



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ LASEREM

TECHNOLOGY OF LASER CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Strouhal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Lukáš Strouhal
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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:

Technologie obrábění laserem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na technologii obrábění pomocí laseru, která se řadí mezi nekonvenční metody obrábění. Teoretická část práce se bude zabývat charakteristikou technologie laserového obrábění. Praktická část bude zaměřena na výrobu zkušebních vzorků a rozbořem jejich obrobených povrchů (defektů). Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat a celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

- Teoretická část – charakteristika nekonvenčních metod obrábění.
- Charakteristika technologie obrábění laserem.
- Praktická část – příprava testovacích vzorků, analýza textur povrchů.
- Analýza, zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KUBÁTOVÁ, J., LUKEŠ, I. Laserové technologie opracování kovových materiálů. 1988. 36 s. ISSN 0322-8525.

SOCHOR, V. Lasery a koherentní svazky. 1.vyd Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1990. 196 s. ISBN 80-200-354-1.

BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

BENKO, B., FOREDEREK, P., KOSEČEK, M., BIELAK, R. I. Laserové technológie. 1.vyd., Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859. ISBN 80-227-1425-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá technologií obrábění laserem a jeho využití ve strojním průmyslu. V první části práce je popsán princip vzniku laserového paprsku, rozdělení a aplikace laserů v průmyslu. Experimentální část je zaměřená na řezání obrobku na laseru a vodním paprsku ve firmě SMR Plus s.r.o., přípravě vzorků a zkoumání struktury obrobku. Na závěr jsou povrchy porovnány s obrobky z vodního paprsku.

Klíčová slova

Laser, paprsek, vodní paprsek, řezání, obrábění

ABSTRACT

The master's thesis deals with laser cutting technology and application in the industry. The first part of the thesis describes principle of laser beam creation, division and application of lasers in industry. The Experimental part is focused on cutting the workpiece using a laser and water jet in company named SMR Plus s.r.o., sample preparation and examining the structure of workpiece. Surface structures are compared with workpieces from water jet at the end of thesis.

Key words

Laser, beam, water jet, cutting, machining

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STROUHAL, Lukáš. *Technologie obrábění laserem* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124954>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 64 s. 7 příloh. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Technologie obrábění laserem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23.6.2020

Datum

Bc. Lukáš Strouhal

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za připomínky a cenné rady týkající se zpracování diplomové práce, firmě SMR Plus s.r.o. za poskytnutí obráběcích laserů a pomoc s přípravou vzorků. Také děkuji laboratoři Katedry strojírenství Univerzity obrany v Brně za ochotu a vyhodnocení vzorků. Na závěr bych rád poděkoval rodičům, celé své rodině a přítelkyni za veškerou podporu v průběhu studia.

OBSAH	
ABSTRAKT, BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	8
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	9
1.1 Rozdělení metod	9
1.1.1 Řezání paprskem plazmatu	10
1.1.1 Chemické obrábění.....	11
1.1.2 Řezání vodním paprskem	12
2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE	14
2.1 Princip laseru	14
2.2 Konstrukce laserů	17
2.3 Kvalita laserového svazku.....	18
2.4 Rozdělení laserů	19
2.4.1 CO ₂ lasery.....	19
2.4.2 Pevnolátkové lasery.....	20
2.4.3 Diodové lasery	22
2.5 Využití laserů v průmyslu	23
2.5.1 Řezání laserem.....	23
2.5.2 Svařování laserem.....	25
2.5.3 Vrtání laserem	26
2.5.4 Značení laserem	27
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	29
3.1 Použité obráběcí stroje	29
3.1.1 Laser TruLaser 5030.....	29
3.1.2 Vodní paprsek FLOW Mach 3020b.....	31
3.2 Příprava vzorků k obrábění	32
3.3 Měření vzorků	36
3.3.1 Měření chemického složení	36
3.3.2 Měření geometrických parametrů experimentálních vzorků.....	38
3.3.3 Obrazová analýza textury povrchu řezů.....	43
3.3.4 Měření textury povrchu řezné plochy	46
3.3.5 Hodnocení textury povrchu	50
ZÁVĚR	52
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
SEZNAM PŘÍLOH	58

ÚVOD

Slovo laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) pochází z angličtiny a lze ho přeložit jako zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Laicky lze říci, že pracuje na principu přeměny světelné energie na tepelnou. Lasery jsou přístroje fungující na principech kvantové mechaniky, které generují záření výjimečných vlastností.

Za počátek vzniku laseru lze považovat objev stimulované emise, na níž jsou lasery založeny. Jev stimulované emise byl objeven v roce 1917 Albertem Einsteinem. První laser byl sestaven Theodorem Mainmanem, který vyřešil problém s aktivním prostředím. Nejdůležitější bylo udržet světlo dostatečně dlouho, tak aby se mohlo zesílit. Tím sestrojil první rezonátor a v roce 1960 sestrojil první laser [1].

V následujících letech došlo k objevům dalších druhů laserů s různými druhy aktivních prostředí, způsoby buzení a výkony. Postupně se ukázalo, že laser lze využít v mnoha oborech. První aplikace laseru byla v oboru lékařství, a to při operaci oka už v roce 1964 [1].

Velkého rozmachu v průmyslu se dočkal až v 90. letech, kdy výrobní proces umožňoval velké přesnosti výroby o velkých sériích [1].

Cílem diplomové práce je obeznámení s metodou laserového obrábění (obr. 1), jeho principech a využití laserů ve strojírenském průmyslu. Experimentální část je zaměřená na srovnání technologie laserového řezání s řezáním pomocí vodního paprsku.

Vyrobené vzorky byly zkoumány z pohledu chemického složení a porovnány s dokumentem kontroly od výrobce. Součástí práce je měření geometrických parametrů, obrazová analýza a měření textury povrchu řezné plochy.



Obr. 1 Řezání laserem [2].

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění neboli také fyzikální technologie jsou založeny na úběru materiálu tepelnými, chemickými, mechanickými (abrazivem) principy, ale také jejich vzájemnými kombinacemi. Při tomto typu obrábění ve většině případů nedochází k přímému styku nástroje s materiálem a nevznikají klasické třísky jako při konvenčním obrábění. Nástroje bývají zastoupeny tryskou, drátkem, elektrodou apod. Ve většině případů se jedná o bezsilové obrábění materiálu, kdy nástroje produkují formu energie, která vyvolává obrušování nebo dělení materiálu. Primárně se používají tam, kde z hlediska technického nebo ekonomického nelze použít konvenční metody, zpravidla při dělení vysoce pevných materiálů. Dnes jsme díky zdokonaleným technologiím schopni obrábět s přesností 1 μm [3, 4, 5, 6].

Důvodem vzniku nekonvenčních metod je jejich široký rozsah parametrů, jak z hlediska technologických podmínek, tak i s ohledem na jejich výstupy příslušných procesů. Hlavní charakteristiku tvoří [3, 5, 6].:

- rychlost, možnosti a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběných materiálů,
- možnost provádění složitých technologických operací, mezi které patří výroba děr se zakřivenou osou, také obrábění děr složitých tvarů nebo tvarových dutin v materiálech s vysokými hodnotami mechanických vlastností,
- schopnost plné mechanizace a automatizace a využití systému CAD/CAM,
- výroba přesných miniaturních součástí (např. vyšetřovací sondy v medicíně, či řídicí a regulační technice).

1.1 Rozdělení metod

Podle převládajících účinků odebírání materiálu lze metody rozdělit do několika skupin (viz tab. 1).

Tab. 1 Rozdělení nekonvenčních metod [3, 6].

Metoda úběru	Typ zařízení	Nástroj	Materiály
Tepelným účinkem	Paprskem plazmy	Paprsek plazmatu	Pouze kovy
	Paprskem laseru	Paprsek laseru	Všechny, krom materiálů s vysokou světelnou odrazivostí
	Paprskem elektronů	Paprskem urychlených elektronů	Těžkoobrobitelné materiály (žárovzdorné a austenitické oceli, slitiny hliníku apod.)
	Elektroerozivní obrábění	Elektrickým výbojem	Tvrdé materiály
Elektrochemickým či chemickým účinkem	Elektrochemické obrábění	Reakce anody a katody v elektrolytu	Pouze vodivé materiály
	Chemické obrábění	Chemická reakce kyseliny	Hliník, měď, titan, mosaz a konstrukční uhlíkové oceli
Mechanickým účinkem	Ultrazvukové obrábění	Kmitání abrazivních zrn	Tvrdé a křehké materiály (sklo, křemík, keramika apod.)
	Paprskem vody	Paprsek vody	Všechny

Pro tyto metody obrábění jsou z pravidla využívány CNC řídicí systémy, které zřetelně rozšiřují jejich aplikační oblast. Stroje jsou standardně řízeny ve třech nebo v šesti osách (např. řezání vodním paprskem). Také je vždy nutné dodržet pár základních pravidel pro volbu CNC stolu, a to aby splňovaly požadavky kladené na danou metodu. Stoly při obrábění vodním paprskem musí vykazovat odolnost vůči prachu a vodě. Zařízení pro obrábění paprskem laseru musí zajišťovat ochrannou atmosféru a odolnost vůči vznikajícím plynům [3, 5, 6].

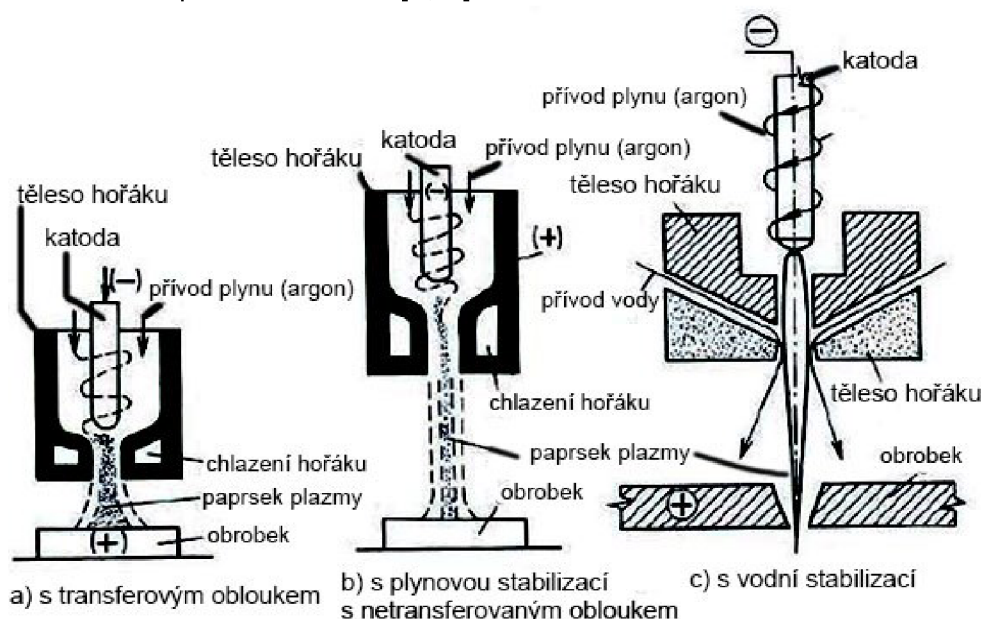
1.1.1 Řezání paprskem plazmatu

Plazma – je definována jako elektricky vodivý stav plynu (také ionizovaný plyn), který vzniká při elektrickém výboji mezi katodou a anodou. Původní stejnorodý plyn se změní na směs kladných a záporných iontů, fotonů a dalších částic. Principem obrábění paprskem plazmatu, nebo také paprskem iontů, je ohřev či roztavení materiálu obrobku za velmi vysokých teplot – převážně nad 10 000 °C dosahujících až 30 000 °C [3, 5, 6, 7, 8, 9].

Podstatou metody je vznik vysoké teploty. Vysoká teplota vzniká rozkladem molekul plynu při průchodu elektrickým obloukem, který vzniká mezi katodou a anodou (obr. 2). Katoda je vyrobena z netavicího wolframu a anoda je opracovávaný materiál či těleso hořáku. Úzký paprsek plazmy o průměru přibližně 1 mm vychází vysokou rychlostí z hořáku a taví materiál součásti. Roztavený materiál je z místa řezu vyfukován pomocí asistenčního plynu [3, 5, 6, 7, 8, 9].

Pracovní zařízení se skládá z:

- plazmového hořáku,
- zdroje elektrického proudu,
- řídicí jednotky,
- zařízení pro manipulaci, mezi něž patří souřadnicový pracovní stůl, manipulátor či robot [8, 9].



Obr. 2 Schéma zařízení pro obrábění paprskem plazmatu – plazmové hořáky [9].

Technologie řezání paprskem plazmatu se nejčastěji používá pro řezání a dělení ocelových materiálů, ale i pro svařování, navařování a stříkání vrstev materiálů požadovaných vlastností na strojní součásti [3, 5, 8, 9].

Řezání plazmatem nedosahuje příliš velké přesnosti a přesnost je srovnatelná s hrubovacími operacemi. Všeobecně záleží na pracovních podmínkách, díky kterým lze dosáhnout dobré jakosti stěn a bez otřepů na spodní straně řezu. Maximální tloušťka řezaného materiálu je přibližně 40 mm a šířka řezné hrany se pohybuje od 1 do 4 mm. Hrany řezné spáry bývají zaoblené a stěny šikmé [3, 5, 8, 9].

Mezi výhody patří velmi rychlý způsob řezání silných plechů a jiných materiálů (hliník, mosaz, měď, korozivzdorné oceli a další), možnost provozu jednoho nebo více hořáků, vyšší řezná rychlosti oproti plamenu, plně automatizovaný proces (viz obr. 3) a méně nákladnou technologii oproti řezání laserem. Nevýhodou jsou velké tepelně ovlivněné oblasti, horší kvalita řezu a opracování než u laserů [3, 5, 6, 7, 8, 9].

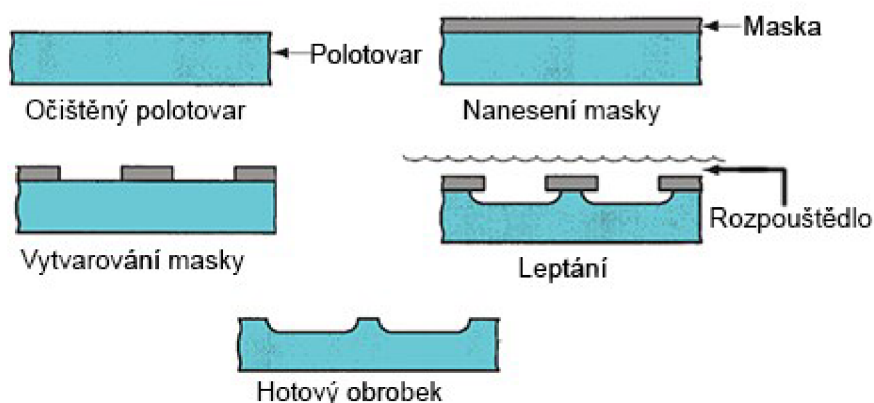


Obr. 3 Řezání paprskem plazmatu [10].

1.1.1 Chemické obrábění

Základem technologie je řízené odleptávání vrstev materiálu o tloušťce od setin mm do několika mm z povrchu obrobku. Probíhá pomocí chemické reakce mezi povrchem obrobku a reaktivního prostředí lázně, ve které je obrobek ponořen (obr. 4) [3, 5, 6, 8, 11, 12, 13].

Chemické obrábění se používá pro leptání a termické odstraňování otřepů.



Obr. 4 Jednotlivé kroky chemického obrábění [8].

Leptání je řízený úběr vrstvy materiálu z povrchu výrobku. K úběru dochází pomocí chemické reakce mezi nástrojem, zpravidla se jedná o chemickou látku jako je kyselina nebo hydroxid, a povrchem obrobku. Místa, která nemají být obrobena, je nutno chránit speciálním povlakem – jedná se o masku složenou z pryskyřice nebo speciálního laku, která je aplikována ve více vrstvách do tloušťky až 2 mm. Leptání je vhodné pro použití na materiálech, jako jsou hliník a jeho slitiny, konstrukční uhlíková ocel, měď, titan nebo mosaz. Metoda je bezsilová a tudíž nedochází k deformaci výrobků [3, 5, 6, 8, 11, 12, 13].

Používá se při výrobě mělkých (několik setin mm) a tvarově složitých reliéfů, při úběru velkých ploch do malých tlouštěk a složitých tvarů (např. leteckých konstrukcí nebo potahy křidel apod.) nebo výrobě děr do tenkostěnných trubek či fólií [3, 5, 6, 8, 11, 12, 13].

Ve všech částech průmyslu představuje tvorba otřepů problém, vznikající primárně při vrtání hlubokých děr. V tomto případě se otřepy tvoří na vstupních, ale i výstupních hranách otvorů výrobků. Otřepy vedou ke snížení kvality výrobku, a proto se používá odstranění otřepů pomocí termické metody. Termické odstraňování otřepů se zařazuje mezi chemicko-tepelný proces, který probíhá mezi dvěma látkami – ty tvoří „nástroj“. Samotný proces obrábění probíhá v uzavřené komoře s obrobky. V komoře dojde k zapálení směsi vodíku a kyslíku pomocí elektrické jiskry, přičemž vznikne teplota až 3 500 °C. Výbuchem dojde k rychlému spálení otřepů na hranách výrobku. Dále je nutno výrobek vyprat v tzv. ultrazvukových pračkách [3, 5, 6, 8, 11, 12, 13].

Metodu lze použít na libovolně tvarované a dostatečně hmotné obrobky, dále lze odstraňovat otřepy v dutinách, u kovových či plastových dílů. Metoda se řídí přísnými bezpečnostními předpisy a je nutno brát v potaz, že teplota působí na celý povrch obrobku. Výrobky musí být suché a odmaštěné [3, 5, 6, 8, 11, 12, 13].

1.1.2 Řezání vodním paprskem

Obrábění vodním paprskem je založeno na oddělování materiálu pomocí kinetické energie vysokotlakého a vysokorychlostního vodního paprsku [3, 5, 6, 8, 9, 13].

V dnešní době je možno řezat dvěma způsoby. První metodou je **čistý vodní paprsek** – hydrodynamické obrábění s pracovním tlakem až 690 MPa. Řeže převážně měkké materiály jako jsou pěny, plasty, papíry, izolace, koberce či dřevěné desky. Druhou metodou je **abrazivní vodní paprsek** znázorněný na obr. 5 – podobný čistému paprsku s tím rozdílem, že vzniká přidáváním abraziva do čistého paprsku. Abrazivo se přidává do řezací hlavy pomocí Venturiho efektu. Výsledkem je abrazivní vodní paprsek, který dokáže řezat kovy, keramiku, kámen, sklo či kompozitní materiály. Jako abrazivní materiál se často používají zrna křemičitého písku či granátu. Kombinací těchto dvou metod lze řezat prakticky jakýkoliv materiál, jakéhokoliv tvaru nebo tloušťky [3, 5, 6, 8, 9, 13, 14].



Obr. 5 Schéma abrazivního vodního paprsku firmy Flow [14].

Zařízení funguje na principu [14].:

1. vytvoření tlaku ve vysokotlakém čerpadle, kde je vytvářen proud vody s provozním tlakem až 6 500 barů,
2. přeměny vytvořeného tlaku na rychlost pomocí trysky z drahého kamene, vznikne paprsek tenký jako lidský vlas, který je schopen řezat měkké materiály,
3. použití abraziva, dojde ke zvýšení výkonu 1000krát. Směs vody a abraziva opouští řezací hlavu rychlostí, která je přibližně 4× vyšší než rychlost zvuku.

Výrobní zařízení je zpravidla v rámci jednoho výrobce tzv. komponentní. Jednotlivé komponenty lze libovolně zaměňovat a zařízení konfigurovat dle požadavků výroby a obráběných materiálů. Zařízení pro tvarové řezání se skládá z ultra vysokotlakého systému, který zahrnuje čerpadlo, řezací hlavu a vysokotlaké trubky. Výrobky jsou řezány na pracovním souřadnicovém stole vybaveny záchytnou vanou pro materiál. Pojízdňá hlava je ovládána řídicím systémem, který zahrnuje ovládací software, rozhraní operátora a hnací jednotky [3, 5, 6, 8, 9, 13, 14].

Výhodou technologie je velmi vysoká šetrnost k životnímu prostředí a možnost recyklace abraziva (díky recyklaci je dosahováno až 70% výtěžnosti). Možnost řezat materiály náchylné na teplo, obrobené plochy nejsou tepelně ani silově ovlivněny. Díky úzké řezné spáři je malá ztráta materiálu. Jelikož se jedná o metodu bezsilového působení, není nutno upínat polotovary. Nevýhodou technologie je vysoká hlučnost procesu, kterou lze zmírnit řezáním pod hladinou vody. Při řezání oceli ve vodním prostředí se projevuje náchylnost povrchu ke korozi [3, 5, 6, 8, 9, 13, 14].

2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE

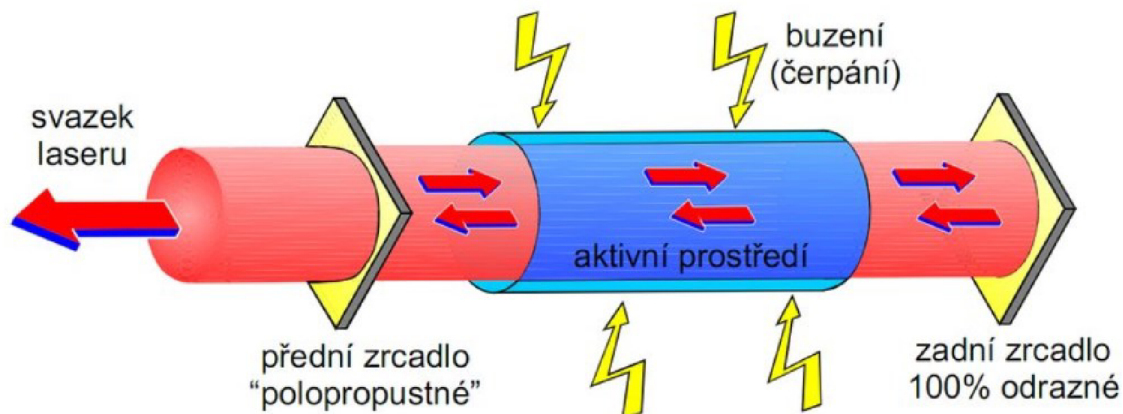
Laser je zkratka z anglického spojení **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – v překladu – zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Laicky lze říci, že pracuje na principu přeměny světelné energie na tepelnou [5, 6, 8, 16, 17, 19, 20].

