



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ NEKONVENČNÍCH PAPRSKOVÝCH
TECHNOLOGIÍ (LASER/VODNÍ PAPERSEK)
VE STROJÍRENSTVÍ

UTILIZATION UNCONVENTIONAL BEAM TECHNOLOGY (LASER/WATER JET) IN MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ HORÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA

BRNO 2008

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá využitím nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství. Cílem této práce je rozbor technologických možností metody laser a rozbor technologických možností metody vodního paprsku. Další cíl této práce je vzájemné porovnání obou metod nekonvenčních paprskových technologií a technicko-ekonomické vyhodnocení.

Klíčová slova

vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, řezání kapalinovým paprskem, řezání laserem, laser

ABSTRACT

This thesis deal with utilization unconventional beam technology (LASER/ water jet) in machine. The aim works is analysis technological possibility method laser and analysis technological possibility method water jet. Further aim of this work is mutual trade-off of the both methods unconventional beam technology and technical economic interpretation.

Key words

water jet, abrasive water jet, liquid jet cutting, laser cutting, laser

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69s. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/ vodní paprsek) ve strojírenství vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23. 5. 2008

.....
HORÁČEK Lukáš

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Karlu Osičkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah	6
Úvod	7
1 ROZBOR TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	9
1.1 Rozbor technologických možností metody vodní paprsek	15
1.1.1 Historie vodního paprsku	15
1.1.2 Obrábění vysokoenergetickým vodním paprskem (VKP)	16
1.1.2.1 Řezání čistým vodním paprskem	16
1.1.2.2 Řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí	17
1.1.3 Kvalita povrchu řezu	19
1.1.4 Fyzikální veličiny a technické parametry kapalinových paprsků	22
1.1.5 Úběr materiálu	25
1.1.6 Hlavní části zařízení vodním paprskem	27
1.2 Rozbor technologických možností metody laser	32
1.2.1 Historie laseru	32
1.2.2 Definice laseru a základní vlastnosti laserového paprsku.....	33
1.2.3 Druhy laserů a jejich dělení.....	36
1.2.4 Účinek laserového paprsku na materiál a úběr materiálu.....	38
1.2.5 Kritéria hodnocení kvality povrchu	41
1.2.6 Řezání a dělení materiálů laserem	43
2 VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ METOD LASERU A VODNÍHO PAPERU	45
2.1 Porovnání z hlediska standardního použití	45
2.1.1 Obrábění abrazivním vodním paprskem	45
2.1.2 Obrábění laserovým paprskem	47
2.2 Porovnání z hlediska obráběných materiálů	50
2.2.1 Obráběné materiály pro metodu laser	50
2.2.2 Obráběné materiály pro metodu vodní paprsek	54
2.3 Porovnání z hlediska extrémních možností použití	56
3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	60
3.1 Přednosti technologie vodního paprsku a perspektivy využití	60
3.2 Přednosti technologie laseru a perspektivy využití	61
3.3 Náklady na hodinu provozu stroje	62
3.4 Porovnání cen řezání vodním paprskem a laseru ..	63
Závěr	65
Seznam použitých zdrojů	66
Seznam použitých zkratk a symbolů	69

ÚVOD

Klasické metody třískového obrábění nejsou v řadě případů vhodné nebo se nedají použít k opracování materiálu a součástí a to především z důvodu tvarové složitosti tzv. těžkoobrobitelných materiálů. V různých oblastech strojírenské výroby nelze konvenční obrábění použít z hlediska kvality obrábění, obrobitelnosti materiálu, produktivity práce apod. Svůj význam má i ekologické hledisko výroby.

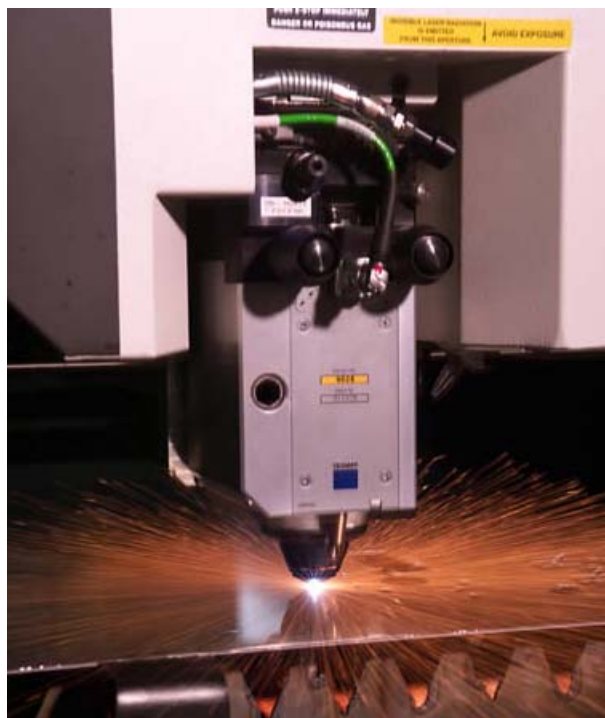
Pod souhrnný název nekonvenční způsoby obrábění zahrnujeme způsoby obrábění, které na rozdíl od klasického třískového obrábění v převážné míře nepoužívají mechanické práce pro úběr materiálu. K úběru materiálu využívají tepelných, elektrických, chemických, ultrazvukových, abrazivních a jiných fyzikálních jevů nebo jejich vzájemných kombinací převážně při bezsilovém působení na obráběný materiál a bez vzniku třísky. Bez ohledu na rozdílné principy a provedení obecně platí, že rychlost, možnosti a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběných materiálů a také materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný materiál. Nekonvenční metody umožňují provádět složité technologické operace s využitím mechanizace a automatizace pochodů. Umožňují zvýšení technologičnosti konstrukce, sériovosti výroby, omezení počtu zmetků a snížení pracnosti daných operací. U většiny nekonvenčních metod obrábění není obrobitelnost materiálu limitována mechanickými vlastnostmi (tvrdostí a pevností), ale je vázána především na fyzikální vlastnosti, jako je tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost, chemické složení apod. (21,18,19)

K rozvoji nekonvenčních metod přispěly zejména požadavky zbrojního a kosmického průmyslu na obrábění obtížně obrobitelných materiálů nebo složitých tvarů, které se postupem doby značně zdokonalovaly. Potřeby při výstavbě energetických zařízení (jaderných reaktorů a elektrárenských bloků), zařízení pro průmysl a zpracování ropy, petrochemie a základních organických výrob, pro dopravu, ale i zařízení pro potravinářský průmysl vyžadovaly ve stále větší míře konstrukční materiály se špičkovými užitnými vlastnostmi, tj. materiály s vysokými pevnostními parametry, špičkovými fyzikálními, chemickými a jinými vlastnostmi. Přitom konstrukční, technologické a jiné inovace výroby požadovaly spolehlivost, dlouhou životnost a snížení hmotnosti konstrukcí si postupně vynutily vývoj a jejich použití s mnohdy kvalitativně odlišnými vlastnostmi než jaké měly materiály dosavadní. Technologické zpracování těchto materiálů přineslo řadu obtíží, zvláště při obrábění, tyto materiály se proto označují jako materiály těžkoobrobitelné. Sortiment těžkoobrobitelných materiálů představuje mnoho desítek značek ocelí, slitin a litin, kovových i nekovových materiálů. Z kovových materiálů mezi ně patří konstrukční oceli zušlechtěné na vysokou pevnost a tvrdost, austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné, žáropevné a otěruvzdorné, vytvrditelné oceli a slitiny, niklové a kobaltové slitiny, vysokotavitelné kovy a jejich slitiny, litiny s vyššími mechanickými vlastnostmi, tvrzené a vysokolegované litiny, dále některé materiály vyráběné metodou práškové metalurgie. (21,18,19)

Nekonvenční technologie opracování materiálů doplňuje, anebo zcela nahrazuje klasické třískové metody obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Jednotlivé metody nekonvenčního obrábění se rychle rozšířily do všech odvětví strojírenské výroby a jejich další vývoj s časem neustále pokračuje.



Obr. 1 Detail řezací hlavy při hydroabrazivním řezání (7)

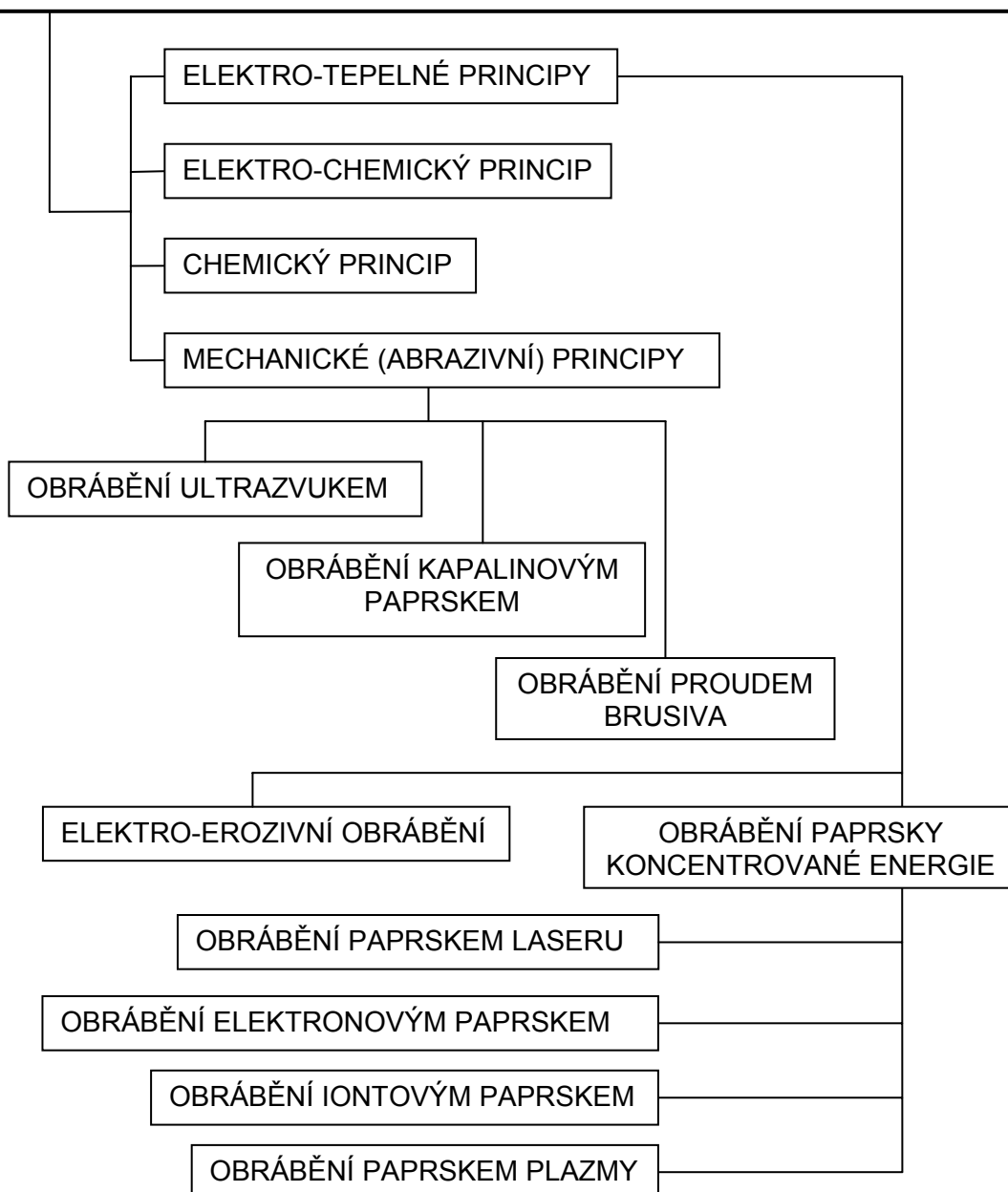


Obr. 2 Detail řezání laserem (6)

1 ROZBOR TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční technologie opracování materiálu jsou založeny na fyzikálních, chemických a elektrických jevech. Na rozdíl od mechanických metod obrábění, spojených s úběrem materiálu ve formě třísek, je při těchto metodách materiál ubírán většinou působením tepelných, chemických, elektrických, elektrochemických a jiných, popř. i kombinovaných pochodů. (4,25)

ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ PODLE VYUŽÍVANÉHO FYZIKÁLNÍHO PRINCIPU



Obr. 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění (4,25)

Tab. 1.1 Porovnání metod obrábění z hlediska úběru, měrné práce a příkonu (4,25)

způsob obrábění	úběr [mm ³ .s ⁻¹]	měrná práce [J.mm ³]	příkon stroje [kW]
soustružení; frézování	až 15000	1 až 10	5 až 50
broušení	80 až 1500	5 až 200	5 až 150
elektroerozivní obrábění	5 až 120	100 až 1000	až 15
elektrochemické obrábění	30 až 1000	1000 až 2000	80 až 2000
ultrazvukové obrábění	3 až 30	150 až 300	1 až 5
plazmové obrábění	1500	500 až 1000	50 až 150
obrábění laserem	30 až 500	80 až 150	5 až 40
obrábění kapalinovým paprskem	80 až 600	15 až 100	5 až 20
obrábění elektronovým paprskem	3	1500	5

Tab. 1.2 Vhodnost nekonvenčních technologií pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů (21)

materiál	obrábění							
	ultrazvukem	elektroerozivní	elektrochemické	chemické	laserem	plazmou	svazkem elektronů	vodním abrazivním paprskem
oceli vysoké pevnosti a tvrdosti	+	+	+	+	+	+	+	+
chromové oceli kalitelné, ferit. a poloferitické	1)	+	+	+	+	+	+	+
austenitické a feritickoaustenitické oceli		+	+	+	+	+	+	+
oceli a slitiny precipitačně vytvrditelné	+	+	+	+	+	+	+	+
slitiny na bázi Ni, Ni-Cr, Co aj.	2)	2)	+	+	+	+	+	+
titán a jeho slitiny		+	+	+	+	+	+	+
litiny vysoké tvrdosti	+	+	+	+				+
vysokolegované litiny	3)	+	+	+				+
slinuté karbidy	+	+			+	+	+	+
keramické materiály	+				+	+	+	+
křemíkové materiály	+				+	+	+	+
diamant	+				+	+	+	

poznámka:
 1) vhodné jen pro kalitelné oceli v kaleném, popř. zušlechtěném stavu
 2) nevhodné pro chromové slitiny
 3) nevhodné pro austenitické slitiny
 + vhodné k obrábění materiálu danou metodou

K základním nedostatkům sledovaných nekonvenčních metod obrábění patří především malá produktivita vlastních metod. Porovnání dosahovaných objemových výkonů (úběrů) Q_v [mm³.min⁻¹] technologií třískového obrábění a nekonvenčních metod obrábění je uvedeno v tab. 1.1, současně s hodnotami měrné práce E [J.mm⁻³], které charakterizují energetickou náročnost jednotlivých technologií. Přes nízkou produktivitu vlastního úběru, vyplývající z použitého

fyzikálního principu, umožňují vhodné přístupy dosažení vysokých úspor pracnosti a nákladů při výrobě zejména velmi složitých tvarů. (21)

Vhodnost jednotlivých nekonvenčních technologií pro opracování těžkoobrobitelných materiálů je v přehledu v tab. 1.2, typické případy prací vhodných pro tyto technologie jsou uvedeny v tab. 1.3.

Tab. 1.3 Příklady prací vhodných pro nekonvenční technologie (21)

operace	obrábění								
	ultrazvukem	elektroerozivní řezání drátem	elektroerozivní	elektrochemické	chemické	laserem	plazmou	paprskem elektronů	vodním abrazivním paprskem
tvarové řezání (dělení)		+				+	+	+	+
děrování	+		+			+	+	+	+
výroba drážek a zápichů			+			+	+	+	+
zahlubování	+		+	+					
obrábění tvarových ploch		+	+			+	+		
hloubení děr a dutin libovol. tvaru	+		+	+	+		+		
hloubení plošně velkých hlubokých dutin			+	+					
hloubení plošně velkých mělkých dutin					+				
opracování drobných součástí				+		+			
vrtání miniaturních děr a štěrbin	+		+			+		+	
dokončování vnějších a vnitřních válcových ploch broušením				+					
leštění				+	+				+
odstraňování otřepů			+	+	+				+
značková					+	+			
Poznámka: + vhodné pro danou operaci danou obráběcí metodou									

Obrábění ultrazvukem

Podstatou obrábění ultrazvukem je vymílání předepsaného tvaru brousícími zrn, rozptýlenými ve vhodné kapalině. Nástroj spojený s tzv. magnetostrikční hlavou uděluje brousícím zrnům, přiváděným v kapalině mezi nástroj a obrobek, vysokou kinetickou energii a tím umožňuje odebrání částic materiálu obrobku. Částice se odebírají pouze ve směru nástroje, a proto má obráběná plocha vždy tvar nástroje. (21)

Jako brusivo se používají zrna karborundu (SiC), bórkarbidu (B₄C), korundu (Al₂O₃) nebo diamantu velikosti 4 až 850 μm. Na velikosti zrn závisí výsledná drsnost povrchu a přesnost vyráběné díry. Úběr závisí na výkonu

ultrazvukového generátoru, velikosti a tvrdosti brousících zrn a na mechanických vlastnostech obráběného materiálu. (21)

Hlavní oblast využití ultrazvuku je při obrábění tvrdých a křehkých i elektricky nevodivých materiálů pro výrobu děr malých průměrů, dutin a děr nepravidelných tvarů apod. K tomu se používají ultrazvukové vrtačky. (21)

Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění je založeno na odebrání částic povrchových vrstev materiálu účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. Elektroerozivně lze obrábět jen elektricky vodivé materiály. Úběr materiálu nezávisí na jeho mechanických vlastnostech a na obrobitelnosti materiálu, závisí však na některých fyzikálních vlastnostech; kovy s vysokou teplotou tavení, velkou tepelnou vodivostí a velkým tavným teplem se obrábějí hůře, než kovy s opačnými vlastnostmi. Při elektroerozivním obrábění nepůsobí na obrobek žádná síla. Podle technického principu a technologických charakteristik se elektroerozivní obrábění dělí:

- na elektrojiskrové,
- na anodomechanické,
- na elektrokontaktní. (21)

Elektrojiskrové obrábění využívá erozivních účinků elektrické jiskry v dielektriku bez dotyku elektrod. Elektroda – nástroj, se pohybuje přímočaře kolmo na obráběnou plochu. Nástrojová elektroda má tvar vyráběné díry nebo dutiny; zhotovuje se z mědi, mosazi, wolframu, slitin hliníku nebo mědigrafitové kompozice. Jako dielektrikum se používá petrolej a transformátorový olej. (21)

Elektrojiskrové obrábění se používá k výrobě přesných děr malých průměrů (od 0,05 mm) a děr libovolných průřezů, k hloubení dutin apod. Přesnost elektrojiskrového obrábění závisí na rychlosti ubývání nástrojové elektrody. (21)

Při anodomechanickém obrábění se úběr materiálu děje převážně odtavováním materiálu elektrickými výboji obloukem, v menší míře také výboji elektrickou jiskrou a anodickým rozpouštěním kovu obrobku. Nástrojem je rotující kotouč nebo nekonečný ocelový pás nebo mosazný či ocelový drát. Vzdálenosti potřebné mezi nástrojem a obrobkem se dosahuje pasivační vrstvou, vznikající rozkladem pracovní kapaliny elektrickým proudem. Nejúčinnější kapalinou je křemičitan sodný (Na_2SiO_3) – vodní sklo. Při dotyku nástroje s obrobkem v místech vyčnívajících nad povrch se pasivační vrstva otírá a mezi nástrojem a těmito místy vzniká elektrický proud velké hustoty, přičemž se vyvýšeniny na obrobku odtavují. Zároveň na dalších místech zbavených pasivační vrstvy, které se nedotýkají nástroje, vzniká jiskrový výboj. (18,19,21)

Podstatou elektrokontaktní metody je odporové odtavování materiálu stykem nástrojové elektrody a povrchem obrobku. Je velmi málo rozšířena, její nevýhodou je poměrně hrubý povrch obrobené plochy. (21)

Elektrochemické obrábění

Podstatou elektrochemického obrábění je řízené elektrolytické rozpouštění materiálu obrobku, lokalizované na obráběnou plochu, anodou v tomto procesu je obrobek, katodou je libovolný kov (olovo, ocel, nerezavějící ocel, měď apod.) Elektrolyty jsou většinou alkalické, v menší míře kyselé. Na principu elektrolytického rozpouštění jsou založeny tyto alternativy:

- elektrochemické broušení rotující elektrodou,
- elektrochemické obrábění s proudícím elektrolytem,
- elektrochemické leštění,
- elektrochemické odstraňování otřepů. (19,21)

Při elektrochemickém broušení se mezi nástroj a obrobek přivádí elektrolyt čerpadlem. Nástrojem je kovový, zpravidla ocelový kotouč nebo diamantový brousící kotouč s kovovou vazbou. Kotouč se otáčí obvodovou rychlostí 20 až 30 m.s⁻¹. V elektrolytu je rozptýleno volné brusivo. Elektrolytem jsou různé alkalické roztoky. Úběr materiálu závisí na proudové intenzitě, vodivosti elektrolytu, na vzdálenosti nástroje a obrobku a na obvodové rychlosti nástrojového kotouče. Běžně dosahovaná přesnost rozměrů je ± 0,03 mm, lze však dosáhnout přesnosti až 0,005 mm, běžně dosažitelná drsnost povrchu $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. (21)

Elektrochemické broušení se používá zejména pro ostření nástrojů, je však výhodné i pro dokončování tvarově složitých součástí z těžkoobrobitelných materiálů. (19,21)

Elektrochemické obrábění s proudícím elektrolytem využívá rychlého proudění elektrolytu v mezeře mezi nástrojem (katodou) a obrobkem (anodou) k zamezení vzniku pasivační vrstvy. Elektrolyt musí současně odnášet uvolněné ionizované částice kovu obrobku; rychlost proudění elektrolytu se volí asi 30 m.s⁻¹. K dosažení optimálních podmínek práce musí být pro každý obráběný materiál nejvhodnější elektrolyt. Mezera mezi elektrodou a obrobkem je podle velikosti obráběné plochy a požadované přesnosti 0,125 až 0,75; u hloubících strojů s dokonalou regulací a stabilizací elektrolytu 0,05 až 0,08 μm . (21)

Elektrochemické obrábění je vhodné pro opracování tvarových ploch. Typickým případem uplatnění této metody je obrábění lopatek spalovacím turbín z chromnikových slitin, turbokompresorových lopatek z vysokolegovaných ocelí, při výrobě a opravě a opravě kovacích zápustek a lisovacích forem ze zušlechtěných a kalených ocelí apod. Dosažitelná přesnost opracování je až ± 0,01 mm, drsnost povrchu $R_a = 0,4$ až 1,6 μm . (21)

Při elektrochemickém leštění materiálu jde jen o úběr malého množství materiálu. Materiál se ubírá na vrcholcích nerovností povrchu a méně intenzivně v jejich prohlubních. Jako elektrolyt se používají zejména anorganické kyseliny. Běžně dosažitelná drsnost povrchu $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. (21)

Chemické obrábění

Podstatou chemického obrábění je odleptávání vrstev materiálu o tloušťce několika setin milimetru až několik milimetrů a povrchu obrobku. Jako leptací prostředek se používají kyseliny nebo alkalické roztoky. Na místa obrobků, která nemají být leptána, se nanáší ochranný – krycí nátěr z vhodných pryskyřic nebo laků v tloušťce do 2 mm nebo se speciálním tmelem přilepí pryžová maska. Hloubka odleptávané vrstvy je dána odolností nátěru nebo masky a může být až 12 mm i více. Přesnost rozměrů závisí na hloubce leptané vrstvy, při leptání do hloubky 1 až 3 mm se udává přesnost 0,05 mm. (21)

Chemické obrábění je ekonomicky výhodné pro úběr do malých hloubek u tenkostěnných a málo tuhých součástí, které by se při obrábění řeznými nástroji deformovaly, pro součásti členitých tvarů a velkých ploch, leštění povrchů aj. (21)

Obrábění paprskem plazmy

Obrábění paprskem plazmy je založeno na principu postupného odtavování materiálu. Plazma se vytváří pomocí plazmové pistole. Paprsek plazmy, který dosahuje teploty 16000 až 20000 °C, odtavuje a částečně odpařuje obráběný materiál. Obrobený povrch je poměrně hladký, dosahovaná přesnost odpovídá hrubovacím operacím při obrábění řeznými nástroji. Výkon obrábění plazmou je ovlivněn teplotou tavení a tepelnou vodivostí obráběného materiálu. (21)

