

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Laserové řezání tenkých kovových fólií

Autor:	Vlastimil Jílek
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	1701R30 Přístrojová fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Hana Chmelíčková
Termín odevzdání práce:	srpen 2019

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Hany Chmelíčkové a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci

.....

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Vlastimil Jílek
Název práce	Laserové řezání tenkých kovových fólií
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR
Vedoucí práce	RNDr. Hana Chmelíčková
Rok obhajoby práce	2019
Abstrakt	Tato práce se věnuje technologiím laserového řezání a moderním zdrojům laserového záření. Dále zpracovává problematiku laserového řezání tenkých plechů a představuje vhodné moderní technologie. Součástí práce je ukázka řezání tenkých plechů laserem a zhodnocení výsledků.
Klíčová slova	laserové řezání, tenké plechy, kovové fólie, moderní technologie
Počet stran	65
Počet příloh	1
Jazyk	Český

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname	Vlastimil Jílek
Title	Laser cutting of thin metal foils
Type of thesis	Bachelor
Department	Joint Laboratory of Optics
Supervisor	RNDr. Hana Chmelíčková
The year of presentation	2019
Abstract	Firstly, the essay will examine the technology of laser cutting and also the modern resources of laser radiation. Complications of laser cutting of thin metal sheets are discussed further in the essay as well as the introduction to appropriate modern technology. A practical demonstration of laser cutting of thin metal sheets and result evaluation are included at the end of the essay.
Keywords	laser cutting, thin sheets, metal foils, modern technologies
Number of pages	65
Number of appendices	1
Language	Czech

Chtěl bych poděkovat své vedoucí RNDr. Haně Chmelíčkové za cenné rady při psaní bakalářské práce a pomoc s realizací experimentu.

Děkuji také Bc. Sabině Malecové a Mgr. Radimu Čtvrtlíkovi, PhD. za pomoc s vytvářením snímků výrobků.

Rád bych také poděkoval rodině, především své sestře Elišce Jílkové za pomoc s kontrolou bakalářské práce.

Obsah

Úvod	8
1 Laserové technologie řezání	9
1.1 Rozdělení laserových technologií řezání	9
1.1.1 Fúzní (tavné) řezání.....	9
1.1.2 Oxidační řezání	10
1.1.3 Sublimační řezání	10
1.1.4 Řezání fotochemickou ablací (studené řezání).....	11
1.2 Moderní technologie generace laserového záření	11
1.2.1 CO ₂ laser	11
1.2.2 Diskový laser.....	12
1.2.3 Vláknové lasery	13
1.2.4 Generace krátkých a ultrakrátkých pulzů.....	14
2 Řezání tenkých kovových fólií	16
2.1 Optimalizace procesu	16
2.2 Moderní technologie řezání tenkých kovových fólií	18
3 Experimentální část	19
3.1 Přístroje	19
3.1.1 Systém LASAG 246-102	19
3.1.2 Konfokální mikroskopy LEXT OLS 3100 a LEXT OLS 5000	25
3.2 Materiály	27
3.3 Nastavení experimentu.....	28
3.3.1 Konfigurace rezonátoru.....	28
3.3.2 Trysky.....	29
3.3.3 Uchycení materiálu na pracovní stůl	29
3.3.4 SPL program.....	31
3.3.5 Parametry procesu řezání	32
3.3.6 Hodnoty parametrů pro jednotlivé části experimentu	34
3.4 Parametry kvality řezu	37

4. Výsledky experimentu	38
4.1 Řezání oceli 0,1 mm	38
4.1.1 Optimalizace energie a rychlosti pro rezonátor R4.2	38
4.1.2 Optimalizace energie a rychlosti pro rezonátor R3.5	41
4.1.3 Optimalizace podkladu.....	44
4.2 Řezání oceli 0,05 mm	47
4.2.1 Optimalizace energie a rychlosti	47
4.2.2 Optimalizace tlaku plynu a průměru trysky	49
4.2.3 Vliv pozice na kvalitu řezu.....	52
5 Diskuze	57
Závěr	59
Seznam použitých pramenů	60
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	63
Přílohy.....	65

Úvod

Řezání materiálů bylo vždy důležitým procesem výroby. Od použití pily se proces řezání vyvinul až k moderním technologiím, jako je elektroerozivní drátové řezání. Velkým skokem v tomto vývoji bylo objevení možnosti řezání materiálů pomocí elektromagnetického záření a vyrobení laseru.

Velké využití získal laser při řezání tenkých kovových fólií a plechů. Mnoho výrobků je určeno pro použití v medicíně, proto je požadována vysoká kvalita. Často požadované tvary nelze klasickými metodami, jako je stříhání, vytvořit. Navíc kvalita hrany při stříhu není příliš vysoká. Postupným vývojem se technologie řezání tenkých plechů posunula od fúzního řezání k moderním technologiím, jako je třeba remote cutting.

Teoretická část práce shrnuje metody laserového řezání a moderní zdroje laserového záření. Dále se zabývá studii pojednávajícími o optimalizaci procesu řezání tenkých kovových fólií a moderních metodách řezání tenkých plechů.

V praktické části je realizováno řezání tenkých kovových fólií s využitím pulsního pevnolátkového Nd:YAG laseru LASAG KLS 246-102. Hlavním cílem práce je optimalizovat energii pulzu, řeznou rychlost, tlak plynu a průměr trysky pro řezání oceli o tloušťkách 0,1 mm a 0,05 mm. Dále je zkoumán vliv podkladu kovové fólie a pozice řezaného výrobku na kvalitu řezu. U výsledků je zkoumán výskyt nežádoucích tvarů v řezu, velikost tepelně ovlivněné oblasti a drsnost povrchu.

1 Laserové technologie řezání

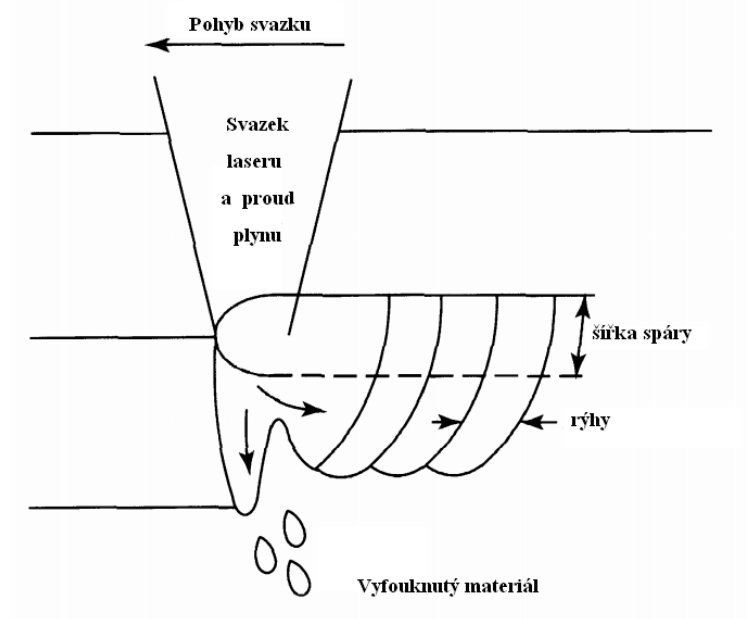
První laser měl aktivní prostředí z rubínu a nebyl příliš efektivní, ale ukázal výhody řezání laserem. Postupně se vyvinuly další druhy laserů a postupně se začali používat v průmyslu.

1.1 Rozdělení laserových technologií řezání

V důsledku rozvoje laserů mohlo dojít k postupnému vývoji technologií laserového řezání. Technologie laserového řezání můžeme rozdělit na řezání fúzní (tavné), oxidační, sublimační a řezání fotochemickou ablací. Tyto technologie a používané laserové zdroje jsou popsány v následujících kapitolách.

1.1.1 Fúzní (tavné) řezání

Technologie fúzního řezání je založena na roztavení a vypaření materiálu pouze energií laserového svazku. Materiál je vyfukován ze spáry řezu pracovním plynem vedeným koaxiálně s laserovým svazkem. Při použití kontinuálního laseru dochází vyfukováním roztaveného a odpařeného materiálu ke vzniku rýh v oblasti řezu (obrázek 1).



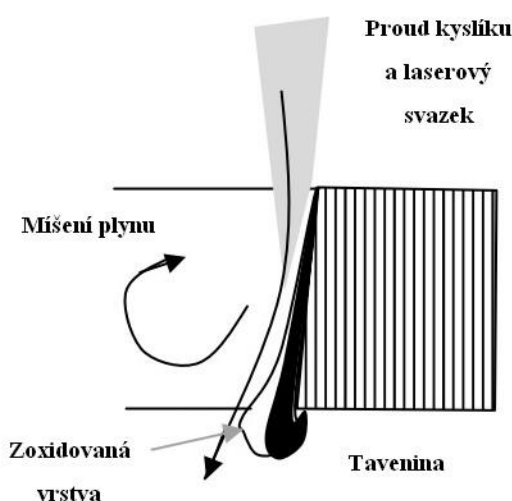
Obrázek 1: Detail procesu fúzního řezání při použití kontinuálního laseru. Upraveno z [1].

Pokud je použit pulsní laser, vznikají na hraně řezu vruby a doliny podle použitého překrytí pulzů a průměru svazku. Tlak plynu je závislý na tloušťce materiálu a může mít hodnotu 2 bar až 20 bar. Jako pracovní plyn je často použit dusík. Lze použít i vzduch. Pro některé

materiály (například Ti a jeho slitiny) je nutné použít jiný plyn. Používá se helium nebo argon. Při použití inertního plynu je řez čistý bez oxidace. Maximální tloušťka kovového materiálu, kterou je možné touto technologií řezat, je přibližně 8 mm [1], [2].

1.1.2 Oxidační řezání

Proces oxidačního řezání je podobný jako u fúzního řezání. Pracovní plyn, v tomto případě kyslík, je veden koaxiálně se svazkem a odstraňuje roztavený materiál ze spáry řezu. Rozdíl je v exotermické reakci kyslíku s materiálem. Exotermická reakce dodává další energii do materiálu a ulehčuje jeho tavení. Omezení této metody jsou dané vlastnostmi materiálu. V porovnání s fúzním řezáním lze při stejném průměrném výkonu řezat až dvakrát vyšší rychlostí. Při použití výkonných laserů lze řezat ocel až o tloušťce 50 mm. V řezu se opět vytvářejí rýhy a okraje jsou díky exotermické reakci zoxidované (obrázek 2) [1], [3].



Obrázek 2: Proces oxidačního řezání. Upraveno z [3].

1.1.3 Sublimační řezání

Princip sublimačního řezání je založen na odebrání materiálu odpařením. Použitá hustota výkonu laseru je velice vysoká – přibližně 100krát vyšší než při fúzním řezání. Materiál je zahřátý velice rychle, nedochází ke vzniku kapalné fáze a je snížen přenos tepla dále do materiálu. Díky tomu je kvalita řezu velice vysoká. Může být použit inertní plyn jako ochrana proti oxidaci. Metoda je vhodná převážně pro materiály s nízkou teplotou vypařování a nízkou tepelnou vodivostí. Díky moderním laserovým zdrojům ji lze dnes použít i na kovy. Běžně se používají lasery s krátkými pulzy, u nichž je dosaženo vysokého vrcholového výkonu [1], [4], [5].

1.1.4 Řezání fotochemickou ablací (studené řezání)

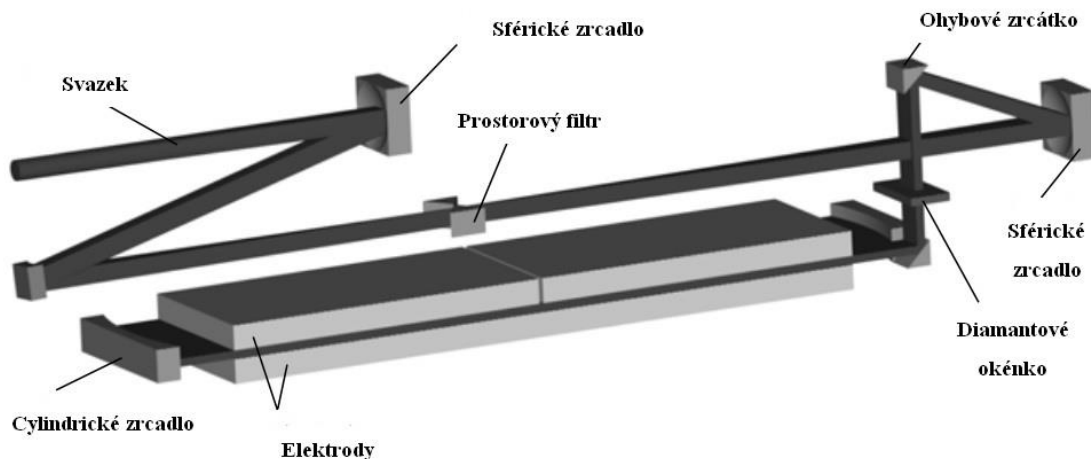
Princip řezání fotochemickou ablací je velice odlišný oproti předchozím technologiím. K odběru materiálu nedochází tepelným efektem, ale přímým „rozbitím“ chemických vazeb materiálu. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby. První možností je použití UV laserů s energií emitovaných fotonů (3,5 – 6,4) eV. Aby došlo k studenému řezání, musí být energie fotonu stejná nebo větší než vazebná energie částic v materiálu. Druhou možností je použití ultrakrátkých pulzů. Pro tento způsob je důležitá termální relaxační doba materiálu τ . Ta popisuje čas, za který je z vazby rozptýlena absorbovaná energie. Pokud je puls kratší než termální relaxační doba materiálu, absorbuje vazba více fotonů a je „rozbita“. Délka pulzů je ≥ 1 ps. Rušením chemických vazeb materiálu se zamezuje přenosu tepla do materiálu a řez je čistý [3], [5].

1.2 Moderní technologie generace laserového záření

Pro jednotlivé technologie řezání jsou vhodné různé typy laserů. V následujících kapitolách jsou popsány moderní zdroje vhodné pro různé technologie laserového řezání.

1.2.1 CO₂ laser

Nejpoužívanějším laserem pro oxidační řezání je CO₂ laser. Jeho aktivním prostředím je směs helia, dusíku, oxidu uhličitého (CO₂) a případně dalších plynů, které většinou proudí rezonátorem. Poměr plynů v aktivním prostředí se liší podle výrobce. Záření vzniká na molekulách CO₂. Nejčastěji je generována vlnová délka $\lambda = 10,6$ μm . Existuje několik používaných rezonátorů. Jedním z nejnovějších rezonátorů je SLAB rezonátor, obrázek 3. Výkon laseru může být až 8 kW při velice vysoké kvalitě svazku. Výhodou je nízká spotřeba směsi, 10 litrů plynu až na 15 měsíců, a kompaktní provedení. Laser s tímto rezonátorem dosahuje efektivity až 30 %.

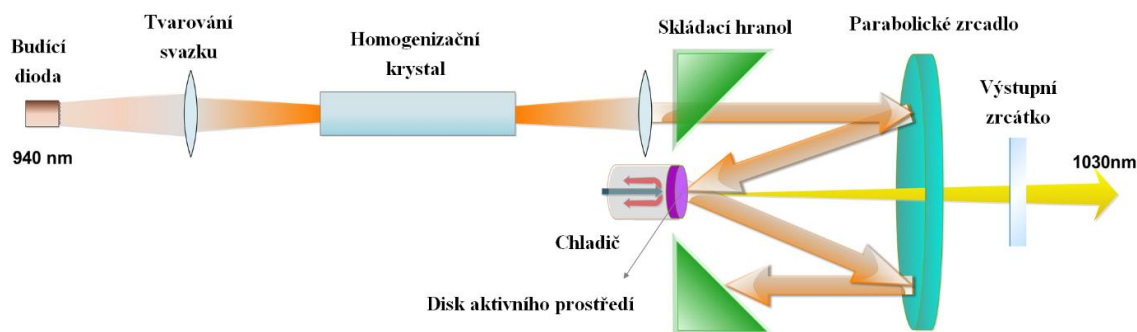


Obrázek 3: Schéma SLAB rezonátoru. Upraveno z [6].

Buzení aktivního prostředí je prováděno vysokofrekvenčním elektrickým proudem. Směs plynů je chlazena difúzním chlazením. Svazek je z rezonátoru na materiál přenášen pomocí zrcadel. Laser je schopen pracovat v kontinuálním režimu a pulzním režimu. Kvalita svazku CO₂ laserů je velice vysoká. U systému ROFIN DC Series Slab je $K \geq 0,95$, kde K má význam míry možnosti fokusace svazku na minimální průměr. Kvalitou se svazek blíží Gaussově svazku [6], [7].

1.2.2 Diskový laser

Pro fúzní řezání se často používaly tyčinkové lasery. Jejich nedostatkem je malá efektivita a ovlivnění kvality svazku zahřátím aktivního prostředí, tzv. thermal leasing effect. Z toho důvodu se dnes používají lasery diskové. Aktivní prostředí ve tvaru disku řeší problémy tyčinkových laserů. Disk má průměr asi 10 mm a šířku 100 až 300 μm . Jako se používá aktivátor Yb³⁺, který generuje světlo o $\lambda = 1\,030\text{ nm}$ – možnost dopování až do 30 %. Efektivita diskového laseru je až 20 %. Buzení laseru se provádí diodou emitující vlnovou délku $\lambda = 940\text{ nm}$. Světlo z diody projde do rezonátoru, odrazí se od parabolického zrcadla do disku aktivního prostředí, kde se od zadní stěny odráží zpět. Takto může svazek projít aktivním prostředím až 24krát, než vystoupí ven. Pro zvýšení výkonu je možné disky skládat za sebe. Chlazení je prováděno chladičem připojeným k zadní stěně aktivního prostředí (obrázek 4).

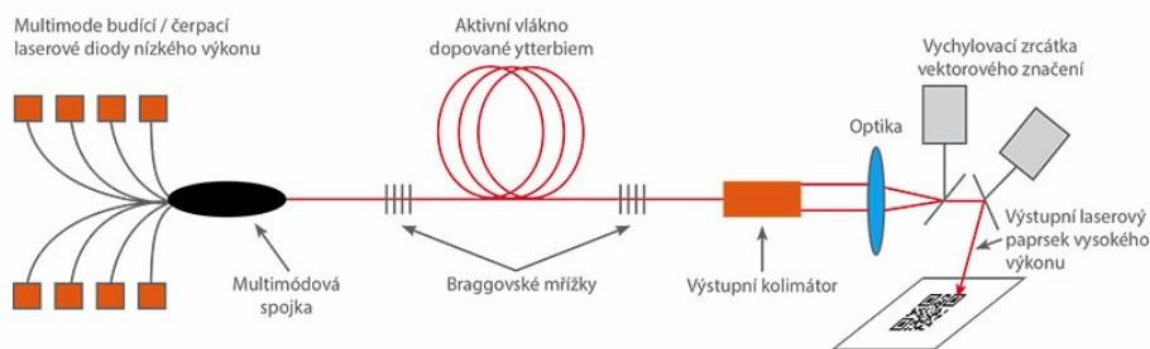


Obrázek 4: Schéma rezonátoru diskového laseru. Upraveno z [8].

Laser obvykle pracuje v kontinuálním módu. Při složení 4 disků může mít průměrný výkon až 16 kW. Pokud je použita technologie q-switch nebo mode-locking, může pracovat také v pulzní módu. Svazek laseru je z rezonátoru vyveden zrcadly a většinou navázán na optické vlákno. Lasery s vysokým výkonem mají multimódový svazek. Kvalita je závislá na průměru použitého optického vlákna. Minimální průměr vlákna je omezen výkonem. Příkladem jsou lasery společnosti TRUMPF. Laser s průměrným výkonem 12 kW a průměrem vlákna 300 μm má hodnotu $BPP = 12 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Hodnota BPP vyjadřuje kvalitu kruhového svazku pevnolátkových laserů. Nejlepší kvalitu svazku má laser s optickým vláknem o průměru 50 μm a výkonem (1 – 2) kW, kdy kvalita svazku dosahuje hodnoty $BPP = 2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ [6], [9], [10], [11].

1.2.3 Vláknové lasery

Další možností zvýšení efektivity pevnolátkového laseru a snížení jevu thermal laseing effect je aktivní prostředí v podobě vlákna. Vláknem aktivního prostředí může mít průměr v rozsahu 11 μm až 100 μm a délku až 100 metrů. Vláknem se skládá z vnějšího obalu a jádra, které je dopováno aktivátorem – nejčastěji ytterbiem a erbiem. Efektivita vláknových laserů je až 50 %. Rezonátor je velice odlišný oproti předešlým pevnolátkovým laserům. Záření je buzeno většinou pomocí diod a vedeno optickými vlákny. Ty jsou pomocí spojky navázány k vláknem aktivního prostředí. Koncová zrcátka jsou zde nahrazena Braggovými mřížkami. Vláknem je chlazeno pasivně vzduchem.



