



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VYSEKÁVÁNÍ

PUNCHING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Králíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Peterková, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Václav Králíček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Eva Peterková, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Technologie vysekávání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie vysekávání je v poslední době velmi užívanou technologií výroby tvarově komplikovaných přístřihů z plechu opatřených zejména velkým množstvím otvorů či nástřihů. Ceněná je především pro její variabilitu, rychlost a dostupnost. Práce by měla zahrnovat princip vysekávání, přehled metod a užívaných nástrojů a strojů včetně jejich popisu. Na závěr práce bude zařazeno porovnání přesnosti výroby vybrané součásti z plechu zhotovené pomocí technologie vysekávání a řezání laserem.

Cíle bakalářské práce:

Popis principu vysekávání.
Přehled metod a užívaných nástrojů.
Přehled nepoužívanějších moderních strojů včetně popisu jejich možností a funkce.
Popis výhod a nevýhod, srovnání s konvenčním postupovým stříháním.
Příklady z praxe.
Porovnání přesnosti výroby součásti metodou vysekávání a řezání laserem.

Seznam doporučené literatury:

TSCHAETSCH, Heinz. Metal Forming Practise: Process - Machines - Tools. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 3-540-33216-2.

SCHULER GmbH. Handbuch der Umformtechnik. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. ISBN 3-540-61099-5.

KOTOUČ, Jiří, Jan ŠANOVEC, Jan ČERMÁK a Luděk MÁDLE. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1993, 349 s. ISBN 80-010-1003-1.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření I. 1. vyd. Brno: Vydavatelské oddělení UO, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na studii technologie vysekávání, tedy metodu výroby tvarově složitých přístřihů z tabulí plechu. Součástí je popis principů vysekávání, důraz je kladen na různé metody výroby, které lze realizovat na moderních vysekávacích lisech, a používané nástroje. V rámci práce jsou porovnány dvě technologie výroby přístřihů z tabulí plechu, a to konkrétně vysekáváním a laserovým řezáním. Vybrané dílce vyrábí firma ACO Industries k.s. z korozi-vzdorné oceli. Dílce jsou srovnány z hlediska rychlosti a přesnosti výroby, což jsou důležitá kritéria při volbě vhodné technologie.

Klíčová slova

plošné tváření, vysekávání, vysekávací lis, vysekávací nástroje, tabule plechu

ABSTRACT

The thesis is focused on punching technology, technology which can create complex-shaped parts from sheet metal. The thesis contains description of the principles of punching, emphasis is put punching tools and various production methods, which can be performed using modern punching machines. Part of this thesis is focused on comparison between punching technology and laser cutting. The comparison is shown on two different semi-finished products made from stainless steel by ACO Industries k.s. These semi-finished products are compared from the point of view of production accuracy and manufacture speed.

Key words

sheet metal forming, punching, punching press, punching tools, sheet metal

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁLÍČEK, Václav. *Technologie vysekávání* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139732>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Eva Peterková.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Technologie vysekávání vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 20.5.2022

Václav Králíček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval paní Ing. Evě Peterkové, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji přátelům a hlavně své rodině za podporu během studia. V neposlední řadě bych rád poděkoval firmě ACO Industries k.s. a především Ing. Vojtěchu Staňkovi za možnost realizace praktické části bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 TECHNOLOGIE VYSEKÁVÁNÍ.....	10
1.1 Princip vysekávání – stříhání	11
1.1.1 Fáze stříhání.....	12
1.1.2 Střížná síla a práce	12
1.1.3 Vzhled střížné plochy a střížná vůle.....	15
1.2 Metody vysekávání a nástroje	16
1.2.1 Děrování	17
1.2.2 Niblování	18
1.2.3 Dělení.....	20
1.2.4 Tváření.....	21
1.2.5 Odjehlování	23
1.2.6 Značení	24
1.3 Vysekávací lisy.....	26
1.4 Srovnání vysekávání s dalšími metodami	28
2 SROVNÁNÍ VYSEKÁVÁNÍ A LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ.....	30
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	36
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ a ZKRATEK.....	39
SEZNAM PŘÍLOH	40

ÚVOD

Důležitou technologickou operací při zpracování kovů je tváření. Tvářením získává materiál nejen tvar, ale i požadované vlastnosti. Produktivitou technologie tváření kovů překonává třískové obrábění. Metody výroby pomocí technologií tváření jsou vysoce efektivní, dosahují vysoké kvality výrobků a vzniká při nich minimum odpadu, nachází tak uplatnění především ve velkosériové výrobě. Tváření kovů aplikuje poznatky z různých vědních oborů, čímž se jedná o velice rozsáhlou a komplexní technickou disciplínu. Díky využití poznatků z chemie a fyziky mohou být nástroje opatřeny tenkými povlaky zlepšujícími jejich vlastnosti a prodlužujícími životnost, od povlaků zajišťujících vyšší tvrdost nástroje až po pórovité vrstvy zlepšující mazání. S rozmachem moderní výpočetní techniky je možné provádět simulace strojírenských procesů plošného a objemového tváření, nebo rozborů napjatosti a deformace pomocí metody konečných prvků. Díky počítačovým simulacím lze predikovat chování materiálu a předejít tak jeho porušení během tváření, nebo poškození tvářecího nástroje. Zejména ve velkosériové výrobě se uplatňují moderní numericky řízené stroje, které pracují samostatně téměř bez lidského zásahu. Lze je řadit do komplexních automatizovaných výrobních linek, čímž se výroba stává rychlejší a úspornější. [1; 11; 26]

Do technologií plošného tváření spadá ohýbání, tažení, tvarování a stříhání. Mezi nimi vyčnívá metoda stříhání. Je to jediná metoda plošného tváření, kde dochází k záměrnému porušení zpracovávaného materiálu. Polotovary pro technologii stříhání jsou plechové tabule nebo pásy plechu navinuté do svitku. Stříhání může sloužit pro přípravu polotovarů pro další zpracování, nebo vyrábět konečné produkty (obr. 1). V případě přesného stříhání nemusí být zapotřebí použití dokončovacích operací. Volba správné geometrie nástroje má vliv na kvalitu stříhu a rozměrovou přesnost výrobku. Technologií stříhání lze vyrábět například součásti pro automobilový průmysl, polotovary pro kuchyňské vybavení, krytování strojů, nebo komponenty pro elektrotechnický průmysl. Technologií, která kombinuje výše zmíněné metody plošného tváření a nachází široké uplatnění je technologie vysekávání. [1; 2; 11; 26]



Obr. 1 Díly zhotovené plošným tvářením [38].

1 TECHNOLOGIE VYSEKÁVÁNÍ

Vysekávání je jednou z metod plošného tváření za studena. Jedná se o metodu, kdy je nástroj v přímém kontaktu se zpracovávaným materiálem. Na rozdíl od jiných metod plošného tváření zde dochází k záměrnému porušení materiálu. Díky konstrukci strojů a nástrojů kromě střížných operací umožňují také tvářecí operace, které by jinak vyžadovaly použití další technologie (obr. 2). Lze tak vyrábět polotovary pro další zpracování, nebo hotové výrobky na jedno upnutí, což přináší úsporu jak časovou, tak i finanční. Moderní vysekávací stroje jsou vždy numericky řízené a programovatelné. Spolu s dalším příslušenstvím jako třeba automatické zakládání a vykládání dílů, třídění výrobků a odpadu, nebo s nástrojovým manipulátorem mohou tvořit celé automatizované výrobní linky schopné pracovat bez lidského zásahu. Na obrázku č. 3 je uvedena ukázka děrování tabule plechu na vysekávacím CNC stroji. [10; 11; 14; 15] Vysekávání je velice rychlou, produktivní a efektivní metodou výroby, která v sobě spojuje následující technologie [10; 11]:

- děrování – pro výrobu otvorů do tabulí plechu,
- vystřihování – zhotovení na sebe navazujících děr a vystřížení obrysu,
- tváření – lze realizovat protažení, osazení, lemy, nebo tvářet závitů,
- značení – zhotovení popisů dílů, značek, nebo log.



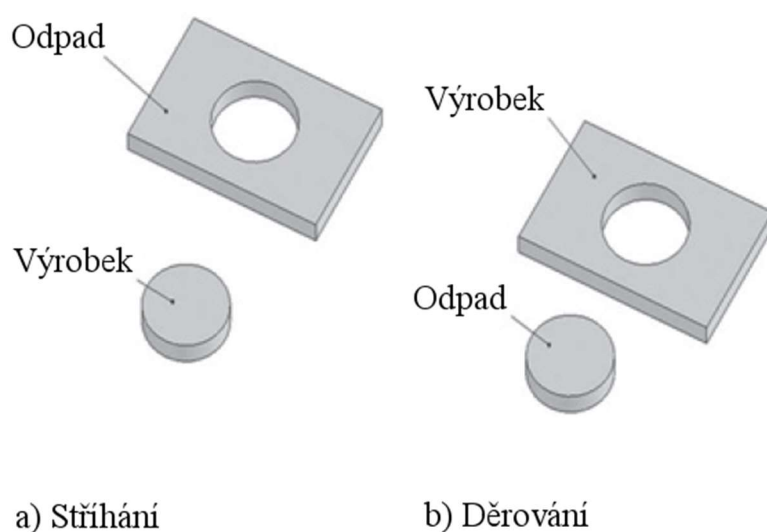
Obr. 2 Ukázka součástí zhotovených technologií vysekávání [37].



Obr. 3 Děrování tabule plechu na CNC vysekávacím lisu [10].

1.1 Princip vysekávání – stříhání

Vysekávání je ve své podstatě realizace procesu stříhání, a proto zde platí stejné zákonitosti jako u technologie stříhání. Jedná se o metodu beztržkového dělení materiálu podél křivky stříhu, kdy nástroj je v přímém kontaktu se zpracovávaným materiálem. Na rozdíl od jiných metod plošného tváření dochází k záměrnému porušení materiálu. Polotovary pro technologii stříhání jsou plechové tabule nebo pásy plechu navinuté do svitku. Stříhání může sloužit pro přípravu polotovarů pro další zpracování, nebo pro zhotovování součástí konkrétních tvarů a rozměrů. Volba správné geometrie nástroje má vliv na kvalitu stříhu a rozměrovou přesnost výrobku. Stříhání má jistá specifika, která je zapotřebí brát v potaz. Z podstaty procesu a rozdílných napětí v materiálu vnikají při stříhání deformace zpracovávaného materiálu, které se mohou projevit mikroskopicky zaoblením horní hrany materiálu a otláčením nástroje na spodní straně, nebo makroskopicky deformací celého dílce. Vznikající napětí a deformace je zapotřebí uvažovat při dalším zpracování dílů, jelikož mohou významně ovlivňovat tvařitelnost, materiál během stříhání zpevňuje. Rovněž střížná plocha není ideální a vykazuje menší či větší nepřesnosti, jelikož částečně vzniká plastickou deformací a částečně lomem. Kvalitu střížné hrany a rozměrovou přesnost výstřížků lze zvýšit přesným stříháním s nátlacnou hranou. V případě přesného stříhání nemusí být zapotřebí použití dokončovacích operací. Technologii stříhání lze vyrábět například součásti pro automobilový průmysl, polotovary pro kuchyňské vybavení, krytování strojů, nebo komponenty pro elektrotechnický průmysl. Při výrobě součástek, tzv. výstřížků anebo při výrobě otvorů v plechu se využívá střížných nástrojů, kde hlavními funkčními částmi jsou střížník a střížnice. Stříhaný materiál se nachází mezi střížníkem a střížnicí, k jeho oddělení dochází pomocí břitů nástroje za působení střížné síly. Střížná síla má vrůstající tendenci a maxima dosahuje v okamžiku začínajícího oddělování materiálu. Produktem stříhání je výstřížek, který propadá otvorem ve střížnici, tabule plechu je zde odpadem (obr. 4a). Při děrování je tomu naopak, tabule plechu je požadovaným produktem a vystřížený tvar odpadem (obr. 4b). Technologie vysekávání vychází z principu stříhání. Vysekávání ale nemusí znamenat jen děrování otvorů, může vystříhovat téměř libovolné kontury. Díky konstrukci strojů a nástrojů kromě střížných operací umožňují také tvářecí operace, které by jinak vyžadovaly použití další technologie. [1; 2; 3; 4; 5; 11; 26]

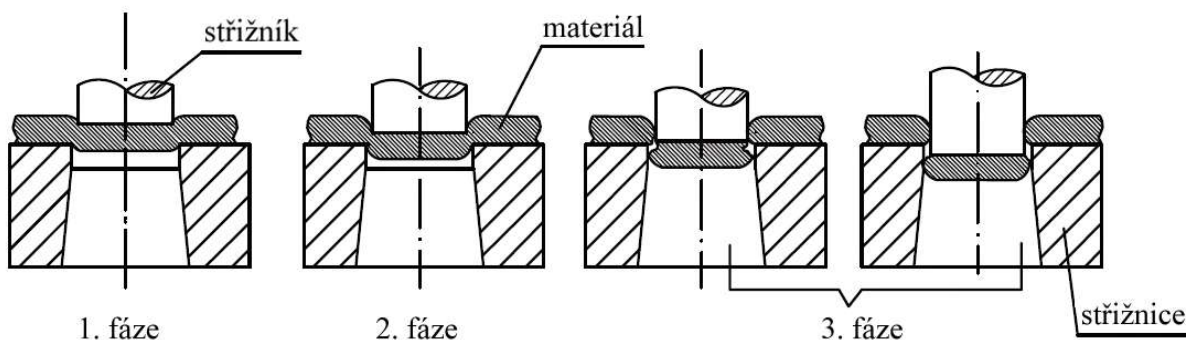


Obr. 4 Výrobek a odpad při stříhání a děrování [4].