Obrábění svazkem paprsků elektronů

Podstatou obrábění svazkem paprsků elektronů je využití energie paprsků elektronů soustředěných na velmi malou plochu obrobku. V místě dopadu se kinetická energie paprsků mění na energii tepelnou, kterou se obráběný materiál taví a vypařuje. Obrobek musí být umístěn ve vakuové komoře. Přesnost řezání a drážkování je $\pm 0,0015$ až $\pm 0,0025$ mm. Lze obrábět libovolný materiál bez zřetele na jeho mechanické či fyzikální vlastnosti. (21)

Obrábění iontovým paprskem

Obrábění iontovým paprskem je založeno na účinku kinetické energie iontů působících ve vakuu na opracováváný materiál. Velikost úběru materiálu je závislá na hustotě proudu iontů. Zdrojem proudu iontů je obvykle argon, který je ionizován elektrony vyzařovanými z katody. Ionty s vysokou kinetickou energií působí na povrch obrobku a vytlačují atomy materiálu pružnou srážkou částic. Při této metodě se nevytváří teplo a nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy. (25)

Technologie obrábění pomocí iontového paprsku se dnes převážně využívá pro přípravu matric, při výrobě integrovaných obvodů a při čištění a hlazení povrchu. Pomocí iontového paprsku se přes speciální masku provádí gravírování ve výrobě integrovaných obvodů a plazmové a reaktivní leptání v oblasti výroby polovodičů v submikronové oblasti. Lze obrábět prakticky všechny materiály včetně optického skla, diamantu apod. (25)

1.1 Rozbor technologických možností metody vodní paprsek

1.1.1 Historie vodního paprsku

Historie řezání vodním paprskem má kořeny již v daleké minulosti, i když rozvoj řezání vodním paprskem propuklo v polovině dvacátého století, ale doznala širokého uplatnění až v osmdesátých letech, kdy se do paprsku vody začala přidávat abraziva. Skutečný začátek aplikace řezání vodním paprskem sahá do devatenáctého století, kdy kalifornští zlatokopové kolem roku 1870 používali tuto metodu k odstranění nánosů písku a vrstev kamení. Jednalo se pouze o nízkotlakové systémy. Dvacátá léta devatenáctého století jsou označována za začátek používání vodních trysek k odstranění písku a horniny v denní stavební činnosti. Tyto trysky dosahovaly velkých rychlostí toku s tlakovou úrovní několika desítek až stovek barů. První patent použití vodního paprsku v Rusku byl na vrtání děr v báňském průmyslu. Rozvoj metody a její pozdější uplatnění měl na starost Petr Tupitsyn, který pracoval v Doněcku na Ukrajině v uhelných dolech. V roce 1936 použil vodní paprsek k řezání děr uhelných slojí. Mezi lety 1950 až 1960 vznikla potřeba těžít uran, vodní paprsek eliminoval rizika přidružená k těžbě jako je záření. Tím se oživil zájem o použití vody jako rezného materiálu s tryskami o vysokém tlaku. (38,47,49)

V padesátých letech dvacátého století experimentoval inženýr lesního hospodářství Dr. Norman Franz s formami řezání vodním paprskem. Byl první osobou, která studovala použití velmi vysokého tlaku (UHP – ultrahigh-pressure) vody jako rezného nástroje. Podmínka UHP je definována tlakem větším jak 30000 liber na čtvereční palec (PSI = 6895 Pa). Proto je Dr. Norman Franz považován za otce vodního paprsku. Začátkem šedesátých let minulého století dokázal získat krátkodobé výbuchy vysokého tlaku, které byly mnohonásobně vyšší než aktuální hodnoty tlaků. Pozdější studium věnoval kontinuálnímu proudu vody. První komerční aplikace přišla na svět v roce 1971. Technologie vodního paprsku postoupila v sedmdesátých letech, kdy Dr. Mohamed Hashish vytvořil techniku přidání abraziva k vodnímu paprsku, tím se umožnilo řezání i materiálů s vyšší pevností a s větší šířkou materiálu. (38,47,48)



Obr. 1.1 Těžba zlata na potoce Bonanza Creek na konci 19. století (48)

1.1.2 Obrábění vysokoenergetickým kapalinovým paprskem (VKP)

Fyzikální podstata řezání materiálů paprskem kapaliny vychází z úvahy, že paprsek kapaliny pohybující se dvojnásobnou až čtyřnásobnou rychlostí zvuku lze považovat z hlediska jeho účinků za pevné těleso. Proces řezání probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny prohlubeň, která se mění v otvor, v druhé etapě dochází k prohlubování a k vytváření řezné spáry. Při nárazu paprsku kapaliny na obrobek dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše, čímž vznikají v řezaném materiálu rázové vlny, a k rychlé destrukci materiálu obrobku na hranici zrn, ke vzniku mikrotrhlin. Mikrotrhliny se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří, a tím dochází k rozrušování obráběného materiálu. K destrukci řezaného materiálu dochází také turbulentním prouděním kapaliny ve spáře s účinkem kavitačních bublin. Pro řezání kovových materiálů, keramiky aj. se do paprsku kapaliny přidávají brousící zrna. K popsáním účinkům paprsku kapaliny přistupuje ještě abrazivní účinek brousících zrn. Jako kapalina se používá většinou upravená voda, k vytvoření potřebné rychlosti proudění se uplatňuje tlak 200 až 600 MPa. (21)

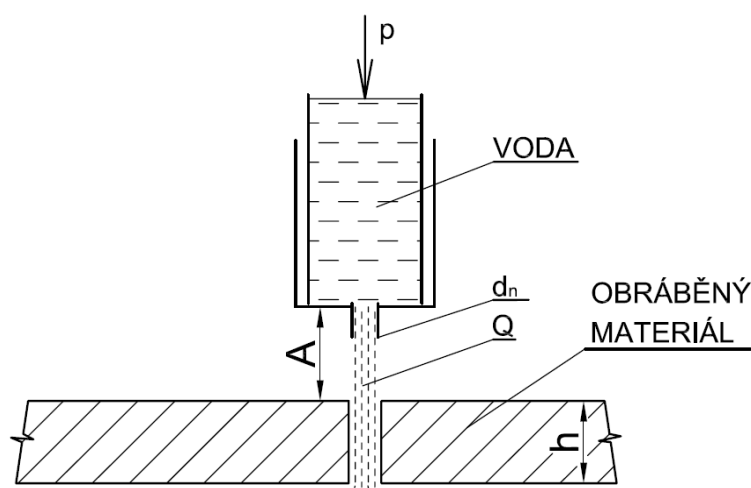
Technologie obrábění materiálu pomocí vysokoenergetického kapalinového paprsku, často označovaná též jako hydroabrazivní obrábění, je speciální způsob obrábění, využívající abrazivního účinku vysokotlakého vodního paprsku pro odstraňování (dělení) materiálů. Vzhledem ke svým mimořádným vlastnostem našla tato technologie velmi rychlé uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu a v důsledku značné univerzality i v celé řadě dalších průmyslových oborů. Uvedená metoda se využívá dnes nejčastěji ve dvou základních provedeních:

- řezání čistým vodním paprskem,
- řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí. (4,13,18,19,21,22,26)

1.1.2.1. Řezání čistým vodním paprskem

Zařízení pro obrábění vodním paprskem se dnes používá zejména pro řezání nekovových materiálů, jako jsou lamináty, kevlar, azbestocement, grafitové kompozity, sklotextil a gumotextil. Rychlost řezání se pohybuje v rozsahu 5 m.min^{-1} (kevlar, lamináty) až 400 m.min^{-1} (papír, lepenky apod.) (4,25)

Tlak kapaliny je možno plynule regulovat podle technologických potřeb a druhu obráběného materiálu. Vodní trysky jsou vyráběny ze safíru, rubínu nebo diamantu. Velikostní řada trysek zajišťuje různou kinetickou energii paprsku a určuje také počet pracovišť, které je možno současně napájet z jednoho zdroje. Životnost trysek při nadzvukové rychlosti výtoku kapaliny (asi 1000 m.s^{-1}) je přímo úměrná množství minerálů obsažených ve vodě a je v rozmezí $50 \div 500$ hodin. (4,25)



Obr. 1.2 Schéma principu řezání čistým vodním paprskem (25)

Tab. 1.4 Základní parametry řezání čistým vodním paprskem (25)

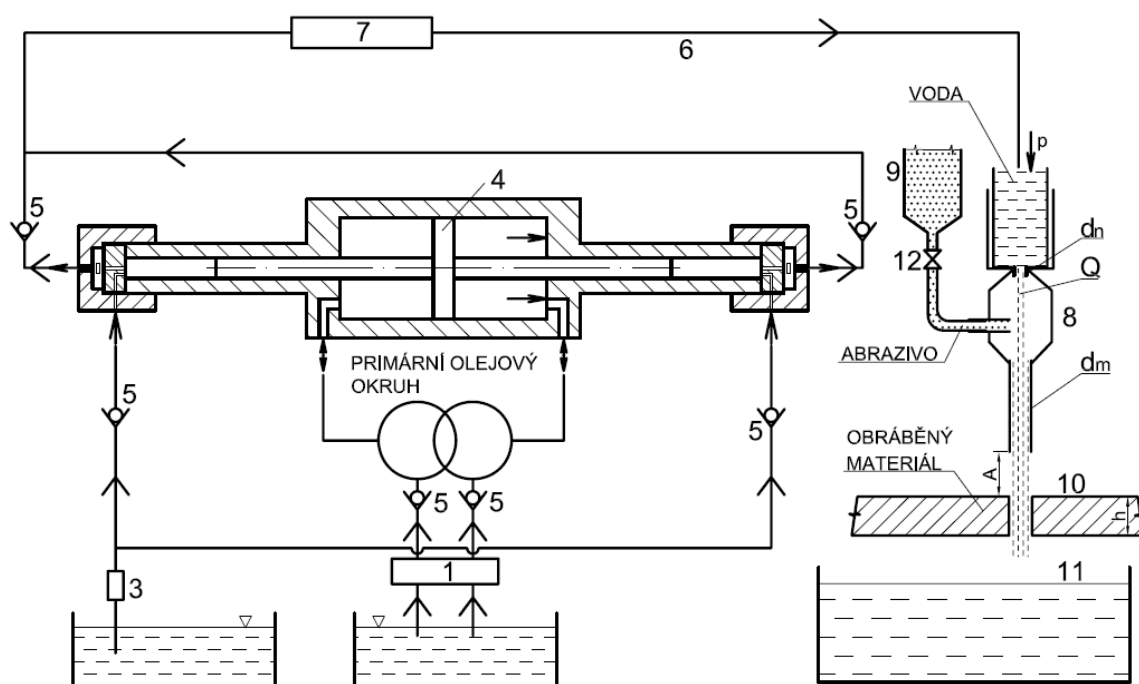
pracovní tlak vody	$p = 60 \div 400 \text{ MPa}$
průměr vodní trysky	$d_n = \text{max. } 0,3 \text{ mm}$
množství vody	$Q = \text{max. } 2,8 \text{ l.min}^{-1}$
vzdálenost trysky od materiálu	$A = 2 \div 70 \text{ mm}$

1.1.2.2 Řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí

Při této variantě VKP se zvyšuje účinnost paprsku přimísením abrazivních zrn do proudu vody. Používají se jak syntetické, tak i přírodní abrazivní materiály jako jsou křemičitý písek používaný při výrobě skla, korundová nebo SiC zrna používaná k výrobě brusných nástrojů, granát, olivín a jiné o zrnitosti (0,2 ÷ 0,5) mm. Výstupní abrazivní tryska musí odolávat vysokým abrazivním účinkům a je vyráběna z karbidu wolframu, keramických materiálů na bázi korundu nebo z kubického nitridu bóru. Při použití běžných parametrů, tj. tlaku vody 200 MPa a křemičitého písku o zrnitosti 0,4 mm dosahuje životnost trysky max. 8 hodin. (4,14,25,39)

Rychlost řezání se obvykle stanovuje optimalizační zkouškou. Vzdálenost výstupní trysky od materiálu se volí co nejmenší z důvodů minimální šířky spáry a tím i dosahované přesnosti. (4,25)

Schéma principu řezání vodním paprskem s příměsí abraziva je zobrazen na obr. 1.3. Základem primárního okruhu je vysokotlaké olejové čerpadlo (pozice č.1) dodávající pracovní tlak max. do 20 MPa. Olej je tlačěn přes uzavírací ventil (pozice č. 2), který umožňuje mžikové přerušování průtoku střídavě před i za píst hydraulického zesilovače tlaku – multiplikátor (pozice č.4). Tímto tlakem působíme na plochu velkého pístu, který je spojen se dvěma pístnicemi o daleko menším průměru, z nichž každá může vytvořit v tlakové komoře tlak až 20-krát větší (až 400 MPa). Velikost zesílení tlaku závisí na poměru velikosti průměru velkého pístu k průměru obou stejných pístnic. Do obou tlakových komor je přiváděna voda přes filtrační jednotku (pozice č. 3) (zde se odlučují pouze pevné částice o rozměrech nad 10 μm). (18)



Obr. 1.3 Schéma principu řezání vodním paprskem s příměsí abraziva (18)

Sekundární okruh je tvořen zpětnými ventily (pozice č.5), dále vysokotlakým akumulátorem (pozice č. 7) ve formě pancéřované vysokotlaké komory, jehož úkolem je tlumit rázy vysokotlaké technologické vody, které vznikají z jedné a druhé tlakové komory. Z něhož je přetlaková voda požadovaného konstantního tlaku vedena pancéřovým potrubím (pozice č. 6) do směšovací komory zakončené safírovou tryskou průměru 0,25 až 2 mm (pozice č. 10), ze které vytéká vodní paprsek nadzvukovou rychlostí 700 až 1200 m.s⁻¹. Pod pevnou tryskou se pohybuje stůl s rezným materiálem (pozice č. 10), pod kterým je vodní nádrž (pozice č.11). (18)

Celá metodu, oproti metodě řezání čistým vodním paprskem je zdokonalena zabudovaným zásobníkem brusiva (SiC, diamantový prach, elektrokorund – spotřeba asi 1kg.min⁻¹ (pozice č. 9), které je podáváno přes ventil s klapkou a s mžikovým přepouštěním (pozice č. 12) do speciálně tvarované otěruvzdorné směšovací komory (pozice č. 8). Zde dochází ke smíšení vody s brusivem. Hybnost vodního paprsku se přenáší na brusivo, čímž se pracovní výkon řezání umocňuje. (18)

Tab. 1.5 Základní parametry řezání vodním paprskem s příměsí abraziva (25)

pracovní tlak vody	$p = 200$ až 300 MPa
průměr vodní trysky	$d_n \geq 0,25$ mm
množství vody	$Q = 2$ až 6 l.min ⁻¹
množství abraziva	$M = 0,2$ až $1,5$ kg.min ⁻¹
vzdálenost výstupní trysky od materiálu	$A = 2$ až 10 mm
průměr výstupní trysky	$d_m = 0,8$ až 2 mm

Tab. 1.6 Příklady použití metody řezání vodním paprskem s přísadou abraziva (25,26)

druh materiálu	tloušťka [mm]	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]
azbest	60	300 až 800
optická skla	až 160	100 až 150
vrstvená skla	až 150	100 až 200
uhlíkové, kevlarové kompozity	až 100	10 až 100
nerez ocel	až 30	70 až 100
titan	až 70	30
hliník	50	80 až 100
keramika	až 100	300 až 2000
izolační materiály (pertainax, texgumoid apod.)	až 80	10 až 2000

1.1.3 Kvalita povrchu řezu

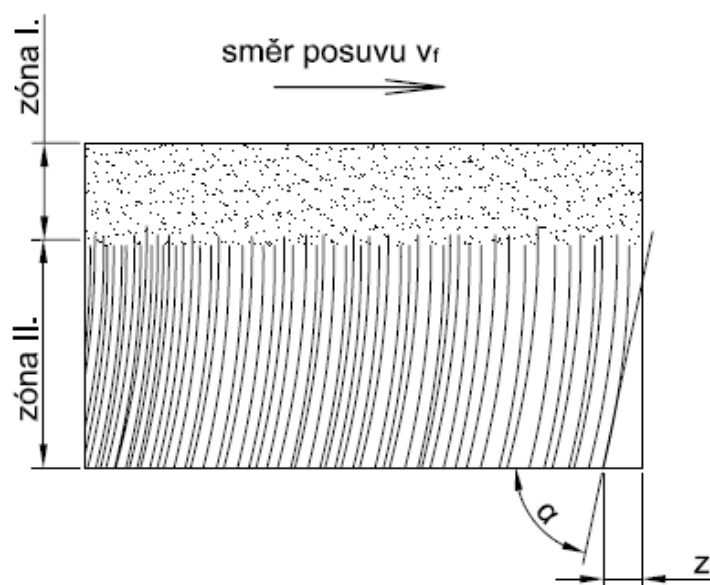
Měřítkem produktivity pro řezání materiálu je zde plošný výkon obrábění (1.1), kde h značí hloubku řezu a v_f rychlost posuvu řezání. (4)

$$Q_s = v_f \cdot h \quad (1.1)$$

V tab. 1.7 jsou doporučené hodnoty plošného výkonu obrábění pro vybrané obráběné materiály. Význam pro hodnocení procesu obrábění má mimo jiné i úhel výstupu paprsku α a hodnota zpoždění paprsku z , viz obr. 1.4. Z hlediska stavu obrobeného povrchu lze na ploše řezu pozorovat dvě zóny, obr. 1.4. Zóna I. Na straně vstupu paprsku do materiálu vykazuje matný vzhled s drsností povrchu $R_a = 2,0 \div 5,5 \mu\text{m}$. Pro zónu II. na straně výstupu paprsku je charakteristické žlábkování s délkou vlny 1 až 2 mm a výškou nerovností v extrémních případech až do 0,8 mm. Absolutní i poměrná šířka obou zón závisí především na tlaku pracovní kapaliny, rychlosti řezání a vzdálenosti nástroje od povrchu obrobku. (4)

Tab. 1.7 Doporučené hodnoty plošného výkonu obrábění pro vybrané materiály (4)

materiál	plošný výkon Q_s [mm ² .min ⁻¹]
ocel	50 až 120
slitiny Ti	80 až 150
slitiny Al	150 až 300
sklo	800 až 1200
pracovní podmínky: abrazivo – granátový prach 0,7 kg.min ⁻¹ ; $p_{\text{H}_2\text{O}} = 200 \text{ MPa}$; $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 4,5 \text{ l.min}^{-1}$	



Obr. 1.4 Zóny řezu vodního paprsku (16,25)



Obr. 1.5 Skupiny kvalit řezu vodním paprskem (32)

Kvalita povrchu řezu paprsku se dělí do pěti skupin a to podle výsledné kvality. Na obr. 1.5 je ukázka pěti skupin kvality řezu, kde 1 je nejhorší kvalita a naopak 5 je nejlepší kvalita řezu.

Kvalita povrchu přímo souvisí s rychlostí řezání. Při vysokých rychlostech posuvu se zvyšuje zakřivení a po celé hloubce řezu jsou viditelné rýhy. V tabulce 1.8 jsou ukázány hodnoty sbíhavosti hran při řezání a dosahovaná přesnost pro vybrané tloušťky materiálu.




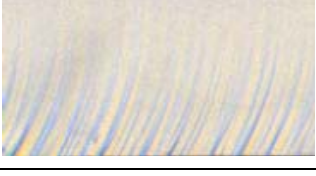
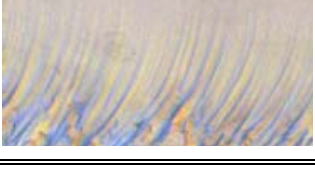
Kvalita řezu je definována vyhodnocovacím systémem označovaným od 1 do 5. V tabulce 1.9 je specifikace každého stupně kvality se slovním zhodnocením a ukázkou řezu.

Tab. 1.8 Hodnoty sbíhavosti hran a dosahované přesnosti pro řezání vodním paprskem s příměsí abraziva (1)

tloušťka materiálu [mm]	sbíhavost hran		přesnost	
	kvalita 5 [mm]	kvalita 3 [mm]	kvalita 5 [mm]	kvalita 3 [mm]
3,05	0,051	0,127	±0,076	±0,127
6,35	0,089	0,191	±0,127	±0,254
12,7	0,076	0,254	±0,178	±1,27
19,05	0,089	0,305	±0,254	±0,508
25,4	0,102	0,356	±0,381	±0,762
38,1	0,152	0,406	±0,508	±1,016
50,8	0,203	0,457	±0,635	±1,143
76,2	0,254	0,508	±0,762	±1,27
101,6	0,305	0,508	±0,762	±1,397

Poznámka: Původní hodnoty v palcích, přepočteno na milimetry (1 inch = 25,4 mm)

Tab. 1.9 Systém označení kvality řezu (1)

řezná kvalita	slovní hodnocení	obrázek řezu
5	vynikající povrch, žádné rýhování, nejpřesnější	
4	velmi dobrý povrch, minimální rýhování	
3	dobrý povrch, rýhování ve spodní polovině řezu, nejběžnější použití	
2	značné rýhování	
1	velice špatný povrch, zřídka používáno	

1.1.4. Fyzikální veličiny a technické parametry kapalinových paprsků

Předpokladem úspěšné aplikace kapalinového paprsku v praxi je vhodná volba kombinace veličin a parametrů, které určují jeho efektivitu. Fyzikální veličiny jsou spojovány především s teoretickým popisem, protože v praxi jsou výrazně limitovány technickými možnostmi použitých zařízení a komponent. Mnohdy pak získávají charakter technických parametrů. Rozlišení je možno také definovat tak, že veličiny popisující účinek kapalinového paprsku lze považovat za fyzikální tehdy, je-li jejich změna v oblasti technicky realizovatelných hodnot spojitá. Nabývá-li v oblasti technické realizace veličina pouze diskrétních hodnot, je považována za technický parametr. Další možná interpretace je taková, že všechny fyzikální veličiny se při technické realizaci stávají technickými parametry procesu. Protože z hlediska možných parametrů či veličin jsou kapalinové paprsky podmnožinou tzv. „vstříkovaných“ abrazivních kapalinových paprsků, je výčet právě pro tyto abrazivní kapalinové paprsky. (13)

Průměr kapalinové trysky je fyzikální veličina, která je v praxi z technických důvodů proměnná pouze v diskrétních hodnotách (nejsou vyráběny libovolné průměry trysek, ale pouze určité řady). Z technického hlediska je navíc změna této veličiny za provozu prakticky neuskutečnitelná. V případě abrazivního paprsku je situace ještě složitější, neboť mezi průměrem kapalinové trysky, průměrem usměrňovací trubice pro abrazivo a střední velikostí částic abraziva je nutno dodržet určité relace. Proto má průměr kapalinové trysky charakter technického parametru, i když ve výpočtových modelech pro stanovení porušení materiálu kapalinovým paprskem je spojitou veličinou. (13)

Vzdálenost výstupního ústí kapalinové trysky (resp. abrazivní trubice) od povrchu materiálu je fyzikální veličina, pro kterou závislost účinku kapalinového paprsku dosahuje výrazného maxima. Pro nepulzující kapalinový paprsek leží toto maximum v blízkosti výstupního ústí kapalinové trysky (či usměrňovací trubice abrazivního paprsku). Je-li pohybové zařízení uzpůsobeno tak, aby bylo možno tuto veličinu definovaným způsobem měnit, stává se vhodnou pro řízení procesu obrábění; výrazně kvantitativně i kvalitativně ovlivňuje působení kapalinového paprsku na obrobek. Většinou je však vzdálenost výstupního ústí od povrchu materiálu během procesu neměnná, což z ní dělá technický parametr. (13)

Úhel dopadu paprsku vzhledem k normále k povrchu materiálu je fyzikální veličina, která ovlivňuje sklon drážky vzhledem k rovině kolmé k povrchu materiálu a obsahující tečnu k trajektorii stopy paprsku. Ovlivňuje také hloubku dna drážky pod povrchem materiálu (pokud se nejedná o prořezávání materiálu) a jejími změnami je možno provádět korekce kolmosti stěn drážky při řezech, zejména v zakřivených částech dráhy, kde působí na částice paprsku v drážce odstředivá síla (především u abrazivního paprsku). Řízení úhlu na obráběcích strojích a kapalinovými paprsky je náročný technický problém i při zavedení kvalitních vztahů popisujících závislost sklonu stěn drážky na nastavených technických parametrech kapalinového paprsku, obráběcích trajektoriích apod. Problém je náročný z důvodu postupné ztráty koherence paprsku při průchodu obrobkem (těžko definovatelná korekce na rozšíření či zúžení aktivní stopy

paprsku) i z důvodu obtížně předvídatelného vlivu nehomogenit obráběného materiálu na odchylení flexibilního nástroje z původního směru. (13)

