 1067,6 \text{ mm}$$

S ohledem na přesnost bude hodnota L_{C2} zaokrouhlena na 1068 mm. Výsledné rozměry rozvinu jsou $L_{C1} = 900 \text{ mm}$ a $L_{C2} = 1068 \text{ mm}$.

3.2 Vysekávací plán a volba polotovaru [7]

Na základě znalostí rozměrů rozvinutého tvaru se vytvoří vysekávací plán. Přitom je potřeba brát ohled na upínací oblast, kterou tvoří čtyři programovatelné upínky. Kolem každé z nich je vymezen prostor, který má na délku 90 mm a na šířku 72 mm. Hrany součástí jsou od tohoto místa ve vzdálenosti 15 mm a vzájemně mezi sebou mají mezeru 20 mm tak, že při šířce dělicího nástroje 5 mm zůstane, po oddělení, desetimilimetrový okraj. Dělicí nástroj postupuje směrem k programovatelným klapkám. Pokud by vzdálenosti mezi upínací oblastí a jednotlivými dílci byly menší, bude postupně, při přesouvání, docházet k čím dál většímu prohýbání a rozkmitávání mříže. Tím pádem by bylo potřeba, s blížícím se koncem programu, snižovat posuvovou rychlost stroje, aby například nedošlo ke kolizi s upínkami.

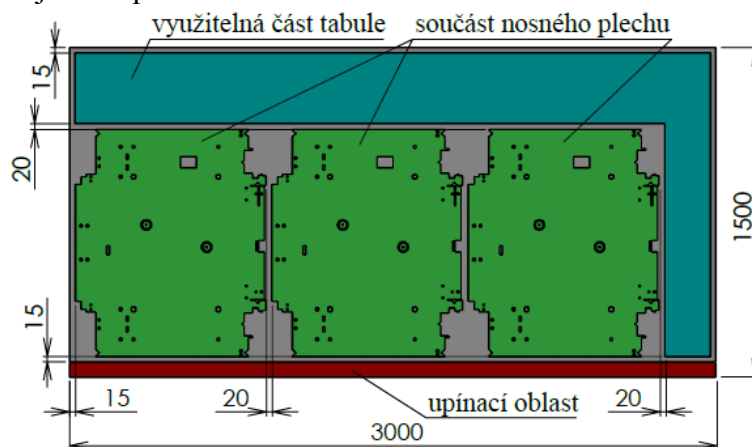
K řešení vysekávacího plánu je třeba znát plnou plochu součásti (bez otvorů), která byla určena programem Solidworks jako $S_{sou} = 874\,885\text{ mm}^2$. Pro výrobu obrysu nosného plechu se nejčastěji používají dva formáty tabule, pro něž budou vytvořeny návrhy:

- Varianta A – rozměry tabule 3000 x 1500 mm. Z tohoto polotovaru lze zhotovit 3 součásti viz obr. 48.

Využití materiálu je dáno vztahem (2.6):

$$k_{mat} = \frac{S_{sou} \cdot n_{sou}}{L_t \cdot M_t} \cdot 100 = \frac{874\,885 \cdot 3}{3000 \cdot 1500} \cdot 100 = 58,33\%$$

Při variantě A je tabule využita z 58,33 %. Část polotovaru, označena modře na obr. 48, je použita na obsazení menšími výstřižky, podle aktuální potřeby. Místa, která již nelze zaplnit končí jako odpad.

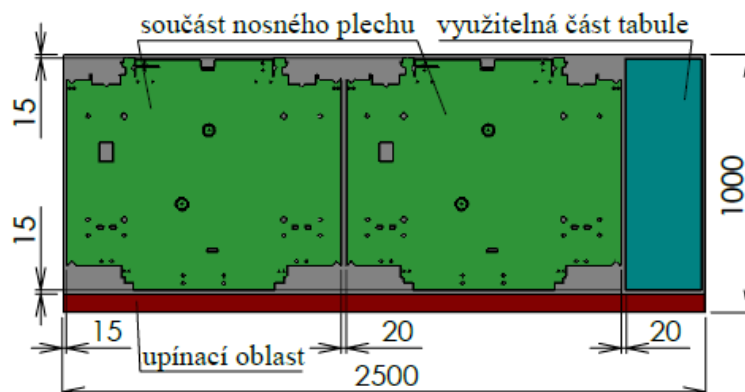


Obr. 48 Varianta A

- Varianta B – rozměry tabule 2500 x 1000 mm. V tomto případě budou na tabuli umístěny 2 polotovary nosného plechu, viz obr. 49, a platí:

$$k_{mat} = \frac{S_{sou} \cdot n_{sou}}{L_t \cdot M_t} \cdot 100 = \frac{874\,885 \cdot 2}{2500 \cdot 1000} \cdot 100 = 69,99\%$$

Využití pro variantu B je téměř 70%. Zbylý pás, označen modře na obr. 49, slouží pro rozmístění dalších součástí odpovídajících rozměrů.



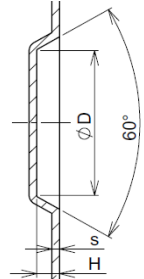
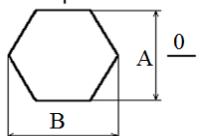
Obr. 49 Varianta B

Z varianty A je patrné, že z jedné tabule lze, vhodným rozmístěním, dostat 3 polotovary nosného plechu, přičemž ale zůstává celkem velká zbytková plocha. Tento návrh je vhodný v případě, pokud lze tabuli zaplnit dalšími výstřižky. U varianty B jsou získány pouze 2 polotovary, což znamená častější zakládání nové tabule. Ovšem z hlediska využitelnosti materiálu je lepším řešením, a proto bude tento návrh (obr. 49) uvažován v další části práce.

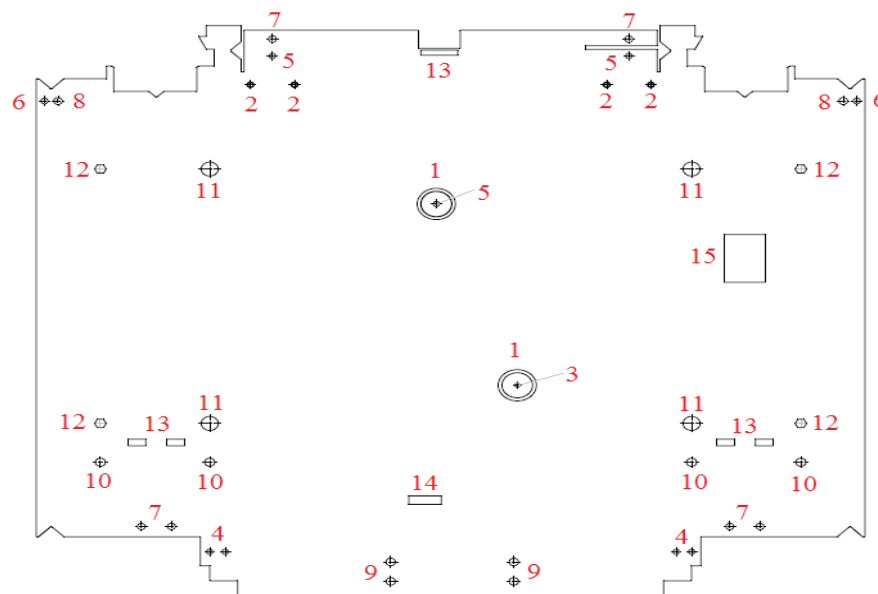
3.3 Postup výroby vysekáváním a volba stroje [7]

Před samotným vysekáváním je potřeba zajistit zásobu plechového materiálu a ujistit se, že v zásobníku stroje se nachází všechny potřebné nástroje. Poté se spustí nahraný program. Nejdříve na řadu přichází kruhové otvory malých průměrů, postupně se přejde k větším, a nakonec se oddělí vnější obrys od zbytku tabule. Na nosném plechu se nachází dva prolisy, uprostřed nichž jsou průchozí otvory. Nejprve se, tvářecím nástrojem, provede prolisování do hloubky 6 mm, až v dalších operacích dojde k prorážení. Každý kruhový otvor na součásti je vyražen na jeden zdvih nástroje. U dalších tvarů, například obdélníků, je často použito tzv. niblování, takže na vytvoření jednoho obrysu je provedeno více úderů razníku. Další část práce se bude zabývat operacemi vysekávání tvarů, které jsou seřazeny v tabulce 3.

