

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Termomechanická měření v technologii laserového
vrtání otvorů**

**vedoucí práce: Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.
autor: Bc. Jiří Navrátil**

2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří NAVRÁTIL**
Osobní číslo: **E12N0024P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Termomechanická měření v technologii laserového vrtání otvorů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou laserové technologie vrtání otvorů a metodami měření teplotních a deformačních polí.
2. Navrhněte a realizujte experiment laserového vrtání otvorů s různými procesními parametry.
3. V průběhu experimentu proveďte termovizní měření teplotního pole v okolí otvoru a měření deformací elektrickými odporovými tenzometry.
4. Pomocí 3D digitálního mikroskopu vyhodnoťte tvar otvorů.
5. Proveďte vyhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Soukup O.: Laser drilling method for residual stress measurement, Diplomová práce, ZČU, Plzeň, 2007, 119 s.
2. Honner, M., Litoš, P., Švantner, M.: Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measuring technique. Infrared Physics & Technology, Vol. 45, pp. 131-142, 2004.
3. Litoš, P., Švantner, M., Honner, M.: Simulation of strain gauge thermal effect during residual stress hole drilling measurement. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 40, No. 7, pp. 611-619, 2005.
4. Trumpf, The Laser as a Tool, Vogel Buchverlag, Wurzburg, 280 p. ISBN-10 3-8343-3072-8
5. Honner M.: Infračervená kvantitativní termografie ve výzkumu fyzikálních technologií. Habilitační práce, ZČU, Plzeň, 2004, 165 s.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**

Katedra technologií a měření

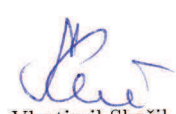
Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.**
NTC-TTP

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na termomechanická měření v technologii laserového vrtání otvorů. Teoreticky jsou popsány možnosti odvrtávání materiálu klasickými metodami a laserem a parametry důležité pro laserové odvrtávání. a dále jsou obsaženy kapitoly, které se týkají zbytkových napětí, jejich zjišťování a termovizního měření.

V práci jsou optimalizovány parametry nastavení laseru pro odvrtávání oceli, křemíku a mosazi. Pro ocel je porovnáno odvrtávání laserem a vysokorychlostní odvrtávání frézou a zjišťována možnost použití laserové odvrtávací metody pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou. Je vyhodnocováno ovlivnění materiálu z hlediska deformací, tepelného ovlivnění a je provedeno vyhodnocení tvaru otvorů.

Klíčová slova

laser, vrtání, termomechanika, měření, 3D mikroskop, tenzometr, zbytkové napětí, HDRSM, IR, optimalizace, ocel, křemík, mosaz

Abstract

The master thesis presents the thermo-mechanical measurement in laser hole-drilling technology. The classic and laser hole-drilling technologies and the laser drilling parameters are described. The chapters which discuss the residual stresses and their discovering and thermo vision technology are also included.

The optimization of the laser drilling parameters is made for three materials – silicon, brass and steel. For the steel material there is a comparison between laser drilling and high speed drilling by a cutter. The hole drilling residual stress measurement method application is discussed for using the laser beam. The mechanical stress and thermal influence of the two drilling technologies on the steel material is evaluated. The quality of the shape of the holes is also evaluated.

Key words

laser, drilling, thermomechanics, measuring, 3D microscopy, strain gauge, residual stress, HDRSM, IR, optimization, steel, silicon, brass

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 4.5.2014

Jiří Navrátil

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Františkovi Steinerovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Michalovi Švantnerovi, Ph.D., Ing. Martinovi Kučerovi a Ing. Tomáši Džuganovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a vstřícnost. Poděkovat bych chtěl také Doc. Ing. Milanovi Honnerovi, Ph.D. za to, že mi bylo umožněno zpracovat diplomovou práci v NTC ZČU a celkově personálu NTC ZČU za velmi ochotný přístup. Nakonec bych rád poděkoval i celé své rodině že mi při studiu finančně i morálně podporovala. Tento příspěvek vznikl s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Úvod	9
1 Technologie vrtání	10
1.1 Klasické metody odvrtávání	10
1.2 Laserové odvrtávání	11
1.2.1 Značení materiálů	13
1.2.2 Parametry ovlivňující laserové odvrtávání	14
2 Zbytková napětí	17
2.1 Zjišťování zbytkových napětí	17
2.1.1 Odvrtávací metoda	18
3 Termovizní měření	22
4 Použité zařízení a materiály	24
4.1 Laserové odvrtávací zařízení	24
4.2 Mechanické odvrtávací zařízení	25
4.3 Měřicí stanice	26
4.4 Tenzometrické růžice	26
4.5 Termovizní kamera	26
4.6 Mikroskopy	27
4.7 Mikrometr	27
4.8 Materiály	28
5 Experiment	29
5.1 Optimalizace rychlosti	29
5.1.1 Ocel	30
5.1.2 Křemík	32
5.1.3 Mosaz	34
5.1.4 Shrnutí optimalizace	37
5.2 Termomechanické měření	38
5.2.1 Zapojení tenzometrických růžic	38
5.2.2 Postup pro odvrtávání laserem	39
5.2.3 Postup pro vysokorychlostní odvrtávání	44
5.2.4 Tenzometrická data	46
5.2.5 Termovizní data	53
5.2.6 Řezy materiálu a struktura	58
5.3 Vyhodnocení experimentu	63
Závěr	65
Použitá literatura	66

Seznam použitých zkratek a symbolů

ASTM	American society for testing and materials
ČSN	Česká technická norma
EUS	Equivalent unified stress
f [Hz]	Frekvence
HDRSM	Hole drilling residual stress measurement
HEPA	High efficiency particulate air
HSD	High speed drilling
IP	Ingress protection
IR	Infra-red
laser	Light amplification by stimulated emission of radiation
LPT-1	Line Printer Terminal, paralelní port
MOPA	Master oscillator power amplifier
Nd:YAG	Yttrium aluminium granát (YAG) obohacený neodymem (Nd), typ laseru
RS-232	Sériový port
SW	Software
t [s]	Čas
USB	Universal serial bus
α [°]	Úhel
ϵ [-]	Deformace, poměrné prodloužení
λ [nm]	Vlnová délka
σ [Pa]	Napětí
σ_{\max} , σ_{\min} [Pa]	Hlavní složky napětí

Úvod

Slovo LASER je akronymem anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tj. zesílení světla stimulovanou emisí záření. Jde o optický zdroj elektromagnetického záření. Může být zdrojem záření, které lidské oko vidí (vlnová délka λ asi 400 nm až 800 nm), či záření, které lidské oko není schopno rozpoznat - ultrafialové ($\lambda < 400$ nm) či infračervené ($\lambda > 800$ nm). První laser byl demonstrován v r. 1960 Theodorem Maimanem (USA 1927–2007). Předchůdcem laseru byl MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), který zesiloval mikrovlnné záření ($\lambda = 1$ mm až 10 cm). Teoreticky byl popsán a následně zkonstruován v 50. letech 20. století. [1]

Laserové odvrátání je způsob odběru materiálu pomocí elektromagnetického záření. Způsob odběru je založen v soustředění velké energie na velmi malou plochu. Tím dochází k odpaření materiálu a odběru hmoty. Tento způsob odvrátání s sebou nese určitá specifika týkající se nastavení, možností použití a jako každý technologický systém má i on své výhody a nevýhody.

Zjišťování zbytkových napětí odvrátací metodou nám dává informaci o stavu materiálu téměř nedestruktivní formou. Zbytková napětí vznikají při technologickém opracování při výrobě či namáháním materiálu za provozu. Zbytková napětí ovlivňují fyzikální vlastnosti materiálů a proto je velmi důležitá znalost procesů, kterými vznikají a schopnost sledovat jejich velikosti v materiálech.

Termovizní měření nám poskytne informaci o tepelných procesech a rozložení teplotních polí uvnitř materiálu i v jeho okolí.

1 Technologie vrtání

Vrtání je subtraktivní (dochází k úbytku materiálu) technologické proces, jehož úkolem je vytvářet otvory různých velikostí a tvarů do rozličných materiálů. V kapitole jsou stručně popsány klasické metody odvrtávání a více pozornosti je věnováno laserovému odvrtávání a parametrům, které ho ovlivňují.

1.1 Klasické metody odvrtávání

Klasické procesy odvrtávání lze rozdělit dle fyzikální podstaty odběru materiálu. Často jsou kombinovány účinky jednotlivých různých energií (např. tepelná, elektrická, chemická). V kapitole je čerpáno ze zdroje [2].

Mechanické metody

Metody využívají k odběru materiálu abrazivního působení nástroje (fréza, vrták), částic (pískování), kapaliny (vodní paprsek) nebo kombinaci kapaliny s částicemi. Výhodou je schopnost obrábět velmi tvrdé, křehké či nevodivé materiály. Nevýhodou je téměř vždy zanesení určitých zbytkových napětí do materiálu a v případě vrtáků nebo fréz také jejich opotřebení.

Elektrické metody

Materiál obráběný touto metodou musí být elektricky vodivý. Výhodou je možnost vytváření komplexních tvarů na jeden průchod nástroje.

Tepelné metody

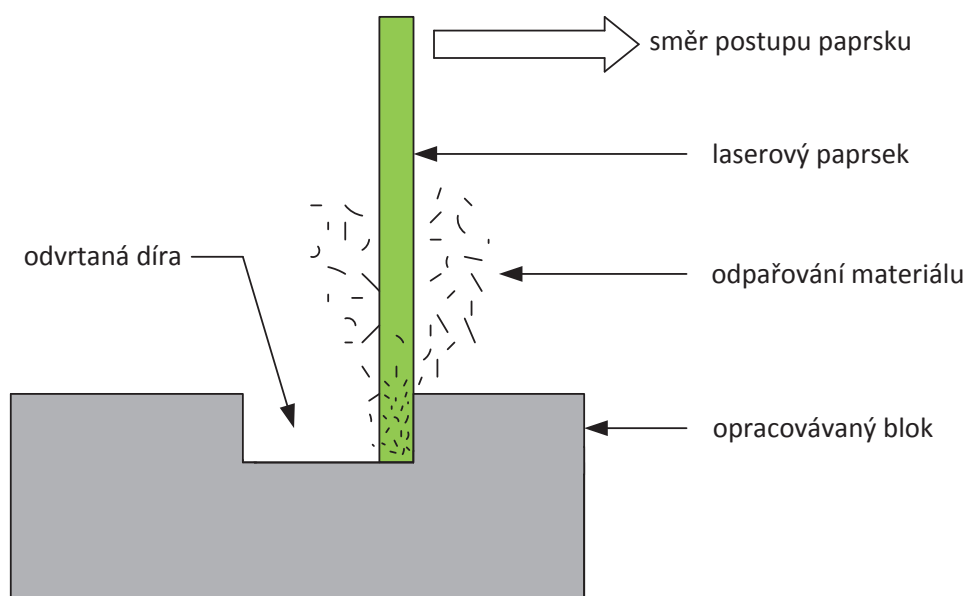
Využívají tepelných zdrojů energie k roztavení či vypaření části materiálu. Energie je jako v případě laseru soustředěna na velmi malou plochu. Mezi zdroje energie pro tuto metodu lze zařadit např. elektrony, fotony či elektrické jiskry.

Chemické metody

Materiál je potažen maskou a v místech, kde maska není, působí chemická látka a materiál rozpouští. Výhodou metody je možnost odběru velkých objemů a také fakt, že na materiál nepůsobí mechanicky žádné síly a nástroje. Metoda se uplatňuje hlavně při leptání masky pro desky plošných spojů.

1.2 Laserové odvrtávání

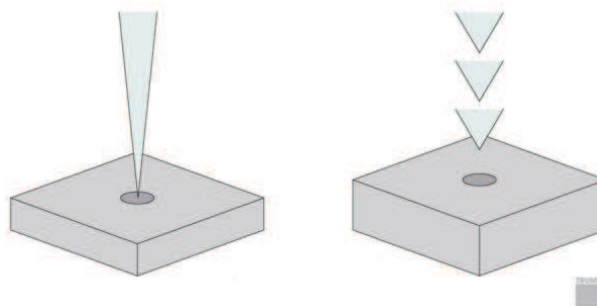
Pod pojmem laserové vrtání se skrývá několik možných postupů. Některé odvrtávací metody lze využít i ke značení materiálů. Technologie laserového vrtání je založena na soustředění vysokého výkonu laseru na malou plochu. Z tohoto důvodu jsou pro odvrtávání téměř výhradně používány pulzní lasery. Po velmi krátkou dobu (pulz) je totiž možné vyvinout vyšší výkon než při kontinuálním provozu. Pro ještě vyšší soustředěný výkon na plochu se využívá zaostřovací optika, která fokusováním laserového svazku zmenšuje laserem ovlivňovanou plochu. Materiál se po kontaktu s laserovým paprskem začne tavit a vypařovat. Aby bylo tohoto procesu dosaženo, musí být soustředěný výkon vyšší než $10\text{MW}/\text{cm}^2$ [4]. Při odpařování tlak páry vypuzuje z otvoru ven roztavený materiál. Pro velmi krátké pulzy laseru v řádech pikosekund se materiál odpařuje přímo bez přechodného roztavení. Výhodou laserového vrtání je možnost vytvářet otvory v místech, kde by to bylo klasickými metodami nemožné či velice obtížné. Další velkou výhodou je z principu nemožnost opotřebovávání samotného řezného nástroje – laserového svazku.[2][3][4][5][6]



Obr. 1 Odvrtávání laserem a vypařování materiálu [3]

Vrtání jednotlivým pulzem a nárazové vrtání

Při vrtání jednotlivým impulsem vznikne otvor v jednom jediném odvrtávacím pulzu laseru. Touto technologií lze vytvářet velké množství otvorů, je ovšem nutný vysoký výkon soustředěný v jednom časově delším pulzu. Oproti tomu nárazové vrtání využívá více kratších pulzů s menší energií. Takto vytvořené otvory mohou být hlubší, přesnější a je možné vytvářet menší průměry než u jednotlivého pulzu. [5] [6]



Obr. 2 Vrtání jednotlivým pulzem (vlevo) a nárazové vrtání (vpravo) [6]

Trepanační vrtání

Nejprve je vytvořen prvotní otvor nárazovým vrtáním a ten je poté zvětšován pohybem laseru kolem otvoru po zvětšujících se kruhových drahách. [5] [6]

Spirálové vrtání

Otvor je vytvářen obdobně jako u trepanačního vrtání s tím rozdílem, že se nevytváří žádný prvotní otvor a po spirálových drahách se laser pohybuje od začátku. Tímto postupem lze vytvářet relativně velké a přesné otvory. [6]

Skenování

Skenovací systémy byly vyvinuty zejména pro techniky laserového řezání, značení, svařování a vrtání. Skenovací hlava vychyluje laserový svazek ve 2D prostoru požadovaným směrem pomocí páru rotačních zrcadel. Laserový svazek může být nastaven s vysokou přesností na libovolné místo vzorku. Poté je předem zvolený obrys otvoru plynulým traverzováním postupně odebírán. Tato technika je používána pro vytváření otvorů většího průměru, než je samotný laserový svazek a lze pomocí ní vytvářet otvory rozličných tvarů. [11] [27]

1.2.1 Značení materiálů

Pro popis materiálu jde o postupy, které nazveme ablace, gravírování, žihání a změna barvy. V současné době se hojně setkáváme s výrobky označenými laserovým paprskem. Škála takto popisovaných výrobků je velmi široká - od skel brýlí, stupnic na měřidle, označení dílenského nářadí až po identifikační čísla na součástkách v automobilovém a jiném průmyslu. Důvody pro označení našeho výrobku mohou být tedy různé. Uvedu jen některé z nich: [3]

- Funkční značky a symboly
- Údaje o výrobcí, logo
- Doba expirace, specifikace materiálu
- Sériová čísla
- Označení pro vnitřní potřebu firmy, logistiku
- Pomocné linie a body pro další technologické zpracování



Obr. 3 Lékařský skalpel označený laserem [29]

1.2.2 Parametry ovlivňující laserové odvrtávání

Bude uvedeno několik nejvýznamnějších parametrů, které ovlivňují kvalitu odvrtávání materiálu laserovou technologií. Část je rozdělena na parametry, které se týkají laserového zařízení a na část, která se týká přímo odvrtávaného materiálu.

Parametry laseru

Typ provozu

Lasery lze provozovat v kontinuálním nebo v pulsním režimu. Pro účely odvrtávání se více používá pulzního režimu z důvodu vyššího dosažitelného výkonu v krátkém časovém impulzu.

