



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA VÝMĚNÍKU KRBOVÉ VLOŽKY

MANUFACTURING OF FIREPLACE INSERT EXCHANGER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Běhounek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Martin Běhounek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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

Výroba výměníku krbové vložky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o výrobu plechového dílu používaného ve vložce krbových kamen. Součástka je prostorového tvaru a bude vyráběna ohraňováním s využitím konvenčního nástroje. Na tuto problematiku bude zaměřena aktuální literární studie.

Cíle diplomové práce:

- zhodnotit technologičnost součástky
- provést rozbor možných technologií výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti
- vypracovat aktuální literární studii se zaměřením na technologii ohraňování
- zpracovat návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty
- navrhnout a popsat postup tváření
- provést technicko-ekonomické hodnocení

Seznam literatury:

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

SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. Speciální technologie tváření. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, (2010-2011), 2 sv. (134, 155 s.). ISBN 978-80-214-4406-52.

MARCINIAK, Zdislaw, J.L. DUNCAN and S.J. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, (2002). 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. Úvod do tváření II. [s.l.] : [s.n.], (2001). 2 sv. (161, 115 s.).

NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. Speciální technologie I: Plošné a objemové tváření. 2. vyd. Technická 2, Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického Brno, (1992). ISBN 80-214-0404.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., (2006). 217 s. ISBN 80-214-2374-9.

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

FREMUNT, P., J. KREJČÍK a T. PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli (odborná kniha). 1. vyd. Brno: Dům techniky. (1994). 230 s.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

BĚHOUNEK Martin: Výroba výměníku krbové vložky.

Práce je zaměřena na návrh technologie výroby dílu krbové vložky. Na základě variantního řešení výroby a doložených výpočtů byla jako nejoptimálnější technologie výroby zvolena metoda ohraňování. Dle požadavků na teplotní odolnost a svařitelnost bude díl vyráběn z kotlového plechu oceli 11 416. Z provedených kontrolních a technologických výpočtů byl navržen postup ohraňování na lisu BAYKAL APHS 3110x180 se jmenovitou silou 180 tun. Bylo provedeno kontrolní ověření ohybů pomocí simulace. Ohýbací nástroje jsou z nástrojové oceli 12 050. Součástí práce je technicko-ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova: Ocel 11 416, ohraňování, krbová vložka, ohraňovací lis, simulace

ABSTRACT

BĚHOUNEK Martin: Manufacturing of fireplace insert exchanger.

This master's thesis deals with a proposal of production technology of a fireplace insert. Based on various solutions of production and documented calculations, charring has been elected as the most optimal technology. According to the requirements of thermal resistance and weldability the component will be made of boiler metal plate 11 416. Based on checking and technological calculations process of charring on press BAYKAL APHS 3110x180 has been proposed with the nominal power of 180 tons. The verification of bends was realized using computer simulations. Bending tools are made of steel 12 050. A technical-economic evaluation is also part of this master's thesis.

Keywords: 11 416 steel, bending, fireplace, bender, press break, simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BĚHOUNEK, Martin. *Výroba výměníku krbové vložky*. Brno, 2016. 60s, 2 výkresy, 7 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 27.5.2016

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále panu Ing. Luboši Bervidovi, MBA., majiteli společnosti Brabenec s.r.o., za poskytnutí potřebných rad a prostředků ke zpracování práce. Rád bych také poděkoval rodině a všem blízkým za trpělivost a kvalitní podporu, kterou mi vždy po celé studijní roky věnovali.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	10
1.1 Varianty výroby	12
2 OHRAŇOVÁNÍ	16
2.1 Odpružení	18
2.2 Minimální a maximální poloměr ohybu	19
2.3 Stanovení délky polotovaru	20
2.4 Ohybová síla a práce.....	22
2.5 Nástroje pro ohraňování	25
2.5.1 <i>Upínání nástrojů</i>	28
2.6 Ohraňovací stroje.....	29
2.7 Průběh procesu ohraňování.....	32
2.8 Technologičnost ohýbání.....	34
3 NÁVRH VÝROBY	35
3.1 Ověření tvárných vlastností oceli 11 416	36
3.2 Stanovení rozvinuté délky polotovaru	40
3.3 Volba pálicího plánu.....	42
3.4 Postup ohraňování	44
3.5 Volba nástrojů.....	45
3.6 Postup ohýbání.....	47
3.7 Simulační ověření průběhu ohybů	51
3.8 Výpočet parametrů ohýbání.....	53
3.9 Volba ohraňovacího stroje	55
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	56
4.1 Technické zhodnocení	56
4.2 Ekonomické zhodnocení.....	56
5 ZÁVĚRY	60

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratk
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam grafů
Seznam příloh
Seznam výkresů

ÚVOD [2], [3], [15], [27], [28]

V současné době je ve strojírenském průmyslu využívána velká řada technologií. Jednou z nejrozšířenějších možností zpracování materiálu je metoda tváření, která má hlavní výhodu v úspoře materiálu. V porovnání s obráběním, kde odpad tvoří v některých případech až 80% hmotnosti, je tváření velmi úsporné. Obecně bývá rozdělováno na objemové (kování, protlačování, pýchování, atd.) a plošné (stříhání, ohýbání, tažení, zakružování, atd.). Při objemovém tváření dochází k přetvoření v celém průřezu materiálu (ve třech směrech) a při plošném dochází k rovinnému přetvoření (ve dvou směrech), což znamená, že tloušťka materiálu je neměnná nebo se její změna zanedbává.

Jedna z technologií využívající plošné tváření je ohýbání, které se stejně jako jiné metody začaly modernizovat využíváním CNC řízenými stroji pro přesnější opakovatelnost výroby. Kromě toho lze automatizaci strojů urychlit a usnadnit výrobu.

Na obr. 1 je možné vidět příklady dílů vyrobených plošným tvářením nebo za pomoci ohraňovacích lisů.



Obr. 1 Příklady součástí vyrobených plošným tvářením [2], [3], [28]

1 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU [5], [7], [12], [14], [18], [23], [24], [32]

Řešená součástka je částí krbových kamen (obr. 2), které vyrábí společnost Brabenec, spol. s.r.o., firma zabývající se především svařováním a tvářením plechových dílů z nerezové oceli a černého plechu. Pro udržení kroku s konkurenčními výrobci je neustále obnovováno strojové vybavení pro zlepšení kvality a rychlosti výroby. Firma byla založena již v roce 1930. Od té doby proběhlo několik změn v sídle a vedení společnosti. Nyní sídlí na pomezí Čech a Moravy v obci Želetava pod vedením Ing. Luboše Bervidy, MBA.

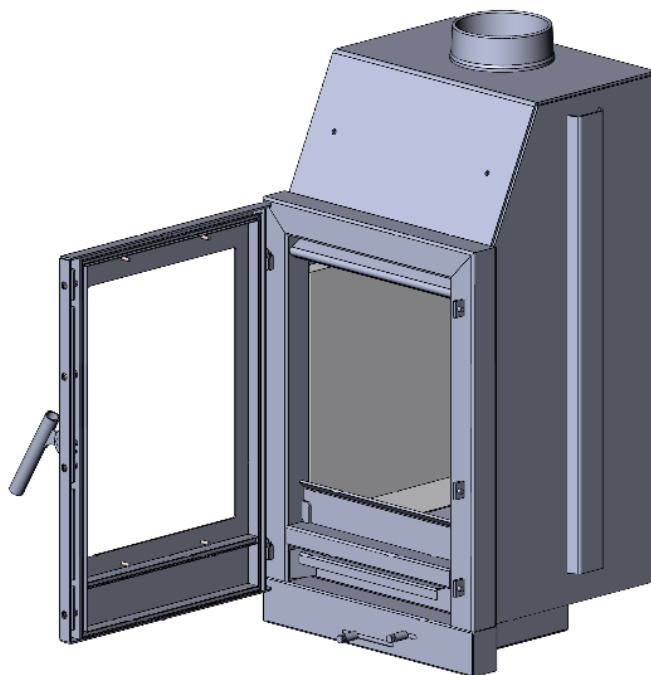
Výrazná změna nastala v roce 1996, kdy se tehdejší majitel pan Josef Brabenec rozhodl, že z důvodu malého výběru domácích kamen na trhu si vyrobí jedny dle vlastních představ. Od té doby se zvedla poptávka po takovýchto kamnech mezi známými. Jelikož se poptávka začala neustále zvyšovat, bylo zapotřebí udělat certifikaci, která se uskutečnila v roce 2000 a tehdy se rozjela výroba Želetavských kamen naplno.

Součástí vložky ocelových kamen (obr. 3) mohou být uzpůsobeny na přání každého zákazníka, který si může zvolit z několika variant dle velikosti nebo způsobu ohřevu s výměníkem nebo bez, výsledného tvaru a velikosti po obložení, výkonu, rozložení kachlí, barevného provedení nebo dalších požadavků. V dnešní době je tato výroba směřována především na individuální požadavky zákazníka, kdy je firma schopná v krátkém čase upravit výrobu k oboustranné spokojenosti.

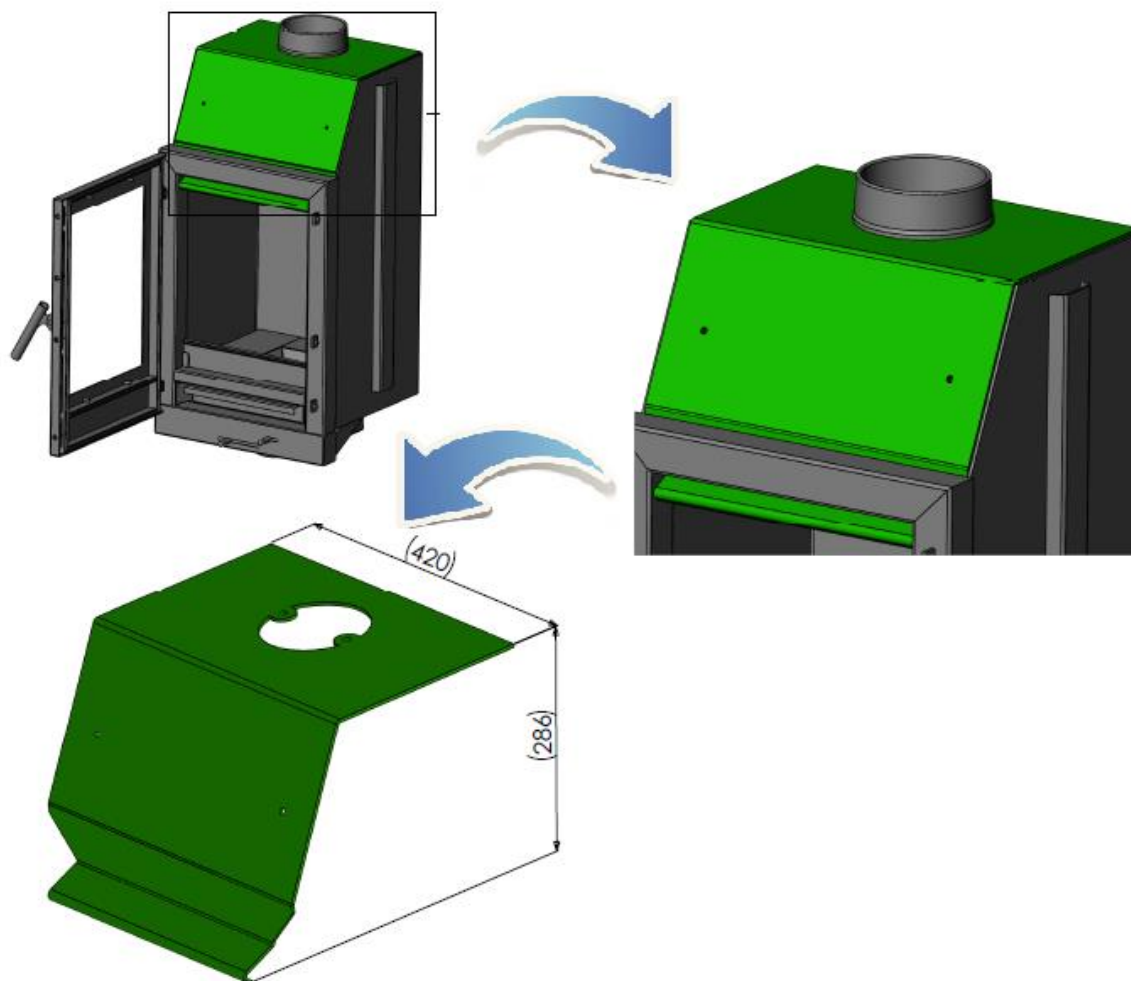
Jelikož se výrobní možnosti dnešní doby zlepšují a požadavky zákazníků zvyšují, je potřeba krbovou vložku (obr. 3) inovovat. Bylo nutné zachovat základní rozměry, ale usnadnit a urychlit samotnou výrobu. Proto bylo vytvořeno několik inovací. Jedna z nich je úprava víka vložky a oplachu skla za vzniku jednotného dílu, viz obr. 4.



Obr. 2 Kamna u zákazníka [32]

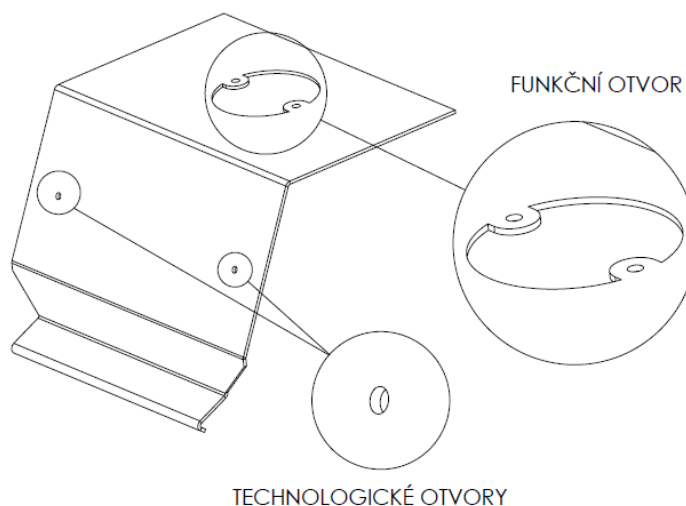


Obr. 3 Model krbové vložky [32]



Obr. 4 Umístění víka vložky [32]

Součástka víko vložky (obr. 5) bude vyráběna v malé výrobní sérii 200 ks za rok z plechu o tloušťce 4 mm s využitím technologie plošného tváření. Součást vznikne tvarováním polotovaru čtyřmi ohyby, kdy nejmenší je o 25° a největší o 120°. Vnější rozvinutý tvar připomíná obdélník a jeho přibližný půdorysný rozměr je 420 x 580 mm. Veškeré rozměry jsou uvedeny ve výkresu DP-01-145298-01. V součásti jsou předpřipravené otvory - technologické, sloužící k přivaření držáků šamotu na vnitřní straně součástky, a funkční pro odvod spalin do komína.



Obr. 5 Model víka vložky [32]

V požadavcích zákazníka nejsou uvedeny žádné zvýšené požadavky na geometrickou či rozměrovou přesnost. Zároveň není nutná ani povrchová úprava ve formě laku, protože vložka je ukryta pod kachlovým obkladem. Pro volbu vhodného materiálu je nutné zohlednit tvárnost, svařitelnost a především odolnost proti vyšším teplotám, které v topeništi vznikají.

Vzhledem ke zmíněným požadavkům na vstupní materiál byl jako nejvhodnější vybrán kotlový plech oceli 11 416, který je běžně dostupný i ve větších formátech. Jeho značení dle norem je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1 Ekvivalenty pro označení oceli 11 416 [31]

Norma	ISO	Euro	Německo
Označení	P265GH	EN 10028-2	H II (1.0425)

Ocel splňuje všechny požadavky, a to především tvárnost za studena. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 11 416 [18]

Název	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Zúžení	Tvrdost
Značka	R_m	R_e	A_5	Z_5	HV_{10}
Jednotka	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[-]
Hodnota	400-490	225	39	68	120

Nutnou podmínkou materiálu je zajištění dobré svařitelnosti a dobré odolnosti proti vyšším teplotám, které v topeništi vznikají. Chemické složení kotlového plechu oceli 11 416 je uvedeno v tab. 3.

Tab. 3 Chemické složení oceli 11 416 [18]

Prvek		C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Cr+Ni+Cu	P	S
Obsah	min		0,5							
[hm. %]	max	0,2		0,35	0,3	0,3	0,3	0,7	0,04	0,04

1.1 Varianty výroby [5], [6], [7], [11], [14], [22], [23], [24], [32]

Vzhledem k nastíněným podmínkám a malosériové výrobě lze součástku vyrábět dvěmi výrobními technologiemi. V první je třeba vytvořit plochý tvar ze svitku plechu či z pásu plechové tabule, aby dále mohl vzniknout požadovaný tvar, viz obr. 5. Mezi technologie, kterými lze polotovary vyrobit lze zahrnout:

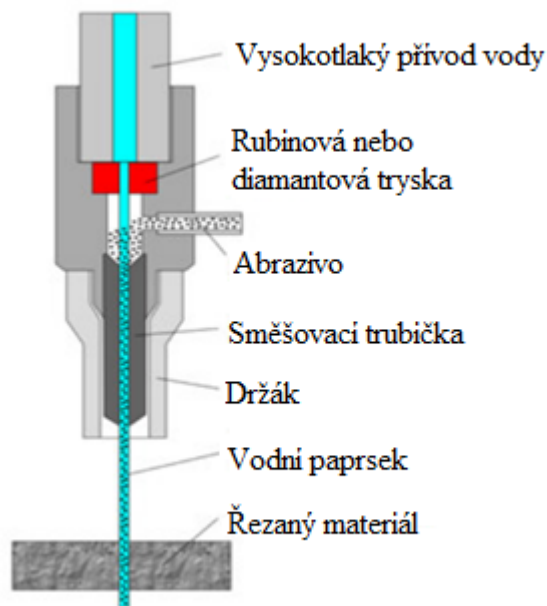
- Vysekávání - využívá beztržiskového dělení plochých materiálů. Slouží ke zhotovení složitých, ale i jednoduchých tvarů dílců. Princip spočívá v proražení nebo vyseknutí otvorů speciálními nástroji pomocí stroje nebo ručního nástroje (obr. 6). Pomocí této metody lze vyrábět polotovary až do tloušťky 6 mm



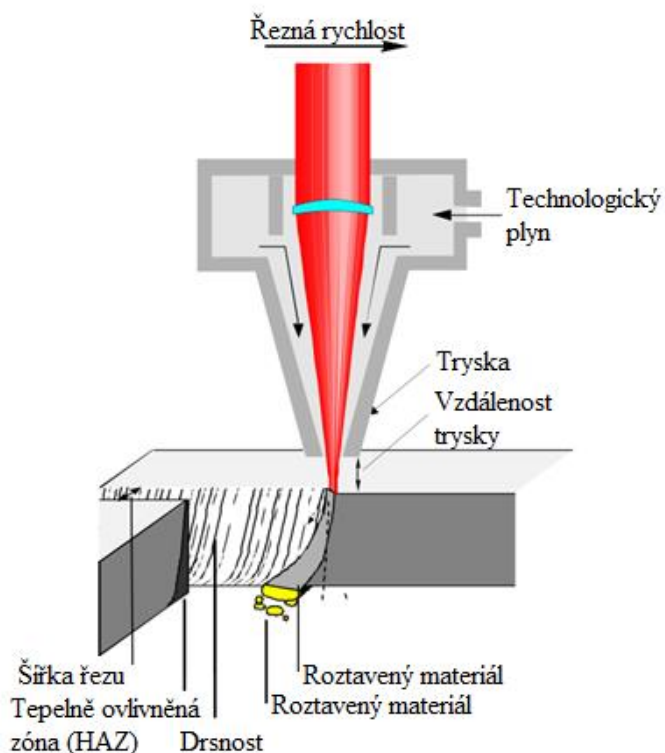
Obr. 6 Vysekávání [22]

v závislosti na materiálu. Vysekávání má obrovskou výhodu ve velkosériové výrobě, a to díky rychlosti, přesnosti výroby a kvalitě ploch hotového výstřižku. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena stroje a speciálních nástrojů. Firma nevlastní vysekávací stroj, proto se tato metoda nehodí pro výrobu zadané součásti.

- Řezání vodním paprskem - založeno na principu řezání pomocí vody a abraziva při vysokých tlacích (obr. 7), využívající řízení CNC programem pro vysokou přesnost polohy řezu. Metoda umožňuje řezání komplikovaných tvarů, kde by nebylo možné využít vysekávacího nebo střížného stroje. Výhodou vodního paprsku je možnost řezat více materiálů, např. gumu, sklo, keramiku, atd. Lze řezat materiál až do tloušťky 200 mm rychlostí až 20 m/min. Velikou výhodou je, že materiál není tepelně ovlivněný, jedná se tedy o studený řez, který umožňuje kvalitní povrch. Mezi nevýhody se řadí vysoká pořizovací a provozní cena, u tvrdých materiálů nelze dosáhnout vysoké rychlosti řezu a samotný proces řezání je značně hlučný. Metoda by byla pro výrobu zmíněné součástky vhodná.
- Řezání laserem - řezání probíhá pomocí řezného paprsku a plynu, viz obr. 8, pomocí něhož lze řezat materiály bez ohledu na jejich tepelné vlastnosti, protože teplota pod tryskou dosahuje až 10 000 °C. Při této teplotě dopadá laserový paprsek na povrch materiálu, kde materiál natavuje a odpařuje. Díky vysokému výkonu laseru lze dosáhnout kvalitního úzkého řezu s malou tepelně ovlivněnou oblastí. Mezi hlavní výhody se řadí možnost řezat složité tvary, vysoká rychlost a přesnost řezu. Zmíněná technologie je pro výrobu zadané součásti vhodná.



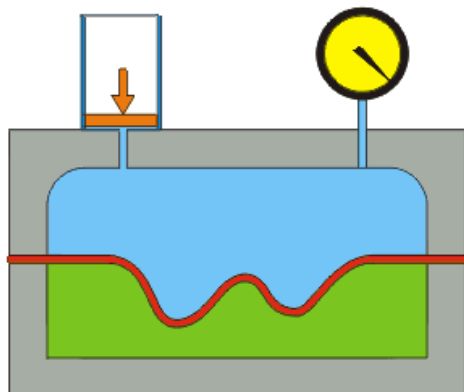
Obr. 7 Řezání vodním paprskem [14]



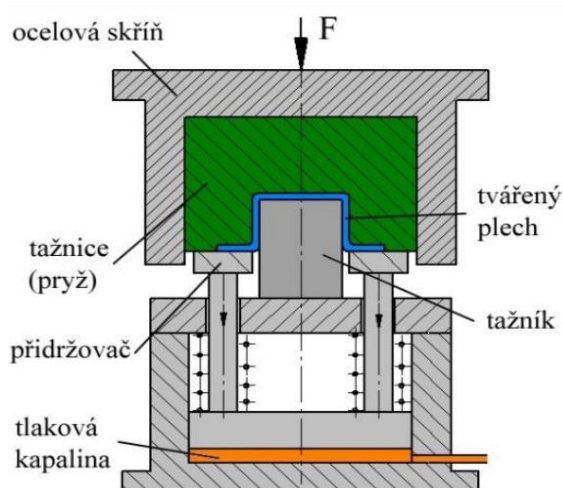
Obr. 8 Princip řezání laserem [2]

Ve druhé operaci je třeba docílit výsledného tvaru víka topeniště (obr. 5). Mezi varianty, kterými by bylo možné tohoto tvaru docílit lze zahrnout:

- Nekonvenční technologie - metody využívající stroj s jedním pevným nástrojem a druhým ve formě nepevného media, což může být kapalina, pryž nebo jiné. Mezi tyto metody se řadí například: Hydroform (obr. 10), kde nepevné medium tvoří kapalina, Marform (obr. 9), kde se tváří pomocí vtlačování polotovaru do pryže. Další z možností je tváření pomocí výbuchu, kde se mění tvar tlakovým rázem. Každá z těchto metod musí mít pro každou součástku vlastní formu.



Obr. 9 Metoda Hydroform [11]



Obr. 10 Metoda Hydroform [11]

Jejich nevýhoda spočívá ve vysokých pořizovacích cenách a pomalé výrobní rychlosti. Mezi hlavní výhody však patří možnost vytvoření složitých tvarů. Po dokončení operace vznikne hladký povrch neponičený nástrojem.

- Svařování - vzhledem k tvaru a požadavkům, které má součástka splňovat, připadá v úvahu svařování. Jeho základem je spojení dvou stejných nebo rozdílných kovových materiálů za vzniku svarové housenky (obr. 11). Ke spojení se využívá elektrického proudu, odporu, frekvence, indukce a mnoho dalších, podle kterých se dělí svařování na mnoho druhů. Vzhledem k tvaru a složitosti zadaného dílu je tato metoda využitelná především v malé sérii nebo kusové výrobě. Vyrobit dílec svařováním z několika kusů je bez použití přípravků a upínacích mechanismů složité a časově velmi náročné. Protože součástka není tolik rozměrná a je nutné, aby byla celistvá, není svařování vhodné.



Obr. 11 Metoda svařování [16]

➤ Ohýbání - jedna z nejstarších a stále velmi používaných technologií. Princip je jednoduchý, kdy po založení polotovaru plechu do ohýbacího nástroje (obr. 12) a přesného založení a upevnění pomocí páky nebo ovládání motoru lze spustit ohybník, který začne polotovar ohýbat. Jakmile je dosaženo výsledného úhlu ohybu, tak sevření lze uvolnit a součástku vyjmout. Na ruční ohýbačce, která nemá dorazy, je časově náročné nastavit každý díl tak, aby byl ohnutý ve stejném místě a byla zaručena opakovatelnost. Tyto stroje se stále hodně využívají, ale pouze pro kusovou výrobu. Pro sériovou výrobu není možnost využívat dorazy, proto je ohýbání časově náročné a není zajištěna dostatečná přesnost. Pro zadanou součást je tato metoda vyhovující.



Obr. 12 Ruční ohýbací stroj [24]

➤ Ohraňování - jedná se o metodu, která ohýbá plechové součástky dle tvaru vyměnitelného nástroje. Princip je stejný jako u klasického ohýbacího stroje s tím rozdílem, že zde je možné využívat tvarových ohybníků a matic s vlastními rádiusy ohybu. Stroje jsou především CNC programovatelné, proto je možná i korekce úhlu odpružení a přesná výška zdvihu pro zaručení požadovaného ohybu. Další značnou výhodou je univerzálnost ohybníků i matic pro různé materiály a úhly ohybu. Existuje zde možnost řízených dorazů, které zaručují opakovatelnost výroby s rychlou změnou jejich polohy pro další ohyb. Pořízení tohoto stroje (obr. 13) je nákladné, ale uplatňuje se především díky jeho univerzálnosti ohybů v malé výrobní sérii, možnosti využití dorazů, rychlosti a přesnosti. Vzhledem k tvaru zadané součástky a rychlosti výroby je tato metoda vhodná.

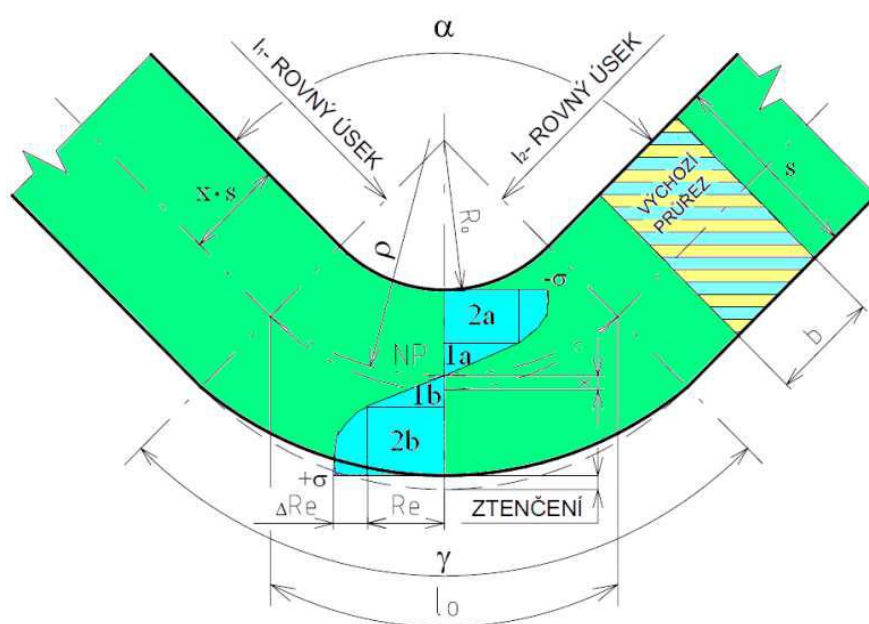


Obr. 13 CNC ohraňovací lis [24]

Z navržených a popsanych technologií výroby polotovaru a tvorby požadovaného tvaru součástky je patrné, že nejvýhodnější varianta pro výrobu zadaného dílu bude v první operaci řezání otvorů a obrysu laserem a v druhé operaci bude požadovaný tvar vytvářen pomocí technologie ohraňování na hydraulickém CNC lisu, který firma Brabenec, spol. s r.o. vlastní a je součástí jejich strojového parku. Druhý krok by bylo možné vyrábět i na ručním ohýbacím stroji, kterým firma také disponuje, ale z důvodu rychlosti výroby bude využit ohraňovací lis. Tyto technologie by měly zaručit nejméně nákladnou požadovanou výrobu. Z rozboru problematiky bude zaměřena práce na druhou metodu, což je ohraňování výsledného tvaru.