Laser je definován jako kvantový generátor a zesilovač koherentního optického záření. Všeobecně je laser přístroj zkonstruovaný na principech kvantové mechaniky, který generuje záření zcela unikátních vlastností s nespočítaným množstvím aplikací [6, 8, 15, 16, 19].

V dnešní době se laserové technologie řadí mezi nejmodernější metody a je možné se s nimi setkat na každém kroku. Použití nacházejí ve zbrojním průmyslu (zaměřovače), medicíně (odstraňování očních vad nebo ke kosmetickým účelům), metrologii, výpočetní technice (např. CD mechaniky), ale také ve strojírenském odvětví, kde se využívá ke svařování, dělení materiálu, vrtání, gravírování či značení výrobků, pro tepelné zpracování a povrchové úpravy. Využití také nalézá v reversním inženýrství při výrobě modelů, které se skládají z kovových prášků a jsou laserovou metodou natavovány a spékány [5, 6, 8, 15, 16, 17, 18, 19].

2.1 Princip laseru

Laserový generátor obsahuje tři základní součásti, a to laserové aktivní prostředí, kde probíhá zesilování záření, zdroj čerpání pro nabuzení aktivního prostředí a rezonátor, který vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucím ke vzniku laserových svazků. Vznik laserového paprsku probíhá mezi odrazovými zrcadly znázorněnými na obr. 6 [6, 15, 16, 17, 18, 19].



Obr. 6 Schéma laseru [17].

Hlavní význam pro funkci má proces tzv. stimulované emise, který nastává při vzájemném působení buzeného kvantového systému (atomu, iontu či molekuly) s elektromagnetickým zářením – fotonem s frekvencí ν , která odpovídá energetickému rozdílu $E_2 - E_1$ mezi buzeným a některým níže položeným stavem kvantového systému. Při tomto jevu dojde k přechodu kvantového systému do energeticky chudšího stavu a současně dojde k vyzáření fotonu. Tento zářivý přechod se děje sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižší energií. To popisuje rovnice (1) [15, 16, 17, 18, 19].

$$h \cdot \nu_{12} = E_2 - E_1 \quad (1)$$

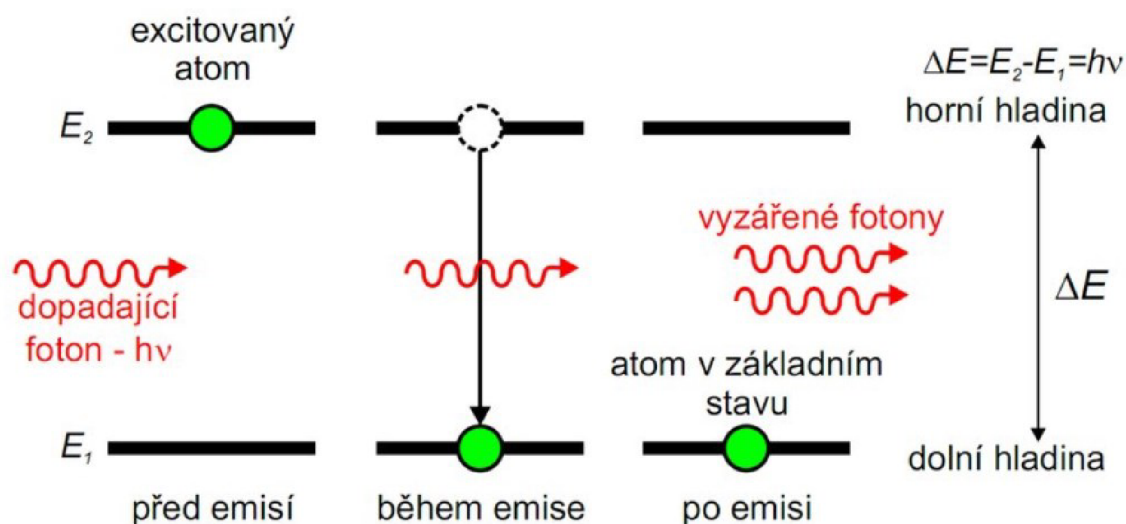
kde: h je Planckova konstanta $6,63 \cdot 10^{-34}$ [J.s],

ν_{12} je frekvence kmitání odpovídající přechodu E_1 až E_2 [Hz],

E_1 je základní, stabilní stav,

E_2 je vybuzený, nestabilní stav [5, 15].

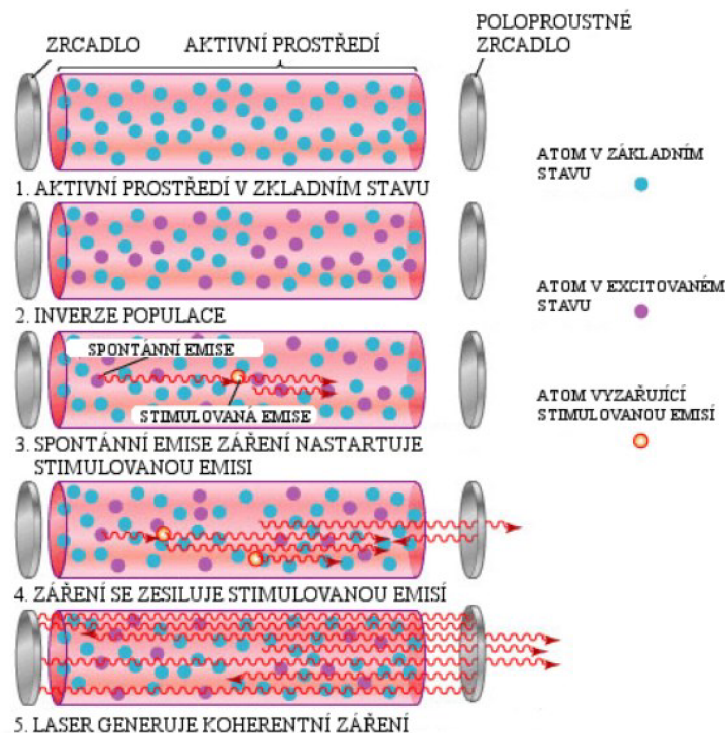
Obecně zdroj budící energie zajistí, že v aktivním prostředí je dostatek kvantových soustav v nabuzeném stavu. Jakmile některá kvantová soustava přejde náhodně samovolnou emisí na nižší hladinu, bude uvolněné kvantum stimulovat i další kvantové soustavy a přinutí je k přechodu na spodní energetickou hladinu a emisi fotonů. Část fotonů se opět absorbuje, ale pokud bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v nabuzeném stavu (stav se nazývá inverze populace) bude se optické záření řetězovou reakcí zesilovat (obr. 7). Teprve v tuto chvíli se může energie dodaná v aktivním prostředí přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí stimulované emise [5, 6, 15, 16, 17, 18, 19].



Obr. 7 Schéma řetězové reakce stimulované emise [].

Stimulovanou emisí předpověděl v roce 1917 Albert Einstein, ale poprvé byla pozorována až v roce 1928 Rudolfem Ladenburgem a Hansem Kopfermannem [19].

Směřovost laserového záření zajišťuje dlouhý válec, který je umístěn uvnitř optického rezonátoru, který zajišťuje odrazení fotonů od zrcadla k zrcadlu, čím jejich počet narůstá a dochází k lavinovému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů (neboli svazku laseru). Po dostatečném zesílení je laserový svazek vyveden z rezonátoru ven. Vznik laserového svazku v rezonátoru je znázorněn na obr. 8 [6, 15, 16, 17, 18, 19].



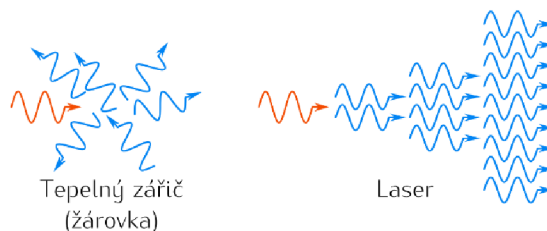
Obr. 8 Schéma lavinového efektu fotonů [16].

Proč je tedy laserový paprsek tak speciální? Je to díky jeho vlastnostem záření (obr. 9), jako jsou monochromaticnost, koherence a směrovost. Vlastnosti dávají paprsku velký rozsah využití v mnoha odvětvích průmyslu [15, 16, 18].

Monochromaticnost – všechny fotony v paprsku mají stejnou vlnovou délku a frekvenci. Vlnová délka je určena energetickými přechody v látkách emitujících paprsek [15, 16, 18].

Koherence záření – fotony laserového zařízení jsou ve fázi a postupují stejným směrem [15, 16, 18].

Fokusace – vysoká koherence a nízká rozbíhavost mu umožní koncentrovat se na velmi malý průměr a tím soustředit vysokou hustotu výkonu do zaměřeného bodu na výrobku [15, 16, 18].



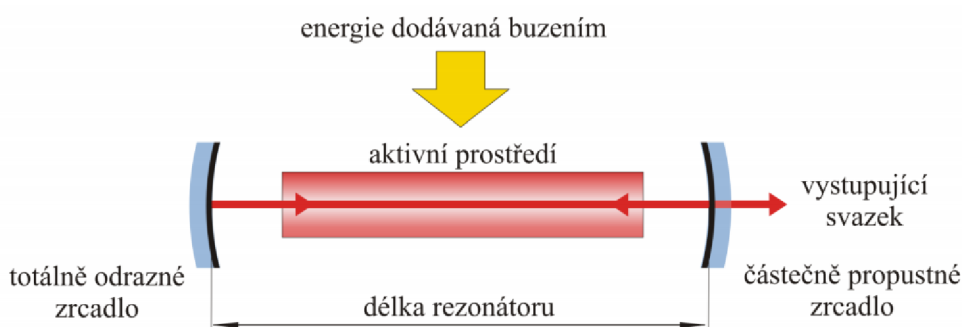
Obr. 9 Srovnání emise záření běžného zdroje a laseru [16].

2.2 Konstrukce laserů

Lasery jsou složeny z již zmiňovaného aktivního prostředí, kde dochází ke stimulované emisi, optického rezonátoru, čerpacího zařízení, vedení svazku, chlazení a řídicího počítače [15, 16, 17, 18].

Čerpací zařízení – než začne aktivní prostředí emitovat laserové světlo je nutno zajistit přebytek částic ve vyšším energetickém stavu, tedy inverzní populaci potřebnou pro stimulované emise. Budící energie, potřebná ke stimulované emisi může být optická, elektrická či chemická [15, 16, 17, 18].

K docílení vyššího počtu stimulovaných přechodů musí být součástí stroje optický rezonátor. Rezonátor je složen ze dvou zrcadel, mezi nimiž se nachází aktivní prostředí (obr. 10). Záření, které vystupuje z aktivního prostředí, je od zrcadla znovu odraženo zpět do aktivního prostředí k další stimulované emisi. Laserové záření zesiluje opakovanými odrazy. Po dosažení správné intenzity opustí paprsek rezonátor částečně propustným zrcadlem [15, 16, 17, 18, 20].



Obr. 10 Optický rezonátor [16].

Opouštějící svazek je dále upravován pomocí čoček a clon, které zvyšují jeho kvalitu a průměr. Systém je nazýván expander a primárně slouží ke snížení divergence svazku. V expanderu dochází během procesu k velkým energetickým ztrátám, jež mají za následek snížení účinnosti laseru [15, 16, 17, 18, 20].

Takto „vyfiltrovaný“ paprsek je dále veden soustavou zrcadel a čoček do laserové hlavice, případně do optického vlákna. Optická vlákna musí být vyrobena z materiálů, které záření nepohlcují. Nejvíce se používá dielektrické sklo nebo leštěné kovy [15, 16, 17, 18, 20].

Vzhledem k velkým energetickým ztrátám při buzení v aktivním prostředí, ztrátám v rezonátoru a při průchodu všemi optickými prvky dochází k ohřevu součástí během provozu laseru. Součástí každého laseru je chladič zařízení s demineralizovanou vodou [15, 16, 17, 18, 20].

Všechny lasery jsou vybaveny řídicím počítačem, který je zabudovaný do opláštění stroje. Obsahuje software pro nastavení volitelných parametrů laseru. Pro složitější geometrie je vhodnější použití 3D CAD programů, jejichž data se importují do řídicího programu laseru [15, 16, 17, 18, 20].

2.3 Kvalita laserového svazku

Kvalita svazku je velmi důležitým parametrem při volbě laseru pro konkrétní aplikace. Laserový paprsek obsahuje tzv. beam waist (pas svazku), kde se paprsek začíná šířit (obr. 11). Průměr paprskového pasu (nejtenčí část paprsku) a úhel divergence (rozbíhavosti) závisí na jeho schopnosti být fokusován. Svazky s malým pasem a nízkou rozbíhavostí mohou být fokusovány do relativně malých míst, při zachování vysoké hloubky ostrosti. Následkem toho je možnost větší vzdálenosti mezi čočkou a obrobkem, což výrobci vyžadují [15, 16, 17, 18, 20].

Menší úhel divergence znamená větší kvalitu paprsku.

K charakteristice kvality paprsku experti používají dvě veličiny – *Beam Parametr Product (BPP)* vyjádřený v rovnici (2) nebo faktor M^2 (*difrakční faktor*) vyjádřený v rovnici (3). Obě veličiny jsou specifikovány v normě DIN EN ISO 11 145 [15, 16].

$$BPP = \omega_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \theta \text{ [mm} \cdot \text{mrad]} \quad (2)$$

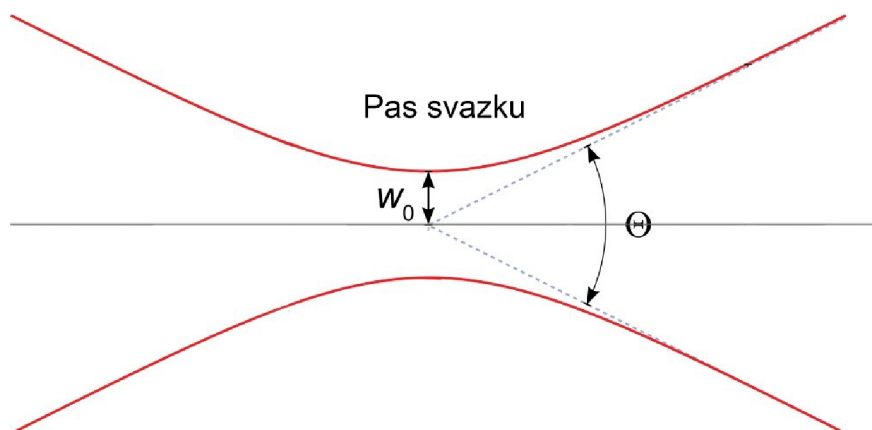
kde: ω_0 [mm] je poloměr pasu svazku,

θ [μ rad] je úhel divergence (rozbíhavost) svazku [15, 16].

Difrakční faktor M^2 popisuje rozsah, v jakém se paprsek odchyluje od optimálního paprsku. Nejlepší hodnota M^2 je ta, která je rovna, či blízká hodnotě 1, pokud se hodnota rovná 1 paprsek se chová jako ideální [15, 16].

$$M_2 = \omega_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \theta \cdot \frac{\pi}{\lambda} [-] \quad (3)$$

kde: λ [nm] je vlnová délka [15, 16].



Obr. 11 Schéma pasu svazku s poloměrem svazku a jeho divergencí [21].

2.4 Rozdělení laserů

Lasery lze rozdělit do mnoha různých tříd, ale jejich základní princip je stejný. Primárně se liší konstrukcí a realizací jednotlivých úkonů. Rozdělení podle typu laseru je vyznačeno v tab. 2 [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].

Tab. 2 Rozdělení laserů [15, 23].

Typ laseru	Aktivní prostředí	Rozdělení, vlnová délka, oblast využití
Plynové	Plyn nebo pára	CO₂ laser: 10 600 nanometrů; strojírenství HeNe laser (helium-neon): 633 nanometrů; měřicí technologie Excimerové lasery: 157-353 nanometrů; měřicí technologie, fotochemie
Pevnolátkové	Krystal nebo sklo dotované příměsí iontů	Rubínový laser: 694 nanometrů; odstranění tetování Nd:YAG laser: 1060 nanometrů; strojírenství Yb:YAG laser: 1030 nanometrů; strojírenství
Polovodičové	Polovodiče	GaAs: 780-980 nanometrů; zábavní elektronika, strojírenství
Kapalinové	Roztoky organických barviv	Korigování vlnové délky od 300 až 1200 nanometrů; spektroskopie

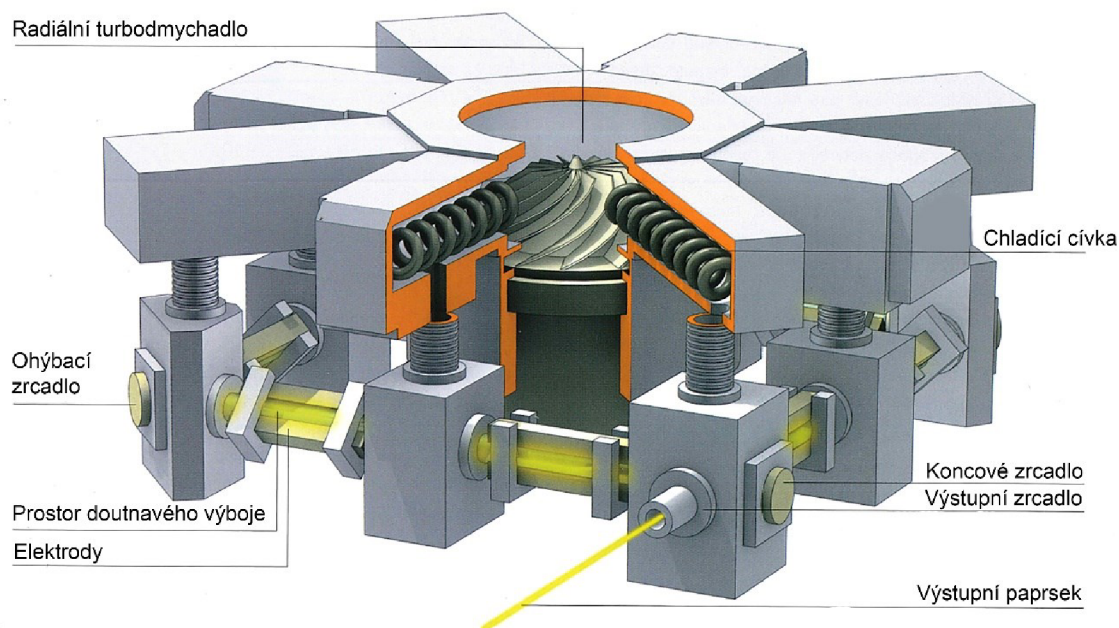
2.4.1 CO₂ lasery

CO₂ lasery jsou řazeny do skupiny plynových laserů. Aktivní prostředí obsahuje CO₂. Díky jejich spolehlivosti a trvanlivosti jako zdroj paprsku si získaly pevné postavení ve zpracování materiálů. Jejich vlnová délka se pohybuje kolem 10,6 μm. Vyznačují se širokým rozsahem výkonu, od méně než 10 W až 20 000 W. Nejčastěji se používají pro dělení a svařování materiálů [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].

První CO₂ laser byl vyvinut v USA v roce 1970 s výkonem 500 W, ale při delším provozu jeho výkon klesal. Vše se změnilo v roce 1980, kdy byl v Německu, s pomocí výzkumného střediska, vyvinut první průmyslový laser s výkonem větším než 1 kW. Od té doby se lasery neustále zdokonalují a zvyšují se i jejich výkony [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].

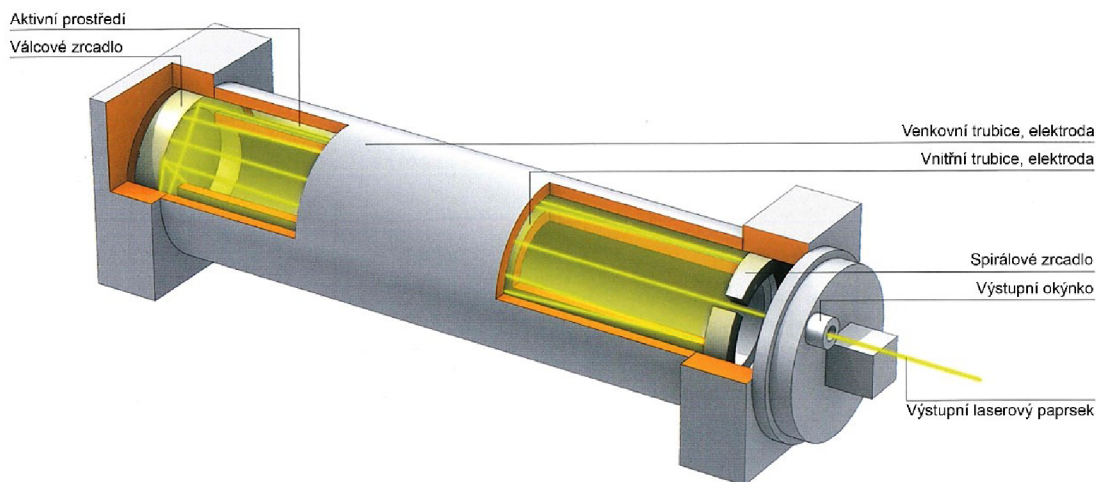
Používají se 2 typy laserů: s prouděním aktivního média nebo s difúzním chlazením [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].