Délka pulzu [ns]

Časový úsek, ve kterém je materiál vystaven jednomu pulzu laserového zařízení.

Výkon laseru [%]

Lze nastavit v % od 0 do 100.

Rychlost posuvu [mm/s]

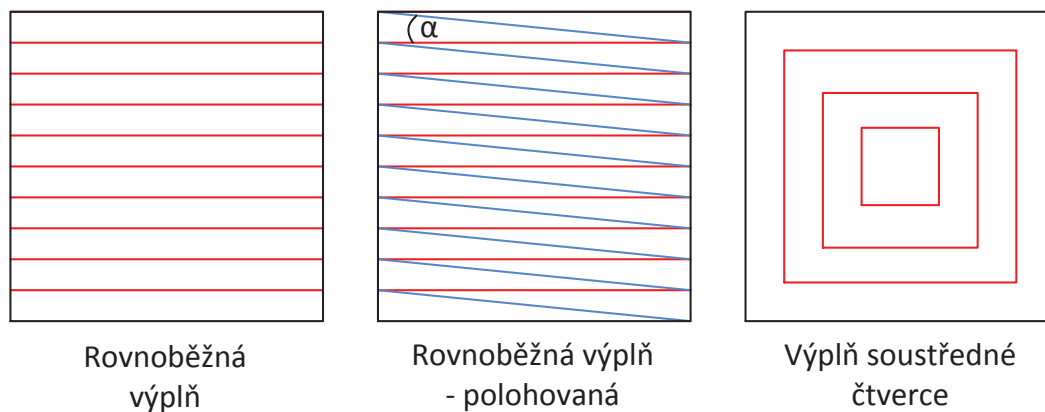
Rychlost posuvu laserového paprsku po odvrtávaném vzorku. Je udávána v mm/s. Pro pomalejší rychlosti se u pulzního laseru jednotlivé pulzy výrazně překrývají, pro rychlosti vyšší již dochází k překryvu menšímu, v extrémním případě k němu nemusí dojít vůbec.



Obr. 4 Překrývání výplně v závislosti na rychlosti, průměr spotu 70 μm ; $f=25\text{ kHz}$;
rychlost posuvu vlevo 500 mm/s, vpravo 2000 mm/s

Tvar výplně

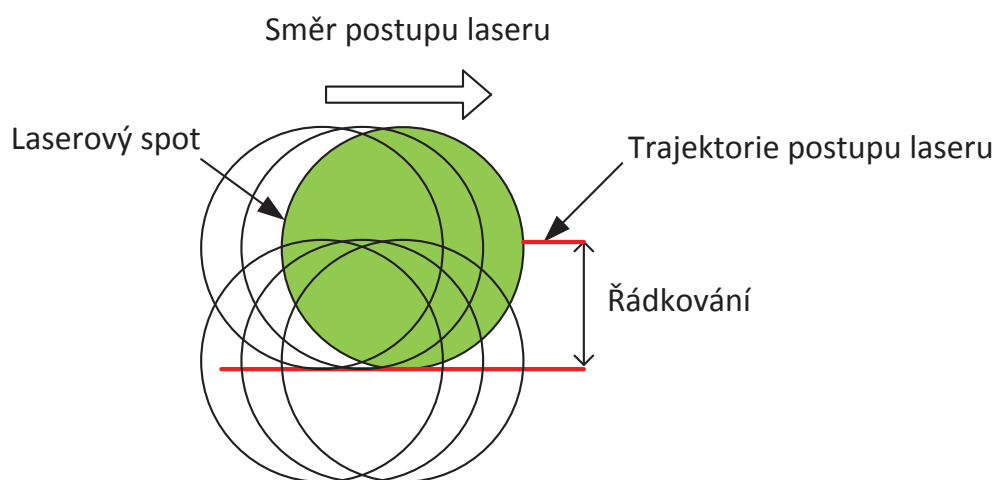
Lze nastavit tvar výplně, kterým se bude daná plocha odvrátávat. Tvar výplně lze volit různý v závislosti na možnostech SW, v praxi se však nejvíce používají tvary na obr. 5. Velmi účinná pro odběr materiálu je rovnoběžná výplň polohovaná, tj. taková, při které se po každém cyklu pootočí lineární výplň o zvolený počet stupňů. Obvykle bývá několik cyklů pootočení výplně.



Obr. 5 Příklady výplně pro čtvercové tvary (polohovaná výplň – první prochází kompletní výplň červená, pak kompletní modrá pootočená o úhel α)

Řádkování výplně [mm]

Udává, jak jsou od sebe daleko středy jednotlivých spotů v sousedních liniích. Čím je hodnota menší, tím je větší hustota.



Obr. 6 Znárodnění řádkování výplně

Ohnisková vzdálenost [mm]

Závisí na použitém objektivu. Pro laserové značení se používají f-theta objektivy, které díky svému optickému uspořádání fokusují laserový svazek do rovinné pracovní plochy. Vzdálenost objektivu a vzorku nazýváme pracovní vzdáleností. Při odvrtávání je pro dodržení konstantní velikosti laserového spotu nutné korigovat pracovní vzdálenost pomocí posouvání skenovací hlavy.

Parametry materiálu

Absorpce

Schopnost materiálu absorbovat vlnovou délku záření generovanou laserovým svazkem. Čím je absorpce vyšší, tím lépe se daný materiál odvrtává (lépe absorbuje energii laserového pulzu).

Tepelné vlastnosti

Důležitými parametry jsou tepelná vodivost a tepelná kapacita materiálu. Nelze obecně definovat vztah mezi těmito parametry a schopností odvrtávání materiálu.

2 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou taková napětí, která v materiálu existují bez působení vnějších vlivů. Zbytková napětí mohou ovlivňovat fyzikální vlastnosti materiálů, jako jsou strukturní a dimenzionální stabilita, odolnost proti únavě či popraskání. [11] [12] [13]

Příčinou vzniku zbytkových napětí jsou z velké části technologické a výrobní procesy (slévání, svařování, opracování, kalení, vlévání do formy, výroba kompozitních materiálů atd.). Další příčinou vzniku jsou také opravy či modifikace materiálu přímo během provozu. Zbytková napětí se mohou v menší míře objevit také při montáži či během životnosti materiálu (např. vlivem dlouhodobého zatížení či přetížení). [13]

2.1 Zjišťování zbytkových napětí

V této kapitole je čerpáno ze zdrojů [12][23]. Metody zjišťování zbytkových napětí lze rozdělit na několik různých typů.

- Výpočetní metody
- Experimentální metody

Výpočetní metody jsou do určité míry zjednodušeným matematickým modelem. Z historického hlediska se používaly metody analytické, dnes se používají metody numerické. Z numerických jde hlavně o metodu konečných prvků nebo o méně používané metody založené na neuronových sítích [16]. Nevýhodou výpočetních metod je ono nutné zjednodušení modelu a nutnost určení správných fyzikálních vlastností materiálu.

Základní rozdělení experimentálních metod je na destruktivní a nedestruktivní. Dále je lze dělit takto:

- Mechanické metody
- Difrakční metody
- Metody využívající fyzikálních vlastností materiálu

Mechanické metody jsou založeny na principu měření uvolněných napětí či nových napětí zanesených technologickým procesem. Princip spočívá v porušení materiálu, čímž dojde k uvolnění napětí. Toto uvolněné napětí registrujeme tenzometry jako deformaci. Mezi nejběžnější metody patří odvrtávací metoda (podrobněji kapitola 2.1.1), průhybová metoda, metoda dělení, metoda trhlin, metoda tepelné relaxace či indentační metoda.

„Difrakční metody jsou založeny na specifických vlastnostech rozptylu záření na krystalové mřížce. Využívá se tzv. konstruktivní interference záření, tj. výskytu maxim a minim intenzity rozptýleného záření v určitých úhlech (difrakčních čar) [12].“ Příkladem je rentgenová, neutronová či elektronová difrakce.

Metody využívající fyzikálních vlastností materiálu využívá změn vlastností materiálu po vystavení určitému napětí. Příkladem mohou být ultrazvukové, piezospektroskopické či elektromagnetické techniky.

2.1.1 Odvrtávací metoda

Jde o jednu z nejpoužívanějších experimentálních mechanických metod zjišťování zbytkových napětí. Jde o metodu destruktivní, někdy je ale vzhledem k velmi malému poškození materiálu označována jako semidestruktivní. Metoda spočívá v odvrtání malého otvoru (průměr typicky 1,8 – 2,0 mm) a důsledkem toho dojde k uvolnění napětí zanesených v materiálu. Uvolněná napětí jsou registrována nalepenými tenzometrickými růžicemi. Metoda je standardizována normou ASTM E 837-13a. V principu spočívá v několika následujících krocích: [14] [15]

- instalace tenzometrické růžice s minimálně třemi tenzometrickými členy
- připojení tenzometrické růžice k vhodnému měřicímu zařízení
- nastavení a připojení odvrtávacího zařízení
- nastavení nulové hloubky
- odvrtávání po jednotlivých krocích (vrstvách)
- zachycení uvolněných napětí (po každém odvrtávacím kroku)
- výpočet zbytkových napětí (nutno znát velikost otvoru, průměr tenzometrické růžice, vlastnosti materiálu a hodnoty uvolněných deformací)

Instalace tenzometrické růžice

Lepení bylo provedeno dle návodu HBM pomocí lepidla HBM Z70, lepící a teflonové pásky. Materiál byl před lepením v těchto místech ručně vyhlazen smirkovým papírem a důkladně očištěn isopropyl alkoholem.

Připojení tenzometrické růžice

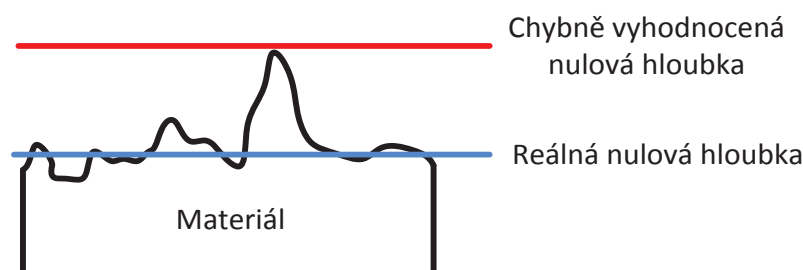
Pro připojení se používá můstková metoda (Wheatstoneův můstek). Dle počtu aktivních růžic lze provést zapojení do čtvrtmůstku (1 růžice), půlmůstku (2 růžice) či plného můstku (4 růžice). [24]

Nastavení odvrtávacího zařízení

Odvrtávací zařízení je sestaveno dle schématu, připojeno a oživeno. Pod zařízení je vložen vzorek a zařízení je pomocí stavěcích šroubů a úhelníku vyváženo tak, aby odvrtávání probíhalo kolmo na materiál. Stavěcí šrouby jsou poté aretovány. Integrovaným mikroskopem se záměrným křížem je zaměřen střed tenzometrické růžice. Dále jsou v SW nastaveny potřebné odvrtávací parametry.

Nastavení nulové hloubky

K nastavení nulové hloubky lze použít dvě metody. První metoda je elektrická, druhá optická. Elektrickou metodu lze využít u vrtání elektricky vodivých materiálů. Spočívá v připojení kontaktů na materiál a frézu a při dotyku frézy s materiálem dojde ke spojení elektrického obvodu a řídicí SW frézu zastaví – je nastavena nulová hloubka. Ovlivnit přesnost elektrické metody může drsnost materiálu. Jako kontakt s reálným povrchem je totiž vyhodnocen i kontakt s nejvýše vyčnívajícím bodem (obr. 7). Druhá metoda spočívá v připojení lupy či jiného zvětšovacího zařízení a sledování frézy a materiálu a optického vyhodnocení okamžiku dotyku. Tato metoda je méně přesná než metoda elektrická, lze ji ale využít i u nevodivých materiálů. Metody nastavení nulové hloubky se samozřejmě týkají pouze mechanického odvrtávání pomocí fréz, při laserovém odvrtávání je nulová hloubka nastavena již z principu. [15]

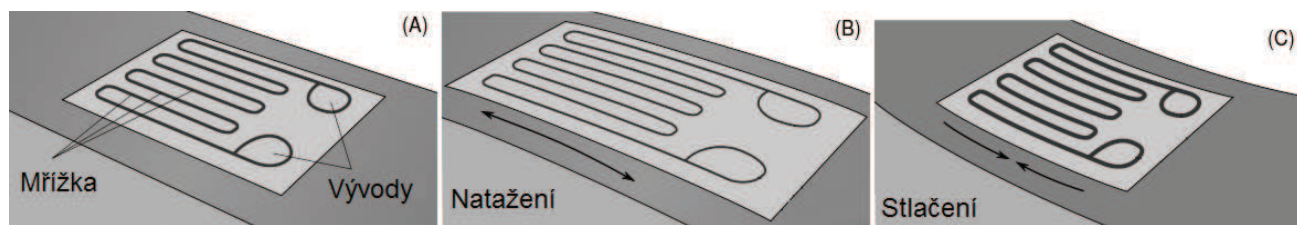


Obr. 7 Problém s drsností materiálu a vyhodnocení
nulové hloubky elektrickou metodou

Měření uvolněných deformací

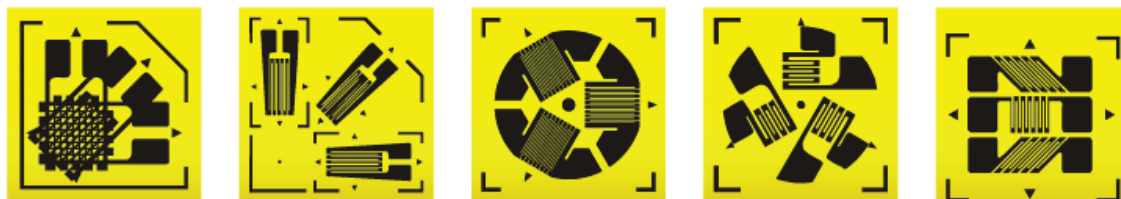
Měření uvolněných deformací je prováděno pomocí tenzometrů. Tenzometr je pasivní součástka, která převádí mechanické deformace na elektrické signály. Skládá se z tenzometrického členu (mřížky), nosné folie a vývodů (viz obr. 8). Hlavní předpoklad správné funkce tenzometru je jeho velmi pevné spojení s podkladem. To je zajištěno speciálním lepidlem a důkladným očištěním, odmaštěním a případným zdrsněním či zjemněním materiálu tak, aby spoj byl co nejpevnější a tenzometr se deformoval stejně jako materiál, na kterém je přilepen. Deformací materiálu se tenzometrický člen prodlužuje či zkracuje a mění tak svůj elektrický odpor. Na základě této změny jsme schopni odečítat deformaci materiálu.

Tenzometry lze (kromě množství dalších kritérií) rozdělit na lineární a růžicové. Lineární tenzometr obsahuje jednu mřížku s vývody, růžice obsahuje mřížek několik ve specifickém geometrickém uspořádání. Lineární tenzometry jsou vhodné na měření v jednom směru, tj. takové, ve kterém nás zajímá pouze jeden směr deformace. Růžice jsou vhodné pro měření všesměrové či takové, kde nevíme, v jakém směru budou deformace působit. [21] [28]



Obr. 8 Schéma funkce tenzometru [30]

- A) Nalepený lineární tenzometr nezatížený deformací
- B) Natažením tenzometru dochází ke zvětšení rezistence
- C) Stlačením tenzometru dochází ke snížení rezistence



Obr. 9 Různé typy tenzometrických růžic [31]

Výpočet zbytkového napětí

Pro výpočet zbytkového nehomogenního napětí lze použít několik metod. Jsou zde stručně popsány metody, které jsou dále použité v experimentu, ostatní metody jsou pro přehled jen uvedeny.