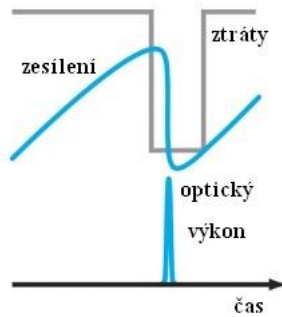
Obrázek 5: Schéma rezonátoru a optiky vláknového laseru. Převzato z [12].

Vláknový laser přirozeně pracuje v kontinuálním režimu. Jejich velkou výhodou je nenáročnost na provoz. V provozu jsou schopny fungovat více než 150 000 operačních hodin. Vlákná se můžou spojovat, výsledný svazek může mít výkon až ve stovkách kW. Vláknové lasery mají i při vysokých výkonech velice kvalitní svazek. Laser o výkonu 6 kW má svazek kvalitu v rozsahu $3 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \leq BPP \leq 4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Pro výkon 2,5 kW můžeme získat svazek s kvalitou $BPP \geq 0,4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Vysoká kvalita svazku umožňuje umístění pracovní hlavy ve větší vzdálenosti od materiálu. Svazek je fokusován na mnohem menší poloměr (vysoká hustota výkonu), pro vysoké výkony 0,01 mm, pro nízké výkony až pod 5 μm [13], [14].

1.2.4 Generace krátkých a ultrakrátkých pulzů

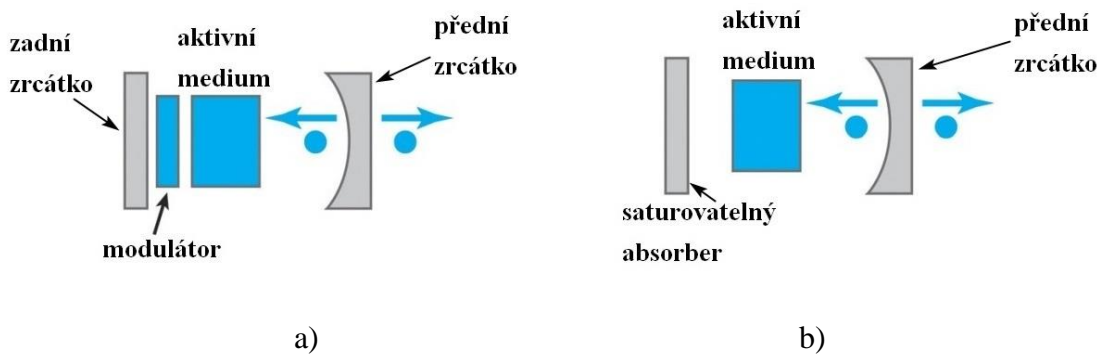
Všechny popsané pevnolátkové lasery přirozeně pracují v kontinuálním režimu. Pro některé technologie řezání je ale vhodnější pulzní režim. Pro získání pulzního režimu u kontinuálních laserů je nutné použít technologie q-switching nebo mode-locking.

Pro získání krátkých pulzů v řádů nanosekund se používá technologie q-switch. Do rezonátoru je umístěn prvek, který ovlivňuje množství ztrát rezonátoru. q-switching může probíhat pasivně nebo aktivně. Pasivní q-switching využívá jako prvku satureovatelný absorber. Na začátku absorber nechává ztráty vysoké. Po dosažení určité hladiny zesílení se saturuje a zabraňuje dalším ztrátám – zvyšuje se energie v rezonátoru. Po krátké době dojde k desaturaci a generaci pulzu (obrázek 6). Aktivní q-switching umožňuje ovládání množství ztráty, typicky akusticko-optickým modulátorem. Výhodou oproti pasivnímu řešení je možnost změny délky pulzu [15].



Obrázek 6: Průběh generace pulzu q-switch technologií. Upraveno z [15].

Pro generaci ultrakrátkých pulzů je využívána technologie mode-locking. Existuje aktivní a pasivní mode-locking. Aktivní mode-locking je realizován vložením modulátoru do rezonátoru (obrázek 7a). Pasivní mode-locking je realizován nahrazením zadního sklíčka saturovatelným absorbérem (obrázek 7 b)). Dochází k modulování ztrát, tím se vytváří a zkracují pulzy laseru. U aktivního mode-lockingu musí být modulace ztrát synchronní s průběhem pulzu v rezonátoru. V rezonátoru může existovat více pulzů najednou. Při každém odrazu od výstupního zrcátka je část energie pulzu propuštěna z rezonátoru a pulz je opět zesilován. Energie pulzů je velice nízká, v řádu jednotek pJ až stovek nJ. Frekvence pulzů z části závisí na délce rezonátoru a je pro daný laser stálá. Její hodnota může být v rozsahu kHz až THz. Délka generovaných pulzů je výrazně kratší než jeden průběh pulzu rezonátorem a lze dosáhnout hodnot v rozmezí $t = 5$ fs až $t = 50$ ps. Pasivní mode-locking umožňuje dosáhnout kratších pulzů než aktivní [15], [16].



Obrázek 7: a) Aktivní, b) pasivní mode-locking. Upraveno z [15].

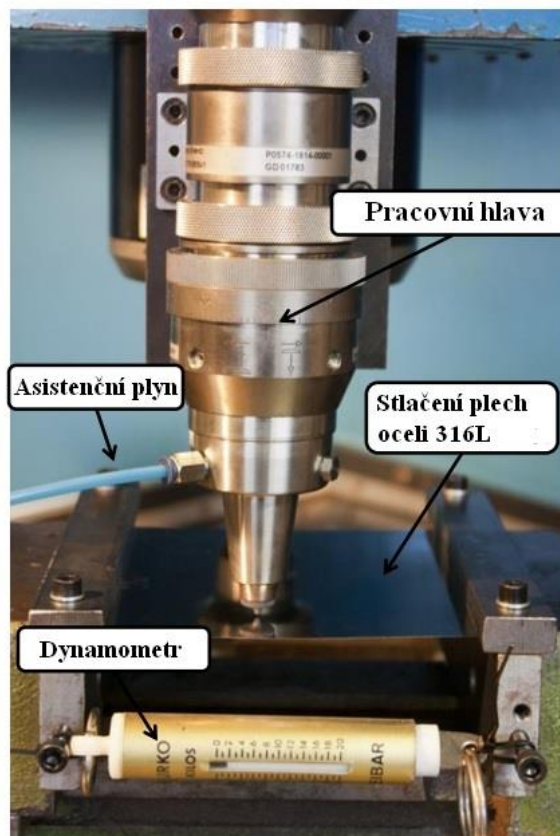
2 Řezání tenkých kovových fólií

Pro jednotlivé tloušťky materiálů je nutné vybrat vhodný laserový zdroj a technologii. Velice důležitá optimalizace parametrů procesu pro dosažení kvalitních výsledků. Je nutné také brát ohled na omezení dané přístroji. V následujícím textu jsou popsány procesy optimalizace řezání tenkých kovových fólií a moderní technologie z několika studií.

2.1 Optimalizace procesu

Optimalizací procesu řezání tenké kovové fólie se ve své studii zabývají Daniel Teixidor, Joaquim Ciurana, Ciro A. Rodriguez. Jejich hlavním zájmem byla závislost kvality řezu na vrcholovém výkonu, frekvenci pulzů a řezné rychlosti pro fixní tlak a typ plynu – dusík o tlaku 6 bar [17].

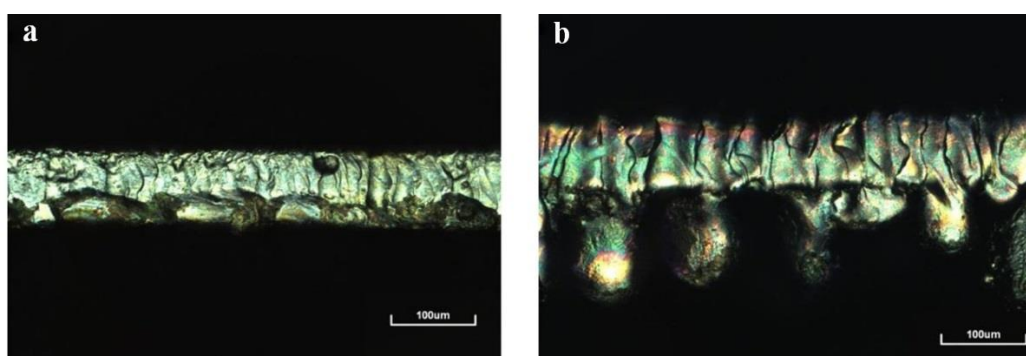
Pro experiment byl použit vláknový laser Rofin FL x50 s maximálním průměrným výkonem 500 W, vlnovou délkou 1 080 nm a faktorem kvality svazku $M < 1,1$. Jako materiál byla použita nerezová ocel 316L o tloušťce 0,1 mm. Ocelový plech byl secvaknutý a stlačený v tenzi o síle přibližně 2 N kvůli zamezení tepelné deformace (obrázek 8) [17].



Obrázek 8: Nastavení experimentu. Upraveno z [17].

Prvním zkoumaným parametrem kvality byla šířka spáry. Výsledky vykazují rozšíření spáry se zvýšením vrcholového výkonu, frekvence pulzu a řezné rychlosti. Průměrný výkon je úměrný frekvenci a vrcholovému výkonu, tedy při vyšším průměrném výkonu se zvětšuje šířka spáry. Je předpoklad, že při zvyšování řezné rychlosti dojde postupně ke zmenšení šířky spáry. Výsledky měli opačný trend. Důvodem byl příliš malý rozdíl mezi minimální a maximální rychlostí ($250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) pro vyjádření reálného trendu [17].

Druhým zkoumaným parametrem byla drsnost povrchu řezu. Drsnost řezu se zvyšovala s vrcholovým výkonem. S vyšší frekvencí pulzů se zvyšoval průměrný výkon. To vedlo k lepším výsledkům díky překrytí pulzů. Také při snížení řezné rychlosti se drsnost povrchu snížila. S drsností povrchu byly také zkoumány rýhy v povrchu, tzv. striations, které jsou s drsností povrchu vázány. Jejich výskyt je těžko pozorovatelný (obrázek 9) [17].



Obrázek 9: Drsnost povrchu řezu u a) kvalitního řezu, b) řezu s okujemi. Upraveno z [17].

Třetím zkoumaným parametrem byly tepelné efekty. Tenké materiály jsou na tyto efekty velice citlivé. Tepelné efekty jsou redukovány při snížení průměrného výkonu. Pokud je vrcholový výkon a frekvence pulzů vysoká, vyskytují se v řezu zaznamatelné tepelné efekty a oxidace podél řezu [17].

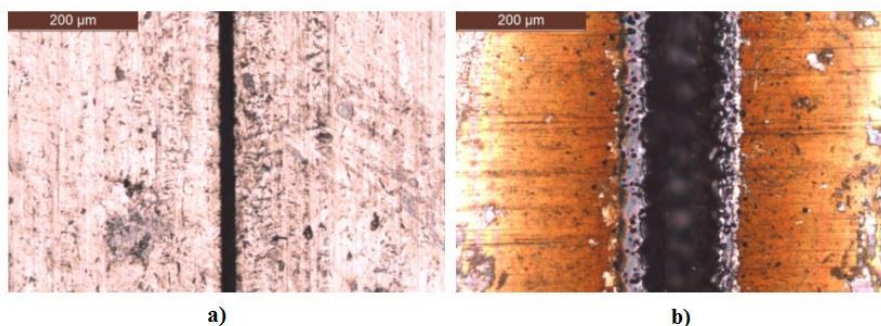
Posledním zkoumaným parametrem kvality byl výskyt okují – zachycené kapičky roztaveného materiálu na spodní straně řezu. Žádný z řezů nebyl bez okují. Roztavený materiál nebyl úplně odstraněn ze spáry a přichytil se k spodní straně řezu. Plocha okují se zvětšovala s rostoucím vrcholovým výkonem, frekvencí pulzu a řeznou rychlostí. Se zvýšením vrcholového výkonu frekvence se zvýší i průměrný výkon. Je roztaveno více materiálu a ten je obtížnější odstranit ze spáry pracovním plynem. Vysoká řezná rychlost zamezuje reakci plynu s roztaveným materiálem – zvětšení plochy okují. Inertní pracovní plyn nedodává další energii do řezu, ale odebírá ji. Tím se ochlazuje roztavený materiál a zvyšuje se jeho viskozita a přilnavost k povrchu [17].

Výsledkem je, že zvyšováním vrcholového výkonu se zvyšuje šířka spáry, drsnost povrchu a množství odpadního materiálu. Vyšší frekvence pulzů rozšiřuje spáru řezu a výskyt okují, ale také snižuje drsnost povrchu. Efekt rychlosti řezání je nutné dále zkoumat [17].

2.2 Moderní technologie řezání tenkých kovových fólií

Řezání tenkých kovových fólií lze provádět různými technologiemi. Jedna z moderních technologií je tzv. remote cutting. Jedná se o laserové řezání bez použití asistenčního plynu. Svazek laseru je rozmítán na materiál pomocí galvo-zrcadel. Materiál je pouze odpařen. Díky vysoké kvalitě svazku, malému průměru stopy svazku a vysoké hustotě výkonu lze řezat tenké plechy velmi vysokými rychlostmi. Například laser s průměrným výkonem 1 kW může teoreticky řezat plech o tloušťce 0,1 mm rychlostí vyšší než $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Řeznou rychlost omezují možnosti laserového systému. Další technologií je tzv. water-jet guided laser cutting (dále WJ cutting). Laser je svázán s vysokotlakým vodním paprskem do svazku. Vodní svazek efektivně chladí materiál a odebírá roztavený materiál ze spáry. Výsledkem je velice kvalitní a čistý řez. Tento proces je velice náročný [18], [19].

Ve studii K. Hocka, B. Adelmanna a R. Hellamna jsou tyto dvě technologie porovnány. Pro remote cutting byl použit laser o výkonu 20 W pulzní vláknový laser. Pro WJ cutting byl použit pulzní Nd:YAG laser pracující s výkony (2,6 – 20) W (podle tloušťky materiálu) a frekvencí pulzů byl 40 kHz. Tlak vodního svazku byl 250 bar. Průměr svazku byl (23 – 60) μm . Byla zkoumána šířka spáry, kvalita řezu a rychlost řezání pro řezy nerezovou ocelí o tloušťkách 100 μm , 50 μm a 25 μm a mosaz o tloušťce 50 μm . Dle výsledků WJ cutting redukuje tepelně ovlivněnou oblast, lépe odstraňuje odpadní materiál ze spáry, vytváří užší spáru a lze touto technologií řezat menší tvary. Oproti tomu remote cutting vykazuje mnohem vyšší produktivitu a nižší cenu výrobku. Porovnání šířky spáry, kvality řezu a tepelně ovlivněné oblasti lze vidět na obrázku 10 [19].



Obrázek 10: Řez nerezovou ocelí o tloušťce 50 μm a) water-jet guided laser cutting technologií, b) remote cutting technologií. Upraveno z [19].

3 Experimentální část

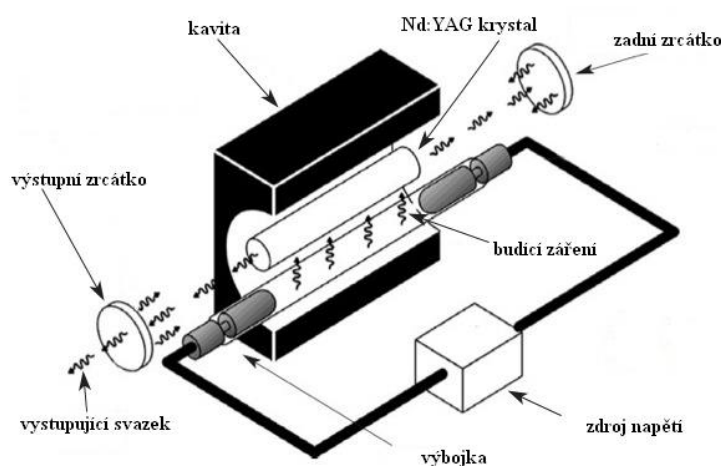
V následujících kapitolách je popsáno vybavení a nastavení experimentu. V kapitole 3.1 je popsán systém laseru použitý pro experiment a přístroje použité pro měření výsledků. V kapitole 3.2 je popsán materiál, který byl řezán. V kapitole 3.3 je popsáno kompletní nastavení experimentu. V kapitole 3.4 jsou popsány parametry použité při realizaci experimentu.

3.1 Přístroje

V této kapitole je popsán laser LASAG 246-102, který byl použit pro realizaci experimentu. Dále jsou popsány konfokální mikroskopy od firmy Olympus, LEXT OLS 3100 a LEXT OLS 5000, které byly použity pro zkoumání výsledků.

3.1.1 Systém LASAG 246-102

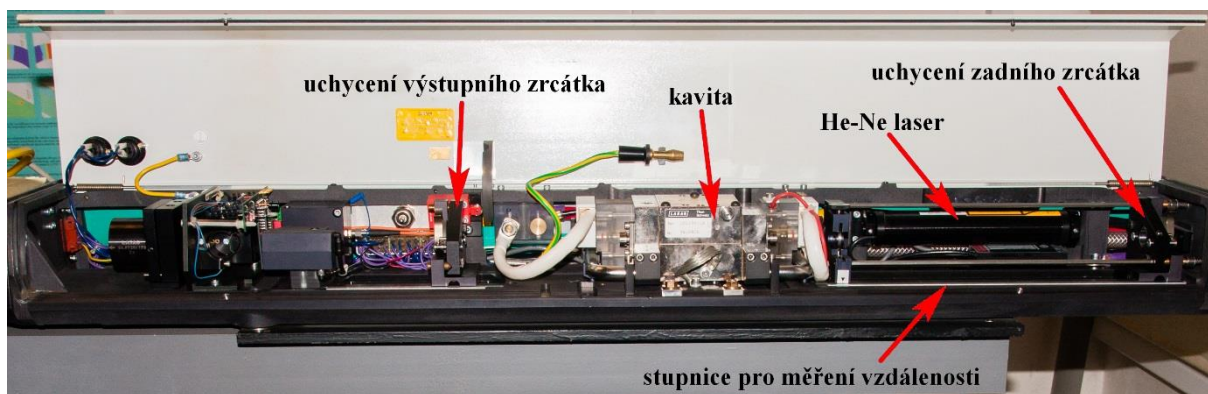
Experiment byl proveden na laseru od společnosti LASAG. Jedná se o pevnolátkový laser. Aktivním prostředím je krystal yttrito-hlinitého granátu (YAG) dopovaný ionty neodymu Nd^{3+} . Čerpání je prováděno kryptonovou výbojkou. Nákres buzení na obrázku 11. Krystal aktivního prostředí má tvar tyčinky o průměru 6 mm a délce 76,2 mm. Krystal je chlazen pomocí deionizované vody, která proudí skleněnými trubicemi skrz kavitu s krystalem. Maximální výkon chlazení je 8,5 kW. Laser generuje záření o vlnové délce $\lambda = 1064 \text{ nm}$ [20], [21], [22].



Obrázek 11: Model buzení rezonátoru Nd:YAG laseru. Upraveno z [23].

Laser pracuje v pulzním režimu. Je schopen generovat pulsy o délce (0,1 – 20) ms s frekvencí (0,1 – 1000) Hz. Průměrný výkon laseru je maximálně 150 W a vrcholový výkon maximálně 6 kW. Nejvyšší možná energie v pulzu je 30 J [22].

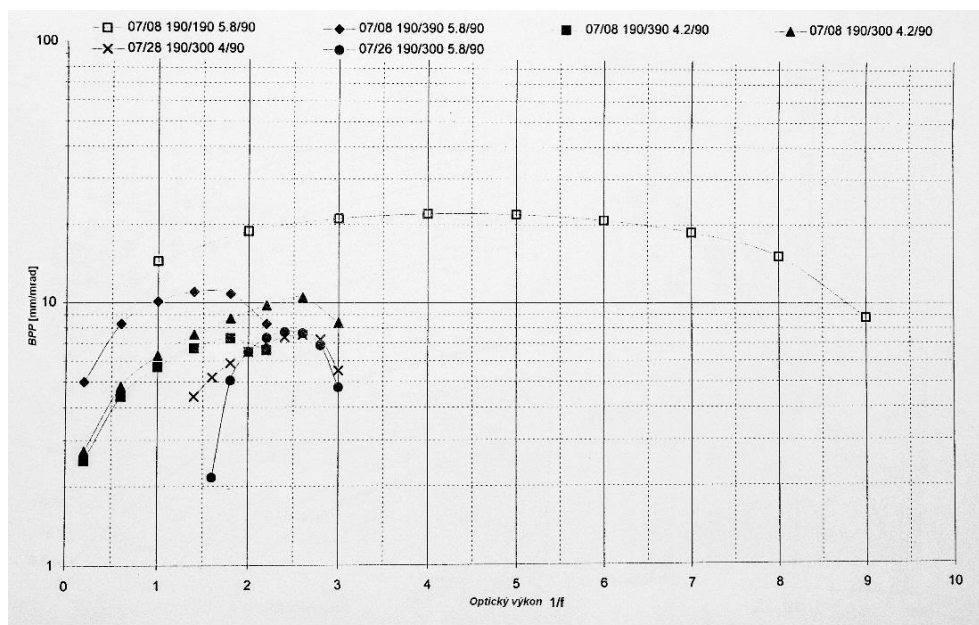
Výhodou laseru je nastavitelný rezonátor. Skládá se z výstupního zrcátka, kavity, ve které je krystal a budící výbojka, clony a zadního zrcátka. Dále se v rezonátoru nachází justážní a naváděcí He-Ne laser. Kavita s krystalem je umístěna mezi výstupním zrcátkem a clonou. Od pozice čelních ploch krystalu jsou měřeny vzdálenosti zrcátek a clony (obrázek 12).



