

Česká zemědělská univerzita

Technická fakulta



Analýza metod dělení materiálu v automobilovém průmyslu

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Autor práce: Radek Sedlák

PRAHA 2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Sedlák Radek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Analýza metod dělení materiálu v automobilovém průmyslu

Anglický název

Analysis of methods of material separation in automotive industry

Cíle práce

Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice, ve které se zaměří na analyzování různých metod dělení materiálu s důrazem na automobilový průmysl. Student se zaměří především na nové vědecké poznatky v oblasti metod dělení materiálu.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).
Závěry a přínos práce.

Osnova práce

1. Úvod.
2. Cíl práce a metodika.
3. Rozbor metod dělení materiálu, výhody a nevýhody.
4. Vývojové trendy v oblasti dělení materiálu.
5. Závěr.
6. Seznam literatury.

Rozsah textové části

cca 30 stran

Klíčová slova

abrazivní kapalinový paprsek, automobilový průmysl, dělení, laser, plazma

Doporučené zdroje informací

BÁTORA, B., VASILKO, K.: Obrobené povrchy. Technologická dědičnost, funkčnost. Trenčín: TU, 2000.
BILK, O.: Obrábění I – 2. díl. Ostrava, VŠB-TUO Ostrava, 2001.
ČADA, R.: Technologie I: zákony plastické deformace kovů, dělení materiálu, slévání. Ostrava, VŠB, 2007.
MAŇKOVÁ, I.: Progresivní technologie. Košice: Viena, 2000.
MOMBER, A. W., KOVAČEVIC, R.: Principles of Abrasive water jet machining. London: Springer Verlag, 1998.
VALÍČEK, J., HLOCH, S.: Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením. Ostrava, 2008.
VAŠEK, J., MARTINEC, P., FOLDYNA, J., ŠÍTEK, L., ŠČUČKA, J.: Abrasives for AWJ cutting. Academy of Sciences, Ostrava, 2002.
VASILKO, K., KMEC, J.: Delecie materiálu: Teória a technológia. Prešov: DATAPRES, 2003.

Journal of applied science, International journal of machine tools and manufacture, Technical Gazette, Strojarstvo, Journal of lasers applications, Journal of Materials Processing Technology, Zváranie – svařování, Welding and Metal Fabrication, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojirenská technologie, The journal of adhesion, Journal of material science

Vedoucí práce

Müller Miroslav, doc. Ing., Ph.D.

Termín zadání

listopad 2013

Termín odevzdání

duben 2015

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Dekan fakulty

V Praze dne 3.2.2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Müllera, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne

.....

Podpis

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a vstřícný přístup při psaní této práce.

Analýza metod dělení materiálu v automobilovém průmyslu

Abstrakt: Tato bakalářská práce je literární rešerší, která se zaměřuje na analyzování metod dělení materiálu v automobilovém průmyslu. V jednotlivých kapitolách jsou postupně zaznamenány metody od řezání až po dělení abrazivním kapalinovým paprskem. Následně je u těchto metod vyhodnocení výhod a nevýhod a použití pro automobilový průmysl. Z důvodu neustálého vývoje výrobních procesů je jedna část práce věnována vývojovým trendům oblasti dělení materiálu, která umožňuje pohled na vývoj problematiky v posledních letech.

Klíčová slova: abrazivní kapalinový paprsek, automobilový průmysl, dělení, laser, plazma

Analysis of methods of material separation in the automotive industry

Abstract: This bachelor thesis is literary research, which is focused on analyzing of methods of material separation in the automotive industry. In the individual chapters is written about methods of separating material from cutting to abrasive water-jet machining. These methods are described by advantages and disadvantages and using in automotive industry. Because of continuous development methods is one part of thesis described development trends of material separating in the last few yeras.

Keywords: abrasive water jet, automotive industry, material separation, laser, plasma

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika.....	2
2.1	Cíl práce.....	2
2.2	Metodika.....	2
3	Rozbor metod dělení materiálu, výhody a nevýhody.....	3
3.1	Rozřezávání pilami.....	3
3.1.1	Princip metody.....	3
3.1.2	Výhody a nevýhody.....	4
3.2	Stříhání.....	5
3.2.1	Princip metody.....	5
3.2.2	SWOT analýza.....	6
3.3	Dělení upichováním.....	7
3.4	Dělení rozbrušováním.....	8
3.5	Frikční dělení.....	8
3.6	Řezání kyslíkovým plamenem.....	9
3.6.1	Princip metody.....	9
3.6.2	Výhody a nevýhody.....	9
3.7	Elektroerozivní dělení.....	10
3.7.1	Princip metody.....	10
3.7.2	Řezání drátovou elektrodou.....	11
3.7.3	Výhody a nevýhody.....	11
3.8	Elektrochemické dělení.....	11
3.8.1	Princip metody.....	11
3.8.2	Výhody a nevýhody.....	12
3.9	Dělení elektronovým paprskem.....	13
3.10	Řezání ultrazvukem.....	13
3.10.1	Princip metody.....	13
3.10.2	Výhody a nevýhody.....	14
3.11	Řezání plazmou.....	15
3.11.1	Princip metody.....	15
3.11.2	SWOT analýza.....	17

3.12	Řezání laserem	19
3.12.1	Princip metody.....	19
3.12.2	SWOT analýza.....	22
3.13	Řezání kapalinovým paprskem	23
3.13.1	Princip metody.....	23
3.13.2	SWOT analýza.....	27
4	Vývojové trendy v oblasti dělení materiálu	28
4.1	Vláknové lasery	28
4.2	Kotoučové (diskové) lasery	29
4.3	Fokusace laseru přes vodní paprsek.....	30
4.4	Stříbrné elektrody pro plazmové řezání.....	31
4.5	Pulzní vodní paprsek.....	31
5	Závěr.....	33
6	Seznam literatury.....	33

1 Úvod

Stejně tak, jak se vyvíjí automobilový průmysl, v oblasti karoserií, designu, vybavení interiéru, tak se vyvíjí i strojírenský průmysl a s ním i metody pro dělení materiálů. Od osobních automobilů po dodávky a nákladní automobily jsou výrobní materiály v tomto odvětví velmi rozmanité a často bývají inovovány.

V automobilovém průmyslu využíváme dělení materiálu jako prvotní operaci, při které vytváříme polotovar zabezpečující vhodné rozměry k následnému zpracování. Nebo můžeme dělení chápat jako operaci pro oddělení již hotové součásti od polotovaru.

Dělení je důležitou operací výrobního procesu a to nejen v automobilovém průmyslu. Při výrobě se snažíme, aby každá pracovní operace byla co nejehospodárnější a zároveň jakostní dle požadavků zákazníka a konkurence trhu což v hromadné výrobě může způsobit velkou finanční úsporu. V dnešní době je na trhu konkurence a zároveň možnost výběru z řady firem, které nabízejí mnoho strojů pro dělení materiálu různými metodami. Z tohoto důvodu je důležité sledovat nové trendy a vývoj metod dělení, abychom dokázali zvolit správný způsob dělení na výrobu určité součásti, což je velmi důležité. Výběrem vhodné metody je totiž možné snížit výrobní náklady, pracovní čas, snížit množství odpadu, zefektivnit a zjednodušit výrobu.

V této literární rešerši jsou shrnuty nejznámější možné způsoby dělení materiálu a to jak konvenční, tak i nekonvenční kterým bude věnována kapitola se zaměřením na jejich moderní trendy.

2 Cíl práce a metodika

V této části jsou zaznamenány informace o zadání a postupu řešení dané problematiky.

2.1 Cíl práce

Studování literárních zdrojů, článků v odborných časopisech a dalších vhodných informačních zdrojů je základem pro splnění cíle práce. Již z názvu práce je patrné, že cílem práce je shromáždit informace a na jejich základě analyzovat metody dělení materiálu používané v automobilovém průmyslu. Získané informace pro danou oblast shrnout a zaznamenat výhody a nevýhody vybraných metod.

2.2 Metodika

V následující kapitole budou jednotlivě uvedeny metody dělení materiálu, které bylo možné získat z prostudovaných zdrojů. Každá metoda je popsána ve své vlastní kapitole a v jejím závěru je vyhodnocena. Pro metody, které jsem vyhodnotil jako prioritní pro automobilový průmysl a pro některé progresivní metody je vyhodnocení završeno SWOT analýzou. Metody, které jsou využívány spíše okrajově nebo jsou nahrazovány jinými progresivními metodami, jsou popsány pouze částečně.

Čtvrtý bod dle osnovy nabízí vývojové trendy v oblasti dělení materiálu. Jsou zde popsány dohledané moderní trendy a inovace pro některé progresivní metody v oblasti dělení.

Celá literární rešerše je vyhodnocena a uzavřena závěrem, který přináší ucelený pohled na danou problematiku.

3 Rozbor metod dělení materiálu, výhody a nevýhody

Metody dělení materiálu můžeme rozdělit do různých skupin. Základním rozdělením je na konvenční (tradiční) a nekonvenční (netradiční). Nekonvenční metody jsou využívány v případech, kdy konvenční metody jsou neproduktivní nebo je nelze aplikovat. Nekonvenční metody dělíme dle energetického zdroje úběru na tepelné, chemické, elektro-chemické, mechanické. Některé nekonvenční metody lze zařadit do kategorie progresivních metod neboli vývojových. V této části se zabývám nejznámějšími metodami dělení materiálu. [24]

3.1 Rozřezávání pilami

Dělení materiálu řezáním je nejpoužívanější metodou, která se používá pro dělení tyčového materiálu nejen v automobilovém průmyslu. Metoda je univerzální, dosažená plocha řezu je čistá a snadno lze nastavit úhel a sklon řezu. Výsledným polotovarem jsou přířezy pro další zpracování. V automobilovém průmyslu jsou tyto přířezy používány například pro výrobu kovaných podvozkových dílů nápravy, které z takovýchto přířezů vyrábí kováním firma Strojmetal aluminium forging Kamenice.

3.1.1 Princip metody

Jedná se o operaci, kdy se úběr materiálu provádí pronikáním břitů nástroje do obrobku, oddělovaný materiál odchází ve formě třísek, proto řezání spadá do kategorie třískového obrábění. Řezným nástrojem mohou být pilové listy, pilové pásy a pilové kotouče opatřené zuby. Aby se nástroj netřel o řezaný materiál, jsou zuby lehce rozvedeny střídavě, vlnitě nebo skupinově.