1.1.1 Fáze stříhání

Stříhaný materiál se odděluje za současného vnikání dvou střížných hran u střížníku a střížnice. Dochází k současnému nebo postupnému oddělování materiálu podél křivky stříhu, podle toho, zda jsou použity rovnoběžné nebo skloněné břity. Silové působení střížných hran vyvolá smykové (střížné) napětí v materiálu. [5; 26] Stříhání lze rozdělit do tří fází, které jsou znázorněny na obr. 5 [3; 4; 5; 20; 26]:

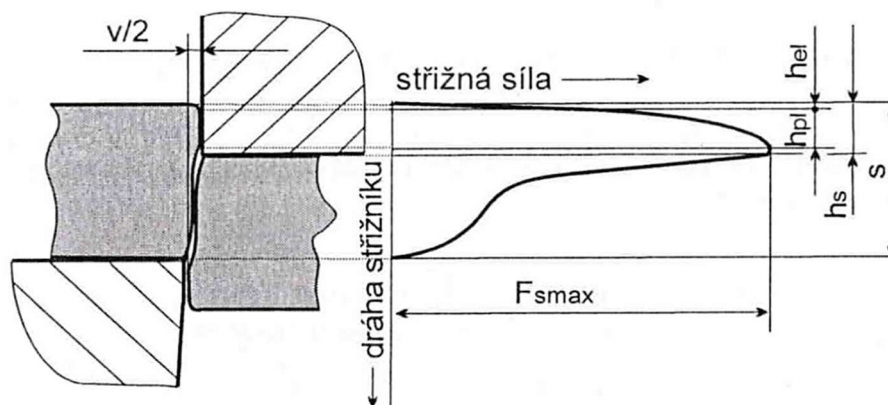
- První fáze – nastává po dosednutí střížníku na stříhaný materiál a nazývá se fází pružnou. Střížník vniká do povrchu, přičemž napětí je nižší než mez kluzu stříhaného materiálu, dochází pouze k jeho elastické deformaci. Hloubka vniknutí bývá $h_{el} = (5 - 8 \%)s$, kde s je tloušťka stříhaného materiálu, a závisí na mechanických vlastnostech. Dvojice sil mezi střížníkem a střížnicí způsobuje ohyb.
- Druhá fáze – bývá označována jako tvárná, napětí roste nad mez kluzu v tahu a dochází k plastické deformaci stříhaného materiálu a vzniku střížné plochy. V závislosti na mechanických vlastnostech materiálu je hloubka plastického vniknutí $h_{pl} = (10 - 25 \%)s$. Na konci tvárné fáze má napětí v blízkosti střížných hran velikost meze pevnosti stříhaného materiálu.
- Třetí fáze – je porušení a oddělení, ve které smykové napětí dosáhne meze pevnosti materiálu. Dochází ke vzniku trhlin a následnému oddělení materiálu. Místa iniciace trhlin se nachází na hraně střížníku na horní straně plechu a na hraně střížnice na spodní straně plechu. Trhliny se šíří podél skluzových rovin proti sobě, dokud nedojde k jejich spojení a úplnému oddělení výstřížku od plechu.



Obr. 5 Fáze střížného procesu [3].

1.1.2 Střížná síla a práce

Pro oddělení materiálu je zapotřebí síly, která způsobí napětí v materiálu vyšší než je jeho mez pevnosti. Nazývá se střížnou silou a její charakteristický průběh je zobrazen na obrázku 6. V elastické fázi stříhu dochází k prudkému nárůstu síly na dráze h_{el} , růst pokračuje i v oblasti plastického stříhu h_{pl} v důsledku deformačního zpevňování materiálu. Vznik prvních trhlinek je doprovázen mírným poklesem síly po hloubku vniknutí h_s . Následně dochází k úplnému porušení materiálu a výraznému poklesu síly. Její pokles není lineární, což je způsobeno třením při průchodu výstřížku střížnicí a třením mezi oddělenými plochami. [4; 20; 26]



Obr. 6 Průběh střížné síly podél dráhy stříhu [20].

Pro střížník s rovným čelem lze stanovit střížnou sílu dle vztahu [20]:

$$F_s = n \cdot S_s \cdot \tau_s = n \cdot l \cdot (s - h_s) \cdot \tau_s \cong n \cdot l \cdot s \cdot \tau_s, \quad (1.1)$$

- kde: n - koeficient zohledňující otupování střížných hran [-],
 $n = 1,1$ až $1,3$,
 S_s - střížná plocha [mm²],
 l - délka střížné hrany [mm],
 s - tloušťka stříhaného materiálu [mm],
 τ_s - pevnost materiálu ve stříhu [MPa].

Pro pevnost materiálu ve stříhu neboli střížný odpor platí přibližný vztah [20]:

$$\tau_s = 0,77 \cdot R_m, \quad (1.2)$$

- kde: R_m - mez pevnosti v tahu [MPa].

Síla potřebná k děrování může být redukována použitím střížníku se zkoseným ostrím, viz obr. 7. Nedochází ke stříhu celým obvodem střížníku zároveň, ale ostří vniká do materiálu postupně, čím se redukuje obsah střížné plochy i velikost střížné síly. Díky tomu lze pomocí nástrojů se zkoseným ostrím děrovat otvory větších rozměrů nebo materiály větší tloušťky, na které by jinak nedostačovala síla stroje. Úhly a výšky zkosení ostří se volí s ohledem na tloušťku stříhaného materiálu, hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. [3, 4]

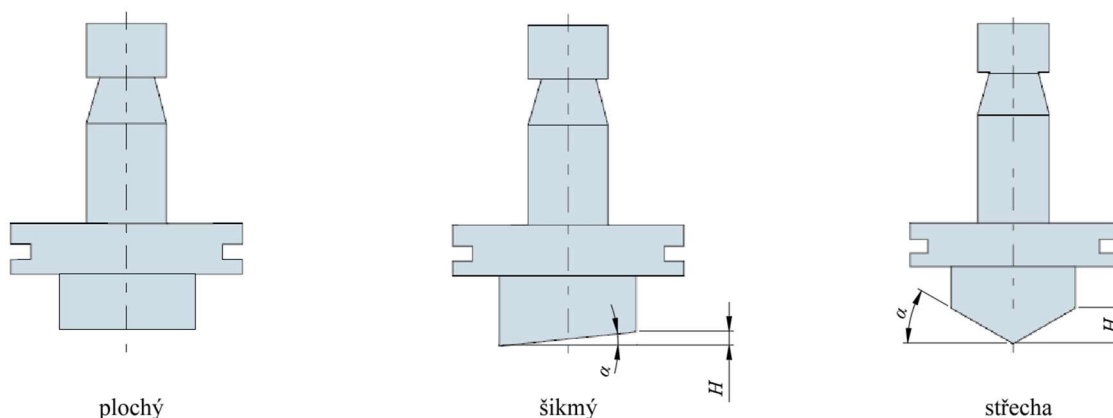
Tab. 1 Hodnoty zkosení šikmých střížníků [4].

tloušťka materiálu s [mm]	výška zkosení H [mm]	úhel zkosení α
≤ 3	$\leq 2 \cdot s$	$\leq 5^\circ$
> 3	s	$\leq 8^\circ$

Velikost střížné síly pro střížník se zkoseným čelem lze určit ze vztahu [4]:

$$F_s = k \cdot l \cdot s \cdot \tau_s, \quad (1.3)$$

- kde: k - koeficient zkosení [-],
 $k = (0,4$ až $0,6)$ pro $H = s$,
 $k = (0,2$ až $0,4)$ pro $H = 2s$.

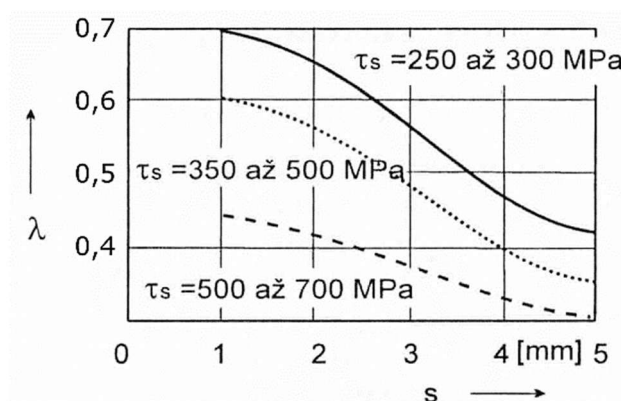


Obr. 7 Možnosti úpravy čel střížníků [10].

Velikost střížné práce lze určit jako plochu pod křivkou střížné síly dle vztahu [20]:

$$A_s = \lambda \cdot F_{smax} \cdot s, \quad (1.4)$$

kde: λ - součinitel plnosti diagramu [-] (obr. 8),
 F_{smax} - maximální střížná síla [N].

Obr. 8 Součinitel plnosti λ v závislosti na střížném odporu [20].

Vlivem pružné deformace má materiál po vystřížení tendenci ulpívat na střížníku, k jeho setření je zapotřebí vynaložit dodatečnou sílu F_t . Po oddělení zůstává výstřížek ve střížnici, k jeho protlačení je nutné vyvinout dodatečnou sílu F_p . Obě síly závisí na materiálových vlastnostech, střížné vůli, mazání a na tvaru a délce křivky stříhu, pro jejich výpočet lze použít následující zjednodušené vztahy [20]:

$$F_t = k_1 \cdot F_s, \quad (1.5)$$

kde: k_1 - koeficient závislý na tloušťce materiálu [-],
 $k_1 = 0,02$ až $0,08$ pro $s < 1$ mm,
 $k_1 = 0,06$ až $0,12$ pro $s = 1$ až 5 mm,
 $k_1 = 0,08$ až $0,15$ pro $s \geq 5$ mm.

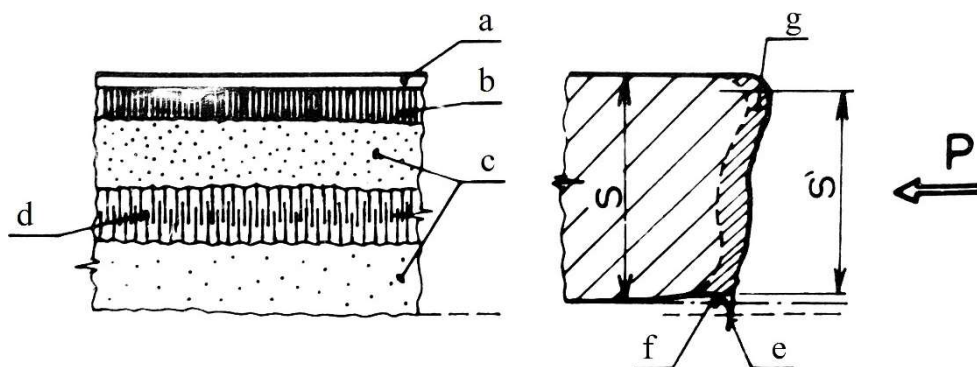
$$F_p = k_2 \cdot F_s \cdot n_2, \quad (1.6)$$

kde: k_2 - koeficient závislý na tloušťce materiálu [-],
 $k_2 = 0,05$ až $0,10$,
 n_2 - počet výstřížků nacházejících se v otvoru střížnice.

