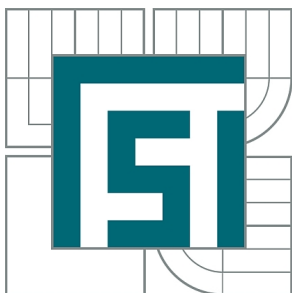


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH HRAN PŘI LASEROVÉM DĚLENÍ KOVŮ YB-YAG LASEREM

MEASUREMENT OF CUTTING EDGE ROUGHNESS IN THE PROCESS OF LASER METAL
CUTTING USING THE YB-YAG LASER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR MAŇAS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Maňas

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

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem

v anglickém jazyce:

Measurement of cutting edge roughness in the process of laser metal cutting using the Yb-YAG laser

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Změření drsnosti řezných hran ocelových plechů v rozsahu tlouštěk 1 - 20 mm při tavném a oxidačním způsobu řezání. Srovnat s údaji v ČSN EN ISO 9013.

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si základy laserového dělení materiálů na nových typech laserových řezných centrech.
Osvojit si základy měření drsnosti.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
2. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
3. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

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

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

MAŇAS Petr: Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG

Projekt vypracovaný v rámci bakalářského studijního programu B-STG Strojírenská technologie (2303R002) vyhodnocuje drsnost vzorků řezných hran laserového řezání. Řezání provedeno na vláknovém Yb:YAG laseru. Vzorky se skládaly z konstrukčních ocelí J235JR a DC01, nerezové oceli X5CrNi18-10 a hliníkové slitiny AlMg3. Byly vyhodnoceny dle normy ČSN EN ISO 9013. Zařazení vzorků do tříd přesnosti dle normy.

Praktické části předchází popis obecných metod dělení, základní princip laserového řezání a jeho typy. Uvedeny řezné parametry a jejich vliv na kvalitu s následnými vadami. Je popsáno měření drsnosti a norma ČSN EN ISO 9013.

Klíčová slova: Laserové řezání, dělení materiálu, drsnost povrchu, Yb-YAG laser, ČSN ISO 9013

ABSTRACT

MAŇAS Petr: Measurement of cutting edge roughness in the process of laser metal cutting using the Yb-YAG laser

The project elaborated in frame of bachelor's degree program B-STG ("Mechanical Engineering Technology", 2303R002), evaluates the roughness of samples of cutting edge laser cutting. Cutting performed the fiber Yb:YAG laser. The samples consisted of structural steel J235JR and DC01, stainless steel X5CrNi18-10 and aluminium alloys AlMg3. They were evaluated according to the ČSN EN ISO 9013 standard. The classification of samples into classes according to the standards of accuracy.

The theoretical part is consists of a description of the methods of cutting, a basic principle of the laser and its types. It includes cutting parameters and their influence on the quality of subsequent defects. It is described roughness measurement and standard ČSN EN ISO 9013.

Keywords: laser cutting, material cutting, surface roughness, Yb-YAG laser, ČSN ISO 9013

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAŇAS, Petr: *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem*. Brno, 2014. 46 s., 3 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 30. 5. 2014

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za poskytnutí norem a v neposlední řadě také své rodině.

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

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografické citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod.....	10
1 Druhy metod dělení	11
1.1 Dělení třískovými metodami.....	11
1.2 Dělení tvářecími metodami	12
1.3 Dělení tepelné.....	13
1.3.1 Řezání autogenem.....	13
1.3.2 Řezání plazmou.....	14
1.3.3 Řezání svazkem elektronů	16
1.3.4 Řezání laserem.....	16
1.4 Řezání vodním paprskem.....	17
1.5 Řezání elektroerozivní	18
1.6 Dělení ultrazvukem a explozí.....	19
2 Typy laserů využívaných pro dělení	20
2.1 Plynové lasery	20
2.1.1 CO ₂ laser	21
2.1.2 Excimerový laser	21
2.2 Pevnolátkové lasery	22
2.2.1 Nd:YAG laser	23
2.2.2 Diskový laser	23
2.2.3 Vláknový laser	24
2.3 Polovodičové lasery	25
3 Princip laserového dělení materiálů.....	26
3.1 Tavný režim	26
3.2 Oxidační režim.....	27
3.3 Sublimační řezání.....	27
3.4 MicroJet metoda.....	27
3.5 Vznik vroubkování řezné hrany	28
3.6 Řezné parametry.....	28

3.7	Vady řezu	31
4	Metody měření drsností	32
5	Norma ČSN EN ISO 9013	34
5.1	Drsnost	34
5.2	Kolmost	35
5.3	Jakost povrchu	35
5.4	Rozměrové úchytky	36
6	Měření drsností vzorků drsnoměrem	37
6.1	Zástupce konstrukční oceli běžné jakosti	37
6.2	Zástupce konstrukční hlubokotažné oceli	38
6.3	Zástupce nerezové oceli	38
6.4	Zástupce hliníkové slitiny	39
6.5	Měření drsnosti	40
7	Zařazení změřených drsností do tříd dle ČSN EN ISO 9013	42
7.1	Zhodnocení vzorků konstrukčních ocelí	42
7.2	Zhodnocení vzorků korozivzdorné oceli	43
7.3	Zhodnocení vzorků z hliníkové slitiny	44
	Závěry	46
	Seznam použitých zdrojů	
	Seznam použitých symbolů a značek	
	Seznam tabulek	
	Seznam příloh	
	Seznam obrázků	

ÚVOD

Řezání laserem dnes již neodmyslitelně patří k průmyslovým aplikacím pro dělení materiálu. Laserová technika nahrazuje konvenční způsoby dělení, dochází ke stále rychlejšímu rozvoji laserových pálicích a svařovacích center a nachází uplatnění i v dalších odvětví průmyslu. Namátkou: laserové operace v lékařství, pájení čipů elektronických obvodů, přenos informací v komunikační technologii, kalibrace měrek pro metrologické účely, systémy navádění pro letectví a kosmonautiku, analýzy chemického složení vzorků ve spektroskopii a jiné. Tento fenomén pronikl již do všech odvětví lidské činnosti pro své specifické výhody, a to za pouhé půlstoletí své existence.

V dnešní době nastupuje nová generace průmyslových pevnolátkových laserů typu Yb:YAG s novými možnostmi výroby, vyššími výkony a neobvyklou účinností. Pro tuto novou generaci laserů je pak důležité změřit drsnosti řezných hran, která je důležitým parametrem takto zpracovávaného výrobku. A právě tímto úkolem se zabývá tato bakalářská práce. Zlatým hřebem je zařazení vyhodnocených vzorků do tříd přesnosti podle normy ČSN EN ISO 9013.

Na obrázku č. 1 [19], [27], [40] je znázorněn proces řezání laserovou technologií.



Obr. č. 1 Příklady ilustrující laserové řezání [19], [27], [40]

TEORETICKÁ ČÁST

1 DRUHY METOD DĚLENÍ [30], [37]

Dělením materiálu se rozumí proces, při kterém se část z materiálu dělí na několik menších částí. Touto operací začíná zpracovávání polotovaru v konečný výrobek, v mnoha případech je i operací konečnou. Ve strojírenském prostředí při zpracovávání zejména kovových materiálů lze rozlišovat dělení podle různých hledisek. Vzhledem k teplotě vstupního materiálu se jedná o dělení za studena a za tepla, pokud je kritériem tvorba třísek při dělení, hovoří se o třískovém nebo beztrískovém dělení.

Následující kapitoly pojednávají o dělení třískovým, tvářecími metodami, o dělení tepelném, dělení elektroerozivním a za pomoci vysokotlakého vodního paprsku. Doplňkovou kapitolou je dělení s pomocí ultrazvuku a explozí.

1.1 Dělení třískovými metodami [30], [34], [43]

Charakteristickým znakem pro třískové dělení je tříska, která ve formě úlomků děleného materiálu představuje odpadový produkt této technologie. Základní metody třískového dělení jsou: řezání, upichování, rozbrušování. Jedná se o nejpoužívanější metody při dělení tyčí a trubek. Dělí se na:

- **řezání**
- **upichování**
- **rozbrušování**

Řezání je rozlišeno na strojní a ruční metody. Materiál obrobku je oddělován úběrem třísek jemnozubým nástrojem - pilovým listem. Listy se zhotovují z oceli nástrojové uhlíkové nebo legované. Zuby listu jsou zakalené, v případě bimetalických listů je funkční část navařena na část nosnou. Strojní forma řezání je realizována na okružních, rámových nebo pásových pilách – viz obrázek č. 2 [52]. Řezat materiál lze jen o určité tvrdosti, jinak se musí předem vyžehat. Mezi výhody patří hladký a kolmý řez s přesnou hmotností nařezaného polotovaru. Nevýhodou je jistá ztráta materiálu ve formě třísek, jež závisí na šířce pily.



Obr. č. 2 Pásová pila [52]

Při **upichování** je dělení prováděno na upichovacích automatech nebo univerzálních soustruzích. Tato metoda se používá jen v kusové výrobě, především pro svou hlavní nevýhodu, jež spočívá ve značných ztrátách materiálu ve formě třísek. Mezi výhody lze pak zmínit hladce obrobenou plochu v porovnání s jinými formami dělení a přesné rozměry polotovarů. Nedochází ke stlačení a tedy ve vnášení dalších zbytkových napětí.

Nástrojem pro **rozbrušování** je tenký řezací kotouč. Operace je prováděna na rozbrušovacích bruskách nebo úhlovými bruskami. Kotouče jsou zhotoveny z karbidu křemíku (SiC) nebo syntetického korundu (Al_2O_3). Vzhledem k širému pásu tepelně ovlivněné oblasti, velkým ztrátám materiálu v podobě třísek, energetické náročnosti a deformaci materiálu v místě řezu je tento způsob dělení využíván pouze tehdy, kdy nelze uplatnit jiný způsob dělení (např. v terénu, při záchranných pracích).

1.2 Dělení tvářecími metodami [25], [43], [53], [54], [65],

Obecně je tento způsob dělení známý pod pojmem stříhání, neboť se jedná o nejrozšířenější metodu dělení plechu. Ovšem v širším slova smyslu lze ke stříhacím metodám přiřadit i jiné způsoby, jak dělit materiál za pomoci přetváření materiálu. Základními technologiemi jsou:

- **Lámání**
- **Sekání a vysekávání**
- **Stříhání**

Pro **lámání** operace se k dělení se používají speciální lámací stroje. V přípravné operaci se místo lomu polotovaru nahřívá kyslíko-acetylenovým plamenem, což má za následek vznik vrubu a zmenšení plochy průřezu v daném místě. Poté se polotovar zaveze do lámacího stroje, kde je zlomen. Použití nachází jako dělení polotovarů pro tváření za tepla.

Mezi nevýhody patří neschopnost dělit měkčí materiály, než ty s mezí pevnosti pod 600 MPa. Materiál by se pouze ohnul. Nepříznivě se jeví i nízká kvalita lomové plochy, vzniku trhlin a jejich šíření materiálem.

Postupné **prosekávání** vnějších tvarů a otvorů v materiálu. V ruční podobě se používá relativně málo, nachází však uplatnění u volného kování odsekáváním přebytečného materiálu na konci výrobku. Pro ruční formu je nástrojem sekáč. Nevýhodou je nerovná plocha po dělení, vysoká fyzická námaha a nízká produktivita. Ve strojní formě je využito bucharu nebo lisu.

Další formou sekání je **vysekávání**, tj. oddělování součástí podél uzavřené křivky vysekávací raznicí proti tvarově shodné matici. Lze prosekávat plechy až do tloušťky 8 mm, různé materiály i velmi složité tvary výrobku. Jedná se o formu beztržiskového dělení materiálu v průmyslu hojně využívanou například pro gumová a klingeritová těsnění. Dřívější pohon vysekávacích strojů obstarával klikový lis, který postupně nahradil lis

hydraulický. V dnešní době se vyskytují i v kombinaci s laserovým pálicím centrem,

která využívá výhody obou technologií - vysokých řezných rychlostech laseru pro obrysové profily a vysoké rozměrové přesnosti prosekávacího stroje pro vnitřní díry. Je možná i kombinace s tvařecími technologiemi. Na obrázku č. 3 [7] je ilustrován proces vysekávání na vysekávacím stroji.

Stříhání je nejrozšířenější technologií z tvářecích metod. Jedná se o beztržiskové dělení materiálu, při kterém se materiál odděluje dvěma podélnými břity ve tvaru klínu. Je základní operací při dělení jak tyčového materiálu, tak i plechů, polotovarů, výkovků, svařenců apod.



Obr. č. 3 Vysekávání dílců na vysekávacím stroji [7]

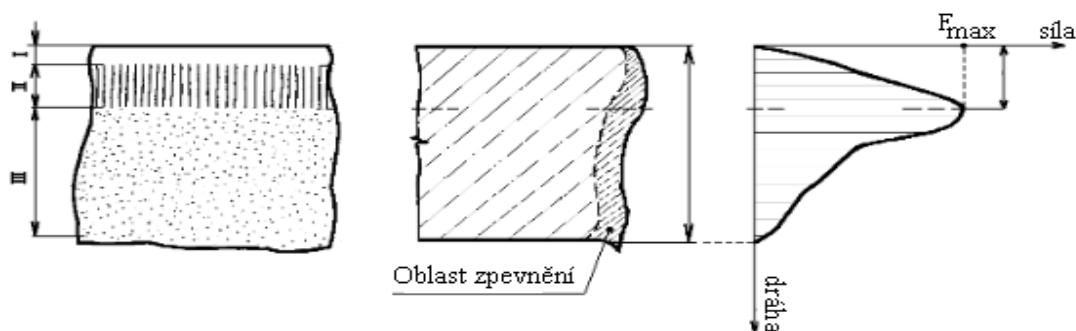
Rozlišuje se podle stádia výroby na:

- **přípravu polotovarů** - stříhání tabulí plechu, dělení svitků, stříhání profilů a apod.
- **vystřihování součástek z plechů** - vystřihování tvaru polotovaru jako konečná součást nebo jako polotovar pro další operace (ohýbání, tažení, protlačování). Vystřižená část tvoří výstřižek.
- **pro dokončovací a pomocné operace** - děrování, prostřihování, ostřihování, přistřihování, přesné stříhání atd.

Stříhání plechu je aplikováno na nůžkách (ruční, pákové, tabulové, křivkové, s paralelními noži), gumou nebo ve stříhadlech - pro děrování, vystřihování, přesné stříhání aj. Stříhání tyčí se provádí za pomoci otevřeného nebo uzavřeného nože, popřípadě vyvozením napjatosti v místě stříhu, dělení trubek bočním nožem nebo kotoučovými noži.

Měkké oceli do pevnosti zhruba 400 MPa a plechy se stříhají za studena. Materiály nad hodnotou pevnosti 400 MPa se stříhají výlučně nad teplotou 700° C. Výhodou je vysoká produktivita, nejsou zde ztráty ve formě třísek, v neposlední řadě se jedná o lacinější řešení v porovnání s třískovým obráběním.

Oproti němu je však dosaženo několikanásobně horší kvality střížné plochy a rozměrové přesnosti, jak je patrné z profilu stříhu na obr. č. 4 [25]. Tato hlavní nevýhoda lze eliminovat použitím metod, jako je např. stříhání zaoblenou střížnou hranou nástroje, použitím zkoseného přidržovače, přistřihováním, kalibrováním, reverzním stříháním či za použití přesného stříhání s tlačnou hranou.



Obr. č. 4 Profil střížné hrany a průběh síly při stříhu [25]

1.3 Dělení tepelné [37], [42]

Pod pojmem tepelného dělení lze chápat technologii řezání, pracující na principech lokálního tavení, spalování nebo odpařování děleného materiálu, případně kombinací těchto metod. Energie vnášená do procesu řezání pro inicializaci a průběh je dodávána různými tepelnými zdroji. Prvními materiály řezané tepelným procesem byly nelegované oceli, postupem času za pomoci elektrického oblouku již bylo možno řezat všechny elektricky vodivé materiály a s nástupem laserových technologií již lze řezat prakticky všechny druhy materiálu s jakýmkoliv chemickými, mechanickými nebo fyzikálními vlastnostmi.

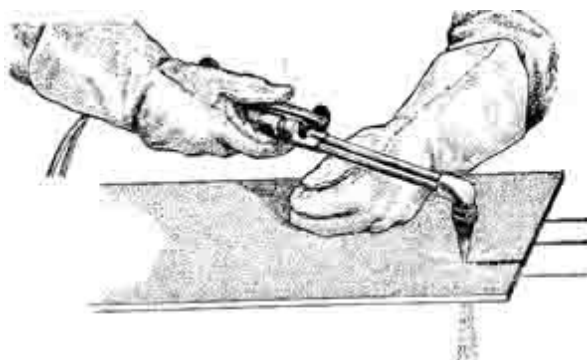
1.3.1 Řezání autogenem [33], [37], [42], [45]

Autogen, nebo-li řezání plamenem, patří mezi tavné metody dělení. Zdrojem tepla je spalování železa v přiváděném kyslíku, Směs je tvořena oxidační složkou směsi, jež tvoří kyslík, a hořlavého plynu C_2H_2 . C_2H_2 může být nahrazen jiným hořlavým plynem, např. vodíkem, propanem nebo svítiplynem.

- ✓ Charakteristika **kyslíku** - chemická zn. O_2 , bezbarvý plyn bez zápachu, nehořlavý avšak hoření podporuje. Kyslík je přepravován v tlakových lahvích označených modrým pruhem (technický), hrdlo bílé. Plnicí tlak je v rozmezí 20-30 MPa. Získává se destilací zkapalněného vzduchu nebo hydrolýzou vody. Čistota pro řezání minimálně 99,2 %.
- ✓ Charakteristika **acetylenu** - chemická zn. C_2H_2 , bezbarvý plyn se silným zápachem po česneku (technický), je hořlavou složkou směsi s kyslíkem. Je přepravován v lahvích s vnitřní pórovitou strukturou napuštěnou acetonem. Lahve jsou označeny hnědým pruhem, hrdlo stejné barvy. Maximální plnicí tlak 2,5 MPa. Vyrábí se rozkladem karbidu vápníku vodou ve vyvíječích.

Vlastní způsob řezání spočívá v předehřevu řezaného materiálu předehřívacím plamenem na teplotu přibližně $1100^\circ C$. Přednostně se využívá hran, ořepů nebo výstupků na materiálu. Poté je hořákem přiváděn kyslík do místa řezu se snižující se dodávkou hořlavého plynu, utvoří se plamen spalující řezaný kov živěný přiváděným kyslíkem. Materiál je spalován v úzkém pruhu, vzniká řezná spára. Natavený kov je tlakem kyslíku vyfukován, část ho ulpívá na hranách řezu. Produktem spalování jsou oxidy a malá část roztaveného železa.

Řezání plamenem se vyznačuje dlouhou tradicí, je nezastupitelné v opravárenství, topenářství a instalatérství obecně, klempířství, autoopravnách. Znázornění je na obrázku č. 5 [33]. Kromě běžného **řezání kyslíkem** lze řezat ještě následujícími metodami: drážkování kyslíkem, hoblování oceli kyslíkem, řezání pomocí prášku a kyslíku, řezání kyslíkem a elektrickým obloukem.



Obr. č. 5 Znázornění řezání plátu plechu autogenem [33]

Jedná se o lacinou a na oceli dobře aplikovatelnou metodu řezání, jež je její hlavní výhodou. Lze řezat materiál v libovolné poloze i v těžko dostupných místech ručně i strojně. K nevýhodám se řadí nutná řemeslná zručnost, široká tepelně ovlivněná oblast, vnášení velkých zbytkových napětí do materiálu a následné deformace, velká drsnost řezaných hran, nekvalitní povrch. Lze řezat pouze oceli.

1.3.2 Řezání plazmou [24], [37]

Pojem **plazma** je datován do roku 1923 I. Langmuirovi jako speciální stav plynů. Principem plazmy je ionizace plynů (mechanická či tepelná), při které dochází k uvolňování elektronů z materiálu, jež v tomto prostředí vedou elektrický proud. K ionizaci plynu se široce používá elektrický oblouk. **Hořákem** je dále přiváděn stabilizační plyn, jenž je částečně vzniklou plazmou ionizován, neionizovaná část plynu stabilizuje plazmový paprsek. Vlastní řezání je realizováno následující posloupností: Na počátku řezání je za pomoci **vysokofrekvenčního ionizátoru** zapálen pilotní oblouk. Pilotní oblouk hoří mezi **elektrodou** (wolframovou, zirkonovou, hafniovou) a **kovovou hubicí** po dobu 6-10 s pro zajištění ionizace prostoru mezi elektrodou a vlastním řezaným materiálem. V takto připravených podmínkách se zapálí hlavní řezací oblouk. Maximální

řezná tloušťka řezaného materiálu je do cca 250 mm. Zvýšeným tlakem stabilizačního plynu se z místa řezu odstraňuje natavený kov.

