

Vliv technologických parametrů na přípravu tvářených polotovarů

Jan Řezníček

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

| | |
|-------------------|---|
| Jméno a příjmení: | Jan Řezníček |
| Osobní číslo: | T17215 |
| Studijní program: | B3909 Procesní inženýrství |
| Studijní obor: | Technologická zařízení |
| Forma studia: | Prezenční |
| Téma práce: | Vliv technologických parametrů na přípravu tvářených polotovarů |

Zásady pro vypracování

1. zpracujte teoretickou studii na dané téma
2. připravte experiment pro hodnocení obrobitelnosti a tvařitelnosti plechů
3. proveďte test a stanovte závislosti daných parametrů.

Seznam doporučené literatury:

- BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 978-80-7454-471-2.
- DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4747-9.
- ČÁDA, Radek. *Technologie tváření a slévání*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010, 78 s. ISBN 978-80-248-2273-0.
- ALTAN, Taylan; TEKKAYA, A. Erman (ed.). *Sheet metal forming: fundamentals*. Asm International, 2012, ISBN 978-1-61503-842-8.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o možnostech plošného tváření a dělení kovových materiálů. Jsou zde zpracovány rozdělení, principy a možnosti využití jednotlivých technologií. Práce zahrnuje základní informace měření drsnosti povrchu a normy ČSN EN ISO 9013. V praktické části je vyráběna plechová součást pomocí laseru a ohraňovacího lisu. Při výrobě je měřen vliv změny řezných parametrů na kvalitu povrchu a závislost odpružení materiálu na směru vláken při ohybu s cílem nalézt optimální řešení.

Klíčová slova: laserové řezání, ohraňování, řezná plocha, odpružení

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the possibilities of surface forming and cutting of the metal materials. The division, principles and possibilities of using individual technologies are elaborated here. The work includes basic information on measuring surface roughness and the standard ČSN EN ISO 9013. A sheet metal part is manufactured using a laser machine and a bending machine in the practical part of the thesis. During production the influence of the change of cutting parameters on the surface quality and the dependence of the material suspension on the direction of the fibers during bending is measured in order to find the optimal solution.

Keywords: laser cutting, bending, cutting surface, suspension

Touto cestou bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce doc. Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za cenné rady a ochotu při zpracování bakalářské práce.

Poděkování patří také zaměstnancům firmy KALINA industries s.r.o. za pomoc při experimentu a sdílení svých zkušeností. V neposlední řadě děkuji mé rodině za podporu a trpělivost.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD..... | 8 |
| I TEORETICKÁ ČÁST..... | 9 |
| 1 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ..... | 10 |
| 1.1 STŘÍHÁNÍ..... | 11 |
| 1.1.1 Rozdělení stříhání..... | 11 |
| 1.1.2 Technologie přesného vystřihování plechů s tlačnou hranou | 12 |
| 1.1.3 Stoje pro stříhání | 13 |
| 1.2 OHÝBÁNÍ A ROVNÁNÍ | 14 |
| 1.2.1 Ohraňování | 14 |
| 1.2.2 Zakružování..... | 15 |
| 1.2.3 Válcování | 16 |
| 1.2.4 Ohýbání pomocí ohýbadel | 17 |
| 1.2.5 Rovnání | 17 |
| 1.3 TAŽENÍ..... | 18 |
| 1.4 OSTATNÍ METODY PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ | 18 |
| 1.4.1 Kroužlení..... | 18 |
| 1.4.2 Tváření pryží | 19 |
| 1.4.3 Tažení plechů pomocí kapaliny | 19 |
| 2 DĚLENÍ MATERIÁLU | 20 |
| 2.1 DĚLENÍ MATERIÁLU ŘEZÁNÍM | 20 |
| 2.2 DĚLENÍ MATERIÁLU ROZBRUŠOVÁNÍM | 21 |
| 2.3 PLAMENOVÉ ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM | 21 |
| 2.4 ŘEZÁNÍ MATERIÁLU KAPALINOVÝM PAPERSEM | 22 |
| 2.5 PLAZMOVÉ ŘEZÁNÍ..... | 23 |
| 2.6 ELEKTROISKROVÉ ŘEZÁNÍ DRÁTOVOU ELEKTRODOU | 23 |
| 2.7 ŘEZÁNÍ LASEREM | 24 |
| 2.7.1 CO ₂ laser | 24 |
| 2.7.2 Pevnolátkové lasery | 25 |
| 2.7.3 Asistenční plyny..... | 26 |
| 3 HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU | 27 |
| 3.1 METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI | 27 |
| 3.2 HODNOCENÍ JAKOSTI TEPELNĚ DĚLENÝCH SOUČÁSTÍ | 27 |
| 3.2.1 Průměrná výška prvků profilu Rz5 | 28 |
| 4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI..... | 29 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 30 |
| 5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI..... | 31 |
| 6 VÝROBNÍ ČÁST | 32 |
| 6.1 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ | 33 |
| 6.2 POUŽITÝ MATERIÁL..... | 33 |
| 6.3 POSTUP VÝROBY VZORKŮ PRO MĚŘENÍ Rz5 | 33 |
| 6.4 POSTUP VÝROBY VZORKŮ PRO HODNOCENÍ VLIVU SMĚRU VLÁKEN..... | 34 |
| 7 ČÁST MĚŘENÍ..... | 35 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 7.1 | POSTUP MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU | 35 |
| 7.2 | ODPRUŽENÍ PŘI OHYBU..... | 35 |
| 8 | VÝSLEDKY MĚŘENÍ | 36 |
| 8.1 | JAKOST POVRCHU ŘEZU | 36 |
| 8.2 | ODPRUŽENÍ MATERIÁLU PŘI OHYBU | 40 |
| 9 | DISKUZE VÝSLEDKŮ | 42 |
| | ZÁVĚR | 43 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 44 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 47 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 48 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 50 |

ÚVOD

Plošné tváření je nedílnou součástí strojírenského průmyslu díky výrobě lehkých dílů s poměrně vysokou tuhostí a pevností. Nejběžnější metodou plošného tváření je použití konvenčních nástrojů a univerzálních lisů. Vyznačují se svou vysokou efektivitou a stálostí procesu výroby. Nevýhodou jsou však velké pořizovací náklady na výrobu nástroje, délka jeho výroby a dlouhé předvýrobní časy. Tato skutečnost se nejvíce projevuje u menších sériích, kdy se cena výše zmíněných vlastností citelně promítá do ceny výrobku. Proto začaly vznikat alternativní způsoby jako tváření pomocí nekovových nástrojů, které nemají tak vysoké počáteční náklady.

K nejvýznamnějším pokrokům došlo zavedením počítačem řízených strojů do výroby, které umožnilo rozmach nejen metod plošného tváření jako ohraňování nebo počítačem řízené vysekávací stroje, ale také nekonvenčních technologií dělení, mezi které například patří elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou, laser nebo vodní paprsek. V dnešní době tyto technologie získávají stále větší uplatnění zejména u velkých dílů se složitou geometrií. Využívány jsou při malých a středních sériích, kdy často úplně nebo z části nahrazují konvenční metody výroby. V souvislosti s tím se také zvyšují nároky na přesnost a opakovatelnost výroby.

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší dnes používaných technologií plošného tváření a dělení materiálu. Jsou zde zahrnuty jejich principy a možnosti využití. Následně je stanoven experiment, jehož součástí je výroba určeného dílu pomocí technologie řezání laserem a ohybu na ohraňovacím stroji. Při řezání jsou měněny rezné parametry rychlost posuvu a tlak asistenčního plynu. Použitými asistenčními plyny jsou v tomto případě kyslík a dusík. Při následném měření se zjišťuje průměrná výška prvků profilu. Cílem je stanovit závislosti měněných parametrů a určit nejvýhodnější variantu. Pro ohyb je vyrobeno 10 vzorků, které jsou natočeny ve směru vláken materiálu od 0 do 90 stupňů. Následně jsou vzorky ohýbány a měren jejich úhel. Z výsledků se určuje závislost odpružení na úhlu ohybu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

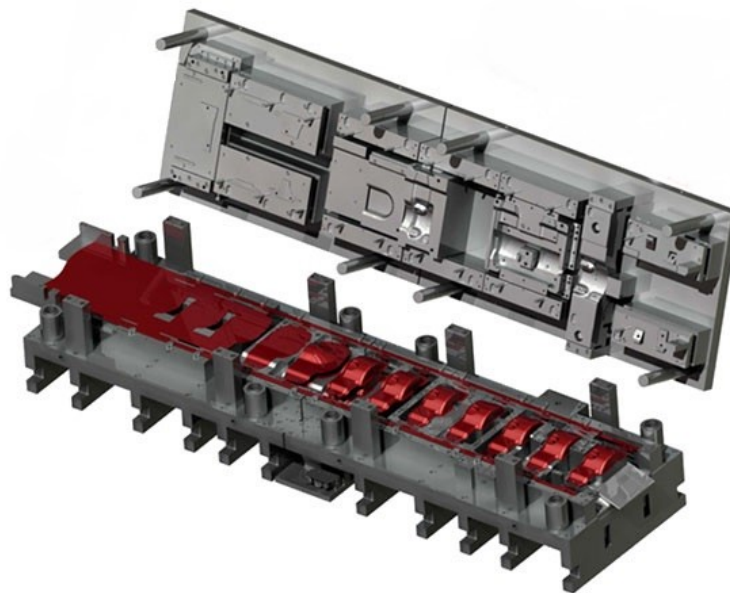
1 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ

Plošným tvářením se označuje řada metod, jimiž se dosáhne trvalé změny tvaru polotovaru (obvykle plech, tenkostěnný profil) bez podstatné změny tloušťky nebo průřezu. [1]

Technologií plošného tvářením lze dosahovat přesných rozměrů, tudíž náklady na dokončovací operace nejsou tak vysoké, jako u objemového tvářením. Velkou výhodou je také nízká hmotnost výrobků při zachování tuhosti a pevnosti. Z větší části se provádí za studena, kdy je teplota tvářeného materiálu pod rekrytalizační teplotou. Nevýhodou je nižší využití materiálu vznikající při tvorbě polotovarů, kterou lze ovlivnit optimalizací uspořádání přístřihů, ne však odstranit. Mezi základní operace, kdy dochází k oddělování, přemisťování nebo tvarování materiálu patří:

- Stříhání
- Ohýbání
- Tažení

Kombinací těchto metod ve sdružených tvářecích nástrojích (Obr.1) lze docílit vysoké efektivity práce. Běžně se tak sdružené tvářecí nástroje využívají v sériové výrobě. [1], [5]



Obr.1 Sdružený nástroj [27]

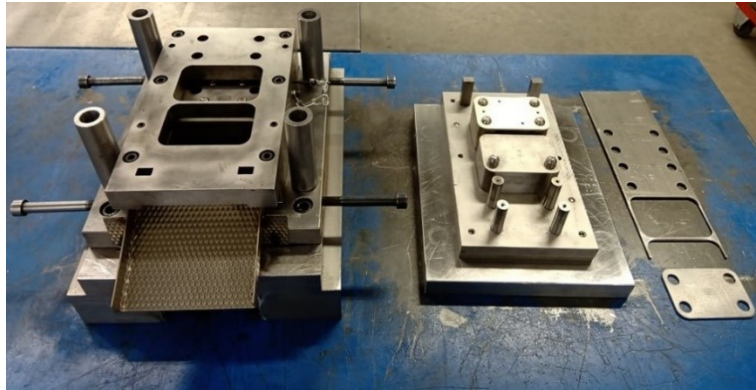
1.1 Stříhání

Tváření materiálu stříháním je jedna z nejrozšířenějších operací ve výrobě. Používá se k přípravě polotvarů (stříhání tabulí, svitkových plechů, profilů atd.), dále pro vystříhování součástí pro konečné použití nebo pro výrobky určené k dalším technologiím zpracování (ohýbání, tažení, protlačování apod.). Využívá se také při dokončovacích a pomocných operacích. [2]

Stříhací nože vnikají do materiálu a vyvolávají napětí přesahující mez kluzu, jež vzrůstá až do meze pevnosti ve smyku. Přitom dochází k plastické deformaci, která je ovšem nežádoucím jevem. Po ustřížení je v první části napěchovaný materiál, následuje střížná plocha dokončená lomem. Díky tomu je plocha stříhu méně kvalitní. Její kvalitu ovlivňuje velikost střížné hrany, vlastnosti stříhaného materiálu, způsob stříhání, kvalita střížného nástroje, kvalita lisu apod. [3], [4]