Laser s prouděním aktivního média – zařízení je schopno produkovat paprsek o výkonu až 20 kW. Rezonátor je tvořen skleněnými trubkami, které paprsku udávají směr. Elektrody, které jsou na skleněných trubkách, nabijí plyn bez jakéhokoliv kontaktu, tudíž nedochází k jejich opotřebení. K vytvoření výkonu přibližně 2 kW je potřeba rezonátor dlouhý několik metrů, proto se rezonátory uspořádávají kvadraticky za sebe. Plynulost paprsku zajišťuje soustava zrcadel. K cirkulaci budících plynů dochází pomocí radiálního turbodmychadla a celý systém je chlazen vodou (viz obr. 12) [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].



Obr. 12 Schéma CO₂ laseru s prouděním aktivního média [15].

Nejnovějším typem CO₂ laseru je **difúzně chlazený deskový laser**. U tohoto typu směs plynů neproudí, ale mísí se v integrované láhvi, která je připojena k rezonátoru. Láhev vydrží až 2 roky nepřetržitého provozu. Rezonátor se skládá ze dvou do sebe zasunutých trubic, které jsou ochlazovány vodou a současně fungují jako vysokofrekvenční elektrody. Aktivní plyn proudí v mezeře mezi dvěma trubicemi, celý systém se nazývá Coax laser (obr. 13). Výkon těchto laserů umožňuje pouze dělení materiálů – řezání [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].



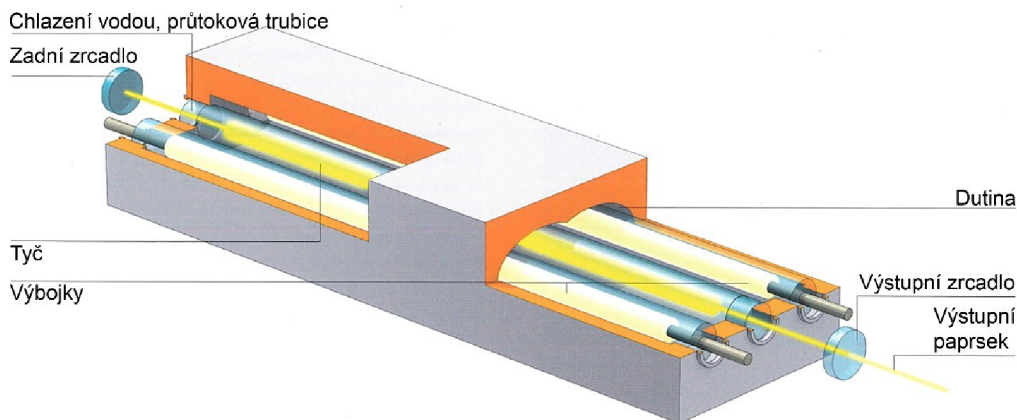
Obr. 13 Schéma Coax laseru [15].

2.4.2 Pevnolátkové lasery

Mezi pevnolátkové lasery se řadí Nd:YAG, vláknový a diskový laser. Tyto lasery mají vlnovou délku $\sim 1 \mu\text{m}$. Aktivní prostředí tvoří matrice YAG krystalu (yttrium aluminium granát), který je dopovaný ionty neodymu (Nd) nebo yterbia (Yb). Hlavním rozdílem je mezi těmito třemi lasery jejich konstrukce aktivního

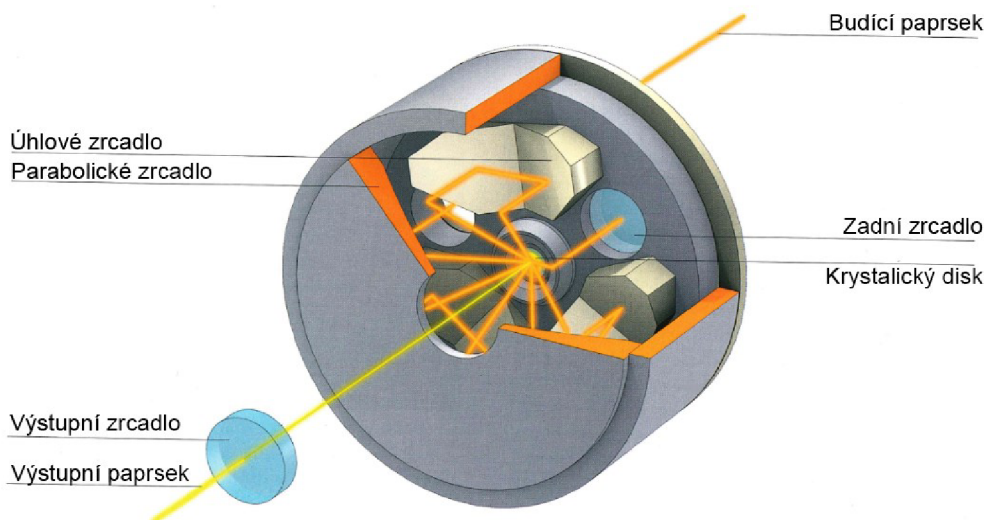
prostředí. Záření u pevnolátkových laserů lze vést optickým vláknem, bez jakékoliv ztráty výkonu a kvality, do místa obrábění [15, 16, 17, 18, 20, 22]

Nejstarším typem laseru je právě **Nd:YAG**. Aktivním prostředím je tyč o průměru přibližně 7 mm a dlouhá 200 mm s výkonem až 6 kW a vlnovou délkou 1,06 μm . Efektivnost laseru je kolem 7 %. Rezonátor je složen ze dvou zrcadel, která jsou umístěna mimo tyče. Aktivní prostředí v tyčích je buzeno výbojkami, které jsou okolo nich. Schéma Nd:YAG laseru je na obr. 14. Během procesu se musí výbojky a krystal ochlazovat pomocí vody – v dnešní době se tyto lasery používají převážně v pulsním režimu pro svařování a vrtání. Nevýhodou jsou vysoké nároky na chlazení, nízká účinnost a krátká životnost výbojek [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].



Obr. 14 Schéma Nd:YAG laser [15].

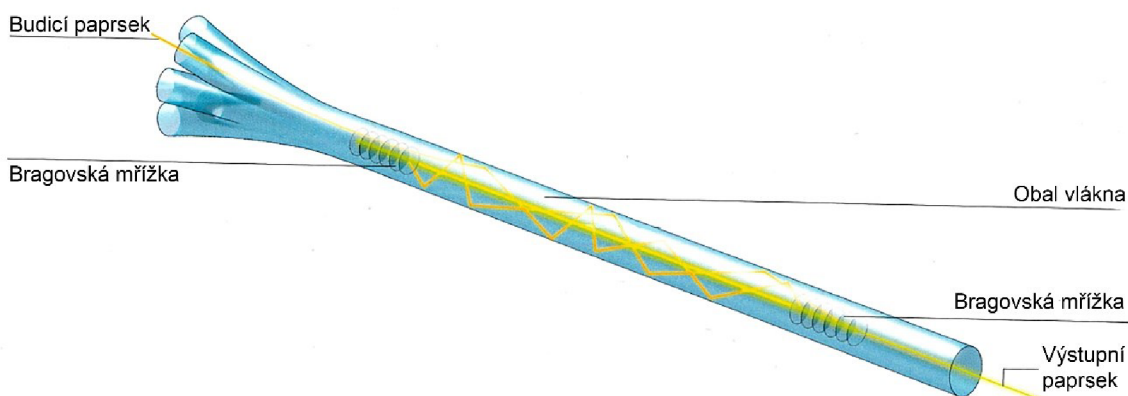
Diskový laser (viz obr. 15) patří mezi moderní technologie a je především vyvíjen firmou Trumpf. Funguje na podobném principu jako Nd:YAG laser, ale aktivní prostředí je tvořeno malým diskem o průměru 15 mm a tloušťce do 1 mm. Výkon laseru je až 16 kW s vlnovou délkou 1,07 μm . Efektivnost laseru je kolem 15 %. Výhodou laseru je rovinný teplotní profil po celém disku, který umožňuje dosáhnout vysokých výkonů s dobrou kvalitou výstupního paprsku, což byl problém u Nd:YAG laserů. Používá se zejména na řezání a svařování kovů [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].



Obr. 15 Schéma diskového laseru [15].

Vláknový laser, také fibre či fiber laser je technologicky nejmodernější typ laseru. Optické vlákno, které je dopované prvkem ytterbia, tvoří aktivní prostředí laseru. Aktivní prostředí je čerpáno pomocí laserových diod. Světlo čerpané z diod generuje další energii, která je následně akumulována a ve formě zesíleného paprsku vychází z vlákna ven. Výstupní paprsek je skládán z mnoha dalších optických vláken, čímž dosahuje mnohem většího výkonu. Paprsek je dále upravován pomocí zrcadel a přiveden až do místa řezu. Řez vláknem laseru je zobrazen na obr. 16 [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].

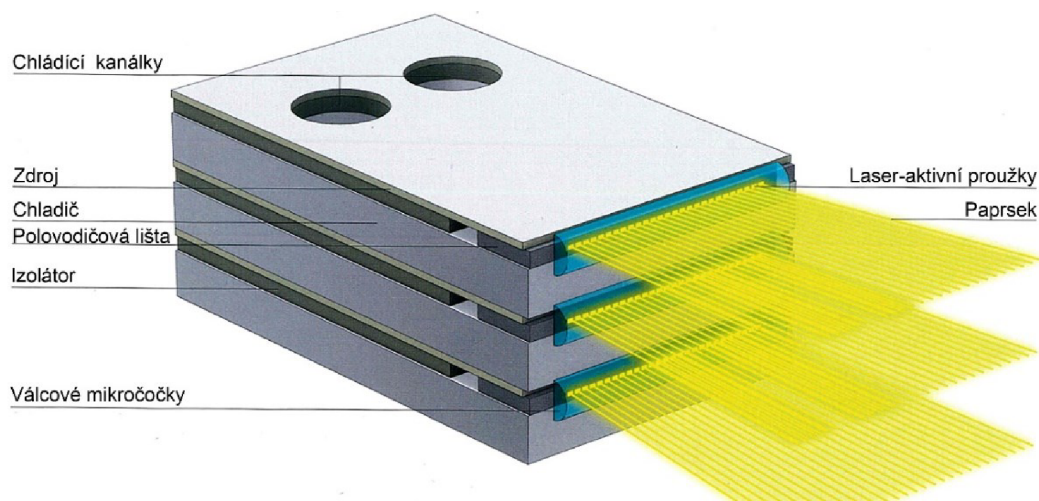
Výhodou laseru je jednoduchost, laser je v podstatě tvořen pomocí optického vlákna. Robustnost a modularita – laser je tvořen tzv. laserovými moduly, které lze navzájem spojovat a díky nim navyšovat výkon laseru (až na 80 kW). Vyznačuje se vysokou účinností 30–35 %, dlouhou životností, vysokou kvalitou svazku, nízkými provozními náklady a téměř nulovou údržbou [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].



Obr. 16 Pohled do vláknového laseru [15].

2.4.3 Diodové lasery

Aktivním prostředím diodových laserů je elektricky čerpaná polovodičová dioda. Diodové lasery mají velké rozpětí výkonů, a to od mW až do kW. Schéma diodového laseru je zobrazeno na obr. 17. Mohou mít malé rozměry a nízký výkon a používají se v CD/DVD přehrávačích nebo v laserových tiskárnách. Lasery s vyšším výkonem se používají pro svařování kovů, plastů nebo kalení. Výhodou je jejich vysoká účinnost. Nevýhodou je nízká kvalita paprsku (s rostoucím výkonem, kvalita paprsku klesá) [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].



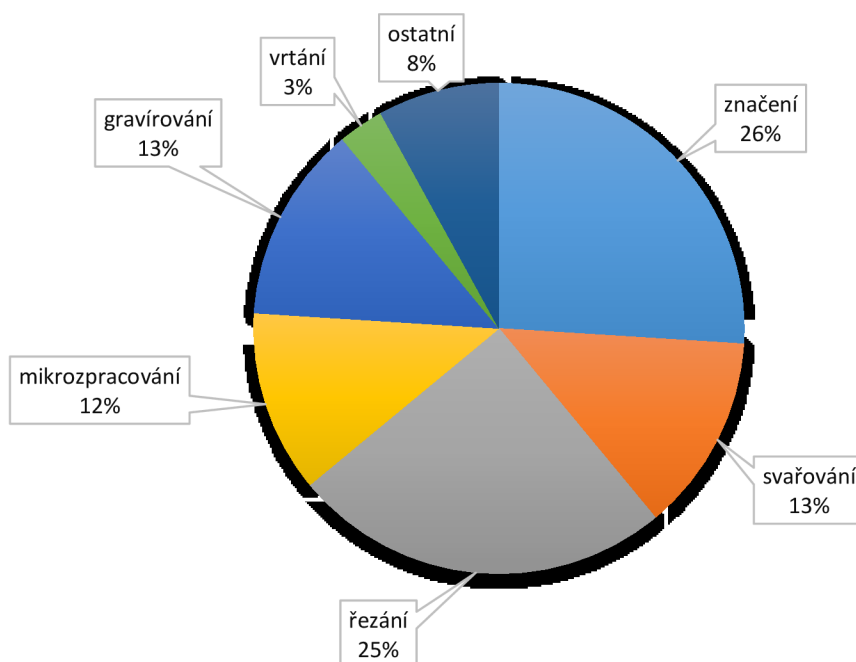
Obr. 17 Vysoce-výkonný diodový laser [15].

2.5 Využití laserů v průmyslu

Laser dnes patří mezi nejmodernější metody obrábění a využívá se ve všech průmyslových odvětvích (viz obr. 18). Jako nástroj se dnes používá v medicíně, technologii, astronomii, geodézii, metrologii, chemii, biologii, energetice atd. [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].

Ve strojírenském průmyslu je především znám při dělení materiálů a značení výrobků. Laser jako takový koresponduje se stále vyššími požadavky na zvyšování kvality a efektivity v průmyslu. Dnes není laser považován jen za špičkovou technologii, ale i za nástroj, který umožňuje dělat práci rychleji a kvalitněji. Výhodou laseru je jeho bezkontaktnost s obrobkem a lze obrábět jakoukoliv tvarově složitější součást s vysokými přesnostmi. I když lasery materiál taví, tepelně ovlivněné oblasti jsou velmi malé. Oproti všem konvenčním metodám disponuje vyšší rychlostí při obrábění, většinou také vyšší kvalitou a eliminuje dokončovací operace na obrobcích [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].

Lasery nacházejí uplatnění v prvotním, ale i finálním stadiu výroby a používají se zejména při dělení materiálů, ke značení, gravírování, vrtání a svařování [15, 16, 17, 18, 20, 22, 23].



Obr. 18 Použití laserů v průmyslu [4].

2.5.1 Řezání laserem

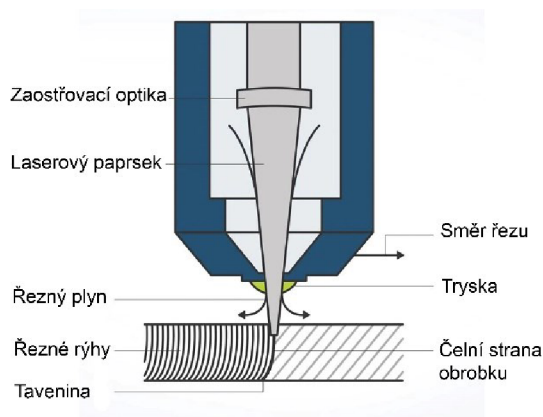
Laserové řezání (obr. 19) označuje proces dělení materiálu, jehož pomocí lze řezat kovové, ale i nekovové materiály s libovolnou tloušťkou materiálu. Základem je paprsek, který je veden, tvarován a sdružen do svazku. Svazek je dále koncentrován na obrobek, materiál se zahřeje natolik, že se roztaví či odpaří (obr. 20). Maximální výkon laseru se přitom soustředí na jeden bod o průměru menším než 0,5 mm. Při nahromadění více tepla, než se může odpařit pomocí vedení tepla, pronikne paprsek skrze obrobek a začíná řezání. Oproti konvenčním metodám paprsek na obrobek nepůsobí žádnou silou a práci vykonává bez dotyku. Nedochozí k opotřebení nástroje či jeho deformaci nebo poškození obrobku [15, 22, 24, 25, 26, 27].

Řezání se dělí na [15, 22, 24, 25, 26, 27]:

- plamenem – materiál je ohřátý na zápalnou teplotu a s přiváděným reaktivním plynem (kyslíkem) shoří při exotermické reakci. V místě řezu vzniká struska, která je odstraňována v průběhu řezu asistenčním plynem. Používá se převážně při řezání kovů,
- tavné – materiál je při řezání roztaven a s pomocí asistenčního plynu odfouknut z místa řezu. Jako řezný plyn se používá dusík nebo argon. Výhodou tavného řezání oproti řezání plamenem je, že řezné hrany jsou bez otřepů a bez oxidů, proto není potřeba žádná dokončovací operace. Používá se převážně při řezání kovů a plastů,
- sublimační – při tomto typu řezání je materiál výhradně odpařován s minimálním tavením. Pára z materiálu vytváří v řezné mezeře vysoký tlak, který taveninu vytlačuje směrem nahoru a dolů. Pracovním plynem je dusík, argon nebo hélium – tento plyn stíní řezné plochy před okolím a zajišťuje tak, že řezné hrany zůstávají bez oxidu. K odpařování je potřeba mnohem více energie než, když se má materiál tavit. Při sublimačním řezání jsou nutné vysokovýkonné lasery a řezání je mnohem pomalejší než u jiných metod, nicméně řezy patří mezi nejkvalitnější. Používá se při dělení tenkých kovových materiálů, keramických materiálů, dřeva, překližek či textilu nebo plastů.



Obr. 19 Řezání laserem [15].



Obr. 20 Proces řezání [26].

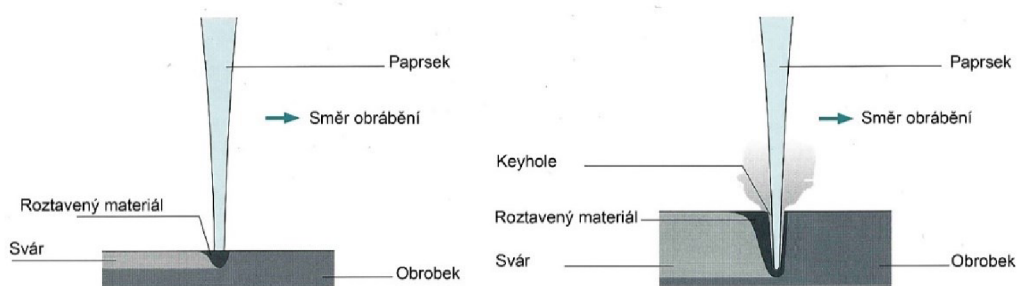
Výhodou laserového řezání je vysoká rozmanitost materiálů – od ocelí, hliníku, ušlechtilých ocelí až po nekovové materiály – plasty, sklo, keramiku nebo dřevo. Pomocí laseru je možné řezat od tloušťky plechů 0,5 mm až po 30 mm a lze řezat i různě tvarované duté profily (příloha 1). Lasery ve většině případů bývají vybaveny různými hlavicemi, které umožňují řezat a zároveň do vyřezané díry vyrobit závit [15, 22, 24, 25, 26, 27].

2.5.2 Svařování laserem

Svařování laserem je výhodnější než použití klasických metod jako je MIG/MAG. Tepelné působení paprsku je pouze lokální a nedochází k tepelnému poškození okolí svařovaného místa. Paprsek dokáže vytvářet velmi jemné a kvalitní sváry a celý proces je řízen pomocí počítače. Lasery svařují materiály s vysokou teplotou tavení, ale i s vysokou tepelnou vodivostí [15, 24, 27].

Existují dva způsoby svařování [15, 24, 27]:

- vedením tepla (obr. 21) – tepelná energie se šíří vedením, sváry jsou široké a ploché,
- hloubkové (obr. 21) – při určité intenzitě tepla pronikne paprsek hluboko do materiálu, ten se roztaví a částečně odpaří, sváry jsou úzké a hluboké.



Obr. 21 Svařování vedením tepla (vlevo) a hloubkové svařování (vpravo) [15].

Výhodou svařování laserem je jejich malá tepelně ovlivněná oblast, sváry jsou úzké a hladké, a proto není potřeba žádná dokončovací operace. Vysoká pevnost svárů. Možnost kombinace s jinými operacemi – ohýbání. Svařování je plně automatické, řízené pomocí počítače s integrovaným robotem (obr. 22) [15, 24, 27].



Obr. 22 Laserové svařování [].

Laser se používá i při pájení či navařování.

Laserové práškové navařování funguje tak, že laser na povrchu vytvoří tavnou lázeň, do které tryska automaticky nanese kovový prášek. Vzniknou spojené svarové housenky, které vytvoří struktury na stávajících základních tělesech [15, 24, 27, 29, 30].

Díky mnohostrannosti patří mezi velmi vyhledávanou metodu v průmyslu. Laserem je možno navařovat díly od velmi malých až po několikátunové. Laserové navařování se využívá ke svařování a navařování forem či k rychlým opravám zlomených nástrojů [15, 24, 27, 29, 30].

2.5.3 Vrtání laserem

Laserové vrtání spočívá v bezdotykovém tvoření otvorů od nejmenších až po větší v různých materiálech. Jedná se o nejzajímavější aplikaci laseru, díky které lze vrtat do jakéhokoliv materiálu pomocí laserového paprsku s přesností až 1 μm a to i pod úhlem [15, 28, 30, 31, 32].