Podle stabilizovaného plynu jsou plazmy děleny na:

- **vzduchovou**
- **plynovou**
- **dusíkovou v kombinaci s vodou**
- **kyslíkovou**

Vzduchová plazma je velmi rozšířená pro řezání nelegovaných a středně legovaných ocelí, je ekonomicky vhodná do řezané tloušťky 40 mm. Pro stabilizaci a chlazení hořáku je použit stlačený vzduch o tlaku 0,4-0,8 MPa. Kvalita řezu je průměrná, rychlost řezání vysoká.

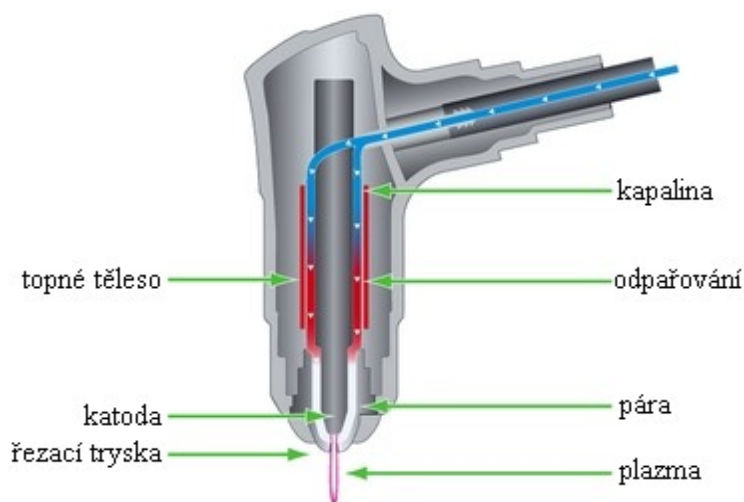
Plynová plazma využívá plynu Ar + H₂. Je využívána především pro řezání vysokolegovaných ocelí, niklu, molybdenu, mědi a jiných kovů. Vodík může být nahrazen dusíkem nebo použita tří-složková směs pro chlazení a stabilizaci plazmy. Vyznačuje se vysokou kvalitou řezu avšak nižší rychlostí řezání, zvláště u tloušťky materiálu nad 35 mm.

Kyslíková plazma je obdobou vzduchové. Oproti ní má výhodu v oxidaci spodní hraně řezu, jež jí zajišťuje vyšší čistotu. V omezené míře dochází ke spalování materiálu kyslíkem, avšak řezy jsou čisté, bez oxidů, kvalita řezu je vysoká s jemnou strukturou povrchu. Rychlost řezání kyslíkem je vysoká.

Pro řezání velkých tloušťek vysokolegovaných ocelí je používána **dusíková plazma s injekčním přívodem vody**. Voda, použitá jako chladivo hořáku, je přiváděna k okrajovým vrstvám plazmového paprsku. Dochází k ochlazování hořáku, disociaci vody pak k zúžení plazmového paprsku a zvýšení jeho teploty. Kvalita řezaných ploch je na vysoké úrovni, zvláště její kolmost, rychlost řezání je také vysoká. Lze kombinovat i s vodní sprchou nebo řezáním pod vodou (po zapálení nad hladinou). Znázornění injekčního přívodu vody je na obr. č. 6 [24]

Mezi hlavní výhody patří řezání jakéhokoli kovového vodivého materiálu, omezeně i elektricky nevodivé, vysoké rychlosti řezání pro tenké a střední tloušťky (9-12 m·min⁻¹), snadná automatizace a mechanizace, snížení vneseného tepla do materiálu a z toho pramenící menší šíře tepelně ovlivněné oblasti a deformace.

K nevýhodám pak nutno započítat vysoké pořizovací náklady, intenzivní UV záření, vysoká hladina hluku (80-100 dB), vývin dýmů, par kovů, ozón, úhel řezné hrany je větší a horní hrana je oblejší v porovnání s řezáním kyslíkem.



Obr. č. 6 Schéma plazmové řezací hlavice s injekčním přívodem vody [24]

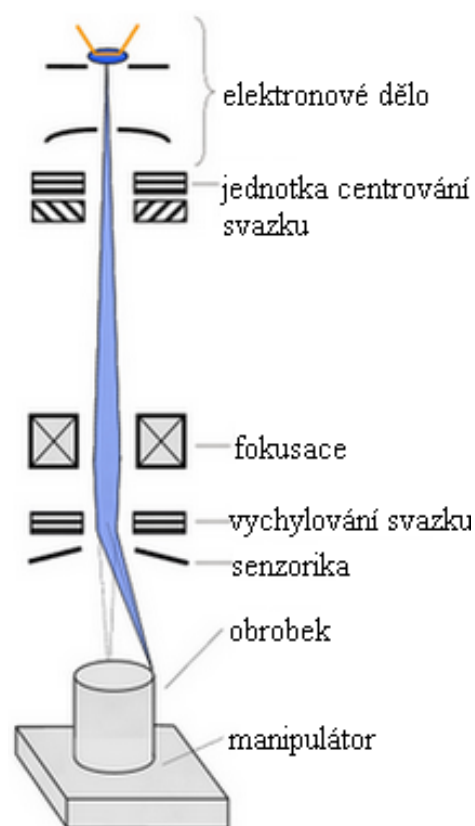
1.3.3 Řezání svazkem elektronů [37], [51]

První aplikace **fokusem svazkem elektronů** byly uskutečněny již v padesátých letech minulého století. Jedná se o další z procesů tavného dělení materiálu. Kinetická energie rychle letících elektronů se mění na tepelnou při dopadu na řezaný materiál. Svazek elektronů je pak koncentrovaným zdrojem energie.

Princip činnosti. Zdrojem elektronů je válcová **vakuová nádoba s emisí elektrodou** na jednom konci (katoda), na druhém konci s **clonou** a **hranolem pozorovací optiky**. Zde je pak umístěna anoda. K tomuto elektronovému dělu dále přísluší **magnety fokusace** a **magnety vychýlení paprsku**. Celý proces je pak realizován ve vysokém vakuu (až $5 \cdot 10^{-4}$ Pa) zamezující rozptylování paprsku, tepelné a chemické izolaci elektrody a zamezení vytváření oblouku mezi elektrodami. Na obrázku č. 7 [51] je pak schéma samotného zařízení.

Elektron je nejmenší elektricky nabitá částice a lze ji elektrickým polem urychlit na vysokou rychlost, jež může činit až 75% rychlosti světla. Toto urychlení je realizováno vysokým napětím mezi katodou a anodou, čímž získá potřebnou kinetickou energii. Fokusací svazku elektronů fokusační magnety se zamezuje rozbíhavost vlivem odpuzivých sil záporného náboje elektronů, na místo dopadu jsou pak usměrňovány za pomoci vychylovacími magnety. Při dopadu se zhruba 70% elektronů odrazí, zbylé elektrony pronikají do materiálu, kde se jejich kinetická energie mění v tepelnou. Během několika μs se materiál začne tavit, teplota překročí teplotu varu kovu a vytvoří se úzká kapilára. Přes taveninu pronikají další elektrony a proces pokračuje, dokud se celý materiál neprotaví skrz řezaným materiálem.

K výhodám patří úzká natavená oblast, z toho plynou minimální deformace, řezání širokého sortimentu materiálů, vysoký stupeň automatizace. I tato metoda má však své nevýhody, jako například vysoké nároky na čistotu povrchu, nutnost vakua a dlouhý čas jeho čerpání, v neposlední řadě také vysoké investiční náklady samotného zařízení.



Obr. č. 7 Schéma elektronového řezacího zařízení [51]

1.3.4 Řezání laserem [10], [37]

Pojmenování LASER vyplývá z jeho počátečních písmen - **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, v překladu zesílení světla stimulovanou emisí záření. Jedná se o optický zdroj elektromagnetického záření. Předchůdcem LASERu byl MASER (z anglického **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation).

Historicky se děj laseru začíná odvíjet počátkem 20. století, kdy M. Planck, N. Bohr a A. Einstein zformulovali základní zákony kvantové elektroniky. Roku 1917 A. Einstein popsal podstatu vynucené emise záření, avšak první experimentální problémy byly překonány až v roce 1954, kdy byl sestaven první generátor v oblasti centimetrových vln. Tento tzv. MASER je předchůdcem laseru. První laserový efekt se povedl roku 1960 T.

Maimanovi v krystalu syntetického rubínu. Od tohoto data pronikají aplikace laseru všemi oblastmi lidského počínání, od fyzikálních aplikací a měření délek přes aplikace v medicíně, přenosu informací a holografie až po technologické využití ve strojírenství a vojenské technice.

Emisní záření, jež je vyvoláno stimulací elektronů, je elektromagnetickým zářením o jedné vlnové délce. Je podstatou principu laseru. Záření je převeden v paprsek, jehož znakem je malá rozbíhavost, čímž ho lze zaostřit na velmi malou plochu. Vysoká koncentrace energie v paprsku dává předpoklady k dělení jakéhokoliv materiálu bez ohledu na jeho tepelné, fyzické a chemické vlastnosti. Po dopadu laserového svazku fotonů na povrch je materiál v úzké zóně natavován a tím dochází k řezání. V případě přivádění pracovního plynu pod tlakem k řezné spáře je tavenina vyfukována. Podle metody řezání je rozlišováno na **tavné**, **oxidační** nebo **sublimační** řezání. Celý proces po zautomatizování lze řídit robotizovaným nebo automatizovaným systémem. K dělení materiálu jsou v dnešní době nejčastěji používány plynové CO₂ lasery a Nd: YAG lasery. CO₂ lasery má majoritní zastoupení, je však trend v jejich nahrazování Nd: YAG lasery nebo lasery diodové a lasery excimeové.

Laser je adaptivní s rychlou změnou technologie, snadná automatizace, provoz je čistý a tichý, zplodiny lze účinně odsávat, tepelně ovlivněná oblast materiálu je minimální, lze řezat všechny technické materiály, vysoké řezné rychlosti v řádu desítek m·min⁻¹, vysoká přesnost řezání v intervalu 0,05 až 0,1 mm na 1 m délky, velmi dobrá kvalita řezných ploch s drsností cca Ra 1,6, a to rovnoměrně na celé řezné ploše včetně rohů, úzká řezná spára, lze uskutečnit i prostorové 3D řezy, jak je vyobrazeno na obr. č. 8 [49]. Za nevýhody lze zmínit snad jen vysokou pořizovací cenu.



Obr. č. 8 3D řezání laserem [49]

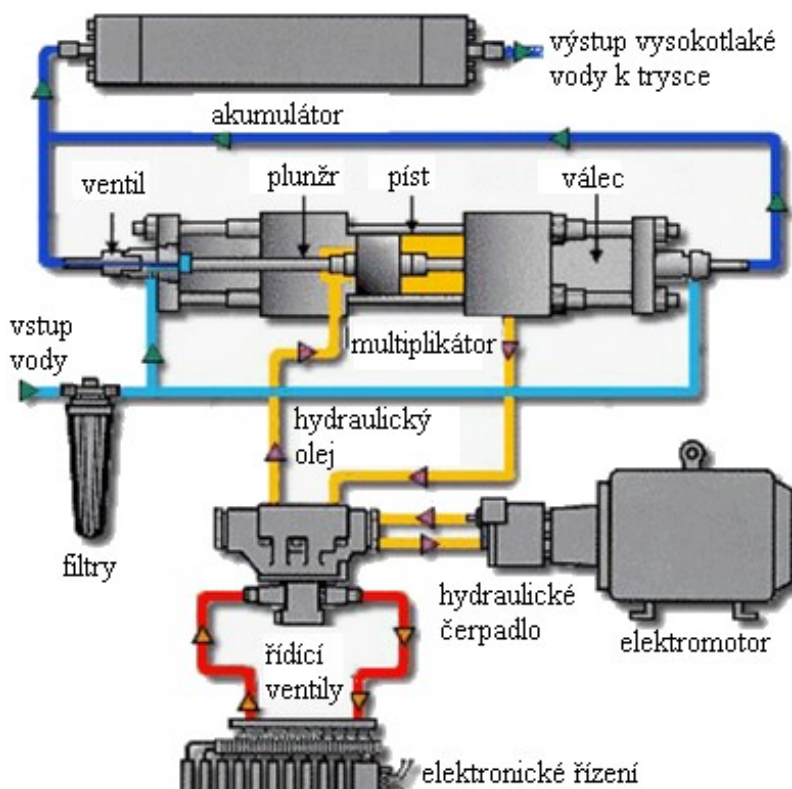
1.4 Řezání vodním paprskem [35], [37]

Metoda dělení tepelně neovlivňující materiál. Prvním úspěšný pokus byl proveden v roce 1978 v USA. Principem řezání je vodní paprsek o extrémně vysokém tlaku (až 400 MPa), jež mu uděluje **tlaková pumpa**. Voda je po tlakové pumpě vedena dále přes **filtr**, **intenzifikátor**, **směšovačem abrazivních přísad** do **řezací dýzy**, která prouděním přes tuto dýzu vytváří paprsek vodního sloupce o průměru 0,50 až 0,76 mm. Rychlost proudění paprsku přes dýzu je závislá na velikosti dýzy a tlaku, může přesahovat dvojnásobek rychlosti zvuku. Samotná rychlost řezání se obecně pohybuje od milimetrů až po jednotky metrů za minutu. Na obrázku č. 9 [35] je znázorněno schéma zařízení pro produkci vodního paprsku.

Vodním paprskem lze řezat prakticky jakýkoliv materiál, velkým přínosem je absence škodlivin. Měkké materiály, plastické látky, polykarbonáty, vyztužené polymery nebo čistou vatu lze řezat čistou vodou bez přísad. Naopak materiály s vysokou tvrdostí nebo tvrdostí lze řezat pouze vodním paprskem s přísadou abrazivních přísad. Mezi tyto materiály patří vysokopevnostní ocele, sklo, keramika, beton. Metoda je vhodná i pro řezání v potravinářském, textilním, gumárenském průmyslu, v elektrotechnice lze takto vyřezávat i tištěné spoje.

Metoda s sebou nese mnoho výhod, k nimž patří: vysoká přesnost řezání, minimální deformace řezaných částí, čisté řezné plochy zakončené ostrými hranami, nízké provozní náklady, možnost více řezacích pracovišť s jednou centrální tlakovou jednotkou, minimální ztráta materiálu, absence škodlivin a tepelně ovlivněné oblasti materiálu, nízká hodnota prašnosti, jednoduchá možnost automatizace a nízká hlučnost.

Množství výhod je však vykoupeno i nevýhodami, jež obnáší vysoké pořizovací náklady na zařízení, relativně nízká rychlost řezání a nízká životnost řezacích trysek. Nezanedbatelná je i hlučnost.



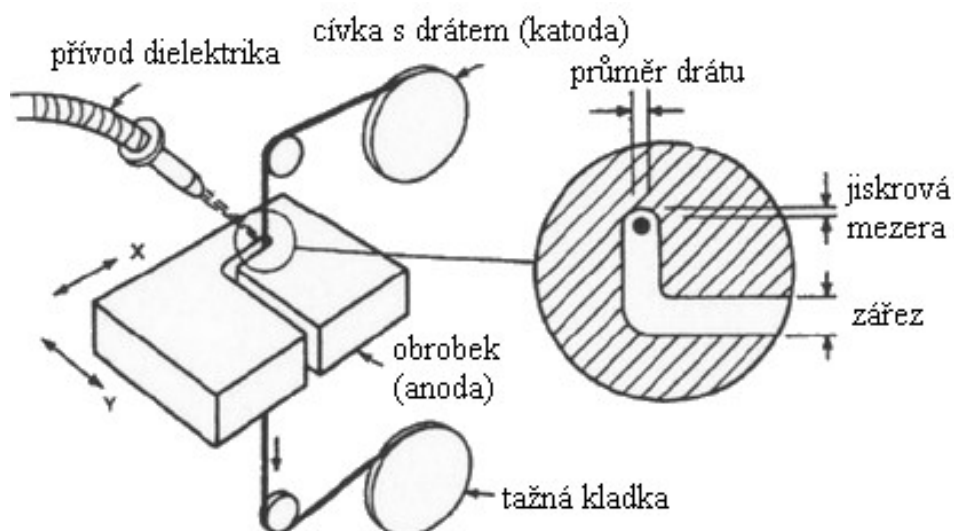
Obr. č. 9 Schéma tvorby vysokotlaké vody pro řezání vodním paprskem [35]

1.5 Řezání elektroerozivní [8], [61]

Podstatou elektroerozivního obrábění je úběr materiálu elektrickým výbojem mezi anodou a katodou. **Anodou** je obvykle nástrojová elektroda, **katodu** pak zastupuje obrobek. Elektrickým výbojem se taví částice materiálu obrobku v místě výboje, částice jsou odplaveny přítomným dielektrikem a materiál je dělen. Tato nekonvenční metoda je známá i pod názvem elektrojiskové obrábění.

Základním typem elektroerozivního dělení je **řezání drátem** a je mezi ostatními typy elektroerozivního obrábění také nejproduktivnější. Nástrojovou elektrodou je drát odolný erozi, obvykle mosazný, wolframový nebo měděný, jež je odvíjen a napínán. Plocha řezu je z principu přímková, lze být naklopena v rozsahu $\pm 30^\circ$. Částice jsou taveny a částečně odpařovány, v některých případech může být k řezu přiváděno dielektrikum pro ochlazování procesu a odplavování částic, jak je vyobrazeno na obrázku č. 10 [61]. Děj probíhá cyklicky. Využívá se při obrábění nástrojů k výrobě složitých břitových destiček a razníků.

Výhody zahrnují obrábění problematických tvarů a materiálů s relativně ostrými hranami. Dosahovaná přesnost je řádově tisícinny mm, dosažené drsnosti Ra 0,2. Nevýhodou je pak možnost dělení pouze elektricky vodivých materiálů a vysoké náklady na samotný proces dělení.

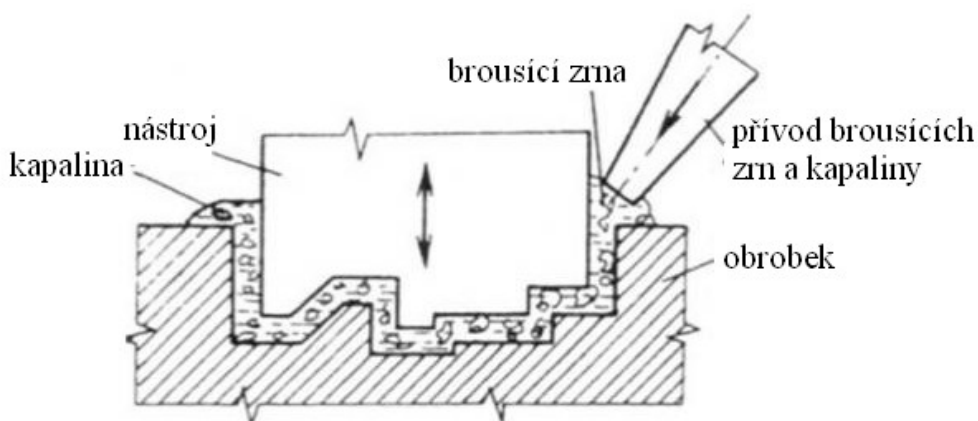


Obr. č. 10 Schéma procesu elektroerozivního řezání drátem [61]

1.6 Dělení ultrazvukem a explozí [29], [58]

Mezi kompletní výčet dělení patří i dělení ultrazvukem a dělení explozí. Podstatou u ultrazvukového dělení je rozrušování obrobku účinkem nárazu abrazivních zrn v kapalném prostředí, jež jsou přítomny mezi obrobkem a kmitajícím nástrojem s ultrazvukovou frekvencí. Využívá se pro řezání tyčí křemene, rubínu či jinak velmi tvrdých materiálů do tloušťky 5 mm. Na obrázku č. 11 [29] je znázorněn proces obrábění materiálu pomocí ultrazvuku.

Dělení explozí využívá kinetické energie šířící se vlny, zdrojem energie je trhavina, nejčastěji semtex. Technologie se využívá při dělení ložisek. Oba způsoby však patří do minoritních druhů dělení, v praxi jsou využity jen ve velmi úzké specializaci.



Obr. č. 11 Schéma dělení materiálu ultrazvukem [29]

2 TYPY LASERŮ VYUŽÍVANÝCH PRO DĚLENÍ [10], [37], [42]

Lasery se dají rozdělit dle mnoha hledisek, hlavní z nich jsou tyto:

- podle druhu energie vyvolávající buzení: optické, elektrické, chemické
- dle režimu práce: kontinuální režim, impulzní režim
- dle vyzařované vlnové délky: infračervené, ultrafialové, rentgenové, s viditelným pásmem záření

Dále lze dělit lasery dle použití nebo výkonu, hlavní rozdělení je však použito dle v praxi nejúčelnějšího dělení podle aktivního prostředí na lasery **pevnolátkové**, **kapalinové** a **plynové**. Kapalinové lasery se používají ve spektrometrii a informační technice, k řezání se neuplatní, proto zde nebude dále rozebírány.