Integrální metoda

Jde o jednu ze základních metod vyhodnocení. Vychází z předpokladu, že deformace měřená na povrchu materiálu je kumulativní funkcí uvolněného zbytkového napětí v dané hloubce a celkové hloubky otvoru. Nedostatkem této metody je numerická nestabilita a citlivost na chyby měření ve větší hloubce otvoru. [12]

Metoda ekvivalentních homogenních napětí (EUS)

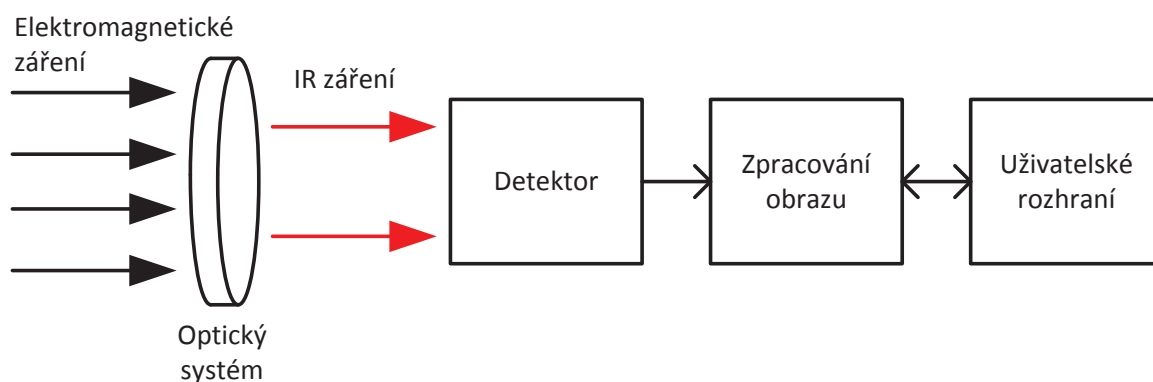
Metoda založena na principu náhrady skutečného nehomogenního napětí na dané hloubce otvoru homogenním napětím, které způsobí stejnou odpovídající deformaci. [12]

Ostatní metody

- Metoda průměrného napětí
- Metoda přírůstku deformace
- Metoda mocninných řad
- Spline metoda [12]

3 Termovizní měření

Termovizní měření spočívá v zachycení záření objektu v infračervené části spektra a jeho interpretaci ve viditelném spektru. Primárním zdrojem infračerveného záření je totiž teplo. Všechny objekty, které mají teplotu vyšší než je absolutní nula ($-273,15^{\circ}\text{C}$) vydávají infračervené záření. Infračervená termografie je proces přetvoření infračerveného obrazu do radiometrického, který umožňuje odečítání hodnot teploty. Každý pixel radiometrického obrazu sám o sobě zprostředkovává samostatné měření teploty. [17] [18] [19]



Obr. 10 Schéma termovizní kamery [17]

Optický systém

V současnosti se téměř výhradně využívá spojka vyrobená z germania bez možnosti optického zoomu. Na jejím povrchu je nanese antireflexní vrstva, která brání odražení IR záření na povrchu čočky. Čočka funguje také jako filtr – na její povrch dopadá veškeré elektromagnetické záření, čočka dále propouští jen IR složku. [17]

Detektor

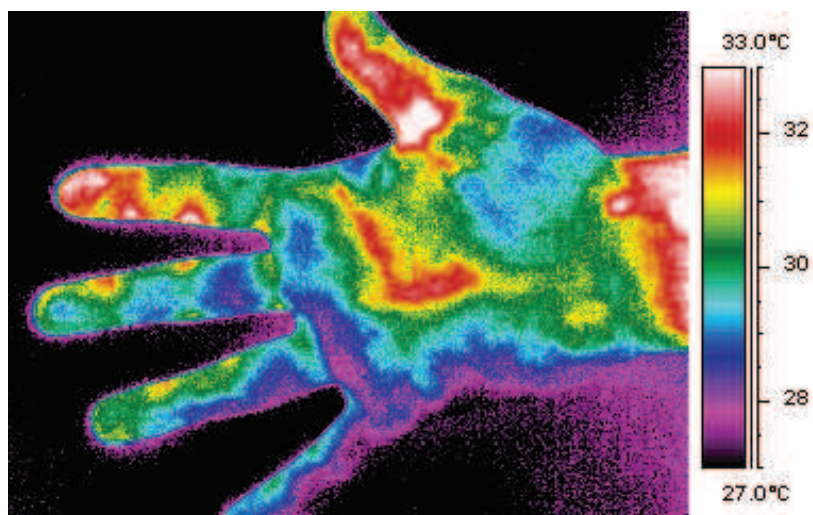
Detektor je citlivý na IR záření a toto záření převádí dále na elektrický signál pro další zpracování. Z hlediska principu a funkce lze rozlišovat dva typy detektorů – tepelný a fotonový. [17]

Tepelný detektor pracuje na principu změny elektrických vlastností s dopadajícím IR zářením. Příkladem takového detektoru je mikrobolometr. Využívá se principu mikrobolometrického 2D pole, tj. rozmístěním mikrobolometrů do matice o určité délce hrany. Jde o nejčastěji používaný typ detektoru. [17]

Fotonový detektor funguje na principu počítání kvant IR záření. Tento typ detektoru je citlivější než detektor tepelný, je však dražší. Termokamery jím vybavené jsou větší a těžší, protože fotonový detektor vyžaduje chlazení. Fotonové detektory jsou také oproti tepelným úzkopásmové (což je určitá daň za vysokou citlivost). [17]

Zpracování obrazu a uživatelské rozhraní

Jsou aplikovány komplexní algoritmy pro docílení co nejlepších výsledků a jejich interpretací. Pomocí SW dodávaného k termovizní kameře je možné si prohlédnout celý záznam z měření, měřit teplotu v různých bodech a oblastech a s různým nastavením (měřit maxima, minima, průměrné hodnoty). Z měření je také možné vytvořit termogram (tj. zobrazení rozložení teplotního pole v prostoru) nebo teplotní křivku (tj. závislost teploty na čase). [17] [19]



Obr. 11 Příklad termogramu [18]

4 Použité zařízení a materiály

4.1 Laserové odvrtávací zařízení

Pro náš experiment jsme použili laserové značící zařízení Lintech LLS-F20 P. Kromě vlastního zdroje laserového záření je důležitou součástí zdroj napájení a ovládání, skenovací hlava se zrcadlovým vychylovacím systémem s objektivem a řídicí karta laseru. K funkci je také nutný počítač s nainstalovaným softwarem Scaps SAMLight a USB rozhraním. [7]

Zdroj laserového záření

Zdroj laserového záření zde byl použit v uspořádání MOPA (tj. laserový zdroj + optický zesilovač) [9]. Jde o pulsní vláknový laser. Jeho maximální průměrný výkon je 20W a vlnová délka 1064 nm (IR). Z hlediska bezpečnosti jde o laser třídy IV (výkon > 0,5W, nutné ochranné brýle, nevystavovat oči ani pokožku přímému záření či odrazům [10]), ovšem při použití krytů se již řadí do třídy I (bez nutnosti ochranných pomůcek [10]). Zakrytování je u přístroje řešeno použitím plechů a dvířky se speciálním ochranným sklem.

Na zařízení je nainstalován ještě druhý laser o výkonu 2,5 mW a vlnové délce 650 nm (červená). Tento pomocný laser se využívá při zaměřování oblasti na opracovávaném předmětu. [7]

Optický systém

Skenovací hlava SCANcube 10 obsahuje zrcadlový vychylovací systém. Ten je tvořen dvěma zrcadly (jedno pro vychylování v ose X, jedno pro vychylování v ose Y) a řídicí elektronikou. Typická rychlost laserového značení materiálu je pro SCANcube 10 2,5m/s. S touto skenovací hlavou je efektivní pracovní plocha laseru 110x110 mm, ohnisková vzdálenost f-theta objektivu je 160 mm a ideální ohnisková pracovní vzdálenost je 268mm. [8]

Odsávání a filtrace

Laserový systém je dovybaven odsávací a filtrační jednotkou pro odvod odpařeného materiálu. Jsou použity HEPA filtry a uhlíkové aktivní filtry. Důvody používání jsou ochrana optických součástí laseru a ochrana zdraví před vdechováním výparů.



Obr. 12 Skenovací hlava SCANcube 10 [8]

4.2 Mechanické odvrtávací zařízení

Při experimentu byl použit odvrtávací systém MTS300-Restan od společnosti SINT Technology. Jde o vysokorychlostní mechanický odvrtávací systém se vzduchovou turbínou. Řídící SW dovede provést detekci nulové hloubky. Pro přesné nastavení odvrtné hloubky v jednom kroku je systém vybaven krokovým motorem. Součástí je také integrovaný mikroskop se záměrným křížem, který umožní přesné zaměření frézy (s přesností $\pm 20\mu\text{m}$). Zařízení je umístěno na třech výškově nezávisle nastavitelných podpěrách s možností aretace. Rychlost otáček turbíny je až 400 000 ot./min. [14]

4.3 Měřicí stanice

Jde o měřicí stanici typ Spider 8-30, která je schopna měřit až s frekvencí 600 Hz. Stanice má 8 vstupních kanálů a při nedostatku kanálů možnost propojení s další měřicí stanicí. Je osazena sériovým (RS-232) a paralelním (LPT-1) výstupem a 8 bit digitálním vstupem-výstupem. Pro obsluhu stanice byl použit SW catman Easy, který umožňuje předpřipravení měřících úkolů a grafů přesně na míru měření. Je možné upravovat nastavení pro zobrazované grafy online během měření. SW provádí i analýzu získaných dat a je možné data exportovat v různých formátech pro další zpracování. [20] [22]

4.4 Tenzometrické růžice

Pro měření deformací byly použity tenzometrické růžice od firmy HBM, typ 1,5/120RY61S. Jde o růžice s geometrickým uspořádáním třech mřížek $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$. Růžice jsou určeny k měření zbytkových napětí odvrtávací metodou. Geometrické uspořádání tenzometrických členů umožňuje uprostřed růžic odvrtat otvor. Nosná folie růžic je z polyimidu, mřížka samotná ze slitiny konstantan. [21, strana 66]



Obr. 13 Schéma růžice HBM $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$ [21]

4.5 Termovizní kamera

K termoviznímu měření byla použita kamera Micro Epsilon TIM 160. Jde o lehkou, kompaktní a velmi odolnou kameru s rozlišením obrazu 160x120 pixelů. Kamera dovede snímat obraz rychlostí až 100 snímků za sekundu. Je použitý tepelný typ detektoru ve formě 2D mikrobolometrického pole. Napájení a datový přenos jsou zajištěny rozhraním USB 2.0. Rozměry kamery jsou 45x45x62 mm, stupeň krytí je IP67 (prachotěsná, chráněna proti ponoření do vody do hloubky 1 m po dobu 30 minut). [33]



Obr. 14 Kamera Micro Epsilon TIM 160 [32]

4.6 Mikroskopy

Hirox

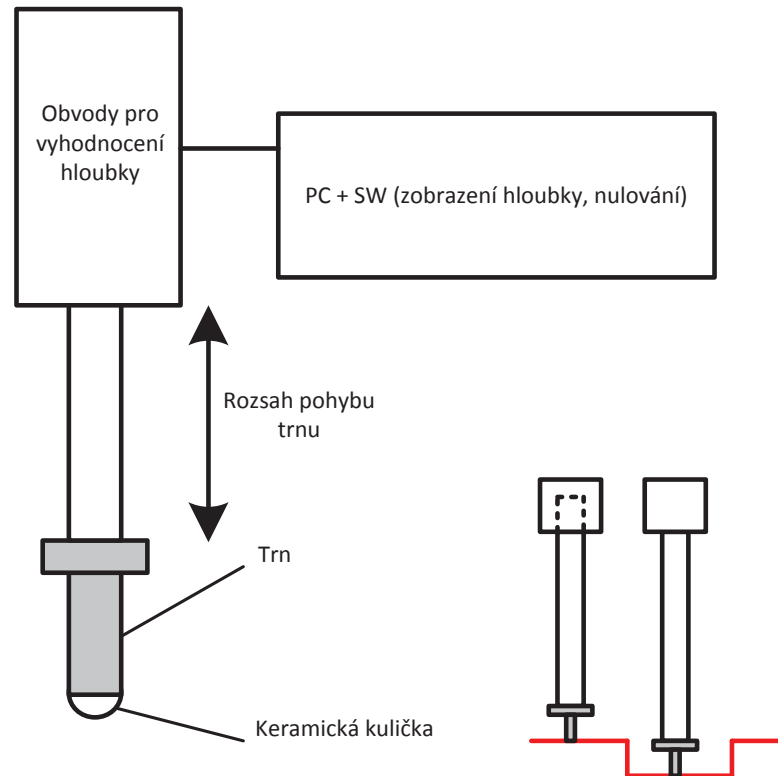
Použit byl digitální mikroskop Hirox KH-7700 pro mikroskopickou analýzu při zvětšení 5-3500x. Mikroskop umožňuje vytvářet 3D obraz, 2D a 3D měření, skládání obrazu a nahrávání videa při otáčení 360°. [34]

Olympus

Dalším použitým mikroskopem byl Olympus LEXT OLS3000 s maximálním zvětšením 14400x, rozlišením v ose X a Y 0,12 μm . Mikroskop umožňuje barevnou 3D rekonstrukci povrchů a měření drsnosti povrchu. [35]

4.7 Mikrometr

Měření hloubky u optimalizace rychlosti a řádkování výplně bylo provedeno pomocí dotykového mikrometru Essa typ: SM 60.81-DCH-3.0-CA9 s keramickou kuličkou jako hrotem. Mikrometr byl připojen k PC a pomocí SW bylo prováděno odečítání hodnot a nulování. U každé měřené díry bylo pomocí SW provedeno nulování, tj. určení nulové hladiny, od které se bude hloubka měřit. Z důvodu větší přesnosti bylo nulování provedeno pro každý měřený otvor individuálně.



Obr. 15 Schéma dotykového mikrometru a měření

4.8 Materiály

Křemík

Zkušebním vzorkem byl jednostranně leštěný křemíkový plátek dopovaný fosforem o rozměrech 75 x 30 x 2 mm.

Mosaz

Zkušebním vzorkem byl mosazný válec o průměru 50mm a výšce 40mm. Bližší specifikace materiálu nebyla k dispozici.

Ocel

Zkušebním vzorkem byla ocelová destička (ocel ČSN 11525) o rozměrech 100 x 100 x 8 mm. Pro účely tenzometrického měření byla tato destička opískovaná.

5 Experiment

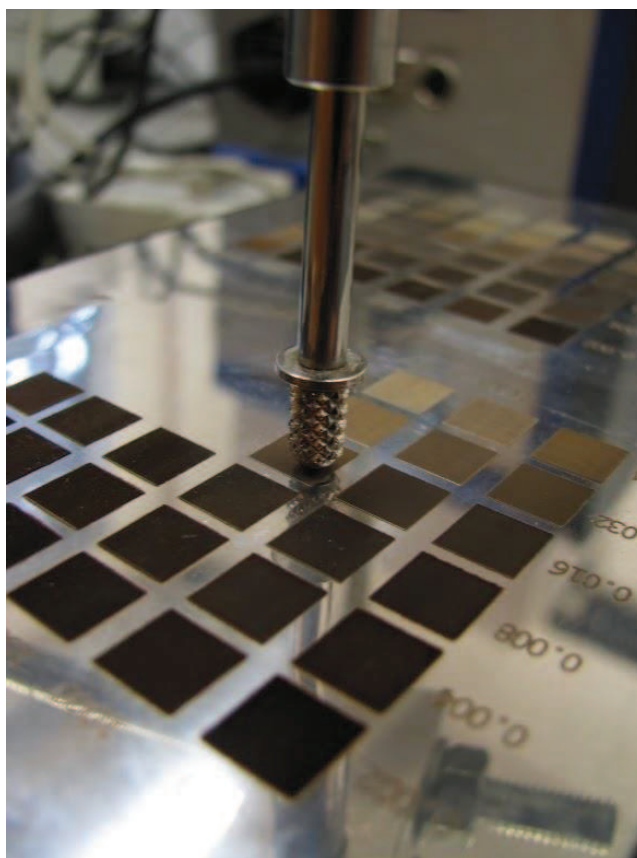
První část experimentu byla zaměřena na optimalizaci rychlosti odvrtávání materiálu pomocí laseru a určení vhodných parametrů nastavení laseru. Odvrtávání a optimalizace byla provedena na třech materiálech – ocel, mosaz a křemík. Optimalizace spočívala v dosažení maximálního úbytku materiálu za sekundu. Cílem bylo najít vhodné nastavení laseru (řádkování výplně a rychlost posuvu) a ověřit schopnost laseru odvrtávat tyto tři materiály.

Druhou částí experimentu bylo porovnání ovlivnění materiálu při klasickém mechanickém odvrtávání frézou s odvrtáváním pomocí laseru. Jako materiál byla jako jeden z nejvíce používaných konstrukčních materiálů zvolena ocel. Během experimentu bylo provedeno měření pomocí tenzometrů a termovizní kamery. Vzorky byly také zkoumány mikroskopicky v řezu a po zaleptání. Cílem experimentu bylo ověřit možnost použití laseru pro odvrtávací metodu měření zbytkových napětí a porovnat výsledky ovlivnění materiálu laserem a HSD technologií (měřením deformací, termovizním měřením a zkoumáním materiálových řezů). Výsledky ovlivnění materiálu z hlediska deformací byly porovnány s experimentem z diplomové práce O. Soukupa [11], kde byl použit jiný typ laseru (pevnolátkový iontový Nd:YAG) a jiné materiály pro odvrtávání (cermetový povlak na litině). Dalším cílem bylo vyhodnotit a porovnat tvar otvorů vytvořených HSD technologií a laserem.