2 OHRAŇOVÁNÍ [2], [7], [8], [9], [10], [14], [16], [21], [22], [23], [25]

Ohraňování je založeno na principech klasického ohýbání na speciálních strojích, ohraňovacích lisech. Při ohraňování plechového dílce platí stejné zásady a řeší se stejná problematika jako u klasického ohýbání. Jedná se o lokální oblast vytvořené plastické deformace se zastoupením pružné deformace, která se také jinak nazývá odpružení. Dále problematika spočívá ve stanovení správné velikosti rozvinuté délky výchozího polotovaru, maximálního a minimálního poloměru ohybu a mnoha dalších činitelů. Veliká výhoda ohraňovacích lisů je možnost ohýbání velkorozměrových plechů o délce až 16 metrů. Nástroj je vždy tvořen ze dvou vyměnitelných lišt, kde spodní, pevná, se nazývá matrice a horní, pohyblivá, ohybník. Ohraňování je metoda využívající napětí od zatěžujících sil pro ohyb. Požadovaný tvar součásti bývá mnohdy získáván na větší počet operací. Ohýbá se většinou za studena s výjimkou křehkých a tvrdých materiálů, které se ohýbají naopak za tepla tzv. kovářskými způsoby.



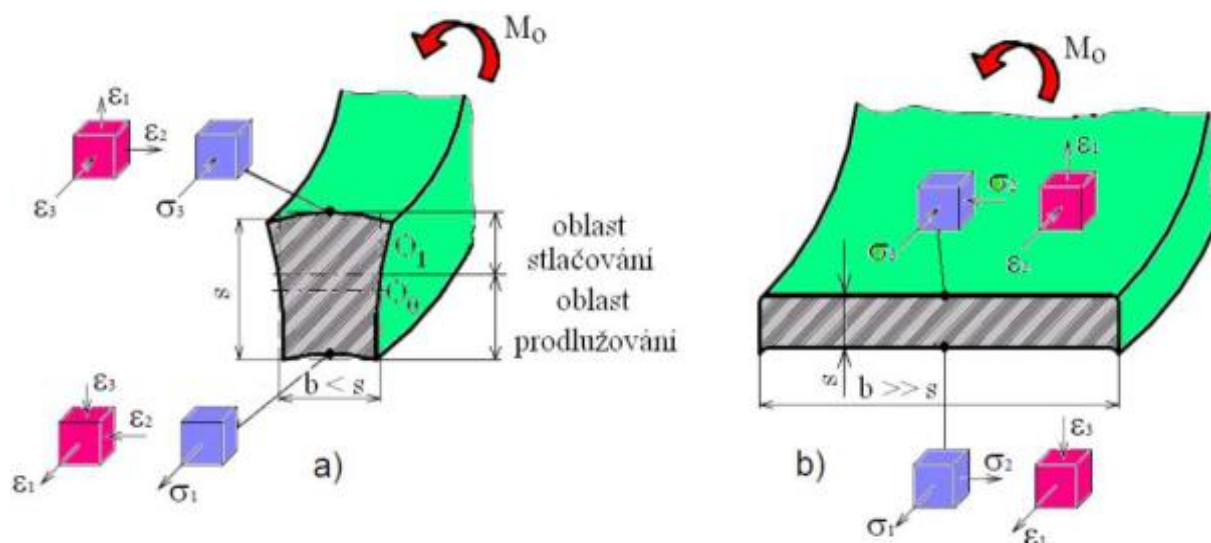
la, lb – oblast pružné deformace,
 2a, 2b – oblast plastické deformace se zpevněním ΔRe ,
 x – součinitel posunutí neutrální plochy (NP) od původní osy průřezu,
 Ro – poloměr ohybu,
 lo – délka ohnutého úseku v neutrální ploše,
 ρ – poloměr neutrální plochy (NP),
 α – úhel ohybu,
 b – šířka průřezu

Obr. 14 Průběh „V“ ohybu [7]

Při ohraňování se materiál na vnitřní straně ohybu stlačí vlivem tlakových napětí v podélném směru a snaží se rozšířit v příčném směru. Na vnější straně ohybu je to naopak, vlivem tahových napětí, které zde působí, nastává prodloužení v podélném směru a zúžení ve směru příčném. Průběh napětí při ohybu do tvaru „V“ je znázorněn na obr. 14. Zde je patrné, že mezi stlačovanou a prodlužovanou vrstvou materiálu se nachází ještě jedna vrstva, kde její tangenciální napětí je rovno nule, tudíž je při ohýbání její délka neměnná a označuje se jako neutrální osa. Ta hraje velmi důležitou roli ve správném vypočtení rozvinuté délky polotovaru nebo velikosti přetvoření v místě ohybu.

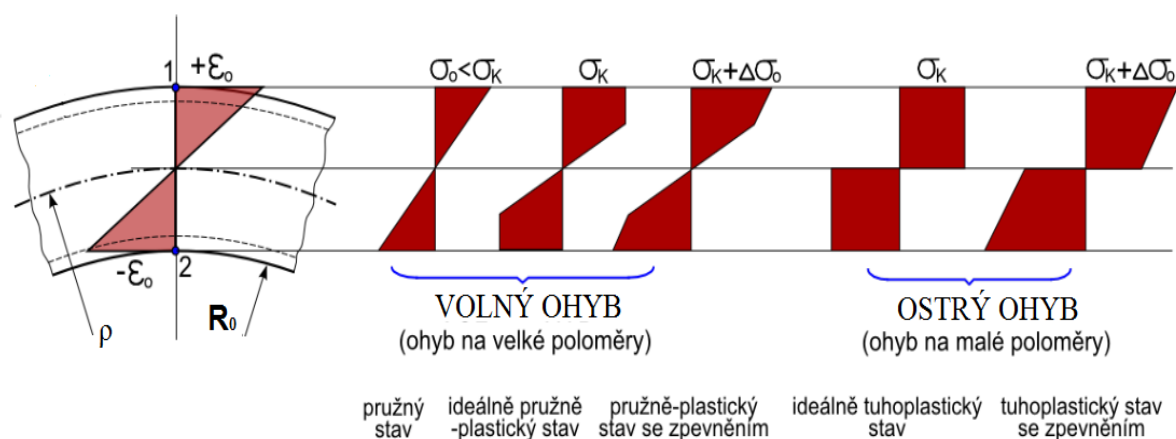
Pro dosažení trvalého ohybu je nutné, aby ohybové napětí bylo vyšší než mez kluzu „ R_e “, ale aby následně nepřekonal mez pevnosti „ R_m “, kdy by došlo k porušení soudržnosti materiálu. Při rozboru napjatosti je nutné rozpoznat, zda se jedná o tváření tenkých tyčí nebo širokých pásů. Při ohýbání úzkých tyčí (obr. 15) je velikost napětí „ σ_2 “ přibližně rovna nule a napjatosti v krajních vláknech odpovídají spíše jednoosému tahu a tlaku. Jednoosé napjatosti odpovídá trojosý stav deformace „ ϵ “. V důsledku toho dochází na vnitřní straně ohybu ke zvětšování šířky a na vnější straně k zužování šířky průřezu.

U ohýbání širokých pásů plechu, kdy je šířka mnohonásobně větší než jeho tloušťka, nedochází k deformaci v příčném směru, tj. $\varepsilon_2 = 0$. Z toho plyne, že při aplikaci zákona zachování objemu v rovinné deformaci na tahové straně jsou směry deformací opačné proti tlakové straně. Platí tedy $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$.



Obr. 15 Schéma napjatosti a deformace [7]

Napětí a deformace se mění v závislosti na tom, ve které fázi tváření se právě nachází. Obr. 16 znázorňuje, jak vypadá průběh napětí v příčném průřezu ohýbaného materiálu. Průběh je rozdělen do 3 fází, kdy první fáze (pružný stav) se vyskytuje v elastické oblasti, kde napětí je pod mezí kluzu „ R_e “. Při dosažení meze kluzu začíná vznikat plastická deformace (ideálně pružně-plastický stav). Při dalším zvyšování ohybové síly se postupně rozšiřuje oblast plastické deformace až na celý průřez ohýbané součásti, což je nazýváno ideálním plastickým materiálem. Pokud by se uvažovalo tváření za studena, pak nastává pružně plastický stav se zpevněním, neboť mechanické vlastnosti se zvyšují.



Obr. 16 Rozložení napětí při ohýbání [7]

2.1 Odpružení [7], [14], [25]

Odpružení je nedílnou součástí každého ohýbání. Jedná se o pružně-plastickou deformaci materiálu, kde pružná vlastnost způsobuje nepřesnosti v ohybech. Po ukončení zatížení a odlehčení má těleso tendenci vrátit se zpět do původního tvaru, tj. těleso odpruží (obr. 17). Na tom, jak velké bude odpružení, má značný vliv tloušťka materiálu, druh materiálu, úhel, poloměr, druh ohybu a mnoho dalších faktorů. Aby bylo dosaženo požadovaného tvaru po odlehčení, je nutné, aby byla velikost ohybu zvětšena o úhel odpružení. Následně bude ohyb po odlehčení stejný jako požadovaný. Velikost pružného úhlu se stanovuje pomocí výpočtů nebo s využitím diagramu sestavených na základě praktických zkoušek, viz příloha 7.

U součástí s velkým poloměrem ohybu, kde $R/s > 20$, je odpružení natolik velké, že se neurčuje úhel odpružení, ale změna poloměrů.

Velikost odpružení lze také určit pomocí obecných výpočtů, a to pro ohyb do tvaru „V“ a „U“ (obr. 18). Velikost se vypočítá následovně:

- Ohyb do tvaru V:

$$\operatorname{tg} \beta = 0,375 \cdot \frac{w}{k \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} \rightarrow \beta \quad (2.1)$$

- Ohyb do tvaru U:

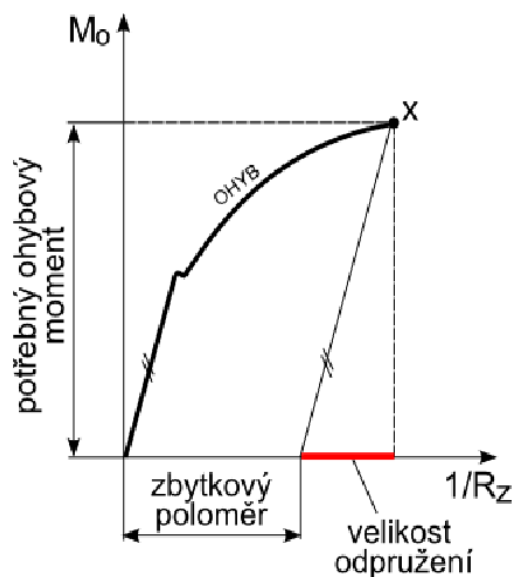
$$\operatorname{tg} \beta = 0,75 \cdot \frac{w}{k \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} \rightarrow \beta \quad (2.2)$$

kde: β – úhel odpružení [°]

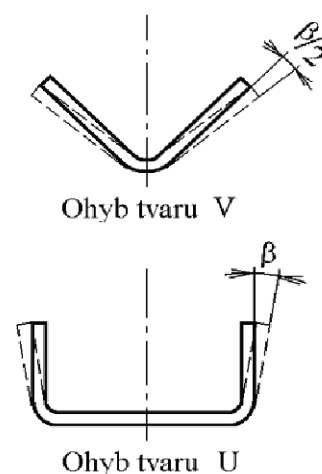
E – modul pružnosti [MPa]

w – vzdálenost mezi opěrami ohybnice [mm]

k – součinitel určující polohu neutrální osy $k=1-x$ [mm]



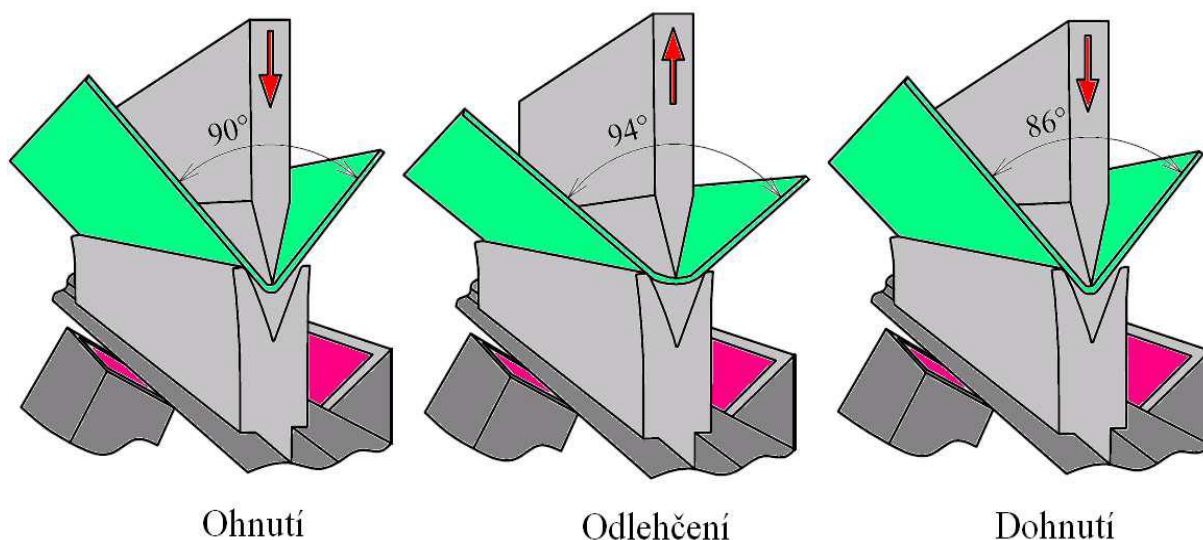
Obr. 17 Závislost ohybového momentu na křivosti s ukázkou odpružení [25]



Obr. 18 Ohyb tvaru „U“ a „V“ [7]

Při ohybu na ohraňovacím lise je možné vliv odpružení kompenzovat. Existují stroje, které jsou vybaveny laserovými snímači. Při tvorbě programu už je znám požadovaný úhel, a díky snímačům je možné získat přesné informace o výsledném úhlu po odlehčení. Na základě toho je stroj schopný vytvořit sám korekci odpružení, kdy dopočítá, o kolik stupňů je potřeba změnit velikost ohybu nebo o jakou vzdálenost je třeba upravit posuv ohybníku v ose.

Na obr. 19 je znázorněn případ, kdy je požadovaný úhel ohybu 90° , ale po odlehčení se úhel rozevře na hodnotu 94° . Proto je nutné využít korekci a znovu ohnout o přidanou hodnotu pro odpružení na 86° . Po odlehčení už bude mít úhel ohybu požadovanou hodnotu 90° .

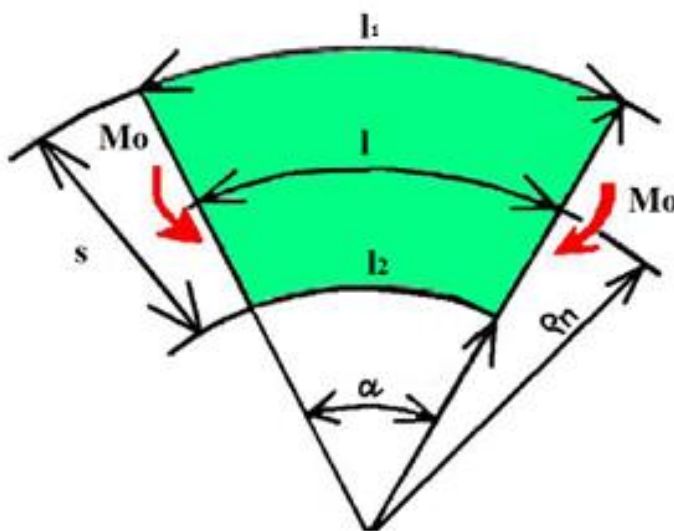


Obr. 19 Kompenzace odpružení při volném ohybu [14]

Existuje ještě jedna možnost, jak co nejvíce eliminovat přítomnost elastické složky, a tou je kalibrace. Zde je podstatou principu to, že po ohnutí se vyskytne odpružení, které lze eliminovat tím, že stroj vyvine ještě větší sílu a zatlačí tím ohýbanou součást napevno mezi ohybník a matici. Při zvýšení síly, a s tím související kalibrací, se vytvoří prolis, který je funkčně nezávadný. Krajní vlákna v elastické oblasti se přemění na plastická, která zajišťují trvalé deformace, čímž se odpružení eliminuje.

2.2 Minimální a maximální poloměr ohybu [7], [14], [25]

Při ohýbání na co nejmenší poloměr ohybu jsou hlavními ovlivňujícími faktory mechanické vlastnosti, tvárnost, anizotropie materiálu a technologie ohybu. Jedná se o minimální hodnotu poloměru ohybu, který lze provést bez porušení vnějších struktur, tedy bez překročení meze pevnosti, která má za následek trhliny. Riziko vzniku trhlín je velké u materiálů, které jsou málo plastické. Pro snížení tvrdosti a zlepšení tvařitelnosti se používá například žihání. Na krajních vláknech vznikne napětí, které má za následek vznikající poměrné přetvoření (obr. 20).



Obr. 20 Deformační schéma ohybu [7]

Pro určení minimálního poloměru je nutné určit maximální poměrné přetvoření „ ε_{1max} “, které je dáno vztahem:

$$\varepsilon_{1max} = \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{R_2 \cdot \alpha - \rho_n \cdot \alpha}{\rho_n \cdot \alpha} = \frac{(R_1 + s) \cdot \alpha - (R_1 + \frac{s}{2}) \cdot \alpha}{(R_1 + \frac{s}{2}) \cdot \alpha} =$$

$$= \frac{s}{2 \cdot R_1 + s} [-] \quad (2.3)$$

kde: l_2 – délka krajního stlačeného vlákna [mm]
 l_1 – délka krajního prodlouženého vlákna [mm]
 R_1 – poloměr ohybu krajního stlačeného vlákna [mm]
 R_2 – poloměr ohybu krajního prodlouženého vlákna [mm]
 ρ_n – poloměr ohybu neutrální vrstvy [mm]

Po vyjádření z rovnice (2.3) dostaneme vztah pro výpočet minimálního poloměru ohybu:

$$R_{1min} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{1max}} - 1 \right) = c_3 \cdot s [mm], \quad (2.4)$$

kde: c_3 – součinitel kompenzace zpevnění a směru vláken, který je uveden v tab. 4

Tab. 4 Součinitel „ c_3 “ pro různé materiály [14]

Materiál	Měkká ocel	Měkká mosaz	Hliník	Dural	Měkká měď
Součinitel c_3	0,5 až 0,6	0,3 až 0,4	0,35	3 až 6	0,25

Hodnoty v tab. 4 jsou spíše orientační a platí pouze pro optimální povrch, tj. pro povrch bez trhlin a rýh. Hodnoty jsou určeny pro příčný a podélný směr vláken.

Maximální poloměr ohybu „ R_{1max} “ je takový poloměr, kdy dojde v krajních vláknech ohybu k trvalému (nevratnému) přetvoření, tedy ke vzniku plastické deformace. V případě, že by se v průběhu tváření vyskytovala pouze elastická deformace a k plastické by nedošlo, ohyb by se po odlehčení narovnal opět do původního tvaru.

Pro určení maximálního poloměru se proto uvažuje s minimálním poměrným přetvořením „ ε_{1min} “, která vyplývá z rovnice (2.3) a zároveň splňuje Hookův zákon, tedy:

$$\varepsilon_{1min} = \frac{s}{2 \cdot R_{1max} + s} = \frac{\sigma_k}{E} [-], \quad (2.5)$$

kde: σ_k – mez kluzu [MPa]

Po úpravě rovnice (2.5) lze vyjádřit maximální poloměr ohybu, který je dán vztahem:

$$R_{1max} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{\sigma_k} - 1 \right) [mm] \quad (2.6)$$

2.3 Stanovení délky polotovaru [7], [14]

Při určování co nejpresnější hodnoty velikosti výchozího polotovaru a minimálního poloměru zaoblení je podstatné určit přesnou polohu neutrální osy. Při ohýbání s velkým poloměrem ohybu vznikají velké pružné, ale zároveň malé plastické deformace. Proto lze v takovýchto případech uvažovat, že neutrální osa se neposune a bude ve středu tloušťky materiálu.

V případě, že je ohýbáno na malé velikosti poloměru ohybu, je nutné brát v potaz fakt, že se zde nachází i deformace v průřezu materiálu, která je nedílnou součástí tohoto procesu. Tyto deformace jsou projevovány ztenčováním nebo rozšiřováním výchozího průřezu a do výpočtů bývají zahrnuty pomocí součinitelů. Hodnota poloměru neutrální osy je tedy závislá na malých a velkých poloměrech dle vztahu:

Pro velké poloměry zaoblení, kdy $\frac{R_0}{s} \geq 12$:

$$\rho = R_0 + \frac{s}{2} \text{ [mm]} \quad (2.7)$$

Pro malé poloměry zaoblení, kdy $\frac{R_0}{s} \leq 6$:

$$\rho = \left(R_0 + \frac{s}{2}\right) \cdot z_z \cdot z_r \text{ [mm]} \quad (2.8)$$

kde: $z_z = s_1/s$ – součinitel ztenčení průřezu [-]

$z_r = b_1/b$ – součinitel rozšíření průřezu [-]

s_1, b_1 – tloušťka a šířka ohnutého průřezu [mm]

Hodnota součinitele ztenčení je závislá na mnoha faktorech, jako například tvárnost materiálu, velikost deformace, úhel ohybu, tření vznikající mezi ohýbaným materiálem a nástrojem a mnoho dalších. Součinitel ztenčení lze určit graficky nebo prostřednictvím tabulek, do kterých byly zaznamenávány výsledky experimentálních zkoušek. Hodnotu součinitele ztenčení lze stanovit dle tloušťky a šířky vlastního polotovaru, jak je uvedeno v tab. 5 a tab. 6.

Tab. 5 Součinitel rozšíření výchozího průřezu [14]

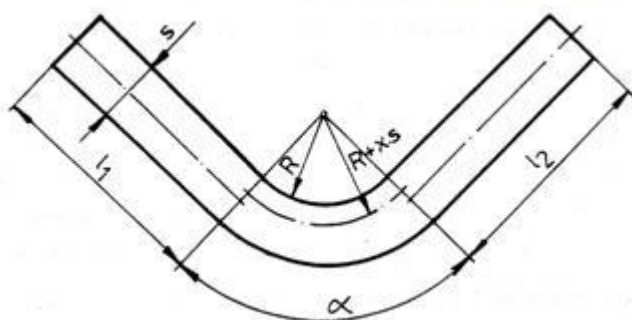
Šířka b [mm]	$b = 0,5 \cdot s$	$b = s$	$b = 1,5 \cdot s$	$b = 2 \cdot s$	$b = 2,5 \cdot s$	$b = 3 \cdot s$
Součinitel rozšíření z_r [-]	1,09	1,05	1,025	1,01	1,005	1,0

Tab. 6 Hodnoty součinitele „ z_z “ a součinitele „ x “ [14]

R_0/s [-]	0,10	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	8,00	10,00
x [-]	0,320	0,350	0,380	0,420	0,445	0,470	0,475	0,478	0,480	0,483	0,486
z_z [-]	0,820	0,870	0,920	0,960	0,985	0,992	0,995	0,996	0,996	0,997	0,998

V případě ohýbání širokých pásů plechu, které splňují podmínku, že $b \geq 3 \cdot s$, se poloměr neutrální osy určí pomocí součinitele „ x “. V průběhu ohýbání se neutrální osa přibližuje k vnitřní straně ohybu a součinitel „ x “ udává přesnou vzdálenost polohy neutrální osy v závislosti na původním poloměru. Při této situaci lze využít vztah pro určení přesné polohy neutrální osy:

$$\rho = R_0 + s \cdot x \text{ [mm]} \quad (2.9)$$



Obr. 21 Poloměr neutrální osy [7]

Hodnota součinitele „ x “ lze správně určit dle tab. 6, když je znám požadovaný poloměr ohybu „ R_0 “ a tloušťka tvářeného materiálu „ s “. Velikost poloměru neutrální osy (obr. 21) hraje velmi důležitou roli v přesném určování délky ohnuté součásti. Délka výchozího polotovaru se určí poloměrem neutrální osy, případně stanovením délky výchozího oblouku nebo součtem jednotlivých rovinných a ohnutých úseků. Přesnou hodnotu ohnuté části lze spočítat pomocí vztahu:

$$l_0 = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot \rho \text{ [mm]} \quad (2.10)$$

Mohou nastat i extrémní případy, kdy se materiál ohýbá o 180° . Tehdy dojde k úplnému styku ohýbaných ramen, a proto lze spočítat délku oblouku snadněji dle vztahu:

$$l_0 = 0,5 \cdot \pi \cdot s \text{ [mm]} \quad (2.11)$$

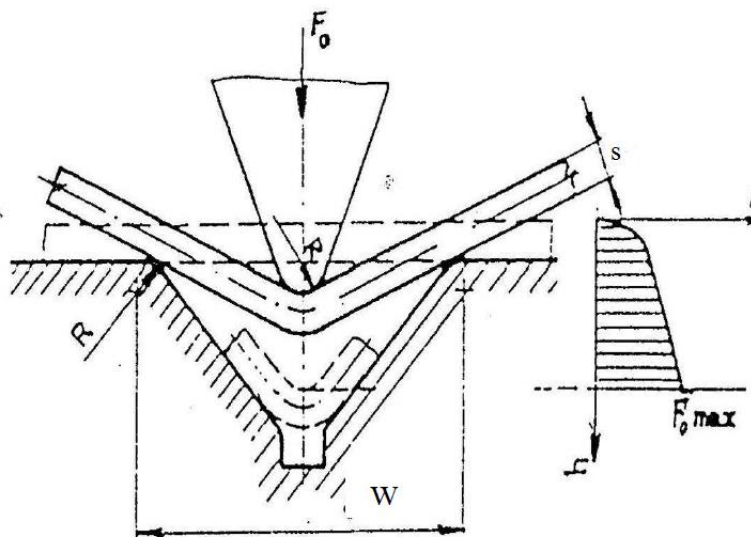
Konečná délka rozvinutého tvaru ohýbané součásti je tedy vyjádřena součtem všech rovinných i ohnutých úseků, které jsou vyjádřeny vztahem:

$$L_c = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^n l_j \text{ [mm]} \quad (2.12)$$

kde: $\sum_{i=1}^n l_i$ – součet délek rovinných úseků [mm]
 $\sum_{j=1}^n l_j$ – součet délek ohnutých úseků [mm]

2.4 Ohybová síla a práce [7], [14], [21], [25]

Výpočet ohybové síly je důležitým parametrem pro správné stanovení lisovacího zařízení a jeho jmenovité síly. V průmyslu se vyrábí velké množství různých tvarů, dle kterých lze materiál ohýbat. Mezi nejčastější patří ohyb do tvaru „U“ a „V“. Vzhledem k řešení problematiky ohraňování, kde se vyskytuje varianta ohybu „V“ budou dále vyjádřeny vztahy týkající se právě tohoto typu ohybu. Tvar ohybu velice ovlivňuje nejen velikost výsledné síly a práce, ale také samotný průběh ohybové síly.



Obr. 22 Ohýbání do tvaru „V“ [7]

Průběh ohýbací síly do písmene „V“ je znázorněn na obr. 23. Při pohledu na tento obrázek je patrné, že velikost síly se mění v celém průběhu.

Proces ohýbání lze rozdělit do tří hlavních oblastí. V první oblasti nastává lineární nárůst tvářecí síly, kterou lze vyjádřit Hookovým zákonem, kdy křivka poměrně rychle narůstá. V celé této oblasti se vyskytují pouze pružné deformace. Při přechodu na druhou oblast se v bodu překročení meze kluzu pružná deformace mění na plastickou. Zde dochází ke vzniku trvalých plastických deformací.

Nárůst síly ve druhé oblasti je po celou dobu jejího trvání mírný. Poslední třetí fáze se také nazývá kalibrace a používá se k minimalizaci odpružení a zpřesnění poloměru ohybu. Síla, potřebná ke kalibraci je mnohonásobně větší než tvářecí síla v celém průběhu. Dle průběhu síly lze stanovit práce, která je rovna oblasti pod křivkou tváření.