1.1.3 Vzhled střížné plochy a střížná vůle

Střížnou plochou se označuje místo, ve kterém došlo k oddělení materiálu. Na střížné ploše lze rozlišit různé oblasti v důsledku rozdílných způsobů deformací vyskytujících se v průběhu stříhání, viz obr. 9. Na poměr mezi jednotlivými oblastmi, respektive kvalitu a tvar střížné plochy, mají vliv zejména mechanické vlastnosti materiálu, střížná vůle, rychlost střížného procesu a stav stříhacího nástroje a jeho geometrie [1; 2; 3; 4; 5]. Na střížné ploše lze pozorovat následující oblasti [1; 2; 3; 4; 26]:

- Oblast zeslabení – vzniká v důsledku plastické deformace. Střížník je zatlačen do materiálu, dochází k jeho deformaci a pěchování (obráz. 9, oblast a).
- Pásmo plastického stříhu – je lesklá plocha vzniklá plastickým přetvořením způsobeného vnikáním střížníku do materiálu (obráz. 9, oblast b). Oblast plastického stříhu dosahuje nejvyšší kvality povrchu.
- Pásmo lomu – vzniká v důsledku smykového napětí, přesahujícího mez pevnosti materiálu, dochází k samovolnému oddělování stříhané části (obráz. 9, oblast c).
- Pásmo otěru – vzniká při návratu razníku do výchozí polohy (obráz. 9, oblast d).
- Otřep – vzniká na spodní hraně střížné plochy a je pro stříhání typický (obráz. 9, oblast e). Velikost otřepu je ovlivněna zvolenou střížnou vůlí.
- Vtisk dolního břitu (obráz. 9, oblast f).
- Oblast zpevnění – je projevem plastické deformace během procesu stříhání (obráz. 9, oblast g).



Obr. 9 Oblasti střížné plochy [4].

V důsledku plastické deformace je materiál v okolí střížné plochy zpevněn, což zhoršuje další tvařitelnost. Na spodní hraně zůstává viditelný vtisk dolního břitu. Střížná plocha vzniká z části lomem, proto i její kvalita bývá horší než u jiných metod dělení materiálu jako například řezání laserem, vodním paprskem nebo vyjiskřováním. Při stříhání je obecně snaha dosáhnout co největší oblasti plastického stříhu a malého otřepu. [1; 2; 3; 4]

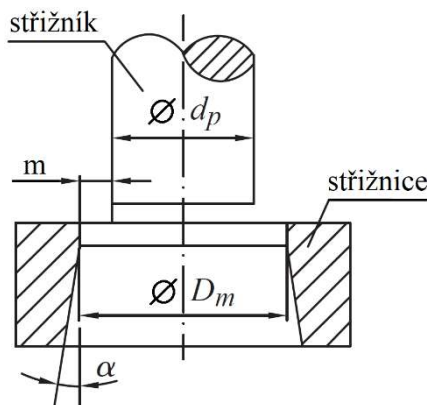
Důležitým faktorem ovlivňujícím kvalitu střížné plochy je střížná mezera, viz obrázek 10. Lze se setkat s pojmem střížná vůle v , což je dvojnásobek střížné mezery. Nedostatečná střížná vůle způsobuje sekundární stříh, kdy se postupující trhliny nesetkají. Dochází k nežádoucímu nárůstu střížné síly a střížné práce. Velké hodnoty střížné vůle způsobují široké pásmo plastické deformace, dochází k většímu zaoblení horní hrany a zvětšuje se otřep. Velikost střížné vůle ovlivňuje také zatížení střížníku a střížnice. Při malých hodnotách střížné vůle je rozložení zatížení mezi obě činné plochy poměrně rovnoměrné, při velkých mezerách jsou nejvíce zatíženy střížné hrany nástroje a dochází k jejich nadměrnému opotřebení nebo i vylamování. Optimální střížná vůle způsobí, že trhliny postupují přímo proti sobě a vzniká oblast čistého lomu. [1; 2; 3; 4]

Velikost optimální střížné mezery lze vypočítat dle vzorce [20]:

$$m = c \cdot s \cdot \sqrt{0,1 \cdot \tau_s} \text{ pro } s \leq 3 \text{ mm}, \quad (1.7)$$

$$m = (1,5 \cdot s - 0,015) \cdot \sqrt{0,1 \cdot \tau_s} \text{ pro } s > 3 \text{ mm}, \quad (1.8)$$

kde: c - koeficient volený podle požadavků na stříhání [-],
 $c = 0,005$ až $0,035$ ($c = 0,005$ pro nejvyšší jakost střížné plochy,
 $c = 0,035$ pro snížení střížné síly).



Obr. 10 Střížná mezera [4].

Na kvalitu střížné plochy má nezanedbatelný vliv i opotřebení nástroje. Se zvyšujícím se opotřebením se zvětšuje ořep na spodní hraně stříhaného plechu a snižuje se kvalita a přesnost stříhu. Vliv opotřebení nástroje je výraznější při větších střížných vůlích. [3; 4]

1.2 Metody vysekávání a nástroje

Na vysekávacích strojích lze realizovat různé metody technologie vysekávání, které se liší způsobem tváření, použitým nástrojem a požadovanou kvalitou, přesností a využitím dílce. Lze se tedy setkat s nástroji pro děrování, niblování, dělení, tváření či odjehlování. Všechny nástroje jsou pro snadnou a rychlou výměnu umístěny v lineárních nebo revolverových zásobnících. V následujících kapitolách budou popsány především nástroje typu Trumpf. Sestavu nástroje tvoří čtyři základní části zobrazené na obrázku 11 [10; 11]:

- Razník – slouží k vlastnímu prosekávání - děrování plechů a pomocí stopky je upnutý do vysekávací hlavy. Razníky jsou vyráběny z rychlořezné oceli, mohou být povlakovány za účelem zvýšení odolnosti a prodloužení životnosti nástroje. Šikmé broušení ostří redukuje tření a střížnou sílu, mimo jiné snižuje i hlučnost samotného vysekávání.
- Ustavovací kroužek – vymezuje tzv. nulovou polohu razníku, zajišťuje jeho vystředění vůči matici a určuje úhlové natočení. Přes ustavovací kroužek se přenáší střížná síla na razník.
- Stěrač – slouží k setření plechu při návratu razníku do výchozí polohy. Z důvodu tlakových napětí a pružných deformací po děrování má plech tendenci sevřít se kolem razníku. Dále může stěrač plnit funkci přidržovače při děrování s aktivním přidržovačem.
- Matrice – je protikus k razníku, otvor matrice má stejné rozměry jako razník zvětšené o střížnou vůli. Výstřížky vzniklé při děrování propadávají skrz matici a jsou pomocí dopravníkového pásu shromažďovány v kontejneru. Matici podobně jako razník lze natáčet o libovolný úhel a provádět požadované děrování či tváření. Při tváření plechu

směrem dolů se matrice zapustí do stolu, aby nedošlo ke kolizi mezi matricí a materiálem. Zapouštěcí matrice umožňuje zpracování výrobků bez poškrábání, před každým posuvem matrice sjede dolů a nedochází k jejímu kontaktu se zpracovávaným materiálem. Vyšší řady vysekovácích strojů jsou vybaveny aktivní matricí, která poskytuje širší možnosti tváření. Aktivní matrice může provádět samostatný tvářecí zdvih ze spodu, kdy matrice vyjíždí z roviny plechu s tvářecím nástrojem nahoru. V podstatě se jedná o druhou děrovací hlavu. Pomocí aktivní matrice lze tvářet žebra, protažení a misky.



Obr. 11 Součásti střižného nástroje [11].

1.2.1 Děrování

Děrování je střižný proces, a proto zde platí stejné zákonitosti jako při stříhání. Při děrování je tabule nebo pás plechu výrobkem a výstřížek odpadem. K tomu slouží děrovací nástroje vyráběné v obvyklých tvarech jako kruh, čtverec, lichoběžník, ale je možné zhotovit téměř libovolný tvar razníku, viz obr. 12. [3; 10; 11]



Obr. 12 Ukázka typů razníků [10].

Děrovacími nástroji lze děrovat jednotlivě, tedy na jeden zdvih vyrobít jeden otvor (obr. 13), nebo za použití vícenásobných razníků děrovat větší počet otvorů v jednom zdvihu. Vícenásobné razníky mohou být zhotoveny jako jeden celistvý díl, nebo jako razník s výměnnými vložkami, viz obr. 14. [10; 11]



Obr. 13 Děrování čtvercových otvorů.



Obr. 14 Vícenásobný razník [10].

Faktory omezující rozměry razníku jsou tloušťka a pevnost děrovaného materiálu, síla, kterou je vysekávací lis schopen vyvinout, a maximální rozměry matrice. [10; 11] Maximální průměr kruhového razníku lze určit dle vztahu [11]:

$$d_{max} = \frac{F_s \cdot x}{\pi \cdot s \cdot 0,9 \cdot R_m} , \quad (1.9)$$

kde: x - faktor zkosení [-],
 $x = 1$ pro razníky bez zkosení,
 $x > 1$ pro zkosené razníky.

Maximální délku hrany čtvercového razníku lze vypočítat ze vzorce [11]:

$$a_{max} = \frac{F_s \cdot x}{4 \cdot s \cdot 0,9 \cdot R_m} . \quad (1.10)$$

Maximální obvod stříhu pro libovolný tvar nebo vícenásobný razník bez zkosení (obr. 15) lze určit dle následujícího vztahu [11]:

$$L_{max} = \frac{F_s}{s \cdot 0,9 \cdot R_m} . \quad (1.11)$$



Obr. 15 Vícenásobný speciální razník bez zkosení s matricí a stěračem.

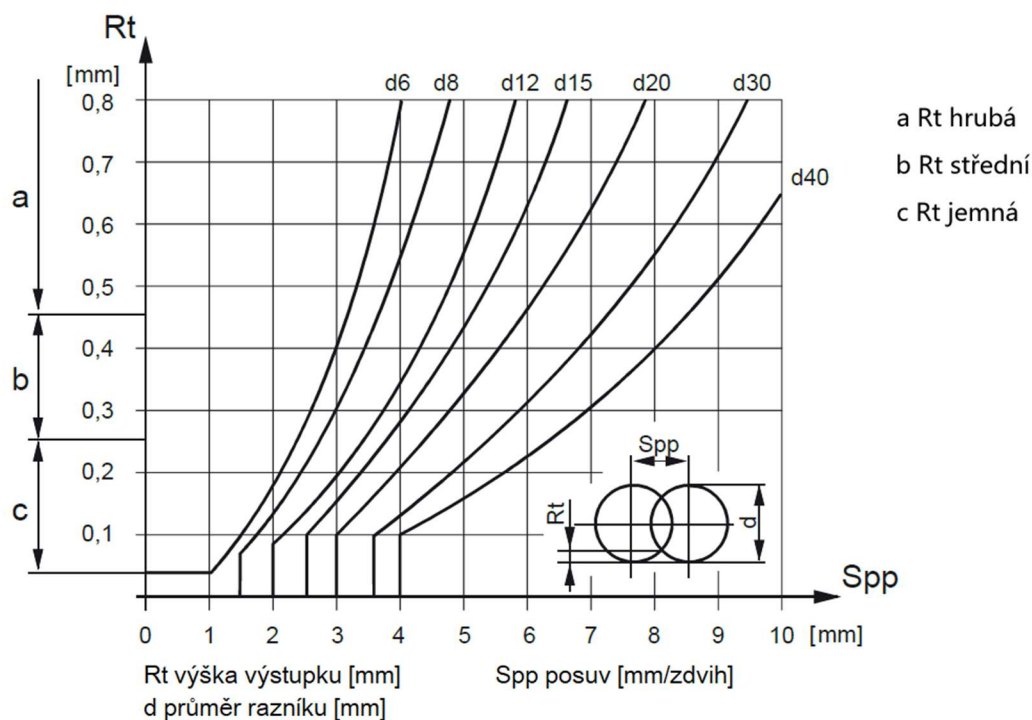
1.2.2 Niblování

Pokud je zapotřebí zpracovat obrysy, na které nedostačuje střížná síla stroje, nebo jsou příliš tvarově komplikované, pak je lze vyrobit postupně vystřihováním neboli niblováním (v angličtině nibbling). Vystřihování se provádí stejnými nástroji jako děrování, typicky kruhovými, čtvercovými, obdélníkovými a oválnými razníky, ale zpravidla se používají razníky menších rozměrů. U niblování jsou jednotlivé díry tak blízko u sebe, že se překrývají. Tak lze postupně vystřihnout prakticky libovolný obrys, viz obrázek 16. [10; 11]



Obr. 16 Rádus zhotovený niblováním.

