



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE LASEROVÉHO TAVNÉHO DĚLENÍ POVLAKOVANÝCH HLINÍKOVÝCH PLECHŮ

OPTIMIZATION OF LASER FUSION CUTTING OF COATED ALUMINUM SHEETS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MILAN POKORÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Milan Pokorák

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Optimalizace laserového tavného dělení povlakovaných hliníkových plechů

v anglickém jazyce:

Optimization of laser fusion cutting of coated aluminum sheets

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro výrobu panelů vlakových karoserií se využívají hliníkové plechy se speciální povrchovou úpravou a krycí ochrannou fólií. Doposud se potřebné tvary vyřezávaly abrazivním vodním paprskem, aby se zabránilo poškození ochranné vrstvy. Pro zvýšení efektivity je nutné zvolit technologii dělení laserovým svazkem s využitím vláknového YbYAG laseru. Je nutno získat takové řezné parametry, při kterých bude dosažena potřebná kvalita řezné hrany a nebude termálně poškozena ochranná vrstva.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii řezání laserem. Navrhnout metodiku experimentu. Vyhodnotit drsnost řezné hrany v závislosti na řezných parametrech. Zhodnotit stupeň poškození povlakové vrstvy. Výsledky řezných testů porovnat s kvalitou řezu a poškozením vrstvy při dělení vysokotlakým vodním paprskem.

Seznam odborné literatury:

- 1.BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technológie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- 2.DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4
- 3.TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
- 4.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

POKORÁK Milan: Optimalizace laserového tavného dělení povlakovaných hliníkových plechů.

Diplomová práce se primárně zabývá optimalizací laserového řezného centra pro dělení povlakovaného plechu a následným srovnáním dosažených výsledků se vzorkem zhotoveným technologií vodního paprsku. Je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou, které na sebe částečně navazují.

Teoretická část je orientovaná na použité nekonvenční technologie, jejich obecný rozbor, konstrukci, historii a využití v průmyslových aplikacích. Stěžejní kapitoly se poté zabývají rozdělením jednotlivých principů řezání a jejich důkladným popisem. Součástí teoretického rozboru je i rozdělení hliníkových slitin, popis měření struktury povrchu a vysvětlení základních pojmů používaných při měření drsnosti.

Praktická část práce je zaměřena na řešení konkrétního problému a obsahuje veškeré poznatky využití při optimalizaci a následném vyhodnocení laserového řezání. Jsou zde tedy uvedeny výsledky měření, popis zpracovávaného materiálu, použité stroje a přístroje a v neposlední řadě technicko – ekonomické zhodnocení dané problematiky.

Celkové vyhodnocení optimalizace laserového řezání pro danou součást je uvedeno v kapitole Zhodnocení výsledků experimentu.

Klíčová slova: Optimalizace, laserové řezání, řezání vodním paprskem, struktura povrchu, povlakovaný hliníkový plech.

ABSTRACT

POKORÁK Milan: Optimization of laser fusion cutting of coated aluminium sheets.

The thesis primarily deals with the optimization of laser cutting center for coated aluminium sheet cutting and with the subsequent comparison of measured results and a sample made using waterjet cutting. The thesis is divided in two parts, the theoretical part followed by the practical one.

The theoretical section is concerned with the unconventional technologies used, with their general analysis, design, history and utilization for industrial appliances. Main parts of this thesis deals with classification of particular cutting principles and their specific description. The theoretical part contains also classification of aluminium alloy, description of surface texture measurement and explanation of basics terms used for roughness measurement.

The practical section is concerned with the particular task solution and with all knowledge used for optimization and evaluation of laser cutting. This part contains the measurement results, the measured material, the machines and devices used and also the technical and economical evaluation of this thesis content.

The overall evaluation of the laser cutting optimization of specific component is mentioned in the experiment outcome evaluation article.

Keywords: Optimization, laser cutting, waterjet cutting, surface texture, coated aluminium sheet.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POKORÁK, Milan. *Optimalizace laserového tavného dělení povlakovaných hliníkových plechů*. Brno, 2014. 56s, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 1. 5. 2014

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za poskytnuté materiály, vedení, vstřícný přístup a cenné připomínky, které mi poskytoval v průběhu psaní této práce. Děkuji také firmě AQUAdem, s.r.o. za možnost provedení experimentu a poskytnutí potřebných informací.

Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi byli po celou dobu studia oporou. Zejména pak své rodině za podporu a trpělivost.

Práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD	11
1. ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	12
2. LASER	13
2.1 Historie laseru.....	13
2.2 Princip laseru	14
2.3 Konstrukce laseru	15
2.4 Vlastnosti laserového paprsku	16
2.5 Rozdělení laserů	18
2.5.1 Pevnolátkové lasery	19
2.5.2 Plynové lasery	20
2.5.3 Kapalinové lasery.....	20
2.5.4 Polovodičové lasery	21
2.6 Laserové technologie.....	21
2.6.1 Laserové řezání	22
2.6.2 Metody laserového řezání	22
2.6.3 Řezné parametry	24
2.6.4 Vyhodnocení laserového řezání	25
3. VODNÍ PAPERSEK.....	26
3.1 Historie vodního paprsku	26
3.2 Princip řezání vodním paprskem	27
3.3 Konstrukce zařízení	27
3.4 Pracovní médium.....	29
3.5 Základní metody řezání	30
3.5.1 Technologie řezání čistým vodním paprskem WJM	30
3.5.2 Technologie řezání abrazivním vodním paprskem AWJ.....	31
3.6 Kvalita řezu	33
3.7 Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem	34
3.8 Porovnání metod.....	35
4. STRUKTURA ŘEZNÉ HRANY	36
4.1 Definice parametrů drsnosti	36
4.2 Měření drsnosti.....	37
5. ROZDĚLENÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN.....	39
5.1 Rozdělení slitin hliníku podle označení (ČSN EN 573 – 3).....	39
6. CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE	40

7. OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	40
8. POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE	40
8.1 Stroj pro řezání vodním paprskem	40
8.2 Laserové řezné centrum	41
8.3 Zařízení na měření drsnosti	42
8.4 Fotoaparát s makroobjektivem	42
8.5 Přístroje pro tvorbu metalografických výbrusů	43
8.6 Stereoskopický mikroskop	43
9. POPIS TVORBY VZORKŮ A JEJICH MĚŘENÍ	44
10. VÝSLEDKY MĚŘENÍ	46
10.1 Drsnost řezné hrany	46
10.2 Velikost otřepů	48
10.3 Velikost oblasti spálené barvy	49
10.4 Vliv orientace a uzemnění plechu na řezný proces	50
10.5 Metalografický výbrus	51
11. TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	52
12. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	54
13. ZÁVĚRY	56

Seznam použité literatury a použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [29], [33], [55]

K obrobení některých nových materiálů a stále složitějších tvarových kontur již přestávají klasické konvenční technologie dostačovat. Proto se do popředí tlačí technologie nekonvenční, které rozšiřují možnosti obrábění, zlepšují kvalitu povrchu, produktivitu a v mnoha případech i jeho ekologičnost.

Za nekonvenční technologie (obr. 1) považujeme způsoby obrábění, při kterých dochází k úběru materiálu pomocí elektrických, tepelných, ultrazvukových, chemických nebo jiných fyzikálních jevů. Další charakteristikou je bezsilové působení na obrobek a úběr materiálu bez vzniku třísky. Tyto faktory ve spojení s automatizací celého procesu umožňují zvýšení sériovosti výroby, snížení pracnosti operací a omezení počtu zmetků.

Rozmach nekonvenčních technologií způsobily především stále se zvyšující požadavky v různých odvětvích strojírenského průmyslu. Zejména v letecké a kosmické oblasti výroby jsou kladeny neustále vyšší nároky na konstrukční materiály, které díky svým vlastnostem nelze obrobit klasickými metodami. Proto je nutné využít metody nekonvenční, u nichž není obrobitelnost materiálu omezena tvrdostí, pevností a dalšími mechanickými vlastnostmi. Závisí spíše na jeho vlastnostech fyzikálních, jako je teplota tavení, elektrická a tepelná vodivost, elektroerozivní odolnost, atd.

Tyto relativně nové, ale již dnes pro průmysl nepostradatelné technologie stále častěji nahrazují nebo minimálně doplňují klasické třískové metody obrábění. Samozřejmostí je i využití ve všech dalších odvětvích strojírenské výroby, což zaručuje jejich další vývoj a zdokonalování.



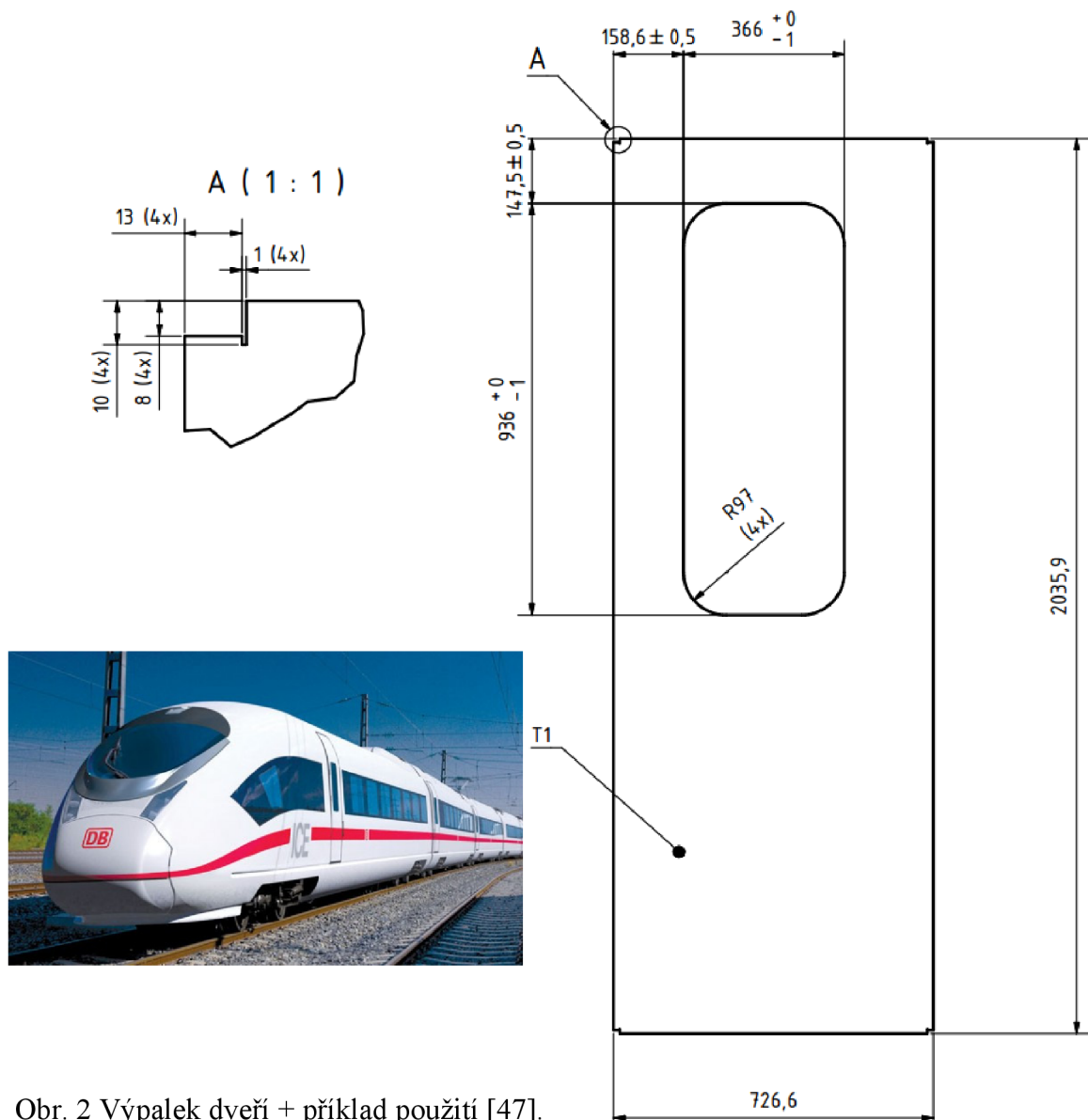
Obr. 1 Příklady řezání vodním paprskem a laserem [13], [24], [55].

1. ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Diplomová práce se zabývá optimalizací výrobní technologie pro řezání panelů vlakových karoserií, konkrétně dveří (příloha 1), jejichž výpalek je zobrazen na obrázku 2. Úkol je zpracováván pro firmu AQUAdem, s.r.o., která donedávna disponovala pouze stroji pro řezání vodním paprskem, na nichž také byly potřebné dílce zhotovovány. Technologie abrazivního vodního paprsku pro konkrétní výrobu již byla odladěná a její výstupy byly dostačující.

Nedávný nákup laserového řezného centra ovšem přinesl i nové technologické možnosti, díky nimž by došlo ke zvýšení efektivnosti a kvality celého procesu. Přechod na laser ale v tomto případě není úplně snadný, protože obráběný materiál má speciální povrchovou úpravu. Jedná se o hliníkový plech opatřený práškovou barvou, která je chráněna před poškozením krycí fólií.

Při řezání abrazivním vodním paprskem nedocházelo k žádnému tepelnému ovlivnění a tudíž barva, ani fólie nebyly obráběním nijak výrazněji poškozovány. Laserový paprsek vnášející do místa řezu poměrně velké množství tepla fólii seškvařuje a práškovou barvu spaluje. Proto je nutné najít optimální řezné parametry, které toto poškození minimalizují a přitom zaručí potřebnou drsnost řezu a minimální ořepy.



Obr. 2 Výpalek dveří + příklad použití [47].

2. LASER [1], [61]

Slovo laser je složeno z počátečních písmen anglických slov popisujících jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. V češtině: Světlo zesílené stimulovanou emisí záření. Obecněji řečeno se jedná o optický zdroj elektromagnetického záření, které se vyznačuje koherentností a monochromaticností.

2.1 Historie laseru [1], [7], [34], [35], [61]

První krok k sestrojení laserového zařízení udělali nepřímo již staří Řekové, kteří se začali jako první zajímat o světelný paprsek. Jejich poznatky byly ovšem velmi strohé a po staletí neměnné. Teprve v 17. století nastal ve výzkumu světla zvrat, který způsobil Isaac Newton rozložením bílého světla na spektrum barev pomocí skleněného hranolu. Newton také tvrdil, že světlo má částicový charakter, což se snažil vyvrátit jeho současník Christian Huyghes, jež viděl podstatu světla ve vlnění. Rozdílné názory těchto vědců vyvolaly spor, díky kterému se výzkum světelného záření dostal do popředí zájmu. I přesto uběhly téměř tři staletí, než přišel se svou teorií Max Planck, který potvrdil, že Newton i Huyghes mají pravdu a položil tím základní kámen kvantové fyziky.

Dalším krokem, tentokrát již přímo souvisejícím s vývojem laseru, je předpověď stimulované emise, kterou učinil v roce 1917 Albert Einstein. Tím rozšířil spontánní emisi a absorpci o další jev. Jeho výzkumem se v roce 1939 začal zabývat ruský fyzik Valentin Aleksandrovich Fabrikant, kterému se pomocí spontánní emise podařilo zesílit elektromagnetické záření.

Díky získaným poznatkům z předchozích výzkumů byl roku 1953 zkonstruován první předchůdce laseru. Zařízení s označením maser bylo založeno na stejném principu jako laser, ale vytvářelo mikrovlnné záření. Za tímto vynálezem stojí Charles H. Townes, James P. Gordon a Herbert J. Zeiger, jenž jsou také považováni za zakladatele nového vědního oboru – kvantové elektroniky.

V následujících šesti letech proběhlo mnoho pokusů a testů, díky nimž 16. května 1960 spatřil světlo světa první laser. Jeho konstruktéři Theodore Maiman (obr. 3), I. J. D'Haenes a C. K. Asawa použili jako aktivní prostředí krystal rubínu, který generoval vlnovou délku 694,3 nm. Další výzkum pak přinesl nejen nové typy laserů, ale začaly se rozvíjet i laserové technologie.



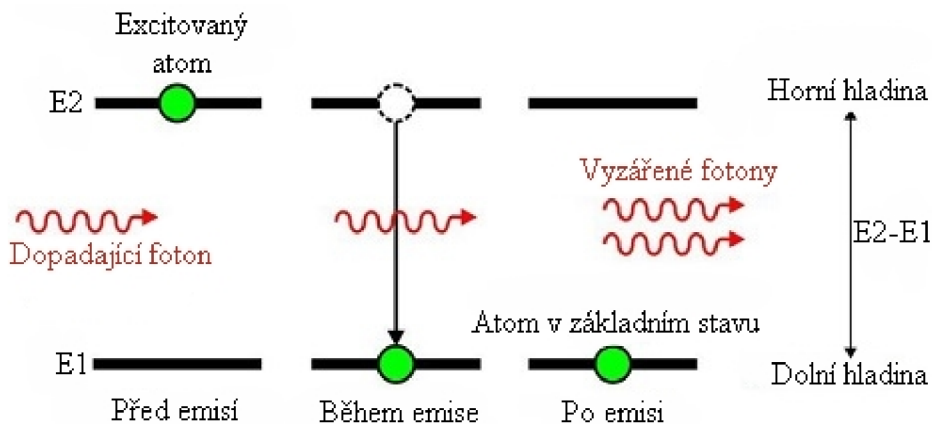
Obr. 3 Theodore Maiman [65].

2.2 Princip laseru [1], [7], [33], [41], [61]

Laser je zařízení přeměňující dodávanou energii na elektromagnetické vlnění, označované jako laserový paprsek. Základním rozdílem od ostatních druhů záření je jeho jednobarevnost, uspořádanost a malá rozbíhavost.

Podstatou každého laserového zařízení je aktivní prostředí, které je společně s dalšími komponenty popsáno v kapitole 2.3 Konstrukce laseru. V aktivním prostředí se musí vždy nacházet element, jenž je schopen setrvat v základním stavu s nižší energií, nebo v tzv. excitovaném stavu s energií vyšší. Při splnění tohoto předpokladu a vzájemné interakci se světlem rozlišujeme tři děje:

- **Absorpce světla:** Nastává přechod atomů na vyšší energetickou hladinu pomocí pohlcování dopadajících fotonů.
- **Spontánní emise:** Jedná se o samovolný jev, který vzniká v zájmu zachování termodynamické rovnováhy. Z toho plyne, že atom bez jakéhokoli vnějšího působení přechází z vyšší energetické hladiny do hladiny nižší. Při tomto přechodu je následně vyzářen foton.
- **Stimulovaná emise:** Pro funkci laseru nejdůležitější jev, jehož předpokladem je přechod atomu z energeticky vyšší hladiny na hladinu nižší (obr. 4). Jedná se o lavinový efekt, který je vyvolán fotonem dopadajícím na excitovaný atom. Dalším důležitým poznatkem je, že primární foton nezaniká, ale pokračuje dále se vzniklým fotonem a to se stejnou fází, rychlostí i frekvencí. Důsledkem je pak vznik koherentního záření.



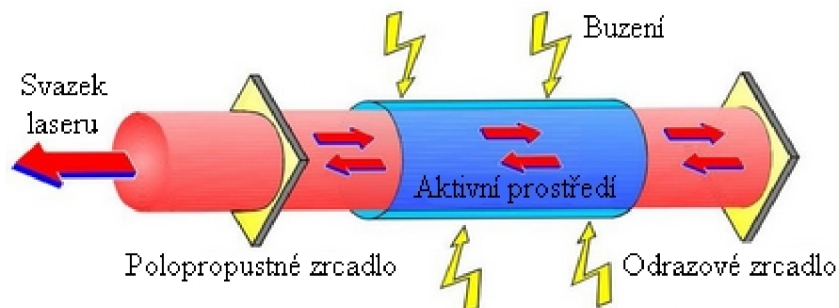
Obr. 4 Princip vzniku stimulované emise [41].

Jak již bylo zmíněno, ke vzniku stimulované emise je nutné excitovat atomy aktivního prostředí, což je vlastně jejich vybudování do vyšší energetické hladiny. Aby k tomuto mohlo dojít, musí být do systému přivedena energie, k čemuž slouží laserové buzení. Po určité době působení budícího systému vzniká inverze populace, při níž se většina atomů aktivního prostředí nachází v energeticky vyšší hladině. Tento stav neodpovídá rovnovážnému rozdělení a je nutnou podmínkou pro vznik stimulované emise.

Další zesílení laserového paprsku a vznik synchronizovaných fotonů nastává díky umístění aktivního prostředí do rezonátoru. Zde dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů a k dosažení takové intenzity paprsku, která je potřebná pro opuštění rezonátoru. Princip popisovaného jevu je zobrazen na obrázku 6.

2.3 Konstrukce laseru [1], [29], [33], [60], [61]

Lasery jsou zařízení se složitou konstrukcí obsahující velké množství komponent. Níže v textu budou popsány ty nejzákladnější, jako je aktivní prostředí, rezonátor, budící a chladicí systém (obr. 5). Mezi další důležité součásti patří například měřič výkonu, kalibrační zařízení, nelineární krystal pro změnu vlnové délky, atd.

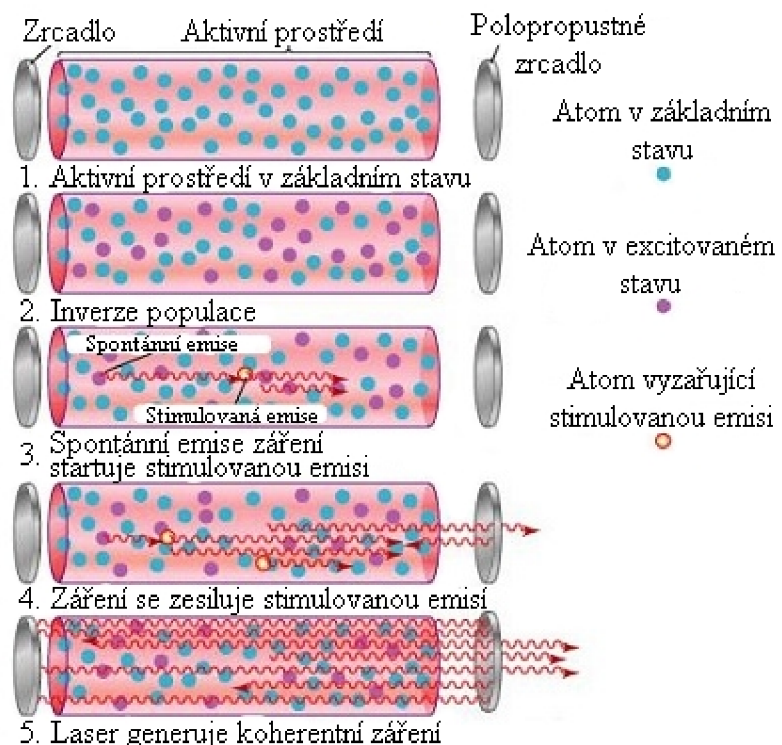


Obr. 5 Konstrukce laseru [41].

Aktivní prostředí: Jedna z hlavních komponent laseru, jež je tvořena plynnou, kapalnou nebo pevnou látkou, která je nasycena více atomy na vyšších energetických hladinách. Tyto atomy jsou během stimulané emise schopny emitovat až dvojnásobnou světelnou energii. Aktivní látka je obvykle umístěna ve skleněné, nebo plastové trubici a nejčastěji má podobu monokrystalu, polovodiče s PN přechodem, volných elektronů, nebo polovodičových multivrstev.

Optický rezonátor: Další součást, bez které se neobejde žádný laser s výjimkou super-radiačních zařízení. Paprsek generovaný v těchto aparátech se vyznačuje schopností získat dostatečnou intenzitu již při jednom průchodu aktivním prostředím. Ostatní typy laserů tuto schopnost nemají a využívají k zesílení paprsku zmiňovaný rezonátor (obr. 6).

