



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

DĚLENÍ MATERIÁLŮ BEZODPADOVÝMI TECHNOLOGIEMI

CUTTING OF MATERIALS USING WASTELESS TECHNOLOGIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN VORÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Voráček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Dělení materiálů bezodpadovými technologiemi

v anglickém jazyce:

Cutting of materials using wasteless technologies

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vytvoření přehledu metod a strojů používaných pro bezodpadové dělení kovových materiálů. V práci by měl být uveden přehled a stručný popis a příklady praktického využití.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na metody a stroje používané pro bezodpadové dělení polotovarů z kovových materiálů.

Seznam odborné literatury:

1. NOVOTNÝ, J. a Z. LANGER. Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, Redakce báňské a strojírenské literatury, 1980. 216 s. L 13–B3-IV- 41/22674.
2. FOREJT, M. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Brno, Rekrorát Vysokého učení technického v Brně, 1991. 187 s. Edit. Nakladatelství VUT v Brně. ISBN 80-214-0294-6.
3. KOVÁČ, Andrej a Milan JENKUT. Tvárniace Stroje. Vyd. 1. Bratislava: ALFA vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, n. p., 1978. 814 s.
4. RUDOLF, Bedřich a Miloslav KOPECKÝ. Tvářecí stroje: Základy výpočtů a konstrukce. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p. , 1979. 408 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

VORÁČEK Martin: Dělení materiálů bezodpadovými technologiemi.

Práce obsahuje literární studii o bezodpadových technologiích dělení kovových materiálů. Jsou zde popsány technologie stříhání plechů, tyčí, sochorů, profilů a trubek. Dále dělení materiálů laserem, plazmou a vodním paprskem. Popis každé metody se skládá z fyzikálního principu a použití v praxi, včetně uvedení používaných technologických zařízení. U uvedených technologií je v práci uveden souhrn hlavních výhod a nevýhod při použití v malosériové nebo velkosériové výrobě.

Klíčová slova: dělení materiálů, bezodpadové technologie, stříhání, laser, plazma, vodní paprsek

ABSTRACT

VORÁČEK Martin: Cutting of materials using wasteless technologies.

Thesis contains literary review of wasteless metal cutting technologies. Technologies of shearing sheets, rods, bars and pipes are described, as well as laser, plasma and water jet cutting. The description of each of these methods consists of both physical principle and practical use, including examples of technological devices. Furthermore, main advantages and disadvantages of each method are discussed with regard to small batch or mass production.

Keywords: cutting of materials, wasteless technologies, shearing, laser, plasma, water jet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VORÁČEK, Martin. *Dělení materiálů bezodpadovými technologiemi*. Brno, 2013. 33 s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 24.5.2013

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD	9
1 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH TECHNOLOGIÍ.....	10
2 STŘÍHÁNÍ PLECHŮ.....	11
2.1 Zařízení ke stříhání plechů	15
3 STŘÍHÁNÍ TYČÍ A SOCHORŮ.....	18
3.1 Zařízení ke stříhání tyčí a sochorů	19
4 STŘÍHÁNÍ PROFILŮ A TRUBEK.....	21
4.1 Zařízení ke stříhání profilů a trubek	22
5 DĚLENÍ LASEREM.....	24
5.1 Zařízení pro laserové dělení	27
6 DĚLENÍ PLAZMOU	28
6.1 Zařízení pro dělení plazmou	30
7 DĚLENÍ VODNÍM PAPRSKEM.....	31
7.1 Zařízení pro dělení vodním paprskem.....	32
ZÁVĚR.....	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	
SEZNAM OBRÁZKŮ	

ÚVOD [7], [15], [22], [26]

Dělení polotovarů je počáteční operací ve všech podnicích zabývajících se výrobou součástí určených k využití v dalších výrobních odvětvích nebo přímo k prodeji. K samotnému dělení kovových polotovarů, ať už se jedná o plechy, tyče či trubky, se využívá mnoho technologií. Samotnou skupinou těchto metod jsou technologie bezodpadové, které jsou díky svým charakteristickým vlastnostem velmi rozšířené. Mezi konvenční technologie bezodpadového dělení polotovarů se řadí stříhání, které je v této oblasti nejrozšířenější, dále pak například lámání a sekání. Jako příklad těchto technologií jsou na obr. 1 zobrazeny kotoučové nůžky na kovové trubky. Příkladem výrobků zhotovených nůžkami na tyče a pruty jsou nastříhané ocelové tyče na obr. 2. Další možností je použití nekonvenčních technologií. Nejrozšířenějšími z nich jsou, v oblasti bezodpadového dělení kovových polotovarů, dělení laserovým paprskem, dělení plazmou a dělení vodním paprskem. Příklad součástí vyrobených dělením vodním paprskem je na obr. 3. Dělení laserem je zobrazeno na obr. 4.



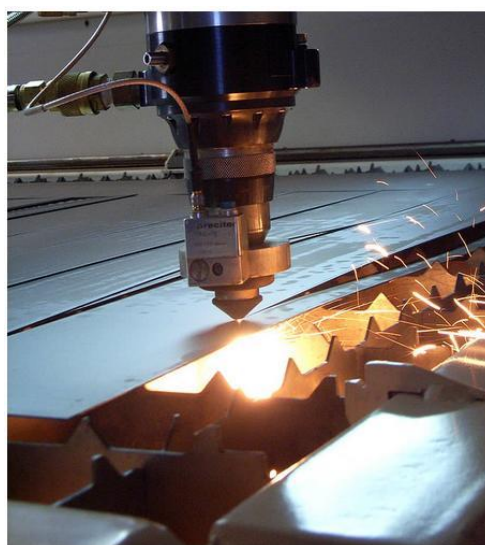
Obr. 1 Nůžky na trubky [26]



Obr. 2 Ustřižené ocelové tyče [22]



Obr. 3 Součásti zhotovené dělením vodním paprskem [7]

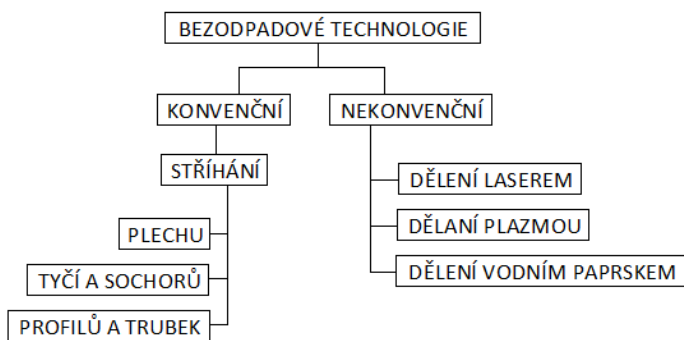


Obr. 4 Dělení plechu laserem [15]

1 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH TECHNOLOGIÍ [2], [3], [20]

Bezodpadové technologie dělení materiálů lze rozdělit do dvou hlavních skupin na konvenční a nekonvenční. Přehled v praxi nejčastějších metod dělení je na obr. 5.

Konvenční metody bezodpadového dělení kovových polotovarů mají dlouhou tradici a jsou nezastupitelné při velkosériové výrobě, kdy je potřeba dělit polotovary na díly



Obr. 5 Přehled používaných technologií

a bezodpadovost procesu dělení. V neposlední řadě také nižší náklady na pořízení strojů. Konvenční technologie jsou rovněž nezastupitelné v malosériové a dílenské výrobě, kde nižší pořizovací a minimální provozní náklady převýší možné snížení přesnosti zhotovovaných dílců a menší produktivitu výroby. Nevýhodou těchto metod, zejména při dělení objemových polotovarů, je nízká kvalita střížné plochy a možná deformace odstřížku. Tyto nevýhody je možno zanedbat, pokud se odstřižený kus následně použije jako výchozí polotovar například u zápusťkového kování, kde je důraz kladen zejména na konstantní objem polotovarů.

Nekonvenční metody dělení materiálů nahrazují tradiční postupy tam, kde je potřeba velmi přesná výroba a efektivita pracovního procesu. Tato potřeba nastává zejména ve velkosériové výrobě ve velkých podnicích. V praxi nejvíce rozšířené nekonvenční metody jsou dělení laserem, plazmou a vodním paprskem. Odpad, vzniklý použitím těchto metod, který je způsoben šířkou dělicího paprsku je ve formě kouře a prašnosti, tudíž lze tyto technologie označit za bezodpadové. Tyto metody jsou ve většině případů plně automatizovány a tím zvyšují přesnost a produktivitu výroby, zvyšují bezpečnost práce na pracovišti a odstraňují rizika při práci vznikající lidským faktorem. Tyto technologie však mají jednu zásadní nevýhodu v tom, že jsou stále obtížně finančně dostupné. Další nevýhodou je tepelně ovlivněná oblast vznikající při dělení laserem a plazmou, která má negativní vliv na vlastnosti děleného materiálu v okolí dělicí spáry. Na obr. 6 je zobrazená tryska laserového CNC dělicího centra.

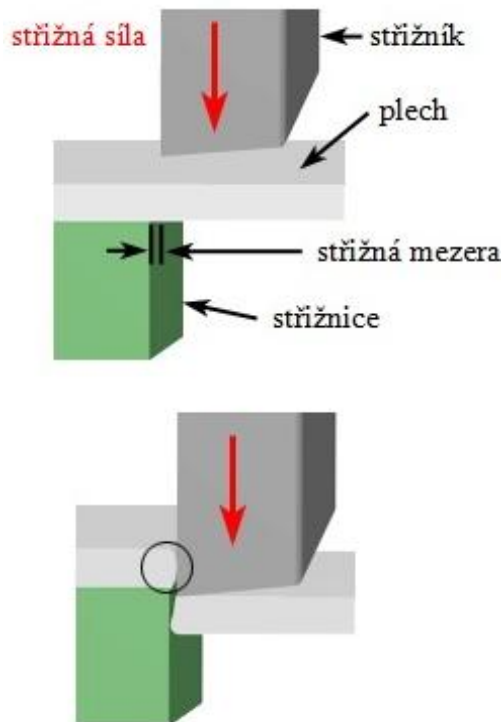
o stejném objemu bez časté kontroly a údržby samotných dělicích nástrojů a strojů. Tyto metody mají ve strojírenských podnicích dlouhou tradici a zajisté budou i do budoucna v pracovním procesu nezastupitelné. Výhodou těchto technologií, z nichž nejvýznamnější je stříhání, je konstantní objem zhotovených dílců



Obr. 6 Tryska laserového dělicího centra [2]

2 STŘÍHÁNÍ PLECHŮ [5], [20], [31]

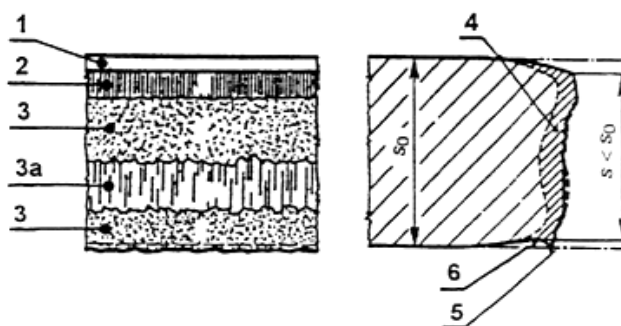
Stříhaný materiál, kterým je v tomto případě plech, se vsune mezi střížník a střížnici, jak je vidět v horní části na obr. 7. Hloubku zasunutí plechu, a tudíž i velikost ústřížku, je možné regulovat nastavením dorazu. V případě potřeby se volný konec plechu zajistí přidržovačem, který mu při střížném procesu brání v natáčení. Střížník působí na stříhaný plech silou, díky které dojde k porušení materiálu plechu a ke vzniku specifické střížné plochy, jak je znázorněno v dolní části obrázku. Při stříhání se na stříhaný materiál působí vhodně upravenými noži tak, aby se materiál ustříhl v žádaném místě. Aby bylo dosaženo kvalitního stříhu, musí být dodržovány určité podmínky, jako je například ostří nožů a mezera mezi noži. Při špatně nastavené vůli mezi noži a při otupení nožů dochází při stříhu ke vzniku nekvalitní střížné plochy. Nedodržení těchto podmínek může způsobit nejen nekvalitní střížnou plochu, ale i vylomení břitů nožů nebo poškození celého stroje.