Obrázek 12: Rezonátor laseru LASAG KLS 246-102.

Výstupní zrcátko s označením 44.0007 je umístěno ve vzdálenosti 190 mm od čelní plochy krystalu. Jeho výměna probíhá pouze v případě poškození. Clona je umístěna ve vzdálenosti 90 mm od zadní stěny krystalu. Je výměnná. K dispozici jsou clony o průměrech 5,8 mm, 4,2 mm a 3,5 mm. Zadní zrcátko má pohyblivou pozici v rozsahu (190 – 390) mm. Je možné jej vyměnit podle nastavení rezonátoru. K dispozici jsou 2 zrcátka. Rovinné zrcátko s označením 44.0008 a kulové zrcátko s označením 44.0026 [21], [22].

Existuje několik kombinací nastavení vzdáleností zadního zrcátka, průměru clony a typu zadního zrcátka, při kterých je generováno záření (rezonátorů). Pro každý rezonátor existují určitá omezení výkonu nebo kvality svazku, který je schopen laser generovat (obrázek 13).

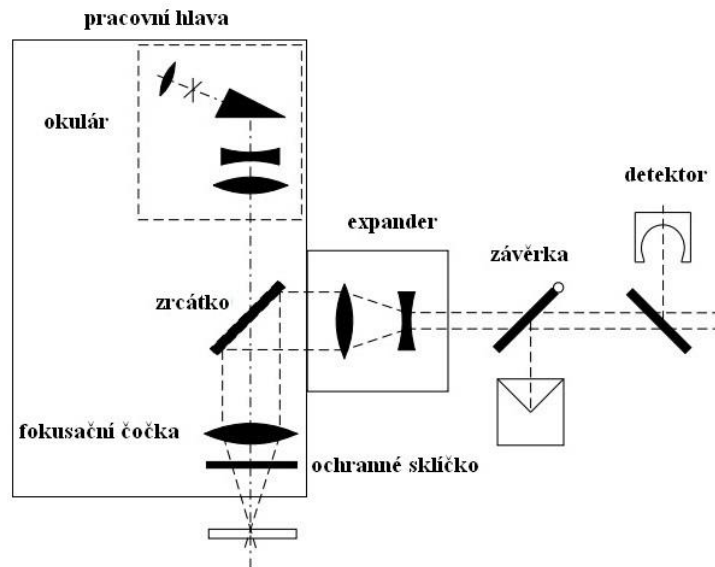


Obrázek 13: Závislost kvality svazku na optickém výkonu pro jednotlivé rezonátory.

Upraveno z [21].

V experimentu byl použit rezonátor s označením 07/08 190/390 4,2/90 (dále R4.2) a rezonátor s označením 07/08 190/390 3,5/90 (dále R3.5). Rezonátor R3.5 v grafu na obrázku 3.3 není uveden. Oba rezonátory mají zadní zrcátko rovinné ve vzdálenosti 390 mm od krystalu. Liší se pouze použitím clony o průměru 4,2 mm v rezonátoru R4.2 a clony průměru 3,5 mm v rezonátoru R3.5. Svazek všech rezonátorů je multimódový.

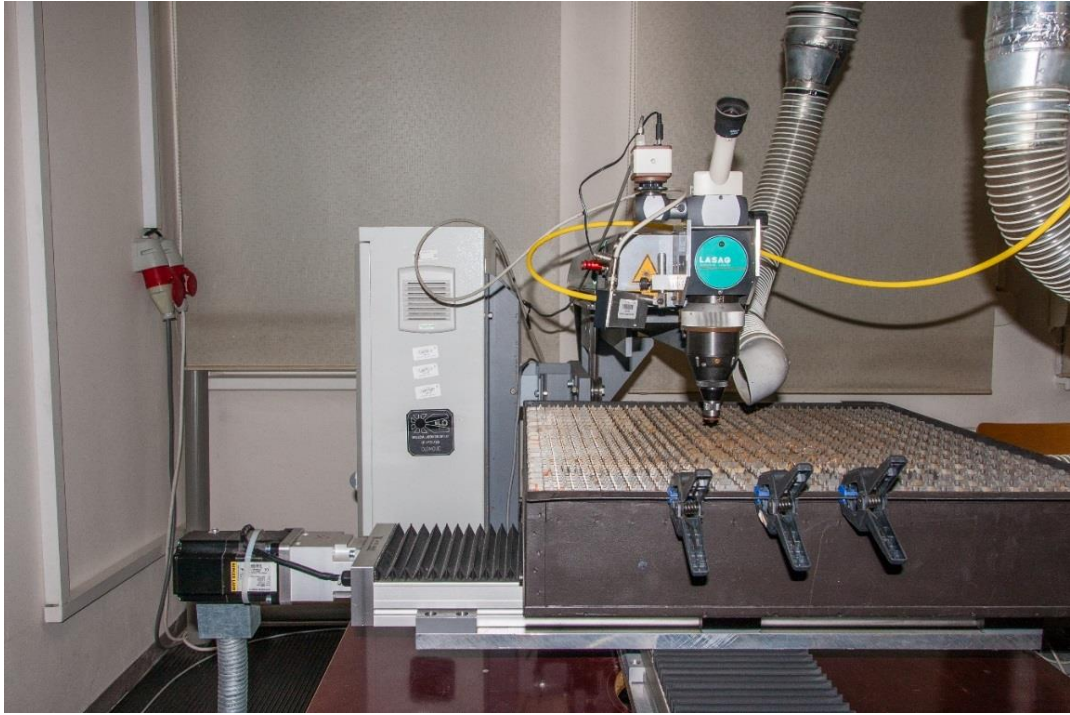
Svazek vycházející z rezonátoru je veden na materiál pomocí optické soustavy skládající se z polopropustného zrcátka – část energie odráží do detektoru – závěrky, expandéru, zrcátka, fokusační čočky a ochranného sklíčka (obrázek 14). Zrcátko odráží záření laseru, ale je průhledné pro viditelné záření. Díky tomu je možné přes připojený okulár pozorovat průběh práce laseru a zaměřování. Pozorování je možné přímo nebo přes CCD čip.



Obrázek 14: Schéma optické soustavy. Upraveno z [20].

Konec optické soustavy je součástí pracovní hlavy. Za koncové skličko je vyveden pracovní plyn, který chrání optiku před nečistotami a odstraňuje odtavený a odpařený materiál ze spáry. Pracovní plyn je usměrněn do spáry tryskou. Tryska je přišroubována na konec pracovní hlavy. Tryska musí být správně vycentrována. Pracovní hlava laseru má několik možností nastavení. Pomocí prstence je možné měnit pozici ohniska. Posuvníkem je možné přepínat mezi okulárem a CCD čipem. Obraz z čipu je přenášen na obrazovku. Pracovní hlavu je možné naklonit až o 15° , aby při svařování nedocházelo ke zpětnému odrazu záření do rezonátoru [21].

Pracovní hlava je statická. Posuv materiálu zajišťují servomotory motory pracovního stolu. Na motorech je připevněna konstrukce stolu. K ní je připevněno odsávání. Na konstrukci je připevněn ocelový rošt s 2 roztečemi mezi hroty, 15 mm a 30 mm. Odsávání je také umístěno nad rošt k pracovní hlavě (obrázek 15).



Obrázek 15: Pracovní stůl, odsávání a pracovní hlava laseru LASAG KLS 246-102.

Napájení laseru je prováděno pomocí zdrojového boxu. Box je napájen ze sítě napětím 3x380 V. V boxu je umístěna také pumpa vnitřního chladicího okruhu. De-ionizovaná voda je chlazená externím sekundárním okruhem připojeným k zdrojovému boxu. Na boxu jsou umístěny ovladače pro zapnutí laseru – hlavní vypínač, klíč interlocku, bezpečnostní tlačítko a tlačítka ON (zelené), OFF (červené). K boxu je připojen ovládací panel (dále hand), jak je vidět na obrázku 16. Hand je připojen kabelem a je jej možné v rámci dosahu přemísťovat. Jsou na něm základní ovládací prvky laseru a display s hodnotami energie, frekvence, délky pulzu a napětí. Při provozu je laser ovládán pomocí PC. Hlavní použití handu je při seřizování nastavení rezonátoru.

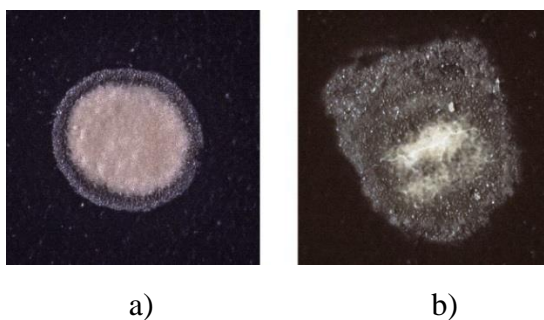


Obrázek 16: Ovladače zapínání a hand na zdroji laseru.

Kromě systému laseru je k provozu nutné mít místnost vybavenou správnou elektroinstalací. Nejdůležitějšími částmi elektroinstalace jsou hlavní jistič a jističe pro zdrojový box, servomotory.

Proces zapnutí laseru se skládá z několika kroků. Na zdrojovém boxu se otočí hlavním vypínače do pozice ON a klíček interlocku se otočí do pozice 4. Rozbliká se tlačítko OFF, laser je ve režimu STAND-BY (dále SB). Po rozsvícení tlačítka OFF se zapne chlazení, výbojka je napájena podprahovým napětím. Je nutné okamžitě zapnout externí chladič. V režimu SB je zapnut He-Ne laser, ovládání závěrky a kontrolní systém. Posuvy pracovního stolu jsou nezávislé na zdrojovém boxu, je tedy možné s nimi pracovat i bez zapnutého laseru. Pro práci s posuvy je nutné zapnout PC. Po zapnutí je třeba synchronizovat připojení motorů a poté zapnout program ovládající laser. V režimu SB se provádí například kontroly správnosti programů, centrování trysky a nastavení rezonátoru. Nastavení rezonátoru se provádí i při vypnutém laseru.

Laser můžeme přepnout do OPERAČNÍHO REŽIMU (dále OM) až se tlačítko OFF rozsvítí. Po stisknutí tlačítka ON se spustí buzení laseru. Pracovat může laser až po rozsvícení tlačítka ON. Před spuštěním programu laseru je nutné vyladit rezonátor. Pokud není rezonátor vyladěn, má laser menší účinnost a svazek má mnohem horší kvalitu (obrázek 17).



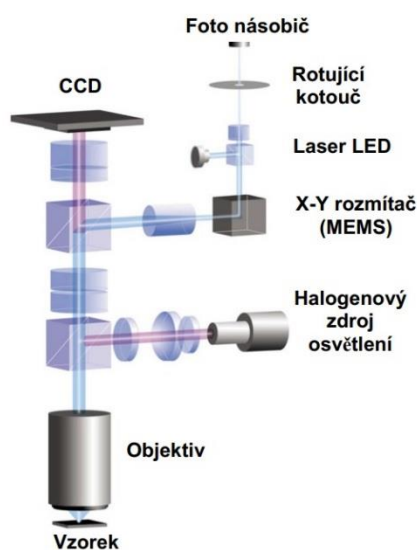
Obrázek 17: Stopa svazku: a) vyladěného rezonátoru, b) nevyladěného rezonátoru.

Ladění je prováděno pomocí dvou stavících šroubů a imbusového klíče, kdy se hledá nejvyšší hodnota energie zobrazená na displeji handu. Nastavení pracovních parametrů se provádí v PC kromě nastavení tlaku pracovního plynu. Ten se nastavuje zvlášť ventilem. Před spuštěním programu práce laseru je potřeba nastavit nulovou pozici posuvů pracovního stolu, zapnout odsávání a otevřít ventil pracovního plynu.

System LASAG KLS 246-102 byl použit pro vytvoření všech řezů v experimentu.

3.1.2 Konfokální mikroskopy LEXT OLS 3100 a LEXT OLS 5000

Pro pozorování kvality řezu tenkých plechů je nezbytné použít mikroskop s přiblížením až 10 000x. U takového přiblížení má klasický mikroskop velice nízkou hloubku ostrosti, kvůli které není možné zobrazit celou strukturu řezu. Výhoda konfokálního mikroskopu je v možnosti 3D skenování povrchu. Pomocí PC se pak z jednotlivých snímků složí snímek s hloubkou ostrosti dostatečnou pro zobrazení celé struktury povrchu. Pro pozorování byly v experimentu použity mikroskopy LEXT OLS 3100 a LEXT OLS 5000 od firmy Olympus.



Obrázek 18: Optická dráha konfokálního mikroskopu LEXT. Převzato z [24].

LEXT OLS 3100 se skládá ze zdroje propojeného s PC a mikroskopu. Samotný mikroskop se skládá z ručně nastavitelného pracovního stolu a těla mikroskopu. Tělo mikroskopu je připevněno na posuvném mechanismu. Ten se ovládá aretační páčkou a nastavovacím šroubem pro hrubé zaostření na objekt, a pomocí PC pro jemné doostření. Na spodní straně těla je otočná pracovní hlava s 5 objektivy se zvětšeními 5x, 10x, 20x, 50x a 100x. Pracovní hlava se ovládá pouze pomocí PC. Rozlišovací schopnosti mikroskopu jsou 120 nm v ploše a 40 nm v řezu. Rozlišení CCD čipu je 1024 x 1024 px. Rozsah zvětšení je 120x až 14 400x. LEXT OLS 3100 využívá laser o vlnové délce $\lambda = 408$ nm pro funkci konfokální mikroskopie a pro klasickou mikroskopii využívá halogenovou lampu [24],[25].



Obrázek 19: Konfokální mikroskop LEXT OLS 3100. Převzato z [26].

LEXT OLS 5000 má také samostatný zdroj připojený k PC. Skladba mikroskopu je velice podobná. Liší se v ovládání pracovního stolu, které je kromě otáčení ovládáno pomocí joysticku nebo pomocí myši v PC. Otočná pracovní hlava má také 5 objektivů se zvětšeními 5x, 10x, 20x, 50x a 100x. Objektiv se zvětšením 100x může pracovat ve 2 vzdálenostech od vzorku. Objektivy se mění stejně jako u LEXT OLS 3100. Rozlišovací schopnosti mikroskopu jsou stejné. Největší výhodou je novější CCD čip s rozlišením 4096 x 4096 px. Mikroskop je schopen vytvořit více snímků vzorku v různých místech (na ploše) a následně skládat složit do jednoho. Rozsah zvětšení je 54x až 17 280x. LEXT OLS 5000 využívá stejný laser a halogenovou lampu. Oproti staršímu modelu obsahují výsledné snímky mnohem méně šumu [27].



Obrázek 20: Konfokální mikroskop LEXT OLS 5000. Převzato z [28][28].

Konfokální mikroskop LEXT OLS 3100 byl použit pro vytvoření snímků k určení kvality řezu z hlediska množství okují a k výběru řezů pro určení kvality povrchu řezu. Snímky pro určení kvality povrchu byly vytvořeny na mikroskopu LEXT OLS 5000.

3.2 Materiály

V experimentu byla použita nerezová pružinová ocel s označením 1.4310 (AISI 301, X12CrNi 17-7) o tloušťkách $h = 0,1$ mm a $h = 0,05$ mm (dále ocel). Tato ocel má dobrou odolnost proti korozi a lze ji použít v aplikacích do teploty 400 °C. Její chemické složení je uvedeno v tabulce 1 [29].

Tabulka 1: Chemické složení oceli 1.4310 [30].

prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Obsah [hm. %]	max 0,15	max 1,50	max 2,00	max 0,045	max 0,03	16 - 18	7 - 9	max 0,80

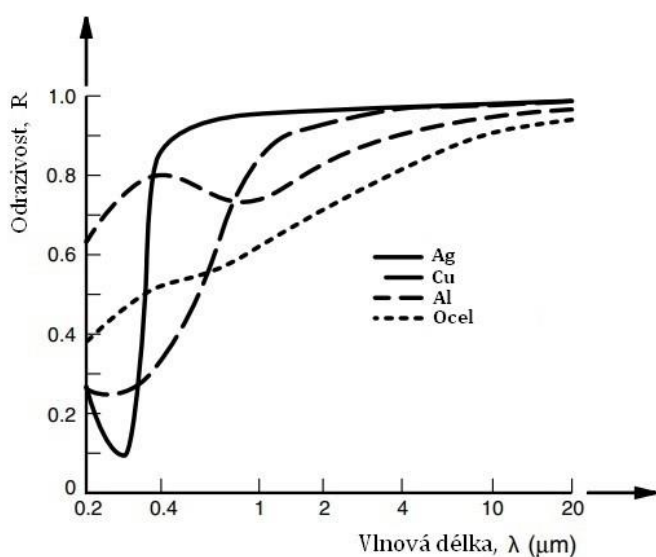
Vhodnost použití materiálu v aplikacích je také určena jeho mechanickými vlastnostmi – mezí pevnosti a mezemi kluzu. Mechanické vlastnosti oceli 1.4310 mají tyto hodnoty: mez pevnosti $R_m = (450 - 600)$ MPa, meze kluzu $R_{p0,1} = 280$ MPa a $R_{p0,2} = 250$ MPa [29].

Pro výpočet parametrů procesu řezání je nutné znát fyzikální vlastnosti oceli popisující reakci materiálu na dodávání tepla – teplotu tání T_t , teplotu vypařování T_v , měrné teplo pevného skupenství c_p , měrné teplo taveniny c_k , skupenské teplo tání l_t , skupenské teplo vypařování l_v , poměr roztaveného a vypařeného materiálu a . Je potřeba také znát hustotu materiálu ρ . Pro první odhad jsou dostačující hodnoty pro železo. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Hodnota a je odhadnuta.

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti železa [4].

T_t	T_v	c_p	c_k	l_t	l_v	a	ρ
[°C]	[°C]	[J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹]	[J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹]	[kJ·kg ⁻¹]	[kJ·kg ⁻¹]		[kg · m ⁻³]
1538	2870	450	820	247	7018	0,1	7870

Další důležitou vlastností je odrazivost. Hodnota odrazivosti je pro kovy závislá na teplotě, s rostoucí teplotou klesá. Přibližná hodnota pro vlnovou délku $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ při standardních podmínkách je stanovena z grafu na obrázku 21 a je rovna $R = 0,6$.



Obrázek 21: Odrazivost materiálů v závislosti na vlnové délce. Upraveno z [4].

3.3 Nastavení experimentu

Pro řezání ocelových plechů pulzním laserem je možné nastavit různé kombinace parametrů systému laseru. Tyto parametry jsou závislé na vlastnostech materiálu a jejich nastavení je omezeno technickými možnostmi laseru. Pro dosažení kvalitního řezu je nutné parametry optimalizovat. Je třeba brát ohled na kvalitu i finanční zátěž.

V následujících kapitolách je popsáno nastavení parametrů použité v experimentu.

3.3.1 Konfigurace rezonátoru

Pro tvar stopy svazku a gradient intenzity je zásadní rezonátor. Rezonátor R4.2 byl použit pouze na řezání ocelového plechu tloušťce 0,1 mm. Kvalita svazku má rozsah hodnot $BPP = (1,5 - 8) \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Uvedeno v obrázku 13. Pro výpočty byla použita hodnota

$BPP = 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Pro provedení experimentu je důležitý průměr svazku. Teoretická hodnota průměru svazku se vypočítá dle vzorce

$$D_{\text{foc}} = 4 \cdot BPP \frac{F}{X \cdot D_0}, \quad (1)$$

kde $F = 100 \text{ mm}$ je ohnisková vzdálenost fokusační čočky, $X = 2$ je zvětšení expanderu a $D_0 = 6 \text{ mm}$ je průměr čela krystalu. Výsledný teoretický průměr svazku má hodnotu $D_{\text{foc}} = 0,27 \text{ mm}$. Nevýhodou rezonátoru je menší gradient intenzity záření ve svazku. Při řezu vzniká v materiálu větší tepelně ovlivněná oblast.