5.1 Optimalizace rychlosti

První částí našeho experimentu byla optimalizace rychlosti odvrtávání. Bylo cílem dosáhnout co největšího odběru materiálu v závislosti na čase. Nejprve bylo zvoleno několik rychlostí posuvu a řádkování z celého rozsahu a poté jsme přeměřili hloubku dotykovým mikrometrem. Hloubka byla měřena na dvou místech otvoru, pak byly obě hodnoty zprůměrovány. Pro změřený přírůstek materiálu byla hloubka označována jako záporná. K takovému zdánlivému přírůstku hmoty dochází nejvíce při vysokých rychlostech posuvu a malé hodnotě řádkování. Je to způsobeno tím, že laserové spoty se díky vysoké rychlosti velmi málo překrývají a na materiálu vznikají krátery s vyvýšeným okrajem, který je pak vyhodnocen jako přírůstek materiálu. Po vytvoření grafů byly vyhodnoceny rychlosti a některé z parametrů jako vhodné. Dalším krokem bylo zabývat se obdobným experimentem jen se zaměřením na první pohled vhodné parametry a jejich

blízké okolí. Časy odvrtávání ukazoval SW laseru. Experiment byl proveden pro ocel, křemík a mosaz.



Obr. 16 Měření dotykovým mikrometrem

5.1.1 Ocel

Ocel byla již odvrtána a částečně měřena v předcházejícím experimentu [25]. V diplomové práci bylo pouze doměřeno několik chybějících dat dotykovým mikrometrem a ta byla následně zpracována. Ocel byla optimalizována jen v jednom kroku.

Pozn. hodnoty v tabulkách označené písmenem x nebyly dostupné [25].

Tab. 1 Hloubka změřená mikrometrem

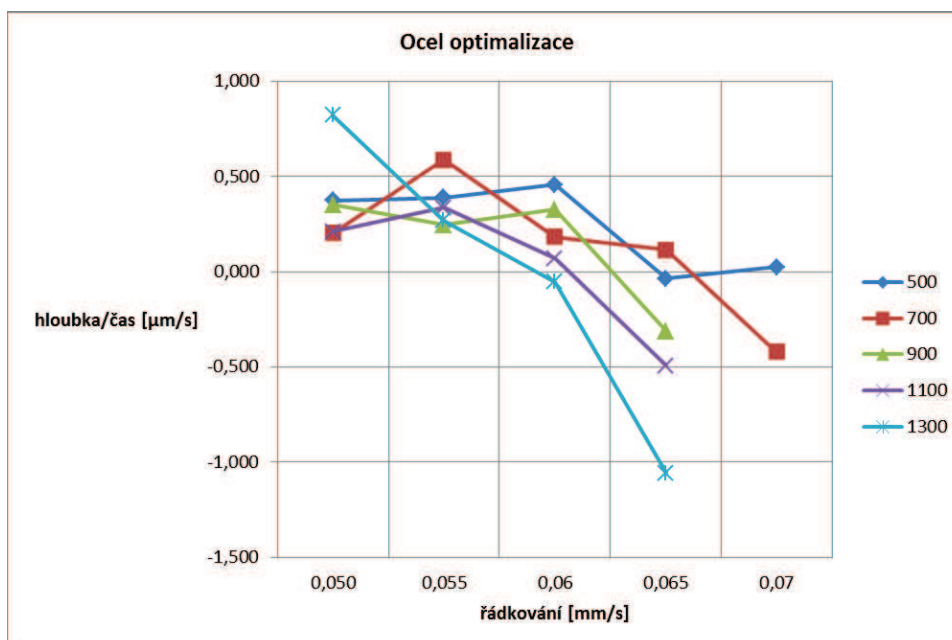
Hloubka - 50 cyklů [μm]	rychlost [mm/s]				
řádkování [mm]	500	700	900	1100	1300
0,05	40	16	22	11	37
0,055	38	42	14	16	11
0,06	41	12	17	3	-2
0,065	-3	7	-15	-20	-37
0,07	2	-24	X	X	X

Tab. 2 Časy potřebné pro vrtání

čas odvrtávání [s]	rychlost [mm/s]				
řádkování [mm]	500	700	900	1100	1300
0,05	107,000	78,500	62,500	52,000	45,000
0,055	97,500	71,500	57,000	47,500	41,000
0,06	89,500	65,500	52,000	43,500	37,500
0,065	82,500	60,500	48,000	40,500	35,000
0,07	77,500	57,000	45,000	38,000	32,500

Tab. 3 Poměr hloubka-čas

hloubka/čas [$\mu\text{m/s}$]	rychlost [mm/s]				
řádkování [mm]	500	700	900	1100	1300
0,050	0,374	0,204	0,352	0,212	0,822
0,055	0,390	0,587	0,246	0,337	0,268
0,06	0,458	0,183	0,327	0,069	-0,053
0,065	-0,036	0,116	-0,313	-0,494	-1,057
0,07	0,026	-0,421	x	x	x



Graf 2 Poměr hloubka-čas ocel měření 2

Závěr ocel

Z grafu je patrné, že nejlepší parametry z hlediska optimalizace rychlosti odběru materiálu jsou: řádkování 0,050 mm a rychlost posuvu 1300 mm/s.

Při těchto parametrech byl odběr materiálu **0,822 $\mu\text{m/s}$** . Hodnota je v tab. 3 označena zeleně.

5.1.2 Křemík

Tab. 4 Hloubka změřená mikrometrem

Hloubka - 5 cyklů [μm]	rychlost [mm/s]											
řádkování [mm]	500		1000		1500		2000		2500		3000	
0,004	224	229	147	148	60	95	7	4	-2	-3	-2	1
0,016	87	91	59	60	13	14	0	3	-1	0	-1	2
0,064	-2	1	2	1	1	0	-2	-2	-1	-1	-1	1

Tab. 5 Zprůměrované hodnoty hloubky

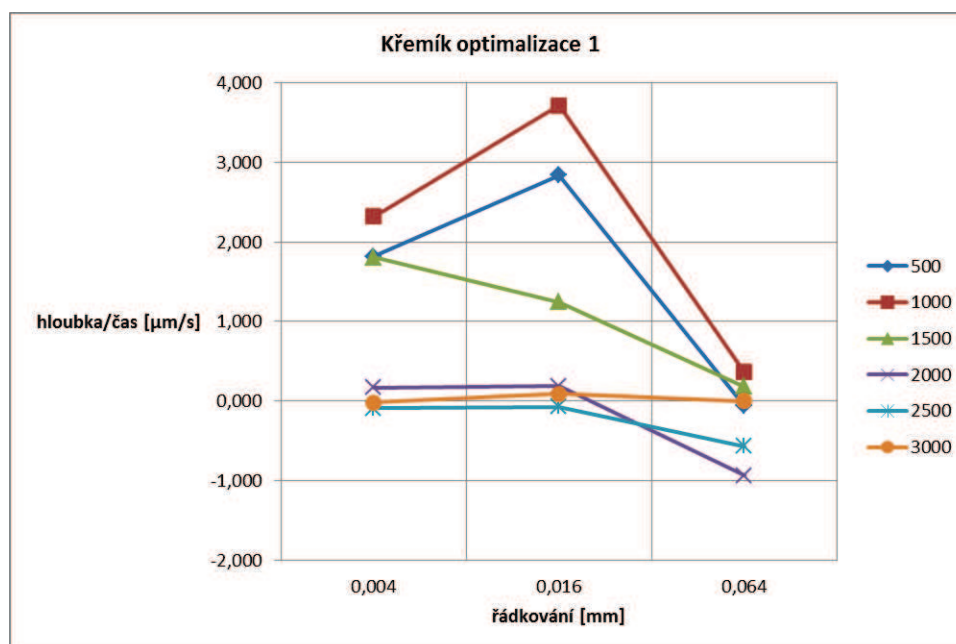
AVG hodnoty hloubka [μm]	rychlost [mm/s]					
řádkování [mm]	500	1000	1500	2000	2500	3000
0,004	226,5	147,5	77,5	5,5	-2,5	-0,5
0,016	89,0	59,5	13,5	1,5	-0,5	0,5
0,064	-0,5	1,5	0,5	-2,0	-1,0	0,0

Tab. 6 Časy potřebné pro vrtání

časy odvrtávání [s]	rychlost [mm/s]					
řádkování [mm]	500	1000	1500	2000	2500	3000
0,004	124,690	63,620	42,985	32,490	26,545	22,440
0,016	31,400	16,040	10,845	8,205	6,715	5,685
0,064	8,090	4,155	2,815	2,140	1,760	1,500

Tab. 7 Poměr hloubka-čas

hloubka/čas	rychlost [mm/s]					
řádkování [mm]	500	1000	1500	2000	2500	3000
0,004	1,817	2,318	1,803	0,169	-0,094	-0,022
0,016	2,834	3,709	1,245	0,183	-0,074	0,088
0,064	-0,062	0,361	0,178	-0,935	-0,568	0,000



Graf 3 Poměr hloubka-čas 1

Z grafu vyplývá, že nejvyššího odběru za čas je dosahováno pro řádkování 0,016 mm a rychlost posuvu 1000 mm/s. Následující měření tedy zaměříme kolem těchto hodnot.

Tab. 8 Hloubka změřená mikrometrem

Hloubka - 5 cyklů [mm]	rychlost [mm/s]							
řádkování [mm]	800		1000		1200		1400	
0,015	66	67	57	56	47	47	26	31
0,030	38	40	29	26	22	18	17	14
0,045	26	23	22	22	17	16	9	9
0,060	3	4	-4	6	1	-1	1	3

Tab. 9 Zprůměrované hodnoty hloubky

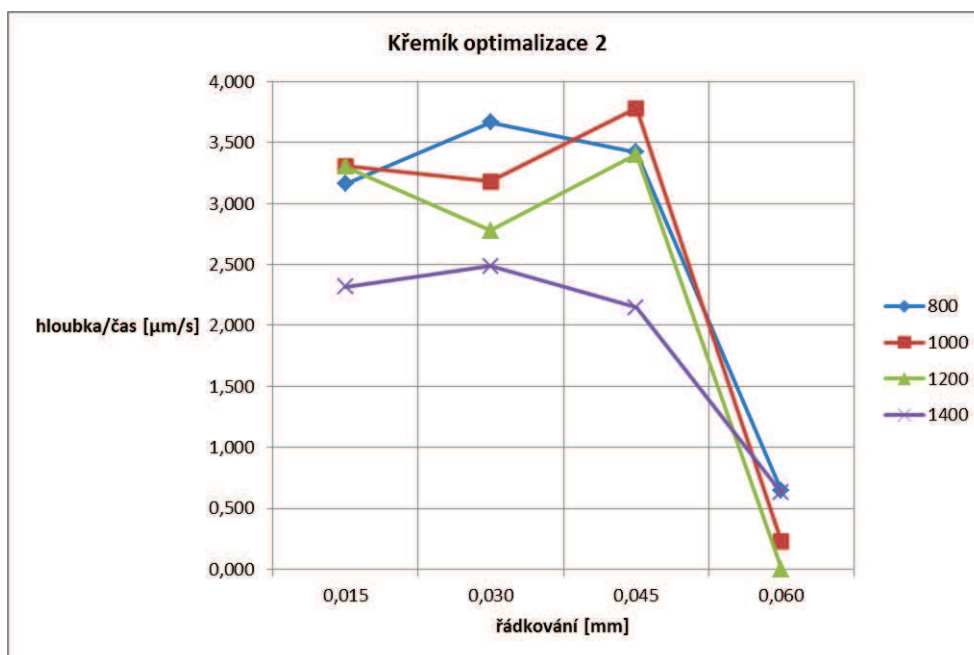
AVG hodnoty hloubka [um]	rychlost [mm/s]			
řádkování [mm]	800	1000	1200	1400
0,015	66,5	56,5	47	28,5
0,030	39	27,5	20	15,5
0,045	24,5	22	16,5	9
0,060	3,5	1	0	2

Tab. 10 Časy potřebné pro vrtání

čas odvrtávání [s]	rychlost [mm/s]			
řádkování [mm]	800	1000	1200	1400
0,015	21,045	17,090	14,230	12,310
0,030	10,640	8,645	7,200	6,230
0,045	7,160	5,820	4,850	4,195
0,060	5,420	4,405	3,670	3,180

Tab. 11 Poměr hloubka-čas

hloubka/cas	rychlost [mm/s]			
řádkování [mm]	800	1000	1200	1400
0,015	3,160	3,306	3,303	2,315
0,030	3,665	3,181	2,778	2,488
0,045	3,422	3,780	3,402	2,145
0,060	0,646	0,227	0,000	0,629



Graf 4 Poměr hloubka-čas 2

Závěr křemík

Z druhého cyklu je patrné, že nejlepší parametry z hlediska optimalizace rychlosti odběru materiálu jsou: řádkování 0,045 mm a rychlost posuvu 1000 mm/s.

Při těchto parametrech byl odběr materiálu **3,780 μm/s**. Hodnota je v tab. 11 označena zeleně.

5.1.3 Mosaz

Tab. 12 Hloubka změřená mikrometrem

Hloubka - 15 cyklů [μm] řádkování [mm]	rychlost [mm/s]									
	500		1000		1500		2000		2500	
0,004	377	390	213	209	54	53	-40	-67	-32	-16
0,016	91	87	67	50	24	18	47	-9	-30	-32
0,064	-40	-43	-26	-24	-40	-52	-67	-145	-39	-74

Tab. 13 Zprůměrované hodnoty hloubky

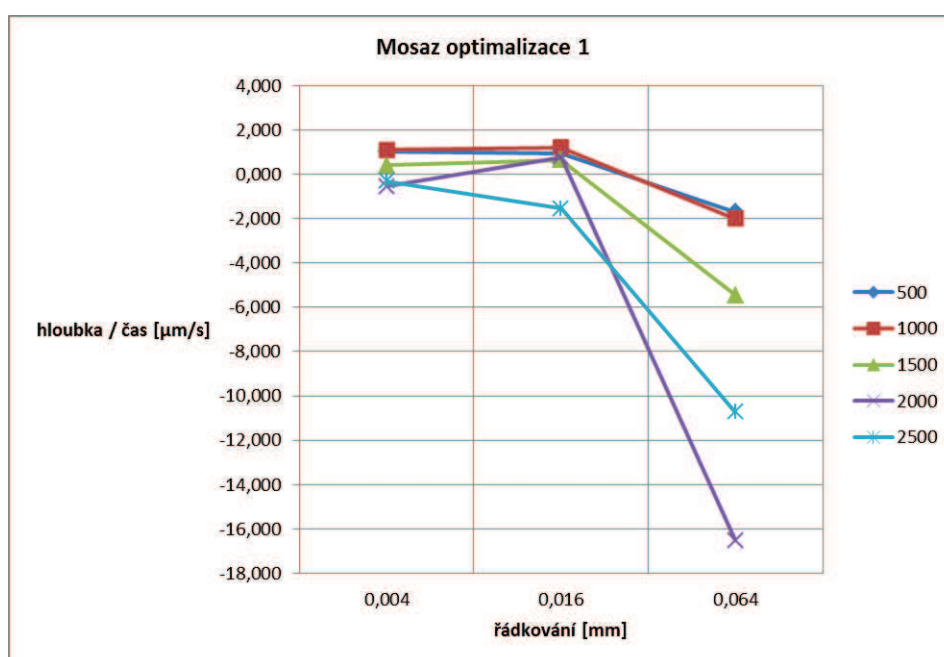
AVG hodnoty hloubka [μm] řádkování [mm]	rychlost [mm/s]				
	500	1000	1500	2000	2500
0,004	383,5	211	53,5	-53,5	-24
0,016	89	58,5	21	19	-31
0,064	-41,5	-25	-46	-106	-56,5

Tab. 14 Časy potřebné pro vrtání

časy odvrátání [s]	rychlost [mm/s]				
řádkování [mm]	500	1000	1500	2000	2500
0,004	374,085	190,860	128,955	97,470	79,635
0,016	94,200	48,120	32,535	24,630	20,145
0,064	24,285	12,465	8,445	6,420	5,265

Tab. 15 Poměr hloubka-čas

hloubka/čas	rychlost [mm/s]				
řádkování [mm]	500	1000	1500	2000	2500
0,004	1,025	1,106	0,415	-0,549	-0,301
0,016	0,945	1,216	0,645	0,771	-1,539
0,064	-1,709	-2,006	-5,447	-16,511	-10,731



Graf 5 Poměr hloubka-čas 1

Z grafu vyplývá, že nejvyššího odběru za čas je dosahováno pro řádkování 0,016 mm a rychlost posuvu 1000 mm/s. Následující měření tedy zaměříme kolem těchto hodnot. Vyšší hodnoty řádkování jsou zřejmě nevhodné, řádkování tedy odstupňujeme jemněji. Pro dvě nejmenší hodnoty řádkování také není vidět výrazný rozdíl pro různé rychlosti, rychlosti také odstupňujeme jemněji.