Pro výpočet ohybové síly je platná norma ČSN 22 7340, podle které lze určit velikost tvářecí síly a práce. Pro ohyb do tvaru „V“ se ohybová síla a práce stanovuje dle následujících vztahů:

$$F_{ov} = \frac{b \cdot s^2 \cdot R_e}{2 \cdot \rho} \cdot tg \frac{\alpha}{2} [N] \quad (2.13)$$

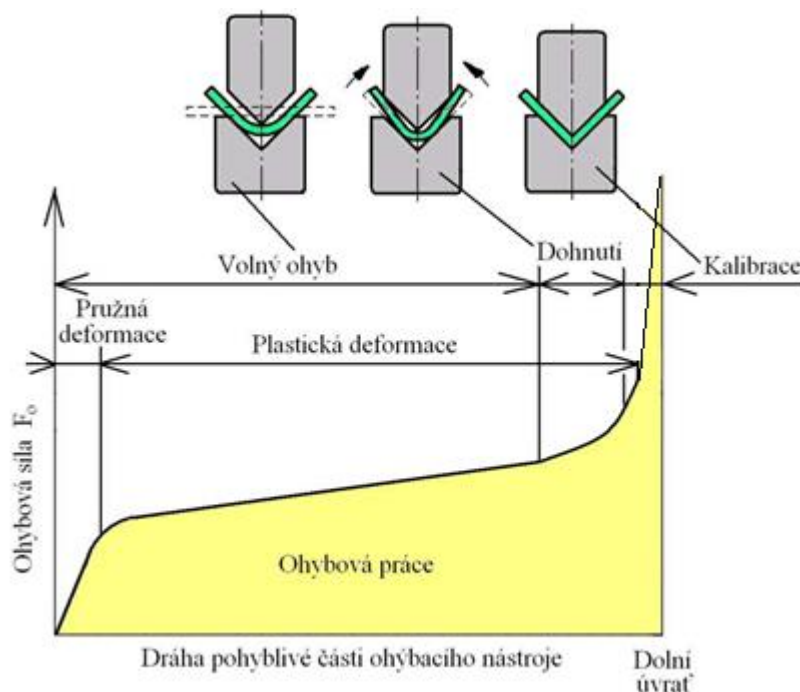
$$A_{ov} = m_v \cdot F_{ov} \cdot h_r [J] \quad (2.14)$$

kde: f – součinitel tření [-]

m_v – koef. zaplnění pracovního diagramu pro ohyb „V“ ($m=1/3$) [-]

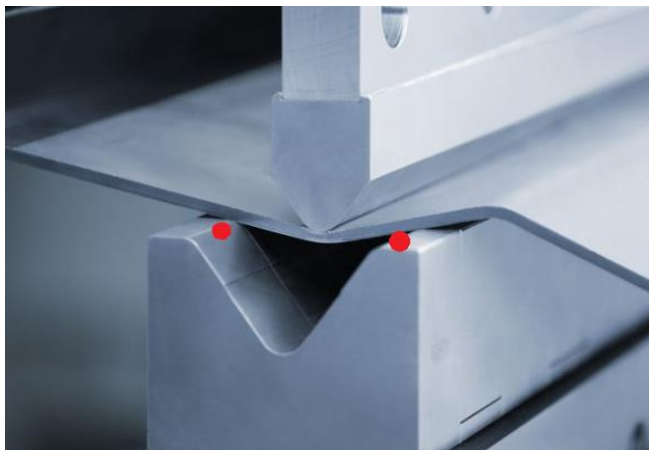
h_r – dráha razníku [mm]

V procesu ohýbání se dá hovořit o dvou možných variantách. U první varianty se součástka dotýká styčných hran matrice vždy ve dvou bodech. Ve druhé variantě vzniká i třetí bod dotyku, kdy je součástka ve stálém dotyku se dnem dutiny matrice, které kopíruje dráhu pohybu ohybníku.



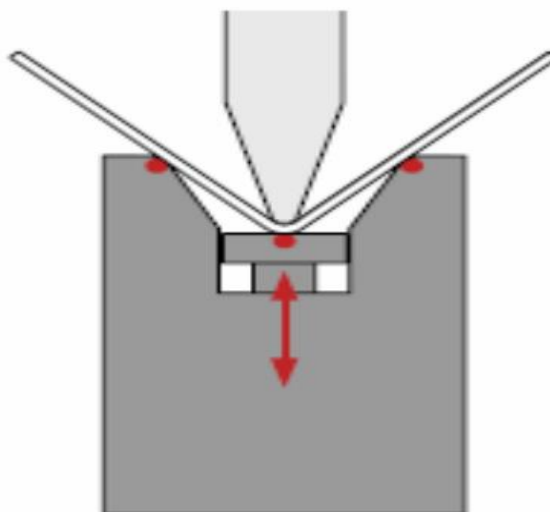
Obr. 23 Průběh tvářecí síly do tvaru „V“ [7]

- Dvoubodové ohýbání - ve zmíněném procesu je tlačén materiál ohybníkem do dutiny matrice, ale nikdy se nedotkne dna dutiny. Polotovár tedy leží po celou dobu procesu pouze na dvou hranách matrice (obr. 24). Z toho je odvozen název dvoubodové ohýbání. Úhel ohybu tedy vzniká v závislosti na tom, jak hluboko je ohybník vnořen do dutiny. To má výhodu v univerzálnosti, kdy je možné vytvářet různé úhly bez nutnosti výměny nástroje.



Obr. 24 Dvoubodový ohyb [21]

- Třibodové ohýbání - při tomto procesu ohybník vtlačí tvářený materiál až na dno dutiny matrice (obr. 25). Dno matrice tak vytvoří spolu s hranami třetí dosedací bod. Existují nástroje, ve kterých lze hloubku dutiny libovolně nastavovat posouváním dosedací polohy. Tím je zaručena přesnost výsledného ohybu s možností ohybu na různé úhly bez nutnosti výměny nástroje. Třibodové ohýbání spojuje přesnost lisování s flexibilitou dvoubodového ohýbání. K dokončení tohoto procesu jsou zapotřebí větší tvářecí síly než u předchozí metody.



Obr. 25 Třibodový ohyb [21]

Při ohraňování se považuje polotovár za nosník dotýkající se na dvou podporách ve vzdálenosti „w“ zatížený silou ve středu „F₀“. Ohýbací sílu je nutné zvětšit o tření polotovaru s funkčními plochami až o 1/3 F₀. Průběh ohýbací síly je zobrazen na obr. 23 a vypočítá se dle následujícího vztahu:

$$F_{oh} = \frac{s^2 \cdot 2 \cdot R_m}{1,4 \cdot w} [kN \cdot m^{-1}] \quad (2.15)$$

Uvedený výpočet se v praxi používá pro rychlé stanovení ohraňovací síly k vytvoření požadovaného ohybu. Velikost tohoto ohybu se vztahuje pouze na ohyb do tvaru „V“. Existuje mnoho dalších způsobů, jak určit orientační velikost tvářecí síly, a to například na základě tabulek při znalosti tloušťky materiálu, rozevření matrice, minimální velikosti ohýbaného ramene a poloměru špičky ohybníku. V případě, že je nutná kalibrace, je potřeba zvýšit výslednou tvářecí sílu šestkrát až dvanáctkrát. Velikost ohraňovací síly se v těchto případech uvádí v kN vztažených na jeden metr ohybu, tj. v kN/m.

Velikosti rozevření matrice a dovolené síly, kterou může ohybník vykonávat je vždy uvedena na nástroji, který dodává výrobce.

2.5 Nástroje pro ohraňování [7], [8], [9], [10], [14], [17], [22], [29]

Ohraňovací nástroj je složen ze dvou hlavních částí. První je lišta osazená v horní polovině stroje, do níž se upíná ohybník. Druhou částí je spodní lišta, na kterou se upíná matrice. Při procesu ohraňování se beran stroje pohybuje směrem dolů do doby, než se dotkne tvářeného materiálu. Po doteku se beran pohybuje stále ve stejném směru za vzniku ohybu natlačením materiálu do dutiny matrice.



Obr. 26 Ohraňovací lis [22]

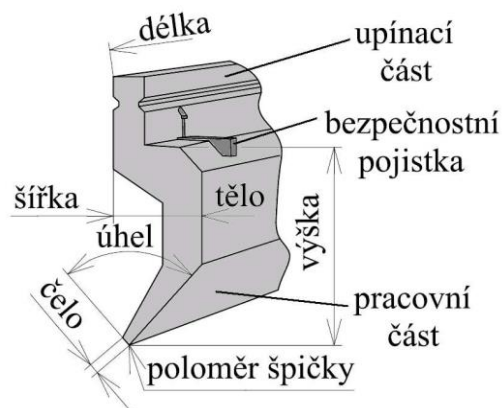
Existuje mnoho typů ohybů, které lze vyrobit. Každý z typů je určen vnějším tvarem ohybníku a vnitřním tvarem matrice. Důležitými parametry ohybníku, které určují výsledný vzhled a požadovaný tvar, jsou šířka, velikost poloměru špičky, ohýbaný úhel a tvar těla ohybníku. Mezi důležité parametry matrice se řadí její šířka, velikost úhlu dutiny a poloměry zaoblení na matici.

Velmi důležité je znát přesné rozměry jak ohybníku, tak i matrice k zabránění vzniku kolize mezi nástrojem a materiálem. Ta může vzniknout v případě vícenásobně ohýbané součásti, kdy je nutné kontrolovat maximální rozměr po každém ohybu. Tomu zabraňují také diagramy, které jsou dodávány ke každému ohybníku, ze kterých lze snadno vyčíst, zda požadovaný ohyb může kolidovat s nástrojem nebo bude bezpečný. Funkční části ohraňovacího lisu jsou vyráběny z kvalitních pevných materiálů, viz tab. 7.

Tab. 7 Materiály pro výrobu nástrojů [8]

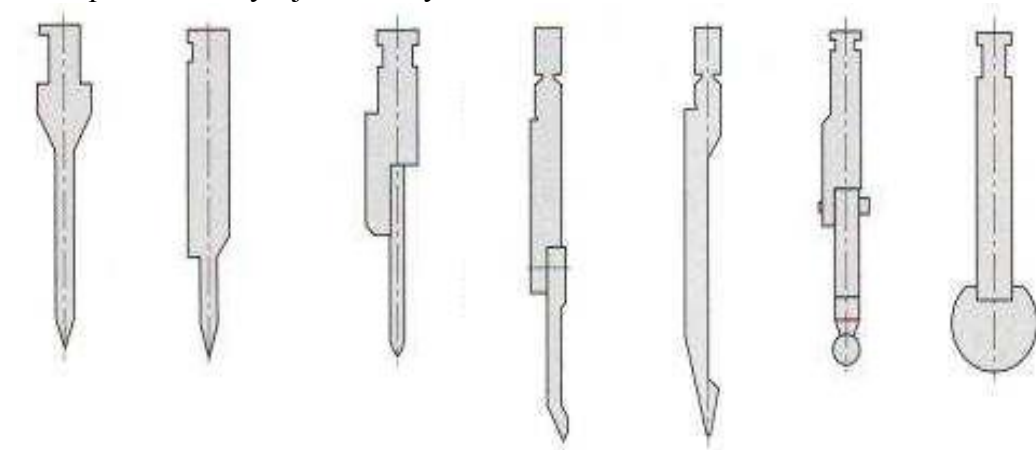
Materiál	W1.2312	42CrMo4	C45
Pevnost	930-1100 N/mm ²	900-1100 N/mm ²	560-710 N/mm ²
Indukční kalení	52-58 HRC	52-58 HRC	52-58 HRC

- Ohybníky – jsou vyráběny ve velkém množství různých tvarů a velikostí pro zajištění výrobnosti a široké škály možných tvarových ohybů. Každý ohybník je tvořen hlavními částmi, mezi něž patří upínací část, kterou je nástroj upnut do stroje a následně je zajištěn bezpečnostní pojistkou či jiným zajištěním, dle výrobce. Další hlavní částí je tělo nástroje, na jehož konci spodní části se nachází pracovní část (obr. 27). Každý ohybník má pevně danou svoji délku, šířku, výšku a pracovní část, která má určený poloměr špičky a velikost úhlu. Pracovní část bývá z pravidla vždy tepelně zpracována z důvodu vyšší pevnosti a delší trvanlivosti. Nejčastěji používané ohybníky jsou dle tvaru těla rovné nebo dvojnásobně loměné. Rovné (obr. 28) se používají především pro součástky s jedním ohybem.



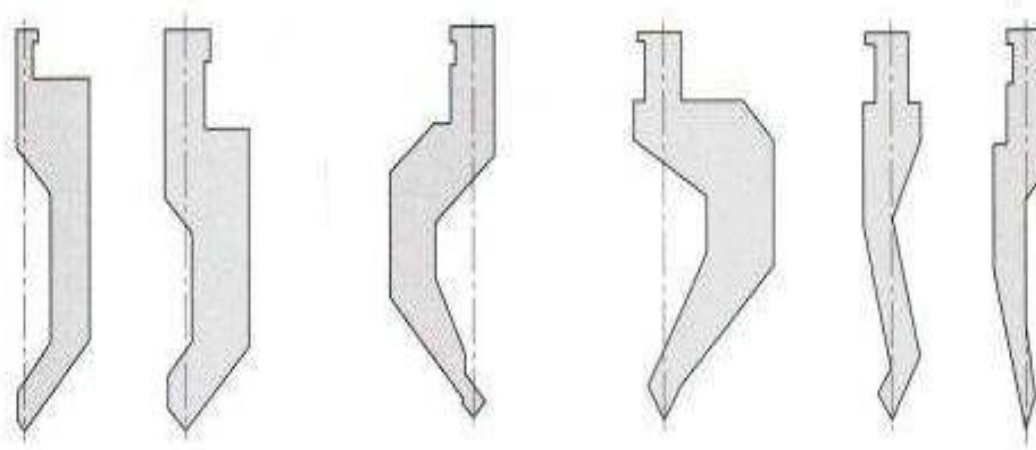
Obr. 27 Ohybník [14]

Rovné (obr. 28) se používají především pro součástky s jedním ohybem.



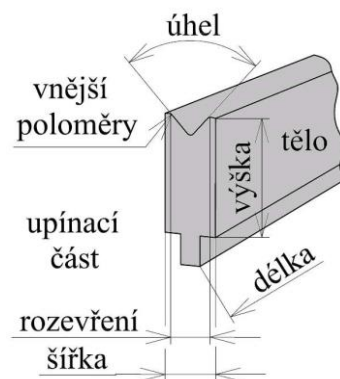
Obr. 28 Příklady přímých ohybníků [14]

Pro složitější tvary součástky se používají spíše dvojnásobně lomené ohybníky (obr. 29).



Obr. 29 Příklady lomených ohybníků [14]

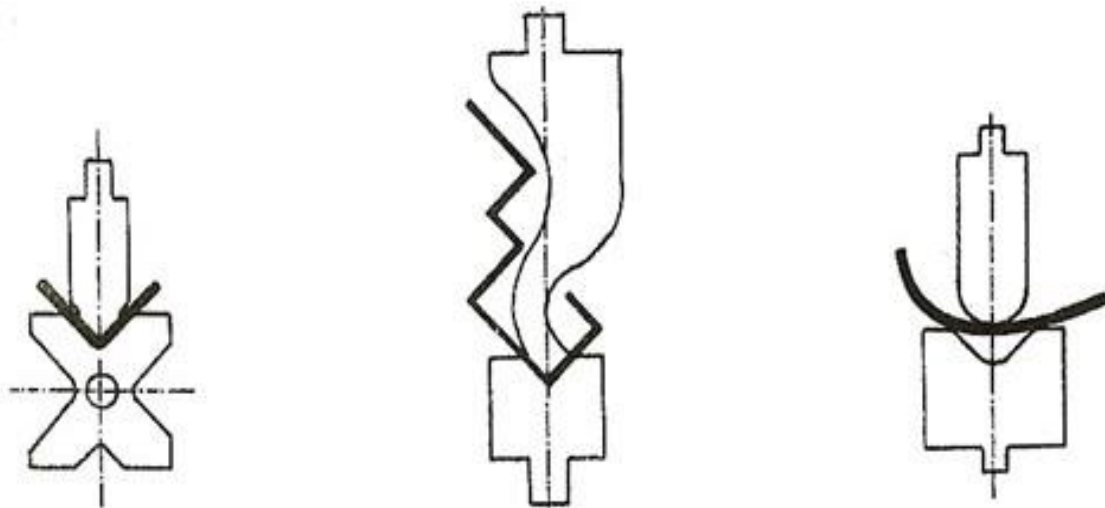
- Matrice – nejčastěji se vyrábí s vlastní dutinou ve tvaru „V“ (obr. 30). Jsou ovšem také výjimky, kdy je nutné použít matici jiného tvaru, který určuje výsledný tvar ohybu dle požadavků zákazníka. Každá matrice je tvořena upínací částí a tělem, v němž se nachází tvarová dutina. Ta slouží jako pracovní část a je podle toho tepelně upravena. Nejčastěji jsou používány jednodutinové matrice.



Obr. 30 Čtyřdutinová matrice (vlevo) a jednodutinová matrice (vpravo) [14]

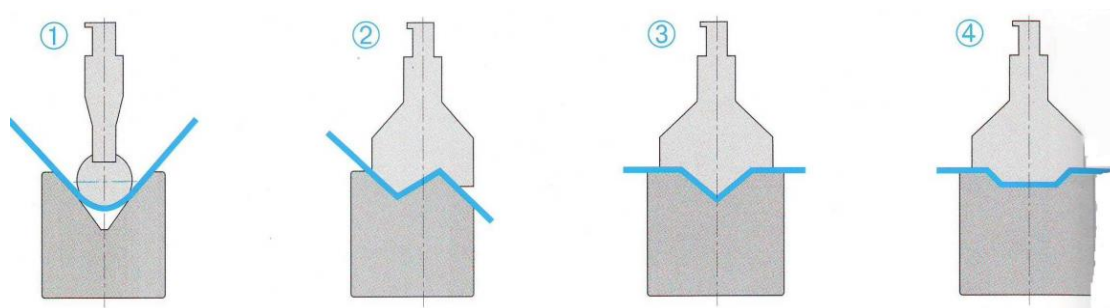
Existují také čtyř dutinové matrice, které jsou univerzálnější pro různorodou výrobu (obr. 31), kdy po otočení matrice lze získat jinou šířku a hloubku dutiny pro další typ ohybu. Pracovní dutina je charakterizována vnějšími poloměry, přes které je materiál vtlačován, úhlem rozevření a šířkou matrice.

V praxi jsou často využívány i speciální tvarové nástroje (obr. 32) sloužící pouze pro jednu operaci, čímž je možné nahradit například dva různé ohyby.



Obr. 31 Základní typy používaných matic [9]

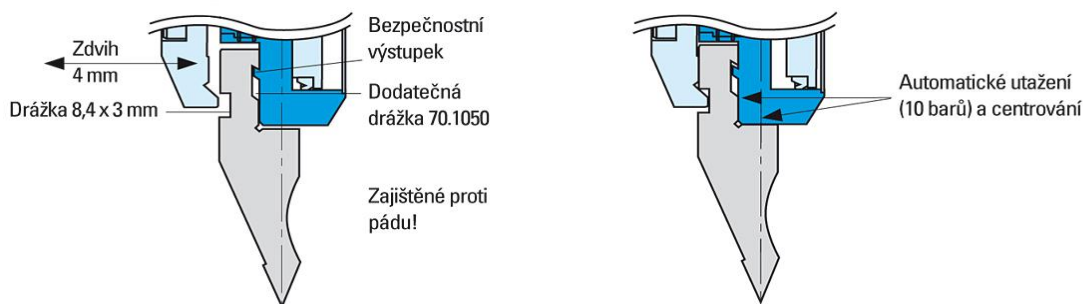
Zmíněná metoda má velké využití především ve velkosériové výrobě z důvodu, vyšších nákladů na pořízení speciálního tvarového nástroje, ale urychlení výroby sjednocením dvou operací. Je tedy vhodné předem spočítat výhodnost výroby a použitelnost nástroje.



Obr. 32 Speciální tvarové nástroje [14]

2.5.1 Upínání nástrojů [25], [29]

V současnosti je většina nástrojů upínána pomocí hydraulického nebo mechanického systému. Cílem je, aby výměna nástroje zabrala co nejméně času a přichycení bylo co nejrychlejší, pevné a bezpečné. Každý výrobce ohraňovacích nástrojů využívá vlastní typ, který je svým způsobem oproti ostatním odlišný.



Obr. 33 Otevřené (vlevo) a uzavřené (vpravo) upínání [29]

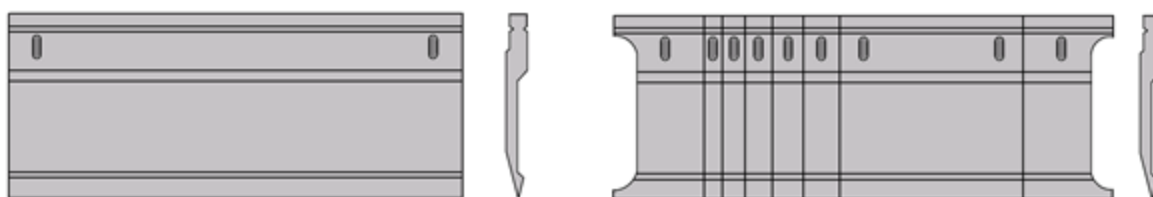
Při výměně nástrojů je nutné zachovat následující postup: nejprve je nutné mechanicky nebo hydraulicky povolit sevření nástroje, aby bylo dosaženo uvolnění ohybníku (obr. 33). Po uvolnění lze uchopit pevně nástroj a pohybem vpřed vytáhnout nástroj z bezpečnostního výstupku, který slouží proti pádu nástroje při uvolnění nebo stejným pohybem stlačit pružinu bezpečnostní západky. Každý výrobce volí jiný typ bezpečnostní pojistky, která musí být vždy součástí stroje. Po vyjmutí je možné vzít nový nástroj a zasouvat do stroje, dokud nástroj nezapadne za bezpečnostní pojistku. Jakmile dosedne na plochu, je možné spustit hydraulické sevření, kdy stroj sám celý nástroj vycentruje a bezpečně zajistí. Vycentrování probíhá pomocí drážky a výstupku, které do sebe zapadají a centrují se vzájemně. V případě použití mechanického zajištění



Obr. 34 Upínání matrice [29]

je celý postup podobný, pouze s tím rozdílem, že není využita síla hydraulické kapaliny, ale je nutné použít šrouby s vnitřním šestihranem, které zajistí vymezení a pevné upnutí nástroje. Podobný princip platí i pro zajištění matrice, kde však není zapotřebí bezpečnostní pojistka, protože matrice nemá kam upadnout a je zasazena ve spodní liště stroje. Po uvolnění sevření lze tedy nástroj vzít a vyměnit za jiný. Po vložení nové matrice se při utahování šroubů nebo upínání pomocí hydrauliky nástroj sám vycentruje podle vodících lišt stroje, které jsou v ose stroje (obr. 34).

U nástrojů lze také určovat jejich přesnou délku, a to dvěma způsoby (obr. 35). Prvním je využití celistvého nástroje, který má rozměry podle požadavků zákazníka a jedná se tedy o dražší variantu. Druhá z možností je využití děleného nástroje, kdy je možné od výrobce nakoupit stejné ohybníky nebo matrice v různých délkách a jejich kombinací lze vytvořit přesný rozměr, který je zapotřebí pro vytvoření požadované délky ohybu. Tento způsob se využívá především při výrobě nádob či součástí s uzavřenými sousedními rohy.



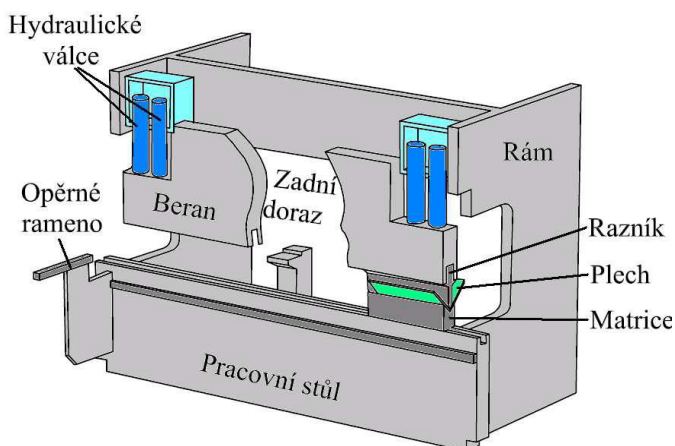
Obr. 35 Celistvý nástroj (vlevo) a dělený nástroj (vpravo) [25]

2.6 Ohraňovací stroje [7], [14], [19], [25], [30]

Stroj je složen ze základních částí, kterými jsou rám, druh pohonu, beran, pracovní stůl, zadní dorazy, řídicí panel, případně přední opěrné rameno.

Celý stroj je vyobrazen na obr. 36.

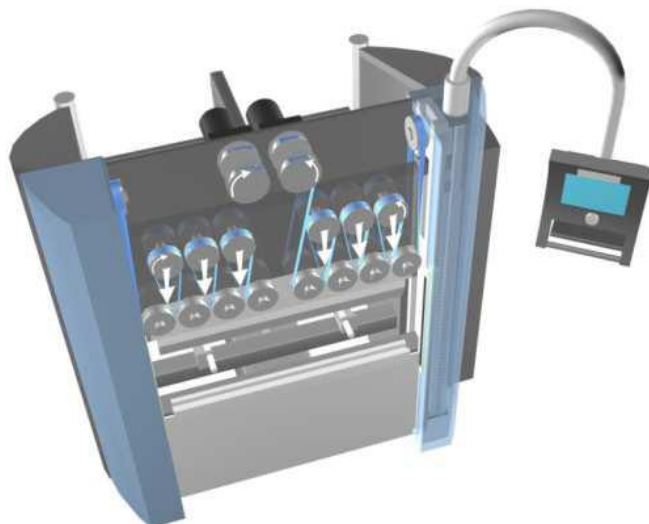
- Rám stroje - hlavní částí stroje je rám plnící funkci nosné konstrukce. Jednotlivé druhy jsou rozlišovány primárně dle jejich tvaru. Nejčastěji používaným je tvar „C“. Dalším často používaným je tvar „O“, který plní především funkci robustnosti a pevnosti stroje pro velké ohybové síly. Díky tvaru „O“ vzniká více prostoru v zadní části stroje pro dorazy, které se mohou pohybovat po celé délce stroje a především je splněna přesnost pohybu ve svislém směru. Zbylé části stroje bývají k rámu šroubovány případně přivařovány dle potřeby zaměnitelnosti či tuhosti. Při návrhu rámu stroje dnes výrobci používají různé softwary pro určení přesné tuhosti a odhalení míst, kde je třeba pevnější rám pro zajištění co největší přesnosti při provozu. U rámu typu „C“ je dokázáno, že vznikají větší deformace při ohýbání než u rámu typu „O“, který působí více jako jeden pevný celek a je dokázána větší tuhost.



Obr. 36 Schéma hydraulického ohraňovacího stroje [25]

- Pohonné jednotky lisů - ohraňovací lisy jsou rozdělovány často dle způsobu pohonu. Existuje mnoho druhů pohonů jako například mechanický, elektrický, hydraulický, segmentový, atd., nebo existují pohony vzniklé kombinací výše zmíněných druhů.

V dnešní době jsou nejčastěji používány pohony hydraulické a elektrické. V případě elektrického pohonu (obr. 37) je svislý pohyb zajištěn pomocí pásů a kladek, kterým udávají pohyb servomotory. Zpětný pohyb beranu je poté proveden za pomoci zpětných pružin, které jsou umístěny po stranách stroje. Díky konstrukci a rozložení kladek po celé



Obr. 37 Elektrický pohon lisu [19]

délce stroje je dosaženo rovnoměrné tvářecí síly po celé délce. Pás, který přenáší moment na kladkách, musí být vysoce pevný, a proto jeho tloušťka činí 3 mm a šířka 50 mm. Pro zvýšení jeho pevnosti je také vyztužen ocelovými dráty a na jeho povrch je nanášena vrstva polyuretanu. Velkou výhodou tohoto systému je, že díky plynulému rozložení sil po celé délce se předchází nežádoucímu vlivu bombírování a zvyšuje se tím přesnost a rychlost pracovního cyklu. Díky využití servomotorů není zapotřebí časté výměny těsnění a oleje, tím se dosahuje nižších nákladů na údržbu. Nevýhodou ale je, že tento systém nedokáže vyvinout příliš velké tvářecí síly a jeho maximální možná dosažená síla je 4 800 kN. Proto se hodí především pro ohýbání tenkých plechů.