Obr. 7 Střížný proces [31]

Ve stříhaném materiálu se od místa styku s noži šíří tlak v izobarických plochách. Působením nožů se část stříhaného materiálu přesune podél střížné plochy proti sobě, to má za následek vznik tahového napětí ve střížné ploše. V určité oblasti kolem střížné plochy dojde k přetvoření stříhaného materiálu, protože při posuvu nožů jsou postupně ohýbána a protahována vlákna materiálu. Deformace vláken klesá úměrně se vzdáleností od břitu nože. Po zatlačení nožů do určité poměrné hloubky, která je pro každý materiál charakteristická, dojde k takovému nárůstu tahového napětí, že dojde k porušení materiálu. Vzniklá trhlinka je orientována ve směru největšího smykového napětí. První trhlinka vzniká obvykle na břitu nože, protože v těchto místech je největší hodnota tahového napětí. Další trhlinky vznikají postupem nožů, až dojde k úplnému oddělení stříhaných částí. Z důvodu nerovnoměrného rozložení tlaku dochází, se změnou vzdálenosti od břitu nožů, ke změně směru prohnutí vláken. Směr trhlinek v materiálu, které vznikají ve směru největšího smykového napětí, se mění podobně.

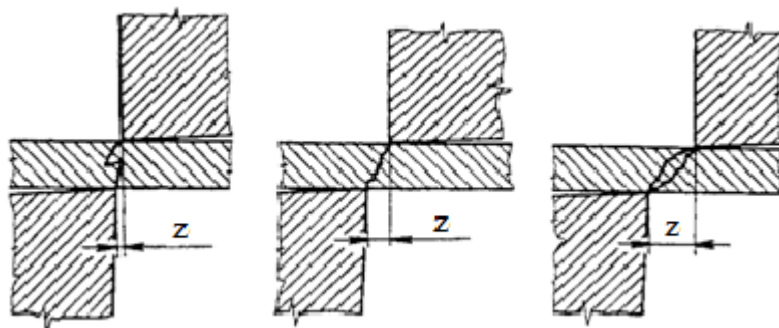
Při stříhání materiálu vzniká v místě stříhu specifická střížná plocha. Kvalita střížné plochy je závislá zejména na vlastnostech stříhaného materiálu, velikosti střížné mezery, tvaru a geometrie střížných hran nástroje a rychlosti střížného procesu. Střížná plocha je rozdělena na několik částí. Na horní hraně plechu dochází k zaoblení vzniklém při vnikání nože do plechu. Následuje pásmo vlastní plastické deformace, vznikající zatlačením nože do stříhaného materiálu až do vzniku trhliny. Pásmo dolomení tvoří, v závislosti na



Obr. 8 Střížná plocha [5]

vlastnostech materiálu, až 80% střížné plochy. Poslední částí je otřep způsobený otupením spodního nože a tvárností stříhaného materiálu. Na obr. 8 jsou vidět jednotlivé oblasti střížné plochy a oblast zpevnění v okolí střížné plochy. Oblast 1 je zeslabení tloušťky vzniklé přechováním horní části materiálu pohyblivým nožem. Tato oblast dosahuje hloubky 5 až 8% tloušťky plechu. Oblast 2 představuje oblast plastického stříhu. Část 3 je oblast lomu. Tento úsek má tvar S-křivky, kdy je horní část prohloubena a spodní část naopak vystupuje. Úsek 3a, nazývaný oblast otěru, je typický pro stříhání na stříhadlech a vzniká třením při protlačování výstřížku střížníkem střížnicí. Část 4, v okolí střížné plochy, je oblast zpevnění materiálu. Tato část má šířku 20 až 30% tloušťky materiálu a její velikost je nepřímo úměrná tvárnosti materiálu a otupení nožů. Pozice 5 označuje vzniklý otřep. Oblast 6 vzniká vtiskem spodního nože a její velikost je závislá na úhlu čela tohoto nože. Čím je úhel čela spodního nože větší, tím snáze se tento nůž zatlačí do spodní části stříhaného plechu.

Pro dosažení kvalitní střížné plochy je zcela zásadní správná volba střížné mezery. Správným zvolením střížné mezery je zaručeno spojení trhlín vzniklých při stříhání



Obr. 9 Volba střížné mezery [5]

a tím je zamezeno vzniku nekvalitní střížné plochy. Optimální střížná mezera zaručuje vznik kvalitní střížné plochy za použití co nejmenší střížné síly. Volba velikosti střížné mezery závisí na vlastnostech, tloušťce stříhaného materiálu

a leží v intervalu 3 - 20% tloušťky stříhaného plechu. Velikost střížné mezery je nepřímo úměrná pevnosti a tloušťce stříhaného plechu. Na obr. 9 je jasné patrné, jak velikost střížné mezery ovlivňuje výslednou střížnou plochu. Zvolení příliš malé střížné mezery může vést k tomu, že se trhlíny, které při stříhání vznikají, nesetkají. To vede k vytvoření nekvalitní střížné plochy se zátrhem. Optimálně zvolená střížná mezera zaručuje vznik střížné plochy požadované jakosti. Pokud je střížná mezera příliš velká a vzniklé trhlíny se vůbec nesetkají, potom se materiál utrhne na dvou místech současně, vzniká tříška, a tudíž není možné dosáhnout požadované velikosti ústřížku.

Obecně lze velikost střížné mezery pro tenké plechy do tloušťky 3 mm určit ze vztahu:

$$z = c \cdot s \cdot \sqrt{0,1 \cdot \tau_s}, \quad (2.1)$$

a pro tlusté plechy od 3 mm do 10 – 12 mm ze vztahu:

$$z = (1,5 \cdot c \cdot s - 0,015) \cdot \sqrt{0,1 \cdot \tau_s}, \quad (2.2)$$

kde c – koeficient závislý na druhu stříhání (volen v mezích 0,005 – 0,035),

s – tloušťka plechu,

τ_s – pevnost materiálu ve stříhu.

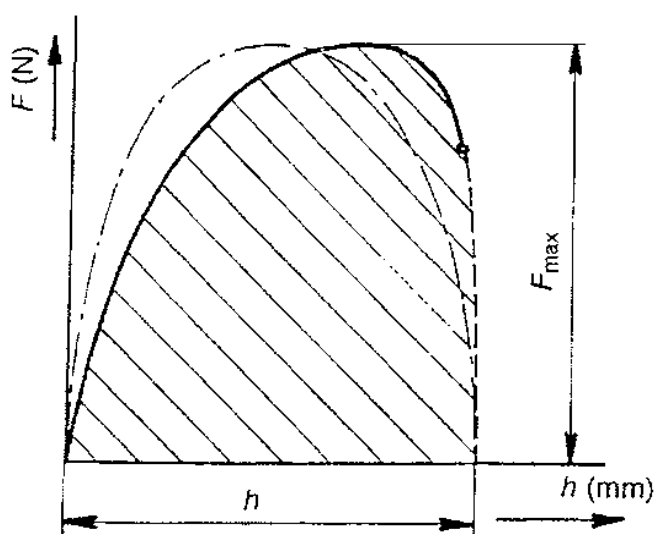
Střížná síla při stříhání paralelními noži vzrůstá a svého maxima nabývá ve chvíli, kdy ve stříhaném materiálu vznikne první trhlina. Poté střížná síla klesá a nulové hodnoty dosáhne, když se stříhaný materiál kompletně oddělí. Jako stříhovou pevnost považujeme poměr maximální stříhové síly a původního průřezu stříhaného materiálu.

Střížnou sílu pro stříh paralelními noži tedy lze vypočítat ze vztahu:

$$F_{max} = S \cdot \tau_s, \quad (2.3)$$

kde S - plocha stříhaného materiálu v rovině stříhu.

Práci potřebnou k ustřížení materiálu je možné vypočítat jako integrál plochy pod křivkou velikosti střížné síly v závislosti na dráze střížníku, ale tuto křivku nelze popsat matematickou funkcí. Proto se skutečný průběh střížné síly nahrazuje eliptickou závislostí a tím se získá dostatečně přesná hodnota potřebné práce. Hlavní poloosa elipsy je rovna velikosti střížné síly. Vedlejší poloosa je rovna polovině hloubky zatlačení nože do materiálu. Průběh střížné síly při stříhání paralelními noži a nahrazení průběhu polovinou elipsy jsou znázorněny na obr. 10. Plocha pod polovinou elipsy, a tudíž i velikost střížné práce je tedy rovna



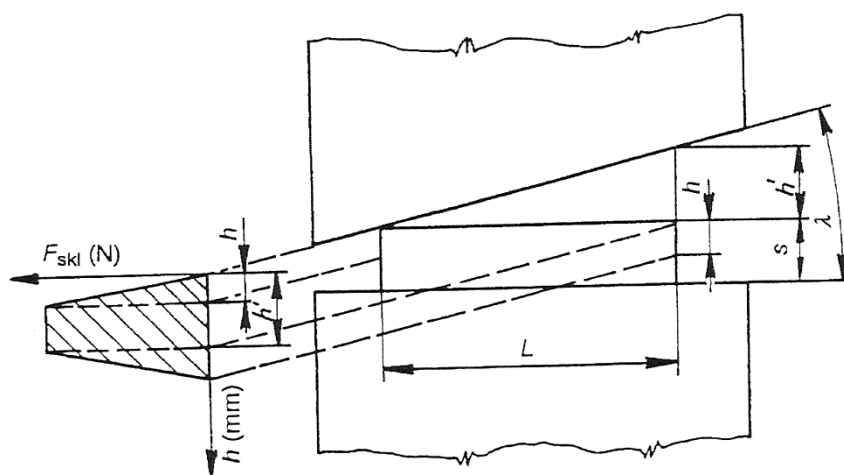
Obr. 10 Průběh střížné síly [5]

$$A = \frac{\pi}{2} \cdot F_{max} \cdot \frac{h}{2}, \quad (2.4)$$

kde h – hloubka vniknutí střížníku do materiálu do okamžiku porušení.

Paralelních nožů se využívá zejména při vystřihování na stříhadlech. Pro stříhání plechů pákovými nebo tabulovými nůžkami je používána jiná konfigurace nožů.

Při stříhání skloněnými noži se, na rozdíl od stříhání paralelními noži, stříhaný materiál neodděluje celý najednou, ale postupně. Stříhání skloněnými noži je výhodné v tom, že se sníží celková potřebná střížná síla oproti stříhání na nůžkách s paralelními noži.



Obr. 11 Stříhání skloněnými noži [5]

Nevýhodou je ale to, že při vzrůstajícím úhlu mezi noži klesá kvalita střížné plochy. V praxi se, kvůli zachování samosvornosti, používá úhel mezi noži 1 až 5°. Na obr. 11 je průběh střížné síly a schéma stříhání plechu o šířce L a tloušťce s skloněnými noži. Střížná síla bude vzrůstat až to chvíle, kdy nůž vnikne do stříhaného materiálu do takové hloubky, že se materiál v daném místě zcela oddělí. Tato hloubka je označena h . Při dalším posuvu bude nožem zasažena stejná část materiálu a proto bude velikost střížné síly konstantní. Střížná síla bude klesat teprve tehdy, až nůž dosáhne konce

stříhaného materiálu. Tedy až se posune o hodnotu 'h'. Za předpokladu malého úhlu 'λ' mezi noži, bude střížná práce, potřebná k ustřížení materiálu, stejná jako při stříhání na nůžkách s noži paralelními.

Práce potřebná k ustřížení materiálu na nůžkách se skloněnými noži tedy bude:

$$A_{skl} = F_{skl} \cdot h' = L \cdot F_{skl} \cdot \tan \lambda, \quad (2.5)$$

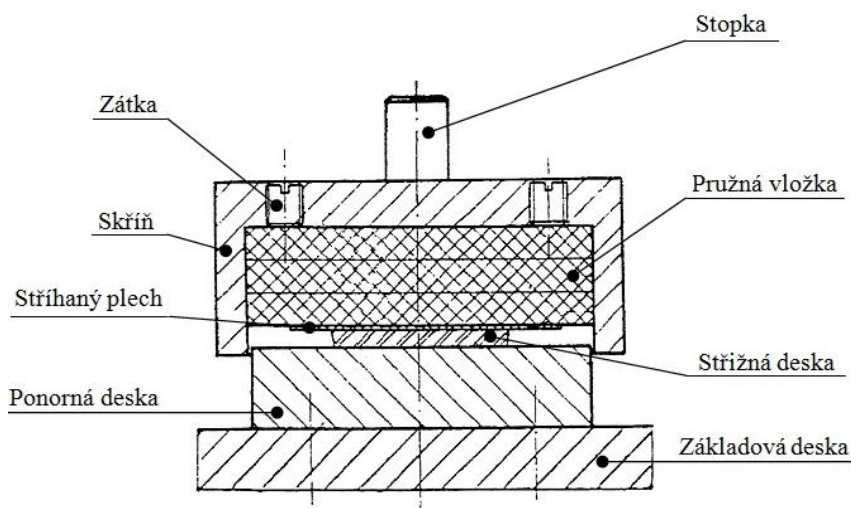
kde F_{skl} – maximální střížná síla při stříhání skloněnými noži,

h' – posunutí střížníku do začátku klesání střížné síly,

L – šířka stříhaného plechu,

λ – úhel mezi noži.