Místa, kde došlo k překrývání nástrojů při jednotlivých zdvizech jsou patrná na první pohled, vzniká drsná střižná hrana. V závislosti na použitém nástroji a požadované výšce výstupku se volí posuv nástroje. Posuv udává, o kolik se nástroj posune při každém zdvihu. Čím menší je zvolený posuv, tím vyšší je výsledná kvalita střižné plochy. Optimální posuv pro dosažení požadované výšky výstupku lze odečíst například z grafu, viz obr. 17. [10; 11]



Obr. 17 Graf závislosti dosažené kvality střižné plochy na posuvu a použitém razníku [11].

Lineární posuv při kulatém nástroji (obr. 18) se vypočte ze vztahu [11]:

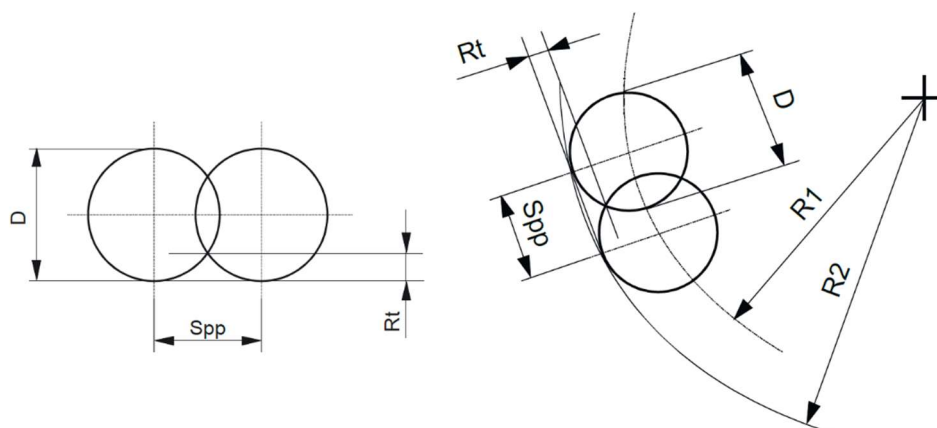
$$Spp_{\text{lineární}} = \sqrt{4 \cdot Rt \cdot (D - Rt)}, \quad (2.4)$$

kde: Rt - výška výstupku [mm],
 D - průměr razníku [mm].

Kruhový posuv při kulatém nástroji (obr. 18) lze určit ze vztahu [11]:

$$Spp_{\text{kruhový}} = Spp_{\text{lineární}} \cdot \frac{R1}{R2}, \quad (2.5)$$

kde: $Spp_{\text{lineární}}$ - lineární posuv [mm/zdvih],
 $R1$ - rádius středu dráhy nástroje [mm],
 $R2$ - rádius hrany výrobku [mm].

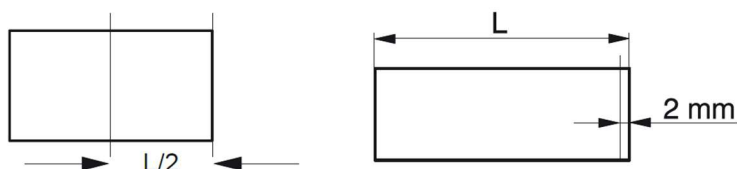


Obr. 18 Lineární a kruhový posuv při niblování kruhovým razníkem [11].

Posuv při čtvercových a obdélníkových nástrojích (obr. 19) se vypočítá ze vztahu [11]:

$$Spp_{min} = \frac{L}{2} \quad Spp_{max} = L - 2, \quad (2.6)$$

kde: Spp_{min} - minimální posuv [mm/zdvih],
 Spp_{max} - maximální posuv [mm/zdvih],
 L - délka hrany nástroje [mm].



Obr. 19 Posuv při použití čtvercových a obdélníkových nástrojů [11].

Posuv při oválných nástrojích a nástrojích s rádiusem v rozích se určí ze vzorce [11]:

$$Spp_{min} = \frac{L}{2} \quad Spp_{max} = L - 2 \cdot R - 1, \quad (2.7)$$

kde: Spp_{min} - minimální posuv [mm/zdvih],
 Spp_{max} - maximální posuv [mm/zdvih],
 R - rádius razníku [mm].

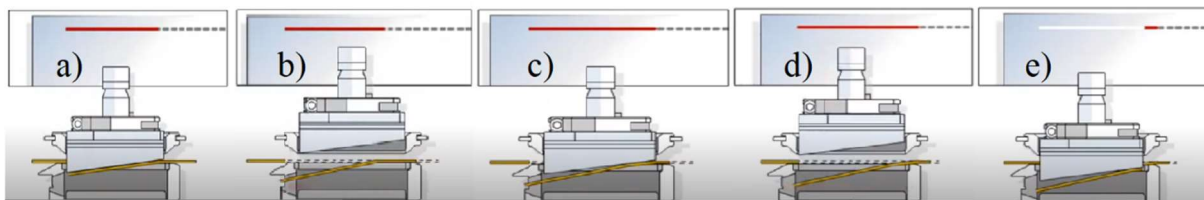
1.2.3 Dělení

K dělení plechů se používají dělicí nástroje, typicky obdélníkového průřezu. Nástroje mají často výměnné ostří a vložky matrice. Obvykle se pro dělení používá šikmé broušení razníku (obr. 20), nebo broušení tvaru střecha (obr. 21).



Obr. 20 Razník se šikmým broušením [11]. Obr. 21 Razník s broušením střecha [11].

Za účelem úspory času a materiálu lze vzdálenosti mezi dvěma díly redukovat na šířku nástroje. Jedním zdvihem se oddělují dva díly zároveň, proto se tato operace nazývá společným dělicím stříhem, přičemž obě střížné hrany dosahují stejné kvality. Jedním ze způsobů dělení je metoda Multishear schematicky zobrazená na obrázku 22. První zdvih je pouze nastříhovací, nedochází k oddělení třísky (obr. 22a), po něm následuje posuv plechu (obr. 22b) a další nastříhovací zdvih (obr. 22c). Plech se poté posune zpět (obr. 22d) a dělicím zdvihem je oddělena tříska (obr. 22e). Po dělicím zdvihu vždy zůstává krátký nástřih, tak aby bylo možné pokračovat v dělení materiálu. Proces se opakuje, dokud není vystřižen celý obrys. [10; 11; 29]



Obr. 22 Dělení materiálu metodou Multishear [29].

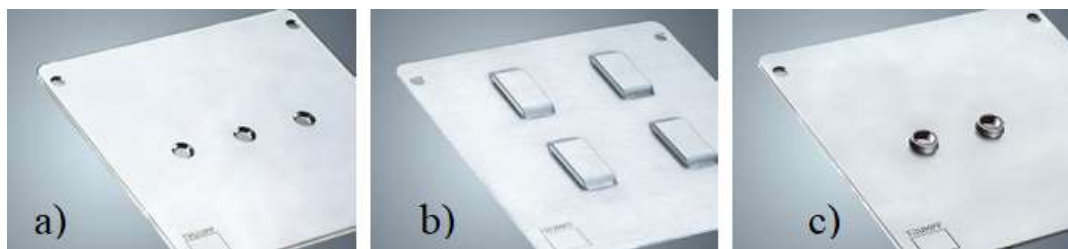
Pro dělení v blízkosti tváření, kde není možné použít klasický dělicí nástroj se stěračem, lze využít nástroj s integrovaným stěračem z polyuretanu, který je přímo součástí razníku, viz obr. 23. Pružný stěrač z polyuretanu zároveň plní funkci přidržovače a je výměnný. [10; 11]



Obr. 23 Dělicí nástroj pro dělení v blízkosti tváření se samostírací vložkou z polyuretanu [10].

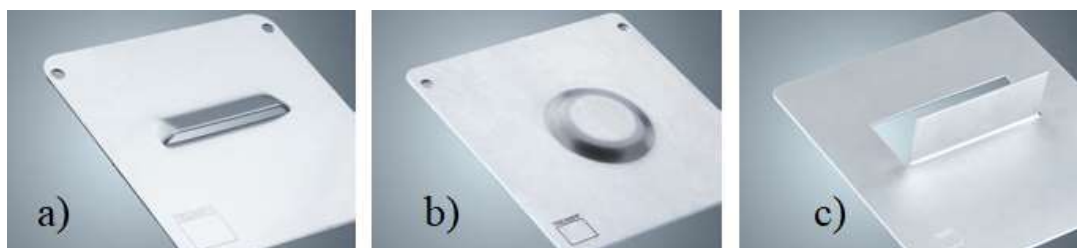
1.2.4 Tváření

Za použití aktivní matrice a vhodných nástrojů pro tváření lze zhotovit v tabuli plechu prvky, které by jinak vyžadovaly použití dalších technologií jako třískového obrábění, ohraňování nebo lisování. Přímo na vysekávacích lisech lze za použití nástroje pro zahloubení na jednu operaci tvářet zahloubení pro hlavy šroubů, nebo hlavy nýtů (obr. 24a). Další možností je tváření můstků sloužících například jako distanční záložky (obr. 24b). Protahání se zhotovují do předděrovaného otvoru, viz obr. 24c. Mohou sloužit jako průchodky pro kabely, nebo fixační prvky, často se do nich tváří závit. [10; 11]



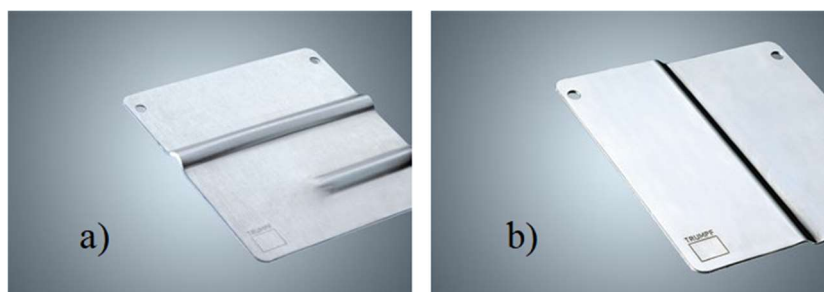
Obr. 24 Tváření zahloubení, můstků a protažení [11].

Plechové dílce zpracovávané na CNC vysekávacích lisech často slouží jako krytování strojů. Za účelem odvětrávání lze do plechových tabulí tvářet žábry, jako třeba na obrázku 25a. Prolisy tvaru misek nachází uplatnění jako nožičky, nebo distanční prvky (obr. 25b). Pomocí nástroje na ohýbání, lze vytvořit ohyb do výšky až 25 mm, s úhlem ohybu až 90°, viz obr. 25c. [10; 11]



Obr. 25 Tváření žáber, misek a ohraňování [10].

U plechových dílců velkých rozměrů často dochází k jejich prohýbání vlastní vahou. K zamezení deformace se do plechů mohou tvářet výztužné prolisy, viz obr. 26a. Nástroj pro tváření prolisů je ve variantě válečkové, nebo tvarového nástroje používaného jednotlivými zdvihy. Obdobně lze vytvářet na tabulích plechu odsazení (obr. 26b). [10; 11]



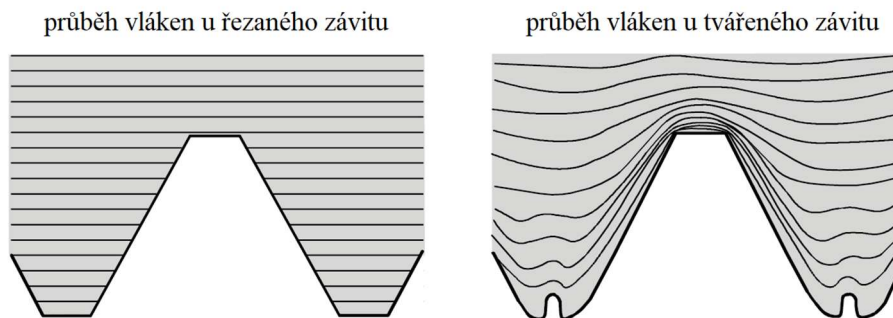
Obr. 26 Tváření výztužných prolisů a odsazení [10].