Ten si můžeme představit jako prostor vyplněný aktivní látkou a ohraničený dvěma rovnoběžnými zrcadly, z nichž jedno je odrazové a druhé polopropustné. Jejich tvar je většinou rovinný, ale vyskytují se i zrcadla konvexní, případně konkávní. K výrobě odrazového zrcadla se obvykle používá zlato, nebo jiný leštěný kov. Polopropustné zrcadlo je pak tvořeno sklem pokrytým tenkou vrstvou kovového materiálu. Jeho funkce je udržet foton v aktivním prostředí delší dobu a uvolnit jej až po získání dostatečné energie.

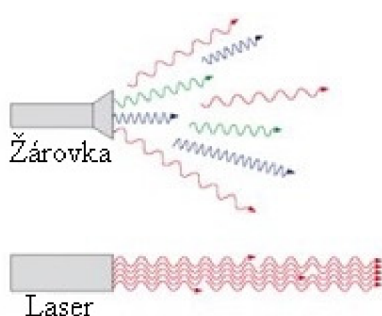


Obr. 6 Zesilování laserového paprsku [41].

Budící zařízení: Systém buzení, někdy označovaný jako systém čerpání, slouží k dodání energie elektronům aktivního prostředí. Díky tomu přechází elektrony z nižších energetických hladin do hladin vyšších, což je základním předpokladem pro vznik stimulované emise. Jako zdroj buzení se používá výbojka, chemická reakce, elektrický proud a další.

Chladicí systém: Volba chladicího média se odvíjí především od výkonu laseru. Ty nejméně výkonné mohou být chlazeny pasivně, u výkonnějších zařízení se pak používá vzduch, nebo voda. Správná volba média následně ovlivňuje životnost laseru a zabezpečuje jeho správnou funkci. Chladit je nutné zejména aktivní prostředí, kde se velká část energie dodávané do systému přeměňuje na teplo.

2.4 Vlastnosti laserového paprsku [1], [7], [32], [33], [40], [41], [60], [61]



Výjimečnost laserového paprsku je tvořena především jeho přesně definovanou vlnovou délkou, monochromaticností, koherentností, směrovostí a módovou strukturou. Tyto vlastnosti jej odlišují od běžných zdrojů elektromagnetického záření jako je například žárovka nebo slunce, které vysílají různé vlnové délky všemi směry, jak je patrné z obrázku 7.

Obr. 7 Typy záření [60].

Monochromaticnost: Vlastnost plynoucí z podstaty stimulované emise. Světlo je tvořeno pouze jednou vlnovou délkou, má tudíž pouze jednu barvu.

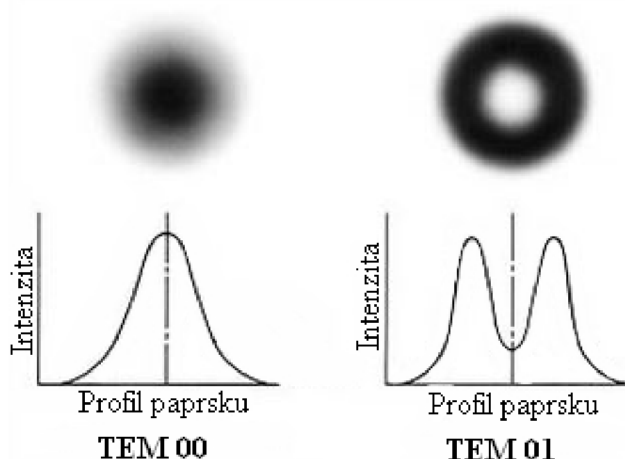
Směrovost: Zásadní parametr umožňující zaměření paprsku do velmi malého místa. Podstatou je stejný směr fotonů a jejich takřka rovnoběžné dráhy.

Koherentnost: Zaručuje, že všechny fotony mají stejný směr kmitání, frekvenci a fázi, nebo fázový posun.

Módová struktura: Laserový paprsek má charakteristické rozložení intenzity záření v průřezu, nazývané jako mód paprsku. Tento mód je dán především geometrickou konstrukcí rezonátoru a nastavením zrcadel. Jeho dokonalá symetrie je velmi důležitá pro mnoho aplikací a má vliv na velikost stopy zaostřeného paprsku.

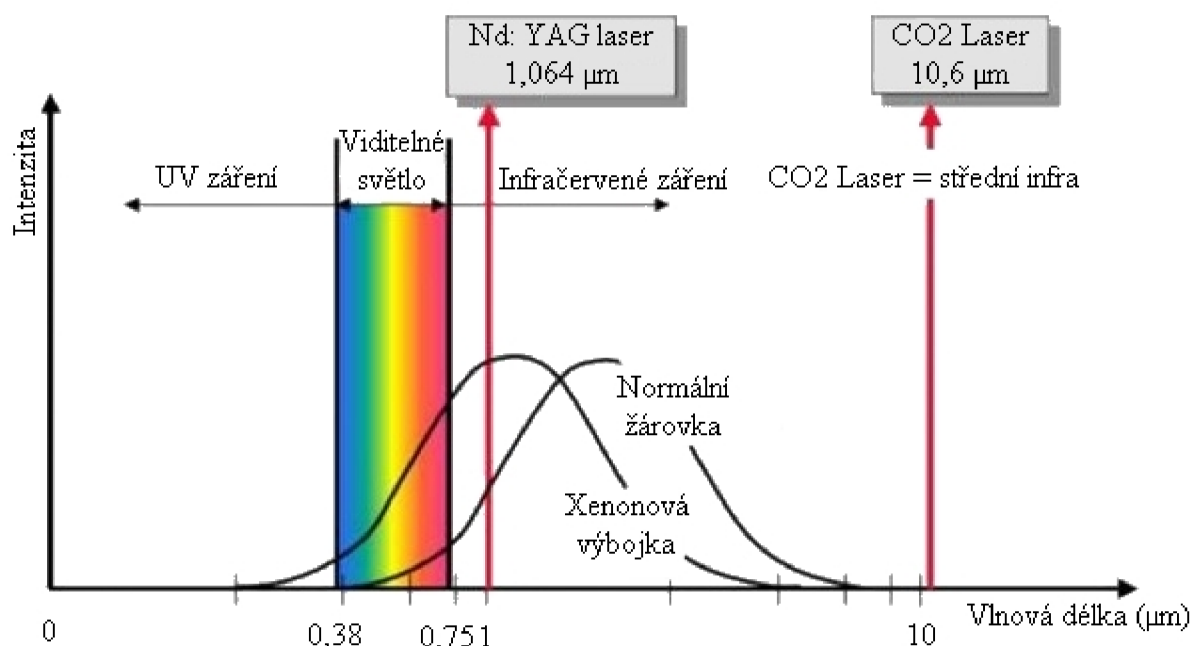
Nejpoužívanějšími módy pro laserové řezání je TEM_{00} , také známý jako Gaussův mód. Intenzita záření je zde největší na ose svazku a snižuje se se vzdáleností od osy paprsku. Druhým často využívaným módem pro řezání a vrtání laserem

je TEM_{01} . Svým tvarem připomíná prstenec, jehož intenzita je na ose svazku nulová a maxima dosahuje na vnější straně. Jednotlivé módy jsou zobrazeny na obr. 8.



Obr. 8 Mód [52].

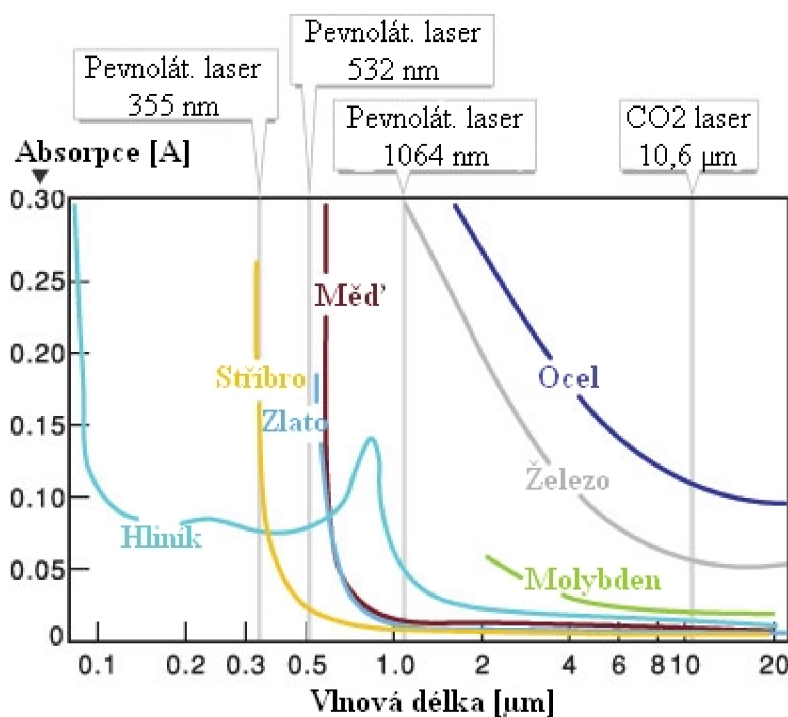
Vlnová délka: Vlastnost světla, která je definovaná jako vzdálenost dvou nejbližších bodů kmitajících při vlnění ve fázi. Vlnová délka ovlivňuje nejen oblast spektra, ve které se paprsek pohybuje, ale také velikost stopy laseru a jeho absorpci. Základní rozdělení paprsků podle vlnové délky je na ultrafialové, viditelné a infračervené, což je patrné z obrázku 9.



Obr. 9 Světelné spektrum [40].

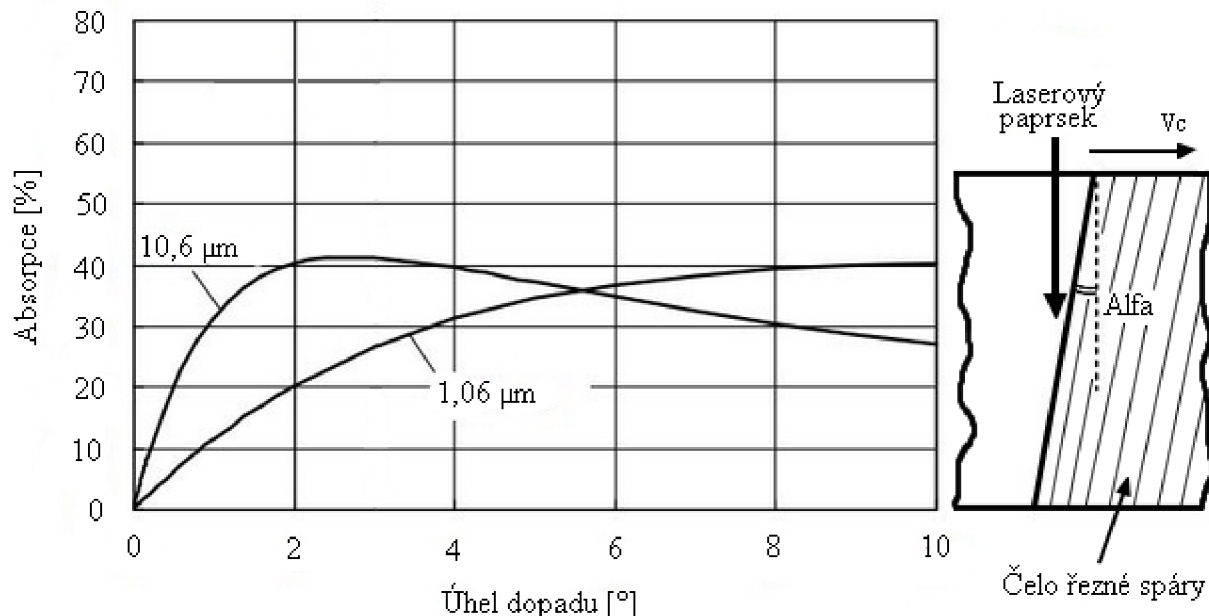
Absorpce: Jedná se o nejdůležitější vlastnost z hlediska efektivity laserových technologií. Je ovlivněna nejen laserovým paprskem, ale především zpracovávaným materiálem, jehož vlastnosti mají na hodnotu absorpce největší vliv. Dále je také výrazně ovlivněna stavem a drsností povrchu, úhlem dopadu paprsku, teplotou řezaného materiálu a jak již bylo zmíněno, vlnovou délkou paprsku.

Jak je patrné z grafu závislosti absorpce na vlnové délce zobrazené na obrázku 10, většina materiálů vykazuje snižující se absorpci při zvětšující se vlnové délce. Existují ovšem i výjimky jako je například hliník, jehož slitina je předmětem zkoumání praktické části této práce. U zmiňovaného materiálu je na první pohled viditelný fakt, že při srovnatelném výkonu dosahuje pevnolátkový laser mnohem lepších výsledků než laser CO₂. Z tohoto důvodu hraje uváděná závislost významnou roli při výběru laseru pro danou aplikaci.



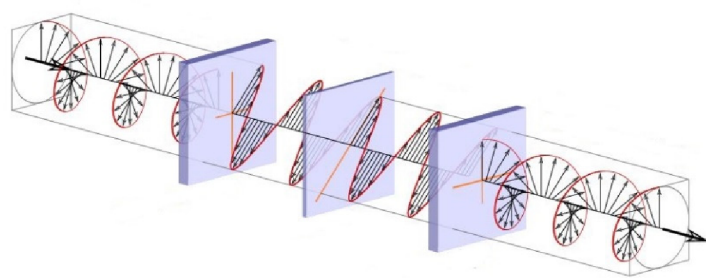
Obr. 10 Závislost absorpce na vlnové délce [59].

Dalším činitelem ovlivňujícím absorpci je úhel dopadu. Jeho význam vystihuje graf na obrázku 11, z něhož je patrné, že při použití CO₂ laseru a pevnolátkového laseru budou hodnoty dosahované absorpce velmi rozdílné. Zatímco CO₂ laser dosahuje největší absorpce a tedy i maximální efektivity při úhlu dopadu mezi dvěma a třemi stupni, u pevnolátkového laseru je tato veličina největší při deseti stupních.



Obr. 11 Závislost absorpce na úhlu dopadu laserového paprsku [15].

Polarizace: Paprsek vystupující z laseru je polarizován pomocí zbroušení Brewsterova skla, které je umístěno na výstupu svazku z rezonátoru. Směr polarizace je velmi důležitý a ovlivňuje především kvalitu řezu. Při vytváření dlouhých řezů, jejichž směr bude stejný, jako směr lineárně polarizovaného paprsku je možné dosáhnout velmi vysokých rezných rychlostí.



Obr. 12 Polarizace [1].

Ve chvíli kdy dojde ke změně směru řezu, se ovšem začnou vytvářet otřepy a zhorší se kvalita obráběného povrchu. To je pro strojírenskou výrobu nepřijatelné a proto se nejčastěji využívá polarizace kruhová, jejímž tvarem není řez při změně směru nijak ovlivňován. Kruhová i lineární polarizace je zobrazena na obrázku 12.

2.5 Rozdělení laserů [1], [7], [29], [30], [48], [66], [67], [68], [69]

Lasery je možné rozdělit dle různých kritérií, nejčastěji se ovšem používá dělení podle:

- Skupenství aktivního prostředí
- Vlnové délky
- Způsobu buzení
- Režimu provozu
- Počtu energetických hladin
- Použití
- Výkonu

2.5.1 Pevnolátkové lasery

Jako aktivní prostředí u tohoto typu laserů se používají monokrystalické nebo amorfní látky, které musí vynikat svojí průzračností, optickou homogeností a v neposlední řadě musí být uměle vyrobitelné. Do takového materiálu jsou poté přidávány aktivační prvky, protože základní látka se nezúčastňuje absorbování, ani vyzařování energie. Aktivačními prvky mohou být například Cr, Ni, Nd, Sm, Yb dodávané do základní látky jako je Al_2O_3 , nebo CaF_2 .

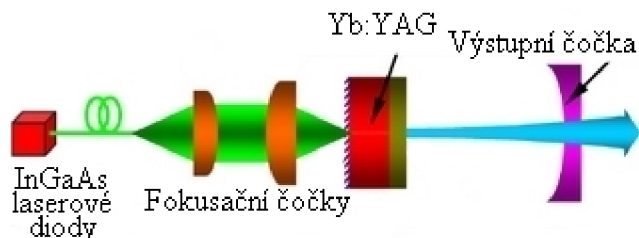
Pevnolátkové lasery obvykle dosahují výkonu 10 kW a mohou být používány jak v pulzním, tak i v kontinuálním režimu. Jsou nenáročné na údržbu a jejich vlnová délka se pohybuje v oblasti infračerveného až viditelného světla. V tabulce 1 jsou podrobně rozepsány základní typy těchto laserů, včetně příkladů jejich použití a zvýraznění typů používaných ve strojírenství.

Tab. 1 Přehled pevnolátkových laserů.

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Rubínový laser	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd: YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$	1 064,1 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Ho: YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ho}^{3+}$	2 100 nm	IR	chirurgie, stomatologie
Er: YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$	1 560 nm a 2 940 nm	IR	dálkoměry, chirurgie, stomatologie
Yb: YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Yb}^{3+}$	1030 nm	IR	strojírenství, svařování, řezání
Titan - safírový laser	Ti, Al_2O_3	690 nm - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie, fs pulsy
Alexandritový laser	$\text{Al}_2\text{BeO}_4:\text{Cr}^{3+}$	700 nm - 818 nm	červená, IR	žihání, řezání
Neodymový laser	$\text{SiO}_2:\text{Nd}_2\text{O}_5$ nebo $\text{P}_2\text{O}_5:\text{Nd}_2\text{O}_5$	1 062,3 nm	červená, IR	vysoce-energetické pulzní systémy
Nd: YLF laser	LiYF_4	1053 nm	červená, IR	průmyslové aplikace, lékařství

Yb:YAG laser: Pevnolátkový laser, který byl optimalizován pro řezání hliníkového povlakovaného plechu v rámci praktické části této práce. Jedná se o zařízení s vlnovou délkou 1030 nm, jehož aktivním prostředím je Yttrium Aluminium Granát dopovaný ionty Ytterbia (obr. 13). Samotný YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) je bezbarvý opticky izotropní krystal s kubickou strukturou, který si i po opracování zachovává vysokou optickou kvalitu.

Dopování Ytterbiem zatím není tak běžné jako Neodymem, ale ve srovnání má řadu výhod. Například velmi nízké teplotní zatížení, delší životnost, snadné buzení pomocí spolehlivých InGaAs laserových diod a v neposlední řadě mnohem větší budící pásmo, které se pohybuje v rozmezí 18 až 940 nm.



Obr. 13 Yb: YAG laser [14].

2.5.2 Plynové lasery

U těchto typů laserů (tab. 2) se paprsek generuje v plynném prostředí, kterým je nejčastěji CO₂, N₂, nebo He. Ke světelné emisi dochází přivedením dostatečně vysokého napětí na elektrody, které se nachází uvnitř trubice s plynem. Trubice mají průměr v řádu milimetrů a délku až několik metrů. Na jejich koncích jsou umístěna zrcadla tvořící rezonátor a aktivní plyn v nich neustále proudí pod nízkým tlakem.

V porovnání s pevnolátkovými lasery jsou používány především v kontinuálním provozu, který je pro plynové aktivní prostředí hospodárnější než provoz pulzní. Jejich hlavními nevýhodami jsou velké nároky na chlazení a především nemožnost vedení paprsku pomocí optických vláken. Vyznačují se ovšem vysokými výkony a účinností.

Tab. 2 Přehled plynových laserů.

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
He - Ne laser	He, Ne	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	Cu	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	I	342 nm, 612 nm, 1 315 nm	UV, viditelné, IR	věda, termojaderná syntéza
Argonový laser	Ar	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
CO₂ laser	CO₂	10 600 nm	IR	svařování, řezání, stomatologie, gravírování
CO laser	CO	5 000 - 6 500 nm	IR	
Dusíkový laser	N ₂	337 nm	UV	
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace, fotolitografie

2.5.3 Kapalinové lasery

Jako aktivní prostředí u kapalinových laserů (tab. 3) jsou používány roztoky organických barviv. Využívají se také metalo-organické sloučeniny, které jsou dopovány ionty vzácných zemin, jako je například Sm, Tb, Eu, atd. Díky změně koncentrace aktivních částic můžeme snadno a plynule měnit vlnovou délku, což je využíváno především v medicíně.

Kapalinové lasery mají výhody v podobě snadného chlazení, stability a homogenity aktivního prostředí. Ani přesto ale ve strojírenství tento typ laserů své využití nenašel a to především kvůli velmi krátké životnosti aktivního prostředí a jeho vysoké toxicitě.

Tab. 3 Přehled kapalinových laserů.

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Rhodamin 6G laser	C ₂₈ H ₃₁ N ₂ O ₃ C ₁	570 - 650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30 laser	C ₉ H ₆ O ₂	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie

2.5.4 Polovodičové lasery

Jedná se o nejnovější skupinu laserů (tab. 4), mnohdy nazývanou laserovými diodami. Jako aktivní prostředí je zde využíván polovodičový materiál obsahující volné nosiče náboje. Princip spočívá ve schopnosti atomů přejít na vyšší energetickou hladinu v důsledku absorpce elektrického proudu procházejícího diodou. Při svém návratu na hladinu nižší poté dochází k vyzáření energie v podobě tepla a světla. To vše se děje v přechodové vrstvě mezi polovodiči typu P a N.

Výhodou polovodičových laserů je možnost regulace výkonu a vlnové délky pomocí změny elektrického proudu. Dalším důvodem proč jsou dnes tyto typy laserů nejrozšířenější je účinnost, která dosahuje hodnoty až 50%. Nevýhodou je pak rozbíhavost paprsku, která je závislá na přesném udržení tloušťky velmi tenké přechodové vrstvy.

Tab. 4 Přehled polovodičových laserů.

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová ukazovátka, laserové tiskárny
GaAlAs laser	GaAlAs	670 - 830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD, displeje
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	blu - ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630 - 685 nm	červená	lékařství

2.6 Laserové technologie [1], [4], [7], [11], [22], [25], [33], [39], [49], [60], [66], [70]

Laser se ve strojírenské výrobě používá od druhé poloviny 60. let. Od té doby prošel a neustále prochází mnoha inovacemi, které se týkají jak nových technických možností, tak i lepší ekonomie provozu. Díky tomuto vývoji dnes laserové technologie výrazně zvyšují kvalitu, technickou úroveň a produktivitu práce. Dále jsou nepostradatelné při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, špatně přístupných částí obrobku, atd.

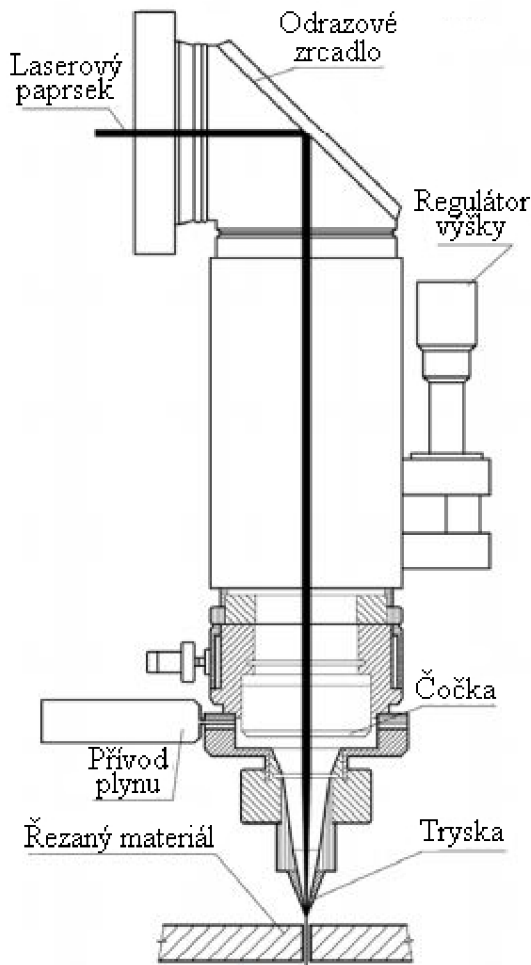
V každém oboru využívajícím laser jsou na dané zařízení kladeny různé požadavky a sledují se jiné parametry. Pro strojírenství jsou nejdůležitějšími parametry absorpce, tepelná vodivost a odrazivost. Obrobitelnost materiálu je pak v závislosti na těchto parametrech lepší, když je absorpce co největší a tepelná vodivost a odrazivost co nejmenší.