Speciálním případem stříhání, který je vhodný zejména pro kusovou a malosériovou výrobu, je stříhání pružným prostředím. Na rozdíl od stříhání dvěma noži probíhá stříhání pružným prostředím podle zcela jiného principu. Nedochází totiž k odstřížení, ale k utržení stříhaného plechu, na který působí tlakem pružné médium, například polyuretan nebo pryž. Celý proces stříhání je možné rozdělit na tři fáze. V první fázi pružné médium přitlačí stříhaný plech na střížný nástroj. V druhé fázi dochází k ohybu plechu a přitlačení okraje plechu ke stolu. Okraj plechu musí být dostatečně dlouhý, aby došlo k dostatečnému přitlačení. V poslední fázi procesu pružné médium dále tlačí na plech a vyvolává v části mezi nástrojem a stolem tahové napětí. Tahové napětí překročí mez pevnosti v tahu materiálu a dojde k utržení na hraně nástroje, která na plech působí vrubovým účinkem. Konstrukce nástroje, znázorněná na obr. 12, je relativně jednoduchá a skládá se ze dvou hlavních celků. První celek je tvořen skříní, ve které je umístěna pružná vložka ve formě desek. Skříně je také opatřena stopkou, která slouží ke spojení nástroje s beranem lisu. Nutnou součástí skříně jsou také zátky, po jejichž vyjmutí je možné vyměnění pružných desek. Druhý celek tvoří ponorná deska, která je pevně sestavena s deskou základovou. Na ponorné desce je umístěna střížná deska, která má tvar požadovaného výstřižku. Tvoří tudíž jakousi šablonu. Při samotném stříhání se položí stříhaný materiál na střížnou desku a skříně se přes stopku upne k beranu lisu. Tlakem beranu se skříně nasouvá na ponornou desku. Při kontaktu se stříhaným plechem a přitlačení plechu na střížnou desku se pružná vložka deformuje a ohýbá volné konce plechu. Po odstřížení konců plechu zůstane na střížné desce výstřižek, který se z nástroje vyjme po zvednutí skříně. Síla, potřebná k ustřížení materiálu, je dána součinem tlaku v pružném médiu a plochou, na kterou působí tlak. Při použití média v nádobě, bude potřebná plocha půdorysným průřezem nádoby.



Obr. 12 Stříhání pružným prostředím [5]

Síla, potřebná ke stříhání, je nezávislá na délce stříhu a je jen nepatrně ovlivňována použitým médiem. Vypočítá se ze vztahu:

$$F = p \cdot S, \quad (2.6)$$

kde p - tlak v pružném médiu.

Při stříhání pružným prostředím je nutno respektovat několik zásad, aby bylo možné dodržet popsany postup stříhu. Velice důležitá je délka lemu, jenž musí být pevně přitlačen k desce stolu, aby v něm mohlo vzniknout tahové napětí rovné mezi pevnosti v tahu stříhaného materiálu. Velmi důležitá je také délka okraje přitlačeného k nástroji, aby vznikla dostatečně velká třecí síla, která nebude překonána tahovým napětím ve volném okraji. Nesplněním této podmínky dojde k posunutí stříhaného plechu a následnému snížení tahového napětí ve volném konci, a tudíž nedojde k utržení.

Z toho vyplývá, že délka přečnívajícího okraje 'B' musí být závislá na výšce střížné desky 'H' a tloušťce stříhaného plechu 's'.

$$H = 10 \cdot s \quad (2.7)$$

$$B \geq 3 \cdot H \quad (2.8)$$

Dále je důležitá ostrost střížné hrany. Otupená střížná hrana nepůsobí dostatečným vrubovým účinkem na stříhaný plech a ten se může utrhnout na jiném místě. Nutné je též vhodně zvolit úhel hřbetu nástroje. Při příliš malém úhlu hrozí dosednutí stříhaného plechu na hřbet nástroje a utržení jinde než v požadovaném místě. Naopak při příliš velkém úhlu vzniká nebezpečí poškození pružného média při střížném procesu.

2.1 Zařízení ke stříhání plechů [1], [3], [6], [18], [20]

Při běžném stříhání tenkých plechů se používají tabulové nůžky se skloněnými noži, se kterými není potřeba tak velká střížná síla, jako při stříhání na tabulových nůžkách s paralelními noži. Pro výrobu kvalitních odstřížků je potřeba přesně ustavit stříhaný materiál ve stroji. K přesnému usazení stříhaného plechu ve stroji se využívá předního nebo zadního dorazu. Při stříhání malých kusů na dílenských pákových nůžkách se stříhá podle rysky na plechu. Většina moderních tabulových nůžek je vybavena číslíkovým nastavením zadního dorazu. Pro dosažení kvalitní střížné plochy je zásadní správná volba střížné mezery. Moderní tabulové nůžky nastaví vhodnou střížnou mezeru pro danou tloušťku stříhaného materiálu automaticky. Pro malosériovou a dílenskou výrobu je vhodné využití pákových nůžek, které jsou cenově výrazně dostupnější, ale ústřížek nemá ve srovnání s použitím tabulových nůžek tak kvalitní střížnou plochu ani nedosahuje takové rozměrové přesnosti, protože se při stříhání ve většině případů nepoužívá doraz, ale stříhá se podle rysky na plechu. V současné době působí na světovém a českém trhu široká škála firem zabývajících se konstrukcí, výrobou a prodejem technologických zařízení pro stříhání plechů, ať už se jedná o tabulové padací nůžky nebo o nůžky pákové. V rámci zachování přehlednosti zde budou uvedeny jen některé.

a) Durmazlar - tato společnost, která je výrobcem vysoce výkonných strojů pro zpracování plechů, sídlí v turecké Burse. Společnost nabízí, mimo jiné, několik modelových řad tabulových nůžek, přičemž každá řada je dále dělena na typy podle maximální délky stříhu a maximální tloušťky stříhaného materiálu.

DURMA VS - modelová řada CNC hydraulických tabulových nůžek robustní konstrukce s automatickým nastavením zadního dorazu, úhlu stříhu a délky stříhu dotykovým ovládacím panelem. Na panelu je rovněž možnost nastavení přítlačného tlaku přidržovačů. Součástí jsou také pneumatické podpěry slabých plechů a optoelektronická zábrana zadního prostoru stroje, která výrazně dopomáhá ke zvýšení bezpečnosti práce. V závislosti na zvoleném typu je rozmezí maximálních délek stříhu 3080-6080mm a maximální tloušťka stříhaného plechu 6-20mm. Na obr. 13 jsou tabulové nůžky typu VS 4013. Masivní tuhá konstrukce stroje zabraňuje prohýbání a zaručuje dosažení požadované kvality střížné plochy po celé délce stříhaného materiálu. Zařízení je rovněž vybaveno systémem dopravujícím ustřižený kus zpět k obsluze, díky kterému se pracovní proces výrazně urychlí.



Obr. 13 DURMA VS 4013 [6]

- b) **Cidan machinery, Inc.** - tato společnost, zaměřená na výrobu technologií používaných ke stříhání plechů, je dceřinou společností skupiny Petersen machinery group A/S. Společnost sídlí v americkém Peachtree City ve státě Georgia, přičemž stroje pro stříhání plechů jsou vyráběny v Dánsku.

CIDAN HMS-F - modelová řada elektromechanických tabulových nůžek dává zákazníkovi široký výběr typů volených především pro maximální délku stříhu a maximální tloušťku stříhaného plechu. Svařovaná konstrukce nůžek je mimořádně tuhá a zbavená vnitřních pnutí, což má za následek minimální požadavky na seřizování mezery mezi noži. Zařízení obsahuje optoelektronickou nebo mechanickou závoru zadní části stroje. Tato řada nabízí rovněž možnost skluzu ustřiženého materiálu zpět k obsluze. Tím pádem se zvyšuje efektivita pracovního procesu. Tabulové nůžky CIDAN HMS-F jsou na obr. 14. Maximální délka stříhu se pohybuje mezi 2050 a 3100mm a maximální tloušťka stříhaného plechu je 2,5 až 3,5mm. Tyto tabulové nůžky jsou schopné dosáhnout až 40 stříhů za minutu.



Obr. 14 CIDAN HMS-F [3]

- c) **Amada SA** - tato společnost, sídlící v Paříži, spadá pod skupinu Amada group. Amada je výrobce široké škály technologií pro zpracování kovových materiálů. Do sortimentu společnosti spadá rovněž výroba tabulových nůžek.

Amada GS II - tato řada tabulových nůžek nabízí automatické nastavení polohy zadního dorazu. Střížná mezera a úhel stříhu se nastavují manuálně. Robustní konstrukce zajišťuje stejnou velikost střížné mezery po celé délce stříhu. Výsledkem toho lze získat velmi přesné výstřižky. Maximální délka stříhu se u jednotlivých typů pohybuje od 3050 do 4050mm s maximální tloušťkou stříhaného ocelového plechu 6-12mm. Tabulové nůžky Amada GS II 1230 jsou na obr. 15.



Obr. 15 AMADA GS II 1230 [1]

- d) **Metallkraft Maschinen** - společnost, sídlící v německém městě Hallstadt, je výrobcem a distributorem řady technologií používaných ve strojírenství. Jejich produktem jsou, mimo jiné, i pákové nůžky.

Metallkraft BSS 1250 E - nejvýkonnější pákové nůžky německé společnosti Metallkraft. Tento typ nůžek je velmi vhodný pro dílenské použití a pro kusovou průmyslovou výrobu. Masivní litinová konstrukce nůžek zaručuje stabilitu při stříhu a zachování konstantní střížné mezery v celé délce stříhu. Nůžky jsou vybaveny přidržovací lištou zabraňující pohybu plechu při stříhu. Maximální možná šířka stříhaného plechu je 1250mm a lze stříhat do tloušťky plechu 1,5mm. Výhodou je volný průchod dovolující stříhání dlouhých plechů nebo stříhání plechů přímo ze svitků. Tyto nůžky jsou na obr. 16.



Obr. 16 Metallkraft BSS 1250 E [18]

Při správné konstrukci nástrojů může být příčinou závad nesprávný způsob výroby, seřízení, špatná kvalita stříhaného materiálu, opotřebení nástroje nebo samotného stroje. Velice důležité je tepelné zpracování nástrojů. Malá tvrdost střížníků, z důvodu nevhodného tepelného zpracování může vést k ohybu, nebo k předčasnému opotřebení. Naopak příliš velká tvrdost střížného nástroje může způsobit jeho prasknutí nebo ulomení. I při správně vyrobených a seřízených nástrojích se za určitý počet pracovních cyklů projeví otupení střížného nástroje. Za tupé se nástroje považují při otupení (zaoblení) střížné hrany

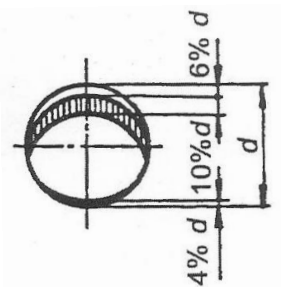
$$r = 0,1 \cdot s. \quad (2.9)$$

3 STŘÍHÁNÍ TYČÍ A SOCHORŮ [5], [20]

Přesné dělení tyčových polotovarů je počáteční operací každého objemového tváření. Základní požadavek je kladen na to, aby měly ústřížky konstantní objem s nízkou deformací povrchu a kvalitní střížnou plochu. Polotovary z tyčí nebo sochorů, vyrobené beztrískovým způsobem, se vyrábějí buď lámáním, nebo objemovým stříháním za studena nebo za tepla. V praxi je nejvíce využíváno objemové stříhání za studena. Beztrískové dělení polotovarů je z ekonomického hlediska nejvýhodnější, vysoce produktivní, ale je omezováno mechanickými vlastnostmi materiálů, požadovaným tvarem a rozměry ústřížku. Dalšími nedostatky beztrískového dělení tyčí a sochorů je nízká kvalita střížné plochy ústřížků.

