

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra experimentální fyziky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Laserové technologie podporované kapalinami



Autor:	Radek Pavlačka
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Aplikovaná fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Hana Chmelíčková

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 dne

Podpis

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Radek Pavlačka
Název práce	Laserové technologie podporované kapalinami
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	RNDr. Hana Chmelíčková
Rok obhajoby práce	2014
Abstrakt	Tato práce je zaměřená na využití kapalin v laserových technologiích. První část práce je věnovaná celkovému přehledu možností. Druhá část je experimentální, kde hlavním cílem bylo ověřit příznivé účinky kapaliny při laserovém obrábění.
Klíčová slova	Laser, kapalina, voda
Počet stran	45
Počet příloh	0
Jazyk	Český

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname	Radek Pavlačka
Title	Liquid supported laser technologies
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	RNDr. Hana Chmelíčková
The year of presentation	2014
Abstract	This work is focused on the laser technologies with using liquids. First part is devoted to the overview of possibilities. The second part is experimental, where the main objective was to verify the beneficial effect of liquid during laser machining.
Keywords	Laser, liquid, water
Number of pages	45
Number of appendices	0
Language	Czech

Děkuji vedoucí bakalářské práce, RNDr. Haně Chmelíčkové, za poskytnutou odbornou pomoc a věnovaný čas. Dále děkuji odborným pracovníkům Společné laboratoře optiky UP a Fyzikálního ústavu AV ČR v Olomouci Mgr. Janu Tomáščíkovi za pomoc při analýze vzorků na konfokálním mikroskopu a RNDr. Heleně Hiklové za naměřená data z kontaktního profilometru.

Obsah

Úvod	7
1 LALP (Liquid Assisted Laser Processing)	8
1.1 Čištění (Cleaning).....	8
1.1.1 Laserové čištění z přední strany	10
1.1.2 Laserové čištění ze zadní strany	11
1.1.3 Laserové čištění pomocí generovaných akustických vln	11
1.1.4 Laserové čištění pomocí generovaných rázových vln	11
1.1.5 Laserové čištění pomocí generovaných bublin	12
1.1.6 Ostatní metody čištění	12
1.2 Zpracování rázem (Shock Processing).....	12
1.2.1 Laserové přechování	13
1.2.2 Laserové formování a plátování	15
1.2.3 Zhutňování porézních materiálů.....	15
1.3 Obrábění (Subtractive Processing).....	16
1.3.1 Mikroobrábění z přední strany	17
1.3.2 Vysokovýkonnostní obrábění	18
1.3.3 Obrábění laserovým svazkem vedeným ve vodním paprsku	20
1.3.4 Obrábění s kapalinou na zadní straně obrobku.....	21
1.3.5 Obrábění materiálů obsahujících kapalinu	22
1.4 Výroba a modifikace částic.....	22
1.4.1 Výroba částic	22
1.4.2 Modifikace částic.....	23
1.5 Modifikace povrchu (Surface Modification).....	24
1.5.1 Depozice tenkého filmu.....	25
1.5.2 Laserové svařování a plátování pod vodou	26
2 Experimentální část	27
2.1 Rýhování křemíkových plátků.....	27
2.1.1 Materiál.....	27
2.1.2 Uspořádání a průběh experimentu	27
2.1.3 Výsledky	30
2.2 Vrtání oceli	33
2.2.1 Materiál.....	33
2.2.2 Uspořádání a průběh experimentu	33
2.2.3 Výsledky	35
3 Diskuze	38
Závěr	44
Seznam použitých pramenů.....	45

Úvod

Laserové technologie jsou v dnešní době jednou z nejrozšířenějších a neustále se rozvíjejících možností pro běžné průmyslové využití. Se zvyšováním nároku na kvalitu jsou neustále zdokonalovány a průběžně se vytvářejí nové způsoby zpracování pro dosažení co nejlepších výsledků. Jedna z mnoha možností jsou tzv. hybridní laserové technologie, kde laserové záření je kombinováno s látkou či energií, což má za následek vylepšení vlastností pro daný způsob obrábění. K těmto hybridním způsobům patří také laserové technologie podporované kapalinami (LALP).

Kontakt mezi kapalinou a obrobkem lze zajistit různě. Podle způsobu zpracování lze využití kapalin v LALP dělit na několik možností. Procesy ve vodním prostředí, obrobek ponořený v kapalině, kapalina aplikovaná na obrobek, kapalina jako vodič světla, procesy v páře a materiály obsahující kapiláry nebo chemicky vázané kapaliny.

Experimenty v laserovém ozařování rozhraní kapalina-pevná látka začaly už brzo po objevení laserů samotných. Cílevědomý výzkum však odstartoval až na konci roku 1980 a na začátku roku 1990 už byly objeveny čtyři hlavní oblasti LALP. V současné době množství dokumentů v rámci této technologie přesahuje číslo 700.

Cílem bakalářské práce je zpracovat poznatky z výzkumu právě této hybridní technologie a provést experiment, který ověří příznivé účinky kapaliny při vybraném druhu zpracování obrobku.

1 LALP (Liquid Assisted Laser Processing)

LALP jsou rozděleny na čtyři hlavní oblasti. Patří sem laserové pēchování (peening), kde kapalina slouží jako těsnící médium proti úniku rázové vlny. Laserové čištění (cleaning), kde k odstranění mikročástic z obrobku dochází vypařováním tenké vrstvy kapaliny na povrchu. Dále výroba koloidních částic ve vodě nebo v organických sloučeninách, a nakonec subtraktivní metody (řezání, vrtání, atd.), kde se kapalina užívá hlavně za účelem chlazení obrobku a k předcházení usazování nečistot.

V LALP bylo ještě donedávna používáno přes 70 druhů kapalin zahrnujících také kapalně kovy a zkapalněné plyny. Avšak s rychlým vývojem vědy a techniky se toto číslo zvyšuje. Nejčastěji prezentovaná kapalina je však voda, jako nejbezpečnější a nejdostupnější zdroj, hlavně ve vysoce energetických procesech jako je například pēchování. V mikroobrábění, popřípadě ve výrobě nanočástic jsou častou volbou organické sloučeniny. Avšak jsou i případy použití kapalného kovu jako je rtuť nebo zmrzlé kapaliny jako například led nebo pevný dusík [1].

Mezi běžné výhody LALP patří např. bezkontaktnost, flexibilní a rychlé řízení procesu, použití na těžko dostupných místech, nízké termální zatížení na obrobku, snížené riziko kontaminace atmosféry plyny a částicemi, kratší vlnová délka než ve vakuu, kratší termální relaxace, fokusace světla v kapalině a podobně. Je však nutné brát v úvahu, že pro různé aplikace existují různé požadavky a určité vlastnosti se mohou jevit i jako negativní. Mezi nejběžnější nevýhody patří cena vybavení, ztráta energie z důvodu chlazení kapalinou, světelný rozptyl z důvodu páry a bublin, oxidace povrchu, kontaminace povrchu a spousta dalších.

1.1 Čištění (Cleaning)

Kapaliny mohou napomáhat k odstraňování částic nebo povrchových vrstev různými způsoby. Redukcí adhezních sil, expanzí páry nebo ve funkci prostředku pro tvorbu rázových nebo akustických vln. V přítomnosti kapaliny je riziko poškození povrchu menší.

Nejdůležitější aplikací laserového čištění (wet laser cleaning) bylo odstraňování částic z povrchu materiálu, hlavně z povrchu křemíkových destiček pro polovodičové integrované obvody, protože částice zabraňují průchodu světla pro fotolitografii a způsobují odchylky rozměrů, v nejhorších případech zkratky a poškození. Vzhledem k malým rozměrům integrovaných obvodů je dnes zapotřebí odstraňovat částice o průměrech desítky nanometrů. Nanočástice mohou vznikat například z okolní atmosféry a podobně. Kapaliny mohou být právě užitečné k prevenci rozptýlení částic do okolní atmosféry.

Tato laserová technika je považována za vhodnou také pro odstraňování radioaktivní kontaminace na nukleárních zařízeních nebo k čištění optických povrchů kosmických systémů [1].

Nejčastěji používané kapaliny v laserovém čištění jsou voda, etanol, metanol a aceton. Nejběžnějšími přísadami pak bývá etanol, metanol nebo NaCl. Různé druhy kapalin a přísad způsobují odlišné vlastnosti. Alkoholy jsou například užívány pro lepší smáčení, tedy dosažení spojitě kapalně vrstvy na povrchu.

Mezi hlavní výhody v porovnání se suchým laserovým čištěním a ostatními metodami patří:

- Kapaliny mohou značně snížit adhezní síly (absence kapilárních sil, atd.)
- Nižší hustota energie záření oproti suchému laserovému čištění

- Mohou být odstraňovány menší částice
- Menší riziko poškození čištěného povrchu
- Spotřeba kapaliny je malá v porovnání s konvenčními metodami
- Možnost elektronického řízení procesu

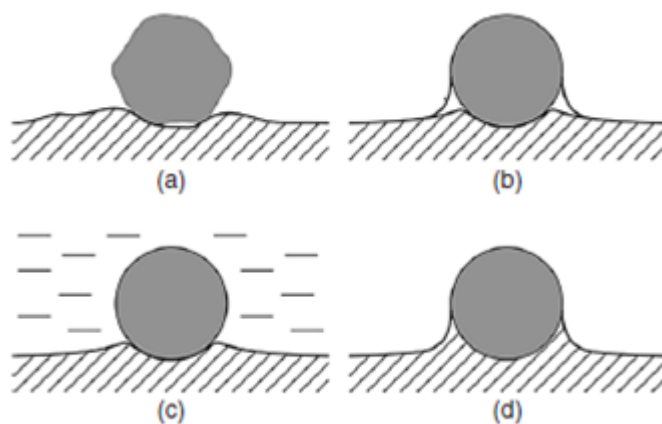
Nejčastějšími nevýhodami jsou pak:

- Cena zařízení
- Možnost poškození povrchu z důvodu fokusace světla v kapalině (větší kapky nebo transparentní částice mohou působit jako čočka)
- Tvorba páry může škodit optickým a elektronickým systémům

K tomu, aby částice byly odstraněny, musí být překonány adhezní síly. Pro částice o velikosti mikrometrů a nanometrů jsou za adhezní síly považovány Van der Waalsovy síly, elektrostatické síly, kapilární síly, síly elektrické dvojvrstvy a síly chemické vazby (př. oxidace povrchu). Na feromagnetických substrátech také magnetické síly. V porovnání s makrosvětem gravitační síly nebereme v potaz.

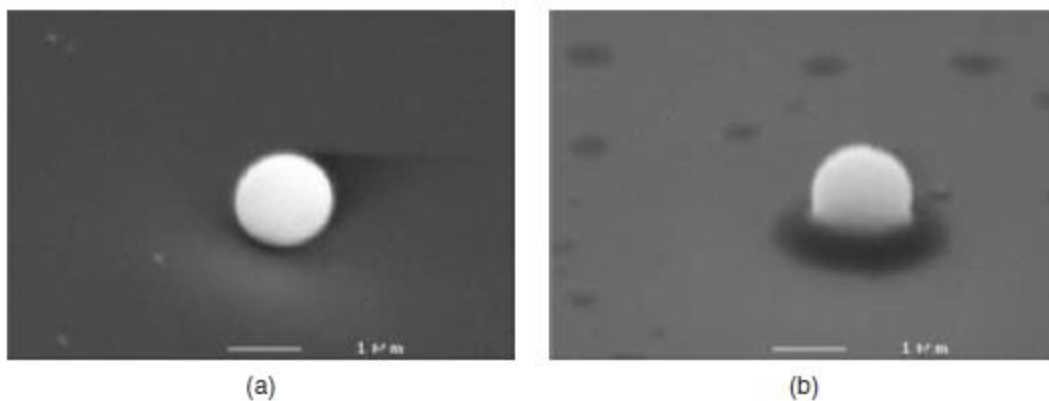
Adheze je značně ovlivněna nerovností povrchu a okolním prostředím. Pro částice na suchém povrchu se adhezní síly snižují se zvyšující se nerovností povrchu. Vliv okolního prostředí na adhezní síly si lze představit například zrušením kapilárních sil ve vodním prostředí.

Mnoho experimentů i teoretických výzkumů bylo provedeno za pomoci sférických částic. Hlavně sférický křemík, sklo a hliníkové částice různých velikostí jsou komerčně dostupné. Avšak v reálné situaci mají částice nepravidelný tvar (obr. 1).



Obr. 1: Příklady rozhraní částice/substrát: (a) nepravidelná částice na nepravidelném povrchu (reálný případ), (b) sférická částice na rovném povrchu (deformace substrátu adhezí a kapilární síly), (c) částice ponořená v kapalině (zrušení kapilárních sil), (d) systém částice/substrát po mnoha hodinách kontaktu (převzato z [1])

Adhezní síly způsobují také deformaci jak povrchu, tak i částic. Deformace způsobují přesun hmoty a poleví po sto až tisíci hodinách. To má za následek zvětšení kontaktní plochy mezi povrchem a částicí, a tím i zvětšení adhezních sil celkově (obr. 2). Z důvodu deformace tak mohou adhezní síly mezi kovovými částicemi nebo částicemi oxidů narůst až dvacetkrát a mezi polymerovými částicemi až stokrát [1].



Obr. 2: Snímky SiO_2 částic $1,5 \mu\text{m}$ z mikroskopu SEM: (a) po 17 h a (b) po 1350 h (převzato z [1])

1.1.1 Laserové čištění z přední strany (Steam Laser Cleaning)

Steam laser cleaning (SLC) je nejvýznamnější druh laserového čištění vůbec. Tenká vrstva kapaliny, o tloušťce až několik mikrometrů, je kondenzována z parní trysky na znečištěný povrch. Následným laserovým ozářením se kapalina odpaří. Tlak a pohyb expandující páry žene částice pryč z povrchu. I nepatrné vychýlení povrchu z důvodu tepelné expanze a akustické vlny mohou přispět k odstranění částic. Vrstva kapaliny může být nespojitá, důležité je aby byla v kontaktu s částicemi. Pokud jsou částice i povrch hydrofobní, může kapalná vrstva vzniknout také z okolní atmosféry.

Pára je vyráběna ohřevem kapaliny (většinou směs vody a alkoholu) ve speciální nádobě a je nanášena na povrch pomocí speciální pulzní trysky. Tloušťka kapalně vrstvičky může být řízena délkou pulzu páry. Většinou délka pulzu trvající pár sekund vytvoří vrstvu o tloušťce $0,2 \mu\text{m}$ až $10 \mu\text{m}$. Vrstvička vydrží na povrchu jen několik sekund, a proto je ihned aplikováno laserové záření asi $0,1 \text{ s}$ po pulzu páry. Pára může být aplikována i kontinuálně, záleží na konkrétním zařízení. Tloušťka kapaliny může být monitorována například pomocí interference.

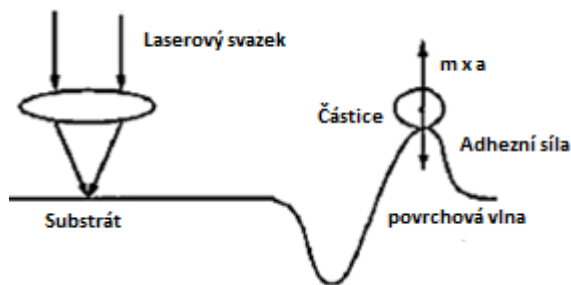
V SLC je výhodné užívat lasery, jejichž vlnová délka není absorbována v kapalině ale substrátem. Tedy vhodné jsou například excimerové nebo neodymové lasery.

U Nd:YAG laserů o vlnové délce $1,06 \mu\text{m}$ a dalších pevnolátkových laserů je většinou vyšší odrazivost od povrchu substrátu než u laserů v UV-VIS oblasti [4]. CO_2 laser, jehož vlnová délka $10,6 \mu\text{m}$ je ve vodě vysoce absorbovaná, má také své uplatnění, například v čistících procesech kde je nutné vyhnout se riziku poškození materiálu.

Principy optických efektů, které mohou negativně ovlivnit proces:

- Odrazivost od rozhraní vzduch/kapalina a kapalina/substrát. Ztráta může být až desítky procent.
- V případě nedostačujícího vlhčení může dojít ke kondenzaci kapek, které mohou působit jako čočka. Zvyšuje se tedy riziko poškození povrchu.
- Lom světla u zakřiveného povrchu nebo v blízkosti částice v případě nanesení velmi tenké vrstvy kapaliny.
- Fokuse světla v průhledných částicích (př. SiO_2) a tedy zvýšené riziko poškození povrchu.

Tepelná expanze může také generovat povrchové vlny, které mohou pomoci překonat adhezní sílu částic mimo ozařovanou oblast (obr. 3). Tato skutečnost již byla ověřena při odstraňování částic oxidu hlinitého na křemíkových destičkách.



Obr. 3: Princip interakce částice s povrchovou vlnou (upraveno z [1])

Účinnost typického SLC závisí na velikosti částic a na hustotě energie laserových pulzů. Účinnost začíná klesat pro částice menší jak 100 nm. Nicméně SLC je schopné odstraňovat částice menší jak 60 nm s účinností až 90 %.

Laserové čištění je možné i bez aplikace kapaliny na povrch. Mezi částicí a povrchem je ve většině případů přítomno malé množství kapilární kondenzované vody a tedy i v tomto případě rychlé odpaření může zajistit odstranění částic.