Na vysekávacích strojích lze přímo do plechu tvářet normalizované závity velikostí M2 až M10. U dostatečně silných plechů se předděruje otvor a následně se do jeho stěny tváří závity. U tenkých plechů se nejprve vytvoří protažení, aby bylo možné tvářet dostatečný počet závitů (obr. 27). Samotný závitník se nachází v razníku nástroje. Závitník je zatočen do předděrovaného otvoru, materiál se přitom vytlačuje do volných prostor závitníku. [10; 11]



Obr. 27 Tváření závitu do tabule plechu s protažením [33].

Výhodou tvářeného závitu je jeho vyšší únosnost oproti závitu vyrobenému třískovým obráběním, jelikož během plastického tváření se nepřerušují vlákna v materiálu a povrch závitu je zpevněn v důsledku plastického přetvoření, viz obr. 28. [10; 11; 33]



Obr. 28 Srovnání průběhu vláken u řezaného a tvářeného závitu [11].

1.2.5 Odjehlování

Při děrování se na spodní hraně vytváří otřep, který je různě velký a ostrý, což může vést k poranění při manipulaci s výrobkem. Otřep kromě toho může vadit při dalším zpracování, jako třeba lakování nebo spojování dvou hran. Proto se vysekávané díly před dalším zpracováním zpravidla odjehlují. Odjehlování na vysekávacích lisech funguje na principu plastického zatlačení otřepu bez oddělování třísky. Odjehlování obrysů a velkých rádiusů se provádí válečkovým odjehlovacím nástrojem (obr. 29), jehož spodní tvarový váleček umístěný v matici zatlačí otřep a zároveň zkosí spodní hranu dílu. Pro odjehlení menších otvorů, rádiusů a ostrých rohů slouží multifunkční odjehlovací nástroj (obr. 30), jehož matrice obsahuje tři tvarové razící vložky, které podobně jako válečkový nástroj zatlačí otřep a zkosí hranu. Nástroj je používán buď jednotlivými zdvihy, nebo se podobně jako při vystřihování nástroj posouvá při každém zdvihu o předem daný posuv a dochází k překryvu. [10; 11]

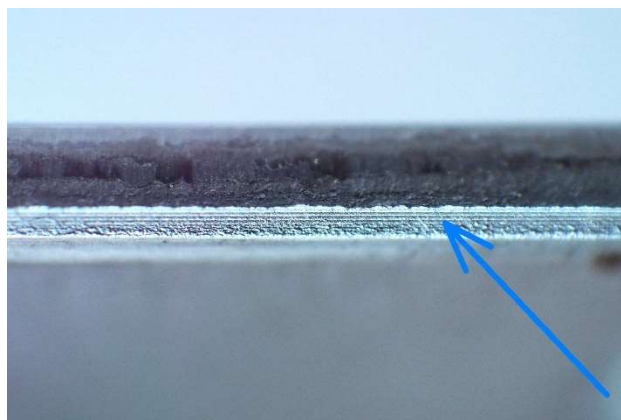


Obr. 29 Válečkový odjehlovací nástroj [10].



Obr. 30 Multifunkční odjehlovací nástroj [10].

Na makro snímku je patrné zkosení spodní hrany vysekávaného dílu z korozi-vzdorné oceli tloušťky 1,5 mm po použití válečkového odjehlovacího nástroje Trumpf, viz obr. 31.



Obr. 31 Zkosení hrany dílce po použití odjehlovacího nástroje.

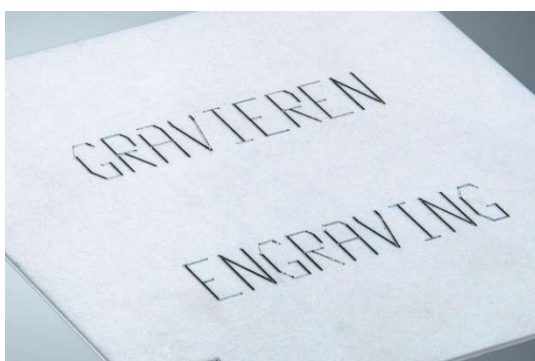
1.2.6 Značení

Přímo na vysekávacích lisech lze značit plechové díly. K označování dílů lze použít širokou škálu nástrojů. Jedním z nich je gravírovací nástroj s diamantovým hrotem, viz obr. 32. V razníku nástroje je diamantový hrot, jenž vytváří vryp do horní strany plechu. Materiál je hrotem vytlačován do stran. Matrice obsahuje kuličku, která působí protitlakem a zamezuje tak promáčknutí plechu. Značení pomocí gravírovacího nástroje je velmi univerzální a dovoluje realizovat popisy, znaky a symboly téměř libovolné velikosti. Nástroj se nepoužívá jednotlivými zdvihy, ale plech se během procesu pohybuje kontinuálně. [10; 11; 39]

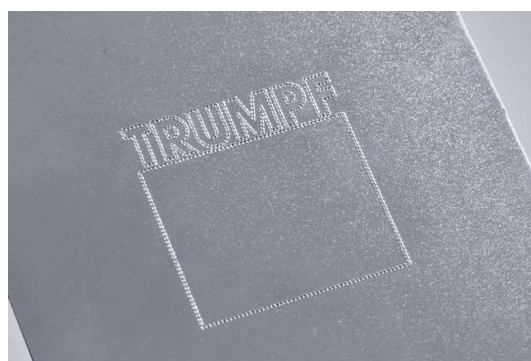


Obr. 32 Gravírovací nástroj s diamantovým hrotem.

Značící nástroj je svojí konstrukcí podobný nástroji gravírovacímu. Na rozdíl od gravírovacího nástroje se značící nástroj používá jednotlivými zdvihy. Popisy, znaky a symboly se vytváří množstvím malých důlků, které jsou v bezprostřední vzdálenosti mezi sebou. Nástroj se vyrábí i ve variantě pro značení zespodu, kdy značící hrot je umístěn v matrici nástroje. Jeho použití vyžaduje vysekávací lis s tzv. aktivní matricí, která může provádět zdvihy zespodu. Při použití nástroje pro značení zespodu lze vytvářet popisy na spodní straně plechu bez nutnosti plech otáčet. Na obr. 33 je pro porovnání zobrazen popis zhotovený pomocí gravírovacího nástroje. Na obr. 34 je popis vytvořený za použití značícího nástroje. [10; 40]



Obr. 33 Popis gravírovacím nástrojem [39].



Obr. 34 Popis značícím nástrojem [40].

Efektivním způsobem popisování dílů je ražení číslic, písmen, nebo speciálních znaků pomocí tzv. *MultiTool* nástroje, viz obr. 35. Razník obsahuje v závislosti na velikosti znaků 5 až 12 razících vložek. Pomocí otočného mechanismu v razníku se jednotlivé razící vložky dostávají do pracovní polohy. Ražení se provádí proti ploché matrici. [10; 41]

Obr. 35 *MultiTool* nástroj s razíciemi vložkami.

Značky, nebo loga firem lze razit za použití speciálních razících nástrojů zhotovených na zakázku dle požadavků zákazníka. Na obr. 36 je zobrazen razící nástroj používaný firmou ACO Industries k.s. Výsledné logo je pak na obr. 37.



Obr. 36 Razící nástroj „ACO“ logo.



Obr. 37 Logo „ACO“ ražené do koroziivzdorné oceli.

Jedním z možných řešení značení dílů je také použitím inkoustového popisovacího nástroje (obr. 38). Inkoustovým nástrojem lze popisovat kovové i nekovové materiály, nebo foliované plechy. Výhodou inkoustového popisu je, že nedochází k mechanickému poškození materiálu. Inkoust se do integrovaného zásobníku doplňuje otvorem ve stopce razníku. [10; 42]



Obr. 38 Nástroj pro značení inkoustem [42].

1.3 Vysekávací lisy

Střížné a tvářecí operace by nebyly proveditelné bez odpovídajícího vybavení – vysekávacího lisu, který zajišťuje polohování zpracovávaného plechu a vyvíjí potřebnou sílu. Mezi největší výrobce vysekávacích lisů patří firmy Trumpf, Euromac, Amada, nebo Prima Power. Stroje jednotlivých výrobců se od sebe liší konstrukcí rámu, typem pohonu, nebo konstrukcí nástrojů. Jedno však mají společné, vždy se jedná o numericky řízené a programovatelné stroje. V kombinaci s dalším příslušenstvím umožňující plnou automatizaci výroby. [11; 12; 13; 17] Základními prvky vysekávacího lisu jsou [10; 11; 12; 13; 17]:

- Rám – je základním stavebním prvkem vysekávacího lisu, ve většině případů se jedná o litinový odlitek. Rám je nosný pro další části jako pracovní stůl, vysekávací hlavu a zásobník nástrojů. Podle konstrukce lze rozdělit rámy na dva typy. Prvním typem je typ „C“, jedná se o otevřený design, jehož výhodou je snadný přístup k pracovnímu stolu a zpracovávanému plechu ze tří stran (obr. 39). Jeho nevýhodou je nižší tuhost a větší zástavbový prostor. Druhým je typ „O“, který je kompaktnější a tužší (obr. 40).



Obr. 39 Rám typu „C“ [12].



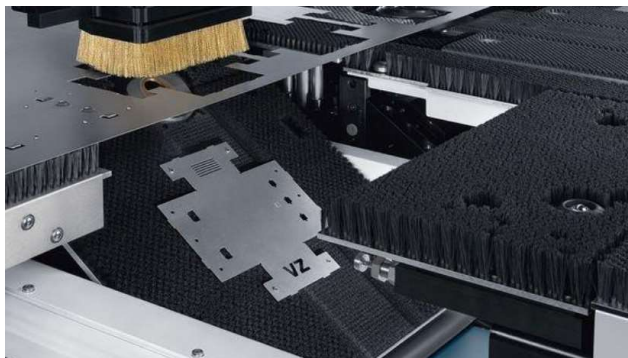
Obr. 40 Rám typu „O“ [12].

- Pracovní stůl – slouží jako podpora pro zpracovávaný plech, mohou být pevné i pohyblivé. Rozměry pracovního stolu určují zástavbovou plochu stroje a rozměry plechových tabulí, které lze na vysekávacím stroji zpracovávat. Jeho nosnost se běžně pohybuje kolem 200 kg. Plocha pracovního stolu je vybavena kartáčky a kuličkami, které zabráňují poškrábání plechových dílců během zpracování (obr. 41).



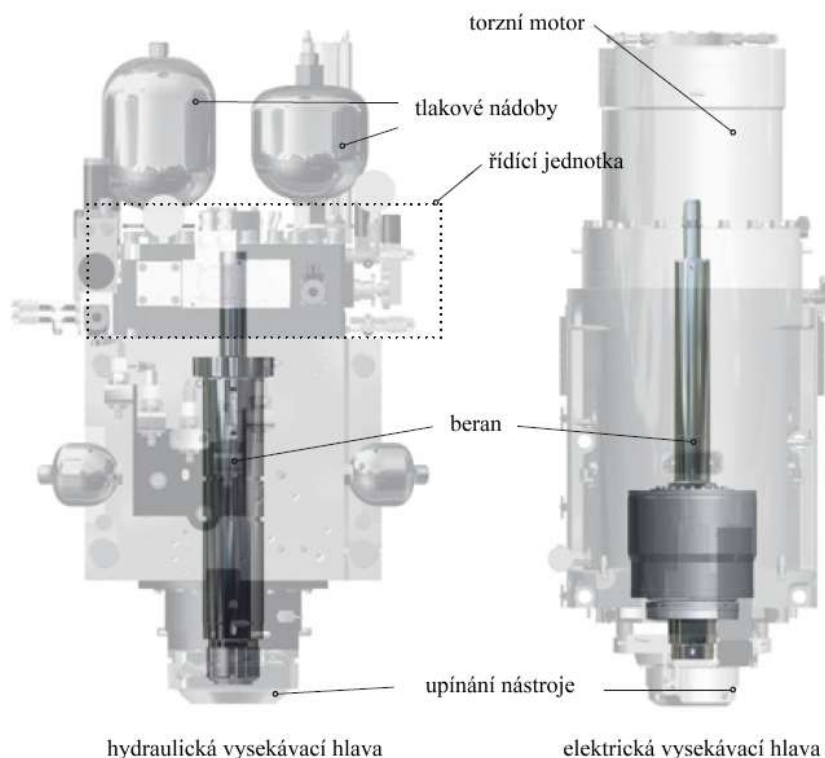
Obr. 41 Pracovní stůl vybavený kombinací kartáčků a kuliček [13].