1.1.1 Rozdělení stříhání

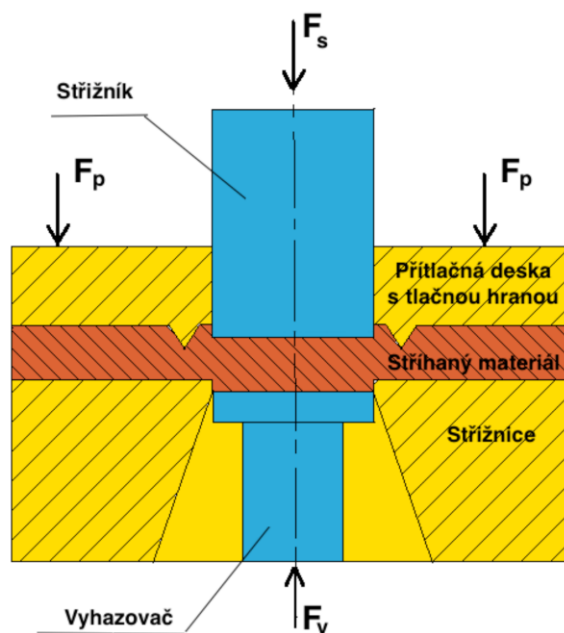
- Stříhání pomocí rovnoběžných a skloněných nožů – využíváno pro stříhání rovinných stříhů (pásů, přístřihů); provádí se na tzv. tabulových nůžkách; u rovnoběžných nožů dochází k velkým rázům, proto se častěji používají nože skloněné, které zajišťují postupný stříh a tím pádem menší potřebnou střížnou sílu [6]
- Stříhání rotačními noži – plynulé stříhání plechů, při kterém je styková plocha nože a materiálů jen v krátké délce; využívá se pro dělení pásů a dlouhých přístřihů
- Stříhání s tvarovými noži – používá se pro stříhání profilů; nože mají negativní tvar profilu, který stříhá; lepších podmínek lze docílit použitím tzv. kmitacích nožů [1]
- Stříhání na stříhadlech – stříhadla jsou jednoduchá nebo složená podle množství a složitosti jednotlivých operací; může provádět jednu i více operací u stříhadel postupových (obr.2), nebo se kombinuje s ohybem, tažením, u moderních nástrojů závitováním otvorů, nýtováním apod; práce se dá plně automatizovat; vhodné pro sériovou výrobu kvůli vysokým pořizovacím nákladům nástroje [6], [1]



Obr.2 Postupové stříhadlo

1.1.2 Technologie přesného vystříhování plechů s tlačnou hranou

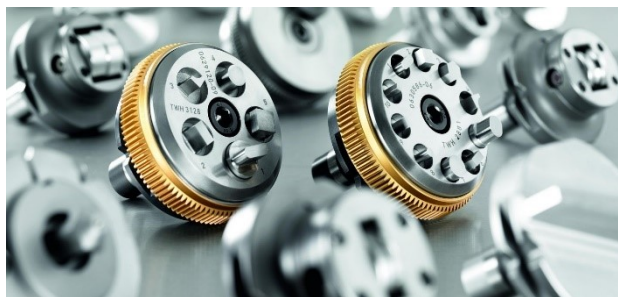
Stříh je popsán na obr.3. Stříhaný materiál je sevřen mezi přidržovačem a střížnicí. Tlačná hrana vniká do materiálu před samotným stříhem a zachytává radiální složku tečení materiálu. Materiál se při stříhu neprohýbá a pásmo plastického stříhu se rozšiřuje přes celou tloušťku materiálu. Touto metodou lze docílit mnohem kvalitnější střížné hrany než u běžného stříhání. Nevýhodou je požadavek na použití přídatných zařízení pro vyvození síly na přidržovači a vyhazovači nebo použití speciálních strojů – trojčinných lisů, které umožňují každý ze tří pohybů ovládat samostatně [6], [7]



Obr.3 Schéma přesného stříhání [7]

1.1.3 Stoje pro stříhání

- Tabulové nůžky – většinou hydraulické; jsou určeny ke stříhání tabulí a přístřihů plechu; horní nůž má různý úhel sklonu, čím menší je úhel sklonu, tím méně se ústřižek ohýbá; pro stříhání tenkých plechů mohou být ruční
- Klikové lisy – pohyb beranu je zajištěn pomocí klikové hřídele; jejich výhodou je konstantní průběh zdvihu, využívá se nejen u stříhání, ale také při ohýbání, tvarování, děrování, v ojedinělých případech i kování
- Výstředníkové lisy – místo klikové využívá výstředníkovou hřídel; pomocí natočení výstředníkového pouzdra se dá měnit výška a rychlost zdvihu; jsou používány pro stříhání, ohýbání, tvarování apod.
- Děrovací stroje – stoje využívají střížných nástrojů jednoduchých tvarů (Obr.4), pomocí kterých vysekávají konečný výrobek; stroj je řízen programem, jenž automaticky posouvá polotovar (plech) po výrobním stole a mění nástroje; v dnešní době jsou stroje vybaveny tak, aby kromě stříhacích nástrojů mohli používat také nástroje ohýbací, tvářecí, rotační nože, závitníky nebo laser; uplatnění mají při výrobě malých sérií dílů většinou o větší velikosti



Obr.4 Děrovací nástroje [8]

- Nůžky na pásy – dělí široké pásy na užší pomocí kruhových nožů uložených na hřídelích
- Hydraulické lisy – pracují na základě rovnoměrného šíření tlaku všemi směry (Pascalův zákon). Uplatnění najdou hlavně u tváření, kde je požadavek na konstantní síly v průběhu tváření; u stříhání pryží; nevýhodou je pomalý zdvih [7], [9]

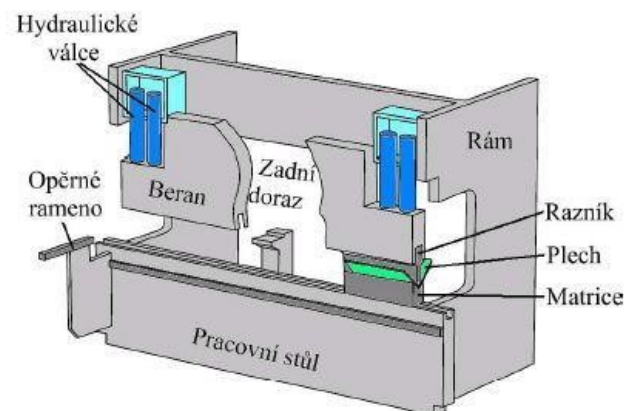
1.2 Ohýbání a rovnání

Ohýbání je trvalé deformování materiálu, při kterém se materiál vzniklým napětím od působící síly buď ohýbá, nebo rovná. Ohýbání je často používaná technologie ve výrobě požadovaných tvarů z plechů, drátů a tyčí. Většinou je prováděno za studena pomocí nástrojů a strojů určených k ohýbání. Materiály tvrdé a křehké se ohýbají za tepla. Mezi nejpoužívanější technologické postupy ohýbání podle způsobu výroby patří ohraňování, zakružování, válcování a ohýbání v ohýbadle. [2], [4]

1.2.1 Ohraňování

Ohraňováním je nazýváno ohýbání plechu s minimálním poloměrem ohybu. K tomuto účelu jsou využívány ohraňovací lisy (Obr.5), které se dělí na ruční, mechanické a hydraulické.

V dnešní době se využívají zejména hydraulické lisy, které se vyznačují nejvyšší jmenovitou silou, kterou jsou schopny dodávat po celý pracovní zdvih. Pohyb zajišťují servo-hydraulické válce, které dokážou měnit rychlost pohybu beranu v jednotlivých úsecích zdvihu. Každý z válců je řízen zvlášť, což vede ke snadnému naklápění beranu. Tato funkce je nezbytná jako korekce při ohraňování na opotřebovaných nástrojích, nebo nerovnoměrném rozložení sil na beran. [11]



Obr.5 Schéma ohraňovacího lisu

Mezi základní operace na ohraňovacích lisech patří volné ohýbání, při kterém razník natlačí materiál do matrice, aniž by ho přitlačil k zápusťkové straně. Zatímco razník jede směrem dolů, ohýbají se ramena obrobku směrem nahoru a vzniká úhel. Čím hlouběji se obrobek tiskne do matrice, tím ostřejší je úhel. Výhodou je univerzálnost nástrojů, které můžeme využít pro různé tloušťky materiálu a úhly ohybu. Další možností je tzv. ohýbání ražením,

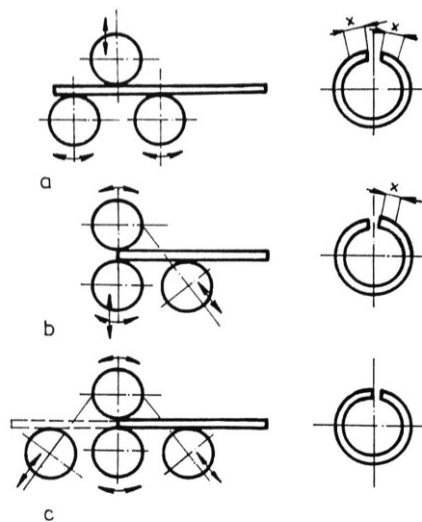
kde razník natlačí materiál kompletně do matrice. Stroj zvyšuje tlak a zatlačuje obrobek do matrice až do předepsané hodnoty. Díky této metodě má výrobek téměř nulové zpětné odpružení, avšak pro každý úhel je zapotřebí vlastní sada nástrojů. Pomocí sdržených a zakázkově vyrobených nástrojů je možné falcovat nebo tvářet [10]

Moderní ohraňovací lisy řízené pomocí řídicího systému s možností vytváření programů a úplné automatizace výroby značně zvyšují efektivitu práce. Tyto stroje nacházejí stále větší uplatnění. Využívají se při zakázkové výrobě nebo menších sériích profilů, skříní a dalších výrobků z plechu, často ve spojení s technologií děrovacích strojů nebo řezání laserem.

1.2.2 Zakružování

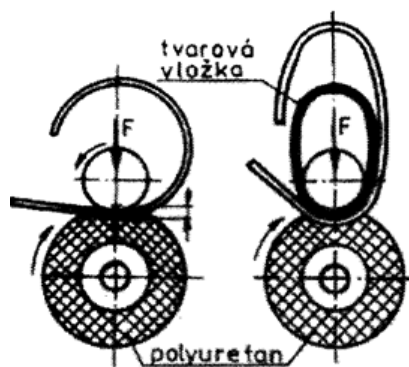
Zakružování je stáčení daného polotovaru (profil, plech) do kruhové, válcové, nebo kuželové plochy. Materiál se postupně ohýbá po celé délce výrobku, dokud se nedosáhne konečného tvaru.

Zakružování se provádí na zakružovačkách. Dělí se na tříválce (typ a, b, obr.6) a čtyřválce (typ c, obr.6), ovšem u tříválcových zakružovaček nelze zakroužit konce materiálu, proto se v dnešní době využívá především čtyřválců.



Obr.6 Různé způsoby zakružování [12]

Speciálním případem je dvouválcová zakružovačka, kdy jeden z válců je potažen polymerem, který umožňuje deformaci plechu pomocí zatlačení do pružného povrchu. Při tomto způsobu lze díl zakružít na jedinou operaci na rozdíl od předchozích metod, kdy zakružujeme většinou postupně na více operací. Další výhodou dvouválce je možnost vytvořit i jiné tvary než kruhové, což jde u tří nebo čtyřválce velmi obtížně. [1]

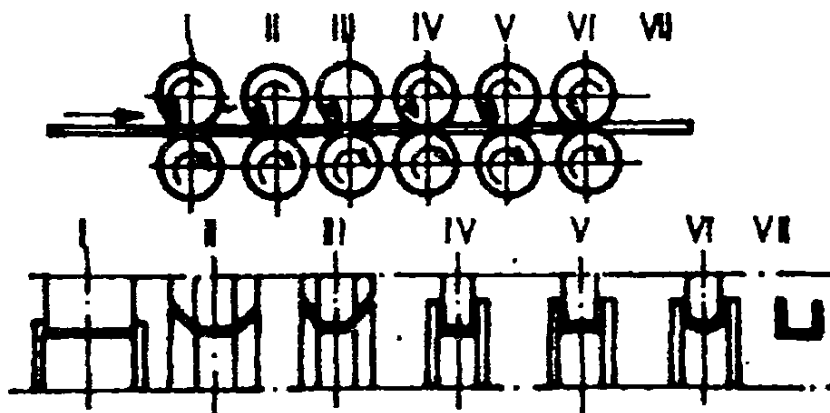


Obr.7 Speciální případ dvouválce [1]

1.2.3 Válcování

Metodou válcování jsou pomocí válcovacího stroje vyráběny přímé profily. Plech prochází přes jednotlivé válce, které ho vytvarují do požadovaného tvaru. Při použití malého počtu válců může být povrch výrobku nekvalitní. [4]

Linka se vyznačuje vysokou produktivitou a možnostmi výroby dlouhého profilu. Nehodí se pro malosériovou výrobu.