Nejčastěji se laser využívá pro následující technologie:

- Svařování
- Řezání
- Vrtání
- Gravírování
- Značení
- Mikropracování
- Leštění
- Povlakování

2.6.1 Laserové řezání

V současné době je dělení materiálu nejčastějším využitím laseru ve strojírenství. Tuto pozici si laserové řezání vybudovalo především díky vysoké přesnosti, kolmosti, malé šířce řezu, vysoké řezné rychlosti a minimálnímu tepelnému ovlivnění děleného materiálu. Dalšími neopomenutelnými výhodami jsou vynikající kvalita řezu, vysoká produktivita práce a snadná automatizace. V neposlední řadě stojí za zmínku možnost řezání velmi tvrdých materiálů, což vyplývá ze skutečnosti, že při laserovém řezání nezáleží na tvrdosti materiálu, nýbrž na jeho optických a tepelných vlastnostech.



Obr. 14 Řezací hlavice [1].

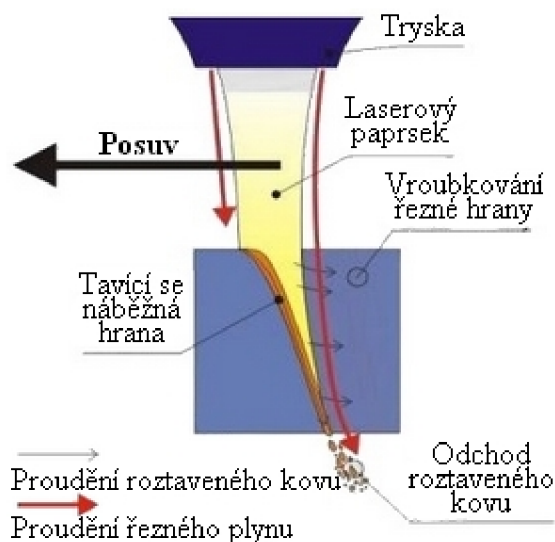
Lasery jsou velmi univerzální zařízení, která umožňují změnu použití pouhou výměnou koncové hlavice. Pro dělení materiálu se využívá hlavice řezací, zobrazená na obrázku 14. Jejím úkolem je přivádět do místa řezu řezný plyn a chránit před poškozením velmi drahou optiku. Každá hlavice je osazena výstupní tryskou, která se mění v závislosti na obráběném materiálu a slouží k usměrnění plynu do místa řezu. Trysky se liší především průměrem, který nesmí omezovat procházející paprsek a má také zásadní vliv na množství proudícího plynu.

Čočka umístěná v řezací hlavici je velmi významným prvkem systému. Slouží ke správné fokusaci paprsku na řezaný materiál a k jeho úpravě pro dosažení co možná nejlepší řezné plochy. Jednotlivé čočky se od sebe liší tloušťkami a poloměry zakřivení, což jsou parametry s vlivem na ohniskovou vzdálenost. Tato veličina u běžně používaných čoček představuje 5“ a 7,5“.

Dalším důležitým prvkem řezací hlavice je regulátor výšky, který má za úkol udržovat konstantní vzdálenost čočky od materiálu. Potřebné informace o vzdálenosti regulátor získává ze senzorů umístěných rovněž na řezací hlavici.

2.6.2 Metody laserového řezání

Princip laserového řezání (obr. 15) spočívá v zaostření paprsku do ohniska představujícího bod, ve kterém se hustota energie pohybuje až na hranici $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Materiál vystavený takovému záření se ohřívá rychlostí $10^8 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž dochází k tavení až sublimaci. Následným působením paprsku vzniká spára vyplněná roztaveným kovem, který je nutné



z místa řezu odstraňovat. K tomuto účelu slouží řezný plyn, jehož druh nám rozděluje řezání laserem na oxidační a tavné. Dalšími rozeznávanými metodami je pak řezání sublimační a plazmové.

Obr. 15 Princip laserového řezání [39].

Oxidační řezání: Tento způsob dělení materiálu využívá jako řezný plyn kyslík. Při vzájemné interakci kyslíku a roztaveného kovu vzniká exotermická reakce, která způsobuje další ohřívání materiálu a umožňuje zvýšení řezné rychlosti. Výhodou je i malá spotřeba řezného plynu, která se pohybuje okolo $2 \text{ Nm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$. Nevýhodami oxidačního řezání jsou vznikající okraje na řezné hraně, široká řezná spára, vysoká drsnost povrchu a velká tepelně ovlivněná oblast. Používá se především pro dělení konstrukčních uhlíkatých ocelí.

Tavné řezání: U tavné metody dochází k roztavení materiálu jenom vlivem působení laserového paprsku. Tento materiál je odstraňován ze spáry proudem inertního plynu, nejčastěji dusíku. Nejpodstatnější výhodou metody je kvalitní řezná hrana, která již nemusí být dále nijak opracovávána. Nevýhodou je ale nižší řezná rychlost, nutnost vysokého výkonu laseru a především vysoká spotřeba řezného plynu. Ta představuje až $50 \text{ Nm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$, což výrazně zvyšuje náklady na řez. Také tlak plynu je téměř 15 krát vyšší, v důsledku čehož dochází k výraznějšímu opotřebení stroje v porovnání s oxidačním způsobem. Tavné řezání je vhodné zejména k dělení nerezových ocelí a barevných kovů.

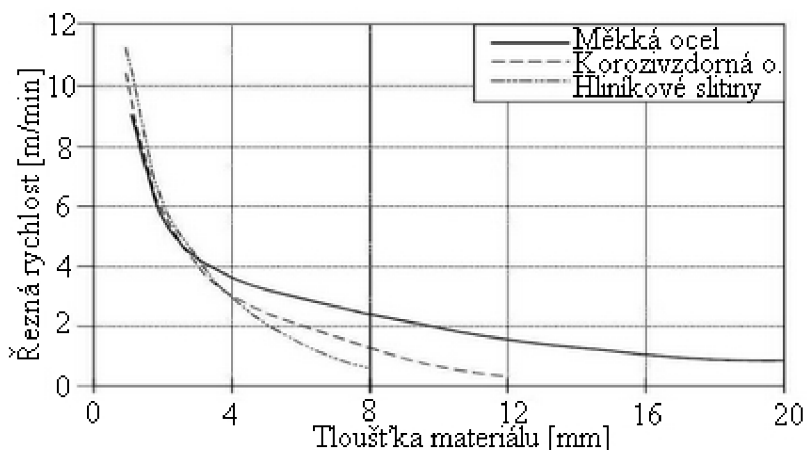
Sublimační řezání: Nepříliš využívaná metoda řezání, která je vhodná spíše pro nekovové materiály. Její podstatou je velmi vysoká intenzita laserového záření, jež způsobuje odpařování materiálu z místa řezu. Přiváděný inertní plyn, nejčastěji dusík, nebo argon odvádí vzniklé páry a zabraňuje oxidaci. Výsledkem je velmi kvalitní řez a úzká řezná spára. Na tlustší materiály je tato metoda nevyužitelná, protože základní podmínkou použití je tloušťka materiálu maximálně se rovnající průměru paprsku. Při jejím nedodržení dojde ke kondenzaci par kovu a vzniku svarového spoje. Proto se sublimační řezání využívá pouze k dělení tenkých kovových fólií.

Plazmové řezání: Další méně využívaná metoda řezání laserem, jejíž podstatou je vznik plazmatu v důsledku vysoké intenzity laserového svazku. Vzniklé plazma rekombinuje a zpětně ohřívá materiál, což zvyšuje účinnost procesu. Výhodou metody je především možnost použití extrémně vysokých rychlostí, které se pohybují až nad $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Nevýhodou je pak použití pouze u nerezových a barevných kovů s maximální tloušťkou 3 mm.

2.6.3 Řezné parametry

Správné nastavení řezných parametrů je klíčové pro dosažení kvalitní řezné hrany a efektivity celého procesu. Špatná volba podmínek obvykle způsobuje vnesení většího množství tepla do místa řezu, následkem čehož výsledná hrana vykazuje větší drsnost, tvoří se otřepy, okuje, atd. Pro dosažení ideálního řezu je nutné správné nastavení mnoha vzájemně se ovlivňujících veličin, mezi něž patří:

Výkon laseru: Parametr určený typem a konstrukcí laserového zařízení, který musí být přizpůsoben druhu materiálu a jeho tloušťce. Výkon se koriguje tak, aby došlo k prořezu materiálu, ale ne ke zbytečnému zhrubnutí řezu.



Řezná rychlost: Je označení pro relativní rychlost mezi nástrojem a řezaným materiálem. Nastavuje se stejně jako výkon laseru podle druhu a tloušťky materiálu, což je vidět na obrázku 16. Se zvyšující se rychlostí pak lineárně roste i potřebný výkon laseru. Špatné nastavení řezné rychlosti vede k větší drsnosti a otřepům.

Obr. 16 Maximální rychlost řezání 4kW laserem v závislosti na tloušťce materiálu [60].

Režim řezu: Podle tohoto kritéria rozdělujeme laserové řezání na časově kontinuální a pulzní. V případě pulzního režimu je nutné nastavovat frekvenci a střihu, která představuje poměr časů, v nichž je signál v jednotlivých úrovních. Tento parametr má vliv na hospodárnost celého procesu a také na množství vneseného tepla do obrobku.

Tlak a typ řezného plynu: Jedná o se další parametr ovlivňující kvalitu řezné plochy, což je zřejmé z obr. 17. Zde je zobrazen rozdíl mezi použitím kyslíku (spodní vzorek) a dusíku. Tlak a spotřeba řezného plynu je pak závislá na průměru trysky a výrazně ovlivňuje ekonomiku celého procesu.



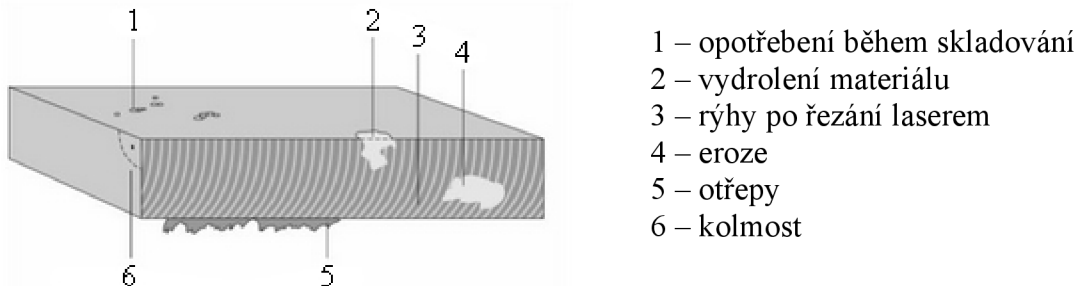
Obr. 17 Řezná hrana ovlivněná typem použitého řezného plynu [1].

Poloha ohniska: Je udávána vůči řezanému materiálu a nastavuje se v závislosti na typu použitého řezného plynu a druhu tohoto materiálu. Výrazně ovlivňuje drsnost a celkovou kvalitu řezné hrany.

Vzdálenost trysky od řezaného materiálu: Změnou vzdálenosti trysky se mění poloha ohniska a také množství plynu ovlivňujícího řez. Při malém odstupu trysky dochází k výraznému zvýšení množství plynu v řezu, ale hrozí zde riziko rozstříku materiálu a zničení čočky.

2.6.4 Vyhodnocení laserového řezání

Řezná kritéria jako například vydrolení materiálu, eroze nebo otřepy je možné analyzovat pouhým okem. Pokud je ovšem zapotřebí přesnější vyhodnocení, je nutné použít doplňkové zařízení pro měření kolmosti, drsnosti, atd. Nejčastěji vyhodnocovaným parametrem je právě zmiňovaná drsnost, které se podrobně věnuje kapitola 4. Struktura řezné hrany. Další kritéria jsou zobrazena na obr. 18 a popsána v následující kapitole. Přesné definice potom obsahuje norma ČSN EN ISO 9013, která se věnuje klasifikaci tepelných řezů, geometrickým požadavkům na výrobky a úchytkám jakosti řezu.

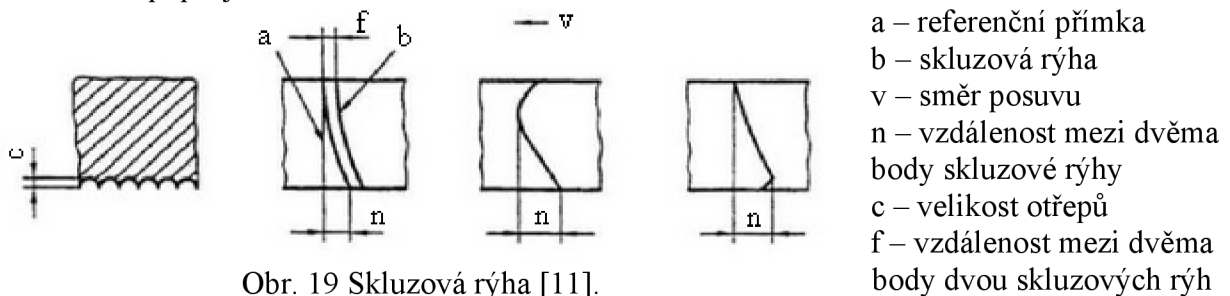


Obr. 18 Kritéria hodnocení laserového řezání [60].

Tvar a šířka řezu: Odvíjí se především z ohniskového průměru, vlnové délky a postupu řezání. Šířka řezu se pak zvětšuje v závislosti na rostoucí tloušťce materiálu a může se pohybovat od 0,15 až do 0,5 mm.

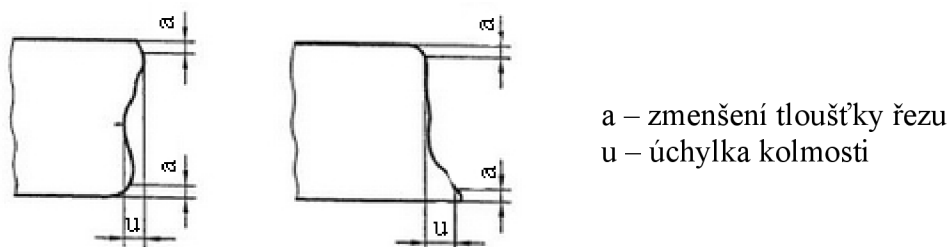
Otřepy: Jedno z nevýznamnějších kritérií při vyhodnocování řezných hran. Dělí se do dvou skupin, které představují otřepy snadno odstranitelné a otřepy velmi tvrdé a ostré. Jelikož otřepy musí být vždy odstraněny, hraje jejich typ významnou roli při volbě dokončovací operace, jejíž cena se promítá do celkových nákladů na zhotovený kus.

Skruz: Je definován jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. Schéma a popis je zobrazen na obrázku 19.



Obr. 19 Skluzová rýha [11].

Úchylka kolmosti: Jedná se o vzdálenost mezi dvěma rovnoběžkami, které se dotýkají vzniklého povrchu, jehož zbytek je mezi tyto přímky vepsán. Rozlišujeme úchylku kolmosti pro šikmé a svislé řezy, jež jsou zobrazeny na obrázku 20.



Obr. 20 Úchylka kolmosti [11].

3. VODNÍ PAPERSEK

Řezání vodním paprskem je perspektivní a stále se vyvíjející nekonvenční technologie. Slouží k obrábění široké palety materiálů a vyznačuje se kvalitou řezu a celkovou ekologičností provozu. V následující kapitole budou rozebrány jeho hlavní technologické možnosti.

3.1 Historie vodního paprsku [45], [55], [64], [72]

Kolem roku 1853 se v průmyslu poprvé začal používat vodní proud jako nástroj k odstraňování materiálu. Jedná se především o důlní průmysl, kde se voda o tlaku několika desítek MPa stříkala na horniny, v důsledku čehož byly vymílány a odplavovány lehčí nánosy. Tohoto principu se využívalo při těžbě drahých kovů a to především v USA v době zlaté horečky.

Téměř o sto let později přišel lesní inženýr z university v Michiganu Dr. Norman Franz (obr. 21) s metodou dělení materiálu za pomoci vysokotlaké vody. Jeho zařízení mělo být využito pro řezání dřeva a pracovalo na principu spouštění těžkých závaží na sloupce vody, které vyústovaly do prostoru skrz trysku s malým průměrem. Tento systém sice poskytoval dostatečný tlak, ale kvůli nekontinuálnímu průtoku byl v praxi nepoužitelný.

Na počátku 70. let dvacátého století byl vyvinut přípravek k zajištění kontinuálního proudu vody. Toto vylepšení přitáhlo pozornost odborné veřejnosti a díky zvyšující se poptávce vznikaly první komerční firmy specializující se na vývoj a výrobu strojů využívajících vodní paprsek. Jedna z prvních firem byla Flow International Corporation, jejíž stroje vyvíjely tlak 275 až 345 MPa a byly využívány pro dělení nekovových materiálů.

V roce 1979 zkusil Dr. Mohamed Hashish přidat do řezného procesu minerální granát v podobě miniaturních částic. Díky tomuto abrazivu se rozšířila paleta řezaných materiálů například o sklo, beton nebo ocel.

V devadesátých letech, kdy do hry vstupují počítačové technologie a nabízí se možnost inteligentního řízení vodního paprsku, proniká tento způsob dělení materiálu do stále více strojírenských odvětví. Běžnou aplikací se stává řezání autoskel a využití v leteckém a kosmickém průmyslu.

Trendem ve vývoji na přelomu století bylo především zdokonalování tlakových čerpadel, které vedlo až k vytvoření tlaku 670 MPa. Nyní se firmy spíše zaměřují na dosažení lepší kolmosti řezu a na zlepšení dalších geometrických parametrů.



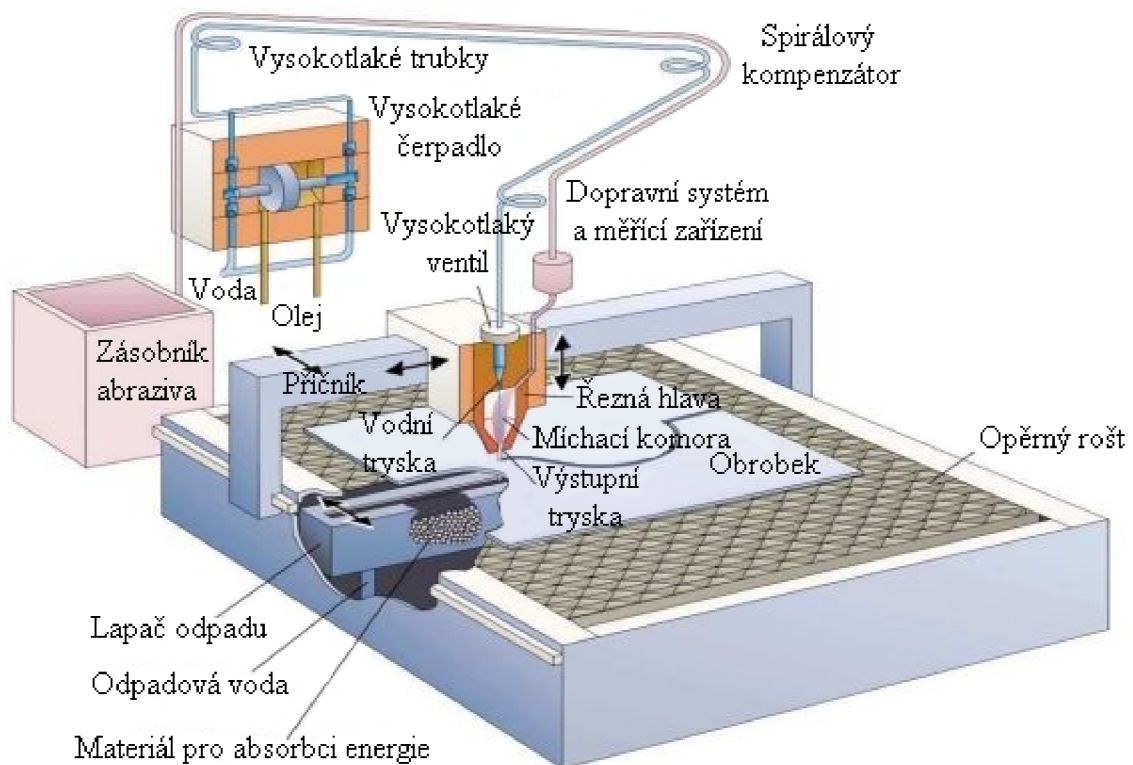
Obr. 21 Dr. Norman Franz [31].

3.2 Princip řezání vodním paprskem [22], [23], [38], [42], [55]

Podstata řezání vodním paprskem spočívá v oddělování materiálu pomocí kinetické energie vysokotlakého a vysokorychlostního paprsku vody. Pro tvrdší materiály jsou do vody přidávány abrazivní částice. Paprsek vystupující z trysky je zaostřen do jednoho bodu a urychlen na rychlost 600 až 900 m·s⁻¹. Z hlediska jeho účinků jej poté považujeme za pevné těleso. Proces řezání můžeme rozdělit do dvou etap. V první etapě působením tlaku vzniká prohlubeň a následně otvor. Ve druhé etapě pak vzniká samotná řezná spára.

Proces přeměny vody na vodní paprsek začíná v hydraulické jednotce složené z vysokotlakého vodního čerpadla a multiplikátoru. Takto stlačená voda putuje potrubím přes několik ventilů a filtrů až do řezací hlavy, kde je usměrněna na paprsek. Řezací hlava může být vybavena dávkovačem abraziva a je zakončena řezací tryskou. Po průchodu paprsku řezaným materiálem je směs vody a abraziva zachycena v lapači, který je umístěn pod řezacím stolem. Celý systém je znázorněn na obrázku 22 a hlavní komponenty jsou podrobně popsány v kapitole 3.3 Konstrukce zařízení.

Řezací hlava je obsluhována pomocí CNC stroje a obrábí podle předem navrženého programu. To umožňuje plynule regulovat tlak kapaliny podle technologických potřeb a druhu materiálu. Dále je možné řídit dráhu řezu a vyrábět tak tvarově složité součásti.



Obr. 22 Schéma řezacího zařízení [42].

3.3 Konstrukce zařízení [3], [8], [42], [45], [72]

V následující kapitole jsou popsány základní komponenty řezacího stroje, při jejichž výrobě je důležité dodržet požadavky na přesnost a kvalitu, která se následně projevuje v efektivnosti celého procesu. Jednotlivé části a posléze celý systém musí být velmi dobře navržen, protože při tak vysokém tlaku může i minimální netěsnost způsobit trvalé erozní poškození.

Hydraulické čerpadlo: Slouží k vyvození vysokého tlaku a jedná se tedy o základní prvek technologie vodního paprsku. Je poháněno elektromotorem o vysokém výkonu, který vhání stlačený olej do multiplikátoru. Samotný vodní paprsek se pak generuje buď za pomoci triplexového plunžru, nebo hydraulickým zařízením s multiplikátorem (obr. 23).