- Klapka na díly – umístěná pod vysekávací hlavou umožňuje propadávání dílů na dopravníkový pás, kde se dále třídí (obr. 42). Odebírání dílů probíhá automaticky bez zásahu obsluhy. Maximální velikost dílů, které lze odebírat tímto způsobem je limitována rozměry klapky, větší díly jsou odebrány obsluhou stroje nebo pomocí automatického manipulátoru.



Obr. 42 Klapka na díly [10].

- Vysekávací hlava – sestává z beranu, který přenáší sílu na razník, pohonu, jenž vytváří potřebnou vysekávací sílu a upínání nástroje, viz obr. 43. Pohon beranu je zajištěn buď hydraulicky, elektromotorem, nebo jejich kombinací, tzv. hybridním pohonem. Vedení beranu musí být dostatečně dlouhé, aby bylo schopné přenášet působící excentrické síly vznikající při stříhání šikmými nástroji nebo při vystřihování. Nástroj je upnut za stopku v otočném upínacím mechanismu vysekávací hlavy, což umožňuje široké možnosti děrování, vystřihování, tváření a značení dílů. Součástí vysekávací hlavy jsou trysky rozprašující olejovou mlhu na razník. Olejový film ulpívající na razníku snižuje tření a zvyšuje životnost nástrojů.



Obr. 43 Vysekávací hlavy s hydraulickým a elektrickým pohonem [11].

- Příčná lišta – spolu s upínacími svorkami zajišťuje upínání zpracovávaného plechu a polohuje jej pod vysekávací hlavu (obr. 44). Standardně jsou vysekávací lisy vybaveny dvěma upínacími svorkami, v případě potřeby manipulace s dílci větší hmotnosti lze pro lepší stabilitu zpracovávaného plechu použít více svorek.



Obr. 44 Příčná lišta s upínacími svorkami [17].

- Zásobník nástrojů – umožňuje výměnu nástrojů během provozu lisu. Daný nástroj je zavezen k vysekávací hlavě, nástroj je následně upnut. Vysekávací lisy firmy Trumpf jsou vybaveny lineárními zásobníky umístěnými na příčnici stroje (obr. 45), vysekávací lisy ostatních výrobců vybavené nástroji typu *Thick turret* využívají revolverových zásobníků, jenž jsou součástí rámu (obr. 46). Zakládání nástrojů do zásobníků se provádí ručně nebo za použití vhodné automatizace.



Obr. 45 Lineární zásobník [18].



Obr. 46 Revolverový zásobník [19].

1.4 Srovnání vysekávání s dalšími metodami

Pro přípravu polotovarů lze použít nejen technologie založené na plastické deformaci, ale i nekonvenční způsoby dělení materiálu, které eliminují nevýhody klasického stříhání. Každá z metod má své výhody a nevýhody, jenž je zapotřebí brát v potaz. [2; 36] K výrobě rozvinutých tvarů lze použít například nesledující technologie:

- Postupové stříhání – je vhodné zejména pro výrobu menších součástí a velké výrobní série. Polotovarem jsou tabule nebo svitky plechu. Výhodou je rychlost a efektivita výroby při použití postupových nástrojů. Pomocí sdužených nástrojů lze realizovat lisování, tažení nebo ohýbání. Při použití sdužených nástrojů dojde na jeden zdvih k realizaci více tvářecích operací. Během střížného procesu jsou do materiálu vnesena tlaková a tahová napětí, což způsobuje deformaci dílce a zhoršuje další tvařitelnost. Střížná plocha vzniká z části lomem, proto i její kvalita bývá horší než u jiných metod dělení materiálu jako například řezání laserem, vodním paprskem nebo vyjiskřováním. Nástroje pro postupové stříhání nejsou univerzální, z čehož plyne, že pro každou novou součást je zapotřebí vyrobit nový střížný nástroj. Nástroje mohou být velmi rozměrné a vzhledem k požadavkům na přesnost velmi drahé. [1; 2; 3; 4; 11; 20]
- Vysekávání – se realizuje na CNC vysekávacích lisech. Jako polotovary slouží tabule, nebo přístřihy plechu. Technologii vysekávání lze realizovat nejen děrování a vystřihování, ale i další operace jako tváření závitů, ohýbání, nebo značení. Nástroje pro technologii vysekávání jsou univerzální, lze je používat jednotlivými zdvihy

(vysekávání), nebo pro vystřihování. Nevýhodou jsou pnutí vnesená do materiálu během stříhání, které způsobují deformaci dílců. Vzhledem k tomu, že princip vysekávání je založen na stejných zákonitostech jako stříhání, vyskytují se tu i stejné nevýhody, a to z hlediska vznikajících pnutí, zpevnění a horší kvality střížné plochy. Výhodou je zejména rychlost, a to především u děrovacích či tvářecích operací. Kvalita a přesnost dílců je srovnatelná s dílci zhotovenými v postupových střížných nástrojích. [1; 2; 3; 4; 11; 12; 18]

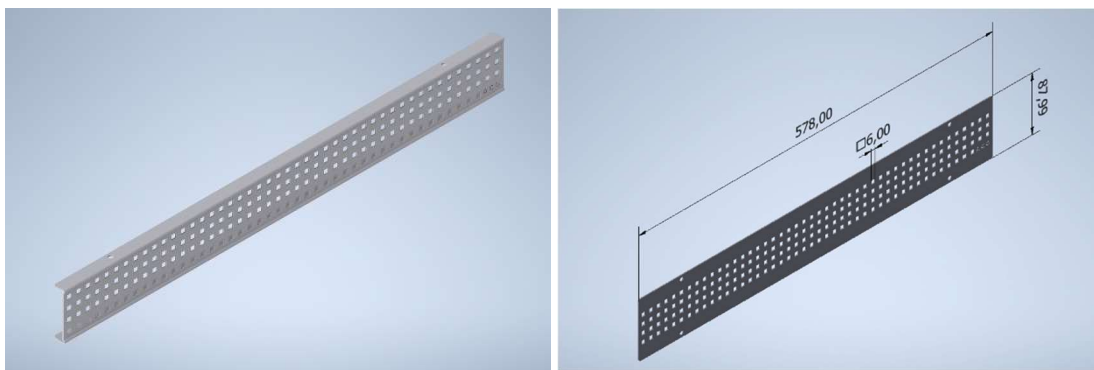
- **Laserové řezání** – dosahuje vynikající kvality řezné plochy s vysokou řeznou rychlostí. Umožňuje zpracování většiny technických materiálů od ocelí přes slitiny neželezných kovů, plasty a dřevo až po keramické materiály. Technologie laserového řezání je založena na přívodu koncentrované energie laserového svazku do místa řezu. Řeznou tryskou se kromě laserového svazku přivádí také asistenční plyn. Při řezání se projevují tři fyzikální jevy: spalování, tavení a sublimace. Obvykle se uplatňuje kombinace všech tří jevů. Který z nich je převládající záleží na volbě asistenčního plynu. Kyslík jako asistenční plyn se používá především při řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Laserový svazek materiál ohřívá a následně dochází k jeho spalování v kyslíku. Oxidy vznikající při hoření a tavenina jsou vyfukovány proudem kyslíku z místa řezu. Při použití dusíku jako asistenčního plynu převládá tavení. Dusík se obvykle používá při řezání vysokolegovaných ocelí a neželezných kovů. Materiál je taven laserovým paprskem a vyfukován proudem dusíku. K řezání materiálů náchylných k tvorbě oxidů a nitridů lze použít jako asistenční plyn argon. Na kvalitu řezné plochy a rychlost řezání má velký vliv čistota použitého plynu. Malá čistota plynu způsobuje pokles řezné rychlosti, tvorbu oxidů a zabarvení řezné hrany. Laserová řezací centra jsou velmi univerzální, vynikají hospodárností i při malých výrobních sériích. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena laserových center. Při řezání silnějších materiálů může docházet k jejich deformaci v důsledku tepelného ovlivnění. [22; 34]
- **Řezání vodním paprskem** – umožňuje řezání měkkých i tvrdých materiálů. Měkké materiály jako pryž, plast, papír, nebo třeba látky a koberce jsou řezány za použití čistého vodního paprsku. Po přidání abraziva vznikne tzv. abrazivní vodní paprsek, kterým lze řezat i tvrdé materiály jako kovy, kámen, sklo, nebo kompozitní materiály. Základem je vysokotlaké čerpadlo schopné vyvinout tlak až 650 MPa. Při průchodu kapaliny tryskou vzniká tenký paprsek. Výhodou řezání vodním paprskem je přesnost řezu, možnost zpracovat téměř libovolný materiál včetně kompozitních a vrstvených materiálů. Při použití vodního paprsku nevzniká tepelně ovlivněná oblast a řezaný materiál je bez vnitřních pnutí. Touto technologií lze řezat oceli do tloušťky 250 mm. Nevýhodou je nutnost sušení výrobků z nasáklých materiálů. U některých materiálů může dojít ke změně barvy v místě řezu. [35; 36]

Z charakteristik jednotlivých metod vyplývá, že technologie postupového stříhání a vysekávání dosahují stejné přesnosti výroby a kvality střížné plochy, jelikož se jedná o příbuzné technologie. Postupové stříhání se hodí pro velkosériovou výrobu, zatímco vysekávání díky použití univerzálních nástrojů je ekonomické i při kusové výrobě. Laserové řezání a řezání vodním paprskem dosahuje oproti stříhání kvalitnější řezné plochy. Řezání laserem je velmi rychlé a dokáže zhotovit téměř libovolný obrys. U tlustších materiálů může dojít k jejich deformaci vlivem tepla vneseného laserem během řezného procesu. Tuto nevýhodu odstraňuje vodní paprsek, jeho použitím nevznikají v materiálu pnutí, ani tepelné namáhání. Nevýhodou vodního paprsku jsou nízké řezné rychlosti. Materiál je během řezání v přímém kontaktu s řeznou kapalinou, proto se řezání vodním paprskem nehodí pro nasáklé materiály.

2 SROVNÁNÍ VYSEKÁVÁNÍ A LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ

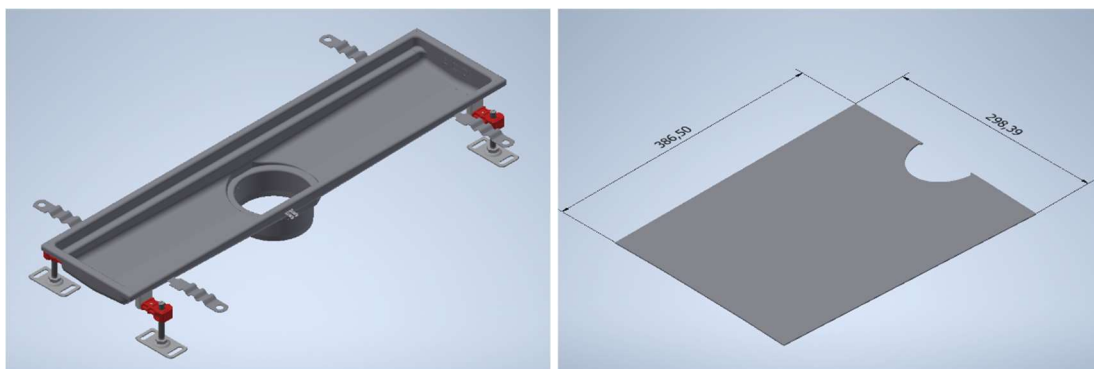
Firma ACO Industries k.s. působí v Přibyslavi už od roku 1993. Zabývá se především návrhem a výrobou odvodňovacích systémů pro průmyslové budovy a venkovní zpevněné plochy z korozivzdorné oceli a polymerbetonu. V Přibyslavské pobočce nadnárodní společnosti ACO Group probíhá celistvý návrh odvodňovacích systémů od návrhu a vývoje, přes testování až po výrobu. Pro výrobu používá celou řadu technologií jako například laserové řezání, vysekávání, ohraňování nebo zakružování trubek [28]. Firma si položila otázku, zda je výhodnější vyrábět polotovary pro některé komponenty ze svého portfolia technologií vysekávání či řezání laserem. Proto v této části práce bude provedena analýza výroby polotovarů (plechových rozvinů) dvou stěžejních zástupců z řady vyráběných dílců. Zkoumána bude zejména rychlost výroby, kvalita a přesnost dílce. Jedná se konkrétně o polotovary pro následující výrobky:

- Sprchový rošt – vyráběný z korozivzdorné oceli 1.4301 tloušťky 1,5 mm pro použití v koupelnách, veřejných bazénech, nebo wellness centrech. Rošty jsou nabízeny v několika provedeních lišících se rozměry a perforací. Ke srovnání byl vybrán rošt s čtvercovými otvory. Základní rozměry jsou na rozvinutém tvaru dílce (obr. 47).