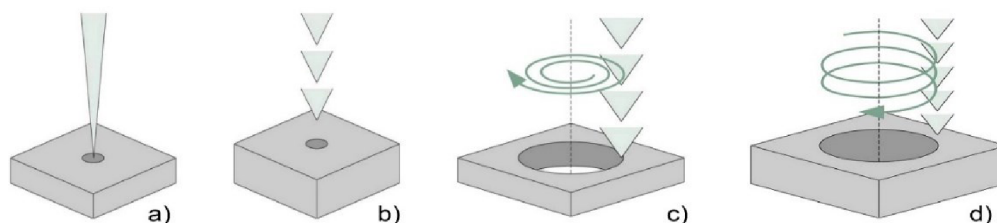
Využívá se krátkých impulzů s vysokou hustotou výkonu. Tímto způsobem je materiál roztaven a odpařuje se (obr. 24). Při odpařování se prudce zvětšuje objem materiálu a tlak sublimačních par vypudí materiál ven. Nejčastěji se používají pulzní, vláknové a Nd:YAG lasery s kratšími vlnovými délkami – z důvodu lepší absorpce v materiálu [15, 28, 30, 31, 32].

V průběhu času se vyvinulo několik základních metod vrtání:

Nárazové vrtání a vrtání impulsy – nejjednodušším případem je vytvoření otvoru jediným impulsem laseru, který má velkou energii. Tímto způsobem lze vyrobit velké množství otvorů v krátkém čase. Oproti nárazovému vrtání, kde otvor vzniká několika impulsy, které trvají kratší dobu a mají menší energii. Nárazové vrtání umožňuje vytvořit mnohem přesnější a hlubší otvory s menšími průměry [15, 28, 30, 31, 32].

Trepnační vrtání – při tomto typu vrtání vzniká otvor rovněž několika impulsy laseru. Nejprve je vyvrtán počáteční otvor pomocí již výše zmíněného nárazového vrtání a následně je otvor zvětšován pohybem laseru nad obrobkem v několika zvětšujících se kruhových drahách. Materiál je přímo vypuzován z obrobku směrem dolů [15, 28, 30, 31, 32].

Spirálové vrtání – u spirálového vrtání nevzniká počáteční otvor. Laser se pohybuje nad obrobkem již při prvních impulsích v dráze kruhového schodiště. Trajektorie je opakována s postupným snižováním ohniska do hloubky materiálu. I když laser pronikne materiálem, lze přidat několik kruhových drah k rozšíření spodní strany a tím i začištění okrajů. Spirálové vrtání se používá při vrtání velkých a hlubokých otvorů o vysoké kvalitě [15, 28, 30, 31, 32].



Obr. 23 Schéma vrtání laserem [15]. a) nárazové b) vrtání impulsy c) trepanační d) spirálové.

Výhodou metody je možnost vrtání velmi malých otvorů (desetiny mm) s vysokou přesností. Vrtání je bezkontaktní, bezprašné a bezhlučné. Obrobek není téměř tepelně namáhán a metodu lze snadno integrovat do výrobní linky a náročnost na údržbu je mnohem nižší než u běžných metod vrtání [32].



Obr. 24 Vrtání pomocí laserové paprsku [15].

2.5.4 Značení laserem

Metoda, bez které se dnešní průmysl neobejde. Metoda nepotřebuje žádný stlačený vzduch či barevné náplně. Hlavními výhodami je nesmazatelnost, bezkontaktnost a minimální tepelné narušení povrchu. Laserové značení lze aplikovat na kovové i nekovové materiály a nejčastěji se používají pevnolátkové lasery (Fiber či Nd:YAG). Rychlost značení se pohybuje až 8 m/s (tj. 450 bodů za sekundu) [15, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

Laserové značení se používá na zubních kartáčcích, klávesách mobilních telefonů, tachometrů, spínačů či řadicích pák v autě, MP3 přehrávačů nebo plechových dílcích. Laserové značení je tak jednou z nejuniverzálnějších metod [15, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

Samotný proces laserového značení spočívá ve vizuální změně povrchu označovaného materiálu. Velmi důležitým aspektem značení je absorpce laserového paprsku – pokud by se paprsek od povrchu odrazil, výrobek by bylo velmi obtížné označit. Pro ideální výsledek značení by měl být paprsek absorbován v několika μm materiálu [15, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

Laserové značení se dělí dle typu vzniku značky do pěti skupin:

Gravírování – při gravírování (i úběru materiálu) se pracuje s krátkými, ale silnými impulsy laseru, což způsobí roztavení vrchní vrstvy, která se odpaří nebo rozpadne. U gravírování dochází k úběru materiálu a v obrobku vzniká prohlubeň (gravura). Gravírovat lze téměř všechny materiály a v případě nutnosti lze vytvořit barevné oxidace, které popis zvýrazňují [15, 33, 34, 35, 37].

Úběr – pod pojmem „úběr“ je myšleno částečné odstranění vrchní vrstvy, která je nanášena na základním materiálu a značně se liší barvou. Materiály pro úběr jsou eloxovaný hliník, výrobky s vrstvou laku nebo speciální fólie pro popisování laserem [15, 33, 34, 35, 37].

Žihání – metoda založená na změně barvy při zahřátí u některých kovů, ale i plastů. Barva je značně ovlivněna teplotou, na kterou je ohřívána. Barevné popisy se tvoří tak, že laserový paprsek zahřeje výrobek v místě, kde má vzniknout označení. Po zahřátí na povrchu vzniknou oxidační vrstvy, které udávají barevný dojem. Oxidační vrstvy nadále neoxidují [15, 33, 34, 35, 37].

Zpěnění – slouží primárně pro zbarvení tmavých plastů na bílo. Zpěnění funguje na principu lokálního natavení místa obrobku, kde má vzniknout značka. V tavenině se vytvoří malé vzduchové bubliny, které zvětší svůj objem. Uzavřené vzduchové bubliny, prohlubně, struktura plastu vytvoří jiný lom světla a tím i vizuální změnu barvy. V těchto případech označení citelně vyčnívá z povrchu [15, 33, 34, 35, 37].

Zbarvení – dojde ke změně barvy obrobku (používá se hlavně u plastů). Materiál se po působení paprsku neodpaří ani nenapění, ale pouze se změní barva – v podstatě laserový paprsek pouze nahřeje určité místo. Některé materiály ztmavnou a některé naopak zesvětlají. Barva vždy záleží na složení plastu [15, 33, 34, 35, 37].



Obr. 25 Příkladů použití značení [15]: 1) gravírování 2) úběr 3) žihání 4) zpěnění 5) zbarvení.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální vzorky byly řezány ve firmě SMR Plus s.r.o. pomocí laseru, jako referenční technologie byla zvolena technologie vodního paprsku. Obráběné vzorky jsou z hliníkové slitiny EN AW 1050A H24 tloušťky 3 mm, z austenitické korozivzdorné oceli AISI 304L (ČSN 41 7249) tloušťky 5 mm, oceli S235 (ČSN 41 1375) tloušťky 10 mm a oceli S355 (ČSN 41 1503) tloušťky 15 mm.

3.1 Použité obráběcí stroje

Experimentální vzorky byly řezány na laseru typu TruLaser 5030 firmy Trumpf a vodním paprsku typu Mach 3020b firmy Flow.

3.1.1 Laser TruLaser 5030

Vzorky byly obráběny na laseru od firmy Trumpf modelovém typu TruLaser 5030 (obr. 26), který je ve firmě SMR Plus s.r.o. využíván primárně k řezání oceli (tlouštěk 1 až 15 mm), hliníkových a korozivzdorných plechů (tlouštěk 0,8 až 5 mm).



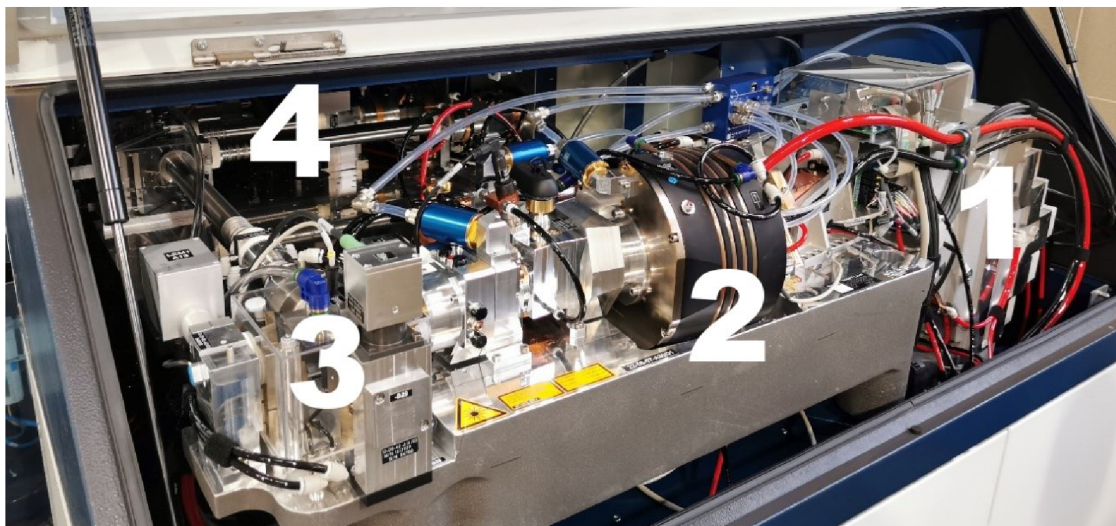
Obr. 26 TruLaser 5030 ve firmě SMR Plus s.r.o.

Tab. 3 Specifikace laseru TruLaser 5030 [39].

Rozměry	Délka	9950 mm
	Šířka	4600 mm
	Výška	2400 mm
Maximální rychlost	300 mm.m ⁻¹	
Pracovní rozsah	Osa x	3000 mm
	Osa y	1500 mm
	Max. hmotnost obrobku	1800 kg
Specifikace	Max. výkon laseru	6000 W
	Max. tloušťka plechu, konstrukční ocel	25 mm
	Max. tloušťka plechu, ušlechtilá ocel	25 mm
	Max. tloušťka plechu, hliník	16 mm

Jedná se o vysoce výkonný pevnolátkový diskový laser s výkonem 6000 W s označením TruDisk 6001 (obr. 27), s konkrétním laserem lze řezat, svařovat a provádět povrchové úpravy kovů [39].

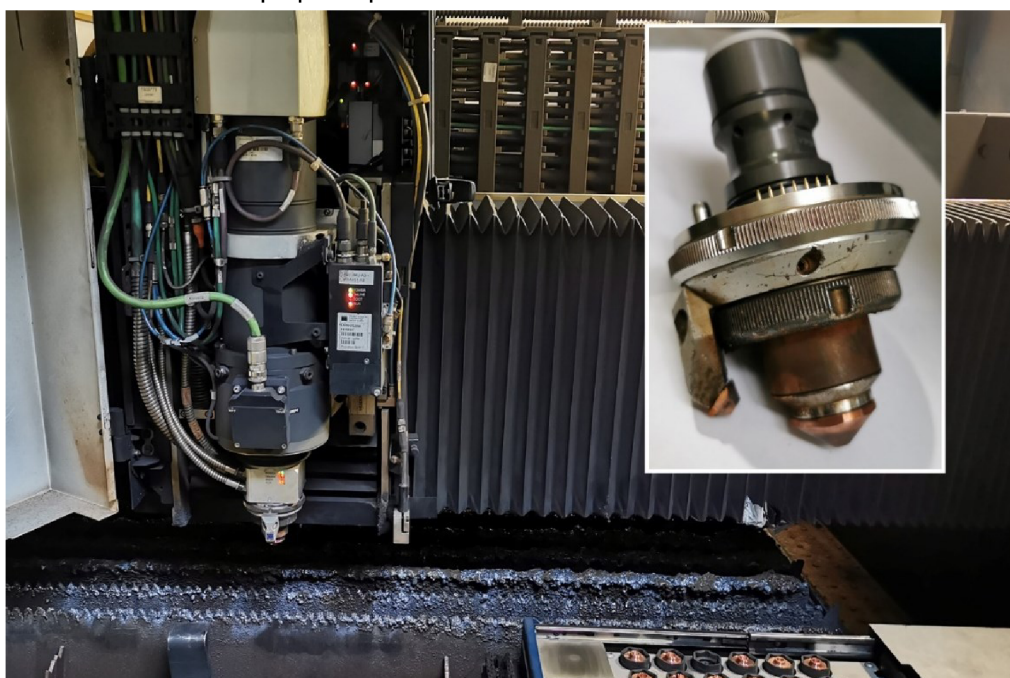
Diskový laser TruDisk 6001 laseru udává plynulou regulaci výkonu od 120 W až 6000 W, vlnovou délku 1030 nm a umožňuje připojení optického kabelu s minimálním průměrem 100 μm [39].



Obr. 27 TruDisk 6001: 1) rezonátor, 2) budicí disk, 3) soustava úhlových zrcadel, 4) výstup paprsku do optického vlákna.

Paprsek je dále přiváděn pomocí optického vlákna do řezací hlavy, kde je pomocí zrcadel a skel zaostřován do ohniska řezaného materiálu.

Stroj je dále vybaven ochranou před kolizí řezací hlavy s výrobky, kontrolou stavu ochranného skla, přesným rozpoznáváním polohy plechů, snadnou dodatečnou výrobou ze zbytků plechů či automatickým měničem trysek (obr. 28) k redukci manuálních příprav před řezáním.



Obr. 28 Řezací hlava laseru TruLaser 5030 s automatickým měničem trysek.

Laser je ovládán pomocí dotykového ovládacího panelu (viz obr. 29), který je obsluhován pověřeným pracovníkem. Ovládací panel slouží ke spuštění procesu obrábění, kontrole procesu (kontrola stavu trysek příloha 2) a stroje. Ovládací panel také umožňuje změnu či opravu programů, např. změnu parametrů řezu. Převážně jsou do laseru importovány tzv. nestingy od programátora laseru. Připravený nesting je načten obsluhou ve stroji a spouští se obrábění. V nestingu jsou již nastaveny parametry řezání, jako jsou tlaky přídavných a řezných plynů, výkon, rychlost a tryska, kterou bude řezáno.



Obr. 29 Ovládací panel laseru.

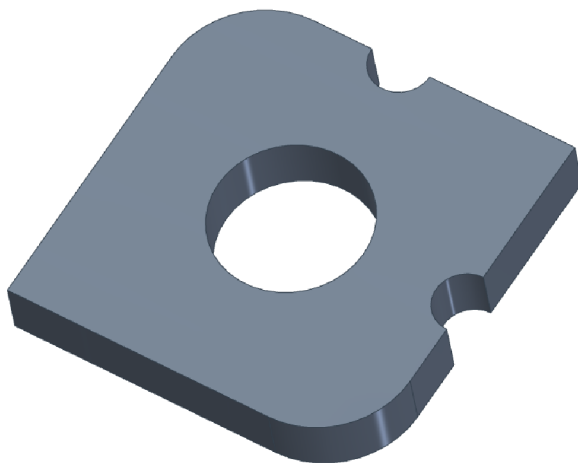
3.1.2 Vodní paprsek FLOW Mach 3020b

Experimentální vzorky k porovnání byly řezány i na vodním paprsku od firmy FLOW na stroji typu FLOW Mach 3020b. Jedná se o vysokotlaký stroj vyznačující se lineární přesností $\pm 0,038 \text{ mm.m}^{-1}$ a maximální rychlostí pojezdu $17,8 \text{ m.min}^{-1}$. Vodním paprskem lze řezat v pěti osách, což umožňuje řezání složitých úhlů s vysokou přesností. Vodní paprsek je vybaven čerpadlem o provozním tlaku až 6000 barů.

Celý proces je řízen pomocí softwaru Flow s rychlým programováním dílů z libovolného materiálu a jakýchkoliv tloušťek [40].

3.2 Příprava vzorků k obrábění

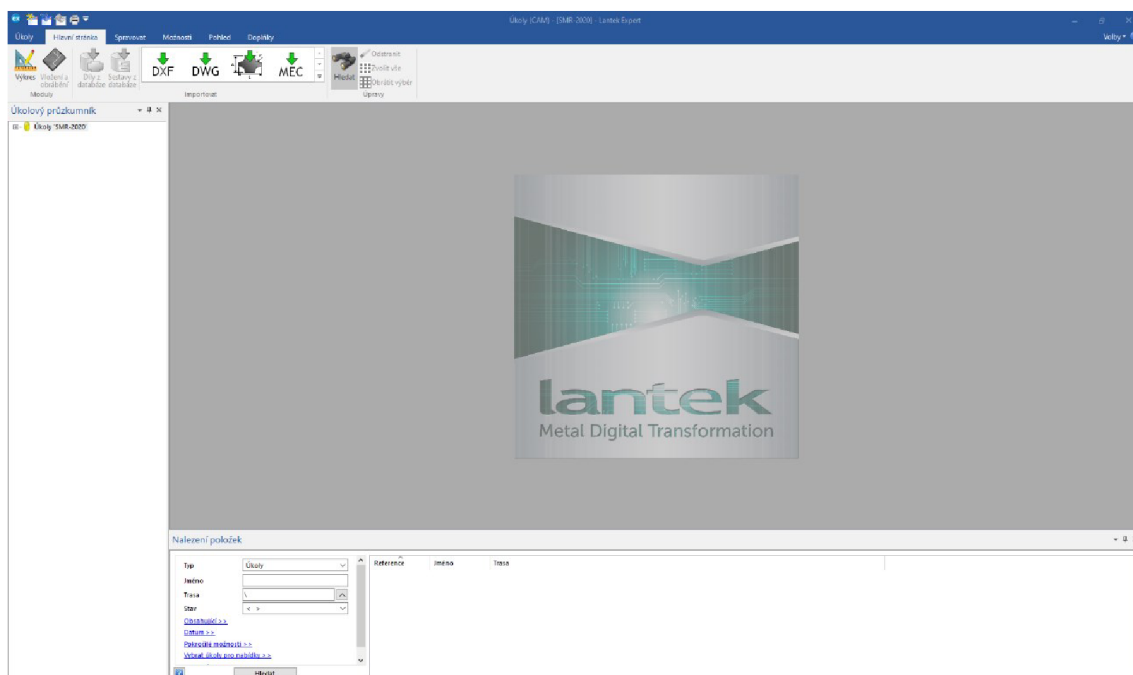
Navrhovaná součást byla vytvořena v programu Autodesk Inventor a exportována do formátu „dxf“, což je běžný způsob dodání výkresů do výroby programátorům stroje.



Obr. 30 Vyráběný 3D experimentální vzorek.

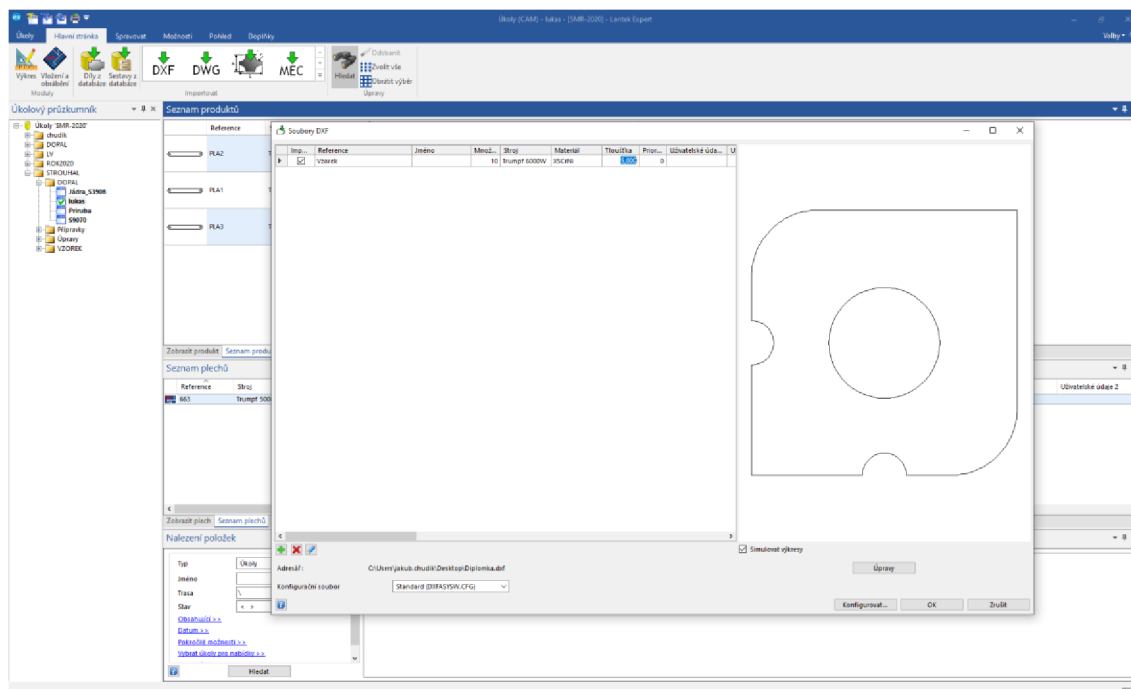
Tvar vzorku (obr. 30) byl zvolen zcela náhodně a velikost přizpůsobena, aby se vzorek vešel na zbytky plechů ve firmě. Vzorek má tvar čtverce s rozměry 60 × 60 mm, obsahuje zaoblění, kruhový otvor s průměrem 25 mm a ostré hrany na analýzu geometrie.

Samotná příprava vzorku probíhá v programu Lantek Expert Cut (obr. 31). Jedná se o CAD/CAM systém, který je speciálně určený k automatizaci při programování řezacích strojů. Celý program je zjednodušen tak, aby programátor následoval navrhované kroky [41].



Obr. 31 Lantek Expert Cut.

Programátor importuje předem připravené „dxf“ do programu Lantek, jelikož formát „dxf“ je 2D, je nutno vyplnit tabulku (obr. 32). V tabulce se vyplňuje tloušťka výpalku, materiál, množství obráběných kusů a stroj, na kterém bude probíhat obrábění.