Tab. 3 Přehled použitých nástrojů na jednotlivé operace [7]

Číslo nástroje	Rozměr nástroje	Typ otvoru	Rozměr otvoru	Poznámky
1	$\varnothing D=40 H=6$	kruhový prolis	$\varnothing D=40 H=6$	kruhový prolis 
2	$\varnothing 6$	kruh	$\varnothing 6$	
3	$\varnothing 6,8$	kruh	$\varnothing 6,8$	
4	$\varnothing 8$	kruh	$\varnothing 8$	
5	$\varnothing 8,2$	kruh	$\varnothing 8,2$	
6	$\varnothing 9$	kruh	$\varnothing 9$	
7	$\varnothing 10$	kruh	$\varnothing 10$	
8	$\varnothing 11$	kruh	$\varnothing 11$	
9	$\varnothing 12$	kruh	$\varnothing 12$	
10	$\varnothing 13$	kruh	$\varnothing 13$	
11	$\varnothing 22$	kruh	$\varnothing 22$	šestiúhelník 
12	A=13,2 B=15,2	šestiúhelník	A=13,2 B=15,2	
13	15 x 3,2	obdélník	23 x 10	
14	37 x 5	obdélník	42 x 13	
15	50 x 50	obdélník	75 x 53,1	

Následně budou provedeny výpočty sil a vykonané práce při vytváření vnitřních otvorů. Ty jsou označeny číslicemi (obr. 50) odpovídající číslu nástroje z tab. 3. Stejný symbol u více obrysů znamená použití shodného nástroje.



Obr. 50 Označení otvorů pro vysekávání

Vzorový výpočet vysekávací síly bude proveden pro největší použitý nástroj dle (2.2):

$$F_{S15} = l_s \cdot s \cdot n \cdot 0,8 \cdot R_m = 200 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 320 = 122\,880\,N$$

kde: n koeficient opotřebení hran má hodnotu 1,2

R_m mez pevnosti je z tab. 1 zvolena 320 MPa

Vysekávací práce podle vztahu (2.5):

$$A_{S15} = F_{S15} \cdot h \cdot k_p = 122\,880 \cdot 2 \cdot 0,4 = 98\,304\,J$$

kde: k_p součinitel plnosti je roven 0,4

Některé nástroje jsou použity pro děrování více otvorů, viz obr. 50. Při vysekávání obdélníkových tvarů často není možné zhotovit požadovaný rozměr jedním úderem, tudíž razník, při jedné operaci, vykoná více zdvihů. Vysekávací síla a práce jsou však spočteny pouze pro jeden zdvih. Výsledné hodnoty jsou seřazeny v tabulce 4.

Tab. 4 Výsledné hodnoty sil a práce

Nástroj	Délka střížné hrany [mm]	Počet zdvihů [-]	Vysekávací síla [N]	Vysekávací práce [J]
1	147,34	2	90 526	72 421
2	18,85	1	11 581	9265
3	21,36	1	13 124	10 499
4	25,13	4	15 440	12 352
5	25,76	3	15 827	12 662
6	28,27	2	17 369	13 895
7	31,42	6	19 304	15 443
8	34,56	2	21 234	16 987
9	37,7	4	23 163	18 530
10	40,84	4	25 092	20 074
11	69,12	4	42 467	33 974
12	45,72	4	28 090	22 472
13	36,4	44	22 364	17 891
14	84	6	58 610	41 288
15	200	4	122 880	98 304

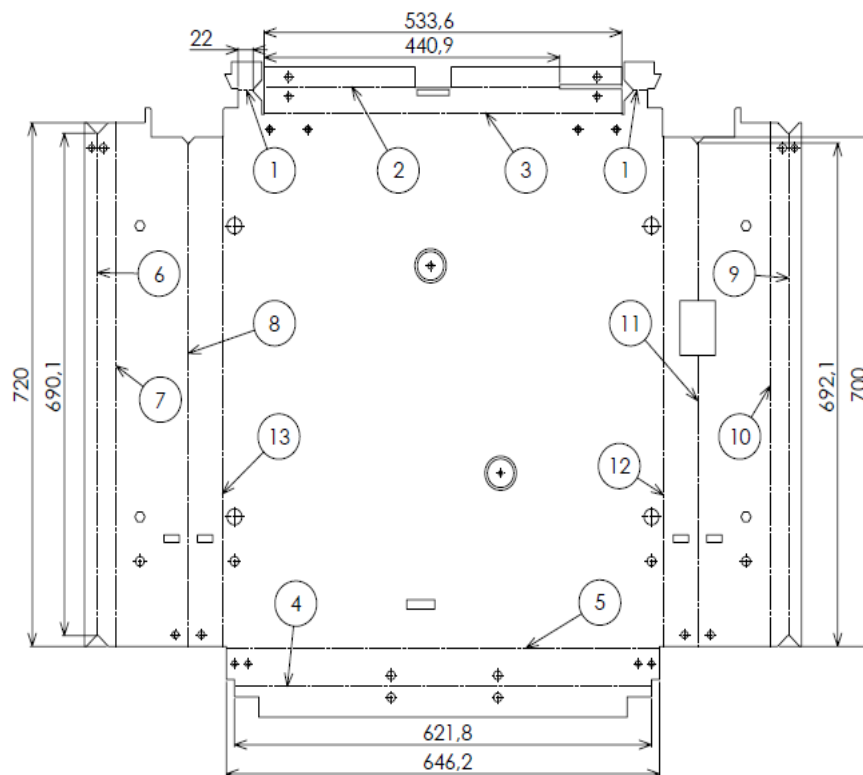
Na základě rozměrů používaného formátu polotovaru, které jsou 2 x 2500 x 1000 mm, a hodnoty maximální síly 122 880 N, jenž vznikne při oddělování materiálu od nástroje čtvercového tvaru 50 x 50 mm, je zvolen vysekávací lis TruPunch 5000 (obr. 51). Tento stroj je zároveň používán společností ABB. Technické parametry lisu jsou uvedeny v příloze 3.



Obr. 51 Vysekávací lis TruPunch 5000 [25]

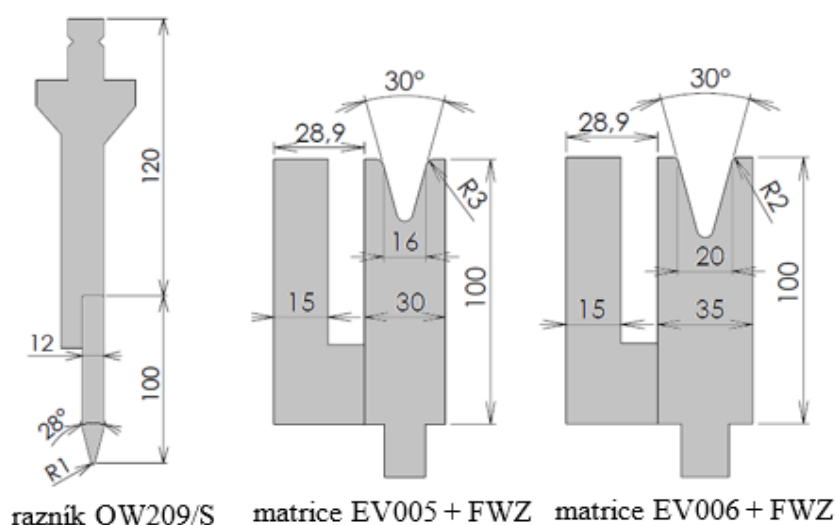
3.4 Postup výroby ohraňování [7] [49]

Při tvorbě ohraňovacího plánu je nejdůležitějším úkolem navrhnout správný sled operací tak, aby bylo možné, danou součást, vyrobit. Zakládání plechu mezi nástroje musí být jednoduché a přesné. Při špatně sestaveném postupu by mohlo docházet ke kolizím s razníkem, matricí, upínacími lištami nebo dorazy a dílec by se stal nevyrobitelným.



Obr. 52 Plán ohraňování nosného plechu

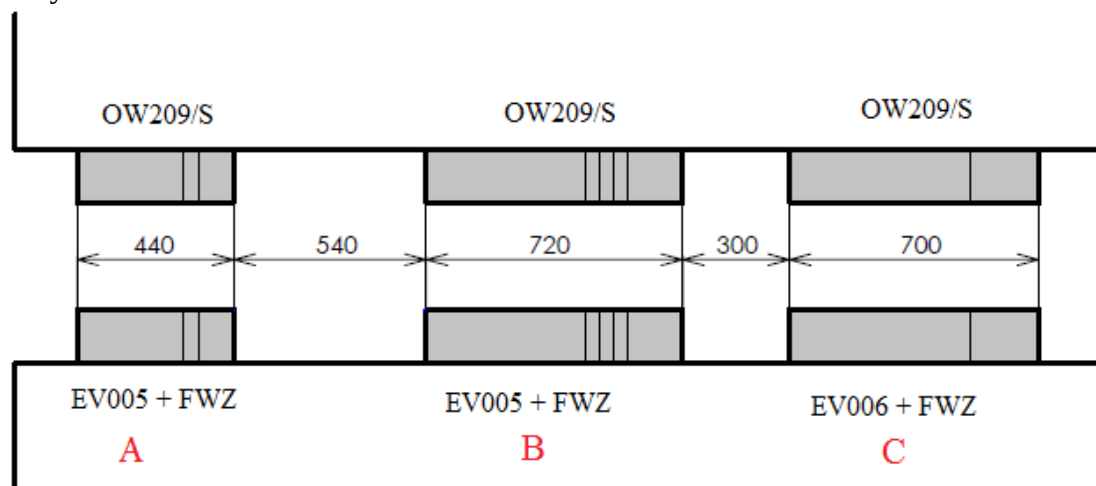
Celá výroba je provedena ve třinácti krocích postupně tak, jak je číselně označeno na obr. 52. Všechny ohyby jsou vytvořeny pomocí razníku OW209/S a dvou druhů matric s označeními EV005 + FWZ a EV006 + FWZ (obr. 53).



razník OW209/S matrice EV005 + FWZ matrice EV006 + FWZ

Obr. 53 Ohraňovací nástroje [49]

Aby byla zajištěna jednoduchá a efektivní výroba, vybrané typy nástrojů se vhodně poskládají, z několika dostupných částí, do upínacích lišt, čímž se vytvoří potřebné délky razníků a matic. Na obr. 54 je zobrazeno schéma jejich rozložení, použité pro celý ohraňovací proces nosného plechu. Označení **A-C**, jednotlivých částí nástrojů, budou použita pro lepší přehlednost při popisování ohýbání. Délky a počet jednotlivých částí použitých nástrojů jsou uvedeny v tab. 5.