Obr. 47 Sprchový rošt a rozvinutý tvar se základními rozměry.

- Hygienický žlab – vyráběný z korozivzdorné oceli 1.4404 tloušťky 1,5 mm slouží k odvodnění vnitřních i venkovních prostor. Díky designu, který využívá větších rádiusů zaoblení včetně čel žlabu, se hodí především pro použití v potravinářském průmyslu (obr. 48).



Obr. 48 Hygienický žlab a rozvinutý tvar poloviny těla žlabu.

Důležitým hlediskem při výrobě je rychlost, kvalita a efektivita výroby. Cílem kapitoly je zhodnocení vhodnosti použití vybrané technologie pro výrobu konkrétního rozvinutého tvaru součásti. Firma ACO Industries k.s. disponuje stroji pro technologii vysekávání i laserové řezání. Srovnání výroby polotovarů bylo provedeno na následujících strojích od firmy Trumpf:

- TruPunch 5000 – je vysekávací lis s otevřenou konstrukcí rámu (obr. 49). Disponuje hydraulickou vysekávací hlavou schopnou vyvinout sílu až 220 kN, lze zpracovávat

tabule plechu o hmotnosti až 280 kg a tloušťce až 8 mm. Lineární zásobník pojme 21 nástrojů. [12; 25]



Obr. 49 Vysekávací lis Trumpf TruPunch 5000.

- TruLaser 3030 Fiber – je laserové řezací centrum s pevnolátkovým laserem o vlnové délce 1030 nm a výkonem regulovatelným od 80 do 4000 W (obr. 50). Umožňuje řezání korozivzdorných ocelí až do tloušťky 20 mm. [22; 23; 24]



Obr. 50 Laserové řezací centrum Trumpf TruLaser 3030 Fiber.

Jedním z hodnocených kritérií je rychlost výroby. Kratší výrobní časy znamenají i finanční úsporu. Z charakteristik obou technologií lze předpokládat, že použití vysekávacího lisu bude výhodnější při výrobě dílu s množstvím opakujících se otvorů, zatímco u laserového řezání dochází k časovým prodlevám vlivem zapálení laserového paprsku a nutnosti najetí a vyjetí z řezu. Naopak při zpracování dlouhých řezů, rádiusů nebo značení dílů by měla být technologie laserového řezání výrazně časově úspornější. V Tab. 2 jsou uvedeny reálné výrobní časy pro zvolené dílce, změřené přímo v dílně firmy ACO.

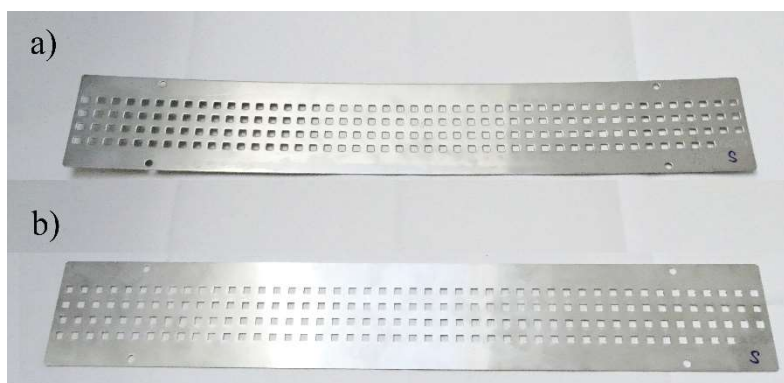
Tab. 2 Změřené výrobní časy při výrobě polotovarů.

	sprchový rošt	hygienický žlab
použitá technologie:	výrobní čas na 1 díl [mm:ss]	
vysekávání	0:37	0:53
laserové řezání	2:38	0:22

Měřením výrobních časů byl potvrzen předchozí předpoklad, že pokud je zapotřebí vyrobit díly s větším počtem opakujících se otvorů, pak jednoznačně výhodnější je zpracování pomocí technologie vysekávání, která rychlostí výroby překonává laserové řezání. Jak je patrné z Tab. 2, polotovar pro sprchový rošt, který obsahuje velké množství stejných otvorů, byl vysekáváním zhotoven za 37 sekund, kdežto řezání laserem trvalo 2 minuty a 38 sekund. Naopak při výrobě rozměrnějších dílců bez perforací a složitějším obrysem je výhodnější

použití laserového řezání. Jak dokládá i porovnání výrobních časů pro zhotovení plného polotovaru pro žlab. Vysekávání tohoto dílce trvalo 53 sekund, zatímco laserem byl tento obrys vyřezán za pouhých 22 sekund.

Nevýhodou vysekávání mohou být deformace dílců v důsledku tahových a tlakových napětí vznikajících během procesu stříhání. Velký podíl na tom má skutečnost, že vystříhovaná část i samotný plech není v okamžiku stříhu dokonale sevřen a v matici zespodu nijak podpírán, což vede ke vzniku ohybových momentů. Deformace jsou tím výraznější, čím hustěji je dílec perforovaný. Při řezání dílců laserem může u tlustších materiálů vznikat deformace v důsledku tepelného ovlivnění materiálu. Vzhledem k tomu, že v obou případech je zkoumaný plech tloušťky 1,5 mm, tepelné ovlivnění při řezání laserem nemá velký vliv na deformaci ohybem a vykazuje dobrou rovinnost, viz obr. 51b. Zato dílec zhotovený vysekáváním je díky velkému počtu vysekaných otvorů výrazně prohnutý, jak je patrné na obr. 51a.



Obr. 51 Deformace dílců zhotovených technologií vysekávání a laserového řezání.

Pomocí obou metod lze provádět značení dílů, aby byly jednoznačně popsány a nedošlo k jejich záměně při výrobě. Značení plechových dílů na laserovém zařízení se provádí sníženým výkonem laserového paprsku, nedojde tak k propálení celé tloušťky materiálu, ale pouze tenké vrstvy na povrchu, jedná se o tzv. gravírování. Z hlediska kvality značení dílů je gravírování laserem přesnější a vytváří popisy bez deformace znaků. Zhotovení konkrétního popisu znázorněného na obr. 52 čítajícího 19 znaků trvalo 7,2 vteřiny. Z obrázku je patrné, že gravírování způsobuje typické zabarvení povrchu vlivem tepelného ovlivnění. [30]



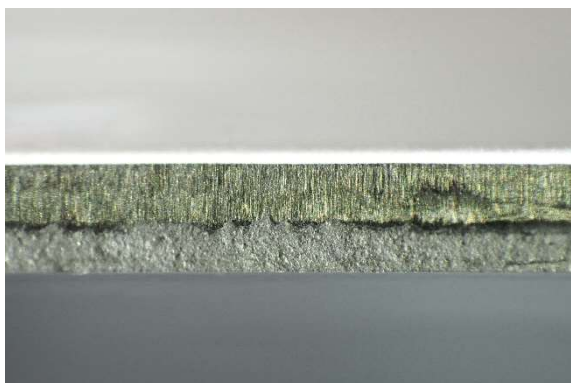
Obr. 52 Značení dílu zhotovené gravírováním laserem.

U technologie vysekávání lze značit díly ražením, rytím, nebo inkoustem. Pro porovnání s technologií laserového řezání bylo zvoleno rytí pomocí gravírovacího nástroje s diamantovým hrotem. Rytí u technologie vysekávání spočívá v zatlačení hrotu nástroje a vytlačování a přechování materiálu, v plechu vzniká vryp. Výsledkem je plocha s ostrými výstupky a deformacemi jednotlivých znaků, viz obr. 53. Zhotovení konkrétního popisu v tomto případě trvalo 19 vteřin, což je více než 2,5x delší čas než při použití gravírování laserem. [10; 11; 30]

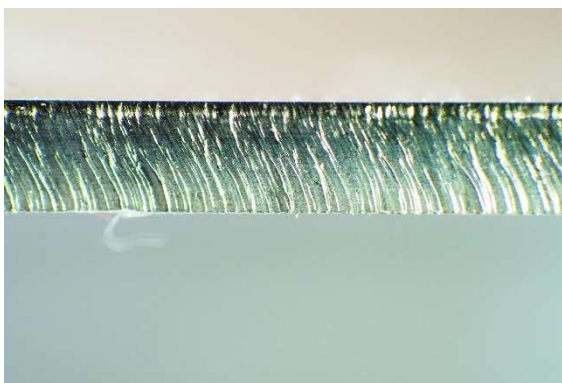


Obr. 53 Značení dílu zhotovené technologií vysekávání.

Důležitým kritériem, na které je zapotřebí brát ohled při volbě technologie výroby, je také kvalita střížné, respektive řezné plochy. Na obr. 54 je zvětšený snímek střížné plochy vzniklé vysekáváním, pásmo lomu dosahuje zhruba poloviny tloušťky materiálu. Detail řezné plochy je na obr. 55. Při řezání laserem byl jako asistenční plyn použit dusík, řez je kovově lesklý bez oxidů.



Obr. 54 Makro snímek střížné plochy.



Obr. 55 Makro snímek řezné plochy.

Díly zhotovené vysekáváním i laserovým řezáním byly srovnány i z hlediska rozměrové přesnosti. Pro srovnání byly vybrány dva charakteristické rozměry na rozvinutém tvaru sprchového roštu. Kontrolovanými rozměry jsou šířka rozvinutého tvaru a čtvercový otvor. V Tab. 3 jsou v horní části uvedeny rozměry včetně mezních úchylek předepsaných na výkresové dokumentaci. V dolní části tabulky jsou uvedené skutečné rozměry zjištěné měřením na optickém přístroji helios 350.H.

Tab. 3 Srovnání rozměrové přesnosti technologie vysekávání a laserového řezání.

	sprchový rošt			
kontrolovaný rozměr	strana čtvercového otvoru		šířka rozvinu	
technologie	vysekávání	laserové řezání	vysekávání	laserové řezání
jmenovitý rozměr	6,00	6,00	87,99	87,99
úchylka	±0,05	±0,05	±0,20	±0,20
horní mezní rozměr	6,05	6,05	88,19	88,19
dolní mezní rozměr	5,95	5,95	87,79	87,79
měření	5,992	6,013	87,975	87,953
vyhodnocení	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Z Tab. 3 vyplývá, že co se týká rozměrové přesnosti výroby, oba dílce vyhovují požadavkům na přesnost. Odchylka od jmenovitého rozměru činí v případě technologie vysekávání 0,008 mm pro čtvercový otvor a 0,015 mm pro šířku polotovaru. U technologie laserového řezání činí odchylka od jmenovitého rozměru 0,013 mm pro čtvercový otvor a 0,037 mm pro šířku plechového dílce. V případě podrobného zkoumání lze konstatovat, že u technologie vysekávání je dosaženo menší odchylky od jmenovitého rozměru obou zkoumaných délek než u technologie řezání laserem. Rozdíl je ovšem velmi malý, a proto lze závěrem říci, že co se rozměrové přesnosti týká, jsou obě technologie srovnatelné a plně vyhovující požadavkům přesnosti výroby.

ZÁVĚR

Cílem práce byl průzkum a přehled možností použití technologie vysekávání a dále i metod výroby na vysekávacích lisech včetně používaných strojů a nástrojů. Vysekávání je ve své podstatě realizace střížného procesu. Pro technologii vysekávání se používá CNC vysekávacích lisů, které lze dle konstrukce rámu rozdělit na otevřené a uzavřené. Různá je i konstrukce nástrojů. Dvěma základními typy jsou nástroje typu Trumpf používané stejnojmennou německou firmou a nástroje typu Thick Turret. Moderní vysekávací lisy umožňují díky konstrukci nástrojů kromě typického děrování (vysekávání) také další operace plošného tváření jako ohýbání, lisování, značení, nebo závitování.