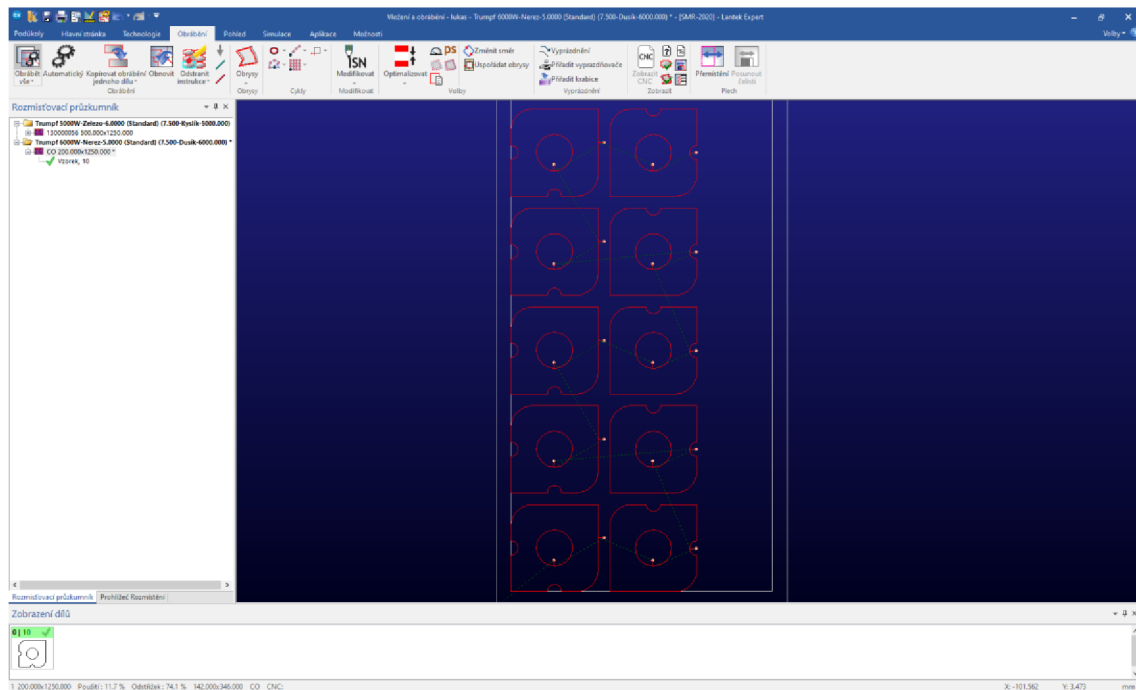
Obr. 32 Importování „dxf“ souboru.

Importovaný soubor musí být vždy zkontrolován programátorem a v případě neshody lze provést úpravu. Při úpravě musí být dodrženo několik pravidel:

- soubor vždy musí mít uzavřenou konturu,
- pokud by se kontura skládala z bodů – je nutné ji vyhladit,
- zkontrolovat měřítko.



Po kontrole může následovat přepnutí do samotného okna pro obrábění. V této části se nastavuje rozměr plechu a odsazení obrobku od krajů. Nejčastější formáty se používají 3000 × 1500 a 2500 × 1250 mm. Po nastavení rozměru plechu se rozmístí díly na plochu plechu, a to buď automaticky (nejvhodněji), ale také ručně. Díly se skládají s mezerou mezi sebou (nejčastěji při složitých obrysech), anebo lze skládat na společný řez, čímž se ušetří čas i místo na plechu.

Po rozmístění všech potřebných dílů přes funkci programu se naprogramuje umístění zápichů manuálně, anebo se generují automaticky již při zadávání dráhy obrysu (obr. 33). V případě malých a lehkých kusů hrozí riziko vyvrácení obrobku na obráběcím stole laseru a následné kolizi řezací hlavy a obrobku. Takové situaci se lze vyhnout přidáním tzv. „mikrospojů“ – jedná se o záměrně vynechané místo na obrysu obrobku přibližné délky 0,75 mm, tak aby díly nepropadávaly a všechny držely na tabuli plechu po celou dobu obrábění.



Obr. 33 Rozmístění dílů a zadání zápichů.

Splněním kroků programu se vygeneruje NC program, který se nahrává do laseru a zároveň programátor vytiskne nesting (obr. 34) s díly a předá obsluze stroje. Obsluha již má na nestingů zadán počet kusů, počet a rozměry plechů potřebných na splnění zakázky, celkový čas obrábění a požadovaný materiál.

		Ref	CO			Množství	1
		Úkol	lukas-JOB000075				
		CNC	71001	200	x 1250	x 5	01.03.2020
		Uživatelské údaje 3					13:27:24.00
							
Stroj	Trumpf 6000W		Váha	9,875		kg	
Materiál	Nerez		X	142			
Celkový čas	00:01:35.07		Y	346			
Uživatelské údaje 1			Použití (%)	11.737			
Uživatelské údaje 2			Odstřížek (%)	74.073	15.845		
#	Reference	Plech	Celkem	Chybi	Váha	Rozměry	
4	Vzorek	10	10	0	0.116	60 x 60	

Obr. 34 Nesting výroby vzorků.

Programované řezné parametry při obrábění vzorků pro laser zobrazuje tab. 4.

Tab. 4 Řezné parametry při obrábění laserem.

	Konstrukční ocel S355	Konstrukční ocel S235	Korozivzdorná ocel AISI 304L	Hliníkové slitiny EN AW 1050A H24
Tloušťka [mm]	15	10	5	3
Výkon laseru [W]	5000	5000	6000	6000
Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	1,4	2,3	5,7	7,7
Druh plynu	Kyslík O ₂	Kyslík O ₂	Dusík N ₂	Dusík N ₂
Tlak plynu [bar]	0,7	0,7	15	8
Doba řezání 10 ks vzorků	3 min 12 s	1 min 57 s	1 min 35 s	50 s

Vzorky na vodním paprsku byly řezány při výstupním tlaku čerpadla 355 MPa, průtokem vody 3,1 l.min⁻¹ soustředěným do dýzy o průměru 0,4 mm. Průtok abraziva byl 7,5 g.s⁻¹, zrnitosti 80 nazvané Almandite Garnet (železo hliníkový granát). Průměr řezné trysky byl 0,8 mm. Řezné parametry pro jednotlivé vzorky zobrazuje tab. 5.

Tab. 5 Řezné parametry obrábění vodním paprskem.

	Konstrukční ocel S355	Konstrukční ocel S235	Korozivzdorná ocel AISI 304L	Hliníkové slitiny EN AW 1050A H24
Tloušťka [mm]	15	10	5	3
Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	0,09	0,145	0,25	0,68
Doba děrování [s]	2,19	0,93	0,27	0,15
Doba řezání 10 ks vzorků	55 min 25 s	34 min 42 s	16 min 10 s	5 min 53 s

*Doba děrování – potřebný čas paprsku k průřezu skrz materiál.

3.3 Měření vzorků

Měření vzorků probíhalo v laboratoři Katedry strojírenství Univerzity obrany v Brně vybavené přístroji k měření chemického složení vzorků, geometrických parametrů a měření textury povrchu.

Chemické složení bylo porovnáno se standardně udávanými maximálními hodnotami, hodnotami z dokumentu kontroly dodavatele a naměřenými hodnotami v laboratoři.

Geometrické parametry byly měřeny na dílenském optickém mikroskopu při zvětšení 6,3x. Parametry jsou porovnány s 3D modelem a zhodnoceny, jak přesně technologie dokážou řezat. Dále byly na stejném mikroskopu pořízeny detailní fotografie textury povrchu po řezání laserem a na vodním paprsku. Nakonec se textura povrchu vyhodnocovala pomocí koherentního korelačního interferometru v programu TalyMap Platinum.

3.3.1 Měření chemického složení

Chemické složení experimentálních vzorků bylo měřeno s využitím jiskrového optického emisního spektrometru Tasman Q4 (obr. 35). Na každém vzorku bylo provedeno 5 měření.

Tabulka je doplněna o hodnoty naměřené výrobcem materiálu, který je povinný při objednávce dodat dokument kontroly (dříve atest) na objednaný polotovár. Dokument kontroly je řízen normou EN 10 204.



Obr. 35 Spektrometr Tasman Q4.

Výsledky analýzy chemického složení konstrukční oceli S355 uvádí tab. 6. Chemické složení konstrukční oceli S235 dokumentuje tab. 7.

Tab. 6 Chemické složení konstrukční oceli S355 [hm. %].

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Cr+N i+Cu	Nb	Al _{celk}	P	S
Standard										
max. 0,18	max. 1,60	max. 0,55	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,70	0,020 – 0,080	min. 0,01 5	max. 0,035	max. 0,035
EN 10204 norma dodaného materiálu										
0,14	1,44	0,014	0,02	0,021	0,02	0,061	0,021	0,01 8	0,016	0,003
Q4 Tasman										
0,15	1,39	0,02	0,03	0,02	0,01	0,06	0,029	0,01 9	0,013	0,015

Tab. 7 Chemické složení konstrukční oceli S235 [hm. %].

C	P	S	N
Standard			
max. 0,17	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,009
EN 10204 norma dodaného materiálu			
0,12	0,012	0,014	0,004
Q4 Tasman			
0,25	0,072	0,041	0,025

Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli AISI 304L zobrazuje tab. 8. Hliníková slitina je uvedena v tab. 9.

Tab. 8 Chemické složení korozivzdorné oceli AISI 304L [hm. %].

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
Standard						
max 0,03	max. 2,00	max. 1,00	17,0 – 20,0	10,0 – 12,5	max. 0,045	max. 0,030
EN 10204 norma dodaného materiálu						
0,027	1,21	0,38	18,1	10,5	0,026	0,001
Q4 Tasman						
0,02	1,42	0,50	18,44	9,03	0,084	0,009

Tab. 9 Chemické složení hliníkové slitiny EN AW 1050A H24 [hm. %].

Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti
Standard						
0,25	0,40	0,05	0,01	0,01	0,07	0,05
EN 10204 norma dodaného materiálu						
0,05	0,28	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Q4 Tasman						
0,15	0,40	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

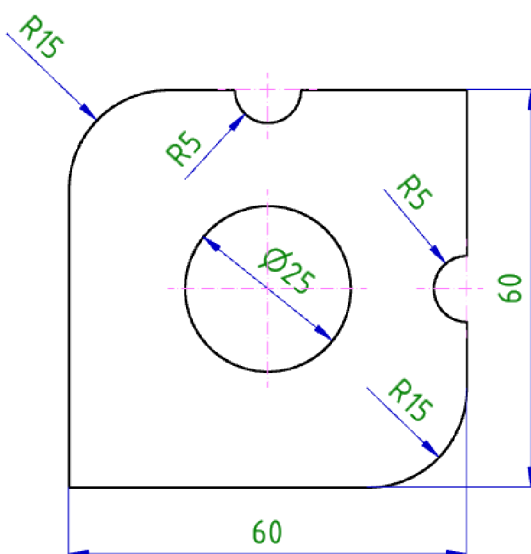
3.3.2 Měření geometrických parametrů experimentálních vzorků

Geometrické parametry experimentálních vzorků byly měřeny na dílenském optickém mikroskopu Olympus MVX10 (obr. 36), při zvětšení 6,3×.



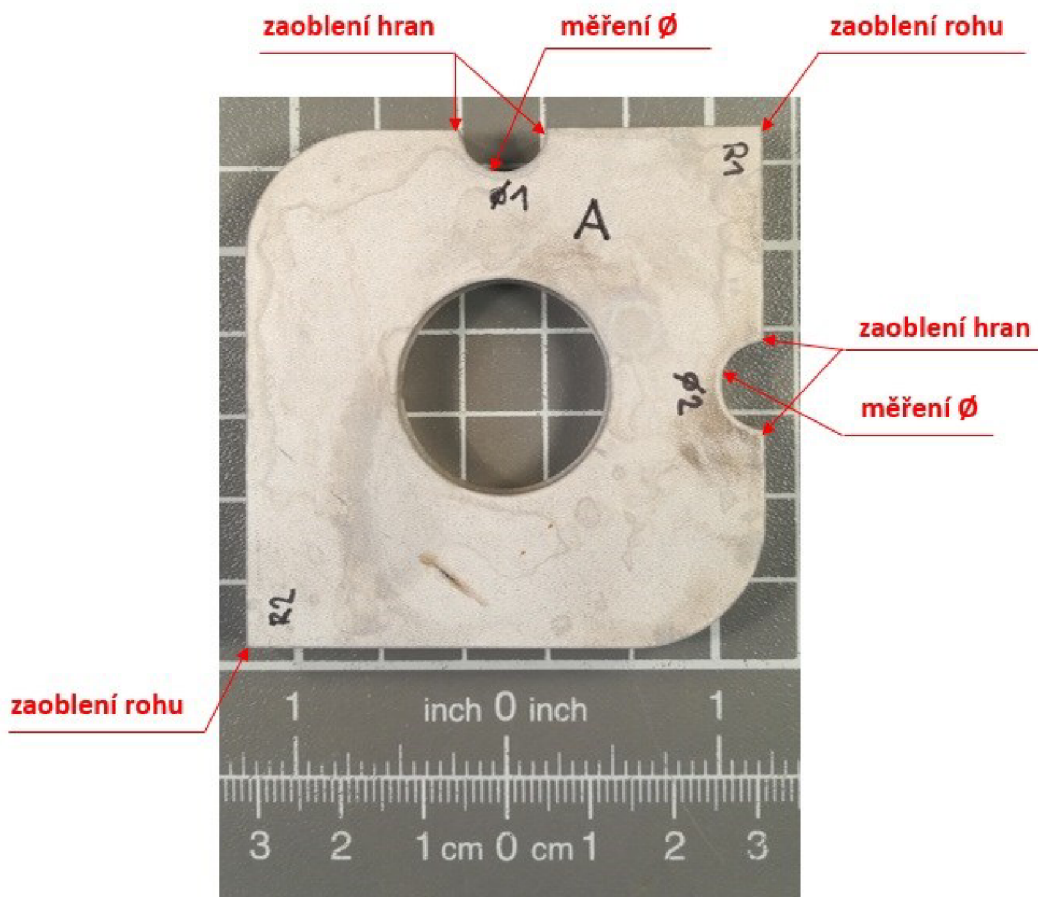
Obr. 36 Dílenský optický mikroskop Olympus MVX10.

Experimentální vzorky byly mezi sebou porovnávány a zkoumány rozdíly v případě pálení laserem a na vodním paprsku. Převážně se zjišťovaly nesrovnalosti s vytvořeným výchozím 3D modelem.

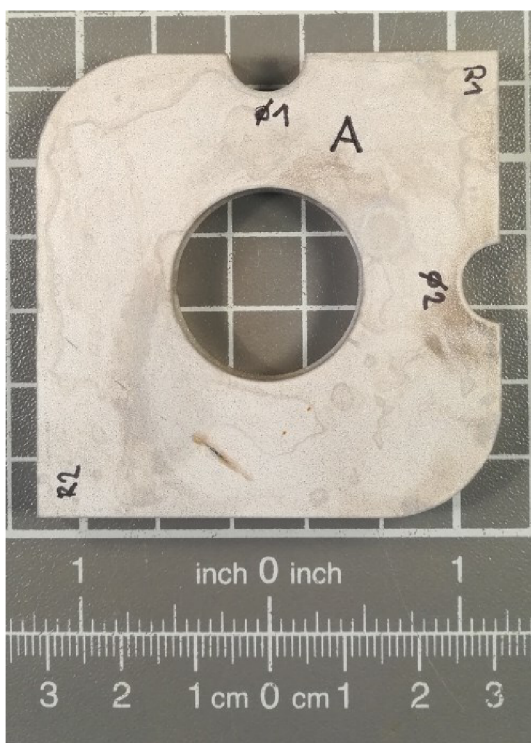


Obr. 37 Model vzorku s rozměry.

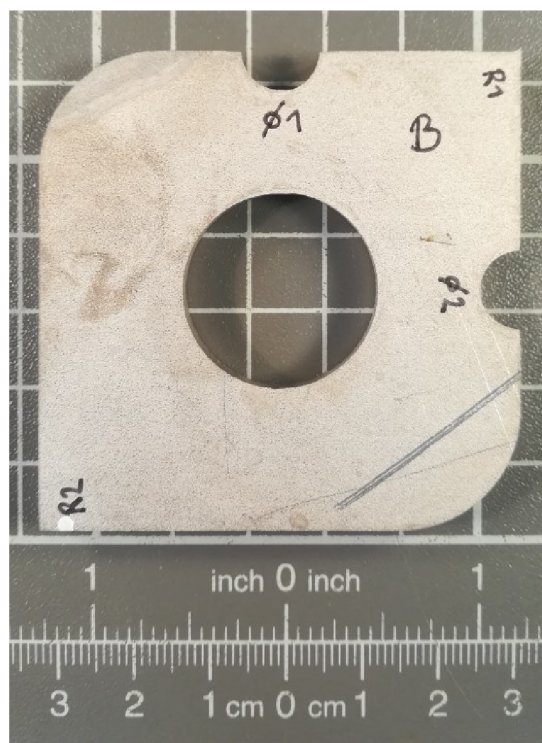
Na každém vzorku bylo měřeno 16 tvarových prvků, vždy 8 na každé straně (označeny jako strana A a B). Měřeny byly průměry půlkruhových vybrání na stranách vzorku (označení $\varnothing 1$ a $\varnothing 2$), zaoblení (rádius) hran půlkruhových vybrání a zaoblení (rádius) hran v ostrých rozích vzorku (označení R1 a R2). Rozmístění jednotlivých měřených tvarových prvků zobrazuje obr. 38. Označení jednotlivých měřených geometrických prvků na experimentálním vzorku z oceli AISI 304L je pro jednotlivé strany A a B znázorněno na obr. 39.



Obr. 38 Rozmístění měřených tvarových prvků na experimentálním vzorku.



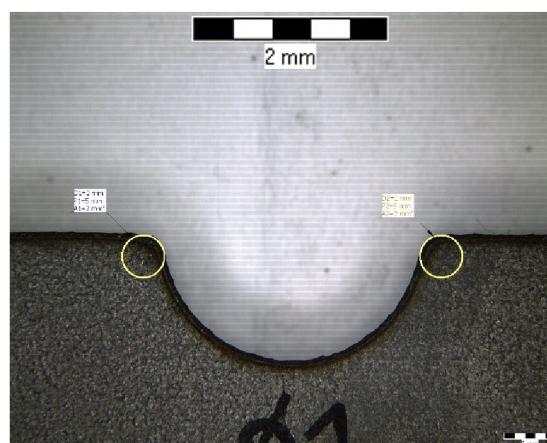
Strana A



Strana B

Obr. 39 Označení měřených tvarových prvků na experimentálním vzorku.

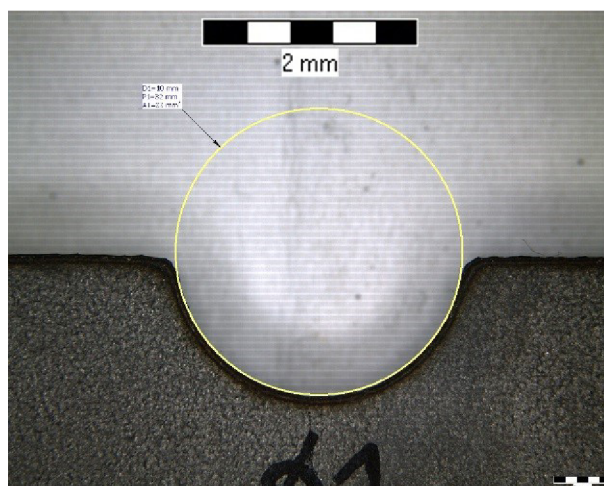
Obr. 40 dokumentuje pohled na geometrický prvek (půlkruhové vybrání), s označením $\emptyset 1$ a strategií měření zaoblení hran tohoto prvku pomocí dvou vepsaných kružnic.



Obr. 40 Pohled na půlkruhové vybrání:

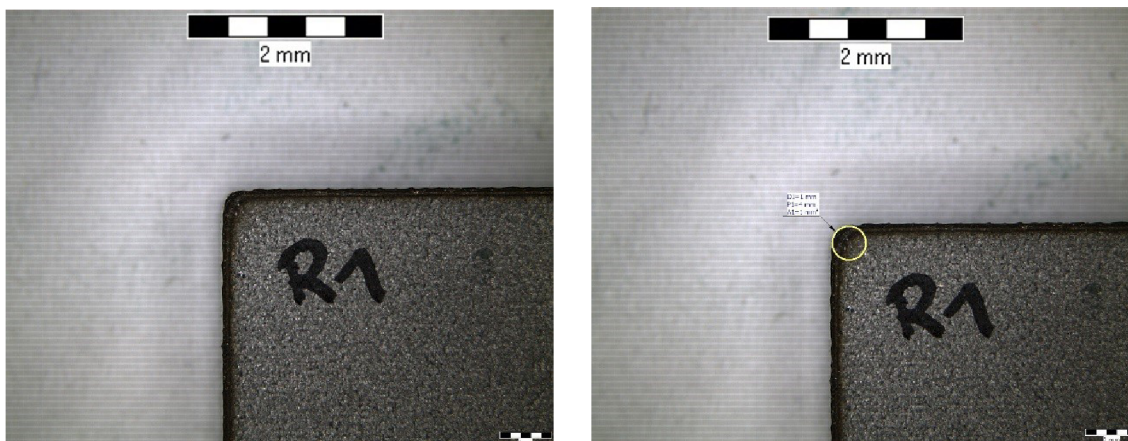
- A) Označené $\emptyset 1$ (vlevo), zvětšeno 6,3 \times .
- B) Měření zaoblení hran (vpravo), zvětšeno 6,3 \times .

Na obr. 41 je znázorněn postup měření průměru půlkruhového vybrání (označení Ø 1) pomocí vepsané kružnice.



Obr. 41 Pohled na půlkruhové vybrání, označené Ø 1 a měření průměru vybrání, zvětšeno 6,3×.