1.1.2 Laserové čištění ze zadní strany

Částice na transparentním substrátu mohou být efektivně odstraňovány ohřevem kapaliny laserovým zářením skrz substrát. Podmínkou je absorpce laserového záření v kapalině na rozdíl od SLC, kde k ohřátí kapaliny dochází ozářením povrchu substrátu. Je tedy menší riziko poškození povrchu. V případě vody jsou často voleny Er:YAG lasery emitující záření o vlnové délce 2,94 μm , které je vysoce absorbované vodou.

V porovnání se SLC je tepelné zatížení částic značně sníženo. Například lze bezpečně oddělovat živé buňky ze skleněných destiček.

1.1.3 Laserové čištění pomocí generovaných akustických vln

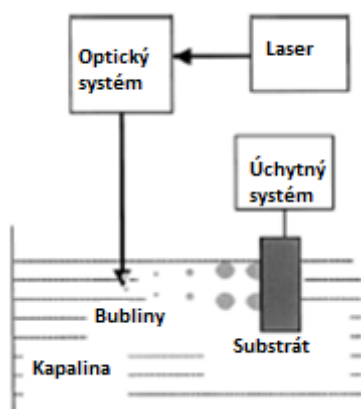
Jedná se o další možnost laserového čištění, avšak jiným způsobem. Byly provedeny pokusy, kde na ponořený substrát do kapaliny byly použity pulzy CO_2 laseru fokusované na volnou hladinu vody. Délka pulzu byla 100 ns a energie 0,3 J. Částice o velikosti 1 μm až 0,1 μm byly efektivně odstraněny z křemíkového substrátu za pomoci laserem indukovaných akustických vln. Tlak akustické vlny na částice byl odhadnut na 0,02 MPa až 38 MPa.

1.1.4 Laserové čištění pomocí generovaných rázových vln (Liquid-assisted Laser Shock Cleaning)

Liquid-assisted laser shock cleaning (LLSC) je kombinace SLC a LSC (laser shock cleaning). Tento způsob je v podstatě SLC s rozšířením o druhý laser, který má za úkol vytvořit těsně nad obrobkem rázovou vlnu, pomocí vysoké hustoty energie fokusovaného laserového záření v plynu. Na povrch se nejdříve nanese kapalina a poté je vystaven nárazové vlně a ohřevu současně. Tato technika se osvědčila pro odstraňování částic o rozměrech kolem 20 nm z křemíkových destiček s efektivností až 90 %. Metoda je tedy účinnější než ostatní.

1.1.5 Laserové čištění pomocí generovaných bublin

Jedná se o velice šetrnou metodu, kde odstranění částic je způsobeno rychlým nárůstem bublin vytvořených laserovým svazkem v blízkosti substrátu (obr. 4). Rychlý proud bublin strhává částice a unáší je pryč z povrchu.



Obr. 4: Princip odstraňování částic pomocí generovaných bublin (upraveno z [1])

1.1.6 Ostatní metody čištění

Způsobů a možností pro laserové čištění je samozřejmě více. Každá metoda má jiné uplatnění, některé jsou aplikovatelné pouze pro konkrétní problémy.

Mezi často používané způsoby patří odstraňování vrstvy oxidů na kovových materiálech přímo laserovou ablací v kapalině. Je to už poměrně hrubší metoda, ale je řazena do této kategorie. V porovnání s jinými metodami jako například broušení a podobně má laserová ablace několik výhod. Metoda je bezdotyková, zabere méně času a lze ji použít na těžce dostupná místa a složité tvary. Tato metoda může mít spoustu vylepšení, například přidáváním příměsí do kapalin a podobně.

Mezi další metody pak lze řadit třeba odstraňování organických částic pomocí produktů vznikajících rozkladem vody po laserové fokusaci, odstraňování částic pomocí ledu a mnoho dalších [1].

1.2 Zpracování rázem (Shock Processing)

Další možnou aplikací laserových technologií s podporou kapalin je tzv. laser shock processing (LSP). V LSP se využívá mechanický zpětný ráz rychle expandující páry a plazmatu k provedení trvalých změn na obrobku.

Hustota laserové energie na povrchu obrobku zde musí být velmi vysoká (1-100 GW/cm²), aby došlo k vytvoření plazmatu. Rychlá expanze vysokotlakého plazmatu (rychlost kolem 1500 m/s a tlak přes 2 GPa ve vodě) vytvoří rázovou vlnu, která se šíří skrz materiál, vytváří dislokace a indukují plastické deformace (obr. 5). Vysoká hustota dislokací má za následek vysokou povrchovou tvrdost a pevnost, zatímco plastické deformace redukuje pórovitost a vytváří tlakové zbytkové napětí, které je později odpovědné za zvýšení odolnosti materiálu proti únavě, tvoření trhlin a napětíové korozi. Z důvodu rázové vlny se také zvyšují hodnoty Yongových modulů a Poissonových koeficientů, a v některých případech dochází ke zjemnění zrna.

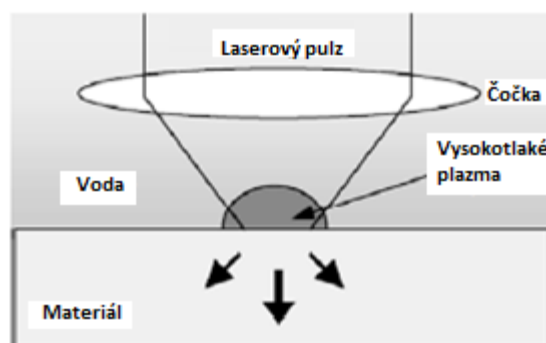
Jestliže je povrch pokrytý průhledným materiálem neabsorbujícím laserové záření (kapalina nebo pevná látka), expanze páry a plazmatu je potlačena a tlak na povrch je mnohonásobně vyšší. Jako omezovací médium se používá v případě pevných materiálů sklo nebo polymery, avšak v uváděném případě to je kapalina. Nejčastěji voda, jako nejbezpečnější a také nejlevnější možnost. Přestože kapalina nezajistí tak vysoký tlak jako

například sklo, dá se aplikovat na zakřivený povrch a proto je tato metoda praktičtější. Navíc u pevných materiálů dochází k nežádoucí vícenásobné vlně z důvodu rozkmitání. Konkrétně u skla pak ještě může docházet k znečištění mechanismu úlomky. Jedinou výhodou skla je velká akustická impedance, která zajistí vysoký tlak při expanzi.

V LSP je žádoucí pouze mechanický náraz. Zahřátí materiálu laserovým zářením je redukováno použitím krátkých pulzů a často i ochranných vrstev (ablatorů).

Tato technologie má uplatnění v pēchování, zhutňování a formování materiálu. Pēchování má však největší význam.

V mnoha ohledech, podobných výsledků jako u LSP lze dosáhnout i jinými metodami jako například brokováním, vodním kavitačním pēchováním a podobně. V základním výzkumu byly použity dokonce i výbušniny. V porovnání s jinými metodami jako je například brokování, jakožto levná a jednoduchá metoda, je LSP bezkontaktní (odpadá zde riziko kontaminace cizím materiálem), laserový svazek lze aplikovat na místa nepřístupná pro zrychlené broky, laserový pulz může být fokusován na plochu velikosti mikrometrů, ale také do velkých ploch až 100 mm², lepší řízení procesu, rychlý postup, nezpůsobuje výrazné makroskopické deformace, plasticky ovlivněná hloubka je až desetkrát větší a nezvyšuje výrazně povrchovou drsnost. Hlavním nedostatkem je pak vysoká cena vybavení.



Obr. 5: Princip LSP (upraveno z [1])

1.2.1 Laserové pēchování (Laser Shock Peening)

Hlavní cíl laserového pēchování je vytváření zbytkového tlakového napětí v povrchové vrstvě obrobku. Takto vytvořené napětí je prospěšné mnoha způsoby, nejvíce ze všeho proti únavě materiálu a napětíové korozi.

V LSP je postup následující. Vysoce intenzivní laserový pulz ozáří povrch obrobku, který je v lepším případě pokrytý ochrannou vrstvou (ablatorem) a transparentní těsnicí vrstvou. Ochranná vrstva (pokud je přítomna) nebo nepatrně tenká povrchová vrstva obrobku je odpařena a pára z části ionizována. Zpětný ráz volně expandujícího nebo utěsněného plazmatu vytváří rázovou vlnu, šířící se do obrobku. Hloubka penetrace rázové vlny je kolem dvou až tří milimetrů a poté se přemění na akustickou vlnu, která už nezpůsobuje žádné změny v materiálu. Ovlivněný rozsah se plasticky přetvoří během šíření vlny. Okolní materiál odporuje tomuto napětí, a proto vznikne na povrchu tlakové zbytkové pnutí (obr. 6).

Většina výzkumu ohledně LSP byla provedena metodami, které jsou vhodné pro zpracování strojních dílů v průmyslu. Jedna z nejběžnějších metod je LSP s ochrannou vrstvou kovové fólie nebo nátěru na povrchu.

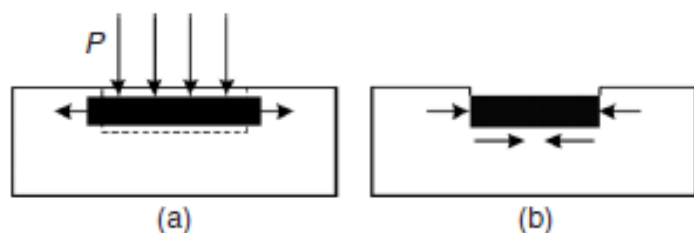
Funkce ochranné vrstvy je zabránění ohřevu obrobku laserovým svazkem. Výběr vhodného materiálu (s nízkou odpařovací teplotou a nízkým akustickým odporem) může také zvýšit amplitudy šokové vlny až o 50 %. Avšak v některých případech, kdy je potřeba

provést pēchování na pevných konstrukcích pod vodou, aplikace ochranné vrstvy může být problematická. Proto byla vytvořena v roce 1995 technologie laserového pēchování bez ochranné vrstvy. V podstatě je obrobek opracováván laserovými pulzy o vysoké hustotě výkonu ale s relativně nízkou frekvencí, aby nedocházelo k tepelnému poškození [1].

Pokud je použita velmi tenká vrstva materiálu, může se rázová vlna odrazit od zadní strany a vyrušit tak účinek na přední straně, která je opracovávána. Řešením této situace může být například provádění pēchování z obou stran současně nebo použitím tzv. momentum trap, což je v podstatě kus jiného materiálu připevněného k zadní straně obrobku, který zabrání odražení vlny tím, že ji absorbuje. Materiál by měl mít co nejvíc podobnou akustickou impedanci.

V LSP je důležité, aby laserové záření prošlo vodní vrstvou bez značné absorpce. Tento požadavek splňují lasery zářící v blízké infračervené oblasti. Tedy Nd:YAG lasery popřípadě další pevnolátkové lasery. V případě pēchování bez ochranné vrstvy, odráží obnažený kovový povrch většinu záření o vlnové délce 1,06 μm , a proto je zapotřebí kratších vlnových délek. Většinou se používají měděné lasery 510 nm nebo Nd:YAG ve vlnové délce 532 nm, kde je navíc menší absorpce ve vodě. A protože bez ochranné vrstvy jsou užity pulzy s nižší energií (40-250 mJ), aplikují se komerčně levné laserové systémy.

V LSP je expanzní tlak běžně měřený piezoelektrickým snímačem. Měřením bylo zjištěno, že tlak trvá déle než laserový pulz a že vodní vrstva na povrchu zvyšuje tlakovou amplitudu mnohonásobně [1].



Obr. 6: Princip vytváření tlakového zbytkového napětí: (a) během interakce, (b) po interakci (převzato z [1])

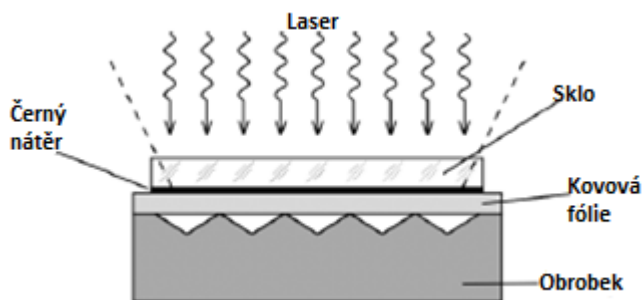
LSP má tendenci vytvořit jistou povrchovou drsnost nezávislou na počátečním stavu. V porovnání s konvenčními metodami má tato metoda průměrnou hodnotu drsnosti. Například brokováním dosáhneme větší drsnosti, což se také někdy používá pro vytvoření dekorativního povrchu. A naopak metodou hluboké tažení (deep rolling) dosáhneme zase nižší drsnosti.

Laserové pēchování má dvě nejdůležitější aplikace. Opracovávání leteckých komponentů a komponentů nukleárních reaktorů. V obou případech se používá jako těsnící vrstva voda. U leteckých součástí jsou to turbíny, součástky rotorů s cílem zlepšit jejich životnost, tedy odolnost vůči únavě materiálu. Běžně se používá nepřetržitě tekoucí vodní clona na místo, které je zrovna opracováváno. Produktivita dosáhne až 1 m^2/h . Laserová technologie pēchování pro komponenty nukleárních reaktorů se používá hlavně proti praskání z důvodu napěťové korozi.

1.2.2 Laserové formování a plátování (Laser Forming and Cladding)

Deformace tenké kovové fólie z důvodu tlaku plazmatu bylo pozorováno už kolem roku 1970. Později se tento proces rozvinul. Jako těsnicí vrstva se používala pevná látka. Kapalina se začala užívat teprve nedávno a to jen pro mikroformování. Laserové formování je považováno jen za alternativu ostatních metod, jako je explozivní nebo magnetické formování. Na rozdíl od ostatních metod je tato vhodná pro vytvoření mikrodeformací do materiálu.

Laserové plátování je opět jako alternativní metoda k explozivnímu plátování schopna spojit materiály s rozdílnými plochami (obr. 7). Tato technologie je doposud prováděna pouze se skleněnou vrstvou. Kapalina zde zatím nemá uplatnění.

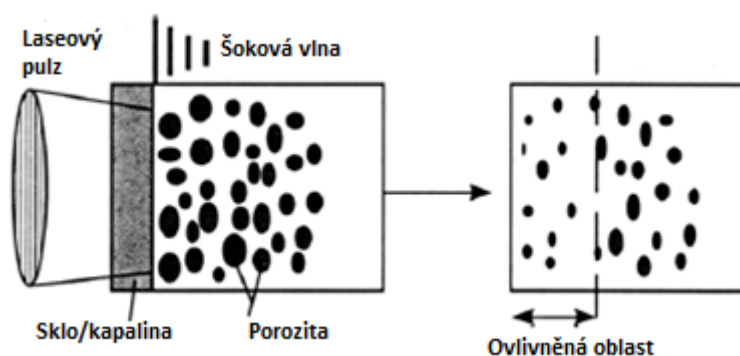


Obr. 7: Princip laserového plátování (upraveno z [1])

1.2.3 Zhutňování porézních materiálů

Výroba strojních částí pomocí lisování prášku je velice atraktivní, protože mohou být snadno vyrábět části různě složitých tvarů, dokonce i tvrdých materiálů jako jsou karbidy a podobně. Nicméně porozita takto lisovaných materiálů způsobuje snížení jejich pevnosti a zvyšování jejich tření a opotřebování. V nějakých případech může být ale výhodou.

Porozita může být snižována zhutňováním materiálu například explozí. Laserový proces je však méně nebezpečný a snadnější na řízení (obr. 8). Proces se uskutečňuje hlavně užitím skleněné vrstvy, výjimečně pomocí vodní vrstvy. Zhutněná hloubka dosahuje přibližně půl milimetru a povrchová porozita řádově jednotky procent.



Obr. 8: Princip laserového zhutňování (upraveno z [1])

1.3 Obrábění (Subtractive Processing)

Laserové obrábění (řezání, vrtání, atd.) je považováno za velice přínosné a konkurenční v případě obrábění tvrdých materiálů, křivých ploch, těžce přístupných míst, vyřezávání struktur do povrchu, mikroobrábění a podobně. Proces je bezkontaktní, může být uskutečněn i mimo atmosférický tlak a navíc je lehce kontrolovatelný [2].

Nicméně laserové obrábění je převážně tepelný proces, kde dochází k odstranění materiálu pomocí tavení a vypařování, a tedy i k různým nežádoucím účinkům. Například u běžného laserového řezání kovů dochází k procesním nedokonalostem, jako je kuželovitost, strukturální změny, natavení okrajů, okuje, otřep a podobně [4]. Přítomnost kapaliny může značně zredukovat tyto nedokonalosti (obr. 9).

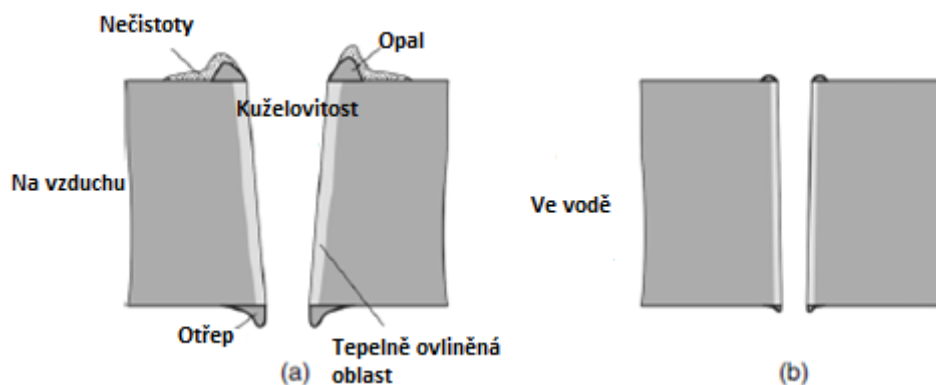
Stejně jako u každého obrábění tak i u laserového vznikají při ablaci nečistoty. Používají se různé techniky k zabránění opětovného usazení odstraněného materiálu. Mezi nejběžnější metody patří ablace ve vakuu, čištění obrobku vysokotlakým proudem plynu, čištění obrobku rozpouštědly nebo různými roztoky, ultrazvuková koupel, použití ochranné vrstvy na obrobku nebo obrábění za pomoci kapalin [2].