Tlak kapaliny před tryskou je fyzikální veličina, která významně ovlivňuje výkonové i kvalitativní projevy kapalinového paprsku. Jsou-li ostatní technické parametry ve svých změnách výrazně limitovány nebo udržovány konstantní, tato veličina je z technického hlediska v podstatě postačující k řízení procesu z hlediska kvantitativního i kvalitativního. Je vhodná k regulaci, neboť existují dostatečně přesné snímače i akční členy ovládající stavové veličiny čerpadel. Je možno buď udržovat definovanou hodnotu tlaku kapaliny, nebo používat jeho plynulou změnu podle technologických potřeb. (13)

Rychlost pohybu stopy paprsku po povrchu materiálu je rovněž fyzikální veličina s výrazným vlivem na kvalitu i kvantitu porušení materiálu. Podobně jako tlak je tato fyzikální veličina použitelná jako technický parametr umožňující regulaci hloubky porušení materiálu. Je možné zajistit snímání okamžité hodnoty i konstruovat pohony zajišťující definovaný pohyb materiálu resp. Pohyb trysky, v níž vzniká paprsek, s téměř plynule měnitelnou rychlostí. Regulace či řízení může probíhat v obou základních módech jako u tlaku: lze udržovat konstantní hodnotu nebo veličinu plynule měnit definovaným způsobem na základě potřeb technologického procesu. (13)

Dosud uvedených pět fyzikálních veličin, resp. technických parametrů, se týká všech kapalinových paprsků, tedy i bez přísad. Kapalinové paprsky bez přísad však nemají v současné praxi takové přímé využití, při kterém by bylo možné plně využít možností přímého řízení technologických parametrů. Jsou používány pro dělení velmi měkkých materiálů v textilním, papírenském nebo potravinářském průmyslu, plastů, gumy, kůže a voštinových, pěnových a jiných měkkých poddajných materiálů, u kterých je tloušťka zanedbatelná a kvalita povrchu řezné drážky se při zvyšování tlaku kapaliny nad určitou minimální hodnotu prakticky nemění pro široký obor řezných rychlostí. U abrazivního vodního paprsku umožňuje automatizace obráběcího procesu využití skrytého potenciálu tohoto nástroje (obecnější název abrazivní kapalinový paprsek se užívá méně, protože zpravidla je při aplikacích v praxi jako nosné médium pro abrazivo používána voda, neboť je to ekologicky i ekonomicky nejpříjemnější kapalina). Využití teoretického modelu založeného na fyzikálních veličinách při řízení a automatizaci obrábění materiálů abrazivním vodním paprskem vysoké energie zahrnuje jak predikci či regulaci odpovídajících technických parametrů, tak výpočet jejich změny na základě snímaných veličin v dialogovém režimu řízení. Při automatizaci pracovišť s abrazivním vodním paprskem je nutno vzít v úvahu, mimo výše uvedené, i další specifické technické parametry (fyzikální veličiny), které ovlivňují kvalitu a kvantitu porušení materiálu. (13)

Množství abrazivního materiálu přidávaného do paprsku je fyzikální veličina, kterou lze ovlivňovat hloubku porušení materiálu i kvalitu vzniklého povrchu. Většinou je však v praxi používáno pouze jedno nastavení, což redukuje tuto veličinu na technický parametr. Existují ovšem zařízení, která relativně plynule a definovaně dávkuje abrazivní materiál do paprsku, a umožňují i změnu tohoto parametru za provozu. Proto je potencionálně možné začlenit regulaci (případně i řízení) dávkování množství abraziva do automatizačního procesu. Do modelu je tento parametr zaveden jako fyzikální veličina, ovšem v návaznosti na ostatní veličiny, neboť proces porušení materiálu je jednoznačně

determinován teprve konkrétní kombinací hodnot všech veličin uvedených v tomto výčtu. (13)

Střední velikost zrna abrazivního materiálu (zrnitost abraziva) má velký vliv na kvalitu vzniklého povrchu a ovlivňuje hloubku porušení materiálu. Jedná se v podstatě o technický parametr, protože i tato veličina je v praxi determinována parametry materiálu, který je dostupný. Z principu není možno tento parametr spojitě měnit, i když do výpočtových modelů je možno jej zahrnout jako spojitě proměnnou fyzikální veličinu. Střední zrnitost dodávaných materiálů je určena technologickými postupy dodavatelů a nabývá diskretních hodnot určitých řad. Veličina (parametr) ovšem úzce souvisí s nutným průměrem kapalinové trysky a nutným průměrem usměrňovací trubice, neboť při dané zrnitosti abraziva a optimální kombinaci průměrů kapalinové trysky a usměrňovací trubice existuje optimální hmotnostní přítok abraziva do systému tak, aby byla energie kapaliny maximálně efektivně využita. (13)

Průměr usměrňovací (abrazivní) trubice patří k technickým parametrům. Za provozu jej není možno měnit ani na zařízeních, které změnu umožňují. Do výpočtového modelu ovšem může být zahrnut jako spojitě proměnná fyzikální veličina. Má vliv na šířku řezu paprsku a spolu s průměrem kapalinové trysky, střední velikostí zrna abrazivního materiálu a hmotnostním průtokem na zásadní význam pro účinnost paprsku a kvalitu vytvořeného povrchu. (13)

Délka usměrňovací (abrazivní) trubice je další z technických parametrů, který ovlivňuje kvalitu vytvořeného povrchu. Ve výpočtovém modelu může být použit jako spojitá fyzikální veličina, ale v praxi není použitelný pro účely regulace či řízení, neboť jeho změna vyžaduje fyzickou výměnu trubice (jako u průměru), a to je poměrně náročný proces i u těch zařízení, která to umožňují. (13)

Kvalita abrazivního materiálu má také charakter spíše technického parametru než fyzikální veličiny, i když je možno jí jako takovou zahrnout do výpočtových modelů. Výrazně ovlivňuje výkon abrazivního paprsku a kvalitu vytvořeného povrchu, ale jedná se o parametr velmi těžko stanovitelný i ovladatelný, neboť se vymyká možnostím přímého řízení. Většinou je totiž používán přírodní materiál (granát, olivín), u něhož jsou sice vlastnosti zjistitelné, ovšem dané lokalitou naleziště. Z ekonomických důvodů zpravidla není možné, aby byly abrazivní materiály zkvalitňovány náročnými technologickými postupy, proto se používají v přírodní formě; jsou pouze jednoduchými postupy pročištěny, vytříděny a rozsítovány. Nejsou-li odstraněna vnitřní napětí a defekty, významné příčiny porušení abrazivního materiálu v procesu vzniku i působení abrazivního paprsku, dochází k významnému poškozování abrazivních částic. Míra tohoto porušování je ovšem v přímé relaci s účinností paprsku a kvalitou vzniklého povrchu. Tento parametr však vůbec není vhodný pro začlenění mezi regulované nebo řízené parametry kapalinového paprsku. (13)

Na základě výpočtu fyzikálních veličin, resp. technických parametrů, a jejich vlivu na kvalitu technologického procesu či jejich regulovatelnosti je možno vybrat soubor veličin (parametrů) mimořádně vhodných pro řízení technologie kapalinového paprsku. V pořadí jak byly uvedeny, tlak kapaliny před tryskou, rychlost pohybu stopy paprsku po povrchu materiálu a množství abrazivního materiálu přidávaného do paprsku při předchozím rozboru se jedná o tyto

parametry; vzdálenost výstupního ústí trysky (resp. usměrňovací trubice) od povrchu materiálu, úhel dopadu paprsku. (13)

1.1.5 Úběr materiálu

Provozní charakteristiky vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku, které ovlivňují úběr materiálu, kvalitu opracovaného povrchu a účinnost procesu jsou:

- tlak vody, rychlost proudění a rozměry otvory dýzy,
- vzdálenost mezi dýzou a obrobkem,
- úhel sklonu paprsku,
- druh a velikost brusiva. (4,13,21,22,39)

Hydraulické parametry technologie vysokotlakého vodního paprsku vychází z teorie mechaniky tekutin. Tlak kapaliny je v procesu vodního paprsku určený Bernoulliho rovnicí pro proudění nestlačené kapaliny:

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} \quad (1.2)$$

Kde v je rychlost proudění, p je tlak kapaliny a ρ hustota kapalného média. Tlak kapaliny je přímo úměrný čtverci řezné rychlosti, který je úměrný ke kinetické energii ($1/2 \cdot m \cdot v^2$) částice o hmotnosti m . Následkem toho tlak vodního paprsku určuje přesnou kinetickou energii částice ve vodním paprsku. Při vyšších tlacích průměrná kinetická energie molekul vody je vyšší a o mnoho snadněji porušuje molekulární vazby v materiálu obrobku. Z toho vyplývá, že tlak čistého vodního paprsku potřebný pro řezání se musí zvyšovat se zvýšením tvrdosti obrobku. (22)

V současnosti nejvyšší hodnoty tlaku vody pro řezání kovových materiálů dosáhly hodnotu 690 MPa pro čistý vodní paprsek. Jestli je tlak vody adekvátní pro řezání a pro daný materiál a zároveň je udržován jako koherentní, potom intenzita úběru materiálu je určena koeficientem proudění. (22)

Na základě rovnice (1.2) se rychlost proudění určí objemem protékající kapaliny jako objemový koeficient proudění Q_s vztahem:

$$Q_s = 24 \cdot C_D \cdot D^2 \cdot \sqrt{0,22 \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (1.3)$$

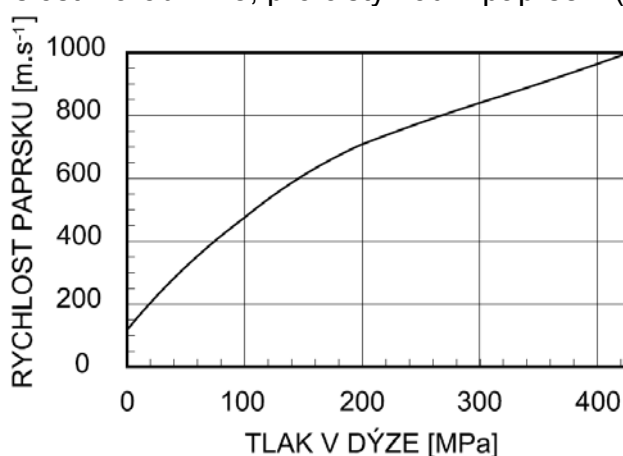
Kde C_D je výtokový koeficient dýzy, D je průměr štěrbin v dýze. Typický výtokový koeficient pro safírovou anebo diamantovou dýzu má hodnotu 0,7. Tabulka 1.10 uvádí používané tlaky vody a dosahované rychlosti proudění pro výtokový součinitel 0,7. (22)

Tab. 1.10 Rychlost proudění pro výtokový koeficient dýzy 0,7 (22)

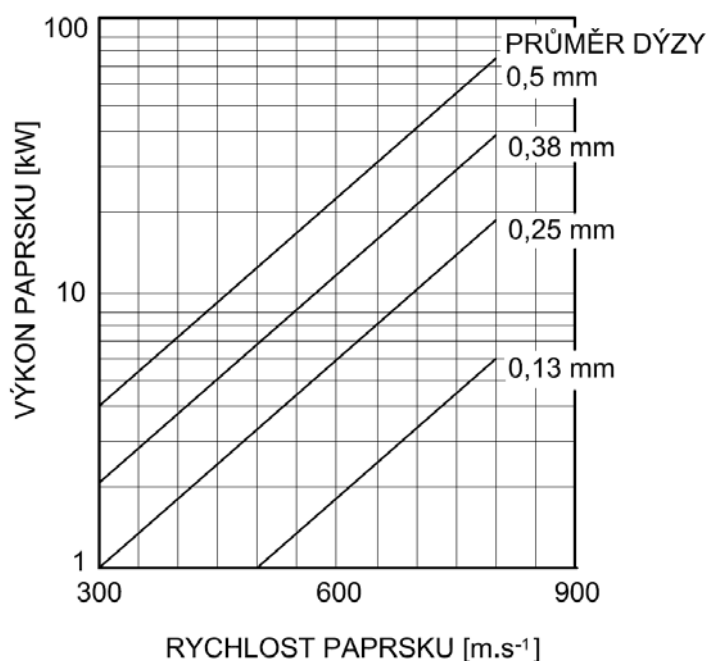
tlak vody [MPa]	průměr štěrbin [mm]	rychlost proudění [l.min ⁻¹]
380	0,15	0,64
	0,30	2,60
275	0,15	0,17
	0,15	2,20
200	0,30	0,49
	0,15	2,00

Rychlost proudění a tlak vodního paprsku mají různý vliv na řezání. Rychlost proudění ovlivňuje intenzitu úběru materiálu a také ovlivňuje mechanismus řezání. Zvýšení tlaku vody vyvolá vyšší rychlost proudění, zvyšuje se celková energie v dýze, čímž se vytváří předpoklady pro řezání silnějších materiálů. Na druhé straně zvýšení tlaku vody vyžaduje výkonnější zařízení. Zvýšení tlaku vody zároveň zlepšuje kvalitu rezných hran při řezání. (4,22,26)

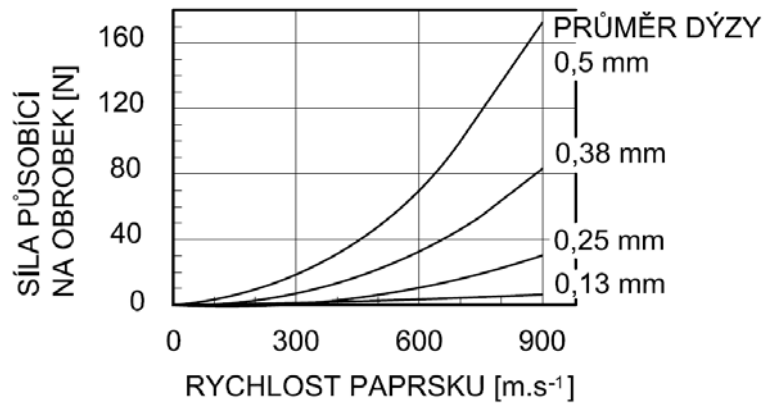
Informativní hodnoty závislosti mezi tlakem vody a rychlostí vodního paprsku jsou graficky znázorněny na obr. 1.6. Lineárně stoupající vztah mezi rychlostí paprsku a jeho výkonem pro různé průměry dýzy jsou zobrazeny na obr. 1.7. Zvyšování tlaku vody zvyšuje i sílu působící na materiál obrobku při řezání. Stoupající hodnoty jsou také závislé na průměru otvoru dýzy podle exponenciální závislosti na obr. 1.8, pro čistý vodní paprsek. (22)



Obr. 1.6 Závislost rychlosti paprsku na tlaku vody v dýze pro čistý vodní paprsek (22)



Obr. 1.7 Závislost výkonu paprsku na rychlosti pro různé průměry otvoru dýzy pro čistý vodní paprsek (22)

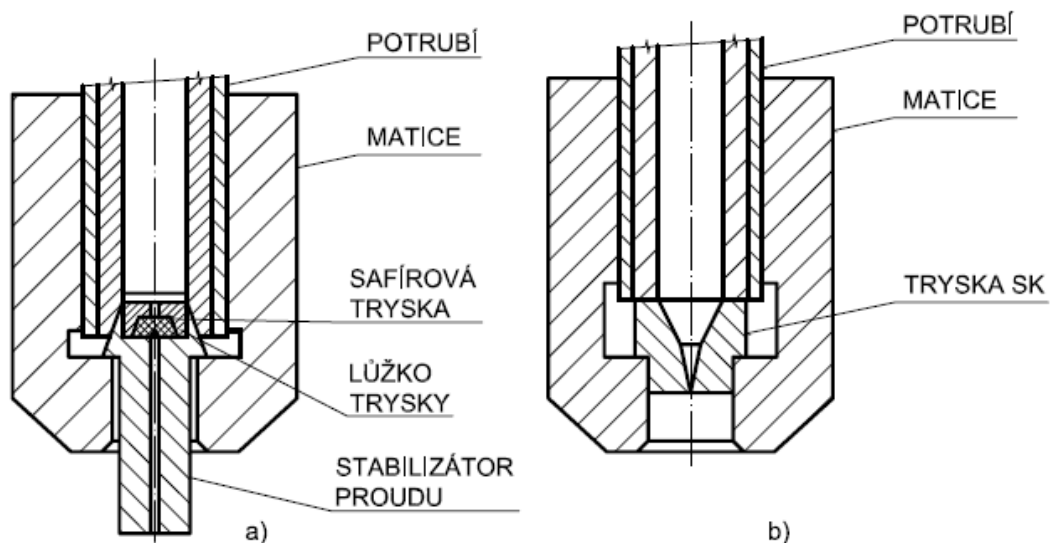


Obr. 1.8 Závislost síly působící na obrobek na rychlosti paprsku pro různé průměry otvoru dýzy pro čistý vodní paprsek (22)

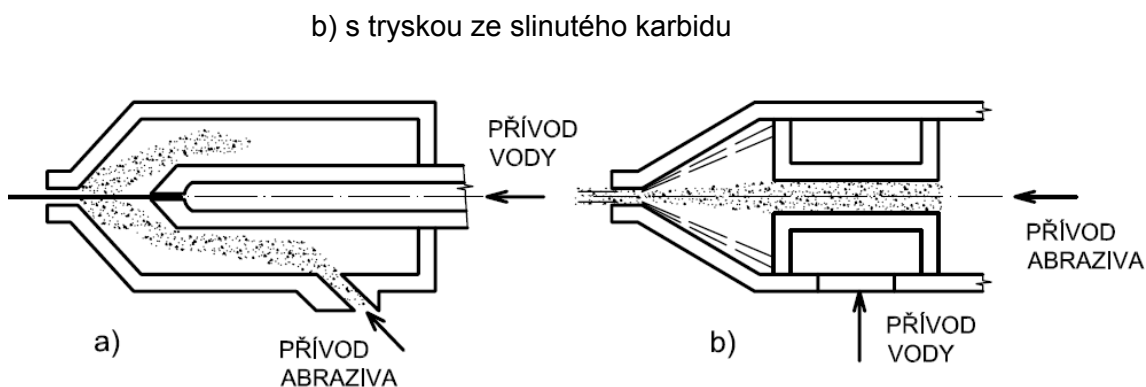
1.1.6 Hlavní části zařízení vodního paprsku

Dýza je základní a nejdůležitější část zařízení ovlivňující kvalitu řezného paprsku i kvality řezu. Část dýzy, v které je výtokový otvor (štěrbina) s průměrem od 0,075 mm se vyrábí ze safíru anebo slinutého karbidu, obr.1.9. V současnosti se safírové části dýzy nahrazují diamantem, který má desetinásobně vyšší pracovní životnost, to je výhodné z hlediska údržby, protože se prodlužuje doba mezi údržbami. Průměrná doba práce safírové dýzy je okolo 200 hodin, po tomto čase se štěrbina dýzy zanechá nečistotami a minerálními usazeninami z vody. Výhodou diamantové dýzy je, že se diamantová štěrbina může vícekrát přečistit, a po přečištění bude produkovat stejný vysokotlaký proud. Cena diamantové dýzy je 7 až 10 násobně vyšší než korundové anebo safírové. Příklad konstrukce dýzy pro čistý vodní paprsek je na obr.1.9. (22,26,42)

Základní rozdíl mezi standardním čistým vodním paprskem a abrazivním paprskem je v přidání jemného brusiva do proudu vody přes různé systémy přívodních mechanismů, k čemu jsou přizpůsobeny i konstrukční řešení dýz. (4,18,22,25)



Obr. 1.9 Základní konstrukční řešení řezací hlavičky (4)
a) se safírovou tryskou



Obr. 1.10 Dýzy pro abrazivní vodní paprsek (22)

- a) Dýza s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva.
 b) Dýza se směšným paprskem a axiálním přívodem brusiva.

Obr.1.10a, b ukazuje typy dýz pro abrazivní vodní paprsek s různými typy přívodu brusiva a jeho následné smíchání s vodou. Konstrukce podle obr. 1.10a představuje lehce vyráběný typ dýzy s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva s možností použití i pro čistý vodní paprsek. Výhodou dýzy podle schématu na obr.1.10b je axiální přívod brusiva, tento způsob přívodu brusiva zlepšuje jeho smíchání s vodou a tím zmenšuje opotřebení obvodu dýzy. Brusivo je přiváděno přes směšovací komoru do vysokotlakého proudu vody. Ve směšovací komoře se brusivo libovolně smíchá s vysokotlakou vodou a potom přechází přes sekundární dýzu, její otvor (štěrbina) má průměr v rozmezí od 0,75 do 2,5 mm. Výkon vodního paprsku se pohybuje od 7 do 45 kW. Používané brusivo je granát, minerální písek a ve speciálním případě křemíkový písek. (22)

Podle konstrukce dýzy se rozlišují i způsoby řezání abrazivním vodním paprskem. Preferují se dvě hlavní technologie abrazivního vodního paprsku:

- Systém s přímým přívodem brusiva, při kterém je brusivo vedené ze zásobníku do směšovací komory, v které je vysokotlakým vodním paprskem strháván a urychlován. Tento systém používá vysokorychlostní vodní paprsek na smíchání a následné tvoření abrazivního paprsku. Používané tlaky jsou 7 až 400 MPa, průtok abraziva je v rozmezí 1 až 20 kg.min⁻¹.
- Systém s přímým vstřikováním brusiva, v tomto případě se do dýzy přivádí stlačená suspenze smíchaná s vodou v tlakové nádobě. Používané tlaky jsou do 100 MPa, průtok suspenze je okolo 20 kg.min⁻¹.
- Systém s přímým přívodem brusiva má vyšší účinnost a vyšší proudovou hustotu narážejících částic než systém s přímým přívodem brusiva. Zároveň systém s přímým vstřikováním brusiva umožňuje použití užšího průměru paprsku a dýzy kompaktní konstrukce. (22)

Úprava vody je další důležitý faktor z hlediska zanášení otvoru dýzy. Nejvýhodnější je demineralizovaná a deionizovaná voda. Otvor dýzy musí být chráněn před různými příměsemi ve vodě, které mají tendenci usazovat se ve štěrbině, jejichž průměr je 0,075 mm. Dodržení kvality vody ovlivňuje životnost dýzy, těsnění a ventilů. Úprava vody ovlivňuje i rychlost řezání, kvalitu finálního opracování a celkové provozní náklady. (22)

Aditiva (přísady) do vody jsou přísady různých polymerů s lineárními molekulami. Roztok vody s polymerem typu PAA (polyakrylamid) anebo PEO (polyetyloxid) vytváří souvislý paprsek a ani po styku s materiálem se paprsek neroztříští. Paprsek je potom při řezání účinnější, energie koncentrovanější a paprsek si zachovává kompaktní jádro (polymery zabraňují nadměrné turbulenci proudění). Úprava vody polymerem se vyžaduje např. pro vytváření ostrých hran na dělených dílech. (22)

Lapač vody je nádoba na zachytávání vodního paprsku, který prochází skrz materiál, také slouží na tlumení hluku a zároveň zachytává třísku. Hladina hluku při použití abrazivního vodního paprsku je vysoká a může dosahovat hodnoty více než 105 dB. Lapač musí být dostatečně hluboký, aby bylo zabezpečeno lámání paprsku ještě před dosažením dna, požadovaná hloubka nádoby je 300 až 600 mm. Při nedostatku prostoru je možno použít i nižší nádoby naplněné kovovými kuličkami. (22)

Hydraulická jednotka slouží k vyvození vysokého tlaku vodního paprsku pomocí systému hydraulických čerpadel. Vysokotlaký vodní paprsek se potom generuje hydraulickým zařízením s multiplikátorem. (22)

Multiplikátor je část hydraulické jednotky a používá se na zvýšení tlaku vody obvykle do 400 MPa. Znásobení tlaku vody závisí na poměru pracovních ploch dvou vzájemně spojených pístů. (22)

Akumulátor tlaku je vysokotlaká nádoba, která tlumí rázy v kapalině vyvolané vznikem pulzů paprsku jako následek stlačení vody. Úlohou akumulátoru je udržovat stejný tlak a rychlost proudící vody. (22)

Filtry jsou neoddelitelnou součástí zařízení, filtrují kapalinu a odplavují nečistoty do velikosti 1,2 až 0,5 μm . Zároveň chrání štěrbinu v dýze před možným poškozením cizími příměsemi. (22)

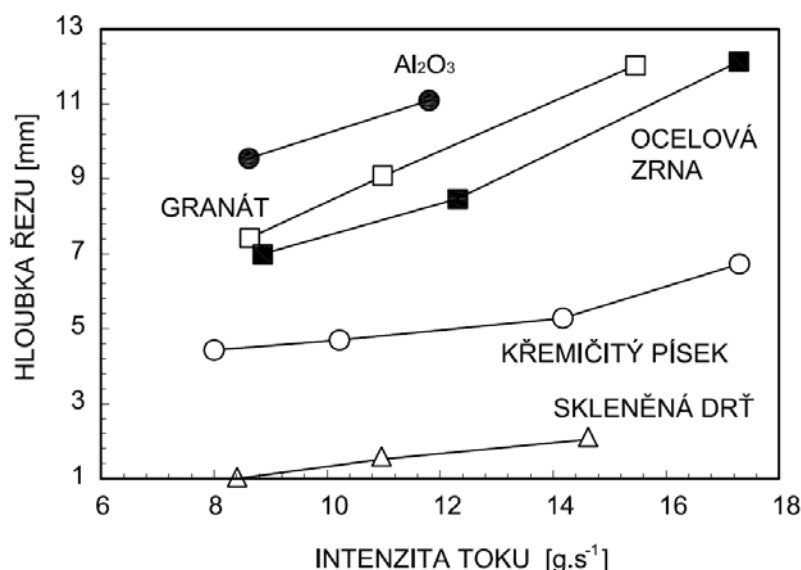
Potrubí na rozvod vody se skládá z různých druhů armatur a spojovacích elementů vyrobených z nerezavějící oceli s průměry od 6 do 14 mm. Potrubí je přizpůsobené flexibilnímu pohybu řezací hlavy. (22)

Druhy používaných paprsků:

- Systém pulzujícího paprsku používá opakované a krátkodobě trvající impulzy paprsku, při kterých vznikají tlakové špičky, které urychlují rozšiřování řezné mezery. Vhodné pro vrtání, řezání a lámání.
- Systém kontinuálního paprsku je charakterizovaný stálou energií hladiny paprsku během procesu. Jedná se o nejvíce rozšířenou metodu a to nejvíce pro dělení materiálů.
- Systém kavitačního paprsku pracuje na principu jevu lokálního porušení materiálu destruktivní silou kavitačních bublin. Kavitační paprsek je kontinuální s obsahem kavitačních bublinek. (4,19,22)

1.1.7 Vliv brusiva na hloubku řezání

Vliv různých druhů brusiv na dosahovanou hloubku řezu je názorně naznačeno na obr. 1.11. Účinek těchto brusiv závisí také na materiálu, který se opracovává.