Tab. 16 Hloubka změřená mikrometrem

Hloubka - 15 cyklů [μm]	rychlost [mm/s]											
řádkování [mm]	800		1000		1250		1500		1750		2000	
0,015	99	80	69	72	61	59	12	9	-17	-11	-32	-30
0,030	47	48	44	41	36	37	15	18	-20	-19	-23	-24
0,045	40	32	33	38	21	21	0	0	-22	-25	-20	-21

Tab. 17 Zprůměrované hodnoty hloubky

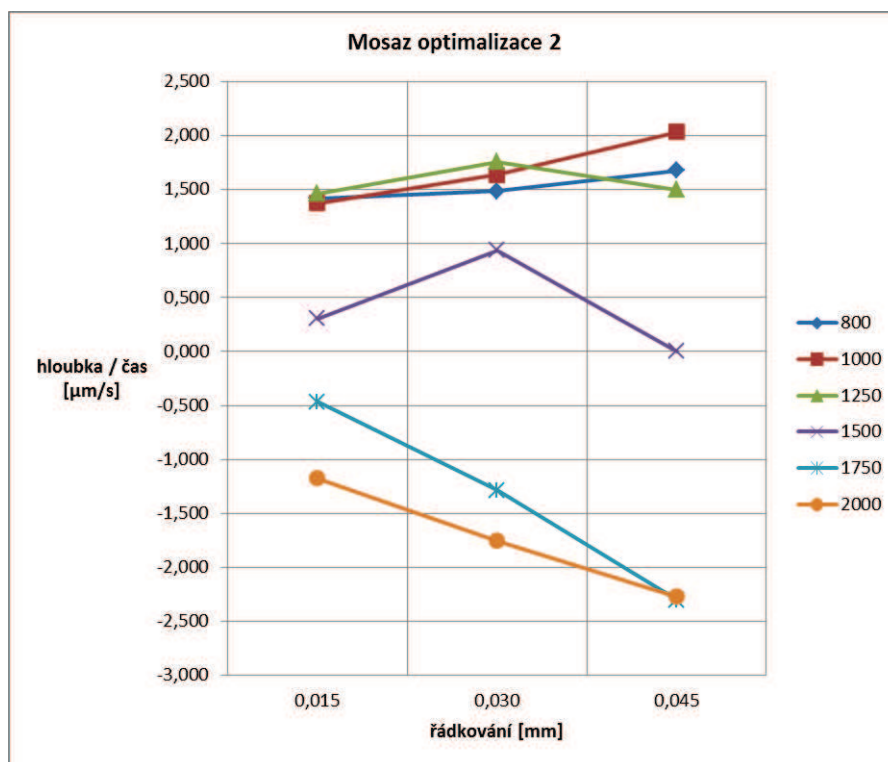
AVG hodnoty hloubka [μm]	rychlost [mm/s]					
řádkování [mm]	800	1000	1250	1500	1750	2000
0,015	89,5	70,5	60	10,5	-14	-31
0,030	47,5	42,5	36,5	16,5	-19,5	-23,5
0,045	36	35,5	21	0	-23,5	-20,5

Tab. 18 Časy potřebné pro vrtání

časy odvtávání [s]	rychlost [mm/s]					
řádkování [mm]	800	1000	1250	1500	1750	2000
0,015	63,135	51,285	41,025	34,680	29,895	26,415
0,030	31,935	25,950	20,760	17,565	15,150	13,395
0,045	21,480	17,475	13,995	11,820	10,215	9,030

Tab. 19 Poměr hloubka-čas

hloubka/čas	rychlost [mm/s]					
řádkování [mm]	800	1000	1250	1500	1750	2000
0,015	1,418	1,375	1,463	0,303	-0,468	-1,174
0,030	1,487	1,638	1,758	0,939	-1,287	-1,754
0,045	1,676	2,031	1,501	0,000	-2,301	-2,270



Graf 6 Poměr hloubka-čas 2

Z druhého cyklu je patrné, že nejlepší parametry z hlediska optimalizace rychlosti odběru materiálu jsou stejné jako v případě křemíku, tj. řádkování 0,045 mm a rychlost posuvu 1000 mm/s. Při těchto parametrech byl odběr materiálu **2,031 $\mu\text{m/s}$** . Hodnota je v tab. 19 označena zeleně.

5.1.4 Shrnutí optimalizace

Tab. 20 Výsledné optimální hodnoty

	ocel	křemík	mosaz
rychlost [mm/s]	1300	1000	1000
řádkování [mm]	0,050	0,045	0,045
odběr materiálu [$\mu\text{m/s}$]	0,822	3,780	2,031

Z výše uvedených výsledků lze vyhodnotit, že při určitém nastavení se všechny tři testované materiály dají dobře odvrátat laserem. Největšího odběru za sekundu bylo dosaženo u křemíku, pak u mosazi a nakonec u oceli. Z tab. 20 je také vidět, že optimální parametry jsou stejné pro mosaz i křemík a pro ocel se je jen mírně vyšší rychlost a hrubší řádkování. Pro další měření byla použita ocel, jako zástupce jednoho z nejpoužívanějších konstrukčních materiálů.

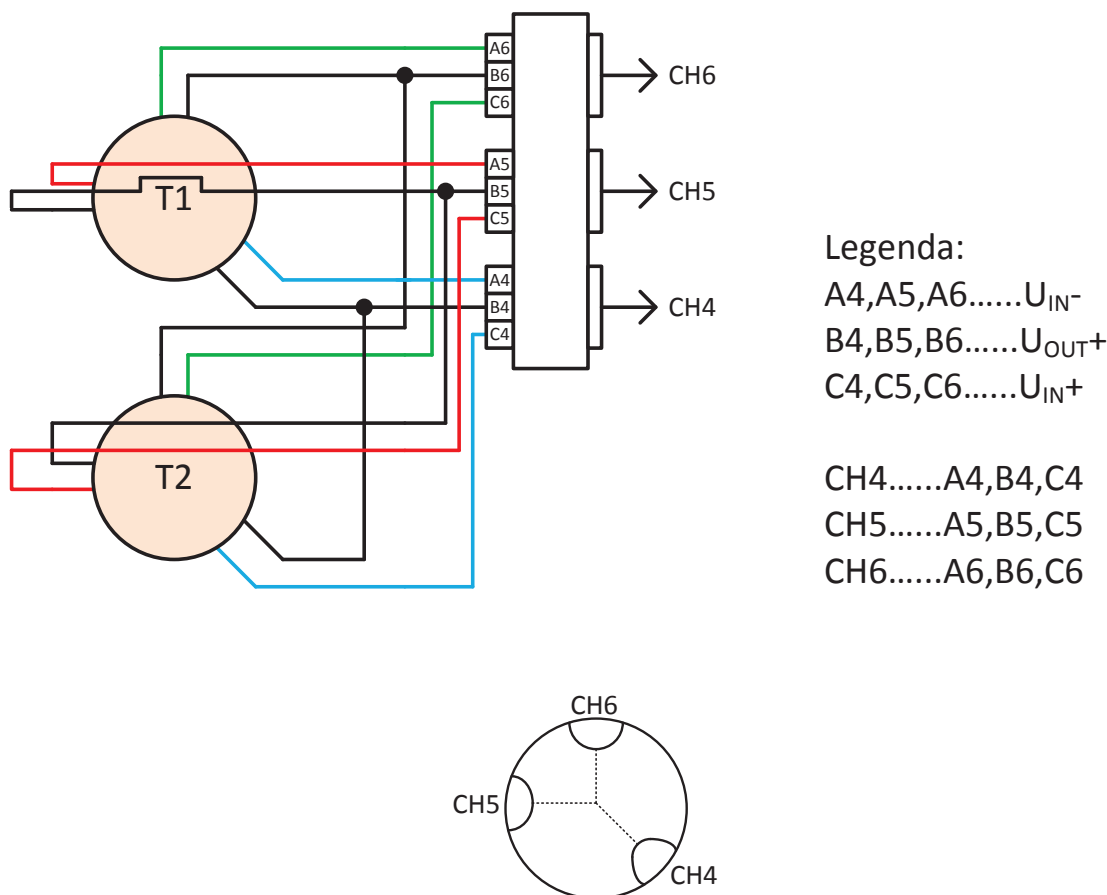
5.2 Termomechanické měření

Další částí experimentu je termomechanické měření a vyhodnocení ovlivnění materiálu při vrtání laserem a HSD frézou. Pro vyhodnocení ovlivnění materiálu bylo použito tenzometrické měření, termovizní měření a odleptané řezy materiálu, které by měly odhalit případné strukturální změny materiálu. Pomocí řezů a mikroskopu byla také vyhodnocena geometrická kvalita otvorů.

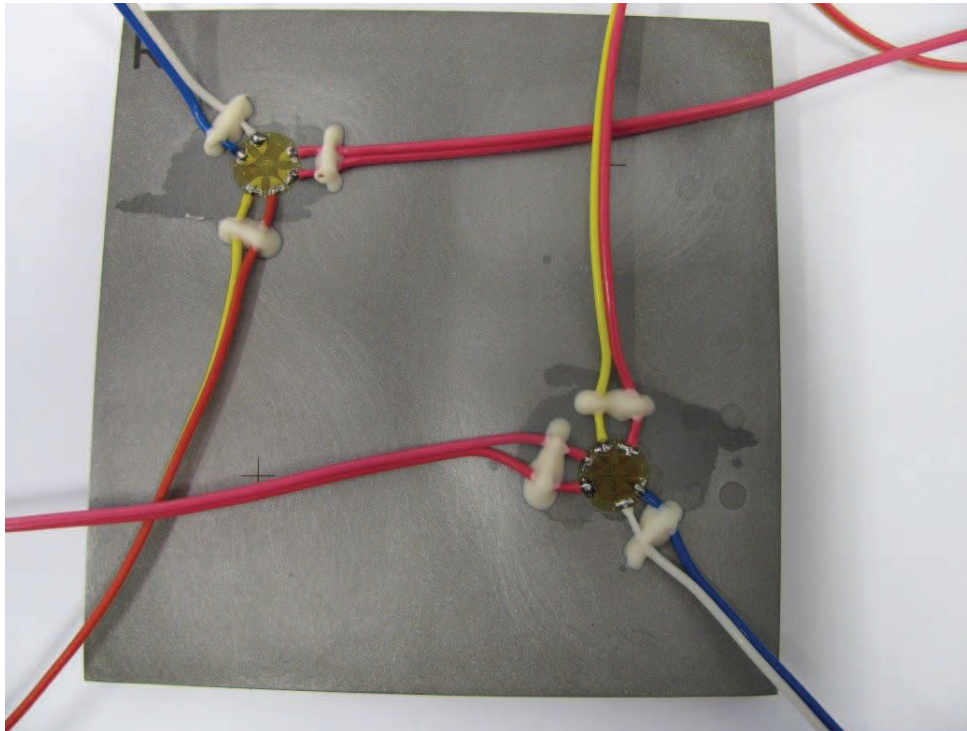
5.2.1 Zapojení tenzometrických růžic

Dle návodu (více kapitola 2.1.1.) byly nalepeny tenzometrické růžice HBM. Nalepeny byly dvě růžice, z nichž vždy jedna sloužila jako měřicí a druhá jako kompenzační. Důvodem tohoto zapojení je kompenzace vnějších vlivů a teplotního ovlivnění měření. Měřicí systém reaguje pouze na rozdíly v deformacích mezi růžicemi.

Tenzometry byly před měřením ověřeny ohmmetrem, zda je vždy mezi dvěma vývody jedné tenzometrické mřížky výrobcem udávaných 120Ω . Jelikož růžice byly dvě, byly zapojeny do měřicího půlmůstku. [20] [24]



Obr. 17 Zapojení vývodů tenzometrických růžic do svorkovnice (T1 měřicí, T2 kompenzační)



Obr. 18 Vzorek s přilepenými tenzometrickými růžicemi

5.2.2 Postup pro odvrtávání laserem

Jak bylo zmíněno v teoretickém úvodu, laser využívá vysokou energii soustředěnou na malou plochu tak, aby materiál odpařil. Bylo tedy předpokládáno, že ovlivnění materiálu bude v případě laseru větší než u frézy. Postup pro měření vrtání laserem byl následující:

- vytvoření pracovních ploch v SW catman Easy
- vytvoření vzoru pro vrtání v SW Scaps SAMLight
- provedení testovacího měření na testovacím vzorku a nastavení vhodné frekvence měření
- testovací odvrtání lineárních tenzometrů na testovacím vzorku
- optimalizace časové prodlevy ustalování vzorku dle testovacího měření
- připojení tenzometrických růžic ke svorkovnici a svorkovnici ke stanici Spider8
- připojení Spider8 k PC s catman Easy
- připojení a zaostření termokamery a nastavení SW
- provedení korekce nastavení středu (viz dále)

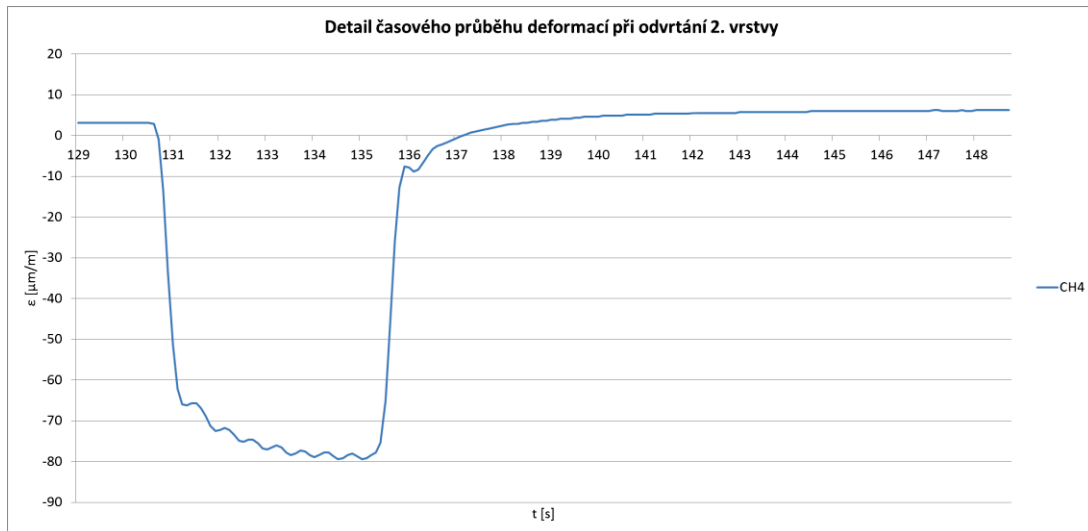
- odvrtání tenzometrické růžice – jednotlivé lineární výplně s vizuální kontrolou odvrtání růžice
- nulování catman Easy
- spuštění vrtání v programu Scaps SAMLight
- odečítání hodnot a kontrola průběhu
- uložení naměřených dat

Testovací měření - frekvence

V našem případě bylo nastaveno 10 Hz. Tuto frekvenci jsme zvolili jako kompromis mezi množstvím dat z relativně dlouhého měření a trvání jevů, které bychom chtěli zachytit. Nejkratší jev který by nás zajímal byl jeden odvrtávací cyklus (tj. 10 lineárních polohovaných průchodů a kontura), který trvá asi 500 ms. Z toho tedy plyne, že frekvence těchto průchodů jsou 2 Hz a dle Shannonova vzorkovacího teorému by měla být vzorkovací frekvence nejméně dvojnásobná (tedy min. 4 Hz). Pro jistotu jsme tedy zvolili frekvenci více než dvojnásobnou, tj. 10 Hz. Provedli jsme i zkušební měření pro 50 Hz, kde výstupní data vypadala stejně jako pro 10 Hz, tudíž nemá význam pro naše účely vyšší frekvenci než 10 Hz využívat.