Důvodů aplikace kapaliny je samozřejmě více. Kromě snížení nečistot na obrobku také napomáhá snížit množství taveniny (menší šířka spáry), redukuje tepelně ovlivněnou oblast, snižuje kuželovitost a otřep. Dále je značně zabráněno kontaminace atmosféry aerosoly a plyny. Nižší tepelná zátěž je zase užitečná pro materiály s velkou tepelnou citlivostí a je zabráněno popřípadě snížena míra praskání křehkých materiálů. Zajímavým použitím kapaliny je také vedení laserového svazku.

Mezi nejčastější nevýhody použití kapalin patří kontaminace povrchu materiálu produkty rozkladu. Kyslík a vodík z vody, popřípadě uhlík z organických sloučenin, dusík a podobně. Dalším problémem mohou být výpary kapaliny a jejich produkty rozkladu, které mohou být škodlivé pro personál nebo elektronické vybavení. Proto pro obrábění ze přední strany jsou běžně používány netoxické transparentní kapaliny. Není to ale nutnou podmínkou. Například rozpuštěný chlorid sodný byl testován jako autofokusační médium pro laserové vrtání, dusičnan sodný zase pro vedení laserového svazku.

V celkových subtraktivních procesech se však používají různé druhy kapalin a přísad. Přidáváním solí a zásad do vody bylo zjištěno lepší zakončení obrábění, organická aditiva zase přispívala k lepšímu smáčení tenkého kapalného filmu na povrchu obrobku [1].

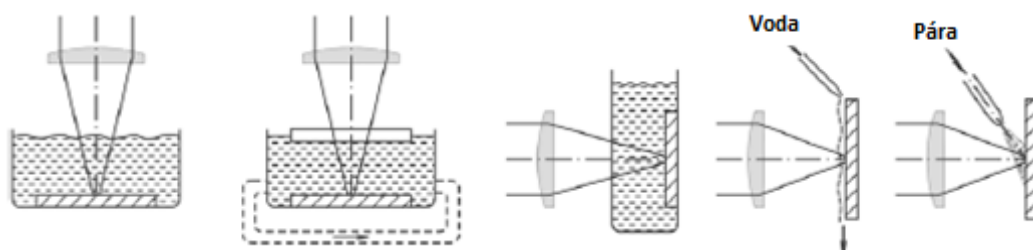
Pro mikroobrábění ze přední strany jsou běžně používány nanosekundové pulzní lasery o vlnových délkách UV-VIS-NIR, které nejsou v kapalinách absorbované. Ve vysoce výkonnostních aplikacích jsou zase zvoleny energeticky efektivní CO₂ lasery.



Obr. 9: Porovnání kvality řezu zhotoveného (a) bez kapaliny, (b) s kapalinou (upraveno z [1])

1.3.1 Mikroobrábění z přední strany (Frontside Micromachining)

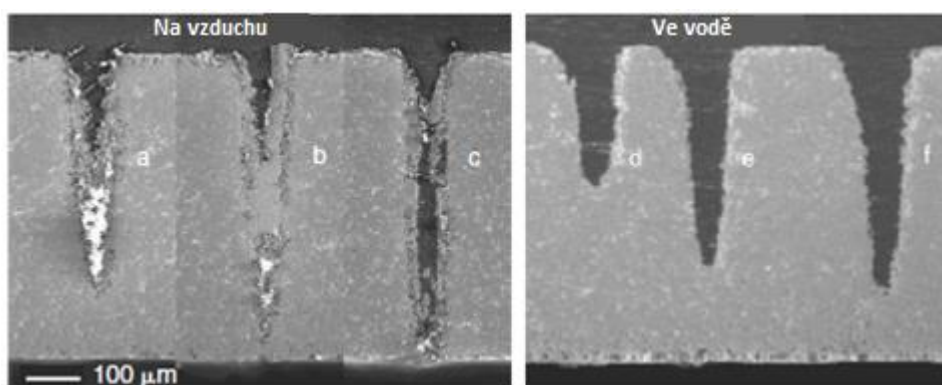
Metody zajištění kontaktu obrobku s kapalinou pro laserové mikroobrábění jsou různé (obr. 10). Nejčastěji používaná metoda je taková, kde obrobek je ponořený a ozařován skrz kapalinu. Vylepšením této metody může být varianta, kdy je na povrch umístěn transparentní pevný materiál (nejčastěji sklo), který zabrání stříkání a vypařování kapaliny do elektronických a optických součástí. V takto uzavřeném systému lze ještě přidat proudění kapaliny a zredukovat tak usazování nečistot. Mezi další metody pak patří například nanášení kapaliny na svisle zachycený obrobek přímo tekoucím proudem popřípadě parní tryskou. V těchto případech špatné vedení laserového svazku může být pro různé aplikace přínosem. Co se týče první uvedené metody, typická tloušťka vrstvy kapaliny nad obrobkem je kolem 1 mm.



Obr. 10: Možné metody aplikace kapaliny v mikroobrábění (upraveno z [1])

Stejně jako u plynu, tak i u kapalin je hlavním ablačním mechanismem tavení a vypařování materiálu. Mnohonásobně vyšší tlak páry a plazmatu v kapalině, ve srovnání s ablací v plynu nebo vakuu, by měl způsobit vyšší ablační účinek. Toto však bylo ověřeno pouze pro nanosekundové pulzy. Detailní mechanismus není ještě objasněn. Pro měření tlaku ablačního procesu se používají piezosenzory.

Laserový ohřev generující teplotní gradienty a bubliny způsobuje proudění kapaliny, které napomáhá k odstraňování nečistot. Síly odporu prostředí na částice je vyšší v kapalinách než v plynu, ale na druhou stranu rychlost usazování částic je díky tomu mnohonásobně nižší. Tedy nečistoty jsou efektivněji odstraňovány z pracovní oblasti a je tedy možné zhotovovat i hluboké a dlouhé kanálky (obr. 11). I přestože je čas usazení částic v kapalinách mnohem větší, doporučuje se cirkulace kapaliny z důvodu absorpce a rozptylu světla na nečistotách.



Obr. 11: Účinky kapaliny pro zhotovování hlubokých kanálků (upraveno z [1])

Teplota plazmatu indukovaného laserovým zářením dosahuje až tisíce kelvinů a generuje UV záření. To může způsobit, že molekuly kapaliny mohou být excitovány, ionizovány popřípadě disociovány a tudíž se stávají chemicky aktivní. To může být

v některých případech přínosem nebo naopak na obtíž. Teoretických i experimentálních výzkumů na toto téma je mnoho.

V mnoha případech je míra ablace větší v kapalinách než v plynech, což může být způsobeno následujícími vlastnostmi:

- Index lomu v kapalinách je větší než v plynech, což vede k tomu, že na rozhraní vzduch/voda/obrobek je větší absorptivita
- Proudění bublin odnáší nečistoty a tím se snižuje rozptyl světla
- Vyšší teplota plasmy z důvodu vyššího tlaku v kapalině

V některých případech je ale míra ablace v kapalině naopak nižší.

- Snížená průhlednost kapaliny z důvodu hromadění nečistot v kapalině
- Rozptyl světla v bublinách snižuje hustotu energie na obrobku
- Zpevňování materiálu z důvodu laserových rázových vln

Míra ablace je silně závislá na tloušťce kapaliny. Se zvyšující se tloušťkou se zvyšuje taktéž. Nicméně jakmile tloušťka dosáhne určité kritické hodnoty, obvykle pár mikrometrů, ablační míra saturuje a pak se nepatrně snižuje, jakmile tloušťka dosáhne 1 mm.

Zpravidla vyšší míra ablace v kapalinách je doprovázena zvýšením nerovností povrchu a v některých případech také zvýšením porozity. Tenhle negativní efekt lze redukovat přísadami v kapalině. Laserová ablace různých materiálů v různých roztocích kyselin a solí vynáší hladší povrch než v čisté vodě [1].

Ve vyšších laserových intenzitách mohou některé kapaliny působit jako fokusační čočka z důvodu většího indexu lomu. Tento jev, zvaný autofokusace, byl použit na vyvrtání mikrometrového otvoru do oceli (316 stainless steel). Bylo dosaženo dvojnásobného zmenšení šířky otvoru a zmenšení kuželovitosti v porovnání s tradiční pevnolátkovou fokusační optikou. Otvory vrtané do oceli pevnou čočkou byly deformované z důvodu polarizace laserového svazku. Užitím fokusace v kapalině je polarizační efekt utlumen. Ve výsledku je pak pro provrtání se skrz obrobek zapotřebí méně pulzů, než u pevnolátkových čoček. Nejlepších výsledků bylo dosaženo za použití sulfidu uhlíčitého (CS_2), jako dobře známá opticky nelineární kapalina. Jinou kapalinou s podobným nelineárními vlastnostmi je například benzen [1].

1.3.2 Vysokovýkonnostní obrábění

Obráběcí technika využívající vysoce výkonné lasery se značně liší od mikroobrábění. Laserový svazek společně s ochranným plynem a vodou je aplikovaný na obrobek pomocí speciální řezací hlavy. Tloušťka materiálu řezaného skrz může měřit až 50 mm. Lasery jsou kontinuální nebo s milisekundovými pulzy s výkonem až několik kilowatů. Často jsou preferovány CO_2 lasery z důvodu jejich vysoce energetické výkonnosti. Voda je zvolena jako chladicí kapalina pro její nízkou cenu a bezpečnost. Protože CO_2 laserové záření je silně absorbované vodou, musí být zajištěna suchá pracovní oblast.

Kapalina může být v kontaktu s obrobkem různými způsoby (obr. 12). V případě neodymových laserů může záření procházet skrz vodu, což usnadňuje její aplikaci. Například vložení obrobku do vody. V ostatních případech musí být zajištěna suchá oblast. Nejběžnější způsob je vysokotlaký proud plynu, který zadržuje kapalinu.



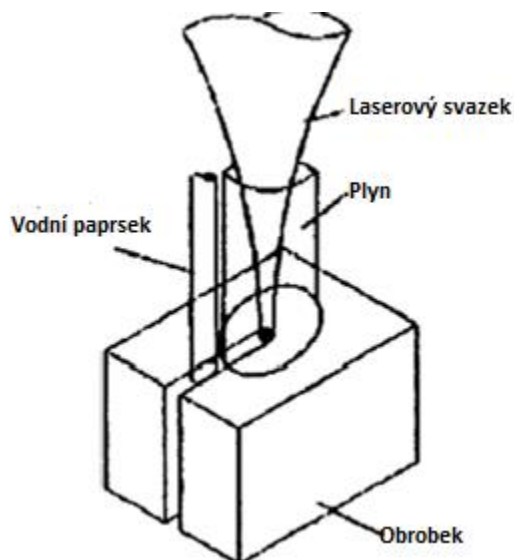
Obr. 12: Možné metody kontaktu obrobku s kapalinou při obrábění (převzato z [1])

Chlazení obrobku kapalinou značně redukuje tepelně ovlivněnou oblast. Kapalina též zabraňuje usazování nečistot a redukuje emisi plynů a částic do okolního ovzduší. Chlazení obrobku může ale také značně ovlivnit kvalitu řezu. Protože při řezání rohů se zpomaluje rychlost posuvu svazku, hrozí spálení materiálu z důvodu nadměrného teplotního hromadění. Ačkoliv řezání s vodním chlazením je kvalitnější, nemůže se rovnat řezání pulzním laserem v plynu. Další možností zabránění spálení materiálu je dynamická kontrola laserového výkonu.

Rychlost řezání v přítomnosti vody není značně ovlivněna. Podle okolností může být vyšší popřípadě nižší než v plynném prostředí.

V případě, že není k dispozici speciální řezací hlava, je možné zajistit opatření s oddělením laserového svazku a vodního paprsku různými způsoby. Tyto způsoby jsou levné a jednoduché, protože k původní řezací hlavě stačí přidat pouze vodní trysku. Metody jsou celkem tři:

- Vodní proud předbíhá laserový svazek.
- Vodní proud a laserový svazek ve stejném bodu. Řízením vodní trysky přímo do tavné zóny dochází k lepšímu chlazení a odstraňování taveniny, což zajišťuje nejlepší kvalitu a rychlost řezání. V lepším případě může být obrobek ponořený ještě ve vodě i s vodní tryskou, která zajistí proudění.
- Vodní proud následuje laserový svazek (obr. 13). Protože voda není v tavné zóně, je vhodné použití také CO₂ laserů.



Obr. 13: Jedna z metod kombinace laserového svazku a vodního proudu (upraveno z [1])

1.3.3 Obrábění laserovým svazkem vedeným ve vodním paprsku

První článek ohledně vedení světla vodním paprskem je z roku 1842. Jev byl později rozsáhle užíván v osvětlených fontánách. První experimenty byly realizovány kolem roku 1976 a plného uznání se dočkalo až v roce 1993.

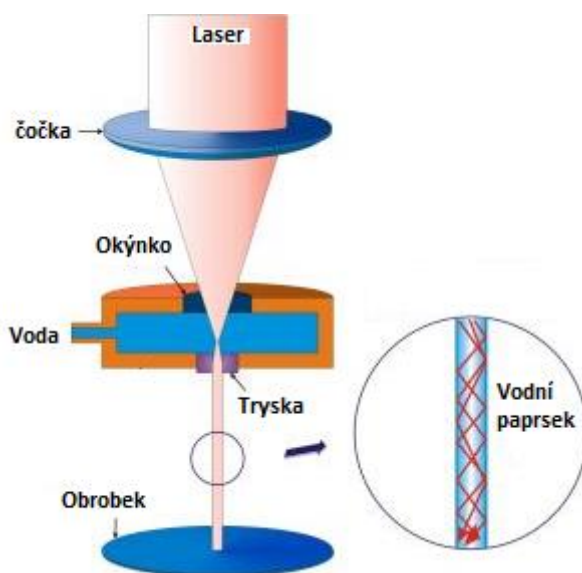
Základním pochopením bylo, že vodní paprsek tenký desítky mikrometrů může vést až stovky wattů laserového záření, schopný řezat několik milimetrů tlustý materiál s velikou precizností. Tato technologie pojmenovaná Laser Microjet byla komercializovaná v roce 1999 firmou Synova ze Švýcarska. Na toto téma existuje spousta podobných metod a nápadů, které jsou popsány v patentech různých firem. Na konci roku 2006 bylo vydáno minimálně 40 patentů.

Typická sestava Laser Microjet systému není nijak složitá (obr. 14). Laserový svazek je fokusován do trysky, zatímco prochází skrz natlakovanou vodní komoru. Proud vody emitovaný ze safírové nebo diamantové trysky vede laserový svazek prostřednictvím totálního odrazu na rozhraní voda/vzduch.

Typickými parametry Laser Microjet systému jsou:

- Laser - Nd:YAG (záření není absorbované ve vodě)
- Kapalina - demineralizovaná voda (jde čistě jen o vedení světla)
- Tlak - 20-500 barů
- Rychlost proudu – až 300 m/s
- Průměr trysky – 20-150 μm

Stabilní délka proudu měřená od otvoru trysky až po pozici, kde se vytvoří první kapka, je závislá na parametrech otvoru a tlaku. Příliš nízké hodnoty tlaku nejsou ideální, stejně tak jako vysoké hodnoty. Rychlost řezání je závislá hlavně na tloušťce materiálu.



Obr. 14: Schéma typického Laser Microjet systému (upraveno z [16])

Tato technologie byla dosud vyvinuta pro precizní obrábění s průměrným laserovým výkonem. Hlavní oblasti aplikace jsou vrtání a drážkování polovodičových destiček, výroba letovacích desek a částí endoskopů (optických přístrojů), řezání tvrdých materiálů (diamant, atd.) a podobně [16].

Hlavní výhody této technologie obrábění v polovodičovém odvětví v porovnání s abrazivními metodami a suchým laserovým obráběním jsou:

- Je široce zabráněno rozptylu škodlivých částic do polovodičových struktur
- Nejsou zanechané žádné nečistoty nebo mikrotrhliny
- Žádné změny na povrchu materiálu z důvodu tepelné ablace
- Vysoká kvalita řezu s konstantní šířkou a rovnoběžnými stěnami
- Řez je efektivně chlazen, ve výsledku se zanedbatelnou tepelně ovlivněnou oblastí
- Mechanické síly vodního proudu na obrobek jsou slabé, nedochází k poškození
- Nižší cena provozu v porovnání s diamantovou pilou, ale vyšší počáteční investice

Drsnost povrchu není nijak vylepšena, avšak ani zhoršena. Omezením této technologie je hlavně řezání vysoce odrazivých materiálů. Chlazení kapalinou způsobí, že se laser nedostane přes počáteční reflexní vrstvu. Tenké fólie například z mědi a zlata řezat lze. Tenká vrstva vysoce odrazivého materiálu na obrobku také nevadí.

Další nevýhodou je pak řezání transparentních popřípadě málo absorbujících materiálů, ze stejné ho důvodu jako při odrazivosti.