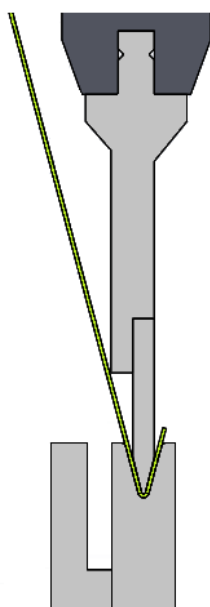


Obr. 54 Schéma rozložení nástrojů

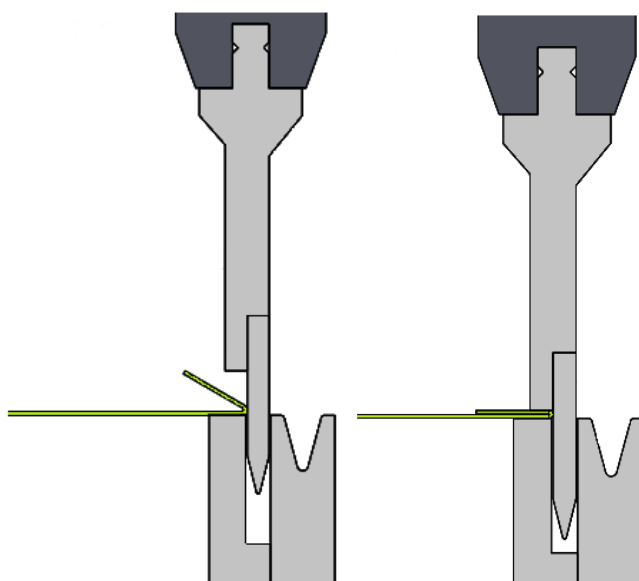
Tab. 5 Použité ohraňovací nástroje [49]

nástroj	OW209/S					EV005+FWZ				EV006+FWZ	
délka [mm]	40	100	200	300	500	40	100	300	500	200	500
počet [-]	4	2	1	1	2	4	2	1	1	1	1

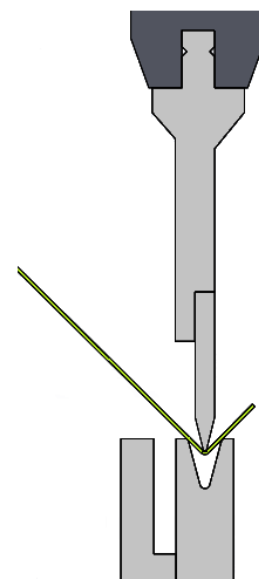
Nosný plech tvoří dva typy ohybů. Nejdříve se provedou ty, jejichž úhel je 180° a jsou zhotoveny ve dvou krocích. První je ohnutí na 30° (obr. 55), druhé slisování, v praxi známé jako falcování (obr. 56). Následují devadesátistupňové ohyby (obr. 57), vytvořené jedním zdvihem beranu.



Obr. 55 Ohyb na 30°

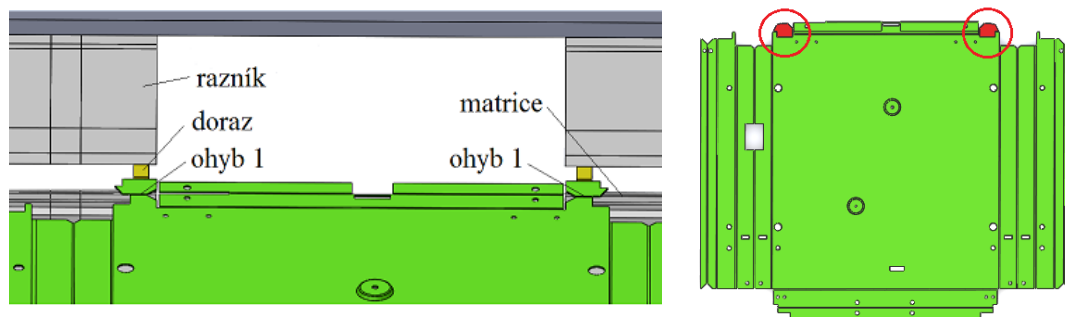


Obr. 56 Falcování



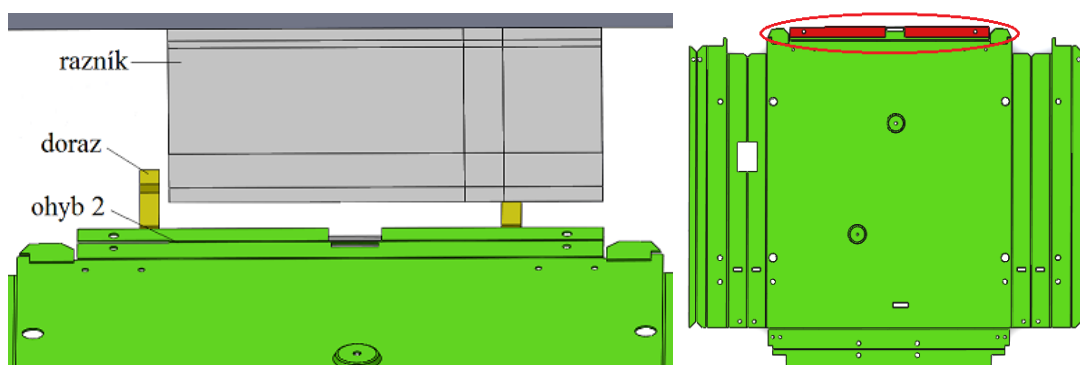
Obr. 57 Ohyb na 90°

- Ohyb č. 1 (obr. 58) – dvě ramena jsou ohnuta na konečný úhel 180° . Součást se vloží mezi složené nástroje **A**, **B** a opře se o dorazy, ve vzdálenosti 39,5 mm od osy ohybu. Následuje ohnutí na 30° , poté dolisování na finální rozměr.



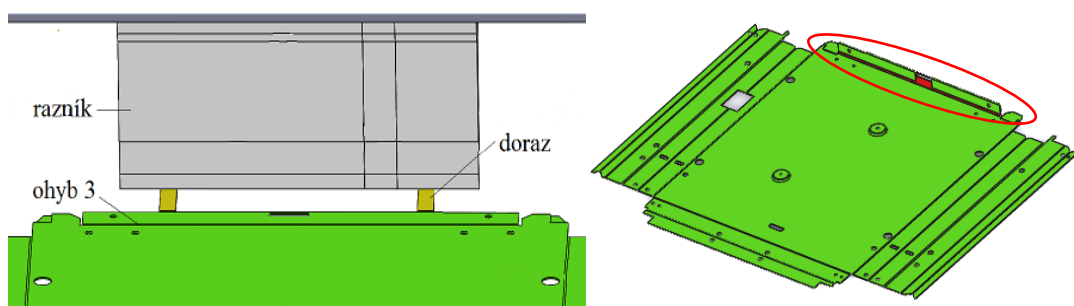
Obr. 58 Ohyb 1

- Ohyb č. 2 (obr. 59) – má úhel 180° . Postup je podobný, jako u předchozího, ovšem tentokrát je použit pouze nástroj označený **A**. Plech je vtlačen na programovatelné dorazy vzdálené 27,5 mm. Ohýbá se nejprve na úhel 30° poté je falcování na 180° , přičemž jako doraz slouží vložka razníku (obr. 56).



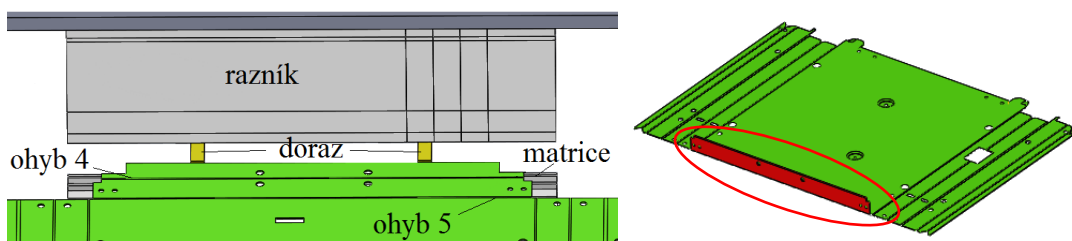
Obr. 59 Ohyb 2

- Ohyb č. 3 (obr. 60) – plech je, mezi razník a matrici, založen stejnou stranou a ve stejném směru, jako při vytváření předešlých ohybů označených 1 a 2, na dorazy ve vzdálenosti 36,5 mm. Ohnutí je provedeno pod úhlem 90° nástrojem označeným **A**.