Rezonátor R3.5 byl použit na řezání ocelového plechu o tloušťce $0,1 \text{ mm}$ i $0,05 \text{ mm}$. Kvalita svazku má rozsah hodnot $BPP = (2,5 - 6) \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Pro výpočty byla použita hodnota $BPP = 6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Podle vzorce (1) byl vypočten teoretický průměr svazku $D_{\text{foc}} = 0,2 \text{ mm}$. Oproti rezonátoru R4.2 je výhodou vyšší gradient intenzity záření a lepší kvalita svazku. Při řezu vzniká menší tepelně ovlivněná oblast a kvalita řezu je méně ovlivněna prohnutím plechu [31].

3.3.2 Trysky

Trysky v pracovní hlavě laseru slouží k směřování pracovního plynu přímo do stopy laseru. Plyn zajišťuje odfuk odpadního materiálu ze spáry řezu. Pomocí tvaru trysky a průměru výstupního otvoru je možné přizpůsobit proud pracovního plynu tak, aby byl získán kvalitní řez.

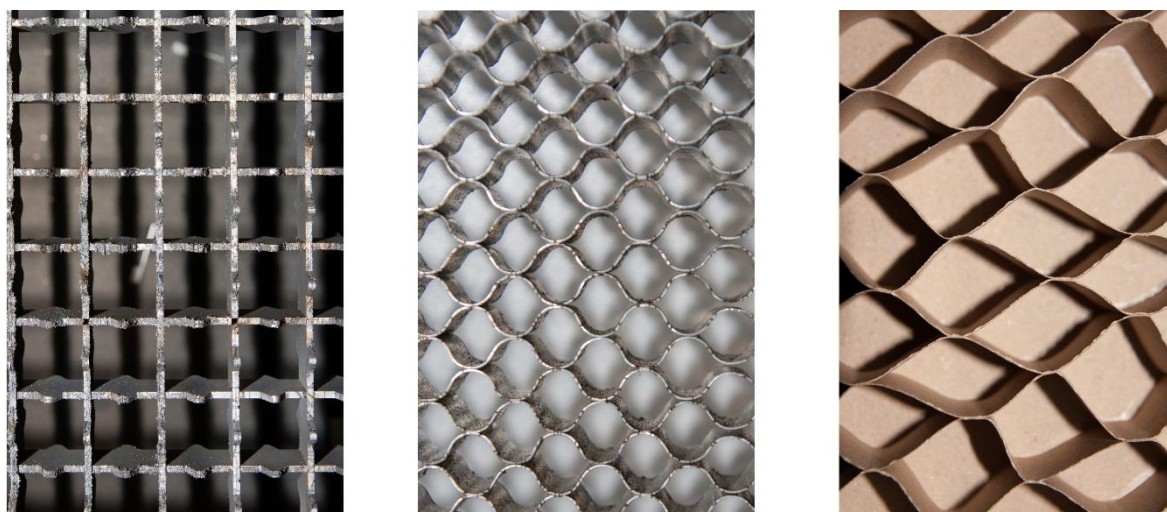
V experimentu byly použity trysky s průměry výstupního otvoru $1,4 \text{ mm}$, $1,2 \text{ mm}$ a 1 mm . Byl zkoumán jejich vliv na kvalitu řezu při řezání ocelového plechu o tloušťce $0,05 \text{ mm}$. Při řezání ocelového plechu $0,1 \text{ mm}$ byla použita pouze tryska o průměru $1,4 \text{ mm}$.

3.3.3 Uchycení materiálu na pracovní stůl

Uchycení materiálu na pracovní stůl má velký vliv na přesnost i kvalitu řezu. Materiál – ocelový plech – je nutné zajistit v pevné poloze. Pro plechy o větších tloušťkách stačí pro zajištění vlastní hmotnost materiálu. Tenké plechy je nutné připevnit k podkladu. Pro uchycení byly použity ocelové plechy, lepicí páska a magnety.

Zásadní vliv na kvalitu řezu má podklad, na který je plech uchycen. Důležitými parametry podkladu je tvar podpírající materiál, tloušťka styčná plocha podpěry s plechem a materiál, ze kterého je podpěra vyrobena. V experimentu jsme použili 6 podkladů. Ocelový rošt s roztečí hrotů $\Delta = 1,5 \text{ cm}$ (obrázek 22a), hliníkovou voštinu s rozměry oka $\Delta = 1 \text{ cm}$ (obrázek 22b), papírovou voštinu s rozměry oka $\Delta = (2,4 \pm 0,1) \text{ cm}$. Papírová voština byla použita ve dvou

úpravách, s plným podkladem (obrázek 22c) a bez podkladu (obrázek 23 a), rámeček vyřezaný z oceli (obrázek 23 b) a rámeček vyřezaný z mědi (obrázek 23 c).

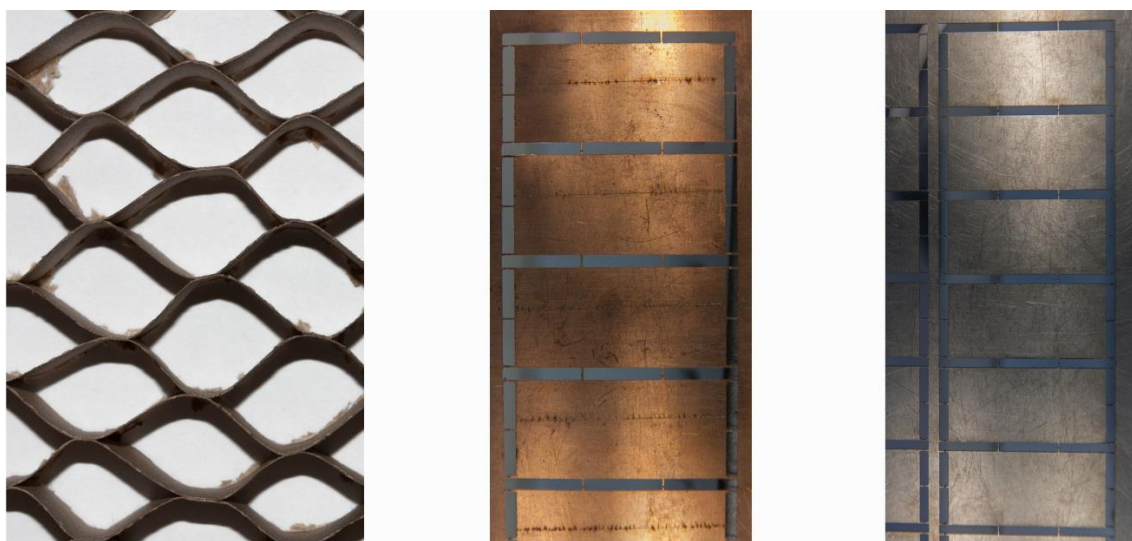


a)

b)

c)

Obrázek 22: Podklady pro uchycení materiálu, a) ocelový rošt, b) hliníková voština, c) papírová voština s plným podkladem.



a)

b)

c)

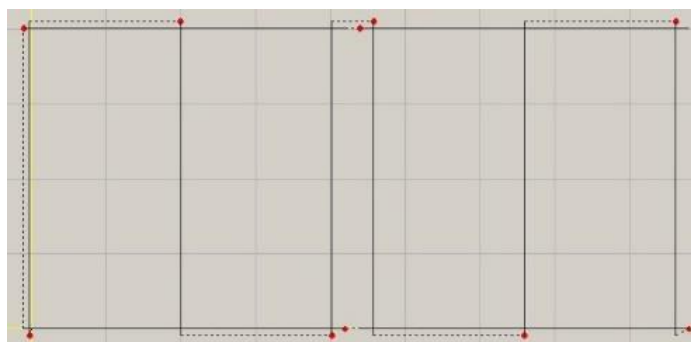
Obrázek 23: Podklady pro uchycení materiálu, a) papírová voština bez podkladu, b) měděný rámeček, c) ocelový rámeček.

3.3.4 SPL program

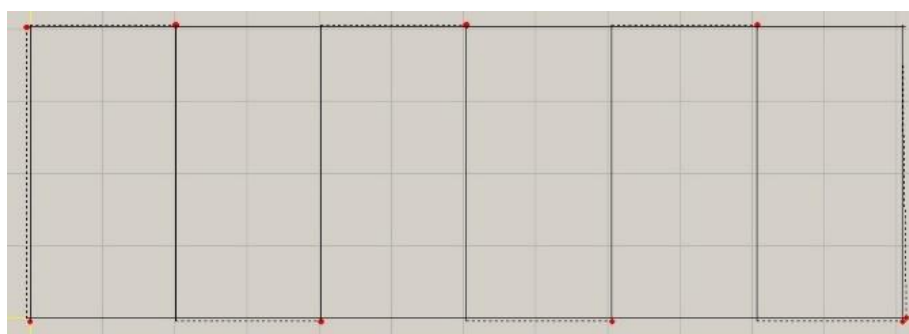
Program pro ovládání posuvů pracovního stolu, závěrky laseru a ventilu pracovního plynu se vytváří v softwaru SPL repeater. Celý program je psán v G-kódu. Příklad programu, který byl použit v experimentu, je uveden v příloze 1.

Pro vytvoření programu platí několik zásad. Je nutné experimentálně určit šířku spáry řezu. Polovina šířky se musí přičíst k rozměrům výrobku tak, aby výsledek odpovídal požadavkům na tolerance. Dále je důležité, aby propal byl umístěn vždy mimo hranu výrobku. Důvodem je, že při propalu dojde k většímu odběru materiálu než během řezu. Poslední zásada platí pro řezání rohů. Roh musí být řezán průnikem dvou řezů. Pokud bude uříznut najednou, bude roh oblý.

V experimentu bylo použito několik programů. Podle použitého rezonátoru se lišily rozměry obdélníků v programu kvůli započtení šířky spáry řezu. Pro řezání oceli 0,1 mm byly použity dvě modifikace programů, a to s můstkem mezi obdélníky (obrázek 24) a program bez můstků (obrázek 25). Výsledné obdélníky měly šířku 20 mm, délku 40 mm.



Obrázek 24: Program pro řezání obdélníků s můstkem.



Obrázek 25: Program pro řezání obdélníků v celku.

Výhodou řezání obdélníků v celku je velká úspora materiálu a výrobního času. Kvalita řezů je stejná jako při řezání obdélníků s můstkem.

Pro řezání ocelového plechu 0,05 mm byl použit program bez vložených můstků. Výsledné obdélníky měly šířku 15 mm a délku 23 mm.

3.3.5 Parametry procesu řezání

Hlavními parametry, které se nastavují při procesu řezání, jsou energie pulzu E , délka pulzu t , frekvence f , tlak pracovního plynu p a řezná rychlost v . Na jejich základě můžeme vypočítat veličiny vrcholový výkon \hat{P} , překrytí pp a poměr vrcholového výkonu a rychlosti \hat{P}/v , které kvalitativně popisují proces řezání.

Energie pulsu E ovlivňuje množství roztaveného a odpařeného materiálu. Její minimální hodnota je počítána pomocí kalorimetrické rovnice, kde je zohledněna odrazivost. Na základě této hodnoty je odhadnuta energie pro experiment. Rovnice má tvar

$$E = \frac{S \cdot h \cdot L}{1-R} [\text{J}], \quad (2)$$

kde S je plocha svazku a L je konstanta, jejíž hodnota se vypočítá dle vzorce

$$L = \rho [c_p(T_t - T_o) + l_t + c_k(T_v - T_t)a + l_v a] [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}]. \quad (3)$$

Při konstantní energii pulzu jeho délka ovlivňuje vznik tepelně ovlivněné oblasti. Přesněji to popisuje vrcholový výkon, který je dán vztahem

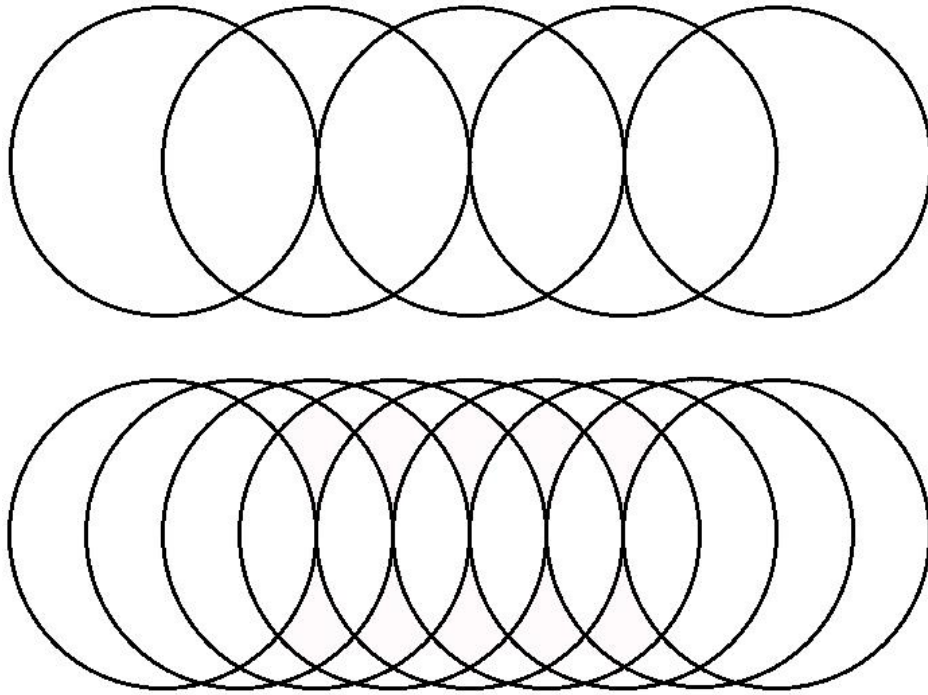
$$\hat{P} = \frac{E}{t} [\text{W}]. \quad (4)$$

Při vyšším vrcholovém výkonu je více materiálu odpařeno a vzniká menší tepelně ovlivněná oblast, protože je omezena schopnost materiálu vést teplo.

Důležitým parametrem pro kvalitu řezu je tzv. překrytí pp , které se vypočítá pomocí vzorce

$$pp = 1 - \frac{v}{f \cdot w} [\%], \quad (5)$$

kde w je reálný průměr svazku, který odebírá materiál. Hodnota překrytí říká, jakou řeznou rychlost při dané frekvenci a průměru svazku můžeme použít, aby povrch řezu nebyl příliš hrubý kvůli vzniklým výstupkům. Nákres na obrázku 26.



Obrázek 26: Porovnání překrytí 50 % a 75 %.

Hodnota frekvence je omezena maximálním průměrným výkonem \bar{P}_{\max} pro danou energii.

$$f_{\max} = \frac{\bar{P}_{\max}}{E} \text{ [Hz]}, \quad (6)$$

kde f_{\max} je maximální frekvence. Řezná rychlost se vypočítá podle požadovaného překrytí.

Pracovní plyn se používá pro odstranění roztaveného a odpařeného materiálu ze spáry. Je důležité správně nastavit jeho tlak. Pokud je tlak příliš velký, dochází k prohnutí plechu a ten se dostává mimo ohnisko svazku. Navíc plech může „vlát“, což způsobuje nerovnosti spáry. Když je tlak plynu moc nízký, plyn nevyfoukne veškerý materiál ze spáry a na okraji řezu se vytvoří okuje a kapičky odpadního materiálu. V experimentu byl použit upravený stlačený vzduch.

Hodnota poměru vrcholového výkonu a rychlosti \hat{P}/v [$\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$] popisuje vstup tepla do materiálu. Pokud bychom chtěli dosáhnout stejných výsledků při vyšší rychlosti, můžeme z této hodnoty získat energii pulzu. Pro stejné překrytí samozřejmě musíme dopočítat frekvenci pulzů.

3.3.6 Hodnoty parametrů pro jednotlivé části experimentu

V první části experimentu byla optimalizována odhadnutá hodnota energie a řezná rychlost při řezání ocelového plechu o tloušťce 0,1 mm pro rezonátor R4.2. Délka pulzu byla rovna $t = 0,2$ ms, frekvence $f = 280$ Hz, tlak pracovního plynu $p = 5$ bar, průměr trysky $d = 1,4$ mm. Průměrná šířka spáry řezu byla $w = 0,2$ mm. Na základě výpočtu energie pomocí rovnice (2) byly použity energie $E_1 = 85$ mJ, $E_2 = 105$ mJ a $E_3 = 125$ mJ. Pro každou energii byly použity rychlosti z tabulky 3. Na základě subjektivního vyhodnocení výsledků byly rychlosti z tabulky 4 použity pouze pro energii $E_1 = 85$ mJ. Plech byl připevněn na ocelový rošt a hliníkovou voštinu.

Tabulka č. 3: Energie pulzu a řezné rychlosti použité na roštu i voštině, překrytí.

i	v_i mm·s ⁻¹	pp_i %
1	11,2	80,0
2	12,6	77,5
3	14,0	75,0
4	15,4	72,5
5	16,8	70,0

Tabulka 4: Rychlosti použité pouze na voštině a příslušné překrytí.

i	v_i mm·s ⁻¹	pp_i %
6	18	67,86
7	19	66,07
8	20	64,29
9	21	62,50

V druhé části experimentu byla optimalizována odhadnutá hodnota energie a řezná rychlost při řezání ocelového plechu o tloušťce 0,1 mm pro rezonátor R3.5. Délka pulzu byla rovna $t = 0,2$ ms, frekvence $f = 280$ Hz, tlak pracovního plynu $p = 5$ bar, průměr trysky $d = 1,4$ mm. Průměrná šířka spáry řezu byla $w = 0,16$ mm. Plech byl upevněn na hliníkové voštině. Na základě výpočtu energie pomocí rovnice (2) byly použity energie uvedené v tabulce 5. Pro každou energii byly použity všechny řezné rychlosti uvedené v tabulce 5.

Tabulka 5: Energie pulzu, řezná rychlost a překrytí použité při řezání rezonátorem R3.5.

i	E_i mJ	v_i $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	pp_i %
1	67	12,0	75,00
2	74	13,2	72,50
3	80	14,4	70,00
4	85	15,4	67,86
5	90	-	-
6	96	-	-

Ve třetí části experimentu byly porovnávány výsledky řezů plechu 0,1 mm při užití různého podkladu materiálu. Byly použity rámečky vyřezané z nerezové oceli a fosforového bronzu, papírová voština s plným podkladem a bez podkladu. Byl použit rezonátor R3.5. Průměrná šířka spáry řezu byla $w = 0,16$ mm. Na základě subjektivního hodnocení výsledků z první a druhé části byly použity parametry, které jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka č. 6: Energie, rychlost, frekvence, délka pulzu a tlak pracovního plynu pro řezání plechu 0,1 mm na různých podkladových materiálech.

E mJ	v $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	f Hz	t ms	p bar	d mm	pp %
78	15,6	300	0,2	5	1,4	67,5

Ve čtvrté části experimentu byla optimalizována odhadnutá hodnota energie a řezná rychlost při řezání ocelového plechu o tloušťce 0,05 mm pro rezonátor R3.5. Délka pulzu byla rovna $t = 0,2$ ms, frekvence $f = 300$ Hz, tlak pracovního plynu $p = 5$ bar, průměr trysky $d = 1,4$ mm. Průměrná šířka spáry řezu byla $w = 0,16$ mm. Na základě výpočtu energie pomocí rovnice (2) byly použity energie $E_1 = 35$ mJ, $E_2 = 39$ mJ a $E_3 = 43$ mJ. Pro každou energii byly použity řezné rychlosti uvedené v tabulce 7. Plech byl upevněn na hliníkové voštině.

Tabulka 7: Energie, řezné rychlosti a překrytí při řezání plechu 0,05 mm.

i	v_i $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	pp_i %
1	13,2	72,5
2	14,4	70,0
3	15,6	67,5
4	16,8	65,0

V páté části experimentu byl hledán optimální tlak plynu a průměr trysky při řezání ocelového plechu o tloušťce 0,05 mm. Byl použit rezonátor R3.5, délka pulzu byla rovna $t = 0,2$ ms, frekvence $f = 300$ Hz. Průměrná šířka spáry řezu byla $w = 0,16$ mm. Plech byl upevněn na hliníkové voštině. Na základě subjektivního hodnocení výsledků z třetí části byla použita energie $E_2 = 39$ mJ a řezná rychlost z tabulky 7 $v_3 = 15,6$ mm·s⁻¹. Hodnota překrytí byla rovna $pp_3 = 67,5$ %. Byly použity tlaky a trysky, které jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Tlak plynu a průměry trysek.

i	p_i bar	d_i mm
1	6,0	1,4
2	5,0	1,2
3	4,5	1,0
4	4,0	-
5	3,5	-

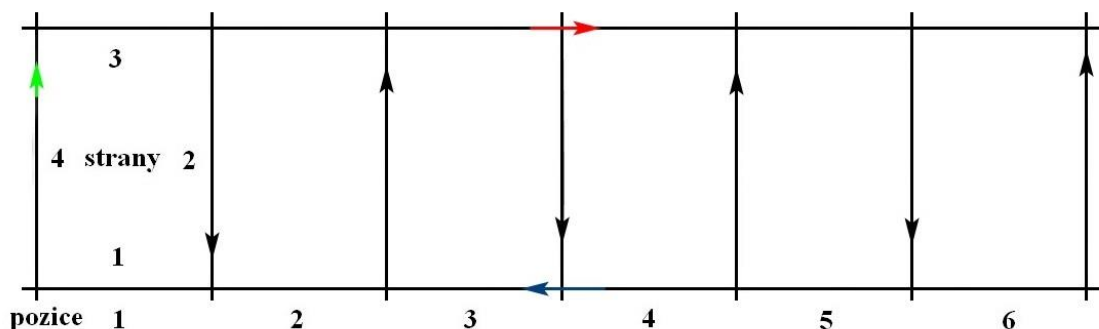
Všechny tlaky byly použity pro trysku o průměru 1,4 mm. Pro další trysky byly použity tlaky $p_2 = 5,0$ bar, $p_4 = 4,0$ bar, $p_5 = 3,5$.