Měření poloměru zaoblení rohů experimentálních vzorků bylo provedeno opět s využitím vepsané kružnice (měření průměru), což je patrné z obr. 42.

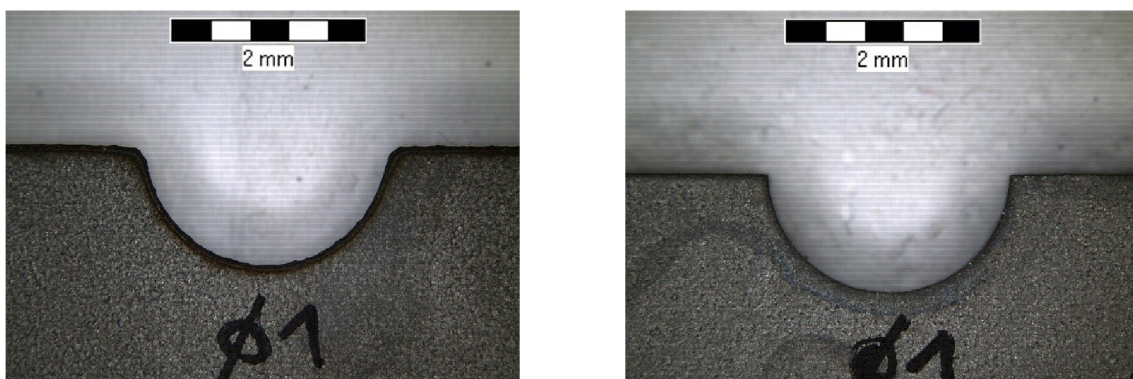


Obr. 42 Vyhodnocovaná oblast:

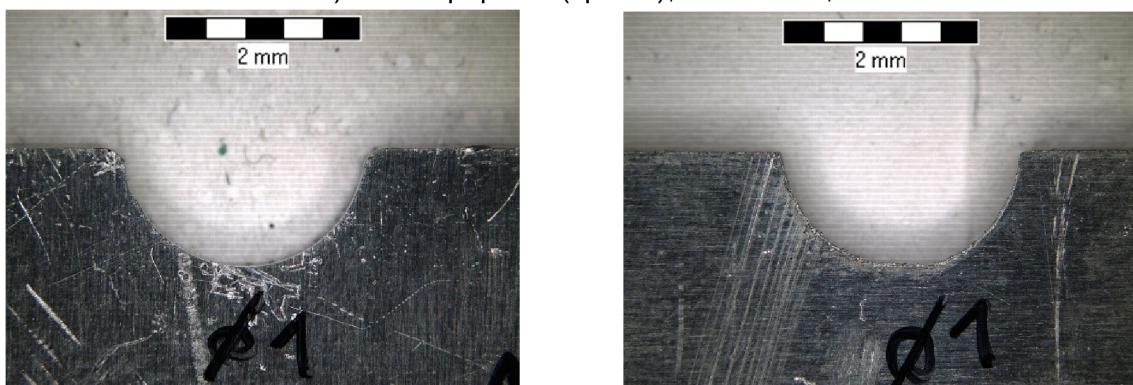
- A) Pohled na roh s označením R1 (vlevo), zvětšeno 6,3×.
- B) Měření zaoblení hrany rohu (vpravo), zvětšeno 6,3×.

K zaoblení hran převážně nedocházelo u vzorků řezaných na vodním paprsku. Jelikož vodní paprsek vzorek nezahřívá, ale pouze obrušuje, nedochází k tzv. „propálení“ hran.

Obr. 43 dokumentuje vzorek z AISI 304L, kdy na laseru došlo k zaoblení hran o Ø 2 mm. Tento případ platí i pro hliníkovou slitinu EN AW 1050A H24 tloušťky 3 mm a pro ocel S235 tloušťky 10 mm zobrazující obr. 44 a obr. 45. V případě oceli S355 tloušťky 15 mm bylo naměřeno zaoblení o Ø 3mm (obr. 46). Vodní paprsek vždy dodržel požadovanou ostrot hrany.



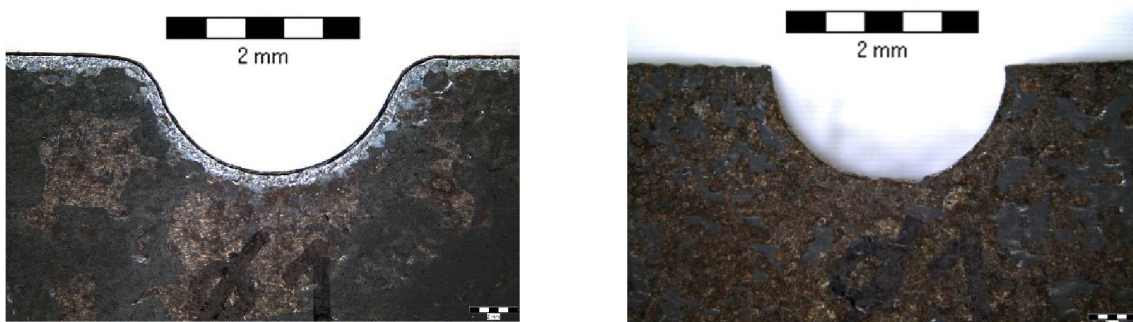
Obr. 43 Porovnání vzorků AISI 304L, tl. 5 mm:
A) Laser (vlevo), zvětšeno 6,3×.
B) Vodní paprsek (vpravo), zvětšeno 6,3×.



Obr. 44 Porovnání vzorků hliníkové slitiny EN AW 1050A H24, tl. 3 mm:
A) Laser (vlevo), zvětšeno 6,3×.
B) Vodní paprsek (vpravo), zvětšeno 6,3×.



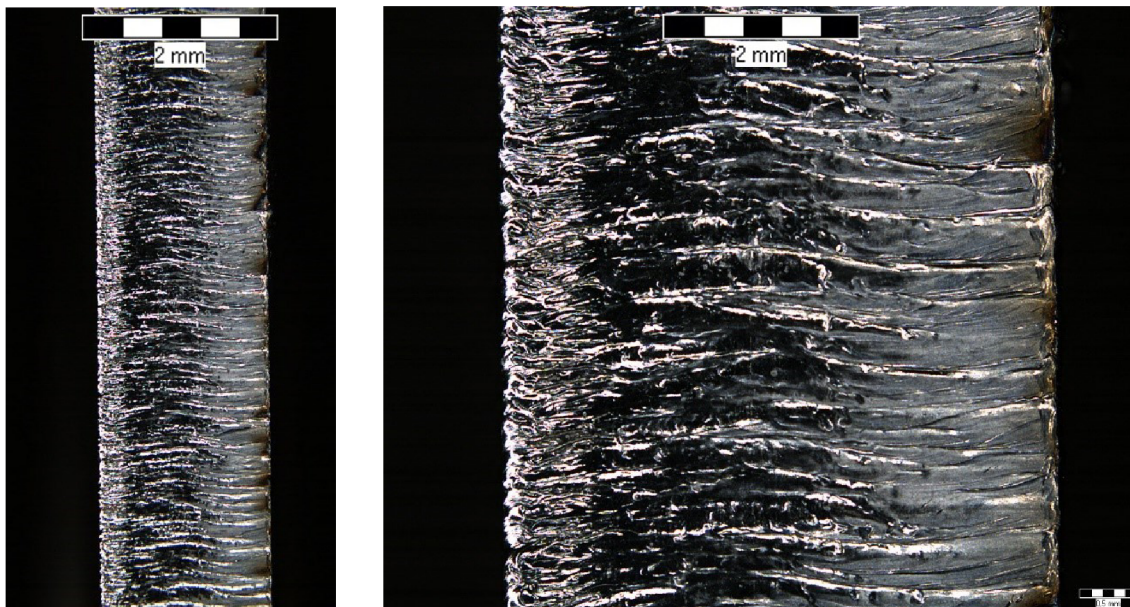
Obr. 45 Porovnání vzorků oceli S235, tl. 10 mm:
A) Laser (vlevo), zvětšeno 6,3×.
B) Vodní paprsek (vpravo), zvětšeno 6,3×.



Obr. 46 Porovnání vzorků oceli S355, tl. 15 mm:
A) Laser (vlevo), zvětšeno 6,3×.
B) Vodní paprsek (vpravo), zvětšeno 6,3×.

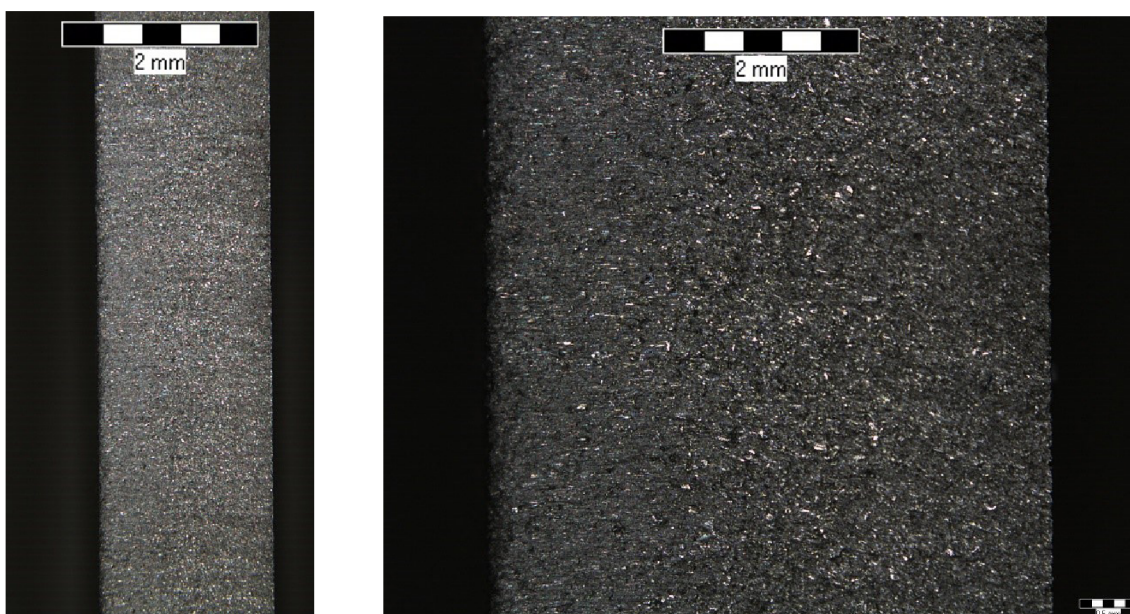
3.3.3 Obrazová analýza textury povrchu řezů

Měření textury povrchu bylo provedeno opět s využitím dílenského optického mikroskopu Olympus MVX10. Analýza textury byla provedena přehledovým snímkem, při zvětšení 6,3× a jedním až třemi snímky při zvětšení 20×. Větší počet snímků při zvětšení 20× byl proveden u experimentálních vzorků s tloušťkou 10 mm a 15 mm (obr. 50 a obr. 51). U těchto vzorků byl snímán konec, střed a začátek řezné plochy vzorku.



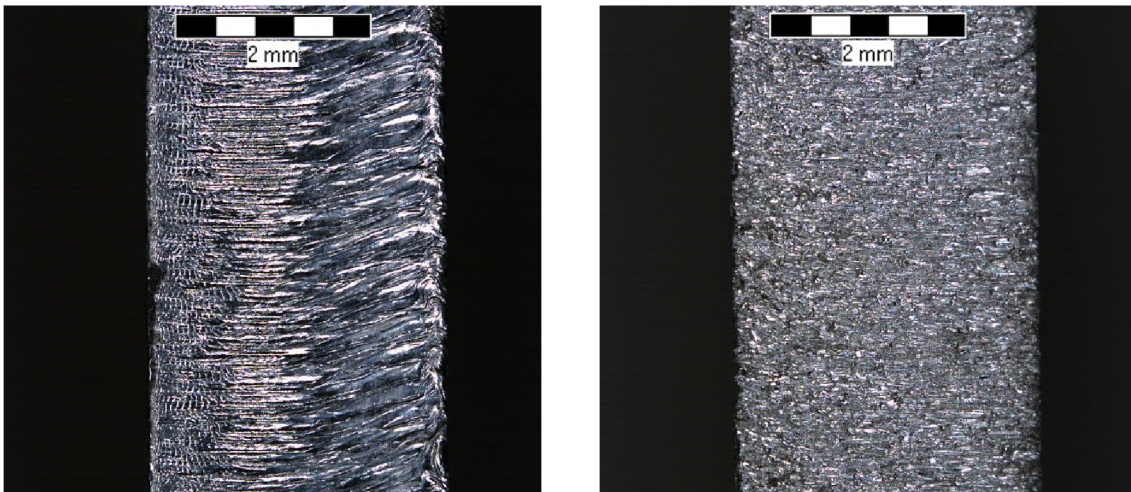
Obr. 47 Přehledový snímek plochy řezu oceli AISI 304L, laser tl. 5 mm:

- A) Zvětšení 6,3× (vlevo).
- B) Zvětšení 20× (vpravo).

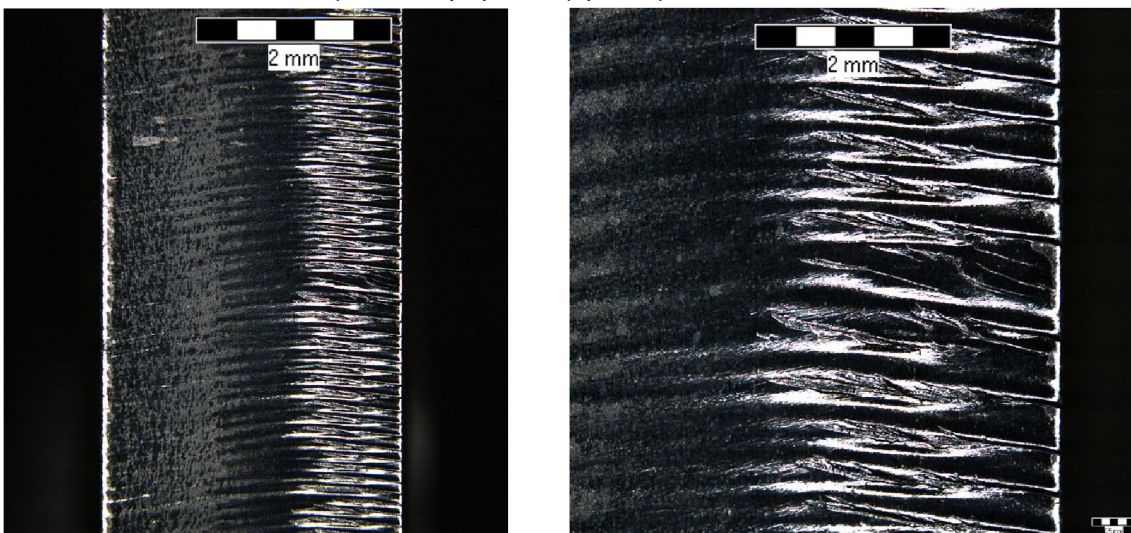


Obr. 48 Přehledový snímek plochy řezu oceli AISI 304L, vodní paprsek, tl. 5 mm:

- A) Zvětšení 6,3× (vlevo).
- B) Zvětšení 20× (vpravo).

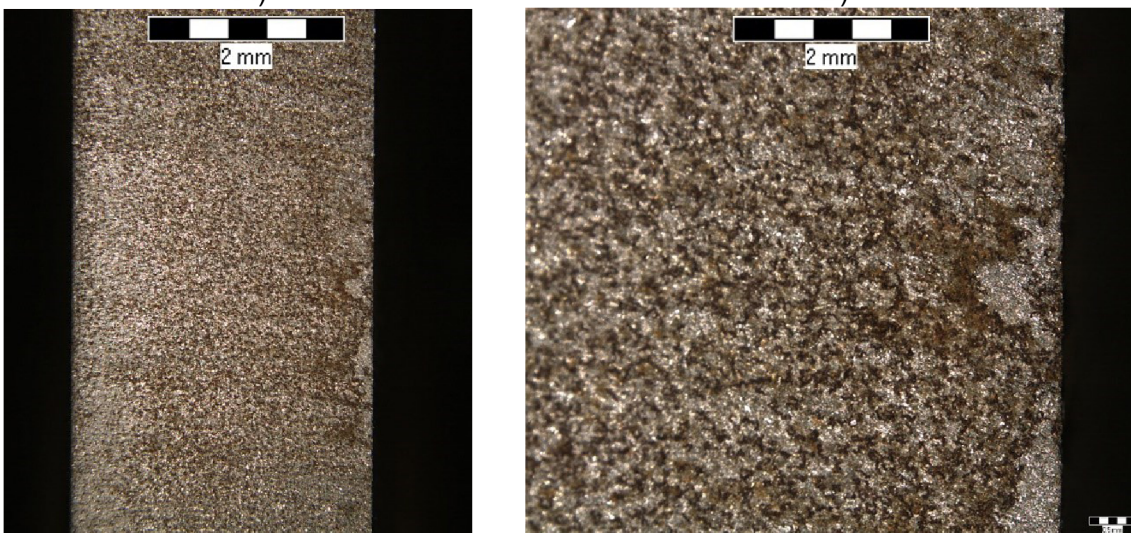


Obr. 49 Přehledový snímek plochy řezu hliníkové slitiny EN AW 1050A H24, tl. 3 mm:
A) Laser (vlevo), zvětšeno 20×.
B) Vodní paprsek (vpravo), zvětšeno 20×.



A)

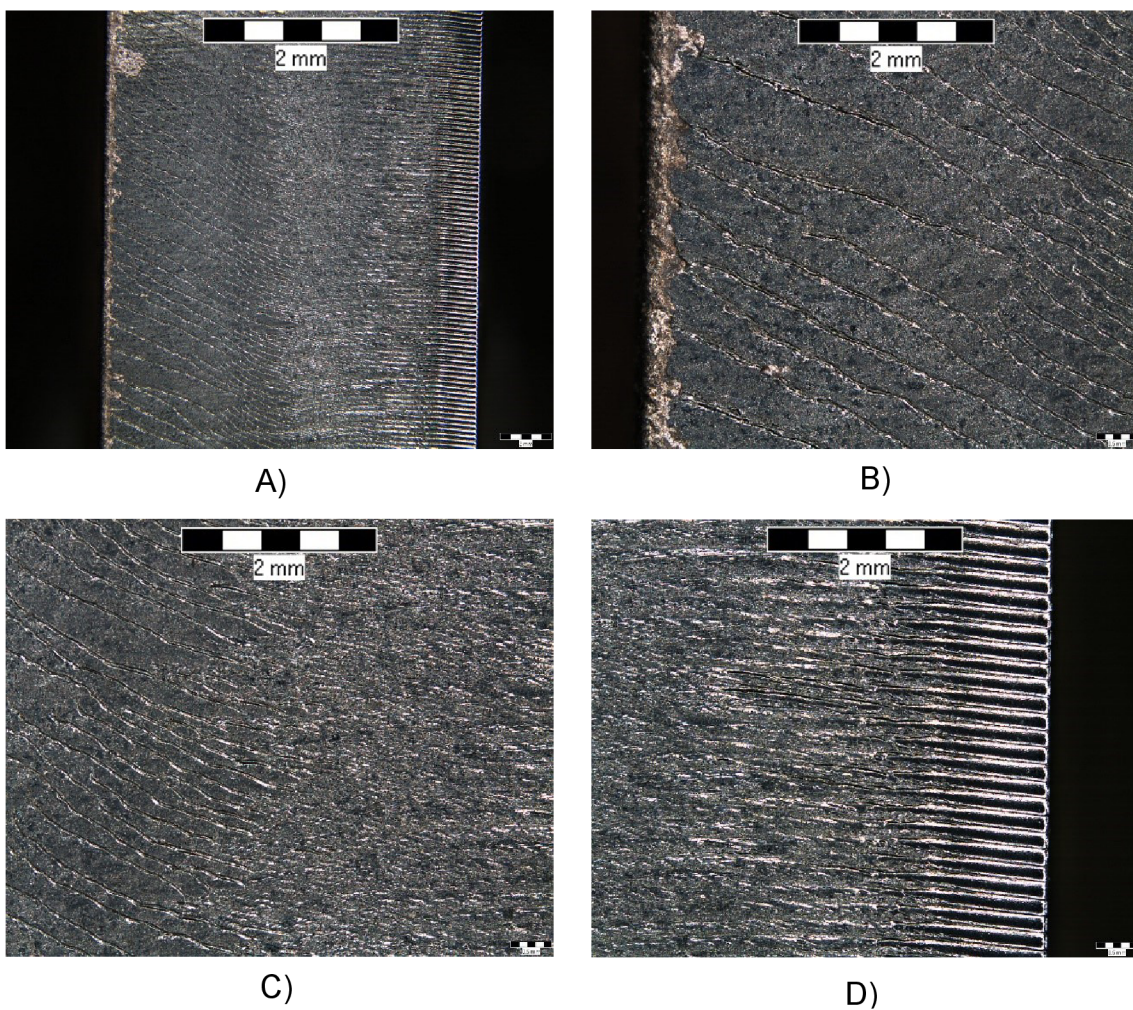
B)



C)

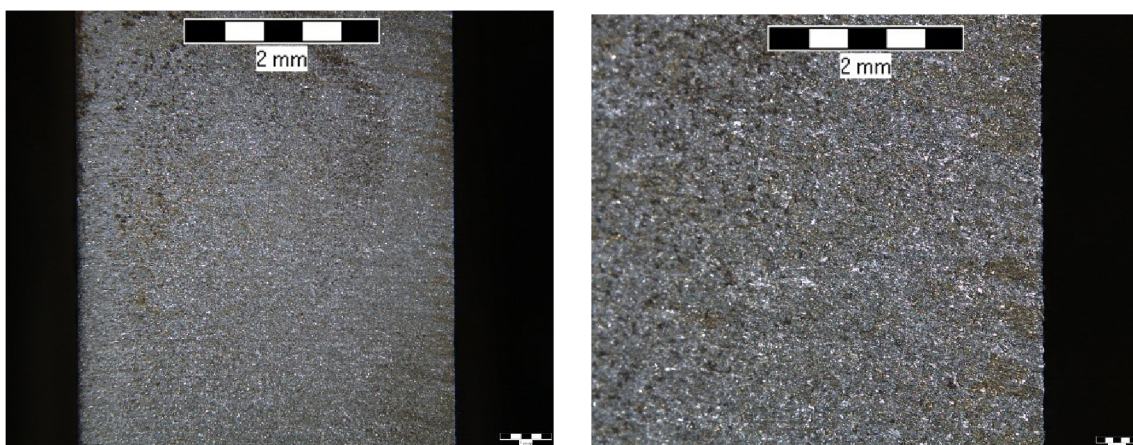
D)

Obr. 50 Přehledový snímek ploch řezu oceli S235, tl. 10mm:
A) Laser, zvětšeno 6,3×, B) Laser, zvětšeno 20×,
C) Vodní paprsek, zvětšeno 6,3×, D) Vodní paprsek, zvětšeno 20×.