Pilové listy jsou ocelové pásy upnuté v rámu. Mají ozubení na jedné nebo na obou stranách. Materiálem listů je rychlořezná ocel. Jsou široké 1,25 až 2,5 mm a dlouhé 300 až 700 mm. Používají se pro řezání na rámových pilách, jejichž hlavním pracovním pohybem je pohyb přímočarý vratný, který je vykonáván klikovým mechanismem. List řeže pouze v jednom směru, při pohybu zpět je nadzvednut vačkovým mechanismem, aby se netřel o materiál a tím se zbytečně neničil. Maximální rozměr, který lze na pile řezat určuje její velikost. Zdvih rámu je přibližně 300 mm. [20]

Pilové pásy jsou dlouhé ocelové pásy s ozubením pouze na jedné straně. Mají mnohem menší tloušťku než pilové listy, a to přibližně 0,65 až 1,1 mm. Jsou dostupné svařené jako nekonečné pásy nebo nesvařené. Tělo pásu je z konstrukční oceli, kdežto zuby jsou z oceli nástrojové nebo ze slinutých karbidů. Používají se při řezání na pásových pilách, kde je pás veden přes hnací a napínací kotouče. Podle konstrukčního provedení jsou pily rozděleny na svislé, vodorovné nebo sklopné. [9]

Pilové kotouče se vyrábějí z rychlořezné nebo nástrojové oceli. Jedná se o ocelové kotouče opatřené zuby po obvodě o tloušťce 5 až 8 mm a průměru 600 až 2000 mm. Vyrábějí se jako celistvé z nástrojové oceli, segmentové z rychlořezné oceli, diamantové nebo s pájenými břitovými destičkami ze slinutých karbidů. Jsou používány pro řezání na kotoučových pilách. Hlavní a vedlejší pracovní pohyb koná kotouč, který rotuje upnut na vřetení, vedlejší pohyb je pohyb posuvný ve směru řezu. [20]

3.1.2 Výhody a nevýhody

Dělení materiálu pilami patří mezi třískové obrábění, nevýhodou je prořez materiálu o velkém objemu v podobě třísek. Odpadem je také přídavek na upínání při řezání. Kvalita a přesnost řezu je nižší, ale protože se tato metoda používá zejména pro výrobu polotovarů, je takováto přesnost vyhovující. V současné době se v sériové výrobě i přes větší objem odpadu používají zejména kotoučové pily pro svoji tuhost konstrukce, vyšší řeznou rychlost a rychlost posuvu nástroje oproti řezání jinými nástroji, což lze porovnat v tab. 1.

Tab. 1 Parametry řezných podmínek rozřezáváním pilami

Způsob dělení		Řezná rychlost (m.min ⁻¹)		Posuv (mm.min ⁻¹)		Prořez (mm)	
		ocel	slitiny hliníku	ocel	slitiny hliníku		
Pilovým listem		25 až 30	až 50			1,05 až 3,75	
Pilovým pásem		30 až 70	35 až 80	15 až 70	25 až 120	1 až 1,65	
Pilovým kotoučem	celistvým	15 až 45	100 až 400	20 až 70	60 až 200	0,2 až 6	
	segmentovým	RO	15 až 60	100 až 600	50 až 150	100 až 400	4,5 až 14,5
		SK	40 až 150	150 až 800	60 až 200	200 až 600	

Zdroj: [9] Kříž a Vávra, 1996

3.2 Střihání

Tuto metodu lze rozdělit na střihání po uzavřeném obryse, střihání po otevřeném obryse. Dále lze dělit na střihání objemové (např. duté a profilované tyče) a plošné (plechové pásy). Mezi základní způsoby střihání patří: prosté střihání, děrování, vystřihování, ostřihování, přistřihování, prostřihování, protrhávání. [18]

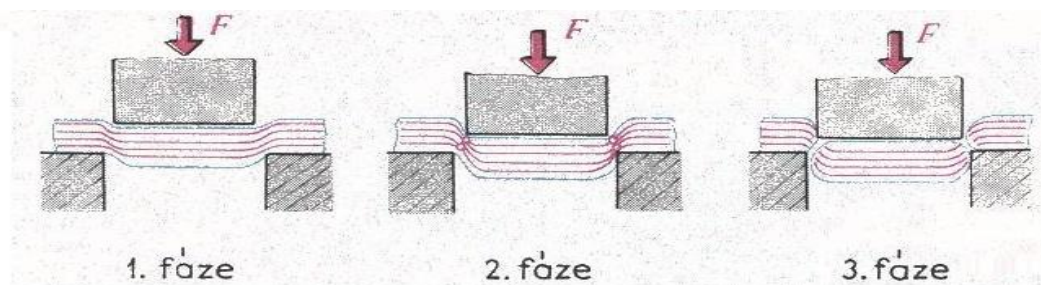
3.2.1 Princip metody

Jedná se o způsob zpracování polotovaru ke zhotovení již konečného výrobku nebo polotovaru k dalšímu zpracování. Při střihu dochází k porušení celistvosti materiálu a následnému oddělení jeho části podél křivky střihu. Oddělení materiálu vzniká působením dvou proti sobě se pohybujících nožů nebo stříhadlem (střížníkem a střížnicí), které v rovině střihu vyvolávají smykové napětí. Smykové napětí k porušení celistvosti materiálu musí být větší, než je mez pevnosti ve smyku materiálu obrobku. [20] Střiháme na lisech (hydraulické, mechanické) nebo nůzkami (pákové, tabulové, kotoučové, profilové). Pro střihání jsou vhodné houževnaté a tvárné materiály menších tloušťek. [2]

Střihání probíhá ve třech fázích, viz obr. 1:

1. Pružná oblast - tlak nástroje způsobuje napětí v materiálu až do meze kluzu.
2. Plastické deformace - překročení meze kluzu, pružné deformace se mění v plastické a nástroj vniká do obrobku.
3. Vznik trhlin – napětí v materiálu překročilo mez pevnosti a od střížníku k střížnici vznikají trhliny. Při vniknutí střížníku asi do třetiny tloušťky obrobku dojde k odtržení výstřížku. [1]

Obr. 1 Fáze střihání

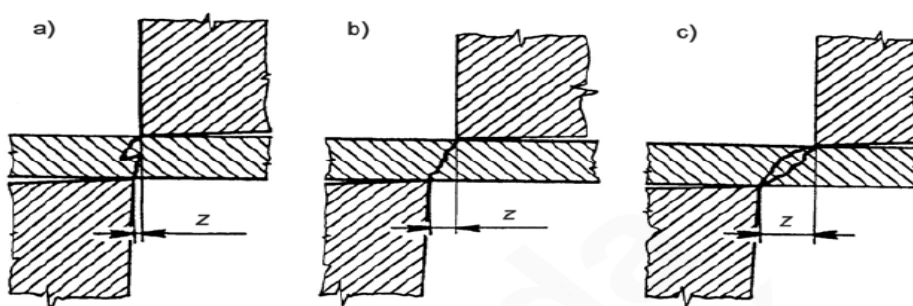


Zdroj: <http://www.ksp.tul.cz>

Nástřihový plán je určení vhodného rozmístění výstřižků na pásy a tabule plechu. Z pohledu úspory nákladů je využití materiálu velmi důležitým prvkem, protože při stříhání připadá přibližně 80-90 % nákladů výroby pouze na materiál. Proces stříhání je sám o sobě rychlý a levný. [3]

Abychom dosáhli kvalitní plochy stříhu, musíme dodržet správný úhel břitu nože a správnou vůli mezi noži stříhadla - viz obr. 2. Velikost střižné mezery je spolu s úhlem břitu závislá na druhu a tloušťce materiálu. Ovlivňuje velikost střižné síly, kvalitu střižné plochy a trvanlivost nástroje. Pokud bychom nedodrželi tyto zásady, mohlo by dojít ke stříhu s ostřinami, popřípadě k poškození či vylomení břitu z nože. [20]

Obr. 2 Nastavení střižné mezery



Vliv střižné mezery z na kvalitu střižné plochy (a – malá střižná mezera, b – optimální střižná mezera, c – velká střižná mezera)

Zdroj: Čada, 2007 [2]

3.2.2 SWOT analýza

(S)trength – síla. Výhodami je nízká nákladovost střižného procesu, variabilita tvarů a dlouhá životnost nástrojů. Zároveň i rychlost a efektivita střižného procesu. Vysoká kvalita výrobků v nízké cenové relaci. Výhodou je možnost spojení pracovní operace s tažením nebo prolisováním. [10]

(W)eakness – slabost: Protože se stříháním vyrábějí karosářské díly, je při výrobě nutné dbát na čistotu pracovních nástrojů a na čistotu prostředí. Jakákoli nečistota by se negativně projevila při lakování automobilu. V případě stříhání profilových tvarů je potřeba speciálních tvarů nástrojů. Nežádoucími vlastnostmi může být zpevnění materiálu, zkosení hran vlivem střižné vůle, zeslabení a zaoblení hran podél plochy stříhu. [23]

(O)pportunities - příležitosti: Při dodržení správného nastavení parametrů stříhání je metoda v porovnání s ostatními metodami nejlevnější, nejkvalitnější, nejefektivnější. Výroba součástí touto metodou se i do budoucna jeví prioritní. Stříháním a následně prolisováním jsou vyráběny výstřížky o nízké hmotnosti, což je směrem vývoje v automobilovém průmyslu. [23]

(T)hreats – hrozby: Podmínkou efektivnosti výroby je dodržení vhodného nástřihového plánu. U tvarově komplikovaných součástí je plánování nástřihů obtížné. Špatnou volbou nástřihu se prudce snižuje efektivita výroby, zvyšuje se množství odpadu a cena výrobku. Nebezpečím je také poničení nástrojů při špatném zvolení optimální střižné vůle. [3]

Tab. 2 SWOT matice strategie stříhání

STŘIHÁNÍ	Slabé stránky – Weakness	Silné stránky – Strength
Příležitosti – Opportunities	čistota prac. prostředí rychlost stříhu	využití dvojčinného lisu tuhost výstřížků
Ohrožení – Threats	výroba karosářských dílů kontrola výstřížků	vhodná střižná vůle využití materiálu

Stříhání se v automobilovém průmyslu využívá velmi často pro výrobu velkého množství karosářských dílů z plechu, které by byly jinými metodami vyráběny velmi dlouho a nákladně. Výhodou je, že při stříhání lze plech současně i vytvarovat či profilovat při jedné pracovní operaci, což je při výrobě velmi výhodné. V některých případech se nežádoucí zpevnění materiálu může stát výhodou. Celková cena výrobku je ovlivněna i tvarem výstřížku. [23]

3.3 Dělení upichováním

Tento způsob je jednou z operací třískového obrábění na soustruzích. Používá se především pro dělení trubek a oddělování hotových výrobků po soustružení krátkých délek v kusové a sériové výrobě. Nástrojem pro oddělování výrobku je upichovací nůž, který musí být správně nastaven. Nůž dojíždí kolmo k ose do středu součásti, tím dojde k oddělení materiálu. Z důvodu šetření materiálu by nástroj měl být vybírán co nejužší. V místě řezu je nutné provádět ochlazování, aby se zde snížilo tepelné ovlivnění součásti. Výhodou

upichování je kvalitní plocha řezu. Naopak nevýhodou je poměrně velká ztráta materiálu a pomalejší výroba. I proto se tato metoda využívá velmi zřídka. [20]

3.4 Dělení rozbrušováním

Rozbrušováním nazýváme proces, při kterém je materiál oddělován abrazivním účinkem vyvolaným rotujícím nástrojem. Řezná rychlost je 60 až 125 m.s⁻¹. Nástrojem je řezný kotouč o průměru 20 až 600 mm, tloušťce 0,6 až 6 mm. Je vyroben z brousícího zrna, pojiva a výstuhy. Jako brousící zrno je používán karbid křemíku, syntetický korund nebo syntetický diamant. Pojiva jsou na bázi syntetických pryskyřic vyztužena sklotextilovými vlákny. V případě diamantového kotouče jsou pojiva kovová, proto mají oproti kotoučům pojeným pryskyřicí mnohem delší životnost.