V šesté části experimentu byl zkoumán vliv pozice řezu na kvalitu. Byl řezán plech 0,05 mm na hliníkové voštině. Byl použit rezonátor R3.5. Průměrná šířka spáry řezu byla $w = 0,16$ mm. Ostatní parametry byly nastaveny na základě subjektivního posouzení podle předchozích částí. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka č. 9: Energie, frekvence, délka pulzu a tlak pracovního plynu pro pátou část experimentu.

E mJ	v mm·s ⁻¹	f Hz	t ms	p bar	d mm
78	15,6	300	0,2	4	1,4

Pozice jsou značeny podle obrázku 27, kde je pomocí šipek vyznačena trajektorie svazku. Zelená šipka značí první řezanou stranu a směr řezu. První byly řezány krátké strany (značené černou šipkou), poté dlouhé strany. Poslední řezanou stranou byla strana značená červenou šipkou.



Obrázek 27: Nákres označení pozic a stran, postup řezání.

3.4 Parametry kvality řezu

Kvalita výsledných řezů byla posuzována podle tří parametrů – četnosti nežádoucích útvarů v řezu σ , šířky tepelně ovlivněné oblasti δ a teoretické výšky vrubů ε . Měření množství nežádoucích útvarů v řezu a šířky tepelně ovlivněné oblasti byla provedena na snímcích z mikroskopů (obrázky v kapitole 4 s označením „číslo“b) pomocí programu Malování.

Nežádoucí útvary v řezu jsou veškeré útvary poškozující kvalitu řezu. Jedná se o okuje, návary, výkusy do materiálu, kapičky materiálu podkladu. Výkus je velký odběr materiálu oproti čistému řezu. Tvar odběru je velice členitý. Často se okolo hrany výkusu objevuje větší množství okují. Četnost nežádoucích útvarů v řezu je dána rovnicí

$$\sigma = \frac{\sum_1^n l_i}{l} [\%], \quad (7)$$

kde l je délka řezu a l_i je rozměr nečistoty rovnoběžný s hranou řezu. Výsledná hodnota ukazuje procentuální výskyt nečistot v délce řezu.

Šířka tepelně ovlivněné oblasti δ byla měřena pouze v místech, kde se nevyskytovaly žádné nečistoty. Jedná se o barevně pozměněnou oblast oproti zbytku materiálu plechu. Šířka byla měřena 3krát, výsledná hodnota je dána průměrem naměřených hodnot.

$$\delta = \alpha \frac{\sum_1^3 \delta_i}{3} [\mu\text{m}], \quad (8)$$

kde α je koeficient pro převod z pixelů na mikrometry. Je vypočítán dle rovnice

$$\alpha = \frac{m_m}{m_p}, \quad (9)$$

kde m_m je rozměr měřítka v μm a m_p je rozměr měřítka v px.

Teoretická výška vrubů ε je vzdálenost mezi vrcholem vroubku a hrany řezu. Je dána vzorcem

$$\varepsilon = r - \sqrt{r^2 - r^2(1 - pp)^2} [\mu\text{m}], \quad (10)$$

kde r je polovina průměrné šířky spáry, $r = w/2$.

4. Výsledky experimentu

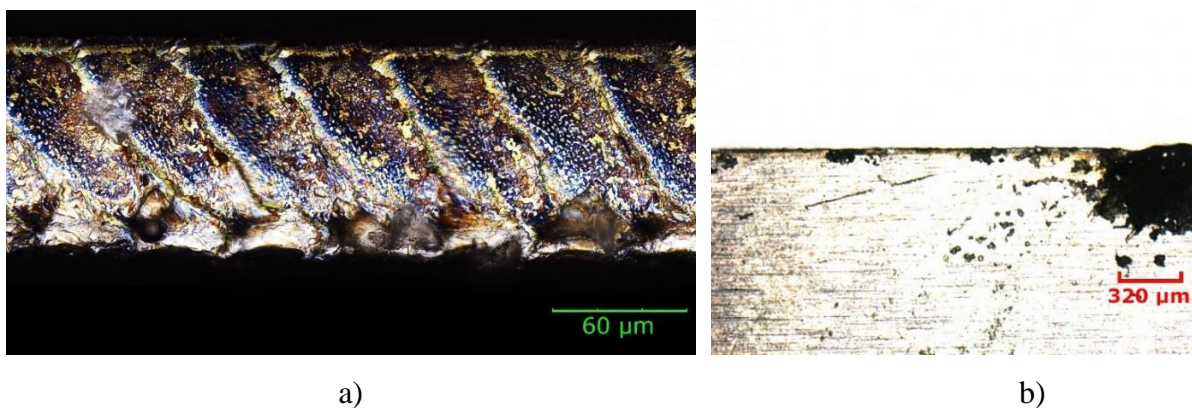
V následujících kapitolách jsou ukázány a popsány výsledky experimentu. Výsledky jsou hodnoceny z hlediska kvality povrchu řezu, četnosti nežádoucích útvarů v řezu a šířky tepelně ovlivněné oblasti. Obrázky ukazující výsledky jsou jen částmi řezu, kde se vyskytují podstatné tvary, které nejlépe charakterizují kvalitu řezu. Důležité je toto zmínit zejména pro četnost nežádoucích útvarů, která se mění v délce řezu a je závislá na materiálu podkladu.

4.1 Řezání oceli 0,1 mm

V této kapitole jsou prezentovány výsledky řezů ocelí o tloušťce 0,1 mm. Jsou zde ukázány výsledky optimalizace energie pulzu a řezné rychlosti pro dva rezonátory a výsledky řezů na různých podkladech.

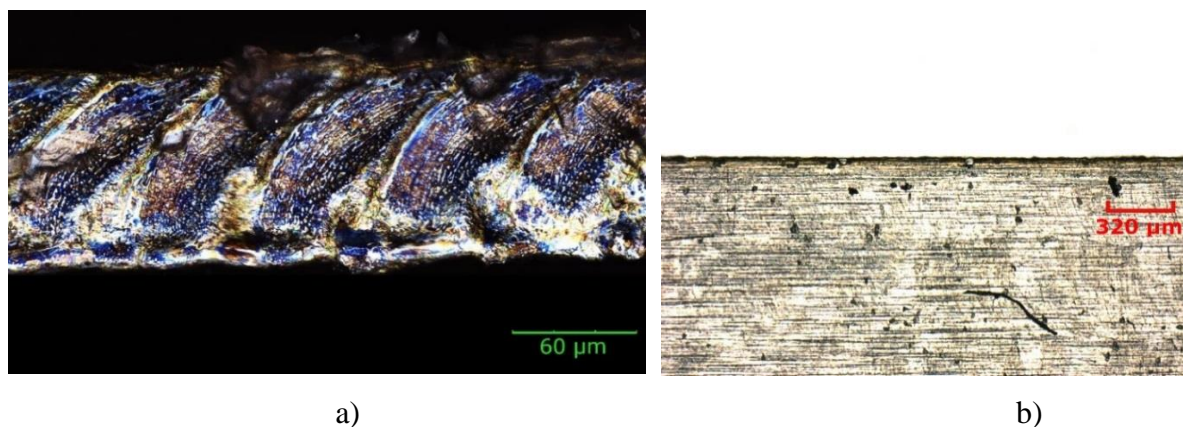
4.1.1 Optimalizace energie a rychlosti pro rezonátor R4.2

Na obrázku 28 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 125 \text{ mJ}$ a $v = 12,6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byl použit ocelový rošt. Kvalita povrchu řezu (obrázek 28a) je výborná, povrch je bez větších vrubů. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 2,56 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou kapičky materiálu. V řezu se vykytují návary k roštu a okuje (obrázek 28b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 34,8 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 37,8 \text{ }\mu\text{m}$.



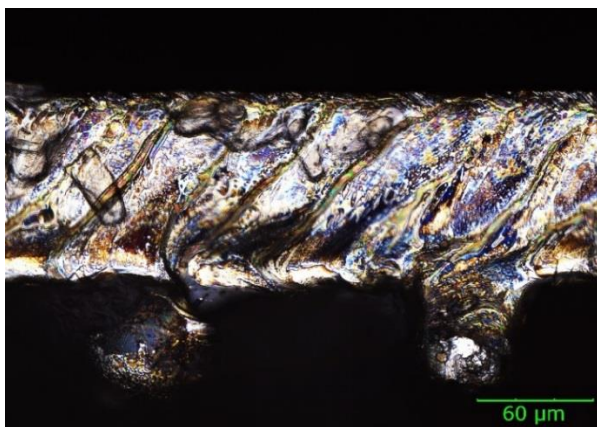
Obrázek 28: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 125 \text{ mJ}$ a $v = 12,6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byl použit ocelový rošt.

Na obrázku 29 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 16,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byl použit ocelový rošt. Povrchu řezu (obrázek 29a) není příliš členitý. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 4,61 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. V řezu se vykytuje malé množství okují (obrázek 29b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 3,6 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 42,8 \text{ }\mu\text{m}$.



Obrázek 29: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 16,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byl použit ocelový rošt

Na obrázku 30 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 11,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština. Kvalita povrchu řezu (obrázek 30a) je výborná, povrch je bez větších výstupků. V řezu se objevují zbytky lepicí pásky. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 2,02 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu jsou přitaveny kapičky materiálu. V řezu se vykytuje velké množství okují (obrázek 30b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 86,6 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 66,2 \text{ }\mu\text{m}$.



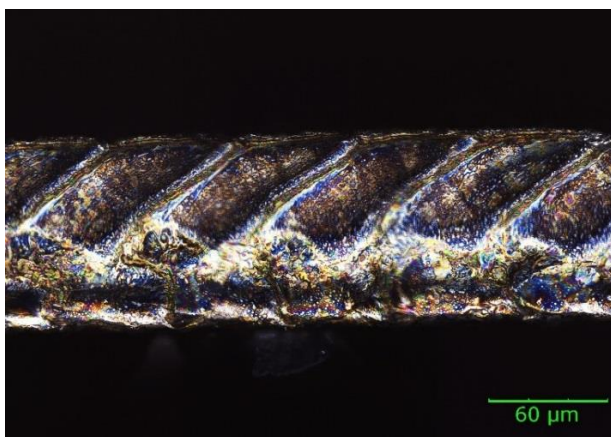
a)



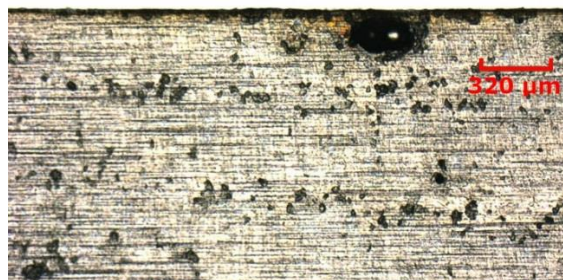
b)

Obrázek 30: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 11,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jako podklad použita hliníková voština.

Na obrázku 31 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 16,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština. Povrch řezu je členitý (obrázek 31a), ale výstupky subjektivně příliš nezvyšují drsnost řezu. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 4,61 \text{ μm}$. Na spodním okraji řezu (obrázek 31b) se vyskytuje menší množství okují a kapiček materiálu. Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 13,6 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 50,4 \text{ μm}$.



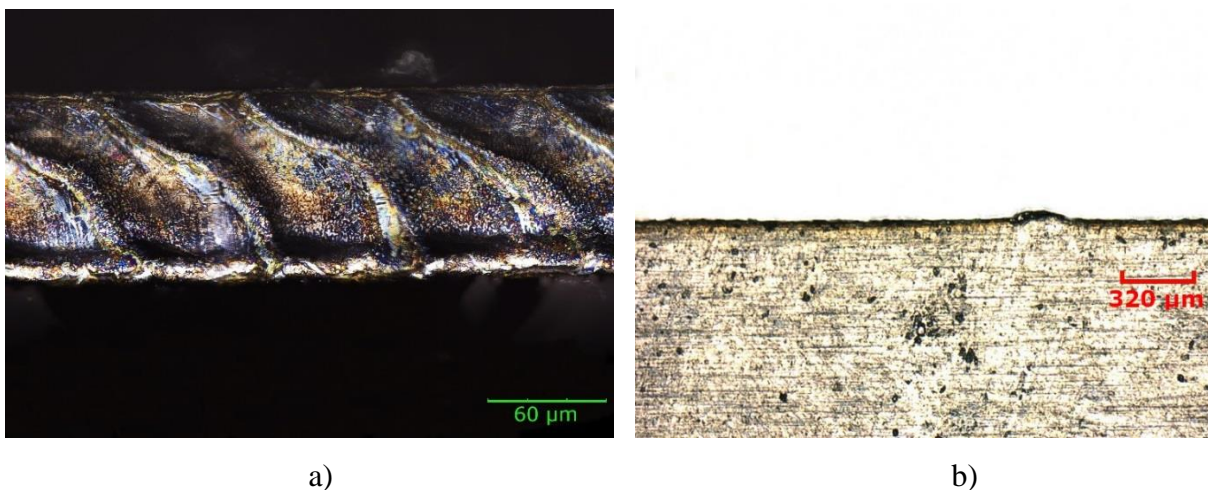
a)



b)

Obrázek 31: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 16,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jako podklad použita hliníková voština.

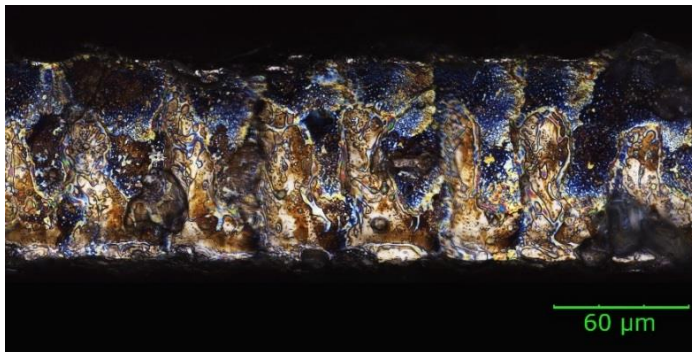
Na obrázku 32 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 21 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština. Povrch řezu (obrázek 32a) je velice členitý. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 7,30 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. Nežádoucí útvary se vyskytují minimálně. Lze pozorovat pouze návary (obrázek 32b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 11,4 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 51,2 \text{ }\mu\text{m}$.



Obrázek 32: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 85 \text{ mJ}$ a $v = 21 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad použita hliníková voština.

4.1.2 Optimalizace energie a rychlosti pro rezonátor R3.5

Na obrázku 33 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 96 \text{ mJ}$ a $v = 12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština. Kvalita povrchu řezu (obrázek 33a) je výborná, povrch je bez větších výstupků. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 2,54 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu (obrázek 33 a)). Na okraji řezu se vyskytuje malé množství okujů (obrázek 33b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 10,9 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 31,9 \text{ }\mu\text{m}$.



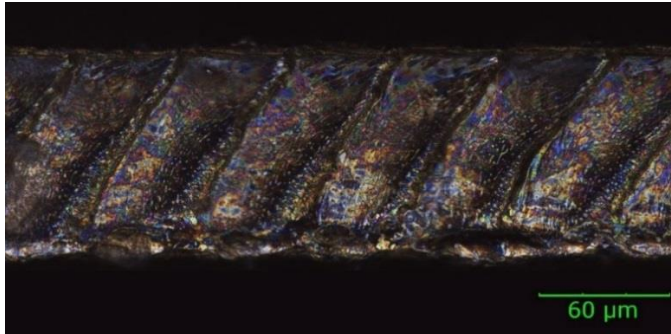
a)



b)

Obrázek 33: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 96 \text{ mJ}$ a $v = 12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština.

Na obrázku 34 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 67 \text{ mJ}$ a $v = 14,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština. Povrch řezu je bez výraznějších vrubů (obrázek 34a). Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 3,68 \text{ μm}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu (obrázek 34a). Na okraji řezu se vyskytuje malé množství nežádoucích útvarů (obrázek 34b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 19,2 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 36,1 \text{ μm}$.



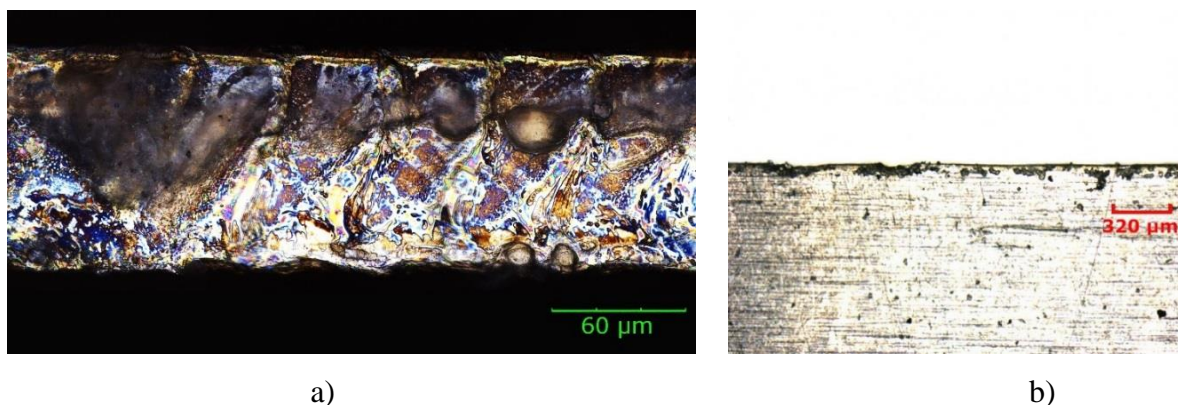
a)



b)

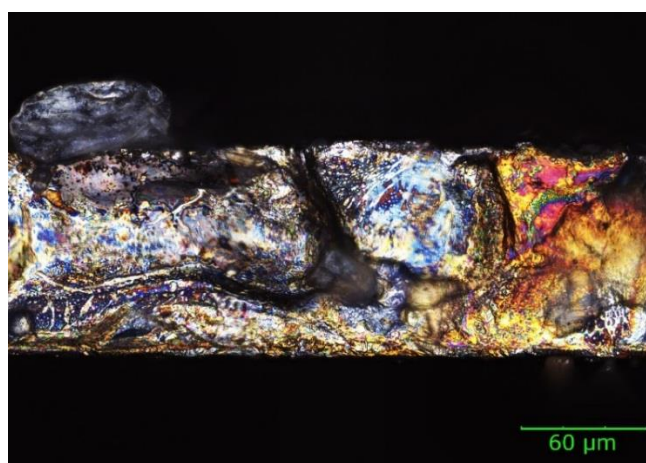
Obrázek 34: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 67 \text{ mJ}$ a $v = 14,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština.

Na obrázku 35 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 74 \text{ mJ}$ a $v = 14,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština. Povrch řezu je bez výraznějších vrubů (obrázek 35a). Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 3,68 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji (obrázek 35a) řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. Na okraji řezu se vyskytuje velké množství nežádoucích útvarů, především výkusy do materiálu (obrázek 35b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 72,9 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 40,3 \text{ }\mu\text{m}$.



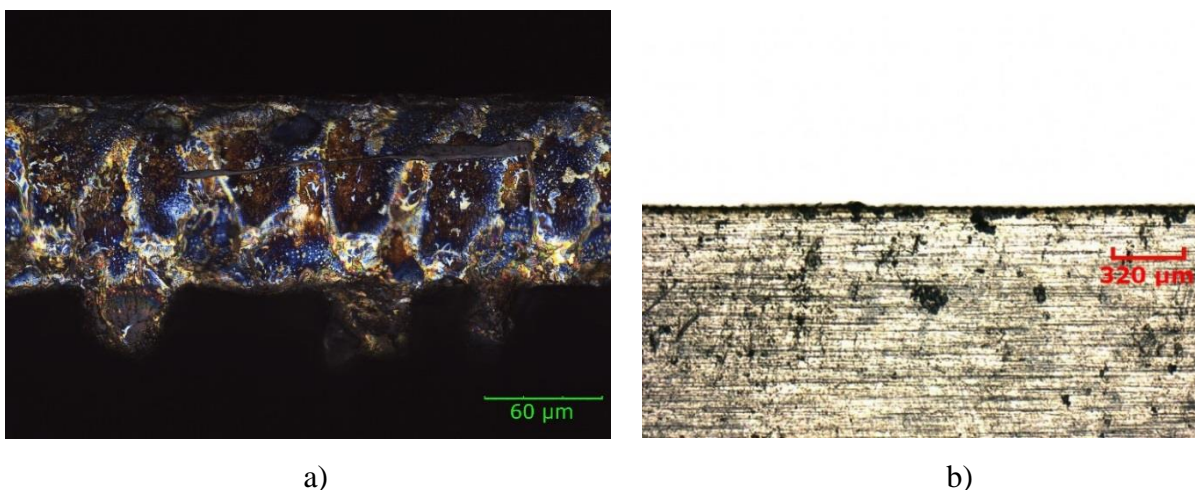
Obrázek 35: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 74 \text{ mJ}$ a $v = 14,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština.