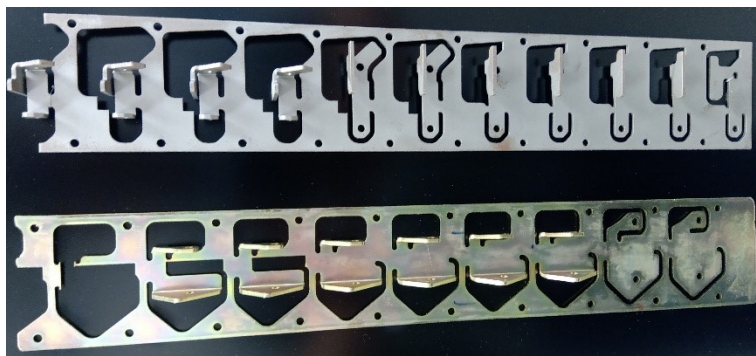


Obr.8 Princip válcování profilů [12]

1.2.4 Ohýbání pomocí ohýbadel

Ohýbadlo se skládá z ohybníku a ohybnice. Pomocí ohýbadel lze vyrábět ohyb s velkým poloměrem zaoblení nejčastěji do tvaru U, nebo V. V praxi jsou běžně konstruovány v postupových nástrojích, tedy v kombinaci se stříháním (Obr.9). Mezi běžně používaná ohýbadla také patří ohýbadlo s bočním pohybem čelisti, které z bočních stran dotlačuje materiál na ohybník. [2], [12]

Ohýbání pomocí ohýbadel se provádí na konvenčních lisech (klikové, výstředníkové), které jsou zmíněny v kapitole Stroje pro stříhání.

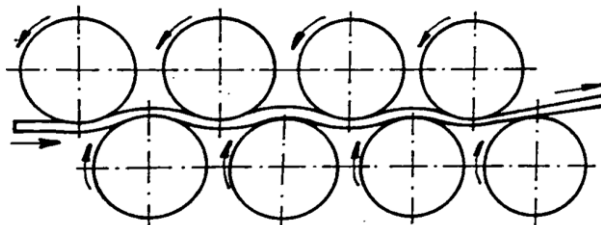


Obr.9 Postupové stříhání s ohýbáním

1.2.5 Rovnění

Rovnění je technologie založená na principu ohýbání mezi rovnacími válci (obr.10) u plechů a mezi rovnacími kotouči u drátů nebo tyčí. Rovnění spočívá v několikanásobném střídavém ohnutí vstupního polotovaru. Zbylá pnutí jsou nižší, když jsou střídavé ohyby menší a menší.

Rovnění je prováděno nejčastěji u svitků plechu, stočeného drátu nebo polotovarů poškozených při dopravě, které musí být před vstupem do nástroje narovnány. [1], [4]



Obr.10 Schéma rovnění svitků mezi válci [1]

1.3 Tažení

Tažení je přetvoření rovinného přístřihu v duté těleso. Vznikne tak poměrně snadně prostorové těleso nerozvinutelného tvaru, které má velkou tuhost při malé váze (víka, poklopy, karoserie, nádoby různých tvarů).

Tažník je upevněn na beranu lisu a tažidlo na stole lisu. Pohybem tažníku směrem dolů je přístřih vtahován přes zaoblené hrany tažnice. Hluboké výtažky je nutné vyrábět ve více krocích s více tažníky a tažnicemi (Obr.11). [4]

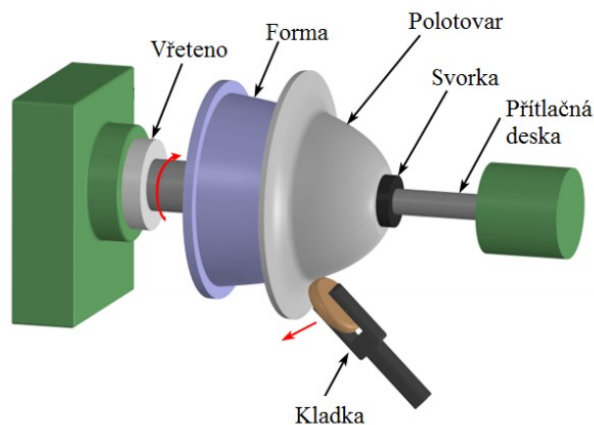


Obr.11 Jednotlivé operace výroby taženého dílu

1.4 Ostatní metody plošného tváření

1.4.1 Kroužlení

Kroužlení, nebo také kovotlačení je způsob tváření rotačně symetrických součástí z plechu, při kterém rotuje polotovar (výstřižek plechu nejčastěji ve tvaru kruhu) přitlačený na formu, která udává tvar konečnému výrobku. Pomocí speciálních nástrojů je plech postupně přitlačován na model, dokud nemá jeho tvar. [2]



Obr.12 Schéma kroužlení [36]

Tato metoda byla z velké části postupně nahrazena tažením, avšak stále má význam při menších sériích nebo v případech, kdy by se výrobek metodou tažení musel vyrábět na příliš mnoho operací. Velkou výhodou je relativně nízká cena modelu.

1.4.2 Tváření pryží

Nástroj je tvořen kovovým modelem, který udává výsledný tvar výrobku a pryžovým, (u některých případech polyuretanovým polštářem), jenž vytváří potřebný tlak.

Výhodou této metody je zejména levná výroba nástroje, pryžová část nástroje lze navíc využít na výrobu dílů o různých tvarech, tudíž je zde úspora času při seřízení. Povrch výrobku není při tažení poškozován jako u konvenčního způsobu tažení.

Hlavní nevýhodou je omezená životnost pryže, která je závislá zejména na tvaru dílu. U této metody potřebujeme vyvolat až čtyřikrát větší sílu, než u konvenčního tažení, jelikož část energie je spotřebována na deformaci pryže. Nedostatek tvarovacího tlaku pryží také způsobuje špatnou výrobu ostrých hran na výrobku, které se často musí provést následně při dokončovacích operacích.

Nejčastěji se tváření pryží využívá u prototypové a malosériové výroby. [14], [15]

1.4.3 Tažení plechů pomocí kapaliny

Místo pryže je zde využíváno jako tlakové médium kapalina. Díky tomu lze vytvářet větší tlak působící na tažený plech a tím vytvořit hluboké tvary na jeden tah. Tuto metodu lze také použít na tváření profilů (hlavně při výrobě rámu kol). Nevýhodou je nutnost použití speciálního zařízení. Na rozdíl od pryže také nelze dané výrobky stříhat. Jednotlivé metody dělíme na:

- Tažení metodou Hydroform – kapalina je uzavřena v pouzdru, které je utěsněno pryžovou membránou; je využívána na hluboké tahy
- Tažení metodou Wheelon – tažení gumovým vakem ovládaným kapalinou, vhodný zejména pro mělké tažení
- Hydromechanické tažení – plech je sevřen mezi přídržovačem a tažnicí; zatímco z jedné strany působí tažník, z druhé strany působí kapalina a tlačí na celou plochu tažníku [14], [15]

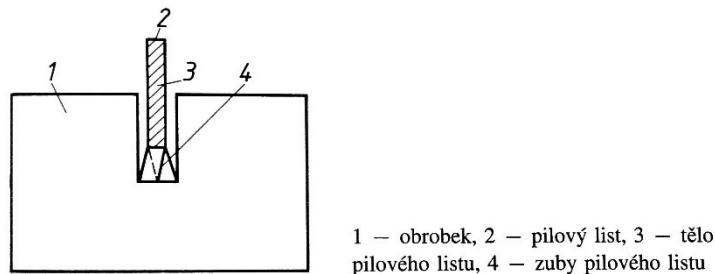
2 DĚLENÍ MATERIÁLU

Normalizované hutní materiály dodané v daných rozměrech se musí obvykle před samotnou výrobou dělit na požadované rozměry pro další zpracování nebo v některých případech již do požadovaného tvaru výrobku. Zpravidla se metody rozdělují na konvenční, jako jsou řezání (třískové) a stříhání (beztřískové), které jsou rozebrány v předchozí kapitole, a nekonvenční, mezi něž patří Elektroerozivní obrábění, chemické obrábění, obrábění paprskem laseru, plasmu, vody apod. [33,18]

2.1 Dělení materiálu řezáním

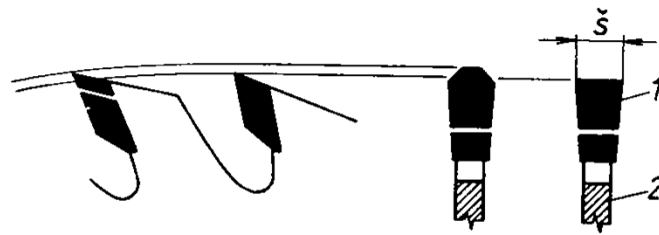
Tato třísková metoda je nejčastější způsob dělení tyčových materiálů. Princip spočívá ve vnikání břitů nástroje do materiálu obrobku. Velkou výhodou je vysoká maximální hloubka řezu. Stroje určené k tomuto účelu jsou rámové, kotoučové nebo pásové pily. V poslední době je kladen velký důraz, aby byly tyto pily plně nebo alespoň částečně automatizovány.

Nástroj u rámové pily tvoří pilový list, což je ocelový pás, který je opatřen zuby. Vyrábí se obvykle z rychlořezné oceli. Konce zubů jsou rozvedeny do šířky tak, aby tělo pilového listu nedřelo o stěny materiálu. [17]



Obr.13 Schéma pilového listu [33]

Kotouče na kotoučové pily se vyrábí celistvé (z nástrojové nebo rychlořezné oceli), segmentové u větších rozměrů kotoučů nebo s pájenými destičkami ze slinutého karbidu.



1 – břit, 2 – těleso

Obr.14 Druhy zubů pilového kotouče [33]

Pilové pásy se vyrábějí většinou v provedení bimetal, tedy zuby jsou vyráběny z nástrojové oceli a tělo z konstrukční. Následně se obě části spojují například laserem. Délka pásu může dosahovat až 100 metrů a většinou se dodává jako svařený nekonečný pás. Pásové pily se konstruují buď jako svislé (pro tvarové řezy), nebo jako vodorovné. V obou případech mají stroje kotouče rozdělené na hnané a hnací, které zajišťují pohyb pilového pásu. [33]

2.2 Dělení materiálu rozbrušováním

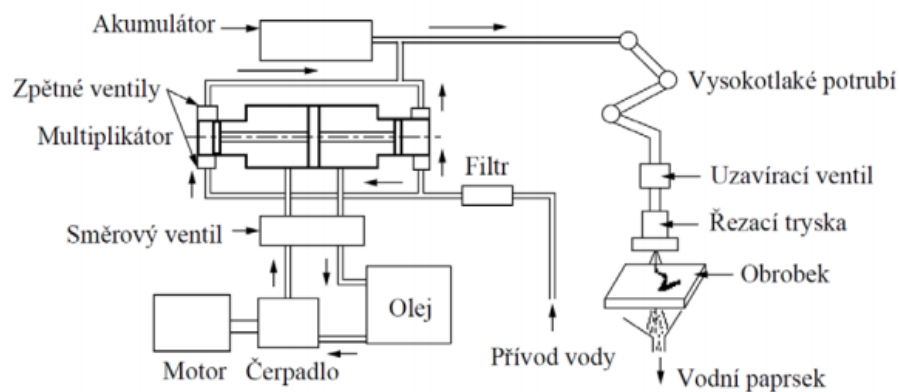
Při rozbrušování je materiál ubírán abrazivním kotoučem při pohybu po materiálu. Hlavním rozdílem mezi řezáním a rozbrušováním je kotouč, který je místo zubů tvořen brusnými zrnky s různými geometrickými tvary. Samoostřící schopnost zrn zajišťuje jejich výměnu, která vzniká vypadáváním tupých zrn z kotouče. Stroje - tzv. rozbrušovačky, které roztáčejí brusný kotouč, mohou být ruční, stacionární, pojízdné apod. Tento způsob dělení se používá především u zakázkové výroby k dělení tenkých plechů nebo profilů. [19]

2.3 Plamenové řezání kyslíkem

Proces spočívá v přehřátí řezaného materiálu na jeho zápalnou teplotu. Následně se přivede kyslík pod tlakem, který zajistí spalování kovu. Jako topný plyn se využívá propan, MAPP, zemní plyn, butan, vodík a acetylen. Druh plynu se využívá dle vlastností děleného materiálu. Nejčastěji se využívá acetylen díky své univerzálnosti. Tato metoda je využívána pro dělení uhlíkových ocelí o velké tloušťce, avšak postupně je nahrazována modernějšími technologiemi [20]