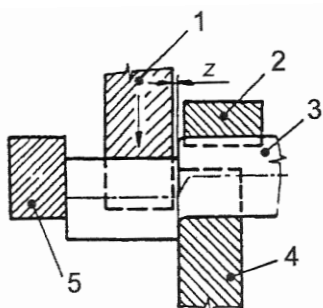
Princip objemového stříhání za studena je obdobný jako princip plošného stříhání. V první fázi se stříhaný materiál, v tomto případě sochor nebo tyč, upevní mezi pevné nože. Po upevnění působí na materiál tlakem pohyblivý nůž a do stříhaného materiálu se zatlačuje. Tento proces způsobuje napínání a ohyb vláken materiálu, jehož velikost je nepřímo úměrná vzdálenosti od břitů nožů. Po zatlačení nože do určité hloubky, která je pro každý stříhaný materiál charakteristická, překročí napětí v materiálu mez pevnosti ve stříhu a dochází ke vzniku prvních trhlin. Tyto trhliny vznikají pod břity nožů, které na stříhaný materiál působí vrubovým účinkem, a tudíž je pod nimi oblast největšího napětí. Dalším postupem nožů se trhliny šíří, přičemž toto šíření končí úplným odlomením ústřížku od tyče.

Při objemovém stříhání za studena vzniká na ústřížku charakteristická střížná plocha, která je znázorněna na obr. 17. Tato plocha je rozdělena na čtyři části. První část střížné plochy je oblast počátečního pěchování materiálu, které je způsobeno zatlačováním pohyblivého nože do stříhaného materiálu. Tato část zaujímá zhruba 6% průměru stříhané tyče. Druhou část tvoří oblast plastického stříhu, která je přibližně na 10% průměru. Největší oblastí střížné plochy je oblast lomu, která zaujímá až 80% průměru stříhané tyče. Tato část je kvůli své velikosti zásadní pro posouzení jakosti střížné plochy. Poslední částí, pokrývající přibližně poslední 4% průměru stříhané tyče, je oblast vtisku spodního pevného nože.



Obr. 17 Střížná plocha při objemovém stříhání [5]

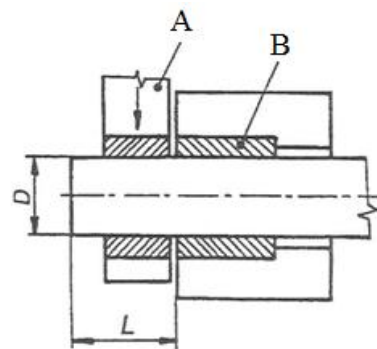
Objemové stříhání otevřenými noži, schematicky znázorněné na obr. 18, je z konstrukčního hlediska nástrojů velice jednoduché. Při stříhání tímto typem nástroje



Obr. 18 Objemové stříhání otevřenými noži [5]

se stříhaný materiál '3' vloží na dolní pevný otevřený nůž '4', upevní se shora prizmatickým vedením '2' a zajistí se dorazem '5'. Nůž, spolu s vedením, kompletně neobklopuje stříhaný materiál. Při samotném stříhu na materiál tlačí pohyblivý horní otevřený nůž '1', který obklopuje jen polovinu obvodu stříhaného materiálu. Při střížném procesu dochází před odlomením nejprve k ohybu stříhaného materiálu. Z tohoto důvodu je výsledná střížná plocha málo kvalitní a ústřížek je celkově pokřivený.

Nástroj pro objemové stříhání uzavřenými noži, schematicky znázorněný na obr. 19, je konstrukčně složitější. Stříhaný materiál se zasune do uzavřeného nože 'B' do takové vzdálenosti, aby z něj přečníval o požadovanou délku ústřížku 'L'. Vnitřní průměr pevného nože je stejný jako průměr stříhaného materiálu 'D'. Při zasunování stříhaný materiál zároveň prochází pohyblivým uzavřeným nožem 'A', který budoucí ústřížek pevně obepíná. Při samotném střížném procesu se pohyblivý nůž držící stříhaný materiál posune a dojde k odstřížení materiálu. Použitím tohoto typu nástroje lze dosáhnout velmi kvalitní střížné plochy. Tato metoda ovšem není vhodná pro objemové stříhání za tepla, protože při ohřevu součásti dochází k deformaci průřezu.



Obr. 19 Objemové stříhání uzavřenými noži [5]

3.1 Zařízení ke stříhání tyčí a sochorů [10], [23]

Zařízení pro stříhání tyčí a sochorů potřebují pro úspěšné ustřížení materiálu vyvinout značnou energii. Dostatečně velkou mechanickou energii potřebnou ke stříhu obstarává u většiny zařízení setrvačnik poháněný přes převodovku elektromotorem. Na světovém trhu se pohybuje mnoho výrobců technologických zařízení používaných k bezodpadovému dělení tyčí a sochorů, ať už se jedná o robustní stroje pro velkosériovou výrobu, nebo o menší mobilní zařízení pro kusovou výrobu a dílenské použití.

a) JAYPEE India Limited - společnost sídlící v indické Kalkatě, která se zabývá výrobou technologických zařízení používaných ke tváření kovových tyčí. Jedná se o stroje k řezání, stříhání, rovnání a ohýbání.

Jaymac C55 - nejvýkonnější zařízení modelové řady nůžek na tyče a pruty. Robustní konstrukce stroje zobrazeného na obr. 20 zajišťuje zvládnutí velkých sil doprovázejících střížný proces. Provedení stroje umožňuje snadný přesun, tudíž je zařízení vhodné jak pro dílenské, tak pro terénní použití. Pohon stroje zajišťuje elektromotor o výkonu 5,6kW umožňující stříhání tyčí o průměru až 55mm. Zařízení je snadno ovladatelné pákou, kterou se střížný proces spouští. V rámci bezpečnosti je stroj opatřen krytem, který je velmi vhodný při odstříhování krátkých kusů, které při odlomení odletují velkou rychlostí. Z tohoto důvodu je stroj rovněž možno ovládat pedálem z větší vzdálenosti. Zařízení je díky své jednoduché konstrukci relativně levné.



Obr. 20 Jaymac C55 [10]

b) Peddinghaus Corporation - společnost, s více než stoletou tradicí, zaměřená na výrobu technologických zařízení používaných k tváření kovů. Společnost sídlí v americkém Bradley ve státě Illinois. Mezi jejich produkty patří také multifunkční tvářecí zařízení uvedené níže.

PeddiMax - tento multifunkční tvářecí stroj je navržen tak, aby mohl provádět různé technologické operace najednou, a jedná se tedy o výhodné řešení zejména tam, kde je potřeba provádět více tvářecích operací na omezeném prostoru. Jak je vidět na obr. 21, je zařízení rovněž navrženo tak, aby mělo co nejmenší půdorysnou plochu, a tudíž aby ve výrobní hale zabíralo co nejméně prostoru. Díky tomu může pracovat více operátorů ve stejnou dobu. Stroj je robustní tuhé konstrukce umožňující bezproblémový chod a zvládnutí velkých sil doprovázejících technologické procesy. Mimo jiné je na tomto zařízení možné stříhat kovové L-profilů o maximální tloušťce 12mm. Dále kruhové tyče o maximálním průměru 50mm a sochory s maximálním rozměrem 55x55mm. Stroj je dále vybaven skloněnými noži pro stříhání desek o maximální šířce 500mm a tloušťce 20mm. Poslední část stroje, využívaná ke stříhání, je vrubovací nůž používaný k vystřižení vrubu potřebného k přesnému usazení dílu při svařování. Ovládání zařízení zajišťují nožní pedály. Potřebný výkon dodává stroji elektromotor o výkonu 11kW.



Obr. 21 PeddiMax [23]

PeddiCat - také na této ekonomické verzi univerzálního tvářecího stroje lze vidět strategii společnosti Peddinghaus, spočívající ve snaze konstruovat stroje tak, aby ke své instalaci na pracoviště vyžadovali co nejmenší prostor, jak je dobře viditelné na obr. 22. Na tomto stroji lze stříhat ocelové desky o maximální šířce 350mm a tloušťce 13mm. Zařízení je rovněž vybaveno noži na stříhání objemových polotovarů, přičemž maximální rozměr stříhaného sochoru je 30x30mm. Limitní průměr tyčí, které lze na stroji ustříhnout je 31,75mm. Mezi další vybavení stroje patří nůž na vrubování, nůž na vystřihování a nástroj na ohýbání plechů. Masivní tuhá konstrukce zaručuje bezproblémový chod zařízení. Oproti stroji Peddimax obsluhuje toto zařízení pouze jeden operátor. Z tohoto důvodu je tento model vhodný zejména do provozů, kde nejsou kladeny tak vysoké nároky na produktivitu.



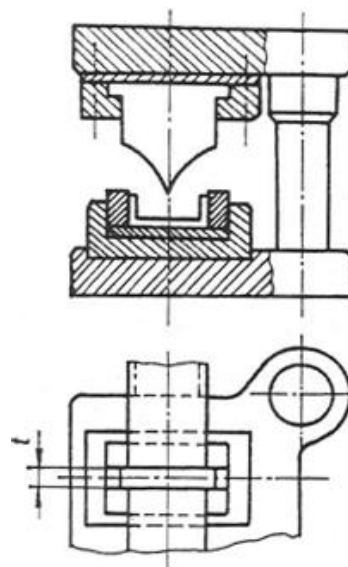
Obr. 22 PeddiCat [23]

4 STŘÍHÁNÍ PROFILŮ A TRUBEK [5], [20]

V důsledku velké poptávky po tenkostěnných profilech a trubkách se tento konstrukční materiál vyrábí válcováním ve velkých sériích. Při hromadné výrobě se v závodech trubky dělí přímo na profilové lince, přičemž se dělicí zařízení pohybuje současně s děleným materiálem. Takto je možné vyrobené profily a trubky dělit buď metodou třískovou, nebo bezodpadovou. Nevýhodou třískového dělení, například řezání pilou, je tvorba otřepů na hranách střížné plochy. Tyto otřepy je nutné odstraňovat a to má za následek přidání dalšího zařízení na výrobní linku. Tuto nevýhodu odstraňuje bezodpadové dělení, kterým je stříhání.

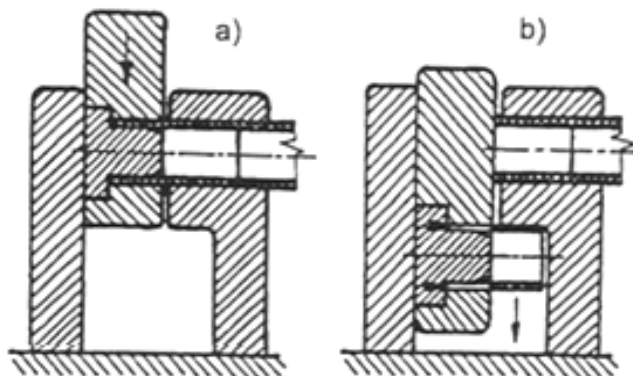
Princip stříhání tenkostěnných profilů a trubek je obdobný jako u stříhání plechů. Proces stříhu začíná vtačováním pohyblivého nože do stříhaného materiálu. To má za následek deformaci a protahování vláken materiálu. Počáteční elastické namáhání je po překročení meze kluzu nahrazeno namáháním plastickým. Po překročení meze pevnosti ve stříhu se od břitů, kde je napětí největší, začnou šířit materiálem trhliny. Tyto trhliny se při vhodně nastavené střížné mezeře setkají a materiál se oddělí. Jakost výsledné střížné plochy je závislá zejména na konstantní šířce stříhané trubky a na odchylce roviny stříhu od roviny kolmé na osu trubky.

K samotnému dělení tenkostěnných profilů a trubek se používá buď dělení v nástroji s odpadem, nebo dělení v nástroji bez odpadu. Rovněž je možno trubky dělit kotoučovými noži. Při stříhání v nástroji s odpadem vzniká tento odpad v důsledku konstrukční potřeby silnějšího břitu. Z toho důvodu je velikost vznikajícího odpadu, a tudíž i tloušťky použitého břitu, přímo úměrná velikosti a pevnosti stříhaného materiálu. Schéma nástroje pro stříhání tenkostěnného profilu nožem o tloušťce 't' s odpadem je na obr. 23. Při stříhání touto technologií je výsledná střížná plocha dobré kvality, protože je deformován pouze odpad.