Na obrázku 36 je detail výkusu při řezání oceli energií $E = 74 \text{ mJ}$ a rychlostí $v = 14,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Je zde vidět tepelně ovlivněná oblast zbarvená od červené do černé. Navíc jsou v řezu vidět zbytky lepicí pásky (světlý materiál).



Obrázek 36: Detail výkusu v oceli AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 74 \text{ mJ}$ a $v = 14,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad byla použita hliníková voština.

Na obrázku 37 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 96$ mJ a rychlostí $v = 15,4$ mm·s⁻¹. Jako podklad byla použita hliníková voština. Povrch řezu je bez výraznějších vrubů (obrázek 37a). Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 4,25$ μm. Na spodním okraji (obrázek 37b) řezu jsou přítaveny kapičky materiálu. Na okraji řezu se vyskytuje větší množství okují. Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 38,4$ %. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 39,5$ μm.

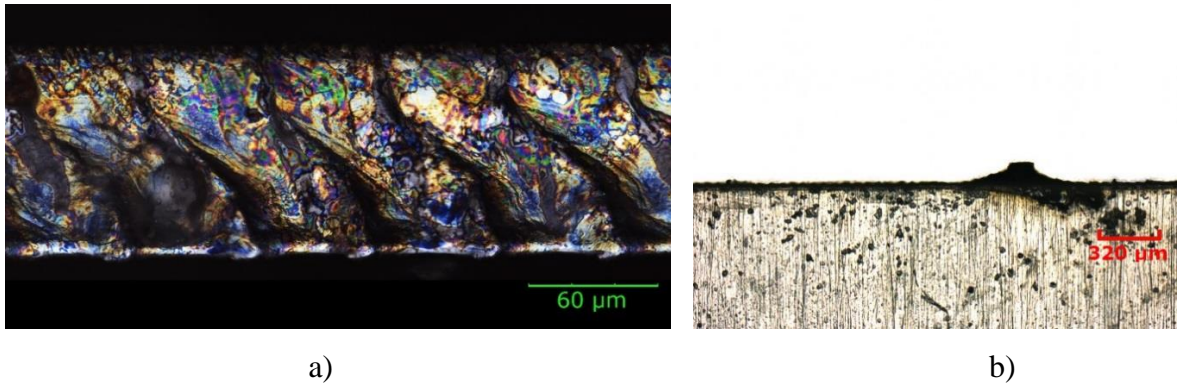


Obrázek 37: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm s parametry řezání $E = 96$ mJ a $v = 15,4$ mm·s⁻¹. Jako podklad použita hliníková voština.

4.1.3 Optimalizace podkladu

Všechny řezy, které jsou ukázány v této kapitole jsou řezány s nastavením z tabulky 6. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 4,34$ μm. Kvalita povrchu je u všech řezů srovnatelná. Řezy se liší výskytem tvarů na okraji řezu.

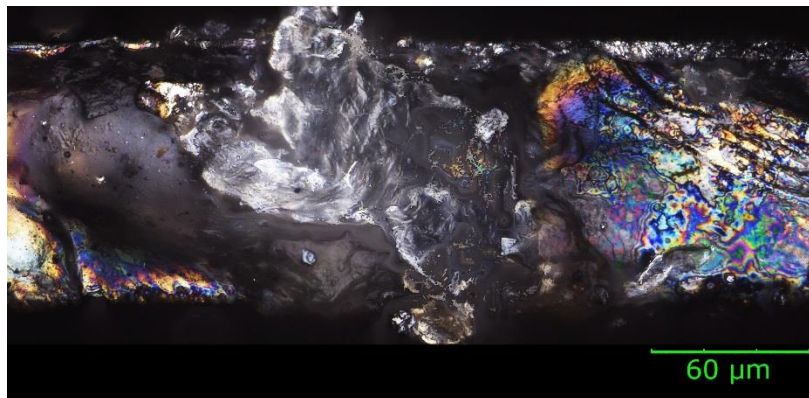
První řez je ukázán na obrázku 38. Jako podklad byl použit ocelový rámeček. Na spodním okraji řezu nejsou přítaveny kapičky materiálu (obrázek 38a). Okuje se na okraji řezu téměř nevyskytují. V místech kde řez kříží můstky rámečku se vykytují návary (obrázek 38b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 28,9$ %. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 46,2$ μm.



Obrázek 38: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm.

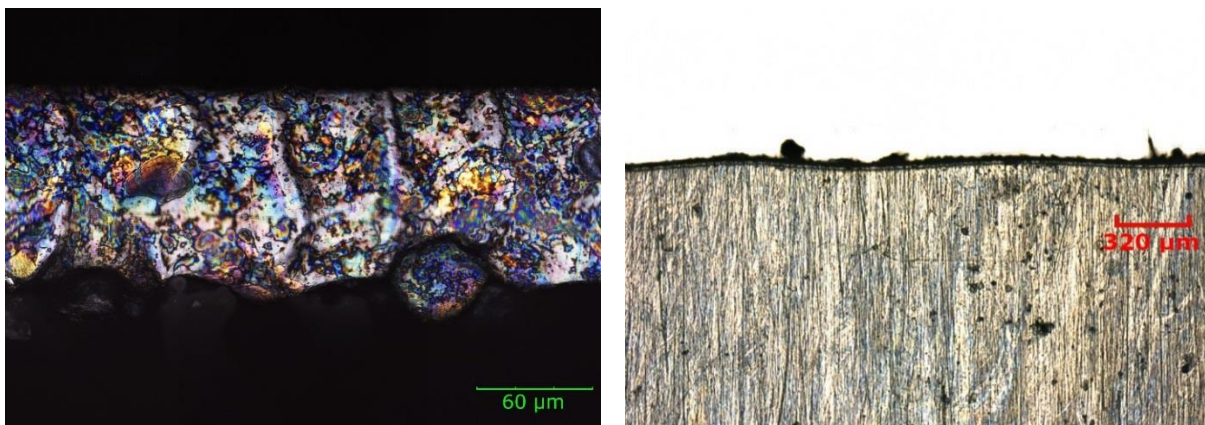
Jako podklad byl použit ocelový rámeček.

Na obrázku 39 je detail návaru při řezání oceli energií na ocelovém rámečku. Je zde vidět tepelně ovlivněná oblast zabarvená od červené do černé a zbytek lepicí pásky (světlý materiál). Povrch řezu je velice členitý.



Obrázek 39: Detail návaru vzorku řezaném na ocelovém rámečku.

Na obrázku 40 je ukázán řez ocelí, kde byl jako podklad použit měděný rámeček. Na spodním okraji (obrázek 40a) řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. Na okraji řezu vyskytuje malé množství okují (obrázek 40b). V místech, kde řez kříží můstky rámečku, se vykytují návary. Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 17,6 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 42,8 \mu\text{m}$.



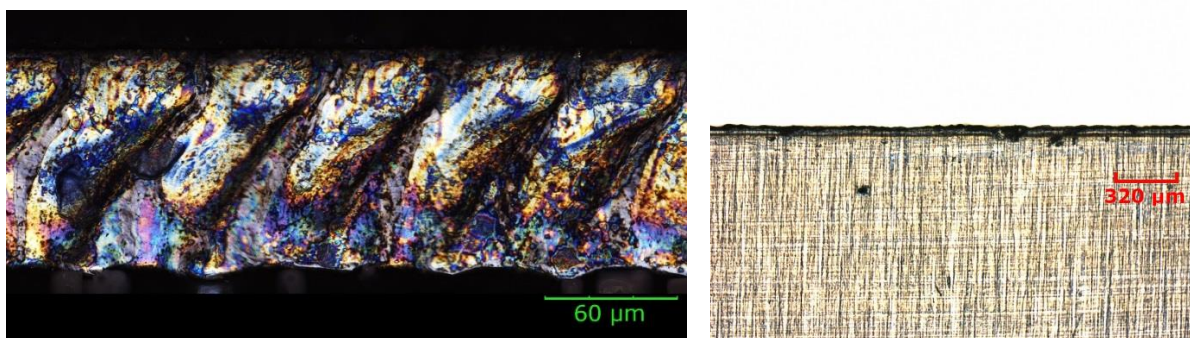
a)

b)

Obrázek 40: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm.

Jako podklad použit měděný rámeček.

Na obrázku 41 je ukázán řez ocelí, kde byla jako podklad použita papírová voština s plným podkladem. Na spodním okraji (obrázek 41a) řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu, nejsou zde žádné návary. Na okraji řezu vyskytuje malé množství okují (obrázek 41b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 15,7 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 54,6 \mu\text{m}$.



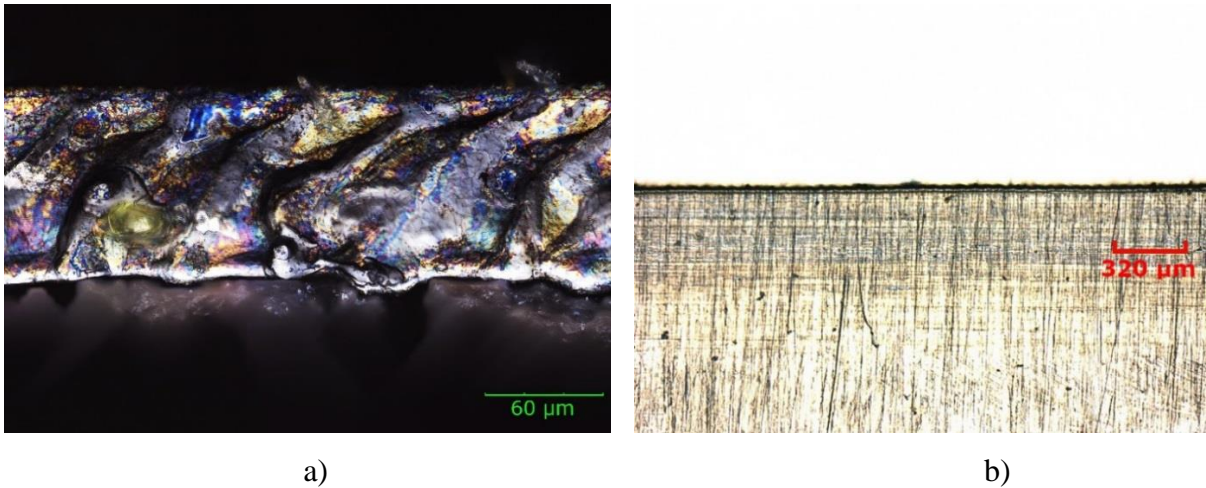
a)

b)

Obrázek 41: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm.

Jako podklad použita papírová voština s plným podkladem.

Na obrázku 42 je ukázán řez ocelí, kde byla jako podklad použita papírová voština bez podkladu. Na spodním okraji (obrázek 42a) řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu, nejsou zde žádné návary. Okuje se na okraji řezu téměř nevyskytují (obrázek 42b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 0,0 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 40,3 \mu\text{m}$.



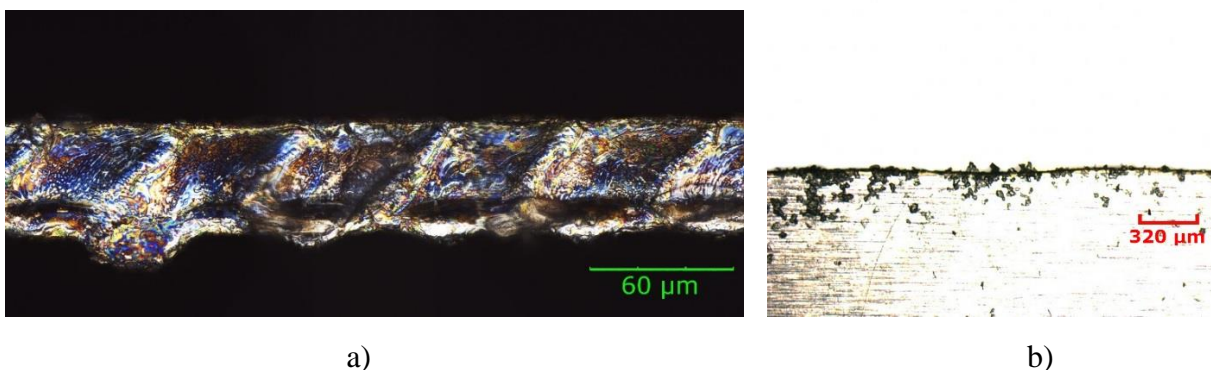
Obrázek 42: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,1 mm.
Jako podklad použita papírová voština bez podkladu.

4.2 Řezání oceli 0,05 mm

V této kapitole jsou prezentovány výsledky řezů ocelí o tloušťce 0,1 mm. Jsou zde ukázány výsledky optimalizace energie pulzu, řezné rychlosti, talku plynu a průměru trysky pro rezonátor R3.5. Dále je ukázán vliv pozice výrobku při řezání na kvalitu svaru. Jako podklad byla vždy použita hliníková voština.

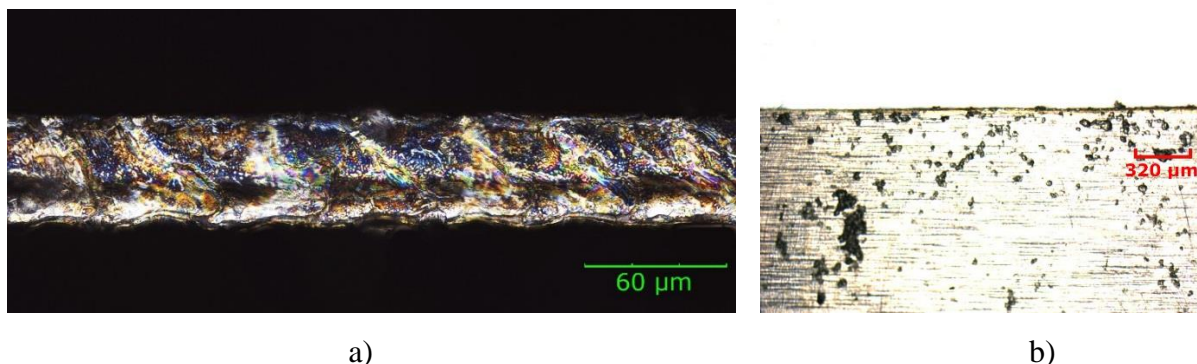
4.2.1 Optimalizace energie a rychlosti

Na obrázku 43 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 35 \text{ mJ}$ a $v = 16,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Povrchu řezu (obrázek 43a) je členitý, Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 5,06 \text{ } \mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. V řezu se vykytuje velké množství okují (obrázek 43b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 77,0 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 25,2 \text{ } \mu\text{m}$.



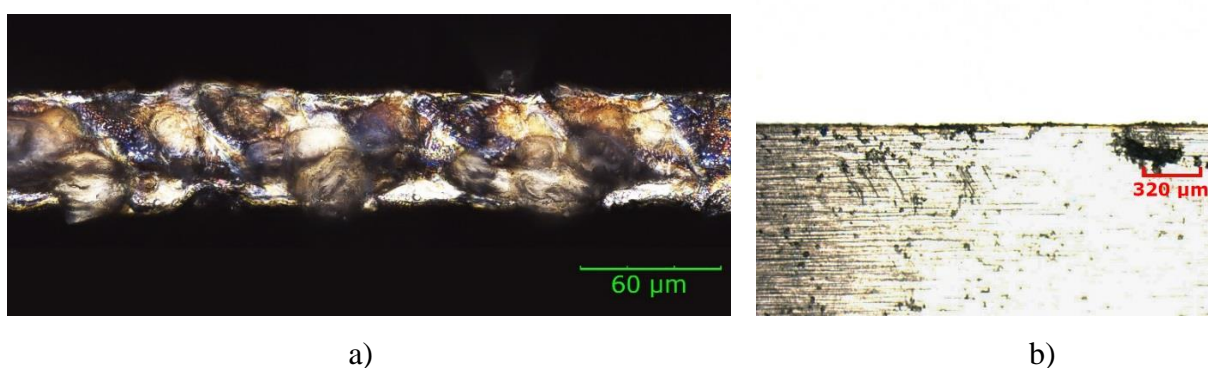
Obrázek 43: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 35 \text{ mJ}$ a $v = 16,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jako podklad použita hliníková voština.

Na obrázku 44 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 43 \text{ mJ}$ a $v = 13,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Povrch řezu je bez větších výstupků (obrázek 44a). Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 3,08 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. V řezu se vykytuje malé množství okují. Na povrchu plechu se vyskytují zbytky lepicí pásky (obrázek 44b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 17,1 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 38,6 \text{ }\mu\text{m}$.



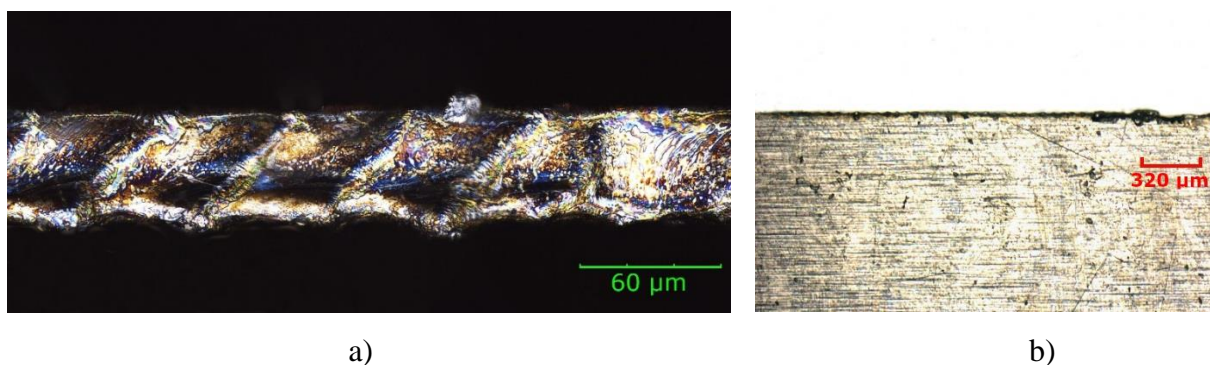
Obrázek 44: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 43 \text{ mJ}$ a $v = 13,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad použita hliníková voština.

Na obrázku 45 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 39 \text{ mJ}$ a $v = 14,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Povrch řezu je bez výraznějších výstupků (obrázek 45a). Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 3,68 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. V řezu se vykytují okuje (obrázek 45b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 40,0 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 34,4 \text{ }\mu\text{m}$.



Obrázek 45: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 39 \text{ mJ}$ a $v = 14,4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad použita hliníková voština.

Na obrázku 46 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 39 \text{ mJ}$ a $v = 15,6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Povrch řezu je bez výraznějších výstupků (obrázek 46a). Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 4,34 \text{ }\mu\text{m}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu. V řezu se vykytuje menší množství okují a výkusy do materiálu (obrázek 46b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 26,8 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 39,5 \text{ }\mu\text{m}$.

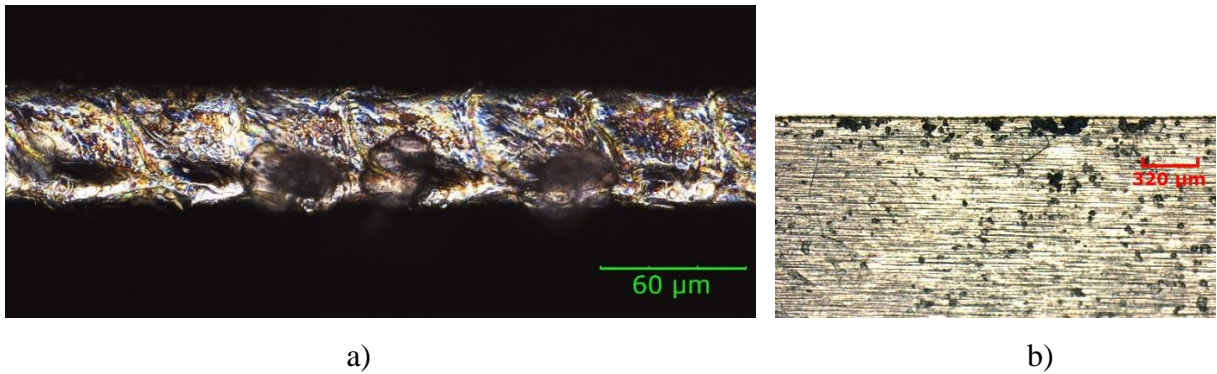


Obrázek 46: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $E = 39 \text{ mJ}$ a $v = 15,6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako podklad použita hliníková voština.