Pro tlaky do 300 MPa se využívají triplexová čerpadla. U vyšších tlaků pak ztrácejí svoji spolehlivost a jsou proto spojována s multiplikátory. Tímto spojením je docíleno tlaků až 670 MPa.



Obr. 23 Vysokotlaké čerpadlo s multiplikátorem [46].

Multiplikátor: Je součástí hydraulické jednotky a jeho úkolem je zvyšování tlaku vody. Skládá se ze dvou spojených pístů. Při provozu je na větší píst přiveden nízký tlak oleje z čerpadla, který je následně převeden na vysoký tlak vody na malém pístu. Z Pascalova zákona pak plyne, že tlak vody závisí na poměru pracovních ploch spojených pístů.

Akumulátor: Jelikož objem dodávané vysokotlaké vody není konstantní, je nutné použít akumulátor, který slouží k vyrovnání výkyvů tlaku v systému. Tyto rázy vznikají v důsledku pulsace vody při jejím stlačování a ve výsledku by způsobovaly zanechávání rýh na povrchu řezaného materiálu.

Konstrukčně se jedná o dutý válec, ve kterém se nachází stlačená voda. V momentě poklesu tlaku expanduje voda v akumulátoru a částečně se dostane do systému. Díky tomu jsou vyrovnány výkyvy tlaku a je zajištěn kontinuální tok vody v systému.

Potrubí pro rozvod vody: Skládá se z několika typů armatur, které jsou vyrobeny z vysokopevnostní korozivzdorné oceli a má průměr obvykle 6 až 14 mm (obr. 24). Potrubí musí umožňovat pohyb řezné hlavy. Další komponenty zajišťující rozvod vody jsou jednocestné a dvojcestný ventil. Jednocestné ventily jsou celkem čtyři a nachází se v multiplikátoru. Dvojcestný ventil je umístěn přímo v potrubí před řezací hlavou a slouží k regulaci řezného procesu.



Obr. 24 Potrubí [62].

Filtry: V technologii vodního paprsku se obvykle využívá obyčejná voda z kohoutku. Proto je nezbytné tuto kapalinu filtrovat a odstranit z ní tak případné nečistoty, které by mohly poškodit trysku. Filtry zachytávají nečistoty o velikosti 0,5 až 1,2 μm a dělíme je na dva základní druhy:

- Nízkotlaké filtry
- Vysokotlaké filtry

Řezná hlava: Komponenta převádějící vysokotlakou vodu na řezný nástroj. Při řezání s přídatným materiálem má za úkol co nejdokonaleji promístit abrazivo s vodním paprskem.

Tento proces následně ovlivňuje kvalitu řezného paprsku a tím i přesnost a kvalitu řezu. Řezné hlavy můžeme rozdělit podle konstrukce na:

- Řezné hlavy pro WJM
- Řezné hlavy pro AWJ
- Řezné hlavy pro ASJ

Jednotlivé druhy jsou podrobně rozepsány v kapitole 3.5 Základní metody řezání.

Vodní tryska: Vsazuje se do řezací hlavy a její průměr začíná na 0,075 mm (obr. 25). Výrazným způsobem ovlivňuje celkovou účinnost řezání. Materiál trysky závisí na tlaku řezné kapaliny. Do tlaku 150 MPa se trysky vyrábí z korozivzdorné oceli, tlak do 250 MPa vyžaduje slinutý karbid, nebo keramiku. Pro vyšší tlaky je nutné použít trysky ze safíru nebo diamantu. Například safírové trysky mají životnost pouhých 200 hodin, poté nastává jejich zanesení nečistotami a minerálními usazeninami z vody. V porovnání s nimi mají diamantové trysky výhodu ve vyšší životnosti a v možnosti několikanásobného přečištění. Tato výhoda je ovšem vykoupena mnohonásobně vyšší cenou.



Obr. 25 Vodní tryska [43].

Fokusační tryska: Poslední část stroje formující výstupní paprsek do konečné podoby. Jedná se o jedinou komponentu, kterou prochází voda již smíchaná s abrazivem. Z tohoto důvodu jsou při výrobě kladeny vysoké nároky na materiál. Obvykle se vyrábí práškovou metalurgií z karbidu wolframu a kubického nitridu boru. Tyto materiály vynikají svou otěruvzdorností, což je základní předpoklad pro zajištění spolehlivosti trysky (obr. 26).



Obr. 26 Fokusační tryska [3].

Lapač vody: Rozeznáváme stacionární a mobilní lapače. Oba typy slouží primárně k pohlcování energie vodního paprsku procházejícího skrz řezaný materiál a k zachytávání a odvádění použité vody. Další jejich funkce jsou zachytávání třísek a snižování hluku. Stacionární lapač je nádoba o hloubce 300 až 600 mm, jejíž velikost určuje řezací plocha stroje. Mobilní lapače jsou menší zařízení, které jsou spojeny s robotickou rukou. Obvykle jsou tvořeny trubkou vyplněnou ocelovými, nebo keramickými kuličkami, které lámou prošlý paprsek. Nevýhodou mobilních lapačů je rychlé opotřebování kuliček a tudíž nutnost jejich časté výměny.

3.4 Pracovní médium [22], [23], [38], [45], [72]

Jako pracovní médium se nejčastěji používá voda, do níž mohou být posléze přidány částice abraziva. Obvyčejná voda ale není nejvhodnější z důvodu zanášení stroje, vysokých ztrát při průchodu potrubím, atd. Z tohoto důvodu je voda upravována a jsou do ní přidány některé látky. Těmto úpravám je důležité věnovat patřičnou pozornost, jelikož vhodně zvolená kapalina ovlivňuje celkovou efektivnost procesu řezání.

Úprava vody: Jak již bylo řečeno, ve strojích se používá běžná voda tekoucí z kohoutku. Tato voda ovšem obsahuje velké množství příměsí, které mají tendenci usazovat se v trysce.

Dochází tak k nežádoucímu zmenšování jejího průměru a narušování tvaru výstupního paprsku. Od toho se pak odvíjí kratší životnost a to nejenom trysky, ale také všech těsnění a ventilů.

Úprava vody se liší v závislosti na výrobci stroje, ale obvykle se skládá ze změkčení, deionizování a demineralizování.

Aditiva: Jedná se o přísady polymerů vyznačující se lineárními molekulami vytvářející dlouhé řetězce. Do vody se přidávají z důvodu vytvoření souvislého paprsku, ve kterém nedochází k turbulencím a v důsledku toho má tvrdé jádro. Takto upravený paprsek se při nárazu na obrobek neroztříští a je možné vytvářet ostré hrany.

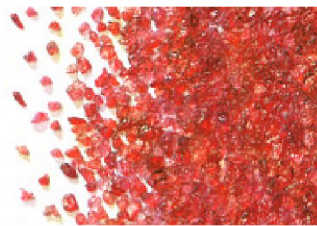
Problémy nastávají při použití abrazivních metod, protože vyšší soudržnost paprsku zabraňuje dobrému promísení abraziva s vodou. Díky tomuto jevu dochází ke snížení účinnosti řezání.

Abraziva: Jsou to směsi částic materiálů, u nichž sledujeme především řezivost, zrnitost a tvrdost. Tyto parametry mají výrazný vliv na kvalitu řezné hrany a efektivitu řezání. Dalšími důležitými faktory jsou recyklovatelnost a množství dávkovaného abraziva, které výrazným způsobem ovlivňují cenu řezu.

Jediné přírodní abrazivo, které se v technologii vodního paprsku využívá je granát (obr. 27). Ostatní jsou vyráběna uměle, aby bylo možné kontrolovat tvrdost, krystalickou strukturu, chemické složení, velikost zrn a řezné vlastnosti.

Druhy abraziva:

- Granát
- Olivín
- Křemičitý písek
- Oxid hlinitý
- Ocelová drť
- Broky
- Ledová tříšť



Obr. 27 Granátové abrazivo [54].

Nejčastěji se používá právě zmiňovaný granát, který díky své tvrdosti poskytuje vynikající kvalitu řezu a vysokou produktivitu řezání. Ze stejného důvodu ale dochází k většímu opotřebení trysky. Dalšími nevýhodami jsou vysoká cena a obtížná recyklace.

3.5 Základní metody řezání [22], [23], [36], [38], [42], [45], [72]

Řezání vodním paprskem lze rozdělit na velké množství metod. Primárně rozlišujeme kontinuální a diskontinuální vodní paprsek. Ve strojírenské praxi se pak nejvíce používají dvě základní metody řadící se do kategorie kontinuálních vodních paprsků:

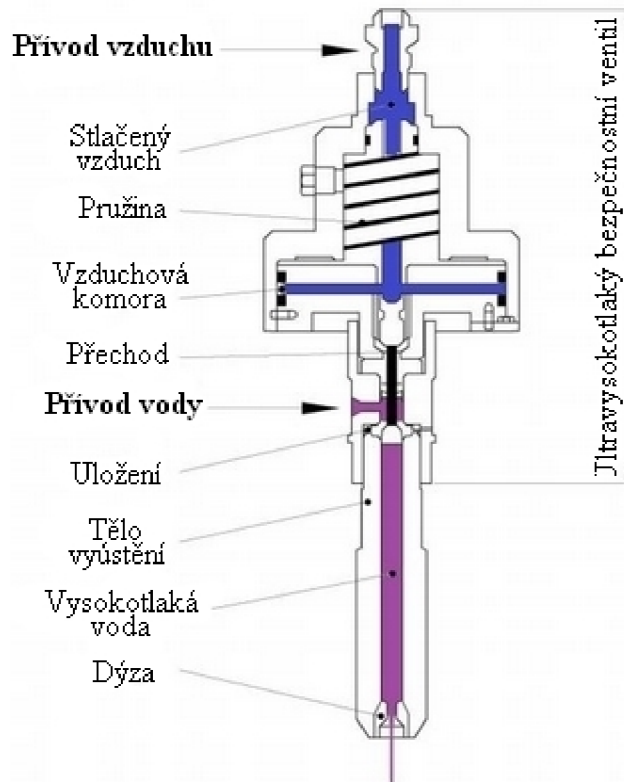
- WJM (water jet machining) – čistý vodní paprsek
- AWJ (abrasive water jet) – abrazivní vodní paprsek

3.5.1 Technologie řezání čistým vodním paprskem WJM

Čistý vodní paprsek, jehož schématické znázornění je vidět na obrázku 28, je původní metodou dělení materiálu pomocí vody. K řezu dochází pouze v důsledku působení vysokého tlaku vody na obráběný materiál. Zmiňovaný tlak má hodnotu až 670 MPa, průměr paprsku je 0,1 až 1,5 mm a jeho výstupní rychlost dosahuje hodnot 600 až 900 m·s⁻¹. Při takto vysokých

rychlostech kapaliny dochází k obroušování trysky i bez přidaných abrazivních částic. Je to způsobeno minerály obsaženými ve vodě. Životnost trysek je potom přímo úměrná množství těchto minerálů a pohybuje se v rozmezí od 50 do 500 hodin.

Metoda WJM se používá především pro dělení nekovových materiálů jako je polystyren, guma, překližka, laminát, plasty, lepenky, atd. Obvyklá tloušťka řezu je do 100 mm a rychlost řezání u materiálů jako je papír může dosahovat až $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 28 Tryska WJM [45].

3.5.2 Technologie řezání abrazivním vodním paprskem AWJ

Z důvodu nepoužitelnosti metody WJM pro řezání tvrdých materiálů byla v roce 1979 vyvinuta technologie abrazivního vodního paprsku. Přidáním tvrdých částic do proudu vody se samotný paprsek změnil z řezného nástroje na urychlovač abrazivních částic. Tyto částice rozrušují obráběný materiál a v porovnání s metodou WJM zvyšují až tisíckrát erozivní sílu paprsku. Díky této skutečnosti se paleta zpracovávaných materiálů rozšiřuje například o železné i neželezné kovy, keramiku a kompozitní materiály.

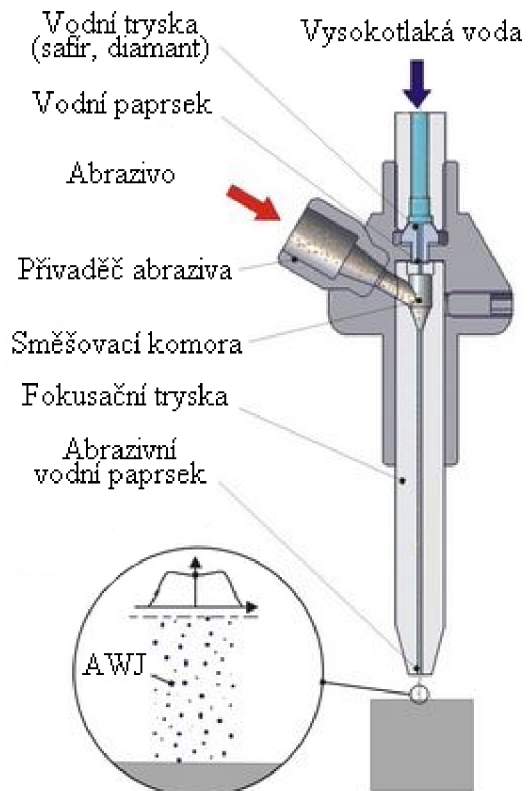
Další výhodou abrazivní technologie je celkové snížení tlaku kapaliny na 300 až 400 MPa, zatímco u metody čistého vodního paprsku se tlaky pohybují okolo 670 MPa. Výstupní rychlost paprsku je srovnatelná a průtok abraziva je $1 \text{ až } 20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$.

Abrazivní technologie řezání se dělí podle konstrukce řezací hlavy na:

- AWJ (abrasive water jet) – systém s přímým přívodem abraziva
- ASJ (abrasive slurry jet) – systém s přímým vstřikováním abraziva

Technologie AWJ: U tohoto systému, jak je vidět na obrázku 29, je abrazivo přiváděno ze zásobníku do směšovací komory. Zde se vlivem průchodu paprsku vytváří podtlak, který způsobuje zachytávání a urychlování abrazivních částic. Konečné uspořádání částic abraziva v paprsku probíhá ve fokusační trysce, jejíž geometrie má výrazný vliv na směšovací výkon.

Nevýhodou technologie AWJ je právě zmiňovaný systém přidávání brusiva, který zapříčiňuje zpomalování paprsku až na polovinu původní rychlosti. Důsledkem této skutečnosti je také snížení řezného výkonu. Dalšími nevýhodami, které jsou ovšem společné pro všechny abrazivní technologie, je zvýšení hlučnosti a zvětšení průměru paprsku.



Obr. 29 Tryska AWJ [26].

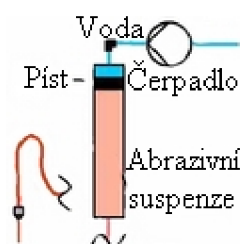
Technologie ASJ: Na rozdíl od systému AWJ je do směšovací komory přiváděna stlačená suspenze a ne pouze abrazivo. Průtok suspenze se mění v závislosti na požadované kvalitě řezu. U přesného řezání jsou to 1 až 3 kg·min⁻¹, u klasického řezu je to až 20 kg·min⁻¹. Popisovaná technologie se vyznačuje především dalším snížením tlaku (100 MPa), menším průměrem trysky, vyšší proudovou hustotou abrazivních částic a především vyšší účinností.

Systém ASJ dělíme podle způsobu mísení abrazivních částic na:

- Systém přímého vstřikování (Direct pumping) – metoda znázorněná na obrázku 30 je nejjednodušší způsob mísení abraziva s pracovním médiem. Nepoužívají se žádné speciální zařízení, suspenze je promísena za atmosférického tlaku a dále do systému je dopravována pomocí čerpadla. Navzdory své jednoduchosti se tento systém prakticky nepoužívá, jelikož dochází k velkému opotřebení čerpadla abrazivní suspenzí.



Obr. 30 Systém přímého vstřikování [36].

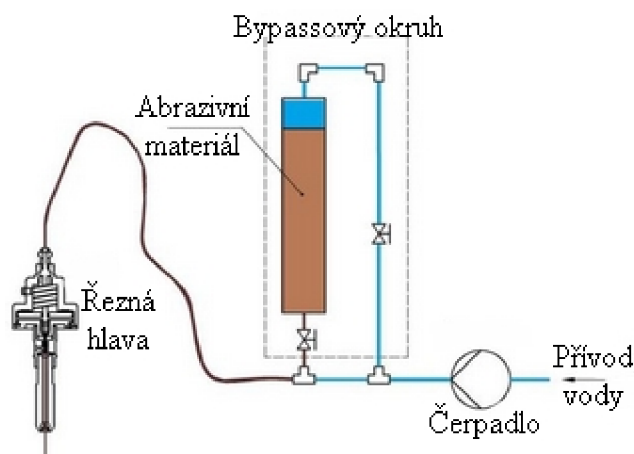


Obr. 31 Systém nepřímého vstřikování [36].

- Systém nepřímého vstřikování (Indirect pumping) – základním prvkem tohoto systému je tlaková nádoba, která také slouží jako zásobník předem namíchané abrazivní suspenze (obr. 31). Voda pod vysokým tlakem pohání píst umístěný v zásobníku a vyvolává tlak, který urychluje suspenzi procházející potrubím až k trysce.

Velkou nevýhodou je objem tlakové nádoby, který omezuje dobu řezání. Navíc dochází k opotřebení pístu, jehož výměna je časově i finančně náročná.

- Systém bočního mísení abraziva (Bypass principle) – metoda pracující na principu dvou větví, v nichž proudí tlaková voda. Jedna z větví vede do tzv. bypassového okruhu, kde se nachází zásobník s abrazivem, ve kterém dochází k mísení a tvorbě suspenze. Jak je vidět na obrázku 32 není zde použit píst, ani jiné prvky, které by byly náchylné k opotřebení. Jedinou nevýhodou zařízení je stejně jako u předchozí metody omezený objem zásobníku.








Obr. 32 Systém bočního mísení abraziva [45].

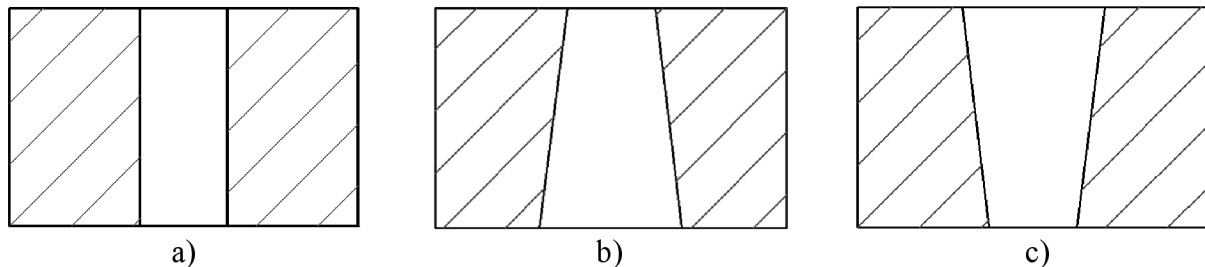
3.6 Kvalita řezu [2], [24], [38], [50], [55], [63], [72]

Existuje velké množství faktorů ovlivňujících přesnost a kvalitu obrobené plochy. Mezi tyto faktory řadíme například konstrukci řezné hlavy, řeznou rychlost, druh abraziva, vzdálenost trysky od materiálu, tloušťku materiálu a mnoho dalších. Tabulka 5 znázorňuje rozdělení a popis používaných stupňů kvality povrchu řezu. Samotná kvalita je pak posuzována pomocí odchylky kolmosti a hloubky řezu, což je rozebráno v následujících odstavcích. Dále je vyhodnocována drsnost řezné hrany, která je podrobně zpracována v kapitole 4. Struktura řezné hrany.

Tab. 5 Používané stupně kvality řezu.

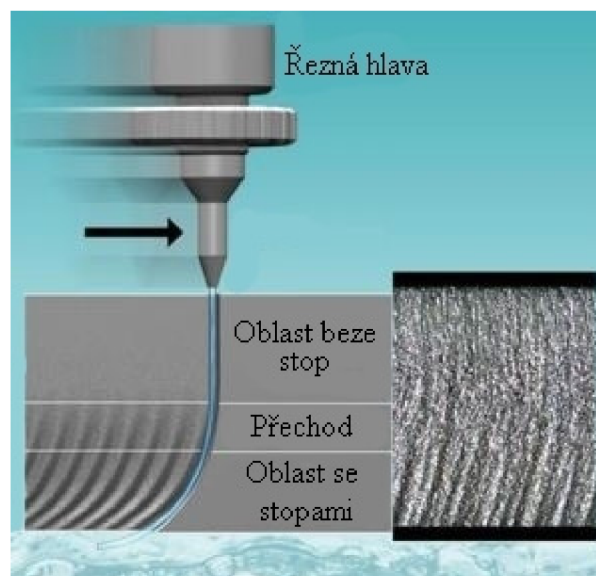
Stupeň kvality	Druh řezu	Drsnost Ra [μm] (horní kontura)	Tvarová přesnost [mm] (horní kontura)	Úkos
 Q5	Nejlepší řez	3,2	± 0,1	Mírný podřez
 Q4	Kvalitní řez	3,2 - 6,3	± 0,1	Minimální
 Q3	Střední řez	4,0 - 12,5	± 0,15	Dle typu a tloušťky materiálu
 Q2	Hrubý řez	4,0 - 25	± 0,2	Dle typu a tloušťky materiálu
 Q1	Dělicí řez	6,3 - 40	± 0,2	Výrazný úkos do +

Odchylka kolmosti: Hlavním faktorem ovlivňujícím kolmost řezu je řezná rychlost, tloušťka a složení materiálu. Nejčastěji se vyskytují tři druhy odchylek, které jsou znázorněny na obrázku 33. Příklad a) zachycuje ideální řez, kdy nevzniká úkos. Paprsek má celou dobu válcovitý tvar, kterého je dosaženo optimální volbou řezných podmínek. Příklad b) je důsledkem pomalé rychlosti posuvu nebo měkkého materiálu. Příklad c) je pak způsoben vlivem vysoké řezné rychlosti, případně špatně obrobitelným materiálem.



Obr. 33 Odchylky kolmosti.

Hloubka řezu: Jedná se o parametr přímo ovlivňující kvalitu řezu, který je závislý především na tlaku kapaliny, řezné rychlosti a hmotnostním toku abraziva. Hlavním problémem velké hloubky řezu je ztráta kinetické energie paprsku, v důsledku čehož dochází k jeho vychýlování vlivem tření. Toto vychýlení se při průchodu materiálem neustále zvětšuje a způsobuje zhoršení jakosti řezu jak je vidět na obrázku 34.



Obr. 34 Ohyb vodního paprsku [42].

3.7 Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem [24], [38], [51]

Výhody:

- Účinnost až 80%
- Žádné tepelné ovlivnění řezaného materiálu (maximální ohřev o 40 až 50°C)
- Je možné řezat téměř všechny materiály
- Snadná automatizace
- Při řezání nevznikají škodlivé emise (šetrnost k životnímu prostředí)
- Jedním čerpadlem je možné napájet až desítky dýz
- Možnost řezání vlnitých, nebo síťovaných materiálů

- Vysoká spolehlivost a jednoduchost obsluhy
- Pomocí jednoduché změny tlaku lze materiál oplachovat, otryskávat a řezat
- Obrobek nemusí být pevně upnut
- Tvarové omezení řezání je dáno pouze kruhovým tvarem paprsku
- Při použití kvalitnějšího stupně řezu již odpadá nutnost následného opracování

Nevýhody:

- Rychlý vznik koroze
- Nemožnost řezání materiálů náchylných na kontakt s vodou
- Dlouhé vysoušení u nasákavých materiálů
- Vysoká hlučnost
- Vysoká cena řezání
- U malých dílů nutnost vytváření můsteků, jinak hrozí propad do lapače

3.8 Porovnání metod [1], [25]

V tabulce 6 jsou porovnány metody obrábění laserem a vodním paprskem. Jsou zde zohledněny základní parametry, které se při řezání nekonvenčními technologiemi hodnotí a které rozhodují o volbě a způsobu zpracování daného výrobku.