2.1 Plynové lasery [10], [37], [42]

Tato skupina využívá jako aktivní látku plyny nebo směs plynů a par. Vlnové délky záření zasahují od oblasti UV záření, napříč viditelnou, infračervenou až po submilimetrovou oblast. Zaujímá v oblasti technologie nezastupitelnou roli. Plynové lasery je rozdělit na:

- **atomární**
- **iontové**
- **molekulární**

V následující tabulce č. 1 [14] jsou znázorněny zastoupení jednotlivých druhů plyných laserů s použitým aktivním prostředím, vlnovou délkou, spektrální oblastí a využitím. Praktické využití v průmyslu pro řezání materiálů našel uplatnění pouze CO₂ laser, avšak některé excimerové druhy laseru se používají pro vrtání a mikroobrábění.

Tab. č. 1 Výpis vlastností plynových laserů [14]

Druh laseru	Typ laseru	Aktivní prostředí	Spektrální oblast	Použití
Atomární	He-Ne laser	He, Ne	zelená, červená	zaměř. polohy
	Měděný laser	Cu	zelená	lokace
	Jodový laser	I	UV, vidit., IR	věda
	Xenonový laser	Xe, Ne, He	viditelné, IR	
Iontové	Argonový laser	Ar	modrá, zelená	spektrologie
	Hélium-kadmiový laser	He, Cd	UV, modrá	
Molekulární	Vodíkový laser	H ₂	UV	
	CO ₂ laser	CO ₂	IR	sváření, řezání
	CO laser	CO	IR	
	Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl	UV	oftalmologie, fotolitografie
	Dusíkový laser	N ₂	UV	
	HF laser	HF	IR	
	H ₂ O laser	H ₂ O	UV	
	HCN laser	HCN	UV	

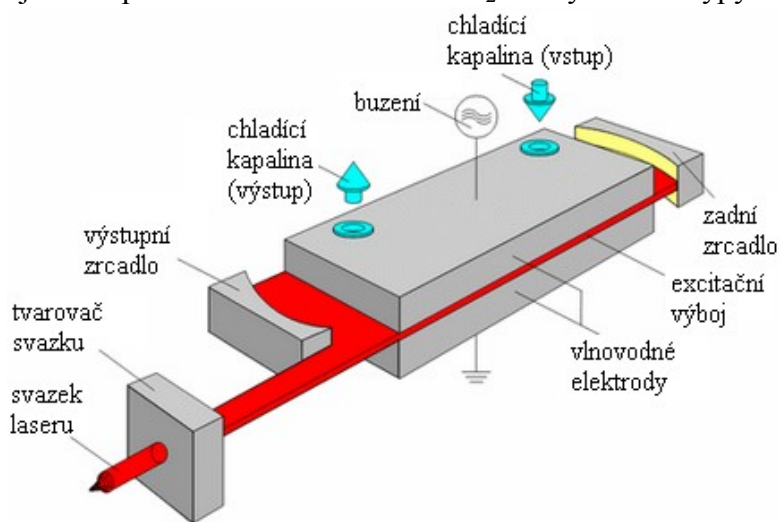
Legenda: IR – Infračervené záření, UV – ultrafialové záření

2.1.1 CO₂ laser [10], [37], [39], [42], [59], [60]

Nejrozšířenější skupinou dnešních laserů pro svařování, řezání, navařování či značení jsou CO₂ lasery. Vynalezen byl již roku 1964 M. Patelem, do průmyslových aplikací byl však postupně zaváděn až od 80. let minulého století, následovaný prudkým vzestupem. V současnosti je jejich vzestup stagnován a částečně nahrazován pevnolátkovými Nd:YAG lasery, avšak co do výkonu se jedná stále o nejsilnější lasery. Výjimkou nejsou CO₂ zařízení s výkonem nad 20 kW, maximální výkon je prozatím 200 kW.

Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů He + N₂ + CO₂ v uzavřené skleněné trubici. Nejběžněji používaný poměr ve směsi je 82:13,5:4,5. Proces je započat excitací molekul N₂ na úroveň E₄. Srážkami excitovaného dusíku s molekulami CO₂ dochází k excitaci molekul na hladinu E₃. Poté jsou molekuly CO₂ navraceny za pomoci hélia na počáteční hladinu E₀ s vyzařením fotonů při přechodu z hladin E₃ na E₂.

V aktivní zóně lze uplatnit dvojí směr proudění. Podle nich se CO₂ lasery dělí na typy s podélným prouděním a s příčným prouděním. Podélné proudění je nejčastěji čerpané doutnavým výbojem, vysokofrekvenčním výbojem jsou pak buzeny zařízení s příčným prouděním plynu. Poslední jmenované dosahují vyšších výkonů. Aktivní prostředí je nutno chladit, a to buď přes tepelný výměník nebo difúzí tepla do deskových měděných elektrod, z nichž se vyvinuly difúzně chlazené CO₂ lasery – schéma vyobrazeno na obrázku č. 12 [59].



Obr. č. 12 Schéma difúzního CO₂ laseru [59]

Pracovní režim je kontinuální nebo pulzní s výkony od 0,5 kW do 20 kW. Vlnová délka je 10,6 μm, účinnost je udávána 10%, některé druhy dosahují účinnosti až 20%. Vysoké výkony dosahované v kontinuálním režimu je hlavní předností CO₂ laseru. Nevýhodou je vlnová délka 10,6 μm, následkem níž není možno vézt paprsek optickými kabely, ale nutno použít soustavu zrcadel, jež je drahá, technicky komplikovaná, vyžaduje údržbu a limituje polohovací rychlosti zařízení. Je používán pro řezání, svařování, vrtání, popisování součástí, nanášení povlaků a tepelné zpracování.

2.1.2 Excimerový laser [10], [31], [37], [39], [41], [42]

Tak jako CO₂ laser, tak i excimerový laser patří do skupiny molekulárních plyných laserů. Aktivní prostředí je vytvořeno excimery, což jsou uměle vytvořené molekuly, které mohou existovat jen ve vybuzeném stavu a při návratu do základního stavu se rozpadají na jednotlivé atomy. K jejich vzniku dochází při srážkách atomů plynů se svazkem elektronů o vysoké energii. Typickým příkladem je kombinace halogenů a vzácných plynů, nejčastěji se jedná o Ar + F (vlnová délka 193 nm), Kr + F (vlnová délka 249 nm) nebo Xe + Cl (vlnová délka 308 nm).

Buzení zajišťuje elektrický výboj nebo svazek elektronů, pracující v impulsním režimu. Vlnové délky všech excimerů se nachází v UV oblasti záření, tím jsou excimerové lasery předurčeny pro mikroobrábění.

Použití nachází v selektivní laserové fotochemii, při technologických aplikacích pro popisování součástí nebo mikrovrtání, v medicíně v očním lékařství, ve fyzikálním a biologickém výzkumu.

2.2 Pevnolátkové lasery [10], [14], [37], [42]

Standardní pevnolátkové lasery pracují s aktivním prostředím, v němž je umístěn homogenní krystal s příměsí cizorodé látky. Světelná emise vzniká vystavením krystalu silnému externímu světelnému výboji. Aktivní prostředí je pak tvořeno výbrusem daného druhu materiálu ležící mezi nepropustným a polopropustným zrcadlem. Čerpání je zajištěno kryptonovými výbojkami. Přes polopropustné zrcadlo je pak vedeno záření světlovodnými kabelami do technologické hlavy, kde je provedena fokusace na povrch řezaného materiálu. Následuje výčet v praxi nejrozšířenějších pevnolátkových laserů, níže uvedená tabulka č. 2 [14] uvádí souhrn všech pevnolátkových laserů s charakteristickými znaky. Pro průmyslové řezání materiálu se používá Nd:YAG laser a v mizivé míře i Yb:YAG laser, rubínový a alexandritický laser. Teoreticky by se dalo k řezání využít i neodymového (Nd:sklo) laseru pro svoji ohromnou energii, praxi se však k tomuto účelu nepoužívá.

Tab. č.2 Výpis vlastností pevnolátkových laserů [14]

Typ laseru	Aktivní prostředí	Spektrální oblast	Použití
Rubínový laser	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$	IR	chirurgie, strojírenství
Ho:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ho}^{3+}$	IR	dálkoměry, stomatologie
Er:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$	IR	chirurgie, stomatologie, dálkoměry
Yb:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Yb}^{3+}$	IR	strojírenství, svařování, řezání
Titan-safírový laser	$\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$	červená, IR	spektroskopie
Alexandritický laser	$\text{Al}_2\text{BeO}_4:\text{Cr}^{3+}$	červená, IR	žihání, řezání
Neodymový laser	$\text{SiO}_2:\text{Nd}_2\text{O}_5$; $\text{P}_2\text{O}_5:\text{Nd}_2\text{O}_5$	červená, IR	vysokoenergetické pulsní systémy
Nd:YLF laser	LiYF_4	červená, IR	lékařství

Legenda: IR – Infračervené záření

➤ Rubínový laser

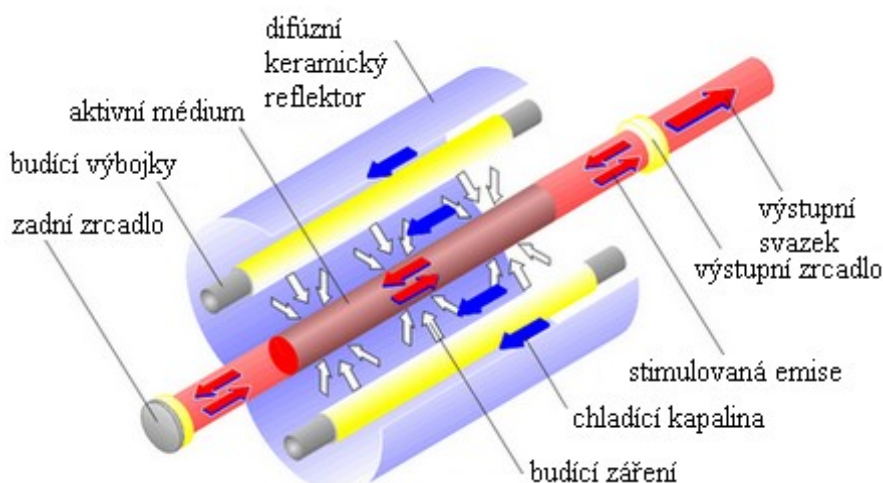
Jedná se o jeden z prvních typů laserů vůbec. Aktivním prostředím je zde rubínový krystal dopovaný trojmocnými ionty chromu, jež jsou umístěny v mřížce oxidu hlinitého. Vlnové délka generovaného záření je 0,694 μm . Zařízení pracuje v pulsním režimu s frekvencí 1 až 500 Hz, je vhodný k vrtání velmi tvrdých materiálů, využívá se i v dermatologii a laserové lokaci družic.

➤ Neodymový laser

Laser s neodymovým sklem. Aktivní iont Nd^{3+} je zabudován ve skle, generující záření má vlnovou délku 1,060 μm . Pracovní režim je pulsní, s použitím počítá jako se zdrojem laserového vybuzení termonukleární reakce, neboť právě v pulsním režimu dokáže dosáhnout ve velmi krátkém čase obrovského výkonu.

2.2.1 Nd:YAG laser [10], [14], [37], [42], [60]

V současnosti velmi významným a v praxi prudce zaváděným laserem je neodymový Nd:YAG laser. Základem je krystal $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ s příměsí iontů neodymu Nd^{3+} . Označení YAG nese z anglického názvu "yttrium aluminium garnet". Pracuje jak v režimu pulsním, tak v kontinuálním režimu. Vlnová délka záření nabývá hodnot 1,064 μm , chladicí médium je voda. Dosahuje výkonu až 5 kW při kontinuálním režimu, ve srovnání s CO_2 laserem je i efektivita nižší, a to pouze 3-5%. Oproti němu je však laserový paprsek veden světlovodnými kabely, odpadá tedy soustava zrcadel s vysokými servisními náklady a častým seřizováním.



Obr. č. 13 Schéma Nd:YAG laseru buzeného výbojkami [60]

V současnosti

Nd:YAG laser

nahrazuje CO_2 lasery díky nízkým servisním nákladům a již dostatečným výkonům. Je využíván ve strojírenství pro řezání, v chirurgii nebo spektroskopii. Na obrázku č. 13 [60] je ilustrováno schéma standardního Nd:YAG laseru.

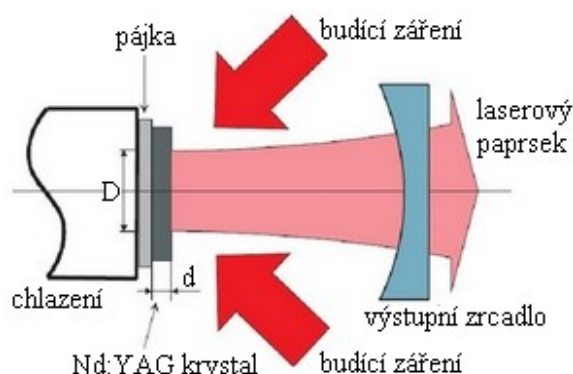
Zvýšení účinnosti lze dosáhnout diodovým čerpáním skutečněného laserovými diodami, jež září ve velmi úzkém spektru absorpční čáry iontů Nd^{3+} . Běžné Nd:YAG zařízení jsou buzeny xenonovými nebo kryptonovými výbojkami, z něhož je absorbováno pouze zelené a modré spektrum (účinnost čerpání 10%). S diodovým čerpáním je účinnost zvýšena z 3% na 30% (účinnost čerpání 45-57%)

2.2.2 Diskový laser [6], [31], [60]

Diskový laser spadá pod pevnolátkové lasery typu Nd:YAG. Důvodem vzniku bylo nerovnoměrné chlazení u klasického Nd:YAG laseru, kdy je dobře chlazen povrch, avšak jádro už tak dobře chlazené není. Krystal je deformován, vzniká tzv. thermal lensing efekt¹. Pro další zvyšování výkonů laserů se stalo chlazení klíčovým problémem, jež bylo vyřešen zvětšením plochy krystalu, a to ve dvou modifikacích: jako diskový a jako vláknový laser.

¹ Thermal lensing efekt je způsoben teplotním rozdílem jádra vůči povrchu krystalu. Touto nerovnoměrností vzniká deformace čelních ploch vlivem délkové roztažnosti, nastává lomu v důsledku teplotního gradientu a foto-elastický jev.

Konstrukce spočívá v krystalu diskového tvaru o tloušťce 0,24 mm (na obrázku č. 14 [6] značené značkou d) a průměru 10 mm (značka D), jež lze účinněji chladit. Obsah YB v matrici je 30%, Nd je přítomen pak pouze v rozsahu 0,3 až 1%, vlnová délka vyzařovaného svazku je 1029 nm. Buzení je provedeno nejčastěji diodami, a to bočními stěnami krystalu nebo příčně horní nebo dolní deskou. Celé zařízení dosahuje kompaktních rozměrů.



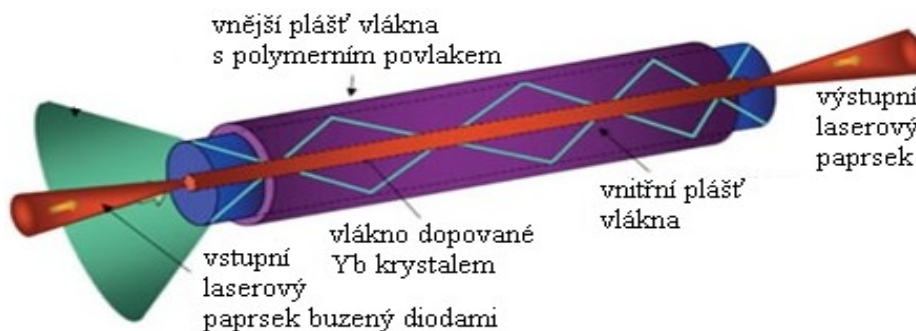
Obr. č. 14 Schéma diskového laseru [6]

Dosahované výkony jsou až 16 kW, výstupní svazek je kvalitní, thermal lensing efekt je potlačen. Celková účinnost do 20%, tedy vyšší než u Nd:YAG laseru klasické konstrukce. Nevýhodou je nižší životnost a účinnost v porovnání s lasery vláknového typu.

2.2.3 Vláknový laser [31], [60], [67]

Tak jako diskový, tak i vláknový laser spadá do rodiny pevnolátkových laserů na bázi Nd:YAG. Zvýšení činné plochy chlazení krystalu je dosaženo "natažením" aktivního prostředí. Je tvořeno křemíkovým vláknem o průměru 1 až 6 μm délky několik desítek metrů. Vláknem je dotováno ionty erbia Er pracující s vlnovou délkou 1060 - 1120 nm, ytterbiem Yb (1540 - 1620 nm) nebo thuliem Tm (1720 - 2000 nm).

Buzení je provedeno výhradně laserovými diodami kolmými na průřez laserového vlákna. Vlastností vlákna je vysoká odrazivost, díky níž se paprsek šíří vláknem, stimuluje emisi a vystupuje na konci vlákna, jak ilustruje obrázek č. 15 [18]. Laserový svazek je tedy veden v samotném vlákně až k laserové hlavě, kde je optikou zaostřen na povrch materiálu. Účinnost buzení je nebývale vysoká - až 75%, díky níž nároky na chlazení podstatně klesají - např. pro 3 kW laser postačuje chlazení vzduchem.



Obr. č. 15 Schéma vlákna vláknového laseru [18]

Jedná se v současnosti o technicky nejpokrokovější typ mezi pevnolátkovými lasery. Dle pracovního režimu jsou vláknové lasery děleny na kontinuální, pulzní nebo kvazipulsní. Účinnost vláknového laseru se pohybuje v rozmezí 30 až 35%, dále se tento typ vyznačuje velmi kvalitním laserovým svazkem a markantní životností až 100 000 pracovních hodin. V průmyslu rychle nachází uplatnění i díky malé prostorové zástavbě, nejnižším provozním nákladům ze všech zmíněných laserů. Je téměř bezúdržbový díky své jednoduchosti konstrukce. Unikátním znakem je modularita, neboť zařízení je sestaveno z modulů, jejichž přidáváním se může dále zvyšovat výkon. Dnešní maximum se pohybuje kolem 80 kW. Provedená řezání jsou uskutečněna právě na tomto druhu laseru.

2.3 Polovodičové lasery [14], [41], [42], [44], [63]

Polovodičové lasery patří do skupiny pevnolátkových laserů, pro své unikátní vlastnosti a široké použití však tvoří samostatnou skupinu. Jedná se o nejnovější skupinu laserů, obecně jsou známy pod pojmem laserové diody.

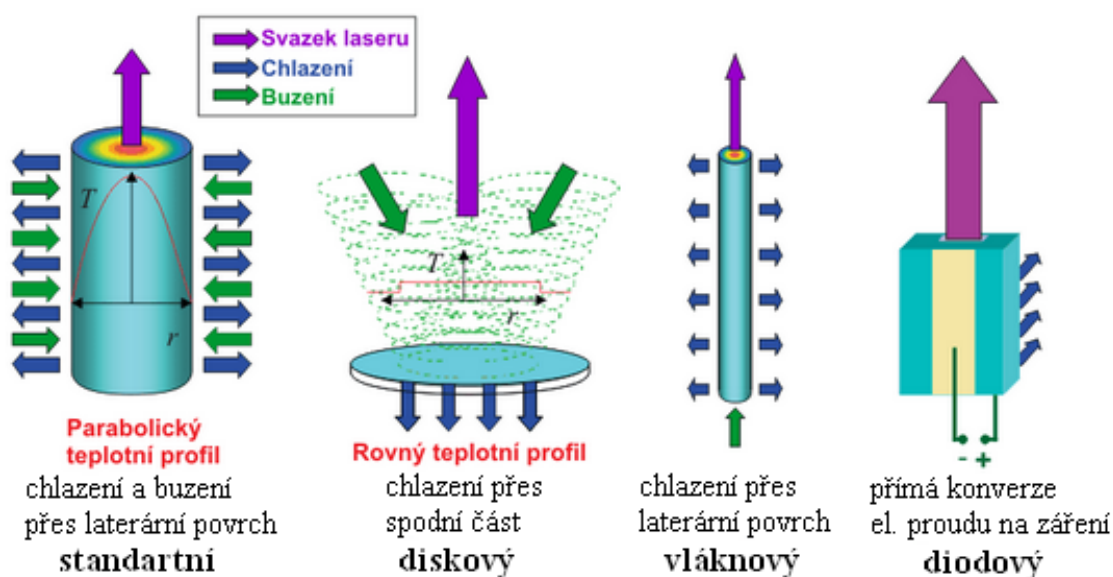
Základem je polovodič s PN přechodem, v níž vzniká světelná emise. Atomy v přechodové vrstvě absorbují energii z elektrického proudu protékající diodou, díky níž pak přecházejí do vyšších energetických hladin. Při návratu na původní stav je pak energie vyzařována ve formě tepla a světla. Lze dosáhnout až 45 % účinnosti. Regulovat výkonu změnou elektrického proudu a velmi malé rozměry jsou hlavní předpoklady pro použití ve výpočetní technice. Významným dílem jsou zastoupeny v optoelektronice.