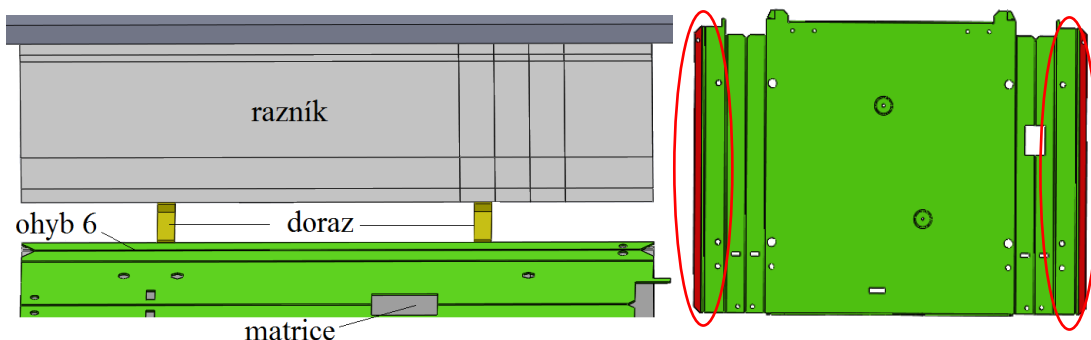
Obr. 60 Ohyb 3

- Ohyby č. 4 a 5 (obr. 61) – oproti předešlým se nachází na protilehlé straně nosného plechu. Nejprve je vyroben č. 4 do úhlu 180° , přičemž osa ohybu je vzdálena 42,5 mm. Před operací č. 5 poodjedou dorazy dozadu na hodnotu 53 mm a plech je posunut dopředu (z pohledu obsluhy). Následuje ohýbání, ve stejném směru jako předchozí, na 90° . Toto celé je provedeno v nástroji **B**.



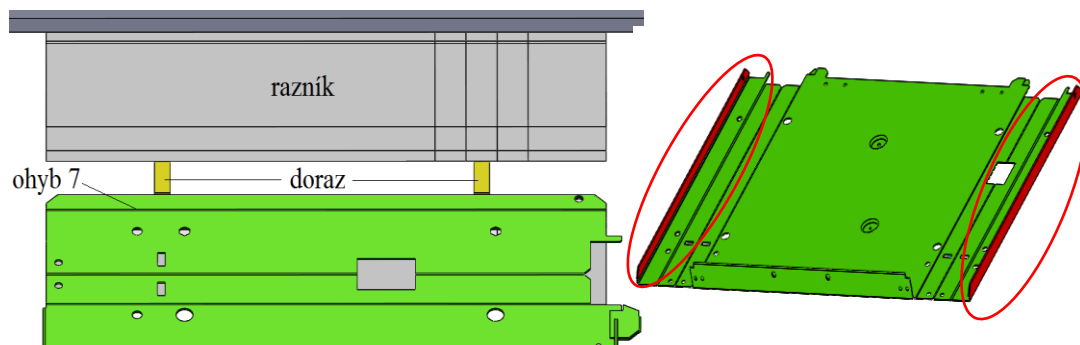
Obr. 61 Ohyby 4 a 5

- Ohyby č. 6 a 9 – jsou vytvořené pod úhlem 180° . Nachází se na protějších stranách, ale způsob zakládání plechu a postup ohraňování je stejný. Na obr. 62 je, nalevo, pohled na součást před zhotovením ohybu č. 6. Vzdálenost dorazů, pro oba ohyby, je 19,5 mm. K tomu je použit razník a matrice s označením **B**. Napravo obr. 62 jsou červeně označeny již obě ohnutá ramena.



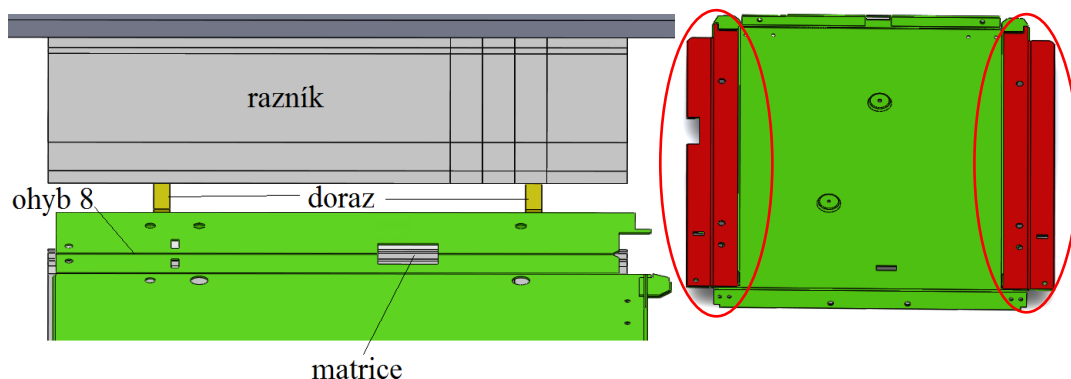
Obr. 62 Ohyby 6 a 9

- Ohyby č. 7 a 10 – jsou nejdelší ohýbané části o délce 720 mm s úhlem 90° , nacházející se na protilehlých bocích součásti. Na obr. 63, vlevo, je ukázáno vkládání plechu pro č. 7. Pro ohyb č. 10 je postup obdobný, pouze na opačné straně součásti. Rozměr od dorazu je 28,4 mm. Použitý nástroj je **B**. Obě ohnuté strany jsou zvýrazněny červeně na obr. 63, vpravo.



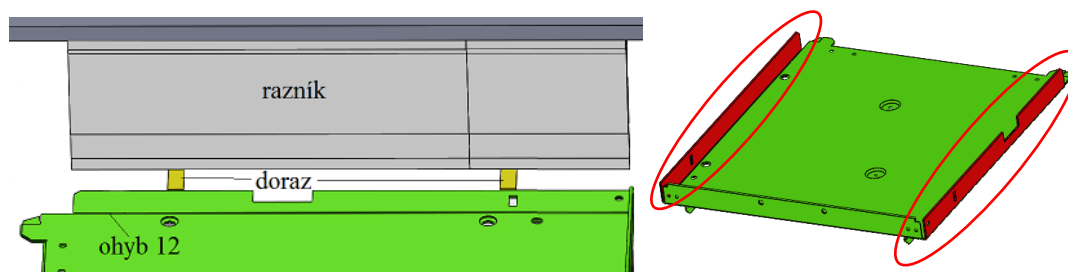
Obr. 63 Ohyby 7 a 10

- Ohyby č. 8 a 11 (obr. 64) – zhotoveny na úhel 180° v matrici **B**. Okraj bočnice se dotýká dorazů ve vzdálenosti 109,7 mm od osy ohybu. Ve fázi kalibrace na konečných 180°, viz obr. 56, je hlavním úkolem obsluhy tlačit plech na doraz po celou dobu lisování, aby nedošlo k vyklouznutí mimo nástroj. Zejména při falcování delších ohybů (obr. 64) musí pracovníci vyvinout značné úsilí.



Obr. 64 Ohyby 8 a 11

- Ohyby č. 12 a 13 (obr. 65) – se vyrábí jako poslední, na úhel 90°, a je pro ně použita větší matrice **(C)**. Jedná se o jediné případy, kdy se ohýbá přeložený, dvojitý plech. Rozměr od dorazů je 51,3 mm. Při těchto operacích je zapotřebí velké pečlivosti obsluhy zejména při zajištění přesného ohnutí v požadovaném místě. Při ohýbání dvojitě tloušťky, má součást tendenci pod razníkem vykluzovat, což by vedlo k vytvoření nepřesného ohybu.