Obr. 23 Stříhání v nástroji s odpadem [5]

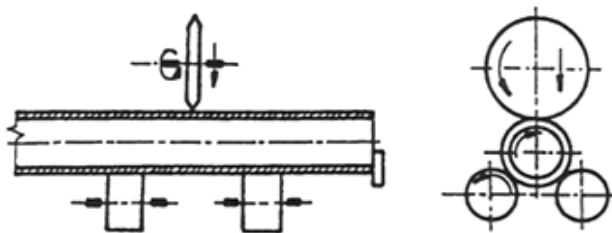
Naproti tomu, při stříhání tenkostěnných profilů a trubek v nástroji bez odpadu, je kvalita střížné plochy o poznání horší. Zároveň je deformován tvar ústřížku v závislosti na nepřesnosti tvaru pevného a pohyblivého nože, který by měl být stejný, jako je tvar stříhaného materiálu. Deformaci trubky při stříhu je možno odstranit použitím trnů, které se vsunou do stříhané trubky. Schéma nástroje pro stříhání tenkostěnných trubek bez odpadu je na obr. 24.



Obr. 24 Stříhání v nástroji bez odpadu [5]

V počáteční fázi se trubka vsune do pevného nože a dalším posuvem do nože pohyblivého, přičemž je vnitřní obvod trubky jištěn trnem. V samotné fázi stříhu se pohyblivý nůž posune a dojde k oddělení materiálu. Ústřížek je následně z pohyblivého nože odstraněn vyhazovačem.

Dalším způsobem dělení tenkostěnných trubek je stříhání kotoučovými noži. Při použití této metody je trubka upevněna na válečkách. Stříhání je prováděno přiložením kotoučového břitu a jeho následným otáčením. Při otáčení břitu je otáčena i trubka, přičemž břit je do ní postupně vtlačován. K úplnému oddělení dojde ve chvíli, kdy hloubka vtlačení břitu dosáhne tloušťky stříhané trubky. Hrozba zborcení profilu trubky může být odstraněna použitím otočného trnu. Schéma stříhání tenkostěnných trubek kotoučovými noži je na obr. 25.



Obr. 25 Stříhání tenkostěnných trubek kotoučovými noži [5]

4.1 Zařízení ke stříhání profilů a trubek [27], [34]

Stříhání tenkostěnných profilů různých tvarů se v praxi provádí na univerzálních tvářecích přístrojích, jako je například PeddiMax popsaný výše. Bezodpadové dělení tenkostěnných trubek se v průmyslové praxi provádí zejména na nůžkách s kotoučovými noži, které jsou univerzální ve své schopnosti dělit tenkostěnné trubky různých průměrů. Tato zařízení jsou výhodná z toho důvodu, že při samotném dělicím procesu nedojde ke zborcení průřezu trubky, a tudíž není potřeba používat ke stříhání trny, které by zborcení průřezu zabraňovali.

a) Ridge Tool Company - tato společnost, sídlící v americkém městě Elyria ve státě Ohio, je výrobcem široké škály zařízení pro průmyslové i dílenské použití. Mezi její produkty patří i kotoučové nůžky na trubky.

RIDGID 65S - nůžky na trubky s kotoučovým nožem, které jsou vhodné zejména pro malosériovou výrobu a dílenské použití. Přidržovací válečky i kotoučový nůž jsou uloženy na jehlových ložiskách, což zajišťuje snadné a plynulé otáčení zařízení nebo trubky při samotném procesu stříhání. Design utahovacího šroubu umožňuje pevnější přitisknutí kotoučového nože k trubce, což má za následek potřebu menšího počtu cyklů otočení trubkou nebo nůžkami do ustřížení trubky. Rovněž provedení celých nůžek, dobře viditelné na obr. 26, se snaží být co nejvýhodnější pro otáčení kolem trubky. Kotoučový nůž je jištěn speciálním kolíkem, který umožňuje snadnou výměnu břitu bez použití dalších nástrojů. Tímto zařízením lze dělit trubky o maximálním vnějším průměru 65mm.



Obr. 26 RIDGID 65S [27]

- b) **Tuwei Construction Equipment Manufacturing Co., Ltd** - společnost, sídlící v čínském městě Huangyan, se specializuje na výrobu zařízení pro tváření trubek. Součástí jejich sortimentu jsou tedy i nůžky na trubky s kotoučovým břitem.

TWQ-VA - nůžky určené ke stříhání kovových tenkostěnných trubek kotoučovým břitem. Díky většímu rozměru zařízení lze dělit trubky maximálního průměru 203mm s tloušťkou stěny maximálně 6mm. Pohon stroje zajišťuje elektromotor o výkonu 550W a otáčkách 23min^{-1} . Pohon stroje motorem je velmi vhodný z důvodu usnadnění a urychlení práce v porovnání s ručním stříháním, kde se musí trubkou dlouhou dobu otáčet, než dojde k úplnému oddělení. Přitlačování kotoučového nože k dělené trubce zajišťuje hydraulický oběh ovládaný pákou. Jednoduchá konstrukce stroje s nízkou hmotností umožňuje snadnou manipulaci se zařízením. Konstrukce nůžek obsahuje lišty potřebné k připevnění zařízení na pracovní stůl, což usnadňuje práci na stroji a snižuje riziko pracovních úrazů. Nůžky jsou zobrazené na obr. 27.



Obr. 27 TWQ-VA [34]

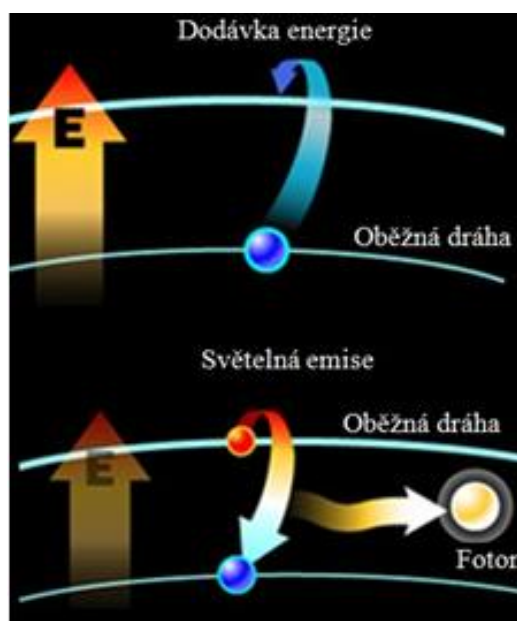
TWQ-VIA - nejnovější a zároveň nejvýkonnější kotoučové nůžky na trubky čínské společnosti Tuwei. Kotoučový břit dosahuje otáček 230min^{-1} díky elektromotoru o výkonu 550W. Vertikální posuv nástroje je ovládán pomocí páky. Konstrukce stroje je navržena tak, aby se minimalizovala možnost jakéhokoli poranění obsluhy při práci. Tento model je primárně určen pro stříhání dlouhých trubek, které jsou na menších elektricky poháněných strojích dělitelné jen obtížně, a je tudíž nutné je dělit pomocí ručních zařízení. To ovšem velmi snižuje produktivitu práce. Z tohoto důvodu je stroj vybaven dalšími podpůrnými válečky, které stříhání dlouhých trubek výrazně usnadňují. Na tomto stroji lze stříhat trubky o maximálním vnějším průměru 50,8mm. Limitní tloušťka stěny dělené trubky je 4mm. Zařízení je zobrazeno na obr. 28. Celková hmotnost stroje je pouze 53kg, což umožňuje jeho snadnou přepravu po pracovišti i případnou práci v terénu.



Obr. 28 TWQ-VIA [34]

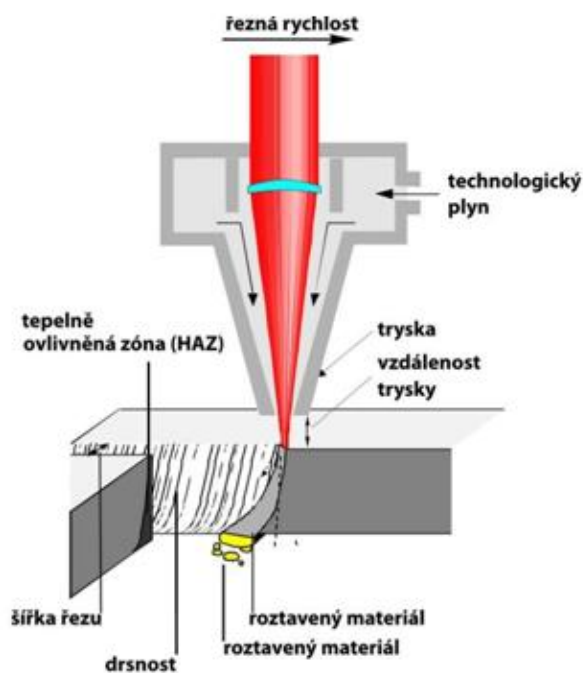
5 DĚLENÍ LASEREM [8], [9], [14], [16], [17], [21], [30]

Dělení materiálu laserovým paprskem je založené na přeměně energie světelné na energii tepelnou. Schopnost dělit materiál laserovým paprskem je dána schopností děleného materiálu absorbovat světlo. Obecně lze říci, že kovové materiály jsou laserem dělitelné obtížněji než ostatní, z důvodu vysoké odrazivosti laserového paprsku. Laser pracuje na principu vynuceného záření, které vzniká při ozařování atomu prvku aktivního prostředí laseru. Ozařování dodá obíhajícímu elektronu tolik energie, aby přestoupil na vyšší oběžnou dráhu kolem jádra. Další dodávkou energie a rovnováhou atomárních sil je elektron přinucen k navracení se na svou původní orbitu, přičemž dodanou energii vyžáří do okolí ve formě světla a tepla. Tento proces je znázorněn na obr. 29.



Obr. 29 Emise světla [9]

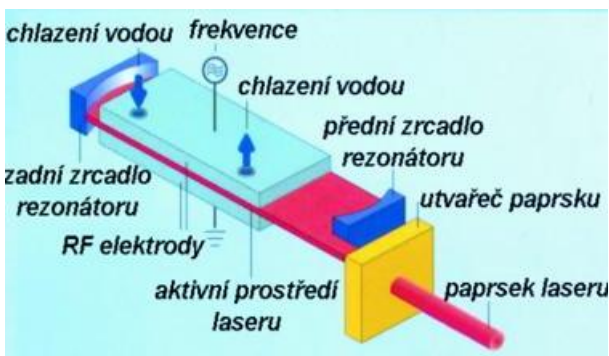
Při samotném dělicím procesu se dělicí tryska přiblíží na vzdálenost kolem jednoho milimetru od materiálu, který chceme dělit. Dodržování této vzdálenosti je velice důležité, a proto jsou moderní zařízení pro dělení laserem vybaveny sofistikovaným kontrolním systémem zaručujícím zachování konstantní vzdálenosti po celou dobu dělicího procesu, což zaručuje stálou kvalitu dělicí plochy po celé délce dělení. Z trysky vychází laserový paprsek, který je zaostřen na povrch materiálu. Dělený materiál paprsek pohlcuje a zahřívá se. Po roztavení děleného materiálu dojde k odstranění taveniny a par kovu z místa dělení tlakem technologického plynu, který proudí kolem laserového paprsku pod vysokým tlakem z výstupní trysky. Ta se pohybuje po předem definované trajektorii. Proces dělení laserovým paprskem je znázorněn na obr. 30. Na obrázku je rovněž znázorněna tepelně ovlivněná zóna vzniklá při dělicím procesu postupem tepla do děleného materiálu.



Obr. 30 Dělení materiálu laserem [30]

Podle použitého aktivního prostředí lze lasery rozdělit do tří skupin:

- **Plynové lasery** mají aktivní prostředí ve formě trubice naplněné plynem, kterým je nejčastěji argon, neon, oxid uhličitý nebo helium. Vynucení světelné emise se dosahuje přivedením vysokého napětí na elektrody umístěné uvnitř trubice s aktivním plynem. Průmyslově používané plynové lasery mohou být i velmi výkonné, ale jsou relativně

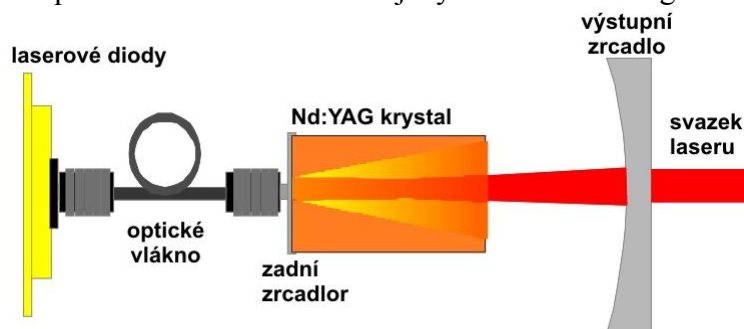


Obr. 31 Princip CO₂ laseru [17]

- drahé a vyžadují složitý systém chlazení. Plynový laser, nejčastěji používaný pro dělení, je CO₂ laser, který má v trubici směs oxidu uhličitého, dusíku, vodíku a helia, ale aktivním prostředím oxid uhličitý. Tento typ laseru, který je schematicky zobrazen na obr. 31, je buzen vysokonapětovým elektrickým výbojem zapalujícím směs helia, dusíku a oxidu uhličitého.