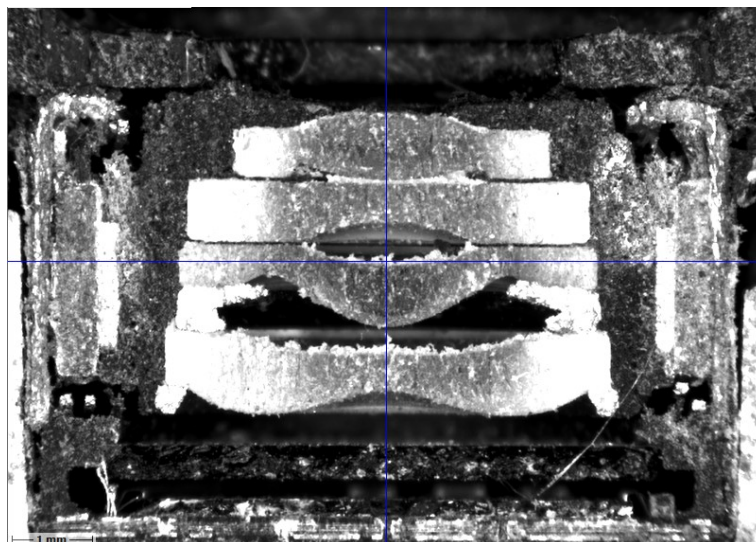
2.4 Řezání materiálu kapalinovým paprskem

Technologie původně vyvinuta pro kosmický průmysl funguje na principu paprsku vody o vysokém tlaku, který se při nárazu na povrch materiálu chová jako pevné těleso. Při nárazu vznikají bubliny vyplněné sytou párou, jež při zániku vytvářejí rázy vytrhávající materiál. Paprsek může být čistá kapalina nebo s příměsí brousícího materiálu. [16]



Obr.15 Schéma systému stroje pro řezání vodním paprskem [26]

V dnešní době se nejčastěji uplatňuje pro řezání keramiky, skla, kovů a různých druhů polymerů. Jeho velkou výhodou je možnost řezání kombinovaných materiálů, které mohou být složeny z několika vrstev (Obr.16). Materiál v blízkosti řezu není tepelně ovlivněn a lze jej řezat pod úhlem. Nevýhodou je zejména nízká rychlost oproti laseru a plazmě při řezání kovů, nutnost následné ochrany před korozi a vysoká hlučnost výroby. [22]



Obr.16 Řez vodním paprskem vrstveného materiálu

Výrobci se často snaží technologii přizpůsobit zákazníkům na míru, lze tak například řezat součástky s vysokou přesností do elektroprůmyslu, otrýskávat, odstraňovat ořep apod. [23]

2.5 Plazmové řezání

Plazmové řezání je proces používaný především pro řezání oceli, ojediněle jiným materiálu. K řezu dochází pomocí plazmového oblouku vznikajícího mezi wolframovou elektrodou a řezaným předmětem, kdy se rozkládají molekuly stlačeného plynu procházejícího elektrickým obloukem. Při vzniku vysoké teploty (okolo 25 000 °C) je materiál taven a odpařován. Nejčastěji používanými plyny jsou argon, dusík, směs argon+dusík a argon+vodík. [16], [24]

Vzhledem k fyzikální podstatě probíhajících procesů jsou plazmová pracoviště vedena jako riziková a jejich provoz se řídí přísnými bezpečnostními předpisy. Při obrábění navíc vznikají škodlivé plyny, které je nutno odsávat. [16]

Jakost řezu závisí především na napájecím proudu a napětí, rychlosti řezu, druhu řezného materiálu a metodě řezání. Maximální tloušťka řezaného materiálu může dosahovat 150 mm. [16]

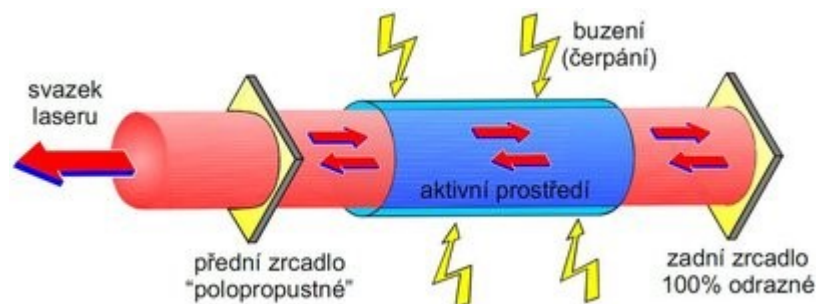
2.6 Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou

Princip řezání spočívá v malých elektrických výbojích mezi drátem a materiálem, které natavují nebo odpařují materiál. Po jednotlivých výbojích zůstávají na materiálu mikro krátery. Drát postupně projíždí celou trajektorií řezu. Kvůli jeho opotřebení se drát odvíjí z cívky a prochází postupně řezem.

Využívá se zejména při výrobě lisovacích nástrojů a dělení velmi tvrdých materiálů. Výhodou je vysoká přesnost. Díky řízení počítačem lze drát v řezu natočit a tím pádem dělat řez pod úhlem. Mezi největší problémy patří relativně dlouhá doba výroby a předvýrobních operací ve formě výroby startovacích otvorů, kterými se drát před začátkem řezání provleče. Moderní centra mají vrtání jako součást stroje a automatické navádění drátu, čímž se dá značně snížit doba celkové výroby. [21]

2.7 Řezání laserem

Laser se obecně označuje jako optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření díky stimulované emisi. Základem laseru je aktivní prostředí, které je různými možnostmi (opticky, elektrickým výbojem, chemicky apod.) buzeno. Tímto způsobem se dodává do laseru energie, která je pomocí stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. K tomu je potřeba optický rezonátor, ten je nejčastěji tvořen zrcadly. [28]



Obr.17 Princip laseru [28]

Tato technologie je využívána napříč všemi obory. Nejběžnějšími aplikacemi je tisk, gravírování, svařování, senzory a v neposlední řadě také dělení materiálu. Lasery pro dělení materiálu jsou nejčastěji rozlišovány dle druhu aktivního prostředí na plynové a pevnolátkové.

2.7.1 CO₂ laser

Řadí se do kategorie plynových laserů. Jeho prostředí je buzeno buď radio-frekvenčně, nebo elektrickým výbojem. Dále jsou děleny podle typu rezonátoru na hermeticky uzavřené rezonátory pro nižší výkony a tzv. průtočné, v nichž plyn neustále proudí pro vyšší výkon.

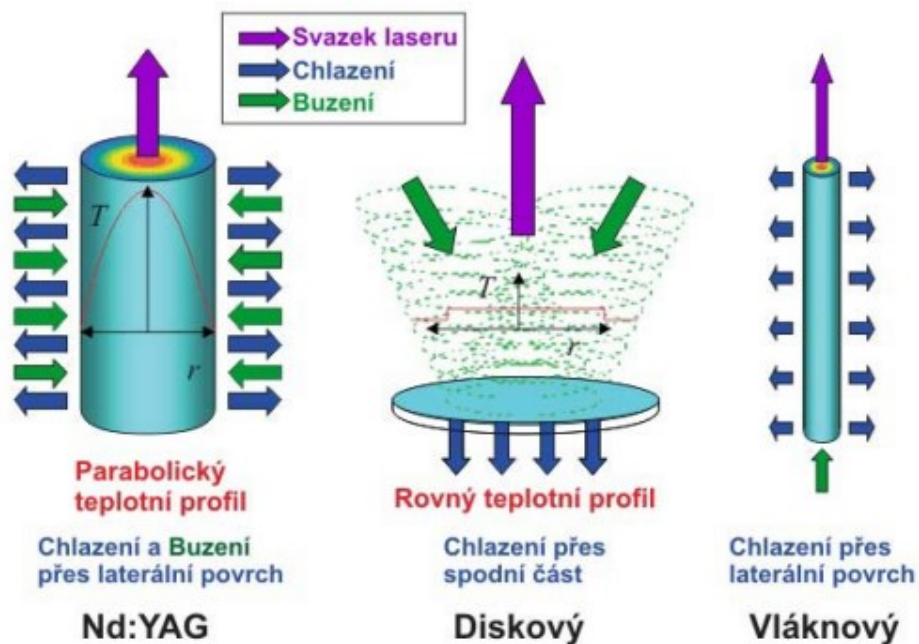
CO₂ laser je nejdéle využívaným typem laseru v průmyslových aplikacích. Nejvíce je rozšířen u gravírování, řezání a svařování plechů do tloušťky 45 mm nebo dělení různých nekovových materiálů (dřevo, kůže apod.). Díky vlnové délce 10,6 μm zaručuje vysokou kvalitu řezu, kdy většinou nejsou nutné další dokončovací práce. Nevýhodou je nemožnost vedení paprsku optickým vláknem. Pro vedení se využívají zrcadla, která prodlužují dráhu paprsku a mají vysoké nároky na kalibraci a údržbu. [28], [29]

2.7.2 Pevnolátkové lasery

V této skupině se pro dělení materiálu využívá nejčastěji tři typů. U všech aktivní prostředí tvoří matrice umělého YAG krystalu dopovaného ionty neodymu, nebo yterbia. Rozdíl mezi těmito typy je v geometrii aktivního prostředí. Vlnová délka záření se pohybuje kolem 1 μm . Kratší vlnová délka umožňuje vést záření optickým vláknem, což je hlavní výhoda zejména u robotických linek, kde je použití CO_2 laserů díky vedení záření velmi náročné. Výhodou kratší vlnové délky je taktéž vyšší absorbování energie do materiálu, díky čemuž se mohou rezat barevné kovy s vysokou odrazivostí a rychleji rezat tenké plechy. [28], [29]

Nd: YAG laser

Jde o nejstarší typ pevnolátkového laseru nasazeného v průmyslu. Je buzen buď výbojkami nebo laserovými diodami. V dnešní době jeho použití klesá kvůli velkým ztrátám energie přeměněné na teplo (Obr.18). Velká část energie se tak nevyužije a vznikají náročné požadavky na chlazení. Nejčastěji je použit pro svařování, ale postupně je nahrazován jinými typy. [28]



Obr.18 Schéma pevnolátkových laserů [29]

Diskový laser

Princip je podobný jako u Nd:YAG, ovšem aktivní prostředí je tvořeno malým diskem (Obr.18). Výhodou je rovný teplotní profil umožňující výkon s vysokou kvalitou výstupního paprsku. Oblíbený je díky široké škále využití a odolnosti vůči drsným podmínkám. [28], [30]

Vláknový laser

Jde o nejnovější a nejperspektivnější typ laseru. Aktivní prostředí tvoří optické vlákno (Obr.18), které zároveň slouží jako vedení paprsku. Vlákno je dopované yterbiem a místo zrcadel je použita Bragovská mřížka vytvořená přímo na vlákně. Laser je buzen pomocí diod. Vlákno je chlazeno po celé délce a díky modularitě, tedy možnosti spojovat, se může navyšovat výkon až na 80 kW při vysoké účinnosti. Mezi jeho největší výhody patří životnost až 100 000 h při nejnižších provozních nákladech a nárocích na údržbu, což je až desetkrát více než u předchozích variant. Díky nízké váze a kompaktnosti je velmi oblíbený při robotizaci. [28], [29], [31]

2.7.3 Asistenční plyny

Kyslík

Využívá se pro nelegované a nízkolegované oceli. Laserový paprsek zahřívá materiál a pomocí kyslíku (do 5 bar) vzniká exotermická reakce, při které je materiál spalován. Produkty hoření a tavenina jsou následně vyfukovány a vzniká řezná spára. Tento způsob řezání se nazývá oxidační. Je kladen vysoký důraz na čistotu kyslíku (99,95 %), která má významný vliv na kvalitu a rychlost řezu. Velkou nevýhodou je vrstva oxidů, jež se vytváří na ploše řezu, a může přinášet potřebu dalších víceprací.

Dusík

Dusík je vhodný pro řezání železných i neželezných kovů. Materiál je taven laserovým paprskem a následně vyfukován proudem dusíku (10-25 bar). Výsledná řezná plocha je bez oxidů a lesklá. Tomuto způsobu řezání se říká tavné. I u dusíku jsou velké nároky na čistotu plynu (99,999%).

Argon

Tento plyn se používá u materiálů velmi náchylných k tvorbě oxidů jako jsou titan, zirkon nebo tantal. Při jeho využití nevzniká oxidační vrstva a není zapotřebí dalšího zpracování řezné hrany.

Stlačený vzduch

Ve strojírenství je tato varianta využívána jen málo. Stlačený vzduch velmi negativně ovlivňuje řeznou plochu a značně snižuje rychlost výroby. [34]

3 HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Na základě funkce daných ploch jsou kladeny na povrch určité požadavky tak, aby nedocházelo k rychlému opotřebení součástí, nadměrnému tepelnému působení apod.