Obr. 65 Ohyby 12 a 13

3.5 Výpočet parametrů ohraňování a volba stroje

Před volbou lisu je nejprve nutné určit některé parametry na základě nichž bude stroj vybrán. Mezi ty podstatné patří velikost ohraňovací síly, výsledná práce a hodnoty odpružení:

- Ohraňovací síla a práce – celková síla je stanovena součtem síly ohybové F_{ov} a kalibrační F_k . Pro stanovení síly vyvinuté při falcování je uvažováno $F_k = 2,5 \cdot F_{ov}$. Při výrobě ohybů 12 a 13 je ohraňován dvojitý plech. Pro tyto ohyby bude předveden vzorový výpočet podle vzorce (2.12):

$$F_{ov\ 12,13} = \frac{b \cdot s^2 \cdot R_m}{l_v} \cdot C_o = F_{ov} = \frac{700 \cdot 4^2 \cdot 320}{20} \cdot 1,45 = 259\ 840\ \text{N}$$

kde: s tloušťka materiálu při ohraňování dvojitého plechu 4 mm
 l_v rozevření matrice EV006 + FWZ je 20 mm
 C_o Caliho konstanta byla zvolena na 1,45

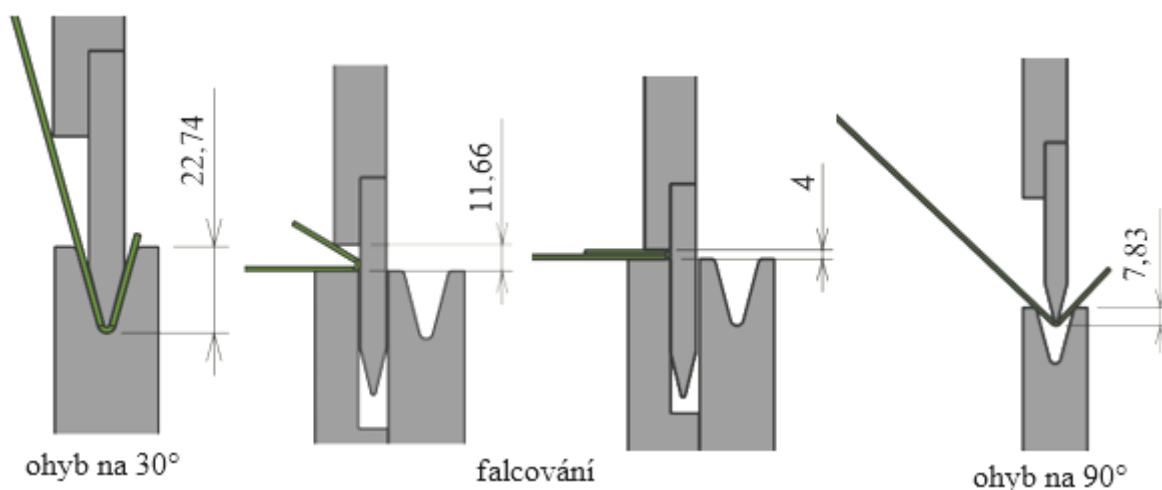
Hloubka vniknutí razníku do matrice závisí na úhlu ohybu (obr. 66). V programu Solidworks bylo změřeno, že pro úhel 30° je tento rozměr 22,74 mm. K této hodnotě je však potřeba přičíst ještě dráhu horního nástroje vykonanou při falcování. Její velikost (7,66 mm) je dána rozdílem vzdáleností razníku v horní a spodní pozici (obr. 66).

Vzorový výpočet práce, vykonaný při operacích 12 a 13 je dle vztahu (2.15):

$$A_{oV\ 12,13} = m_V \cdot F_{coV} \cdot h = \frac{1}{3} \cdot 259\ 840 \cdot 7,83 = 678\ 182\ J$$

kde: m_V opravný koeficient pro ohýbání do V je 1/3

h hloubka vtlacení při ohybu na 90° je 7,83 mm



Obr. 66 Hodnoty vtlacení materiálu do matrice

Tab. 6 Vypočtené hodnoty ohraňovacích sil a prací

Číslo ohybu	Délka ohybu [mm]	Celková síla [N]	Dráha nástroje [mm]	Práce [J]
1	44	17 864	30,4	181 022
2	440,9	179 005	30,4	1 813 917
3	533,6	61 898	7,83	161 554
4	621,8	252 451	30,4	2 558 170
5	646,2	74 959	7,83	195 643
6 a 9	690,1	280 181	30,4	2 839 167
7 a 10	720	83 520	7,83	217 987
8 a 11	692,1	280 993	30,4	2 847 396
12 a 13	700	259 840	7,83	678 182

- Odpružení – vzniká vlivem elastické deformace, která zapříčiňuje změnu úhlu ohybu. Vztah pro určení jeho velikosti je závislý na rozměru rozevření matrice. Hodnota odpružení bude vypočtena po dosazení do rovnice (2.11):

$$\tan \gamma_o = 0,375 \cdot \frac{l_V}{x \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} = 0,375 \cdot \frac{16}{0,38 \cdot 2} \cdot \frac{256}{2 \cdot 10^5} = 0,0101$$

$$\gamma_o = \arctg(0,0101) = 0,34^\circ$$

$$\frac{R_0}{s} = \frac{1}{2} = 0,5$$

kde: x bylo určeno 0,38 z tab. 2

R_e mez kluzu, určena jako: $R_e = 0,8 \cdot R_m = 0,8 \cdot 320 = 256 \text{ MPa}$

l_v rozevření matrice EV005 + FWZ je 16 mm

Při ohraňování dvojitého plechu, které je provedeno v matrici EV006 + FWZ, je odpružení:

$$\tan \gamma_o = 0,375 \cdot \frac{l_v}{x \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} = 0,375 \cdot \frac{20}{0,35 \cdot 4} \cdot \frac{256}{2 \cdot 10^5} = 0,0069$$

$$\gamma_o = \arctg(0,0069) = 0,23^\circ$$

$$\frac{R_0}{s} = \frac{1}{4} = 0,25$$

kde: x bylo určeno 0,35

Výsledné hodnoty jsou poměrně malé, přesto je třeba na ně brát ohled, protože se při každém ohybu sčítají, a to by mělo vliv na konečný tvar součásti. Tyto výsledky jsou pouze orientační. Skutečné velikosti odpružení jsou zjištěny až při samotné výrobě, kdy operátor lisu provede zkušební ohyb, změří velikost úhlu a odchylku eliminuje nastavením korekce.

Ohraňovací lis pro výrobu součásti musí splňovat zejména dvě základní kritéria. Těmi jsou odpovídající pracovní šířka stroje, která musí vyhovovat pro výrobu nejdelšího ohybu (720 mm), a lisovací síla, jenž musí být větší, než největší vynaložená síla (259 840 N) při tváření jednoho ohybu. Ve strojním parku firmy ABB se nachází více ohýbacích center, ale podle výše zmíněných podmínek, pro výrobu nosného plechu, je zvolen CNC lis s označením TruBend 5130 (obr. 67). Technické parametry stroje jsou uvedeny v příloze 4.



Obr. 67 Ohraňovací lis TruBend 5130 [14]

4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [7] [50]

Jelikož strojní vybavení a nástroje, použité pro výrobu, jsou součástí firmy ABB s.r.o. Brno, jejich pořizovací náklady nebudou uvažovány. Na celkové ceně součásti se výrazně podílí režijní náklady, jež však nebudou v této práci řešeny. Předmětem tak bude stanovení pořizovací ceny plechových tabulí a ušetřené peníze při prodeji nevyužitého, odpadového materiálu.

V průběhu práce nebyl dosud uveden přesný počet vyráběných dílů. Velikost roční, výrobní série byla uváděna jako několik set kusů. To z toho důvodu, že tato hodnota záleží na počtu přijatých zakázek. Pro následující výpočty bude stanovena velikost série 200 kusů za rok:

- Náklady na materiál polotovaru – se určí součinem celkového počtu tabulí a cenou za jednu tabuli. Nosný plech je vyráběn z oceli s označením DX51D+ZM. Zvolený výchozí polotovar má rozměry 2 x 2500 x 1000 mm. Počet tabulí se stanoví jako:

$$N_{tab} = \frac{n_{rs}}{i_s} = \frac{200}{2} = 100 \text{ ks} \quad (4.1)$$

kde: N_{tab} počet tabulí na celou sérii

n_{rs} velikost roční série

i_s počet kusů z jedné tabule

Pro danou roční sérii bude potřeba nakoupit 100 plechových tabulí. Celková cena na nákup materiálu bude:

$$N_{ctab} = N_{tab} \cdot c_{tab} = 100 \cdot 750 = 75\,000 \text{ Kč} \quad (4.2)$$

kde: N_{ctab} celková cena všech tabulí [Kč]

c_{tab} cena jedné tabule je 750 Kč

Dalším úkolem je spočítat celkovou hmotnost tabulí:

$$m_{ctab} = D_{tab} \cdot \check{S}_{tab} \cdot s \cdot \rho_o \cdot N_{tab} = 2,5 \cdot 1 \cdot 0,002 \cdot 7850 \cdot 100 = 3\,925 \text{ kg} \quad (4.3)$$

kde: m_{ctab} hmotnost všech tabulí [kg]

D_{tab} délka tabule [m]

$\check{S}_{tab}$ šířka tabule [m]

ρ_o hustota oceli [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Pro zjištění vratných nákladů, je třeba spočítat hmotnost odpadu:

$$m_o = m_{ctab} \cdot \frac{100 - k_{mat}}{100} = 3925 \cdot \frac{100 - 70}{100} = 1\,177,5 \text{ kg} \quad (4.4)$$

kde: m_o hmotnost odpadu [kg]

k_{mat} součinitel využití tabule pro variantu B je 70 %

Část výdajů na nákup materiálu se firmě vrátí prodejem nevyužitého odpadu. Vrácené náklady budou:

$$N_v = m_o \cdot C_v = 1\,177,5 \cdot 15 = 17\,662,5 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

kde: N_v vratné náklady [Kč]

C_v cena za výkup 1 kg odpadu činí 15 Kč

Výše vypočtené hodnoty jsou seřazeny v tabulce 7.