Obr. 1.11 Účinek druhu brusiva na hloubku řezu (22)
 Podmínky řezání: $d_n=0,508$ mm; $d_m=1,57$ mm; $p=207$ MPa;
 $v_f=4,4$ mm.s⁻¹; ocel 35CrNiMo6

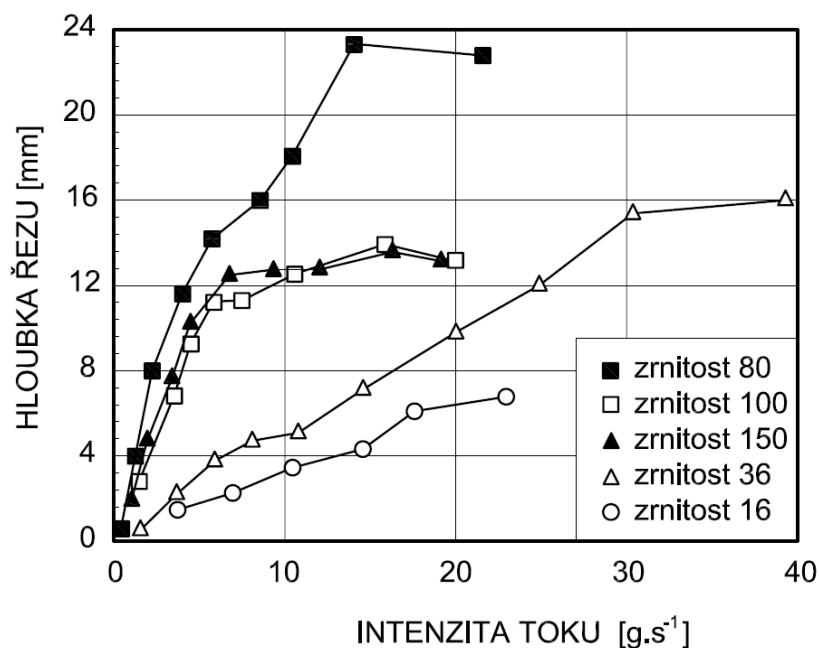
Volbu druhu brusiva ovlivňuje několik faktorů, které jsou závislé na použití průmyslového zařízení:

- brusiva s nižší účinností jsou lacinější;
- opotřebení dýzy je nižší při použití měkčího a tím i lacinějšího brusiva jako je křemičitý písek, v porovnání s použitím dražšího granátu anebo oxidu hlinitého,
- výběr materiálu brusiva má vliv na životní prostředí, technicky a ekonomicky vhodné materiály nejsou vždy příznivé pro své okolí;
- recyklace brusiv je požadavkem ekonomické výroby, vyžaduje orientaci na volbu zvláštních druhů brusných částic, při kterých se minimalizuje lom částic. Klasické druhy brusiv jako granát a křemičitý písek se v procesu mění na prášek a jsou tedy nevhodné pro recyklaci. (22)

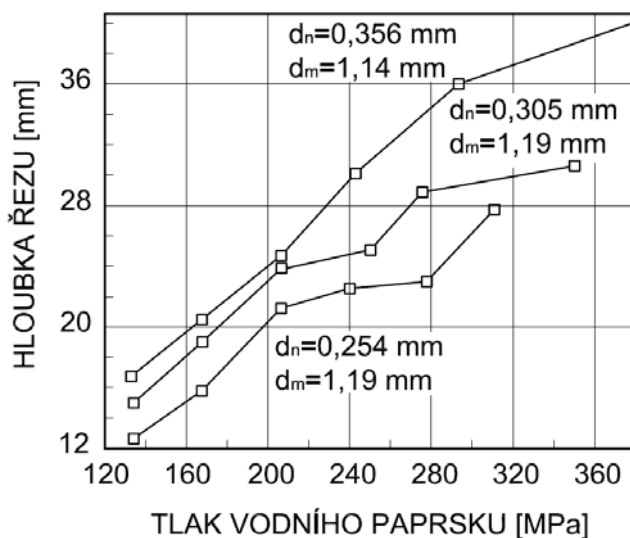
Velikost použitého brusiva určená svou zrnitostí je ovlivněná vlastnostmi obráběného materiálu a se stoupající intenzitou toku brusiva zrnitost mění hloubku řezání. Závislost účinku zrnitosti brusiva na hloubce řezu je zobrazeno na obr. 1.12. Střední velikost zrna (zrnitost 60 podle ISO) je o mnoho účinnější při dělení oceli oproti jemným zrnům (zrnitost 100 a 150) anebo hrubším zrnům (zrnitost 36 a 16). (22)

Pro jemné řezy se doporučuje malá zrnitost brusiva a to od 150 výše podle ISO. Avšak paprsek s malými částicemi brusiva řeže pomaleji anebo ztrácí rychleji svou kinetickou energii při výtoku z dýzy, což může mít za následek zvýšení vlnitosti řezaného povrchu a snížení intenzity řezání. (22)

Na hloubku řezu mají vliv i provozní parametry procesu. Obr. 1.13 znázorňuje účinek tlaku vody a průměru paprsku určeného velikostí průměru štěrbiny dýzy na hloubku řezu. Při stoupající rychlosti výtoku vody pro dané množství brusiva, intenzita zvyšování hloubky řezu klesá.



Obr. 1.12 Účinek velikosti zrna brusiva na hloubku řezu (22)
 Podmínky řezání: $v_f=3,39 \text{ mm.s}^{-1}$; $d_n=0,457 \text{ mm}$; $p=221 \text{ MPa}$;
 brusivo: granát; obrobek: nerez ocel X5CrNi189



Obr. 1.13 Účinek tlaku vody a průměru paprsku na hloubku řezu (22)
 Parametry řezání: $m_a=4,5 \text{ g.s}^{-1}$; $v_f=2,5 \text{ mm.s}^{-1}$;
 brusivo granát o zrnitosti 80; obrobek: hliník 6061-T6

Zvyšování tlaku vody nad určitý limit má nepříznivé účinky na ekonomickou účinnost řezání, vznikají vyšší tlakové ztráty, vzniká vyšší hluk, což nepříznivě ovlivňuje okolí, vznikají vyšší náklady na filtraci a úpravu vody. (22)

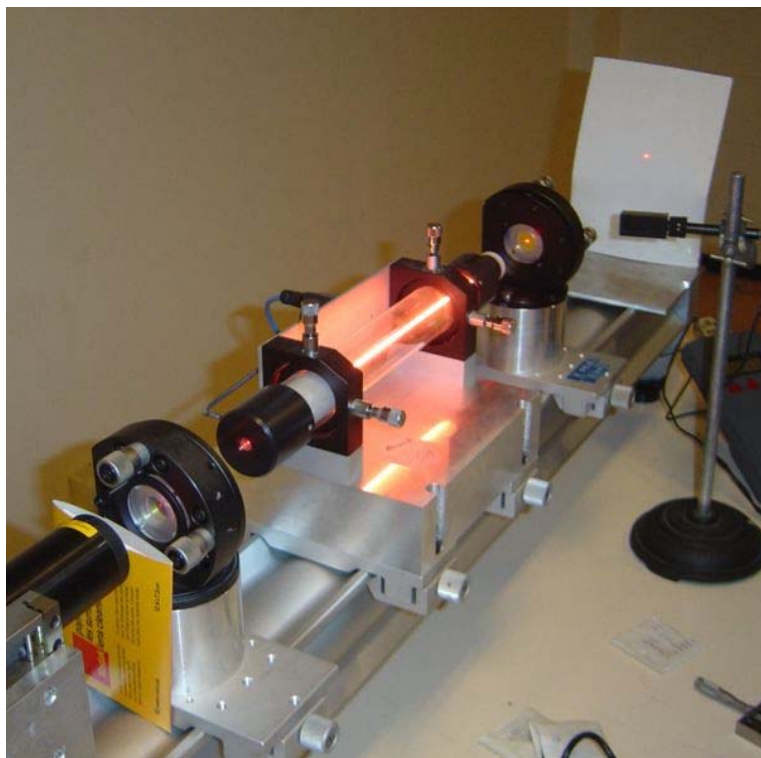
1.2 Rozbor technologických možností metody laser

1.2.1 Historie laseru

Objevení laseru lze bez velkého přehánění považovat jako největší objev minulého století. Význam laseru lze srovnat s objevy jako je parní stroj, elektrický proud, štěpení atomového jádra, raketová technika, polovodiče apod.

Stimulovaná emise, která byla teoreticky předpovězena již roku 1917 A. Einsteinem a pozorována v Gasu roku 1928 R. Ladenburgem a H. Kopfermannem, byla roku 1940 využita pro zesilování světla sovětským fyzikem W. A. Fabrikantem. Prvé práce týkající se maseru pochází z roku 1953 a první práce o laserech z roku 1958. Experimentálně byl laserový princip ověřen v roce 1960, kdy fyzika a technologie, zejména polovodičových struktur dosáhly potřebného stupně vývoje. Za základní výzkumy v oblasti kvantové elektroniky, které vedly k vytvoření generátorů a zesilovačů nového typu – maserů a laserů, byla v roce 1964 udělena Nobelova cena za fyziku N. G. Basovovi a A. M. Prochorovovi a C. H. Townesovi. (9,24,33,40,47)

Po dlouhodobém právním sporu je G. Gould na základě notářsky ověřeného zápisu z roku 1957 pokládán za vynálezce pevnolátkového a plynového laseru. První rubínový laser roku 1960 zkonstruoval T. H. Maiman. První plynový laser byl uveden do provozu roku 1961 A. Javanem, W. R. Bennetem a D. R. Herriotem. Roku 1962 byl současně na různých místech vyvinut polovodičový laser. V roce 1964 C. H. Patel experimentoval s plynovým CO₂ laserem, který našel v současnosti nejvyšší uplatnění v průmyslové výrobě. (9,24,33,40,47)

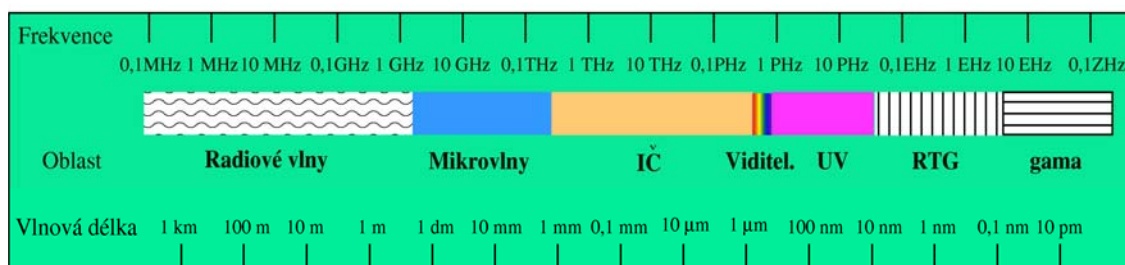


Obr. 1.14 Helium-neonový laser (47)

1.2.2 Definice laseru a základní vlastnosti laserového paprsku

Princip funkce laseru je možné objasnit na základě pojmů kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. **LASER** je akronym anglického názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, což lze přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. (36,40)

Definice říká, že laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního (vnitřně uspořádaného, sfázovaného optického záření), které vyniká extrémní monochromatickostí (všechny fotony mají stejnou vlnovou délku a frekvenci), nízkou rozbíhavostí (divergencí) svazku (všechny fotony laserového záření se pohybují stejným směrem) vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie. Žádné jiné záření, než záření generované laserem tyto vlastnosti nemá. Vlnové délky laserového záření spadají od mikrovlnné oblasti, přes infračervené tepelné záření a viditelné světlo až po rentgenové paprsky. (33,36,40)



Obr. 1.15 Elektromagnetické spektrum (50)

Ačkoliv existuje velké množství různých typů laserových generátorů, každý v sobě zahrnuje tři základní součásti:

- *laserové aktivní prostředí*, ve kterém probíhá zesilování záření,
- *zdroj čerpání* pro excitaci aktivního prostředí,
- *rezonátor* vytvářející zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucí ke vzniku laserových oscilací. (9,36,40)

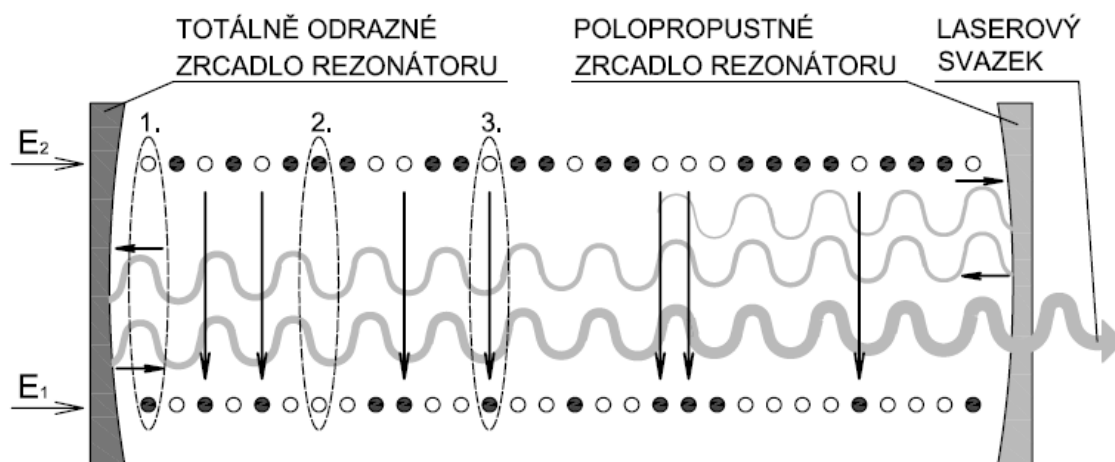
Základní význam pro funkci laseru má proces stimulované emise, který může nastat při interakci excitovaného kvantového systému (atomu, iontu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením – fotonem, jehož frekvence ν odpovídá energetickému rozdílu $E_2 - E_1$ mezi excitovaným a některým níže položeným stavem kvantového systému. Přitom dochází k přechodu kvantového systému do tohoto energeticky chudšího stavu a současně je excitační energie uvolněna emitováním fotonu s energií:

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1 \quad (1.4)$$

kde $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s je Planckova konstanta. (36)

Obecný princip laseru: zdroj budící energie zajišťuje, aby se v aktivním prostředí nacházel dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu. Poté, co některá kvantová soustava aktivního prostředí přejde náhodně spontánní emisí na nižší hladinu, bude uvolněné kvantum stimulovat i další kvantové soustavy k přechodu na spodní energetickou hladinu a emisí fotonů. Část fotonů se může kvantovými soustavami opět absorbovat. Pokud však bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v excitovaném stavu, bude se optické záření řetězovou

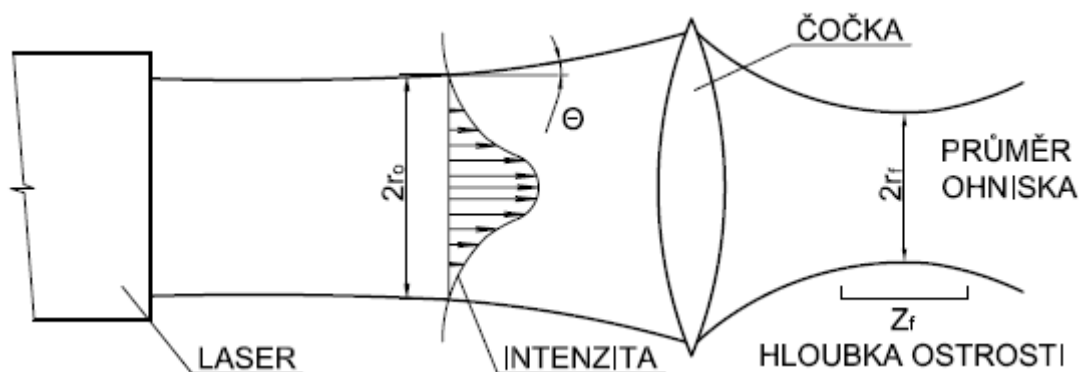
reakcí zesilovat. Spontánní emise se stane zanedbatelnou vzhledem k emisi stimulované a generované záření nabude jednotné povahy, tj. bude koherentní a monochromatické. Aby se zajistila směrovanou laserového záření, formuje se aktivní prostředí do tvaru dlouhého válce a je umístěno uvnitř optického rezonátoru. Ten zajistí selektivní kladnou zpětnou vazbu systému – jen rezonující fotony se budou zesilovat. Její velikost lze nastavit tak, aby byla maximální pro laserový paprsek požadovaných vlastností. Po dostatečném zesílení je laserový paprsek vyveden – viz obr. 1.16. (36)



Obr. 1.16 Optický rezonátor (36)

Pokud je aktivní prostředí s inverzním obsazením hladin uzavřeno v optickém rezonátoru (tvořeném obvykle dvěma navzájem proti sobě umístěnými rovinnými nebo také sférickými zrcadly), zpětná vazba laserového záření umožní vznik generátoru elektromagnetických kmitů. Překročí-li zesílení světla v aktivním prostředí ztráty při jednom průchodu mezi zrcadly, začne laser emitovat záření na vlnové délce charakteristické pro dané aktivní laserové prostředí. Aby bylo možné vyvést laserový paprsek z rezonátoru, je jedno ze zrcadel částečně propustné. Na obr. 1.17 jsou vyznačeny kvantové soustavy v základním (1.) a v excitovaném (2.) stavu, stimulovaná emise (3.) a energetické hladiny kvantových soustav E_1 a E_2 . (9,33,36,40)

Základní vlastnosti laserového paprsku



Obr. 1.17 Rozbíhavost, prostorový profil a fokusace charakteristického laserového paprsku (22)

- Minimální divergence (rozbíhavost) Θ , charakterizovaná poloviční hodnotou vrcholového úhlu kužele, který vystupuje z rovinného okýnka laseru s průměrem $2 \cdot r_o$, přičemž divergence laserového paprsku s vlnovou délkou λ_w je dána vztahem: (22)

$$\Theta = \frac{\lambda_w}{\pi \cdot r_o} \quad (1.5)$$

- Vysoká výstupní intenzita I , není limitována zákony záření absolutně černého tělesa a pro intenzitu záření laserového paprsku platí:

$$I = I_o \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{r_o^2}\right) \quad (1.6)$$

kde I_o je intenzita ve středu paprsku, r_o je poloměr, v kterém je intenzita redukována ze střední hodnoty faktorem e^2 . (22)

- Módová struktura (TEM – transverse electromagnetic mode), v příčném průřezu paprsek vytváří buď jednoduchou stopu – základní mód, anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Ve vnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci (mód), v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru, obr. 1.18. Nejvyšší hustoty energie při dané výstupní energii laseru lze dosáhnout lasery pracujícími v základním módu označovaným jako TEM_{00} (index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření paprsku). Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití jako je např. řezání, sváření apod. (22)

průřez A v rovině kolmý na směr paprsku	průřez B kolmý na A	půdorys	označení TEM (použití)
			TEM ₀₀ -Gauss (řezání)
			TEM ₀₁ (sváření, kalení)
			TEM _{2,1}
			TEM ₃₂ (málo používaný)
			multimód (řezání)
			multimód (nevhodný pro řezání)

Obr. 1.18 Některé módové struktury laserů, TEM označení a doporučené použití (22)

Uvedené vlastnosti laserového paprsku umožňují při jeho fokusaci soustředit do malého bodu mimořádně vysokou hustotu energie v místě dopadu paprsku, to má za následek natavení až odpaření materiálu, čímž se dosáhne požadovaný efekt zpracování. Pro srovnání, tab. 1.11 uvádí řádové hodnoty toku energie (hustoty výkonu), které jsou dosažitelné různými zdroji energie. (22)

Tab. 1.11 – Hustoty výkonů různých energetických zdrojů (22)

zdroj energie	dosahovaná hustota výkonu [W.cm ⁻²]
slunce (čočka f = 50mm)	5.10 ²
elektrický oblouk	1.10 ⁵
acetylén-kyslíkový plamen	1.10 ⁴
plazmový paprsek	1.10 ⁵
elektrický paprsek	4.10 ⁸
CO ₂ laser	1.10 ⁹
Nd laser	1.10 ¹⁴

- Velikost stopy paprsku je přímo úměrná ohniskové vzdálenosti čočky f, vlnové délce laseru a nepřímo úměrná poloměru paprsku r_o:

$$r_f = \frac{f \cdot \lambda_w}{\pi \cdot r_o} \quad (1.7)$$

- Pro multimódový paprsek je poloměr fokusovaného paprsku dán vztahem:

$$r_f = f \cdot \Theta \quad (1.8)$$

kde Θ je úhel divergence v radiánech. (22)

- Hloubka ostrosti je definována jako vzdálenost mezi dvěma příčnými rovinami před a za ohniskovou vzdáleností, na které je efektivní poloměr topy paprsku o 5% větší než v ohniskové vzdálenosti:

$$Z_f = 0,64 \cdot \frac{\lambda_w}{\pi} \cdot \frac{f^2}{r_o^2} \quad (1.9)$$

Aby se dosáhlo vysoké hustotě toku energie paprsku v místě jeho dopadu, je potřebné paprsek co nejlépe fokusovat. Zároveň je nutné materiál udržovat vůči paprsku v relativně přesné pozici, aby se nedostal pod hloubku ostrosti, kde hustota toku energie klesá. (22)

1.2.3 Druhy laserů a jejich dělení

Existuje mnoho různých tříd laserů, jejich základní princip je sice stejný, ale liší se výrazně konstrukcí a realizací jednotlivých částí. Dělení laserů do jednotlivých skupin probíhá podle několika kritérií:

Podle skupenství aktivního prostředí se lasery dělí na *pevnolátkové*, *kapalinové*, *plynové* a *plazmatické*. Zvláštní třídu přitom tvoří lasery polovodičové – *laserové diody*. (36)

Podle režimu generace se pak lasery dělí na dvě velké třídy: na kontinuální (často označované zkratkou CW) a na pulzní lasery. Pulzní se dále dělí na lasery pracující v režimu volné generace (délka impulsů řádově 10^{-4} s), lasery pracující v režimu spínání zisku (často označované jako Q-spínání, délka impulsů řádově 10^{-8} s) a na lasery pracující v režimu synchronizace módů (délka impulsů řádově 10^{-12} s). (36)

Podle způsobu čerpání se lasery rozdělují na opticky (koherentně nebo nekoherentně) čerpané, na lasery čerpané elektrickým výbojem, chemickou reakcí, elektronovým svazkem atd. (36)

Podle frekvenční oblasti, ve které je laserové záření generované se lasery dělí na submilimetrové, infračervené, viditelné, ultrafialové a rentgenovské.