4.2.2 Optimalizace tlaku plynu a průměru trysky

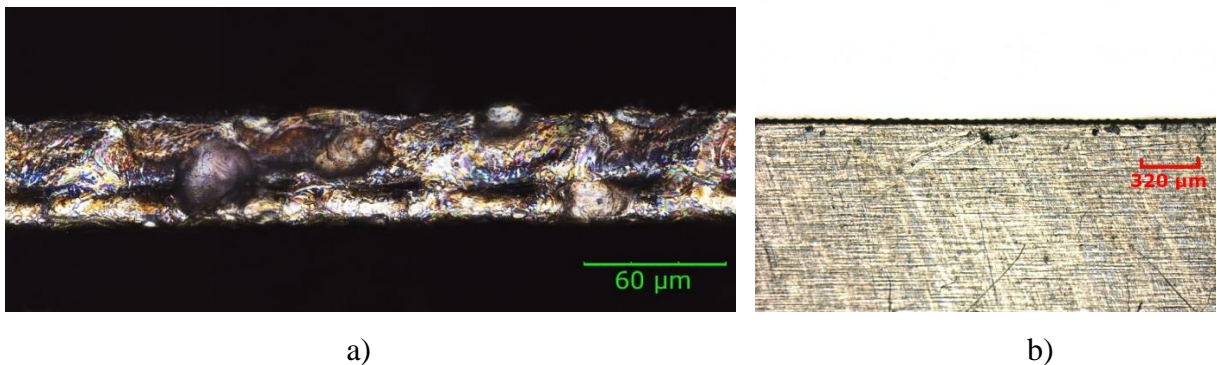
Na vytvoření všech řezů, které jsou ukázány v této kapitole, byla použita energie $E = 39 \text{ mJ}$ a řezná rychlost $v = 15,6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 4,34 \text{ }\mu\text{m}$. Kvalita povrchu je u všech řezů srovnatelná. Řezy se liší výskytem kapiček materiálu, okují, návarů a výkusů na okraji řezu.

Na obrázku 47 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry procesu $p = 5 \text{ bar}$ a $d = 1,4 \text{ mm}$. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu (obrázek 47a). V řezu se vykytuje větší množství okují (obrázek 47b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 44,8 \text{ }\%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 29,4 \text{ }\mu\text{m}$.



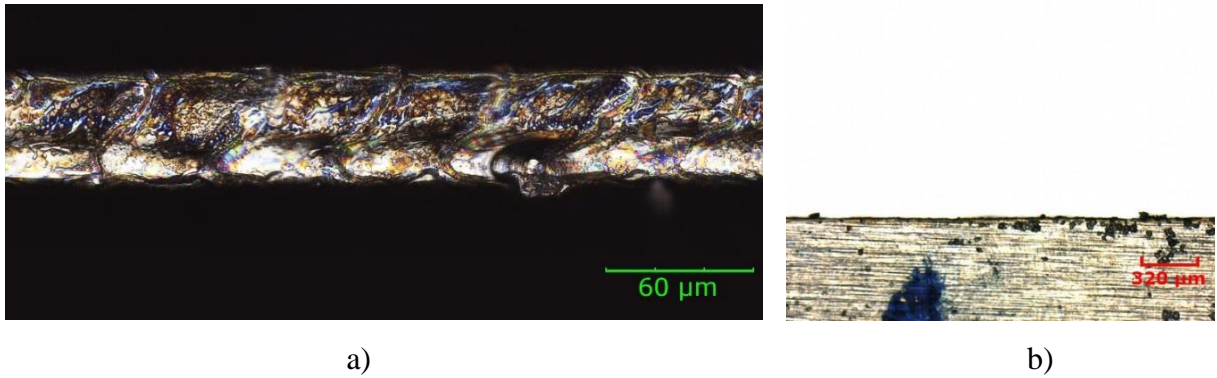
Obrázek 47: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $p = 5$ bar a $d = 1,4$ mm. Jako podklad použita hliníková voština.

Na obrázku 48 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry procesu $p = 4$ bar a $d = 1,4$ mm. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu (obrázek 48a). V řezu se vykytuje minimální množství okují (obrázek 48b). Okraj řezu je silně oxidován. Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 2,4$ %. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 38,6$ μm .



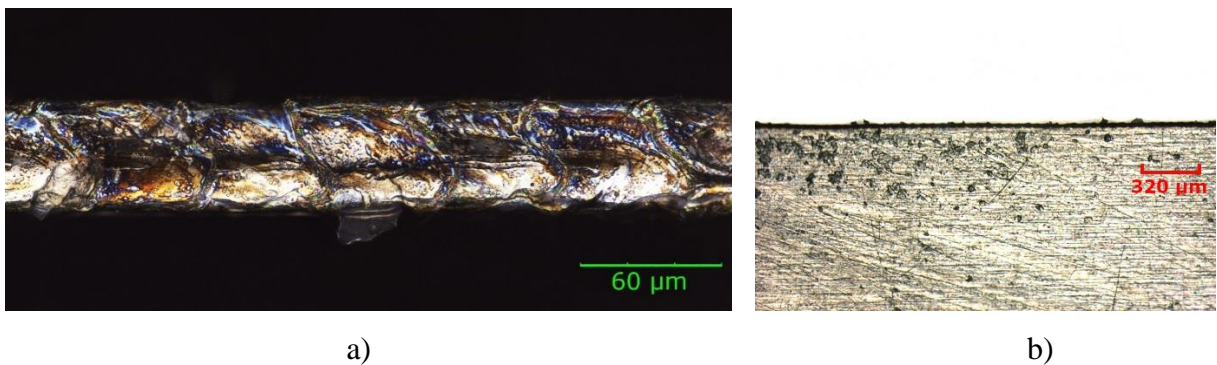
Obrázek 48: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $p = 4$ bar a $d = 1,4$ mm, hliníková voština.

Na obrázku 49 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry procesu $p = 3,5$ bar a $d = 1,4$ mm. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu (obrázek 49a). V řezu se vykytuje větší množství okují (obrázek 49b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 40,6$ %. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 34,4$ μm .



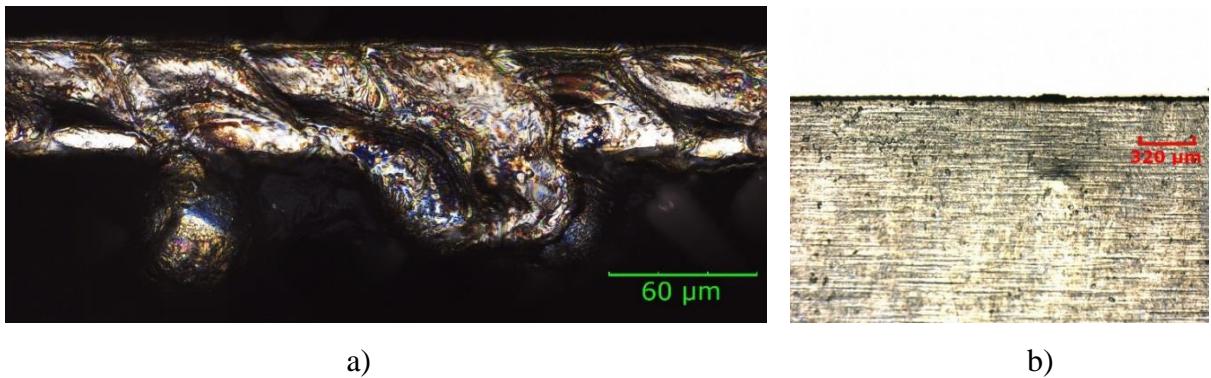
Obrázek 49: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $p = 3,5$ bar a $d = 1,4$ mm, hliníková voština.

Na obrázku 50 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry procesu $p = 4$ bar a $d = 1,2$ mm. Na spodním okraji řezu nejsou přitaveny kapičky materiálu (obrázek 50a). V řezu se vykytuje minimální množství okují (obrázek 50b). Okraj řezu je silně oxidován. Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 6,5$ %. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 27,7$ µm.



Obrázek 50: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $p = 4$ bar a $d = 1,2$ mm, hliníková voština.

Na obrázku 51 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s parametry procesu $p = 4$ bar a $d = 1$ mm. Na spodním okraji řezu se vyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 51a). V řezu se vykytuje minimální množství okují (obrázek 51b). Okraj řezu je silně oxidován. Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 5,2$ %. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 36,1$ µm.

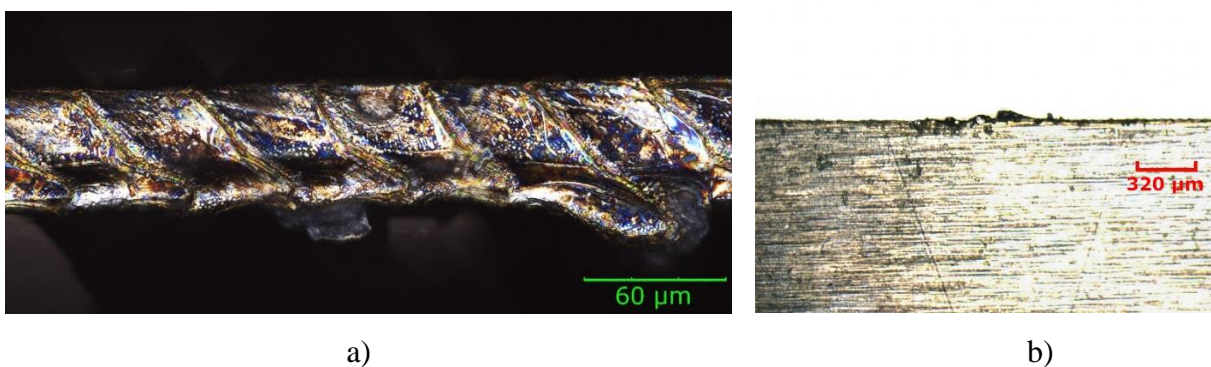


Obrázek 51: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm s parametry řezání $p = 4$ bar a $d = 1$ mm, hliníková voština.

4.2.3 Vliv pozice na kvalitu řezu

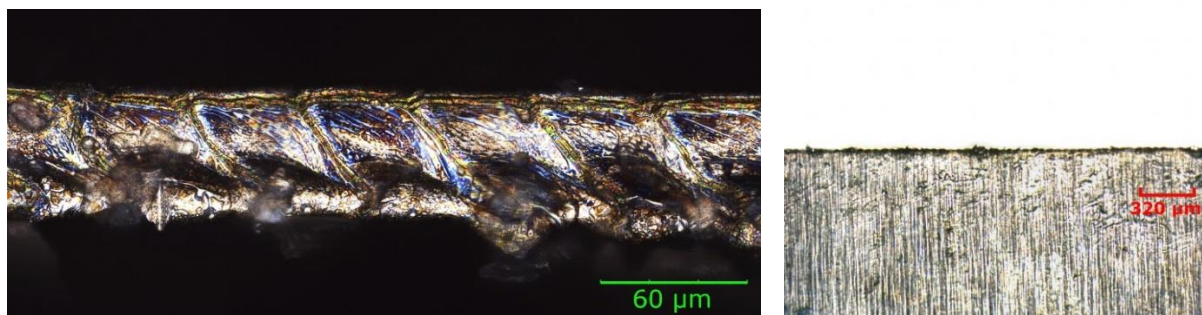
Na vytvoření všech řezů, které jsou ukázány v této kapitole, bylo použito nastavení uvedené v tabulce 9. Teoretická výška vrubů je rovna $\varepsilon = 4,34$ μm . Kvalita povrchu je u všech řezů srovnatelná. Řezy se liší výskytem kapiček materiálu, okují, návarů a výkusů na okraji řezu. Snímky jsou značeny podle obrázku 6.

Na obrázku 52 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 1, strana 1. Na spodním okraji řezu se vyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 52a). V řezu se vykytují návary a výkusy, množství okují je minimální (obrázek 52b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 33,1$ %. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 27,7$ μm .



Obrázek 52: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm. Umístění vzorku v programu je pozice 1, strana 1.

Na obrázku 53 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 1, strana 2. Na spodním okraji řezu se nevyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 53a). V řezu se nevykytují návary a výkusy, množství okují je menší (obrázek 53b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 27,8 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 35,3 \mu\text{m}$.



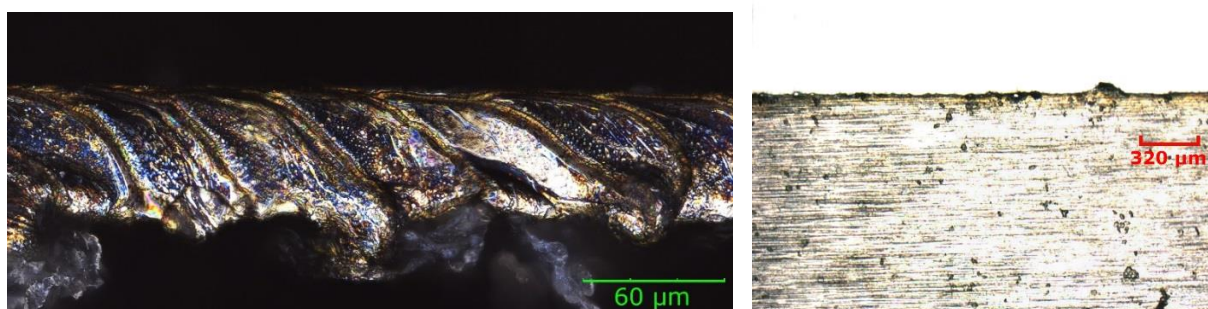
a)

b)

Obrázek 53: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm.

Umístění vzorku v programu je pozice 1, strana 2.

Na obrázku 54 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 1, strana 3. Na spodním okraji řezu se vyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 54a). V řezu se vykytují návary a výkusy, množství okují je menší (obrázek 54b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 48,2 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 46,2 \mu\text{m}$.



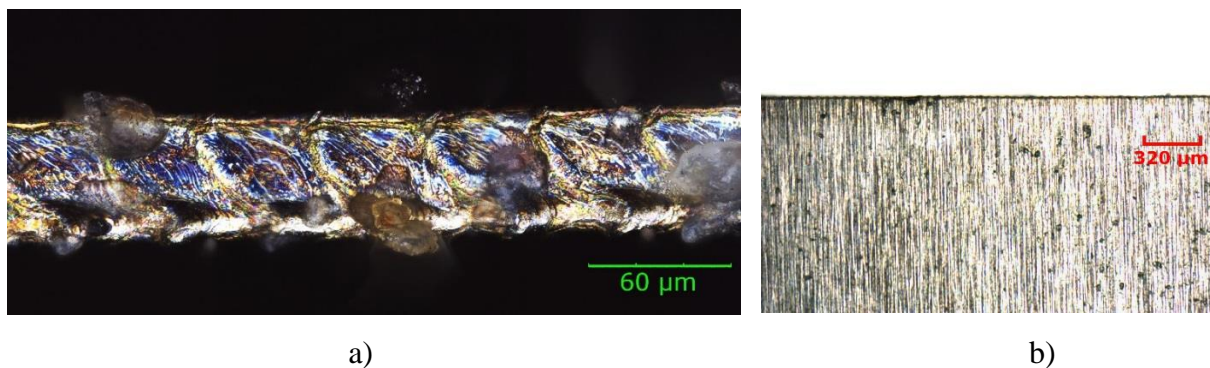
a)

b)

Obrázek 54: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm.

Umístění vzorku v programu je pozice 1, strana 3.

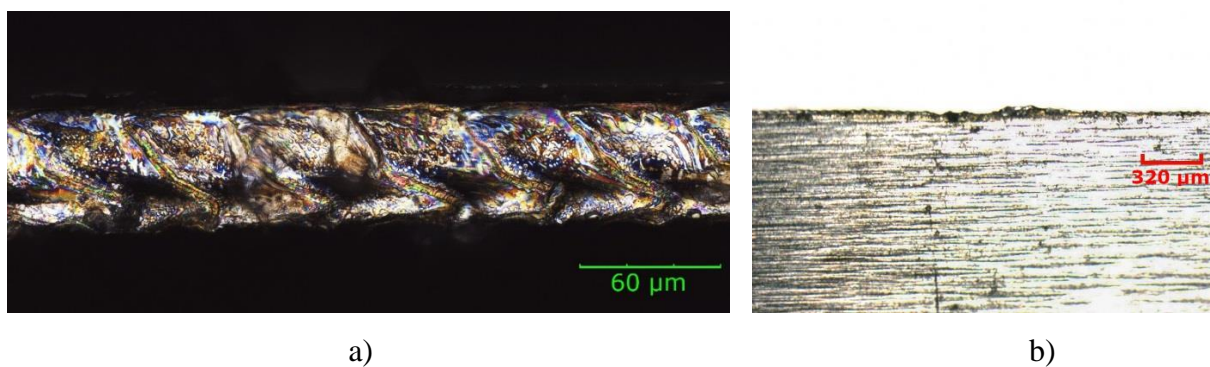
Na obrázku 55 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 1, strana 4. Na spodním okraji řezu se vyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 55a). V řezu se nevykytují návary a výkusy, množství okují je minimální (obrázek 55b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 8,7 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 20,2 \mu\text{m}$.



Obrázek 55: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm.

Umístění vzorku v programu je pozice 1, strana 4.

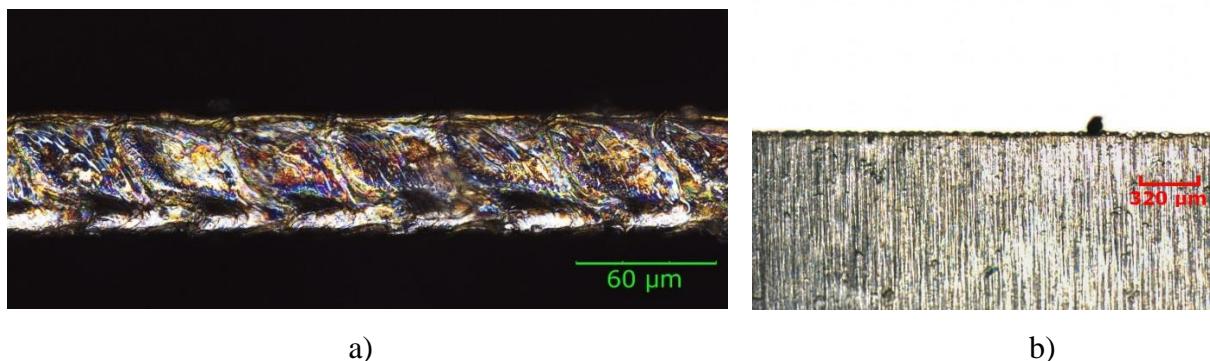
Na obrázku 56 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 3, strana 1. Na spodním okraji řezu se vyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 56a). V řezu se vykytují návary a výkusy, množství okují je menší (obrázek 56b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 32,0 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 38,6 \mu\text{m}$.



Obrázek 56: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm.

Umístění vzorku v programu je pozice 3, strana 1.

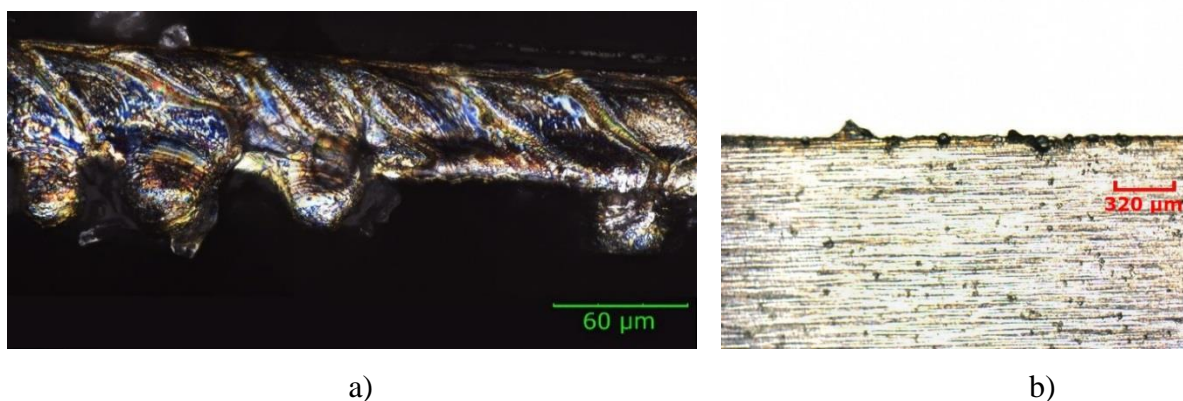
Na obrázku 57 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 3, strana 2. Na spodním okraji řezu se nevyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 57a). V řezu se nevykytují návary a výkusy, množství okují je minimální (obrázek 57b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 3,9 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 43,7 \mu\text{m}$.