Tab. 7 Náklady na nákup materiálu

Náklady	Cena [Kč]
Nákup materiálu	75 000
Prodej odpadu	-17 662,5
Celkové náklady na materiál	57 337,5

Výsledné náklady na materiál jsou 57 337,5 Kč. Pokud je tabule doplněna o menší díly z jiné zakázky, celkové využití materiálu se zvýší a náklady na materiál budou nižší.

5 ZÁVĚRY

Nosný plech je vrchní částí servisního vozíku, sloužícího k manipulaci s vypínačem vysokého napětí. Součást je vyráběna z nízkouhlíkové, hlubokotažné oceli s označením DX51D+ZM (EN 10346) o tloušťce plechu 2 mm. Počet vyráběných kusů byl stanoven na 200 ks/rok.

Při výběru vhodné výrobní technologie byly, z několika rozebraných metod, vybrány vysekávání a ohraňování, ke kterým má společnost ABB s.r.o. Brno, potřebné vybavení. Ze zvoleného polotovaru, plechové tabule o rozměrech 2 x 2500 x 1000 mm, bude v první části výroby vytvořen kompletní rozvinutý tvar součásti, včetně všech otvorů a prolisů. K tomu se použijí firmou dostupné nástroje od dodavatele TRUMPF.

Technologickými výpočty byla stanovena maximální vysekávací síla 122 880 N. Ta vznikne při jednom úderu největšího, použitého razníku čtvercového tvaru o rozměru 50 x 50 mm. S ohledem na rozměry tabule a maximální vysekávací sílu byl pro výrobu určen hydraulický CNC lis TruPunch 5000. V další fázi budou zhotoveny ohyby, pomocí razníku OW209/S a dvou typů matric EV005 + FWZ, s rozevřením 16 mm, a EV006 + FWZ, která má rozevření 20 mm. Největší ohybová síla 259 840 N vznikne při ohraňování ramene o délce 700 mm, přičemž je ohýbán dvojitý plech. K tomu je zvolen CNC lis TruBend 5130.

V technicko ekonomickém zhodnocení byly řešeny výdaje na nákup materiálu. Část vstupních nákladů se firmě vrátí prodejem ocelového odpadu. Při 70% využití tabule bylo vypočteno, že by se odpad, vzniklý ze 100 plechových tabulí, prodal asi za 17 663 Kč. Pak by celkový nákup materiálu vyšel na 57 338 Kč. Pokud se vysekávaná tabule doplní o menší díly z jiné zakázky, celkové využití plechu bude vyšší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. POČTA, Bohumil. *Základy teorie tváření kovů*. SNTL-Nakladatelství technické literatury: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966
2. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. : il. ISBN 80-214-2683-7
3. Folding & Forming. *FabTech: Sheet Metal* [online]. Peterborough: FabTech, 2014 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://fabtechsheetmetal.co.uk/folding-and-forming>
4. Products. *Jobro: Sheet metal technology* [online]. Ulricehamn (Švédsko): Jobro, 2016 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.jobro.se/en/products/>
5. What is Mechanical Engineering? *Columbia engineering* [online]. New York: Columbia University in the city of New York, 2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://me.columbia.edu/what-mechanical-engineering>
6. Energetika a automatizace [online]. Brno: ABB, 2016 [cit. 2020-03-9].
7. INTERNÍ DOKUMENTY. ABB s.r.o. Brno, 2020.
8. Ocelové plechy válcované za studena zároveň pozinkované. *Alfun metal service center* [online]. Bruntál: Alfun [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/plechy-valcovane-za-studena-zarove-pozinkovane>
9. *Specifikace materiálu*. 2. Brno: ABB, 2015.
10. *Magnelis®* [online]. Lucembursko: ArcelorMittal, 2020, 8 s. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.e-pletivo.cz/_shop/documents/450/450_4_magnelis-brochure-cz-1444648981.pdf. Pdf.
11. *Ohraňování plechu. CNC ohýbání plechu* [online]. Prachatice: Prostor-design, 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.ohranovaniplechu.cz/>
12. *Vystřihování, děrování a vysekávání plechu* [online]. Prachatice: PROSTOR-design, c2015 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.vystrihovani-derovani-vysekovani.cz/#>
13. LENFELD, Petr. *Technologie II: Tváření kovu a zpracování plastů* [online]. Liberec [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm
14. *Trumpf* [online]. Ditzingen (Německo): TRUMPF, c2020 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/
15. Originální příslušenství BFT. BFT [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <http://cz.bft-pumps.com/Rezani-vodnim-paprskem/PRISLUSENSTVI>
16. Co je to řezání vodním paprskem? *Řezeme vodou* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
17. KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery-laserové řezání (laser cutting)* [online]. Praha, 2011 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
18. *Esab knowledge center: How does the laser cutting work* [online]. USA: Esab, c2020 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/index.cfm>

19. Ruční ohýbačka plechu HSBM 610 HS. *První hanácká BOW* [online]. Olomouc: design CODE01, 2018 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <http://www.bow.cz/produkt/3772610-mobilni-ohybacka-plechu-hsbm-610-hs/>
20. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. Speciální technologie tváření. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010, 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
21. Minifaber [online]. Via Brusaporto (Italy): Minifaber, [2014] [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.minifaber.com/blog/sheet-metal-punching-and-the-differences-with-stamping>
22. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011, s. 263. ISBN 978-1-107-00452-8.
23. FINUS, Frauke a Alexander STARK. How does stamping and punching of sheet metal work? *Maschinenmarkt international* [online]. Düsseldorf: Vogel Communications Group, c2020, 20/04/2019 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.maschinenmarkt.international/how-does-stamping-and-punching-of-sheet-metal-work-a-820992/>
24. Akademie tváření: Stříhání. MM spektrum [online]. Praha 10: MM spektrum, 2010 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
25. HÁJEK, Pavel. *Výroba krytu* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85972. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.
26. NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
27. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
28. HELLWIG, Waldemar a Erwin SEMLINGER. *Spanlose Fertigung: Stanzen*. 5., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 1994. Fachbuch der Technik (Vieweg). ISBN 3-528-44042-2.
29. Nibbling. *Manufacturing guide* [online]. Stockholm: Manufacturing guide Sweden AB [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/nibbling>
30. Multitool. In: *Trumpf* [online]. Česko: Trumpf, c2020 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/servis/servis-strojni-systemy-a-lasery/nastroje/derovaci-nastroje/derovaci-nastroje/multitool/?q=multitool
31. What is CNC punching? *Bespoke sheet metal* [online]. Hampshire: Vandf, 2010 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <http://www.vandf.co.uk/tooling/what-is-cnc-punching/>
32. TruMatic 7000 - Pantronic. In: *Pantronic* [online]. Anolitveien: Pantronic, 2020 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.pantronic.no/produkt/trumatic-7000/>
33. Punch Genius. In: *Primapower* [online]. Torino-Pianezza: Prima industrie, 2019 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.primapower.com/turret-punch-press-punch-genius/>

34. Akademie tváření: Ohýbání. MM Průmyslové spektrum [online]. 2010
[cit. 2020-02-01]. Dostupné z:
http://www.mmspektrum.com/content/100716_Akademie_tvaření_ohýbání.pdf
35. Ohraňovací nástroje a ohýbací příslušenství. Trumpf Česká republika [online]. 2020
[cit. 2020-05-02]. Dostupné z:
<http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabecistroje/sluzby/ohranovaci-nastroje-a-ohybaci-prislusenstvi/vyroba.html>
36. Speciální ohraňovací nástroje. UKB-Ohraňovací nástroje [online]. 2020
[cit. 2020-05-02].
Dostupné z: http://www.ukbgmbh.de/fileadmin/pdf/cz/UKB_07_CZ_Ausgabe_8.pdf
37. KOTOUČ, Jiří. Tvářecí nástroje. Praha: České vysoké učení technické, 1993.
ISBN 80-01-01003-1
38. Press brake productivity catalog. In: *Canmet: Technologie zpracování plechu* [online].
Brno: Canmet, 2018 [cit. 2020-03-20].
Dostupné z: <https://www.canmet.eu/perch/resources/wila-cataloggb-2020.pdf>
39. Choosing the best press brake... Wila [online]. USA: Wila, 2020 [cit. 2020-03-20].
Dostupné z: <https://www.wilausa.com/Choosing-the-best-press-brake-clamping-system.aspx?USA-22-555-0>
40. HOLUB, Dominik. *Výroba IT skříně* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-02-13]. Dostupné
z: <http://hdl.handle.net/11012/179031>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v
Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce
Zdeněk Lidmila.
41. CNC hydraulické ohraňovací lisy – výhodné ceny. Dovoz strojů [online]. Zlín, 2016
[cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <http://dovoz-stroju.cz/cnc-hydraulicke-ohranovaci-lisy-vyhodne-ceny>
42. Antil Robotic APR Robot Arm. *Selmach (Velká Británie): Machinery* [online].
Hereford: Selmach Machinery, 2020 [cit. 2020-03-19].
Dostupné z: <https://selmach.com/product/antil-robotic-apr-robot-arm/#tabFeatures>
43. Press brakes. *JMT: Strong on service* [online]. USA: JTM, c2020 [cit. 2020-03-19].
Dostupné z: <http://jmtusa.com/press-brakes/>
44. *Výroba závěsu sedadla motocyklu* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-03-31].
Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/60304/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v
Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie
tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.
45. Akademie tváření: Technologičnost konstrukce při ohýbání. *MM průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM spektrum, 2020 [cit. 2020-04-02].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvaření-technologicnost-konstrukce-pri-ohybání.html>
46. *Rockwill* [online]. Zhejiang (Čína): Rockwill Electric Group, c2018 [cit. 2020-04-09].
Dostupné z: <https://www.cnrockwill.com/article/medium-voltage-switchgear.html>
47. Sheet Metal: Hypertherm Plasma Sources. *HACO* [online]. 2020 [cit. 2020-04-10].
Dostupné z: <http://www.haco.com/en/our-services/hypertherm-plasmasources#gallery>