Tab. 6 Vzájemné porovnání řezání laserem a vodním paprskem.

	LASER	VODNÍ PAPERSEK
Dělitelné materiály	všechny, kromě materiálů s vysokou světelnou odrazivostí	všechny materiály
Teplota řezu	odpovídá teplotě varu řezaného materiálu	do 40 °C
TOO	malá	není
Kolmost řezu	desítky úhlových minut	1 až 2,5 stupně
Struktura povrchu obrobené plochy	Ra 2,5 – Ra 25	Ra 3,2 – Ra 40
Výronek v řezné spáře	většinou bez výronku	vždy bez výronku
Tvrdości řezaného materiálu	nemá vliv na rychlost řezání	mírně ovlivňuje rychlost řezání
Velikost dílce	malé i velké dílce	malé i velké dílce
Tloušťka řezaného materiálu	ocel do 25 mm	ocel do 500 mm
Složitosť tvaru	složité tvary	složité tvary
Prústřel	je možný	je možný
Vznik plynných emisí	malé množství	nevznikají
Vznik oxidických povlaků	vznikají pouze při řezání kyslíkem	vznikají u materiálů korodujících při styku s vodou

4. STRUKTURA ŘEZNÉ HRANY [1], [27]

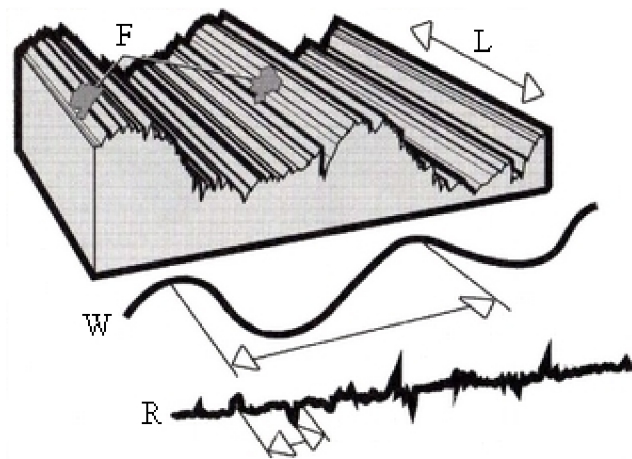
Mezi nejčastěji vyhodnocované složky struktury řezné hrany patří drsnost, jež byla měřena i v praktické části této diplomové práce. Můžeme ji definovat jako část geometrických úchylek skutečného povrchu s relativně malou vzdáleností sousedních nerovností. V případě řezání laserem a vodním paprskem je hodnota drsnosti určena hloubkou rýh v řezné rovině a obvykle má tendenci se zvětšovat s rostoucí tloušťkou obráběného materiálu.

Struktura řezné hrany se rozděluje na dva druhy:

- **Mikronerovnost** – jedná se o stopy, které na řezné hraně zanechává laserový nebo vodní paprsek. Do této kategorie spadá i zmiňovaná drsnost povrchu.
- **Makronerovnost** – rozlehlejší periodické nerovnosti, které jsou nejčastěji způsobeny vibrací soustavy Stroj – Nástroj – Obrobek – Prostředí. Příkladem může být vlnitost povrchu.

Podrobnému popisu jednotlivých druhů nerovností se věnuje norma ČSN EN ISO 4287, která stanovuje termíny, definice a parametry pro zjišťování struktury povrchu profilovou metodou. Nejdůležitější z těchto parametrů jsou zobrazeny na obrázku 35, kde písmeno R označuje drsnost, což jsou v podstatě mikrogeometrické odchylky od ideálního povrchu. Následujícím parametrem je vlnitost označená písmenem W, která jak již bylo zmiňováno, patří do skupiny makronerovností. Jejím podstatným rozdílem oproti drsnosti je vyhodnocování na výrazně delší vzdálenosti.

Dalším parametrem je textura povrchu L, která označuje uspořádání rýh po obrábění. Posledním parametrem jsou pak nerovnosti vzniklé náhodným poškozením, které se označují písmenem F. Do hodnocení struktury povrchu se nezahrnují a nejčastějšími představiteli bývají póry nebo trhliny v materiálu.



Obr. 35 Nerovnosti povrchu [1].

4.1 Definice parametrů drsnosti [1], [12], [27], [44]

Jednou z nejdůležitějších veličin pro vyhodnocení drsnosti povrchu je délka měřeného úseku. Rozlišujeme délku základní (l_r) a vyhodnocovanou (l_n), jejichž správná volba má zásadní vliv na určení jakosti povrchu. Rozsah základní délky musí být dostatečně velký, aby obsahoval potřebné množství údajů charakterizujících daný profil. Vyhodnocovaná délka je potom složena z jedné, nebo více délek základních.

Drsnost povrchu je možné popsat pomocí mnoha parametrů, jež dělíme na výškové a délkové, které následně obsahují jednotlivé charakteristiky.

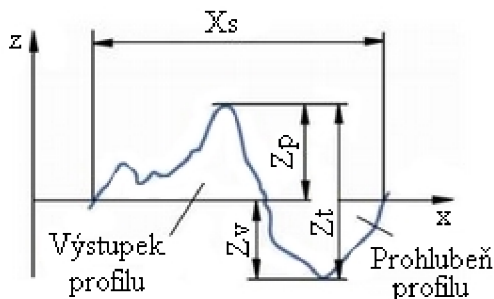
Výškové

- Střední aritmetická úchylka profilu (R_a)
- Průměrná kvadratická úchylka profilu (R_q)
- Šikmost profilu (R_{sk})
- Špičatost profilu (R_{ku})

Délkové

➤ Průměrná šířka prvků profilu (RSm)

Všechny uváděné charakteristiky vychází z určení jednotlivých elementů, jež jsou popsány na nejmenší možné posuzované části, nazývané prvek profilu. Jedná se v podstatě o výstupek a přilehlou prohlubeň, jak je vidět na obrázku 36.



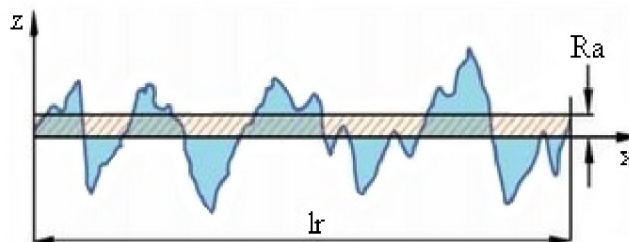
Z_p – Výška výstupku profilu
 Z_v – Hloubka prohlubně profilu
 Z_t – Výška prvku profilu
 X_s – Šířka prvku profilu

Obr. 36 Prvek profilu [44].

V praktické části práce byly u jednotlivých vzorků vyhodnocovány parametry R_a a R_z . První zmiňovaný je podrobně rozebrán níže. Parametr R_z pak vychází z prvku profilu a je roven součtu nejvyššího výstupku (Z_p) a nejnižší prohlubně (Z_v) v rozsahu základní délky (l_r).

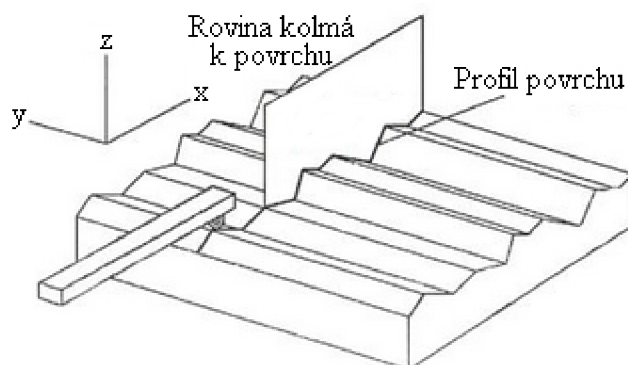
Střední aritmetická úchylka profilu (R_a) – Vypočítá se jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky (vzorec 4.1). Jedná se o nejpoužívanější charakteristiku vyhodnocovanou ve strojírenství (obr. 37), která se ale vyznačuje řadou nevýhod. V první řadě pomocí R_a nelze zjistit, jak vypadá měřený povrch a také má malou vypovídací schopnost, protože nereaguje na extrémní výšky a hloubky měřeného profilu.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4.1)$$



Obr. 37 Střední aritmetická úchylka profilu [44].

4.2 Měření drsnosti [1], [44]



Obr. 38 Měření drsnosti [1].

dotykového měření, která je rozebrána níže. Existují ale i metody bezdotykové, jako například optické nebo pneumatické měření drsnosti.

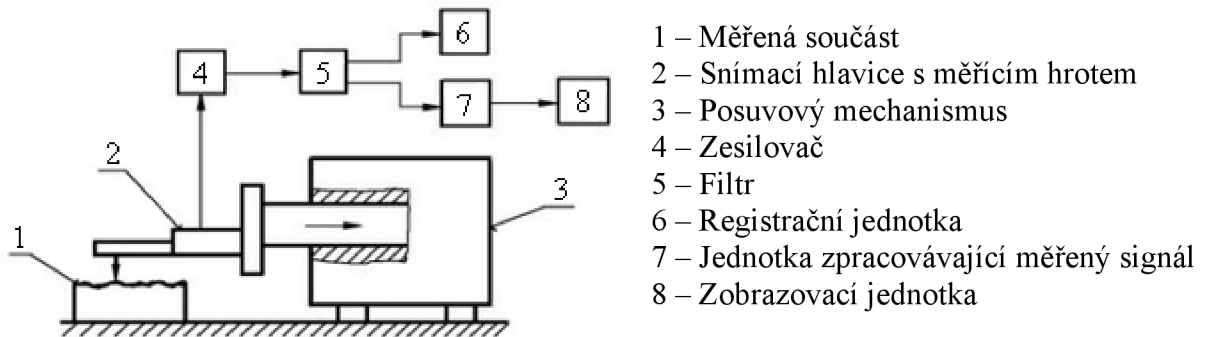
Měření drsnosti probíhá ve směru kolmém vůči nerovnostem vzniklým při obrábění (obr. 38). Pro případ řezání laserem a vodou je to směr kolmý na vnikající paprsek. Pokud v tomto směru promítneme rovinu kolmou k povrchu, získáme profil, jež je základním zdrojem informací pro vyhodnocení drsnosti. K tomu se používá řada přístrojů pracujících na různých principech. Nejčastěji je využívána metoda

Dotykové měření drsnosti – ve strojírenství se jedná o nejlepší a nejrozšířenější metodu měření drsnosti. Princip dotykového měřícího zařízení spočívá v posunu diamantového hrotu po měřeném povrchu. Mechanický signál je poté převeden do elektrické podoby, díky čemuž je možné odečítat číselné hodnoty veškerých parametrů profilu drsnosti a grafický záznam přímo z displeje drsnoměru (obr. 39).

Výhodami tohoto způsobu měření drsnosti je zejména vysoká přesnost, citlivost a reprodukovatelnost měření. Mezi nevýhody pak patří vysoká pořizovací cena, křehkost a částečné poškození povrchové vrstvy materiálu, což je způsobeno pohybem velmi tvrdého hrotu po povrchu součásti.

Přesnost měření dotykovým způsobem ovlivňují mimo jiné následující parametry:

- Poloměr zaoblení snímacího hrotu (2 μm , 5 μm , 10 μm)
- Vrcholový úhel snímacího hrotu (60°, 90°)
- Přítlačná síla (0,00075 N)



Obr. 39 Schéma dotykového měřícího přístroje [1].

5. ROZDĚLENÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN [6], [16], [17], [18], [19], [28]

Hliník je neželezný kov bělavě šedé barvy vyznačující se zejména svou nízkou hmotností a vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí. Řadí se k nejrozšířenějším prvkům na Zemi a v přírodě se vyskytuje především ve formě sloučenin. Čistý hliník má hustotu $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, teplotu tání $660,32^\circ\text{C}$ a teplotu varu 2519°C . Jeho mechanické vlastnosti jsou poměrně nízké a to mez pevnosti $R_m = 40 - 50 \text{ MPa}$, při tažnosti $A = 70 - 90\%$.

V této formě je proto ve strojírenství nepoužitelný a využívají se zde spíše jeho slitiny. Přidáním legujících prvků dochází k výraznému zlepšení vlastností, obzvláště pak pevnosti, což z těchto slitin dělá nepostradatelný materiál hlavně pro letecký a automobilový průmysl.

5.1 Rozdělení slitin hliníku podle označení (ČSN EN 573 – 3)

Řada 1000 (hliník minimálně 99,00% a více) – Používá se v oblastech, kde jsou vyžadovány vysoké hodnoty fyzikálních vlastností, jako je vysoká elektrická a tepelná vodivost nebo odolnost vůči korozi. Většinou se jedná o elektrotechnický a chemický průmysl, pro výrobu obalového materiálu, atd.

Řada 2000 (slitina Al – Cu) – Slitiny někdy označované jako duraly. Jsou legovány primárně mědí (4 – 5% Cu) a sekundárně hořčíkem a jsou vytvrditelné. Vynikají mimo jiné vysokou pevností, tažností a lomovou houževnatostí. Jejich nevýhodami jsou špatné slévárenské vlastnosti a špatná odolnost vůči korozi. Nejčastěji jsou využívány v leteckém průmyslu.

Řada 3000 (slitina Al – Mn) – Přidáním manganu se zvyšuje jejich pevnost, tvárnost i odolnost vůči korozi. Nejsou tepelně zpracovatelné a obvykle se používají jako náhrady za čistý hliník řady 1000. Nejčastější aplikací jsou výměníky tepla v architektuře a obaly na jídlo v potravinářském průmyslu.

Řada 4000 (slitina Al – Si) – Slitiny hliníku také nazývané siluminy s obsahem křemíku do 12%. Právě křemík zlepšuje téměř všechny slévárenské technologické vlastnosti, jako je například zabíhavost a také potlačuje vznik trhlin. Dalšími legujícími prvky může být hořčík, nikl, nebo měď. Díky možnosti delšího zatěžování při vyšších teplotách se využívá například na výrobu pístů motorů.

Řada 5000 (slitina Al – Mg) – Obsah hořčíku se pohybuje okolo 5% a zlepšuje nejen odolnost vůči korozi, ale také obrobitelnost materiálu. Dalšími neopomenutelnými výhodami jsou dobrá svařitelnost a lešitelnost. Využití řady 5000 je zejména v potravinářském a chemickém průmyslu.

Řada 6000 (slitina Al – Mg – Si) – V porovnání se slitinou Al – Mg jsou vytvrditelné. Ostatní výhody zůstávají v podstatě srovnatelné, jen mechanické vlastnosti se mění s poměrem hořčíku a křemíku, jejichž množství obvykle nepřekračuje 1%. Nejčastější využití je v leteckém a stavebnictví. Díky dobré svařitelnosti jsou také používány na výrobu rámců jízdních kol, atd.

Řada 7000 (slitina Al – Zn) – Dosahují nejvyšších pevnostních vlastností ze všech hliníkových slitin, mají ovšem velmi nízkou odolnost vůči korozi. Obsah zinku je v rozmezí 1 – 8% a využívá se hlavně v leteckém a automobilovém průmyslu.

Řada 8000 (slitina Al s různými prvky) – nejčastější je legování Lithiem (do 2,5%), které snižuje hmotnost o 5 až 10% a současně zvyšuje modul pružnosti v tahu. Pevnost těchto slitin je srovnatelná s duraly a obvykle se používají v leteckém a zejména v kosmickém průmyslu.

6. CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE

Cílem praktické části práce bylo zhodnocení stupně poškození povlakované vrstvy a vyhodnocení drsnosti obrobených hran v závislosti na řezných parametrech. Následně byly tyto hodnoty srovnány s kvalitou řezu a poškozením povlakované vrstvy při řezání abrazivním vodním paprskem.

7. OBRÁBĚNÝ MATERIÁL [20], [21], [71]

Zpracovávaným materiálem byla slitina hliníku řady 5000, s přesným označením EN AW – 5754 H42 (AlMg₃), které vyplývá z normy ČSN EN 573-3. Jedná se o středně pevnou tvářenou slitinu hliníku s hořčíkem v podobě tenkého plechu, která je deformačně zpevněná a opatřená práškovou barvou. Vyniká zejména svou korozivzdorností, obzvláště v mořské vodě, chemickou odolností, leštitelností a svařitelností. Typické využití této slitiny je k výrobě ochranných krytů, plavidel, součástí zemědělských strojů, automobilů a vlaků.

Námi zkoumaný materiál měl tloušťku 1 milimetr a v porovnání s normovaným EN AW – 5754 H42 byl opatřen ochrannou fólií. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách 7 a 8 a vyplývají z atestu, který je k dispozici v příloze 2.

Tab. 7 Chemické složení.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,175	0,298	0,031	0,261	2,811	0,013	0,013	0,013

Tab. 8 Mechanické vlastnosti.

Smluvní mez kluzu Rp _{0,2} [MPa]	Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	Tažnost A ₅₀ [%]
184	246	10,6

8. POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE

Ke zhotovení vzorků byl použit stroj pro řezání vodním paprskem a laserové řezné centrum. Samotné vyhodnocení všech vzorků pak probíhalo za použití zařízení pro měření drsnosti a fotoaparátu s makroobjektivem. U vybraných vzorků byl ještě proveden metalografický výbrus, který byl zkoumán s použitím příslušného softwaru na stereoskopickém mikroskopu propojeném s PC.

8.1 Stroj pro řezání vodním paprskem [5], [63]

CNC stroj pro řezání vodním paprskem firmy AQUAdem, s.r.o., je produktem společnosti Water Jet Sweden. Jedná se o zařízení pro plošné řezání s označením NC4030T (obr. 40), jehož efektivní plocha činí 3 000 x 4 000 mm. Stroj je osazen třemi řezacími hlavami, přičemž pro náš případ byly použity hlavy dvě. Může být využit jak pro metodu AWJ, tak i pro WJM. Na zařízení je dále možné dělit materiály od tloušťky 0,1 mm, až do 150 mm, při zachování velmi kvalitního řezu. Paleta zpracovávaných materiálů zahrnuje takřka všechno od oceli, přes sklo, plasty, kámen až po molitany. Podrobnější informace o zpracovatelných materiálech a některé další technické údaje jsou v zapsány tabulce 9.



Obr. 40 NC4030T [63].

Tab. 9 Technické parametry C4030T.

Počet řezacích hlav [ks]	3
Efektivní plocha [mm]	3 000 x 4 000
Polotovary pro řezání [mm]	1 000 x 2 000
	1 250 x 2 500
	1 500 x 3 000
	2 000 x 3 000
Formát vstupních dat	DXF, DWG
Přesnost [mm]	0,1/1 000
Maximální tloušťka řezané oceli [mm]	100
Maximální tloušťka řezaného hliníku [mm]	150

8.2 Laserové řezné centrum [58]

Laserové centrum, jehož řezné parametry byly optimalizovány pro řezání povlakovaného hliníkového plechu je také vlastnictvím firmy AQUAdem, s.r.o. Konkrétně se jedná o stroj BySprint Fiber 3015 (obr. 41) od švýcarského výrobce Bystronic, který disponuje pevnolátkovým Yb: YAG laserem s výkonem 3 000 W. Díky speciálnímu zapouzdření toto zařízení snižuje na minimum emise kouře a hluku a vyniká také dalšími konstrukčními prvky, jako jsou například bezúdržbová magnetická ložiska nebo automatický měnič trysky. Řezný systém je typu létající optika, což znamená, že zpracovávaný materiál leží na roštu a pohybuje se pouze řezná hlava, která je řízena CNC programem. Další technické parametry stroje obsahuje tabulka 10.



Obr. 41 Bystronic BySprint Fiber 3015 [58].

Tab. 10 Technické parametry Bystronic BySprint Fiber 3015.

Výkon [W]	3 000
Vlnová délka [nm]	1 030
Maximální souběžná rychlost polohování [$m \cdot min^{-1}$]	140
Maximální zrychlení os [$m \cdot s^{-1}$]	12
Přesnost [mm]	0,1/1 000
Maximální tloušťka řezané oceli [mm]	20
Maximální tloušťka řezané nerezové oceli [mm]	12
Maximální tloušťka řezaného hliníku [mm]	12
Řezná oblast X x Y x Z [mm]	3 048 x 1 524 x 70
Rozměry laserového řezacího stroje D x Š x V [mm]	10 150 x 6 200 x 2 500
Nosnost stolu [kg]	750
Hmotnost centra [kg]	12 000

8.3 Zařízení na měření drsnosti [1], [37]

Pro vyhodnocení drsnosti povrchu jednotlivých vzorků byl použit přístroj MarSurf M 300 (obr. 42), který splňuje požadavky na vyhodnocení a dokumentaci daných parametrů. Přístroj navíc disponuje vnitřní pamětí pro uchování 40 000 naměřených hodnot a 30 profilů, kontrolou překročení tolerance a mnoha dalšími funkcemi. Skládá se z vyhodnocovací a posuvové jednotky, které jsou vzájemně propojeny pomocí bluetooth interface.

V našem případě byla použita posuvová jednotka MarSurf RD 18 C se snímacím hrotem PHT 350, pomocí níž byly vyhodnocovány parametry Ra a Rz. Podrobnější technická specifikace je uvedena v tabulce 11.



Obr. 42 MarSurf M 300 [1].

Tab. 11 Technická specifikace MarSurf M 300 [1].

Měřicí princip	profilová metoda
Rozsah měření	do 350 μm
Rychlost snímání	0,5 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Snímací hrot	PHT - 350, $r = 2 \mu\text{m}$
Parametry měření	Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rk, Rv
Paměť	40 000 výsledků
Provozní teplota	5°C - 40 °C
Rozměry M 300 (d x š x v)	190 x 140 x 75 mm
Rozměry RD 18 (d x š x v)	130 x 70 x 50 mm

8.4 Fotoaparát s makroobjektivem [10]

Z důvodu vyhodnocení velikosti poškozené vrstvy a otřepů bylo nutné jednotlivé vzorky nafotit v makro režimu. K tomu posloužil fotoaparát Canon EOS 40D vybaven makroobjektivem Canon EF – S 60 mm f/2.8 Macro USM a kruhovým bleskem. Tato sestava byla umístěna do polohovatelného stativu jak je vidět na obrázku 43. Fotoaparát se řadí do kategorie digitálních zrcadlovek, což umožnilo jeho propojení s PC a ukládání vytvořených snímků ve formátu JPEG a RAW. Celkové rozlišení fotoaparátu činí 10,1 megapixelů a společně s přídatným makroobjektivem s pevným ohniskem a poměrem zobrazení 1:1 zajišťoval potřebné zvětšení zkoumané oblasti.



Obr. 43 Sestava pro focení vzorků.

8.5 Přístroje pro tvorbu metalografických výbrusů [56], [57]

Zalítí vzorků do lisovací hmoty bylo provedeno na přístroji CitoPress – 1 od firmy Struers (obr. 44 vpravo). Toto zařízení disponuje vysokým výkonem jednotky topení, což zkracuje lisovací časy. Dále podporuje individuální řízení jednotlivých parametrů jako je teplota, tlak, doba ohřevu a chlazení. Průměr lisovacího válce byl v našem případě 30 mm.

Vybroušení a vyleštění vzorku bylo realizováno na přístroji Tegramin – 20 (obr. 44 vlevo), jehož výrobcem je taktéž společnost Struers. Jedná se o robustní zařízení podporující plynulou regulaci otáček a využívající velkého spektra držáků na vzorky a unáščeů. Dodává se v několika velikostech, přičemž pro náš účel byl využit kotouč o průměru 200 mm. Přístroj také zajišťuje opakovatelnost měření pomocí automatického procesu zpracování.



Obr. 44 Přístroje využití při tvorbě metalografického výbrusu.