Další možnost je dělit lasery podle prostorové struktury laserového svazku na jedno a mnohamódové; podle rozsahu generovaných frekvencí na jednofrekvenční a přeladitelné; podle využitých nelineárních jevů na lasery generující na vyšší harmonické frekvenci, lasery se směřováním frekvencí, na Romanovské lasery atd. Zatímco uvedené třídy se neustále doplňují a mění, jak jsou realizovány nové a nové lasery, dělení podle skupenství aktivního prostředí je víceméně univerzální. (36)

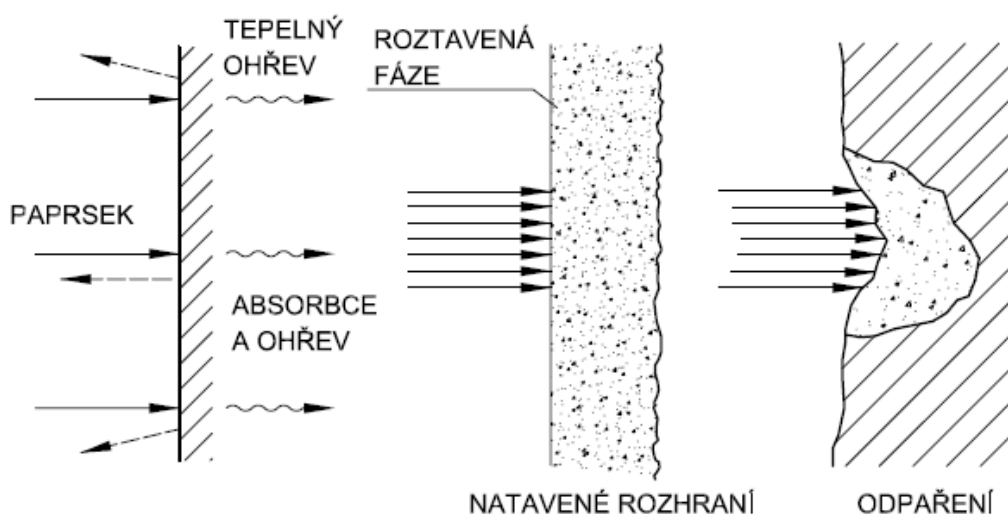
Tab. 1.12 – Rozdělení vybraných typů laserů (22,47)

druh laseru	aktivní látka		vlnová délka	typ paprsku	výkon laseru	oblasti aplikací
			[μm]			
pevný	rubín	Cr^{3+}	0,6943	pulzní	5 W	holografie
	Nd-YAG	Nd^{3+}	1,064	kontinuální pulzní	100 až 1200 W	strojní průmysl
	Nd-sklo	Nd^{3+}	1,064	pulzní	2mW	
	alexandrit		0,7 až 0,818	pulzní	10W	
polo- vodičové	GaAs		0,8 až 0,9	pulzní	2 až 10 mW	informační technologie
plynový	$\text{CO}_2(\text{N}_2+\text{He})$	CO_2	10,6	kontinuální pulzní	500 až 15000W	strojní průmysl
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15	kontinuální	20mW	metrologie
	Ar	Ar^+	0,4764;0,488; 0,5145	kontinuální pulzní	1 až 5000 W	laserová chirurgie
	Excimer (ArCl)		0,170	pulzní	20 až 250 W	strojní průmysl, laserová chirurgie
	(XeCl)		0,308			
	(XeF)		0,351			
	(KrF)		0,248			

1.2.4 Účinek laserového paprsku na materiál a úběr materiálu

Při styku laserového paprsku s materiálem, jak je zobrazeno na obr. 1.19, dochází k vzájemné interakci a efektům, které jsou závislé na vlastnostech materiálu a jeho schopnostech pohlcovat a odrážet záření. Faktory důležité pro použití laserového paprsku jsou:

- reflektivita (odrazivost povrchu),
- absorpce (pohlcení laserového záření),
- tepelná vodivost,
- tavení povrchové vrstvy,
- odpařování. (22)



Obr. 1.19 Účinek laserového paprsku při dopadu na povrch materiálu (22)

Po dopadu paprsku na materiál se část paprsků odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde materiálem. Absorbované paprsky ohřívají materiál, který se ohřevem nataví a následně odpaří z ohřáté oblasti. Množství odražených paprsků závisí na odrazivosti materiálu. Odrazivost (reflektivita) kovového povrchu, pro vlnovou délku větší než $10 \mu\text{m}$ je vyjádřena Hagen-Rubensovým vztahem:

$$R \approx 1 - \sqrt{\frac{f}{\sigma_0}} \quad (1.10)$$

kde σ_0 je elektrická vodivost kovu [$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]. (22)

Absorpce A [%] světelného záření způsobuje ohřátí povrchové vrstvy. Reflexe i absorpce jsou komplexní jevy a jejich vzájemné působení vyjadřuje vztah:

$$R + A = 100\% \quad (1.11)$$

Odrazivost infračerveného světla od kovových povrchů je velmi vysoká. Některé hodnoty odrazivosti pro Nd – YAG laser (vlnová délka $1,06 \mu\text{m}$) a CO_2 laser (vlnová délka $10,6 \mu\text{m}$) jsou uvedeny v tab. 1.13. Tyto hodnoty platí pro leštěné povrchy materiálů. Ve skutečnosti na odrazivost působí přítomnost

oxidické vrstvy na povrchu, jako i zbytkové napětí pod povrchem, takže reálné hodnoty odrazivosti mohou být jiné. Všeobecně platí, že se zvyšováním vlnové délky světelného záření, reflektivita kovů stoupá. (22)

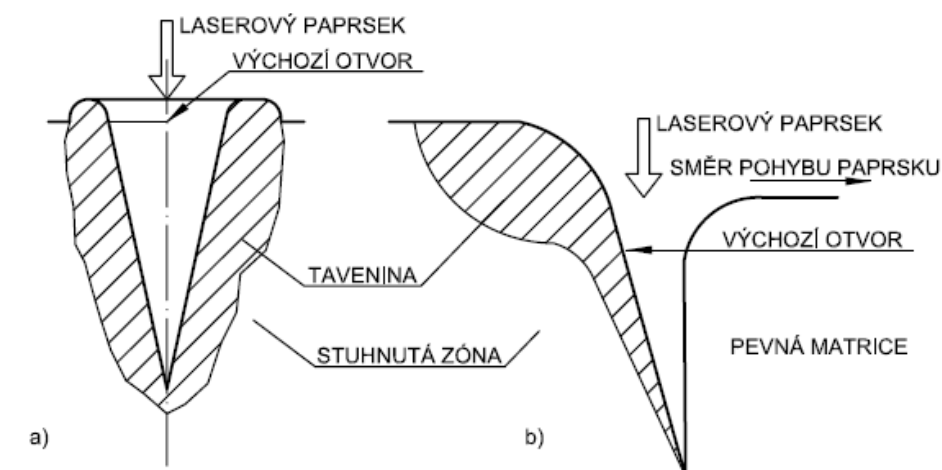
Odrazivost paprsků se dá snížit např. zdrsňením povrchu, vytvořením krycí nekovové vrstvy, porušením lidické vrstvy ozářením povrchu laserovým paprskem s vysokou energií, ohřátím materiálu na teplotu blízkou se teplotě tavení. (22)

Absorpce světelných paprsků do materiálu závisí na tepelném gradientu kovového povrchu a mění se s drsností povrchu. S rostoucí drsností povrchu klesá schopnost absorpce paprsků. Toto platí i pro zbytková napětí v povrchové vrstvě po předcházející mechanické operaci. Absorpce světelného záření a následný ohřev kovového povrchu, ale i jiných materiálů závisí na tepelné vodivosti materiálů. (22)

Tab. 1.13 Odrazivost vybraných materiálů (22)

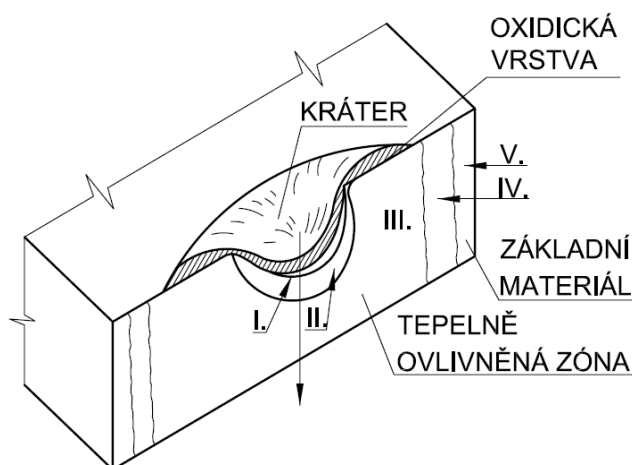
Reflektivita R [%]		
kov	vlnová délka [μm]	
	0,9 až 1,1	9 až 11
zlato	94,7	97,7
stříbro	96,4	99
hliník	73,3	96,9
měď	90,1	98,9
železo	65	93,8
nikl	72	95,6
zinek	49	98,1
chrom	57	93
křemík	28	28
ocel (1%uhlíku)	63,1	93 až 96
uhlík (grafit)	26,8	59

Působením intenzivního fokusovaného laserového paprsku na materiál dochází k jeho natavení, obr. 1.19. Když laserový paprsek s určitou hustotou výkonu ozáří povrch materiálu, absorbované paprsky lokálně ohřejí částice materiálu až na teplotu tavení. Povrch natavené plochy se rychle rozšiřuje a materiál se dalším působením paprsku začne odpařovat. V natavené zóně při odpařování částic materiálu vznikají poměrně vysoké tlaky a tavenina je přemísťována a vytlačena ze vznikajícího otvoru. V místě dopadu paprsku se následkem toho vytváří malý otvor a laserový paprsek může pronikat hlouběji do otvoru. V příčném řezu, obr. 1.20a je naznačeno, jak roztavený materiál je tlačěn na obě strany. V podélném řezu, obr. 1.20b je tlačěn dozadu za pohybující se paprsek. Když záření přestane anebo se laserový paprsek posouvá dopředu, tavenina začíná tuhnout anebo rekrystalizovat a v tuhnoucí tavenině vznikají a zůstávají zbytková napětí. (11,20,22)



Obr. 1.20 Chování materiálu při působení laserového paprsku
a) v příčném směru; b) v podélném směru (22)

V závislosti na použité technologii obrábění (vrtání, řezání, hloubení drážek) může být tepelně ovlivněná oblast dvoj a nebo trojrozměrná. Řezání laserem se charakterizuje jako ustálený proces, při kterém se tepelně ovlivněná zóna tvoří pouze na stěnách řezu. Tepelně ovlivněná oblast u hloubení drážek je na obou stěnách i ve spodní části drážky a oblast vedení tepla je trojrozměrná. (11,20,22)



Obr. 1.21 Schematické znázornění řezu oblasti po aplikaci laserového paprsku pro ocel s 1% C (22)

Změny, které probíhají ve struktuře kovových materiálů po ozáření laserovým paprskem, jsou zobrazeny na obr. 1.21 – pro ocel s obsahem 1% uhlíku při ozáření CO₂ laserem o výkonu 150 W. Na povrchu kráteru se vytvoří kráter. Velikost kráteru se úměrně zvyšuje s časem záření laseru. Přetavená vrstva se skládá z několika vrstev I. až IV. Vrchní oxidická vrstva o hloubce asi 0,1 mm překrývá vrstvu v oblasti I., jejíž hloubka je asi 30 μm. Mikrotvrdost vrstvy je 700 až 800 HV a je tvořena martenzitem a austenitem. Vrstva II. tvoří přetavenou oblast tvaru půlměsíce s tvrdostí okolo 350 až 550 HV a je tvořena z α-železa. Za ní je zóna III. s průměrem asi 2,4 mm, která se ve směru základního materiálu

zužuje. Tvrdost této vrstvy se pohybuje okolo 900 HV a má převážně zpevněnou martenzitickou strukturu. (22)

Tepelně ovlivněná zóna HAZ (heat affected zone) je různá pro rozdílné materiály a závisí na posuvu paprsku, vlnové délce a absorpčních vlastnostech materiálu. Čím vyšší je hodnota posuvu paprsku, tím menší je tepelně ovlivněná zóna. Intenzita absorpce laserových paprsků do materiálu se zvyšuje se zvyšováním vlnové délky záření. Průměr laserové hlavičky a vzdálenost mezi povrchem a hlavičkou ovlivňují také průměrnou hloubku HAZ. Některé vybrané údaje o vlivu rychlosti řezání, rychlosti posuvu paprsku a průměru laserové hlavičky jsou zobrazeny v tab. 1.14. (22)

Tab. 1.14 Údaje o hodnotách tepelného ovlivnění (22)

materiál	šířka materiálu [mm]	rychlost [m.min ⁻¹]	HAZ [mm]	výkon [kW]
sklotextil	1,5	3	0,25	0,4
sklotextil	12,7	4,6	0,63	20
nástrojová ocel	3	1,7	0,2	0,4
ocel pro zušlechťení	1,2	4,6	0,2	0,4
korozivzdorná ocel	1,3	4,6	0,2	0,4
	2,5	1,27	0,25	0,4
	4,7	1,27	0,2	20
titan	1	7,5	0,5	0,6

1.2.5 Kritéria hodnocení kvality povrchu

Podobně jako při klasickém řezání nástrojem s určitou geometrií řezné hrany, při posuzování kvality řezání laserem je potřebné brát do úvahy spektrum vlivů, které jsou rozděleny do třech skupin:

- parametry procesu,
- parametry materiálu produktu,
- kvalita řezu. (9,22)

Parametry procesu při řezání laserem zahrnují:

- výkon paprsku,
- rychlost posuvu paprsku (řezná rychlost),
- šířku vytvořené spáry,
- druh paprsku a jeho mód,
- ohniskovou vzdálenost,
- průměr fokusovaného paprsku,
- úhel vychýlení paprsku α (vychýlení paprsku od původního směru)

- přídavný plyn (druh plynu, tlak plynu). (9,22)

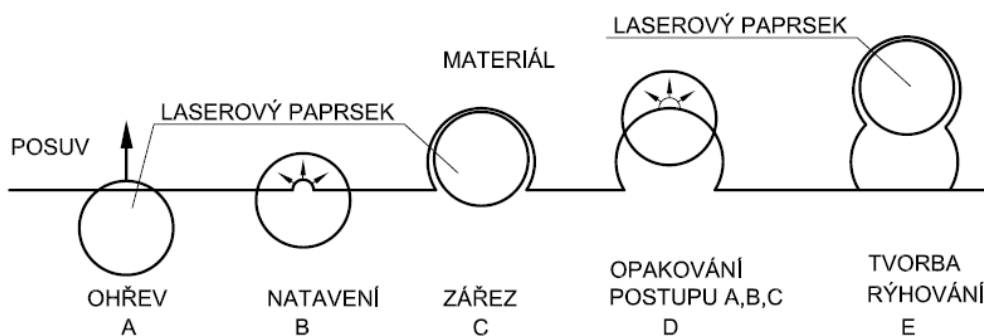
Parametry materiálu a komplexnost vytvořeného profilu jsou charakterizované:

- fyzikálně-chemickými vlastnostmi materiálu,
- typem materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit,...),
- termofyzikálními vlastnostmi (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce, reflektivita),
- geometrií obrobku. (9,22)

Při sledování samotné kvality řezu je potřebné brát do úvahy parametry zóny řezání laserem, které zároveň mohou sloužit jako kritéria pro hodnocení řezaného povrchu laserem:

- šířka řezu,
- zaoblení hrany vlivem řezání,
- nepravidelnost hrany,
- šířka tepelně ovlivněné vrstvy,
- kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi vstupem a výstupem laserového paprsku),
- tvoření trhlin,
- úbytek materiálu,
- šířka kráteru,
- vychýlení paprsku,
- změna struktury povrchu materiálu,
- zpevnění,
- zbytkové napětí. (9,22)

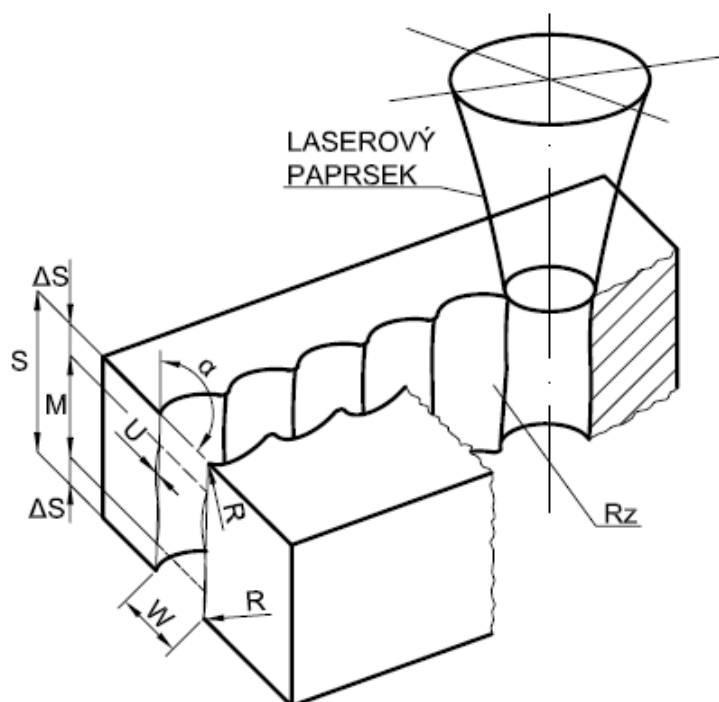
Toto je výčet všech vlivů, které ovlivňují kvalitu povrchu. Většina literárních pramenů, které se zabývají kvalitou řezného povrchu se soustředí při hodnocení na jeden nebo dva určující provozní parametry jako jsou výkon paprsku a rychlost posuvu a také na jeden anebo dva parametry kvality řezu, obvykle HAZ a šířku řezné spáry. Vychází z toho, že při hodnocení kvality řezu a optimalizaci laserového řezání je spektrum všech uvedených kritérií velmi široké. (9,22)



Obr. 1.22 Model tvoření rýh v zóně tavného řezání laserem (22)

Oblast řezání laserem je charakterizována, podobně jako skoro všechny vysokoenergetické technologie řezání, tvořením rýhovací stopy řezu, která vzniká při laserovém tavném řezání jako výsledek cyklické povahy energetického paprsku při interakci s materiálem v důsledku oscilace proudění taveniny. Vznik rýhované oblasti je schematicky znázorněn na obr. 1.22. Obr. 1.23 ilustruje zónu po řezání laserem a doporučené veličiny používané pro kvantifikaci hodnocení kvality řezu. (8,11,15,17,19,23,30)

Rz - výška nerovností,
 U - nepravidelnost spáry,
 α - úhel vychýlení paprsku,
 R - zaoblení vlivem řezání,
 W - šířka řezu,
 S - tloušťka materiálu,
 ΔS - náběhová a výběhová oblast při řezání
 (0,1 až 0,2 mm podle tloušťky materiálu),
 M - měřená oblast pro určení hodnot Rz, U, α .



Obr. 1.23 Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem (22)

1.2.6 Řezání a dělení materiálů laserem

Z technologického hlediska existují dvě metody řezání a dělení materiálů laserem:

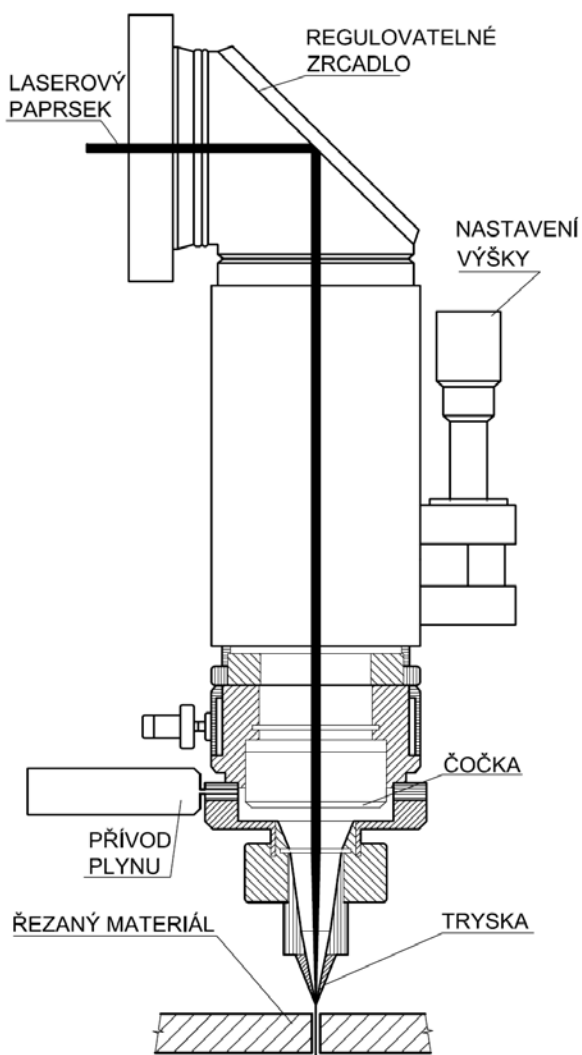
- Řezání/dělení materiálů (nejčastěji pro plechy a jiné tenké materiály).
- Tvoření drážky na povrchu materiálu a potom jeho kontrolovaný lom (vhodné pro křehké materiály jako sklo a keramika).

Na řezání se nejvíce používají CO₂ lasery, většinou v kontinuálním režimu. Řezání/dělení laserem je odstraňování materiálu postupným působením paprsku a proudu plynu, obvykle kyslíku (O₂), dusíku (N₂), stlačeného vzduchu, argonu (Ar) anebo helia (He). (11,15,17,22)

Hlavní mechanismus úběru při řezání laserem se skládá:

- z erozivního účinku vysokoenergetických částic fotonů na povrch materiálu,
- z lokálního natavení povrchu,
- z odstranění taveniny odpařením anebo pomocí přídavného stlačeného plynu, který tlakem odstraňuje (vyfukuje) natavené částice materiálu ze zóny řezání. (22)

Pro řezání je laser vybavený tzv. řezací hlavicí, obr. 1.24, která chrání optiku před poškozením a zároveň přivádí pomocný anebo ochranný plyn do zóny řezání. Volba přídavného plynu závisí na materiálu obrobku. Pro kovy a uhlíkové ocele se používá kyslík, vzduch a inertní plyny se používají pro nekovy a plasty (plexisklo, polypropylen). Mimo inertních plynů a kyslíku se používá také dusík, a to pro řezání nekovových materiálů (PVC, textil apod.) Dusík chrání řezné plochy před spálením a vznícením. (22)



Obr. 1.24 Řezací hlavice (15)

Vlastní proces řezání závisí na druhu materiálu a použitém plynu. Může se uskutečňovat několika způsoby:

- laserové sublimační řezání – laserový paprsek ohřívá povrch materiálu na teplotu odpařování a přiváděný inertní plyn odstraňuje vznikající páry na čele řezu. Vzniká úzký řez s vysokou kvalitou řezné plochy. Doporučuje se jen pro velmi malé tloušťky materiálu.
- Laserové tavné řezání – silný proud inertního plynu odstraňuje roztavený materiál ze zóny řezu. Povrch materiálu se ohřívá jen na teplotu tavení, takže je potřebná menší energie na jednotkovou délku řezu. Nevýhodou je zhoršená jakost řezu, způsobená tuhnutími kapkami taveniny na spodním okraji řezu.
- Laserové řezání s aktivním plynem – používá se většinou kyslík, který vyvolává exotermickou reakci při spalování základního materiálu, tím se dosahuje rychlejšího ohřevu, vyšší rychlosti řezání s kvalitním povrchem řezu. (22)

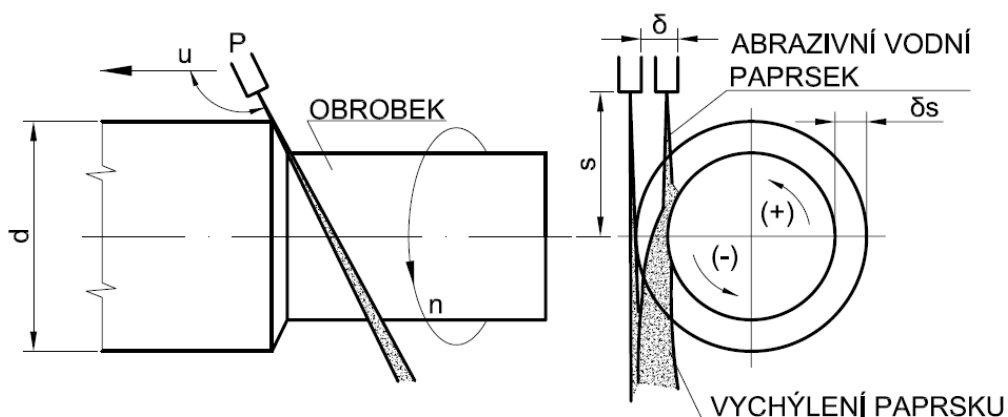
2 VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ LASERU A VODNÍHO PAPERSKU

2.1 Z hlediska standardního použití

Hlavní využití nekonvenčních metod obrábění ve strojírenství je v převážné míře v řezání a v dělení materiálů. Řezání čistým vodním paprskem se věnovala kapitola 1.1.2.1 a řezání abrazivním vysokotlakým paprskem se věnovala kapitola 1.1.2.2. Řezáním paprskem laseru se zabývala kapitola 1.2.6. Laser a vodní paprsek neslouží jen k dělení materiálu, ale používají se tyto paprskové technologie i k obrábění a to zejména těžkoobrobitelných materiálů pro operace obrábění jako je soustružení, frézování, vrtání, řezání závitů apod.