Rozbrušování je vhodnou metodou pro dělení kovových i nekovových materiálů. Pro řezání i velmi tvrdých materiálů se používají kotouče diamantové. Výhodou je možnost dosažení nižších strojních časů a nižších drsností řezné plochy oproti řezání pilami. Nevýhodou je neustálé opotřebování řezného kotouče, na něm závislá změna řezných podmínek, náklady na častou výměnu kotoučů. [9]

3.5 Frikční dělení

Frikční neboli třecí kotoučové pily jsou užívány pro dělení ocelových profilů, trubek a tenkých plechů v hutní výrobě. Třecí řezné kotouče jsou vyráběny z chrom-vanadové oceli, po obvodu jsou zdrsňeny vroubkováním nebo mají nízké jemné ozubení o průměrech 400 až 900 mm a tloušťkách 3 až 8 mm. Proces řezu spočívá v zahřátí místa řezu třením kotouče o obvodové rychlosti 60 až 150 m.s⁻¹ na vysokou teplotu, vyměknutím materiálu a následným řezáním. Nástrojem může být i drát nebo pás. Výhodami je vysoká produktivita řezání a vysoce kvalitní povrch řezu. [9]

3.6 Řezání kyslíkovým plamenem

K dělení materiálů užívá soustředěné tepelné energie do místa řezu, zdrojem tepla je plamen topného plynu.

3.6.1 Princip metody

Princip metody je založen na součinnosti dvou fází. V první fázi je nutné, aby se řezaný materiál ohřál plamenem na zápalnou teplotu, v druhé fázi do plamene přivedeme kyslík a tím dochází k oxidaci - postupnému spalování, odtavování materiálu z místa řezu. Kyslík je přiváděn pod tlakem, což umožní vytvoření spáry a zároveň se tímto tlakem odfukuje struska. Nejčastěji používaným topným plynem pro kyslíkové řezání je acetylén, ale jsou používány i další plyny: propan, butan, vodík, zemní plyn, methylacetylen-propadien. [20]

3.6.2 Výhody a nevýhody

Výhodou jsou bezesporu nízké investiční náklady: nízká pořizovací cena zařízení, nízké náklady na opotřebení, nízká provozní cena. Lze pracovat s několika hořáky najednou. Nevýhodami jsou značné tepelné deformace v místě řezu u materiálů o tloušťkách nižších než 10 mm. Omezená je řezatelnost legovaných materiálů. Dalšími nevýhodami jsou nepřesnosti, vysoký stupeň drsnosti, otřepy a zkroucení po řezání, které je v případě potřeby nutné odstranit dalším obráběním. [15] V tab. 3 jsou hodnoty pro porovnání s jinými způsoby tepelného dělení.

Tab. 3 Parametry řezání kyslíkovým plamenem

Tloušťka plechu (mm)		Stupeň přesnosti (mm)	Drsnost povrchu Ra (μm)	Šířka spáry (mm)	Poloměr zaoblení horní hrany (mm)
od	do				
5	30	± 1 až 3	25	2 až 3	1
30	60	± 1,5 až 4		3 až 5	1,5
60	100	± 2,5 až 6		4 až 5	2

Zdroj: Minařík, 1993 [13]

Z důvodu uvedených nevýhod se tato metoda ve strojírenství a tedy ani v automobilovém průmyslu neuznává, je nahrazena jinými metodami, především řezáním plazmou.

3.7 Elektroerozivní dělení

Elektroerozivní, neboli elektrojiskrové dělení je elektrotepelný proces, u kterého je dosažen úběr materiálu rychle se opakujícími elektrickými výboji mezi elektrodou a materiálem ponořenými v dielektriku. Základem úběru materiálu je elektroeroze. [12]

3.7.1 Princip metody

Podstatou procesu je, že energie výboje na odstranění atomu musí být větší, než energie mřížkové vazby materiálu. Hlavní podmínkou elektroerozivního dělení je elektrická vodivost materiálu, a proto jí podléhají všechny elektricky vodivé materiály. Elektroeroze může probíhat v plynném i kapalném dielektriku. Výboj probíhá mezi katodou (nástrojem) a anodou (obráběným materiálem) které jsou v těsné blízkosti, ale nedotýkají se. K výboji dochází přivedením napětí na elektrody. V místě jeho působení vzniká teplota od 8000 °C až do 12000 °C, dochází zde k tání a odpařování materiálu, zároveň i odpařování dielektrika. Ubírání materiálu probíhá na obrobku ale i nástroji. [12]

Pro dosažení opakovaných výbojů mezi elektrodami, maximálního úběru materiálu a minimálního opotřebení nástroje při požadované produktivitě a jakosti dělení musíme zvolit vhodné dielektrikum, vhodné zapojení elektrického obvodu a polaritu, četnost a parametry elektrických výbojů, správný materiál nástroje. Elektrolyt musí zajišťovat vedení elektrického proudu, musí určovat rozpouštění anody, odvádět nečistoty vzniklé chemickou reakcí a musí mít dobrou vodivost, aby odváděl teplo z místa řezu. [21]

Kvalita povrchu má náhodný profil, tvořen charakteristickými krátery vytvořenými výboji. Povrch má matný vzhled, což je zapříčiněno i natavením materiálu. Z důvodu vysokých teplot a následného rychlého ochlazení dielektrikem má materiál u řezné plochy tepelně ovlivněnou oblast, což způsobuje metalurgické změny. Ovlivněná oblast zasahuje do hloubky až 1000 μm . [12]

3.7.2 Řezání drátovou elektrodou

Metoda je označována také jako WEDM nebo WIRE-EDM (wire electrical discharge machining) umožňuje vyrábět přímkové plochy řezu do tloušťky 20 mm. Nástrojem je tenký drát, který musí být z důvodu opotřebení postupně odvíjen a zároveň neustále napnut. Materiál drátu bývá měď, molybden, wolfram nebo ocel povlakovaná mědí. Musí mít dostatečnou pevnost, vysokou tvarovou přesnost průměru, nízkou toleranci rozměru. Dielektrikum bývá neionizovaná voda nebo jiné nízkoviskózní kapaliny. Obráběný předmět je upnut na stole, může se pohybovat nebo nemusí vykonávat žádný pohyb. Drátová elektroda může díky osmi osovému CNC (počítačově řídicímu) systému vytvářet i velmi složité tvarové hrany. Přesnost řezů je dána přívodem a čistotou dielektrika, napnutostí elektrody, nastavením parametrů generátoru. Je používána pro výrobu přesných součástí z tvrdých materiálů. [12]

3.7.3 Výhody a nevýhody

Výhodami je vysoká přesnost a jakost řezu, úzká dělicí spára. Malý rozdíl rezných rychlostí mezi dělením tvrdých a měkkých materiálů. Nevýhodami jsou vysoké investiční a provozní náklady, dělení pouze elektricky vodivých materiálů, tepelně ovlivněná oblast a změny struktury v místě řezu, vnitřní napětí v materiálu. [12] Parametry elektroerozivního řezání jsou uvedeny v tab. 4 v následující kapitole.

Tato metoda je používána na mikroděrování a zhotovování otvorů nejrůznějších tvarů do tvrdých, korozivzdorných a kalených materiálů.

3.8 Elektrochemické dělení

Tento způsob dělení materiálu je beztřískový (bezsilový), bývá také označován jako ECM obrábění (electrochemical machining), podstatou procesu je elektrolýza. [12]

3.8.1 Princip metody

Elektrolýza je anodické rozpouštění materiálu v elektrolytu za působení elektrického proudu. Při reakci se kationty elektrolytu slučují s anionty na povrchu obráběného kovu. To je příčinou, proč se rozpouští materiál obrobku. [12]

Obrábět lze pouze elektricky vodivé materiály, jejich obráběná část je ponořena v elektrolytu. Obrobek je anodou a kopíruje tvar a obrysy katody (nástroje). Pro dělení materiálu bývá nástrojem rotující kotouč, drátová elektroda, štěrbinový nástroj. Nejvyšší rychlost ubírání (rozpuštění) kovu nastává při minimální možné mezeře mezi elektrodami (0,05 až 1 mm), proto je důležité udržet stále stejnou pracovní mezeru. Obrábění závisí na hustotě proudu, rychlosti proudění a typu elektrolytu. Přenos elektrického náboje z anody na katodu probíhá pomocí iontů v elektrolytu. [12]

Elektrolyt musí zajistit vedení elektrického proudu, odvádět produkty vzniklé při reakci, odvádět teplo z pracovní mezery, musí umožnit rozpuštění všech částí kovu. Elektrolytem mohou být soli, zásady a kyseliny, používají se hlavně chlorid a chlorečnan sodný. Měrná elektrická vodivost elektrolytu γ ovlivňuje intenzitu a stabilitu děje. Vlivem reakcí se v elektrolytu zvyšuje hodnota jeho pH, což reakci zpomaluje, proto musíme elektrolyt stabilizovat kyselinou. Během procesu je nutné elektrolyt čistit. [12]

3.8.2 Výhody a nevýhody

V tab. 4 jsou porovnány parametry elektrochemického řezání s elektroerozivním. Po opracování není součást nijak tepelně ani mechanicky zatěžována. Dosahovaná drsnost povrchu je oproti mechanickému obrábění kvalitnější. Tato technologie se používá pro dělení a opracování složitých tvarů, především tvrdých a tvrzených materiálů v automobilovém a leteckém průmyslu. [12]

Tab. 4 Porovnání elektrochemického a elektroerozivního řezání

Ukazatel	Elektrochemické obrábění	Elektroerozivní obrábění
Úběr materiálu	$\sim 20\,000\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ pro zdroje 10 000 A	max. $\sim 5\,000\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Rychlost obrábění	0,5 až $10\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	0,01 až $0,1\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Opotřebení nástroje	bez opotřebení	závislé na zdroji a prac. podmínkách 1 až 30 %
Přesnost	$\pm 0,01$ až $\pm 0,2\text{ mm}$	$\pm 0,01$ ($\pm 0,005$) mm
Obráběná plocha	několik 100 cm^2 pro zdroje 10 000 A	několik $1\,000\text{ cm}^2$
Pracovní prostředí	vysoké nároky na elektrolyt a jeho čištění, problémy s odpadem	snažší čištění dielektrické kapaliny, nezávadný odpad

Zdroj: Řasa, Pokorný a Gabriel, 2001 [21]

3.9 Dělení elektronovým paprskem

Dělení elektronovým paprskem, neboli dělení svazkem elektronů, označované také jako EBM (electron beam), využívá k obrábění kinetickou energii urychlených usměrněných elektronů. Při srážce elektronů s plochou obráběného materiálu (0,3 až 0,6 mm²) se kinetická energie mění na tepelnou a v místě průniku elektronu materiál nataví a zároveň odpařuje, tepelně však ovlivňuje i okolí řezu. Energie se absorbuje z větší části do hloubky než do celého okolí. Tato metoda lze použít pro všechny druhy kovových i nekovových materiálů, bez ohledu na jejich vlastnosti, lze ji ale používat pouze ve vakuu. Elektrony jsou produkovány elektronovým dělem. [12]

Výhodami této metody je rychle a přesně regulovat tok paprsku. Nevýhodami je vznik rentgenového záření, nutnost vakua, problémy se zpracováním izolantů a částečné tepelné ovlivnění okolí řezu. Proces je limitován velikostí vakuové komory. Dělení materiálu elektronovým paprskem se dnes již tolik nepoužívá, protože není technologicky ani ekonomicky výhodné. Metoda se ve strojírenství používá spíše pro svařování, pájení, nebo vrtání. Tato metoda řezání je nahrazována řezáním plazmou nebo laserem. [21]