Testovací měření – čas ustálení

Z měření na testovacím vzorku bylo vidět, že ustálení po odvrtání jedné vrstvy je poměrně rychlé (přibližně 10 sekund). U testovacího vzorku jsme volili záměrně delší čas (120 sekund) mezi odvrtáním jednotlivých vrstev tak, aby bylo ustálení splněno s dostatečnou rezervou. Na základě těchto dat bylo možné při odvrtávání dalšího vzorku velmi zredukovat počet dat, a to na čtvrtinu tím, že byla nastavena prodleva mezi odvrtáváním jednotlivých vrstev na 30 sekund.



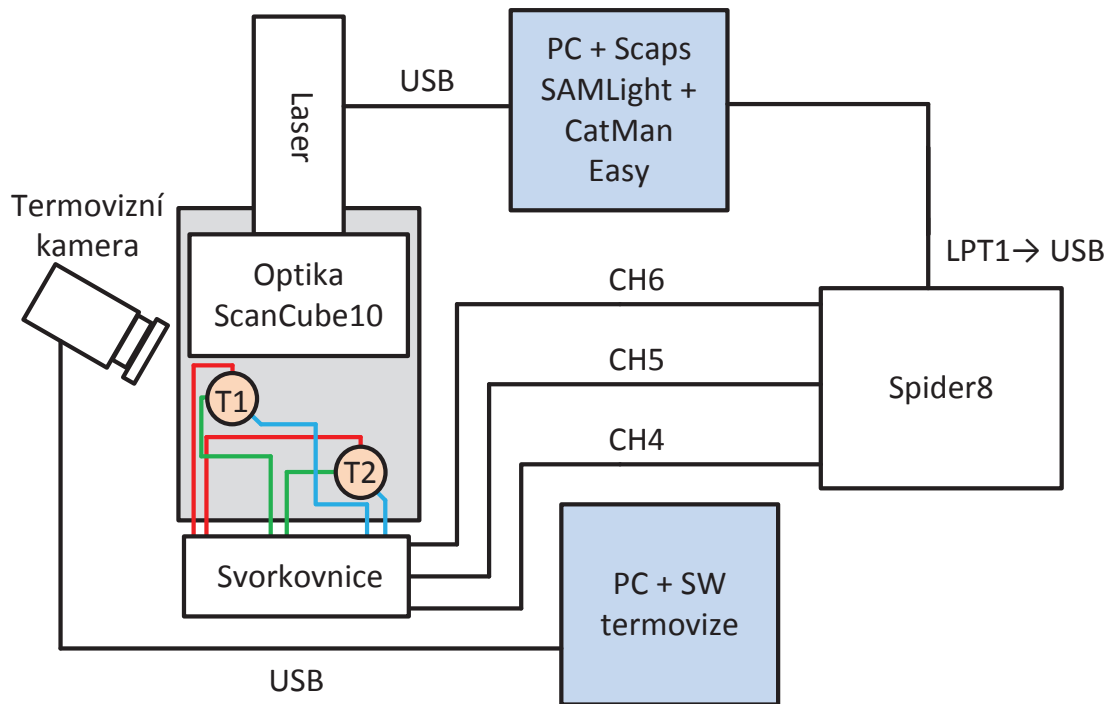
Graf 7 Testovací měření – detail odvrtání jedné vrstvy

Nastavení laseru

Průměr vytvářeného otvoru byl 1,8 mm, cílová hloubka 0,5 mm. Odvrtáno bylo 40 vrstev materiálu. Jedna vrstva představovala 10 lineárních polohovaných výplní otvoru a jednu kruhovou konturu. Po každých 9ti vrstvách byla optika laseru posunuta o 13 μm dolů (otvor je stále hlubší, je třeba korigovat vzdálenost laseru od materiálu, aby byla dodržena pracovní vzdálenost 268 mm). Odběr na jednu vrstvu představuje 14,7 μm [26].

Parametry laseru [26]:

- rychlost posuvu: 1300 mm/s
- řádkování: 0,055 mm
- výkon: 95%
- nabíjecí proud: 95%
- délka pulzu: 65 ns
- frekvence: 65 kHz



Obr. 19 Schéma pracoviště laser

Nastavení středu

Pro technologii laserového vrtání bylo nutné provést korekci nastavení laseru tak, aby byl vrtaný otvor přesně uprostřed tenzometrické růžice. Nejprve bylo na pokusném vzorku pomocí mikroskopu ověřeno, že pokud se destička založí do dorazů na pracovní plochu laseru, označí, opět založí a opět označí, značka bude na stejném místě. Strategie korekce byla po tomto ověření následující:

- označení na destičce křížem body pro nalepení tenzometrických růžic
- nalepení růžic s co největší přesností tak, aby lícovale kříž na růžici s křížem na materiálu
- změření mikroskopem posunu kříže na růžici vůči kříži na destičce v osách x a y
- nastavení posunutí v ovládacím SW laseru

posunuta nahoru a vpravo. V SW k ovládání laseru bylo tedy nutné provést korekci a laserový paprsek zaměřit o 28,5 μm nahoru a o 40,5 μm vpravo (viz tab.21)

Tab. 21 Změřené posuvy a průměrné hodnoty

zvětšení	300x	100x	průměr
posuv osa X [μm]	43	38	40,5
posuv osa Y [μm]	26	31	28,5

5.2.3 Postup pro vysokorychlostní odvrtávání

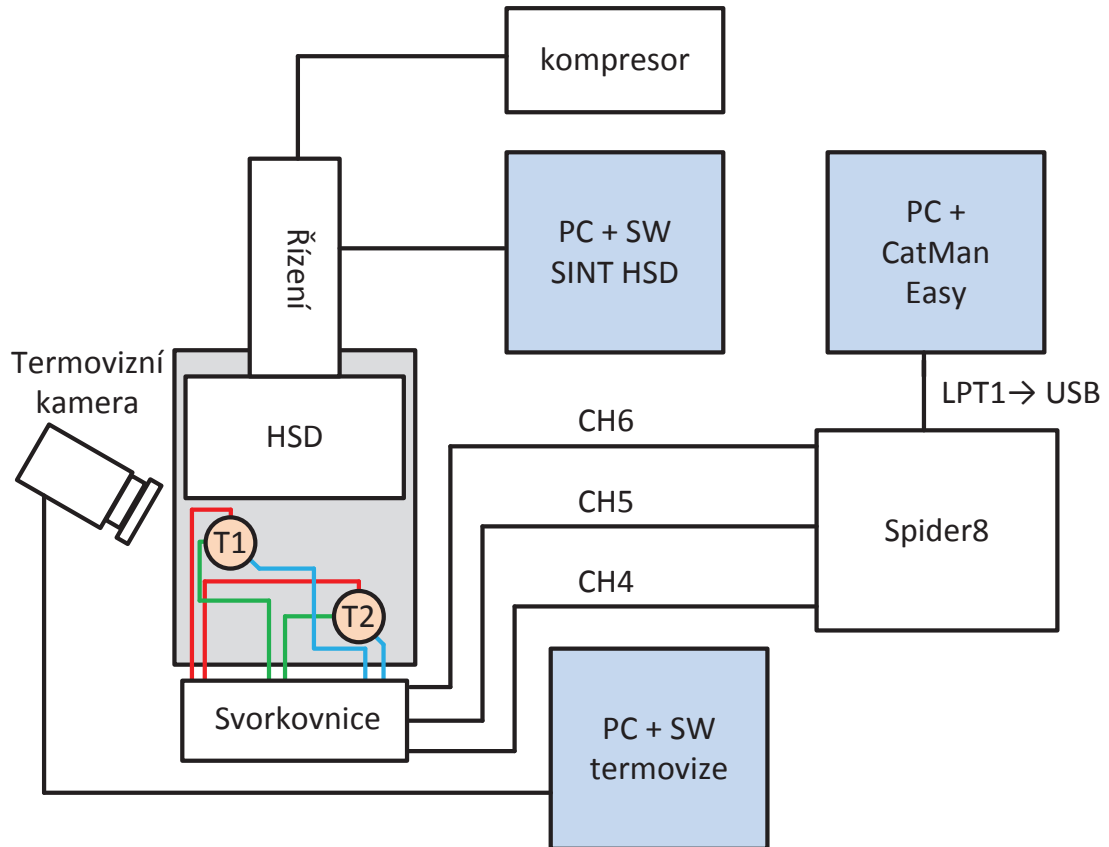
- vytvoření pracovních ploch v SW CatMan Easy
- připojení tenzometrů ke svorkovnici a tu ke stanici Spider8
- připojení Spider8 k PC s CatMan Easy
- zaměření středu tenzometrické růžice záměrným křížem pomocí integrovaného mikroskopu na HSD fréze
- připojení a zaostření termovizní kamery a nastavení SW
- odvrtání tenzometrické růžice – nastavení nulové hloubky
- nulování catman Easy
- spuštění vrtání v SW SINT HSD
- odečítání hodnot a kontrola průběhu
- uložení naměřených dat

Nastavení HSD

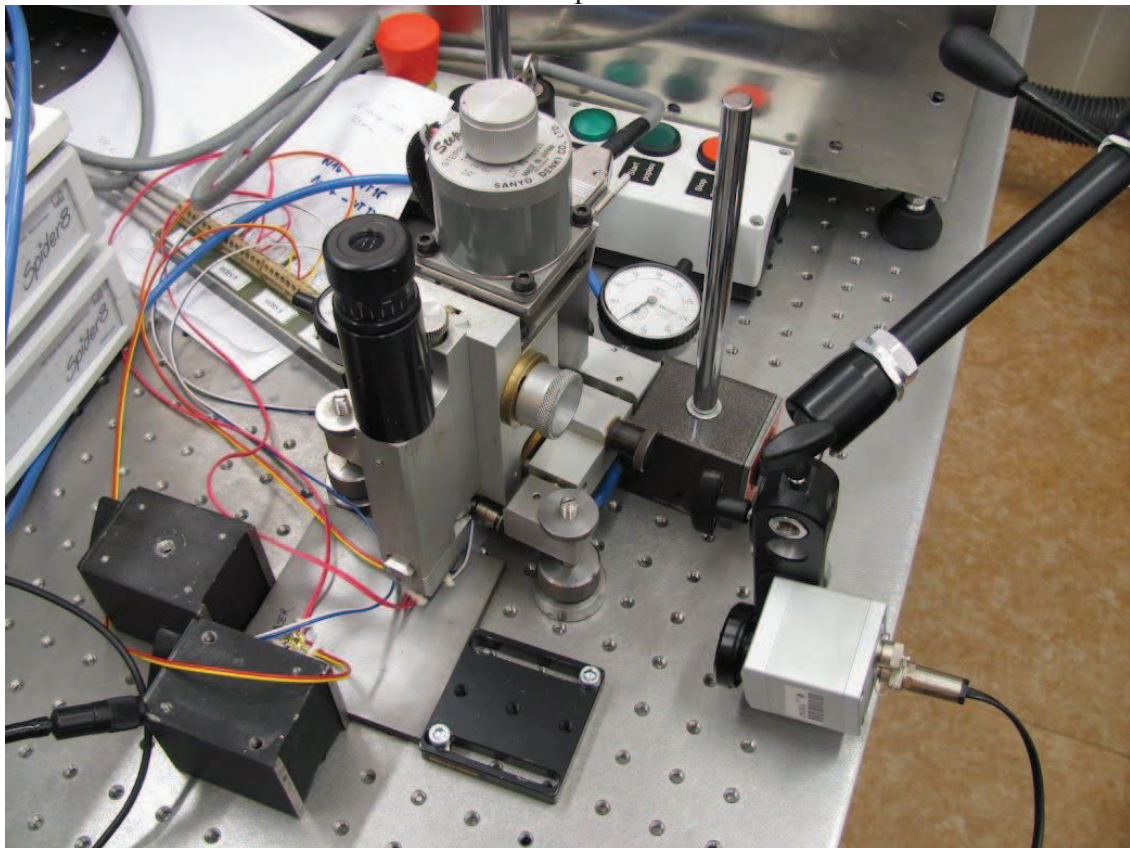
Průměr vytvářeného otvoru byl 1,8 mm, cílová hloubka 0,5 mm. Vrtáno bylo ve 32 krocích s následujícími parametry.

Parametry HSD:

- odběr materiálu / 1 krok = 20 μm
- rychlost odběru materiálu = 0,9 mm / min.