Hydraulický systém (obr. 38) je založen na principu pohybu za pomoci zubových čerpadel, hydraulickém pohonu, hydraulických válců a dvoustupňovým tlakovým vedením. Hlavní svislý pohyb je realizován pomocí dvou či čtyř hydraulických válců, které řídí pohyb s přesností 0,01 mm. Podle požadované maximální tvářecí síly se určuje počet válců, které budou použity. Hydraulické válce vytvářejí sílu působící na beran, který přenáší sílu po celé délce a tváří daný materiál. Velkou výhodou je, že každý válec je řízen samostatně pomocí řídicí jednotky a lze tak regulovat plynulost a případnou nerovnoměrnost v ohybu. Hlavní předností tohoto stroje je možnost ohýbání tlustostěnných materiálů. Velikost síly, kterou je možné vyvinout je až 12 500 kN. Maximální výkon stroje je 90 kW a rychlost beranu je okolo 10 mm/s.



Obr. 38 Hydraulický pohon lisu [19]

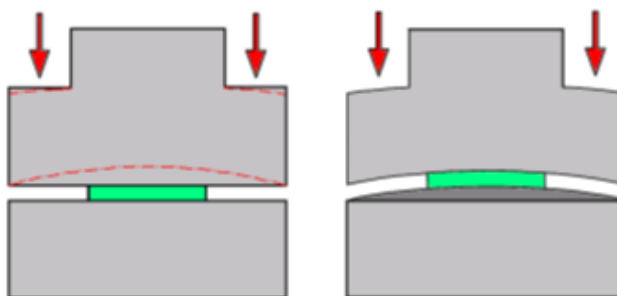
- Beran stroje – díky své stabilitě a pevnosti slouží ke správnému přenosu tvářecí síly z pohonného systému. Jeho svislý pohyb je zajištěn nejen pomocí pohonu stroje, ale také pomocí kluzného vedení na jeho bocích. Spodní část beranu je uzpůsobena dle každého výrobce pro co nejrychlejší a nejpevnější výměnu nástroje. Přesná poloha beranu je kontrolována pomocí dvou měřících lineárních senzorů (nejčastěji laserových), které předávají informace do řídicího systému, kde jsou dále tyto hodnoty použity.

- Pracovní stůl - pod pracovní částí stroje se nachází pracovní stůl, do kterého jsou upínány matrice nástroje a využívá se zde bombírovacího systému.

To znamená, že při hydraulickém pohonu, kdy vznikají vysoké tvářecí síly, se krajní části stroje dostanou do nižší pozice než střední část. Tento jev se objevuje především u dlouhých ohybů, kdy nastává pružná deformace nástroje (obr. 39). Rozdíl střední části a působišť hydraulických válců může být o více jak 2 mm. Průhyb ovlivňuje ohýbanou součást, která není vyrobena s konstantním úhlem ohybu po celé délce. V okrajích vznikne požadovaný úhel ohybu, ale ve středu je úhel o trochu větší než v krajích. Snahou tedy je tento nedostatek napravit tak, aby vznikl díl s konstantním úhlem ohybu po celé délce. Postupem času byla vyvíjena řada nových způsobů, jak této deformaci předejít, až vznikl princip bombírování. Spočívá v ohýbání pracovního stolu směrem vzhůru tak, aby kopíroval zakřivení beranu v jeho střední části a zamezil tak vznikající deformaci. V současné době se používají automatické bombírovací systémy, které jsou ovládány řídicím systémem stroje a dosahují tak vysokých přesností.

Na přední část pracovního stolu lze také namontovat opěrná ramena pro podepření těžkých polotovarů. Tyto ramena mohou být pevná nebo pohyblivá v různých směrech dle potřeby.

- Ovládací panel - součástí každého stroje je ovládací panel (obr. 40), přes který lze nastavit parametry výrobního procesu. Každý panel je vybavený klávesnicí a monitorem nebo dotykovou obrazovkou pro zadávání kompenzačních hodnot nebo přímo pro vytváření programu. Díky nim lze také simulovat požadovaný ohyb, programovat, upravovat program, přepínat mezi uloženými daty pro rychlou změnu opakované výroby. Existují panely, do kterých lze nahrát přímo soubor ve tvaru DXF, kdy už program sám pozná a nastaví, jak díl tvářet nebo pomocí ovládacího panelu napíše celý program operátor sám.

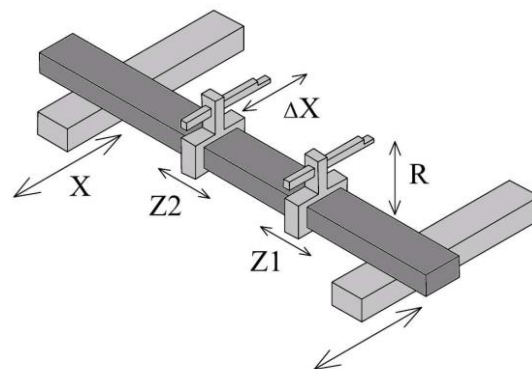


Obr. 39 Pružná deformace beranu [25]



Obr. 40 Ovládací panel stroje [19]

- Dorazy - obrovskou výhodou oproti ručním ohýbačkám je možnost použití pevných či ovládaných dorazů, což zajistí skvělou opakovatelnost výroby, protože bude každý díl vždy založen ve stejné pozici. Tyto dorazy jsou umístěny na dvou pohyblivých ramenech a mohou vykonávat pohyby ve směru X, Z, R, viz obr. 41. Díky řídicímu systému lze pohybovat s každým dorazem zvlášť vysokou rychlostí a přesností. Samotný doraz je tvarován tak, aby o něj byla opřena hrana plechu. Dorazy se povrchově upravují z toho důvodu, aby nebyly rychle opotřebované a nezhoršila se jejich přesnost při zakládání polotovaru.



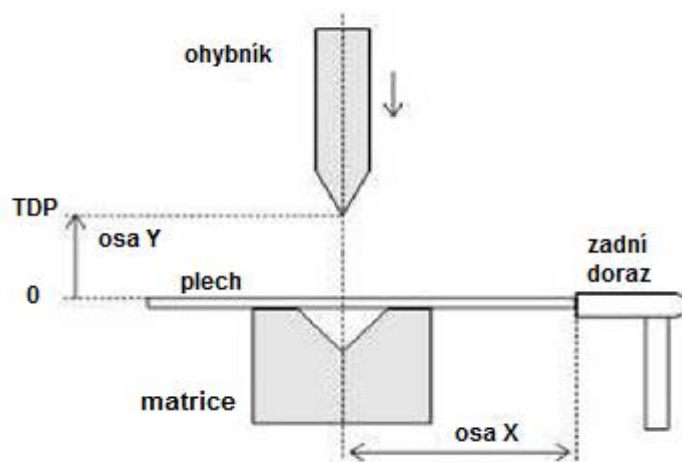
Obr. 41 Směry pohybů dorazů [19]

2.7 Průběh procesu ohraňování [7], [14], [16], [17], [26]

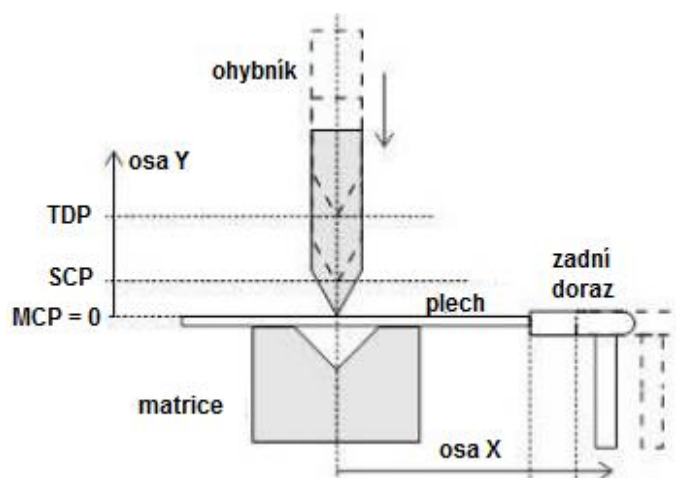
Proces ohraňování je rozdělen na několik kroků navazujících na sebe. Prvním z nich je příprava stroje a materiálu.

Dle obr. 42 je patrné, jak bude vypadat příprava pro ohnutí plechu. Polotovár bude tvářen mezi ohybníkem a matricí. Ohybník je upnut v beranu stroje a matrice zase v pracovním stole. Nejprve je nutné připravit program v řídicím systému. Po spuštění programu se zvedne beran lisu do výchozí (maximální) polohy, jinak nazývané „TDP“, a dorazy přijdou na přesné místo v ose X, které je určené programem. Zadní doraz určuje přesnou polohu hrany polotovaru od osy ohybu. Horní povrch polotovaru je v pozici $Y=0$. Jakmile je vše nastaveno, položí se plech na matrici a zasune se dozadu, dokud se neopře o zadní doraz. Tím je plech založený a lze postoupit k další fázi. Tou je najetí do bodu upnutí plechu.

Po správném založení plechu na matrici a k dorazům lze sešlápnout pedál, který ovládá pracovní pohyb stroje. Tím se začne ohybník posouvat dolů ve směru osy Y rychloposuvem až do pozice SCP, která je v bezpečné vzdálenosti od materiálu (obráz. 43).



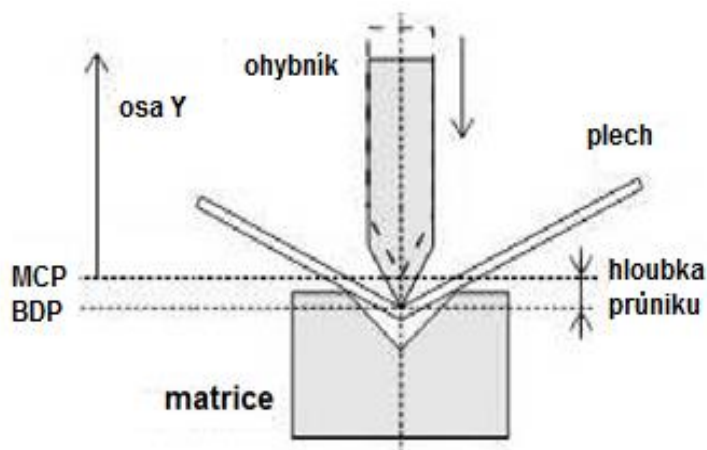
Obr. 42 Schéma založení plechu [26]



Obr. 43 Upnutí plechu nástrojem [26]

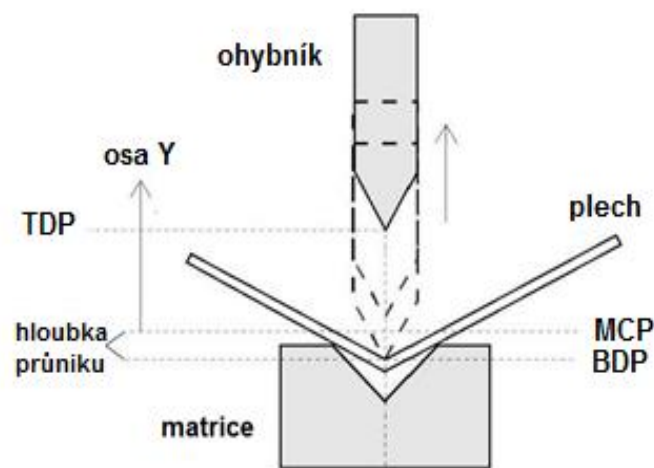
Od této pozice se pohybuje beran maximální ohýbací rychlostí až do bodu kontaktu s polotovarem. Jakmile se nástroj dotkne materiálu, nemělo by se dát s polotovarem jakkoliv hýbat, neboť by měl být polotovar pevně uchycen. Bod uchopení „MCP“ určuje referenční nulu na ose Y. Pozice nástroje se od tohoto bodu pohybuje do záporných hodnot a při odjetí se pohybuje v kladných hodnotách. Po uchycení odjíždí dorazy do bezpečné vzdálenosti v ose X tak, aby nebránily tvářecímu procesu a nekolidovaly s polotovarem.

Po dosažení bodu uchopení, probíhá samotné ohraňování. Ohybník se pohybuje směrem dolů v záporných hodnotách osy Y předem stanovenou rychlostí uvedenou v programu až do konečného bodu za vzniku výsledného úhlu ohybu. Dráha, kterou ohybník vykoná od bodu upnutí (MCP) do bodu dolní úvrati (BDP), se nazývá hloubka průniku. Celý proces je schematicky vidět na obr. 44. Po dokončení této operace lze přejít k závěrečné fázi, kterou je vyjmutí plechu.



Obr. 44 Ohraňování [26]

Při dosažení požadované hloubky průniku nastává návrat ohybníku do výchozí polohy (obr. 45). Zpětný pohyb se většinou provádí zpomalenou rychlostí alespoň do bodu $Y=0$ a od tohoto bodu už je možné ohybníkem pohybovat rychloposuvem. Důvodem malé rychlosti posuvu ze začátku je zamezit vyskočení ohnutého plechu z nástroje, který by mohl zranit obsluhu stroje. Úsek, který je vykonán touto zpomalenou rychlostí se nazývá dekompresní vzdálenost. Po návratu ohybníku do výchozí polohy lze plech bezpečně vyjmout ze stroje a celý proces ohraňování se může opakovat nebo posunout na jiný typ ohybu stejného plechu.



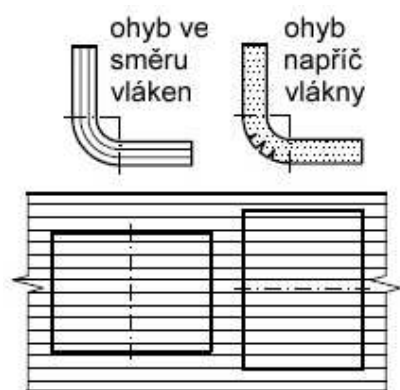
Obr. 45 Návrat do výchozí polohy [26]

Po vyjmutí ohnutého plechu je nutné zkontrolovat přesnost ohnutí, a to změřením úhlu a vzdálenosti ohybu od referenční hrany. V případě, že se výsledek měření liší od zadaných parametrů, je třeba upravit program tak, aby se vykompenzovala nepřesnost stroje nebo úhlu odpružení. Po úpravě programu je nutné polotovar znovu upnout a ohnout, dokud nebudou dosaženy požadované hodnoty.

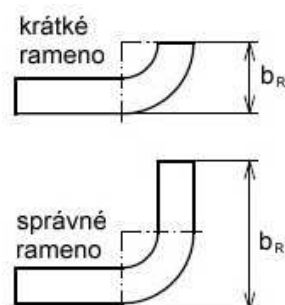
2.8 Technologičnost ohýbání [2], [14], [25]

Technologičnost součásti je závislá na vlastnostech materiálu, který je ohýbán. Při navrhování ohýbané součásti je podstatné dodržovat základní doporučení k získání co nejpřesnějšího funkčního dílce, mezi které patří:

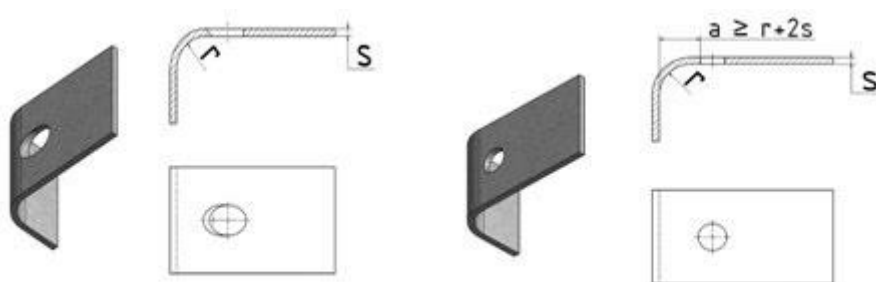
- osa ohybu by měla být volena kolmo na osu vláken (v opačném případě je nutné zvětšit poloměr ohybu), viz obr. 46
- místo volného ohybu ohýbat s kalibrací
- pokud je možné, ohýbá se s použitím následné kalibrace
- nevolit příliš malé tolerance výlisku
- vytvoření prolisů nebo žeber u materiálů s vysokou anizotropií
- minimální délka ohýbaného ramene musí být větší jak dvojnásobek tloušťky materiálu (pokud je potřeba kratší rameno tak, se po ohnutí zbytek odstříhne), viz obr. 47
- začátek otvoru vyrábět s minimální vzdáleností dvojnásobku tloušťky materiálu od osy ohybu, viz obr. 48
- u stříhaných materiálů musí být otřep na vnitřní straně ohybu.



Obr. 47 Vliv směru vláken [2]



Obr. 46 Vliv délky ramene [2]



Obr. 48 Vliv vzdálenosti otvoru od osy ohybu [2]

Přesnost při ohýbání v ohýbacích nástrojích závisí na řadě faktorů, například:

- velikost a tvar ohýbané součásti
- anizotropie mechanických vlastností vstupního materiálu
- rovnoměrnost tloušťky vstupního materiálu
- přesnost ohýbacích nástrojů
- využití kalibrace.

3 NÁVRH VÝROBY

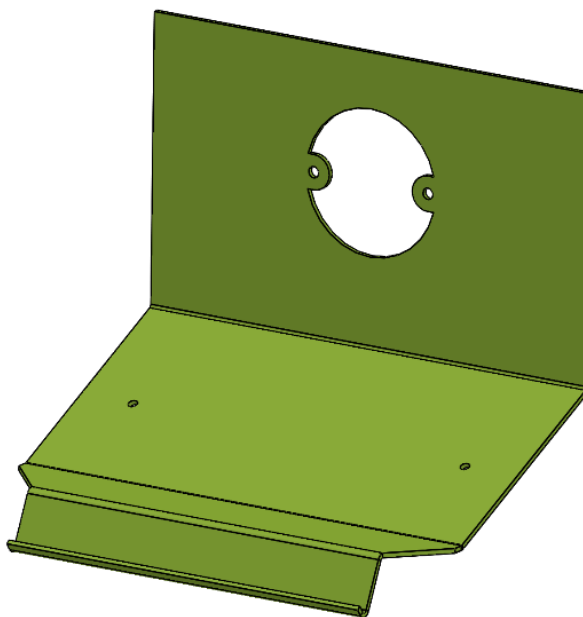
Díl (obr. 49) je součástí krbové vložky, kde společně s bočnicemi a dnem tvoří opláštění a zároveň plní funkci oplachu skla proudícím vzduchem. Je vyráběn o výrobní sérii 200 ks/rok z kotlového plechu tloušťky 4 mm z oceli 11 416, jež je specifická pro svoji vyšší tepelnou odolnost a dobrou svařitelnost, která je požadovaná. Přibližný půdorysný rozměr dílu je 420 x 580 mm. Veškeré rozměry jsou uvedeny ve výkresu DP-01-145298-01.

Z technologií, jakými lze součástku vyhotovit, byly vybrány metody dostupné ve strojovém parku firmy nebo cenově a kvalitně nejvýhodnější.

Pro vytvoření půdorysného tvaru a otvorů byla vybrána technologie vyřezávání laserem. Prostorový tvar součásti, který je tvořen čtyřmi ohyby, bude proveden na ohraňovacím stroji. Součástka bude následně přivařena do sestavy krbové vložky. Důležitým požadavkem je, aby na povrchu nevznikly žádné praskliny, které by následně mohly vytvořit vzduchovou netěsnost nebo omezit funkčnost vložky.

Z hlediska posouzení technologičnosti dělení polotovaru laserem je nutné zkontrolovat velikost otvorů, zda bude možné je vyrobit řezáním nebo bude nutné je dodělat v další operaci. Vzhledem k velikosti nejmenšího otvoru (8 mm) bez požadavku na přesnost lze konstatovat, že budou veškeré otvory i vnější tvar řezány bez komplikací. V obryse polotovaru nejsou žádné dutiny ani jiné složité vyrobitelné tvary, proto polotovar lze vyrobit řezáním laserem.

Při ohraňování je nutné zkontrolovat technologické podmínky, mezi které patří například umístění otvorů v bezpečné vzdálenosti od ohybu. S jistotou lze konstatovat, že veškeré otvory jsou v bezpečné vzdálenosti a nebudou tedy ovlivněny ohybem. Důležité je dodržení minimální délky ramene. Doporučená minimální délka pro dané parametry součástky je 15 mm, což odpovídá předepsanému rozměru dle výkresu. Při ohybu o 120° je nutné zhodnotit také orientaci dílu při řezání polotovaru z důvodu směru vláken při ohýbání. Vždy je lepší používat směr vláken pod úhlem 45°, což je ale neekonomické. V tomto případě nelze určit, zda nastane problém s praskáním vnější strany ohybu či nikoliv, proto bude proveden praktický test. Součástka se zadanými parametry splňuje všechny podmínky technologičnosti a lze ji vyrábět.



Obr. 49 Model tváření součásti [32]

3.1 Ověření tvárných vlastností oceli 11 416

Pro získání představy o tom, jak se materiál při tváření chová, se užívají mechanické zkoušky, mezi které patří například zkouška tahem, tlakem, krutem, stříhem, atd. Vzhledem k možnosti využít strojového vybavení školy byla zvolena tahová zkouška (příloha 1), realizována dle normy ČSN EN 10 001-2 za okolní teploty na hydraulickém stroji s označením ZD40.

Zkouška spočívá v deformaci zkušební vzorku pásu plechu pomocí rostoucího tahového zatížení až do vzniku tvárného lomu. V průběhu zatížení jsou snímány veličiny pomocí zpětné vazby, kdy stroj reaguje na průběh zkoušky. Hydraulický stroj (obr. 50) snímá velikost tvářecí síly pomocí hydrostatického tlaku oleje v pracovním válci. Typy strojů pro zkoušky se dělí dle svého pohonu a velikosti maximální tvářecí síly. Každý zkušební stroj musí být kalibrován podle normy EN ISO 7500-1 a musí také vyhovovat požadavkům třídy 1. Do zařízení jsou upínány zkušební vzorky (obr. 52) o velikostech 250 x 15 mm například pomocí klínů, závitových, plochých nebo osazených čelistí. Upnutí je velice důležitým faktorem, kterému je třeba věnovat pozornost. Vzorek se musí zajistit tak, aby tahové napětí působilo co nejvíce v ose zkušební tyče a případný ohyb byl tak minimální (obr. 51). To ovlivňuje především vzorky z křehkých materiálů nebo zjišťovanou mez kluzu.

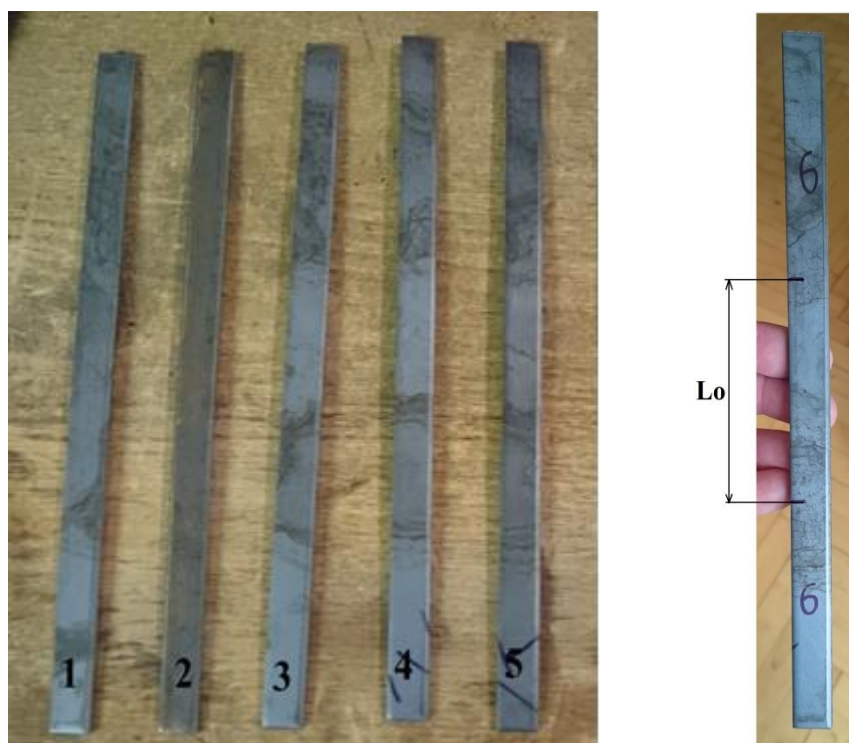


Obr. 50 Hydraulický zkušební stroj ZD40



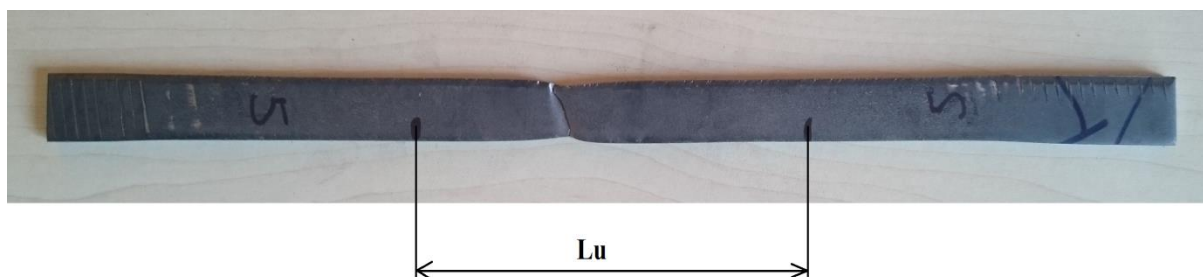
Obr. 51 Upnutí vzorku do čelistí stroje

Do označených vzorků je nutné pro výpočet tažnosti zakreslit body, které určují délku tvářené části $L_0 = 80$ mm, viz obr. 52.



Obr. 52 Označené vzorky před zkouškou

Po provedení zkoušky se přiloží vzorky opět k sobě a změří se vzdálenosti mezi těmito body po přetržení. Vzdálenost udává hodnotu „ L_u “, viz obr. 53.



Obr. 53 Zkušební vzorek po přetržení při měření L_u

Z naměřených hodnot lze následně určit velikost tažnosti daného vzorku. Pro přesné výsledky je nutné změřit šířku každého vzorku, která je následně zadávána do měřicího programu před provedením zkoušky. Šířka vzorku ovlivňuje velikost příčného průřezu, jenž je nutný pro stanovení tvárnosti materiálu. Zkouška byla provedena 5x, aby byly odhaleny a vyloučeny případné chyby v měření. Vzorky po provedení zkoušky jsou vidět na obr. 54. Na vzorcích po přetržení jsou patrné vtisky od upínacích čelistí stroje.



Obr. 54 Vzorky po provedení trhačí zkoušky

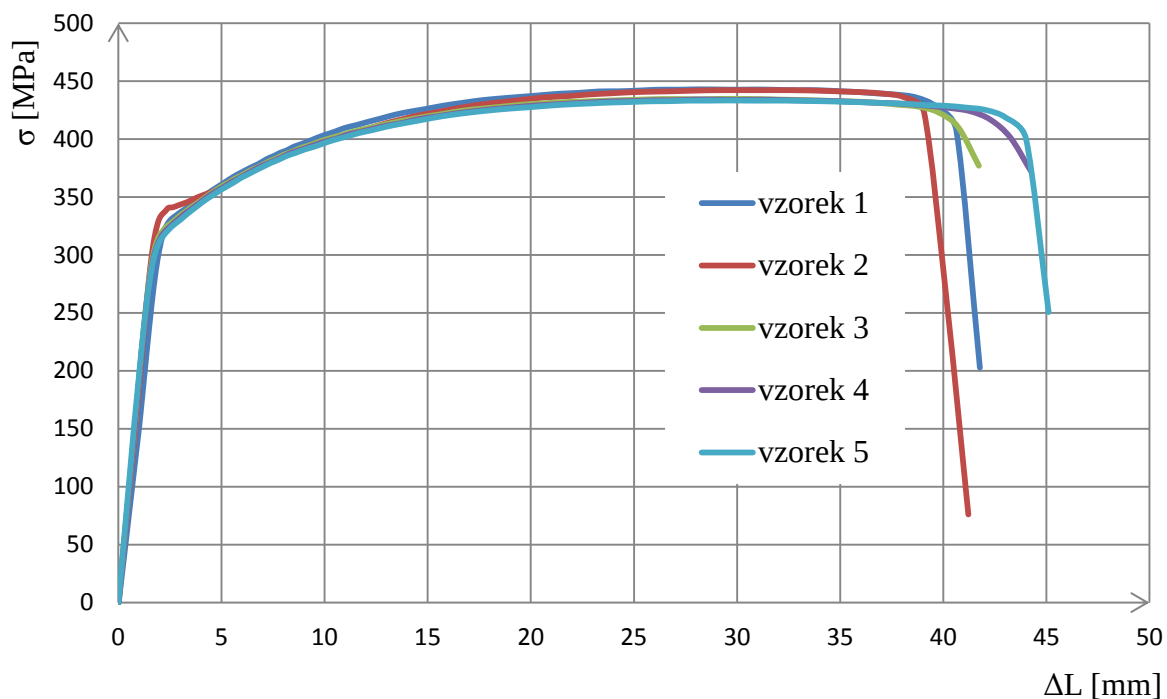
Při každém měření byl výstupem graf závislosti tahové síly na prodloužení spolu s významnými hodnotami průběhu, mezi které patří také mez kluzu a mez pevnosti. Dalšími výslednými hodnotami jsou tažnost, doba průběhu, atd. Veškeré hodnoty jednotlivých měření jsou zpracovány v tab. 8.