3.10 Řezání ultrazvukem

Proces ubírání materiálu ultrazvukem, označován zkratkou USM (ultrasonic machining), je klasifikován jako obrábění volným brusivem. [12]

3.10.1 Princip metody

Charakteristickým znakem procesu je narážení rozkmitaného brusiva o ultrazvukové frekvenci (20 až 30 kHz) na povrch obrobku a následným mikrovylamováním částecek z jeho povrchu. Zrna brusiva jsou přitlačována nástrojem řízenou silou a tím je do obrobku překopírován tvar nástroje. [9]

Zařízení pro obrábění se skládá z generátoru elektrických kmitů, konvektoru měnícího elektrickou energii na kmitání, koncentrátoru zesilujícího kmity, nástavce pro vedení nástroje a systému pro přívod brusiva. Nástroj má tvar negativní k obráběné ploše. Jeho trvanlivost by měla být co nejvyšší, protože při procesu je odebírán povrch obrobku, ale i nástroje. Proto je vyráběn nejčastěji z korozivzdorné oceli, molybdenu či mosazi. [12]

Na úběr materiálu, drsnost a kvalitu povrchu má vliv koncentrace suspenze brusiva a nosného media (nejčastěji vody), velikost zrn brusiva, tvrdost brusiva a způsob přívodu suspenze do místa řezu. Nosné medium musí mít dobrou smáčivost a tepelnou vodivost, nízkou viskozitu a hustotu. Na přesnost rozměru má vliv opotřebení nástroje, čím vyšší je požadavek na přesnost, tím kvalitnější musí být materiál nástroje. V tab. 5 je znázorněna rychlost úběru materiálu ultrazvukem. [12]

Tab. 5 Rychlosti řezání ultrazvukem

Materiál	Rychlost řezání [mm.min ⁻¹]	Poměr úbytku materiálu obrobku k opotřebení nástroje
sklo	3,8	100 : 1
ferit	3,2	100 : 1
grafit	2,0	100 : 1
keramika	1,5	75 : 1
krystal	1,7	50 : 1
karbid wolframu	0,25	1.5 : 1
karbid boru	0,20	2 : 1
nástrojová ocel	0,13	1 : 1

Zdroj: Maňková, 2000 [12]

3.10.2 Výhody a nevýhody

Výhodou je, že povrch obrobku není tepelně ovlivněn. Procesy úběru materiálu mechanickým způsobem jsou užívány pro obrábění velmi tvrdých materiálů, které by byly klasickými metodami jen těžko obrobitelné a pro obrábění gumy, když vyžadujeme řezání bez otřepů. Nevýhodou je nepříznivý účinek brusiva na materiál nástroje a malý úběr materiálu. Opotřebení závisí na materiálech nástroje a obrobku, i když se vzájemně nedotýkají a na druhu použitého brusiva. [12]

3.11 Řezání plazmou

Mezinárodně je plazmové obrábění označováno písmeny PBM (plasma beam machining) nebo PAM (plasma arc machining), původně bylo vynalezeno pro dělení slitin a neželezných kovových materiálů. Postupem času se metoda vyvíjela, takže dnes můžeme řezat i kovové materiály. Plazma je čtvrté skupenství látky, které se v přírodě vyskytuje výjimečně. Je definována jako „*velké množství částic bez pevné vzájemné vazby, z kterých alespoň nějaké mají elektrický náboj a v dostatečně velkém objemu je součet kladných a záporných částic nulový.*“ [12]

3.11.1 Princip metody

Vznik plazmy je zapříčiněn elektrickým obloukovým výbojem mezi elektrodami (katodou a anodou) nebo ionizací plynu při vysoké teplotě. Plazma je elektricky vodivá, a proto podléhá vlivům elektrického a magnetického pole. [12]

V procesu řezání jsou používány plyny, které rozdělujeme do třech skupin, Plazma se vytváří rozkladem molekul těchto plynů za vysoké teploty při výboji elektrického oblouku.

- plazmové plyny – jsou ionizovány přímo v elektrickém oblouku
(argon, helium, dusík, směs argonu a dusíku, vzduch)
- fokusační plyny – slouží pro zúžení (fokusaci) a stabilizaci plazmového paprsku
(argon, dusík, směs argonu a dusíku, směs argonu a vodíku)
- asistenční plyny – chrání plazmový paprsek a oblast tavení materiálu
(argon) [21]

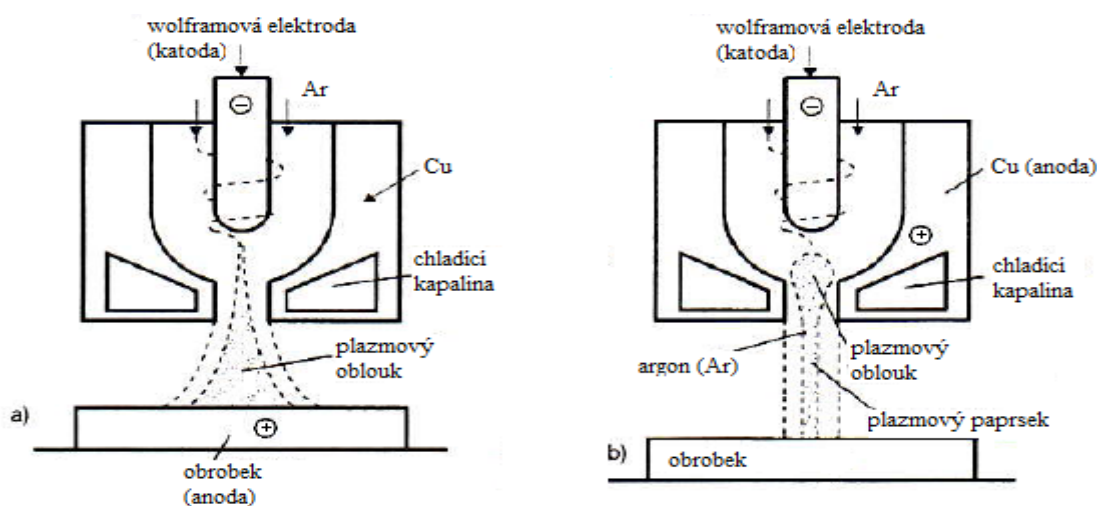
Zařízení pro řezání plazmou je složeno z několika částí: zdroje energie, ionizátoru, řídicí jednotky a plazmového hořáku. Tělo hořáku je složeno z netavící se wolframové, zirkonové nebo hafniové elektrody (katody), trysky k usměrnění plazmového paprsku a ochranné části k chlazení a fokusaci. Hořák musí umožnit přísun plynů, přívod elektrického proudu, tvarování a usměrnění plazmového oblouku na požadované místo. Chladičí systém hořáku je z důvodu vysokých teplot nepostradatelný. Na obr. 3 je systém chlazení vodou

zabudován ve stěnách hořáku, ale můžeme chladit i proudem fokusačního plynu, nebo stabilizační kapalinou. [12]

Zařízení se dělí dle dvou způsobů vzniku elektrického oblouku.

- Přenesený oblouk - vzniká mezi elektrodou a obrobkem (z elektrody se výboj přenáší na obrobek), je označován PAM, obr. 3 a).
- Nepřenesený oblouk - vzniká v hořáku mezi dvěma elektrodami (na obrobek je přenášén až proudem plynu), je označován PBM, obr. 3 b).

Obr. 3 Plazmový hořák



Zdroj: Maňková, 2000 [12]

Stabilizace elektrického oblouku je pojem, kterým je označováno vytvoření vhodných podmínek pro udržení plazmy v určitém požadovaném tvaru. Stabilizaci můžeme dosáhnout tvarem trysky hořáku, proudem plynu a vodou.

- Stabilizace plynem - je proces velmi hlučný, dochází při něm ke vzniku dýmu, prachu, škodlivých oxidů dusíku a UV záření. To je důvodem, proč musí být pracovní prostor odvětráván. Pro stabilizaci je používán obyčejný stlačený vzduch.
- Stabilizace vodou - okolo hořáku je vodní sprcha, ze které vytéká voda obklopující plazmový paprsek, který snižuje hluk a odvádí nežádoucí emise. Materiál je zároveň okamžitě chlazen, to zmenšuje tepelně ovlivněnou oblast. Zároveň příznivě působí na šířku a kvalitu řezu. Z této metody vyplývá, že při úpravě hořáku lze řezat i pod vodou.

Výhody stabilizace vodou jsou vyšší řezná rychlost, trvanlivost trysky, kvalitnější řez, menší oblast tepelného ovlivnění, nižší emise dýmu a výparů, nižší hladina hluku. [12]

Principem metody je odtavování materiálu za extrémně vysoké teploty vznikající při plazmovém výboji. Extrémní teplotou máme na mysli hodnotu v rozmezí od 17000 až do 33000°C. Natavený kov je odváděn z místa řezu plynem, jenž má vysokou přítokovou rychlost, následkem toho je čistý a hladký řez.

Proces řezání lze rozdělit do těchto fází: předfuk - pilot arc - startování - řezací oblouk – dofuk. Předfuk je spuštění plazmového plynu přibližně dvě vteřiny před zapálením oblouku. Pilot arc je doprovodný elektrický oblouk, pomáhá nám zapálit plazmu. Startování znamená spojit pilotní elektrický oblouk s obrobkem. Dofuk provádíme po skončení řezání, slouží k ochlazení hořáku, prodlužujeme tím jeho životnost.

Řezání plazmou ovlivňují následující činitelé:

- Průměr trysky – čím užší, tím kvalitnější řez, zároveň ale roste opotřebení.
- Výkon zdroje – mění se dle hloubky řezu.
- Plazmový plyn
- Vzdálenost hořáku od materiálu – na správné volbě vzdálenosti závisí sloupovitost řezu.
- Řezná rychlost – roste s výkonem zdroje, ale klesá s hloubkou řezu.
- Šířka řezu – až v milimetrových hodnotách.
- Kolmost hran – specifické je, že při řezání je odlišný úkos na pravém a levém boku řezu.