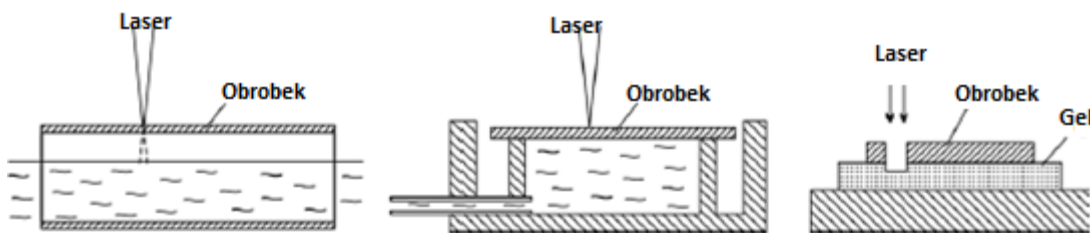
Při vedení svazku nemusí být použita jen voda. Byl vydán patent, kde bylo navrženo požití rozpuštěných solí. Například dusičnan sodný nebo dusičnan draselný. Výhodou rozpuštěných solí oproti vodě je vyšší tepelná kapacita a vyšší obsah kyslíku, který dodává řezání energii.

1.3.4 Obrábění s kapalinou na zadní straně obrobku

Voda na zadní straně obrobku má chladicí účinek, zabránuje adhezi nečistot na zadní a protější stranu obrobku, což může být pro určité aplikace přínosem. Kapalina na zadní straně nestojí v cestě laserovému záření, tudíž mohou být použity CO₂ lasery.

Metod použití je několik (obr. 15). Nejběžnější je způsob, kde je pod obrobkem nádoba s vodou, která zachytává nečistoty. V případě vrtání otvorů do trubek, lze nalít vodu přímo dovnitř a je dosaženo stejného výsledku. O něco lepší je metoda, kde je použit uzavřený systém naplněný vodou tak, že zadní strana obrobku je s ní v kontaktu. To zabránuje usazování nečistot na obrobek a způsobuje chlazení. Zajímavou metodou je použití gelu obsahující vodu, na který lze obrobek přímo položit, což vše zjednoduší.

Tato technika je aplikovaná například při výrobě malých vstřikovacích trysek do palivových motorů, kde je zapotřebí vyvrtat precizní malé otvory [1].



Obr. 15: Možné metody obrábění ze zadní strany (upraveno z [1])

1.3.5 Obrábění materiálů obsahujících kapalinu

Porózní hydrofilní anorganické i organické materiály obsahují za normálních podmínek určité množství vody, která ovlivňuje obráběcí proces. Jestliže je laserové záření absorbované hlavně ve vodě (př. CO₂ laser), materiál se rozkládá a odstraňuje hlavně z důvodu tlaku vodních par a tepelné zátěže materiálu zůstává malý. Tedy může být zabráněno změnám vlastností materiálu [2].

Jedna z aplikací je vrtání horniny nebo různých stavebních materiálů jako beton a podobně. Hornina, v závislosti na porositě, může obsahovat značné množství vody. Po desetiletí zde byl zájem o vrtání ložisek plynu za použití laseru. Ložiska jsou tři kilometry hluboko a výměna vrtacích částí zabere mnoho času. Použitím laseru může být ložisko o hloubce 3 km vyvrtáno za 10 dní namísto 100 dní za použití konvenčních metod [1].

Předběžné studie ohledně perspektivního užití laserů pro vrtání ložisek začaly v roce 1995 a v roce 1997 se uskutečnil první experiment. V roce 1999 se začalo na této metodě intenzivně pracovat a první komerční produkty se očekávaly kolem roku 2012.

Biologické materiály jako dřevo, papír, jídlo a podobně obsahují také značné množství vody. Existuje spousta aplikací použití laserů například v potravinářském průmyslu a podobně.

1.4 Výroba a modifikace částic

1.4.1 Výroba částic

Vytváření malých částic laserovou ablací obrobku v kapalině je nevyhnutelný jev. Když je těleso odpařováno, pára má tendenci kondenzovat na malé částice. Jestliže je ablace uskutečněna v kapalině, částice v ní zůstanou jako suspenze (obr. 16).

Částice o velikosti 2 nm až 1000 nm se za normálních podmínek neusadí a říká se jim koloidní. Vodní koloidy jsou nazývány hydrosoly.

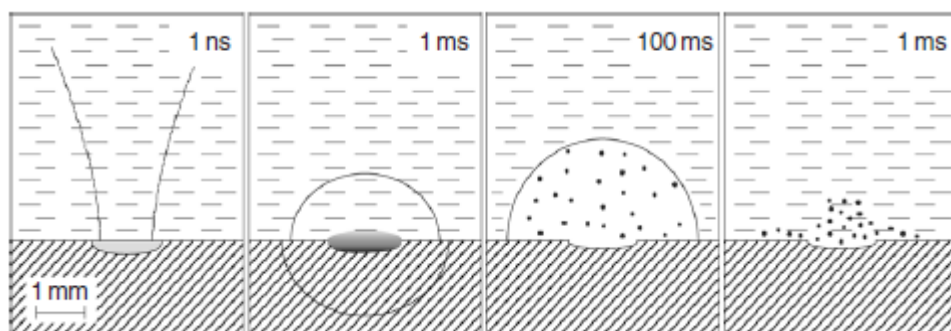
V posledních letech se laserovou ablací takto běžně vyrábí částice různých velikostí a materiálů a samozřejmě vzrostl celkový zájem o výrobu nanočástic.

V porovnání s ostatními metodami výroby nanočástic má laserová ablace v kapalině značné výhody. Například není problém se sbíráním částic, ve srovnání s výrobou v plynu. Laserová ablace přináší také čistší částice, protože do procesu nejsou zapojeny žádné další látky, jen kapalina a obrobek. V chemických metodách je zapotřebí stabilizátor, který už může modifikovat povrch částic. Hlavní nevýhodou této metody je zase malá produktivita a cena vybavení.

Donedávna bylo ve výrobě nanočástic používáno okolo dvaceti druhů kapalin, od organických sloučenin, vodu až po kapalně helium a podobně. Různá aditiva jsou přidávána hlavně za účelem řízení velikosti částic.

V úvahu se musí brát také stabilita částic. Koloidy se mohou hromadit srážkami mezi sebou. V elektrolytických roztocích částice nesou elektrický náboj úměrný jejich potenciálu, který brání jejich vzájemnému přiblížení. Koloidy jsou považovány za nestabilní, pokud jejich potenciál leží mezi -30 mV až 30 mV. V ostatních případech jsou stabilní. Například stříbrné koloidy o velikosti menší než 50 nm jsou nestabilní v čisté vodě. Velké částice se zase mohou usazovat z důvodu gravitace.

Technika výroby může být různá. Jednoduchý princip je možné vylepšit například otáčením substrátu a podobně.



Obr. 16: Princip laserové výroby částic (převzato z [1])

Koloidy z ušlechtilých kovů jsou užitečné ve fotografování, optoelektronice, katalýze, značení proteinů a podobně. Nedávno byl vydán přehled aplikací ohledně fotofyzikálních a fotochemických vlastností kovových částic. U kovových částic musíme počítat, že při ablaci v kapalině obsahující kyslík může docházet k oxidaci částic.

Anorganické částice jsou vhodné pro katalýzu a senzory, z důvodu jejich velké plochy. Mohou být užitečné také jako luminofory, polovodičové kvantové tečky a jako tvrdé a vysoce tepelně vodivé materiály.

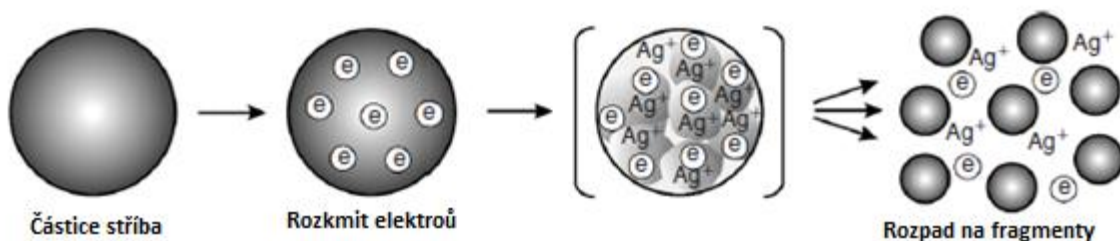
V mnoha aplikacích je důležité, aby částice byly stejné velikosti. Běžně platí závislost teploty tavení pevných částic na jejich velikosti tak, že teplota tavení klesá s klesáním jejich velikosti. Dalším mechanismem je rozpustnost, která je větší u menších částic. S rostoucím časem tak nastává přeměna suspenze s malými částicemi na velké. Tomuto jevu se říká Ostwaldovo zrání. Řízení velikosti částic je možné i pomocí přenosu tepla. Malé částice se ochlazují rychleji než ty větší. Bylo zjištěno, že pro danou hustotu energie existuje kritická velikost částice, jejíž teplota nedosáhne teploty tavení, během jednoho laserového pulzu. Toho se využívá k modifikaci částic, konkrétně k zmenšování velikosti nebo snížení jejich distribuce.

Jinou možností účinné kontroly velikosti částic jsou surfaktanty (povrchově aktivní látky). Po laserové ablaci je okamžitě vytvořen hustý mrak kovových atomů. Protože meziatomární síly jsou silnější než síly mezi kovovými atomy a molekuly surfaktantu nebo rozpouštědla, začnou se kovové atomy rapidně hromadit tak moc, jak se mezi sebou potkají. Tento rapidní růst je ukončen, až jsou všechny kovové atomy v blízkém okolí zkonsumovány. Nicméně zásoba kovových atomů mimo oblast nahromadění způsobí pomalý růst částic, kterého využíváme [1].

1.4.2 Modifikace částic

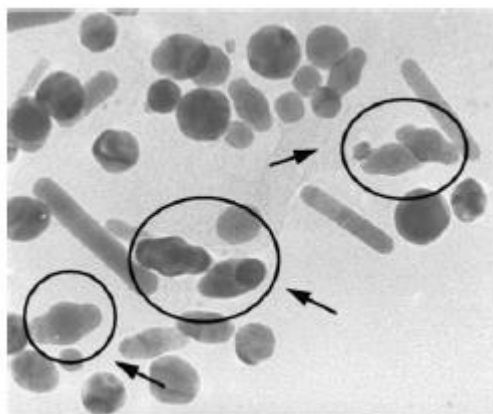
Často je potřeba přeměnit velké částice na malé. Částice vystavené záření mohou ztratit svoji hmotu prostřednictvím vypařování a fotorozkladu.

V případě ultrakrátkých pulzů se mohou částice rozpadat na menší fragmenty. Kratší pulzy ohřejí částici v nižší energii pulzu, protože ztracená energie kvůli přenosu tepla z částice do kapaliny je menší. Vzhledem k malé hmotnosti elektronů, snadněji získají energii z laserového záření než ionty a mohou být vyraženy z částice. Jestliže opustí částici výrazné množství elektronů, může explodovat z důvodu odpuzivých sil mezi pozitivními ionty. Tento jev se nazývá Colom explosion (obr. 17).



Obr. 17: Princip jevu Coulomb explosion (upraveno z [1])

Možné je také měnit tvar a strukturu částic. Například zahříváním částic tvaru tyčinek se přetvářejí do sférického tvaru (obr. 18). Minimalizuje se takto jejich povrchová energie. Změny začnou ve středu tyčinky, kde je menší chlazení a tedy vyšší teplota. Tvarová modifikace po vystavení záření může nastat v nějakých případech i bez tavení.



Obr. 18: Snímek z mikroskopu TEM zobrazující přeměnu tyčinkových částic na sférické (převzato z [1])

Ozářené částice se také mohou mezi sebou spojovat. Lze tak vyrobit částici z více materiálů. Byl proveden pokus, kde byly smíchány koloidy zlata a stříbra. Laserovým ozářením se částice spojily a vytvořily tak novou částici. Spojovat se mohou i částice stejného druhu a lze tak opět regulovat jejich velikost [1].

1.5 Modifikace povrchu (Surface Modification)

Laserové záření může modifikovat povrch látek například tavením nebo vyvoláním chemické reakce mezi látkou a okolím [2]. Proces v kapalině má dva hlavní rozdíly v porovnání s plynem a vakuem. Chlazení laserem roztavené zóny je rychlejší, což může vytvořit metastabilní fázi a hustota chemických druhů (kyslík, dusík, atd.) je větší než v plynu, tedy reakce jsou více efektivní.

Velká část výzkumu je věnována modifikaci křemíkových destiček. Po ozáření monokrystalického křemíku pod vodou byla získána perfektní epitaxe bez změn v morfologii povrchu nebo oxidace. Rychlost rekrytalizace byla přes 7 m/s [1].

Organické materiály jako fluorouhlíkové polymery mají výbornou chemickou a tepelnou stabilitu, malou smáčivost, nízkou vodivost a podobně. Tyto vlastnosti je dělají užitečné v mnoha aplikacích. Na druhou stranu vysoká chemická stabilita brání jejich spojení s ostatními materiály, což je potřebné například k výrobě elektronických desek. Adheze a biokompatibilita těchto materiálů může být zlepšena právě laserovým ozářením ve vodě nebo vodních roztocích.

1.5.1 Depozice tenkého filmu

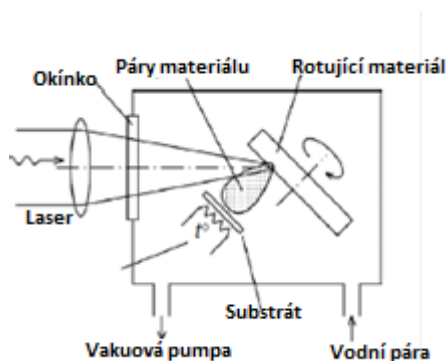
Laserová ablační depozice ve vodní páře

Jedna z metod je laserová ablační depozice ve vodní páře. Byla vynalezena pro fabrikaci biokompatibilní hydroxylapatitové (HA) vrstvy na implantátech a pro výrobu TiO_2 pasivního filmu na křemíkové solární struktury [1].

Fokusem pulzu laseru ozáří cíl a způsobí explosivní odpaření materiálu. Ejektovaný materiál kondenzuje na substrátu umístěného o několik centimetrů dál. Většinou se používají excimerové lasery z důvodu krátkých pulzů a vysoké absorpce. Vše probíhá ve vodní páře za určitého tlaku (obr. 19).

HA je materiál používaný pro biologicky kompatibilní povlaky kovových substrátů, implantátů a protéz pro stomatologii, ortopedii a neurochirurgii. Je to nejstabilnější materiál v kontaktu s tělními tekutinami. Vrstva může být vytvořena rozprašováním, plasmovým nástřikem, elektroforézou, elektrolýzou, depozicí iontového svazku, slinutím prášku a podobně. Běžně se používá plasmový nástřik, ale trpí porozitou ve vrstvě. Laserová ablační depozice ve vodní páře se používá hlavně pro zachování vysoké kvality povlaku.

Co se týče jiných materiálů, pouze TiO_2 vrstva pro solární články je vyráběna stejnou metodou. Bylo zjištěno, že tlak vodní páry kolem 0,55 mbar zajistí nejlepší pasivní film.



Obr. 19: Schéma Laserové depozice ve vodní páře (upraveno z [1])

Laserová ablační depozice užitím kapalného cíle

Pulzní laserová ablace je metoda pro výrobu vysoce čistých tenkých filmů s minimální odchylkou od původního materiálu. Je také používána pro depozici vícevrstvých filmů záměnou materiálů. Nevýhodou této metody je zničení cíle. V ozařovaném materiálu se vytváří díry, praskliny a je konzumován nepravidelně. Navíc v depozitním filmu se vyskytují částice vytvořené z vystříknutých kapek roztaveného materiálu.

Oba tyto problémy lze vyřešit použitím kapalného cíle. Laserový svazek vždy konzumuje jen hladký povrch a stačí jen dolívat materiál. Navíc cíl nemusí rotovat. Stříkání lze omezit použitím viskózních kapalin. Použití je například pro výrobu GaAl filmů a podobně [1].

Laserová ablační depozice užitím zmrzlého cíle

Jestliže je potřeba vytvořit film obsahující například dusík, laserová ablace je běžně prováděná v prostředí dusíkatých plynů. Nicméně z důvodu nízké hustoty atomů dusíku v plynu nemusí depoziční vrstva obsahovat dostatečné množství. Použití zmrzlého dusíku jako cíle, tento problém vyřeší. Pro depozici uhlíkové vrstvy poslouží například zmrazený metan nebo acetylén. Podobně může být využito i zmrzlých roztoků pro depozici biomateriálů a podobně [1].

Depozice LIFT (Laser Induced Forward Transfer)

LIFT technologie je alternativa k předchozí metodě pro výrobu filmů z biomateriálů. Tato metoda umožňuje výrobu tenkých filmů dokonce se vzorem. Princip je takový, že cíl je tenká vrstva roztoku nanesená na transparentní materiál, která je skrz něj ozařována. Tepelná expanze žene vrstvu na substrát, který je naproti. Roztok může taky přispívat k minimalizaci poškození rozpuštěné látky v kapalně nebo jako fixační médium [1].

1.5.2 Laserové svařování a plátování pod vodou

Svařování a plátování v kontaktu s kapalinou nepřináší žádné zásadní výhody. Někdy je však potřeba tuto metodu použít z důvodu oprav podvodních konstrukcí (plovoucí struktury, nukleární reaktory a podobně).