Tab. 8 Výstupní hodnoty z tahové zkoušky

Vzorek	s[mm]	b[mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A[%]	T[s]
1	4	15,23	60,92	27226,8	330,992	446,9271	23,75	51,40
2	4	15,31	61,24	27189,2	336,629	443,9778	23,13	50,82
3	4	15,37	61,48	26728,4	319,102	434,7495	24,37	50,66
4	4	15,39	61,56	26681,2	315,783	433,4178	25,00	50,82
5	4	15,36	61,44	26634,4	314,564	433,5026	25,00	51,18
průměr				26892,0	323,414	438,5150	24,25	50,98

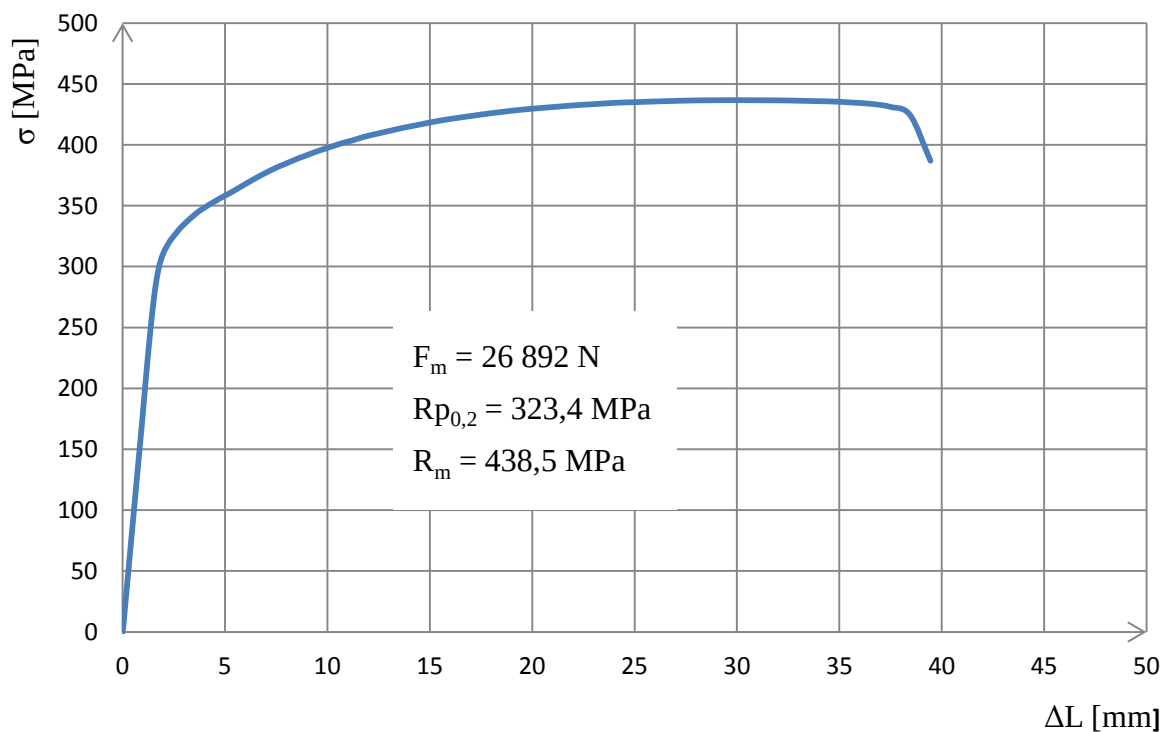
Při pohledu na hodnoty uvedené v tab. 8 je výrazný rozdíl u prvních dvou vzorků, které mají vyšší mez kluzu označenou „R_{p0,2}“, než zbylé tři vzorky. Tato nestejná tvárnost vzorku oproti ostatním byla způsobena rozdílným směrem válcovaných vláken u jednotlivých vzorků. Je patrné, že první dva vzorky mají směr vláken ve špatné orientaci, která se pro zkoušky nedoporučuje, a to v příčném směru se vzorkem. Zbylé tři vzorky mají směr vláken v podélném směru, což je pro zkušební pásky doporučeno. Zřejmý je také rozdíl tvárnosti, se kterým se lze ve tváření setkat. Tyto zkušební pásky mají také zaznamenanou vyšší tažnost oproti prvním dvěma. Z důvodu kompenzace odlišností byly hodnoty zprůměrovány a budou použity při následných výpočtech.

Jednotlivé průběhy tahových sil v závislosti na vlastním prodloužení dle naměřených hodnot byly zaznamenány do graf 1, ze kterého je patrné, že každý materiál je svým způsobem specifický a vyskytují se zde mírné odchylky v tažnosti, které jsou vidět při porovnání polohy bodu meze pevnosti každého vzorku. Závislosti jednotlivých vzorků jsou graficky znázorněny v příloze 2-6.



Graf 1 Závislost napětí na prodloužení všech vzorků

Z naměřených hodnot byla graficky vynesena průměrná závislost tahové síly na prodloužení, která je znázorněna v graf 2 spolu s mechanickými vlastnostmi a bude použita pro výpočty simulací ohybů.



Graf 2 Průměrná závislost napětí na prodloužení

3.2 Stanovení rozvinuté délky polotovaru [32]

Pro stanovení přesného rozměru polotovaru je nutná znalost rozvinuté délky. Výsledná velikost rozvinu se určí jako součet všech délek neutrálních os v ohýbaných částech a součet rovinných úseků. Součást je vyráběna z plechu tloušťky 4 mm a je tvořena čtyřmi ohyby.

Dále je zapotřebí zjistit vzdálenost poloměru neutrální osy od středu zaoblení. Podstatné je, posoudit nejmenší výrobitelný vnitřní poloměr ohybu, aby nedošlo k porušení povrchu materiálu nebo nepřesné výrobě. V závislosti na nástrojovém vybavení firmy byl zvolen pro všechny ohyby poloměr $R_0 = 3$ mm. Další potřebnou hodnotou je součinitel „ x “, který je známý z hodnot dle tab. 6, kdy poměr $R_0/s = 3/4 = 0,75$ a hodnota součinitele je tedy zvolena 0,41.

Vzdálenost je značena „ ρ “ a lze ji spočítat ze vztahu (2.9):

$$\rho = R_0 + s \cdot x = 3 + 4 \cdot 0,41 = 4,641 \text{ mm}$$

Výsledná vzdálenost neutrálního vlákna bude vzhledem k požadované přesnosti zaokrouhlena na dvě desetinná místa, tedy $\rho = 4,64$. Pro kontrolu je nutné ověřit, zda zvolený vnitřní poloměr ohybu 3 mm bude vyhovovat a nevzniknou praskliny na vnější tahové straně ohybu. Poloměr „ R_2 “ je na vnější straně ohybu, který lze spočítat jako součet vnitřního poloměru a tloušťky materiálu, tj. $R_2 = R_0 + s = 3 + 4 = 7$ mm.

- Poloměr ohybu „ R_{1min} “ se počítá ze vztahu (2.4) a (2.3):

$$R_{1min} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{1max}} - 1 \right) = \frac{4}{2} \cdot \left(\frac{1}{0,4199} - 1 \right) = 2,76 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{1max} = \frac{l_2 - l_0}{l_0} = \frac{R_2 \cdot \alpha - \rho \cdot \alpha}{\rho \cdot \alpha} = \frac{R_2 - \rho}{\rho} = \frac{7 - 4,93}{4,93} = 0,4199$$

Z porovnání minimálního a zvoleného poloměru ohybu vyplývá, že zvolený poloměr lze vytvořit bez porušení materiálu.

$$2,76 < 3 \rightarrow R_{1min} < R_0$$

- Maximální poloměr ohybu, který je výrobitelný ohraňováním se počítá se ze vztahu (2.6) pro „ R_{1max} “:

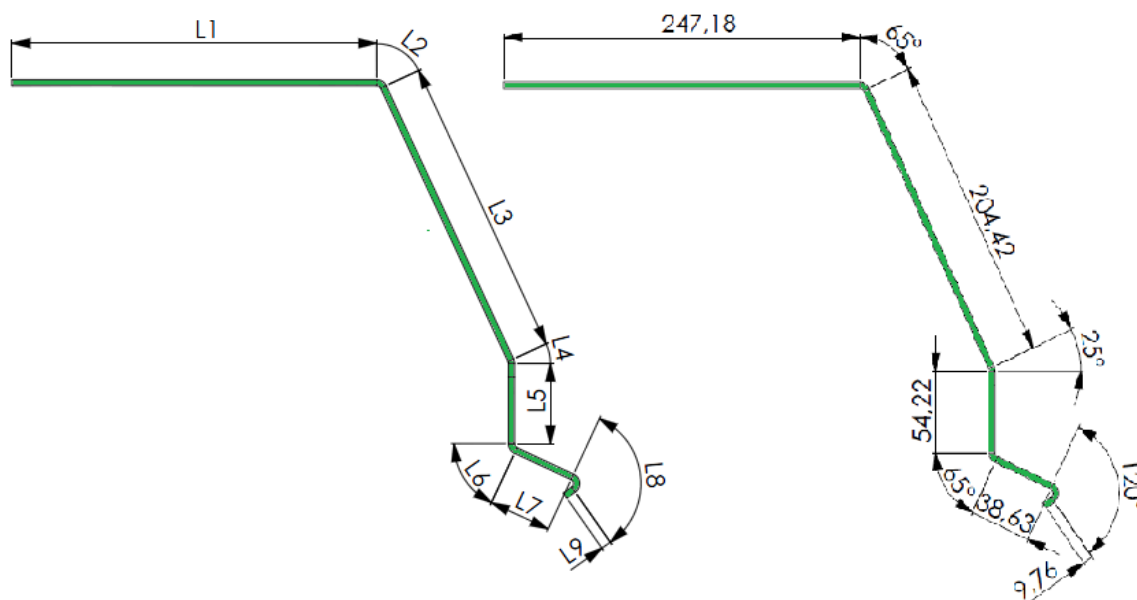
$$R_{1max} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{\sigma_k} - 1 \right) = \frac{4}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^5}{323} - 1 \right) = 1\,236,4 \text{ mm}$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že maximální poloměr ohybu je tedy 1 236,4 mm. Ohyb s větším radiusem nelze vzhledem k zadaným podmínkám vyrobit, protože by zde působily pouze elastické deformace a po odlehčení by se polotovar vrátil do původní polohy.

Nyní lze stanovit délky jednotlivých úseků s označením $L_1 - L_9$ dle obr. 55. Při rozvinutí celé délky je patrné, že bude uvažováno 5 rovinných úseků a 4 zahnuté dle úhlu ohybu. Rovinné úseky jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 9 Hodnoty rovinných úseků [32]

Úsek	l_1	l_3	l_5	l_7	l_9
Délka [mm]	247,18	204,42	54,22	38,63	9,76



Obr. 55 Označení jednotlivých požadovaných úseků [32]

Délky ohnutých úseků se spočítají ze vztahu (2.10), kdy pro jednotlivé úseky se mění hodnota úhlu ohybu.

$$l_2 = l_6 = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 65}{180} \cdot 4,64 = 5,26 \text{ mm}$$

$$l_4 = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 25}{180} \cdot 4,64 = 2,03 \text{ mm}$$

$$l_8 = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 120}{180} \cdot 4,64 = 9,72 \text{ mm}$$

Celková délka rozvinuté součásti se tedy spočítá jako součet všech rovinných i ohnutých úseků, dle vztahu (2.12).

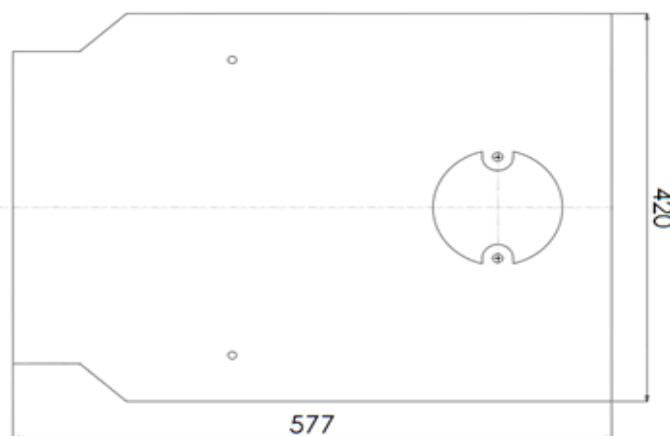
$$L_c = L_i + L_o = 555,36 + 22,27 = 577,63 \text{ mm}$$

$$L_i = \sum_{i=1}^n l_i = 247,18 + 204,42 + 54,22 + 38,63 + 9,76 = 554,21 \text{ mm}$$

$$L_o = \sum_{i=1}^n l_o = 5,26 + 2,03 + 5,26 + 9,72 = 22,27 \text{ mm}$$

Vzhledem k tomu, že výrobní přesnost ohybu má své tolerance, výsledné hodnoty lze zaokrouhlit na celé číslo, tedy na 578 mm.

Hodnota rozvinuté délky byla zjišťována i za pomoci programu Solidworks 2014, v němž byl vytvořen model plechového dílu. Po rozvinutí a zadání parametrů program vypočítal velikost délky 577 mm. Tato hodnota je mírně odlišná od hodnoty vypočítané na základě teorie. Je na zvážení, která z hodnot je správná. Vzhledem k přesnostem, kterých je třeba dosáhnout, je možné považovat obě hodnoty za správné. Pro tento případ se bude dále pracovat s hodnotou vypočtenou, tedy $L_c = 578$ mm.



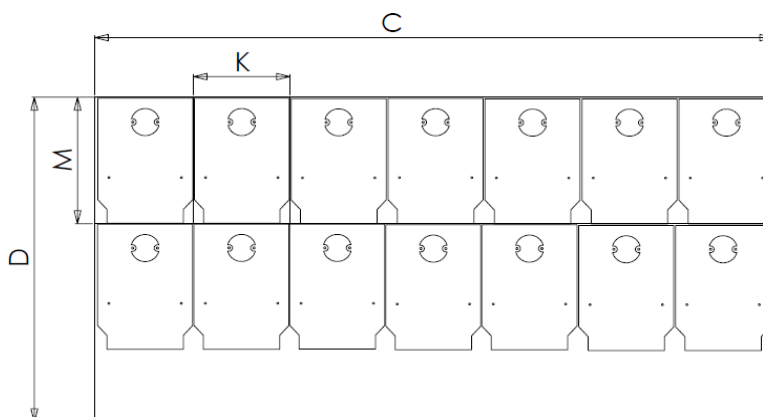
Obr. 56 Rozvinutý tvar dle programu Solidworks 2014 [32]

3.3 Volba pálicího plánu

Správná volba pálicího plánu je jedna z nejdůležitějších podmínek při navrhování efektivního využití materiálu pro vyráběný dílec. Cílem je rozvržení a orientace jednotlivých dílů tak, aby byla využita co největší plocha tabule plechu. Níže budou popsány možnosti rozložení pro minimalizaci odpadu, z nichž bude následně zvolena nejvýhodnější varianta.

Jedním z možných řešení je objednávka svitku plechu o přesné šířce pro snížení odpadů a zvýšení efektivnosti využití plechu. Tato varianta není ovšem vhodná pro zadanou malosériovou výrobu, která činí 200 ks/rok. Proto bude výhodnější uvažovat o jedné ze tří standardizovaných rozměrů tabulí plechu, a to 3000 x 1500 mm, 2500 x 1250 mm a 2000 x 1000 mm. Důležitým aspektem při navrhování rozložení je dodržet mezery mezi jednotlivými díly a od kraje plechu. Hodnoty potřebné k určení využitelnosti plechu jsou uvedeny v tab. 10.

- Výroba výpalku z tabule plechu 3000 x 1500 mm (C x D) – podélné natočení



Obr. 57 Schéma pálicího plánu dle podélného uspořádání

Tab. 10 Vstupní hodnoty pro výpočet využití materiálu

Délka plechu C [mm]	Šířka plechu D [mm]	Mezera od kraje F [mm]	Mezera mezi díly E [mm]	Krok pálení $K=D+E$ [mm]	Krok pálení $M=C+E$ [mm]
578	420	10	6	426	584

Tabuli plechu lze rozdělit na pomyslné pásy, kdy počet pásů „ n_p “ se spočítá:

$$n_p = \frac{D}{M} = \frac{1500}{584} = 2,56 \text{ pásů} \quad (3.1)$$

Z výpočtu lze stanovit, že z jedné tabule plechu budou vytvořeny 2 pásy, které lze použít pro další výpočty.

Počet výpalků z jednoho pásu:

$$i_p = \frac{C}{K} = \frac{3000}{426} = 7,04 \text{ výpalků} \quad (3.2)$$

Počet výpalků z jednoho pásu plechu byl spočítán na 7 kusů. S touto hodnotou bude dále počítáno. Celkový počet výpalků z tabule je součinem počtu pásů z tabule a počtu výpalků z pásu.

Počet výpalků z jedné tabule:

$$i_t = n_p \cdot i_p = 2 \cdot 7 = 14 \text{ výpalků} \quad (3.3)$$

Z uvedeného vyplývá, že z jedné tabule plechu při daném rozložení lze tedy vypálit 14 polotovarů.

Pro výpočet využitelnosti tabule je nutné znát plochu polotovaru „ S_p “, která byla spočítána pomocí programu Solidworks 2014 a činí 224 089 mm². Plocha tabule se spočítá jako $S_t = C \cdot D = 3\,000 \cdot 1\,500 = 4\,500\,000 \text{ mm}^2$

$$\mu = \frac{i_t \cdot S_p}{S_t} \cdot 100 = \frac{14 \cdot 224\,089}{4\,500\,000} \cdot 100 = 69,7\% \quad (3.4)$$

Vztahem (3.4) bylo vypočteno procento využití tabule plechu o rozměru 3000 x 1500 mm při užití podélného uspořádání polotovarů, a to 69,7 %.

➤ Výroba výpalku z tabule plechu 3000 x 1500 mm (C x D) – příčné natočení

Tabuli plechu lze rozdělit na pomyslné pásy, kdy počet pásů „ n_p “ se spočítá:

$$n_p = \frac{C}{M} = \frac{3000}{584} = 5,13 \text{ pásů}$$

Z výpočtu lze stanovit, že z jedné tabule plechu bude vytvořeno 5 pásů, které lze použít pro další výpočty.

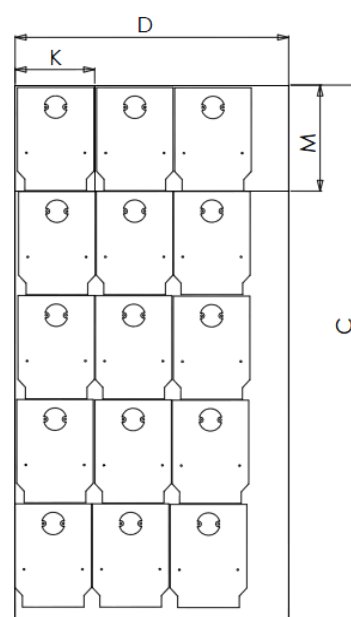
Počet výpalků z jednoho pásu:

$$i_p = \frac{D}{K} = \frac{1500}{426} = 3,52 \text{ výpalků}$$

Počet výpalků z jednoho pásu plechu byl spočítán na 3 kusy. S touto hodnotou bude dále počítáno. Celkový počet výpalků z tabule je součinem počtu pásů z tabule a počtu výpalků z pásu.

Počet výpalků z jedné tabule:

$$i_t = n_p \cdot i_p = 5 \cdot 3 = 15 \text{ výpalků}$$



Obr. 58 Schéma pálicího plánu dle příčného uspořádání

Z jedné tabule plechu při daném rozložení lze tedy vypálit 15 polotovarů, což je o jeden více než v předchozí variantě.

Využití jedné tabule:

$$\mu = \frac{i_t \cdot S_p}{S_t} \cdot 100 = \frac{15 \cdot 224\,089}{4\,500\,000} \cdot 100 = 74,7\%$$

Uvedeným vztahem bylo vypočteno procento využití tabule plechu o rozměru 3000 x 1500 mm při užití příčného uspořádání polotovarů, a to 74,7 %.

- Výroba výpalku z tabule plechu 2500 x 1250 mm nebo 2000 x 1000 mm (C x D)

Z důvodu opakovatelnosti předchozích výpočtů budou pouze shrnuty výsledky využitelnosti tabule plechu do tab. 11.

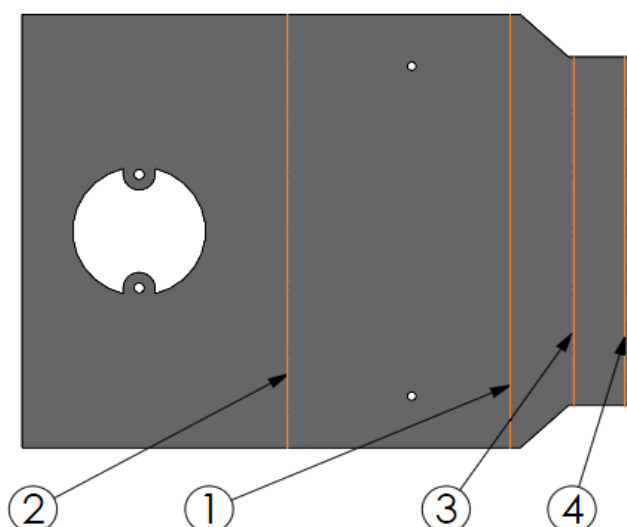
Tab. 11 Využitelnost tabulí

Tabule	Uspořádání	Počet pásů [ks]	Počet výpalků z pásu [ks]	Počet výpalků z tabule [ks]	Využitelnost tabule [%]
3000 x 1500	Podélné	2	7	14	69,7
	Příčné	5	3	15	74,7
2500 x 1250	Podélné	2	5	10	71,7
	Příčné	4	2	8	57,4
2000 x 1000	Podélné	1	4	4	44,4
	Příčné	2	3	6	67,2

Z hodnot uvedených v tab. 11 jasně vyplývá, že jako nejvýhodnější se jeví tabule plechu o rozměru 3000 x 1500 mm s podélným natočením polotovarů, neboť využitelnost této tabule dosahuje hodnoty 74,7 %. Do procenta využití jsou započítány i jako odpad otvory v polotovaru, které činí 5,1 % každého polotovaru. Při vypalování laserem musí stroj pro každý výpalek vykonat dráhu 2 504 mm. Tato hodnota byla změřena pomocí programu Solidworks 2014.

3.4 Postup ohraňování [4], [32]

Při návrhu postupu ohýbání je důležité brát ohled na celou řadu faktorů. Při vícenásobném ohýbání je podstatné zajistit pořadí ohybů tak, aby nenastala situace, kdy kvůli špatně zvolenému pořadí nebude možné vytvořit některý z ohybů. Důležité je, aby nedošlo k poškození již vytvořených ohybů nebo materiálu na povrchu. Nesmí ani dojít ke kolizi mezi materiálem, nástrojem, dorazy a strojem kvůli možnému poničení. Je potřeba brát ohled na bezpečnost obsluhy stroje a blízkého okolí.



Obr. 59 Popis postupu ohýbání v ohraňovacím lise [32]

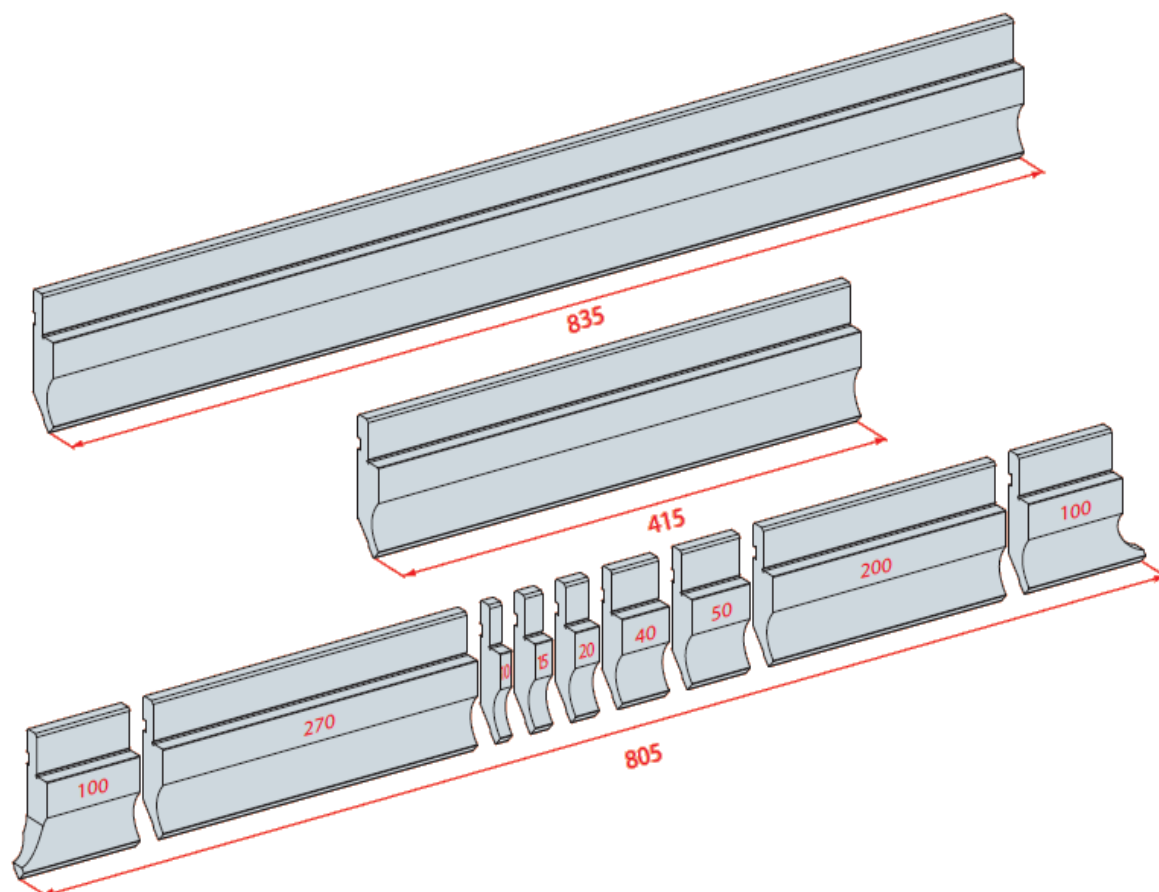
Na vyráběné součásti budou vytvářeny 4 ohyby, z nichž jeden je pod úhlem 25° , dva pod úhlem 65° a jeden pod úhlem 120° .

Aby nedošlo ke kolizím, byl vypracován ohybový plán (obr. 59), v němž je zakresleno pořadí ohybu a dále bude rozvedeno nejvhodnější natočení tvářeného dílce. Pro navržený postup ohýbání budou následně vybrány vhodné ohýbací nástroje, a to s ohledem na dostupnost ve firmě.

3.5 Volba nástrojů [4], [32]

Ve výrobě firma užívá nástroje pro ohraňování od společnosti Eurostamp. Většina nástrojů, které firma vlastní, jsou vyrobeny z nástrojové oceli C45, jež se značí jako ocel 12 050 nebo 1.1191. Jedná se o nelegovanou jakostní ocel pro středně namáhané součásti. Některé nástroje jsou také vyrobeny z Cr-Mo oceli zajišťující vyšší pevnost a životnost při provozu. Z nástrojového vybavení společnosti budou vybrány nejvhodnější matrice a ohybníky pro zhotovení požadovaných ohybů.

Matrice byla zvolena na základě znalosti tloušťky materiálu, požadovaného poloměru ohybu a doporučení rozevření matrice dle katalogu společnosti Eurostamp. Z doporučených velikostí matric vychází optimální rozevření $w = 20$ mm. Při volbě matrice je třeba brát v úvahu fakt, že ohýbaná součást je větších rozměrů. To může mít za následek kolizi materiálu s nástrojem nebo strojem. Z toho důvodu bude pro výrobu zvolena matrice s co nejmenší výškou.