➤ Diodový laser

Aktivní prostředí je tvořeno blokem polovodičů. Buzení je provedeno fotony, elektrickým polem nebo, ve valné většině, svazkem elektronů. Patří zde galiumarsenidový (GaAs) polovodičový laser, kadmiumsulfidový (CdS) a kadmiumselenidový (CdSe) polovodičový laser. Vlnová délka leží v pásmu infračerveného záření, výstupní výkon se pohybuje v rozmezí 30 W až 8 kW. V praxi jsou dnes použity zejména jako buzení pro jiné lasery, např. pro Nd:YAG laser viz výše. Porovnání diodového typu Nd:YAG laseru s ostatními zástupci je znázorněno na obrázku č. 16 [60].

➤ Injekční polovodičové lasery

Injekcí nosičů náboje elektrickým proudem v přechodové vrstvě je typ čerpání u injekčního polovodičového laseru. Princip je značně podobný luminescenčním diodám (LED), kde však na rozdíl od spontánní emise v LED diodě je záření generováno stimulovanou energií. Výkon injekčních laserů se obvykle pohybuje v řádech wattů. Jsou součástí širokého rozsahu zařízení, laserovým ukazovátkem počínaje a laserovou tiskárnou konče. V medicíně je použit pro vyřezávání kožních anomálií.



Obr. č. 16 Srovnání typů Nd:YAG laseru [60]

3 PRINCIP LASEROVÉHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ [10], [37]

Charakterem funkce je emisní záření. **Emise záření** může mít buď charakter spontánní (samovolný přechod) nebo stimulovaný (vynucený). Právě druhého případu je využíváno pro zesílení záření jedné vlnové délky. Podstatou je přechod elektronu z vyšší (excitované) energetické hladiny na hladinu nižší (základní) vlivem vnějšího podnětu za vzniku nového fotonu. Vnější podmínkou se chápá dopad kvant vnějšího záření (fotonů) s energií rovnající se rozdílu energetických hladin. Nově emitovaný foton disponuje pak stejnou energií, jako iniciační foton. Děj je možný i opačným směrem, po absorbování fotonu přechází elektron na vyšší kvantovou dráhu s vyšší energií (vyšší o energii pohlceného fotonu), což je známo jako výše uvedený excitovaný stav elektronu. Typickou vlastností laserového záření je monochromaticnost a koherentnost, laser je tedy zdrojem emitujících fotonů v koherentní paprsek. Má také minimální divergenci (rozbíhavost) svazku fotonů, lze ho tedy soustředit na malou plochu o průměru až 10 μm , nemá elektrický náboj a nelze ho tedy ovlivnit magnetickým polem. Rychlost paprsku je ve vakuu rovna rychlosti světla.

Paprsek se vyznačuje vysokou hustotou energie dopadající na velmi malou plošku. Například pro řezání je hustota energie cca $10^{10} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Výkon lze velmi přesně dávkovat a reprodukovat, malá divergence svazku fotonů pak dává předpoklad zaostřit tento svazek na plochu o průměru 10 μm . Svazek fotonů není ovlivňován magnetickým polem, neboť nemá elektrický náboj. Těchto vlastností laseru se v průmyslu využívá ke svařování a pájení materiálů, navařování, značkování, dekorování, řezání a pro obrábění materiálu obecně. Je použit i při žárových nástřicích, napařování povrchových vrstev nebo k jejich legování či kalení.

Laserové zařízení je tvořeno **aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie**. Zdrojem budící energie je například plynová výbojka nebo laserová dioda, která dodává energii do aktivního prostředí pro excitaci. Elektrony jsou excitovány do vyšších energetických stavů, dochází k inverzní populaci (nerovnovážnou, uměle vytvořenou). Při ozáření takto excitovaného elektronu dochází zpětnému přestupu elektronu na hladinu nižší je vyvolána stimulovaná emise fotonů. V rezonátoru, tvořeném polopropustným a nepropustným zrcadlem, je pak dále zesilován tok fotonů, jež rezonátor opouští polopropustným zrcadlem na jeho konci. Vystupující fotony jsou zpracovávány v paprsek, jež je veden k hlavě laseru a zde fokusován optikou a vyzařován k materiálu. K příslušenství laseru patří chladič, měření výkonu a kalibrace zařízení.

3.1 Tavný režim [10], [37], [46]

Materiál se ohřívá na teplotu varu kontinuálním laserovým svazkem. Proudem neaktivního plynu, nejčastěji dusíku N_2 , hnáným okolo ústí laseru je tavenina vyfukována z řezné spáry, čímž se zabráňuje ulpívání taveniny na spodní hraně řezu. Plyn však musí být hnán dostatečně vysokým tlakem 10 až 15 bary. Sekundární vliv ochranného plynu spočívá v ochraně fokusační optiky před „zaprskáním“ od odlétajících kapek taveniny. Rychlost řezání je v porovnání s jiným režimem relativně pomalá, naproti



Obr. č. 17 Poloha ohniska pro tavný režim [50]

tomu jsou řezné plochy velmi kvalitní, bez okují a s kovovým leskem. Tavného řezání je využito pro řezání barevných kovů a jejich slitin, vysokolegovaných ocelí a i nekovových materiálů jako je keramika, plexisklo, dřevo. Poloha ohniska je ve spodní polovině řezu, tak jak znázorňuje obr. č. 17 [50].

3.2 Oxidační režim [10], [37], [46]

Kontinuálním laserovým svazkem je materiál ohříván na teplotu varu. Do natavené oblasti je přiváděn kyslík O_2 o tlaku 0,5 až 1,5 barů. Kyslík jakožto pracovní plyn vyvolává exotermickou reakci s natavovaným materiálem, čímž vnáší hlavní část tepla do procesu dělení. Takto dodané teplo intenzivně přehřívá okolí řezu. Řezná rychlost dosahuje desítek $m \cdot min^{-1}$, tímto způsobem se řezou materiály s nejvyšší tloušťkou. Řezané plochy se však vyznačují charakteristickým oxidačním zbarvením a přítomností oxidů na povrchu, zvláště je to pak patrné u jiných kovů, než ocel. Je tedy vhodný k řezání nelegovaných, nízcí až středně legovaných ocelí, není vhodný pro řezání ostrých geometrických tvarů, malých otvorů apod. Díky exotermické reakci s kyslíkem je tato metoda nejméně energeticky náročná. Poloha ohniska se nachází u horní hrany řezného profilu, ilustraci nabízí obr. č. 18 [50].



Obr. č. 18 Poloha ohniska pro oxidační režim [50]

3.3 Sublimační řezání [10], [37], [46]

Pulzní laserový paprsek o vysoké hustotě energie ohřívá řezaný materiál na teplotu varu, materiál je odpařován a v intervalech mezi pulzy je páram umožněno uniknout ven z kapiláry. Páry lze také odstranit proudem inertního plynu o nízkém tlaku směřující do místa tavení. Jako inertního plynu bývá používáno dusíku nebo argonu, zvláště kvůli zamezení oxidace řezného materiálu. Výsledkem jsou hladké rovné plochy díky absenci taveniny. Využití metody je pro vrtání a řezání minerálů, dřeva nebo tenkých plechů, zpravidla do 1 mm tloušťky. Tento způsob je energeticky nejnáročnějším, neboť dodaná energie paprsku musí být schopna materiál odpařovat, nejen pouze tavit.

3.4 MicroJet metoda [10], [21], [37]

Jedná se o metodu, kdy ochranný plyn je zastoupen vodou. Ta je přiváděna k trysce, od které putuje s laserovým paprskem k obrobku. Materiál obrobku je po kontaktu s takto smíchaným paprskem laseru a vody roztaven a vodou z místa řezu odplaven. Mimo tuto funkci voda chladí řezané místo a zmenšuje tepelně ovlivněnou oblast. Průměr vodního paprsku se pohybuje mezi 20 až 150 μm , laserový paprsek je v něm veden podobně, jako v optickém vlákně. Je dosahováno naprosté kolmosti řezných hran. Metoda Microjet je využívána pro malé a velmi složité obrobky.

3.5 Vznik vroubkování řezné hrany [50], [68]

Pro řez provedený laserem je typický reliéf rýhování. Lze z něj usuzovat i na řeznou rychlost, neboť pro nízké řezné rychlosti je rýhování téměř svislé, pro vysoké rychlosti pak platí výrazné zakřivení drážek rýhování. Podstata tvorby takového reliéfu je zřejmá z obrázku č. 19 [50]. Směr zakřivení je vždy opačný ke směru řezání.

3.6 Řezné parametry [4], [5], [20], [21], [28], [32], [50], [62], [66]

Řeznými parametry se upravuje samotný proces řezání. Lze je rozdělit na parametry procesu řezání a parametry materiálu. Obojí se významnou měrou podílí na kvalitě řezaného povrchu a chodu řezání.

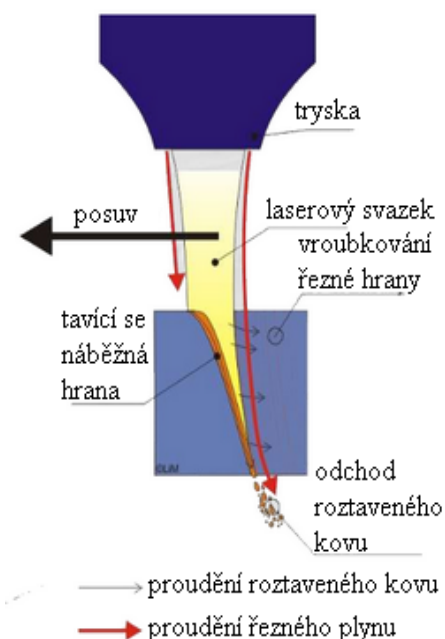
Parametry procesu při řezání zahrnují:

- výkon laseru
- režim práce laseru (CW/pulzní)
- řezná rychlost
- typ řezného plynu (N_2 , O_2 , vzduch)
- tlak řezného plynu
- poloha ohniska vzhledem k materiálu
- průměr řezné trysky
- odstup trysky od plechu
- parametry vpichu

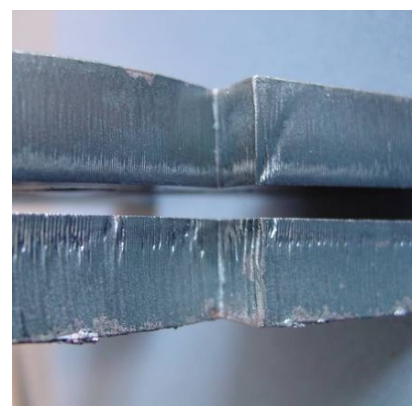
Parametry materiálu:

- fyzické a chemické vlastnosti materiálu (tloušťka materiálu, chem. složení aj.)
- typ materiálu (sklo, keramika, guma, plech...)
- termofyzikální vlastnosti (absorbce, reflexivita, viskozita taveniny, tepelná vodivost)

Kvalita řezu jde ruku v ruce s nastavenými řeznými parametry stroje a/nebo řeznými parametry materiálu. Ve druhém případě lze vadám řezu předejít vhodným výběrem druhu řezaného materiálu. Tímto krokem jsou pak určeny **fyzické, chemické a termofyzikální vlastnosti** daného materiálu, které ovlivňují proces řezání. Existují i ocelové plechy určené speciálně pro laserové řezání, vyšší cena materiálu kompenzuje rychlejší, levnější a kvalitnější řez. Na obrázku č. 20 [32] je patrný rozdíl v řezu plechu Raex (horní) určený k laserovému dělení a běžné řezu běžné oceli tloušťky 15 mm. Nutno podotknout, že lze řezat prakticky všechny druhy materiálů s výjimkou takových, které mají vysokou světelnou odrazivost, např. zlato a stříbro.



Obr. č. 19 Proces vzniku vroubkování [50]



Obr. č. 20 Rozdílná kvalita řezu různých typů materiálů stejné tloušťky [32]

Mimo parametry materiálu rozhodují o kvalitě řezných hran i parametry procesu, tedy parametry nastavení stroje, seznam viz výše. První z nich, **výkon laseru**, je jedním z nejdůležitějších parametrů. Na obrázku č. 21 [4] je srovnání řezu pro malý, optimální a příliš vysoký výkon. Výkon závisí zvláště na tloušťce materiálu, provozním režimu a druhu řezaného materiálu.



Obr. č. 21 Srovnání nastaveného výkonu a jeho vliv na kvalitu řezu [4]

Hned za výkonem laseru co do vlivu na kvalitu řezných ploch je parametr **posuvové rychlosti**, tedy řezná rychlost. Obvykle platí, že čím větší výkon laseru a menší tloušťka materiálu, tím větší řezná rychlost. Mimo tyto skutečnosti řeznou rychlost ovlivňuje i geometrie řezu, neboť na přímých úsecích lze vyvinout vysokou řeznou rychlost, při řezání oblouků, otvorů nebo detailů je nutno tuto rychlost snížit. Neoptimální rychlost pak vede k vadám jako např. vysoká drsnost řezných hran nebo vznik otřepů. Obrázek č. 22 [4] ilustruje řez optimální rychlostí i s jeho krajně nastavenými parametry.



Obr. č. 22 Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu [4]

Dalším parametrem je **poloha ohniska** paprsku vzhledem k materiálu. Je závislá na metodě řezání (viz výše) a tloušťce materiálu. Jak z názvu plyne, jedná se o vzdálenost od zaostřovací čočky do ohniska paprsku, kde je průměr paprsku nejužší. Polohu lze nastavit ručně s odzkoušením nebo automaticky pomocí interních optických čidel k tomu určené. Na obrázku č. 23 [4] jsou vyobrazeny řezy pro optimální polohu ohniska paprsku spolu s odchýlenými polohami výše nebo níže od optimální polohy.



Obr. č. 23 Vliv výšky polohy ohniska na kvalitu řezu [4]

Neméně důležitým parametrem je i použitý **typ řezného plynu**. Druh plynu je určen použitou metodou řezání, potažmo tedy i druhem řezaného materiálu. Nepřekvapí tedy, že při oxidačním řezání vlivem přiváděného kyslíku je řezná hrana oxidovaná, na rozdíl od tavného nebo sublimačního dělení, kdy je použito ochranného plynu dusíku nebo jiného inertního plynu. U Microjet metody je řezná hrana nejčistší. Důležitá je i čistota ochranného plynu, protože při horší, než předepsané čistotě, dochází k tvorbě otřepů.

S druhem plynu souvisí i **tlak pracovního plynu**. Při nízkém tlaku nedochází k vyfukování taveniny z řezné spáry a ta ulpívá na spodní hraně obrobku, vysoký tlak pak naopak způsobí zbytečné víření a rozstříku taveniny. Volí se s ohledem na tloušťku řezaného materiálu a způsobu dělení. Tlak lze dělit do tří skupin: nízkotlaké (do 100 kPa), středotlaké (do 500 kPa) a vysokotlaké (do 2 MPa). Na obrázku č. 24 [4] jsou znázorněny příklady řezné hrany při použití vysokého, nízkého a optimálního tlaku řezného plynu.



Obr. č. 24 Vliv tlaku pracovního plynu na vzhled a kvalitu řezné hrany [4]

Odstup trysky od materiálu má být co nejmenší, ale dostatečně velký, aby tryska a optika laseru nebyla nadměrně znečišťována rozstříkem taveniny. Mimo vzdálenost trysky od obrobku hraje roli i tlak plynu proti znečišťování trysky. Obvyklá vzdálenost se nachází v rozmezí 0,1 - 2,5 mm od plochy obrobku, pro kyslík je vzdálenost od obrobku větší, pro dusík a jiné plyny vzdálenost menší. V praxi osvědčený **průměr trysky** se pohybuje v rozmezí 1 - 2,5 mm.

Režim práce laseru, ať již kontinuální (CW) nebo pulzní, má také vliv na výslednou kvalitu řezu. Pro kontinuální režim je důležitý aktuální výkon, pro pulzní režim opakovací frekvence, tedy množství pulzů za jednotku času. Tato frekvence souvisí i s parametrem zvaným duty (střídání činnosti oproti nečinnosti), který značí poměr mezi dobou záření laseru a jeho klidovým stavem. Vyšší číslo znamená delší činnost naproti jeho odpočinku. Například duty 50% znamená polovinu času strávenou činností laseru. Duty 100% pak značí kontinuální režim.

Dosahované kvality v závislosti na parametrech jsou pak následující: drsnost řezaných ploch závisející na tloušťce materiálu, druhu materiálu a rychlosti posuvu se nachází v rozmezí od 6,3 do 0,3 Ra. Tvar a hloubka řezu záleží na výkonu laseru, fokusaci svazku a druhu materiálu. Lze řezat materiály až do hloubky 25 mm, běžně se však řeže 20 mm konstrukční oceli a pro korozivzdorné oceli až 15 mm při výkonu 3 kW. Hliníkové slitiny, nejčastěji materiálu z AlMg3, lze řezat při stejném výkonu do tloušťky 12 mm. Tvarová a rozměrová přesnost se odvíjí od nastavení ohniska paprsku a vzdálenosti výstupní trysky od materiálu, jež se pohybuje v rozmezí 0,1 až 2,5 mm. Dosahované hodnoty přesností jsou až 0,05 až 0,1 mm na 1 m délky řezu, rychlost řezání se pohybuje v rozmezí od 0,5 m·min⁻¹ do 35 m·min⁻¹. Řezná spára se pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 mm, a to prakticky bez ohledu na tloušťku materiálu. Absorpce je závislá na teplotě a vlnové délce.

3.7 Vady řezu [4], [9], [20], [62], [68]

Povrch řezu může vykazovat i vady. Vznikají nesprávně nastavenými řeznými parametry, vadami v materiálu nebo i jako průvodní jev laserového dělení. Mohou se vyskytnout i špatně seřízenou optickou soustavou či její degradací, například zakřivením čočky přehřátím nebo znečištěním. Následuje výčet vad.

Otřep je častou vadou materiálu. Vzniká obvykle na spodní části obrobku, kde roztavený kov ulpívá a chladne. Posuzují se vizuálně. Mohou být odstraněny broušením nebo frézováním. Základní typy otřepu jsou:

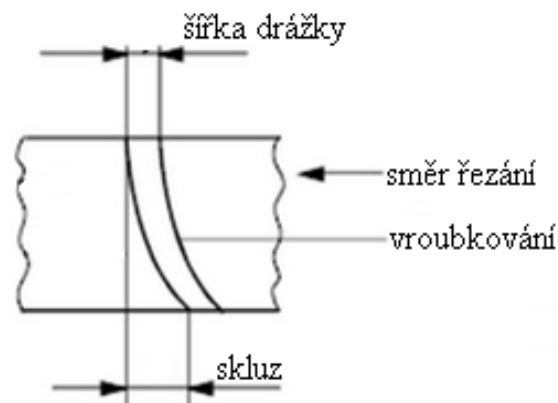
- **slzovitý** je tvarem slzy, jak název prozrazuje. Povrch je čistý, kovový. Vzniká ztuhnutím kapek roztaveného kovu na spodní části řezu. Těžce se odstraňuje.
- **struskovitý** je velmi křehký, lze ho lehce odstraňovat. Nezachytává se na dolní hraně obrobku ale na povrchu řezu.
- **špičatý** se vyskytuje zejména u korozivzdorných ocelí, dolní hrana obrobku je velmi ostrá, špičatá. Lze lehce odstraňovat.

Nesouměrná řezná spára vzniká jako důsledek tvaru laserového paprsku. Je závislé na ohniskovém průměru, materiálu, jeho tloušťce, typu laseru, potažmo jeho vlnové délce a postupu řezání.

Pitting je povrchové eroze, které narušují sourodost plochy řezu. Vyznačují se nejednotnou šířkou, hloubkou nebo formou eroze. Vzniká při změně směru řezání nebo přítomností vměstků v materiálu.

Skluz souvisí s vroubkováním řezné hrany, jež je typickým znakem pro laserové svařování. Vroubkování viz výše. Čím větší řezná rychlost, tím větší skluz. Je definován jako vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. Schéma je vyznačeno na obrázku č. 25 [68].

Nadměrná drsnost je poslední, avšak neméně důležitou vadou řezu. Přídomek nadměrný není přesně definovaný, avšak základním kritériem, rozhodujícím o vadné drsnosti, je následná funkčnost výrobku. Nadměrná drsnost vzniká nesprávně nastavenými řeznými parametry i použitím nevhodného materiálu. Příčinou nadměrné drsnosti může být i nevhodná metoda laserového dělení, popřípadě i nevhodně zvolený ochranný plyn, ovšem tyto poslední dvě příčiny jsou hrubým porušením technologie a neměly by se stávat. Rozhodujícími parametry ovlivňujícími drsnost povrchu jsou: tloušťka materiálu, posuvová rychlost a druh materiálu.