Jedna z často měřených vlastností je drsnost povrchu. Ve výkresové dokumentaci je její požadovaná velikost většinou značena Ra (Aritmetická odchylka od profilu) nebo Rz (Průměrná hodnota z absolutních hodnot maxim a minim u profilu křivky). Měření kromě zjištění drsnosti povrchu může poskytnout informace o výrobním procesu.

3.1 Metody měření drsnosti

- Kvalitativní hodnocení – probíhá pomocí zraku či hmatu, kdy člověk porovnává daný povrch se vzorem s případným využitím optických pomůcek; spolehlivost je značně omezena rozlišovací schopností lidských smyslů
- Nepřímá kvantitativní měření – dochází k porovnání kontrolované plochy s etalonem komparačními měřidly; výsledek je rozdíl porovnávaných drsností
- Dotykové profiloměry – princip je založen na posuvu hrotu po měřeném povrchu, kdy se zaznamenávají změny výšky způsobené nerovnostmi
- Bezdotykové profiloměry – měřicí přístroj vyhodnocuje výšku profilu pomocí odrazu vysílaných paprsků na měřený povrch [35]

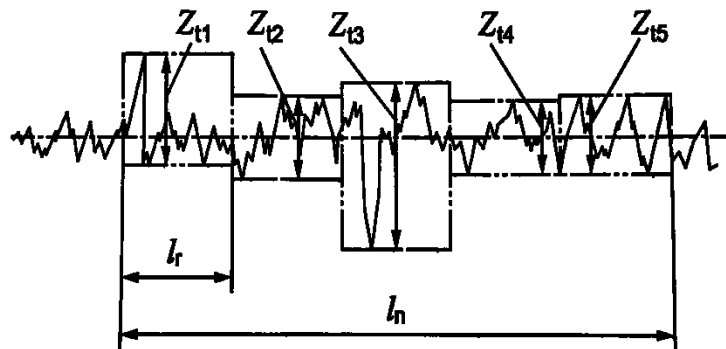
3.2 Hodnocení jakosti tepelně dělených součástí

K hodnocení tepelně dělených součástí slouží norma ČSN EN ISO 9013. Kromě požadavků na jakost povrchu a jeho měření jsou zde i požadavky na geometrii dílů. Charakteristické veličiny jakosti povrchu řezu jsou úchylka kolmosti a průměrná výška prvků profilu s možnou kombinací se skluzem, natavením horní hrany a natavení spodní hrany či okuje. V praktické části bude měřena průměrná výška prvků profilu, a proto je zde rozebrána zejména tato část.

3.2.1 Průměrná výška prvků profilu Rz5

Je definována jako aritmetický průměr z pěti za sebou naměřených výšek profilu (Obr.19). Měření je prováděno na úseku 15 mm ve směru posuvu paprsku a v místě s maximální očekávanou drsností povrchu. Materiál musí být očištěn a bez vad.

Měření se řídí dle normy ČSN EN ISO 4288 s použitím měřidel uvedených v ČSN EN ISO 3274. Měření probíhá na elektrickém dotykovém hrotovém přístroji s maximální mezní hodnotou chyby 0,002 mm. [32]



Legenda

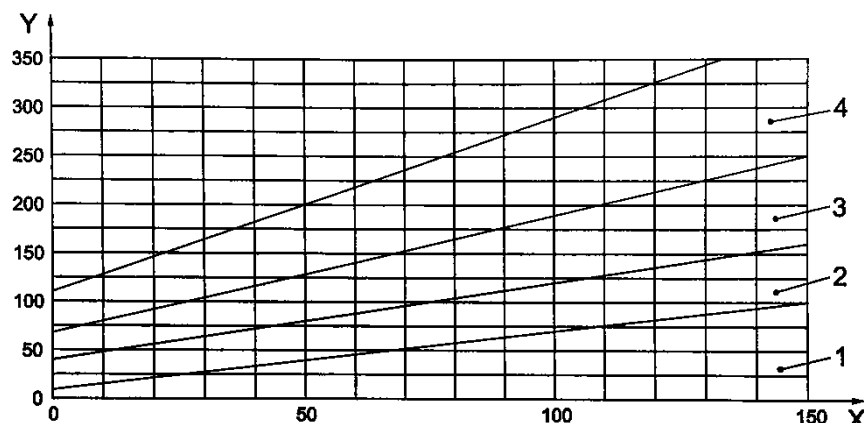
Z_{t1} až Z_{t5} charakterizuje jednotlivé prvky profilu

l_n celková délka

l_r základní délka (1/5 z l_n)

Obr.19 Průměrná výška prvků profilu Rz5 [32]

Norma rozlišuje čtyři toleranční pole (Obr.20), které jsou udávány na výkresech. Jejich hodnoty se mění v závislosti na tloušťce materiálu.



b) Průměrná výška prvků profilu, Rz5 – tloušťka zpracovávaného kusu 150 mm

Legenda

1 až 4 toleranční pole (viz tabulka 5)

X řezná tloušťka, e , v mm

Y průměrná výška prvků profilu, Rz5

Obr.20 Graf tolerančních polí Rz5 [32]

4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část je zaměřena na řešení metod výroby plošným tvářením a dělením materiálu. Jsou zde popsány principy a jednotlivé druhy technologií. Cílem je seznámení s možnostmi výroby a vytvoření teoretického základu pro praktickou část. Dále byla zpracována teorie měření jakosti povrchu a norma ČSN EN ISO 9013 udávající parametry měření a úchylek povrchu u tepelně dělených řezů.

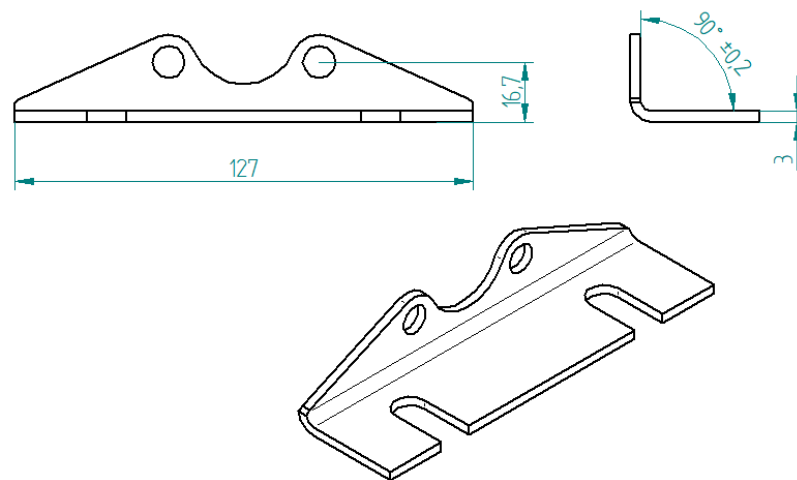
PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část bude zaměřena na výrobu ohýbaného dílu z materiálu DC01 pomocí technologií laserového řezání a ohýbání na ohraňovacím lisu. Následně dojde k porovnání kvality povrchu řezu v závislosti na změně rezných parametrů, z čehož bude stanovována nejlepší varianta a jednotlivé závislosti daných parametrů. U ohýbání bude sledován vliv směru vláken materiálu na odpružení při ohybu.

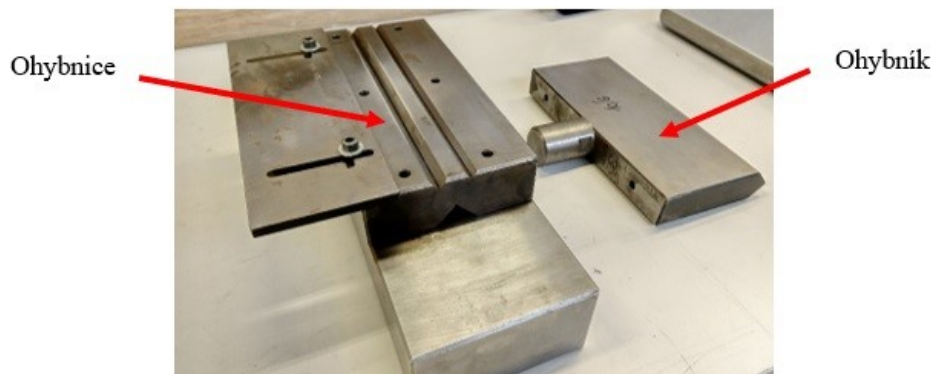
6 VÝROBNÍ ČÁST

Daný výlisek (Obr.21) je zvolen zejména kvůli tvarové nenáročnosti a sériovosti jeho výroby. Původní postup výroby byl řezání laserem pomocí kyslíku a následné ohnutí na ohýbadle (Obr.22). Technologie pro ohyb však byla změněna po snížení odebíraných kusů v sérii na ohýbání pomocí ohraňovacího lisu. Byl tak zkrácen přípravný čas a manipulace s výrobky mezi pracovišti. Použity jsou univerzální nástroje, tudíž nevznikly žádné náklady na výrobu nových.



Obr.21 Náčrt vyráběného dílce

Tyto nástroje jsou konstruovány k velkému rozpětí úhlu ohybu, tudíž nedochází při ohybu k plastické deformaci vzniklé dotlačením na plochu nástroje při konci cyklu ohýbání. To přináší větší míru odpružení než u ohýbadel. Dochází k zastavování výroby, kdy obsluha stroje musí upravovat parametry ohybu, aby díl splňoval požadavky ve výkresové dokumentaci. Jedna z vlastností měnící míru odpružení je natočení dílů vůči vláknům materiálu. Tato skutečnost se musí zohledňovat už při programování laseru.



Obr.22 Původní nástroj pro ohýbání

6.1 Použitá zařízení

Pro výrobu je využit diskový laser TruLaser 3030 L49 od společnosti Trumpf o výkonu 3000 W. Stoj disponuje možností využívané v experimentu upravovat řezné podmínky přímo ve výrobě. K ohybu je použit stroj od stejné společnosti TruBend 5170 s čtyřválcovým elektrohydraulickým pohonem o maximální lisovací síle 170 kN.

Měření Rz5 je provedeno na přístroji pro měření drsnosti Mitutoyo SJ-301. Maximální zdvih snímače je 350 μm , dělení 0,01 μm a posuv 12,5 mm. Měřicí zařízení splňuje požadavky ČSN EN ISO 3274. Snímá a vyhodnocuje drsnost dle norem ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288. K měření úhlu ohybu je použit digitální úhloměr značky KMITEX, s rozlišitelností 10'' a přesností $\pm 0,08^\circ$.

6.2 Použitý materiál

Pro výrobu je použit materiál DC01 podle normy EN 10027-1 o tloušťce $3\pm 0,18$ mm. Tato nízkouhlíková ocel je válcována za studena a často je využívána při tváření za studena nebo pro díly s další úpravou (pokovování, lakování). Dolní mez kluzu R_e je 280 MPa a mez pevnosti R_m 270-410 MPa.

6.3 Postup výroby vzorků pro měření Rz5

Obrábění laserem probíhá postupným řezáním jednotlivých vzorků, kdy je na základě vizuální kontroly po vyřezání každého vzorku provedena změna parametrů. Parametry použité pro řez jsou zvoleny dle řezných tabulek stroje pro daný materiál, tloušťku a zvolený asistenční plyn. Proměnnými parametry jsou rychlost posuvu (4-8,2 m/min) a tlak plynu, zbytek parametrů zůstává konstantních (Tab. 1,2). Jako asistenční plyn je použit kyslík (0,5-0,9 bar) a dusík (10-14 bar). Experiment je proveden zvlášť pro každý z plynů.

Tabulka 1 Konstantní parametry kyslík

| | | |
|--------------------------------|-------|----|
| Výkon laseru | 3000 | W |
| spínací frekvence | 20000 | Hz |
| Vzdálenost trysky od materiálu | 0,7 | mm |
| Průměr trysky | 1 | mm |

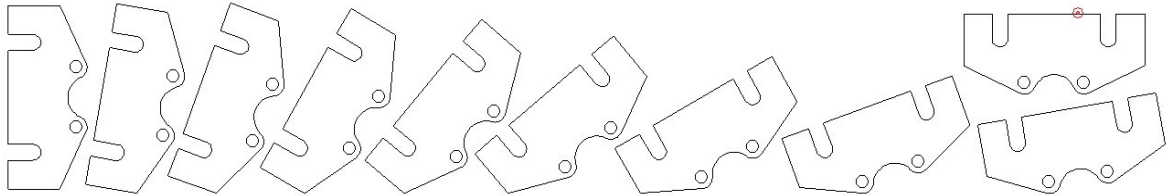
Tabulka 2 Konstantní parametry dusík

| | | |
|--------------------------------|-------|----|
| Výkon laseru | 3000 | W |
| spínací frekvence | 20000 | Hz |
| Vzdálenost trysky od materiálu | 0,7 | mm |
| Průměr trysky | 2,3 | mm |

První kus je v obou případech vyroben beze změny řezných parametrů.