Obr. 60 Délky dostupných nástrojů [4]

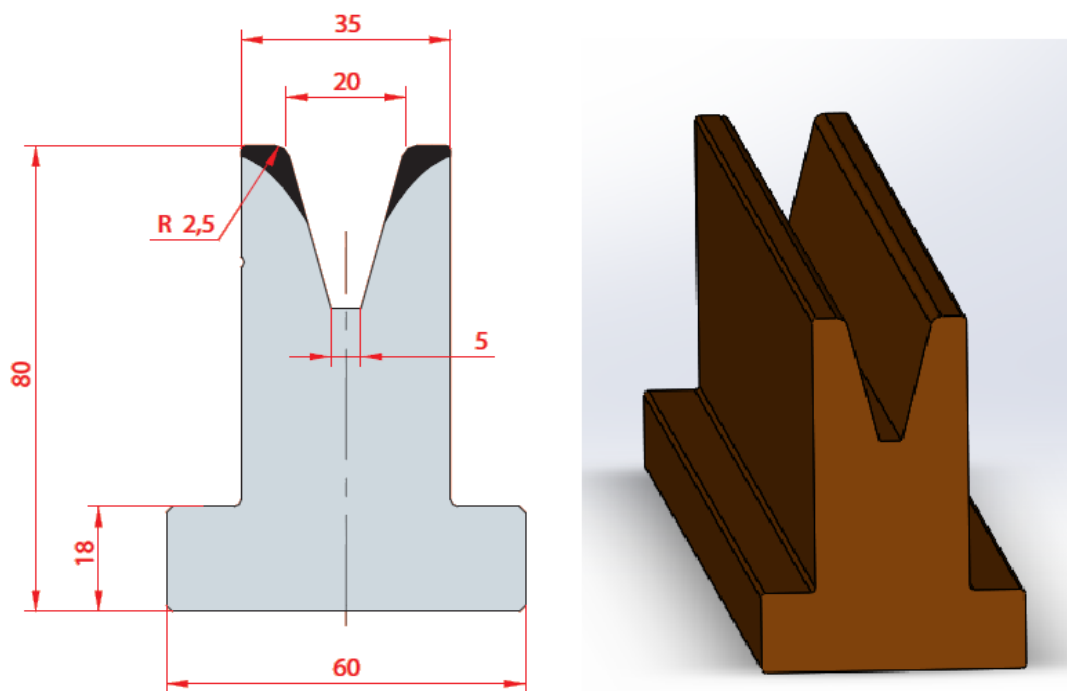
Při volbě vhodného ohybníku je nutné zohlednit velikost vnitřního poloměru výsledného ohybu. Ten je vždy tvořen poloměrem zaoblení špičky nástroje. Jeho velikost bývá v každém katalogu doporučena. Ve výrobní společnosti jsou dostupné pouze razníky s poloměrem špičky 0,8 mm, 3 mm nebo 10 mm. Z toho důvodu byl vybrán poloměr o velikosti 3 mm.

Dle doložených výpočtů by neměl nastat žádný problém s nekvalitním ohybem. Z důvodu možné kolize stroje s polotovarem při ohybu je vhodné zvolit ohybník s co největší délkou, aby vznikl co největší prostor mezi beranem a pracovní deskou a předešlo se možné chybě. Větší výškou ale ztrácí ohybník svoji tuhost.

Důležitým faktorem pro zvolení vhodných nástrojů je možnost vytvořit celý díl nejlépe jedním nástrojem. Z toho důvodu byly zvoleny menší hodnoty pracovních úhlů ohybníku a matrice, aby se zabránilo časté výměně nástrojů, které vedou k prodloužení výrobních časů.

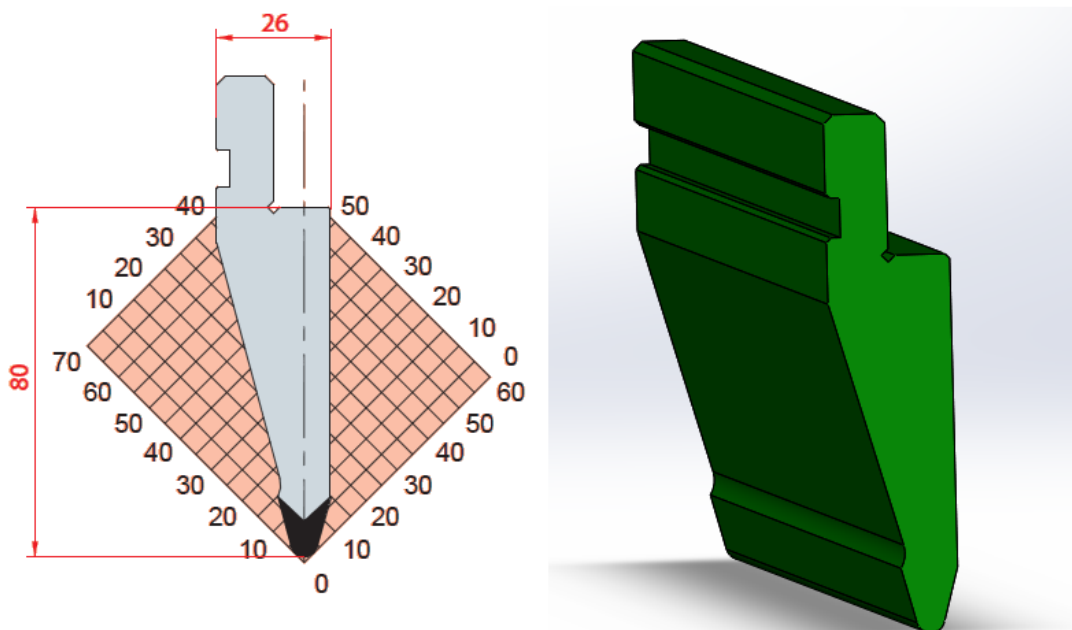
Ohraňovací nástroje mají již danou délku, která je uvedena v katalogu jejich výrobce a díky rozdělení na segmenty tak lze složit libovolný délkový rozměr pro ohýbání součástky (obr. 60). Ten je zapotřebí především u ohybu, který je z obou stran omezen například materiálem. Vždy je nutné dodržet, aby délka ohybníků byla větší než délka osy ohybu ohraňované součástky. Aby výroba proběhla co nejrychleji, byl jako nejvhodnější zvolen stejný poloměr ohybu pro každou operaci. Není nutné tedy měnit v průběhu ohraňování nástroje.

Z dostupného vybavení firmy byla vybrána matrice s katalogovým označením 3047, která splňuje všechny požadavky. Velikost jejího rozevření je požadovaných 20 mm a malým pracovním úhlem 30°. Matrice dále disponuje nízkou výškou, která činí 80 mm. Maximální povolené zatížení nástroje je 588 kN/m (v katalogu je tato hodnota uvedena v jednotkách T/m).



Obr. 61 Matrice Eurostamp 3047 [4]

Stejně jako matrice byl vybrán nejvhodnější ohybník, který musí zapadat do matrice a umožňuje vytvořit požadované ohyby. Zvolený ohybník nese katalogové označením 1057 (obr. 62), který má poloměr zaoblení špičky 3 mm, pracovní úhel 30° a pracovní výšku 60 mm. Maximální přípustné zatížení ohybníku je díky jeho malé výšce 980 kN/m



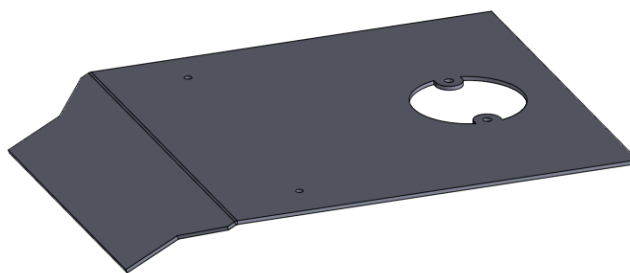
Obr. 62 Ohybník Eurostamp 1057 [4]

Jednotlivé délky použitých nástrojů budou poskládány z několika segmentů tak, aby bylo dosaženo minimální délky 420 mm, což odpovídá šířce tvářeného dílce. Doporučuje se použít delší nástroje, pokud není ohyb z kraje nijak omezen.

3.6 Postup ohýbání [4], [32]

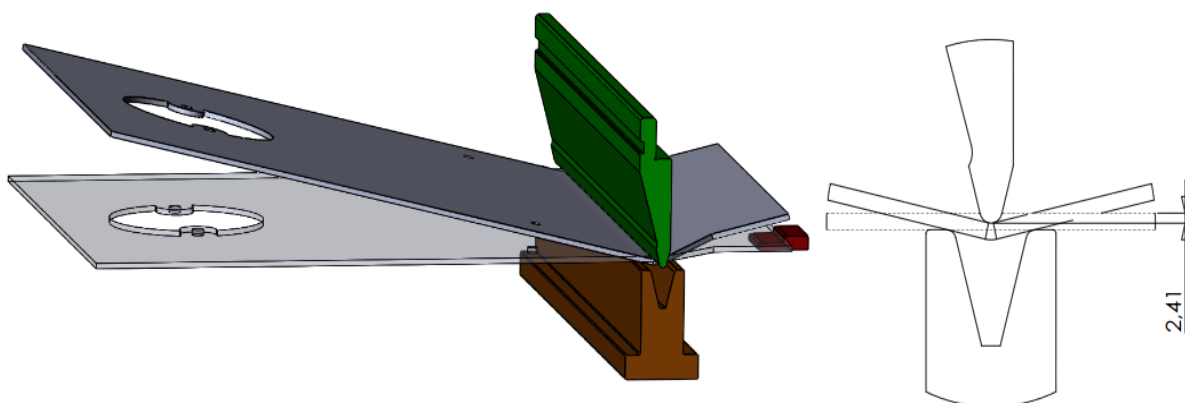
Navržený postup ohýbání vyráběné součástky a jednotlivé délky ramen všech ohybů včetně vzhledů jednotlivých kroků byly vytvořeny za pomoci programu Solidworks 2014.

- Ohyb č. 1 (obr. 63) je tvořen ohybem pod úhlem 25° a jeho délka činí 420 mm. Vnitřní poloměr po ohybu bude mít dle určeného nástroje velikost 3 mm. Délka ramene mezi osou ohybu a pevné části dorazu bude 119,77 mm. Součást bude dotlačena na dotyk dvou zadních dorazů a zúžené části polotovaru. K vytvoření ohybu



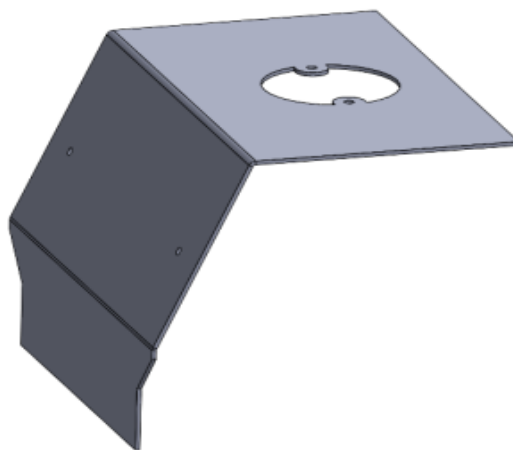
Obr. 63 Ohyb č. 1

bude použit ohybník 1057 a matrice 3047 o pracovní délce 515 mm. Délka vznikne složením dvou segmentů, z nichž první bude o délce 415 mm a druhý o délce 100 mm. Tím vznikne přesah nástroje oproti ohýbané součástce o celkové délce 95 mm, který bude sloužit k toleranci vybočení při zakládání součástky. Segmenty mohou být upnuty ve kterékoliv pracovní části stroje, protože prostor nebude omezen rozměry součástky. Pohled na ohyb č. 1 je uveden na obr. 64.

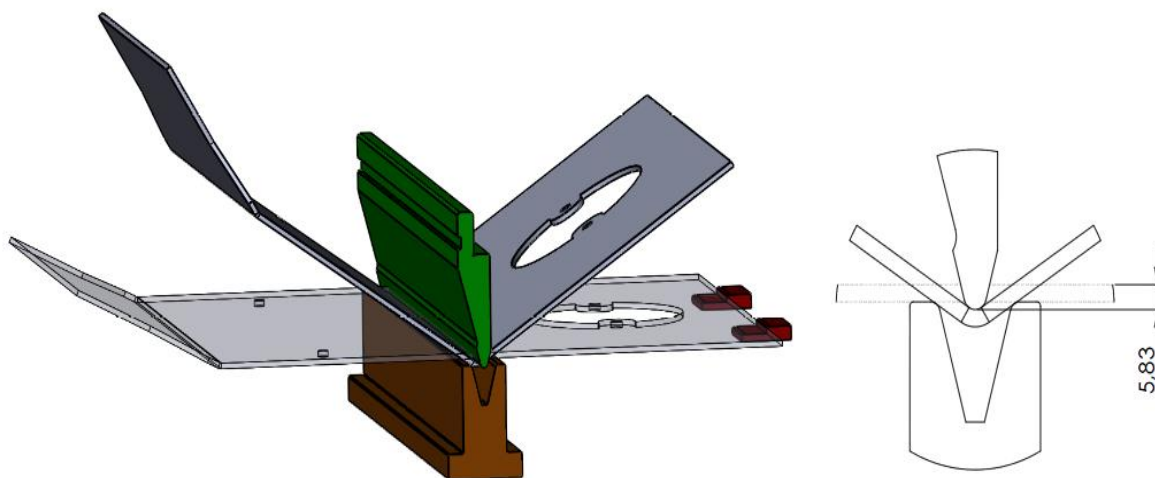


Obr. 64 Pohled na ohyb č. 1

- Ohyb č. 2 (obr. 65), který bude ohnutý o úhel 65° , bude mít délku 420 mm a vnitřní poloměr 3 mm. Délka ramene, které bude založeno do dorazů, bude od osy ohybu ve vzdálenosti 249,81 mm. Polotovár bude do dorazů zasunut širší stranou, v níž se nachází otvory pro odvod spalin od komína. K vytvoření ohybu budou použity stejné nástroje jako v předchozím kroku, neboť rychlou změnou orientace polotovaru a pokračováním dalším ohybem bude výroba značně urychlena. Nástroje budou opět složeny ze stejných segmentů, jako v předchozím kroku, a v součtu budou mít délku 515 mm. Tento ohyb zajistí svým tvarem kopírování tvaru bočních stěn do uzavřeného celku. Pohled na ohyb č. 2 je uveden na obr. 66.

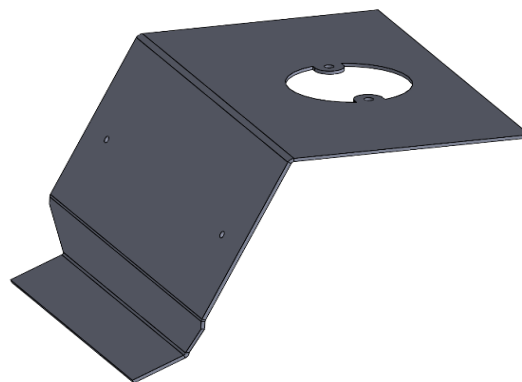


Obr. 65 Ohyb č. 2

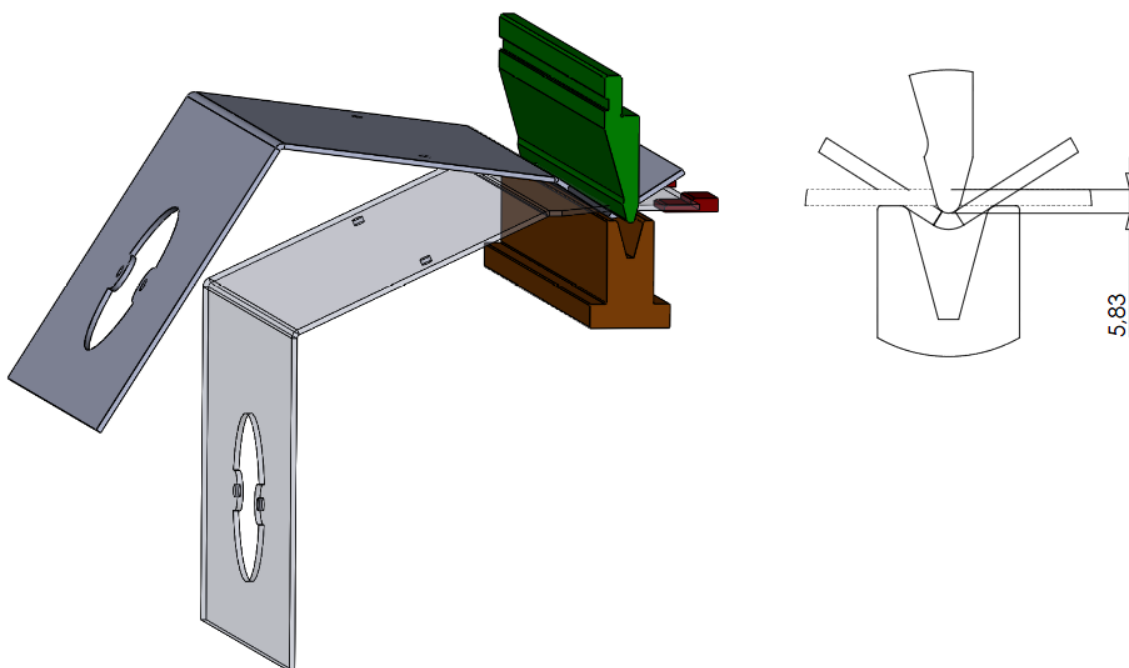


Obr. 66 Pohled na ohyb č. 2

- Ohyb č. 3 (obr. 67) pod úhlem 65° . Délka ohýbané součásti bude 338 mm. Hodnota vnitřního poloměru bude tvořena použitým nástrojem jako v předchozích krocích a bude mít hodnotu 3 mm. Vzhledem k urychlení výroby nebude měněna délka nástrojů na dostačujících 415 mm, ale zůstane délka jako v předchozích krocích 515 mm. Tím vznikne přesah 88,5 mm z každé strany, který bude využit pro toleranci založení polotovaru. Polotovar bude zasunut do pevné části dorazu zúženou částí. Délka ramene mezi osou ohybu a koncem polotovaru dotlačeného v dorazu je 61,7 mm. Pohled na ohyb č. 3 je uveden na obr. 68.

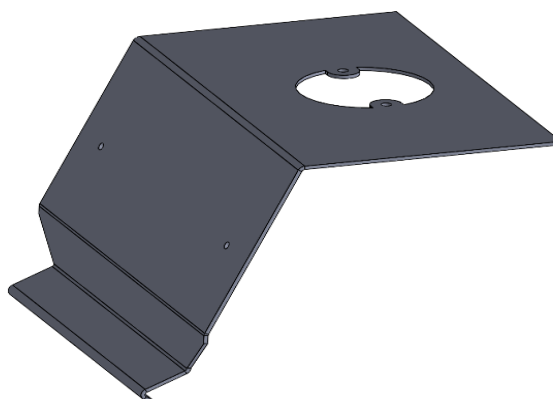


Obr. 67 Ohyb č. 3

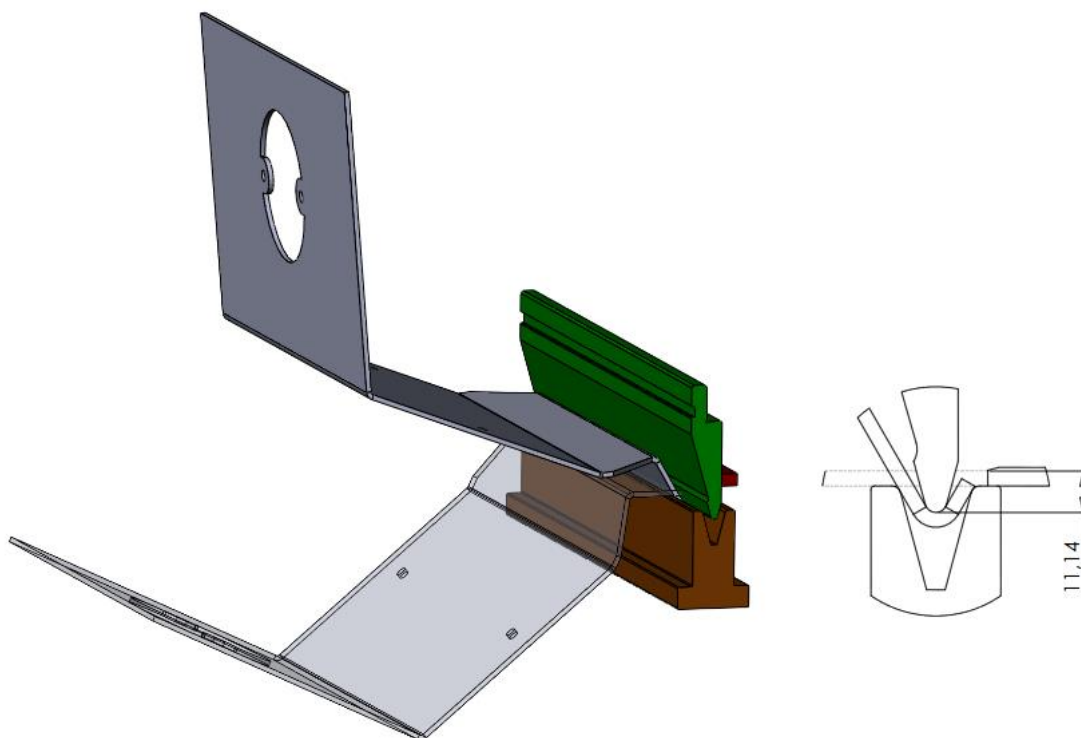


Obr. 68 Pohled na ohyb č. 3

- Ohyb č. 4 (obr. 69) vytvoří požadovaný tvar pro proud vzduchu při oplachu skla, čím bude součástka dotvarována. Úhel, pod kterým bude ohyb vykonán, je 120° . Vnitřní poloměr ohybu vznikne stejný jako na použitém nástroji, tedy 3 mm. Délka ohybu je 338 mm a vzdálenost osy ohybu od kraje součásti je 15 mm. Délka nástroje bude stejná jako ve všech krocích, a to 515 mm. Polotovar bude zasunut do pevné části dorazu zúženou částí. Pohled na ohyb č. 4 je uveden na obr. 70.

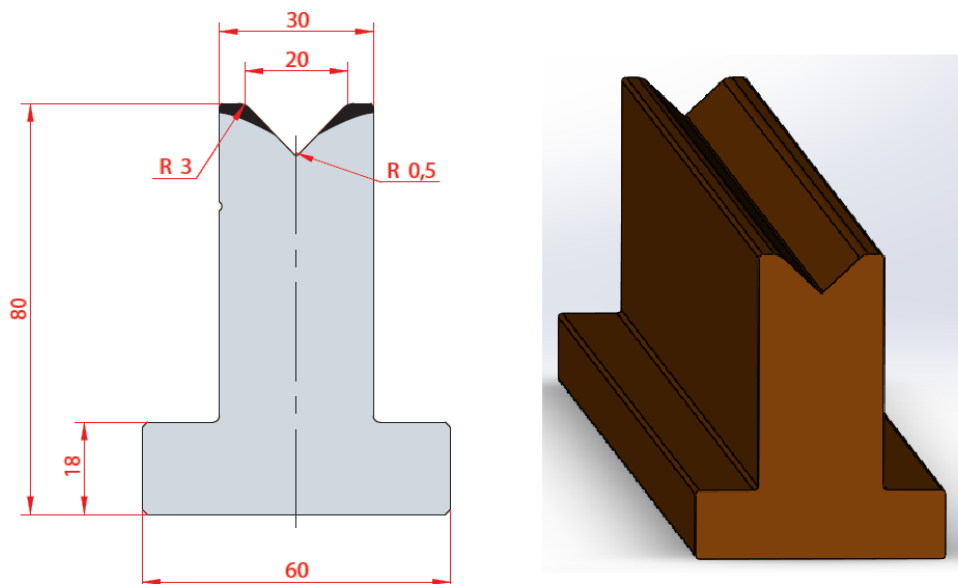


Obr. 69 Ohyb č. 4



Obr. 70 Pohled na ohyb č. 4

Společnost také disponuje dalšími nástroji, které mají menší úhel rozevření matrice a stále splňují požadavky pro vytvoření tohoto dílu. Pro větší trvanlivost především matrice by bylo vhodné takový nástroj použít pro první 3 operace, kdy jsou tvořeny menší úhly ohybu než v ohybu č. 4. Při výběru správného nástroje by připadala v úvahu matrice s katalogovým označením 3017 (obr. 71), která má vnitřní úhel 88° , a nebude tedy tak namáhána.



Obr. 71 Matrice Eurostamp 3017 [4]

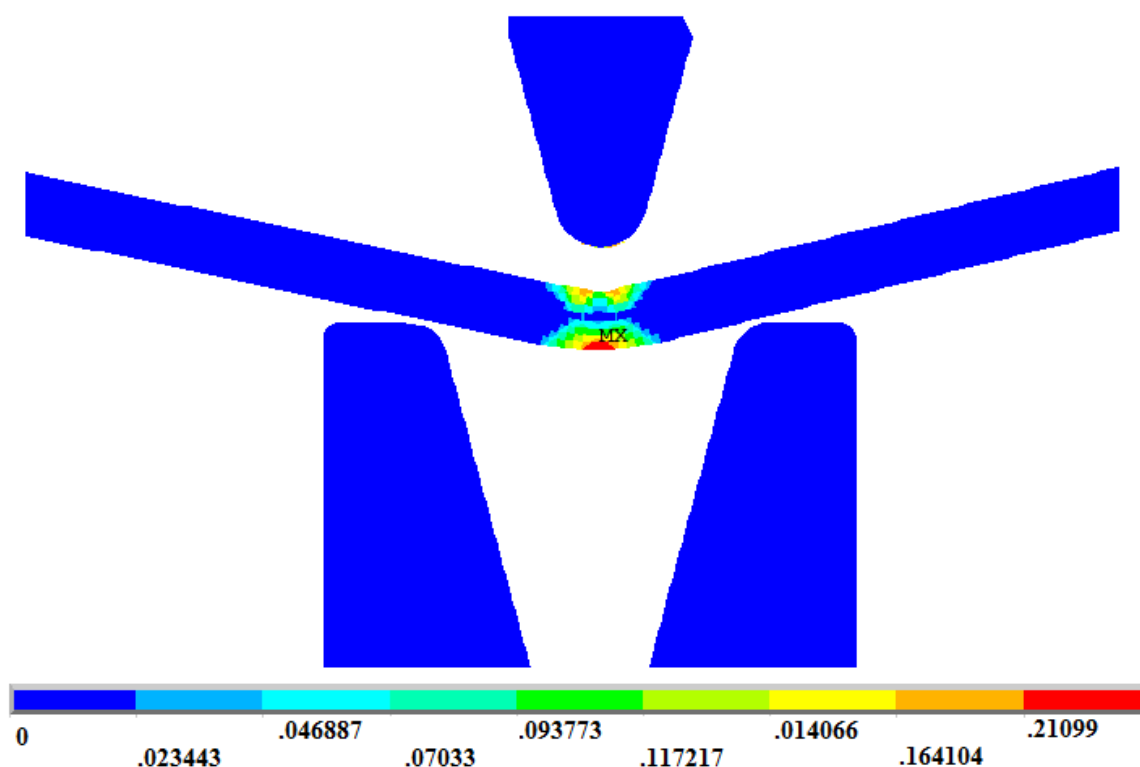
Při ohybu je prostoru na obou stranách dostatek, a proto lze upnout na každou část stroje jiný nástroj. Po dokončení poslední operace je nutné díl překontrolovat alespoň vizuálně pro případ poškození při manipulaci nebo při ohybu a roztřídit dobré kusy od špatných.

3.7 Simulační ověření průběhu ohybů

Ověření výrobního procesu při návrhu se zavádí v dnešní době stále častěji do vývoje drahých či nadměrně zatěžovaných součástí. Jedná se o simulaci za účelem kontroly tvářené součásti. Díky tomu lze předejít případným konstrukčním chybám nebo jiným nedostatkům vzniklých při návrhu. Nejčastěji se kontroluje rozsah deformované části, kdy se zjišťuje, zda část, která je plasticky namáhána a má tím pádem horší tvářecí schopnosti, není znovu intenzivně deformována. Tvářená oblast je při ohýbání závislá především na úhlu a poloměru ohybu, ale také na vlastnostech materiálu a dalších činitelích.

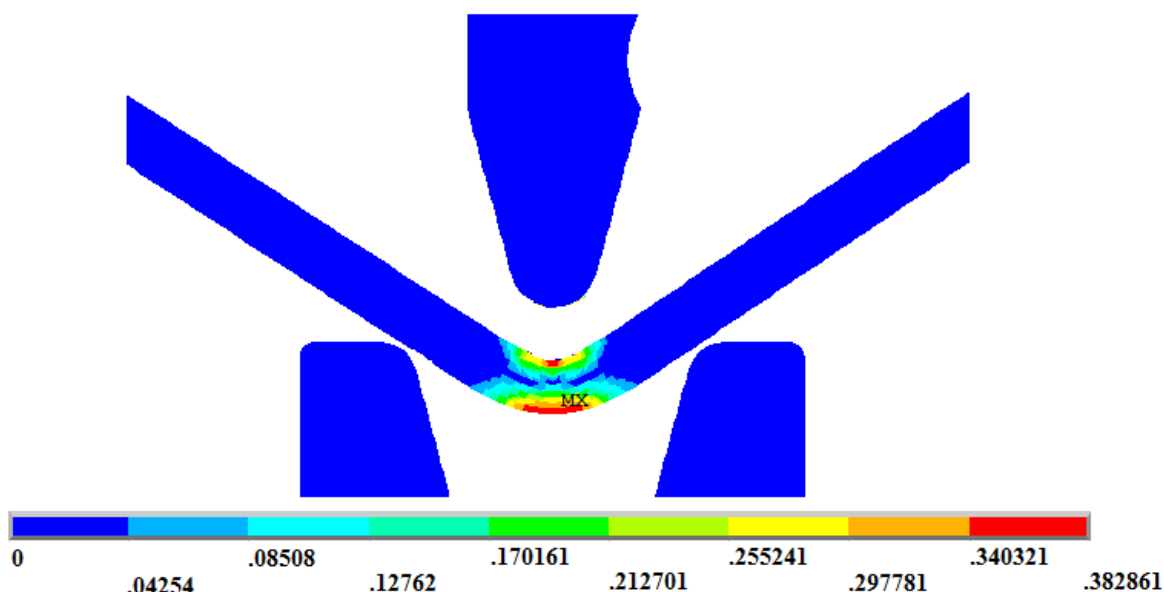
Při samotném ohybu vznikají vysoké deformace, které zajistí překonání elastické a dosažení plastické složky. Po odlehčení se do jisté míry zmenší vzniklé přetvoření díky vymizení elastické části a zajistí tím stálou pevnost ohnuté součásti. Veškeré simulace, které budou uvedeny, byly provedeny v programu Ansys 15.0.