Tab. 6 Hodnoty parametrů řezání plazmou

Parametr	Rozměr	stabilizováno plynem			stabilizováno vodou			stabiliz. stlač. vzduchem		
		3,2	6,4	15,9	3,2	6,4	15,9	3,2	6,4	15,9
Tloušťka materiálu	mm	3,2	6,4	15,9	3,2	6,4	15,9	3,2	6,4	15,9
Řezná rychlost	mm/s	106	51	32	74	64	34	106	95	32
Výkon	kW	15	15	15	58	70	89	49	58	64
Proudová intenzita		150	150	150	300	350	400	200	235	250
Lin. intenzita řezání	m/h	381	183	114	267	229	107	381	343	114

Zdroj: Maňková, 2000 [12]

3.11.2 SWOT analýza

(S)trength – síla. V porovnání s řezáním kyslíkovým plamenem je výhodou dosažení lepšího povrchu řezu, asi desetkrát vyšší řezná rychlost – viz tab. 6. a oblast řezu není zdaleka tak tepelně namáhána. V případě řezání tenkých plechů je lacinější než laser. Tvrdost materiálu nemá vliv na řeznou rychlost. Výhodou je především vysoká hospodárnost procesu. [24]

(W)eakness – slabost: S řezáním plazmou je spojeno tepelné ovlivnění oblasti řezu. Nevýhody jsou vyšší náklady proti řezání plamenem, širší a méně kvalitní řez v porovnání s laserem. V porovnání s laserem širší a méně kvalitní řez. Dělení plazmou je omezeno převážně na řezání elektricky vodivých materiálů. [12]

(O)pportunities - příležitosti: Vysoká kvalita řezu, která oproti kyslíkovému řezání nemusí být dále opracována. Použitím speciálních trysek umožňuje řezání pod vodou. Plazmové řezání dokáže dělit hned několik vrstev plechů najednou. Z ekonomického hlediska v tloušťkovém pásmu materiálu od 5 do 30 mm prozatím nemá konkurenci. [12]

(T)hreats – hrozby: Při procesu vznikají zplodiny, UV záření, vysoký hluk a kouř. Nutnost zabezpečit chlazení trysky. Ohrožením používání metody je vyvíjení laserového řezání, které až tak tepelně nedeformuje materiál. [24]

Tab. 7 SWOT matice strategie řezání plazmou

ŘEZÁNÍ PLAZMOU	Slabé stránky – Weakness	Silné stránky – Strenght
Příležitosti – Opportunities	hospodárnost rychlost řezu	řezání tenkých plechů řezání tvrdých materiálů
Ohrožení – Threats	odvětrávání pracoviště chlazení materiálu	automatizace procesu

„Plazma je bezkonkurenční řezací metodou především v tloušťkovém pásmu materiálu od 5 do 30 mm.“ [11] S ohledem na výhody, nevýhody se dělení plazmou v automobilovém průmyslu využívá pro dělení profilovaných tyčí na konstrukci rámu.

3.12 Řezání laserem

Laser je zkratka anglických slov light amplification by stimulated emission radiation, což v překladu znamená: zesílení světla pomocí vybuzené energie záření. Laser je kvantový elektronický zesilovač a generátor světelných vln. [21]

3.12.1 Princip metody

Dělení materiálu laserovým paprskem je založeno na principu přeměny světelné energie na tepelnou. Energie se přeměňují při kontaktu paprsku s obrobkem, díky tomu se materiál natavuje a případně odpařuje. [21] Řez vzniká působením erozivního účinku laseru a tlaku přídavného vzduchu, natavením a odpařením materiálu. Přídavný plyn je určován dle materiálu obrobku, může jím být kyslík, nebo inertní plyny. Proces řezání lasery je vhodným způsobem pro sériovou i malosériovou výrobu. Lze považovat za univerzální technologii pro řezání. Řezání může být uskutečněno těmito způsoby: [12]

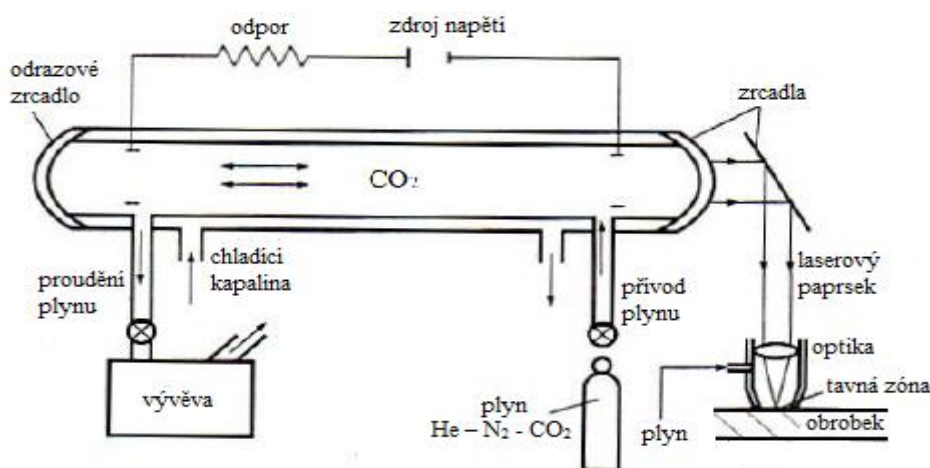
- Sublimační – materiál je nataven a zároveň okamžitě vypařován díky zahřátí obrobku na teplotu vypařování, páry jsou z místa řezu odfukovány inertním plynem. Tento způsob je vhodný pro tenké materiály, plochy řezu jsou kvalitní.
- Tavné – materiál je pouze nataven a z místa řezu je odfukována tavenina silným proudem inertního plynu. Plocha řezu je horší, díky odfukované tavenině. Plocha řezu je horší, ale náklady na jednotkovou délku řezu jsou nižší než u sublimačního řezu.
- Oxidační – materiál je nataven a do místa řezu přiváděn aktivní plyn (kyslík), tím dochází k oxidaci a spalování taveniny. Plocha řezu je kvalitní a zároveň můžeme řezání urychlit. [14]

Hlavními částmi stroje jsou hlavice, rezonátor, budicí zařízení, zdroj energie buzení a chladicí zařízení - viz obr. 4.

- Řezací hlava obsahuje přívod plynu, trysku a čočku pro fokusaci paprsku. Musí umožňovat snadnou nastavitelnost, stálost paprsku a manipulaci.
- Rezonátor formuje a zesiluje záření. Jeho hlavní částí je minimálně jeden pár zrcadel. V rezonátoru se nachází laserové medium.

- Budící zařízení je určeno druhem media. Emisi záření můžeme vybudit elektrickým výbojem, chemickou reakcí, expanzí plynu nebo opticky.
- Chladicí zařízení je používáno pro odvedení nepotřebné energie, která se nepřeměnila v záření, ale v energii tepelnou. Chlazení probíhá v rezonátoru, médiem může být voda nebo vzduch. [21]

Obr. 4 Schéma stroje CO₂ laseru



Zdroj: Maňková, 2000 [12]

Výběr vhodného typu laseru je ovlivněn tloušťkou a materiálem obrobku, kvalitou řezu. Naopak volba typu laseru ovlivňuje šířku řezné spáry, rychlost řezání. Lasery se dají určit dle media pro emise paprsku. [13] Medium laserového svazku je směsí několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu, který je schopen odvodu tepla a zároveň je průhledný. Výsledný laserový paprsek je ale monochromatický (o jedné vlnové délce), koherentní (fotony jsou v časové fázi), kulminovaný (nerozbíhá se). Medium může být pevné, kapalné, plynné nebo polovodičové. Pro řezání můžeme vybírat z těchto typů: [21]

Plynné lasery jsou nejpoužívanějším typem laserů pro řezání, jsou schopny pracovat jak v pulsním (označovaným pw) tak kontinuálním režimu (označovaným cw). Plynné laserové medium je směsí plynů CO₂, He, Nz, která emituje infračervené záření. Směs plynů proudí rezonátorem, dle toho dělíme plynné lasery do skupin:

- Lasery s pomalým prouděním axiálním mají stabilní výkon a dobrou modovou charakteristiku svazku. Řezy jsou hladké, provoz může být kontinuální i pulsní.

- Lasery s rychlým prouděním axiálním dosahují několikanásobně vyššího výkonu, ale kvalita řezu, modová struktura svazku a pulsní provoz je horší.

Pevnolátkové lasery, nejpoužívanějším typem je YAG laser (ytrium-aluminový granát). Jeho mediem jsou tyčinky nebo krystaly, které musí být v rezonátoru intenzivně chlazeny deionizovanou vodou. Výkon bývá kolem 4 kW, účinnost je velice malá. Jsou vhodné pro pulsní řezání, ale řezná rychlost je nižší, než pro plynové lasery. [13]

Parametry laseru, kterými lasery posuzujeme:

- Výkonem rozumíme veškerou energii emitovanou laserem za sekundu.
- Intenzita je poměr laserového záření na plochu.
- Kontinuálním provozem provádíme řezání většiny materiálů. Pulsní provoz je vhodnější pro řezání, pokud jsou dva řezy blízko u sebe, ale řezání tímto způsobem je mnohem pomalejší než kontinuální řezání.
- Módy jsou elektromagnetické příčné vlny laserového svazku, charakterizují distribuci energie v příčném řezu, ovlivňují intenzitu paprsku, a pokud je mód nepříznivý, negativně ovlivňuje i kvalitu řezu.
- Polarizace elektromagnetické oscilace má vliv na pohlcování světla materiálem. Může být kruhová, eliptická nebo nekontrolovatelná. Pro řezání je důležité užívat pouze svazek s kruhovou polarizací. Z důvodu správné geometrie řezu.
- Poloha ohniska svazku ovlivňuje hloubku řezu. Ohnisko by mělo být polohováno do hloubky jedné třetiny od povrchu.
- Poloha trysky od povrchu nesmí být větší, než je její průměr z důvodu turbulentního proudění asistenčního plynu.
- Řezatelnost je ovlivněna absorpcí vlnových délek svazku. Pokud materiál není schopen absorbovat laserové záření, není řezatelný, protože záření jím pouze prochází. Obrobitelnost materiálu je ideální, pokud je absorpce záření co největší, naopak tepelná vodivost a odrazivost co nejmenší.
- Z konstrukčního hlediska můžeme přístroj dělit dle pohyblivého stolu, pohyblivé laserové hlavičky nebo kombinací. Pohybový systém je řízen CNC jednotkou. [13]

Kvalita povrchu po řezání laserem je ovlivněna parametry procesu a vlastnostmi materiálu obrobku. Samotná kvalita povrchu řezu se dá hodnotit dle mnoha parametrů: šířky a kuželovitosti řezu, zaoblení a nepravidelnostmi hran, šířkou tepelně ovlivněné oblasti, tvoření kráterů, zpevnění. [12]

Řezání laserem lze snadno porovnat s metodami pro podobné využití, kterými jsou řezání plazmou, řezání kyslíkem, řezáním abrazivním vodním paprskem. V tab. 8 jsou hodnoty plazmového řezání k porovnání s ostatními metodami.

Tab. 8 Hodnoty parametrů řezání

Obráběný materiál	Tloušťka (mm)	Výkon laseru (W)	Asistentní plyn	Řezná rychlost (m.min ⁻¹)
Uhlíková ocel třídy 11	1 8	1200	O ₂	až 9 0,9
Nerezavějící ocel třídy 17	1 6	1200	Ar	2,6 0,2
Titan	5 10	1200	směs Ar + O ₂	0,35 0,2

Zdroj: Kříž a Vávra, 1996 [9]

3.12.2 SWOT analýza

(S)trength - síla. Řezání laserem zanechává nejmenší šířku řezné spáry, málo tepelně ovlivňuje obrobek. Výhodami je velice přesná pravouhlá řezná hrana $\pm 0,1$ mm a vysoká řezná rychlost u slabých materiálů. Lze snadno dělit i tvrdé materiály, které nemají vliv na rychlost řezu. [24]

(W)eakness - slabost: Maximální hloubka řezu je v porovnání s ostatními progresivními metodami velmi malá. Nevýhodami je vysoká pořizovací cena stroje a hlavně vybavení pracoviště. [12]

(O)pportunities - příležitosti: Metoda je univerzální pro takřka veškeré druhy materiálů, rozsah materiálů k řezání je velmi široký. [12]

(T)hreats - hrozby: Nepříjemností metody je vznik toxických výparů při procesu, nízká účinnost provozu a snížená obrobiteľnosť lesklých materiálů. [24]

Tab. 9 SWOT matice strategie laserového řezání

ŘEZÁNÍ LASEREM	Slabé stránky – Weakness	Silné stránky – Strength
Příležitosti – Opportunities	řezání tenkých plechů vysoké vytižení pracoviště	řezání tvrdých materiálů vysoká přesnost univerzálnost metody
Ohrožení – Threats	zdrsnění povrchu, matné povlaky odvětrávání pracoviště	žádný odpad po řezání malý prořez

3.13 Řezání kapalinovým paprskem

Při této metodě se k obrábění využívá kinetické energie molekul řezné kapaliny a kavitační koroze kapaliny.