8.6 Stereoskopický mikroskop [53]



Obr. 45 Mikroskop Motic SMZ 168 [53].

Ke zkoumání metalografického výbrusu byl použit mikroskop Motic SMZ 168 (obr. 45) propojený s PC. Toto zařízení vyniká velkou hloubkou ostrosti obrazu a je vybaveno optickým systémem Greenough, který zajišťuje zvětšení 2,25 krát – 320 krát s plynulou regulací. Dalším regulovatelným prvkem je intenzita osvětlení zkoumaného vzorku, což zabezpečuje halogenový zdroj světla. Pracovní vzdálenost je 113 mm.

9. POPIS TVORBY VZORKŮ A JEJICH MĚŘENÍ

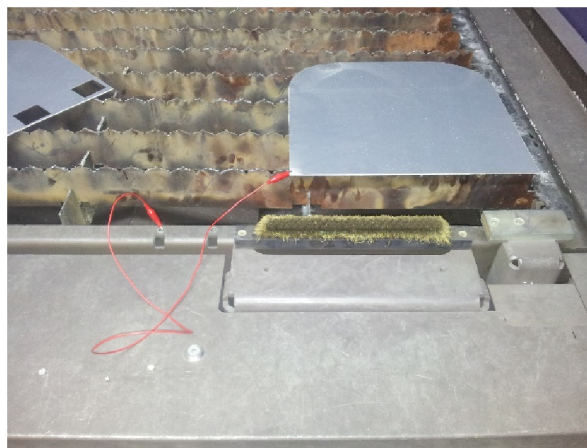
Vyhotovení potřebných vzorků probíhalo, jak již bylo zmíněno, ve firmě AQUAdem, s.r.o. na laserovém řezném centru Bystronic BySprint Fiber 3015. Z důvodu povrchové úpravy, jež je kryta ochrannou fólií, byly zkoumány následující varianty. Bez ochranné fólie a s ochrannou fólií, dále pak s fólií umístěnou na horní straně řezu a naopak. Poslední zkoušenou variantou byla fólie na spodní straně řezu s vodivým propojením řezaného plechu a rámu stroje jak je vidět na obrázku 47.

Z každé varianty bylo vypáleno několik čtvercových vzorků o hraně 50 mm (obr. 46), které se lišily nastavením řezných parametrů. Konkrétně se měnila řezná rychlost, odstup trysky, typ trysky, poloha ohniska, tlak plynu a výkon laseru, jak je vidět v tabulce 12 umístěné na konci kapitoly.

Jeden vzorek byl vytvořen i na vodním paprsku při odzkoušených řezných parametrech, kterými momentálně firma materiál zpracovává. Tento vzorek sloužil především pro srovnání jednotlivých metod řezání.



Obr. 46 Zhotovování vzorků.



Obr. 47 Vodivé propojení plechu a roštu.

Vyhotovené vzorky byly náležitě označeny a převezeny do Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, kde probíhalo samotné měření, jehož podmínky byly:

- Teplota: 20 °C
- Tlak: 101 kPa
- Vlhkost: 52 %

Nejprve probíhalo focení kvůli zjištění tepelného ovlivnění v podobě spálené barvy a kvůli velikosti otřepů. K tomu byl využit fotoaparát s makroobjektivem, jak zobrazuje obrázek 43. Při focení řezných hran pro vyhodnocení otřepů byly jednotlivé vzorky upnuty ve svěráku po 1 až 4 kusech. Pro focení spálené barvy pak byly dokumentovány jednotlivě.

Dalším krokem bylo měření drsnosti řezných hran přístrojem MarSurf M 300. Poloha měřicího hrotu vůči výpalku a celé měřicí prostředí je zobrazeno na obrázku 48. Každý vzorek byl proměřen na třech různých místech a výsledné hodnoty byly odečítány z displeje měřicího přístroje.



Obr. 48 Měření drsnosti.

Posledním úkolem měření bylo vytvoření metalografického výbrusu a jeho vyhodnocení pomocí stereoskopického mikroskopu připojeného k PC. Jelikož podstatou práce nebylo zjišťování struktury materiálu, nebyl vzorek leptán, ale pouze zalit, vybroušen a vyleštěn. K tomuto účelu byly vybrány exempláře vykazující nejlepší a nejhorší kvalitu řezu na laseru a také řez z vodního paprsku.

Tab. 12 Řezné parametry použité při zhotovování vzorků na laserovém řezném centru.

Poloha plechu	Vzorek	Řezná rychlost	Odstup trysky	Poloha ohniska	Tlak plynu	Výkon	Vnesené teplo [J/m]	Tryska
Bez fólie	1	18 000	1,2	-1	8	3 000	10 000	HK 15 => Ø 1,5 mm
	2	18 000	1,2	-2	8	3 000	10 000	
	3	18 000	1,2	-3	8	3 000	10 000	
	4	18 000	1,2	0	8	3 000	10 000	
	5	16 000	1,2	-1	8	3 000	11 250	
	6	20 000	1,2	-1	8	3 000	9 000	
	7	18 000	1	-1	8	3 000	10 000	
	8	18 000	0,8	-1	8	3 000	10 000	
	9	18 000	1,2	-1	10	3 000	10 000	
	10	18 000	1,2	-1	12	3 000	10 000	
	11	18 000	1,2	-1	6	3 000	10 000	
	12	18 000	1,2	-1	8	2 800	9 333	
Fólie na horní straně řezu	13	18 000	1,2	-1	8	3 000	10 000	
Fólie na spodní straně řezu	14	18 000	1,2	-1	8	3 000	10 000	HK 12 => Ø 1,2 mm
	15	18 000	1,2	-2	8	3 000	10 000	
	16	18 000	1,2	0	8	3 000	10 000	
	17	18 000	1,2	1	8	3 000	10 000	
	18	18 000	1,2	0	10	3 000	10 000	
	19	18 000	1,2	0	12	3 000	10 000	
	20	18 000	1,2	-1	10	3 000	10 000	
	21	18 000	1,2	-1	12	3 000	10 000	
	22	16 000	1,2	-1	10	3 000	11 250	
	23	14 000	1,2	-1	10	3 000	12 857	
	24	20 000	1,2	-1	10	3 000	9 000	
	25	4 000	0,5	-1,5	8	3 000	45 000	
	26	6 000	0,5	-1,5	8	3 000	30 000	
	27	6 000	0,5	-1,5	8	3 000	30 000	
	28	6 000	0,5	-1	10	3 000	30 000	
	29	6 000	0,5	0	10	3 000	30 000	
Fólie na spodní straně řezu uzemněný pl.	30	4 000	0,5	-1,5	8	3 000	45 000	
	31	6 000	0,5	-1,5	8	3 000	30 000	
	32	6 000	0,5	-1,5	8	3 000	30 000	
	33	6 000	0,5	-1	10	3 000	30 000	
	34	6 000	0,5	0	10	3 000	30 000	

10. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Vyhodnocení zhotovených vzorků probíhalo podle tří kritérií:

- Drsnost řezné hrany
- Velikost otřepů
- Velikost oblasti spálené barvy

Kapitola Výsledky měření obsahuje pouze naměřené hodnoty a ukázky povrchů dosažených při různém nastavení parametrů laseru. Celkové zhodnocení zmiňovaných kritérií je poté zahrnuto v kapitole 12. Zhodnocení výsledků experimentu.

10.1 Drsnost řezné hrany

Při měření drsnosti řezné hrany byly vyhodnocovány parametry Ra a Rz, konkrétně jejich střední hodnoty ze tří měření. Podrobné výsledky včetně směrodatné odchylky jsou k dispozici v příloze číslo 3, kde byly využity následující vzorce 10.1 a 10.2:

Bodový odhad střední hodnoty (průměrná výška profilu):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (10.1)$$

Bodový odhad směrodatné odchylky:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (10.2)$$

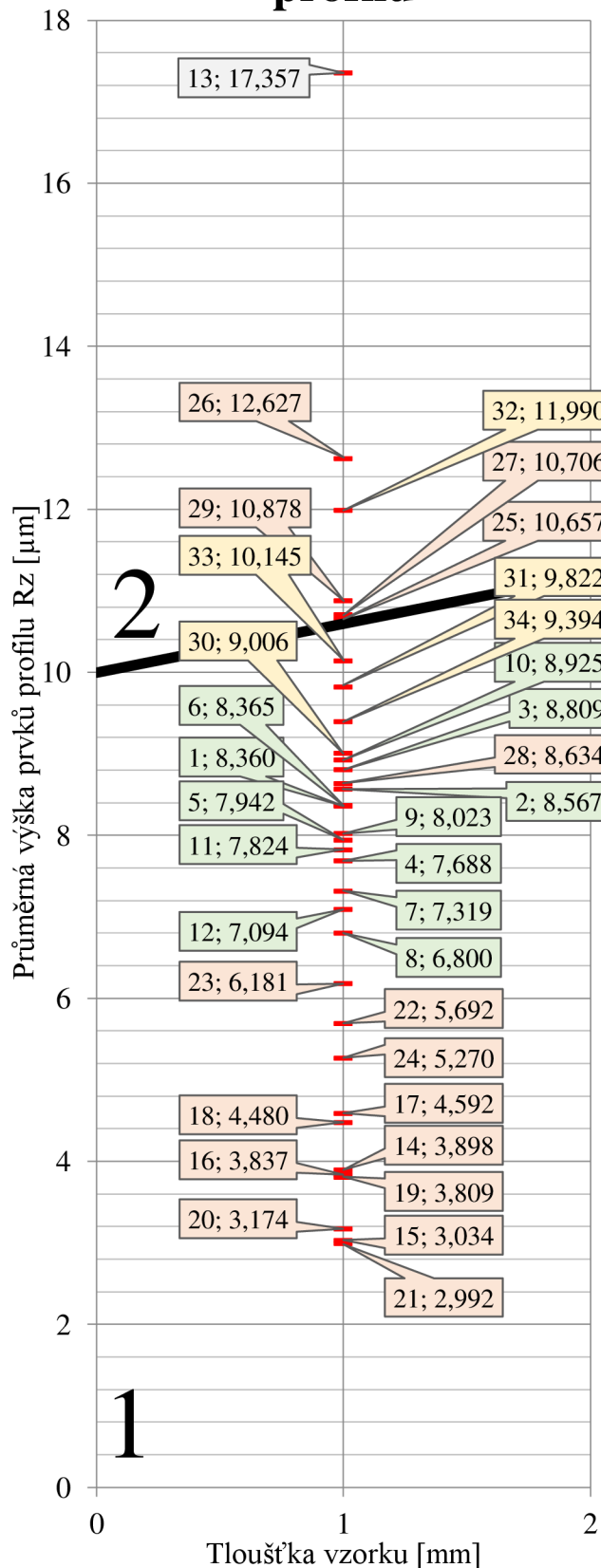
Pro přehlednost byla zpracována tabulka 14, ve které jsou hodnoty Ra a Rz seřazeny vzestupně od nejmenší drsnosti řezné hrany po největší. Jednotlivé řádky byly vyznačeny barevně, podle orientace plechu, jak je uvedeno v legendě pod tabulkou.

Dále byly hodnoty průměrných výšek prvků profilu Rz vyneseny do grafu na obrázku 49, z něhož je možné odečítat toleranční pole příslušného řezu. Jednotlivé velikosti tolerančních polí jsou znázorněny v tabulce 13, která stejně jako graf vychází z normy ČSN EN ISO 9013, jež se zabývá metodami tepelného dělení materiálů. Z tohoto důvodu nebyla do grafu vynesena hodnota vzorku zhotoveného pomocí vodního paprsku.

Tab. 13 Průměrná výška prvků profilu [11].

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu [μm]
1	10 + (0,6a mm)
2	40 + (0,8a mm)
3	70 + (1,2a mm)
4	110 + (1,8a mm)

Průměrná výška prvků profilu



Obr. 49 Průměrná výška prvků profilu Rz.

Tab. 14 Parametry drsnosti řezných hran.

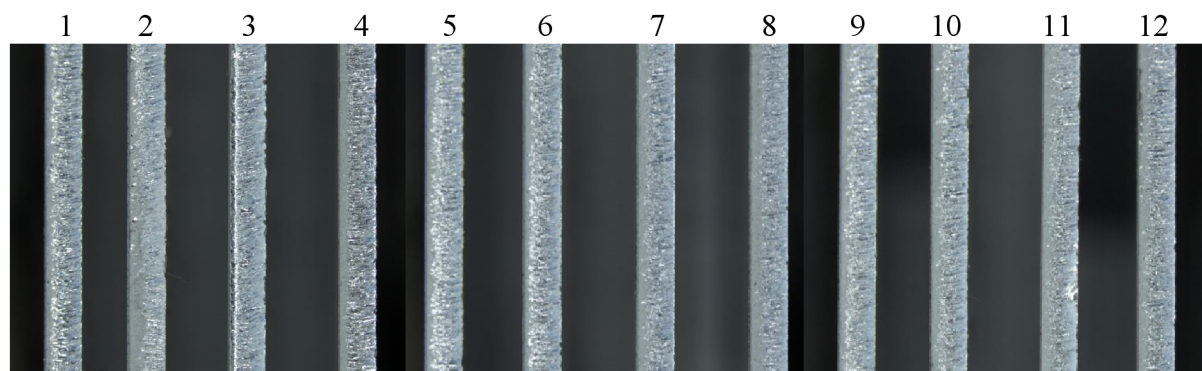
Parametr Rz		Parametr Ra	
Číslo vzorku	Střední hodnota [μm]	Číslo vzorku	Střední hodnota [μm]
21	2,992	20	0,660
15	3,034	15	0,684
20	3,174	21	0,730
19	3,809	16	0,800
16	3,837	19	0,810
14	3,898	14	0,849
18	4,480	18	0,962
17	4,592	17	1,002
24	5,270	24	1,134
22	5,692	22	1,227
23	6,181	23	1,302
8	6,800	12	1,380
12	7,094	28	1,393
7	7,319	8	1,438
4	7,688	30	1,548
11	7,824	1	1,586
5	7,942	7	1,586
9	8,023	34	1,589
1	8,360	11	1,592
6	8,365	33	1,592
2	8,567	9	1,661
28	8,634	5	1,665
3	8,809	25	1,702
10	8,925	31	1,715
30	9,006	6	1,716
34	9,394	4	1,717
31	9,822	3	1,756
33	10,145	2	1,774
25	10,657	27	1,793
27	10,706	29	1,872
29	10,878	10	1,906
32	11,990	26	2,042
26	12,627	32	2,066
13	17,357	13	4,099
WaterJet	31,000	WaterJet	6,161

Legenda

Bez fólie	
Fólie na horní straně řezu	
Fólie na spodní straně řezu	
Fólie na spodní straně řezu, uzemněný plech	

10.2 Velikost otřepů

Velikost a vlastnosti otřepů nebyly zjišťovány žádnou exaktní metodou, ale byly hodnoceny spíše subjektivně. Na obrázcích 50 až 53b jsou zachyceny řezné hrany, rozdělené do skupin podle orientace plechu vycházející z tabulky 12.



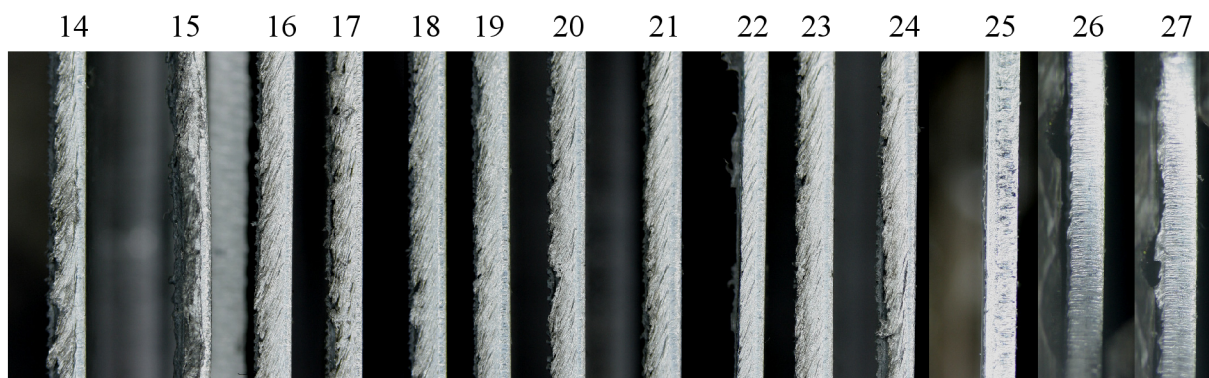
Obr. 50 Velikost otřepů vzorků bez fólie.



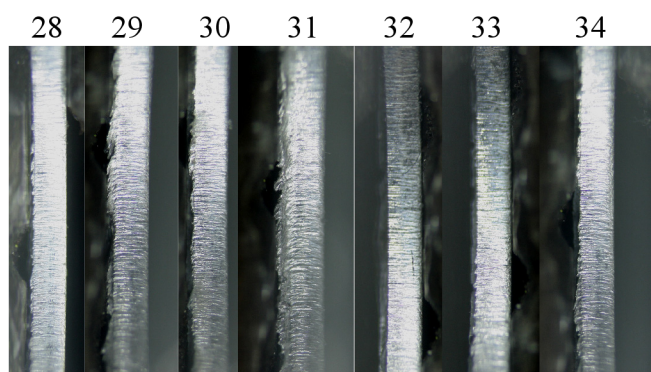
Obr. 51
Velikost otřepů
vzorku s fólií
umístěnou na
horní straně
řezu.



Obr. 52 Velikost
otřepů vzorku
zhotoveného
vodním paprskem.



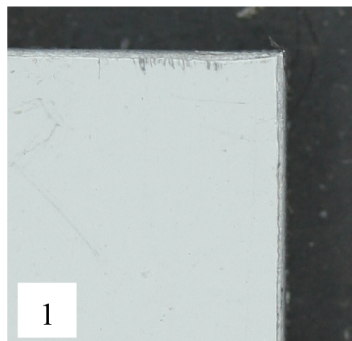
Obr. 53a Velikost otřepů vzorků s fólií umístěnou na spodní straně řezu.



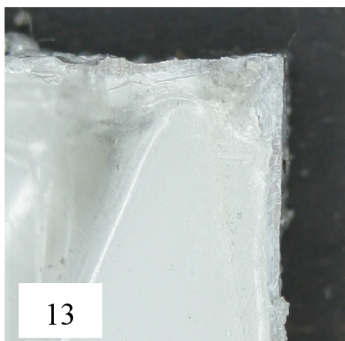
Obr. 53b Velikost otřepů vzorků
s fólií umístěnou na spodní straně
řezu – vzorek 30 až 34 uzemněný
plech.

10.3 Velikost oblasti spálené barvy

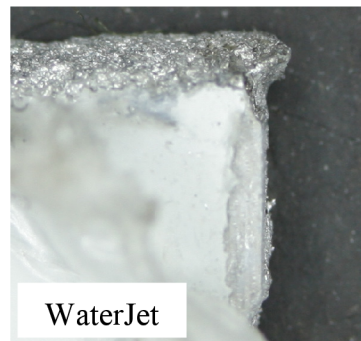
Jedná se o nejdůležitější hodnocené kritérium z pohledu odběratele finálního výrobku. Stejně jako u vyhodnocování velikosti otřepů jsou jednotlivé vzorky zobrazené na obrázcích 54 až 58 a rozdělené podle orientace plechu při řezání. Jen skupina vzorků řezaných bez fólie je zastoupena pouze jedním snímkem (obr. 54), protože rozdíly mezi takto zhotovenými kusy byly téměř neznatelné.



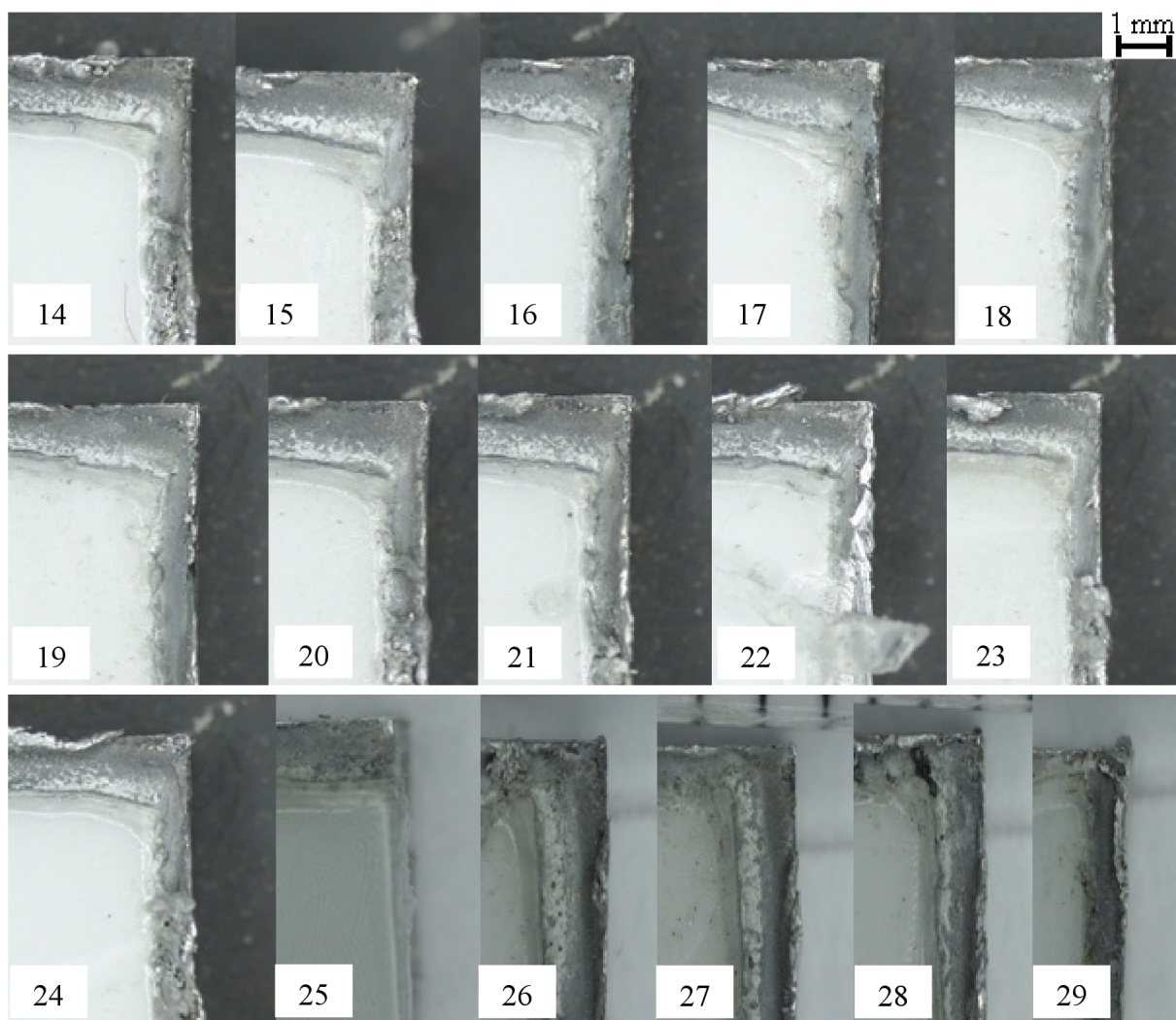
Obr. 54 Příklad vzorku řezaného bez fólie.