Pro ohyb o úhel 25° vznikají poměrně malé přetvoření, ty největší z nich jsou k vidění na obr. 72 v nejvíce zatěžovaném bodě, který je v ose polotovaru na vnější straně ohybu. Vzniklé deformace se měří pouze po odlehčení (obr. 72), kdy ohybník přestane tvářet a materiál zůstane ležet na matrici. Nyní je podstatné zjistit maximální přetvoření, které je 0,21 a vyhodnotit, zda neovlivní povrch materiálu. Z obrázku je také patrný rozsah deformace, který zabírá oblast širokou přibližně 5 mm. Vzhledem k malé velikosti úhlu ohybu a přetvoření nepřekračující maximální dovolené lze konstatovat, že ohyb půjde vyrobit.



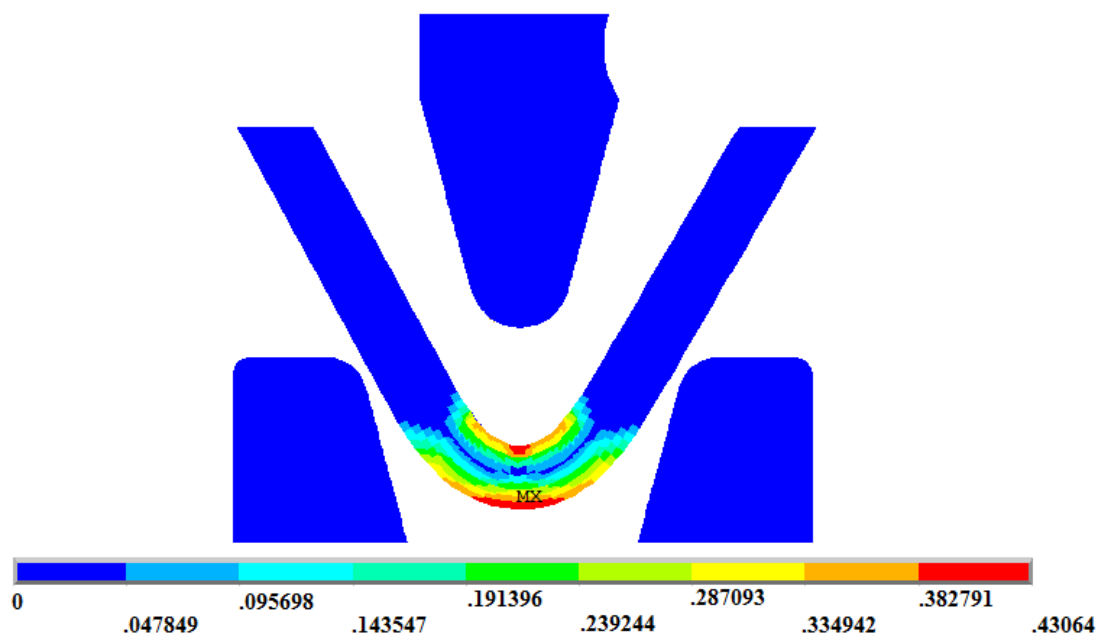
Obr. 72 Deformace po odlehčení v ohybu 25°

Při ohybu o 65° je zřejmé, že vzniklé deformace při zatížení jsou značně větší, než u předchozího ohybu. Na obr. 73 lze vidět, jak vypadá deformovaná součást po odlehčení, kdy nepůsobí žádné napětí a deformace se částečně vrátí díky elastické složce materiálu. Nejvíce deformovaná oblast vzniká ve stejném bodě bez ohledu na úhel, o který se ohýbá. Při tomto ohybu dosahuje přetvoření v kritickém bodě hodnoty 0,38 na krajních vláknech, ovšem v celém průřezu se přetvoření mění. Zbylé deformace už v ohybu zůstávají a dále se nemění. Šířka deformované oblasti je přibližně 7 mm. V této oblasti se nedoporučují žádné další tvářecí operace. I tento ohyb lze bez problémů vyrobit na základě praktického ověření.



Obr. 73 Deformace po odlehčení v ohybu 65°

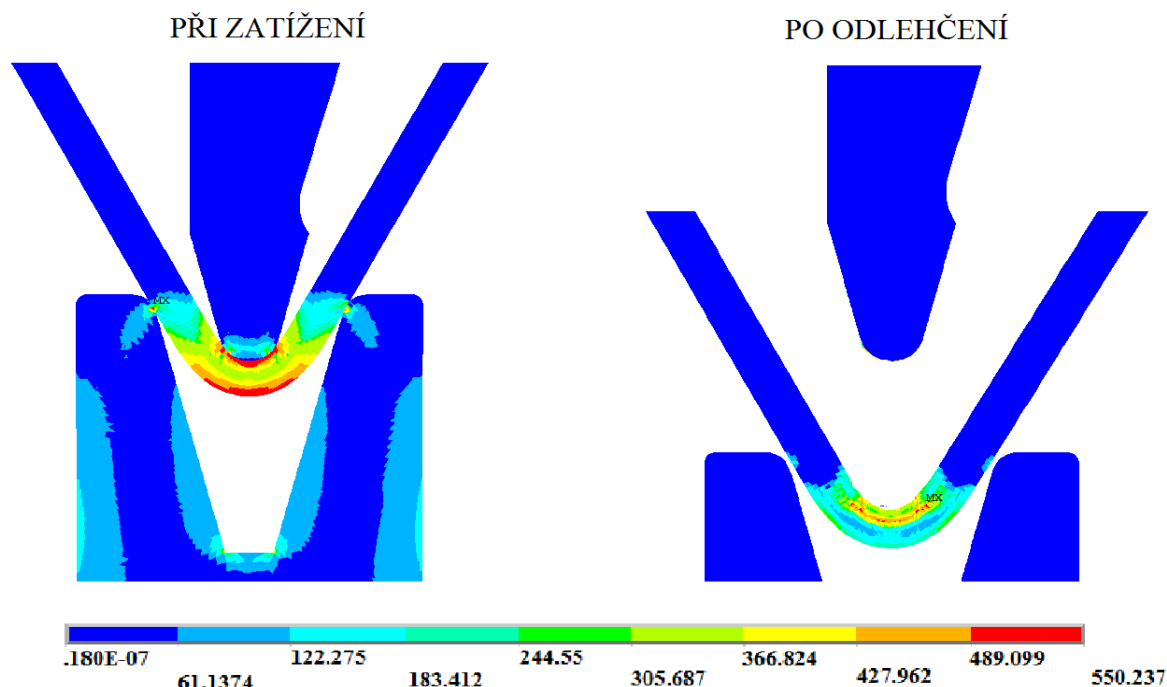
Při ohybu o 120° (obr. 74) poměrná deformace dosahuje vysokých hodnot. Dle vzorového výpočtu bylo zjištěno, že maximální přetvoření v krajních vláknech by mělo mít hodnotu 0,42. Vzhledem k simulaci je patrné, že hodnoty přetvoření v kritických bodech nabývají podobných hodnot, a to 0,43. Kritická hodnota je na krajních vláknech, kde je nutné je kontrolovat. V celém průřezu se velikost přetvoření mění a materiál by neměl být poničen. Zasažená oblast přetvořením zde tvoří šířku přibližně 11 mm. Z toho je patrné, že provedená simulace a teoretické výpočty se shodují a ověřují proveditelnost tohoto ohybu. Toto tvrzení je ovšem nutné prakticky ověřit a případně ho vyvrátit.



Obr. 74 Deformace po odlehčení v ohybu 120°

Největší napětí a deformace vznikají při požadovaném ohybu 120°. Při němž je dosahováno vysokých hodnot při zatížení, viz obr. 75. Vzhledem k simulačnímu ověření lze říci, že maximální dosažená hodnota napětí je při zatížení 550 MPa, což je hodnota překračující mez pevnosti tvářeného materiálu. Po odlehčení se ovšem napětí zmenší a to na

hodnotu 366 MPa. Na tomto případě je dobře vidět, jaký vliv má elastické odpružení materiálu, které je třeba překonat. Praktickými zkouškami bylo ověřeno, že ohyb lze provést bez porušení.



Obr. 75 Simulace průběhu napětí při ohybu 120°

Z obr. 75 je patrné, že při zmíněném úhlu ohybu byl částečně ovlivněn elastickou složkou také nástroj. Ten se ovšem po odlehčení opět vrátí do původního stavu a nebude nijak poškozen. Vzhledem k tomuto možnému deformování nástroje jsou jeho funkční plochy kaleny na vyšší tvrdost, a proto tyto deformace v praxi nenastávají. Na simulovaném nástroji lze vidět, že napětí vzniklé tvářením se objevuje pouze v bodech styku polotovaru a nástroje, kde působí třecí síla. V kritických bodech se objevuje napětí až o velikosti 550 MPa, proto jsou funkční plochy povrchově kaleny, aby odolaly těmto vysokým tlakovým silám.

Ze všech simulací je tedy zřejmé, že součástku lze vyrobit, ale je nutné tvářené části vyráběné součástky pravidelně kontrolovat a v případě problémů navrhnout jiné řešení například ve formě většího poloměru ohybu nebo menšího úhlu než 120°.

3.8 Výpočet parametrů ohýbání

Mezi parametry, které je nutné stanovit při volbě ideálního stroje, jsou zahrnuty výpočty ohraňovací síly, výsledné práce a odpružení pro jednotlivé operace.

➤ Ohraňovací síla a práce

Výpočet síly potřebné k provedení požadovaného ohybu bude proveden po úpravě uvedeného vztahu (2.15). Tento vztah je určen pouze pro výpočet síly pro jeden metr ohýbané délky. Hodnota meze pevnosti byla stanovena dle tab. 8 na hodnotu 438 MPa. Optimální velikost rozevření matrice „w“ bylo stanoveno dle katalogu doporučených hodnot na 20 mm pro tloušťku materiálu 4 mm. Pro jeden metr délky ohybu se vypočítá ohraňovací síla:

$$F_{oh} = \frac{2 \cdot s^2 \cdot R_m}{1,4 \cdot w} = \frac{2 \cdot 4^2 \cdot 438}{1,4 \cdot 20} = 500,6 \text{ kN/m}$$

Dále bude proveden vzorový výpočet pro určení ohraňovací práce. Vzorový výpočet bude stanoven pro ohyb číslo 4, díky velikosti úhlu, dle kterého je vytvořen. Délka ohybu, která je nutná pro výpočet, byla stanovena dle výkresu na hodnotu 338 mm.

$$F_{oh4} = F_{oh} \cdot l_{ohr4} = 500,6 \cdot 0,338 = 169,2 \text{ kN} \quad (3.1)$$

Stejným způsobem bude proveden postup výpočtu zbývajících ohraňovacích sil pro každý ohyb v závislosti na jednotlivých délkách ohybu.

Velikost ohraňovací práce se vypočítá ze vztahu (2.14). Hodnota koeficientu zaplnění pracovního diagramu je pro matici s dutinou ve tvaru „V“ rovna $1/3 = 0,33$. Dráhy ohybníků byly odměřeny v programu Solidworks 2014 pro každý ohyb. Jednotlivé velikosti drah jsou zobrazeny v předchozí kapitole jako kóta v obrázku. Dráhy ohybníků jsou závislé na úhlu ohybu, kdy pro úhel 25° odpovídá dráha velikosti 2,41 mm, pro úhel 65° platí velikost 5,83 mm a pro úhel 120° je dráha 11,14 mm.

$$A_{ov4} = m_v \cdot F_{oh4} \cdot h_r = 0,33 \cdot 169,2 \cdot 11,14 = 622 \text{ J}$$

Pro přehlednost jsou vypočtené hodnoty seřazeny a zpracovány dle čísla ohybu do tab. 12.

Tab. 12 Naměřené a vypočtené hodnoty jednotlivých ohybů.

Číslo ohybu	Délka ohybu $l_{ohr} [mm]$	Ohraňovací síla $F_{oh} [kN]$	Dráha ohybníku $h_r [mm]$	Ohraňovací práce $A_o [J]$
1	420	210,25	2,41	167,2
2	420	210,25	5,83	404,5
3	338	169,2	5,83	325,5
4	338	169,2	11,14	622

Na každém nástroji je vždy uvedena dle katalogu hodnota maximálního zatížení, která se z důvodu porušení nebo zničení nástroje nesmí překročit. Pro ohybník 1057 je dána výrobcem hodnota 100 T/m, která odpovídá dle přepočtu hodnotě 980 kN/m. Matrice s označením 3047 má maximální hodnotu zatížení danou 55 T/m, což odpovídá hodnotě 540 kN/m. Ze vztahu pro ohraňovací síly byla stanovena velikost 500 kN/m. Tato hodnota nebyla překročena v žádném z použitých nástrojů a lze tedy konstatovat, že nehrozí žádné riziko zničení nástroje z důvodu nadměrného zatížení.

➤ Odpružení

Celková deformace materiálu při ohýbání je tvořena plastickou a elastickou složkou deformace, kdy elastická složka způsobuje odpružení. V důsledku pružnosti materiálu dochází ke změně požadovaných úhlů ohybu na vyráběné součásti. Odpružení bude počítáno dle vztahu (2.1) pro matici tvaru „V“. Optimální velikost rozevření matice bylo stanoveno jako $w = 20 \text{ mm}$. Hodnota meze kluzu byla určena z tab. 8 jako $R_e = 323 \text{ MPa}$. Modul pružnosti pro běžné ocelové materiály je $E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$. Součinitel pro určení polohy neutrální osy $k = 1 - x = 1 - 0,482 = 0,518$. Z uvedeného vztahu pro výpočet úhlu odpružení je patrné, že jeho velikost není závislá na úhlu požadovaného ohybu. Z toho důvodu bude odpružení pro každý ohyb stejné.

$$tg\beta = 0,375 \cdot \frac{w}{k \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} = 0,375 \cdot \frac{20}{0,518 \cdot 4} \cdot \frac{323}{2 \cdot 10^5} = 5,846 \cdot 10^{-3}$$

$$\beta = \arctg(5,846 \cdot 10^{-3}) = 0,335^\circ = 0^\circ 20' 6''$$

Vypočtená hodnota odpružení je velmi malá, ale i přesto je třeba na ni dát pozor, a to především u vícenásobných ohybů na součásti, kdy se tyto úhly sčítají a na konci mohou dostatečně ovlivnit výsledný tvar. Vypočtená hodnota je pouze informativní. Přesná velikost bude určena operátorem přímo na ohraňovacím stroji. Jednou z možností určení velikosti pružného úhlu je použití zkušebních vzorků pro konkrétní ohyb. Další z používaných možností je provedení ohnutí přímo na vyráběné součásti a změření výsledného úhlu ohybu. Podle toho, o kolik se bude lišit oproti zadanému, se změní výrobní úhel a součástka se vytvaruje znovu. Z důvodu provedení veškerých ohybů volným ohýbáním bude korekce provedena zvětšením úhlu ohnutí každé části o velikost odpružení.

3.9 Volba ohraňovacího stroje [2], [20], [21], [32]

Ohraňovací stroj bude zvolen na základě splnění podmínek pro nejsložitější ohyb, který se určuje na základě největší délky ohybu a maximální potřebné síly pro ohyb vyráběné součásti. Z hodnot uvedených v tab. 12 vyplývá, že maximální délka ohybu je 420 mm a maximální síla pro tento ohyb je 210,25 kN. Dalším důležitým kritériem pro výběr stroje je jeho pracovní prostor při výrobě rozměrných součástek a tloušťka tvářeného materiálu, která je 4 mm. Výrobní společnost je vybavena strojem pro ohraňování. Jedná se o hydraulický lis Baykal s označením APHS 3110x180 (obr. 76). Jeho pracovní délka je 3 100 mm a výška 180 mm, jak vyplývá z označení. Jmenovitá ohraňovací síla je 180 t, což je v přepočtu 1 766 kN. Zbylé parametry lisu jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Technické parametry ohraňovacího stroje Baykal APHS 3110x180 [20]

Jmenovitá síla [kN]	1 766	Hmotnost stroje [kg]	10 000
Pracovní délka [mm]	3 100	Nosnost ohybníku [kg]	60
Příkon [V/Hz/Ph]	400/50/3	Nosnost matrice [kg]	100
Výkon motoru [kW]	15	Šířka stroje [mm]	3 800
Tvářecí tlak [bar]	240	Délka stroje [mm]	1 850
Maximální zdvih [mm]	260	Výška stroje [mm]	2 800

Při porovnání potřebné tvářecí síly a prostoru je patrné, že ohraňovací stroj, který je součástí strojového parku společnosti, bude dostačující. Hydraulické stroje jsou schopny vytvořit mnohem větší ohraňovací sílu než servo-elektrické stroje, a proto jsou více používány pro ohyby větších tloušťek materiálu. Jediná nevýhoda tohoto stroje by mohla nastat v případě ohybu rozměrné součástky, kdy by se začala projevovat nepřesnost ohybu po celé délce a bylo by nutné použít bombírovací systém, který není součástí tohoto stroje. Pro rozměrově podobné součástky jako je zadaná není tento vliv patrný.



Obr. 76 Hydraulický ohraňovací stroj Baykal APHS 3110x180 [20]

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Aby bylo možné posoudit výhodnost výroby a jejích změn, je nutné provést technické a ekonomické zhodnocení. Jedná se tedy o výpočty nákladů spojených s výrobou dané součástky navrženou technologií a zhodnocení vyrobiteľnosti součástky.

4.1 Technické zhodnocení

K výrobě zadané součástky byl zvolen stroj od společnosti BAYKAL, který plně vyhovuje požadavkům pro výrobu. Stroj disponuje tvářecí silou 1 800 kN, která je dostatečná pro vytvoření každého ohybu. Bylo ovšem nutné oproti prvotnímu návrhu posunout osu posledního ohybu o 5 mm směrem do středu součástky, a to z důvodu uchycení polotovaru do nástroje a dotlačení k dorazům. Při simulacích bylo zjištěno, že by mohla hrana součástky poničit matrici nebo by se mohla součástka zaseknout ve stroji, kdyby nebyl zajištěn požadovaný úhel ohybu. Z funkčního hlediska tato změna neovlivní správný chod kamen. Při zhodnocení vyrobiteľnosti vzhledem k technickým parametrům bylo ověřeno, že výroba zadané součástky je uskutečnitelná bez komplikací.

4.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení je ukazatel hranice mezi ztrátovou výrobou a dobou, kdy začíná být výroba zisková. Hlavním ukazatelem je bod zvratu, který rozděluje zmíněné dva stavy. Mezi parametry, které ovlivňují ziskovost výroby, se řadí velikost výrobní série, náklady na pořízení stroje a další činitelé.

➤ Náklady na materiál

Jedná se o náklady spojené s nákupem materiálu a jeho využitelnosti. Mezi tyto náklady se řadí také úprava materiálu, jako řezání na požadované rozměry, atd. K výrobě byl zvolen kotlový plech oceli 11 416, který bude dodáván jako tabule plechu o rozměrech 4 x 3000 x 1500 mm.

Počet tabulí pro n_{tab} výrobní série $Q = 200$ ks/rok, při počtu 15 kusů výpalků z jedné tabule plechu činí:

$$n_{tab} = \frac{Q}{i_t} = \frac{200}{15} = 13,3 \text{ ks} \quad (4.1)$$

Pro dodržení roční výrobní série bude zapotřebí zakoupení 14 kusů tabulí plechu. Hmotnost plechů m_p se stanoví na základě výrobní série, počtu tabulí a hustoty oceli $\rho_{ocel} = 7850 \text{ kg.m}^{-3}$ následovně:

$$m_p = s \cdot C \cdot D \cdot \rho_{ocel} \cdot n_{tab} = 0,004 \cdot 3 \cdot 1,5 \cdot 7850 \cdot 14 = 1\,978,2 \text{ kg} \quad (4.2)$$

Celková cena plechu C_p při ceně 1 kg plechu $C_{pkg} = 21,94$ Kč, je:

$$C_p = C_{pkg} \cdot m_p = 1978,2 \cdot 21,94 = 43\,402 \text{ Kč} \quad (4.3)$$

Hmotnost odpadu m_o je stanovena dle nevyužitého materiálu:

$$m_o = m_p \cdot \frac{100 - \mu}{100} = 1\,978,2 \cdot \frac{100 - 74,7}{100} = 500,5 \text{ kg} \quad (4.4)$$

Výkupní cena odpadu C_o byla stanovena dle ceny jednoho kilogramu odpadu $C_{okg} = 4,50$ Kč, na:

$$C_o = C_{okg} \cdot m_o = 4,50 \cdot 500,5 = 2\,252 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

Celkové náklady na materiál N_{cmat} jsou:

$$N_{cmat} = C_p - C_o = 43\,402 - 2\,252 = 41\,150 \text{ Kč} \quad (4.6)$$

Náklady na materiál výroby jedné součástky N_{M1} jsou:

$$N_{M1} = \frac{N_{cmat}}{Q} = \frac{41\,150}{200} = 205,75 \text{ Kč} \quad (4.7)$$

➤ Náklady na nástroje

Z důvodu použití ohraňovacích nástrojů dostupných ve výrobní společnosti není nutné provádět nákup nových. Tím lze stanovit, že náklady na nákup nástrojů jsou nulové. Značnou výhodou je podstatné snížení výrobních nákladů a tedy i snížení ceny vyrobitelnosti a následného prodeje zákazníkovi.

$$N_{cnas} = 0 \text{ Kč} \quad (4.8)$$

➤ Náklady na vyřezání polotovaru laserem

Vzhledem k faktu, že společnost Brabenec s.r.o. nedisponuje žádným strojem s možností řezání laserovým paprskem, bude tato část výroby prováděna v kooperaci s jinou společností. Ta bude vybrána dle cenové nabídky, na které se obě strany shodnou. Cena jednoho metru přímého řezu je 30 Kč. Při uvážení ceny zápalu, tvorby děr a tvar výsledného výpalku, lze stanovit průměrnou cenu jednoho metru řezu na $N_{1mřez} = 40$ Kč. Vzhledem ke stanovenému obvodu součástky dle programu Solidworks 2014, kdy délka řezu je $l_{řez} = 2,5$ m, bude cena jednoho výpalku:

$$N_{c1vyp} = l_{řez} \cdot N_{1mřez} = 2,5 \cdot 40 = 100 \text{ Kč} \quad (4.9)$$

Cena vypálení celé výrobní série bude:

$$N_{cvyp} = Q \cdot N_{c1vyp} = 200 \cdot 100 = 20\,000 \text{ Kč} \quad (4.10)$$

➤ Náklady na provoz ohraňovacího stroje BAYKAL

Jedním z důležitých parametrů pro výpočet nákladů stroje je stanovení pracovní doby, která je ve výrobní společnosti $t_{ssm} = 7,5$ hodiny na jednu pracovní směnu. Pracovní doba bude rozdělena na výrobní čas a čas přípravy. Velikost výrobního času byla stanovena na $t_{VS} = 6,5$ hodiny. Zbylou část pracovní doby tvoří příprava stroje, nastavení dorazů, ohnutí zkušební vzorku pro kompenzaci úhlu odpružení, příprava nástrojů a zadání dat do řídicího systému. Doba přípravného času byla stanovena na $t_{PS} = 0,5$ hod. Při ohýbání je nutné také vyhotovené součástky kontrolovat, a proto bude zařazen do pracovní doby ještě čas kontroly $t_{KS} = 0,5$ hodiny, kdy se bude kontrolovat dosažený úhel ohybu a případné trhliny z vnější strany ohybu.

Vzhledem k velikosti a hmotnosti polotovaru lze stanovit, že proces ohybu může ovládat jeden pracovník. Čas na založení polotovaru a provedení jednoho ohybu byl s ohledem na uvedené skutečnosti stanoven na hodnotu $t_{s1o} = 0,5$ minuty.

Z těchto skutečností lze spočítat počet vyrobených součástí za jednu směnu n_{s1s} za předpokladu, že jedna součást obsahuje 4 ohyby $n_{oh1s} = 4$.

$$n_{s1s} = \frac{t_{VS} \cdot 60}{n_{oh1s} \cdot t_{s1o}} = \frac{6,5 \cdot 60}{4 \cdot 0,5} = 195 \text{ ks} \quad (4.11)$$

Počet směn potřebných na vyrobení jedné série na ohraňovacím lise:

$$n_{SSS} = \frac{Q}{n_{s1s}} = \frac{200}{195} = 1,026 \text{ směny} \quad (4.12)$$

Vzhledem k tomu, že vyrobení jedné série zabere jednomu pracovníkovi jednu směnu a malou část směny druhé, je vhodné výrobní dobu přepočítat na výrobní hodiny. Zároveň je nutné uvažovat, že příprava stroje zabere vždy 0,5 hodiny a zbylé úkony jsou závislé na počtu vyrobených kusů:

$$n_{hss} = t_{ps} + n_{SSS}(t_{VS} + t_{KS}) = 0,5 + 1,026(6,5 + 0,5) = 7,7 \text{ hod} \quad (4.13)$$

Výše nákladů na jednu hodinu práce na ohraňovacím lise BAYKAL APHS 3110x180 včetně nákladů na mzdy zaměstnanců a energie ve společnosti Brabenec s.r.o. je stanovena na hodnotu $N_{1hs} = 900$ Kč/hod. Náklady na výrobu celé série na ohraňovacím lise tedy jsou:

$$N_{CS} = n_{hss} \cdot N_{1hs} = 7,7 \cdot 900 = 6\,930 \text{ Kč} \quad (4.14)$$

➤ Celkové náklady a výsledná cena jedné součástky

Celkové náklady budou vypočteny vzhledem k roční sérii z celkové ceny materiálu, ceny nástrojů, ceny kooperací a ceny provozu stroje:

$$\begin{aligned} N_{Cser} &= N_{Cmat} + N_{Cnas} + N_{Cvyp} + N_{CS} = \\ &= 41\,150 + 0 + 20\,000 + 6\,930 = 68\,080 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Celková cena jedné součásti:

$$C_{c1} = \frac{N_{Cser}}{Q} = \frac{68\,080}{200} = 340,4 \text{ Kč} \quad (4.16)$$

Celkové náklady výrobní série s uvažováním zisku 20%:

$$N_{CserZ} = N_{Cser} \cdot 1,2 = 68\,080 \cdot 1,2 = 81\,696 \text{ Kč} \quad (4.17)$$

Celková cena jedné součásti s uvažovaným ziskem 20%:

$$C_{c1Z} = \frac{N_{CserZ}}{Q} = \frac{81\,696}{200} = 408,50 \text{ Kč} \quad (4.18)$$

Celkový čistý zisk z jedné vyrobené součástky:

$$C_{\check{z}1s} = C_{C1Z} - C_{C1} = 408,5 - 340,4 = 68,10 \text{ Kč} \quad (4.19)$$

Celkový čistý zisk z celkové výrobní série:

$$C_{\check{z}ser} = C_{\check{z}1s} \cdot Q = 68,1 \cdot 200 = 13\,620 \text{ Kč} \quad (4.20)$$

V porovnání s původními součástkami, které byly díky inovaci nahrazeny za jednu plnohodnotnou, kdy původní výrobní cena C_{pc1} byla 465 Kč, lze vypočítat rozdíl mezi cenou nové součástky a cenou původních součástek. Nutné je ovšem podotknout, že byla provedena změna tvaru a materiálu tak, aby byly dodrženy všechny požadavky na funkci a součástka tak byla plně zaměnitelná bez dalších úprav.