Laserové podvodní svařování je běžně prováděno užitím lokální suché zóny, ale z principu může být uskutečněno i bez ní.

Ve svařování vzroste teplota až na 10 000 °C, což způsobí termální rozklad vody. Je zjištěno, že plynové bubliny obsahují až 80 % vodíku, který se snadno rozpouští v tavenině a způsobuje tak křehkost svaru. K zabránění vstupu vody do pracovní zóny jsou proto vyvinuty speciální svařovací hlavy.

2 Experimentální část

Na pulzním Nd:YAG laseru LASAG KLS 246-102 byly provedeny experimenty rýhování křemíku a vrtání oceli. Výsledky byly vyhodnoceny kontaktním profilometrem Talysurf Series 2 v případě rýhování a konfokálním mikroskopem Olympus OLS-LEXT-3100 v případě vrtání. Pohyby polohovacího stolu v ose X a Y byly řízeny programem SW Turbostep, parametry laseru byly voleny v ovládacím programu LASAG.

2.1 Rýhování křemíkových plátek

Experiment rýhování křemíku byl pro porovnání proveden jak s kapalinou, tak na vzduchu. Jako kapalina byla zvolena demineralizovaná voda. Byla provedena řada pokusů s proměnnými parametry. Pro lepší výsledky byly jednotlivé vzorky sadou čtyř rýh při stejných parametrech.

2.1.1 Materiál

Křemík je nejčistší průmyslově vyráběný materiál. Jeho použití spočívá zejména ve výrobě polovodičových součástek. Jako základní materiál se používá destička z vysoce čistého monokrystalického křemíku. Pro výrobu těchto destiček je zapotřebí špičkové technologie [13].

Laserové obrábění křemíkových destiček má velký význam. Například použití laserové technologie při výrobě solárních článků vede ke zvýšení účinnosti a celkově snižuje časovou náročnost technologických procesů. Využití je především u texturizace povrchu, řezání, vrtání, rýhování a podobně [15].

2.1.2 Uspořádání a průběh experimentu

Pro přípravu vzorků byly použity plátky z polykrystalického křemíku tloušťky 0,2 mm. Plátky byly připevněné lepicí páskou na plastové rámy o tloušťce 2 mm a tedy i tloušťka kapaliny nanesená do rámu byla přibližně 2 mm (obr. 20 a 21).



Obr. 20: Průběh pokusu rýhování



Obr. 21: Fotografie vzorků křemíku

Obrázky byly pořízeny mobilním telefonem Nokia Lumia 620.

Experiment byl proveden pomocí pulzního pevnolátkového Nd:YAG laseru KLS 246-102. Laserový systém je opatřen polohovacím stolem a umožňuje nastavení širokého rozmezí parametrů s maximálním průměrným výkonem 150 W. Aktivním prostředím je krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný ionty neodymu. Vlnová délka je tedy

1064 nm. Délku optického rezonátoru složeného ze dvou paralelních zrcadel lze měnit od 190 mm do 390 mm a tím i kvalitu svazku, kterou popisuje veličina BPP (beam parameter product). Délku pulzu lze nastavit od 0,1 ms až do 20 ms [8].

Vyhodnocování výsledků bylo provedeno na kontaktním profilometru Talysurf Series 2, kterým byla měřena šířka a hloubka rýhy. Profilometr je vybaven kontaktním hrotem s diamantovou kuličkou pro co nejpřesnější výsledky. V každém vzorku byl měřen profil povrchu v úseku 3 x 4 mm přibližně uprostřed rýh.

První pokus rýhování spočíval ve zvyšování energie laserového svazku. Bylo provedeno deset měření na vzduchu a deset s vrstvou kapaliny na povrchu plátku, při zachování stejných parametrů. Rýhování na vzduchu bylo provedeno bez asistenčního plynu pro přesnější srovnání s kapalinou, kde plyn nebylo možné použít.

Průměr svazku v ohnisku $D_{foc} = 0,16$ mm. Délka pulzu $t = 0,15$ ms. Frekvence $f = 250$ Hz.

Označení vzorku	Napětí zdroje [V]	Energie pulzu [mJ]	Vrcholový výkon [W]	Průměrný výkon [W]	Hustota energie [$J \cdot cm^{-2}$]	Hustota výkonu [$W \cdot cm^{-2}$]
Si_E1_01	195	21	140	5,25	1,04E+02	6,97E+05
Si_E1_02	190	16	107	4	7,96E+01	5,31E+05
Si_E1_03	185	12	80	3	5,97E+01	3,98E+05
Si_E1_04	180	9	60	2,25	4,48E+01	2,99E+05
Si_E1_05	175	6	40	1,5	2,99E+01	1,99E+05
Si_E1_06	170	3	20	0,75	1,49E+01	9,95E+04
Si_E1_07	198	24	160	6	1,19E+02	7,96E+05
Si_E1_08	200	26	173	6,5	1,29E+02	8,63E+05
Si_E1_09	203	30	200	7,5	1,49E+02	9,95E+05
Si_E1_10	206	33	220	8,25	1,64E+02	1,09E+06

Tabulka 1: Přehled parametrů pro pokus č. 1 na vzduchu (Si)

Průměr svazku v ohnisku $D_{foc} = 0,32$ mm. Délka pulzu $t = 0,15$ ms. Frekvence $f = 250$ Hz.

Označení vzorku	Napětí zdroje [V]	Energie pulzu [mJ]	Vrcholový výkon [W]	Průměrný výkon [W]	Hustota energie [$J \cdot cm^{-2}$]	Hustota výkonu [$W \cdot cm^{-2}$]
WSi_E1_01	195	21	140	5,25	2,61E+01	1,74E+05
WSi_E1_02	190	16	107	4	1,99E+01	1,33E+05
WSi_E1_03	185	12	80	3	1,49E+01	9,95E+04
WSi_E1_04	180	9	60	2,25	1,12E+01	7,46E+04
WSi_E1_05	175	6	40	1,5	7,46E+00	4,98E+04
WSi_E1_06	170	3	20	0,75	3,73E+00	2,49E+04
WSi_E1_07	198	24	160	6	2,99E+01	1,99E+05
WSi_E1_08	200	26	173	6,5	3,23E+01	2,16E+05
WSi_E1_09	203	30	200	7,5	3,73E+01	2,49E+05
WSi_E1_10	206	33	220	8,25	4,11E+01	2,74E+05

Tabulka 2: Přehled parametrů pro pokus č. 1 s kapalinou (Si)

Jak bude později prezentováno, na základě výsledku prvního pokusu bylo zjištěno, že v důsledku přítomnosti kapaliny se prodloužila optická dráha. Bylo tedy nutné najít správnou polohu ohniska, jako druhý pokus. Bylo provedeno patnáct měření, přičemž při každém z nich byla fokusační čočka v pracovní hlavě zvednuta o 0,1 mm.

Délka pulzu $t = 0,15$ ms. Frekvence $f = 250$ Hz. Napětí zdroje $U = 210$ V. Energie pulzu $E = 36$ mJ.

Označení vzorku	Průměr svazku v ohnisku [mm]	Posun ohniska + [mm]	Vrcholový výkon [W]	Průměrný výkon [W]	Hustota energie [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Hustota výkonu [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]
WSi_F2_01	0,31	0,1	240	9	4,77E+01	3,18E+05
WSi_F2_02	0,29	0,2	240	9	5,45E+01	3,64E+05
WSi_F2_03	0,28	0,3	240	9	5,85E+01	3,90E+05
WSi_F2_04	0,26	0,4	240	9	6,78E+01	4,52E+05
WSi_F2_05	0,24	0,5	240	9	7,96E+01	5,31E+05
WSi_F2_06	0,22	0,6	240	9	9,48E+01	6,32E+05
WSi_F2_07	0,21	0,7	240	9	1,04E+02	6,93E+05
WSi_F2_08	0,20	0,8	240	9	1,15E+02	7,64E+05
WSi_F2_09	0,18	0,9	240	9	1,42E+02	9,44E+05
WSi_F2_10	0,17	1	240	9	1,59E+02	1,06E+06
WSi_F2_11	0,17	1,1	240	9	1,59E+02	1,06E+06
WSi_F2_12	0,16	1,2	240	9	1,79E+02	1,19E+06
WSi_F2_13	0,17	1,3	240	9	1,59E+02	1,06E+06
WSi_F2_14	0,17	1,4	240	9	1,59E+02	1,06E+06
WSi_F2_15	0,18	1,5	240	9	1,42E+02	9,44E+05

Tabulka 3: Přehled parametrů pro pokus č. 2 s kapalinou (Si)

Třetí pokus byl stejný jako první, avšak při rýhování s vrstvou kapaliny byla poloha ohniska přizpůsobena podle výsledků z druhého pokusu. Bylo tedy možné provést konečné srovnání rýhování s kapalinou a na vzduchu. Poloha ohniska byla zvednuta o 1,3 mm.

Průměr svazku v ohnisku $D_{\text{foc}} = 0,16$ mm. Délka pulzu $t = 0,15$ ms. Frekvence $f = 250$ Hz.

Označení vzorku	Napětí zdroje [V]	Energie pulzu [mJ]	Vrcholový výkon [W]	Průměrný výkon [W]	Hustota energie [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Hustota výkonu [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]
Si_E3_01	210	36	240	9	1,79E+02	1,19E+06
Si_E3_02	212	39	260	9,75	1,94E+02	1,29E+06
Si_E3_03	216	43	287	10,75	2,14E+02	1,43E+06
Si_E3_04	219	47	313	11,75	2,34E+02	1,56E+06
Si_E3_05	221	53	353	13,25	2,64E+02	1,76E+06
Si_E3_06	225	58	387	14,5	2,89E+02	1,92E+06
Si_E3_07	230	67	447	16,75	3,33E+02	2,22E+06
Si_E3_08	235	77	513	19,25	3,83E+02	2,55E+06
Si_E3_09	240	84	560	21	4,18E+02	2,79E+06
Si_E3_10	245	93	620	23,25	4,63E+02	3,09E+06
Si_E3_11	250	104	693	26	5,18E+02	3,45E+06
Si_E3_12	255	116	773	29	5,77E+02	3,85E+06
Si_E3_13	260	130	867	32,5	6,47E+02	4,31E+06
Si_E3_14	265	143	953	35,75	7,12E+02	4,74E+06
Si_E3_15	270	157	1047	39,25	7,81E+02	5,21E+06
Si_E3_16	275	172	1147	43	8,56E+02	5,71E+06

Tabulka 4: Přehled parametrů pro pokus č. 3 na vzduchu (Si)

Průměr svazku v ohnisku $D_{\text{foc}} = 0,16$ mm. Délka pulzu $t = 0,15$ ms. Frekvence $f = 250$ Hz.

Označení vzorku	Napětí zdroje [V]	Energie pulzu [mJ]	Vrcholový výkon [W]	Průměrný výkon [W]	Hustota energie [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Hustota výkonu [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]
WSi_E3_01	210	36	240	9	1,79E+02	1,19E+06
WSi_E3_02	220	52	347	13	2,59E+02	1,73E+06
WSi_E3_03	230	72	480	18	3,58E+02	2,39E+06
WSi_E3_04	240	89	593	22,25	4,43E+02	2,95E+06
WSi_E3_05	245	99	660	24,75	4,93E+02	3,28E+06
WSi_E3_06	250	109	727	27,25	5,42E+02	3,62E+06
WSi_E3_07	255	121	807	30,25	6,02E+02	4,01E+06
WSi_E3_08	260	134	893	33,5	6,67E+02	4,45E+06
WSi_E3_09	270	163	1087	40,75	8,11E+02	5,41E+06
WSi_E3_10	275	180	1200	45	8,96E+02	5,97E+06
WSi_E3_11	290	204	1360	40,8	1,02E+03	6,77E+06

Tabulka 5: Přehled parametrů pro pokus č. 3 s kapalinou (Si)

Počet měření na vzduchu a s kapalinou bylo u třetího pokusu rozdílné, neboť se předpokládalo, že u rýhování na vzduchu dojde dříve k prasknutí křemíkového plátku, což bylo také potvrzeno. Energie se tedy zvyšovala pozvolněji.

2.1.3 Výsledky

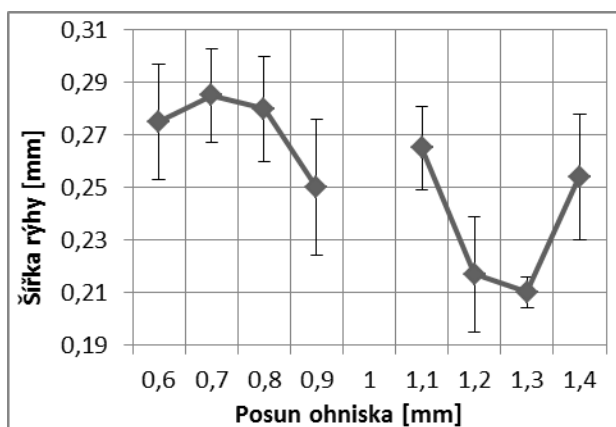
První pokus spočíval v porovnání dat z rýhování na vzduchu a s kapalinou. Nebylo však možné získat potřebná data, neboť bylo opomenuto, že v důsledku kapalin se prodlouží optická dráha a dojde tak k posunu ohniska pod povrch materiálu. Průměr ohniska se zvětšil na $D_{\text{foc}} = 0,32$ mm, což byl dvojnásobek hodnoty než u rýhování na vzduchu. Rýhy tedy nebyly znatelné a měřitelné. Porovnáme-li hodnoty v obou tabulkách, lze si všimnout nižší hustoty energie a výkonu u rýhování s kapalinou.

V druhém pokusu bylo tedy nutné najít správnou polohu ohniska pro další experimenty, které s touto nutnou korekcí již budou počítat. Bylo nutné zjistit polohu ohniska experimentálně, neboť výšku kapaliny nebylo možné určit přesně. Odhadem se shodovala s tloušťkou rámu 2 mm, přičemž by teoretická hodnota posunu ohniska činila 0,66 mm [7]. Nejlepší rýhy bylo dosaženo u posunu ohniska o 1,3 mm, což také bylo pozorovatelné už při procesu. Tedy tloušťka kapaliny byla ve skutečnosti větší, srovná-li se teoretická hodnota naměřenou. Výsledky získané na kontaktním profilometru Talysurf Series 2 se shodovaly s předpokladem.

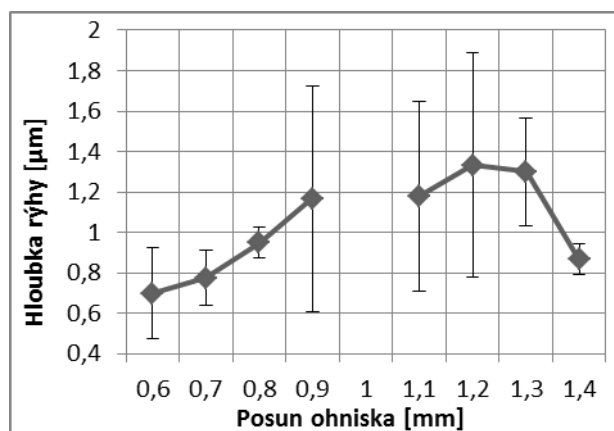
Označení vzorku	Posun ohniska + [mm]	Šířka rýhy [mm]	Hloubka rýhy [μm]
WSi_F2_06	0,6	$0,275 \pm 0,022$	$0,700 \pm 0,225$
WSi_F2_07	0,7	$0,285 \pm 0,018$	$0,775 \pm 0,138$
WSi_F2_08	0,8	$0,280 \pm 0,020$	$0,950 \pm 0,075$
WSi_F2_09	0,9	$0,250 \pm 0,026$	$1,167 \pm 0,556$
WSi_F2_10	1	-	-
WSi_F2_11	1,1	$0,265 \pm 0,016$	$1,180 \pm 0,470$
WSi_F2_12	1,2	$0,217 \pm 0,022$	$1,333 \pm 0,556$
WSi_F2_13	1,3	$0,210 \pm 0,006$	$1,300 \pm 0,267$
WSi_F2_14	1,4	$0,254 \pm 0,024$	$0,865 \pm 0,076$
WSi_F2_15	1,5	-	-

Tabulka 6: Výsledky z profilometru pro pokus č. 2 s kapalinou (Si)

V tabulce 6 chybí hodnoty pro posun ohniska o 1 mm a 1,5 mm, neboť profilometr nebyl schopen tyto data zaznamenat, což bylo nejspíš způsobeno náhodnou chybou. Stejně tak pro vzorky WSi_F2_01 až WSi_F2_05 nebylo možné získat data z důvodu nízké hustoty energie, proto se začínalo od šestého vzorku.



Graf 1: Závislost posunu ohniska na šířce rýhy vytvořené s kapalinou (pokus č. 2)



Graf 2: Závislost posunu ohniska na hloubce rýhy vytvořené s kapalinou (pokus č. 2)

Z grafu 1 lze vyčíst, že šířka rýhy je nejmenší kolem hodnoty 1,3 mm, což odpovídalo předpokladům. Stejně tak hloubka je největší kolem hodnoty 1,2 mm (graf 2). Tedy pro další experimenty s kapalinou bude poloha ohniska zvednuta o 1,3 mm. Tato korekce bude využita také u vrtání oceli.

Třetí pokus byl analogií prvního, avšak s potřebnou úpravou polohy ohniska.