6.4 Postup výroby vzorků pro hodnocení vlivu směru vláken

Je vyrobeno 10 vzorků, kdy každý z nich má vždy posunutý úhel natočení o 10° vůči předchozímu (Obr.23). U všech kusů je následně měřena tloušťka, která se upravuje v korekcích technologie přímo na ohraňovacím lisu. Po každém vyrobeném kusu je tak změněna korekce, aby tloušťka materiálu neovlivnila velikost úhlu ohybu a negativně se nepromítala do výsledků měření. Horní nástroj OW 200/S má úhel 86° a poloměr 1 mm. Dolní nástroj EV-W16 má šířku zápustky 10 mm a úhel zkosení 30° .



Obr.23 Rozložení vzorků pro měření úhlu

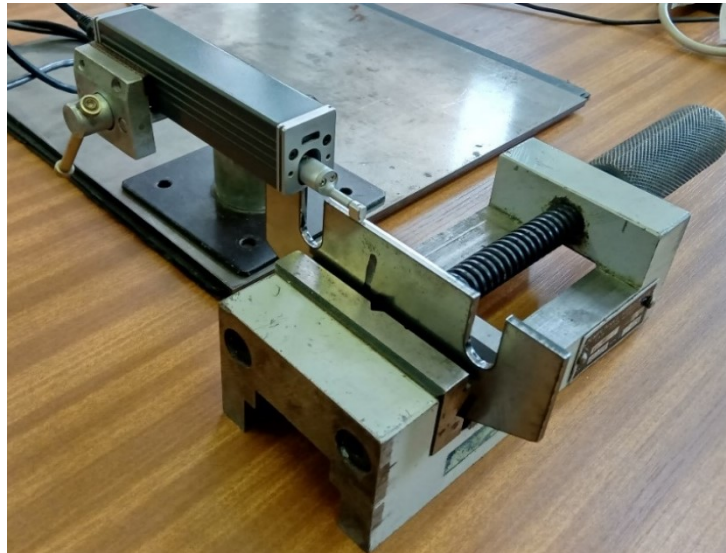
7 ČÁST MĚŘENÍ

Před samotným měřením u vzorků proběhne očištění od nečistot na povrchu a okartáčování oxidační vrstvy. Jsou nachystána a zkalibrována měřící zařízení dle požadavků výrobců.

7.1 Postup měření drsnosti povrchu

Měřící zařízení se zkalibruje pomocí etalonu drsnosti a je provedeno nastavení, aby odpovídalo požadavkům normy ČSN EN ISO 9013. Jelikož nemá použité zařízení takový rozsah délky měření, je použit maximální možný 12,5 mm.

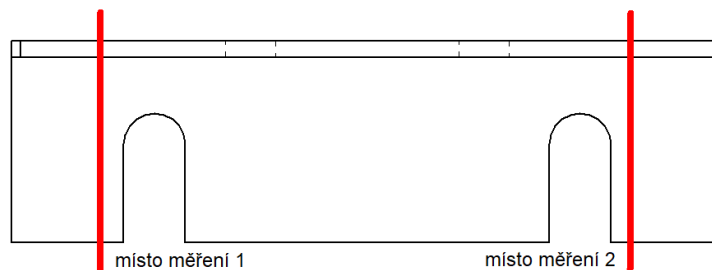
U každého upnutého vzorku (obr.24) je provedeno 10 měření po celé délce určené plochy. Hrot se vždy posouvá ve směru řezání u spodní části řezu s nejhorsí kvalitou povrchu.



Obr.24 Foto měřícího pracoviště

7.2 Odpružení při ohybu

Úhломěr je před měřením zkalibrován pomocí úhlové měrky. Měření je provedeno vždy dvakrát pro každý vzorek v předem určených orientačních místech (Obr.25).



Obr.25 Zvolená místa měření

8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Naměřené výsledky jsou uspořádány a připraveny do jednotlivých tabulek pro vyhodnocení jakosti povrchu a odpružení. K vyhodnocení jsou přidány ilustrační fotky pořízené v průběhu měření na zařízení Vertex od společnosti Micro-vu.

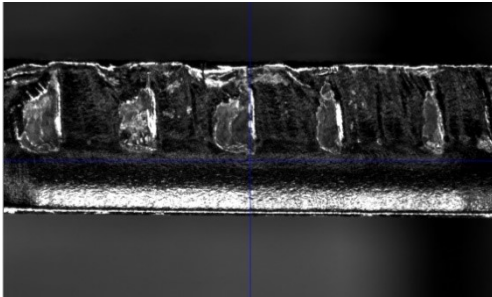
8.1 Jakost povrchu řezu

V tabulkách je uvedeno deset hodnot Rz5, jejich průměr a směrodatné odchytky u každého vzorku podrobeného měření. U všech je proveden Grubbsův test odlehlých hodnot s pravděpodobností 95% a červeně jsou označeny vyřazené hodnoty. Tyto hodnoty nejsou do průměru a směrodatné odchytky zahrnuty. Tabulky jsou rozděleny podle použitých asistenčních plynů.

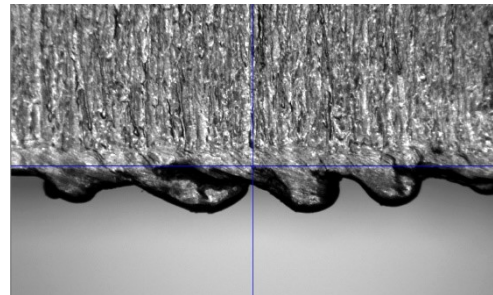
Tabulka 3 Výsledky měření vzorků řezaných kyslíkem

| Číslo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| Rychlost [m/min] | 4 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | 4,6 | 4,8 | 4,4 | 4,4 | 5 | 5 | |
| Tlak plynu [bar] | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 | 0,9 | |
| Rz5 [μm] | 1 | 16,91 | 14,74 | x | 21,56 | 17,23 | 18,12 | 10,24 | 13,8 | 30,37 | x |
| | 2 | 10,38 | 17,88 | x | 19,31 | 14,84 | 13,84 | 9,31 | 9,46 | 23,33 | x |
| | 3 | 7,57 | 17,99 | x | 13,85 | 14,06 | 22,05 | 7,73 | 8,8 | 21,73 | x |
| | 4 | 7,59 | 15,08 | x | 18,47 | 12,96 | 13,43 | 8,26 | 10,43 | 18,3 | x |
| | 5 | 9,57 | 16,84 | x | 12,15 | 14,9 | 14,64 | 8,15 | 7,96 | 28,17 | x |
| | 6 | 11,01 | 17,19 | x | 18,28 | 11,62 | 13,56 | 7,9 | 8,83 | 29,79 | x |
| | 7 | 8,5 | 17,16 | x | 24,37 | 15,36 | 18,65 | 6,59 | 13,84 | 27,7 | x |
| | 8 | 7,67 | 18,41 | x | 24,71 | 15,02 | 13,31 | 7,09 | 10,86 | 29,57 | x |
| | 9 | 12,5 | 19,26 | x | 20,6 | 16,08 | 16,81 | 8,39 | 12,7 | 28,47 | x |
| | 10 | 12,34 | 21,76 | x | 21,55 | 20,08 | 17,73 | 13,42 | 12,41 | 31,18 | x |
| Průměr | 10,40 | 17,63 | x | 19,49 | 15,22 | 16,21 | 8,18 | 10,91 | 26,86 | x | |
| Směrodatná odchytky | 2,80 | 1,91 | x | 3,86 | 2,19 | 2,79 | 1,09 | 2,05 | 4,05 | x | |

Při kvalitativním hodnocení povrchu byl vyřazen vzorek 3 (Obr.26) s velkými nataveninami a vzorek 10 (Obr.27) s těžce odstranitelnou struskou na spodní hraně. Z těchto důvodů u nich nebyla provedena měření.



Obr.26 Nataveniny na vzorku č. 3

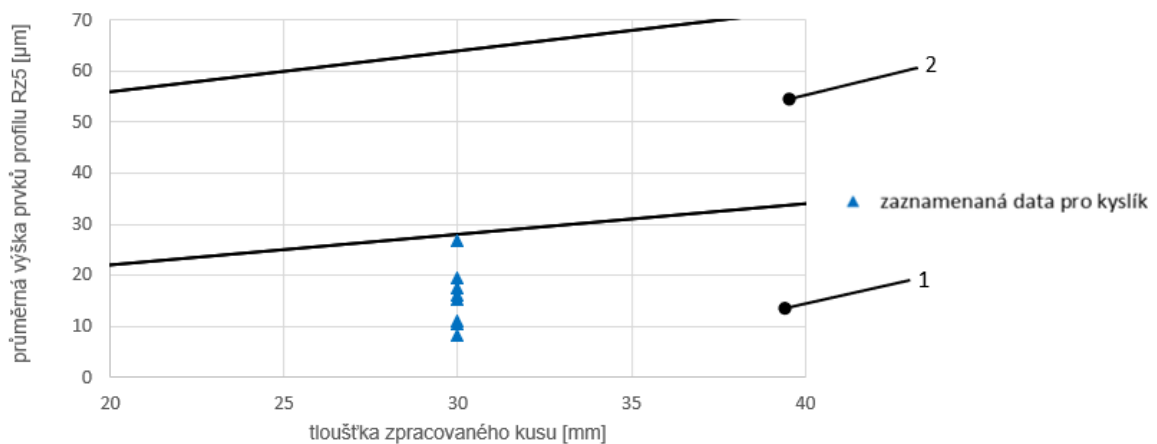


Obr.27 Kapkovité otřepení vzorku č. 10

Při pohledu na hodnoty měření uvedené v Tabulce 3 lze pozorovat při rychlosti 4,4 m /min výraznou změnu drsnosti u tlaku kyslíku 0,5-0,8 bar a při změnách rychlosti od 4,4-4,8 m/min u tlaku 0,5 bar.

Z výsledků vyplývá, že nejmenší Rz5 bylo docíleno u vzorku 7 při rychlosti 4,4 m/min a tlaku plynu 0,6 barů. Nejvíce úspornou variantou je vzorek 6 s rychlostí 4,8 m/min a tlakem 0,5 bar.

Z hodnot je možné konstatovat, že i s rychlejším posuvem stroje a nižší spotřebou kyslíku lze docílit v některých případech lepšího, nebo srovnatelného výsledku s původními parametry. Z hlediska normy všechny měřené vzorky spadají do prvního tolerančního pole (obr.28).