Obr. č. 25 Schéma skluzu [68]

4 METODY MĚŘENÍ DRSNOSTÍ [2], [26], [36], [56], [64]

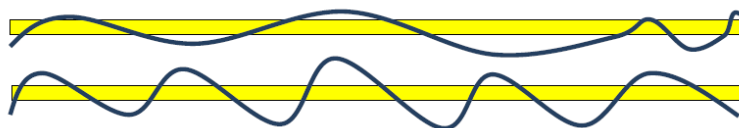
Po použití jakémkoliv druhu dělení vznikají na řezu materiálu stopy po dělení. Struktura povrchu je charakteristická pro způsob obrábění, vzhled a hloubky stop po nástroji. Takto vzniklé nerovnosti udávají drsnost děleného materiálu v řezu. Drsnost povrchu spolu s rozměrovou a geometrickou drsností určují jakost povrchu. Drsnost povrchu má vliv na funkčnost, přesnost, životnost a spolehlivost součásti, ve strojním celku pak na hlučnost, délku záběhu s protikusem, tření, tepelnou a elektrickou vodivost.

Nerovnost povrchu je prostorovým útvarem, proto je redukován na rovinu řezu kolnou k povrchu. V této rovině je pak povrch znázorněn jako křivka profilu. Takto znázorněná struktura povrchu lze rozdělit na tři součásti, jež odlišuje vlnová délka. Dělí se na základní profil, vlnitost a drsnost povrchu. Dle normy ČSN EN ISO 4287 jsou definovány parametry pro tyto složky:

- R pro drsnost povrchu
- W pro vlnitost povrchu
- P pro základní profil

Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů drsnosti a vzniká odfiltrováním vlnitosti povrchu a základního profilu. Údajem o velikosti drsnosti povrchu je pak číselná hodnota v μm s použitým parametrem vyhodnocení, např. R_a 1,6. V praxi je nejvíce využíváno parametrů R_a a R_z .

- ✓ R_a - Střední aritmetická úchylka drsnosti je střední hodnota vzdálenosti bodu zjišťovaného profilu od střední čáry v délce měřeného úseku. Jelikož se jedná o aritmetický průměr všech odchylek, extrémní výšky hrotů a hloubky rýh profilu jsou tak z velké části ve výsledné hodnotě potlačeny. Proto se stejná hodnota R_a může ukázat u povrchů s profilem různého tvaru a velikostí, tak jak je znázorněno na obrázku č. 26 [56] Znázornění profilu viz obrázek č. 27 [2].
- ✓ R_z - Výška nerovností je střední vzdálenost mezi 5 nejvyššími a 5 nejnižšími body měřeného profilu od jeho střední čáry v délce měřeného úseku. Jedná se o naměřenou nejvyšší úchylku od střední čáry. Orientační určení hodnoty je čtyřnásobek hodnoty R_a . Znázornění parametru R_z je patrné z obrázku č. 28 [2].



Obr. č. 26 Stejná hodnota parametru R_a pro různě členité profily [56]

Drsnost lze měřit i v dalších parametrech, jako např. R_t (největší hloubka drsnosti, viz obr. č. 29 [2], jež je metoda měření založená na metodě R_z , avšak v celém rozsahu vyhodnocované délky, nebo metodou R_q , tedy průměrné kvadratické úchylce profilu. Oproti R_a a R_z jsou tyto metody v technické praxi jen velmi málo využívány.

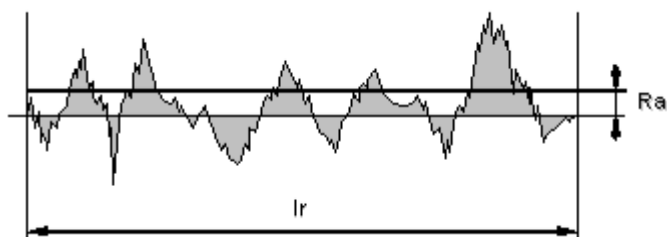
Určení drsnosti povrchu se provádí za pomoci porovnávacích šablon, měřidly pro měření drsnosti povrchu nebo komparačním mikroskopem. Poslední zmiňovaná metoda se používá při analyzování velmi jemné struktury, měřený povrch je znázorněn ve 3D. Místo mikroskopu lze použít i jiné bezdotykové metody založené na optickém principu, např. s využitím interference světla nebo metodou světelného řezu. Tří-rozměrné metody jsou však technicky a časově náročnější na snímání a vyhodnocení dat. Přínosem je komplexnější posouzení vlastností povrchu.

Nejlevnějším způsobem zjištění drsnosti povrchu nadále zůstává s použitím porovnávacích šablon. Tyto šablony nesou na sobě etalony materiálu s různým stupněm drsnosti pro daný typ obrábění materiálu. Obrobek je porovnáván s těmito šablonami zrakem nebo hmatem. Značnou nevýhodou je subjektivní hodnocení a také vyhodnocení pouze jeden parametr drsnosti, například hodnota R_a . Jedná se o metodu bezkontaktní, ovšem při porovnávání hmatem to již říci nelze.

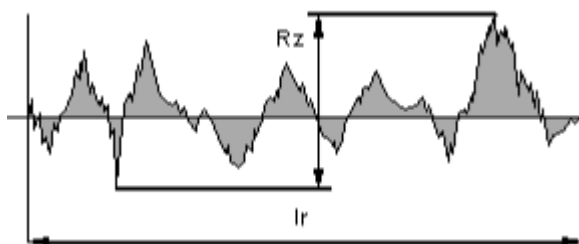
Nejrozšířenější metodou měření je dotykovými profilometry. Jedná se o kontaktní metodu, neboť měřicí část - hrot přejíždí po povrchu. Tento hrot s daným vrcholovým úhlem a poloměrem zaoblení hrotu je upevněn na měřicí hlavici, jež je nerovnostmi na povrchu vychylována, tyto odchylky generované snímacím hrotem jsou transformovány na elektrický signál, jenž je po zesílení dále zpracováván. Součástí je posuvový mechanismus, který posouvá měřicí hlavici konstantní hlavicí, a to buď elektromotorkem, nebo pneumaticky.

Poloměr zaoblení snímacího hrotu je 2, 5 nebo 10 μm , vrcholový úhel 60° nebo 90° a přitlačná síla hrotu přibližně 0,00075 N. Použité převodníky pracují na principu piezoelektrickém, magnetoelektrickém, indukčním nebo interferometrickém s využitím laseru, u posledně jmenovaného se pak jedná o bezdotykové snímání.

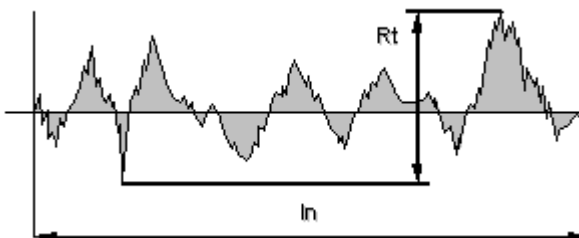
Tato metoda obvykle určuje náraz číselné hodnoty více parametrů drsnosti. Dotykový profilometr MarSurf je použit v následujícím měření.



Obr. č. 27 Znázornění profilu R_a na skutečném povrchu [2]



Obr. č. 28 Znázornění profilu R_z na skutečném profilu [2]



Obr. č. 29 Znázornění profilu R_t na celé délce vyhodnocované délky [2]

5 NORMA ČSN EN ISO 9013 [16], [37]

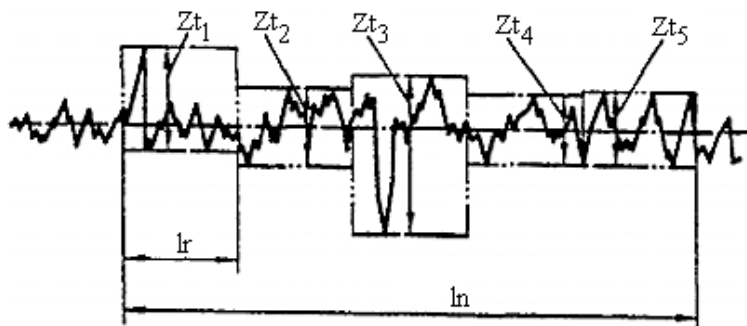
Norma, zabývající se tepelným dělením materiálu, vstoupila v platnost v květnu 2003, posléze nahrazená upravenou verzí v září téhož roku je platná dodnes. Řezání materiálu je předepsáno pro řezy plamenem pro tloušťky materiálu od 3 mm do 300 mm, pro řezy plazmou o síle materiálu od 1 mm do 150 mm a řezy laserem od 0,5 mm do 40 mm.

Úvodem jsou definovány pojmy jako šířka řezné spáry, skluz, rychlost řezání, typ řezu, úchylka kolmosti a úchylka úhlu, výška prvku profilu, průměrná výška prvků profilu, drážkování. Norma stanovuje úchylky tvaru a polohy, stanovení jakosti povrchu řezu, postup měření a vyhodnocování, toleranční pole pro jednotlivé parametry i rozměrové úchylky a značení.

Měření je předepsáno provádět na očištěných řezech od oxidů kartáčem. Měřené místo je takové, kde lze očekávat kritické hodnoty, jsou z nich však vyjmuty oblasti s viditelnými vadami. Počet a umístění měřicích míst je určen výrobcem pro kolmost řezu nebo sklon řezu, pokud není, je měření provedeno ve dvou sériích po třech měření ve vzdálenosti 20 mm na metr délky řezu. Pro měření parametrů drsnosti je pak předepsáno jedno měření na každý metr řezu. Všeobecně záleží na tvaru, velikosti, případně i na předpokládaném použití zpracovávaného kusu. Pokud se naměřené hodnoty nachází blízko hranic třídy definované normou, musí být provedena doplňková měření.

5.1 Drsnost [16]

Pro měření drsností jsou předepsány 2 parametry - **Zt** a **Rz5**. **Zt** je výška profilu, která je definována jako součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu. **Rz5** je pak aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu a je vlastním měřicím parametrem drsnosti. Index 5 je zaveden pro odlišení průměrné výšky profilu a největší výšky profilu z 5 jednotlivých prvků profilu, tak jak znázorňuje obrázek č. 30 [16]



Obr. č. 30 Znázornění parametru Rz5 [16]

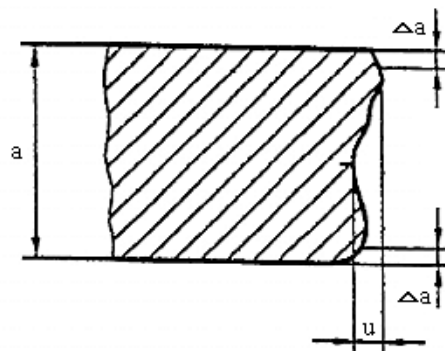
Předepsaná oblast měření parametru **Rz5** je dle použité technologie dělení určeno takto: pro řez kyslíkovým paprskem a plazmové řezání se nachází ve vzdálenosti 2/3 tloušťky řezu od horní hrany řezu, pro laserové dělení náleží oblast první třetiny tloušťky od horní hrany řezu. Tyto oblasti jsou charakteristické svojí maximální drsností. Pro tloušťky řezu menší jak 2 mm je doporučeno měřit v polovině tloušťky řezu. Délka měření je stanovena na 15 mm délky řezu ve směru posuvu hořáku.

Jako měřidlo pro přesné měření je normou předepsán elektrický dotykový hrotový přístroj pro souvislé snímání. Mezní hodnota chyby je předepsána na 0,002 mm. Pro hrubé měření není přístroj definován.

5.2 Kolmost [16]

Měřená oblast pro stanovení úchylky kolmosti, případně úchylky úhlové, se provádí jen v omezené oblasti povrchu. Omezení spočívá ve zmenšení o vzdálenost Δa (tabulka parametrů viz norma) od horní a dolní hrany řezu z důvodu dovoleného natavení horní hrany řezu. Pro tloušťku menší než 2 mm musí být předem dohodnut postup měření. Pro úchylky úhlu platí analogický postup jako s úchylkou kolmosti. Na obr. č. 31 [16] je vykreslena Δa , o níž musí být zmenšena vyhodnocovaná oblast. Parametr a značí tloušťku materiálu.

Měřicí zařízení je normou předepsáno pro přesně měření vodícího zařízení s číselníkovým úchylkoměrem, jehož úhel dotkového hrotu je menší než 90° a jeho poloměr zaoblení je do 0,1 mm. Mezní hodnota chyby je stanovena na 0,02 mm. V případě hrubého měření lze pak použít příložený úhelník s třídou přesnosti 1 nebo 2, měřicí drát, listkové spárové měrky, měřidlo sklonu nebo úhloměr. Mezní hodnota chyby je v těchto případech zaručena hodnotou 0,1 mm. Pokud není možnost měřicí drát nebo snímač pro hrubé měření úchylky vložit do mezery mezi úhelníkem s posuvným ramenem a povrchem řezu, použije se hloubkoměr s dotkovým hrotem. Dotkový hloubkoměr se použije i v případě natavených hran s nedokonalou projekcí.



Obr. č. 31 Znárodnění omezení měřené dráhy pro měření úchylky kolmosti u [16]

5.3 Jakost povrchu [16]

Jakost spolu s přesností povrchu řezu tepelně dělených materiálů je ovlivněna charakteristickými veličinami:

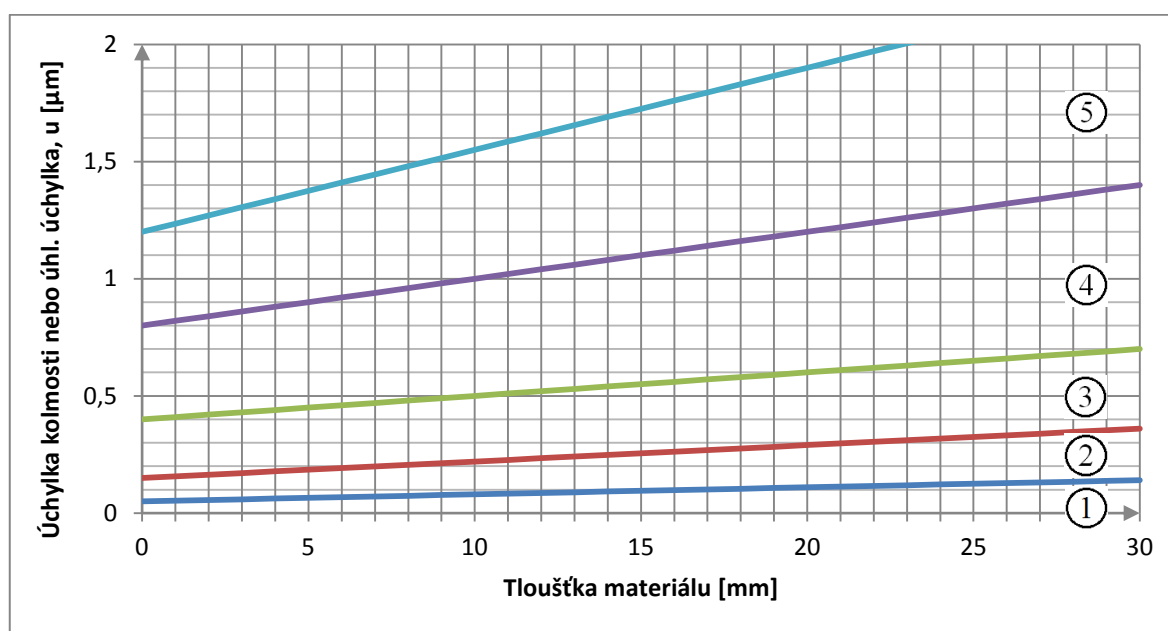
- úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, u
- průměrná výška prvků profilu, **Rz5**

Dále mohou být pro stanovení kvality řezu použity i jiné, normou definované, veličiny:

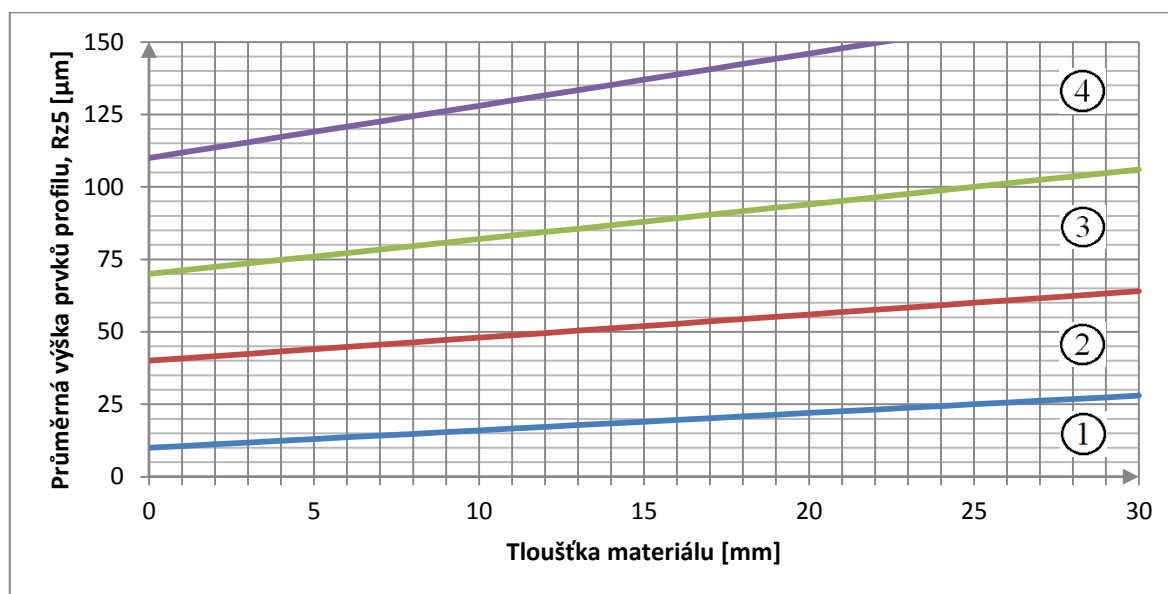
- skluz, n
- natavení horní hrany, r
- možný výskyt okujů nebo natavených kapek na dolní hraně řezu

Dle naměřených parametrů pro úchylky kolmosti a úhlů a pro parametr **Rz5** jsou normou stanoveny tabulky, dle kterých je pak vzorek zařazen do třídy, tzv. tolerančního pole. Obrázek č. 32 [16] znázorňuje graf tolerančních polí úchylek kolmosti nebo úhlové úchylky, na obrázku č. 33 [16] je znázorněno toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu **Rz5**.

Parametr a značí tloušťku řezaného materiálu, parametr u úchylku kolmosti nebo úhlu. Norma obsahuje i grafy tolerančních polí, jak pro úchylky kolmosti a úhlů, tak i pro parametr drsnosti **Rz5**, a to vždy ve dvou vyhotovení: do tloušťky materiálu 30 mm a 150 mm. Na ukázkou je vyobrazen graf pro parametr Rz5 do tloušťky řezu 30 mm. V příloze normy jsou přiloženy grafy typických dosažených hodnot pro danou metodu dělení.



Obr. č. 32 Graf pro úchylku kolmosti nebo úhlovou úchylku s vyznačenými tolerančními poli [16]



Obr. č. 33 Graf pro průměrnou výšku profilu s vyznačenými tolerančními poli [16]

5.4 Rozměrové úchylky [16]

Norma dále stanovuje rozměrové úchylky od jmenovité hodnoty předepsané na výkresech, pokud je na výkresu nebo i jiném dokumentu uveden odkaz na tuto normu. Rozměrové úchylky jsou posuzovány odděleně od mezních úchylek kolmosti a úhlů a jsou předepsány jen pro řezy zhotovené plamenem a plazmou. Tabulky rozměrových úchylek jsou ve dvou tolerančních třídách a závisí na velikosti jmenovité hodnoty a tloušťky řezaného materiálu. Dosažené úchylky pro řezy provedené laserem závisí na geometrii a předběžné úpravě materiálu.

PRAKTICKÁ ČÁST

6 MĚŘENÍ DRSNOSTI VZORKŮ DRSNOMĚREM [16], [44]

První kapitola praktické části této práce se věnuje měřením a vyhodnocením výsledků měření. Kapitola pojednává o měření drsnosti řezaných hran laserem 3 typů materiálů:

- Konstrukční ocel běžné jakosti, tloušťka materiálu 3 – 4 mm
- Konstrukční ocel válcovaná za studena, tloušťka materiálu 1 mm
- Nerezová ocel, tloušťka materiálu 1 – 10 mm
- Hliníková slitina, tloušťka materiálu 3 mm

Každý druh materiálu obsahuje vzorky tvaru čtverce s kruhovou dírou uprostřed o různé tloušťce materiálu, a to v celkovém rozmezí od 1 mm do 10 mm. Vzorky byly pořízeny na pevnolátkovém vláknovém Yb: Yag laseru Bistronic BySprint 3015 Fiber 3000 v brněnské firmě Aquaderm. Parametry laseru jsou k dispozici v tabulce č. 3 [13], [44].