3.13.1 Princip metody

Kinetická energie paprsku se při dopadu na obrobek mění v mechanickou práci. Paprsek vystupující z trysky je čtyřnásobně rychlejší než je rychlost zvuku, svou získanou kinetickou energií se na obrobek chová jako pevné těleso. Ke kavitační korozi dochází pouze za určitých podmínek, pokud se v proudu kapaliny objevují bubliny syté páry. [21]

Kapalinový paprsek může být čistý nebo s abrazivem.

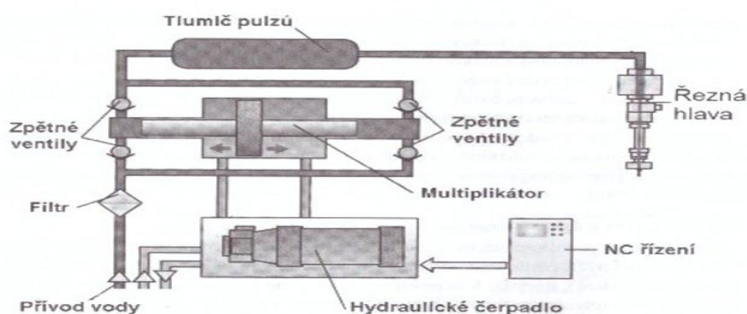
- Čistý kapalinový paprsek - WJM (water jet machining) získává řeznou sílu přeměnou kinetické energie paprsku. Určitá část kapaliny se odpaří a tím vzniká kavitační koroze.
- Abrazivní kapalinový paprsek - AWJ (abrasive water jet machining) se liší od čistého paprsku přidáním jemného brusiva. Získává nejen kinetickou energii, kavitační korozi, ale navíc ještě brousící účinek zrn brusiva. [21]

Kapalina by měla splňovat požadavky na nízkou viskozitu, nízké ztráty toku, nízkou cenu. Nejčastěji se volí demineralizovaná a deionizovaná voda, která je nejdostupnější, nejekologičtější a nejlevnější. Deionizace vody je důležitá kvůli ochraně trysky. [24]

Pracovní zařízení se skládá z několika částí - viz obr. 5:

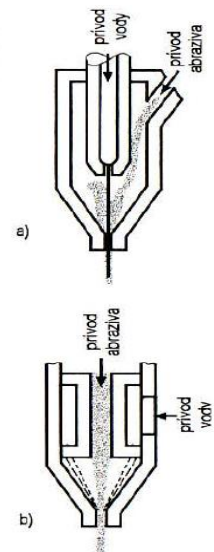
- Přívod pracovní kapaliny
- Čistící filtry zachycují nečistoty v kapalině po obrábění a vracejí ji do oběhu. Filtrace je předpokladem pro dlouhou životnost zařízení. Voda ve filtrech není pouze čištěna, ale je i změkčována a deionizována.
- Nízkotlaké čerpadlo slouží k regulaci výstupního tlaku kapaliny a dodává kapalinu do zásobníku pro vysokotlaké čerpadlo.
- Zásobník kapaliny shromažďuje kapalinu pro plnění vysokotlakého čerpadla.
- Vysokotlaké čerpadlo funguje jako zesilovač tlaku kapaliny. Pro zvýšení tlaku se používá multiplikátor nebo plunžrové čerpadlo.
- Řezací hlava s tryskou, zaostřovací trubicí a směšovačem abraziva. V trysce se přeměňuje potenciální energie kapaliny na kinetickou. V zaostřovací hlavici dochází k vytvoření souvislého paprsku, ve směšovací komoře k příměsi abraziva do paprsku. Na obr. 6 a) je zobrazena tryska s radiálním přívodem brusiva, na obr. 6 b) je axiální směšování brusiva.
- Zásobník zrn pro abrazivní řezání.
- Lapač zachycuje a ničí přebytečnou energii paprsku, který vystupuje z obrobku. Jedná se o nádrž naplněnou vodou, musí být dostatečně hluboká. [24]

Obr. 5 Schéma stroje řezání vodou



Zdroj: Valíček a Hloch, 2008 [24]

Obr. 6 Přívod abraziva do paprsku



Zdroj: Maňková, 2000 [12]

Použití čistého kapalinového paprsku je pro měkké, málo houževnaté materiály. Naopak abrazivní kapalinový paprsek se užívá pro dělení tvrdších a houževnatých materiálů. Metoda je univerzální, lze obrábět takřka veškeré druhy kovových i nekovových materiálů, korozivzdorné oceli, sklo, plasty gumu a podobně, v tab. 10 jsou uvedeny rychlosti řezu pro vybrané druhy materiálů.

Druhy používaných proudů:

- Pulzující – opakující se krátkodobé trvání paprsku.
- Kontinuální – plynulý nepřerušovaný paprsek o stálé energii. [21]

Tab. 10 Rychlost řezání metodou AWJ

Materiál	Tloušťka (mm)	Rychlost (mm/min)	Šířka zářezu (mm)	Výkon (kW)
Sklo	9,5	1520	1	20
Konstrukční ocel	0,3	6000	0,1	0,3
	1	4500	0,05±0,1	0,4
	2	4900	0,1±0,2	2
	3,18	840	0,5	0,4
	6,4	2300	1	15
Korozivzdorná ocel	0,45	635	0,46±0,92	0,2
	1,27	760	0,51	0,16
	3,18	5080	0,1±0,2	0,5
	4,75	1270	2	20
Nástrojová ocel	3	1700	0,2	0,4
Titan	0,5	200	0,46±0,9	0,2
	5	3300	0,4	0,8
Hliník	1,5	2500	0,8	1
	12,7	2300	1	15

Zdroj: Maňková, 2000 [12]

Při řezání je paprskem nejprve proražen otvor, následně na to se teprve tvoří spára, která vzniká pohybem obrobku k paprsku. Proud od výstupu z trysky ztrácí kinetickou energii, proto se snažíme, aby pracovní hlava byla co nejbližší k obrobku. Rychlost proudění ovlivňuje intenzitu úběru materiálu. Tlak paprsku ovlivňuje nejen intenzitu, ale i mechanismus úběru. Zvýšení tlaku vody zvyšuje její rychlost a parametry řezání. S vyšším tlakem je spojen požadavek na výkonnější zařízení. V souhrnu tak maximální možnou řeznou tloušťku obrobku ovlivňuje: tvar a velikost zrn abraziva, tvrdost abraziva, tlak a průtok pracovní kapaliny, materiál obrobku, řezací rychlost, tvar trysky, sklon proudu. [12]

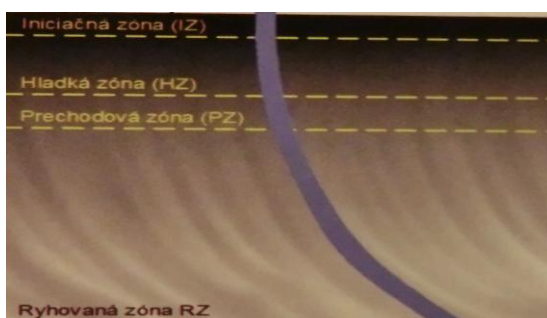
Volba abraziva probíhá dle určitých zásad:

- Ekonomičnost procesu závisí na ceně a rychlosti řezání. Dražší brusiva jsou kvalitnější, ale závislost ceny a kvality brusiva není lineární. Rozhodujeme se dle materiálu obrobku, pro různé materiály jsou ekonomická různá brusiva.
- Opatření trysky a drsnost povrchu řezu souvisí s tvrdostí, tvarem, velikostí zrn abraziva.
- Ekologičnost provozu by měla být dodržena i přes to, že z důvodu životního prostředí budeme muset zvolit dražší brusivo.
- Recyklace brusiva je požadavkem ekologické a environmentální výroby. Volíme brusivo, které se při řezu co nejméně opotřebovává. Důležitým odvětvím recyklace je separace použitého brusiva od kapaliny z lapače a nečistot po obrábění. [24]

Nejčastěji se používá granátový nebo olivínový písek, popřípadě struska.

Struktura povrchu řezu je dána řezivostí a rychlostí posuvu paprsku. Kapalinový vodní paprsek pronikající materiálem postupně ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se. Tak jak prostupuje materiálem, tvoří texturu řezu. Přibližně v první polovině řezu má obrobek relativně hladkou texturu, abrazivo má vzhledem k obrobku řeznou schopnost. V druhé části je povrch rýhovaný, což je příčinou deformačního opotřebení abraziva o materiál. Drsnost rýhované oblasti prudce roste s hloubkou řezu a s rychlostí posuvu paprsku. [12] Poměr hladké a rýhované části není vždy rozdělen na poloviny, struktura řezného povrchu závisí na řezných podmínkách. Na obr. 7 je vyznačeno ještě podrobnější popsání řezné plochy, mezi hladkou a rýhovanou částí je přechodová oblast, na začátku řezu je označena iniciační zóna. [5]

Obr. 7 Struktura řezné plochy



Zdroj: Hloch a Valíček, 2008, s 38 – 41 [5]

3.13.2 SWOT analýza

(S)trength - síla: Výhodou metody je její universálnost využití v širokém spektru materiálů. Další výhodou je relativně studený řez, a proto nevzniká tepelně ovlivněná oblast a s ní spojené deformace a napětí v materiálu. Tenká šířka řezu bez otřepů, malá ztráta materiálu prořezem, vysoká přesnost. Vysoká energetická účinnost. [24]

(W)eakness - slabost: Nevýhodou je určitě vysoká investiční a provozní cena, pomalý posuv řezné hlavy, vysoká hlučnost, recyklace abraziva. [24]

(O)pportunities - příležitosti: Pozitivní vlastností je ekologičnost procesu, což by se stále přísnějšími požadavky v tomto směru mohlo být v budoucnu velkou předností. AWJ je šetrné i k materiálu, nedochází k chemickému ovlivnění součástí, silové působení na obrobek je minimální. Nevznikají emise a prašnost. [24]

(T)hreats - hrozby: Z důvodu korozního prostředí se v případě potřeby musí obrobek po obrábění osušit. Nelze řezat materiály náchylné na vlhkost. [24]

Tab. 11 SWOT matice strategie řezání kapalinovým paprskem

ŘEZÁNÍ KAPALINOVÝM PAPRSKEM	Slabé stránky – Weakness	Silné stránky – Strenght
Příležitosti – Opportunities	řezání více paprsky současně dělení malých součástí čistá plocha řezu	univerzálnost účinnost obrobek bez deformací
Ohrožení – Threats	osušení obrobků antikorozi kapalin	malý prořez dělení hořlavých materiálů

V automobilovém průmyslu je kapalinový paprsek používán pro dělení materiálů na vnitřní vybavení interiéru (koberce, řídicí panel, ovládací prvky), izolace, nárazníky, bezpečnostní skla, tlumiče, kapoty. [8]