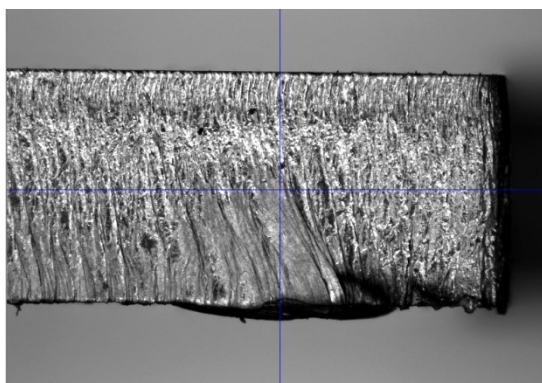


Obr.28 Vynesené výsledky řezu pomocí kyslíku do grafu s tolerančními poli

Tabulka 4 Výsledky měření vzorků řezaných dusíkem

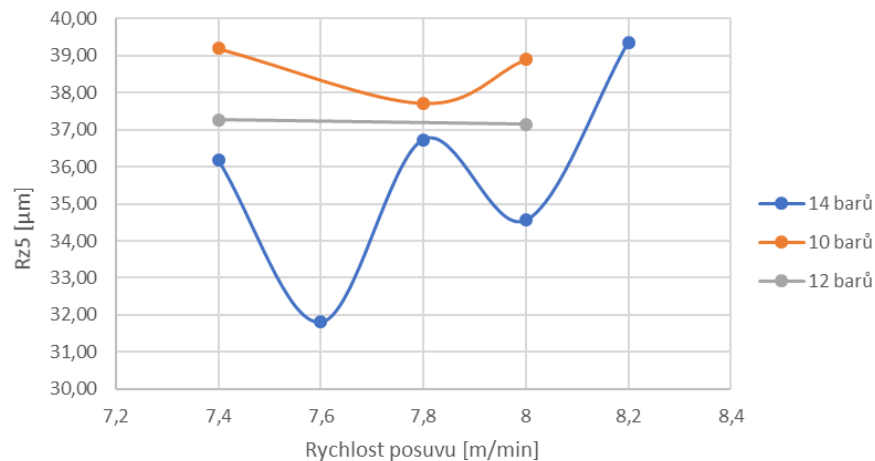
| Číslo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Rychlost [m/min] | 7,4 | 7,6 | 7,8 | 8 | 8,2 | 7,4 | 7,8 | 8 | 8,2 | 7,4 | 8 | |
| Tlak plynu [bar] | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 12 | 12 | |
| Rz5 [μm] | 1 | 29,72 | 30,27 | 37,27 | 33,59 | 35,90 | 49,59 | 34,75 | 37,76 | x | 35,91 | 33,02 |
| | 2 | 35,16 | 33,70 | 43,90 | 37,91 | 47,32 | 39,48 | 35,21 | 37,22 | x | 36,48 | 42,24 |
| | 3 | 37,09 | 32,13 | 36,30 | 42,07 | 43,95 | 42,94 | 34,72 | 43,68 | x | 36,92 | 40,26 |
| | 4 | 33,35 | 35,55 | 35,94 | 39,40 | 38,15 | 40,52 | 39,78 | 39,54 | x | 32,98 | 39,54 |
| | 5 | 35,04 | 35,32 | 37,65 | 38,51 | 37,87 | 40,95 | 40,48 | 39,95 | x | 36,37 | 34,93 |
| | 6 | 34,21 | 29,34 | 37,19 | 30,21 | 39,48 | 38,81 | 36,30 | 35,45 | x | 33,79 | 33,35 |
| | 7 | 34,35 | 28,80 | 36,93 | 28,73 | 39,15 | 37,14 | 44,00 | 38,69 | x | 44,06 | 41,20 |
| | 8 | 39,23 | 32,40 | 36,47 | 32,51 | 36,22 | 35,14 | 36,93 | 38,78 | x | 43,00 | 42,28 |
| | 9 | 40,08 | 27,56 | 37,08 | 30,97 | 34,78 | 42,66 | 37,66 | 34,20 | x | 39,44 | 30,47 |
| | 10 | 43,52 | 33,11 | 35,76 | 31,71 | 40,69 | 35,08 | 37,31 | 43,73 | x | 33,66 | 34,23 |
| Průměr | 36,18 | 31,82 | 36,73 | 34,56 | 39,35 | 39,19 | 37,71 | 38,90 | x | 37,26 | 37,15 | |
| Směrodatná odchylka | 3,72 | 2,60 | 0,65 | 4,31 | 3,64 | 2,76 | 2,80 | 2,93 | x | 3,61 | 4,17 | |

Vzorek 9 byl vyřazen kvůli nedostatečnému prořezání materiálu, dále u vzorku 1 (Obr.29) byly pozorovány vruby ve spodní straně u rohů geometrie řezu (Obr. 29). Pravděpodobně je příčinou zpomalení posuvu stroje v rohu geometrie řezu. Na těchto místech nebylo provedeno měření.



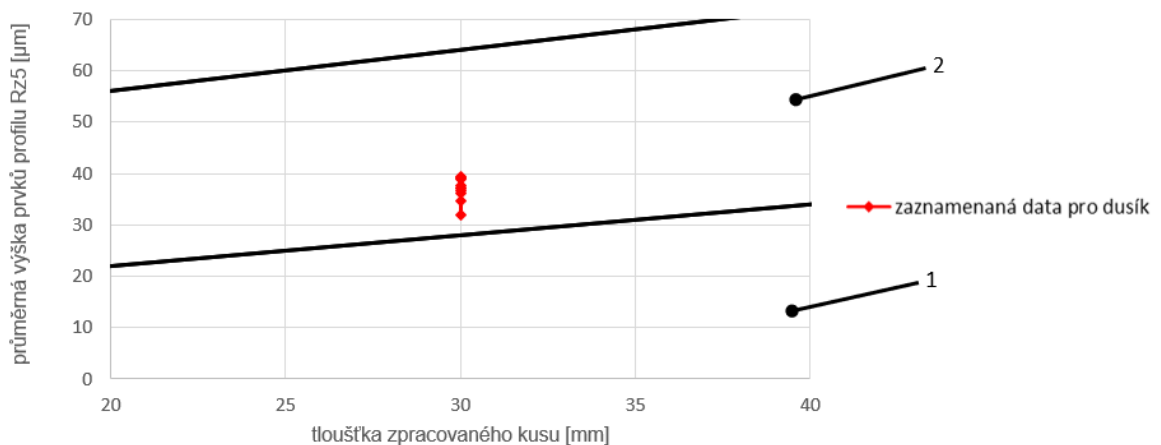
Obr.29 Natavenina na začátku řezu

V grafu (Obr.30) jsou znázorněny změny Rz5 v závislosti na rychlosti posuvu. Lze pozorovat, že při použití 14 barů je křivka velmi rozkolísaná. Při rychlosti 7,8 se tlak plynu jen nepatrně projevuje na výslednou velikost Rz5.



Obr.30 Graf závislosti rychlosti posuvu na Rz5

Nejmenší drsnost byla naměřena u vzorku 2 s rychlostí 7,6 m/min a tlaku plynu 14 bar. Nejvíce úspornou variantu z hlediska posuvu představuje vzorek 5 s rychlostí 8,2 m/min a tlakem 14 bar. Z hlediska plynu je největší úspora prokázána u vzorku 8 s rychlostí 8 m/min s tlakem 10 bar.



Obr.31 Vynesené výsledky řezu pomocí kyslíku do grafu s tolerančními poli

Z grafu (Obr.31) lze konstatovat, že všechny naměřené výsledky spadají do spodní části druhého tolerančního pole. V porovnání s hodnotami vzorků řezaných pomocí kyslíku je tedy Rz5 větší. Bylo také spotřebováno více plynu, avšak řez je bez oxidační vrstvy a rychlost posuvu je vyšší.

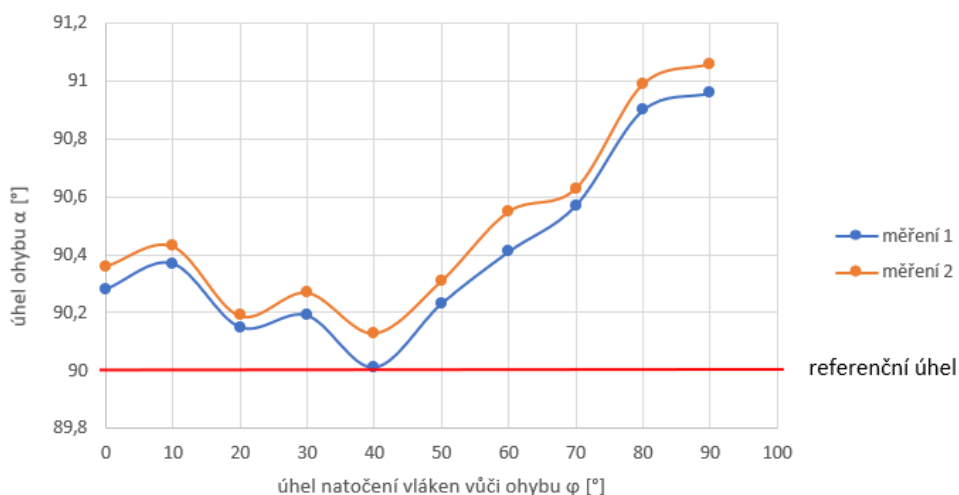
8.2 Odpružení materiálu při ohybu

Tabulka 5 Naměřené úhly ohybu

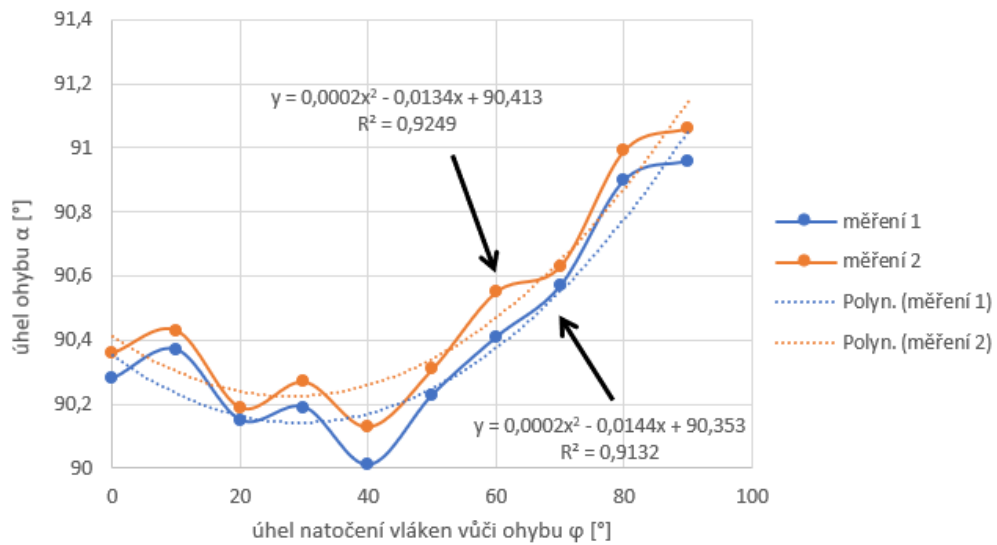
| č.vzorku | Natočení dílu vůči vláknům [°] | č. měření ohybu [°] | |
|----------|--------------------------------|---------------------|-------|
| | | 1 | 2 |
| 1 | 90 | 90,96 | 91,06 |
| 2 | 80 | 90,9 | 90,99 |
| 3 | 70 | 90,57 | 90,63 |
| 4 | 60 | 90,41 | 90,55 |
| 5 | 50 | 90,23 | 90,31 |
| 6 | 40 | 90,01 | 90,13 |
| 7 | 30 | 90,19 | 90,27 |
| 8 | 20 | 90,15 | 90,19 |
| 9 | 10 | 90,37 | 90,43 |
| 10 | 0 | 90,28 | 90,36 |

Z grafu (Obr.32) vyplývá, že největší míra odpružení nastává u vzorku 1, tedy při natočení směru vláken vůči ohybu o 90 stupňů. Naopak k nejnižšímu odpružení dochází kolem 40°. Rozdíl mezi těmito vzorky je téměř jeden stupeň, což je více, než udává zadaná úhlová tolerance $\pm 0,2^\circ$.

Z grafu je také patrné, že vzorky mají vždy na jedné straně větší úhel, než na druhé. Je to připsáno špatnému seřízení polohy beranu, nebo bombírování stolu. Křivky tedy musí být porovnány a dokázána jejich podobnost.



Obr.32 Graf měření úhlu



Obr.33 Graf se spojnicemi trendu

U obou křivek byly vytvořeny polynomicke směrnice trendu druhého stupně (Obr.34) a vygenerovány jejich rovnice. U rovnic se porovnávaly výsledky při zadání hodnot φ . Z výsledků lze konstatovat, že jsou křivky téměř totožné a posunuté od sebe ve směru α .

rovnice měření 1: $\alpha = 0,0002\varphi^2 - 0,0144\varphi + 90,353$

rovnice měření 2: $\alpha = 0,0002\varphi^2 - 0,0134\varphi + 90,413$

Tabulka 6 výsledky dosažených hodnot φ

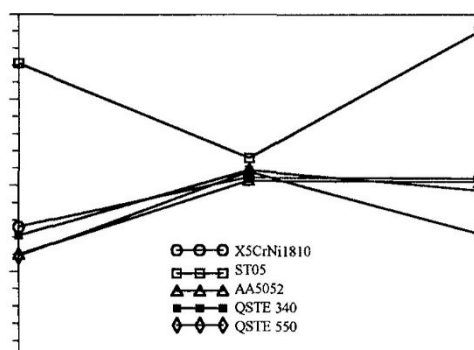
| α | φ model 1 | φ model 2 | rozdíl modelů [%] |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 10 | 90,229 | 90,299 | 0,078 |
| 20 | 90,145 | 90,225 | 0,089 |
| 30 | 90,101 | 90,191 | 0,100 |
| 40 | 90,097 | 90,197 | 0,111 |
| 50 | 90,133 | 90,243 | 0,122 |
| 60 | 90,209 | 90,329 | 0,133 |
| 70 | 90,325 | 90,455 | 0,144 |
| 80 | 90,481 | 90,621 | 0,154 |
| 90 | 90,677 | 90,827 | 0,165 |

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V rámci bakalářské práce byla měřena průměrná výška prvků profilu Rz5, v závislosti na změnách řezných parametrů s cílem najít optimální variantu pro výrobu zvolené součásti. Z měření lze říci, že parametry doporučené výrobcem nejsou optimální pro tuto výrobu. V některých případech bylo dosaženo lepšího povrchu při značné úspoře asistenčního plynu a navýšení řezné rychlosti. Jeden z předpokladů pro toto zlepšení je popsán v článku Mazaira Sharifiho [37]. Tento článek na základě provedených testů popisuje velký význam teploty v místě řezu, která má vliv na tok taveniny. Vyšší rychlost má tak do jisté míry pozitivní dopad na snížení drsnosti, což se dokázalo i v mých experimentech.