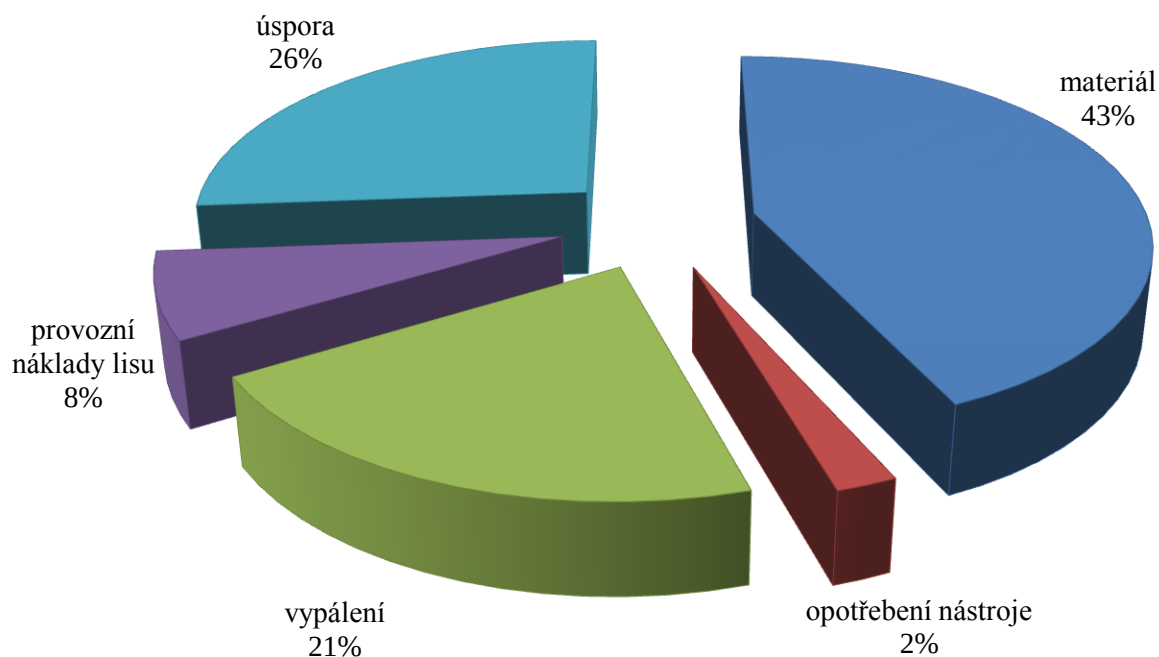
Celkové ušetřené náklady na jedné součástce bez ohledu na zisk jsou:

$$C_{up1} = C_{C1} - C_{pc1} = 465 - 340,4 = 124,60 \text{ Kč} \quad (4.21)$$

Celkové ušetřené náklady na výrobní sérii bez ohledu na zisk jsou:

$$C_{up} = C_{up1} \cdot Q = 124,6 \cdot 200 = 24\,920 \text{ Kč} \quad (4.22)$$

Zobrazení celkové ceny nové součástky, kde je zahrnuta také úspora oproti původnímu řešení (graf 3).



Graf 3 Náklady navržené součástky dle výrobních částí

5 ZÁVĚRY

Řešená součástka je část krbové vložky – víko, tvořící vrchní díl opláštění proti úniku spalin do okolí. Zároveň slouží jako pevná část pro přivaření výměníku nebo držáků šamotu. Jako vstupní materiál je použita konstrukční ocel 11 416. Jedná se o plechový díl o rozměrech vstupního polotovaru 578 x 420 mm, který se bude vyrábět v sérii 200 kusů za rok.

Vzhledem k nutnosti minimálních nákladů na výrobu spojených s ideálním tvarem součásti, byly zhodnoceny možné technologie výroby, ze kterých byly vybrány ty, jež má výrobní společnost Brabenec s.r.o. k dispozici. Na základě provedeného rozboru byla jako nejvhodnější vybrána metoda ohraňování. Za účelem nalezení ideálního polotovaru byly provedeny potřebné kontrolní a technologické výpočty. Dle vypočítaného rozvinutého tvaru byla jako nejvhodnější z hlediska využitelnosti zvolena tabule plechu o rozměrech 3000 x 1500 x 4 mm a hmotnosti 141,3 kg, ze které se bude polotovar řezat laserem. Při porovnání s jinými rozměry tabulí plechu vyšla zmíněná velikost nejvýhodněji, a to s využitím 74,7 %. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně řezacího stroje je pro společnost výhodnější variantou dodávka polotovaru externí firmou, a to v závislosti na nabídce.

Z technologických výpočtů vyplývá, že součástku je třeba vyrobít na čtyři operace. Rozměry součástky byly zvoleny tak, aby veškeré operace bylo možné provádět prostřednictvím jednoho stroje a stejných nástrojů, čímž se urychlí výroba. Potřebná síla pro vytvoření ohybů je závislá na délce ohýbané plochy a činí 500 kN/m. Pro technologii byl navržen hydraulický ohraňovací lis se jmenovitou silou 1800 kN, který je dle svých parametrů pro navrženou součást vyhovující. Byly provedeny kontrolní simulace pro zjištění napětí a deformací na materiálu a nástrojích při procesu, jimiž byly ověřeny kontrolní teoretické výpočty, které se s výsledky simulací shodují.

V technicko-ekonomické části bylo provedeno zhodnocení výroby součástky, kdy za předpokladu pravidelných kontrol, lze díl vyrábět. V ekonomické části byly provedeny orientační výpočty zahrnující náklady na materiál, vypálení, nástroje, provoz stroje a případný zisk. Z nich byla stanovena celková výrobní cena jedné součástky, která činí 340,40 Kč. Tato hodnota bude ještě v praxi navýšena dle potřeb výrobní společnosti. Ze známých hodnot výpočtu je zřejmé, že výroba se stává výdělečnou již od začátku, protože výrobní cena oproti původní klesla o 26%.

S jistotou lze říci, že dle navržených technologií, doložených výpočtů a praktického ověření, je možné součástku zavést do výroby.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. *Citace PRO* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>
2. Akademie tváření: Technologičnost konstrukce při ohýbání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technologicnost-konstrukce-pri-ohybani.html>
3. CNC Ohraňování plechu. In: *CNC zpracování plechu v průmyslu* [online]. 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.ohranovaniplechu.cz/>
4. *EUROSTAMP* [online]. Piacenza, 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.eurostamp srl.it/catalog/catalog-2015.html>
5. *EWM HIGHTECH WELDING* [online]. Mündersbach, 2010 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.ewm-group.cz/rootarc/>
6. *FLOWTECH* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.flowtech.cz/postupovy-lisovaci-nastroj-2/>
7. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
8. FREMUNT, P., J. KREJČÍK a T. PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli* (odborná kniha). 1. vyd. Brno: Dům techniky. (1994). 230 s.
9. HORÁČEK, Martin. *Výroba tenkostěnných profilů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://server.kdk.fce.vutbr.cz/Frvs/414_2012/vyroba.html. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Martin Horáček.
10. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 3rd ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2007. ISBN 0521881218.
11. *HP Corse.: Hydroform* [online]. Bologna, 2013 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.hpcorse.com/en/hydroform?setprovenence=ue>
12. *Jakosti ocelí* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
13. KLÍBER, Jiří. *Základy tváření kovů*. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 9788024817941.
14. LENFELD, Petr. *Technologie II*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 8073720205.
15. *Manuál k úspěchu* [online]. Kyjov, 2013 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.manualkuspechu.cz/index.php/strojirenstvi>
16. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I: Plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Technická 2, Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického Brno, (1992). ISBN 80-214-0404.
17. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.

18. Ocel ČSN 11416. *T-PROM* [online]. Pardubice, 2009 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.tprom.cz/wiki/ocel/11416>
19. Ohraňovací lis iBend. *Stroje, nástroje, zariadenia* [online]. Rosina, 2007 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://stroje-naradie.sk/firmy/stroje/258/?zobrazenie-&idfirmy=258&zapisat=nie&nazov1=4768&nazov2=13110&prezentaciaklienta>
20. Ohraňovací lisy. *BAYKAL Machine tools* [online]. 2016 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.atlanticmachinerysales.com/assets/baykal/Baykal%20Katalog%202008-20092.pdf>
21. Ohýbání. *Bystronics Czech Republic* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://www.bystronic.cz/cs/produkty/ohranovaci_lisy/
22. Ohýbání. *TRUMPF Česká republika* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/ohybani.html>
23. PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. Úvod do tváření II. [s.l.] : [s.n.], (2001). 2 sv. (161, 115 s.).
24. Ruční ohýbačka plechu HSBM 610 HS. *První hanácká BOW* [online]. Olomouc, 2005 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.bow.cz/produkt/3772610-mobilni-ohybacka-plechu-hsbm-610-hs/>
25. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. Speciální technologie tváření. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, (2010-2011), 2 sv. (134, 155 s.). ISBN 978-80-214-4406-52.
26. Servo mechanický ohraňovací lis SAFAN® E-Brake: Uživatelský manuál. *Safan AB*Lochem The Netherlands, 2004.
27. Strojírenství. In: *Wikipedie* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Stroj%C3%ADrenstv%C3%AD>
28. TOKOZ. In: *TOKOZ* [online]. Žďár nad Sázavou, 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.tokoz.cz/lisovani-plechu>
29. Upínání rolleri. *ROLLERI profesionální ohraňování* [online]. Slaný, 2013 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.rolleri.it/mod/Up%C3%ADn%C3%A1n%C3%AD+Rolleri/Syst%C3%A9m+ROL3+pro+razn%C3%ADky-CZ.htm?id=4131>
30. WOLBERG, Lewis R. *The practice of psychotherapy: 506 questions and answers*. New York: Brunner/Mazel, c1982. ISBN 08-763-0290-8.
31. *Značka ocelí DIN - EN - ČSN* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.salzgitter.cz/index.php?page=33>
32. *Želetavská kamna* [online]. Želetava, 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.zeletavska-kamna.cz/o-nas/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
1a	oblast pružné deformace	[mm ²]
1b	oblast pružné deformace	[mm ²]
2a	oblast plastické deformace	[mm ²]
2b	oblast plastické deformace	[mm ²]
A	tažnost	[%]
A _{ov}	ohraňovací práce pro ohyb V	[J]
b	tloušťka materiálu	[mm]
b ₂	šířka ohnutého materiálu	[mm]
C	délka tabule plechu	[mm]
c ₃	součinitel kompenzace zpevnění a směru vláken	[-]
C _{c1}	celková cena jedné součásti	[Kč]
C _{c1z}	celková cena jedné součásti se ziskem	[Kč]
C _{čz1s}	čistý zisk z jedné vyrobené součásti	[Kč]
C _{čzser}	čistý zisk z vyrobení série	[Kč]
C _o	cena odpadu	[Kč]
C _p	cena plechu	[Kč]
C _{up}	ušetřené náklady na sérii	[Kč]
C _{up1}	ušetřené náklady na jedné součásti	[Kč]
D	šířka tabule plechu	[mm]
E	modul pružnosti	[MPa]
E	mezera mezi díly při pálení	[mm]
f	součinitel tření	[-]
F	mezera od kraje plechu při pálení	[mm]
F _m	maximální tahová síla při trhací zkoušce	[N]
F _{oh}	ohraňovací síla pro jeden metr	[kN/m]
F _{ov}	ohraňovací síla pro ohyb V	[N]
h _r	dráha razníku	[mm]
i _p	počet výpalků z pásu	[ks]
i _t	počet výpalků z jedné tabule	[ks]
k	součinitel určující polohu neutrální osy	[mm]
K	krok pálení dílů podélně	[mm]
l ₁	délka krajního prodlouženého vlákna	[mm]
l ₂	délka krajního stlačeného vlákna	[mm]
L _c	délka rozvinutého tvaru	[mm]
l _i	délky rovinných úseků	[mm]
l _j	délky ohnutých úseků	[mm]
l _o	délka ohnutého úseku v neutrální ploše	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
L_o	délka měřených bodů před trhací zkouškou	[mm]
l_{ohr}	délka ohybu	[mm]
$l_{řez}$	délka řezu	[mm]
L_u	délka měřených bodů po trhací zkoušce	[mm]
M	krok pálení dílů příčně	[mm]
m_o	hmotnost odpadu	[kg]
m_p	hmotnost plechů v sérii	[kg]
m_v	koeficient zaplnění pracovního diagramu	[-]
N_{1hs}	náklady na jednu hodinu práce na stroji	[Kč]
$N_{1mřez}$	cena metru řezu	[Kč]
N_{c1vyp}	cena jednoho výpalku	[Kč]
N_{cmat}	náklady na materiál	[Kč]
N_{cnas}	náklady na nástroje	[Kč]
N_{cs}	náklady na výrobu série	[Kč]
N_{cser}	celkové náklady na výrobu série	[Kč]
N_{cserz}	celkové náklady na výrobu série se ziskem	[Kč]
N_{cvyp}	cena vypálení série	[Kč]
n_{hss}	počet výrobních hodin směny	[hod]
N_{m1}	náklady na materiál jedné součástky	[Kč]
n_{oh1s}	počet ohybů na součásti	[ks]
n_p	počet pásů z tabule	[ks]
n_{s1s}	počet vyrobených součástí za směnu	[ks]
n_{sss}	počet směn na výrobu série	[směna]
n_{tab}	počet tabulí na sérii	[ks]
Q	počet kusů v sérii	[ks]
R_1	poloměr ohybu krajního stlačeného vlákna	[mm]
R_{1max}	maximální poloměr ohybu	[mm]
R_{1min}	minimální poloměr ohybu	[mm]
R_2	poloměr ohybu krajního prodlouženého vlákna	[mm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_o	poloměr ohybu	[mm]
R_{p2}	mez kluzu při trhací zkoušce	[MPa]
s_1	tloušťka ohnutého materiálu	[mm]
S_o	průřez vzorku pro trhací zkoušku	[mm ²]
T	doba do přetržení vzorku	[s]
t_{ks}	kontrolní čas	[hod]

Označení	Legenda	Jednotka
t_{ps}	přípravný čas	[hod]
t_{s1o}	čas jednoho ohybu	[min]
t_{ssm}	doba pracovní směny	[hod]
t_{vs}	výrobní čas	[hod]
w	vzdálenost mezi opěrami matrice	[mm]
x	součinitel posunutí neutrální plochy	[-]
z_r	součinitel rozšíření průřezu	[-]
z_z	součinitel ztenčení průřezu	[-]
Označení	Legenda	Jednotka
α	úhel ohybu	[°]
β	úhel odpružení	[°]
ΔL	prodloužení vzorku	[mm]
ε_1	deformace v ose x	[-]
ε_{1max}	maximální poměrné přetvoření	[-]
ε_{1min}	minimální poměrné přetvoření	[-]
ε_2	deformace v ose y	[-]
ε_3	deformace v ose z	[-]
μ	využitelnost tabule plechu	[%]
ρ	poloměr neutrální plochy	[mm]
ρ_n	poloměr ohybu neutrální vrstvy	[mm]
ρ_{ocel}	hustota oceli	[kg/m ³]
σ	napětí ve vzorku	[MPa]
σ_1	napětí v ose x	[MPa]
σ_2	napětí v ose y	[MPa]
σ_3	napětí v ose z	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady součástí vyrobených plošným tvářením.....	9
Obr. 2 Kamna u zákazníka	10
Obr. 3 Model krbové vložky.....	10
Obr. 4 Umístění víka vložky.....	11
Obr. 5 Model víka vložky.....	11
Obr. 6 Vysekávání	12
Obr. 7 Řezání vodním paprskem	13
Obr. 8 Princip řezání laserem	13
Obr. 9 Metoda Hydroform Obr. 10 Metoda Hydroform	14
Obr. 11 Metoda svařování	14
Obr. 12 Ruční ohýbací stroj.....	15
Obr. 13 CNC ohraňovací lis	15
Obr. 14 Průběh „V“ ohybu	16
Obr. 15 Schéma napjatosti a deformace	17
Obr. 16 Rozložení napětí při ohýbání.....	17
Obr. 17 Závislost ohybového momentu na křivosti s ukázkou odpružení	18
Obr. 18 Ohyb tvaru „U“ a „V“	18
Obr. 19 Kompenzace odpružení při volném ohybu.....	19
Obr. 20 Deformační schéma ohybu	19
Obr. 21 Poloměr neutrální osy.....	21
Obr. 22 Ohýbání do tvaru „V“.....	22
Obr. 23 Průběh tvářecí síly do tvaru „V“	23
Obr. 24 Dvoubodový ohyb	24
Obr. 25 Tříbodový ohyb	24
Obr. 26 Ohraňovací lis	25
Obr. 27 Ohybník	26
Obr. 28 Příklady přímých ohybníků	26
Obr. 29 Příklady lomených ohybníků.....	26
Obr. 30 Čtyřdutinová matrice (vlevo) a jednodutinová matrice (vpravo)	27
Obr. 31 Základní typy používaných matic	27
Obr. 32 Speciální tvarové nástroje	28
Obr. 33 Otevřené (vlevo) a uzavřené (vpravo) upínání.....	28
Obr. 34 Upínání matrice	28
Obr. 35 Celistvý nástroj (vlevo) a dělený nástroj (vpravo)	29
Obr. 36 Schéma hydraulického	29
Obr. 37 Elektrický pohon lisu.....	30
Obr. 38 Hydraulický pohon lisu	30
Obr. 39 Pružná deformace beranu	31
Obr. 40 Ovládací panel stroje	31

Obr. 41 Směry pohybů dorazů	32
Obr. 42 Schéma založení plechu	32
Obr. 43 Upnutí plechu nástrojem	32
Obr. 44 Ohraňování	33
Obr. 45 Návrat do výchozí polohy	33
Obr. 46 Vliv délky ramene	34
Obr. 47 Vliv směru vláken	34
Obr. 48 Vliv vzdálenosti otvoru od osy ohybu.....	34
Obr. 49 Model tvářené součásti.....	35
Obr. 50 Hydraulický zkušební stroj ZD40	36
Obr. 51 Upnutí vzorku do čelistí stroje	36
Obr. 52 Označené vzorky před zkouškou.....	37
Obr. 53 Zkušební vzorek po přetržení při měření Lu	37
Obr. 54 Vzorky po provedení trhací zkoušky.....	38
Obr. 55 Označení jednotlivých požadovaných úseků	41
Obr. 56 Rozvinutý tvar dle programu.....	42
Obr. 57 Schéma pálicího plánu dle podélného uspořádání	42
Obr. 58 Schéma pálicího plánu dle příčného uspořádání	43
Obr. 59 Popis postupu ohýbání v	44
Obr. 60 Délky dostupných nástrojů	45
Obr. 61 Matrice Eurostamp 3047	46
Obr. 62 Ohybík Eurostamp 1057.....	47
Obr. 63 Ohyb č. 1	47
Obr. 64 Pohled na ohyb č. 1	48
Obr. 65 Ohyb č. 2	48
Obr. 66 Pohled na ohyb č. 2	48
Obr. 67 Ohyb č. 3	49
Obr. 68 Pohled na ohyb č. 3	49
Obr. 69 Ohyb č. 4	49
Obr. 70 Pohled na ohyb č. 4	50
Obr. 71 Matrice Eurostamp 3017	50
Obr. 72 Deformace po odlehčení v ohybu 25°	51
Obr. 73 Deformace po odlehčení v ohybu 65°	52
Obr. 74 Deformace po odlehčení v ohybu 120°	52
Obr. 75 Simulace průběhu napětí při ohybu 120°	53
Obr. 76 Hydraulický ohraňovací stroj	55

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Ekvivalenty pro označení oceli 11 416	12
Tab. 2	Mechanické vlastnosti oceli 11 416	12
Tab. 3	Chemické složení oceli 11 416	12
Tab. 4	Součinitel „ c_3 “ pro různé materiály	20
Tab. 5	Součinitel rozšíření výchozího průřezu	21
Tab. 6	Hodnoty součinitele „ Z_z “ a součinitele „ x “	21
Tab. 7	Materiály pro výrobu nástrojů	25
Tab. 8	Výstupní hodnoty z tahové zkoušky	38
Tab. 9	Hodnoty rovinných úseků	41
Tab. 10	Vstupní hodnoty pro výpočet využití materiálu	42
Tab. 11	Využitelnost tabulí	44
Tab. 12	Naměřené a vypočtené hodnoty jednotlivých ohybů.	54
Tab. 13	Technické parametry ohraňovacího stroje Baykal APHS 3110x180	55

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1	Závislost napětí na prodloužení všech vzorků	39
Graf 2	Průměrná závislost napětí na prodloužení.....	39
Graf 3	Náklady navržené součástky dle výrobních částí.....	59

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/
Příloha č. 2	Závislost napětí na prodloužení vzorku 1
Příloha č. 3	Závislost napětí na prodloužení vzorku 2
Příloha č. 4	Závislost napětí na prodloužení vzorku 3
Příloha č. 5	Závislost napětí na prodloužení vzorku 4
Příloha č. 6	Závislost napětí na prodloužení vzorku 5

SEZNAM VÝKRESŮ

Vložka krbových kamen	DP-01-145298-01
Vložka krbových kamen	DP-01-145298-01-P

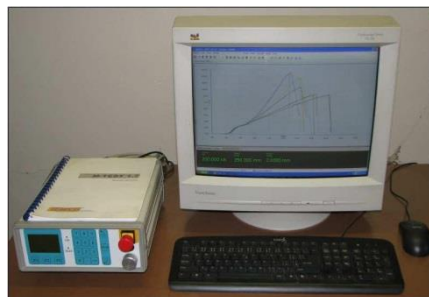
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: $8 \div 400$ kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. ± 1 % odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: $0 \div 280$ mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

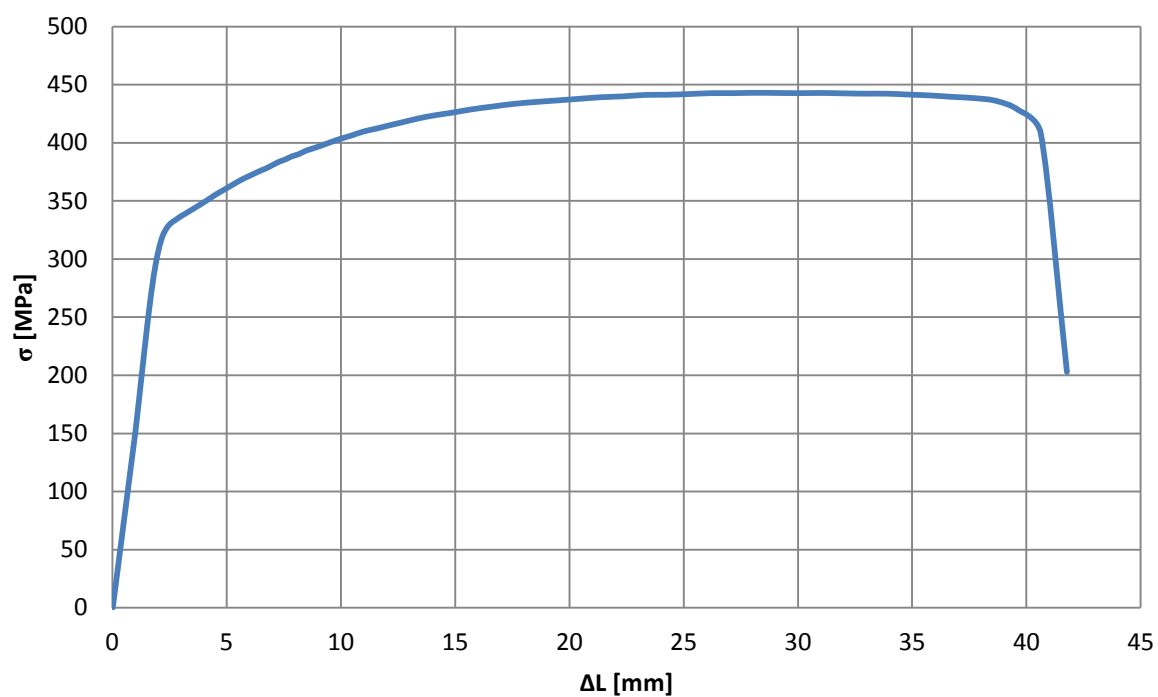
Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

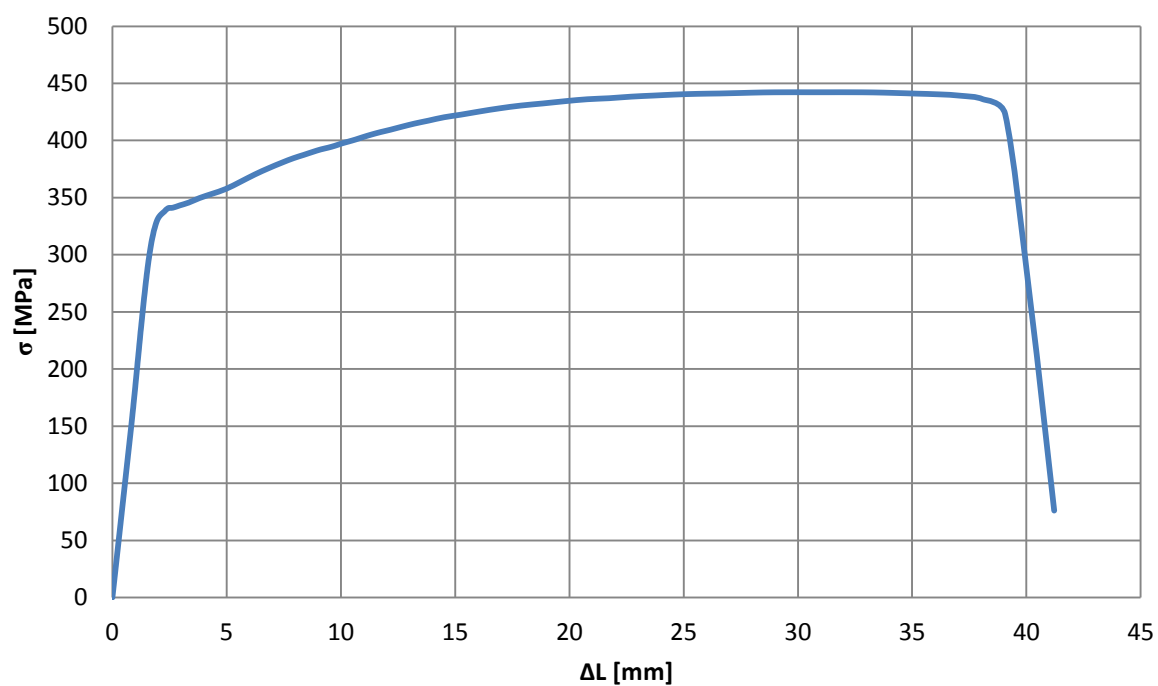
Příloha č. 2 Závislost napětí na prodloužení vzorku 1

1/1



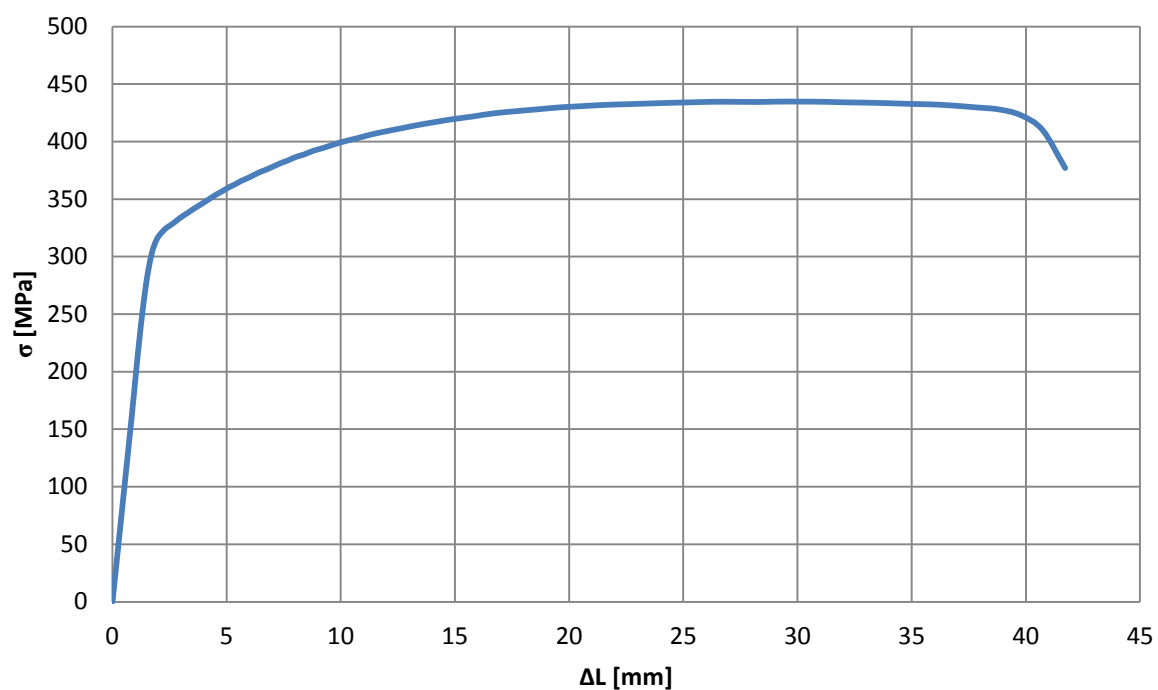
Příloha č. 3 Závislost napětí na prodloužení vzorku 2

1/1



Příloha č. 4 Závislost napětí na prodloužení vzorku 3

1/1



Příloha č. 5 Závislost napětí na prodloužení vzorku 4

1/1