- **V pevnolátkových laserech** je aktivním prostředím homogenní krystal s příměsí cizorodé látky. U tohoto typu laserů se světelná emise dosahuje ozářením krystalu silným externím světelným výbojem. Nejčastěji používaným pevnolátkovým laserem je Nd:YAG laser, který nahradil dříve používaný rubínový laser. Aktivním prostředím tohoto laseru je yttriumaluminumgranát dopovaný

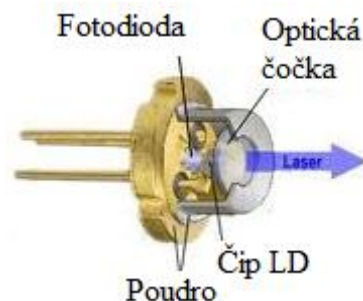
neodymem, který po vybuzení generuje světlo o vlnové délce 1,06 μm . Nd:YAG laser dosahuje výkonu až 4000W a může pracovat jak v kontinuálním, tak v pulzním režimu. Na obr. 32 je



Obr. 32 Nd:YAG laser [8]

Nd:YAG laser se zadním buzením laserovými diodami.

- **Polovodičové lasery**, známé také jako laserové diody, jsou nejnovějším druhem laserů. U tohoto typu laserů vzniká světelná emise na hranici polovodičů P a N v tenké přechodové vrstvě. Atomy v přechodové vrstvě absorbují energii z elektrického proudu a vystupují na vyšší oběžné dráhy. Při sestupu na své původní dráhy přijatou energii vydají v podobě světla a tepla. Díky potřebě monochromatického záření je potřebná velmi tenká přechodová vrstva. Schéma laserové diody je na obr. 33.



Obr. 33 Laserová dioda [16]

V praxi lze laserovým paprskem dělit kovové materiály třemi způsoby, přičemž příklad součásti zhotovené touto technologií je na obr. 34. Tavná metoda je prvním způsobem laserového dělení. Při dělení touto metodou dochází k tavení materiálu zasaženého laserovým paprskem a k jeho následnému oddělování od základního materiálu proudem inertního plynu. Inertní plyn slouží pouze k odstraňování nataveného materiálu z místa dělení, ale na samotném dělicím procesu se nepodílí. Nevýhodou tavného dělení, ve srovnání s ostatními metodami, je nižší dělicí rychlost způsobená nízkou absorpcí laserového paprsku děleným materiálem. Maximální dělicí rychlost je přímo úměrná výkonu použitého laseru a nepřímo úměrná tloušťce a teplotě děleného materiálu. Naproti tomu výhodou tohoto způsobu je neoxidovaná kovově lesklá dělicí plocha, která nevyžaduje žádné finální úpravy. Oxidační dělení je dalším způsobem dělení laserem. Charakteristickým znakem této metody je použití kyslíku jako dělicího plynu. Během dělení dochází k exotermické reakci mezi kyslíkem a nataveným materiálem, jejímž důsledkem je další ohřátí materiálu. To ve výsledku vede ke zvýšení dělicí rychlosti, ovšem za cenu širší dělicí spáry, horší kvality dělicí plochy a větší tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. Z těchto důvodů je tento proces nevhodný ke tvorbě velmi přesných geometrických tvarů. Určitého zlepšení jakosti dělicích ploch lze dosáhnout při dělení pulzujícím laserovým paprskem, kdy v mezeře mezi jednotlivými pulzy dochází k ochlazení děleného materiálu. Ovšem při pulzním dělení se nedosahuje takových dělicích rychlostí jako při dělení kontinuálním. Při sublimačním dělení dochází k odpařování materiálu v místě dělení. Tento způsob laserového dělení je v dnešní době používán jen málo, z důvodu nutnosti použití velmi výkonného laseru k dosažení minimální tavné zóny na dělicí hraně. Tloušťka děleného materiálu navíc nesmí překročit průměr paprsku laseru, aby nedošlo ke zpětné kondenzaci par děleného materiálu, a tudíž ke svaření dělicí spáry. Tato podmínka neplatí pro netavící se materiály, jako je například keramika nebo dřevo. Dělicí rychlost se při sublimačním dělení zvyšuje se vzrůstající rychlostí proudění dělicího plynu a klesá se vzrůstajícím odpařovacím teplem děleného materiálu.



Obr. 34 Součást zhotovená dělením laserem [14]

Mezi výhody dělení materiálů laserem patří vysoká přesnost dílů při dělení materiálů malých a středních tloušťek. Dále možnost tvorby otvorů malých průměrů, dělení úzkých pásků a různých tvarů s ostrými úhly. Dále pravoúhlá dělicí hrana. Malá tepelně ovlivněná oblast v důsledku malého množství tepla přivedeného do oblasti dělení, což má za následek nulovou deformaci děleného materiálu. Dělicí spára široká řádově desetinu milimetru. Vysoká rychlost dělení a možnost dělit téměř všechny materiály.

Nevýhodou této technologie je nutnost přesně řídit vzdálenost trysky od děleného materiálu a v neposlední řadě také vysoké provozní a pořizovací náklady celého zařízení. Dále nestabilita dělicího procesu při dělení lesklých materiálů a nízká účinnost.

5.1 Zařízení pro laserové dělení [2], [33]

Pro dělení kovových materiálů laserovým paprskem se používají počítačem řízená centra, podporující většinu formátů technických výkresů. Na trhu se pohybuje velké množství výrobců produkující tato zařízení, ať už se jedná o dělicí centra s pevnolátkovými nebo s plynovými lasery. Z hlediska přehlednosti jsou dále uvedeny jen některá zařízení.

- a) **Bystronic** - přední výrobce a dodavatel zařízení používaných k obrábění plechů. Společnost, patřící do koncernu Conzzeta, sídlí ve městě Niederönz ve Švýcarsku. Mezi širokým sortimentem nabízených zařízení jsou i laserová CNC dělicí centra.

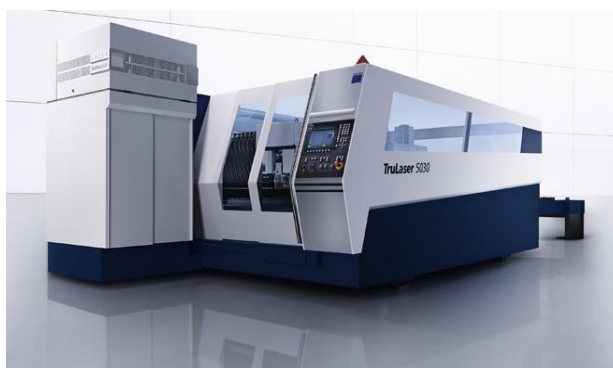
BySprint Pro - modelová řada laserových CNC dělicích center pracujících s CO₂ lasery. Největší model této řady je schopen dělit plechy o rozměrech až 2000x4000mm. Zařízení je vybaveno automatickým měničem trysek, který minimalizuje prostoje způsobené ruční výměnou. Dělicí rychlost je ovlivněna druhem a tloušťkou děleného materiálu, přičemž nejvyšší možná je 140m/min. Při samotném dělicím procesu je vnitřní prostor stroje hermeticky uzavřen, což má za následek minimalizaci hluchosti na pracovišti a brání úniku vznikajícího kouře do okolí. Všechny funkce stroje jsou ovládány pomocí dotykového displeje, který je spolu s celým zařízením vidět na obr. 35.



Obr. 35 BySprint Pro 3015 [2]

- b) **Trumpf, Inc.** - společnost sídlící v americkém Farmingtonu ve státě Connecticut. Produkty této společnosti se prosazují v různých odvětvích, a mimo jiné, produkuje stroje ke zpracování kovových plechů. Mezi ně patří i laserová dělicí centra.

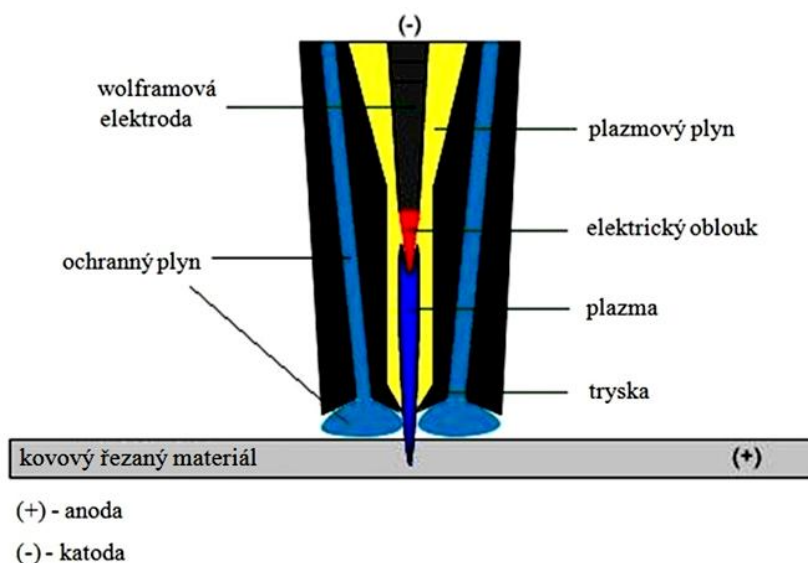
TruLaser 5030 - vysoce výkonné laserové dělicí centrum, které při maximálním výkonu svého pevnolátkového laseru umožňuje dělit ocelové plechy do tloušťek až 30mm. Tento stroj má robustní konstrukci zaručující provoz bez nežádoucích vibrací. Díky tomu se na stroji dosahuje přesných obrysů dělených dílů. Pracovní oblast dělicího centra je 3000x1500mm. Dělicí hlava je polohována s přesností 0,1mm. Na obr. 36 je rovněž vidět ovládací panel centra, který umožňuje snadnou obsluhu. Pracovní oblast je hermeticky uzavřena, což má za následek snížení úrovně prašnosti a hluchosti v podniku. Po přidání speciálního přípravku je na tomto dělicím centru možno dělit trubky.



Obr. 36 TruLaser 5030 [33]

6 DĚLENÍ PLAZMOU [18], [19], [24], [25], [28]

Základem plazmového dělení je ohřev a tavení materiálu za velmi vysokých teplot vznikajících v elektrickém oblouku mezi netavící se wolframovou katodou a anodou, kterou je, v závislosti na použité technologii, buď těleso hořáku, nebo dělený materiál. Princip metody, znázorněné na obr. 37, spočívá v zapálení elektrického oblouku mezi elektrodami a následným přiváděním plazmového plynu do oblouku. Oblouk se zapaluje buď automaticky pomocí jiskrového výboje, nebo mechanicky zapalovací jehlou. V oblouku se plyn ohřívá a za velkého tepelného výdeje se jeho molekuly rozpadají na elektrony, neutrony, pozitivní a negativní ionty. Tato vysoce elektricky vodivá plynná směs dosahuje velmi vysokých teplot dosahujících až 20000°C. Proud plazmy z hořáku svou vysokou teplotou taví dělený materiál a svou kinetickou energií ho vytlačuje z místa dělení. Při procesu dělení vzniká kouř, prach a ultrafialové záření, proto je nutná adekvátní ochrana obsluhy zařízení.



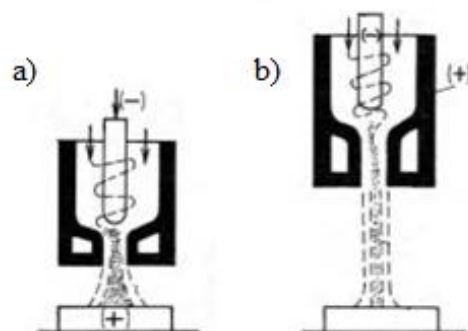
Obr. 37 Princip dělení plazmou [24]

Při dělení plazmou je velice důležitá volba plazmového plynu. V praxi se používají tyto druhy plynů:

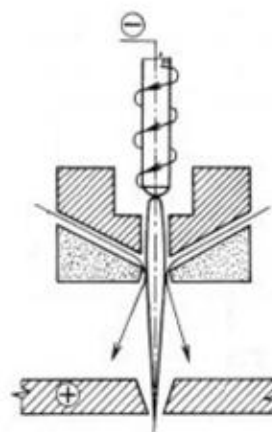
- Plazmové plyny jsou přiváděny hořákem přímo do elektrického oblouku, kde ionizují. Mezi tyto plyny patří například argon, směs argonu a vodíku, helium, dusík nebo kyslík. V případě kyslíku se dělený materiál spaluje a tím přispívá k rychlosti dělicího procesu.
- Fokusační plyny zajišťují zúžení paprsku plazmy po výstupu paprsku z trysky hořáku. Těmito plyny jsou argon, dusík, popřípadě směs argonu s vodíkem nebo argonu s dusíkem.
- Asistenční plyny plní funkci ochrany místa dělení před nežádoucím působením okolní atmosféry. Těmito plyny jsou dusík a argon.