K určení závislosti jednotlivých parametrů na kvalitu řezu nedošlo z důvodu malého počtu vzorků. Problém také nastává při změně více parametrů najednou, které se navzájem ovlivňují. Vzniká tak velké množství kombinací a náročnost u experimentu. Jednou z možností pro nalezení optimálních parametrů je prostřednictvím modelu statistické analýzy Taguchi, ta je schopna drasticky snížit počet experimentů. [38]

V rámci určení míry odpružení při ohybu v závislosti na směru vláken materiálu byl vytvořen graf, z kterého je patrné nejmenší odpružení v oblasti okolo 40° natočení vláken vůči ohybu a největší v oblasti 90°. Obecně se tyto vlastnosti v dnešní době zkoumají pomocí simulací. Jedním ze základních parametrů používaných pro tváření anizotropních materiálů je součinitel plastické deformace, který je zjišťován z tahových zkoušek. V grafu (Obr.34) jsou zaznamenány výsledky z tahových zkoušek vzorků trhaných ve směru 0, 45 a 90 stupňů ve směru vláken pro jednotlivé materiály. Z grafu lze určit jistou korelaci výsledků materiálu ST05 s naměřenými hodnotami v mé práci a vysvětluje tak extrémní chování v oblasti 40°. Čím větší je velikost součinitele plastické deformace, tím dochází k většímu odpružení. Pro výrobu je tak nejvýhodnější z hlediska co nejmenšího odpružení poloha 45° avšak musí být bráno v úvahu, že tak dochází k velkému snížení meze ohybu.



Obr.34 výsledky součinitele plastické deformace [39]

ZÁVĚR

Teoretická část se zabývala technologiemi plošného tváření a dělení materiálů. Bylo zde popsáno jejich rozdělení, principy, použité strojní vybavení a možností využití. S ohledem na experiment byl kladen důraz na technologie ohraňování a řezání lasem. Tato část také obsahovala stručné shrnutí metod hodnocení drsností povrchu a normy ČSN EN ISO 9013, která udává specifikace měření a vyhodnocování drsnosti u tepelných řezů.

V prvním kroku praktické části byla zvolena součást z materiálu DC01 o tloušťce 3 mm. Výroba proběhla pomocí diskového laseru a ohraňovacího lisu. Při výrobě se měnily parametry řezných podmínek rychlosti posuvu, tlak a druh asistenčního plynu. Ostatní parametry byly nastaveny konstantně dle doporučení výrobce. Změny probíhaly v závislosti na vizuální kontrole povrchu při výrobě. Následně bylo provedeno dotykové měření drsnosti podle normy ČSN EN ISO 9013 z důvodu stanovení Rz5, dle které byla posuzována kvalita řezu. Dále bylo vyrobeno 10 vzorků s úhlem natočení směru vláken materiálu na ohyb od 0° po 90°. Po ohybu byl měřen jeho úhel, z něhož byla určena míra odpružení.

Měření a vyhodnocování kvality povrchu řezu bylo určováno zvláště pro jednotlivé asistenční plyny z důvodu odlišných vlastností povrchu. U použití kyslíku naměřené vzorky spadaly do prvního tolerančního pole. Plocha řezu zde byla pokryta oxidační vrstvou, která se při následných povrchových úpravách musí odstranit. Vzorky řezané pomocí dusíku spadaly do druhého tolerančního pole, povrch tedy měl větší drsnost než u řezání kyslíkem. Výhodou však je plocha bez oxidační vrstvy. Experimentem byly u obou plynů zjištěny parametry, při kterých se dosahovalo velké úspory plynů a vyšší rychlosti řezu bez výrazné změny drsnosti. U stanovování závislosti polohy vláken vyplývá, že k nejmenšímu odpružení dochází okolo 40° natočené a k největšímu u 90°. Rozdíl úhlu ohybu u těchto dvou vzorků se pohyboval okolo jednoho stupně a zadaná tolerance u dílu +/-0,2°. Z tohoto důvodu musí být už u výroby na laseru dbáno na polohu dílů, aby se zamezilo výrobě špatným kusům.

V praktické části u řezání bylo docíleno optimálnějších podmínek, avšak nedošlo k určení jejich závislosti na kvalitu povrchu z důvodu potřeby dalšího nákladného testování a systematického postupování při stanovování podmínek. U dalšího zkoumání by bylo vhodné kromě měření Rz5 sledovat úchylku kolmosti, která nebyla zahrnuta do vyhodnocování. Dále by bylo vhodné opakovat experiment odpružení z důvodů tolerovaných vlastností materiálu. Také zde vyplývá, že k velkým úsporám může dojít při jasně stanovených požadavcích od zákazníka, dle kterých jsou voleny parametry výroby.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS, 2014. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [2] LENFELD, Petr, 2018. *Technologie II. Technická univerzita Liberec* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm
- [3] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA, 2006. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ, 2013. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK, 2001. *Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd.* Praha: Scientia. ISBN 80-718-3244-8.
- [6] BOLJANOVIC, Vukota, c2004. *Sheet metal forming processes and die design*. New York: Industrial Press. ISBN 08-311-3182-9.
- [7] NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER, 1980. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. ISBN 04-234-80.
- [8] Trumpf, 2020. *Děrovací nástroje* [online]. Ditzingen: Trumpf [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/
- [9] POKORNÝ, Přemysl, 2001. *Výrobní stroje II: tvářecí stroje*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 80-708-3482-X.
- [10] Trumpf, 2020. *Ohýbání: postup a metody* [online]. Ditzingen: Trumpf [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/
- [11] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA, 2006. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2374-9.
- [12] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*, 2001. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2351-6.
- [13] *Strojírenské materiály a technologie*, 1980. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně. Učební texty vysokých škol. ISBN 55-567-80.
- [14] ČADA, Radek, 2010. *Technologie tváření a slévání*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2273-0.

- [15] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL, 2005. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia. ISBN 80-718-3336-3.
- [16] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3336-3.
- [17] HUMÁR, A, 2004. *Technologie I: Technologie obrábění*. Brno. Multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [18] STOKLÁSEK, Pavel. *Vliv technologie dělení materiálu na jejich povrchové vlastnosti*. Zlín, 2019. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [19] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP, 2005. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-3068-0.
- [20] MINAŘÍK, Václav, 1997. *Plamenové svařování*. Praha: Scientia. ISBN 80-718-3080-1.
- [21] KOČMAN, Karel, 2011. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [22] Řezání vysokým tlakem, 2018. *MM* [online]. 2018, 55 [cit. 2020-05-22]. DOI: 180103. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vysokym-tlakem.html>
- [23] *Mach 500* [online], 2020. Flow International Corporation [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/>
- [24] KRAJCARZ, Daniel. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. *Procedia Engineering*, 2014, 69.1: 838-843.
- [25] *Rychloupínací systémy nástrojů* [online], Canmet s.r.o. Brno [cit. 2017-05-17] Dostupné z: <http://www.canmet.eu/clanky/detail/bezkonkurencni-rychloupinacisystemy-hornich-nastroju.htm#zalozka-1>
- [26] EL-HOFY, Hassan Abdel-Gawad. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. McGraw Hill Professional, 2005.
- [27] *Cimatron.cz* [online]. Praha: technology-support s.r.o, 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.cimatron.cz/>
- [28] Lao, 2014. *Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/>
- [29] LASCAM systems, 2015. *Rozdělení laserů* [online]. Praha: LASCAM systems [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/>

- [30] Trumpf, 2020. *Diskový laser* [online]. Praha: TRUMPF Praha, spol. s r.o. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/
- [31] BYSTRONIC CZECH REPUBLIC S.R.O., 2020. *Systémy pro řezání laserem* [online]. Brno: Bystronic [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.bystronic.cz/cs/>
- [32] ČSN EN ISO 9013: *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*, 2019. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [33] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL, 2000. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia. ISBN 80-718-3207-3.
- [34] JAN, Kašpar. Laserové řezání: *Volba a vlastnosti asistenčních plynů* [online]. Brno 2014, s. 50-51 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: http://old.messergroup.com/cz/Tisk/Archiv-2014/Laserove_rezani_volba_a_vlastnosti_asistencnich_plynu.pdf
- [35] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL, 1989. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
- [36] Custompartnet: *Sheet Metal Forming* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>
- [37] SHARIFI, Maziar; AKBARI, Mohammad. Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy. *Optik*, 2019, 184: 457-463.
- [38] AMARAL, I., et al. Improving the Cut Surface Quality by Optimizing Parameters in the Fibre Laser Cutting Process. *Procedia Manufacturing*, 2019, 38: 1111-1120.
- [39] TAN, Zheng; PERSSON, B.; MAGNUSSON, C. Plastic bending of anisotropic sheet metals. *International journal of mechanical sciences*, 1995, 37.4: 405-421.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------------------|--|
| MAPP | Methylacetylen-propadienový plyn |
| YAG | Krystal Yttrium Aluminium Granátu |
| Rz (μm) | Průměrná hodnota z absolutních hodnot maxim a minim u profilu křivky |
| Rz5 (μm) | Průměrná výška prvků profilů u tepelných řezů |
| Ra (μm) | Aritmetická odchylka od profilu |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| <i>Obr.1 Sdružený nástroj [27]</i> | 10 |
| <i>Obr.2 Postupové stříhadlo</i> | 12 |
| <i>Obr.3 Schéma přesného stříhání [7]</i> | 12 |
| <i>Obr.4 Děrovací nástroje [8]</i> | 13 |
| <i>Obr.5 Schéma ohraňovacího lisu</i> | 14 |
| <i>Obr.6 Různé způsoby zakružování [12]</i> | 15 |
| <i>Obr.7 Speciální případ dvouválce [1]</i> | 16 |
| <i>Obr.8 Princip válcování profilů [12]</i> | 16 |
| <i>Obr.9 Postupové stříhání s ohýbáním</i> | 17 |
| <i>Obr.10 Schéma rovnání svitek mezi válci [1]</i> | 17 |
| <i>Obr.11 Jednotlivé operace výroby taženého dílu</i> | 18 |
| <i>Obr.12 Schéma kroužlení [36]</i> | 18 |
| <i>Obr.13 Schéma pilového listu [33]</i> | 20 |
| <i>Obr.14 Druhy zubů pilového kotouče [33]</i> | 21 |
| <i>Obr.15 Schéma systému stroje pro řezání vodním paprskem [26]</i> | 22 |
| <i>Obr.16 Řez vodním paprskem vrstveného materiálu</i> | 22 |
| <i>Obr.17 Princip laseru [28]</i> | 24 |
| <i>Obr.18 Schéma pevnolátkových laserů [29]</i> | 25 |
| <i>Obr.19 Průměrná výška prvků profilu Rz5 [32]</i> | 28 |
| <i>Obr.20 Graf tolerančních polí Rz5 [32]</i> | 28 |
| <i>Obr.21 Náčrt vyráběného dílce</i> | 32 |
| <i>Obr.22 Původní nástroj pro ohýbání</i> | 32 |
| <i>Obr.23 Rozložení vzorků pro měření úhlu</i> | 34 |
| <i>Obr.24 Foto měřícího pracoviště</i> | 35 |
| <i>Obr.25 Zvolená místa měření</i> | 35 |
| <i>Obr.26 Nataveniny na vzorku č. 3</i> | 37 |
| <i>Obr.27 Kapkovité ořepení vzorku č. 10</i> | 37 |
| <i>Obr.28 Vynesené výsledky řezu pomocí kyslíku do grafu s tolerančními poli</i> | 37 |
| <i>Obr.29 Natavenina na začátku řezu</i> | 38 |
| <i>Obr.30 Graf závislosti rychlosti posuvu na Rz5</i> | 39 |
| <i>Obr.31 Vynesené výsledky řezu pomocí kyslíku do grafu s tolerančními poli</i> | 39 |
| <i>Obr.32 Graf měření úhlu</i> | 40 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Obr.33 Graf se spojnicemi tredu</i> | <i>41</i> |
| <i>Obr.34 výsledky součinitele plastické deformace [39]</i> | <i>42</i> |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabulka 1 Konstantní parametry kyslík</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabulka 2 Konstantní parametry dusík</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabulka 3 Výsledky měření vzorků řezaných kyslíkem</i> | <i>36</i> |
| <i>Tabulka 4 Výsledky měření vzorků řezaných dusíkem</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabulka 5 Naměřené úhly ohybu</i> | <i>40</i> |
| <i>Tabulka 6 výsledky dosažených hodnot φ</i> | <i>41</i> |