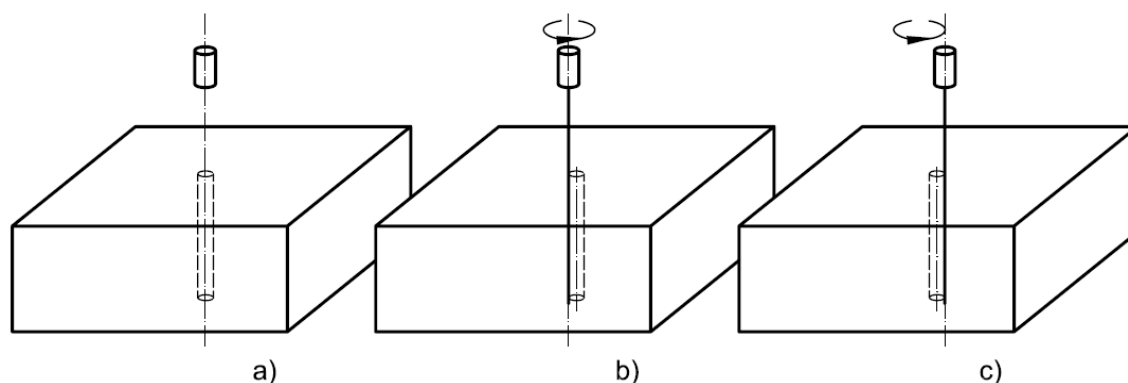
2.1.1 Obrábění abrazivním vodním paprskem

Při soustružení obrobek rotuje a abrazivní vodní paprsek se posouvá ve směru osy obrobku. Úběr materiálu je zabezpečený radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky řezu. Obr. 2.1 ukazuje základní schéma soustružení abrazivním vodním paprskem. (22)

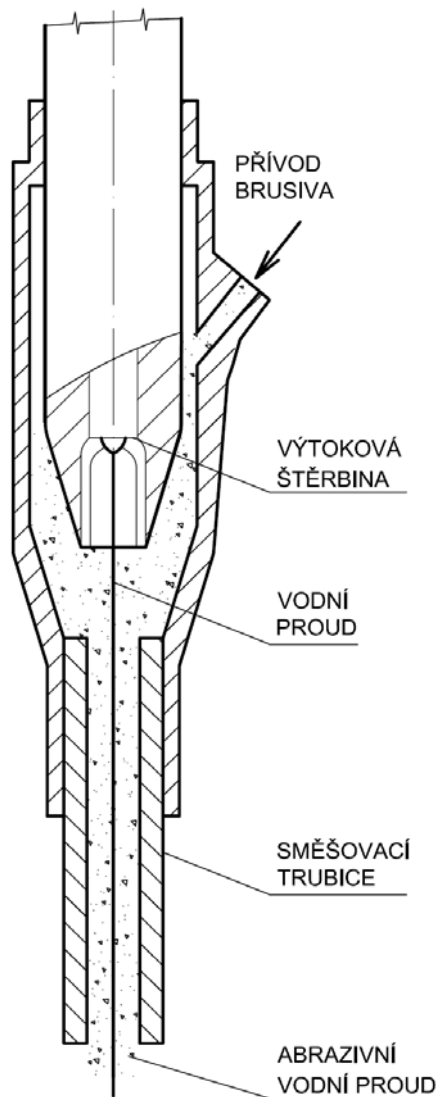


Obr. 2.1 Soustružení abrazivním vodním paprskem (22)

Vrtání těžkoobrobitelných materiálů jako je keramika, sklo, niklové slitiny používané pro plynové turbíny, se využitím abrazivního vodního paprsku dostává do popředí zájmu jako perspektivní technologie. V současnosti je vyvinuto několik způsobů vrtání otvorů charakterizovaných vzájemným pohybem paprsku a obrobku. Nejčastěji se používá vrtání se stacionárním paprskem a obrobkem, vrtání rotujícím paprskem anebo vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem tzv. vyřezáváním středu otvoru. Obr. 2.2 znázorňuje některé metody vrtání. (22)



Obr. 2.2 Způsoby vrtání pomocí abrazivního vodního paprsku (22)
a) převrtání b) vyřezání c) frézování

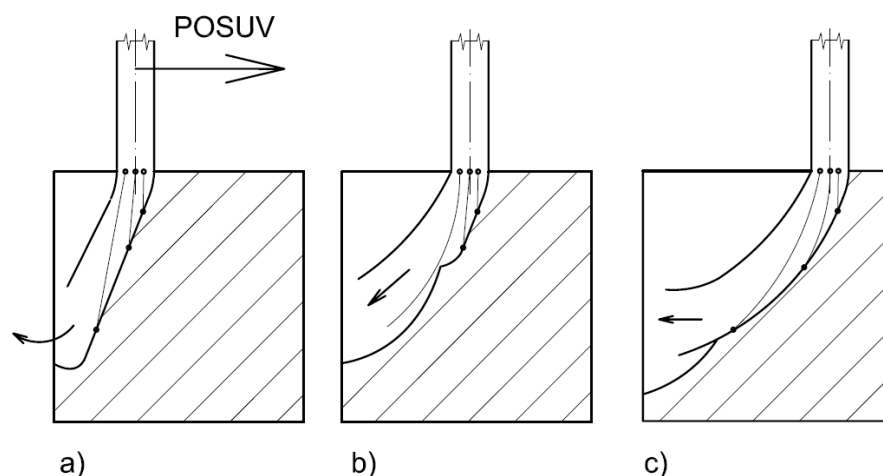


Obr. 2.3 Koncept dýzy pro obrábění abrazivním vodním paprskem (22)

Pro obrábění abrazivním vodním paprskem se používá tvar dýzy podle obr. 2.3, která produkuje vysoce rychlostní koherentní abrazivní paprsek s typickou rychlostí okolo 300 až 600 m.s⁻¹ a průtokem brusné směsi 10 g.s⁻¹.

Frézování pomocí abrazivního vodního paprsku se využívá pro tvarově složité obrobky. Při frézování se jedná o řezání, ale ne o dělení materiálu. Řezný cyklus frézování znázorňuje obr. 2.4, kde jsou vidět zřetelně řezné stupně. Frézování abrazivním vodním paprskem je proces, při kterém paprsek vícenásobně přechází po obráběné ploše a postupně tvoří blízký tvar konečnému tvaru. Tato metoda je vhodná pro výrobu tvářených nástrojů. Ukazatelem efektivity procesu při obrábění abrazivním vodním paprskem je úběr materiálu a topografie povrchu, které jsou ovlivňované posuvem paprsku a vzdáleností mezi obrobkem a paprskem. (22)

Při obrábění vodním abrazivním paprskem je potřebné věnovat pozornost především opotřebení směšovací trubice. Průměr směšovací trubice d_m a průměr štěrbin d_n ve velké míře ovlivňují maximální řeznou rychlost a zároveň mají vliv na účinnost procesu. Rychlost řezání je mimo toho ovlivněná i tlakem abrazivní směsi. Zvyšováním hydraulického tlaku směsi se zvyšuje i opotřebení směšovací trubice. Opotřebenost je určovaná změnou výsledného průměru výstupu paprsku. (22)



Obr. 2.4 Řezný cyklus při frézování abrazivním vodním paprskem (22)
a) začátek tvoření stopy řezu; b) stabilizovaná stopa řezu s viditelnými stupni posuvu paprsku; c) pokračující posuv paprsku a vyrovnání stupňovitosti řezu

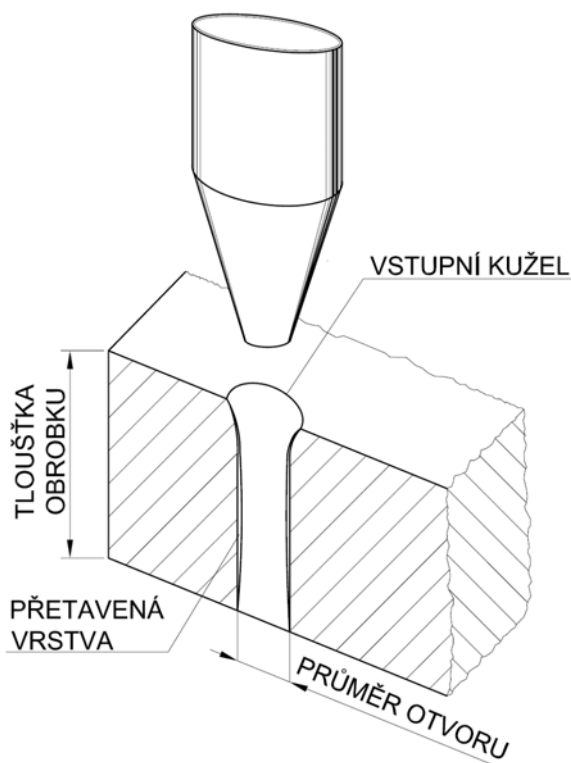
2.1.2 Obrábění laserovým paprskem

Soustružení laserovým paprskem

Při soustružení výhodou laseru je, že na obrobek působí pouze paprsek. Jde tedy o bezkontaktní obrábění, které eliminuje problémy spojené s chvěním obráběcího stroje a s opotřebením nástroje. Tím se odstraňuje složitost upínání součástek, upínacího zařízení a přípravků, protože laserový paprsek nepůsobí silou na obrobek. Největší výhodou laserového nástroje je možnost přesného obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou kalené oceli a keramika. Na druhé straně jeho nevýhodou je malá intenzita úběru materiálu v porovnání s klasickým soustružením. (8,9,11,22)

Vrtání laserem

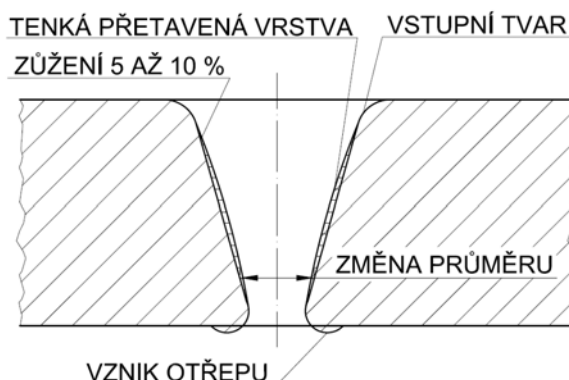
Při vrtání paprsek zahřívá povrch rychlostí $10^{10} \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, materiál se odpaří a umožní průnik paprsku hlouběji do povrchu. V průběhu vrtání se natavený materiál akumuluje v otvoru, vlivem eroze částic se rozstříkuje po stěnách otvoru a tlak v otvoru, který může dosahovat hodnoty 10^3 až 10^4 MPa způsobí, že proud nataveného kovu proudí ven z otvoru rychlostí ultrazvuku. Obr.() ukazuje typický tvar otvoru při vrtání laserem, za předpokladu, že ohnisko paprsku je na povrchu. Změna průměru otvoru se pohybuje v rozmezí ± 5 až ± 20 % v závislosti od optického systému laseru. (8,9,11,22)



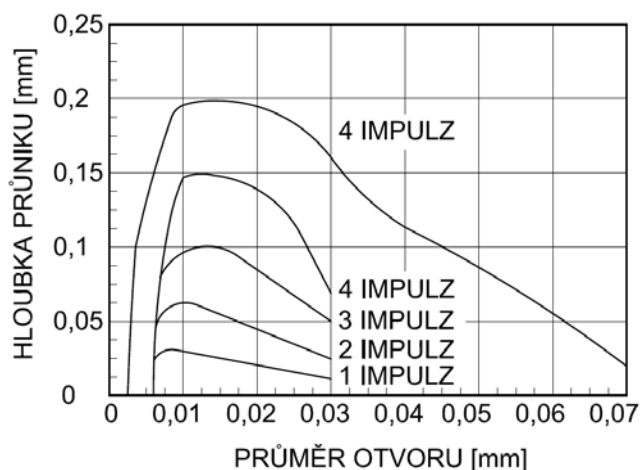
Obr. 2.5 Typický tvar vrtaného otvoru (22)

Obr. 2.5 ilustruje změny, které vznikají při vrtání laserem. Na vrtání otvorů se používá paprsek v kontinuálním, ale i v pulzním režimu. Z hlediska tepelně ovlivněné zóny je vrtání otvoru pulzujícím paprskem výhodnější, protože ovlivněná zóna je menší než při kontinuálním paprsku. Při vrtání pulzujícím paprskem vzniká postupně dostatečně hluboký otvor jen po opakovaných impulzech. Počet impulzů a jejich intenzita určuje hloubku průniku do materiálu,

obr. 2.7. Délka impulzu bývá v rozsahu 0,5 až 2 ms, frekvence impulzů pro Nd-YAG je v rozsahu 5 až 20 Hz, pro CO₂ laser až do 100 Hz. (22)

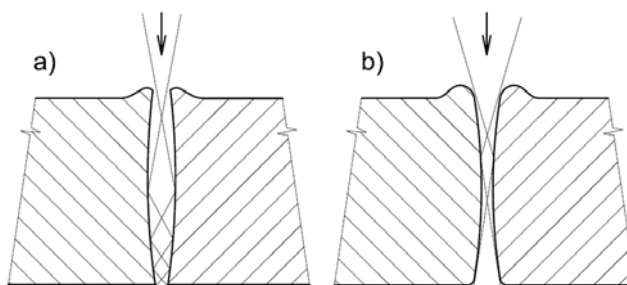


Obr. 2.6 Změna materiálu následkem vrtání laserovým paprskem (22)



Obr. 2.7 Závislost hloubky průniku paprsku na počtu impulzů a vznikajícího průměru otvoru při vrtání vysokolegované oceli (22)

Hloubka otvoru a jeho tvar, jako i intenzita úběru materiálu je silně ovlivněná ohniskovou vzdáleností, polohou ohniska vzhledem k povrchu obrobku a energií impulzu. Stanovení optimálních podmínek pro vrtání musí být případ od případu s ohledem na druh materiálu obrobku a profil vrtaného otvoru. Profil a hloubka otvoru jsou závislé na relativní poloze mezi ohniskem laserového paprsku a povrchem obrobku. S rostoucí tloušťkou materiálu a hloubkou otvoru se musí ohnisková vzdálenost prodlužovat. Doporučená ohnisková vzdálenost bývá v rozsahu od 100 do 250 mm. (8,9,11,22)



Obr. 2.8 Řez kráterem vypáleným laserovým svazkem při různých polohách ohniska fokusační techniky (11)
a) ohnisko při povrchu materiálu, b) ohnisko pod povrchem

Přesnost fokusace paprsku je velmi významná při vrtání materiálů s vysokým bodem tavení, ale také pro dodržení kvality otvoru. Toto se hodnotí jeho kruhovitostí, množstvím vznikajících trhlin na stěně řezné mezery a tloušťkou přetavené vrstvy. (22)

Z technologického hlediska možno laserem vrtat průběžné otvory i slepé otvory. Vrtání laserem je možné s podporou resp. bez podpory přídavného plynu. Při vrtání s podporou přídavného plynu se používají podobné podmínky jako při řezání. Vzdálenost dýzy od materiálu je v rozsahu od 4 do 40 mm. Průměrné výrobní lasery pro vrtání mají výkon kolem 500 W. (22)

Typické oblasti použití laserového vrtání jsou orientované na vrtání velmi malých otvorů a otvorů se zakřivenou osou souměrnosti, jako jsou otvory pro:

- palivové filtry,
- karburátorové dýzy,
- otvory pro bezpečnostní matice,
- chladicí otvory pro lopatky proudových motorů apod. (22)

Laser při dokončování povrchů

Konvenční dokončovací procesy v obrábění (broušení, honování, lapování) jsou založené na vícenásobném bodovém kontaktu brusného zrna vázaného v nástroji (brusný kotouč, honovací kameny), anebo v tuhém či kapalném médiu (lapovací pasta) s povrchem obrobku. Každé zrno ubírá částice materiálu ve tvaru třísky s mikroskopickými rozměry. Přitom na kvalitně dokončený povrch, uvedenými technologiemi, hlavně broušením, je potřebné vynaložit poměrně velkou energii. V procesu vznikají velké hodnoty zatěžujících sil, nástroj podléhá opotřebení a jeho použití je limitované vlastnostmi obráběného materiálu (tvrdost, křehkost). (8,9,11,22)

Technologie dokončování povrchů pomocí laserovým paprskem spočívá v působení laserového paprsku tangenciálně na povrch rotujícího obrobku, čímž dochází k zahlazování mikronerovností po předcházející operaci a snižování hodnoty drsnosti. K úběru materiálu laserovým paprskem dochází odpařením (plastické materiály a kompozitní materiály) anebo natavením a následným odstraněním taveniny proudem přídavného plynu (kovy a keramické materiály). Hloubka řezu závisí na výkonu paprsku, rychlosti posuvu obrobku a rychlosti jeho rotace. Kolísání těchto parametrů způsobuje proměnlivou hloubku řezu. Když paprsek dopadá na povrch obrobku v tangenciálním směru, hloubka řezu je stabilizovaná relativní polohou paprsku k povrchu obrobku. Kolísání rychlosti posuvu obrobku a jeho rotace mají o mnoho menší vliv na hloubku průniku paprsku do materiálu. Hloubka řezu je ovlivněna především výstupní intenzitou paprsku. (8,9,11,22)

Mezi přednosti laserového dokončování v porovnání s broušením patří:

- jeden druh nástroje (laserový paprsek) je možné použít pro různé materiály,

- není potřebná specifikace vlastnosti paprsku jako v případě brusného kotouče, kde je potřebné mimo rozměrů určit druh brusiva, druh pojiva, tvrdost kotouče, zrnitost brusiva a struktura kotouče,
- nedochází k opotřebení nástroje (laserového paprsku),
- laserové dokončování povrchů je vysoko flexibilní technologie vhodná pro dokončování dílců v širokém rozsahu komplexnosti geometrického tvaru a různorodosti materiálů. (22)

2.2 Z hlediska obráběných materiálů

2.2.1 Obráběné materiály pro metodu laser

Obráběné materiály metodou laser se dají shrnout do čtyř hlavních skupin. Každá skupina materiálů má svá omezení nebo podmínky, za kterých je možno daný materiál obrábět. Skupiny materiálů jsou:

- kovové materiály,
- neželezné kovy,
- nekovové materiály,
- kompozitní materiály. (22)

Kovové materiály

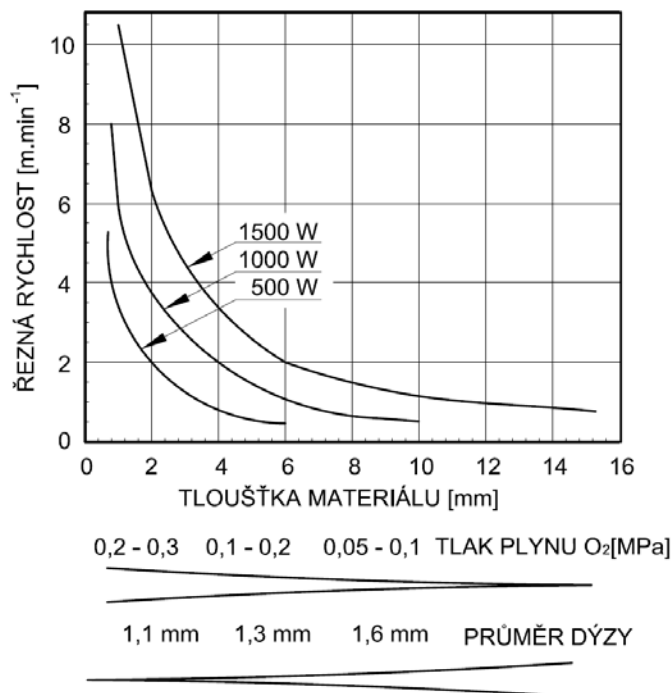
Pro řezání a dělení ocelí se přednostně používají CO₂ lasery, které jsou nejehospodárnější pro tloušťky materiálu 6 až 7 mm, technicky je možné řezat i větší tloušťky materiálů a to až do 25 mm. (20,22)

Při dělení ocelových materiálů se rozlišuje druh ocele (uhlíková, nízkolegovaná, legovaná, korozivzdorná apod.), historie zpracování (plechy válcované za tepla, za studena) a dodatečné úpravy (povrchová úprava plechů, tryskané povrchy plechů, pozinkované plechy apod.), které je potřebné brát do úvahy při návrhu použití laserové technologie. Stav povrchu po předchozí operaci, zbytky olejů a maziv, korozní zplodiny a tvrdé oxidické vrstvy ovlivní dělení laserem. Oxidické vrstvy zpomalují rychlost řezání a zhoršují kvalitu řezu tvořením otřepů ve formě ztuhnutých kapek materiálu ve spodní části řezu. (20,22)

Povrchově upravené plechy jako jsou pozinkované, barvené, tryskané lze řezat laserem za určitých omezujících podmínek. Řezání pozinkovaných plechů je doprovázeno natavením a odpařením zinku v zóně řezu, tvořením kapek roztaveného a ztuhnutého materiálu ve spodní části řezu, což zhoršuje kvalitu řezu. Výpary zinku jsou zdraví škodlivé, takže musí být zabezpečeno dostatečné odsávání. Kadmium používané také na povrchové úpravy je méně problematické oproti zinku, avšak jeho výpary jsou jedovaté a o mnoho nebezpečnější pro zdraví a okolí. Poplastované a barvené plechy je možno řezat laserem, ale při řezání dochází k poškození povlaku v oblasti řezu, poškození je způsobené odvodem tepla ze zóny řezání, což degraduje vazbu mezi povlakem a plechem. Poškození může být eliminováno použitím chladícího média. Tryskané povrchy plechů vykazují při řezání nízkou kvalitu řezu v důsledku usazených tvrdých částic tryskacího prostředku v roztaveném materiálu, které zůstali v zóně řezu.