Tab. č. 3 Technické parametry laseru Bistronic BySprint 3015 Fiber 3000 [13], [44]

Laserové centrum Bistronic BySprint 3015 Fiber 3000			
Výkon [W]	Rozměr stolu [mm]	Maximální posuvová rychlost [m·min ⁻¹]	Maximální akcelerace posuvu [m·s ⁻²]
3000	3000x1500	140	12

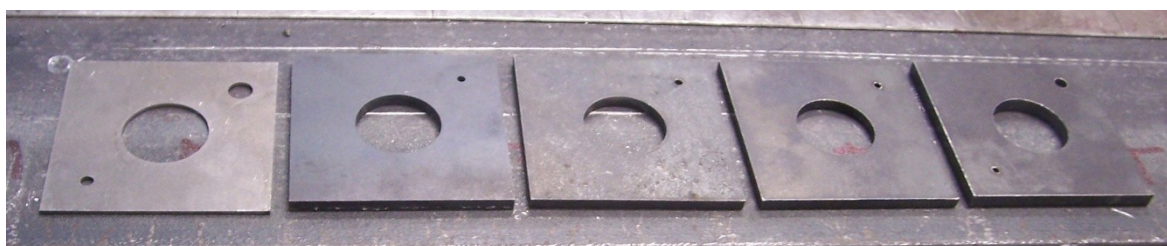
6.1 Zástupce konstrukční oceli běžné jakosti [11], [23]

Konstrukční ocel zastupuje materiál **S235JR**, ekvivalentem v normě ČSN je ocel 11 375. Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodné ke svařování. Parametry materiálu o maximální tloušťce 16 mm jsou vepsány do tab. č. 4 [23]. Použití vhodné například pro konstrukci součástí tavným svařováním, součásti svařované kovářsky, vtokové objekty vodních turbín, výtoky, stavidla, svařovaná potrubí, jezové konstrukce. Součásti mohou být vystaveny namáhání statickým i mírně dynamickým.

Tab. č. 4 Parametry oceli S235JR [11]

Ocel S235JR							
Mez kluzu R _{eH} [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost min [%]	C _{max} [%]	Mn _{max} [%]	P _{max} [%]	S _{max} [%]	N _{max} [%]
235	360-510	26	0,19	1,5	0,045	0,045	0,014

Vzorky oceli S235JR byly dohromady 4, z nichž 3 o tloušťce 3 mm a jeden 4 mm tlustý. Řezání bylo provedeno oxidačním způsobem, pracovní plyn kyslík. Na obrázku č. 34 je vyobrazení měřených vzorků z konstrukčních ocelí seřazené vzestupně dle tloušťky materiálu. První zleva je zástupce materiálu DC01, ostatní jsou pak z materiálu S235JR.



Obr. č. 34 Vzorky z konstrukčních ocelí

6.2 Zástupce konstrukční hlubokotažné oceli [17], [23], [57]

Hlubokotažnou ocel válcovanou za studena zastupuje konstrukční ocel **DC01**. Ekvivalentem v normě ČSN je zástupce oceli 11 321. Jedná se o ocel nelegovanou, uhlíkovou, vhodnou k tváření za studena, k středně hlubokému tažení, lakování, pokovování v tavenině, potisku a smaltování. Svařitelnost je zaručená, je však závislá na rozměrech polotovaru. V tabulce č. 5 [17], [57] jsou uvedeny materiálové parametry.

Tab. č. 5 Parametry oceli DC01 [17], [57]

Ocel DC01							
Zpracování	Mez kluzu R_{eH} [MPa]	Mez pevnosti R_m min [MPa]	Tažnost ϵ_{min} [%]	C_{max} [%]	Mn_{max} [%]	P_{max} [%]	S_{max} [%]
Žíhané	180	280-390	28	0,12	0,6	0,045	0,045
Lehce válcované	280	270-420	28				
Zpev. za studena ²	200-630	290-740	18				

6.3 Zástupce nerezové oceli [12], [22]

Jediným zástupcem této skupiny byl vzorek tloušťky 1 mm, řezání bylo provedeno opět oxidačním způsobem, pracovní plyn byl použit kyslík. Vzorek je vyobrazen na obrázku č. 33 jako první zleva.

Řezání nerezové oceli bylo provedeno na nerezové oceli **X5CrNi18-10**. Ekvivalentem k ní by mohl být v normě ČSN zástupce 17 240. Ocel nerezová, austenitická, legovaná Cr (18%) a Ni (10%). Vyznačuje se vysokou tažností, lze tedy dobře tvářit, jsou však těžko obrobitelné pro jejich dobrou houževnatost a nízkou tepelnou vodivostí. Při tváření za studena dochází k výraznému zpevňování. Parametry této oceli viz tabulka č. 6 [12].

Ocel velmi dobře odolává atmosférické korozi v ne příliš znečištěném venkovním prostředí, pitné vodě, zředěné kyselině dusičné a některým organickým kyselinám. Ocel dobře odolává produktům potravinářského průmyslu, jako jsou např. ovocné šťávy, mléčné výrobky, pivo a další. Sníženou odolnost vykazuje vůči vínu, resp. vinnému moštu. Ve stavu po rozpouštěcím žíhání odolává též mezikrystalové korozi. Ke vzniku náchylnosti k mezikrystalové korozi může dojít, je-li ocel vystavena po určitou dobu teplotám v rozmezí 500 až 900 °C.

Tab. č. 6 Parametry oceli X5CrNi18-10 [12]

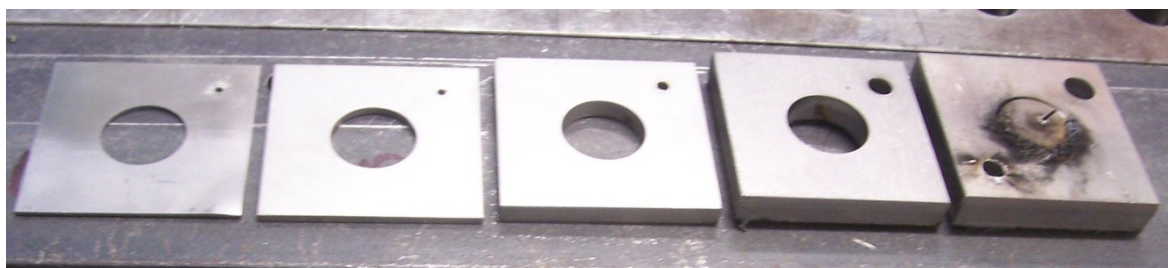
Ocel X5CrNi18-10											
Mez kluzu R_{eH} [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost ϵ_{min} [%]	C [%]	Cr [%]	Ni [%]	P_{max} [%]	S_{max} [%]	Mn ϵ_{max} [%]	N ϵ_{max} [%]	Mo ϵ_{max} [%]	Si ϵ_{max} [%]
210-260	520-720 ³ 540-750 ⁴	45	0,07	17,0-19,5	8-10,5	0,045	0,030	2	0,11	0,8	1

Vzorky nerezové oceli byly nejpočetnější. Celkem bylo vyhodnoceno 5 vzorků, každý o jiné tloušťce materiálu: 1, 2, 5, 8 a 10 mm. Bylo využito tavného režimu, jako pracovní plyn posloužil dusík. Vyobrazení všech vzorků nerezové oceli je na obrázku č. 34.

² Rozmezí hodnot dle stupně přetvoření za studena

³ Hodnota platí pro plechy válcované za tepla

⁴ Hodnota platí pro plechy válcované za studena



Obr. č. 35 Vzorky z nerezové oceli

Z obrázku č. 35 je na posledním vzorku patrné nevyříznutí středového otvoru. Jedná se o tloušťku vzorku 10 mm, který je již příliš silný pro tento výkon laseru. Vzorky o tloušťce 8 mm a 10 mm mají na řezných hranách silné otěpy.

6.4 Zástupce hliníkové slitiny [3], [55]

Materiál této kapitoly je hliníková slitina **AlMg3**, ekvivalentem v normě ČSN je zástupce 42 4413. Materiál je středně pevný, nevytvrzovatelný, velmi dobře odolný proti korozi, mořské vodě a tropickým podmínkám, je pro něj charakteristická velmi dobrá chemická odolnost. Je velmi dobře svařitelný všemi způsoby, přičemž svařené spoje jsou korozně odolné, téměř jako základní materiál. Vyznačuje se velmi dobrou leštitelností. Obrobitelnost řeznými nástroji v měkkém stavu je nevyhovující, avšak v tvrdším stavu již dostačující. Jeho plasticita je velmi dobrá v měkkém stavu a vyhovující ve stavu polotvrdém.

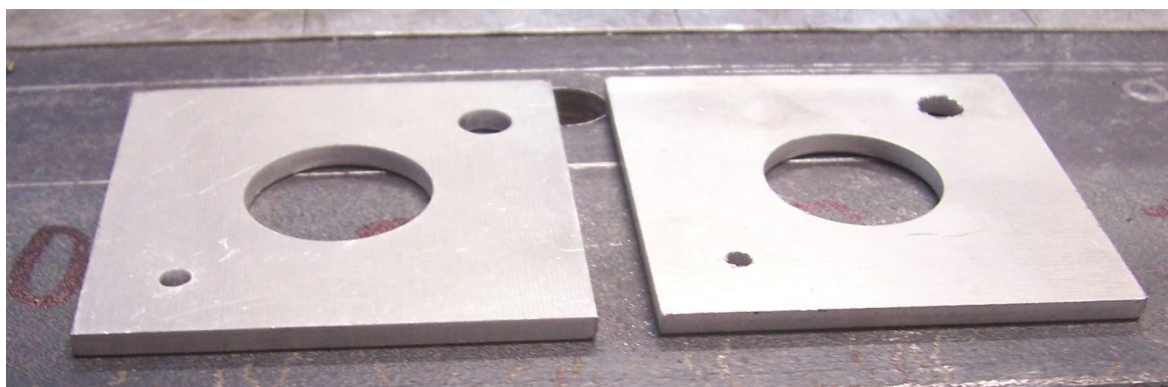
Používá se na středně namáhané konstrukce, svařované součásti a konstrukce, které mají odolávat korozi a mořské vodě. Nádoby ze žíhaného a deformací zpevněného materiálu mohou být vystaveny tlaku až 1,6 MPa při teplotách od -196 do +150 °C. Nachází široké použití v potravinářském a chemickém průmyslu, při stavbě vozidel a plavidel, ve vnější i vnitřní architektuře, ve stavebnictví jako krytiny střech, obklady a nosné konstrukce stěn či oken, dopravní značky. Typické výrobky: potrubí, nádoby na tekutiny, nosné konstrukce, výměníky tepla, ochranné kryty, součásti zemědělských, textilních, zpracovatelských strojů, automobilů, plavidla, nádrže čističek. V elektrotechnice se slitina využívá při výrobě elektrických spotřebičů a hliníkové fólie nacházejí široké uplatnění v potravinářství jako obalový materiál. Povrch může být eloxovaný, lakovaný, s protiskluzovou úpravou nebo surový, tedy bez dalších úprav. V tabulce č. 7 [1], [55] jsou uvedeny parametry této slitiny.

Tab. č. 7 Parametry hliníkové slitiny AlMg3 [1], [55]

AlMg3										
Mez kluzu R_{eH} [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ti max [%]	Zn max [%]	Cu max [%]	Fe max [%]	Si max [%]	Al
80-160 ⁵	180-280 ⁵	8-17 ⁵	0,05-0,4	2,6-4,0	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	zbytek

Pro hliníkovou slitinu byly zpracovány dva vzorky, oba o stejné tloušťce 3 mm. Řezání provedeno tavným režimem, pracovní plyn dusík. Zpracovávané vzorky jsou k vidění na obrázku č. 36.

⁵ Hodnota závisí dle stupně přetvoření materiálu za studena



Obr. č. 36 Vzorky z hliníkové slitiny

Jelikož vzorky pocházejí z již zaběhnuté sériové výroby, lze předpokládat optimálně nastavené řezné parametry a samotný proces řezání bez výrazných chyb a odchylek. Parametry byly nastaveny v závislosti na materiálu, tloušťce materiálu, použité metodě dělení a produktivity výrobního procesu. Vzhledem k výsledku vyhodnocení lze konstatovat, že samotný výrobní proces řezání je firmou technologicky velmi dobře zvládnut a využívá celého potenciálu instalovaného laseru.

6.5 Měření drsnosti [47], [48]

Samotné měření drsnosti na popsanych vzorcích bylo provedeno na přístroji MarSurf M300 od firmy Mahr. Jedná se o digitální drsnoměr s bezdrátovým bluetooth spojením s měřicí jednotkou MarSurf RD18. Napájení je pomocí baterií, v přístroji je integrována grafická termotiskárna a paměť pro výsledky a profily. Vyobrazení přístroje je na obrázku č. 37, tabulka parametrů přístroje pak v tabulce č. 8 [48].



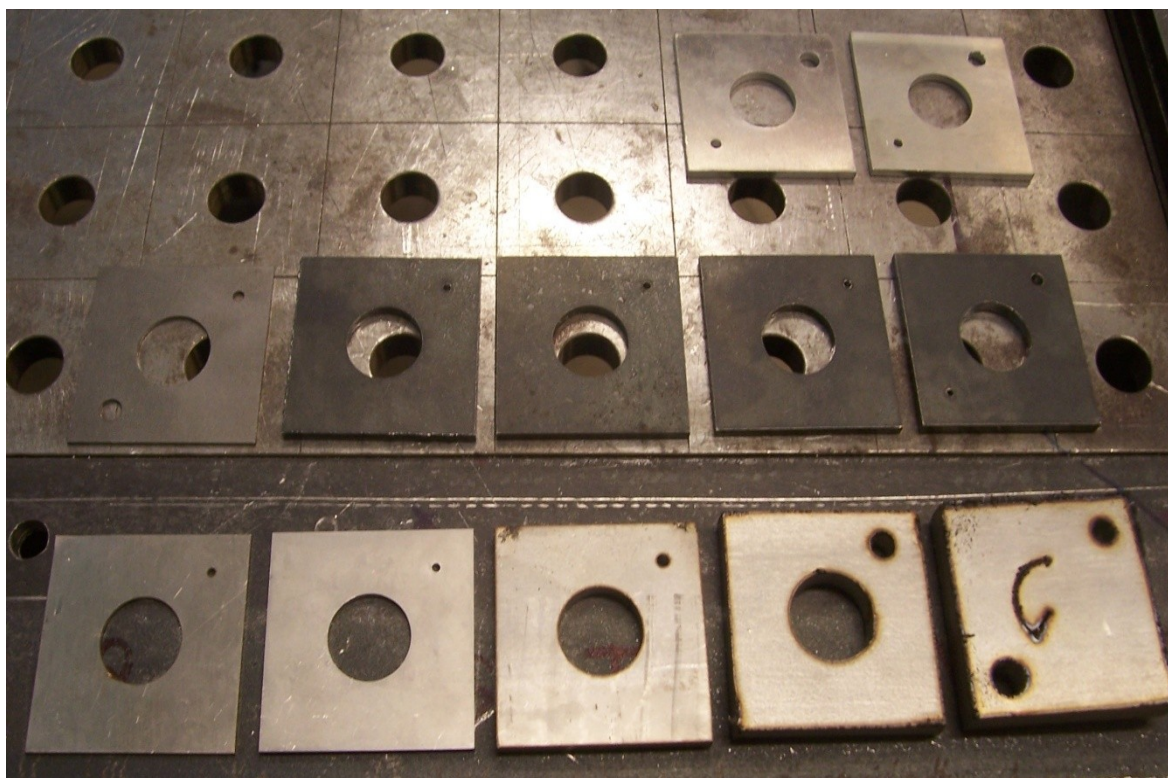
Obr. č. 37 Drsnoměr při měření vzorků

Tab. č. 8 Parametry drsnoměru MarSurf M300 [48]

Drsnoměr MarSurf M300	
posuvová rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	0,5
rozsah měření [μm]	350
rozlišení profilu	90 μm , 180 μm , 350 μm , 8 nm, 16 nm, 32 nm
měřená délka [mm]	1,75/5,6/17,5 1/2/4/8/12/16
měřené parametry	Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv, Rt apod.
rozlišení LCD obrazovky [px]	320x240, barevné
operační rozsah teplot [$^{\circ}\text{C}$]	od +5 do +40
hmotnost [kg]	1

Měření bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně. Vzorky byly nejdříve rozčleněny dle materiálu a tloušťky. Poté byly upnuty do svěráku pro zajištění polohy a takto byly vzorky připraveny k vlastnímu měření. Příprava drsnoměru spočívala v jeho sestavení, uvedení v provoz, navolení měřené délky a napolohování vůči měřenému vzorku.

Navolená celková vyhodnocovaná délka byla zvolena vzhledem k velikosti vzorku 1,750 mm, vyhodnocovaná základní délka tak měla hodnotu 0,250 mm. Pět následujících základních měřených délek pak tvoří jednu celkovou vyhodnocovanou délku. Pro jeden vzorek byly provedeny 4 měření, každý na jedné vnější řezné hraně. Dle pravidel normy ČSN EN ISO 9013 bylo toto měření situováno do poloviny řezu pro tloušťku vzorku menší, jak 2 mm, od tloušťky 2 mm pak bylo měření provedeno v horní třetině od horní hrany řezu, ale vždy v těch místech, kde se vizuálně daly předpokládat nejvyšší hodnoty drsnosti. Po každém měření byly zaznamenány hodnoty R_a a R_z , vzorek byl otočen a měření započalo nanovo. Po změření všech vnějších řezných hran byl vzorek vyjmut ze svěráku a vložen další. Všechny naměřené vzorky jsou k vidění na obrázku č. 38, kde první řadu tvoří hliníkové vzorky, druhou vzorky z konstrukčních ocelí a poslední řada je zastoupena vzorky nerezové oceli.



Obr. č. 38 Všechny měřené vzorky seřazené do skupin

7 ZAŘAZENÍ ZMĚŘENÝCH DRSNOSTÍ DO TŘÍD DLE ČSN EN ISO 9013

Pro každý vzorek byl z naměřených hodnot pro drsnosti Ra a Rz5 vypočítán průměr se směrodatnou odchylkou. Zpracované údaje byly pro skupiny měřených vzorků vyneseny do tabulek, viz níže. Norma ČSN EN ISO 9013 disponuje grafy s parametrem drsnosti Rz5. Tyto grafy pracují se závislostí kvality řezné hrany na řezané tloušťce materiálu. Do těchto grafů jsou vneseny naměřené hodnoty pro určení třídy přesnosti měřeného vzorku.

Měřený vzorek o určité tloušťce a naměřené drsnosti je znázorněn jako bod, který protínají dvě úsečky. Směrodatná odchylka je znázorněna prodloužením vertikální úsečky bodu o svou hodnotu na stupnici Rz5. Takto znázorněné body pak spadají do určité skupiny přesnosti definované normou, nebo díky svému rozptylu, daným směrodatnou odchylkou, jsou na pomezí dvou skupin.

7.1 Zhodnocení vzorků konstrukčních ocelí

První skupinou jsou konstrukční oceli. Naměřené parametry drsnosti Ra a Rz5 pro ocel **S235JR** jsou vepsány do tabulky č. 9. Hodnoty Rz5 jsou pak vneseny do grafu na obrázku č. 38. V grafu jsou vyneseny i třídy přesnosti definované normou.

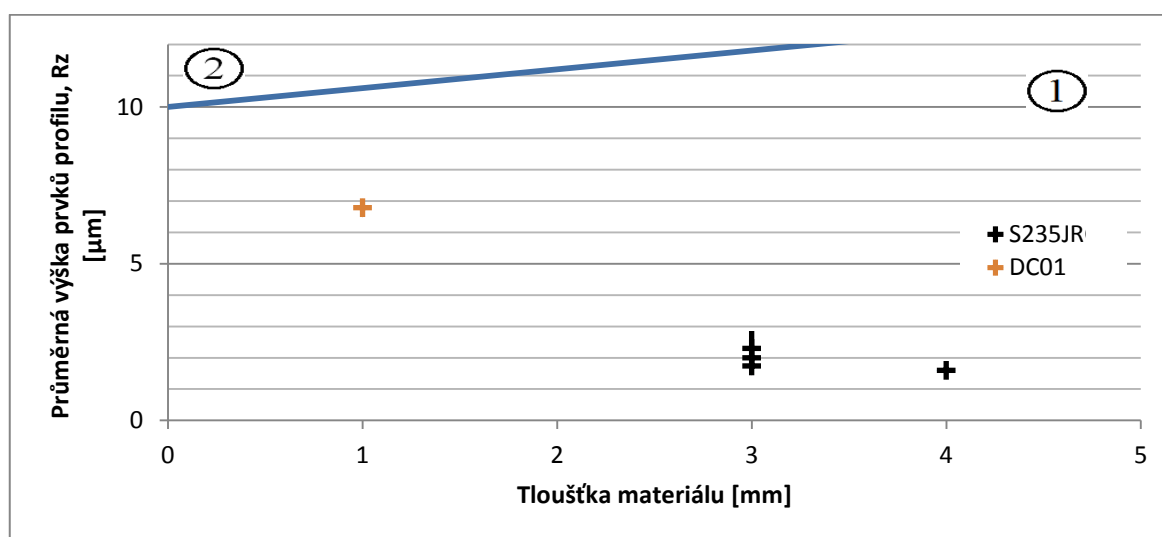
Do skupiny konstrukčních ocelí spadá i vzorek oceli **DC01**, který pro znázornění byl vnesen také do grafu na obrázku č. 39 k oceli S235JR. Naměřené parametry drsnosti jsou uvedeny v tabulce č. 10. V příloze č. 1 jsou vyobrazena makra řezných hran.