Obrázek 57: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm.

Umístění vzorku v programu je pozice 3, strana 2.

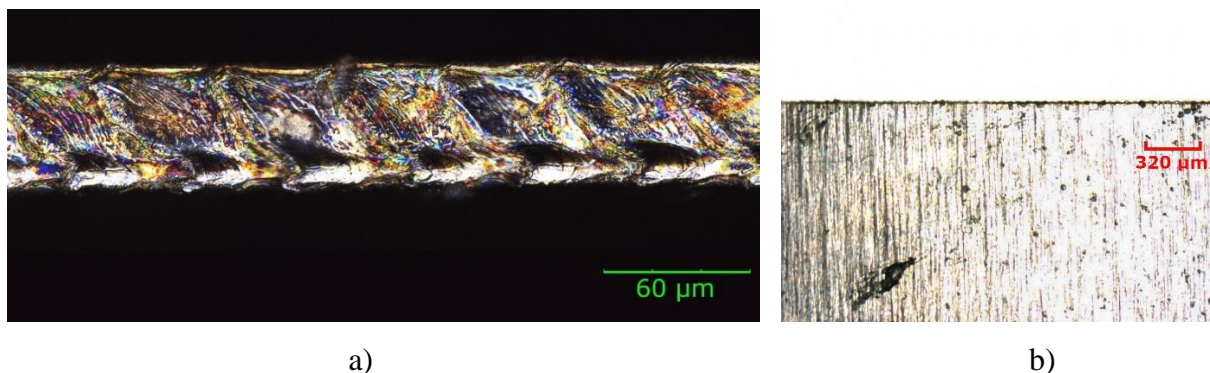
Na obrázku 58 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 3, strana 3. Na spodním okraji řezu se vyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 58a). V řezu se vykytují návary a výkusy, množství okují je větší (obrázek 58b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 47,2 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 55,4 \mu\text{m}$.



Obrázek 58: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm.

Umístění vzorku v programu je pozice 3, strana 3.

Na obrázku 59 je ukázán řez ocelí AISI 301 o tloušťce 0,05 mm s umístěním pozice 3, strana 4. Na spodním okraji řezu se nevyskytují přitavené kapičky materiálu (obrázek 59a). V řezu se nevykytují návary a výkusy, množství okují je minimální (obrázek 59b). Četnost nežádoucích útvarů má hodnotu $\sigma = 5,6 \%$. Šířka tepelně ovlivněné oblasti má hodnotu $\delta = 30,2 \mu\text{m}$.



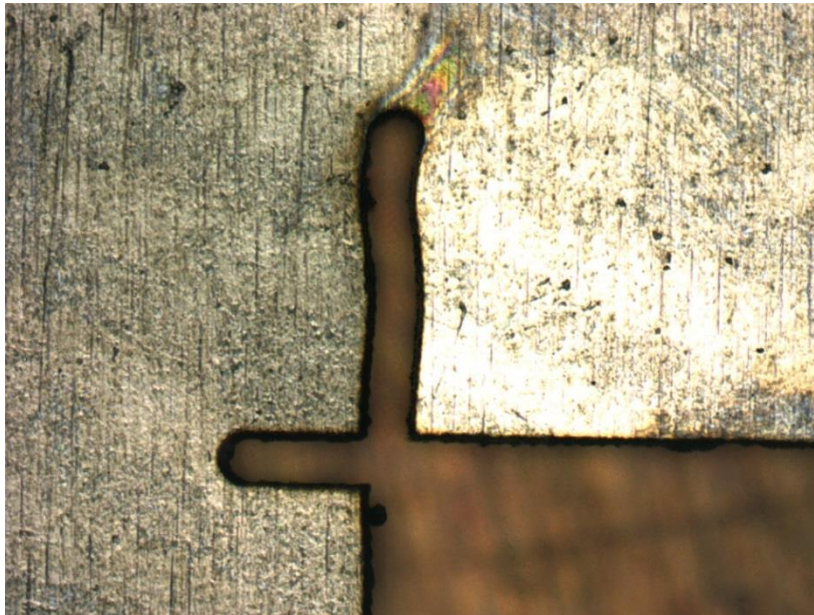
Obrázek 59: a) Povrch řezu, b) kvalita okrajů řezu ocelí o tloušťce 0,05 mm.

Umístění vzorku v programu je pozice 3, strana 4.

5 Diskuze

Na kvalitu řezu laserem má vliv mnoho parametrů. Kromě samotné kvality je také důležitá ekonomická stránka procesu. Mezi nejdůležitější parametry patří energie pulzu a řezná rychlost. Nastavení řezné rychlosti, frekvence pulzů a hodnoty průměru svazku, který odebírá materiál, určuje drsnost povrchu řezu. Ta je přibližena hodnotou teoretické výšky vrubu. Dle subjektivního posouzení drsnosti lze použít nastavení, které vytvoří vruby o teoretické výšce $\varepsilon < 5 \mu\text{m}$. Reálně může mít výška vrubů jinou hodnotu z důvodů deformace vrubu nastavením a působením pracovního plynu. Pro vytvoření kvalitního řezu je nutné zvolit vhodnou hodnotu energii pulzu. Z porovnání výsledků je patrné, že pokud je nastavena vysoká energie pulzu – myšlena nejvyšší nastavená energie pulzu v experimentu pro jednotlivé rezonátory a tloušťky plechu – je pro dobrou kvalitu řezu nutné snížit řeznou rychlost. Vysoká energie pulzu odebírá větší množství materiálu. Pokud je nastavena příliš vysoká řezná rychlost, pracovní plyn pravděpodobně není schopen odstranit veškerý materiál ze spáry a dochází k jeho přitavení ke spodní hraně řezu (obrázek 37). Při nastavení nižší energie pulzu nebyl tento problém zaznamenán, a to i při nastavení velice vysoké řezné energie (obrázek 32). Z výsledků lze vyvodit závěr, že dostatečně kvalitního řezu lze dosáhnout při použití vyšší řezné rychlosti a nižší energie.

Pracovní plyn má funkci odstraňování odebraného materiálu ze spáry řezu a ochrany optiky před nečistotami. Pro kvalitu řezu je nutné správně nastavit tlak plynu a průměr trysky, kterou je směřován do spáry. Při řezání tenkých materiálů dochází vlivem tlaku plynu k jejich prohnutí. To může způsobit snížení kvality řezu, kvůli změně pozice plechu vůči ohnisku svazku, kdy se plech může dostat mimo hloubku ostrosti. V případě, že je tlak plynu příliš nízký, nedochází k dostatečnému odfuku materiálu ze spáry a materiál je přitaven k spodní hraně řezu. Při snižování tlaku plynu je snížení kvality řezu velice rychlé. Problémem je také kolísání tlaku plynu po otevření ventilu. Kolísání pravděpodobně způsobuje křivost řezu (obrázek 40, obrázek 60). Pokud použijeme trysky o menších průměrech, dochází ke zhoršení kvality materiálu. Důvodem může být menší plocha průřezu proudu pracovního plynu. Kvůli tomu by pracovní plyn nemusel být schopný dostatečného odfuku materiálu.



Obrázek 60: Křivost spáry na začátku řezu.

Pro dosažení kvalitního řezu je důležitý materiál podkladu, na kterém je plech připevněn, a tvar podkladu. Při použití kovových roštů a rámečků jako podkladu dochází v místě, kde se kříží spára řezu s podpěrou (s můstkem v případě rámečku) k zabránění odvodu materiálu pracovním plynem a vytvoření návarů a výkusů. Důvodem je příliš velká šířka podpěry. Při použití voštiny z tenkého plechu by k tomuto nemělo docházet. Pokud je voština z kovu s nízkou teplotou tání (například hliník), může dojít k přivaření plechu k podkladu, případně k navaření kapiček materiálu na plech. Možným řešením je papírová voština. Když dochází k překřížení spáry s podpěrou, je materiál podpěry odpařen odfouknutým materiálem. Nedochozí k vytváření návarů a výkusů. Na okraji řezu se nevyskytují žádné kapičky materiálu. Pouze se na okraji plechu objevuje černý povlak, který lze lehce setřít.

Vliv pozice na kvalitu řezu je výrazný zejména při porovnání pořadí řezaných stran. Nejlepší kvality řezu je dosaženo při vytváření dlouhých stran obdélníků. Materiál obdélníků je stále pevně spojen s celým plechem a nedochází k většímu prohnutí, případně „vlání“. K tomuto jevu dochází při dořezávání obdélníků, kdy obdélníky nejsou příliš pevně spojeny se zbytkem plechu. Pravděpodobně dochází k většímu prohnutí, a tedy možnosti vychýlení plechu mimo hloubku ostrosti. Dochází k rozšíření svazku a snížení hustoty energie. Svazek teoreticky může natavit větší množství materiálu, ale méně materiálu bude odpařeno a tavenina bude mít pravděpodobně vyšší viskozitu. Pracovní plyn není schopen materiál ze spáry odstranit, a díky vyšší viskozitě by mohl materiál lehčeji přilnout k hranám řezu.

Závěr

Předložená práce shrnuje dělení metod laserového řezání a popisuje moderní laserové zdroje. Věnuje se problematice řezání tenkých kovových fólií, předkládá výsledky optimalizace procesu řezání tenkých kovových fólií a ukazuje moderní technologie řezání tenkých kovových fólií. Dále práce popisuje experiment řezání tenké oceli s označením 1.4310 (AISI 301, X12CrNi 17-7) o tloušťkách $h = 0,1$ mm a $h = 0,05$ mm na pevnolátkovém pulzní laseru LASAG KLS 246-102 a prezentuje jeho výsledky.

Experiment ukazuje vliv parametrů laseru, podkladu a pozice výrobku při řezání na kvalitu řezu tenkým plechem. Cílem experimentu byla optimalizace parametrů laseru a výběr vhodného podkladu pro řezání tenkých plechů. Optimalizace parametrů byla zaměřena na vhodný rezonátor, energii pulzu, řeznou rychlost, tlak plynu a průměr trysky. Jako podklad sloužil ocelový rošt, hliníková voština, ocelový rámeček, měděný rámeček, papírová voština s plným podkladem a papírová voština bez podkladu.

Všechny výsledky byly zkoumány na konfokálním mikroskopu LEXT OLS 3100. U vybraných výsledků byly vytvořeny snímky na konfokálních mikroskopech LEXT OLS 3100 a LEXT OLS 5000. Na snímcích vybraných výsledků byla provedena měření parametrů kvality řezu. Jednalo se o četnost nežádoucích tvarů v řezu a šířku tepelně ovlivněné oblasti. Poslední parametr kvality řezu, teoretická výška vrubů, byl vypočítán z nastavení parametrů laseru pomocí rovnice (10).

První část experimentu se věnovala řezání oceli o tloušťce $h = 0,1$ mm. Pro dva rezonátory, R4.2 a R3.5, byla optimalizována energie pulzu a řezná rychlost. Dále byly porovnávány řezy provedené na různých podkladech. Nejvyšší kvalita byla získána na papírové voštině bez podkladu při použití energie pulzu $E = 78$ mJ, řezné rychlosti $v = 15,6$ mm·s⁻¹, tlaku $p = 5$ bar a průměru trysky $d = 1,4$ mm. Důležitým zjištěním je, že pokud byl použit podklad z kovu, vyskytovaly se v řezu návary a výkusy v místech, kde se dotýkal ocelový plech s podkladem.

Druhá část experimentu se věnovala řezání oceli o tloušťce $h = 0,05$ mm. Pro rezonátor R3.5 byla optimalizována energie pulzu, řezná rychlost, tlak plynu a průměr pracovní trysky. Dále byl zkoumán vliv pozice výrobku na kvalitu řezu. Jako podklad byla použita hliníková voština. Nejvyšší kvality bylo dosaženo při použití energie pulzu $E = 39$ mJ, řezné rychlosti $v = 15,6$ mm·s⁻¹, tlaku $p = 4$ bar a průměru trysky $d = 1,4$ mm. Je ukázáno, že vliv pozice na kvalitu řezu je značný. Nejlepších výsledků je dosaženo při řezání prvních stran výrobku, kdy je výrobek ještě pevně spojen se základním materiálem. Nejhorších výsledků je dosaženo při dořezávání výrobku.

Seznam použitých pramenů

- [1] ION John. C., *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750660791.
- [2] TRUMPF, *Tavné řezání* [online]. Dostupné z https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/laserove-rezani/tavne-rezani/
- [3] STEEN, W. M. a J. MAZUMDER. *Laser Material Processing*. 4th Edition. London: Springer, [2010]. ISBN 978-1-84996-061-8
- [4] KANNATEY-ASIBU E., *Principles of Laser Materials Processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 0470177985.
- [5] DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. *Laser fabrication and machining of materials*. New York, N.Y.: Springer, c2008. ISBN 9780387723440.
- [6] ROFIN, *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*.
- [7] COHERENT-ROFIN, *DC series CO₂ laser cutting and welding without break* [online]. Dostupné z https://www.rofin.com/fileadmin/user_upload/DC_Series_03-2017_E.pdf
- [8] KAZEMI S. S., MAHDEH M. H., *Determination and suppression of back-Reflected pump power in Yb:YAG thin-disk laser* [online]. Dostupné z www.spiedigitallibrary.org/ContentImages/Journals/OPEGAR/56/2/026109/FigureImages/OE_56_2_026109_f001.png
- [9] SÜDMEYER T., KRÄNKEL C., BAER C.R.E., HECKL O.H., SARACENO C.J., GOLLING M., PETERS R., PETERANN K., HUBER G., KELLER U. *High-power ultrafast thin disk laser oscillators and their potential for sub-100-femtosecond pulse generation* [online]. Dostupné z www.ulp.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/phys/quantum-electronics/ultrafast-laser-physics-dam/research/Thin%20Disk/Scaling%20to%20sub-100%20fs/292.pdf
- [10] RP PHOTONICS ENCYKLOPEDIA: *Thin-disk Lasers* [online]. Dostupné z www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html

- [11] TRUMPF: *TruDisk Technické údaje* [online].
Dostupné z www.trumpf.com/no_cache/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/trudisk/product_data_sheet/download/TruDisk.pdf
- [12] LEONARDO TECHNOLOGY: *Princip vláknového laseru – FIBER LASERU* [online]. Dostupné z www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru
- [13] LASER FOCUS WORLD: *High-power fiber lasers: techniques and accessories* [online]. Dostupné z www.ipgphotonics.com/en/619/Widget/High-power+fiber+lasers%3A+techniques+and+accessories.pdf
- [14] TRUMPF: *TruFiber Technické údaje* [online].
Dostupné z www.trumpf.com/no_cache/cs_CZ/produkty/laser/vlaknovy-laser/trufiber/product_data_sheet/download/TruFiber.pdf
- [15] PASCHOTTA, Rüdiger. *Field guide to laser pulse generation*. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2008. ISBN 9780819472489.
- [16] LARSSON D. *Fabrication and characterisation of low-noise monolithic mode-locked lasers* [online]. Dostupné z orbit.dtu.dk/files/4705087/PhD_final_20070123_lyx152.pdf
- [17] TEIXIDOR D., CIURANA J., RODRIGUEZ C. A. *Dross formation and process parameters analysis of fibre laser cutting of stainless steel thin sheets* [online]. Dostupné z <https://cyberleninka.org/article/n/515685.pdf>
- [18] LÜTKE M., MAHRLE A., HIMMER T., MORGENTHAL L., BEYER E. *Remote-cutting – a smart solution using the advantages of high brightness lasers* [online]. Dostupné z https://www.researchgate.net/profile/Achim_Mahrle/publication/44201358_Remote-cutting_-_a_smart_solution_using_the_advantages_of_high_brightness_lasers/links/56ea538b08ae95bdc2a7e02.pdf
- [19] HOCK K., AKDEMANN B., HELLMANN R., *Comparative study of remote fiber laser and water-jet guided laser cutting of thin metal sheets* [online]. Dostupné z https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212025606/pdf?md5=eb2a56dbec58241c551f1dfb42b6ef8b&pid=1-s2.0-S1875389212025606-main.pdf&_valck=1
- [20] LASAG: *Operation manual FLS/KLS/SLS series of lasers*.

- [21] LASAG: *KLS 246* [online].
Dostupné z http://www.jinacom.com/documentation/lasag/Brochure_KLS_246_english.pdf
- [22] ROFIN-LASAG: *Laser Components and Laser Service* [online].
Dostupné z <http://directedlight.com/rofin-lasag/>
- [23] *Nd-YAG-laser-optically-pumped-Xenon-Krypton-lamp* [online].
Dostupné z <http://directedlight.com/laser-components/catalog/nd-yag-rods/attachment/nd-yag-laser-optically-pumped-xenon-krypton-lamp-jpg/>
- [24] ŘEHOUN J., HAMÁČEK A., *Mirkoskop LEXT a jeho využití v materiálových vědách* [online]. Dostupné z <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/396/1/R0C1C1.pdf>
- [25] *Olympus Confocal microscope LEXT OLS 3100* [online].
Dostupné z https://nano.tau.ac.il/sites/shtans1-english.tau.ac.il/files/media_server/Nano/LEXT.pdf
- [26] *Konfokální mikroskop LEXT OLS 3100* [online].
Dostupné z <https://www.olympus-global.com/en/news/2007a/image/nr070125/lext31e.jpg>
- [27] *Olympus Confocal microscope LEXT OLS 5000* [online].
Dostupné z <https://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols5000/>
- [28] *Konfokální mikroskop LEXT OLS 5000* [online].
Dostupné z https://static1.olympus-ims.com/data/Image/IE/ols5000/specifications/product_ols5000_specifications_00.jpg?rev=3D3E
- [29] *Mechanické hodnoty 1.4310* [online].
Dostupné z <http://www.matkov.cz/katalog/mechanicke-hodnoty/>
- [30] *Chemické složení oceli 1.4310* [online].
Dostupné z https://www.hs-folien.de/fileadmin/user_upload/tabelle_werkstoffinformation_gb.pdf
- [31] CHMELÍČKOVÁ H., HAVELKOVÁ M., HIKLOVÁ H. ŘIHÁKOVÁ L., *Pulsed Nd:YAG laser drilling of alumina ceramics and silicon wafers.* [online]
Dostupné z https://www.wlt.de/lim/Proceedings2017/Data/PDF/Contribution127_final.pdf

Seznam použitých symbolů a zkratk

a	poměr roztaveného a vypařeného materiálu
BPP	kvalita kruhového svazku pevnolátkových laserů
c_p	měrné teplo pevného skupenství
c_k	měrné teplo taveniny
d	průměr výstupního otvoru trysky
D_{foc}	teoretická hodnota průměru svazku
D_0	průměr čela krystalu
Δ	rozměr ok podkladů
δ	šířka tepelně ovlivněné oblasti
E	energie pulzu
ε	teoretická výška vrubů
F	ohnisková vzdálenost
f	frekvence pulzů
h	tloušťka materiálu
HAND	ovládací panel laseru LASAG 246-102
K	míra možnosti fokusace svazku na minimální průměr
L	konstanta
l_t	skupenské teplo tání
l_v	skupenské teplo vypařování
λ	vlnová délka
M	faktor kvality svazku
OM	operační režim laseru LASAG 246-102
p	tlak pracovního plynu
pp	překrytí
\hat{P}	vrcholový výkon
\bar{P}_{max}	maximální průměrný výkonem
\hat{P}/v	poměr vrcholového výkonu a rychlosti
R	odrazivost
R_m	mez pevnosti
$R_{p0,1}$	mez kluzu, deformace do 0,1 %
$R_{p0,2}$	mez kluzu, deformace do 0,2 %
R3.5	rezonátor s označením 07/08 190/390 3,5/90
R4.2	rezonátor s označením 07/08 190/390 4,2/90
ρ	hustotu materiálu
S	plocha svazku
SB	stand-by laseru LASAG 246-102
σ	četnost nežádoucích útvarů

t	délka pulzu
T_t	teplotu tání
T_v	teplotu vypařování
v	řezná rychlost
w	reálný průměr svazku, který odebírá materiál
WJ cutting	water-jet guided laser cutting
X	zvětšení expanderu

Přílohy

Příloha 1: Ukázka kódu pro řezání ocelového plechu

G12 3
G63 X 50 4000 25 25
G64 X 50 950 600 600
G63 Y 50 4000 25 25
G64 Y 50 950 600 600
G00 X0 Y-50
G12 0
G04 100
G01 X0 Y4050
G12 1
G00 X2015 Y4050
G12 0
G04 100
G01 X2015 Y-50
G12 1
G00 X4030 Y-50
G12 0
G04 100
G01 X4030 Y4050
G12 1
G00 X6045 Y4050
G12 0
G04 100
G01 X6045 Y-50
G12 1
G00 X8060 Y-50
...