48. Automatizace a robotizace výroby: Salvagnini. *Sp-tech: Speciální technologie zpracování plechu* [online]. ©2020 [cit. 2020-04-10].
Dostupné z: <http://www.sptech.cz/produkty/salvagnini/ohybaci-centrum/>
49. Bending Tools. *Tool-catalog* [online]. Trumpf, 2019, 263 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z:
https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-bending-tools-catalog-EN.pdf
50. SKALNÍK, Petr. *Návrh výroby spodního dílu nabíjecí stanice* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/179042>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.
51. *Citace Pro* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A_{80}	minimální tažnost	[%]
A_{oV}	práce při ohybu do V	[J]
A_S	střížná práce	[J]
b	šířka ohýbaného materiálu	[mm]
c	materiálový koeficient	[-]
C_o	Caliho konstanta	[-]
C_s	součinitel střížné vůle	[-]
C_{tab}	cena jedné tabule	[Kč]
C_v	cena za výkup odpadu	[Kč]
D_{tab}	délka tabule	[m]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F_k	kalibrační síla	[N]
F_{oV}	ohýbací síla do V	[N]
F_{coV}	celková ohybová síla	[N]
F_{ohr}	ohraňovací síla	[kN·m ⁻¹]
F_s	střížná síla	[N]
h	hloubka vniknutí nástroje	[mm]
i_s	počet kusů z jedné tabule	[-]
k	součinitel plnosti	[-]
k_{mat}	součinitel využití tabule	[%]
L_o	délka oblouku ohybu	[mm]
L_c	celková délka polotovaru	[mm]
l_s	délka střížné hrany	[mm]
L_t	délka tabule plechu	[mm]
l_v	rozevření matrice	[mm]
m_{ctab}	hmotnost všech tabulí	[kg]
m_o	hmotnost odpadu	[kg]
M_t	šířka tabule plechu	[mm]
m_v	opravný koeficient pro ohyb do V	[-]
n	koeficient opotřebení hran nástroje	[-]
N_{ctab}	celková cena všech tabulí	[Kč]
n_{sou}	počet kusů na jedné tabuli	[-]
N_{tab}	počet tabulí na celou sérii	[-]
n_{rS}	velikost roční série	[-]
N_v	vratné náklady	[Kč]
p	měrný tlak	[MPa]
$R_{1\ min}$	minimální poloměr ohybu	[mm]
$R_{1\ max}$	maximální poloměr ohybu	[mm]
Re	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_o	poloměr zaoblení	[mm]
S	střížná plocha	[mm ²]
s	tloušťka materiálu	[mm]
S_k	kalibrovaná plocha materiálu	[mm ²]

Označení	Legenda	Jednotka
S_{sou}	plocha součásti bez otvorů	[mm ²]
$\bar{S}_{\text{tab}}$	šířka tabule	[m]
v	střižná vůle	[mm]
x	součinitel polohy neutrální plochy	[-]
z	střižná mezera	[mm]
α	úhel ohybu	[°]
γ	úhel ohnutého úseku	[°]
γ_0	úhel odpružení	[°]
ϵ_{max}	mezní prodloužení	[mm]
ρ	poloměr neutrální osy	[mm]
ρ_0	hustota oceli	[kg·m ⁻³]
τ_s	pevnost materiálu ve stříhu	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Součásti vyrobené plošným tvářením [3] [4].....	9
Obr. 2 Nosný plech	10
Obr. 3 Servisní vozík [7]	10
Obr. 4 Detailní pohled na dvojité ohyby	10
Obr. 5 Základní rozměry součásti	10
Obr. 6 Označení otvorů pro montáž	11
Obr. 7 Řezání vodním paprskem [15]	12
Obr. 8 Řezání plazmou [47]	12
Obr. 9 Laser [17]	12
Obr. 10 Postupový střížný nástroj [44]	13
Obr. 11 Vysekávání [12]	13
Obr. 12 Ohýbací nástroj	13
Obr. 13 Ruční ohýbací nástroj [19]	14
Obr. 14 Ohýbací centrum [14]	14
Obr. 15 Ohraňování [11]	14
Obr. 16 Fáze stříhu [24]	15
Obr. 17 Pásma střížné plochy [25]	16
Obr. 18 Vliv střížné vůle na kvalitu střížné plochy [24]	16
Obr. 19 Závislost střížné síly na hloubce vniknutí střížného nástroje [27]	17
Obr. 20 Vysekávací plán [7]	18
Obr. 21 Vysekávací plán se zobrazenými nástroji [7]	19
Obr. 22 Multitool [30]	19
Obr. 23 Nástrojová sestava pro vysekávání [14]	19
Obr. 24 Děrovací a dělicí nástroje [14] [29]	20
Obr. 25 Tvářecí, válečkovací a popisovací nástroje [14]	20
Obr. 26 Konstrukce stroje s C-rámem [23]	21
Obr. 27 Konstrukce stroje s O-rámem [14]	21
Obr. 28 Vysekávací centrum TruPunch 5000 [14]	21
Obr. 29 Zásobník nástrojů [14]	22
Obr. 30 Ohýbání osamělou silou a momentem [27]	22
Obr. 31 Napjatost a deformace v ohybu [27]	23
Obr. 32 Schéma ohybu [2]	23
Obr. 33 Schéma odpružení [13]	24
Obr. 34 Závislost ohýbací síly na dráze razníku [13]	25
Obr. 35 Razník [36]	26
Obr. 36 Matrice [36]	26
Obr. 37 Hydraulické upínání [38]	26
Obr. 38 Hydraulický ohraňovací lis [40]	27
Obr. 39 Zadní programovatelné dorazy [25]	27
Obr. 40 Robotické rameno [42]	28
Obr. 41 Důsledek pružné deformace beranu na ohýbanou součást [43]	28
Obr. 42 Minimální vzdálenost otvorů od okrajů [44]	29
Obr. 43 Technologičnost ohýbané součásti [44]	29
Obr. 44 Model nosného plechu	30
Obr. 45 Technologičnost nosného plechu	30
Obr. 46 Rozvinutá délka součásti	31
Obr. 47 Rozvinutá šířka součásti	31
Obr. 48 Varianta A	33

Obr. 49 Varianta B	33
Obr. 50 Označení otvorů pro vysekávání.....	34
Obr. 51 Vysekávací lis TruPunch 5000 [25].....	35
Obr. 52 Plán ohraňování nosného plechu	36
Obr. 53 Ohraňovací nástroje [49].....	36
Obr. 54 Schéma rozložení nástrojů	37
Obr. 55 Ohyb na 30°	37
Obr. 56 Falcování.....	37
Obr. 57 Ohyb na 90°	37
Obr. 58 Ohyb 1.....	38
Obr. 59 Ohyb 2.....	38
Obr. 60 Ohyb 3.....	38
Obr. 61 Ohyby 4 a 5.....	39
Obr. 62 Ohyby 6 a 9.....	39
Obr. 63 Ohyby 7 a 10.....	39
Obr. 64 Ohyby 8 a 11.....	40
Obr. 65 Ohyby 12 a 13.....	40
Obr. 66 Hodnoty vtlačení materiálu do matrice.....	41
Obr. 67 Ohraňovací lis TruBend 5130 [14]	42