Označení vzorku	Energie pulzu [mJ]	Šířka rýhy [mm]	Hloubka rýhy [μm]
Si_E3_05	53	0,210 ± 0,009	2,375 ± 0,625
Si_E3_06	58	0,225 ± 0,015	2,250 ± 0,375
Si_E3_07	67	0,238 ± 0,018	2,536 ± 0,250
Si_E3_08	77	0,243 ± 0,008	2,040 ± 0,640
Si_E3_09	84	0,258 ± 0,028	1,375 ± 0,625
Si_E3_10	93	0,286 ± 0,012	0,625 ± 0,188
Si_E3_11	104	0,343 ± 0,013	0,634 ± 0,375
Si_E3_12	116	0,325 ± 0,025	0,750 ± 0,525
Si_E3_13	130	0,328 ± 0,016	0,556 ± 0,415
Si_E3_14	143	0,334 ± 0,011	0,598 ± 0,476
Si_E3_15	157	0,335 ± 0,017	0,950 ± 0,340

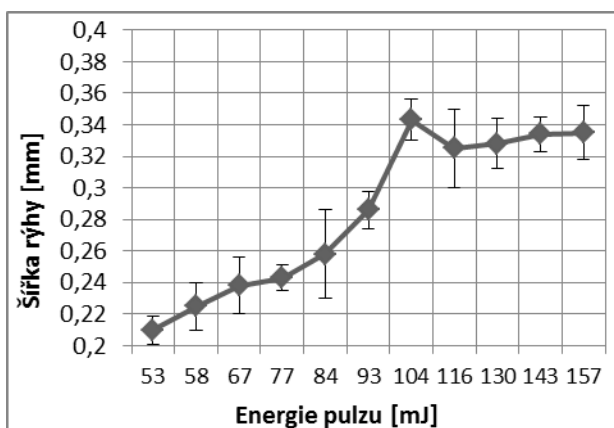
Tabulka 7: Výsledky z profilometru pro pokus č. 3 na vzduchu (Si)

Hodnoty z profilometru byly zaznamenávány až od pátého vzorku, neboť při rýhování bylo zaznamenáno na pozorovací kameře znečištění ochranného sklíčka v pracovní hlavě laseru, které setrvalo do páté hodnoty energie pulzu. Poslední vzorek Si_E3_16 nebyl zaznamenán taktéž, protože došlo k prasknutí křemíkového plátku, což bylo očekáváno.

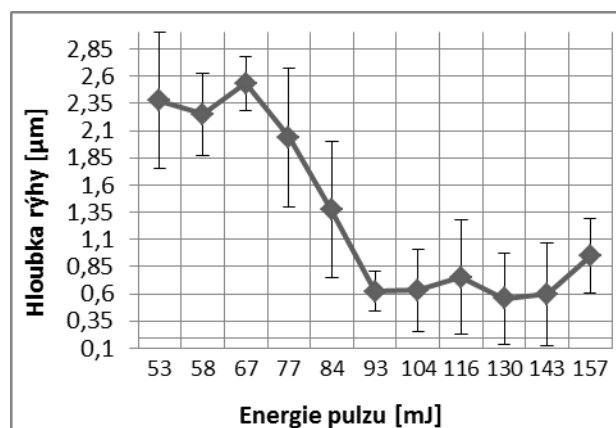
Označení vzorku	Energie pulzu [mJ]	Šířka rýhy [mm]	Hloubka rýhy [μm]
WSi_E3_01	36	$0,256 \pm 0,044$	$2,526 \pm 0,625$
WSi_E3_02	52	$0,270 \pm 0,015$	$2,725 \pm 0,363$
WSi_E3_03	72	$0,318 \pm 0,016$	$3,750 \pm 0,746$
WSi_E3_04	89	$0,358 \pm 0,016$	$3,834 \pm 1,112$
WSi_E3_05	99	$0,363 \pm 0,032$	$6,748 \pm 1,050$
WSi_E3_06	109	$0,388 \pm 0,006$	$5,134 \pm 0,836$
WSi_E3_07	121	$0,390 \pm 0,020$	$6,625 \pm 0,938$
WSi_E3_08	134	$0,445 \pm 0,038$	$6,318 \pm 1,200$
WSi_E3_09	163	$0,498 \pm 0,013$	$6,334 \pm 2,024$
WSi_E3_10	180	$0,478 \pm 0,022$	$7,667 \pm 2,889$
WSi_E3_11	204	$0,493 \pm 0,008$	$8,657 \pm 2,445$

Tabulka 8: Výsledky z profilometru pro pokus č. 3 s kapalinou (Si)

U posledního vzorku WSi_E3_11 byla nastavena energie pulzu mnohonásobně vyšší než u rýhování na vzduchu. Křemíkový plátek však nepraskl z důvodu přítomnosti vrstvičky vody.

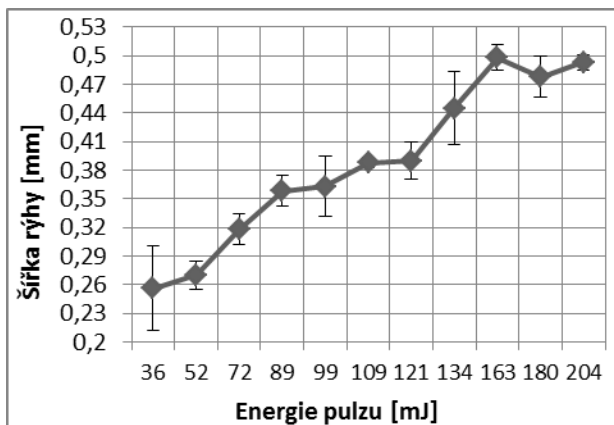


Graf 3: Závislost energie pulzu na šířce rýhy vytvořené na vzduchu (pokus č. 3)

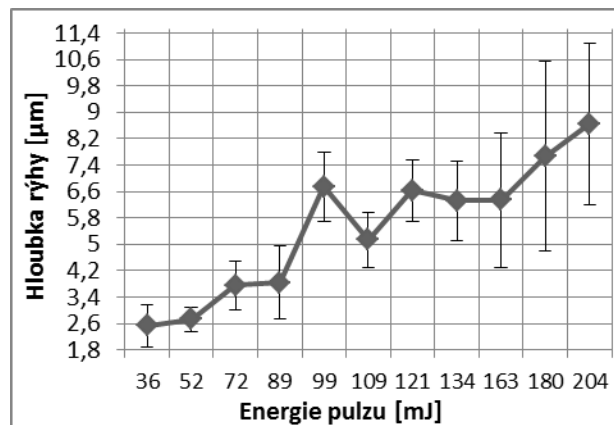


Graf 4: Závislost energie pulzu na hloubce rýhy vytvořené na vzduchu (pokus č. 3)

V grafu 3 si lze všimnout, že šířka rýhy roste až do určité hodnoty, kterou nadále nepřekračuje. To je způsobeno tím, že i přes zvyšování energie průměr svazku v ohnisku zůstává neměnný. U hloubky rýhy byl průběh opačný (graf 4). Se zvyšující se energií hloubka rýhy klesala z důvodu absence asistenčního plynu působícího na taveninu, jehož jedna z funkcí je vyfukování materiálu. Natavený křemík proto vytvářel výstupky místo rýh, které se s rostoucí energií zvětšovaly.



Graf 5: Závislost energie pulzu na šířce rýhy vytvořené s kapalinou (pokus č. 3)



Graf 6: Závislost energie pulzu na hloubce rýhy vytvořené s kapalinou (pokus č. 3)

V grafu 5 je vidět podobný průběh u šířky rýhy, která narostla o něco víc než u rýhování na vzduchu. To bylo nejspíš způsobeno nepatrným posunem polohy ohniska v kapalině. I přestože byla poloha nastavena podle předchozích poznatků, výška kapaliny se mohla pro jednotlivé pokusy měnit z důvodu výměny vzorků. V grafu 6 má hloubka rýhy rostoucí průběh, přestože z důvodu kapaliny nebyl použit asistenční plyn. Rýhy tedy vznikaly pomocí tlaku generovaných rázových vln, které jsou v kapalině mnohonásobně vyšší. Tato skutečnost poukazuje na možnou náhradu kapaliny za asistenční plyn jako levnější způsob obrábění. Rýhování v kapalině navíc umožňuje použít větší energie než na vzduchu, kdy při energii pulzu 172 mJ došlo k prasknutí vzorku. U kapaliny byla energie nastavena na 204 mJ jako maximální hodnota, přesto k prasknutí nedošlo.

2.2 Vrtání oceli

Experiment vrtání oceli byl opět proveden jak s kapalinou, tak na vzduchu pro lepší srovnání. Pro pokusy s kapalinou byla zvolena demineralizovaná voda, jakožto plně dostačující. Byly provedeny dva pokusy s proměnnými parametry.

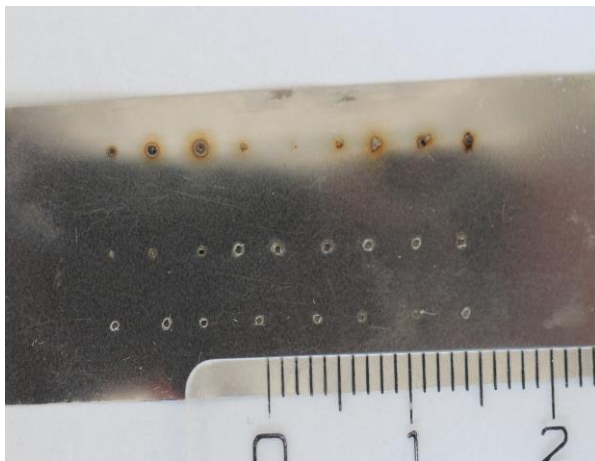
2.2.1 Materiál

Laserové obrábění oceli je jedna z nejběžnějších průmyslových činností. Interakce laserového záření s ocelí lze využít zejména v řezání, vrtání, kalení, svařování a podobně. Laserové obrábění je běžně využíváno jak v mikroskopickém měřítku, tak i u běžných vysokoenergetických procesů.

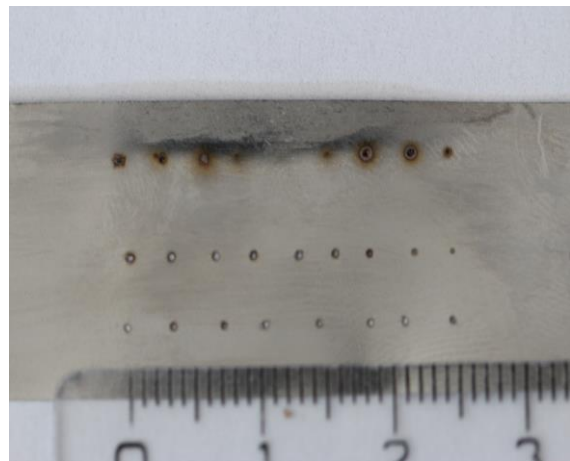
Materiálem byla zvolena ocel číslo 1.4310. Tato ocel má dobrou odolnost proti korozi díky obsahu chromu a niklu. Její předností je vynikající pevnost v tahu, které dosahuje válcováním za studena. Díky tomu je vhodná pro podkladové planžety, nerezové pružiny a části s vyšší pevností [17].

2.2.2 Uspořádání a průběh experimentu

Pro přípravu vzorků byl použit ocelový plíšek tloušťky 0,05 mm (obr. 22 a 23). Ocelový plíšek byl připevněn stejným způsobem jako křemíkové plátky. Tudíž tloušťka kapaliny byla opět kolem hodnoty 2 mm.



Obr. 22: Fotografie vzorků oceli zepředu



Obr. 23: Fotografie vzorků oceli zezadu

Obrázky byly pořízeny fotoaparátem Canon EOS-600D

Experiment byl proveden na stejném laserovém systému KLS 246-102. Vyhodnocování výsledků probíhalo na konfokálním mikroskopu Olympus OLS-LEXT-3100. Konfokální mikroskop je druh optického mikroskopu, jehož hlavní výhodou je vysoká rozlišovací schopnost z důvodu detekce světla pouze z ohniskové roviny mikroskopu. Tento konfokální mikroskop používá laserového záření krátké vlnové délky (408 nm) pro co nejvyšší kvalitu obrazu s minimálními odchylkami. Možné zvětšení je 120x až 14 400x [12].

První pokus vrtání spočíval ve zvyšování energie laserového svazku a následném porovnání otvorů vyvrtaných na vzduchu a s kapalinou. Bylo provedeno devět měření na vzduchu a devět s kapalinou, při zachování stejných parametrů. U vrtání s kapalinou byla upravena poloha ohniska podle předchozích zkušeností. Vrtání oceli probíhalo opět bez asistenčního plynu pro zachování stejných parametrů.

Bylo užito perkusního vrtání, což znamená, že na jeden otvor je použito několika pulzů. Tedy materiál je ubírán postupně. Tato metoda byla zvolena také z důvodu absence asistenčního plynu, jehož hlavním účelem je vyfukování taveniny z otvorů. Každá sada obsahovala deset pulzů a na každý otvor připadalo pět sad. Počet pulzů na jeden otvor bylo tedy 50.

Průměr svazku v ohnisku $D_{\text{foc}} = 0,16$ mm. Délka pulzu $t = 0,5$ ms. Frekvence $f = 20$ Hz.

Označení vzorku	Napětí zdroje [V]	Energie pulzu [mJ]	Vrcholový výkon [W]	Průměrný výkon [W]	Hustota energie [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Hustota výkonu [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]
(W)O_E1_01	200	233	466	4,66	1,16E+03	3,32E+06
(W)O_E1_02	220	330	660	6,6	1,64E+03	3,28 E+06
(W)O_E1_03	240	445	890	8,9	2,21E+03	4,43 E+06
(W)O_E1_04	260	563	1126	11,26	2,80E+03	5,60 E+06
(W)O_E1_05	280	735	1470	14,7	3,66E+03	7,31 E+06
(W)O_E1_06	300	886	1772	17,72	4,40E+03	8,81 E+06
(W)O_E1_07	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
(W)O_E1_08	340	1300	2600	26	6,47E+03	1,29 E+07
(W)O_E1_09	360	1500	3000	30	7,66E+03	1,49 E+07

Tabulka 9: Přehled parametrů pro pokus č. 1 na vzduchu a s kapalinou (Ocel)

Tabulka 9 zahrnuje vrtání na vzduchu i s kapalinou, neboť jsou parametry stejné.

V druhém pokusu bylo za cíl určit závislost na počtu pulzů. Na základě předchozích výsledků, kde vrtání na vzduchu bez asistenčního plynu nebylo příliš zdařilé, byl tento pokus proveden pouze s kapalinou. Opět bylo použito perkusního vrtání, kde každá sada obsahovala tři pulzy. Bylo provedeno osm měření, přičemž se postupně zvyšoval počet sad od jedné do osmi. Ostatní parametry zůstali neměnné.

Průměr svazku v ohnisku $D_{\text{foc}} = 0,16 \text{ mm}$. Délka pulzu $t = 0,5 \text{ ms}$. Frekvence $f = 20 \text{ Hz}$.

Označení vzorku	Počet pulzů	Napětí zdroje [V]	Energie pulzu [mJ]	Vrcholový výkon [W]	Průměrný výkon [W]	Hustota energie [J.cm^{-2}]	Hustota výkonu [W.cm^{-2}]
O_P2_01	1x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
O_P2_02	2x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
O_P2_03	3x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
O_P2_04	4x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
O_P2_05	5x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
O_P2_06	6x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
O_P2_07	7x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07
O_P2_08	8x3	320	1085	2170	21,7	5,39E+03	1,08 E+07

Tabulka 10: Přehled parametrů pro pokus č. 2 s kapalinou (Ocel)

2.2.3 Výsledky

Průměry vyvrtaných otvorů byly měřeny přímo v programu, který je součástí konfokálního mikroskopu a kterým je mikroskop ovládán. Metoda měření spočívala ve vykreslování kružnic do otvorů na obrázcích pořízených mikroskopem. Na každou díru připadalo pět kružnic, ze kterých byl vypočítán průměr a odchylka. V prvním pokusu byl měřen průměr otvorů pro devět vzorků vrtaných na vzduchu a devět s kapalinou.

Označení vzorku	Energie pulzu [mJ]	Průměr otvorů [μm]
O_E1_01	233	455 ± 23
O_E1_02	330	691 ± 26
O_E1_03	445	788 ± 35
O_E1_04	563	-
O_E1_05	735	-
O_E1_06	886	-
O_E1_07	1085	543 ± 97
O_E1_08	1300	504 ± 31
O_E1_09	1500	472 ± 23

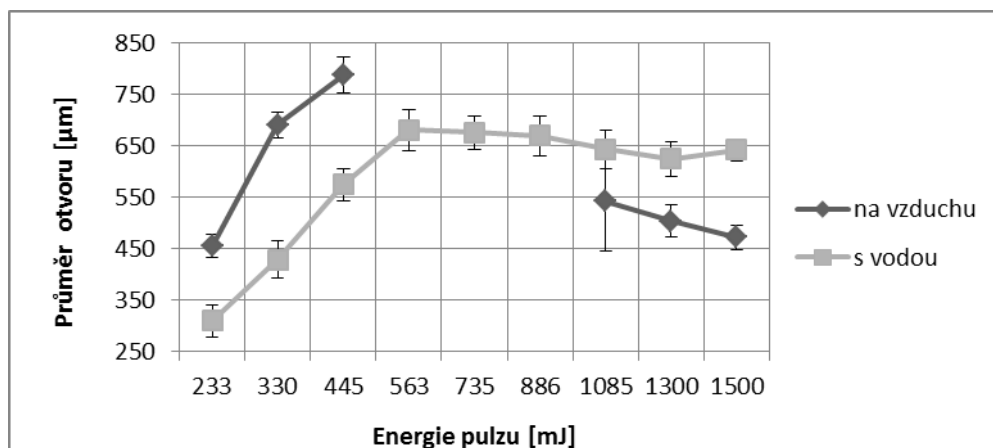
Tabulka 11: Výsledky z mikroskopu pro pokus č. 1 na vzduchu (Ocel)

V tabulce 11 chybí hodnoty pro tři otvory, které v důsledku náhodné chyby nebylo možné změřit. Problém byl pravděpodobně v zakřivení ocelového plíšku, v důsledku čehož se změnila poloha ohniska. Otvory byly však celkově horší kvality (Obr. 30). Už od pohledu byly opálené, nepravidelného tvaru a většina nebyla řádně provrtaná. Hlavním důsledkem této špatné kvality byla absence asistenčního plynu.