Některé zásady řezání korozivzdorných ocelí a jejich kvalitativní porovnání s řezáním nízkolegovaných ocelí jsou:

- korozivzdorné oceli je potřebné řezat v závislosti na obsahu chromu až o 40 % pomaleji než nízkolegované oceli (chrom má silný sklon k tvorbě oxidické vrstvy, která brání další oxidaci při řezání),
- maximální tloušťka řezaných korozivzdorných materiálů je při stejném výkonu nižší než u ocelí nízkolegovaných. Obr. 2.9 ukazuje doporučené podmínky pro řezání nízkolegované oceli pro daný rozsah tloušťek materiálu a různé výkony CO₂ laseru se zohledněním změny tlaku přidavného plynu – kyslíku a průměru laserové hlavice. Doporučené tloušťky pro řezání korozivzdorných ocelí pro výkony laseru 500, 1000 a 1500 W jsou v rozsahu od 1 do 9 mm,
- při řezání korozivzdorných ocelí se hůře odstraňuje tavenina ze zářezu. Oxid chromu brání úniku taveniny z řezu a ta zůstává ve formě otřepu na spodní straně řezu. (20,22)

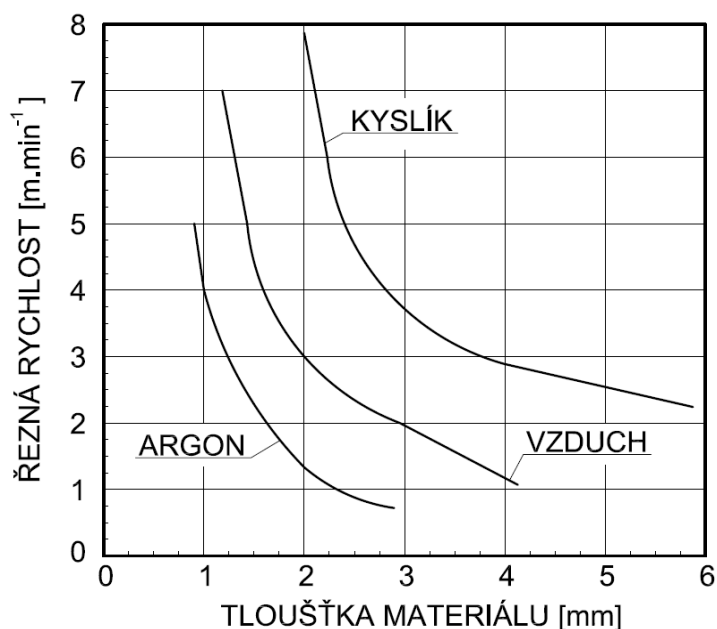


Obr. 2.9 Doporučené rychlosti řezání nízkolegované oceli pro různé výkony laseru, proměnlivé parametry tlaku přidavného plynu a změnu průměru dýzy pro přidavný plyn (22)

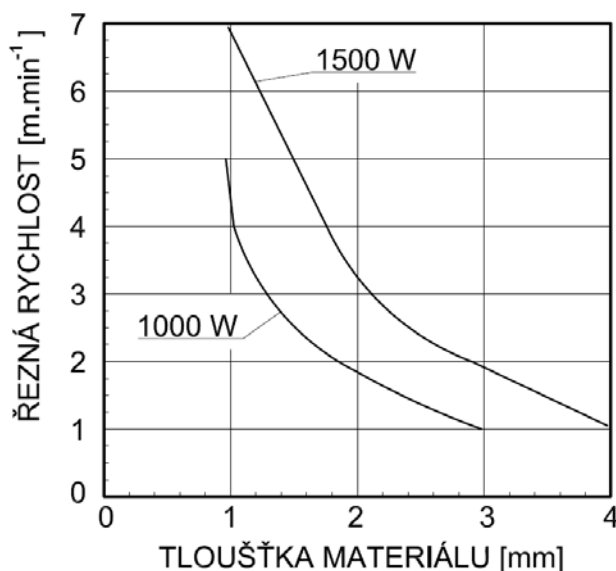
Neželezné kovy

Do této skupiny materiálů patří titan, hliník, nikl a měď, které jsou vhodné pro řezání CO₂ laserem jen s určitými omezeními. Proces řezání je méně efektivní oproti dělení ocelí. Tyto kovy mají silný sklon k oxidaci a při řezání vyžadují někdy i vakuovou atmosféru. Tyto materiály jsou charakteristické vznikem otřepů (ztuhnutých kapek materiálu). Kovy, které nejsou silně reaktivní s kyslíkem, jako je nikl, se doporučuje řezat laserem pomocí ochranného přidavného plynu, obvykle inertního plynu jako je argon. (22)

Rychlost řezání neželezných kovových materiálů je nižší v porovnání s oceli, tato redukce nastává v důsledku vyšší tepelné vodivosti a reflektivity těchto kovů a také nižší účinnosti oxidační reakce při řezání. Pouze titan z uvedených neželezných kovů reaguje podobně jako ocel a může být řezán podobnou účinností. Obr. 2.10 ukazuje doporučené řezné rychlosti při dělení titanu CO₂ laserem v závislosti na druhu přídavného plynu a výkonu laseru. (22)



Obr. 2.10 Doporučení pro řezání titanu CO₂ laserem 1000 W a různými přídavnými plyny (22)



Obr. 2.11 Typické řezné rychlosti pro řezání hliníkových slitin pro výkon CO₂ laseru 1000 a 1500 W, kyslík s tlakem 0,2 až 0,6 MPa jako přídavný plyn (22)

Protože titan je náchylný na tvoření výrazné oxidické vrstvy, pro řezání se doporučuje používat argon jako přídavný plyn, který zaručí, aby hrana řezu nebyla zoxidovaná a aby měla stříbrnou barvu. Žlutá anebo modrá barva svědčí

o přítomnosti oxidické vrstvy. Řezání titanu vysokým tlakem plynu (0,3 až 1 MPa) zaručuje kvalitní řeznou hranu bez otřepů. Použití kyslíku jako přídavného plynu je při řezání titanu nebezpečné a může vést k nekontrolovanému vzplanutí, zejména když se dělí menší tloušťky materiálu. (22)

Hliník a jeho slitiny se doporučuje řezat až po vytvoření anodické vrstvy a to umožňuje řezání hliníku až o 30 % rychleji. Doporučené řezné rychlosti a řezané tloušťky hliníkových plechů ilustruje obr. 2.11. (22)

Nekovové materiály

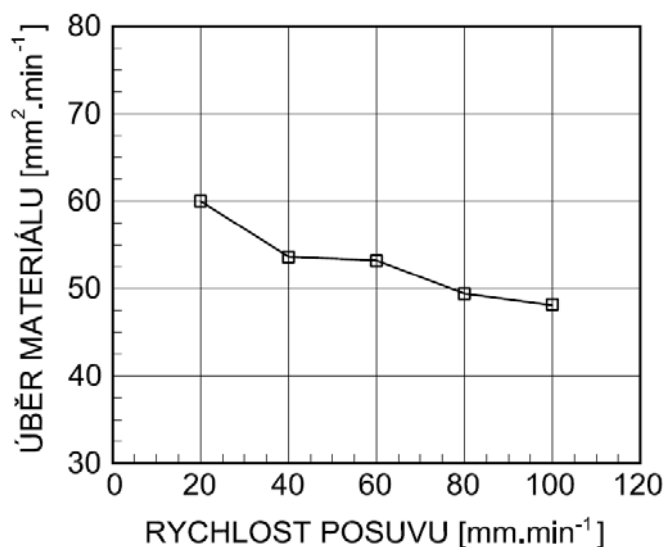
Řezný proces nekovových materiálů (keramika, plasty a kompozitní materiály) zahrnuje tři dominantní mechanizmy:

- dělení tavením a následným stříhem je velmi rychlý způsob řezání s vysokou kvalitou řezu a je typický pro termoplasty (polypropylén, polystyren, nylon, polyetylén) a pro keramické materiály,
- natavením a následným odpařením materiálu v zóně řezu vzniká vysoce kvalitní řezná mezera, plocha řezu je hladká jakoby leštěná, při řezání vlivem vysoké teploty (nad teplotu tavení) dochází ke změně fáze materiálu, z pevné na kapalnou a následně na páru. Mechanismus řezání je typický pro plexisklo, polyacetát, akryl.
- chemická degradace, která vzniká vlivem vysoké teploty a nerovnorodosti složení materiálu. Hrany po řezání jsou rovné a povrch řezu je hladký, ale je pokrytý jemnou vrstvou zbytkového uhlíkového prachu. Tento mechanismus je typický pro řezání produktů na bázi dřeva, kompozitních materiálů, ale i některých plastů, jako polyvinylchlorid (PVC), polyuretan (novodur). (22)

Kompozitní materiály

Při řezání kompozitních materiálů se doporučuje výkon laseru volit s ohledem na vlastnosti použitých vláken (skleněné, uhlíkové, aramidové apod.) ne na vlastnosti matrice. Vysoký výkon potřebný pro řezání vláken chemicky degraduje hlavně polymerové matrice. Matrice a vlákna mají rozdílnou teplotu odpařování a teda i časy natavení materiálů. Tepelná vodivost kompozitních materiálů je anizotropní. Pro řezání a dělení kompozitních materiálů jsou vhodné Nd-YAG lasery a excimerové lasery na bázi KrF, vyznačují se menší tepelně ovlivněnou oblastí v porovnání s řezáním CO₂ laserem. (22)

Na obr. 2.12 je účinek rychlosti posuvu na úběr materiálu při řezání CFC kompozitu (carbon fibre composite – polymerový kompozit s uhlíkovým vláknem) pomocí Nd-YAG laseru. Laserový paprsek způsobuje poškození kompozitních materiálů tavením matrice, tepelnou roztažností uhlíkových vláken (pro CFC kompozity), vznikem kráterů na povrchu řezné mezery. Po řezání vzniká rýhovaný povrch. (22)



Obr. 2.12 Rychlost posuvu na úběr materiálu při řezání CFC kompozitu Nd-YAG laserem - 120W (energie impulsu 1J; frekvence impulsu $f_p=30\text{Hz}$; trvání impulsu $t_i=1,4\text{ms}$; ohnisková vzdálenost = 80mm, průměr paprsku 0,1 mm (22)

2.2.2 Obráběné materiály pro metodu vodní paprsek

Vysokotlaký vodní paprsek a abrazivní vodní paprsek nachází stále širší použití v různých průmyslových odvětvích, od dělení plochých ale i tvarových materiálů jako sklo, hliník, oceli, litiny, titan, kompozitní materiály a keramické materiály, až po využití vodního paprsku jako řezného nástroje pro operaci soustružení, frézování, vrtání apod. (22)

Pro řezání abrazivním vodním paprskem nejsou žádná omezení ohledně obráběných materiálů. Proto je metoda řezání vysokotlakým paprskem vhodná pro všechny známé materiály vzhledem k vysoké univerzálnosti. Tato metoda zvládá dělení např. pancéřová skla o tloušťce materiálu 100 mm, titanové desky o tloušťce materiálu 250 mm a ocelové desky o tloušťce materiálu 170 mm. V tab. 2.1 jsou některé referenční údaje řezaných materiálů a řezných rychlostí pro dané tloušťky materiálu. (22)

Tab. 2.1 Tloušťky materiálů a jejich řezná rychlost (26)

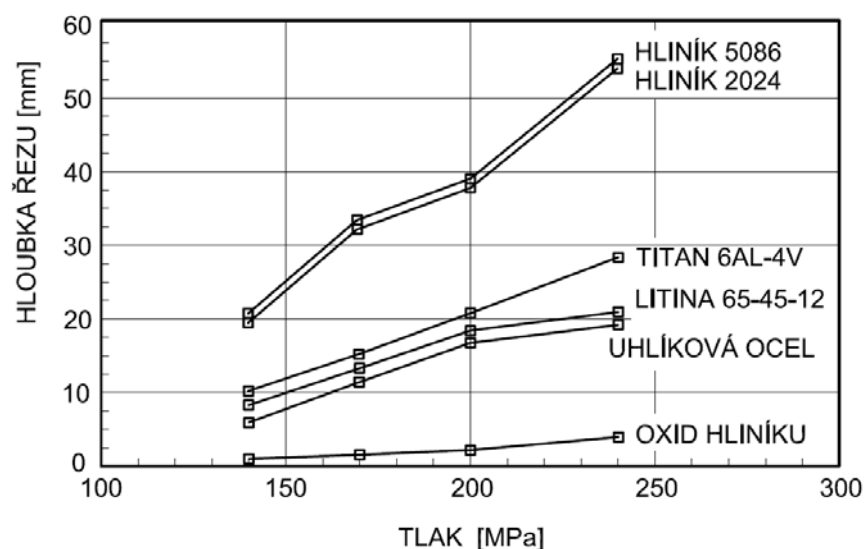
materiál	tloušťka [mm]	řezná rychlost [mm.min ⁻¹]
konstrukční ocel	1 až 70	3300 až 20
nerez ocel	1 až 50	2500 až 25
titan	1 až 60	3000 až 25
sklo	4 až 50	5000 až 200
guma	5 až 100	8000 až 200
sklolaminát	3 až 60	9000 až 200

Díky kosmickému a později i leteckému průmyslu se rozvíjely pracoviště na dělení titanu, wolframu, molybdenu, kobaltu, niklu, vysokopevných ocelí, slitin

s rozdílnou tepelnou vodivostí, tantalu, uranu, sendvičových konstrukcí, extrémně tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, silných kompozitních materiálů, skel všeho druhu a všech tepelně, elektricky i radiačně izolačních materiálů. Mimořádně výhodné se ukázalo použití při výrobě lopatek, trysek a dílů tryskových a raketových motorů, ale i parních turbín a turbokompresorů. (21,26)

Tab. 2.2 Rychlost řezání vodním paprskem bez brusiva (22,26)

materiál	tloušťka [mm]	řezná rychlost [mm.s ⁻¹]	průměr dýzy [mm]	pracovní tlak [MPa]
azbestový obklad	18	1520	0,20	190
gumová dlaždice	3	150	0,13	380
sklo	300	420	0,15	350
polypropylén	2	60	0,10	380
polyester	12	600	0,15	380
polyvinylchlorid	0,75	300	0,10	380
uhlíkový kompozit	1,6	10	0,15	380
sklolaminát	1,7	40	0,20	385

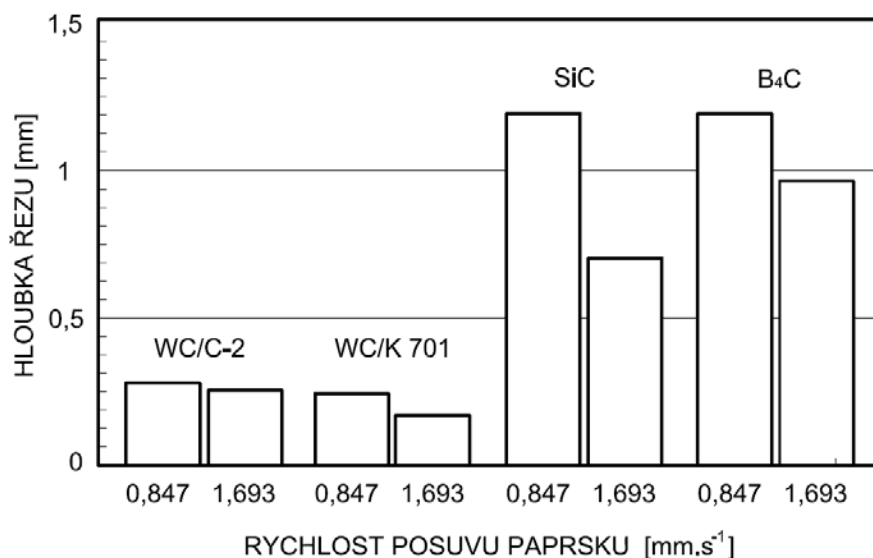


Obr. 2.13 Hloubka řezu pro různé materiály; hliník - $R_m=331$ až 386 MPa; $E=71$ až 73 GPa; uhlíková ocel - $R_m=441$ MPa; titan - $R_m=1035$ MPa, $E=113$ GPa; litina - $R_m=448$ MPa, $E=165$ GPa (22)

Rychlost proudění a tlak vodního paprsku mají různý vliv na řezání. Rychlost proudění ovlivňuje intenzitu úběru materiálu. Tab. 2.2 uvádí typické parametry řezání různých materiálů čistým vodním paprskem. Jak je vidět v tab. 2.2, čistý vodní paprsek umožňuje řezání a dělení nekovových materiálů. Zvýšení tlaku vody vyvolá vyšší rychlost proudění, zvyšuje se celková energie v dýze, čímž se vytváří předpoklady pro řezání silnějších materiálů. Na druhé straně zvýšení tlaku vody vyžaduje výkonnější zařízení. Vyšší tlak vody zvyšuje

rychlost paprsku a jeho průnik do materiálu. Zvýšení tlaku vody zároveň zlepšuje kvalitu řezných hran při řezání. (22)

Jak vyplývá z obr. 2.14, vliv tvrdosti materiálu na hloubku řezu je rozdílný pro materiály s rozdílnou tvrdostí, jako jsou relativně měkký hliník a velmi tvrdý oxid hliníku. V porovnání s „klasickým“ řezacím nástrojem s definovanou geometrií řezné hrany je řezání abrazivním vodním paprskem proces, který je méně citlivý na tvrdost materiálu. Na druhé straně svůj vliv mimo tvrdost materiálu hraje i jeho houževnatost. Hloubka řezu je částečně ovlivněna mechanickými vlastnostmi materiálu, jejich tvrdostí a houževnatostí. Při řezání materiálů s vysokou tvrdostí, jako je karbid křemíku (SiC) a karbid bóru (B_4C), se dosahují větší hloubky řezu v porovnání s materiály stejně tvrdými, ale zároveň houževnatými, jako je karbid wolframu (WC). Karbid wolframu při konstantních podmínkách řezání vykazuje až 4 krát menší hloubku řezu, než výše uvedené materiály SiC a B_4C , obr. 2.14. (22)



Obr. 2.14 Hloubka řezu pro materiály s odlišnou tvrdostí a houževnatostí (22)

Podmínky řezání: $d_n=0,457$ mm, $d_m=1,14$ mm, $l_m=50$ mm, $p=311$ MPa, $m_a=12,7$ g.s⁻¹, brusivo granát zrnitost 80

2.3 Porovnání z hlediska extrémní možnosti použití

V posledních letech se ke strojům na řezání pomocí laseru anebo vodního paprsku dodávají příslušenství, které pomáhají zvýšit funkčnost stroje a dovedou řezat větší množství tvarově obtížně řezaných materiálů, které by nebylo proveditelné bez tohoto příslušenství. Jedná se například o pěti-osou řezací hlavu, která je vhodná pro prostorové řezání ve strojrenských aplikacích, výškový senzor zajišťuje konstantní vzdálenost řezací hlavy od povrchu materiálu, dávkovač abraziva, který umožňuje plynule měnit potřebné průtokové množství abraziva bez nutnosti zastavení stroje apod. (34,42)

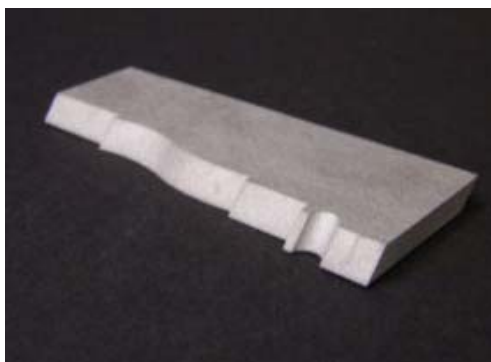
Natáčecí řezací hlava

Na obr. 2.15 je zobrazena řezací hlavice, která je schopná se pohybovat a natáčet v pěti osách. Základní osy x a y zajišťuje stůl portálové koncepce. Na podélných osách se pohybuje příčnick s vozíkem nesoucím z -ovou osu. Na její přírubě jsou umístěny dvě navzájem kolmé rotační osy. Díky tomuto uspořádání je možno řezat deskový materiál až pod úhlem 45 stupňů.



Obr. 2.15 Řezací hlavice (34)

Na obr. 2.16 je ukázka řezu, ostří se zužujícími řezy z nerez oceli. Takto atypicky řezaná část požaduje nižší řeznou rychlost, která se projeví v dražší ceně řezu.



Obr. 2.16 Řezání úkosu nerez oceli (44)

Výškový senzor

Výškový senzor plní funkci automatického hlídání optimální distance mezi nerovným řezaným polotovarem a řezací tryskou. Při stranovém pohybu zabrání nárazu před jakoukoli překážkou, která by mohla narazit do trysky a následně ji ulomit. Toto může nastat při vzpříčení části polotovaru resp. výřezu. K udržování správné distance je použit potenciometrický senzor. Na obr. 2.17 je zobrazen výškový senzor. (37,43)



Obr. 2.17 Výškový senzor od firmy PTV a model výškového senzoru firmy Omax (34,37)

Řízený dávkovač abraziva

Řízený dávkovač abraziva umožňuje plynule měnit průtok abraziva během řezu bez nutnosti zastavit řezání. Vhodnou volbou regulace množství při různých režimech provozu lze snížit spotřebu abraziva. Regulaci je možno provádět automaticky z řezacího programu anebo manuálně přímo na stroji. Úspora abraziva sníží provozní náklady. Na obr. 2.18 je zobrazen dávkovač abraziva od firmy PTV. (34,42)



Obr. 2.18 Řízený dávkovač abraziva (34,42)

Porovnání tloušťek materiálů pro řezání vodním paprskem a laserem

Pro porovnání proříznuté síly materiálu pro vodní paprsek a laser je nutno porovnávat podobné stroje s podobným výstupním výkonem. Nejlépe to bude vystihovat výrobce, který vyrábí oba typy stroje, v tomto případě se jedná o firmu Bystronic, která dodává stroje pro řezání již několik let.

Řezání vodním tlakem zastupuje stroj ByJet Pro 3015 s maximálním provozním tlakem 3800 bar, řezání laserem zastupuje stroj Byspeed 4020 s výkonem 5200W. (46)

U metody řezání pomocí laseru jsou maximální tloušťky materiálu dány už od výrobce. U konstrukční oceli pro tento typ a výkon stroje je maximální tloušťka plechu 25 mm, pro ušlechtilou ocel to je 20 mm a pro slitiny hliníku 12 mm. Pro řezání maximálních tloušťek materiálu musí být dodrženy podmínky dané výrobcem jako je optimálně ošetřené a nastavené laserové zařízení a materiály musí dosahovat kvalit požadované výrobcem. (46)

U metody řezání pomocí vodního paprsku žádná taková omezení jako u řezání laseru nejsou. U stroje ByJet Pro 3015 je maximální možná řezná tloušťka materiálu 200 mm a to díky konstrukci stroje. Řezná tloušťka u řezání vodním paprskem je závislá na mnoha faktorech jako je výstupní tlak, použité abrazivo, průtok abraziva, průměry výstupní a vstupní trysky apod. Vodní paprsek je schopen řezat i tloušťky větší jak 200 mm, ale je potřeba zvážit kvalitu povrchu kvůli doběhu paprsku a jeho sbíhavosti hran. (46)

Na obr. 2.19 je zobrazen stroj od firmy Bystronic ByJet Pro 3015 a na obr. 2.20 je stroj Byspeed 4020 s výkonem 5200 W od stejného výrobce.



Obr. 2.19 ByJet Pro 3015, maximální provozní tlak 3800 bar, rozměry stroje: délka 13450mm, šířka 5900mm, výška 2550 mm (46)



Obr. 2.20 Byspeed 4020, výkon 5200W, rozměry stroje: délka 9850mm, šířka 8450mm, výška 2300 (46)

3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

3.1 Přednosti technologie vodního paprsku a perspektivy využití

Přednosti technologie vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku v porovnání s ostatními technologiemi, které předurčují rozsah jeho použití:

- energetická účinnost cca 80 % (8-krát větší v porovnání oproti laseru,
- relativně studený řez, který umožňuje řezat materiály citlivé na teplotu,
- řezné hrany nevykazují tepelnou a mechanickou deformaci,
- v řezu nevznikají zbytková napětí a mikrotrhliny,
- vlastní proces řezání je bezprašný a nevznikají při něm žádné plyny a páry, jako např. při mechanickém způsobu řezání,
- malé ztráty materiálu v řezu, které jsou výsledkem průměru ústí výtokové štěrbin v dýze – vodní paprsek 0,1 až 0,25 mm, abrazivní paprsek 0,8 až 2 mm,
- jedním vysokotlakým čerpadlem je možné napájet až 70 současně pracujících dýz vodního paprsku anebo 8 dýz abrazivního paprsku,
- životnost kapalinových dýz je cca 100 hodin, životnost abrazivních dýz je cca 50 hodin,
- možnost řezání i pod hladinou vody,
- řezat je možné bez omezení ve všech směrech, obrysech, tvarech a úkosech,
- mimořádná provozní spolehlivost a jednoduchost obsluhy,
- změnou tlaku je možné v průběhu několik sekund materiál oplachovat, otrýskávat, čistit a řezat,
- možnost řezat vlnité materiály, malá citlivost na vzdálenost dýzy od materiálu (např. řezání a dělení střešních krytin),
- řezání problémových materiálů, jako jsou síťované materiály a vata,
- vysoká flexibilita dokonce i při složité geometrii výřezu,
- vrtání a řezání jedním nástrojem,
- zcela odpadá potřeba nástrojů,
- hospodárnost odpadu materiálu úzkou štěrbinou řezu,
- přesné leštění a čištění povrchů těžkoobrobitelných materiálů,
- ideální pro automatizaci pohybu paprsku,
- není potřebné pevné upnutí obrobků,
- hygienické a nezávadné prostředí,
- elektricky nevodivý řez,

- mimořádně jednoduché rozvody tlakové vody, nevyžadující v průběhu celé životnosti vůbec žádnou údržbu,
- spuštění a zastavení paprsku v čase 150 milisekund,
- materiál je možno kdekoli prostřelit či provrtat – také řez kdekoli ukončit. (4,22,25,26)

3.2 Přednosti technologie laseru a perspektivy využití

Kvalitativní přednosti laseru v průmyslových technologických aplikacích v porovnání s jinými technologiemi jsou:

- extrémní koncentrace energie na plochu, vysoká hustota energie a výkonu,
- jednoduchá regulace výkonu laseru a jeho energetického účinku na materiál,
- lehké ovládání paprsku,
- vrtání a řezání jedním nástrojem,
- zcela odpadá potřeba nástrojů,
- nevzniká RTG záření v interakci s jinými látkami,
- není potřebné vakuum,
- rozsah materiálů pro řezání laserem je velmi široký (jen abrazivní vodní paprsek poskytuje větší možnosti řezaných materiálů),
 - šířka řezné spáry je velmi úzká (0,1 až 1,0 mm), proto se mohou řezat různé tvary a detaily profilu,
 - získáváme ostré hrany,
 - maximální tloušťka materiálu, kterou lze dělit je velmi omezená,
 - laserem se dají řezat všechny materiály bez ohledu na tvrdost, pevnost a křehkost,
 - deformace řezaných součástí je velmi malá,
 - jedná se o bezkontaktní opracování materiálů,
 - na obrobek působí pouze laserový paprsek, odpadají problémy s vibrací stroje, nástroje, odpadá složitost upínacího zařízení,
 - spolehlivé a velmi vysoce kvalitní řezání v automatickém cyklu,
 - minimální průměr vrtání 0,005 mm \pm 5 %, hloubka vrtaného otvoru v závislosti na vrtaném materiálu až 23 mm. (11,17,22)

3.3 Náklady na hodinu provozu stroje

Tab. 3.1 Orientační náklady na provoz uvedených způsobů obrábění (5,10,30,31)

použitá technologie obrábění	náklady na hodinu provozu [Kč.hod ⁻¹]
laser	2500 až 3000
vodní paprsek	1000 až 1500
elektroerozivní obrábění	700 až 1000
obrábění ultrazvukem	700 až 1000
NC bruska	400 až 600
klasický brousicí stroj	150 až 300

Náklady na hodinu provozu stroje se označuje N_{hs} [Kč.hod⁻¹] a s uvážením specifikovaných složek jsou obecně vyjádřeny ve tvaru:

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d - L}{Z \cdot F_{ef}} \quad (3.1)$$

Náklady na provoz obráběcího stroje obecně patří do režijních nákladů s ohledem na relativně vysoké pořizovací náklady obráběcích strojů je výhodné náklady na jejich provoz z celkových režijních nákladů vyčlenit a adresně přiřadit k danému stroji. Náklady na provoz obráběcího stroje se konkretizují na jednu hodinu jeho provozu.(26;31)

Nákladové položky provozu obráběcího stroje

Pro vyjádření nákladů na hodinu provozu stroje se uvažují dále specifikované základní položky. V konkrétním případě mohou být uvedené položky rozšířeny na bližších znalostech příslušného provozu.(26;31)

- Cena stroje C_s [Kč] – cena u dodavatele nebo výrobce, náklady na případný úvěr.
- Náklady na instalaci stroje N_i [Kč] – dovoz, základy, montáž na místě, přívody energií.
- Náklady na demontáž N_d [Kč] – po skončení technické životnosti stroje, uvedení pracovního místa do původního stavu.
- Likvidační hodnota L [Kč] – odprodej po skončení životnosti, případně cena šrotu.
- Doba životnosti Z [rok] – souvisí s dobou odepisování stroje.
- Efektivní časový fond stroje za rok F_{ef} [hod] – využitelný fond pracovní doby pro danou směnnost zohledňující preventivní údržbu, opravy, absence obsluhy.
- Fixní hodinová sazba S_f [Kč.hod⁻¹] – mzda obsluhy, energie, podíl práce programátora.