4 Vývojové trendy v oblasti dělení materiálu

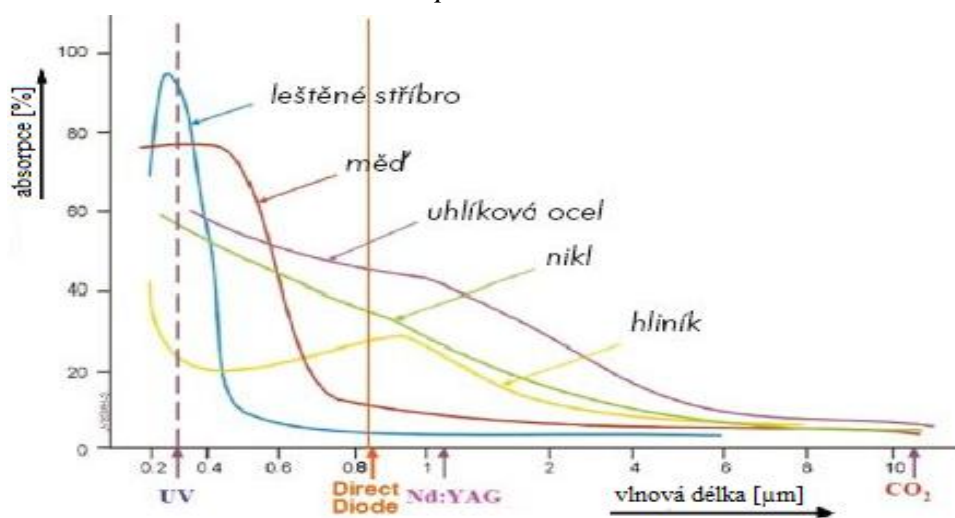
Ve třetí kapitole bylo uvedeno hned několik způsobů pro dělení materiálu. Vzhledem ke konkurenci na trhu, neustálým požadavkům na snižování výrobních nákladů, zvýšení výkonnosti, univerzálnosti použití, ekologickým požadavkům a mnoha dalším kritériím je nutný vývoj současných ale i nových metod dělení. Vývojové metody jsou nazývány progresivními. V této části jsou uvedeny některé moderní trendy v oblasti dělení, které se na trhu objevily v posledních letech.

4.1 Vlákenné lasery

Vlákenný laser vznikl z pevnolátkového Nd-Yag laseru. Natažením tohoto tyčového pevnolátkového laseru do extrémní délky vznikne vlákenný laser. Aktivní prostředí tvoří optické vlákno dlouhé až 50 metrů obsahující atomy erbia, thulia nebo yterbia. Záření je vyvozeno příčným buzením pomocí laserových diod. Jejich záření je do aktivního prostředí vedeno dalším optickým vláknem, jedná se o takzvanou vlákno-vlákno architekturu. [16] Vlákno aktivního prostředí je obaleno druhým vlákem. K vysoké excitaci atomů aktivního prostředí dochází mnohonásobnými odrazy příčného budícího záření v obalovém vlákne. [15] Dnešní vlákenné lasery dosahují výkonu až 40 W. [16]

Na obr. 8 lze vidět jedna z hlavních výhod použití vlákenných laserů, pevnolátkové lasery jsou absorbovány v přibližně desetkrát nižší vlnové délce než CO₂ lasery.

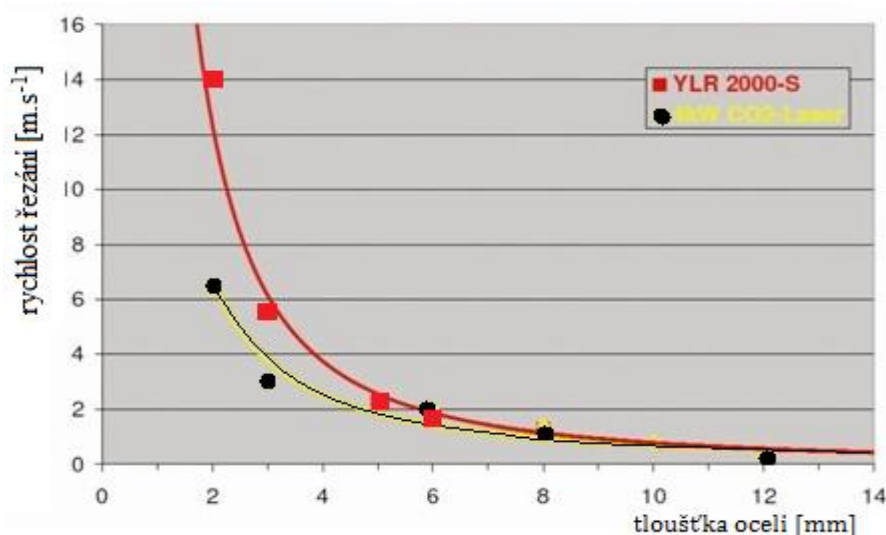
Obr. 8 Absorpce laserového záření



Zdroj: Kořán, 2012, s. 50 [7]

Další výhoda je zobrazena na Obr. 9, zde jsou porovnány řezné rychlosti vláknového laseru s CO₂ laserem, lze vysledovat, že vláknovým laserem můžeme pro tenké plechy dosáhnout až dvojnásobné řezné rychlosti. [7]

Obr. 9 Porovnání řezných rychlostí



Zdroj: Kořán, 2012, s. 50 [7]

Jednou z pozitivních vlastností zařízení je, že pomocí vláknových laserů jsme schopni řezat i v trojrozměrném prostředí. Laserový paprsek je do řezací hlavy přiveden optickým vláknem, takže ji lze snadno naklánět. [7]

Dalšími výhodami je jednoduchá a kompaktní konstrukce stroje, dlouhá životnost, která je zaručena diodovým buzením, vyšší rychlost řezu, vyšší účinnost oproti plynovým laserům, nízké provozní náklady díky pozvolnému chlazení vzduchem – dlouhé vlákno se samočinně stačí ochladit na vzduchu, umožnění manipulace řezné hlavy ve třech dimenzích. Nevýhodou je obtížná výroba vlákna, oproti jiným metodám stále vysoká cena a některé nežádoucí fyzikální jevy (Ramanův, Brillouinův rozptyl). [15]

4.2 Kotoučové (diskové) lasery

Aktivním prostředím jsou kotoučky o průměru 10 mm, tloušťce jen 0,25 mm vyrobené většinou z yttria a hliníku. Chlazení je zaručeno přitmělením disku na chladicí element. Aby bylo možné dosáhnout cíleného výkonu, musí světlo projít kotoučkem hned několikrát (až 20 krát), to je zajištěno příčným uspořádáním zrcadel. [19] V tab. 12 je porovnání typů laserového řezání, výkon kotoučového laseru je několikrát vyšší s dobrou kvalitou výstupního

svazku. Výkon kotoučových laserů lze zesílit kombinací čtyř a teoreticky až osmi vzájemně zapojeným kotouči. V porovnání s vláknovými lasery je nevýhodou nižší účinnost, životnost a nutnost údržby. [17]

Tab. 12 Porovnání parametrů laserů

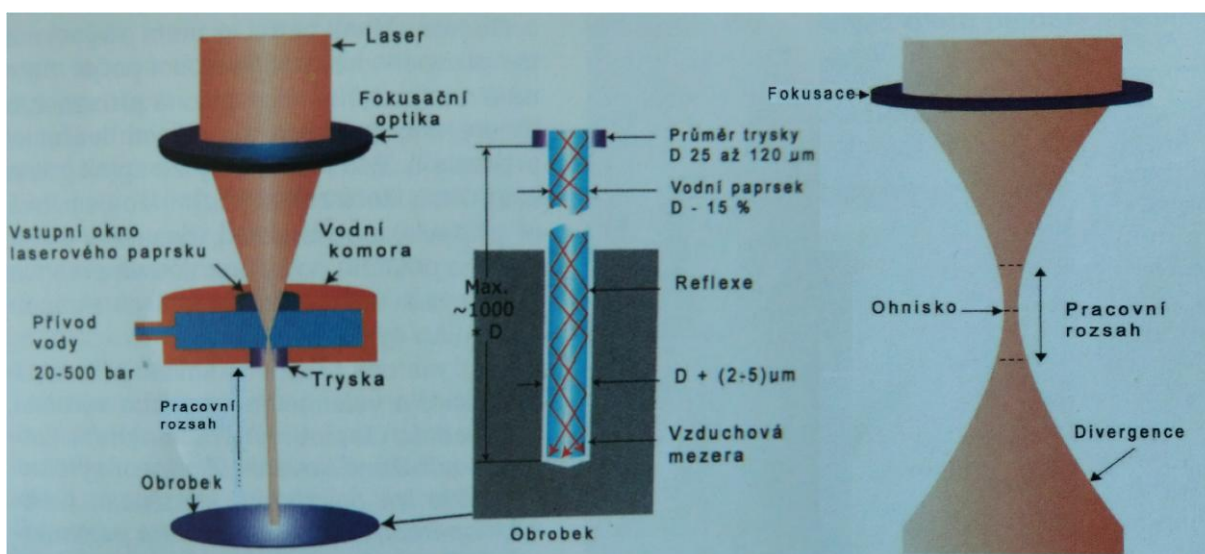
Typ laseru	Účinnost [%]	Výkon [W]	Vlnová délka [nm]	Údržba	Životnost [h]
Nd:YAG	7	až 6000	1 064	ano	10 000
CO2	25	až 20 000	10 600	ano	20 000
Diskový	15	až 16000	1 070	ano	10 000
Vláknový	30	až 1200	1 070	ne	100 000

Zdroj: Novák, 2012, s. 126. [17]

4.3 Fokusace laseru přes vodní paprsek

System zvaný Mikrojet využívá k fokusaci laserového svazku vodní komoru nebo k vedení laserového svazku do místa řezu vodní paprsek. Zdrojem záření je vláknový laser. Vodní sloupec má průměr přibližně tloušťky lidského vlasu a může být dlouhý až 50 mm, vodní komora je natlakována na 20 až 500 barů. Metoda spojuje pozitivní vlastnosti vodního a laserového řezání. Tepelné ovlivnění oblasti je minimální, zvláště při použití laserů s ultrakrátkými pulzy. Při vedení svazku vodním sloupcem je místo řezu nejen ochlazováno, ale navíc i proplachováno vysokým tlakem vodního sloupce. Řezná rychlost je vyšší, řez je čistý a bez trhlin. I při největších tloušťkách řezaného materiálu jsou stěny řezu paralelní. V obr. 10 je vidět mnohem větší pracovní rozsah v porovnání s laserem zaostřovaným optickou čočkou. V článku je uvedeno, že využití metody je: „*vrtání trysek pro spalovací motory a v neposlední řadě efektivní náhrada za elektroerozivní metody*“. [22] Hlavním využitím je dělení solárních článků, které by se v budoucnu mohly stát tradiční součástí v automobilovém průmyslu.