Tab. č. 9 Naměřené hodnoty drsnosti pro konstrukční ocel S235JR, řezané oxidačně

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota [μm]					Střední hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
	Parametr drsnosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č. 4		
3	Ra	0,36	0,93	0,27	0,34	0,48	0,26
	Rz5	1,59	4,20	1,51	1,91	2,30	1,11
3	Ra	0,33	0,42	0,40	0,25	0,35	0,07
	Rz5	1,53	1,93	2,32	1,30	1,77	0,39
3	Ra	0,39	0,31	0,34	0,31	0,31	0,03
	Rz5	1,98	1,66	1,62	1,69	1,74	0,14
4	Ra	0,24	0,40	0,25	0,69	0,40	0,18
	Rz5	1,12	1,57	1,14	2,56	1,60	0,58

Tab. č. 10 Naměřené hodnoty drsnosti pro konstrukční ocel DC10, řezané oxidačně

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota [μm]					Střední hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
	Parametr drsnosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č. 4		
1	Ra	1,52	1,16	1,28	1,30	1,32	0,13
	Rz5	7,17	5,99	6,84	7,16	6,79	0,48



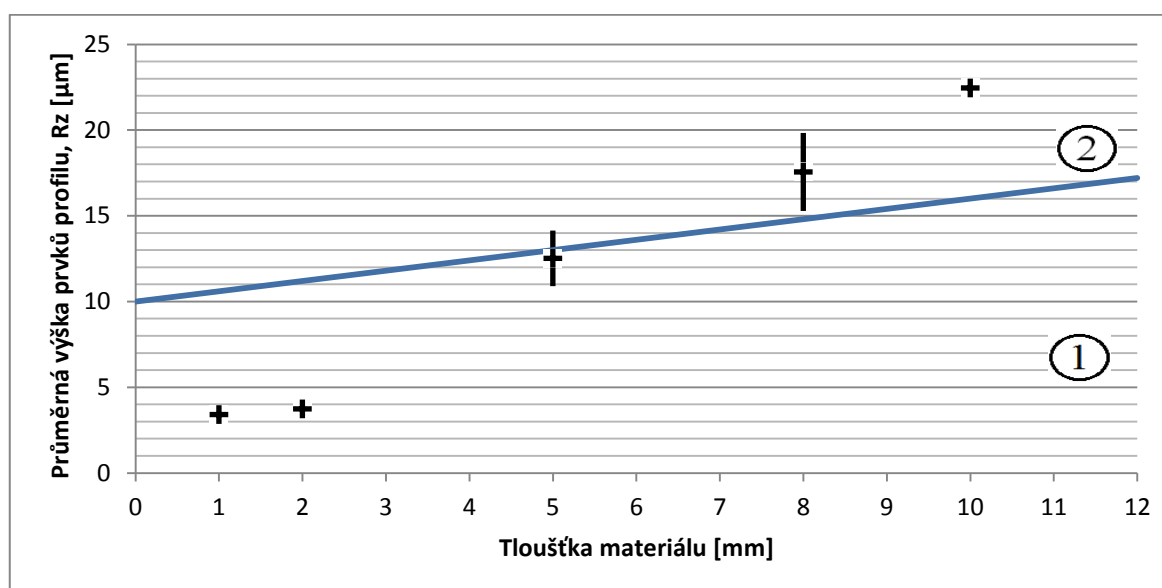
Obr. 39 Zařazení vzorků konstrukčních ocelí S235JR a DC01 do tříd přesnosti

Z grafu je patrné, že všechny vzorky konstrukčních ocelí spadají do třídy přesnosti 1. Je až s podivem, jak vynikajících parametrů drsnosti dosáhla ocel S235JR. Překvapí i fakt, že s přibývajícím tloušťkou tohoto materiálu nevzroste nekvalita řezných hran, ovšem pro statické vyhodnocení této závislosti není dostatečný počet naměřených vzorků. Nepřekvapí však, že vzorek oceli DC01 dopadl ze všech vzorků konstrukční oceli nejhůře, byť se jedná o nejtenčí vzorek z této skupiny. Vysvětlení lze nalézt v jiných řezných parametrech a také v odlišném složení materiálu a zvláště v jeho přetvoření. DC01 je totiž o ocel válcovaná za studena, kdy byly při válcování do materiálu vneseny značná zbytková napětí, která byla laserovým řezem uvolněna, a tím došlo k deformaci řezné hrany těmito napětími – zhoršení drsnosti povrchu.

7.2 Zhodnocení vzorků korozivzdorné oceli

Zástupcem skupiny je ocel **X5CrNi18-10**. Ocel byla řezána tavně s pracovním plynem N_2 . Naměřené parametry drsností jsou uvedeny v tabulce č. 11. Střední hodnoty Rz_5 i s odchylkami jsou vyneseny do grafu na obrázku č. 40 spolu s třídami přesnosti dle normy. Tab. č. 11 Naměřené hodnoty drsnosti pro nerez. ocel X5CrNi18-10, řez. tavně s N_2

Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota [μm]					Střední hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
	Parametr drsnosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č. 4		
1	Ra	0,73	0,58	0,67	0,66	0,66	0,05
	Rz5	3,69	2,64	3,60	3,71	3,41	0,45
2	Ra	0,84	0,68	0,66	0,78	0,74	0,07
	Rz5	3,99	3,67	3,46	3,82	3,74	0,19
5	Ra	1,66	2,88	2,20	2,85	2,40	0,51
	Rz5	7,48	14,87	11,91	15,80	12,52	3,24
8	Ra	3,82	3,93	2,59	4,97	3,83	0,84
	Rz5	15,84	19,93	11,14	23,31	17,56	4,55
10	Ra	5,13	4,67	5,66	4,86	5,08	0,37
	Rz5	23,03	22,95	22,79	21,05	22,46	0,82



Obr. č. 40 Zařazení vzorků korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 do tříd přesnosti

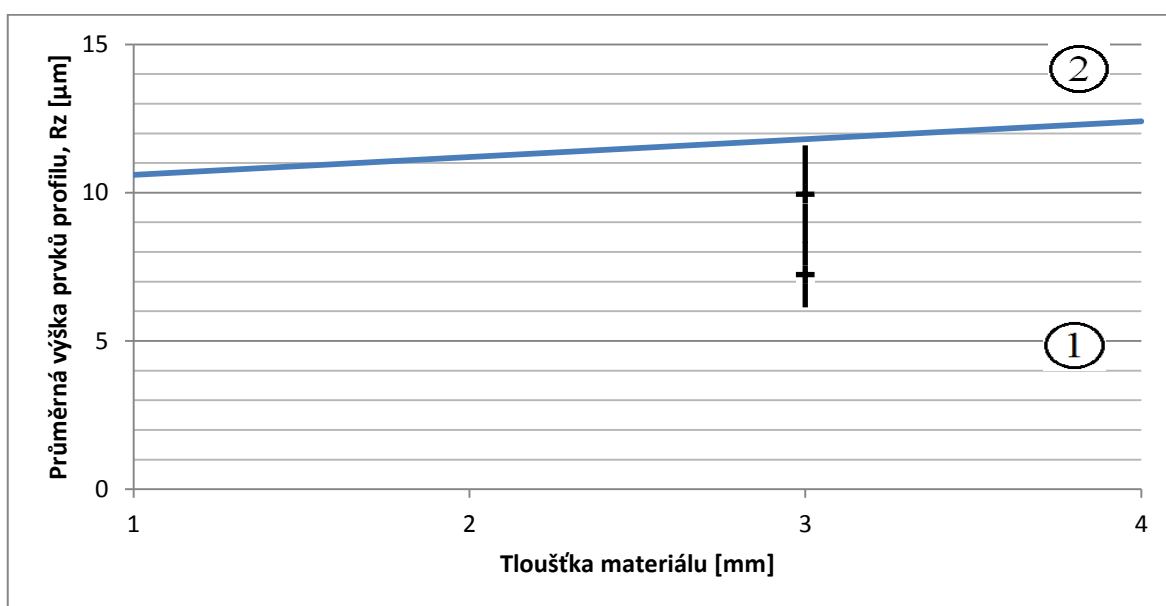
Vyhodnocené vzorky spadají dle grafu do prvních dvou tříd přesnosti. Kvalita řezné hrany je závislá na tloušťce materiálu, s přibývajícím tloušťkou se drsnost hran zhoršuje, závislost je podobná lineární závislosti. Ke zhodnocení by se slušelo říci, že vzorky dopadly opět velmi dobře vzhledem k naměřené drsnosti hran a použité technologii dělení. Je však nutné uvést, že poslední dva vzorky (tloušťky 8 a 10 mm) jsou již pro řezání na hranici možnosti laseru, což je patrné z obrázku č. 34, kdy nedošlo u posledního vzorku k vyříznutí středového otvoru. V příloze č. 3 jsou vyobrazena makra řezných hran.

7.3 Zhodnocení vzorků z hliníkové slitiny

Poslední skupinou jsou vzorky z hliníkové slitiny AlMg3. Naměřené hodnoty jsou vyneseny do tabulky č. 12. Ačkoliv Ra není součástí normy, stojí v tomto případě za zhlédnutí v porovnání s parametrem Rz5. Hodnoty Rz5 jsou vyneseny v grafu na obrázku č. 41, kde spolu s třídami přesnosti použité z normy ilustrují zařazení těchto vzorků do tříd přesností. V příloze č. 2 jsou vyobrazena makra řezných hran.

Tab. č. 12 Naměřené hodnoty drsnosti pro AlMg3, řezané tavně s N₂

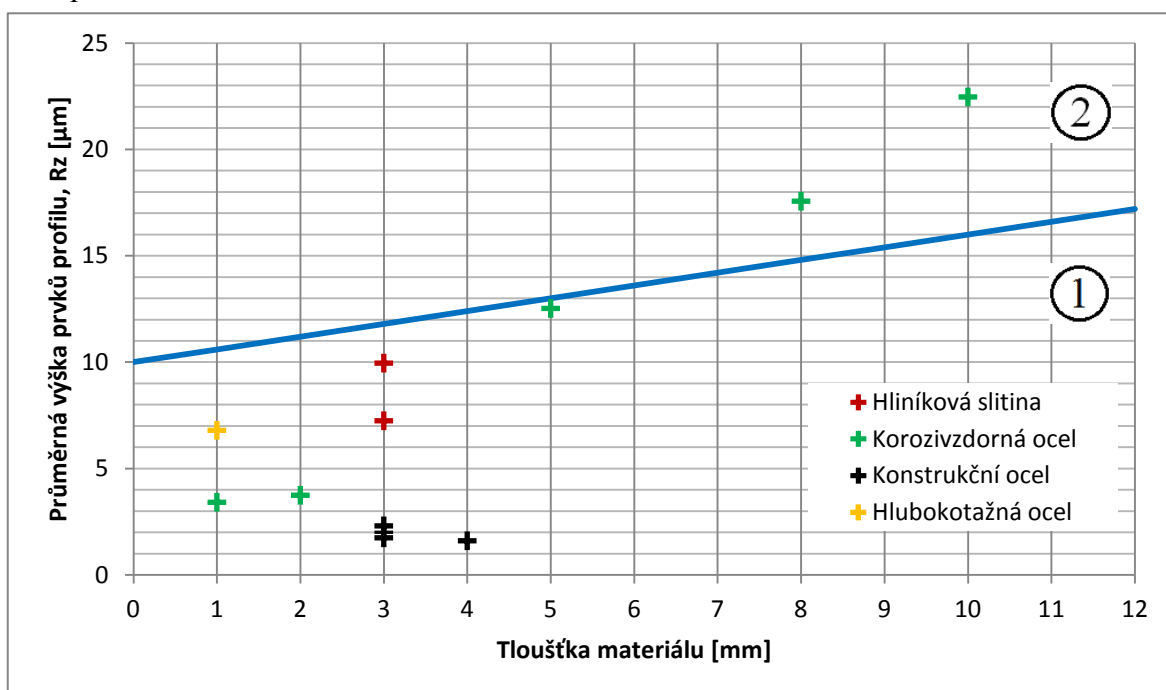
Tloušťka materiálu [mm]	Naměřená hodnota [μm]					Střední hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
	Parametr drsnosti	Hrana č. 1	Hrana č. 2	Hrana č. 3	Hrana č. 4		
3	Ra	1,57	2,41	1,65	0,89	1,63	0,54
	Rz5	7,17	10,14	7,71	3,94	7,24	2,21
3	Ra	2,41	1,57	3,76	1,34	2,27	0,95
	Rz5	10,6	8,96	14,69	5,54	9,95	3,29



Obr. č. 41 Zařazení vzorků hliníkové slitiny AlMg3 do tříd přesnosti

Z grafu je zřejmé, že oba vzorky spadají i se směrodatnou odchylkou do první, tedy nejkvalitnější skupiny. Obecně se vzorky z hliníkových slitin řezou na laserových zařízeních do tloušťky 10 mm. Proto nepřekvapí fakt, že vzorky z této poslední skupiny mají vzhledem k tloušťce materiálu nejvyšší drsnost řezné hrany v parametru Rz5. Avšak zařazení do první třídy přesnosti dle normy je výsledek velmi dobrý.

V grafu na obrázku č. 42 jsou pak zaznamenány všechny vzorky ve třídách přesnosti podle normy ČSN EN ISO 9013. Kromě dvou nejtlustších vzorků z nerezové oceli se všechny ostatní vzorky nacházejí v první (nejkvalitnější) třídě přesnosti. Lze tedy prohlásit, že všechny vzorky bez ohledu na materiál do tloušťky 5 mm včetně se nacházejí v první třídě přesnosti.



Obr. č. 42 Zařazení všech vzorků do tříd přesnosti

ZÁVĚRY

Rešerže řezných metod používaných pro dělení materiálů se zvýšenou pozorností na dělení materiálů laserem ve formě plechů s následným vyhodnocením vzorků laserového dělení průmyslovým pevnolátkovým laserem poslední generace. V první části této práce je nastíněn obecný proces dělení různými technologiemi, od konvečních třískových a tvařecích metod přes tepelné metody po řezání vodním paprskem a speciální metody dělení využívané pro typické průmyslové aplikace.

Blíže byly zpracovány základy laserové technologie doplněné o typy laserů a metody laserového dělení. Na závěr teoretické části byly zpracovány řezné parametry s následnými vadami a metodika měření drsností použitá pro samotné zpracování vzorků. Vyhodnocení bylo provedeno na základě platné normy ČSN EN ISO 9013, zabývající se touto problematikou u laserového dělení materiálů.

Vzorky byly pořízeny na průmyslovém pevnolátkovém vláknovém laseru Yb:YAG laseru. Jednalo se druhově o vzorky z konstrukčních ocelí S235JR a DC01, nerezové oceli X5CrNi18-10 a hliníkové slitiny AlMg3, tedy vzorků nejčastěji průmyslově zpracovávaných plechů laserovou technologií. Celková tloušťka vzorků tvořila rozhraní od 1 do 10 mm. Vzorky byly změřeny na drsnost řezných hran a vyhodnoceny dle výše uvedené normy. Řezné hrany vzorků jsou velmi kvalitní, do tloušťky 5 mm včetně nejsou přítomné otřepy, odpadá jejich další opracování. Dle vyhodnocených výsledků měření z hlediska drsnosti spadají až na dvě výjimky do první, nejkvalitnější, skupiny normy. Výjimku utvořily poslední dva nejtlustší vzorky z nerezové oceli o tloušťce plechu 8 a 10 mm, které spadají do druhé třídy jakosti dle normy. Oba tyto vzorky vykazují na hranách střední až silné otřepy. Chybu lze hledat v nedostatečném výkonu laseru, jehož 3 kW výkon již nemusí plně stačit na tak silné nerezové plechy.

Celkové zařazení naměřených vzorků povětšinou do první skupiny přesnosti a minoritně i do druhé jakostní třídy lze pokládat za výborné, neboť zůstávají hluboko pod normou udávanými obvyklými hodnotami. Vyhodnocení ukazuje i na technologicky dobře připravenou výrobu, ze které pocházejí tyto vzorky, i na kvality poslední generace vláknového laseru, který byl použit k vyřezání vyhodnocených vzorků. Výsledek této práce potvrzuje i celkový trend nahrazování plynových CO₂ laserů nynějšími pevnolátkovými Yb:YAG lasery pro snadnější obsluhu i velmi dobré výsledky při vyřezávání tenčích plechů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [15]

1. A + A PARDUBICE S R.O. *Slitiny hliníku* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>
2. AICHLER, Jaroslav. *Systém managementu měření*. Brno, 2009. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/11380/AICHLER_Jaroslav_DIPLOMA%20THESIS.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Koška, Ph.D.
3. ALFUN A.S. *Hliníkové plechy a pásy* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/sortiment/hlinik/plechy-a-pasy>
4. AMADA AMERICA, Inc. *Cutting Know-how for Amada lasers* [online]. Schaumburg, 2011 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.amada.com/>
5. ARC-H HRADEC KRÁLOVÉ S.R.O. *Laserové pracoviště TRUMPF – Trulaser 3030* [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.vypalky.cz/vyroba-vypalky/9-tepelne-dleni-materialu/59-laserove-pracoviste>
6. ASHOORI, V., M. SHAYGANMANESH a S. RADMARD. InTech - Open Science Open Minds. In: *Heat Generation and Removal in Solid State Lasers* [online]. 2012 [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/an-overview-of-heat-transfer-phenomena/heat-generation-and-removal-in-solid-state-lasers#article-front>
7. ASV V.D. *Nový vysekávací stroj* [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.asv-solnice.cz/cz/aktuality/novy-vysekovaci-stroj-10>
8. BARABÁŠ, Martin. *Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou*. Brno, 2012. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/5796/2012_BP_Barab%C3%A1%C5%A1_Elektrojiskrov%C3%A9_%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD_dr%C3%A1tovou_elektrodou.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vendula Švecová.
9. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s. ISBN 80-857-7172-1.
10. BENKO, Bernard, Peter FOLDEREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
11. BOHDAN BOLZANO S.R.O. *Přehled vlastností oceli S235JR* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
12. BOHDAN BOLZANO S.R.O. *X5CrNi18-10: Technická příručka* [online]. 2004 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/zaruvzdorne_oceli/korozivzdorne/Materialovelisty/austeniticke/X5CrNi18-10/
13. BYSTRONIC LASER AG. *Laser cutting system BySprint Fiber* [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.bystronic.com/com-en/products/LaserSystems/BySprintFiber.php>
14. CENTRUM LASEROVÝCH A AUTOMATIZAČNÍCH TECHNOLOGIÍ. *Rozdělení laserů* [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>

15. *Citace PRO* [online]. KMa Webdesing, 2004 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>
16. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
17. CZ FERRO - STEEL, spol. s r.o. ČSN 11320 – ocel k tažení a tváření za studena [online]. 2011 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky2-11320.pdf>
18. DAWSON, Jay. *Photons & Fusion Newsletter* [online]. 2012 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <https://lasers.llnl.gov/news/photons-fusion/2012/june>
19. DINU, Andrei. Lera Blog. In: *How Can Laser Cutting Serve Your Business?* [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://lerablog.org/business/how-can-laser-cutting-serve-your-business/>
20. DOČEKAL, Miroslav. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb - YAG*. Brno, 2013. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/27382/2013_BP_Docekal%20Miroslav_133448.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
21. DRÁBEK, Michal. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54189. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
22. EURO INOX. *Korozivzdorné oceli - vlastnosti* [online]. Lucembursko, 2002 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
23. FEROMAT BRNO, s.r.o. *Jakosti ocelí* [online]. 2010 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
24. FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. *TransCut - plasmové řezání* [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-E0ACBE76-2C708690/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3918.htm
25. GAJDOŠ, František, Milan DVOŘÁK a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tvaření: Plošné a objemové tvaření*. Brno: WELCO, spol. s r.o., 1996. ISBN 80-214-0771-7.
26. GAJDOŠÍK, David. *Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřicí techniku Mytutoyo SJ 210*. České Budějovice, 2013. Dostupné z: http://theses.cz/id/xoi08h/BP_Gajdok.pdf. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
27. G.A.M. HEAT GMBH. *Technické precizní díly z kovu* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: www.gam.de/cz/vyrobní-oblasti/technicke-dily.html
28. HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství*. Brno, 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5663. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
29. HORDĚJČUK, Jakub. *Třískové a netřískové obrábění*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