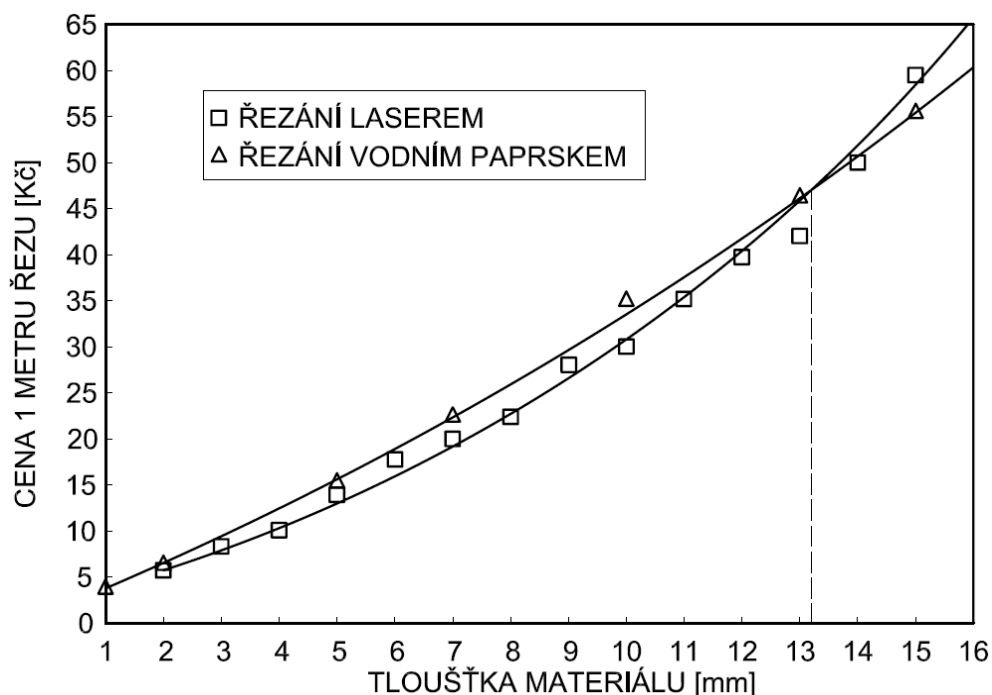
3.4 POROVNÁNÍ CEN ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM A LASEREM

Použití laseru k řezání je oproti řezání vodním abrazivním paprskem velmi omezeno z hlediska tloušťky materiálu, které je možno danou metodou řezat. Pro menší tloušťky materiálů je vhodné použít k řezání laser kvůli vysokým rychlostem posuvu, který způsobuje levnější řezání. Se stoupající tloušťkou materiálu se znatelně snižuje rychlost posuvu laseru a tím narůstá cena řezání. Rychlosti posuvu abrazivního paprsku klesají oproti laseru neúměrně pomaleji.

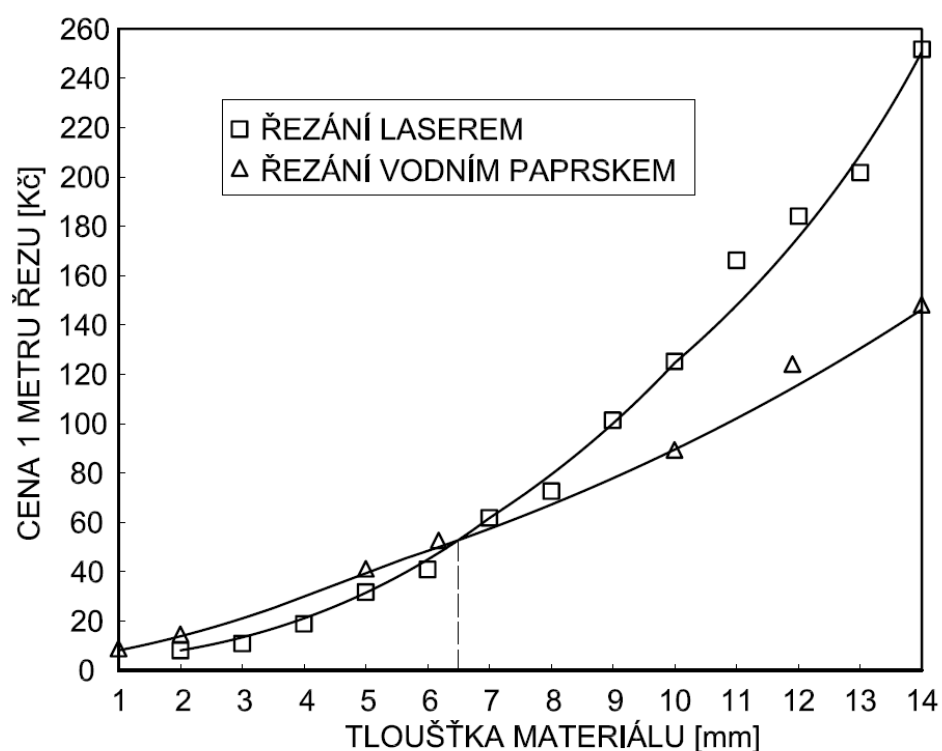
Závislost ceny jednoho metru řezu na tloušťce materiálu pro hlavní tři skupiny materiálů, jako jsou měkká ocel, korozivzdorná ocel a slitiny hliníku zobrazují obr. 3.1 až obr.3.3. Tyto materiály se řezaly laserem i vodním paprskem, a je zde naznačeno, že řezání vodním paprskem je levnější pro menší tloušťky materiálu a pro hodnoty větších tlouštěk materiálu je naopak výhodnější použití vodního paprsku.

Nutno vzpomenout na to, že se zde porovnávají zcela neporovnatelné metody řezání, a že je mnoho faktorů, které ovlivňují výsledky. Tyto hodnoty jsou stanoveny pro určité stroje s podobným výkonem.

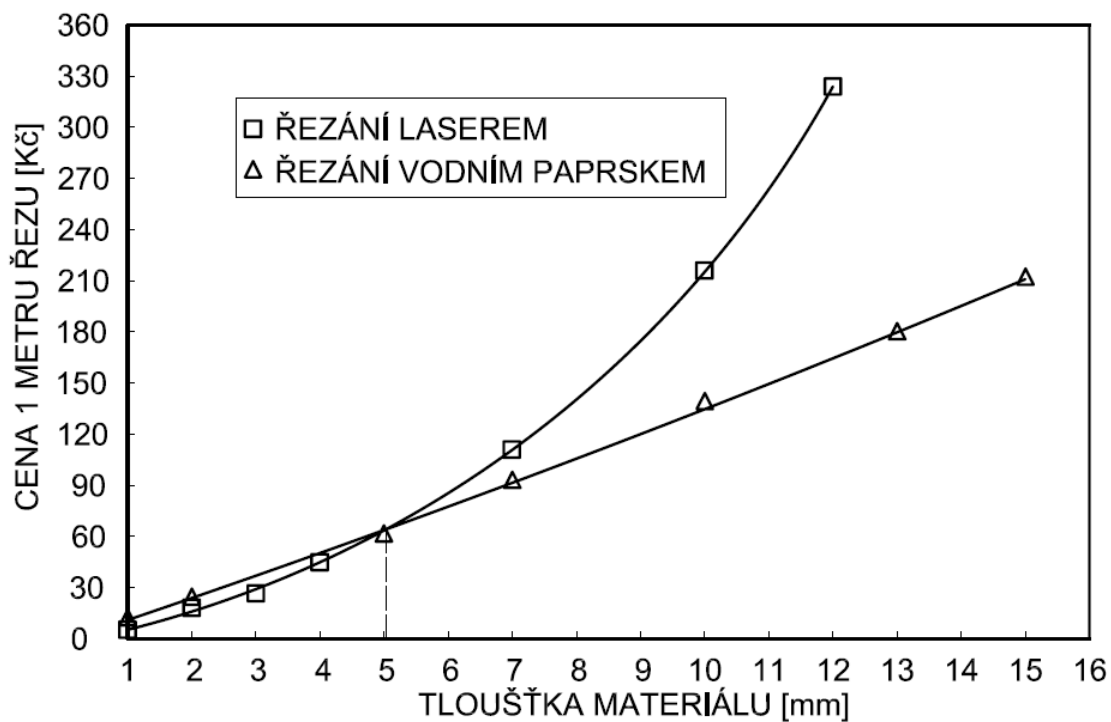
Parametry ovlivňující výstupní rychlost posuvu řezání a následně i cenu řezu u vysokotlakého vodního paprsku jsou výstupní tlak z trysky, průměr vstupní trysky, průměr směšovací trysky, vzdálenost trysky od povrchu materiálu, množství použitého abraziva a jeho zrnitost atd. U laseru ovlivňující parametry jsou výkon laseru, vzdálenost ohniska od povrchu materiálu, použitý přídavný plyn při řezání a jeho použitý tlak apod.



Obr. 3.1 Cena řezu měkkých ocelí laseru a vodního paprsku (2,22,27,30,45)
 Podmínky řezání: vodní paprsek: výstupní tlak 4000bar; průtok brusiva $0,75 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$; průměr vstupního otvoru trysky 0,37 mm; průměr směšovací trubice 0,762 mm; laser: CO₂ laser s výkonem 2000 W; přídavný plyn O₂



Obr. 3.2 Cena řezu korozivzdorných ocelí laseru a vodního paprsku (2,22,27,30,45)
 Podmínky řezání: vodní paprsek: výstupní tlak 4000bar; průtok brusiva $0,75 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$; průměr vstupního otvoru trysky 0,37 mm; průměr směšovací trubice 0,762 mm; laser: CO₂ laser s výkonem 2000 W; přídatný plyn N₂



Obr. 3.3 Cena řezu hliníkových slitin laseru a vodního paprsku (2,22,27,30,45)
 Podmínky řezání: vodní paprsek: výstupní tlak 2000bar; průtok brusiva $0,3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$; průměr vstupního otvoru trysky 0,34 mm; průměr směšovací trubice 1,27 mm; laser: CO₂ laser s výkonem 1500 W; přídatný plyn O₂

ZÁVĚR

Použití nekonvenčních technologií obrábění se celosvětově dlouhodobě zvyšuje a zdokonaluje. Důvodem je zlepšování obráběných materiálů a následné zhoršení jejich obrobiteľnosti. Proto v mnoha případech nahrazují nekonvenční způsoby obrábění klasické třískové způsoby kvůli perspektivnímu a rentabilnímu provozu. Tyto metody jsou vhodné pro obrábění obtížně obrobiteľných materiálů, složitých tvarů anebo velikostí a přesností úběru materiálu oproti třískovému obrábění. Paprskové technologie se výhradně používají na dělení materiálů, tato skupina zaujímá kolem osmdesáti procent použití paprskových technologií jako je laser a vodní paprsek při obrábění materiálů. Do zbylých asi dvaceti procent obrábění paprskovými technologiemi spadá frézování, soustružení, vrtání a řezání závitů a to především pro těžkoobrobiteľné materiály. Tato skupina se stále více uplatňuje ve strojírenství a zaujímá v posledních letech stále větší použití.

Diplomová práce byla zaměřena na využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství se zaměřením na standardní využití. Rozsah práce je shrnut do následujících bodů:

- rozbor technologického principu metody vodní paprsek, který se dělí na dvě hlavní skupiny. První skupinou je řezání čistým vodním paprskem a tou druhou skupinou je řezání vodním abrazivním paprskem s abrazivní příměsí.
- rozbor technologického principu metody laser. Se zaměřením na CO₂ lasery a také na Nd-YAG lasery, které se používají ve strojírenství asi v největší míře.
- vzájemné porovnání obou metod a to z několika hledisek. Z hlediska standardního použití bylo poukázáno na dělení materiálů a následné zjednodušení v obrábění, kde jsou tyto metody zatím v rozvoji. Z hlediska obráběných materiálů, kde větší uplatnění nabízí vysokotlaký vodní paprsek, protože může obrábět většinu doposud známých materiálů. Posledním bodem bylo porovnání z hlediska extrémních možností použití.
- technicko-ekonomické vyhodnocení, kde jsou vyjmenovány přednosti a perspektivy jednotlivých technologií. Je zde naznačen výpočet nákladů na hodinu provozu stroje, ze kterého se vychází pro porovnání cen řezu laseru a vodního paprsku. Jsou stanoveny grafy pro hlavní tři skupiny materiálů, jako je měkká ocel, korozivzdorná ocel a slitiny hliníku. Jedná se o závislost ceny jednoho metru řezu v závislosti na tloušťce řezaného materiálu. Jak z těchto závislostí vyplývá, je lacinější použití laseru k řezání tenkých plechů a s přibývajícím tloušťkou je výhodnější použití vysokotlakého vodního paprsku. Na toto porovnání ovšem působí mnoho faktorů a vlivů, které ovlivňují volbu dané technologie řezání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Abrasive Waterjet Cutting – Application and Capability* [online]. c2007, [březen 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.accustream.com/pdf/waterjet-cutting-white-papers.pdf>>.
2. *Abrasivejet Cutting Parameter Generator* [počítačový program]. Ver. 1.2, [cit. únor 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.wardjet.com/>>.
3. *ATD IV. Řízený dávkovač abraziva*. PTV spol.s r.o. Hostivice, Česká republika. Zář 2007.
4. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Skriptum FSI ČVUT Vydavatelství ČVUT, Praha 1989. 122s.
5. *CNC tvarové pálení, řezání, dělení plechů plazmou* [online]. [cit. 2008-2-16]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.cnc-paleni-plazmou.eu/>>
6. *Dělení laserem* [online]. [cit. 2008-4-15]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.atrima.cz/laser/>>.
7. *Dělení materiálu vodním paprskem* [online]. [cit. 2008-4-15]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.fiutsro.eu/photos/sou2.jpg>>.
8. DUNOVSKÝ, JIŘÍ. Technologické aplikace laserů. In *Sborník referátů – Mladá Boleslav 28. – 29. 5. 1986 „Průmyslové aplikace laserů“*. Dům techniky ČSVTS Pardubice, s. 11 – 22.
9. DVOŘÁK, T. *Vývoj a aplikace laserů*. Praha: SIVO, 1968. 42s.
10. *Elektroerozivní drátové řezání* [online]. [cit. 2008-3-16]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.robotrio.cz>>.
11. ENGST, P. *Aplikace laserů*. 1. vyd Praha: Nakladatelství technické literatury SNTL, 1989. 208s.
12. *High-tech Waterjet Cutting* [online]. c2001, [cit. březen 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ant-ag.com/uploads/media/PR_HighTech16.03.01.pdf>
13. HLAVÁČ, L. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalínového paprsku vysoké energie s materiálem*. Profesorské přednášky ČVUT Fakulta strojní, 30s. ISBN 80-01-03465-8.
14. HOLEŠOVSKÝ, F., STANČÍK, L. *Materiály a technologie obrábění*. 1.vyd. Ústí nad Labem, 1991. 258s. ISBN 80-7044-024-4.
15. JECHAN, JIŘÍ. Řezání plechů CO₂ laserem na zařízeních Trumatic. In *Sborník referátů – Mladá Boleslav 28. – 29. 5. 1986 „Průmyslové aplikace laserů“*. Dům techniky ČSVTS Pardubice, s. 25 – 30.
16. *Jetsimulator-OMAX Jet lag demonstrator 302504 Rev C* [počítačový program]. c2001, [cit. únor 2008].]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.omax.com>>.
17. JISKRA, JIŘÍ. Lasery a laserové systémy pro průmyslové využití. In *Sborník referátů – Mladá Boleslav 28. – 29. 5. 1986 „Průmyslové aplikace laserů“*. Dům techniky ČSVTS Pardubice, s. 1 – 11.

18. KARAFIÁTOVÁ, S. a LANGER, I. *Nekonvenční technologie*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: nakladatelství FRAGMENT, 1998. 164s. ISBN 80-7200-296-1.
19. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2.
20. KUBÁTOVÁ, J., LUKEŠ, I. *Laserové technologie opracování kovových materiálů*. 1988. 36s. ISSN 0322-8525.
21. MAKOVEC, MIROSLAV. Uplatnění nekonvenčních metod pro opracování těžkoobrobitelných materiálů. In *Sborník referátů „Progresivní a nekonvenční technologie obrábění“*. Dům techniky ČSVTS Praha, 1987. s 55 – 60.
22. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Viena Košice, 2000. 270s. ISBN 80-7099-430.3.
23. MATELA, OLDŘICH. Použití laserů CO₂ při dělení plošných materiálů. In *Sborník referátů – Mladá Boleslav 28. – 29. 5. 1986 „Průmyslové aplikace laserů“*. Dům techniky ČSVTS Pardubice, s. 60 – 65.
24. MAŽÁTKO, J. *Elektronika, lasery – kvantové generátory světla*. 1. vyd. Praha: IDEA SERVIS, 1998. 57s.
25. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. Západočeská Univerzita, 101s. ISBN 80-7082-518-9.
26. NOVÁK, J., MĚŠTÁNEK, J., ŘASA, J., VAŠEK, J., JEŘÁBEK, Z., JANČUŠKA, I. *Vysokoenergetický kapalinový paprsek – využití v čs. průmyslu*. Dům techniky ČSVTS Praha 1989. 68s.
27. *PRC Laser Cutting Calculator* [online]. c2005, [cit. 2008-5-19]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.prclaser.com/calculator.shtml>>.
28. PROKOP, JAROSLAV. *Přednášky: „Vybrané statě z obrábění“*. Letní semestr 2008.
29. RŮŽIČKOVÁ, A. *Současné a perspektivní aplikace laserů v národním hospodářství*. Praha: SIVO, 1988. 50s.
30. *Řezání laserem* [online]. c2002-2003 [cit. září 2007]. Dostupné na Word Wide Web: < http://www.lao.cz/common/download_prezentace.php>.
31. *Řezání laserem* [online]. [cit. 2008-3-15]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.kovostanek.cz/rezani-laserem>>.
32. *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2008-3-15]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.elnaservis.cz/voda.htm> >.
33. SOCHOR, V. *Lasery a koherentní svazky*. 1.vyd Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1990. 196s. ISBN 80-200-354-1.
34. *Systém ProgressJET a 3D CNC řezací stůl*. PTV spol.s r.o. Hostivice, Česká republika. Září 2007.
35. ŠTULPA, M. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. 1.vyd. Praha: nakladatelství technické literatury BEN, 2006. 128s. ISBN 80-7300-207-8.

36. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace* [online]. c2002, [cit. březen 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>.
37. *Terrain Follower* [online]. [cit. 2008-5-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.omax.com/pdfs/tf_207.pdf>.
38. *The water abrasive suspension (WAS)* [online]. [cit. březen 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ant-ag.com>>.
39. VLACH, B. *Technologie obrábění a montáží*. 1.vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury SNTL. 1990. 472s.
40. VRBOVÁ, M., JELÍNKOVÁ, H., GAVRILOV, P. *Úvod do laserové techniky*. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 228s. ISBN 80-01-01108-9.
41. *Vysokotlaká čerpadla a příslušenství AccuStream*. AWAC spol. s r.o. Praha, Česká republika. Zář 2007.
42. *Vysokotlaký vodní paprsek* [online]. [cit. 2008-5-19]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ptv.cz>>.
43. *Výškový senzor Vs1*. PTV spol.s r.o. Hostivice, Česká republika. Zář 2007.
44. *Waterjet Web Reference* [online]. c1994-2008, [cit. 2008-5-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.waterjets.org/waterjet_pictures_8.html>.
45. *Waterjet Web Reference Abrasive Jet Feed Rate Calculator* [počítačový program]. Ver.2.4, [cit. únor 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.waterjets.org>>.
46. *WebSite Bystronic Corporate* [online]. [cit. březen 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.bystronic.com/cutting_and_bending/com/cz/products/water/ByJet_Pro/index.php?navid=45&nl=3> a <http://www.bystronic.com/cutting_and_bending/com/cz/products/laser/by speed/index.php?navid=38&nl=3>.
47. *Wikipedia-laser* [online]. poslední revize 24. 4. 2008 [cit. 2008-4-29]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.
48. *Wikipedia-Water jet cutter* [online]. poslední revize 9. 4. 2008, [cit. březen 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter>.
49. WILKINS, Christopher. *Waterjet cutting: The other „non-traditional“ process*, [online]. c2003, [cit. březen 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.omax.com/pdfs/WATERJETCUTTING.pdf>>.
50. ZÖLZER, FRIEDO. *Fyzikální optika* [online]. c2007, [cit. 2008-3-15]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.zsf.jcu.cz/struktura/katedry/radio/informace-pro-studenty/ucebni_texty/ochrana-obyvatelestva-se-zamerenim-na-cbrne-aplikovana-radiobiologie-a-toxikologie-krizova-radiobiologie-a-toxikologie/fyzikalni-optika.doc/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[%]	absorpce
A	[mm]	vzdálenost trysky od materiálu
C_D	[-]	výtokový koeficient dýzy
C_S	[Kč]	cena stroje
D	[mm]	průměr štěrbin v dýze
E	[J.mm ⁻³]	měrná práce
E_1, E_2	[J]	energie
F	[N]	síla působící na obrobek
F_{ef}	[hod]	efektivní časový fond stroje za rok
HAZ	[mm]	tepelně ovlivněná zóna
I	[W.cm ⁻²]	výstupní intenzita výkonu
I_0	[W.cm ⁻²]	intenzita záření ve středu paprsku
L	[Kč]	likvidační hodnota
N_{hs}	[Kč]	náklady na hodinu provozu stroje
N_d	[Kč]	náklady na demontáž
N_i	[Kč]	cena instalace
P	[MPa]	pracovní tlak
P	[kW]	příkon stroje
Q	[l.min ⁻¹]	průtokové množství vody
Q_S	[mm ² .min ⁻¹]	plošný výkon obrábění
Q_V	[mm ³ .min ⁻¹]	objemový úběr
R	[-]	odrazivost (reflektivita)
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylnost profilu
S_f	[Kč.hod ⁻¹]	fixní hodinová sazba
Z	[rok]	doba životnosti
Z_f	[m]	hloubka ostrosti
d_m	[mm]	průměr výstupní trysky
d_n	[mm]	průměr vodní trysky
f	[mm]	posuv paprsku
h	[mm]	hloubka řezu
h	[J.s]	Planckova konstanta
m	[kg]	hmotnost
m_a	[kg.min ⁻¹]	množství abraziva
r_0	[mm]	poloměr paprsku
r_f	[mm]	poloměr fokusovaného paprsku
v	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v	[m.min ⁻¹]	rychlost proudění
v_f	[mm.min ⁻¹]	rychlost posuvu
Θ	[-]	divergence (rozbíhavost) paprsku
λ_w	[-]	vlnová délka
v	[s ⁻¹]	frekvence
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ_0	[Ω ⁻¹ .m ⁻¹]	elektrická vodivost kovu