Praktická část práce byla zaměřena na srovnání výroby dvou konkrétních polotovarů z korozivzdorné oceli za použití technologie vysekávání a laserového řezání. Pro zjištění rozměrové přesnosti výroby byly u vybraného dílce proměřeny dva zvolené rozměry, a to rozměr čtvercového otvoru a šířka rozvinu. Z měření vzorku vyplynulo, že v případě výroby čtvercového otvoru bylo dosaženo vysekáváním vyšší přesnosti než při laserovém řezání. Stejně tomu je u měření celkové šířky polotovaru, kde větší rozměrové přesnosti bylo dosaženo taktéž technologií vysekávání. Důležitým hlediskem při rozhodování, jakou technologii zvolit, je vznikající deformace. Tahová a tlaková napětí vznikající při vysekávání mohou mít za následek výraznou deformaci dílů. Vlivem plastické deformace je horní hrana zaoblená, což v některých aplikacích může být výhodou. Při řezání laserem vzniká úzká tepelně ovlivněná oblast, která se při zpracování tlustších plechů může projevit celkovou deformací dílce. Vzhledem k malé tloušťce plechu ($s = 1,5 \text{ mm}$) se deformace dílce řezaného laserem neprojevily a ve srovnání s vysekávaným dílcem vykazuje větší rovinnost. Horní i dolní hrana dílce zůstává při řezání laserem ostrá. Dalším zkoumaným parametrem byla rychlost výroby rozvinu jednotlivých dílců. Obecně lze konstatovat, že při zpracování dílů s větším počtem opakujících se otvorů je výhodnější technologie vysekávání, nevýhodou je pomalejší zpracování obrysů, zejména pak velkých rádiusů. Laserové řezání je efektivní při výrobě dlouhých obrysů, rádiusů, nebo značení dílů, jeho nevýhodou je pomalejší zpracování velkého počtu otvorů, kde ztrácí oproti vysekávání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00651-1.
2. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-010-1003-1.
3. ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet metal forming: Processes and applications*. Ohio: ASM International, 2012. ISBN 9781615038442.
4. BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. 2nd edition. New York: Industrial Press, 2014. ISBN 9780831134921.
5. ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 2. 12. přepracované vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1968.
6. ČADA, Radek. *Technologie I*. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1507-7.
7. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
8. 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.
9. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření: Část II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
10. TRUMPF INC. *Punching tools catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-punching-tools-catalog-EN.pdf. 212 s.
11. TRUMPF INC. *Punching at a glance* [online]. 2021 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-punching-at-a-glance-brochure-EN.pdf. 52 s.
12. *TruPunch: The time-saving technology* [online]. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co, 2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Machines_and_Systems/02_Brochures/TRUMPF-punching-machines-brochure-EN.pdf
13. *The punch: Versatile solutions for servo-electric punching* [online]. Prima Industrie Group, 2020 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.primapower.com/files/primapower/attachments/218EN_May2020_ThePunch_v2_lowres.pdf
14. *Vystřihování, děrování a vysekávání plechu* [online]. Prachatice: PROSTOR – design, 2015 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.vystrihovani-derovani-vysekavani.cz/>
15. *Výhody našich děrovacích strojů TRUMPF* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/vyhody-stroju-trumpf/vyhody-derovacich-stroju/
16. KUDLÁČ, Lukáš. *Návrh výroby krytu vany regulátoru*. Brno, 2017. 73s, 2 výkresy, 21 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.

-
17. *Extraordinary technology* [online]. Formigine: Euromac S.p.A., 2022 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.euromac.com/en/prodotto/xt/>
 18. *TruMatic 6000* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/kombinovane-stroje/trumatic-6000/
 19. *Punch Genius* [online]. Collegno: Prima Industrie S.p.A., 2022 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.primapower.com/en/technologies/punching-shearing-combi/punching-machines/punch-genius>
 20. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření I*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.
 21. SCHULER GmbH. *Handbuch der Umformtechnik*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. ISBN 3-540-61099-5.
 22. KAŠPAR, Jan. *Laserové řezání: volba a vlastnosti asistenčních plynů. Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media CZ, 2014, 2014, 1 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/laserove-rezani-volba-a-vlastnosti-asistencnich-plynu_28272.html
 23. *TruDisk: Diskový laser* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/trudisk/
 24. *Lasers: The Power of Choice* [online]. TRUMPF Laser- und Systemtechnik, 2021 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Lasers/02_Brochures/TRUMPF-laser-beam-sources-broschure-EN.pdf
 25. *TruPunch 5000* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/derovaci-stroje/trupunch-5000/
 26. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0415-9.
 27. *TruLaser: Cost-effective cutting through thick and thin* [online]. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co., 2021 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Machines_and_Systems/02_Brochures/TRUMPF-2D-laser-cutting-machines-broschure-EN.pdf
 28. *ACO Přibyslav: Co děláme* [online]. ACO Industries, 2022 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.aco-industries.cz/aco-pribyslav/co-delame>
 29. *Trumpf Punch Multishear* [online]. 2020 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=d5BCrS7eOD4>
 30. *Laserové označování: Gravírování laserem* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-oznacovani/gravirovani-laserem/
 31. TONKOVIČ, M. *Analýza materiálu pro laserové řezání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s., 36 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
 32. HÁJEK Pavel: *Výroba krytu*. Brno, 2014. 95 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.
-

-
33. *DĚROVACÍ NÁSTROJE: Závítovací nástroj* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022, 2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/servis/servis-strojni-systemy-a-lasery/nastroje/derovaci-nastroje/derovaci-nastroje/zavitovaci-nastroj/
 34. *Laserové řezání* [online]. Domažlice: LINTECH, spol. s r.o., 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-rezani>
 35. *Jak funguje vodní paprsek* [online]. Brno: Flow International Corporation, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Jak-funguje-vodni-paprsek.aspx#basics>
 36. *Řezání vodním paprskem* [online]. Strážnice: GUMEX, spol. s r.o., 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profily-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>
 37. *Punching Tools: Application Catalog* [online]. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co., 2014 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-punching-tools-application-catalog-EN.pdf
 38. *Forming the future: THE ENTIRE WORLD OF METAL FORMING* [online]. Göppingen: Schuler, 2018 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.schulergroup.com/major/download_center/broschueren_uebersichten/download_uebersichten/uebersicht_broschuere_produkte_blechumformung_e.pdf?shortcut=sheetforming
 39. *DĚROVACÍ NÁSTROJE: Gravírovací nástroj* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/servis/servis-strojni-systemy-a-lasery/nastroje/derovaci-nastroje/derovaci-nastroje/gravirovaci-nastroj/
 40. *DĚROVACÍ NÁSTROJE: značicí nástroj zespod* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/servis/servis-strojni-systemy-a-lasery/nastroje/derovaci-nastroje/derovaci-nastroje/znacici-nastroj-zespod/
 41. *DĚROVACÍ NÁSTROJE: Razicí MultiTool Easy Type* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/servis/servis-strojni-systemy-a-lasery/nastroje/derovaci-nastroje/derovaci-nastroje/razici-multitool-easy-type/
 42. *VYSEKÁVACÍ NÁSTROJE: Nástroj pro inkoustové značení* [online]. Praha: TRUMPF Praha, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/servis/servis-strojni-systemy-a-lasery/nastroje/derovaci-nastroje/derovaci-nastroje/nastroj-pro-inkoustove-znaceni/
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A_s	střížná práce	[J]
$a_{\max}$	maximální délka hrany čtvercového razníku	[mm]
c	koeficient zohledňující typ střížnice	[-]
D	průměr razníku	[mm]
$d_{\max}$	maximální průměr kruhového razníku	[mm]
F_s	střížná síla	[N]
$F_{s\max}$	maximální střížná síla	[N]
F_p	síla potřebná k protlačení výstřížku střížnicí	[N]
F_t	síla potřebná k setření materiálu stěračem	[N]
H	výška zkosení střížníku	[mm]
h_{el}	hloubka elastického vniknutí	[mm]
h_{pl}	hloubka plastického vniknutí	[mm]
h_s	hloubka vniknutí střížníku	[mm]
k	koeficient zkosení střížníku	[-]
k_1	koeficient závislý na tloušťce materiálu (pro F_t)	[-]
k_2	koeficient závislý na tloušťce materiálu (pro F_p)	[-]
L	délka hrany nástroje	[mm]
$L_{\max}$	maximální obvod stříhu pro libovolný tvar/vícenásobný razník	[mm]
l	délka střížné hrany	[mm]
m	střížná mezera	[mm]
n	koeficient zohledňující otupování střížných hran	[-]
n_2	počet výstřížků nacházejících se ve válcové ploše střížnice	[ks]
R	rádius razníku	[mm]
R_1	rádius středu dráhy nástroje	[mm]
R_2	rádius hrany výrobku	[mm]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_t	výška výstupku	[mm]
$S_{ppkruhový}$	kruhový posuv při kulatém nástroji	[mm/zdvih]
$S_{pplineární}$	lineární posuv při kulatém nástroji	[mm/zdvih]
$S_{pp\max}$	maximální posuv	[mm/zdvih]
$S_{pp\min}$	minimální posuv	[mm/zdvih]
S_s	střížná plocha	[mm ²]
s	tloušťka materiálu	[mm]
v	střížná vůle	[mm]
x	faktor zkosení střížníku	[-]
α	úhel zkosení střížníku	[°]
λ	součinitel plnosti diagramu	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
τ_s	pevnost materiálu ve stříhu	[MPa]

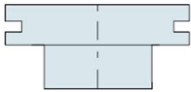
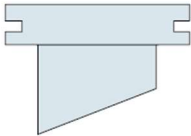
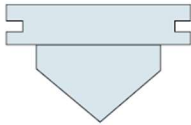
Zkratky

Označení	Legenda
CNC	Computer Numeric Control
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Faktory zkosení střížníků dle katalogu Trumpf
Příloha 2 Tabulka měření vzorků

Faktory zkosení střížníků dle katalogu Trumpf [10]

Sheet thickness s (in mm)	Shear factor flat X	Shear factor Whisper X	Shear factor roof X
			
1.0	1.00	3.50	1.53
1.5	1.00	2.66	1.44
2.0	1.00	2.25	1.35
2.5	1.00	2.00	1.30
3.0	1.00	1.83	1.25
3.5	1.00	1.71	1.11
4.0	1.00	1.62	1.19
5.0	1.00	1.50	1.15
6.0	1.00	1.41	1.12
8.0	1.00	1.31	1.08
10.0	1.00	1.25	approx. 1.00

Příloha 2
Tabulka měření vzorků

1/1

číslo měření	měřený rozměr				k=	2				
	A	B	C	D						
1	6.01	6.01	87.90	87.93						
2	5.99	6.02	87.99	87.97						
3	5.99	6.01	87.99	87.95						
4	5.98	6.02	87.98	87.97						
5	6.00	6.00	87.98	87.95						
6	5.99	6.03	88.03	87.96						
7	5.99	6.01	88.01	87.94						
8	5.98	6.01	88.00	87.96						
9	6.01	5.99	87.97	87.94						
10	5.98	6.03	87.90	87.96						
ar. x	5.992	6.013	87.975	87.953						
s(x)	0.011352924	0.012516656	0.043011626	0.013374935						
uA	0.00359011	0.003958114	0.013601471	0.004229526						
uB	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018						
uC	0.004016079	0.004348180	0.013720058	0.004596617						
U1=k*uC	0.008032158	0.008696359	0.027440117	0.009193234						
výsledek	5.992±0.008	6.013±0.009	87.975±0.028	87.953±0.010						
jmenovitý rozměr	6	6	87.99	87.99						
horní odchylka	0.05	0.05	0.2	0.2						
dolní odchylka	-0.05	-0.05	-0.2	-0.2						
LSL	5.95	5.95	87.79	87.79						
USL	6.05	6.05	88.19	88.19						

A	čtvercový otvor 6x6 mm - vysekávání
B	čtvercový otvor 6x6 mm - laser
C	šířka rozvinu roštu - vysekávání
D	šířka rozvinu roštu - laser

	A	B	C	D
LSL-U1	5.941968	5.941304	87.762560	87.780807
LSL+U1	5.958032	5.958696	87.817440	87.799193
USL-U1	6.041968	6.041304	88.162560	88.180807
USL+U1	6.058032	6.058696	88.217440	88.199193
ar. X	5.992	6.013	87.975	87.953