Volba vhodného plynu závisí na vlastnostech a tloušťce materiálu, který chceme plazmou dělit. Vhodná kombinace plazmového a asistenčního plynu je doporučena výrobcem používaného zařízení. Pro dělení konstrukčních ocelí se jako plazmový plyn používá kyslík nebo vzduch. Pro vysokolegovanou ocel se používají kombinace argonu a vodíku, argonu a dusíku, čistý dusík nebo vzduch. Pro neželezné kovy směs argonu a vodíku nebo vzduch. Při dělení kompozitních materiálů je použitým plazmovým plynem argon s vodíkem, argon s kyslíkem, čistý dusík nebo vzduch.

Při plazmovém dělení je možné použít tři typy plazmových hořáků, přičemž příklady vyrobených součástí jsou na obr. 40. Těmito hořáky jsou plynem stabilizované hořáky s přímým nebo s nepřímým obloukem a vodou stabilizované hořáky. Plynem stabilizované hořáky s přímým obloukem mají netavící se wolframovou katodu a jako anoda je připojen dělený materiál. Z toho vyplývá, že při dělicím procesu elektrický oblouk hoří přímo mezi hořákem a děleným materiálem. Tomuto oblouku se říká přímý nebo také transferový. Schéma hořáku je na obr. 38a. Díky potřebě elektricky vodivého děleného materiálu je tento způsob používán při dělení konstrukčních či legovaných ocelí a neželezných kovů. Při použití plynem stabilizovaných hořáků s nepřímým obloukem hoří elektrický oblouk mezi vnitřní wolframovou katodou a anodou, kterou tvoří tryska hořáku. Díky tomu hoří oblouk převážně uvnitř hořáku a z trysky vystupuje přímo plazma. Z toho plyne nevýhoda rychlého opotřebování trysky. Oblouku se říká nepřímý nebo také netransferový. Tato metoda se používá k nanášení povlaků a k dělení elektricky nevodivých materiálů. Schéma hořáku s nepřímým obloukem je na obr. 38b. Další možností je použití vodní stabilizace, kdy jsou do hořáku přidány kanálky pro přívod vody do plazmového paprsku, což má za následek zvýšení trvanlivosti trysky hořáku. Dělení je prováděno pod hladinou, a tudíž je redukována prašnost, vznik dýmu a tlumí se rovněž hluk dělicího procesu. Omezen je také vliv ultrafialového záření na obsluhu zařízení. Schéma vodou stabilizovaného hořáku je na obr. 39.

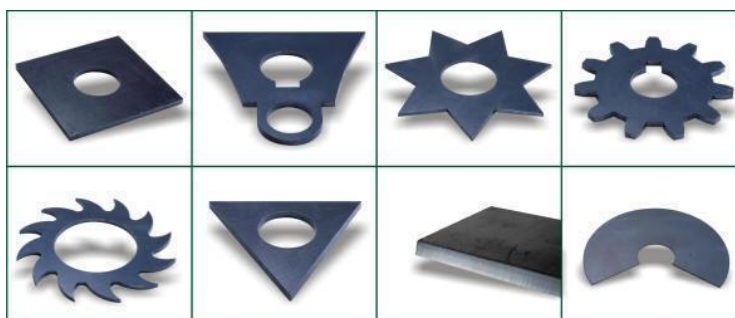


Obr. 38 Stabilizace plyny [19]



Obr. 39 Stabilizace vodou [19]

Dělení pomocí usměrněného plazmového plynu je vhodnou technologií pro všechny kovové materiály. Další výhodou je vysoká kvalita dělicí plochy při použití velké proudové hustoty. Velký výkon při dělení malých a středních tloušťek. Dále vysoká dělicí rychlost. Výsledkem dělení pod hladinou je velmi malá tepelně ovlivněná oblast v okolí spáry a snížená hlučnost a prašnost dělicího procesu.



Obr. 40 Součásti zhotovené dělením plazmou [25]

Mezi nevýhody dělení pomocí plazmového paprsku patří širší spára než při dělení laserem. Dále úkos či zaoblení na horní hraně spáry. Vysoká hlučnost až 100dB. Intenzivní ultrafialové záření z elektrického oblouku. A v neposlední řadě omezení tloušťky děleného materiálu na maximálně 200mm při dělení na vzduchu a 120mm při dělení pod vodní hladinou.

6.1 Zařízení pro dělení plazmou [12], [13]

Pro dělení materiálů plazmou se používají buď CNC plazmová dělicí centra, nebo ruční plazmové hořáky. V případě použití počítačově řízených dělicích center lze dosáhnout nesrovnatelně vyšší přesnosti než při použití ručních plazmových hořáků. Naproti tomu ruční hořáky jsou výrazně cenově dostupnější a jsou tedy vhodné pro dílenskou využití a kusovou výrobu. Na celosvětovém trhu se pohybuje řada výrobců těchto zařízení. Z hlediska přehlednosti jsou zde uvedeni jen někteří.

- a) **VANAD 2000 a.s.** - tato česká společnost, sídlící v Golčově Jeníkově, se specializuje na výrobu moderních CNC strojů k dělení plechů kyslíkem, laserem a plazmou. Zákazníci mají na výběr z několika modelových řad specializujících se buď na ekonomičnost, nebo na vysokou výkonnost procesu dělení. Výběr z produkce CNC pálicích strojů je uveden níže.

Vanad ARENA - kvalitní CNC pálicí stroj s moderním ovládacím systémem, usnadňujícím obsluhu, je dodáván ve dvou provedeních lišících se rozměry pracovní oblasti. Stroj, který je zobrazen na obr. 41, se obsluhuje přes dotykový display umístěný na mobilním panelu. Pracovní šířka stroje s větší pracovní oblastí je 2000mm s pracovní délkou až 6m. Výkonný stroj je schopen upálit materiál o maximální tloušťce 175mm. Maximální rychlost posuvu dělicí hlavy je u tohoto stroje 13m/min.



Obr. 41 Vanad ARENA [13]

- b) **Koike Aronson, Inc./ Ransome** - tato společnost, sídlící v americkém Arcade ve státě New York, je dodavatelem pokročilých CNC dělicích center. Zastoupení mezi nimi mají i stroje určené k dělení materiálů plazmou. Výběr z těchto strojů je uveden níže.

MONOGRAPH EXTREME - tento CNC plazmový dělicí stroj je navržen tak, aby měl co nejmenší půdorysný průměr. Tento design rovněž umožňuje obsluhu mít po celou dobu dělicí proces plně pod vizuální kontrolou. Kouř, vznikající při procesu, je odváděn do speciálního filtru, který je součástí příslušenství. Stroj, zobrazený na obr. 42, je vyráběn v několika velikostních provedeních, přičemž pracovní oblast největšího z nich je 1829x6096mm.



Obr. 42 MONOGRAPH EXTREME [12]

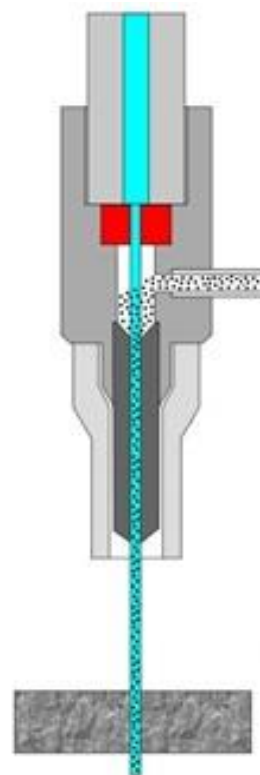
7 DĚLENÍ VODNÍM PAPSKEM [11], [29], [32], [36]

Dělení vodním paprskem je metoda využívající abrazivní účinek vysokotlakého vodního paprsku k dělení materiálů. Tuto technologii lze podle typu používaného vodního paprsku rozdělit na dvě metody. První metoda, nazývaná waterknife, pracuje s čistým vodním paprskem bez příměsí a používá se výhradně pro dělení nekovových materiálů. Pro dělení tvrdých materiálů je potřeba využít druhé metody, při které se do vodního paprsku přidává abrazivo. Této metodě se říká paser, z anglického particle stream erosion, což lze přeložit jako eroze proudem částic. Používanými abrazivy o doporučené zrnitosti 16 - 63 μ m jsou například mletý korund, smírek, granát, karbid křemíku nebo diamantový prach. Princip tvorby paprsku při metodě paser je na obr. 43.

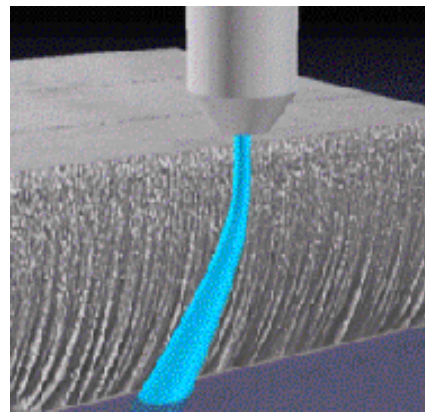
Základním požadavkem pro dělení materiálu vodním paprskem je vysokotlaké čerpadlo schopné vyvinout tlak až 400MPa. Vysokotlaké čerpadlo pohání vodu sensorově kontrolovaným potrubím. Pokud dojde k porušení potrubí a ztratě tlaku, senzory na potrubí událost vyhodnotí a odstaví vysokotlaké čerpadlo v čase v řádu několika desítek milisekund. Potrubí ústí do dělicí hlavy, na které je výstupní tryska vyrobená kvůli potřebě vysoké otěruvzdornosti buď ze slinutých karbidů, nebo ze safíru. Tato tryska formuje vodní paprsek o průměru zhruba 0,1 - 2mm s výstupní rychlostí kolem 900m/s. Pohyb trysky nad materiálem je řízen počítačovým programem.

Povrch plochy, vzniklé dělením vodním paprskem, lze rozdělit na dvě hlavní části. Horní část plochy, kde vodní paprsek vstupuje do materiálu, je charakteristicky matná se strukturou povrchu velikosti $R_a = 2 - 5,5\mu$ m. Struktura plochy je dobře viditelná na obr 44. Naproti tomu na spodní straně plochy je patrné zvlnění vzniklé výstupem vodního paprsku z místa dělení. Vzniklé vlnky jsou jeden až dva milimetry dlouhé a v extrémních případech mohou být vysoké až 0,8mm. Rozložení jednotlivých oblastí na ploše závisí hlavně na rychlosti dělení, tlaku pracovní kapaliny a vzdálenosti trysky od děleného materiálu. Současná dělicí zařízení jsou schopna dosáhnout přesnosti dělení až $\pm 0,4$ mm, ale standardně se přesnost pohybuje okolo $\pm 0,1$ až 0,2mm. Přesnost dělení je nepřímo úměrná tloušťce materiálu a rychlosti dělení.

Výhodou této technologie je prakticky nulové ovlivnění okolí spáry, díky nulovému dodávání tepla do místa dělení. Z toho důvodu je možné dělit povrchově upravené materiály bez obavy z poškození povrchové úpravy. Dále možnost dělit libovolné materiály. Schopnost paprsku proniknout určitou tloušťkou závisí pouze na dělicí rychlosti. Při nastavení malé dělicí rychlosti není potřeba dále opracovávat hrany spáry.



Obr. 43 Princip vodního paprsku s abrazivem [32]



Obr. 44 Plocha dělení [11]

Nevýhodou této technologie je kontakt děleného materiálu s vodou a s abrazivem. Bez okamžitého ošetření dochází u kovových materiálů k povrchové korozi. Dalšími nevýhodami je obtížná výroba hodně malých dílců a deformace dolní části spáry při dělení tlustších materiálů velkou dělicí rychlostí.