Označení vzorku	Energie pulzu [mJ]	Průměr otvorů [μm]
WO_E1_01	233	310 ± 31
WO_E1_02	330	429 ± 37
WO_E1_03	445	575 ± 31
WO_E1_04	563	681 ± 41
WO_E1_05	735	676 ± 33
WO_E1_06	886	670 ± 38
WO_E1_07	1085	644 ± 38
WO_E1_08	1300	625 ± 33
WO_E1_09	1500	643 ± 21

Tabulka 12: Výsledky z mikroskopu pro pokus č. 1 s kapalinou (Ocel)

Otvory vrtané s vrstvou vody byly celkově kvalitnější a pohlednější, což opět vede k možnému nahrazení asistenčního plynu za kapalinu jako levnější způsob.



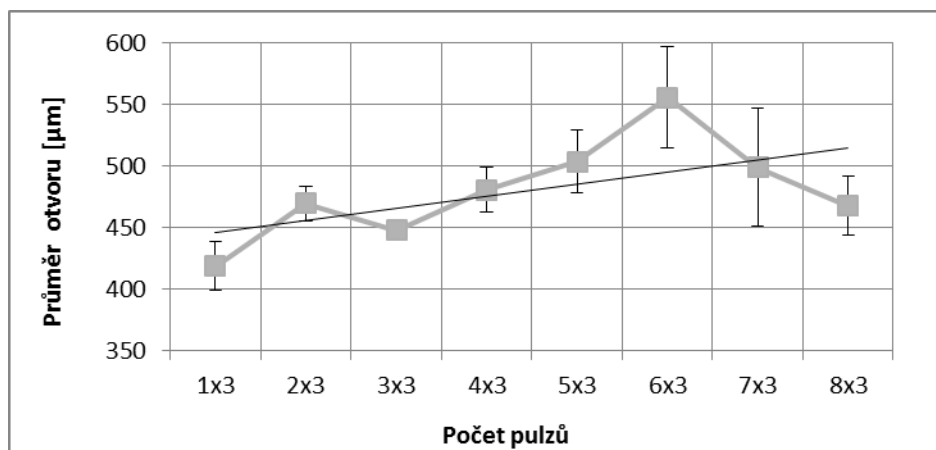
Graf 7: Závislost energie pulzu na průměru otvorů vytvořených na vzduchu a s kapalinou (pokus č. 1)

Z grafu 7 lze vyčíst, že průměry otvorů rostou se zvyšující se energií až do určité saturační hodnoty, která se dále s rostoucí energií už nemění. Tuto závislost lze vidět zejména u vrtání s kapalinou. U vrtání na vzduchu se předpokládá podobný průběh, avšak v důsledku špatné kvality otvorů a tedy i dat, nelze sestavit tuto charakteristiku.

U druhého pokusu najít závislost na počtu pulzů byl postup obdobný.

Označení vzorku	Počet pulzů	Průměr otvorů [μm]
O_P2_01	1x3	419 ± 20
O_P2_02	2x3	470 ± 14
O_P2_03	3x3	448 ± 4
O_P2_04	4x3	481 ± 18
O_P2_05	5x3	504 ± 26
O_P2_06	6x3	556 ± 41
O_P2_07	7x3	499 ± 48
O_P2_08	8x3	468 ± 24

Tabulka 13: Výsledky z mikroskopu pro pokus č. 2 s kapalinou (Ocel)



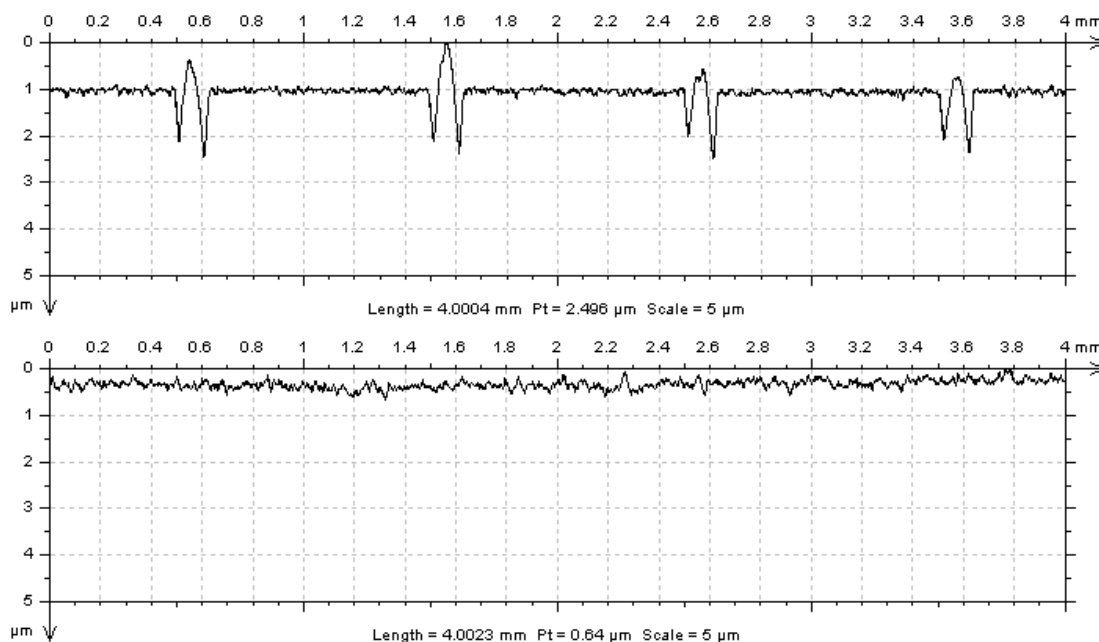
Graf 8: Závislost počtu pulzů na průměru otvorů vytvořených s kapalinou (pokus č. 2)

V grafu 8 není vidět výrazná tendence. Průměry otvorů mají nepatrný rostoucí průběh se zvyšujícím se počtem pulzů, což je nejspíš způsobeno tím, že každý další pulz přispívá k zarovnání otvoru do pravidelnějšího tvaru. Všechny otvory byly řádně provrtané a na první pohled kvalitní.

3 Diskuze

Experimenty provedené za účelem zkoumání laserového obrábění s pomocí kapaliny lze celkově považovat za úspěšné. Bylo zjištěno, že v mnoha případech kapalina přináší značné zlepšení výsledků a v některých případech by mohla plně nahradit asistenční plyn, bez kterého se neobejde takřka jakékoliv zpracování.

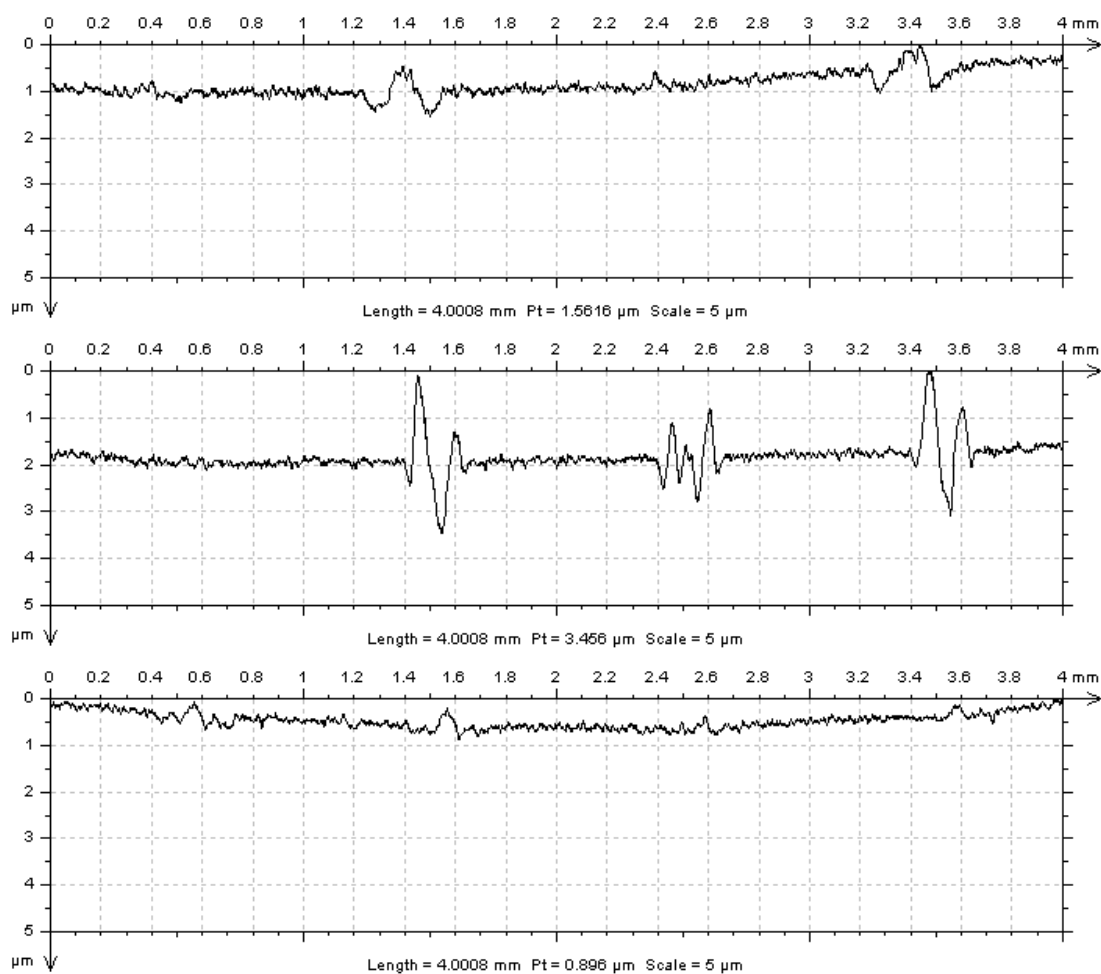
U experimentu rýhování křemíku byla zjištěna zásadní věc, a to že s vrstvou kapaliny na substrátu dochází k posunu ohniska. Je tedy nutné při práci s kapalinou s touto korekcí dopředu počítat, což bylo potvrzeno prvním pokusem.



Obr. 24: Srovnání rýh pokusu č. 1 vytvořených na vzduchu (nahore) a s kapalinou (dole) při zachování stejných parametrů bez korekce ohniska (obrázek z profilometru)

Na obrázku 24 je zřetelné, že posunem ohniska získala rozostřená stopa nízkou hustotu energie a nedošlo tak k vytvoření potřebných rýh.

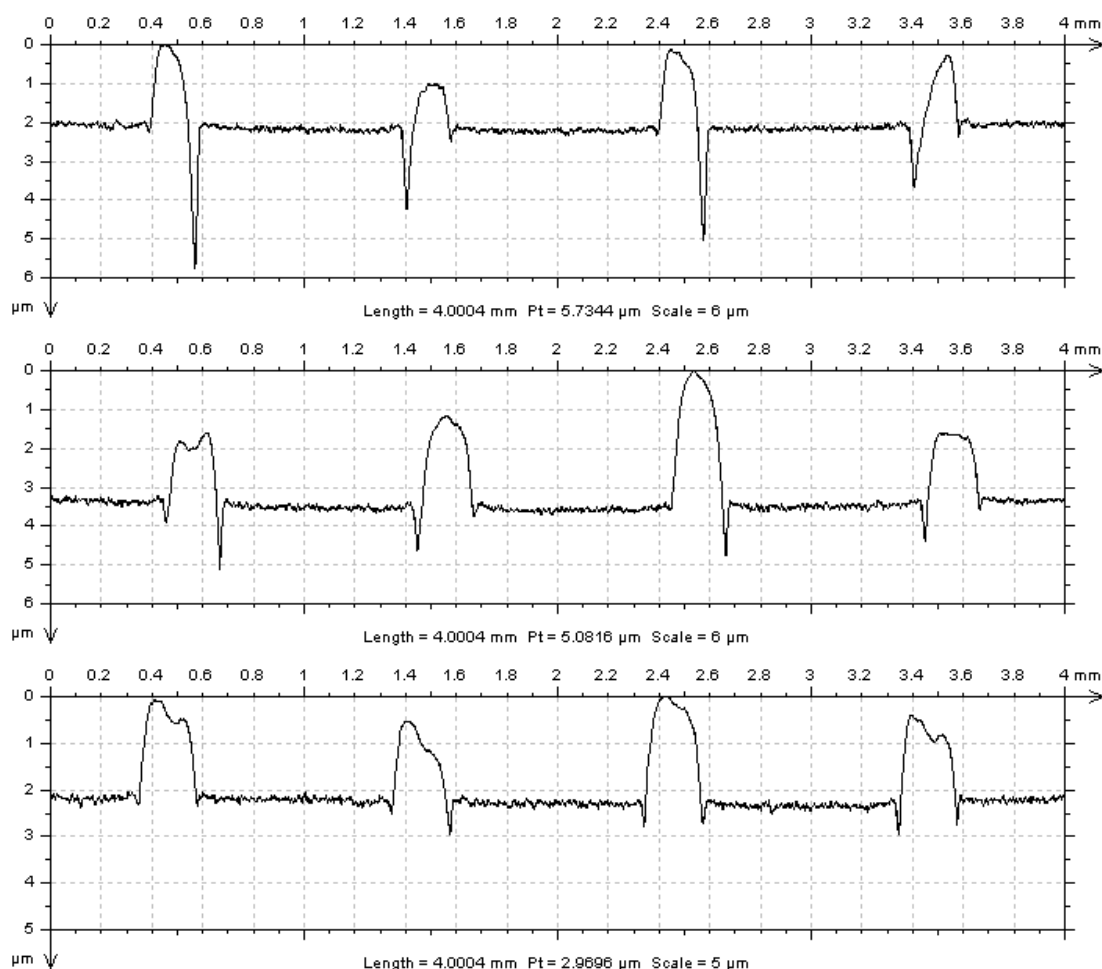
Hledání správné polohy ohniska probíhalo experimentálně, kdy na každé měření bylo ohnisko zvednuto o 0,1 mm. Výsledky byly znatelné už od pohledu a následně potvrzeny měřeními na profilometru.



Obr. 25: Srovnání rýh pokusu č. 2 vytvořených s kapalinou při posunu ohniska o 1,1 mm (nahore), o 1,3 mm (uprostřed) a o 1,5 mm (dole) při zachování stejných parametrů (obrázek z profilometru)

Při srovnání rýh na obrázku 25 je vidět, že pouhých 0,2 mm stačí k rozostření stopy laserového svazku natolik, že rýhy nelze rozpoznat. Nej kvalitnějších rýh bylo dosaženo právě u hodnoty 1,3 mm, poté se ohnisko začalo zvedat nad substrát.

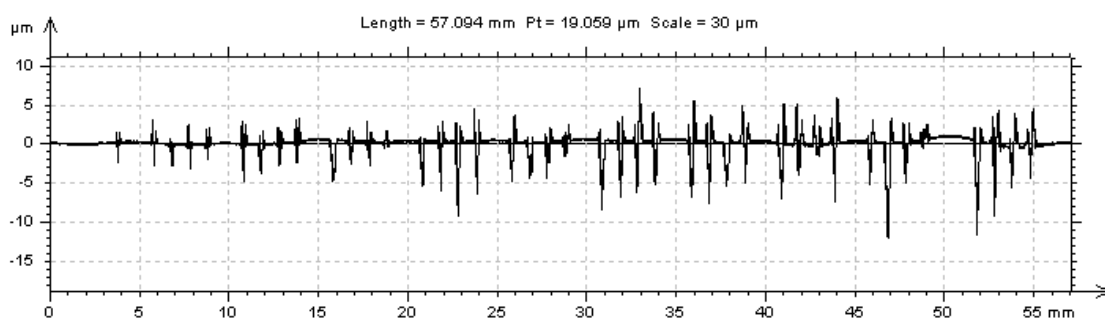
Konečné srovnání rýh vytvořených na vzduchu a s kapalinou proběhlo v posledním třetím pokusu, kde bylo využito předchozích poznatků, a pro vzorky s kapalinou byla příčná poloha ohniska upravena. Rýhování bez kapaliny ale nemělo očekávaný průběh, neboť hloubka rýh se zvyšující se energií klesala a naopak rostla výška nahromaděné taveniny. To bylo nejspíš způsobeno absencí asistenčního plynu, který pro lepší srovnání výsledků nebyl použit. U rýhování na vzduchu byla také zaznamenána destrukce substrátu od určité hodnoty energie, kterou nebylo možné překročit, na rozdíl od rýhování s kapalinou, kde byla tato hranice energie značně překročena a přesto k destrukci nedošlo.