Obr. 10 Fokusace vodní komorou v porovnání s fokusací optikou



Zdroj: Šmíd, 2012 [22]

4.4 Stříbrné elektrody pro plazmové řezání

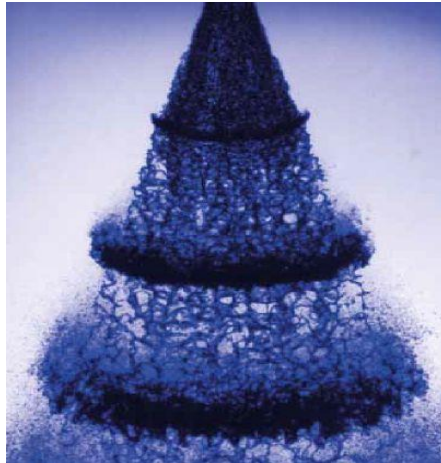
Elektrody SilverPlus jsou specifické pevně přivařeným hrotem ze stříbra na měděném podkladu se zasunutou hafniovou vložkou uprostřed elektrody. Testy prokázaly, že oproti měděné elektrodě je míra opotřebení hafnia mnohem menší a stříbrný hrot rozptyluje teplo mnohem lépe. Výhodami použití těchto elektrod je další snížení výrobních nákladů, přibližně dvojnásobné prodloužení životnosti elektrody, zvýšení rychlosti řezání a kvalitnější hrany řezu. [6]

4.5 Pulzní vodní paprsek

Vývoj řezání kapalinovým paprskem souvisí s ekologickými a ekonomickými požadavky na výrobu, proto je vývojem snaha o vynechání abraziva z paprsku na rozdíl od metody AWJ. Metoda je založena na využití extrémně vysokých tlaků, které v pulzních cyklech narážejí na materiál. Pulzní paprsek působí na rozdíl od kontinuálního nejen normálovým, ale i mnohokrát vyšším smykovým (impaktním) tlakem. Cyklickými nárazy dochází také k únavovému namáhání. Generování vysokých tlaků je prováděno vysokofrekvenčními tlakovými pulzacemi nebo šířením akustických vln v kapalině působením akustického budiče. Systém je schopen generovat desítky tisíc pulzů za vteřinu.

Vytvoření kapalinového pulzujícího paprsku probíhá vytvářením velkých talkových pulzací v tlakové kapalině ještě před výstupem z trysky. Paprsek vystupující z trysky je zprvu kontinuální, ale díky pulzacím má při výstupu z trysky rozdílnou rychlost. Rychlejší segmenty paprsku se v určité části shlukují s pomalejšími, tím se kontinuální paprsek změní na pulzní viz - obr.11.

Obr. 11 Pulzní plochý paprsek



Zdroj: Foldyna, 2013 [4]

Metoda se neustále vyvíjí, zatím se používá k čištění a obrábění povrchů, v článku je uvedeno, že „v automobilovém průmyslu se uvažuje o aplikaci pulzujících paprsků např. k odstraňování otřepů po obrábění vnitřních prostor bloku válců motorů“. [4]

5 Závěr

Smyslem práce bylo shromáždit informace v oblasti dělení materiálu a sepsat poznatky, které se týkají použití dané problematiky automobilového průmyslu.

Každá metoda je popsána svými charakteristickými vlastnostmi a znaky, závěrem charakterizování je vyhodnoceno použití metod v automobilovém průmyslu a shrnutí výhod a nevýhod. Pro vzájemné porovnání vlastností jednotlivých metod, jsou u většiny případů uvedeny tabulky s parametry řezání. Metody, které jsou zaznamenány, ale v automobilovém průmyslu se používají minimálně, jsou popsány pouze okrajově.

Ve třetí kapitole jsou uvedeny veškeré možné způsoby dělení materiálu, které se mi podařilo dohledat. Jednotlivé možnosti dělení jsou v kapitole řazeny od klasických mechanických metod po nekonvenční až progresivní metody. Na základě získaných informací jsem jako prioritní způsoby pro využití v automobilovém průmyslu vyhodnotil ty, které jsou završeny SWOT analýzou. Patří mezi ně stříhání a řezání plazmou. Jelikož by jim v budoucnu mohly konkurovat progresivní (vyvíjející se) metody, je pro porovnání SWOT analýza provedena i u těchto způsobů, jsou jimi řezání laserem, kapalinovým abrazivním paprskem.

Čtvrtý bod je věnován vývojovým trendům zejména progresivních metod, které byly objeveny v posledních letech a přinášejí i další možnost vývoje v budoucnu. Vývoj je zaměřen zejména na snížení výrobních nákladů, zvýšení konkurenceschopnosti, univerzálnosti. Velice pozitivní vývoj jsem zaznamenal u řezání použitím vláknových laserů, které mají v porovnání s klasickými CO₂ lasery nesrovnatelně lepší vlastnosti. Ve vývoji je stále používání pulzujícího vodního paprsku, který má za následek vyšší životnost a oproti abrazivnímu paprsku není zapotřebí brusiva.

Ze studování dané problematiky usuzuji, že těžko lze určitou metodu posoudit za ideální, porovnávání metod vzájemně mezi sebou je velice diskutabilní. Každý způsob má své výhody, nevýhody a různý rozsah použití vzhledem k dělenému materiálu, jeho tloušťce, přesnosti řezu, rychlosti a dalším řezným podmínkám. Hlavním ukazatelem volby metody je její hospodárnost při dosažení požadovaných kvalit řezu. Ve velkosériové výrobě je i sebemenší úspora výrobních nákladů jedné součásti obrovskou úsporou nákladů celkových.

Pro čtenáře je práce přínosná jako seznam metod dělení materiálu, jejich užití v automobilovém průmyslu a hlavně seznámení s principem moderních metod v dané oblasti.

6 Seznam literatury

- [1] BŘEZINA, Richard a Jiří PETRUŽELKA. *Úvod do tváření II*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002, 114 s. ISBN 80-248-0068-3.
- [2] 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.
- [3] FINDA, Luděk a Roman HALTUF. Akademie tváření: Stříhání. *MM Průmyslové spektrum*. 2010, č. 6, s. 72. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
- [4] FOLDYNA, Josef. Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti?. *Vesmír: 140 let tradice*. 2013, roč. 92, č. 12. Dostupné z: <http://casopis.vesmir.cz/clanek/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti>
- [5] HLOCH, Sergej a Jan VALÍČEK. Dělení materiálu vodním paprskem (5): Experimentálna štúdia morfolóbie plochy AISI304 (nehrdzavejúca oceľ) vytvorenej hydroabrazívnym dělením. *Technický magazín: svařování dělení spojování materiálů*. 2008, roč. 6, 5-6, s. 38-41.
- [6] HYPERTHERM. Novinky a zajímavosti: Elektrody Hypertherm pro plazmové řezání. *Technický magazín: svařování dělení spojování materiálů*. 2008, roč. 6, 5-6, s. 43.
- [7] KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (5): laserové řezání. *MM Průmyslové spektrum: odborné strojírenské zpravodajství*. 2012, roč. 15, č. 10, s. 50. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
- [8] KRAJNÝ, Zdenko. Vysokotlaký vodný lúč: WJM - projects. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2011. ISBN 978-80-227-3535-3.
- [9] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka, 24 oddílů v osmi svazcích: 7. svazek*. Vyd. 1. Praha: Scientia, 1996, 216 s. ISBN 80-718-3024-0.
- [10] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka, 24 oddílů v osmi svazcích: 8. svazek*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1998, 255 s. ISBN 8071830542.
- [11] KUDĚLKA, Vladimír. Porovnání dělicích metod: Jaká technologie řezání je nejvhodnější? *Technický magazín: svařování dělení spojování materiálů*. 2008, roč. 6, č. 3, s. 13.
- [12] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progressívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [13] MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1993, 50 s. ISBN 80-010-1028-7.

- [14] MINAŘÍK, Václav. Tepelné dělení: přehled metod. *Technický magazín: svařování dělení spojování materiálu*. 2007, roč. 5, 5-6, s. 10.
- [15] MRŇA, Libor. Vláknové lasery: vycházející hvězda v průmyslové oblasti. *Technický magazín: spojování dělení svařování materiálu*. 2008, roč. 6, č. 3, s. 30-31.
- [16] NOVÁK, Miroslav. MM Průmyslové spektrum. *Průmyslové lasery (4): Hlavní typy laserů v průmyslové praxi*. 2012, č. 9, s. 126. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- [17] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (1): princip laseru. *MM Průmyslové spektrum: odborné strojírenské zpravodajství*. 2012, č. 3, s. 52-53. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
- [18] NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. *Stříhání a další způsoby dělení materiálu*. 1. vydání. Praha1: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [19] Od plynového k vláknovému a kotoučovému laseru. *Technik: technologie materiály inovace trhy*. 2009, roč. 17, 1-2, s. 58-59.
- [20] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění 1.díl*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2000, 256 s. ISBN 80-718-3207-3.
- [21] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2001, 221 s. ISBN 80-718-3227-8.
- [22] ŠMÍD, Jiří. Řezání laserem s fokusací přes vodní paprsek. *Technik: automatizace technologie inovace trhy*. 2012, roč. 20, č. 4.
- [23] URBÁNEK, Jaroslav. Proměny plechu v karosářské díly. *MM Průmyslové spektrum*. 2001, č. 7, s. 30. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/promeny-plechu-v-karosarske-dily.html>
- [24] VALÍČEK, Jan a Sergej Hloch. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Vyd. 1. Ostrava: Ámos, 2008. ISBN 978-802-5435-885.

Seznam obrázků

Obr. 1 Fáze stříhání

Obr. 2 Nastavení střížné mezery

Obr. 3 Plazmový hořák

Obr. 4 Schéma stroje CO₂ laseru

Obr. 5 Schéma stroje řezání vodou

Obr. 6 Přívod abraziva do paprsku

Obr. 7 Struktura řezné plochy

Obr. 8 Absorpce laserového záření

Obr. 9 Porovnání řezných rychlostí

Obr. 10 Fokusace vodní komorou v porovnání s fokusací optikou

Obr. 11 Pulzní plochý paprsek

Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry řezných podmínek rozřezáváním pilami

Tab. 2 SWOT matice strategie stříhání

Tab. 3 Parametry řezání kyslíkovým plamenem

Tab. 4 Porovnání elektrochemického a elektroerozivního řezání

Tab. 5 Rychlosti řezání ultrazvukem

Tab. 6 Hodnoty parametrů řezání plazmou

Tab. 7 SWOT matice strategie řezání plazmou

Tab. 8 Hodnoty parametrů řezání

Tab. 9 SWOT matice strategie laserového řezání

Tab. 10 Rychlost řezání metodou AWJ

Tab. 11 SWOT matice strategie řezání kapalinovým paprskem

Tab. 12 Porovnání parametrů laserů

Seznam symbolů a zkratk

<i>AWJ</i>	<i>řezání abrazivním kapalinovým paprskem</i>
<i>CNC</i>	<i>numerické řízení počítačem</i>
<i>cw</i>	<i>kontinuální režim laserového řezání</i>
<i>ECM</i>	<i>elektrochemické obrábění</i>
<i>PAM</i>	<i>řezání plazmou</i>
<i>PBM</i>	<i>řezání plazmou</i>
<i>pH</i>	<i>parametr kyselosti, zásaditosti</i>
<i>pw</i>	<i>pulsní režim laserového řezání</i>
<i>RO</i>	<i>rychlořezné oceli</i>
<i>SK</i>	<i>parametr drsnosti povrchu</i>
<i>SWOT</i>	<i>analýza silných a slabých stránek v závislosti na příležitostech a ohrožení</i>
<i>USM</i>	<i>řezání ultrazvukem</i>
<i>UV</i>	<i>ultrafialové záření</i>
<i>WEDM</i>	<i>řezání drátovou elektrodou</i>
<i>WIRE-EDM</i>	<i>řezání drátovou elektrodou</i>
<i>WJM</i>	<i>řezání čistým kapalinovým paprskem</i>
γ [<i>S.m⁻¹</i>]	<i>Měrná elektrická vodivost</i>