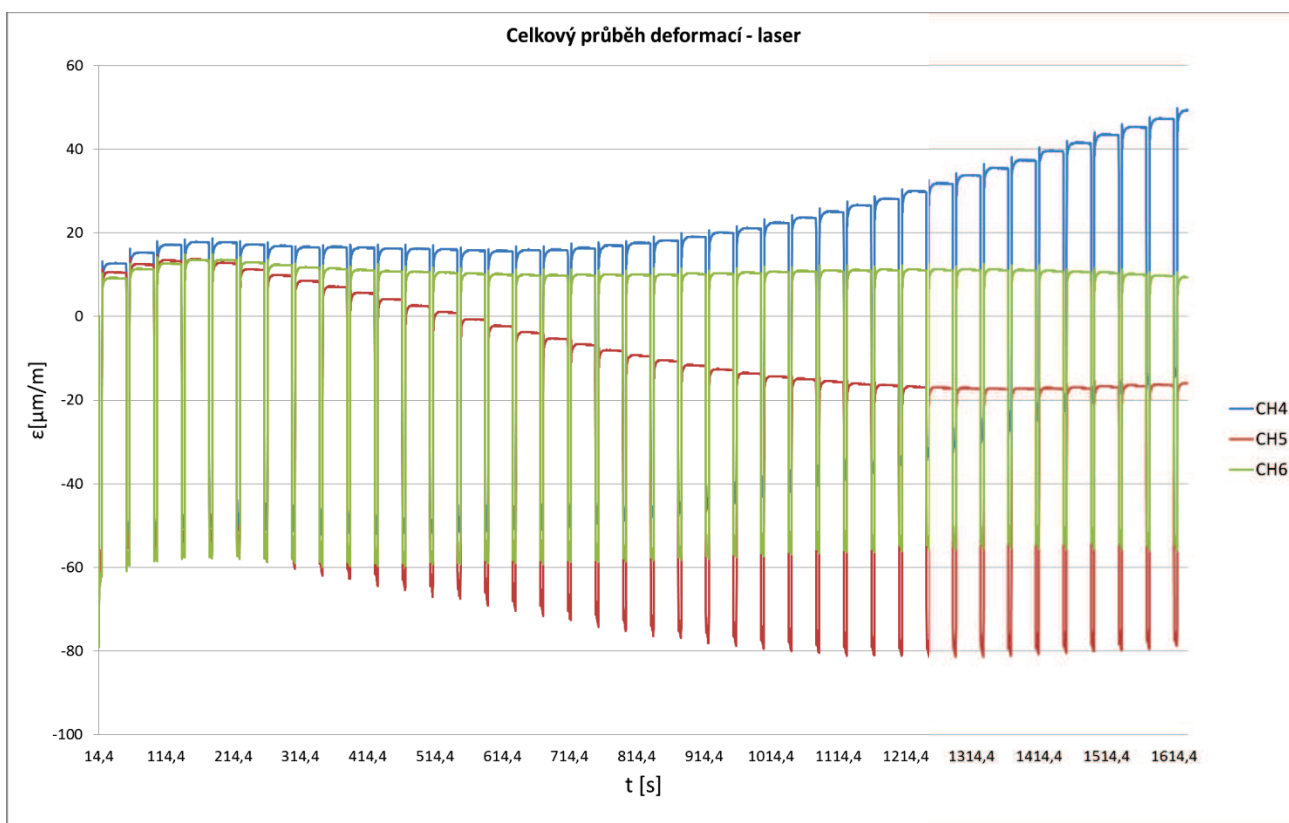
Obr. 22 Schéma pracoviště HSD



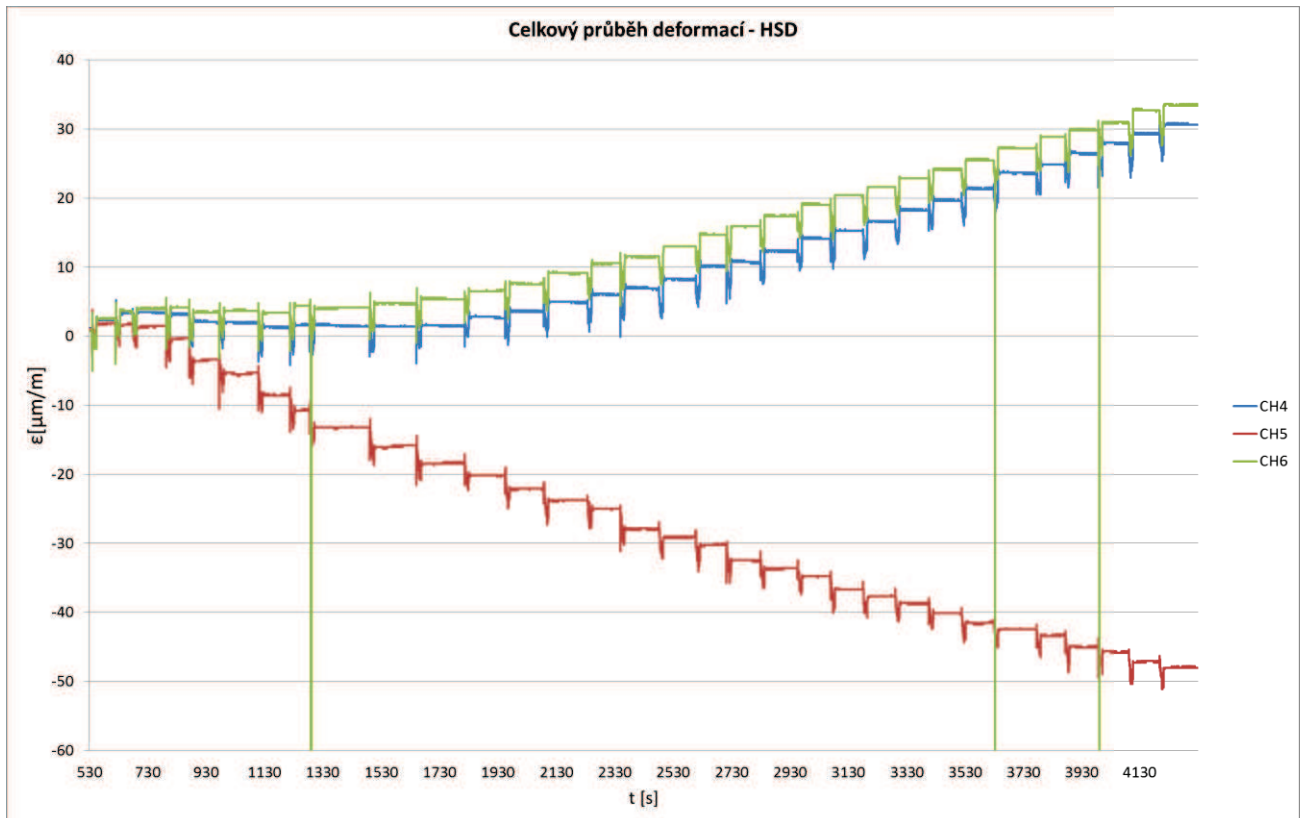
Obr. 23 Pracoviště - HSD vrtací systém a termovizní kamera (vpravo dole)

5.2.4 Tenzometrická data

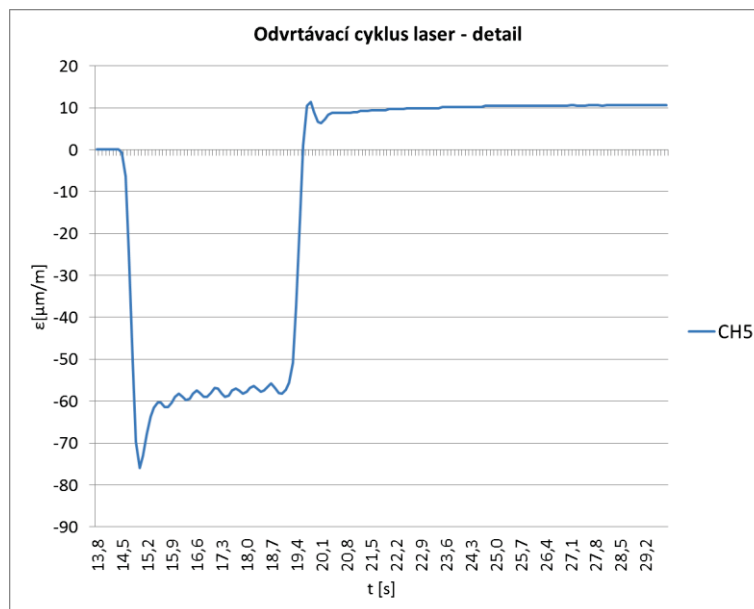
Následující část obsahuje data z tenzometrického měření. Na grafech je vidět celkový průběh odvtávání laserem (Graf 8) a HSD frézou (Graf 9). V grafu pro HSD jsou na všech kanálech patrné tři hodnoty – chyby měření, způsobené zřejmě vnějším rušením experimentu. V těchto bodech dosahovaly ϵ nelogických hodnot kolem 9000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Tyto hodnoty považujeme za chybu měření a neovlivňují ostatní grafy ani výpočty. Dále jsou zde detailní grafy jednoho vybraného odvtávacího cyklu pro laser (Graf 10) a HSD frézu (Graf 11). Na Grafu Z je patrné porovnání celkových uvolněných deformací pro laser a HSD v závislosti na směru deformace a v posledních grafech je znázorněna velikost uvolněných deformací v závislosti na odvtané vrstvě.



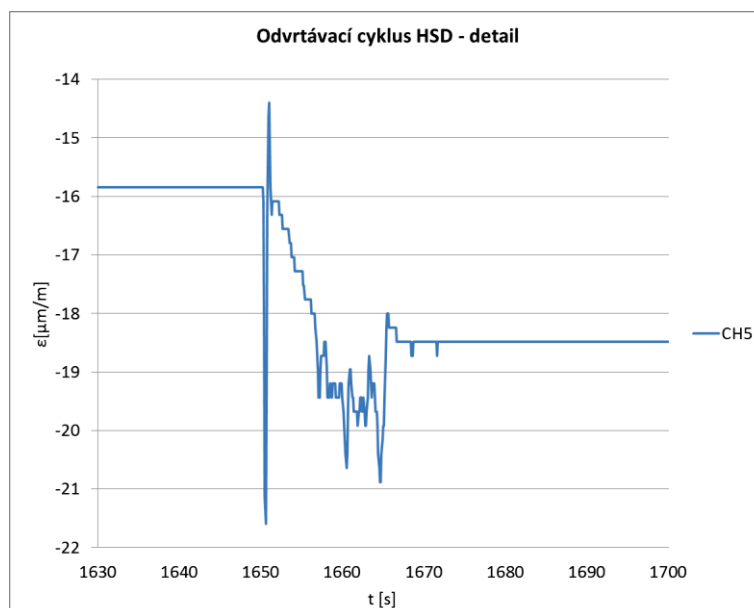
Graf 8 Průběh deformací v závislosti na čase laser



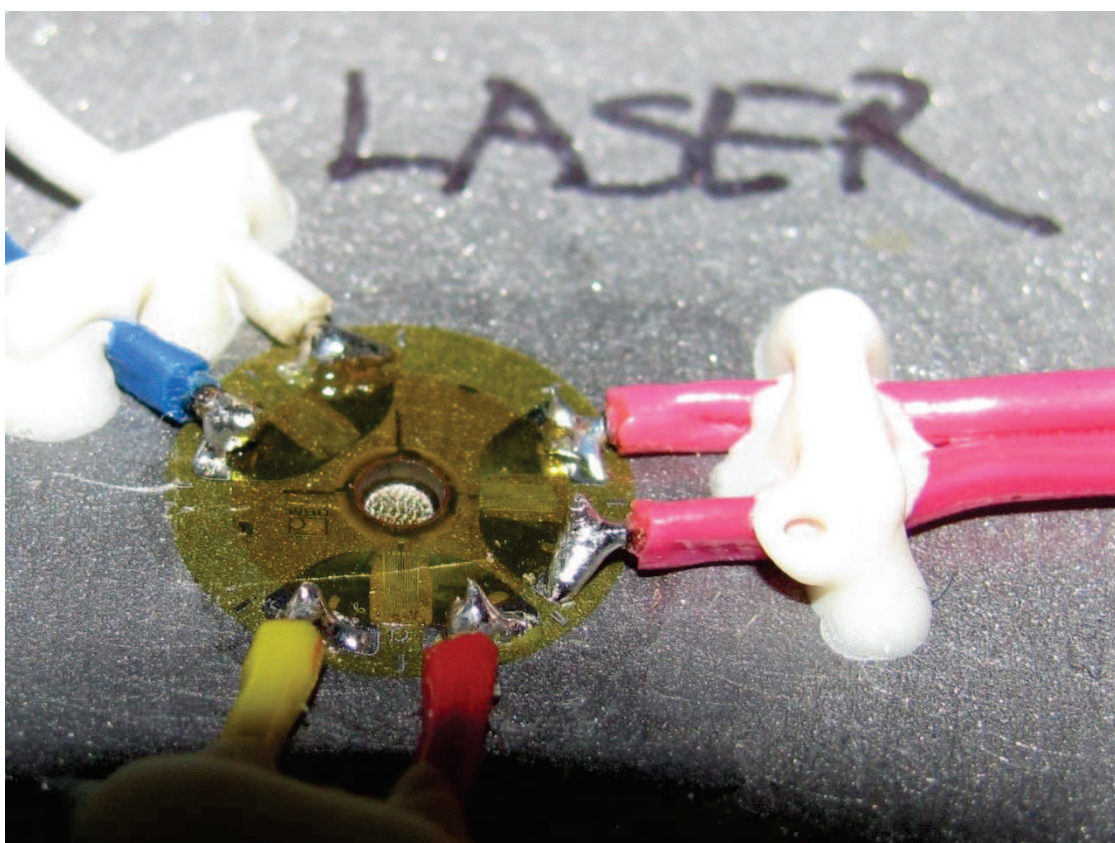
Graf 9 Průběh deformací v závislosti na čase HSD



Graf 10 Detail odvrtávacího cyklu laser



Graf 11 Detail odvrtávacího cyklu HSD

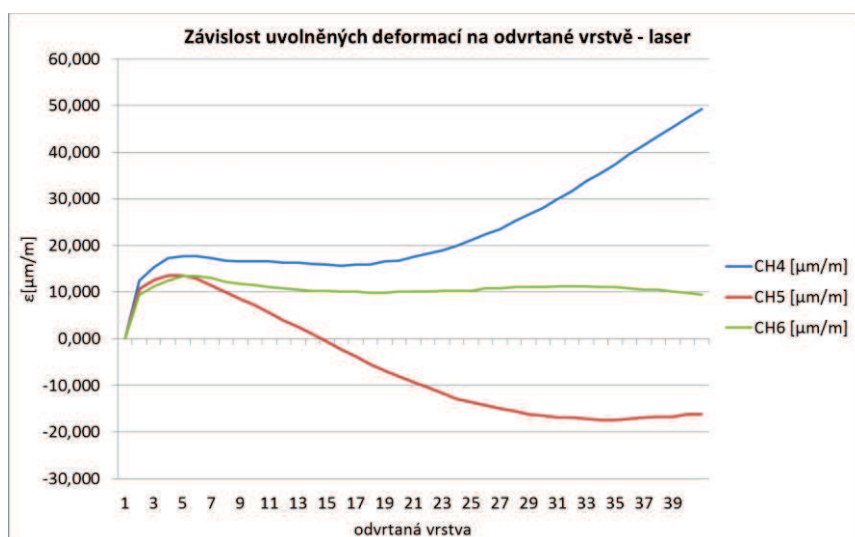


Obr. 24 Otvor odvrtaný laserem

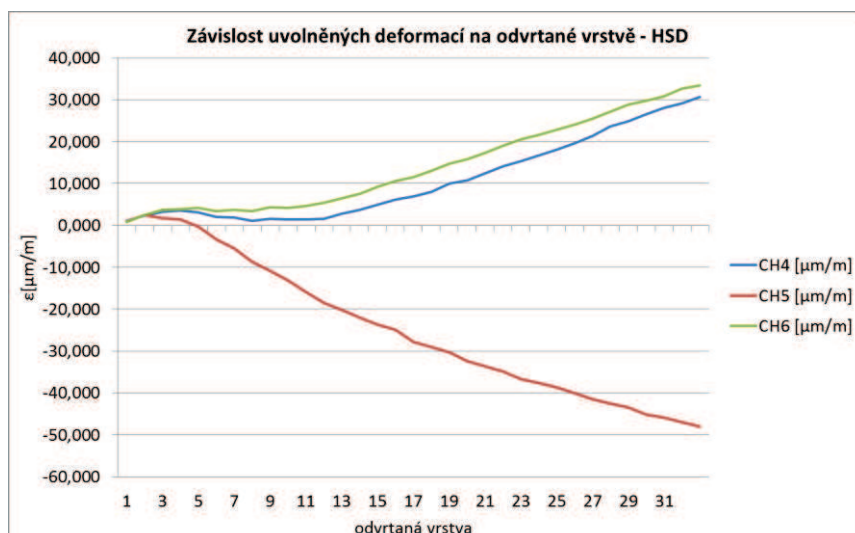


Obr. 25 Otvor odvrtaný HSD (na obr. s použitou frézou)

Z výše uvedených grafů vyplývá, že při laserovém odvrtávání je maximální deformace při odvrtávacím kroku několikanásobně vyšší než při HSD metodě. V detailu je také vidět, že tvar grafu deformace je u obou metod odlišný. To je způsobeno jinou technologií odběru materiálu a tím, že laser odebrává materiál pulsně v několika krocích, ale fréza kontinuálně. Z výše uvedeného je zřejmé, že okamžitá míra ovlivnění materiálu je u frézy několikanásobně menší než u laseru.

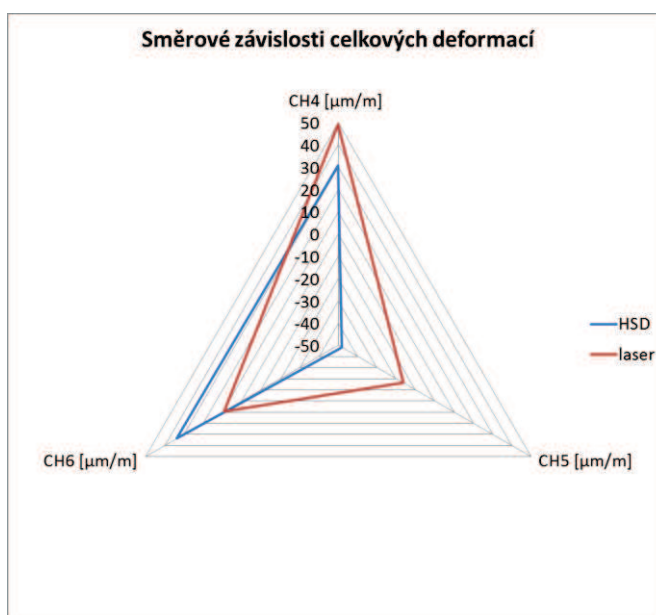


Graf 12 Uvolněné deformace laser



Graf 13 Uvolněné deformace HSD

Křivky na grafech jsou ovlivněny uvolňováním různých deformací v různé hloubce materiálu, ale také tím, že s hloubkou odvrtaného materiálu klesá citlivost reakce tenzometrů, které jsou přilepeny na povrchu otvoru.

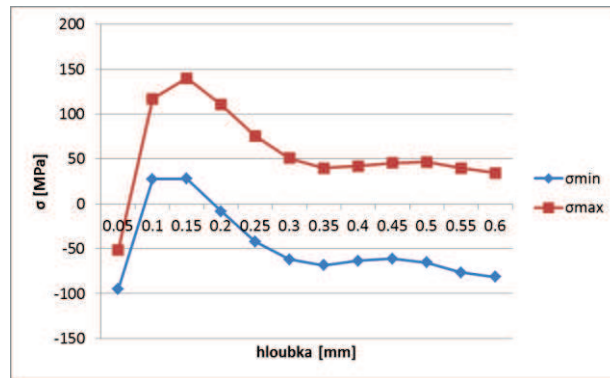


Graf 14 Směry uvolněných deformací

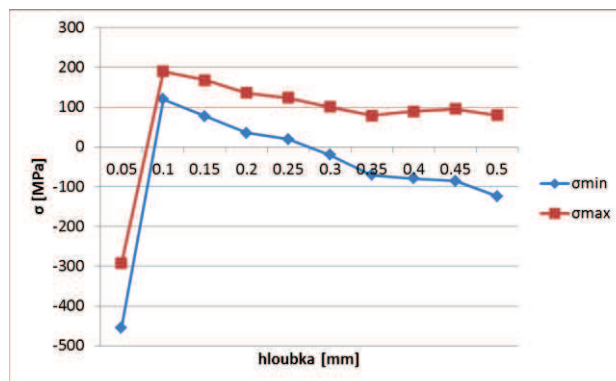
Graf 14 porovnává směr uvolněných deformací u HSD a laseru. Z grafu je patrné, že směry uvolněných deformací se (kromě kanálu CH5) nijak zásadně nelišily, což svědčí o tom, že se deformace materiálu na obou tenzometrických růžicích uvolňovaly podobným směrem.