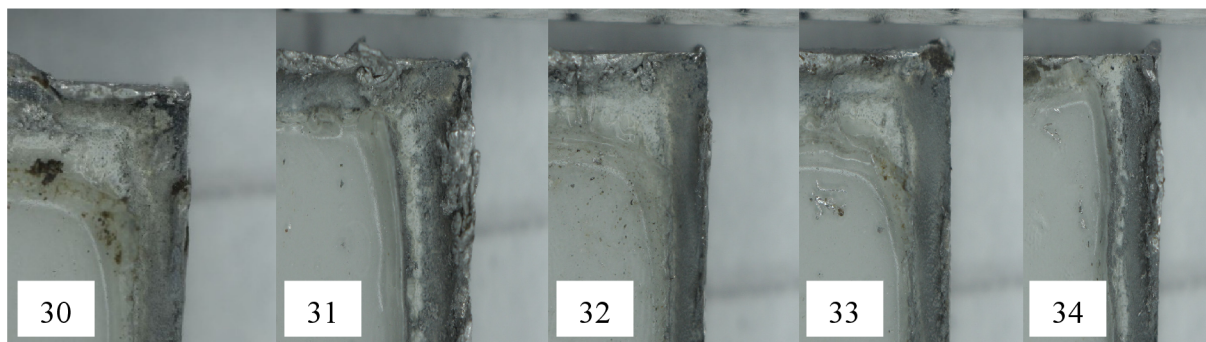
Obr. 55 Vzorek řezaný s fólií umístěnou na horní straně řezu.



Obr. 56 Vzorek řezaný vodním paprskem.



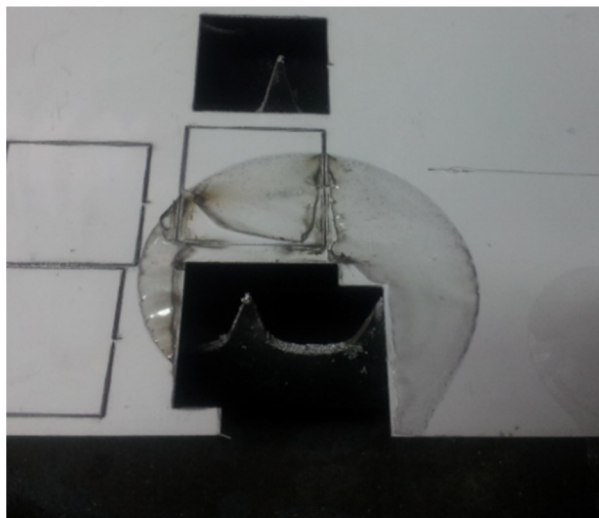
Obr. 57 Vzorky řezané s fólií umístěnou na spodní straně řezu.



Obr. 58 Vzorky řezané s fólií umístěnou na spodní straně řezu – uzemněný plech.

10.4 Vliv orientace a uzemnění plechu na řezný proces

Orientace plechu hrála velmi významnou roli při řezání vzorků potažených ochrannou fólií. Ukázalo se, že umístění fólie na horní stranu řezu je nepřijatelné z důvodu vytvoření velké bubliny při vpichu, jak je vidět na obrázku 59.



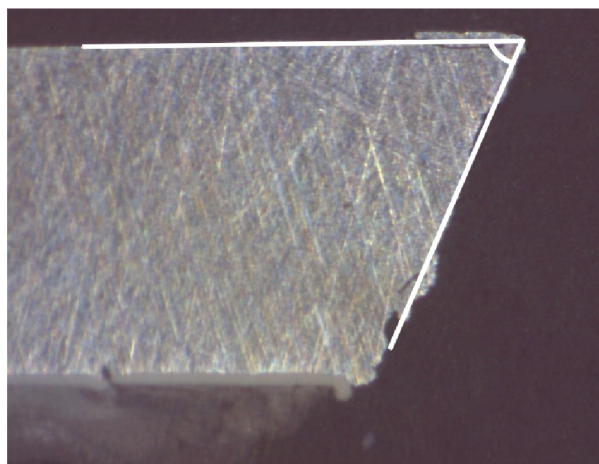
Obr. 59 Řez při orientaci fólie na horní straně řezu.

Z předchozího odstavce plyne, že ideální orientace plechu je s fólií na spodní straně řezu. Tato varianta ovšem způsobuje odizolování řezaného materiálu od nosného roštu, čímž dochází k přerušení elektrické vodivosti. Tryska a řezaný materiál fungují v konstrukci stroje jako kondenzátor, jehož změna kapacity způsobena změnou vzdálenosti desek je vyhodnocována CNC programem, který upravuje polohu řezné hlavy v ose z. Tato funkce je izolací odstavena a dochází k řezání s proměnným ohniskem a odstupem trysky.

Pro eliminování tohoto jevu a umožnění automatické regulace vzdálenosti trysky od řezaného materiálu, byl hliníkový plech s nosným roštem vodivě propojen pomocí svorek, jak je vidět na obrázku 47.

10.5 Metalografický výbrus

Samotný výbrus byl zhotoven pouze u tří vzorků, z nichž jeden byl vytvořen vodním paprskem, a další dva byly vybrány s ohledem na velikost otřepů. Pro srovnání byl vybrán vzorek číslo 14, který vykazoval největší otřep a vzorek číslo 25 vykazující otřep nejmenší. U zalitých vzorků byl vyhodnocován úkos, jež byl dopočítán ze změřeného úhlu (v obrázcích vyznačen bíle) a velikost oblasti spálené barvy (v obrázcích vyznačena červeně).



Obr. 60 Vzorek WaterJet.

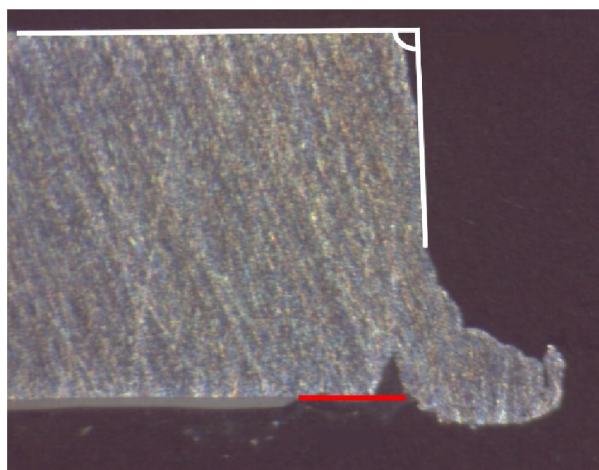
Vzorek zhotovený vodním paprskem

Změřený úhel: $65,96^\circ \Rightarrow$ **úkos:** $24,04^\circ$

Velikost oblasti spálené barvy:

Jelikož vodní paprsek materiál tepelně nezatěžuje, nedochází ke spalování barvy. Dochází ovšem k trhání ochranné fólie na tenké pramínky, což je rozpoznatelné na obr. 60.

Otřep: Bez otřepu



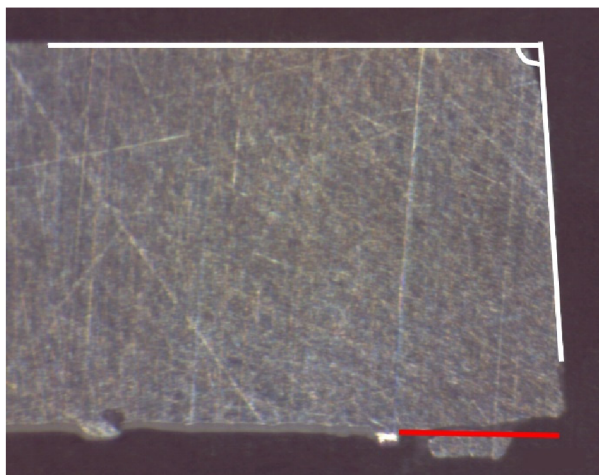
Obr. 61 Vzorek 14.

Vzorek číslo 14 (obr. 61)

Změřený úhel: $92,06^\circ \Rightarrow$ **úkos:** $2,06^\circ$

Velikost oblasti spálené barvy: 1,09 mm

Otřep: Výrazný otřep



Obr. 62 Vzorek 25.

Vzorek číslo 25 (obr. 62)

Změřený úhel: $93,89^\circ \Rightarrow$ **úkos:** $3,89^\circ$

Velikost oblasti spálené barvy: 1,65 mm

Otřep: Bez otřepu

11. TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Technicko – ekonomické zhodnocení zhotovovaného dílce vyplývá z provedených experimentů a podkladů dodaných firmou AQUAdem, s.r.o., vypsanych v tabulce 15.

Tab. 15 Potřebné hodnoty pro technicko – ekonomické zhodnocení.

Cena řezání na vodním paprsku [N_w]	15 Kč·min ⁻¹
Cena řezání na laseru [N_l]	58 Kč·min ⁻¹
Cena za materiál [N_m]	0 Kč – dodán odběratelem
Výrobní dávka [d_v]	6000 ks·rok ⁻¹
Délka řezu [l]	7978,5 mm
Počet najednou řezaných kusů na vodním paprsku	2 Ks
Počet najednou řezaných kusů na laseru	1 Ks

Vodní paprsek:

Pro tento způsob řezání nebyl proveden žádný experiment a vychází se přímo z odzkoušeného postupu aplikovaného firmou AQUAdem, s.r.o.:

- Řezná rychlost – 2 600 mm·min⁻¹

Celkové náklady na kus zhotovený vodním paprskem byly vypočteny podle následujícího vztahu:

$$N_{cw} = \frac{l}{v_c} \cdot N_w = \frac{7978,5}{2600} \cdot 15 = 46,03 \text{ Kč} \cdot 2 \text{ ks}^{-1} \Rightarrow \underline{23,015 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}} \quad (11.1)$$

Kde: N_{cw} – celkové náklady na kus na vodním paprsku [Kč·ks⁻¹]
 l – délka řezu [mm]
 v_c – řezná rychlost [mm·min⁻¹]
 N_w – cena řezání na vodním paprsku [Kč·min⁻¹]

Náklady na výrobní dávku zhotovenou vodním paprskem:

$$N_{dw} = N_{cw} \cdot d_v = 23,015 \cdot 6000 = \underline{138\,090 \text{ Kč} \cdot \text{rok}^{-1}} \quad (11.2)$$

Kde: N_{dw} – náklady na výrobní dávku na vodním paprsku [Kč·rok⁻¹]
 N_{cw} – celkové náklady na kus na vodním paprsku [Kč·ks⁻¹]
 d_v – výrobní dávka [ks·rok⁻¹]

Laser:

Z výsledků měření jak je popsáno v kapitole 12. Zhodnocení experimentu vyplývá, že nejmenší poškození vykazuje vzorek číslo 25, pro který byl proveden následující výpočet nákladů. Vzorek byl zhotoven podmínkami uvedenými v tabulce 12. Ostatní zkoumané kusy nevyhovovaly hodnoceným kritériím, a proto nebyly po ekonomické stránce hodnoceny.

- Řezná rychlost – 4 000 mm·min⁻¹

Celkové náklady na kus zhotovený na laseru byly vypočteny podle následujícího vztahu:

$$N_{cl} = \frac{l}{v_c} \cdot N_l = \frac{7\,978,5}{4\,000} \cdot 58 = \underline{115,69 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}} \quad (11.3)$$

Kde: N_{cl} – celkové náklady na kus na laseru [Kč·ks⁻¹]
 l – délka řezu [mm]
 v_c – řezná rychlost [mm·min⁻¹]
 N_l – Cena řezání na laseru [Kč·min⁻¹]

Náklady na výrobní dávku zhotovenou na laseru:

$$N_{dl} = N_{cw} \cdot d_v = 115,69 \cdot 6\,000 = \underline{694\,140 \text{ Kč} \cdot \text{rok}^{-1}} \quad (11.4)$$

Kde: N_{dl} – náklady na výrobní dávku na laseru [Kč·rok⁻¹]
 N_{cl} – celkové náklady na kus na laseru [Kč·ks⁻¹]
 d_v – výrobní dávka [ks·rok⁻¹]

Srovnání nákladů na jeden kus:

$$R_k = N_{cl} - N_{cw} = 115,69 - 23,015 = \underline{92,675 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}} \quad (11.5)$$

Kde: R_k – rozdíl nákladů na jeden kus [Kč·ks⁻¹]
 N_{cl} – celkové náklady na kus na laseru [Kč·ks⁻¹]
 N_{cw} – celkové náklady na kus na vodním parsku [Kč·ks⁻¹]

Srovnání nákladů na výrobní dávku:

$$R_d = N_{dl} - N_{dw} = 694\,140 - 138\,090 = \underline{556\,050 \text{ Kč} \cdot \text{rok}^{-1}} \quad (11.6)$$

Kde: R_d – rozdíl nákladů na výrobní dávku [Kč·rok⁻¹]
 N_{dl} – náklady na výrobní dávku na laseru [Kč·rok⁻¹]
 N_{dw} – náklady na výrobní dávku na vodním paprsku [Kč·rok⁻¹]

12. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Výsledky optimalizace laserového tavného dělení povlakovaného hliníkového plechu byly srovnávány především s parametry odzkoušené metody vodního paprsku využívané k řezání konkrétních dílců ve firmě AQUAdem, s.r.o. dříve. Hodnocení probíhalo jak po stránce kvalitativní, tak ekonomické. Po kvalitativní stránce byla nejdříve posuzována drsnost řezné hrany, velikost otřepu a následně velikost oblasti spálené barvy u jednotlivých skupin tvořených například různou orientací plechu.

Technologie vodního paprsku, jak je patrné z tabulky 14 vykazuje z hlediska drsnosti řezné hrany nejhorší výsledky. Jedná se o rozdíl až 2 mikrometrů v porovnání s nejhorší kvalitou na laserovém zařízení. Řezná hrana je v porovnání s laserem bez otřepů (obr. 52), ale na ploše opatřené povrchovou úpravou dochází k výraznému poškození vlivem abraziva (obr. 56). Ochranná fólie není spalována jako v případě laserového řezání, ale je trhána na tenké pramínky u hrany řezu. Tato technologie není pro konkrétní výrobu zcela ideální, nicméně je dostačující.

Významný vzorek celého experimentu s označením 13 tvořil samostatnou skupinu, která byla charakteristická umístěním fólie na horní straně řezu. Drsnost řezné hrany byla sice největší z laserem vytvořených vzorků, ale otřepy byly naprosto minimální (obr. 51). I přesto se tato orientace plechu ukázala jako nepoužitelná, jelikož při vpichu laserového paprsku do materiálu došlo k nafouknutí ochranné fólie a vytvoření bubliny o průměru několika desítek milimetrů (obr. 59). Následně se vzniklá bublina dotkla trysky, čímž byl celý plech posunut ze své pozice.

Pro vyloučení možnosti nekonstantní vzdálenosti trysky od řezaného plechu z důvodu odizolování ochrannou fólií, byl materiál vodivě propojen s nosným roštem, jak je podrobněji popsáno v kapitole 10.4 Vliv orientace a uzemnění plechu na řezný proces. Od této konfigurace se očekávalo zmenšení otřepů a drsnosti řezné hrany. Dosažené výsledky jednotlivých kritérií ovšem byly takřka totožné s výsledky bez uzemnění, čímž se tato teorie nepotvrdila.

Skupina vzorků zhotovená bez ochranné fólie měla sloužit spíše jako model pro rychlejší představu o problémech, které samotná fólie způsobuje. V porovnání se skupinou vzorků řezaných s fólií umístěnou na spodní straně řezu se potvrdil předpoklad, že u tak tenkého materiálu způsobuje tvorbu výrazných otřepů právě nalepená fólie (obr. 53a,b). Ta pravděpodobně snižuje rychlost proudění plynu v řezu, což má za následek pomalejší odvod materiálu z řezné spáry a jeho tuhnutí v podobě otřepů.

Očekávaných výsledků bylo dosaženo i v porovnání velikosti oblasti spálené barvy, kde vzorky bez fólie nevykazovaly žádné poškození (obr. 54), zatímco vzorky s fólií měly v blízkosti místa řezu výrazný opal (obr. 57). Tento jev byl opět přisuzován nalepené fólii a z toho vyplývající snížené rychlosti proudění plynu v řezu. Důsledkem poté bylo snížení odvodu tepla z místa řezu a také pálení samotné fólie, což způsobilo poškození práškové barvy.

Drsnost těchto dvou skupin je nejlépe porovnatelná z obrázku 49 a tabulky 14, z nichž vyplývá, že nejnižších hodnot R_a a R_z dosahovaly vzorky s fólií umístěnou na spodní straně řezu, při použití trysky s větším průměrem. Z prvního pohledu je patrné, že drsnost řezné hrany R_a bez fólie je až o 1 mikrometr vyšší v porovnání se vzorky s fólií. Vysvětlení této skutečnosti pravděpodobně spočívá v typu proudění řezného plynu. Je možné, že fólie umístěná na spodní straně řezu vytváří další „trysku“, jež způsobuje prodloužení dráhy laminárně proudícího plynu a zmenšuje tak drsnost řezu.

Konečným zhodnocením všech zmiňovaných parametrů a jejich vzájemnou kombinací bylo rozhodnuto, že jediné použitelné podmínky pro řezání daného materiálu byly nastaveny u vzorku s označením 25. Zde byl splněn požadavek na minimální oblast spálené barvy a téměř

žádné otřepy. Mírně vyšší drsnost tohoto kusu nehraje žádnou roli, protože bez problémů splňuje požadavky zapsané na výkrese. Paradoxem nejlepšího vzorku je právě nejmenší velikost oblasti spálené barvy, jelikož vypočítané vnesené teplo (tab. 12) je více než čtyřnásobně vyšší než u ostatních vzorků.

Z tohoto poznatku, jež plyne z nízké řezné rychlosti, vychází i problémy ekonomické. V důsledku vyšší ceny laserového řezání oproti vodnímu paprsku výrazně vzrůstají náklady na vyhotovení jednoho kusu. V rámci roční produkce 6 000 ks potom laserové řezání daného dílce vychází o 556 050 Kč draž než řezání vodním paprskem (vzorec 11.6). Tento fakt je z části způsoben i nadhodnocením laserového řezání firmou AQUAdem, s.r.o., protože i při propočtech s nejvyšší možnou řeznou rychlostí nebylo dosaženo nižší ceny než na vodním paprsku, což je značně neobvyklé.

Optimalizace laserového řezání tedy dospěla k závěru, kdy se podařily najít nejlepší řezné podmínky pro zhotovování dveří vlakových karoserií, které odpovídají požadavkům odběratele a není nutné je následně nijak upravovat. Zmiňované podmínky ovšem nejsou efektivním řešením z hlediska ekonomiky procesu, jelikož nedochází ani k časové, ani k finanční úspoře. Laserové řezání z těchto důvodů může být využito v případě poruchy nebo odstávky vodního paprsku, ale nikoliv ke zhotovování celé produkce.

13. ZÁVĚRY

Diplomová práce byla zpracována ve spolupráci s firmou AQUAdem, s.r.o. a jejím hlavním cílem byla optimalizace laserového řezání hliníkového plechu se speciální povrchovou úpravou. Pro řezání daného materiálu byl v minulosti využíván vysokotlaký vodní paprsek, jehož principem a dosaženou kvalitou řezu pro konkrétní aplikaci se část práce také zabývá.

Úvod je věnován obecnému rozboru, konstrukci a historii použitých nekonvenčních technologií. Nemalá část se zabývá rozdělením jednotlivých principů řezání, jejich popisem a vhodností použití pro různé aplikace. Součástí je také porovnání těchto způsobů řezání v závislosti na různých technologických aspektech. Navazující část se zaměřuje na definici a vysvětlení pojmů používaných při měření drsnosti povrchu. Dále specifikuje způsoby měření a podrobněji se věnuje metodě použité v praktické části diplomové práce.

Poslední obecnou část práce tvoří kapitola rozdělení hliníkových slitin, v níž jsou obsaženy základní informace o tomto materiálu získané z normy ČSN EN 573 – 3. Jedná se především o chemické specifikace a rozdíly v použití jednotlivých slitin.

Druhou polovinu práce tvoří stěžejní kapitoly, které obsahují veškeré poznatky, jež byly využity při optimalizaci a následném vyhodnocení laserového řezání povlakovaného hliníkového plechu. Jsou zde detailně popsány použité stroje a přístroje, obráběný materiál, metodika experimentu i výsledky měření. Součástí praktické části bylo taktéž technicko – ekonomické zhodnocení, jež bylo vypracováno pro vzorek zhotovený vodním paprskem a pro jediný vyhovující vzorek z hlediska kvality řezu, vyhotovený na laserovém řezném centru.

Výsledek praktické části práce poukazuje na fakt, že problémy v podobě vznikajících otřepů a výrazné oblasti spálené barvy jsou způsobeny nalepenou ochrannou fólií. Klasicky používaná metoda gravírování fólie před samotným řezáním zde nelze použít z důvodu spálení práškové barvy. Jediná možnost eliminace zmiňovaných problémů je proto výrazné snížení rychlosti řezání, což negativně ovlivňuje ekonomiku procesu.