30. HUMÁR, Anton. *Výrobní technologie II: Strojírenská technologie* [online]. 2008 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_II.pdf
31. CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I.: Plynové lasery pro průmyslové využití* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_3prez.pdf
32. CHPS S.R.O. *Materiály* [online]. 2012 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/materialy>
33. Industrial Maintenance Solutions for Manufacturing and Industry. *Oxy-Acetylene Cutting* [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.maintenance-industrial.com/welding-7.html>
34. JERMOLAJEV, Štěpán. *Technologie dělení materiálu rozbrušováním*. Brno, 2011. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/408/2011_BP_Jermolajev_Stepan_115643.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Prokop.
35. JET EDGE WATERJETS SYSTEMS. *How a Water Jet Machine Works* [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp_applications_101
36. KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. *Elektrorevue. Optické metody měření 3D objektů* [online]. 2005, č. 23 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2>
37. KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
38. KAŠPAR, Ladislav. *Analýza konvenční technologie dělení materiálu*. Brno, 2008. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6241/2008_BP_Kaspar_Ladislav_75051.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.
39. KORANDA, Petr. *Plynové lasery* [online]. 2010 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/10_plynove_lasery.pdf
40. KOVO FUKAL S.R.O. *Řezání laserem* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.kovofukal.cz/sluzby/cnc-rezani-laserem.html>
41. KUSALA, Jaroslav. *Laser a jeho využití: Konstrukce laserů* [online]. 2004 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/f4.htm>
42. *Laserové a plazmové řezání* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2009 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
43. LENFELD, Petr. *Technologie II: Tvaření kovů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#018
44. LIBOR MRŇA *Konzultace*.
45. LINDE GAS. *Nové barevné značení tlakových lahví* [online]. 2008 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/BarevneZnaceniTlakLahvi200779_16200.pdf
46. LUKÁŠEK, Jaromír a Petr ZATLOUKAL. *Laserové dělení materiálu* [online]. 2007 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>

47. MAHR GMBH. *MarSurf M 300 - Mahr Metrology* [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.mahr.com/en/products/metrology/by-mahr-product-group/marsurf/systems/portable-instruments/marsurf-m-300/?ContentID=10575>
48. MAHR GMBH. *MarSurf M 300* [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.msi-viking.com/assets/images/downloads/productspecsheets/MahrSpecSheets/MarSurf%20M%20300%20SET%20download.pdf>
49. MRB SAZOVICE S.R.O. *Řezání laserem 3D* [online]. 2011 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.mrb.cz/cz/kategorie/rezani-laserem-3d.aspx>
50. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf
51. MRŇA, Libor. *Svařování svazkem elektronů* [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_svazkem_elektronu_2013__mrna.pdf
52. M&M TECHNIKA S.R.O. *Pásová pila na kov* [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.mamtechnika.cz/sn1470-pasova-pila-na-kov-2-000w-1-470x13x0-65mm>
53. NC LINE S.R.O. *CNC vysekávání* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.ncline.cz/index.php?lang=cz&menu=zamereni&submenu=vysekavani>
54. NOVOTNÝ, Karel. *Speciální technologie výroby: Část tvaření* [online]. 2002 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/SpecTechnologieVyroby.pdf>
55. NPS PROAL S.R.O. *Hliník AlMg3 - ČSN 424413: Hliníkové profily* [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424413.htm>
56. *Odborné vzdělávání s moderní technikou: Drsnost povrchu* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-05-18]. CZ.1.07/1.1.02/04.0004. Dostupné z: files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf
57. PÁSOVÁ OCEL S.R.O. *Výrobní program* [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.pasovaocel.cz/vyro_kla.htm
58. PRUMYSL.cz. In: *ZKL představuje převratnou novinku: nová ložiska testuje řízenou explozi* [online]. 2013 [cit. 2014]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/zkl-predstavuje-prevratnou-novinku-nova-loziska-testuje-rizenou-explozi/>
59. RYBA, Jakub a Pavel KOŘÁN. *Lao - lasery a optika. In: Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting)* [online]. 2013 [cit. 2014]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
60. RYBA, Jakub a Miroslav NOVÁK. *Lao - lasery a optika. In: Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. 2013 [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
61. SOLICAD S.R.O. *Detailní popis funkcí programu SprutCAM: Elektroerozivní řezání drátem (Wire EDM)* [online]. 2012 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://solicad.com/i/detailni-popis-funkci-programu-sprutcam/c/sprutcam-detaily/g/sprutcam-info?page=9>

62. ŠŤASTNÝ, Jan. *Souvislost vad řezu s řeznými parametry při laserovém řezání*. Brno, 2012. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7626/2012_DP_Stastny_Jan_101272.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
63. ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů* [online]. 2004 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
64. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská Metrologie: Část 1* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
65. TRUMPF. *Vysekávání - TRUMPF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/vysekavani.html>
66. TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG. *Laser processing: CO2 laser* [online]. 2007 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
67. ÚSTAV FOTONIKY A ELEKTRONIKY AVČR. *Vláknové lasery: jasné světlo ze skleněných nitek* [online]. 2010 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.ufe.cz/docs/articles/10_Peterka_CesCasFyz_50_let_laseruvlaknove_lasery.pdf
68. VACULKA, Jakub. *Měření drsnosti hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5146/2012_BP_Vaculka_Jakub_126436.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
3D	[-]	prostorové zobrazení nebo manipulace
D	[mm]	průměr krystalu
CW	[-]	kontinuální režim laseru (z angl. Conginuous Wave)
E1	[-]	nejnižší energetická hladina elektronu
E2	[-]	energetická hladina elektronu
E3	[-]	energetická hladina elektronu
E4	[-]	nejvyšší energetická hladina elektronu
F _{max}	[N]	maximální síla při střihání
IR	[-]	infračervené záření
LASER	[-]	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla stimulovanou emisí záření)
LED	[-]	luminescenční dioda
ln	[mm]	vyhodnocovaná délka při měření drsnosti
lr	[mm]	základní délka při měření drsnosti
lt	[mm]	vyhod. celková délka pohybu při měření drsnosti
MASER	[-]	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení mikrovln stimul. emisí záření)
P	[-]	parametr základního povrchu
PN	[-]	PN přechod polovodiče
R	[-]	parametr drsnosti povrchu
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu drsnosti
ReH	[MPa]	horní mez kluzu materiálu
Rm	[MPa]	mez pevnosti materiálu
Rq	[μm]	průměrná kvadratická úchylka profilu
Rt	[μm]	největší hloubka drsnosti vyh. v celém rozsahu délky
Rz	[μm]	největší výška základního profilu
Rz5	[μm]	průměrná výška profilu
Uv	[-]	ultrafialové záření
W	[-]	parametr vlnitosti povrchu
Zt	[μm]	výška profilu. Srovnatelné s Rt.
a	[mm]	tloušťka řezaného materiálu
d	[mm]	tloušťka krystalu
n	[mm]	skluz
r	[mm]	poloměr zaoblení natavené horní hrany
u	[mm]	úchylka kolmosti

Seznam prvků periodické tabulky

Zkratka	Název
Al	hliník
Ar	argon
Be	beryllium
Cd	kadmium
Cl	chlór
Cr	chrom
Cu	měď
Er	erbium
F	fluor
Ga	galium
H	vodík
He	hélium
Ho	holmium
I	jód
Kr	krypton
Li	lithium
Mo	molybden
Nd	neodym
Ne	neon
Ni	nikl
O	kyslík
P	fosfor
Se	selen
Si	křemík
Ti	titan
Tm	thulium
Xe	xenon
Y	yttrium
Yb	ytterbium

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Výpis vlastností plynových laserů [14]	20
Tab. č. 2 Výpis vlastností pevnolátkových laserů [14]	22
Tab. č. 3 Technické parametry laseru Bistronic BySprint 3015 Fiber 3000 [13], [44]	37
Tab. č. 4 Parametry oceli S235JR [11]	37
Tab. č. 5 Parametry oceli DC01 [17], [57]	38
Tab. č. 6 Parametry oceli X5CrNi18-10 [12]	38
Tab. č. 7 Parametry hliníkové slitiny AlMg3 [1], [55]	39
Tab. č. 8 Parametry drsnoměru MarSurf M300 [48]	40
Tab. č. 9 Naměřené hodnoty drsnosti pro konstrukční ocel S235JR, řezané oxidačně	42
Tab. č. 10 Naměřené hodnoty drsnosti pro konstrukční ocel DC10, řezané oxidačně	42
Tab. č. 11 Naměřené hodnoty drsnosti pro nerez. ocel X5CrNi18-10, řez. tavně s N2	43
Tab. č. 12 3D Naměřené hodnoty drsnosti pro AlMg3 , řezané tavně s N2	44

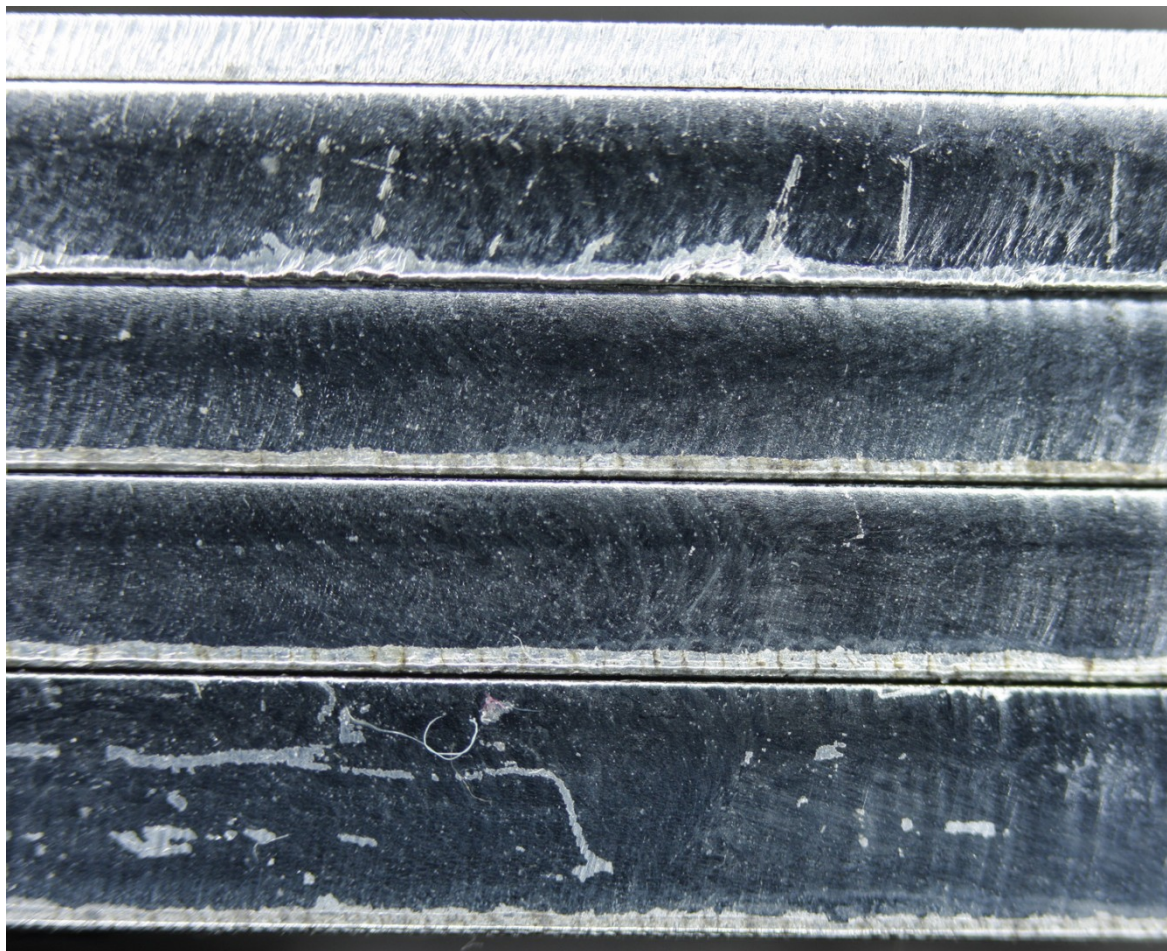
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 [44]
Příloha č. 2 [44]
Příloha č. 3 [44]

SEZNAM OBRÁZKŮ

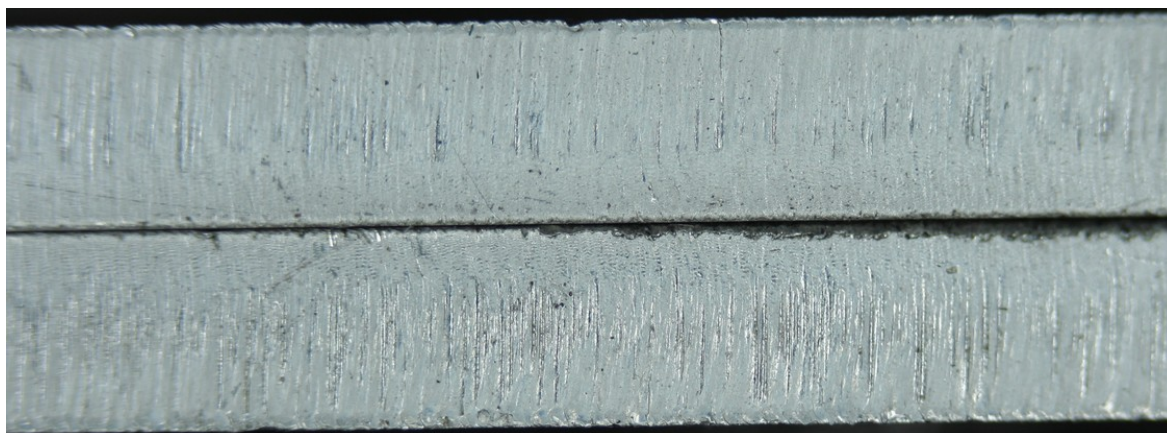
Obr. č. 1 Příklady ilustrující laserové řezání [19], [27], [40]	10
Obr. č. 2 Pásová pila [52]	11
Obr. č. 3 Vysekávání dílců na vysekávacím stroji [7]	12
Obr. č. 4 Profil střížné hrany a průběh síly při stříhu [25]	13
Obr. č. 5 Znázornění řezání plátu plechu autogenem [33]	14
Obr. č. 6 Schéma plazmové řezací hlavice s injekčním přívodem vody [24]	15
Obr. č. 7 Schéma elektronového řezacího zařízení [51]	16
Obr. č. 8 3D řezání laserem [49]	17
Obr. č. 9 Schéma tvorby vysokotlaké vody pro řezání vodním paprskem [35]	18
Obr. č. 10 Schéma procesu elektroerozivního řezání drátem [61]	19
Obr. č. 11 Schéma dělení materiálu ultrazvukem [29]	19
Obr. č. 12 Schéma difúzního CO ₂ laseru [59]	21
Obr. č. 13 Schéma Nd:YAG laseru buzeného výbojkami [60]	23
Obr. č. 15 Schéma vlákna vláknového laseru [18]	24
Obr. č. 14 Schéma diskového laseru [6]	24
Obr. č. 16 Srovnání typů Nd:YAG laseru [60]	25
Obr. č. 17 Poloha ohniska pro tavný režim [50]	26
Obr. č. 18 Poloha ohniska pro oxidační režim [50]	27
Obr. č. 19 Proces vzniku vroubkování [50]	28
Obr. č. 20 Rozdílná kvalita řezu různých typů materiálů stejné tloušťky [32]	28
Obr. č. 21 Srovnání nastaveného výkonu a jeho vliv na kvalitu řezu [4]	29
Obr. č. 22 Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu [4]	29
Obr. č. 23 Vliv výšky polohy ohniska na kvalitu řezu [4]	29
Obr. č. 24 Vliv tlaku pracovního plynu na vzhled a kvalitu řezné hrany [4]	30
Obr. č. 25 Schéma skluzu [68]	31
Obr. č. 26 Stejná hodnota parametru Ra pro různě členité profily [56]	32
Obr. č. 27 Znázornění profilu Ra na skutečném povrchu [2]	33
Obr. č. 28 Znázornění profilu Rz na skutečném profilu [2]	33
Obr. č. 29 Znázornění profilu Rt na celé délce vyhodnocované délky [2]	33
Obr. č. 30 Znázornění parametru Rz5 [16]	34
Obr. č. 31 Znázornění omezení měřené dráhy pro měření úchylky kolmosti u [16]	35
Obr. č. 32 Graf pro úchylku kolmosti nebo úhl. úchylku s vyznačenými tol. poli [16]	36
Obr. č. 33 Graf pro průměrnou výšku profilu s vyznačenými tolerančními poli [16]	36
Obr. č. 34 Vzorky z konstrukčních ocelí	37
Obr. č. 35 Vzorky z nerezové oceli	39
Obr. č. 36 Vzorky z hliníkové slitiny	40
Obr. č. 37 Drsnoměr při měření vzorků	40
Obr. č. 38 Všechny měřené vzorky seřazené do skupin	41
Obr. č. 39 Zařazení vzorků konstrukčních ocelí S235JR a DC01 do tříd přesnosti	43
Obr. č. 40 Zařazení vzorků korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 do tříd přesnosti	44
Obr. č. 41 Zařazení vzorků hliníkové slitiny AlMg3 do tříd přesnosti	45
Obr. č. 42 Zařazení všech vzorků do tříd přesnosti	45

Příloha č. 1 [44]



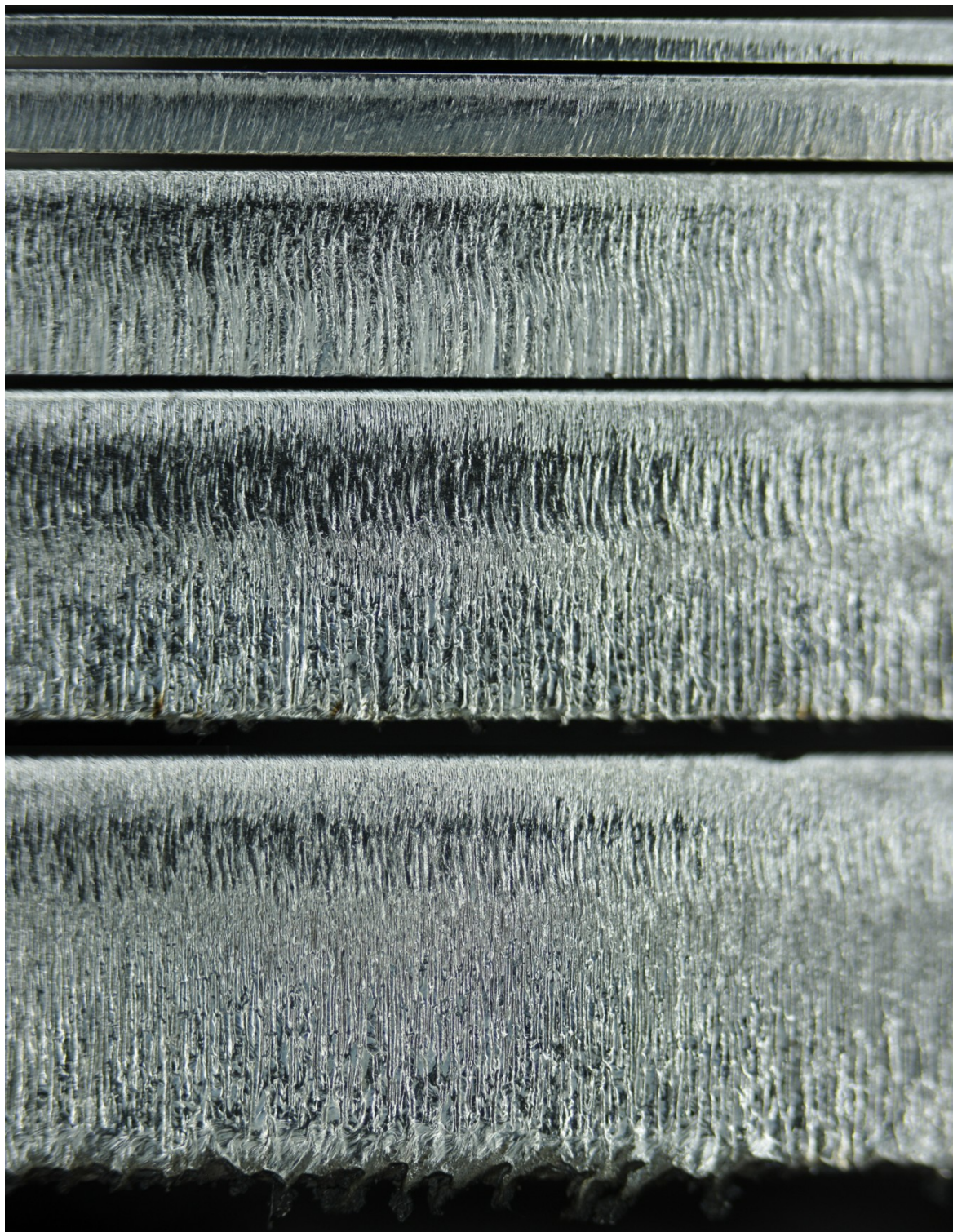
Makro řezné hrany vzorků z konstrukčních ocelí. Zhora: vzorek DC01 1 mm, S235JR 3 mm, 3 mm, 3mm a 4 mm.

Příloha č. 2 [44]



Makro řezné hrany vzorků z hliníkové slitiny. Zhora: vzorek AlMg3 3 mm a 3mm.

Příloha č. 3 [44]



Makro řezné hrany vzorků z nerezové oceli. Zhora: vzorek X5CrNi18-10 1 mm, 2 mm, 5 mm, 8 mm a 10 mm