SEZNAM TABULEK

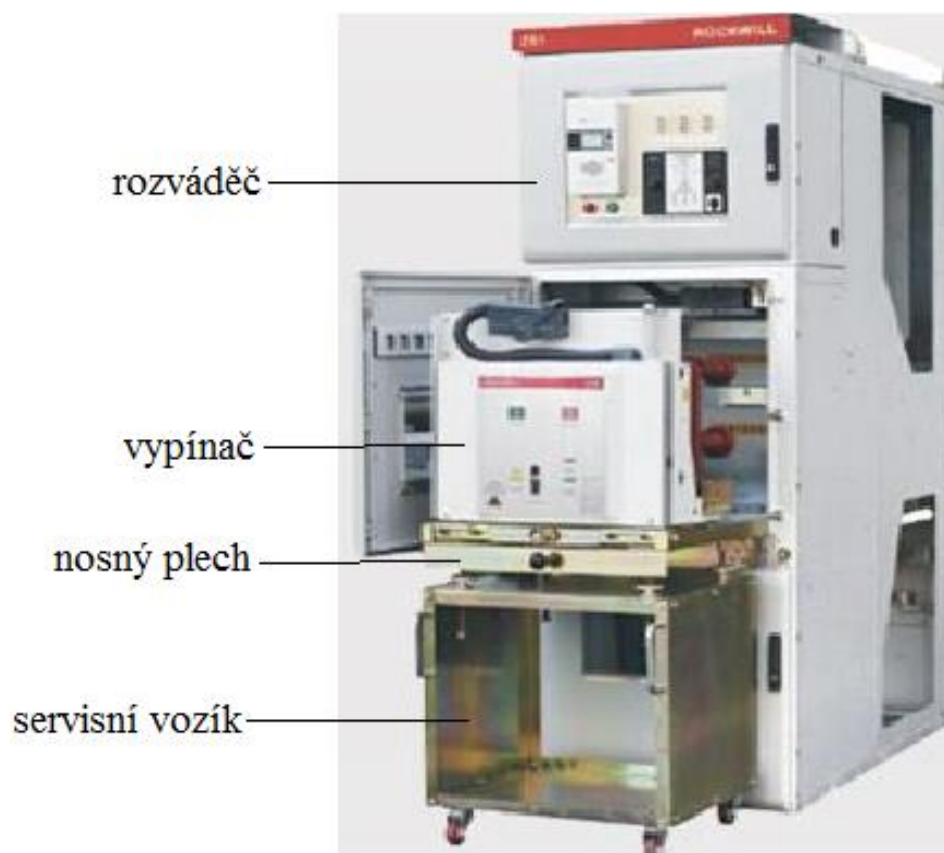
Tab. 1	Mechanické vlastnosti a chemické složení oceli [9]	11
Tab. 2	Hodnoty součinitele x [2]	24
Tab. 3	Přehled použitých nástrojů na jednotlivé operace [7]	34
Tab. 4	Výsledné hodnoty sil a práce	35
Tab. 5	Použité ohraňovací nástroje [49]	37
Tab. 6	Vypočtené hodnoty ohraňovacích sil a prací	41
Tab. 7	Náklady na nákup materiálu	43

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Manipulace s vypínačem z rozváděče vysokého napětí [46]
Příloha 2	Hlavní výhody Magnelisu® [10]
Příloha 3	Technické parametry TruPunch 5000 [14]
Příloha 4	Technické parametry CNC lisu TruPunch 5130 [14]

SEZNAM VÝKRESŮ

Nosný plech BP-01-2020



Magnelis®

Hlavní výhody

Vynikající odolnost vůči korozi

Nic neposkytuje v prostředí s vysokým obsahem chloridu či čpavku lepší ochranu než Magnelis®. Díky svému unikátnímu chemickému složení má Magnelis® vyšší odolnost vůči korozi než běžná žárově zinkovaná ocel.

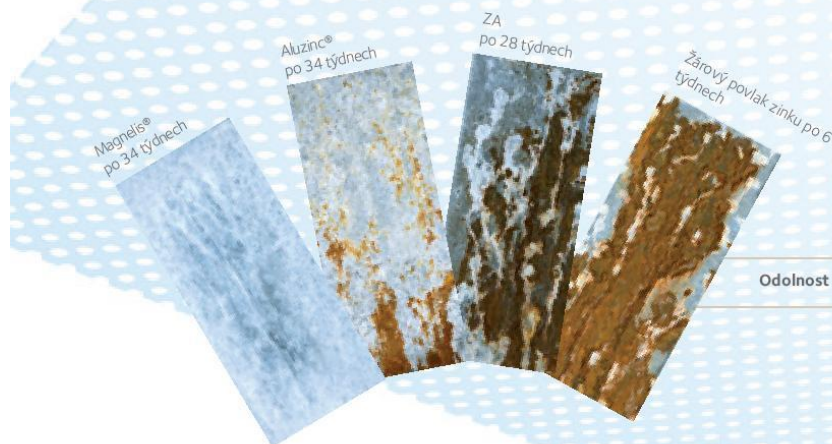
Poškození povlaku, ke kterému dochází například v prostředí s vysokým obsahem čpavku, je u povlaku Magnelis® sedmkrát menší než u běžného povlaku zinku. Kromě toho zajišťuje Magnelis® dlouhodobější aktivní ochranu podkladového kovu. Několik výrobků s kovovým povrskem bylo podrobeno zkouškám odolnosti v solné mlze po dobu osmi měsíců.

Výsledky byly jasným důkazem vynikající odolnosti vůči korozi povlaku Magnelis®. Na rozdíl od ostatních vzorků se na vzorku s povrskem Magnelis® neobjevily žádné známky „červené“ koroze.



Odolnost v solné mlze (průměr)

Magnelis®: > 200 h/μm – Aluzinc®: ± 100 h/μm – ZA: ± 25 h/μm
Žárový povlak zinku: ± 8–10 h/μm



Odolnost v solné mlze 20 μm/strana

I ve vysoce alkalickém prostředí (pH 10 až 13) je odolnost vůči korozi povlaku Magnelis® vyšší než u jiných kovových povlaků.

Díky svému chemickému složení má tento výrobek lepší funkční charakteristiky s ohledem na bariérovou ochranu proti korozi v prostředí s vysokým obsahem čpavku.

Úbytek hmotnosti v nejnepriznivějším prostředí



Měření úbytku hmotnosti

pH: 11,7 – Roztok s 5% NH₃ – T: 20°C – Trvání zkoušky 24 h

	TruPunch 5000 velký formát	TruPunch 5000 střední formát
ROZMĚRY		
ŠÍŘKA	7610 mm ¹	6540 mm ¹
HLOUBKA	8171 mm ¹	7395 mm ¹
VÝŠKA	2072 mm ¹	2072 mm ¹
MAX. SLED ZDVIHŮ		
VYSEKÁVÁNÍ (E = 1 MM)	1350 1/min	1600 1/min
ZNAČENÍ	3000 1/min	3000 1/min
PRACOVNÍ ROZSAH		
REŽIM VYSEKÁVÁNÍ, OSA X	3050 mm	2500 mm
REŽIM VYSEKÁVÁNÍ, OSA Y	1550 mm	1250 mm
MAX. TLOUŠŤKA PLECHU	8,0 mm	8 mm
MAX. HMOTNOST OBROBKU	280 kg	200 kg
MAX. VYSEKÁVACÍ SÍLA	220 kN	220 kN
NÁSTROJE		
DOBA VÝMĚNY NÁSTROJE MULTITOOL	0,3 s	0,3 s
POČET NÁSTROJŮ / UPÍNACÍCH ČELISTÍ	21 ks / 4 ks	18 ks / 3 ks
ODEBÍRÁNÍ DÍLŮ		
MAX. VELIKOST DÍLU, Klapka NA DÍLY, VYSEKÁVÁNÍ	500 mm x 500 mm	500 mm x 500 mm
MAX. VELIKOST DÍLU PRO VYSEKÁVÁNÍ S NEHYBNÝM SKLUZEM (S POSUVNÝM STOLEM)	80 mm x 50 mm	80 mm x 50 mm
HODNOTY SPOTŘEBY		
PRŮMĚRNÝ PŘÍKON, VYPÍNAČÍ AUTOMATIKA AKTIVNÍ	0,5 kW	0,5 kW
PRŮMĚRNÝ PŘÍKON VE VÝROBĚ	9,5 kW	9,5 kW

¹ Rozměry jsou přibližné, platné jsou vždy rozměry uvedené v instalačním plánu

TruBend 5130

LISOVACÍ SÍLA	1300 kN
DĚLKA OHYBU	3230 mm
VOLNÝ PRŮCHOD STOJANU	2690 mm
UŽITEČNÁ MONTÁŽNÍ VÝŠKA	385 mm
UŽITEČNÁ MONTÁŽNÍ VÝŠKA PRO ZVĚTŠENÉ PROVEDENÍ (VOLITELNĚ VYBAVENÍ)	615 mm
VYLOŽENÍ	420 mm
OVLÁDACÍ PLOCHA	Touchpoint TruBend
MAX. RYCHLOST PRACOVNÍHO CHODU OSY Y (MOŽNOST)	25 mm/s
ROZMĚRY, HMOTNOSTI	
DĚLKA	3980 mm
ŠÍŘKA	1900 mm
VÝŠKA	2840 mm
HMOTNOST	11800 kg