Obr. 51 Přehledový snímek ploch řezu oceli S355, laser, tl. 15mm:

A) Celá plocha, zvětšení 6,3×, B) konec řezu, zvětšení 20×,
C) Střední oblast, zvětšení 20×, D) Začátek řezu, zvětšení 20×.



Obr. 52 Snímek plochy řezu oceli S355, vodní paprsek, tl. 15 mm:

A) Zvětšení 6,3×.
B) Zvětšení 20×.

Textury povrchu jsou od sebe odlišné a pro každou technologii specifické. Při řezání laserem vzniká tepelně ovlivněná oblast v oblasti řezu a lze pozorovat deformační rýhy způsobené při tavení materiálu a jeho vyfukování inertním plynem (v našem případě O_2 a N_2). Naopak u řezání vodním paprskem lze pozorovat na pohled celistvý a souměrný řez způsoben obrušováním zrnkem abraziva.

3.3.4 Měření textury povrchu řezné plochy

Textura povrchu byla měřena na koherentním korelačním interferometru TalySurf CCI Lite (obr. 53) a vyhodnocena pomocí software TalyMap Platinum.



Obr. 53 Interferometr TalySurf CCI Lite.

Parametry měření experimentálních vzorků jsou uvedeny v tab. 10. Podmínky měření textury povrchu a profilu drsnosti zvoleny v souladu s normami ČSN EN ISO 25178-2 a ČSN EN ISO 4288. Podmínky měření tzn. velikost měřené plochy, základní délku (cut-off) a typ a nastavení filtrace uvádí tab. 11.

Tab. 10 Parametry měření textury povrchu experimentálních vzorků.

Typ snímače	Rozsah	Rozlišení	Počet snímaných bodů
Optický, zvětšení 20×	2,2 mm	0,1 nm	1024 × 1024

Tab. 11 Podmínky měření textury povrchu experimentálních vzorků.

Měřená plocha	Počet snímaných profilů	Základní délka	Filtrace
0,8 mm × 0,8 mm	3	0,8 mm	Gauss – 0,8 mm

Pro měření textury povrchu experimentálních vzorků byla získaná data vyhodnocena podle následujícího postupu:

1. **Levelling** – vyrovnaní plochy podle zvolené oblasti,
2. **Form removal** – odstranění tvarových úchylek plochy – polynomem 5. řádu,
3. **Thresholding** – zahrnutí odpovídajícího spektra dat do analýzy,
4. **Photosimulation** – zobrazení fotosimulace povrchu vyhodnocované plochy,
5. **3D visualization** – 3D vizualizace textury měřené plochy,
6. **Parameter list** – zobrazení 3D parametrů plochy,
7. **Extract 1st Profile** – extrahování 1. profilu drsnosti, délka 5,5 mm,
8. **Zoom 1st Profile** – Zoom vyhodnocované oblasti, délka 4 mm
9. **Roughness and Waviness filtration** – filtrace plochy pro získání drsnosti plochy a profilu drsnosti, použit Gaussův filtr, cut-off 0,8 mm,
10. **Parameter list** – zobrazení 2D parametrů drsnosti,
11. **Extract 2nd Profile** – extrahování 2. profilu drsnosti, délka 5,5 mm,
12. **Zoom 2nd Profile** – Zoom vyhodnocované oblasti, délka 4 mm
13. **Roughness and Waviness filtration** – filtrace plochy pro získání drsnosti plochy a profilu drsnosti, použit Gaussův filtr, cut-off 0,8 mm,
14. **Parameter list** – zobrazení 2D parametrů drsnosti,
15. **Extract 3rd Profile** – extrahování 3. profilu drsnosti, délka 5,5 mm,
16. **Zoom 3rd Profile** – Zoom vyhodnocované oblasti, délka 4 mm
17. **Roughness and Waviness filtration** – filtrace plochy pro získání drsnosti plochy a profilu drsnost, použit Gaussův filtr, cut-off 0,8 mm,
18. **Parameter list** – zobrazení 2D parametrů drsnosti.

Následující tabulky porovnávají amplitudové parametry řezaných vzorků technologií laseru a vodního paprsku. Součástí porovnání jsou 3D vizualizace získané z fotosimulace povrchu. Měřené amplitudové (výškové) parametry:

- Sa – průměrná aritmetická úchylka povrchu,
- Ra – průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti,
- Rz – největší výška profilu drsnosti.

Parametr Sa představuje průměrnou aritmetickou míru výškových souřadnic textury hodnoceného povrchu. Využívá se především pro obráběné plochy [42].

Parametr Ra, průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti, je nejčastěji užívaným parametrem pro posuzování drsnosti povrchu. Jedná se o velmi opakovatelný a stabilní parametr, vhodný převážně pro neperiodické povrchy, využívá se např. pro povrchy po broušení apod. [43].

Parametr není zcela vhodný pro porovnání povrchů vyrobených zcela odlišnou technologií, jelikož nerozlišuje výstupky od prohlubní (obr. 54) [44].



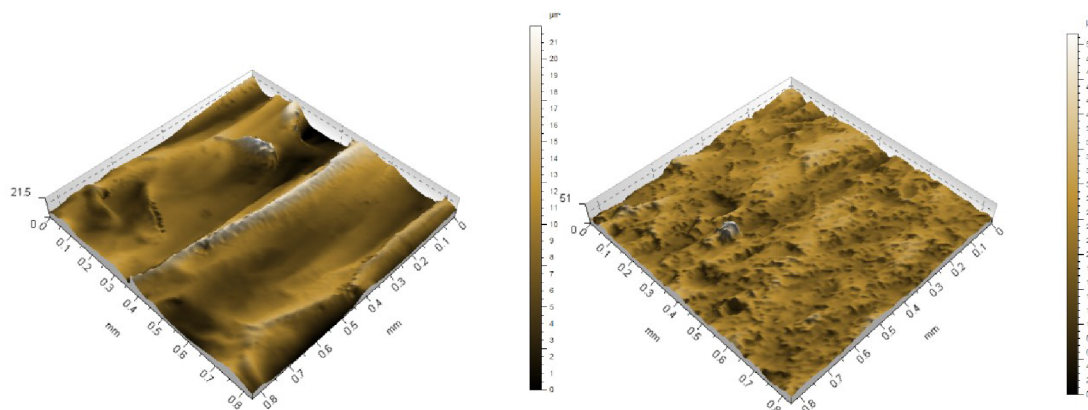
Obr. 54 Metodika hodnocení drsnosti povrchu Ra [44].

Parametr Rz reprezentuje největší výšku profilu drsnosti. Oproti parametru Ra je daleko citlivější na změnu textury povrchu. Jedná se čistě o výškový parametr a ne o průměrnou hodnotu [43].

Výsledné parametry Ra a Rz byly získány pomocí opakovaných měření a z naměřených hodnot byl vytvořen aritmetický průměr.

Tab. 12 Amplitudové parametry korozivzdorné oceli AISI 304L.

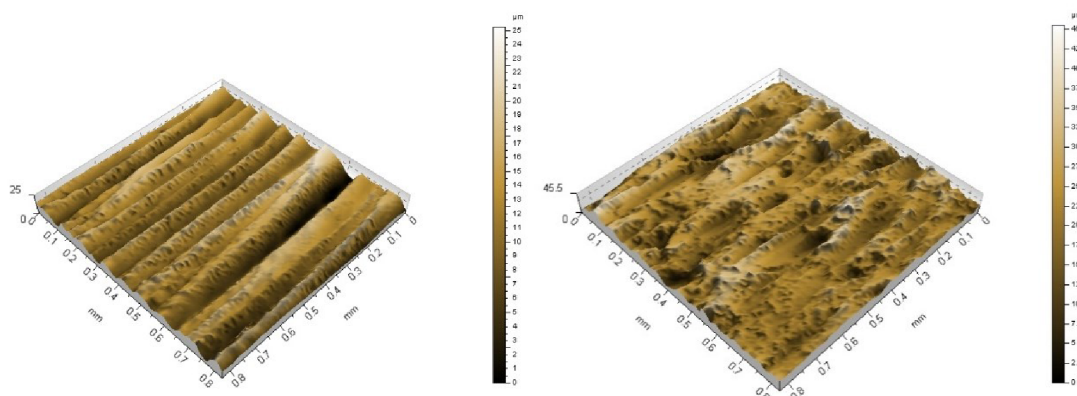
Označení parametru	Laser	Vodní paprsek
Sa [μm]	3,026	4,588
Ra [μm]	2,686	3,887
Rz [μm]	17,246	35,673



Obr. 55 3D vizualizace textury povrchu korozivzdorné oceli AISI 304L:
A) Laser; B) Vodní paprsek.

Tab. 13 Amplitudové parametry hliníkové slitiny EN AW 1050A H24.

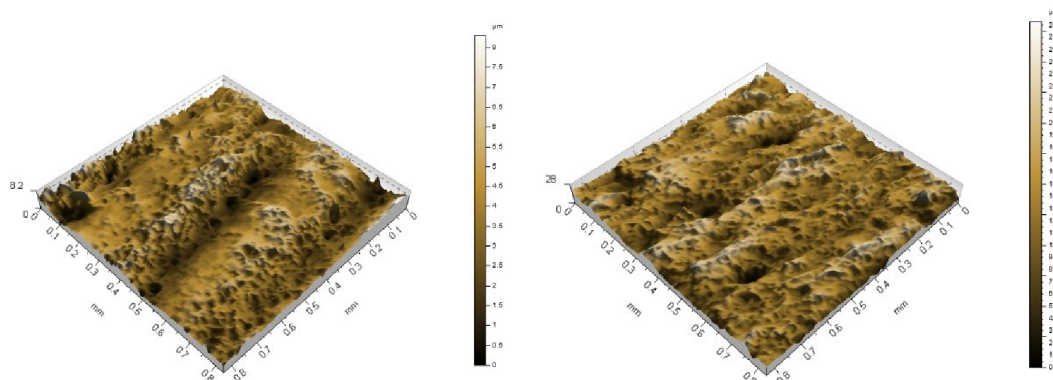
Označení parametru	Laser	Vodní paprsek
Sa [μm]	3,620	5,493
Ra [μm]	3,508	4,748
Rz [μm]	21,766	36,570



Obr. 56 3D vizualizace textury povrchu hliníkové slitiny EN AW 1050A H24:
A) Laser; B) Vodní paprsek.

Tab. 14 Amplitudové parametry oceli S235 (ČSN 41 1375).

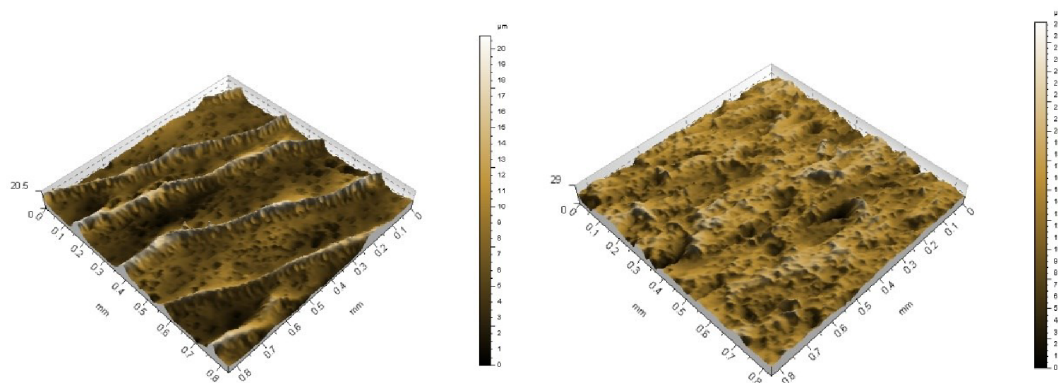
Označení parametru	Laser	Vodní paprsek
Sa [μm]	1,113	3,521
Ra [μm]	0,958	3,243
Rz [μm]	6,759	24,493



Obr. 57 3D vizualizace textury povrchu oceli S235:
A) Laser; B) Vodní paprsek.

Tab. 15 Amplitudové parametry konstrukční oceli S355 (ČSN 41 1503).

Označení parametru	Laser	Vodní paprsek
Sa [μm]	3,172	3,186
Ra [μm]	3,148	2,793
Rz [μm]	19,263	22,27

Obr. 58 3D vizualizace textury povrchu oceli S235:
A) Laser; B) Vodní paprsek.

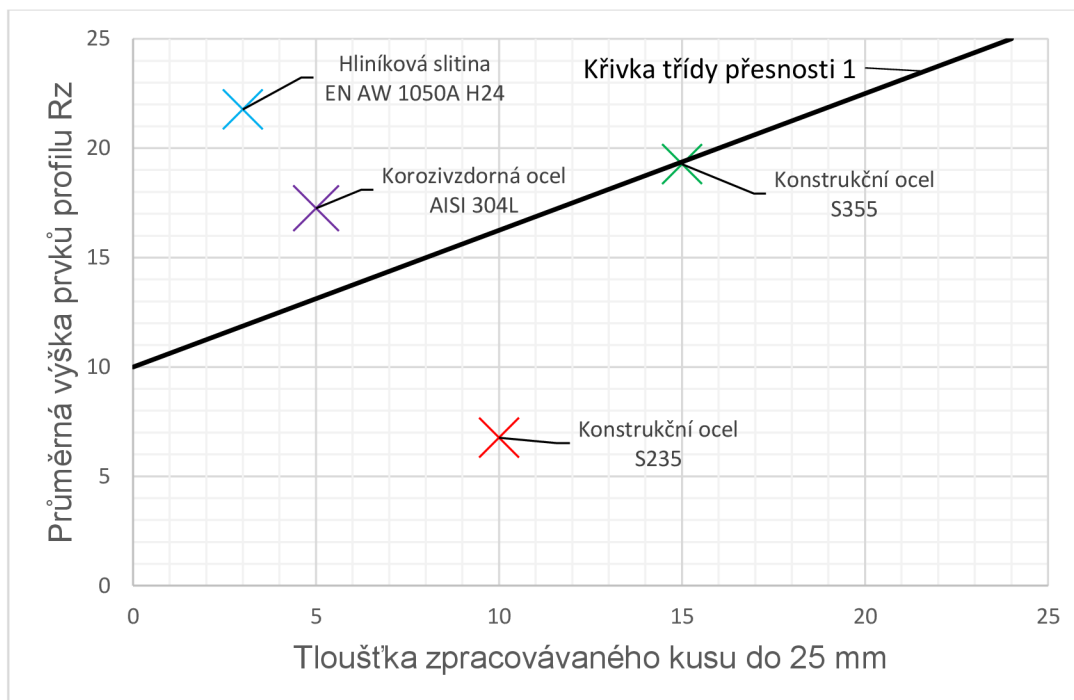
3.3.5 Hodnocení textury povrchu

Vyhodnocování povrchů při řezání laserem se provádí pomocí normy ČSN EN ISO 9013 „*Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*“. Norma představuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezů pro tepelné řezy materiálů. Konkrétně pro řezání laserem pracuje v rozsahu tloušťek od 0,5 mm do 32 mm [45].

Jakost povrchu se stanovuje dle parametru Rz a výsledná jakost povrchu je stanovena z grafů zvilostí Rz na tloušťce materiálu. Všeobecně platí, že čím vyšší tloušťka materiálu se reže, tím výrazně stoupá jeho jakost povrchu. Platí i pro rozměrové tolerance [45].

Laserové řezání se řadí do toleranční třídy 1, pro kterou platí určité rozměrové tolerance. V případě námi vyrobeného vzorku z konstrukční oceli S235 tloušťky 10 mm se jmenovitá rozměrová tolerance uvažuje $\pm 0,4$ mm, v případě konstrukční oceli S355 tloušťky 15 mm se rozměrová tolerance zvyšuje na $\pm 0,5$ mm [45].

Naměřené hodnoty výšek profilů Rz pro laserové řezání byly vyneseny do grafu viz obr. 59 s třídou přesnosti 1 pro laserové řezání dle normy. Z grafu lze říci, že všechny konstrukční oceli splňují nejkvalitnější třídu přesnosti. Ostatní vzorky jsou již nad křivkou přesnosti, což může být způsobeno, špatným měřením či parametry nastavenými na laseru.



Obr. 59 Průměrná výška prvků profilu v závislosti na tloušťce materiálu.
Třída přesnosti 1 pro laserové řezání dle ČSN EN ISO 9013 [45].

Vyhodnocování povrchů v případě vodního paprsku se řídí dle následující tab. 16. Tabulka je pouze orientační a může se lišit dle materiálů [45].

Tab. 16 Dosažitelné stupně kvality řezu [46].

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra* v horní kontuře [μm]	Drsnost Ra* ve spodní kontuře [μm]	Tvarová přesnost [mm] v horní kontuře	Tvarová přesnost [mm] ve spodní kontuře	Úkos
Q1	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	±0,1	±0,1	Mírný podřez
Q2	Kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	±0,1	±0,2	Minimální
Q3	Střední řez	cca 4,0	do 12,5	±0,15	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q4	Hrubý řez	cca 4,0	do 25	±0,2		
Q5	Dělicí řez	4,0-6,3	do 40	±0,2		

V případě konstrukčních ocelí lze řezy zařadit do kategorie Q1 tzv. nejlepší řez. Vzorek z korozivzdorné oceli splňuje kategorii Q3 a v případě hliníkové slitiny kategorie Q5.

ZÁVĚR

Laserové technologie, dříve považovány jen za těžce dosažitelné pro běžnou průmyslovou výrobu, nyní získávají stále širší uplatnění v průřezu všech průmyslových odvětví. V průmyslu se laser s oblibou využívá při řezání, svařování či značení, díky jeho přesnosti, rychlosti obrábění a velkému rozsahu řezaných materiálů. Laserový paprsek je dnes nedílnou součástí medicíny, kde se používá například při léčbě vad zraku, vyhlazování jizev nebo léčbě nádorů.

Teoretická část diplomové práce byla zaměřena na technologii laserového paprsku. V první kapitole byly popsány nekonvenční metody obrábění a vybrány metody pomocí jiného principu úběru materiálu. Následující kapitola se zaměřovala na laserovou technologii – principu vzniku laserového paprsku, konstrukci laserových zařízení, ovlivňující kvalitu paprsku a rozdělení nejpoužívanějších laserů v průmyslu.

Experimentální část diplomové práce byla zaměřena na srovnání vzorků z laseru od firmy TRUMPF a vodního paprsku od firmy Flow. Vzorky byly vyrobeny ve firmě SMR Plus s.r.o., která disponuje oběma stroji. Jelikož laser a vodní paprsek jsou ve firmě využívány především pro výrobu ocelových transportních palet, nejsou ve firmě požadovány vysoké přesnosti na obrobky a jakosti povrchů, proto vše bylo řezáno za doporučených podmínek výrobců, při kterých převládá kvantita.

V první části bylo zjištěno a porovnáno složení materiálů s kontrolním dokumentem poskytnutým výrobcem. Naměřené hodnoty se převážně shodovaly. Chemické složení materiálů souhlasilo se standardním předepsaným složením při výrobě plechů.

Ve druhé části experimentu se zjišťovaly geometrické parametry vzorků. Vzorky pomocí laseru splnily předepsanou přesnost stroje a to $\pm 0,2\text{mm}$. V zásadě platí, že při větší tloušťce materiálu vzniká více nepřesností při řezání. Způsobeno vysokým výkonem a nízkou rychlostí řezání, tak aby laser byl schopen propálit řezaný materiál. Maximální tloušťky pro řezání laserem jsou standardně maximálně 30 mm pro konstrukční oceli. Po prozkoumání textury povrchu bylo vidět, že výrobky z laseru měly vždy zaoblené hrany, i přestože nebyly žádány. Rozmezí naměřených poloměrů pomocí vepsaných kružnic bylo 2 mm až 3 mm.

Obrazová analýza ukázala typické skluzové rýhy, které patří mezi vady a výrazně ovlivňují jakost povrchu. Oproti vodnímu paprsku, kde je materiál odbrušován, vypadaly řezné plochy na pohled lépe.

V poslední části se měřily parametry Sa, Ra a Rz. Výsledné parametry byly vyhodnoceny dle ČSN EN ISO 9013 a konstrukční oceli tloušťky 10 mm a 15 mm splnily třídu přesnosti 1 tzv. nejvyšší. Hliníková slitina a korozivzdorná ocel se řadí spíše do třídy přesnosti 2. Řezný povrch vodního paprsku není přímo řízen normou, ale tabulkou se stupni kvality. Nejvyšší kvalitu řezu Q1 splnily vzorky z konstrukční oceli tloušťky 10 mm a 15 mm. Ostatní dva vzorky se zařadily do skupiny středního a dělicího řezu, což je ve firmě SMR Plus s.r.o. pro výrobky dostačující.