Obr. 26: Srovnání rýh pokusu č. 3 na vzduchu s energií pulzu 53 mJ (nahore), 84 mJ (uprostřed) a 93 mJ (dole), (obrázek z profilometru)

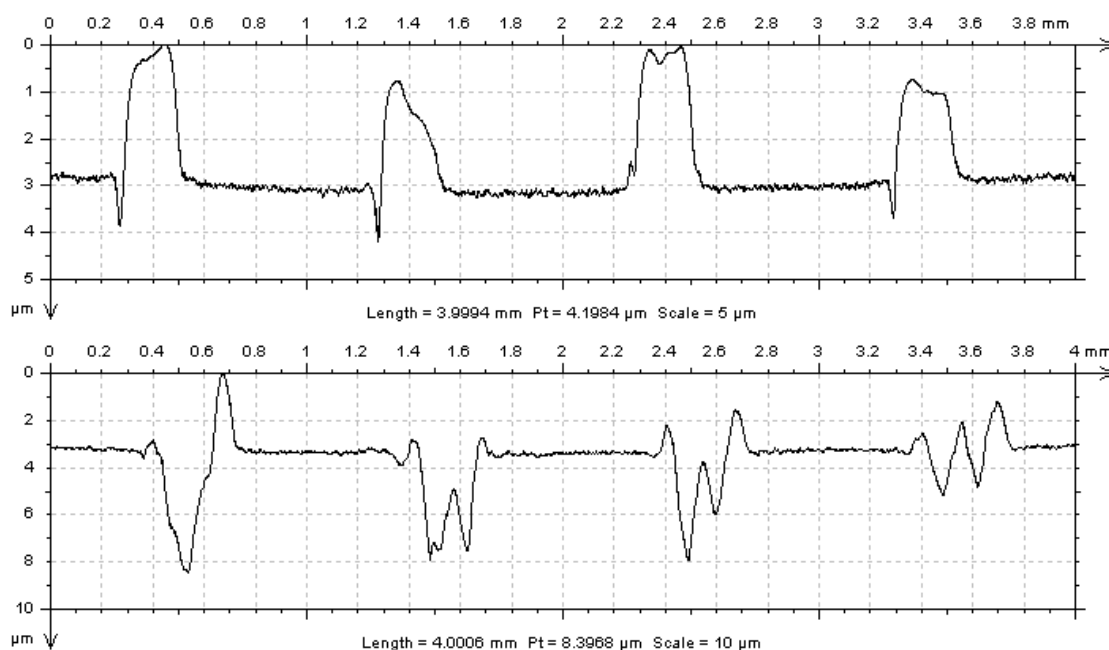
Z obrázku 26 je zřejmé, že hloubka rýh s rostoucí energií značně klesá a v některých případech už ani nelze mluvit o rýhách.

U kapaliny byl celkový průběh o mnoho lepší. S rostoucí energií rostla také hloubka rýh, což bylo vyžadováno. Tento rozdíl oproti rýhování na vzduchu spočívá pravděpodobně ve vzniku rázových vln v kapalině, které napomáhají k prohlubování rýh.



Obr. 27: Celkový průběh pokusu č. 3 rýhování s kapalinou při zvyšování energie pulzu (obrázek z profilometru)

V obrázku 27 je vidět jak rostoucí hloubka rýh, tak i rostoucí výška nahromaděné taveniny jako u rýhování na vzduchu, které nešlo zabránit.



Obr. 28: Srovnání rýh pokusu č. 3 pro rýhování na vzduchu (nahore) a s kapalinou (dole) při zachování stejných parametrů (obrázek z profilometru)

Ze srovnání rýh vytvořených při stejných parametrech na vzduchu a s kapalinou je rozdíl zřejmý (obr. 28). Tedy kapalina má zde jednoznačně uplatnění.

Experiment vrtání oceli může být považován taktéž za úspěšný. Otvory vrtané na vzduchu a s kapalinou mají už na první pohled rozdílnou kvalitu, která je lepší právě u kapaliny (obr. 29 a 30).



Obr. 29: Srovnání kvality otvorů pro vrtání na vzduchu (horní řádek) a s kapalinou (prostřední a spodní řádek)

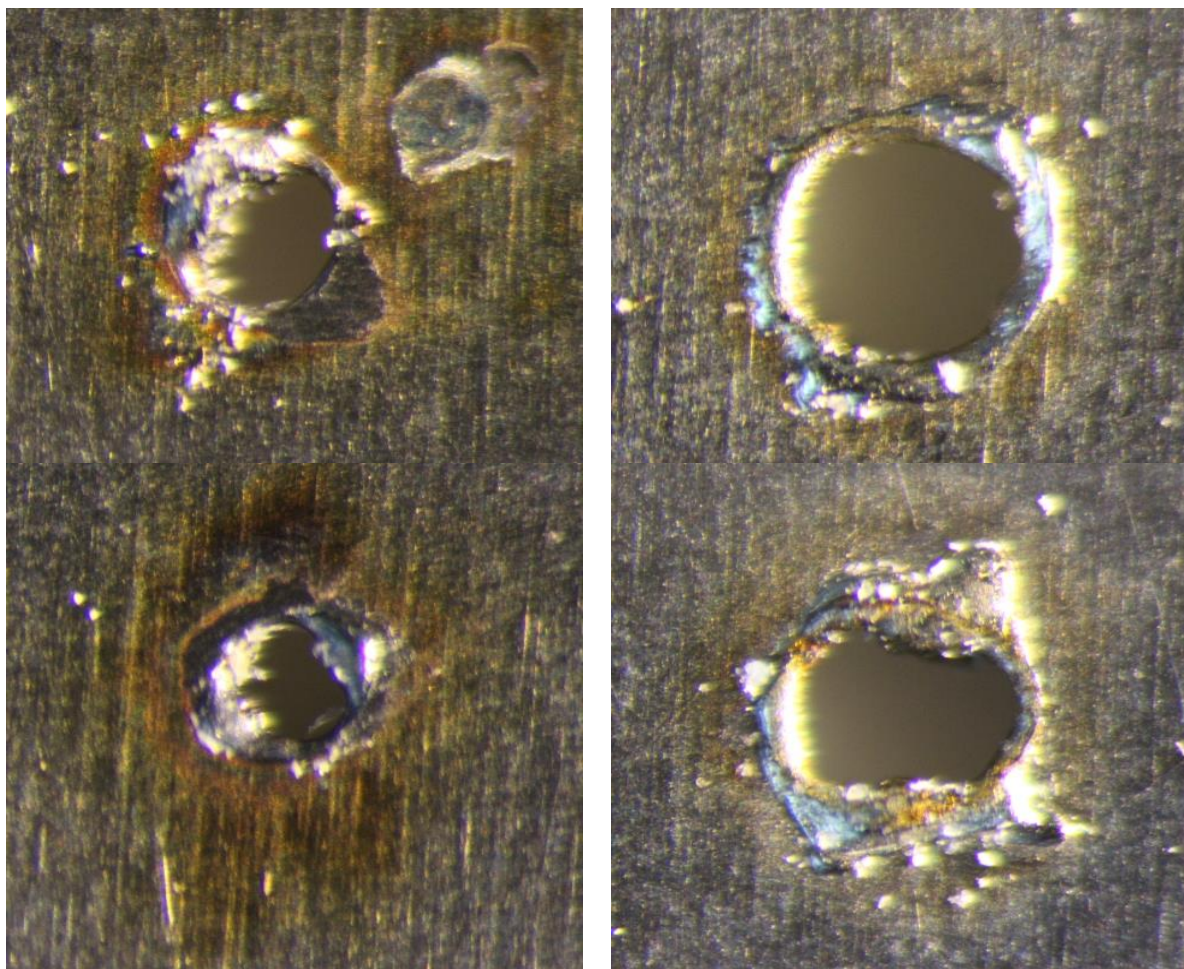


Obr. 30: Detailní srovnání otvorů pro vrtání na vzduchu (nahore) a s kapalinou (dole)

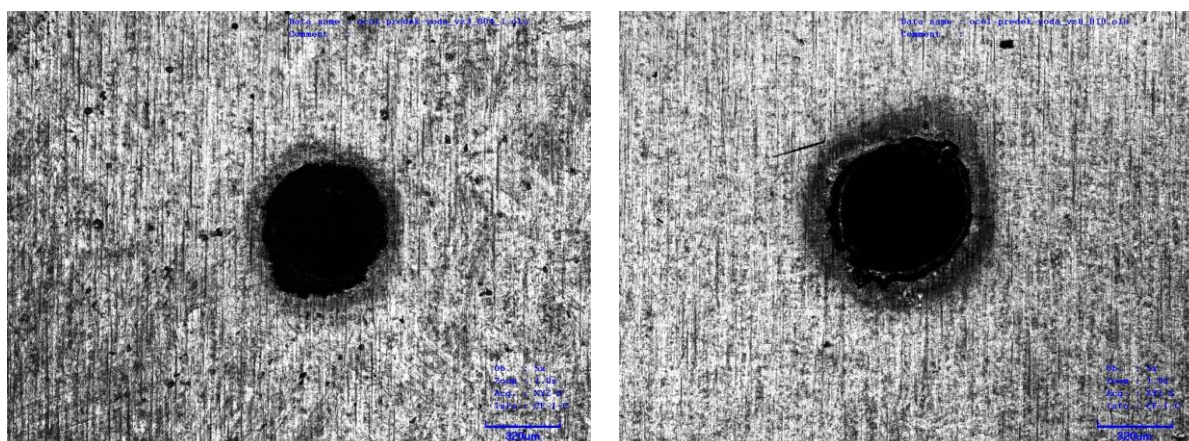
Obrázky byly pořízeny fotoaparátem Canon EOS-600D

Na obrázcích 29 a 30 je zřejmé, že otvory vrtané na vzduchu jsou kolem opálené, nepravidelné a většinou neprovrtané skrz, což u otvorů vrtaných s kapalinou nelze říct. Hlavním problémem byla absence asistenčního plynu, který pod tlakem vyfukuje taveninu z otvorů. U kapaliny byla tato skutečnost nahrazena tvorbou rázových vln, jejichž tlak odstraňuje taveninu z otvorů taktéž. Na obrázku 29 je horní a prostřední řádek součástí

prvního pokusu, kde bylo cílem určit závislost energie pulzů na průměru otvorů při stejných parametrech. U obou případů byl očekáván rychle rostoucí průběh až do určité hodnoty energie, kdy už průměr otvoru nebyl ovlivněn, ale spíše jeho kvalita. U vrtání na vzduchu z důvodu špatné kvality nebylo možné tuto závislost potvrdit.



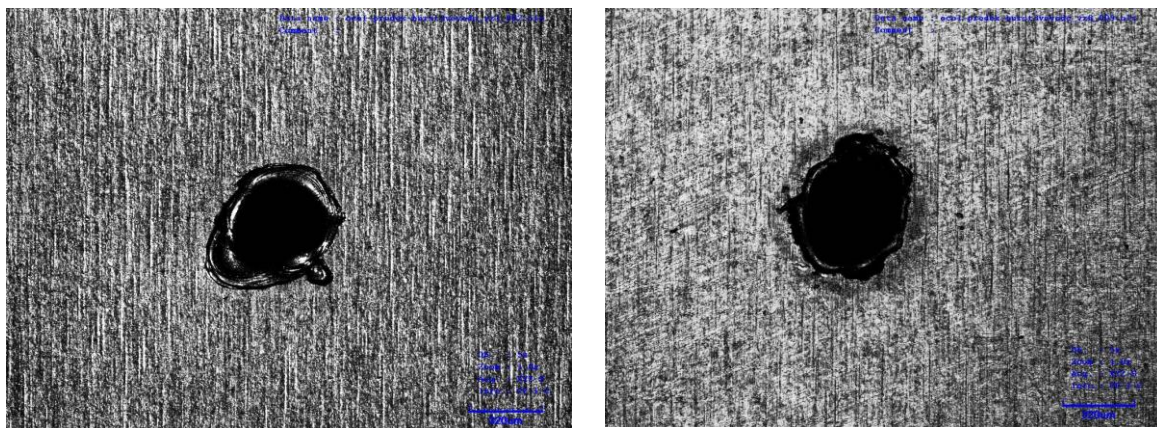
Obr. 31: Srovnání kvality otvorů pokusu č. 1 pro poslední dvě hodnoty energie 1,3 J a 1,5 J na vzduchu (levá strana) a s kapalinou (pravá strana), (obrázek z konfokálního mikroskopu)



Obr. 32: Srovnání průměru otvorů pokusu č. 1 pro energii 445 mJ a 1300 mJ u vrtání s kapalinou (obrázek z konfokálního mikroskopu)

Na obrázku 32 je vidět, že už od třetí hodnoty energie pulzu (455 mJ) se průměr otvoru tolik nezměnil, i přestože je mezi oběma otvory rozdíl přibližně 900 mJ.

U druhého pokusu určení závislosti počtu pulzů na průměru a kvalitě otvorů bylo provedeno měření pouze s kapalinou na základě předchozích zkušeností. Počet pulzů na průměr otvorů taktéž neměl zásadní vliv, i přestože byla zaznamenána lehce rostoucí tendence. To bylo ale nejspíš způsobeno tím, že opakované pulzy, do už tak vyvrtaného otvoru, zarovnávaly okraje do kulatějšího tvaru. Rozdílly však byly nepatrné (obr. 41).



Obr. 41: Rozdíl mezi prvním otvorem (1x3 pulzů) a posledním otvorem (8x3 pulzů) laserového vrtání s kapalinou v pokusu č. 2 (obrázek z konfokálního mikroskopu)

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo experimentálně poukázat na možné využití kapalin při laserovém obrábění, jako jednu z dalších hybridních laserových technologií. Experimentálně bylo prokázáno, že v mnoha případech může být použití kapaliny značně přínosné, ba dokonce nepostradatelné.

Vzhledem k omezeným možnostem použití laserového systém KLS 246-102 pro experimenty s kapalinou bylo zvoleno rýhování křemíkových plátek a vrtání ocelového plíšku. I přes veškeré nedokonalosti vytvořeného systému pro obrábění s kapalinou bylo dosaženo značně pozitivních výsledků. U obou experimentů bylo provedeno obrábění s vrstvou kapaliny a také na vzduchu, aby výsledky měly srovnávací charakter. Protože při obrábění s vrstvou kapaliny nebylo možné použití asistenčního plynu, pro lepší srovnání výsledků nebyl plyn použit ani na vzduchu. Absence asistenčního plynu u obrábění na vzduchu způsobila, že výsledky se neshodovaly s předpokladem. U obrábění s kapalinou však tyto problémy nenastaly. Kapalina dokázala plně nahradit asistenční plyn, což také poukazovalo na možnou náhradu, jako levnější způsob obrábění.

U rýhování křemíku s kapalinou bylo také možné použít vyšších energií pulzu, při kterých by křemíkový plátek obráběný na vzduchu již prasknul. Této skutečnosti může být v praxi využito například pro potřebu vytvářet hlubší rýhy.

Vrtání oceli v kapalině se jeví jako velice zdařilé. Otvory měly vysokou kvalitu. Zde kapalina plně nahrazovala asistenční plyn, který je jinak u vrtání nezbytný z důvodu vyfukování taveniny z otvorů.

Seznam použitých pramenů

- [1] KRUUSING, A.: *Handbook of Liquids-assisted Laser Processing*. Elsevier (Science, 2008), ISBN 978-0-08-044498-7
 - [2] DAHOTRE, N. B., HAMIKAR, S. P.: *Laser Fabrication and Machining of Materials* (Springer Sciences and Business Media, LLC, New York 2008). ISBN 978-0-387-72343-3, e-ISBN 978-0-387-72344-0
 - [3] ION, J.C.: *Laser Processing of engineering Materials* (Elsevier, Oxford, 2005), ISBN 0 7506 6079 1
 - [4] M.VRBOVÁ, H.JELÍNKOVÁ, P.GAVRILOV: *Úvod do laserové techniky* (Vydavatelství ČVUT, 1998)
 - [5] H.CHMELÍČKOVÁ: *Základní konstrukční součásti laserů* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc, 2011). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/laserove-technologie-v-praxi-1>
 - [6] H.CHMELÍČKOVÁ: *Fyzikální princip laserů* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc, 2011). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/laserove-technologie-v-praxi-1>
 - [7] H.CHMELÍČKOVÁ: *Vedení laserového svazku* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc, 2011). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/laserove-technologie-v-praxi-1>
 - [8] H.CHMELÍČKOVÁ: *Parametry laserového svazku laseru KLS 204-102* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc, 2011). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/laserove-technologie-v-praxi-1>
 - [9] H.CHMELÍČKOVÁ: *Laserové zpracování materiálu* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc, 2011). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/laserove-technologie-v-praxi-1>
 - [10] H.CHMELÍČKOVÁ: *Průmyslový laserový systém* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc, 2011). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/laserove-technologie-v-praxi-1>
 - [11] H.ŠEBESTOVÁ, P.SCHOVÁNEK: *Krystalizace ocelí a litin* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/zaklady-nauky-o-materialu-1>
 - [12] H.ŠEBESTOVÁ: *Laserový rastrovací konfokální mikroskop LEXT OLS 3100* (SLO UP a FZÚ AVČR, Olomouc). Dostupné z <http://fyzika.upol.cz/cs/pro-studenty/uvod-do-modernich-technologii-1>
- Internet:
- [13] <http://www.abb-conversations.com/cs/2013/12/kremik-material-nejen-pro-vykonove-polovodicove-soucastky/>
 - [14] http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=62120
 - [15] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8201
 - [16] <http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=65898&taxid=1443>
 - [17] <http://www.mepac-eshop.cz/nerezove-crni-stahl-1-4310-1-4034>