Hlavním závěrem diplomové práce tedy bylo zjištění, že laserové řezání zadaného kusu z aktuálně dodávaného materiálu je pro danou firmu ekonomicky nevýhodné. Technologickým doporučením je ponechat stávající výrobu na strojích využívajících vysokotlaký vodní paprsek. Popřípadě se pokusit dohodnout s producentem plechu o náhradu použité ochranné fólie za fólii, která se běžně využívá pro laserové řezání a neměla by tedy výsledný řez tolik ovlivňovat. Celkové zhodnocení, včetně všech aspektů vedoucích k tomuto závěru je popsáno v kapitole 12. Zhodnocení experimentu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ [9]

1. POKORÁK, Milan. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. 49s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
2. Abrasive waterjet cutting: Application and Capability. *AccuStream* [online]. ©2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.accustream.com/pdf/waterjet-cutting-white-papers.pdf>
3. Abrasive Waterjet Nozzles. *Zhuzhou Jielong Non-ferrous Metal Technology CO.,LTD* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.china-wumo.com/pro_info.asp?id=77
4. AMADA AMERICA, Inc. *Cutting know-how: for amada lasers*. Los Angeles, 2011.
5. *AQUAdem s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.aquadem.cz/>
6. BÁRTKOVÁ, Denisa. *Nízkocyklová únava hliníkové slitiny EN-AW 7075*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Stanislav Věchet, CSc.
7. BENKO, Bernard. *Laserové technologie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. ISBN 8022714259.
8. BOUDA, Luděk. Řezání vodním paprskem. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2008, č. 7 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
9. *Citace.com* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: www.citace.com
10. ČERBÁK, Jan. Canon EOS 40D. *Digimanie* [online]. 17.12.2007 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/recenze-canon-eos-40d-neunavny-dric/2018>
11. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
12. Drsnost povrchu dle DIN EN ISO - HOMMEL CS s.r.o. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
13. *ESAB* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.esab.cz>
14. High-power subpicosecond harmonically mode-locked Yb:YAG laser with pulse repetition rate up to 240 GHz - Abstract - Laser Physics Letters - IOPscience. *IOPscience* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/1612-202X/10/1/015803/article>
15. HIRANO, Koji a Rémy FABBRO. *Influence of laser wavelength on striation generation during laser cutting of steel*. Drážďany, únor 2014.
16. HLA VATÝ, Ivo a Tomáš ZMYDLENÝ. Hliník a jeho slitiny: Konstrukce z hliníku. *Homen.vsb.cz* [online]. 2010 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/3-3.pdf>

17. Hliník a jeho slitiny. In: *Benjamin* [online]. 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf
18. Hliník a jeho slitiny. In: *Katedra materiálů* [online]. 2010 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/HLINIK_a_jeho_slitiny_podklady.ppt
19. Hliník. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>
20. Hliníkové plechy a pásy. *ALFUN a.s.* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/sortiment/hlinik/plechy-a-pasy>
21. *Hliníkové profily, ploché hliníkové tyče, trubky - ALUCAD Bohemia, s. r. o.* [online]. 2010 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.alucad.cz/>
22. HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
23. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 3. část*. 2005, 57 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
24. CHPS S.R.O. *Chps* [online]. 2008 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.chps.cz>
25. INDRA, Jaroslav. *Nekonvenční technologie laserového řezání*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
26. Industrial Waterjet. *Om SWA* [online]. 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.swa.se/page/132/industrial-waterjet.aspx>
27. JANEČKO, Ondřej. *KONTROLA STRUKTURY POVRCHU*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jiří Perníkář, Csc.
28. JELÍNEK, Adam. *Analýza podmínek obrábění hliníku a jeho slitin*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
29. KACHTÍK, Lukáš. *Laser* [online]. 2009 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.lasery.wz.cz/>
30. KAVAN, Petr. *Analýza a využití laseru při obrábění*. Brno, 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18069. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Csc.
31. KMT Waterjet, the birthplace of water jet cutting machines. [online]. 2007 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.kmtwaterjet.com/about-kmt-waterjet.aspx>

32. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (3) - laserové svařování. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 15.05.2012, č. 5 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-3-laserove-svarovani.html>
33. KRAMOLIŠ, Lukáš. *Laserové řezání s podporou vzduchu*. Brno, 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27990. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
34. Laser. *Wikipedie.cz* [online]. 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
35. Laserart. *Laserart* [online]. 2010 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html
36. LOUIS, H, F PUDE, Chr VON RAD a R VERSEMANN. ABRASIVE WATER SUSPENSION JET TECHNOLOGY – FUNDAMENTALS, APPLICATION AND DEVELOPMENTS. *China - Weldnet* [online]. 2009 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.china-weldnet.com/English/information/I-E-363-03.htm>
37. M 300 - Mahr Metrology. *Mahr Metrology* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/index.php?NodeID=13279&ContentID=10575>
38. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. 1. vyd. Košice: Vienaľa, 2000, viii, 275 s. ISBN 8070994304.
39. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser*. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf
40. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf
41. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. *LAO - lasery a optika* [online]. 15.3.2011 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
42. OPOČENSKÁ, Hana. *Produkce součástí z tabulí plechů nekonvenční metodou vodního paprsku*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
43. ORIFICE ASSY, PASER 4, RUBY. *Barton* [online]. 2013 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://store.barton.com/en/waterjet-parts/flow-parts/paser-4/-014-orifice-assy-paser-4-ruby--wf041714>
44. PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.
45. PRAX, Ondřej. *Nekonvenční metoda obrábění vodním paprskem*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

46. PTV JETS. *PTV - vodní paprsek, řezání vodním paprskem* [online]. © 2006 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.ptv.cz/jnp/cz/produkty/vysokotlaka_cerpadla/PTV_22_60_bez_krytaze/index.html
47. Rychlovlaky - Ekologické bydlení. *Zateplení, vytápění, solární elektrárny - Ekologické bydlení* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/tag/rychlovlaky>
48. ŘASA, Jaroslav a Kerečaninová ZUZANA. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *Mmspektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
49. ŘASA, Jaroslav a Kerečaninová ZUZANA. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. *Mmspektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
50. Řezání vodním paprskem. *ELNA Servis, s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.elnaservis.cz/voda.htm>
51. *Řezání vodním paprskem Ostrava - Řežeme vodou* [online]. © 2011 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.rezeme-vodou.cz/>
52. Sicurezza Laser Conoscenza. *LaserTo* [online]. © 2006 - 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://it.laserto.com/laser-safety-knowledge/>
53. SMZ-168 BLED. *Microscopy Solutions by Motic* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.motic.com/As_Ind_stereozoom_SMZ168/product_265.html
54. Speedblast/Garnet. *OXID eShop* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://piskovacky.cz/eshop/Abraziva/Seznam-abraziv/Mineralni-Abraziva/Speedblast-Garnet-Granat-oxid-kremiku-SiO2.html>
55. *Stroje a produkty pro řezání vodou, ultra vysokotlaká čerpadla, HyperJetFlow* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/>
56. Struers - Metalografický lis CitoPress. *Struers - Ensuring Certainty* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?top_id=3&main_id=9&doc_id=817
57. Struers - VÝROBKY - Broušení a leštění - Pokročilé preparační systémy. *Struers - Ensuring Certainty* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?top_id=3&main_id=10&sub_id=300&doc_id=1197
58. Systém pro řezání laserem BySprint Bystronic. *Bystronic Czech Republic s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.bystronic.cz/cs/produkty/Systemy_Rezani_Laserem/BySprint.php
59. Tips for Successful Laser Marking in Job Shops. *Fabricating and Metalworking* [online]. ©2013 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2012/09/tips-for-successful-laser-marking-in-job-shops/>
60. TRUMPF. *Technical information: Laser processing*. Ditzingen, 2007.

61. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvárania*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 383 s. ISBN 80-05-00097-9.
62. *WARDJet Waterjet Cutting Machines and Waterjet Abrasive Recycling* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/>
63. Water Jet Sweden AB. *Water Jet Sweden AB* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.waterjet.se/>
64. WaterJet Machining - Engineer's Handbook. *Mechanical Engineering Design Guide - Engineer's Handbook* [online]. 2004 - 2006 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/waterjet.htm>
65. Who Invented Laser?. *The Gemini Geek* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.thegeminigeek.com/who-invented-laser/>
66. Wiki. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2005 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.laser.zcu.cz/wiki>
67. Yb:YAG Crystals. *Altechna – laser related components and technologies* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.altechna.com/product_details.php?id=863
68. Yb:YAG. *Laser Components* [online]. © 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/divers-optik/laserstaebe_yb-yag.pdf&no_cache=1
69. Yttrium aluminium garnet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Yttrium_aluminium_garnet
70. ZLESÁK, Jakub. *Trendy vývoje laserové technologie*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
71. Značení hliníku a jeho slitin vč. stavů. *Steel supplier and service in steel, stainless steel and aluminium- BE Group* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.begroup.com/cz/BE-Group-Czech-Republic/Produkty/Hlinik-1/znaeni-hliniku-a-jeho-slitin-v-stav/>
72. ZOUHAR, Ondřej. *Řezání vodním paprskem*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	tloušťka řezu	[mm]
A ₅₀	tažnost	[%]
b	skluzová rýha	[-]
c	velikost otřepů	[mm]
CNC	číslicové řízení	[-]
d _v	výrobní dávka	[ks·rok ⁻¹]
f	vzdálenost mezi dvěma body dvou skluzových rýh	[mm]
IR	infračervená spektrální oblast	[-]
l	délka řezu	[mm]
l _n	vyhodnocovací délka	[mm]
l _r	základní délka	[mm]
n	vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy	[mm]
N _{cl}	celkové náklady na kus na laseru	[Kč·ks ⁻¹]
N _{cw}	celkové náklady na kus na vodním paprsku	[Kč·ks ⁻¹]
N _{dl}	celkové náklady na výrobní dávku na laseru	[Kč·rok ⁻¹]
N _{dw}	celkové náklady na výrobní dávku na vodním paprsku	[Kč·rok ⁻¹]
N _m	náklady na materiál	[Kč]
R _a	střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
R _d	rozdíl nákladů na jeden kus	[Kč·ks ⁻¹]
R _k	rozdíl nákladů na výrobní dávku	[Kč·rok ⁻¹]
R _{ku}	špičatost posuzovaného profilu	[μm]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _p	největší výška výstupku profilu	[μm]
R _{p02}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _q	průměrná kvadratická úchylka profilu	[μm]
R _{sk}	šikmost profilu	[μm]
R _{Sm}	průměrná šířka prvků profilu	[μm]
R _v	největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
R _z	největší výška profilu	[μm]
s	tloušťka materiálu	[mm]
s _x	bodový odhad směrodatné odchylky	[-]
UV	ultrafialová oblast záření	[-]
v _c	rychlost řezání	[m·min ⁻¹]
\bar{X}	bodový odhad střední hodnoty	[-]
X _s	šířka prvku profilu	[μm]
Z _p	výška výstupku profilu	[μm]
Z _t	výška prvku profilu	[μm]
Z _v	hloubka prohlubně profilu	[μm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Příklady řezání vodním paprskem a laserem.
- Obr. 2 Výpalek dveří + příklad použití.
- Obr. 3 Theodore Maiman.
- Obr. 4 Princip vzniku stimulované emise.
- Obr. 5 Konstrukce laseru.
- Obr. 6 Zesilování laserového paprsku.
- Obr. 7 Typy záření.
- Obr. 8 Mód.
- Obr. 9 Světelné spektrum.
- Obr. 10 Závislost absorpce na vlnové délce.
- Obr. 11 Závislost absorpce na úhlu dopadu laserového paprsku.
- Obr. 12 Polarizace.
- Obr. 13 Yb: YAG laser.
- Obr. 14 Řezací hlavice.
- Obr. 15 Princip laserového řezání.
- Obr. 16 Maximální rychlost řezání 4kW laserem v závislosti na tloušťce materiálu.
- Obr. 17 Řezná hrana ovlivněná typem použitého řezného plynu.
- Obr. 18 Kritéria hodnocení laserového řezání.
- Obr. 19 Skluzová rýha.
- Obr. 20 Úchylka kolmosti.
- Obr. 21 Dr. Norman Franz.
- Obr. 22 Schéma řezacího zařízení.
- Obr. 23 Vysokotlaké čerpadlo s multiplikátorem.
- Obr. 24 Potrubí.
- Obr. 25 Vodní tryska.
- Obr. 26 Fokusační tryska.
- Obr. 27 Granátové abrazivo.
- Obr. 28 Tryska WJM.
- Obr. 29 Tryska AWJ.
- Obr. 30 Systém přímého vstřikování.
- Obr. 31 Systém nepřímého vstřikování.
- Obr. 32 Systém bočního mísení abraziva.
- Obr. 33 Odchylky kolmosti.
- Obr. 34 Ohyb vodního paprsku.
- Obr. 35 Nerovnosti povrchu.
- Obr. 36 Prvek profilu.
- Obr. 37 Střední aritmetická úchylka profilu.
- Obr. 38 Měření drsnosti.
- Obr. 39 Schéma dotykového měřicího přístroje.
- Obr. 40 NC4030T.
- Obr. 41 Bystronic BySprint Fiber 3015.
- Obr. 42 MarSurf M 300.
- Obr. 43 Sestava pro focení vzorků.
- Obr. 44 Přístroje využití při tvorbě metalografického výbrusu.
- Obr. 45 Mikroskop Motic SMZ 168.
- Obr. 46 Zhotovování vzorků.
- Obr. 47 Vodivé propojení plechu a roštu.
- Obr. 48 Měření drsnosti.

- Obr. 49 Průměrná výška prvků profilu Rz.
- Obr. 50 Velikost otřepů vzorků bez fólie.
- Obr. 51 Velikost otřepů vzorku s fólií umístěnou na horní straně řezu.
- Obr. 52 Velikost otřepů vzorku zhotoveného na vodním paprsku.
- Obr. 53a Velikost otřepů vzorků s fólií umístěnou na spodní straně řezu.
- Obr. 53b Velikost otřepů vzorků s fólií umístěnou na spodní straně řezu – vzorek 30 až 34.
- Obr. 54 Příklad vzorku řezaného bez fólie.
- Obr. 55 Vzorek řezaný s fólií umístěnou na horní straně řezu.
- Obr. 56 Vzorek řezaný vodním paprskem.
- Obr. 57 Vzorky řezané s fólií umístěnou na spodní straně řezu.
- Obr. 58 Vzorky řezané s fólií umístěnou na spodní straně řezu – uzemněný plech.
- Obr. 59 Řez při orientaci fólie na horní straně řezu.
- Obr. 60 Vzorek WaterJet.
- Obr. 61 Vzorek 14.
- Obr. 62 Vzorek 25.

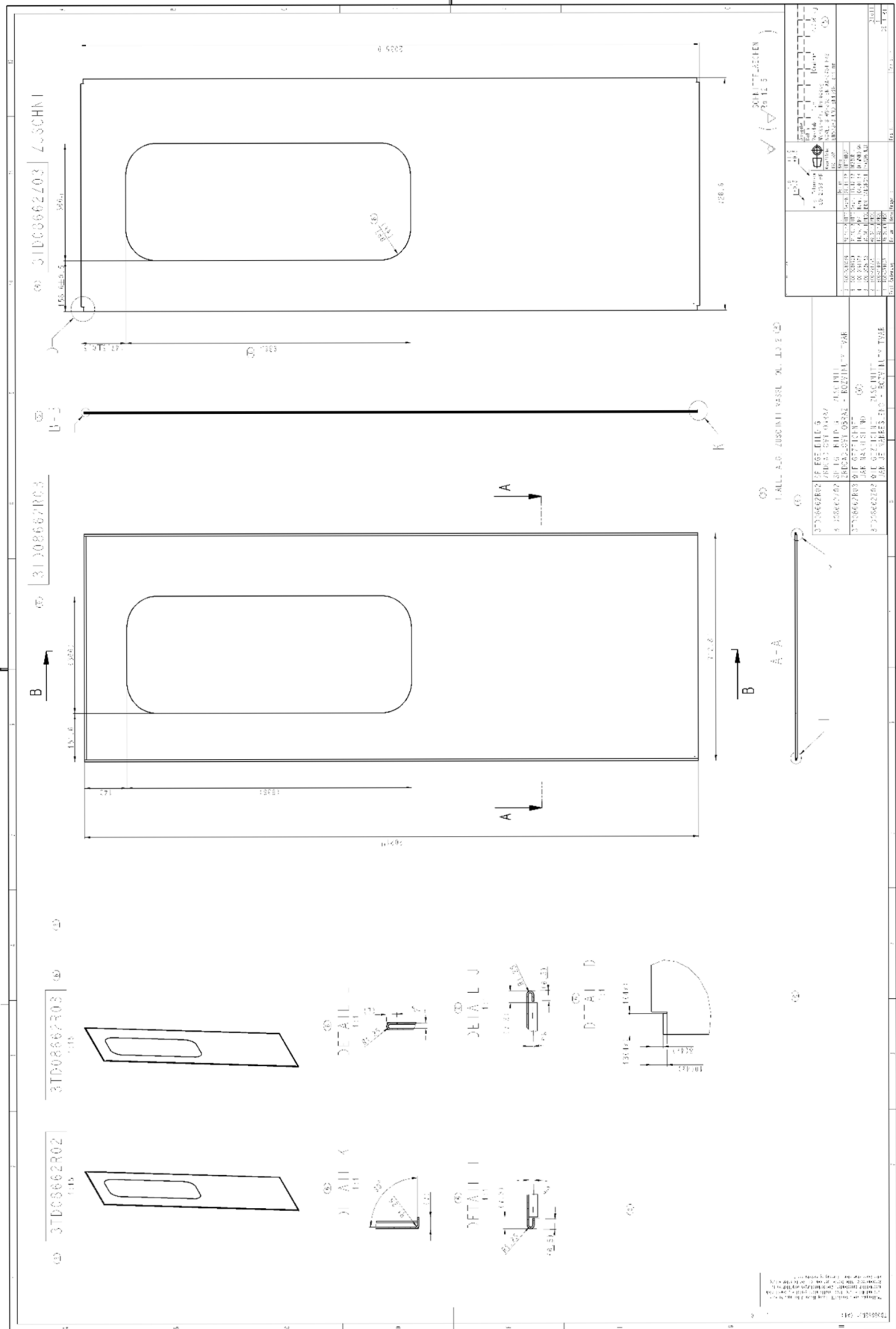
SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Přehled pevnolátkových laserů.
- Tab. 2 Přehled plynových laserů.
- Tab. 3 Přehled kapalinových laserů.
- Tab. 4 Přehled polovodičových laserů.
- Tab. 5 Používané stupně kvality řezu.
- Tab. 6 Vzájemné porovnání řezání laserem a vodním paprskem.
- Tab. 7 Chemické složení.
- Tab. 8 Mechanické vlastnosti.
- Tab. 9 Technické parametry C4030T.
- Tab. 10 Technické parametry Bystronic BySprint Fiber 3015.
- Tab. 11 Technická specifikace MarSurf M 300.
- Tab. 12 Řezné parametry použité při zhotovování vzorků na laserovém řezném centru.
- Tab. 13 Průměrná výška prvků profilu.
- Tab. 14 Parametry drsnosti řezných hran.

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Výkres zhotovovaného dílce
- Příloha 2: Atest povlakovaného hliníkového plechu
- Příloha 3: Drsnost řezné hrany

Příloha 1: Výkres zhotovovaného dílce



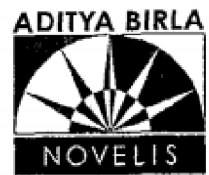
Příloha 2: Atest povlakovaného hliníkového plechu

Novelis Deutschland GmbH
Werk Göttingen

Postfach 12 41
D-37002 Göttingen

Hannoversche Str. 1
D-37075 Göttingen

Tel.: (0551) 304 - 0
Fax.: (0551) 304 - 593



AMARI AUSTRIA GMBH

Abnahmeprüfzeugnis 3.1 EN 10204
Inspection Certificate 3.1 EN 10204
Certificat de Réception 3.1 EN 10204
VK:801 VAZ: 59197

INDUSTRIESTRASSE 54

A-5600 ST. JOHANN I.PONGAU

OESTERREICH

Auftrag Nr. Bestellnummer	Legierung Zustand	Schliff *	Gewicht, netto	Dicke *	Breite *	Länge *
Our Order No. Your Order No.	Alloy Temper	Grind	Weight, net	Gauge	Width	Length
Notre Commande Votre Commande	Alliage Etat	Surface	Poids net	Epaisseur mm	Largeur mm	Longueur mm
801 97301 04 827545.00	EN AW 5754 WG-53S H42	MF	9040kg	1,000	1650,00	0,00

* = Sollwert / theoretical value / valeur théorique

Mechanische Eigenschaften Mechanical Properties Caractéristiques mécaniques

Planungsnummer	Guß-Nr.	Prüfrich- tung	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Dehnung	Zipfel
Production planning no.	Cast no.	Direction of testing	Proof stress	Tensile strength	Elongation	Earing
No. de planning	No de coulé	Sens de mesure	Limite d'élasticité	Résistance à la traction	Allongement	Corne
13600280 001	100 275344	T	$R_{p0,2}$ MPa 184	R_{m} MPa 246	A_{50} % 10,6	%

Chemische Zusammensetzung in Gewichtsprozenten Chemical Composition in percentage per weight Composition chimique en pourcentage de poids

Guß-Nr. / Cast no. / No. de coulé	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
100 275344	0,175	0,298	0,031	0,261	2,811	0,013	0,013	0,013

Farbe / Colour / Couleur

Oberseite / top side / haut: 1723 60 LICHTGRAU
Unterseite / bottom side / dessous: 2932 80 ASTRALSILBER

Dieses Zeugnis wurde mittels EDV erstellt und ist daher ohne Unterschrift.
This certificate has been generated electronically and has therefore not been signed.
Ce certificat a été édité par informatique; pour cette raison sans signature.

Göttingen, 30.10.2013

Novelis Deutschland GmbH
Werk Göttingen
i.A. D. Winkler

Příloha 3: Drsnost řezné hrany (1/2)

EN AW – 5754 H42						
Vzorek	Parametr	Drsnost [μm]			Střední hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
		1. měření	2. měření	3. měření		
1	Ra	1,634	1,336	1,787	1,586	0,2294
	Rz	8,711	7,210	9,158	8,360	1,0204
2	Ra	1,757	1,568	1,998	1,774	0,2155
	Rz	9,717	7,514	8,471	8,567	1,1047
3	Ra	1,464	1,856	1,947	1,756	0,2567
	Rz	7,361	7,835	11,230	8,809	2,1103
4	Ra	2,032	1,816	1,304	1,717	0,3739
	Rz	9,829	7,276	5,958	7,688	1,9681
5	Ra	1,453	1,678	1,865	1,665	0,2063
	Rz	7,201	7,749	8,875	7,942	0,8535
6	Ra	2,122	1,376	1,650	1,716	0,3774
	Rz	9,210	7,523	8,361	8,365	0,8435
7	Ra	1,625	1,485	1,648	1,586	0,0882
	Rz	7,249	6,616	8,092	7,319	0,7405
8	Ra	1,661	1,274	1,380	1,438	0,2000
	Rz	7,459	6,000	6,941	6,800	0,7396
9	Ra	1,560	1,504	1,918	1,661	0,2246
	Rz	7,571	6,616	9,882	8,023	1,6793
10	Ra	1,995	1,566	2,158	1,906	0,3058
	Rz	9,928	7,438	9,408	8,925	1,3135
11	Ra	1,897	1,435	1,444	1,592	0,2642
	Rz	9,613	6,571	7,287	7,824	1,5904
12	Ra	1,930	1,292	0,918	1,380	0,5117
	Rz	10,190	6,514	4,578	7,094	2,8506
13	Ra	6,858	2,741	2,699	4,099	2,3892
	Rz	27,520	12,350	12,200	17,357	8,8020
14	Ra	0,625	1,338	0,585	0,849	0,4237
	Rz	2,361	6,382	2,952	3,898	2,1711
15	Ra	0,904	0,456	0,691	0,684	0,2241
	Rz	3,727	2,067	3,309	3,034	0,8634
16	Ra	0,592	0,891	0,918	0,800	0,1809
	Rz	2,648	4,367	4,495	3,837	1,0314
17	Ra	1,012	0,882	1,112	1,002	0,1153
	Rz	4,440	4,201	5,136	4,592	0,4858

Příloha 3: Drsnost řezné hrany (2/2)

EN AW – 5754 H42						
Vzorek	Parametr	Drsnost [μm]			Střední hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
		1. měření	2. měření	3. měření		
18	Ra	1,180	0,808	0,899	0,962	0,1939
	Rz	5,261	4,092	4,088	4,480	0,6761
19	Ra	0,623	0,955	0,853	0,810	0,1701
	Rz	2,452	4,862	4,112	3,809	1,2333
20	Ra	0,649	0,532	0,798	0,660	0,1333
	Rz	3,220	2,860	3,441	3,174	0,2933
21	Ra	0,512	0,684	0,995	0,730	0,2448
	Rz	2,365	3,167	3,444	2,992	0,5604
22	Ra	1,554	0,908	1,219	1,227	0,3231
	Rz	7,852	3,737	5,488	5,692	2,0651
23	Ra	1,525	1,054	1,328	1,302	0,2365
	Rz	7,962	4,144	6,437	6,181	1,9218
24	Ra	0,854	1,428	1,121	1,134	0,2872
	Rz	4,053	6,880	4,877	5,270	1,4539
25	Ra	1,546	1,660	1,900	1,702	0,1807
	Rz	9,842	10,700	11,430	10,657	0,7949
26	Ra	1,872	2,030	2,224	2,042	0,1763
	Rz	11,990	11,310	14,580	12,627	1,7255
27	Ra	1,609	1,440	2,330	1,793	0,4727
	Rz	9,729	8,870	13,520	10,706	2,4743
28	Ra	1,487	1,167	1,524	1,393	0,1963
	Rz	9,711	7,108	9,084	8,634	1,3585
29	Ra	1,879	2,010	1,728	1,872	0,1411
	Rz	10,990	12,060	9,584	10,878	1,2418
30	Ra	1,306	1,565	1,772	1,548	0,2335
	Rz	7,427	9,261	10,330	9,006	1,4682
31	Ra	1,506	1,676	1,964	1,715	0,2315
	Rz	8,795	9,062	11,610	9,822	1,5539
32	Ra	2,284	1,857	2,058	2,066	0,2136
	Rz	13,550	10,860	11,560	11,990	1,3956
33	Ra	1,575	1,714	1,488	1,592	0,1140
	Rz	10,000	10,490	9,944	10,145	0,3004
34	Ra	1,662	1,574	1,532	1,589	0,0665
	Rz	9,679	9,877	8,626	9,394	0,6724
WaterJet	Ra	5,640	5,545	7,297	6,161	0,9852
	Rz	29,650	27,060	36,290	31,000	4,7608