Časy řezání vzorků dokazují, že řezání laserem je více než 10x rychlejší než na vodním paprsku (viz tab. 4 a tab. 5). Potvrdilo se, že laser je rychlejší a přesnější než řezání na vodním paprsku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Historie laserů. *LASCAM* [online]. 25.07.2015 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/historie/>
2. *IVT Centrum* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.ivt.cz/our-services/design-and-build/>
3. HUMÁR, A. Technologie I.: Technologie obrábění – 3. část. [online]. [cit. 2020-03-03]. 57 s. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>.
4. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, 19.07.2007, (7) [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
5. TRNKA, Lukáš. *Nekonvenční paprskové metody obrábění* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/20292>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.
6. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
7. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 8. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **2008**(10) [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html> - plazma
8. Elektronická učebnice: Speciální technologie obrábění. *ELUC* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1059>
9. ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3 - 2. díl*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-718-3336-3. – plazma + voda
10. *Camfil APC* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://camfilapc.com/au/applications/plasma-cutting/> - obrázek plazma
11. Digitální učební materiály - Nekonvenční metody obrábění. *Internetový portál COPTTEL* [online]. 2009-2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=40241&docGroup=4781&cmd=0&instance=2> – chemické obrábění
12. ASTEN, Teun. Technologie: Nová úroveň odstraňování otřepů. *Strojirenstvi.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/2792> - odstraňování otřepů
13. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2.html>

14. *Flow* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz - voda>
15. BUCHFINK, Gabriela. *The Laser as a Tool*. 1. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
16. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. , 17 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
17. *Lasery a optika* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
18. ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
19. Historie vývoje laseru. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
20. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace* [online]. In: . 2002, s. 6 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/cvut/fjfi/lasery-a-jejich-aplikace-m9312-p1.html>
21. GaussianBeamWaist. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam#/media/File:GaussianBeamWaist.svg
22. *Lasery a optika* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
23. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Mega blog* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
24. Průmyslové aplikace. *Medicom* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove,aplikace>
25. *ASX Laser Cut Plus* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://asxlasercutplus.com/about-us/>
26. Laserové řezání. *TRUMPF* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/
27. KUSALA, Jaroslav. Lasery kolem nás. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k31.htm>
28. *Narran s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://narran.cz/aplikace-laseru/laserove-vrtani/?gclid=Cj0KCQiAyp7yBRCwARIsABfQsnTzxbnbSuXpgZ6e7AdtKWldiY_AD7myOW95ozVGbqICsIWFj5y01RlaAgTbEALw_wcB

29. Laserové navařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani.html>
30. Laserové navařování. *Lintech* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/ostatni-laser-podle-aplikace/laserove-navarovani>
31. Lasery pro vrtání. *LASCAM* [online]. 2016 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/lasery-pro-vrtani/>
32. Vrtání. *TRUMPF* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/vrtani/
33. Laserové značení a gravírování. *Lasery a Optika* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89>
34. Značení laserem. *SIC Venim* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.venim.cz/znaeni-laserem>
35. Značení laserem. *LIFTEC* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.liftec.cz/technologie/znaceni-laserem/>
36. Laserové značení a gravírování. *Narran* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://narran.cz/aplikace-laseru/laserove-znaceni-gravirovani/>
37. Popisování laserem. *TRUMPF* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/popisovani-laserem/
38. Laserové značení. *SIMAP* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://simap.cz/laserove-znaceni/>
39. TruLaser Cell 5030. *TRUMPF* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/3d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-cell-5030/?q=trulaser%205030
40. *Flow* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Stroje/Mach-500>
41. *Vanad* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://vanad.cz/cs/vse-ke-strojum/software-hardware/cadcam-software/lantek-nesting-software>
42. JANKOVÝCH, Róbert a Bohumil BUMBÁLEK. Výškové parametry textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
43. METELKOVÁ, Jitka. *POKROČILÉ METODY VYHODNOCOVÁNÍ TOPOGRAFIE POVRCHU* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86460. Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Miroslav Píška.
44. KARRER, Jean-Marc. La mesure des états de surface. [online]. 2005, s. 24 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf>

45. SLAVÍK, Josef. GCE, SPOL. S R.O. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Chotěboř, 2013, 28 s. Dostupné také z:
http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/05/68684/68684_nahled.htm
46. *CNC Delfin* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z:
<https://www.cncdelfin.cz/cnc-technologie>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
h	[J. s]	Planckova konstanta
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rz	[μm]	Největší výška profilu drsnosti
Sa	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka povrchu
v	[Hz]	Vlnová délka
ω_0	[mm]	Poloměr pasu svazku
θ	[μrad]	Úhel divergence (rozbíhavosti) svazku
λ	[nm]	Vlnová délka

Zkratka	Popis
BPP	Beam parametr product
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer numerical control
ČSN	Česká technická norma
dxf	Vektorový grafický formát – drawing interchange file format
EN	Evropská norma
M²	Difrakční faktor
NC	Numerical control
Nd	Neodym
Yb	Yterbium

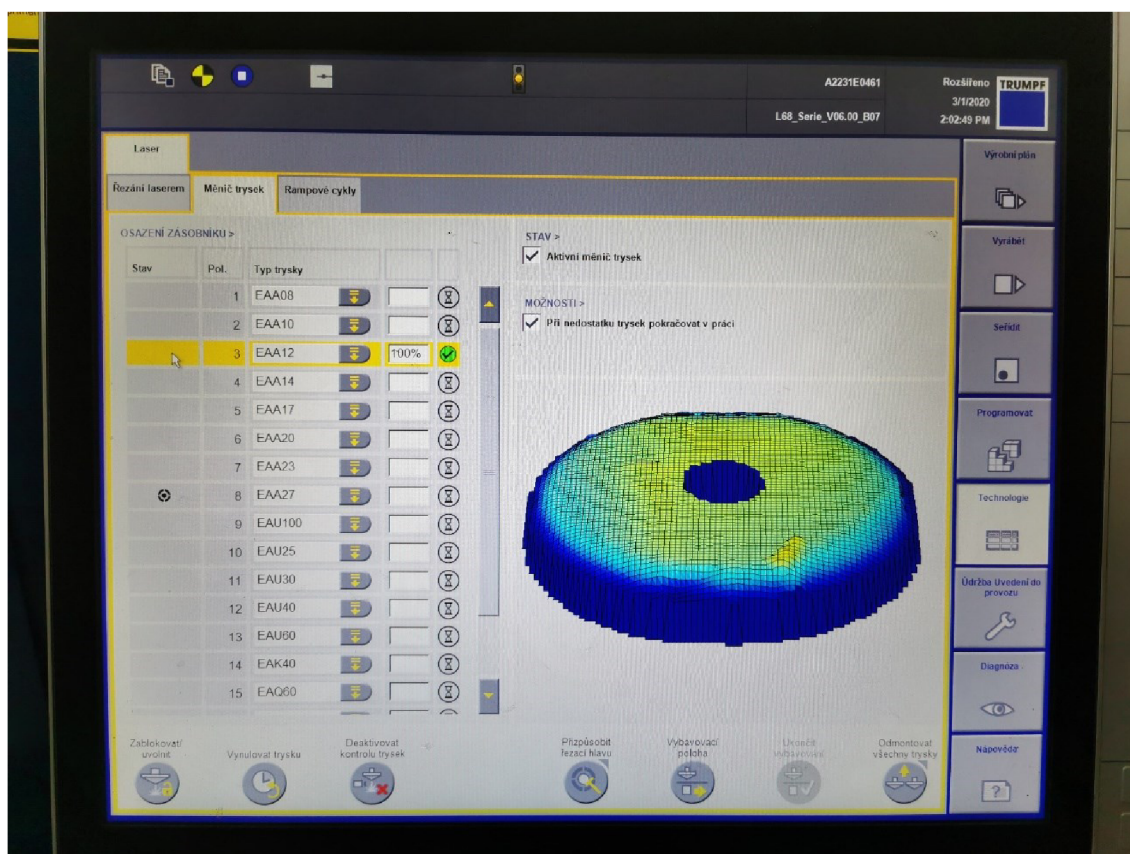
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Laser ve firmě SMR Plus s.r.o. určený pro dělení dutých profilů či pásovin.
- Příloha 2 Kontrola opotřebení trysky na ovládacím panelu laseru.
- Příloha 3 Kontrolní dokument pro korozivzdornou ocel AISI 304L tloušťky 5 mm.
- Příloha 4 Kontrolní dokument pro konstrukční ocel S235 tloušťky 10 mm.
- Příloha 5 Kontrolní dokument pro konstrukční ocel S355 tloušťky 15 mm.
- Příloha 6 Kontrolní dokument pro hliníkovou slitinu EN AW 1050A H24 tloušťky 3 mm.
- Příloha 7 Kontrolní dokument chemického složení abraziva pro vodní paprsek.



Příloha 1



Příloha 2



Kontrolní dokument pro korozivzdornou ocel AISI 304L tloušťky 5 mm.

		Type Inspection Certificate 3.1 AD-2000 EN10204 - QMS approved acc AD-2000 W0 with Cert 01 202 (IC-08 6131 by TÜV Rheinland (0035)) - Material acc. AD-2000 W2 - W10 in ref to EN10204-2 - Material conforming to IMCE MR0175MR0103 - ISO 15156 - II/ISO 15156-3		Number 10718348568 Issued On 14/05/2019	
Customer NEREZOVE MATERIALY, S.R.O. PRUMYSLOVA 1510 686 01 UHERSKE HRADISTE CZ		Consignes NEREZOVE MATERIALY, S.R.O. PRUMYSLOVA 1510 686 01 UHERSKE HRADISTE CZ		Delivery N° Of Delivery note n°	
Material 51800015 Description LXC 5,00 x 1250 x 2500 4307/304L		Norm/Grade EN10028-2 EN10088-4 ASTM A240 ASME SA240 ASTM A480 ASME SA480 Quality/Qualità X5CrNi18-10/X2CrNi18-9 WNR 1.4301/A 4307 304/304L		Order Nr 1191022219/420 Client Order OV442/2019 Client Date 6/05/2019	
Item 1 19EM002736 2 19EM002737		Heat Y181121D11 Y181121D11		Quantity 1475 KG 1460 KG	
Identification Nr Chemical Type Mark		Dimensional tolerances/ EN644-2		Steel Processing/ Electric arc furnace VOD/AOD, continuous casting, heat treatment (annealing at 1050°C, forced air cooling) Mark Tester/ - Organization inspection: CG3 Terms of Delivery/ - ASME norms acc. Sec. II Part A Ed. 2017	
Identification Nr 19EM002736 19EM002737		Chemical Type Product Product		Mark 19H9003506 19H9003506	
Identification Nr Test position Test direction		C (%) .020 .020		Si (%) .284 .284	
Identification Nr Test position Test direction		Mn (%) 1.069 1.069		P (%) .0249 .0249	
Identification Nr Test position Test direction		S (%) .0135 .0135		Cr (%) 18.046 18.046	
Identification Nr Test position Test direction		N (%) .0237 .0237		Ni (%) 8.022 8.022	
Identification Nr Test position Test direction		Rp 0.2 [N/mm²] 664 664		Rp 1 [N/mm²] 374 374	
Identification Nr Test position Test direction		ASD (%) 54.3 54.3		ASD (%) 54.3 54.3	
Identification Nr Test position Test direction		HRB B 86 86		HRB T 85 85	
Test Position/Posizione Prova B=Coil End C=Coil middle T=Coil head		Test Direction/Direzione Prova T=Transverse Direction L=Longitudinal Direction		Remarks about tensile test: - Renounced of counter signature agreed by TÜV Rheinland (01/03/2012)	
Remarks: - We certify that products listed above comply with order requirements - Document validated acc. EN 10204 par. 5 - Durability: NPD - Regulated Substances: NPD - Intended Uses: Building Constructions or Civil Engineering		Other controls: - Dimensions within tolerances, spectrometrical identity test OK - Corrosion Test EN ISO 961-2 Method A and ASTM A262 pract.E OK		0474 13  MARCEGAGLIA S.p.A. - Via S. Maria, 11 37030 - Verona - Italy EN 10088-4:2009	

ISD DUNAFERR

TEST REPORT

ISO 9001

Page 2 (2)

Modification 0

A03 Statement No.: 0027468862/000016

CHEMICAL INSPECTION		C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	C87	C88	C89	C90	C91	C92	C93	C94:			
		C	Mn	Si	S	P	N	Al	Cu	Cr	Ni	V	Nb	Ti	B	Ca	Mo	O	Zr	As	Sn	W	Co	Cev	st+2.5P			
Standard requirement min:	S235JR +N	0.17	1.40		0.035	0.035	0.012		0.550															0.35				
Standard requirement max:	S235JR +N																											
Contract requirement min:				0.030																				0.000				
Contract requirement max:																								0.090				
Charge chemistry	577548	0.12	0.72	0.011	0.014	0.012	0.004	0.049	0.049	0.095	0.042	0.001	0.001	0.001	0.0000		0.009			0.003	0.004			0.27	0.040			
Finished product chemistry																												

MECHANICAL INSPECTION	C10	TENSILE TEST										BENDING TEST					IMPACT TEST											
		C01	C02	C04	C11 Yield point		C12 Tens. N/mm ²	C13 Elongation				C14 Contr. %	C15 Reh/R m	C01	C02	C04	C51 Bend. rad. (mm)	C56 Bend angle	C52 Result	C44 Temp. °C	C01	C02	C04	C40-41 Type	C42 Impact 1 J	C42 Impact 2 J	C42 Impact 3 J	C43 Average J
					tip	N/mm ²		tip	%	tip	%																	
Standard requirement min:	S235JR +N		4		REH	235	360	A5	24.0																			
Standard requirement max:	S235JR +N						510																					
Contract requirement min:					REH	235	360	A5	24.0																			
Contract requirement max:							510																					
SAMPLE (No.)	90000763333 20207000017 90000763333 20207000018	5	4	1	REH	314	424	A5	33.8			0.74			5	4	1	0A	180	stf								

Code according to EN 10188:2004

C10 Shape of sample: The sample is a quadratic cross-section taken from sheet in every case.

C01 Sample taken from: 5 = beginning of coil; 6 = end of coil; 7 = middle of coil; 8 = other

C02 Direction of samples: 3 = L = lengthwise; 4 = T = cross; 5 = Z = diagonal

C04 Status of samples: 1 = rolled; 2 = annealed; 9 = normalised

D01 Marking and identification, surface properties, shape and dimension properties:

Marking and identification, control of surface properties, form and measure properties are completed, the product complies with the contract requirements.

Z01 The product complies with the contract requirements.

D51 Supplementary information:

1. Radioactivity: We verify that the produced and delivered products don't increase the radioactivity in environment, the radioactivity is under the normal value of 100 Bq/kg.

2. 1N/mm²=1MPa

Kontrolní dokument pro konstrukční ocel S235 tloušťky 10 mm.

Příloha 4

Kontrolní dokument pro konstrukční ocel S355 tloušťky 15 mm.

A01 ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Krakowie ul. Ujastek 1 30-999 Kraków 2021 Kraków, 09.05.2018		A02 SWIADECTWO ODBIORU 3.1 / INSPECTION CERTIFICATE 3.1 ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1 EN 10204		A03 1002279502 ArcelorMittal	
A06.1 Zamawiający: ul. Ujastek 1 30-999 Kraków 2021 Kraków, 09.05.2018		A07 Nr zamówienia / Identity No of purchase order/No der Bestellung 20180147		A08.3 LEVERAGE FH8CBBK081	
A06.1 ArcelorMittal Commercial CZ k.s. 719 00 Ostrava Kunice, Vratimovská 699/117, Republ. Czeska / Czech Republic / Tschechische Re		A08.1 Nr zlecenia/Manuf. Order No/Auftrag No 10784054		A08.2 Nr kontraktu/Contract No/Vertrag No PL/277839653/18-10784054	
A06.3 Odbiorca dokumentu kontroli. Recipient of a certificate. Empfänger eines Zertifikates:		A10 B&B COMMERCIAL ACTIVITY S.R.O. 130 00 PRAHA 3, ROHACOVA 188/37 Republ. Czeska / Czech Republic / Tschechische Re		A11 Nr środka transportu/Number of transport/Transportmittel-Nr SMY20M2 / SMY20P4	
B01, B04, B06-B11, B16 Blacha goracelowana w arkuszach grub.: 15,00 szer.: 1500,00 długość: 3000,00 gat.stal: S355J2+N gładka czarna niewyfradowana zabezpieczona: S01 Stan dostawy: walcowanie normalizujące +N Hot-rolled sheets thickness: 15,00 width: 1500,00 length: 3000,00 steel grade: S355J2+N plain black not pickled surf.prot.: no protection packaging: S01 Delivery condition: normalizing rolling +N		A12 Norma wymiarowa Tolerance standards Massnorm EN 10051:2010		Kod wyrobu Steel grade Produkt-Code S355J2+N HRSH	
B02 Norma przedmiotowa According Nach EN 10025-1:2004		Norma klasyfikacyjna Classification standards Materialform EN 10025-2:2004		Gatunek Steel grade Marke S355J2+N	
Specyfikacja Wyrobu - Product Specification - Produktdatenblatt: S355J2+N-CL1 EN10025-J2					
B07.1 Nr partii badanej - QM Batch No - WK Los Nr 040007454531		B07.2 Numer partii - Batch No - Los Nr B038994P02		Ilość sztuk - Number of pieces - Stückzahl 5	
NR PACZKI/PACKAGE NO / PARTENUMMER: B038994P02 C71-C92 Skład chemiczny - Chemical composition C93 = CEV		B07.3 Wypoc - Heat - Schmelze E879664		W[%] 0,0200 Ni[%] 0,002 As[%] 0,0036 Ca[%] 0,0036	
B07.1 Nr partii badanej - QM Batch No - WK Los Nr 040007454532		B07.2 Numer partii - Batch No - Los Nr B038994P03		Ilość sztuk - Number of pieces - Stückzahl 5	
NR PACZKI/PACKAGE NO / PARTENUMMER: B038994P03 C71-C92 Skład chemiczny - Chemical composition C93 = CEV		B07.3 Wypoc - Heat - Schmelze E879664		W[%] 0,0200 Ni[%] 0,002 As[%] 0,0036 Ca[%] 0,0036	
B07.1 Nr partii badanej - QM Batch No - WK Los Nr 040007454534		B07.2 Numer partii - Batch No - Los Nr B038994P04		Ilość sztuk - Number of pieces - Stückzahl 5	
NR PACZKI/PACKAGE NO / PARTENUMMER: B038994P04 C71-C92 Skład chemiczny - Chemical composition C93 = CEV		B07.3 Wypoc - Heat - Schmelze E879664		W[%] 0,0200 Ni[%] 0,002 As[%] 0,0036 Ca[%] 0,0036	

Příloha 6

Kontrolní dokument pro hliníkovou slitinu EN AW 1050A H24 tloušťky 3 mm.

Materiál (Material): BPL003001050AH24
tl. 3,00 mm; PLECH; EN AW-1050A H24; EN 573-3, EN-485-1+A1,-2,-4; Al 99,5; polotvrký
Rozměr (Dimension) [mm]: 1250x2500 mm
Množství (Quantity): 15,00 ks

Kupní smlouva (Contract): KS 1813633
Objednávka (Purchase order): OV-1586/18
Dodací list (Shipping document): DLV 1808010
Originální atest (OIC No.): 135845/2
Ze dne (Date): 24.04.2018
Původ zboží (Origin): PL

Mechanické vlastnosti (Mechanical properties)

Číslo šarže (Lot number)	Číslo tavby (Cast number)	Pevnost v tahu (Tensile strength) [Mpa]	Mez kluzu (Yield strength) [Mpa]	Tažnost (Elongation) [%]	Tvrдость HB (Hardness)
07190804	07190804	115	105	A0=11	

Chemické složení (Chemical composition)[%]

Prvek (Element)	Silicon Si	Iron Fe	Copper Cu	Manganese Mn	Magnesium Mg	Chromium Cr	Zinc Zn	Titanium Ti	Aluminium Al
Hodnota (Content)	0,05	0,28	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	

Poznámka (Note):

Kontrolní dokument s chemickým složení abraziva pro řezání vodním paprskem.

CERTIFICATE OF ANALYSIS

P.O NO.		Invoice NO. A1001-1
Customer Name	Unicom Power, Ltd.	Date: 9/08/2017
Mesh	80 mesh	Sample Analyzed
Packing	1 ton jumbo bag	Batch NO.: 17H885-1
Type:	Red Garnet	Quantity: 135Tons

We hereby certify the garnet with Batch Number 17H885-1 is having the following results of our analysis:

Average Chemical Composition (Typical-wt%)

SiO ₂	38,00%
Al ₂ O ₃	21,00%
FeO	29,00%
Fe ₂ O ₃	3,00%
TiO ₂	0,80%
MnO	1,10%
CaO	2,00%
MgO	4,00%

Mineral Composition (Typical)

Almandine Garnet	92,00%
Ilmenite	0,80%
Quartz	0,50%
Hornblende	0,20%
Others	0,40%

Product Range (Size Distrubution,Typical)

Physical Characteristics (Typical)

Bulk Density	1,95
Specific Gravity	3,96
Hardness (moh)	7,65
Melting Point	1300 C
Shape Of Natural Grains	Sharp Angular

Mesh	Microns	Retained %
35	500	0
40	425	0,06
60	250	29,2
80	180	38,7
100	150	15,05
120	125	14,63
PAN		2,36

Other Characteristics (Typical)

Conductivity	<20ppm
Total Chlorides	<20ppm
Radioactivity	Not detectable
Moisture Absorption	Non-hygroscopic inert
Ferrite (free iron)	< 0.01 %
Lead	< 0.002 %
Copper	< 0.01 %
Other Heavy Metals	< 0.01 %
Sulphur	< 0.01 %

Packaging

1 ton jumbo bag



The garnet is in accordance with ISO 11126-10 and was tested in accordance with ISO 11127 Part 1 to Part 7.