7.1 Zařízení pro dělení vodním paprskem [35], [36]

Světových výrobců CNC systémů k dělení vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem je celá řada. Tyto systémy podporují většinu výkresových formátů a tím velice usnadňují obsluhu. Níže je uvedeno několik modelů těchto strojů vybraných výrobců.

a) Flow International Corporation - společnost sídlící v americkém Kentu ve státě Washington. Tato společnost je výrobcem CNC systémů pro dělení vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem. Níže je uveden nejmodernější ze strojů nabízených touto společností.

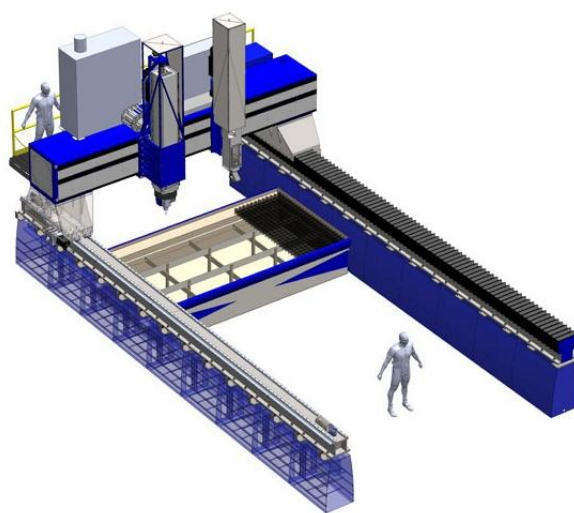
MACH 4c - nejmodernější modelová řada velmi výkonných CNC systémů, s nimiž lze dělit až čtyřmi tryskami najednou. Součástí zařízení je i speciální systém odstraňování abraziva, který výrazně snižuje prostoje vzniklé ručním odstraňováním. Přesnost polohování trysky je u tohoto stroje 0,025mm. Pracovní oblast je u největšího modelu 4x14m se zdvihem v ose z až 305mm. Maximální dělicí rychlost je 25m/min. Tento stroj je na obr. 45.



Obr. 45 MACH 4c [36]

b) WARDJet, Inc. - tato společnost, sídlící v americkém Tallmadge ve státě Ohio, se specializuje na výrobu CNC systémů pro dělení abrazivním vodním paprskem. Níže je ukázka nejmohutnějšího stroje produkovaného touto společností.

G-Series - jak je vidět na obr. 46, specializuje se tato modelová řada na dělení dílů nadměrných velikostí. I tak je ale stroj navržen tak, aby v pracovní hale bylo k jeho instalaci potřeba co nejméně prostoru. Tryska tohoto stroje umožňuje dělení abrazivním vodním paprskem v pěti osách. Konzole stroje je umístěna na dvou podporách. Stroj má volně průchozí prostor pod tryskami, tudíž je velikost dělených dílců prakticky neomezená. Pracovní šířka je u většího modelu 6m s maximální pracovní výškou 1500mm. Také tento stroj lze osadit více dělicími hlavami najednou.



Obr. 46 G-Series [35]

ZÁVĚR

V praxi nejvíce zastoupenou konvenční technologií bezodpadového dělení kovových materiálů je beze sporu stříhání. Stříhání vyniká zejména svou cenovou dostupností, což jej činí ideálním řešením pro malosériovou a dílenskou výrobu. Další výhodnou vlastností technologie stříhání je konstantní objem ustřižených dílců. Díky tomu je stříhání vhodné jako počáteční technologická operace ve velkosériových podnicích. V neposlední řadě rovněž potřeba malé zástavbové plochy pro instalaci potřebných zařízení. Hlavní nevýhodou stříhání je tvorba charakteristické střižné plochy na odstřižku, která ke své úpravě ve většině případů vyžaduje další technologickou operaci. Stříhání plechů se provádí buď na tabulových nůžkách, které jsou pro svou velkou produktivitu vhodné zejména pro velkosériovou výrobu, nebo na nůžkách pákových, které jsou naopak pro svou univerzálnost vhodné pro výrobu malosériovou a pro dílenské použití. Stříhání objemových polotovarů, jako jsou tyče a sochory, je výhodné svou vysokou produktivitou a konstantním objemem ustřižených dílců. Deformace odstřižku a nekvalitní střižná plocha ovšem vyžadují zařazení další operace na úpravu povrchu odstřižku. Z tohoto důvodu je tato metoda vhodná zejména jako předcházející operace například pro zápuskové kování.

Nejrozšířenějšími nekonvenčními technologiemi bezodpadového dělení kovových materiálů jsou dělení laserovým paprskem, plazmou a vodním paprskem. Tyto technologie vynikají zejména vysokými dělicími rychlostmi při tváření plechů, díky kterým jsou beze sporu nejvhodnějšími pro výrobu složitě tvarovaných součástí. Další výhodou těchto technologií jsou velmi úzká dělicí spára, díky čemuž je možno pomocí těchto metod zhotovovat složitě tvarované součásti s úzkými otvory. Nevýhodou je ovlivnění okolí dělicí plochy. U laserové a plazmové technologie je to tepelné ovlivnění, které má negativní vliv na vlastnosti materiálu. U dělení vodním paprskem je to kontakt děleného materiálu s vodou, což může mít za následek vznik koroze a následné znehodnocení děleného materiálu. Zásadní jsou rovněž vysoké pořizovací náklady na zařízení, díky kterým jsou tyto technologie rozšířené zejména ve velkých podnicích.

Bezodpadové technologie dělení materiálu jsou v průmyslové praxi hojně využívány. Velký potenciál se skrývá zejména v nekonvenčních technologiích, které v současné době limituje jen nízký výkon při dělení objemových polotovarů a vysoké pořizovací náklady.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [4]

1. AMADA [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.amada.fr/>
2. Bystronic: Systems for cutting and bending [online]. 2012 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.bystronic.com/en/>
3. CIDAN [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.cidanmachinery.com/>
4. Citace.com [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
5. ČADA, Radek. Technologie I: zákony plastické deformace kovů, dělení materiálu, slévání. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 74 s. ISBN 978-80-248-1274-8.
6. DURMA [online]. 2011 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://v1.durmazlar.com.tr/>
7. DYNAMIC WATER JET CUTTING. Penn Stainless Products [online]. 2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.pennstainless.com/DynamicWaterjetCutting.php>
8. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. Megablog [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
9. How Lasers Work: The Laser/Atom Connection. HowStuffWorks [online]. 2003 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.howstuffworks.com/laser3.htm>
10. Jaypee India Limited [online]. 2011 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.jaypee.in/>
11. JIT WATERJET [online]. 2010 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.jitwaterjet.com/>
12. Koike Aronson, Inc./ Ransome. Koike Aronson, Inc./ Ransome [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.koike.com/index.aspx>
13. Kyslíkové, plazmové a laserové CNC řezací stroje. Vanad [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.vanad.cz/>
14. Laser cutting and profilling. Yorkshire laser and fabrication [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.yorkshirlaser.co.uk/>
15. Laser Cutting Machines for Metal Processing. Made-in-China.com [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://gdgylaser.en.made-in-china.com/productimage/ZvUmzJRKqnVA-2f0j00njSTirvMrfoC/China-Laser-Cutting-Machines-for-Metal-Processing.html>
16. Laserová dioda. Optoelektronické prvky [online]. 2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~houlec/www/htm/LD.htm>
17. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. MM Průmyslové spektrum [online]. 2006 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
18. Metalkraft [online]. 2004 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.metalkraft-maschinen.de/>
19. Nekonenční metody obrábění – 8. díl. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenčni-metody-obrabeni-8-dil.html>
20. NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980, 213 s.

21. Obrábění laserem: princip a užití u ocele a jiných kovů. *Technik* [online]. 2013 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://technik.ihned.cz/c1-57339360-obrabeni-laserem-princip-a-uziti-u-ocelove-a-jinych-kovu>
22. Ocelové konstrukce. *MONTKOVO* [online]. 2009 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.montkovo.cz/vyroba-a-montaz/ocelove-konstrukce>
23. *Peddinghaus* [online]. 2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.peddinghaus.com/>
24. PLASMA CUTTER: How It Works?. *Plasma Cutter* [online]. 2010 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: http://www.plasma-cutter.org/how_it_works.html
25. Plasma Cutting Machine. *China Nice-Cut Mechanical Equipment Co., Ltd.* [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.allproducts.com/metal/nicecut/Cnc-plasma-cutting-machine.html>
26. RIDGID Professional Tools: 258 Power Pipe Cutter. *RIDGID Professional Tools* [online]. 2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://stage.ridgid.com/Tools/258-Power-Pipe-Cutter/EN/index.htm>
27. *RIDGID* [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.ridgid.com/>
28. Řezání plazmou, plamenem. *Schinkmann* [online]. 2013 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/rezani-plazmou-plamenem>
29. Řezání vodním paprskem. *ELNA Servis* [online]. 2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.elnaservis.cz/voda.htm>
30. Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting). *Larery a Optika* [online]. 2011 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
31. Sheet Metal Cutting (Shearing). *CustomPartNet* [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-shearing>
32. Technologie řezání: Princip řezání. *ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM* [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://wcm.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem/princip-rezani>
33. *TRUMPF Česká republika* [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/>
34. *Tuwei Construction Equipment* [online]. 2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.cntuwei.com/e-about.asp>
35. *WARDJet Waterjet Cutting Machines and Waterjet Abrasive Recycling* [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/>
36. WATERJET CUTTING. *Flow Waterjet Cutting Systems* [online]. 2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/cutting-systems.aspx>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	plocha pod polovinou elipsy	[mm ²]
B	délka přečnávajícího okraje plechu	[mm]
c	koeficient závislý na druhu stříhání	[-]
F	síla potřebná při stříhání pružným médiem	[N]
F _{max}	maximální střížná síla	[N]
F _{skl}	maximální střížná síla při stříhání skloněnými noži	[N]
h	hloubka vniknutí střížníku do porušení	[mm]
h'	posunutí střížníku do okamžiku klesání střížné síly	[mm]
H	výška střížné desky	[mm]
L	šířka stříhaného plechu	[mm]
p	tlak v pružném médiu	[MPa]
r	otupení střížné hrany	[mm]
S	plocha stříhaného materiálu v rovině stříhu	[mm ²]
s	tloušťka plechu	[mm]
z	velikost střížné mezery	[mm]
λ	úhel mezi noži	[°]
τ_s	pevnost materiálu ve stříhu	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Nůžky na trubky	9
Obr. 2 Ustřižené ocelové tyče	9
Obr. 3 Součásti zhotovené dělením vodním paprskem	9
Obr. 4 Dělení plechu laserem	9
Obr. 5 Přehled používaných technologií	10
Obr. 6 Tryska laserového dělicího centra	10
Obr. 7 Střížný proces	11
Obr. 8 Střížná plocha	11
Obr. 9 Volba střížné mezery	12
Obr. 10 Průběh střížné síly	13
Obr. 11 Stříhání skloněnými noži	13
Obr. 12 Stříhání pružným prostředím	14
Obr. 13 DURMA VS 4013	16
Obr. 14 CIDAN HMS-F	16
Obr. 15 AMADA GS II 1230	17
Obr. 16 Metallkraft BSS 1250 E	17
Obr. 17 Střížná plocha při objemovém stříhání	18
Obr. 18 Objemové stříhání otevřenými noži	18
Obr. 19 Objemové stříhání uzavřenými noži	19
Obr. 20 Jaymac C55	19
Obr. 21 PeddiMax	20
Obr. 22 PeddiCat	20
Obr. 23 Stříhání v nástroji s odpadem	21
Obr. 24 Stříhání v nástroji bez odpadu	21
Obr. 25 Stříhání tenkostěnných trubek kotoučovými noži	22
Obr. 26 RIDGID 65S	22
Obr. 27 TWQ-VA	23
Obr. 28 TWQ-VIA	23
Obr. 29 Emise světla	24
Obr. 30 Dělení materiálu laserem	24
Obr. 31 Princip CO2 laseru	25
Obr. 32 Nd:YAG laser	25
Obr. 33 Laserová dioda	25
Obr. 34 Součást zhotovená dělením laserem	26
Obr. 35 BySprint Pro 3015	27
Obr. 36 TruLaser 5030	27
Obr. 37 Princip dělení plazmou	28
Obr. 38 Stabilizace plyny	29
Obr. 39 Stabilizace vodou	29
Obr. 40 Součásti zhotovené dělením plazmou	29
Obr. 41 Vanad ARENA	30
Obr. 42 MONOGRAPH EXTREME	30
Obr. 43 Princip vodního paprsku s abrazivem	31
Obr. 44 Plocha dělení	31
Obr. 45 MACH 4c	32
Obr. 46 G-Series	32