Vyhodnocení zbytkových napětí

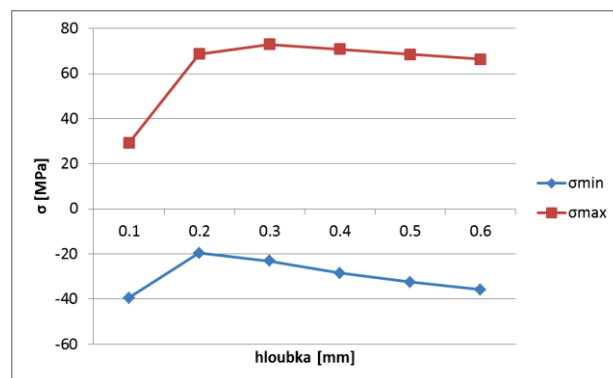
Vyhodnocení zbytkových napětí bylo provedeno ve spolupráci s NTC ZČU. Byla použita integrální a EUS metoda.



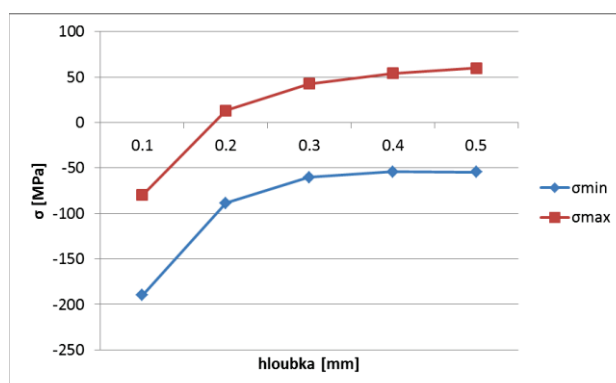
Graf 15 HSD integrální metoda



Graf 16 laser integrální metoda



Graf 17 HSD EUS metoda



Graf 18 laser EUS metoda

Z grafů jsou v první řadě patrné rozdílné hodnoty a tvary křivek při vyhodnocení různými metodami. Objevují se jak tlaková napětí ($\sigma < 0$), tak napětí tahová ($\sigma > 0$) [11].

Integrální metoda

U integrální metody byla napětí při povrchu vyhodnocena jako tlaková, hlouběji jako tahová a minimální hodnoty pak s postupnou hloubkou opět přešly do napětí tlakových. Od hloubky otvoru 0,25 mm se maximální napětí σ_{\max} u HSD pohybují kolem hodnoty 50 MPa, u laseru kolem 100 MPa a oboje mají tlakový charakter. Míra ovlivnění z hlediska deformací je tedy pro HSD menší. Pro minimální napětí σ_{\min} se pro obě technologie pohybují napětí nejvýše kolem 100 MPa a charakter je tahový. Křivka u HSD se ovšem pohybuje více v nižších hladinách, lze tedy soudit, že i zde je z hlediska deformací lepší HSD technologie.

EUS

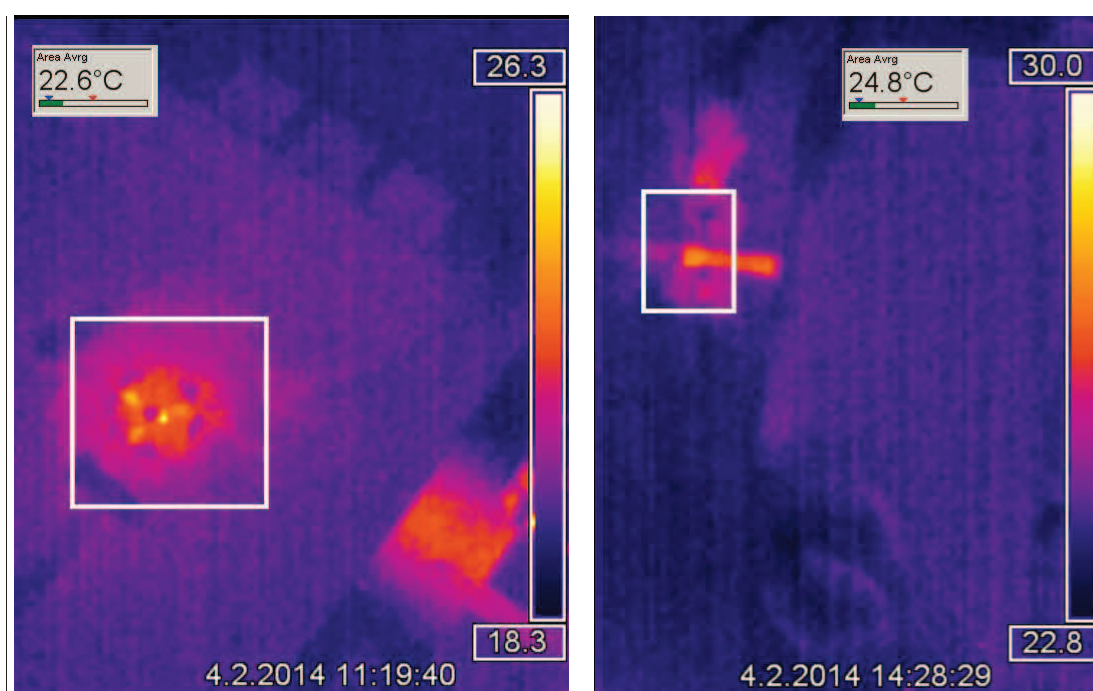
U metody EUS se maximální napětí σ_{\max} u laseru a HSD podstatně liší v hloubce 0,1 mm – pro laser zde hodnoty dosahují přibližně 80 MPa, u HSD jen asi 30 MPa, obojí tlakového charakteru. Další hodnoty už ale hovoří ve prospěch laseru, který se na větších hloubkách otvoru pohybuje kolem 50 MPa oproti HSD se 70 MPa, obojí tahového charakteru. Minimální napětí σ_{\min} u HSD se pohybuje od 20 MPa do 40 MPa, oproti laseru, který zde dosahuje hodnot od 50 MPa až do téměř 200 MPa, obojí tlakového charakteru. I pro EUS metodu lze tedy vyhodnotit HSD technologii jako kvalitnější.

Shrnutí

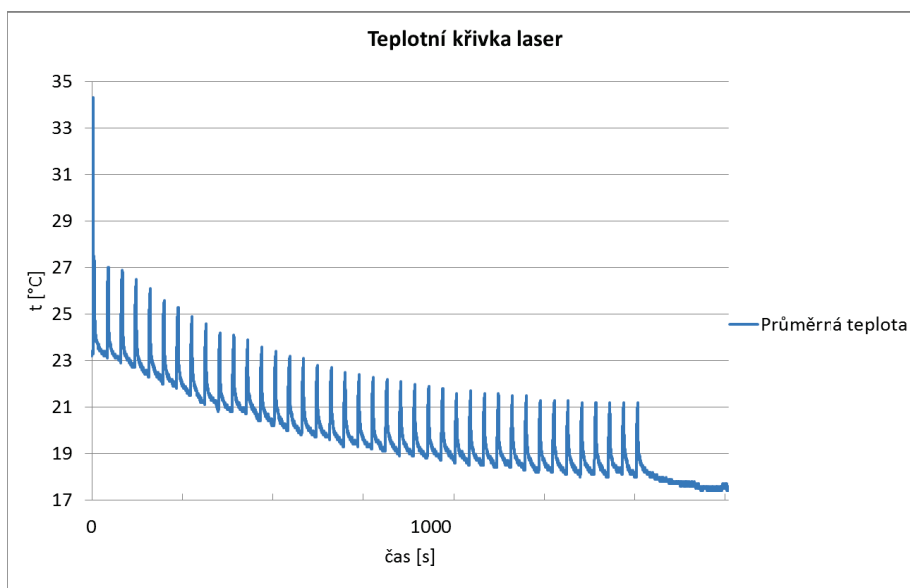
Dle obou použitých metod vyhodnocení (integrální metoda a EUS metoda) lze vyvodit závěr, že menší míru ovlivnění z hlediska deformací umožňuje technologie HSD.

5.2.5 Termovizní data

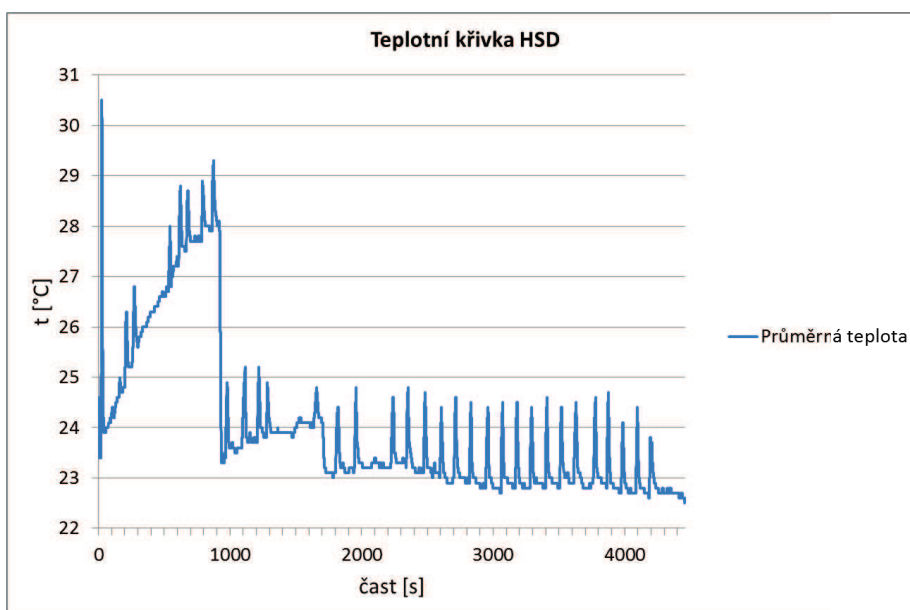
Měřena byla průměrná teplota oblasti. Byly vytvořeny teplotní křivky závislosti teploty na čase. Vzorkovací frekvence byla shodná s tenzometrickým měřením a to 10 Hz. Na křivkách jsou patrné jednotlivé odvrtávací kroky. Pro každý odvrtávací krok byl určen rozdíl maximální a minimální průměrné teploty oblasti a vyneseno do grafů 21 a 22. Spíše než absolutní hodnoty teplot nás zajímal rozdíl mezi teplotou při odvrtávání a ustálené teploty v závislosti na odvrtané vrstvě (graf 23), ze kterého lze porovnat technologii laseru a HSD. Je nutné zdůraznit, že kamera snímala laserové odvrtávání shora zatímco HSD frézu z boku a viditelnost na materiál nebyla ideální. Zatímco u laserové technologie nebylo shora vidět přímo na materiál v otvoru, ale pouze na vznikající horké plyny, u HSD dno logicky nemohlo být pozorováno vůbec a teplotní grafy byly částečně ovlivňovány ohřívající se frézou. K určení absolutních teplot přímo v otvoru při odvrtávání by bylo nutné využít simulací a numerického dopočítání.



Obr. 26 Měřená oblast (bílý obdélník) a ukázka termogramu (vlevo laser, vpravo HSD)
Pozn.: barevná škála je v každém obrázku odlišná



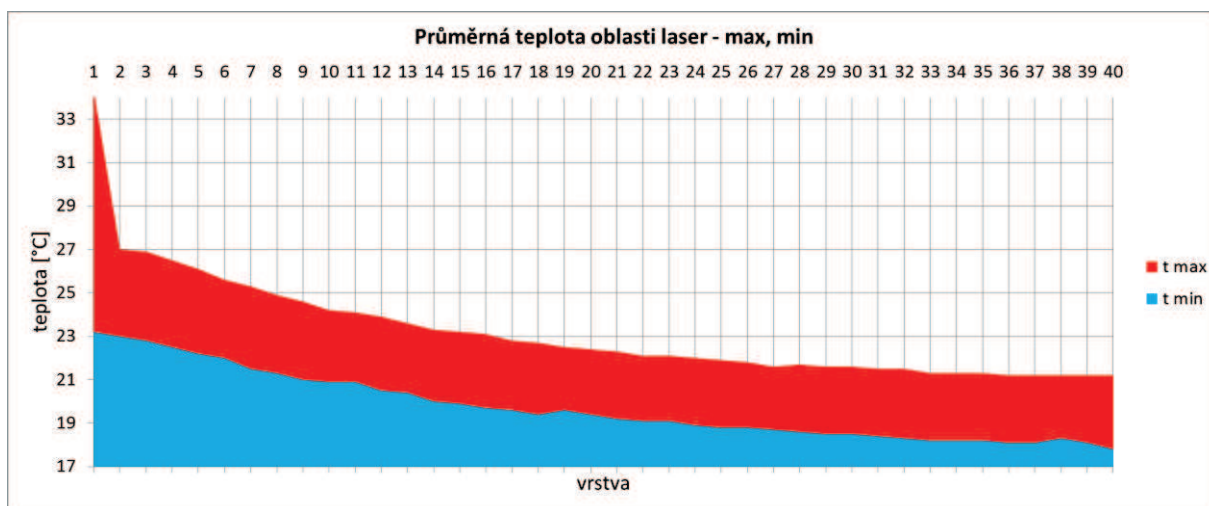
Graf 19 Teplotní křivka laser



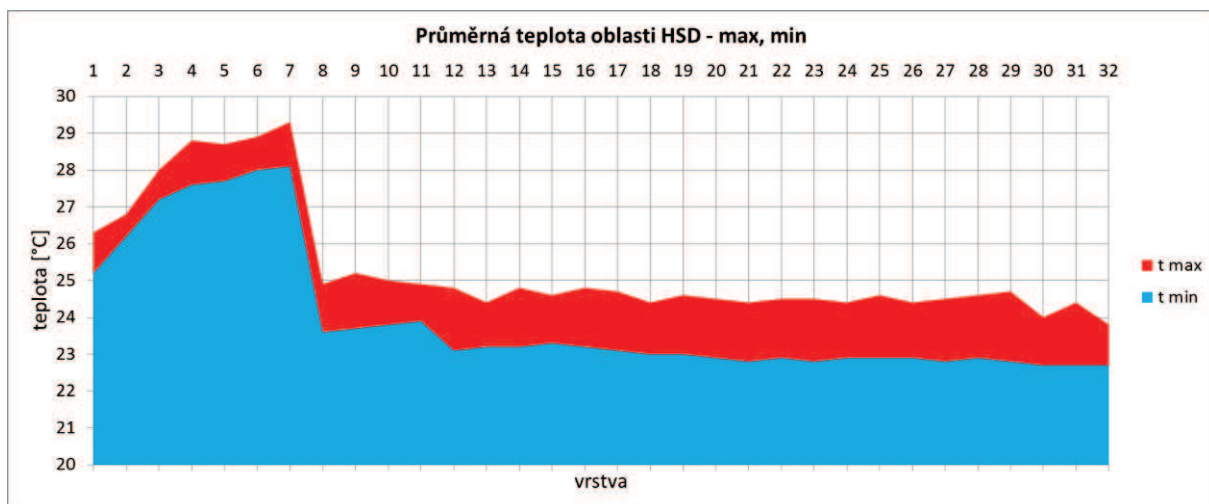
Graf 20 Teplotní křivka HSD

V teplotních křivkách je vidět nejvyšší teplota při prvním odvrtávacím kroku. Tento stav mohl být způsoben přítomností nečistot na povrchu materiálu v případě laseru a v případě HSD frézy tím, že při prvním kroku byla ještě vidět hlava frézy, kde byla teplota nejvyšší. U grafu HSD je patrný skok v čase kolem 1000 sekund. Ten byl způsoben kalibrací kamery v průběhu ustalování. Kalibrace kamery byla nutná, protože jak je vidět z grafu, i při ustalování po několika prvních odvrtávacích krocích teplota nelogicky rostla. Jelikož bylo dále počítáno s diferencemi hodnot, neměla pro nás kalibrace významný vliv na měření. Z grafů (teplotních ale i tenzometrických) je také patrné, že u laseru je graf pravidelnější než u HSD. To je způsobeno tím, že u laseru byl celý proces odvrtávání a

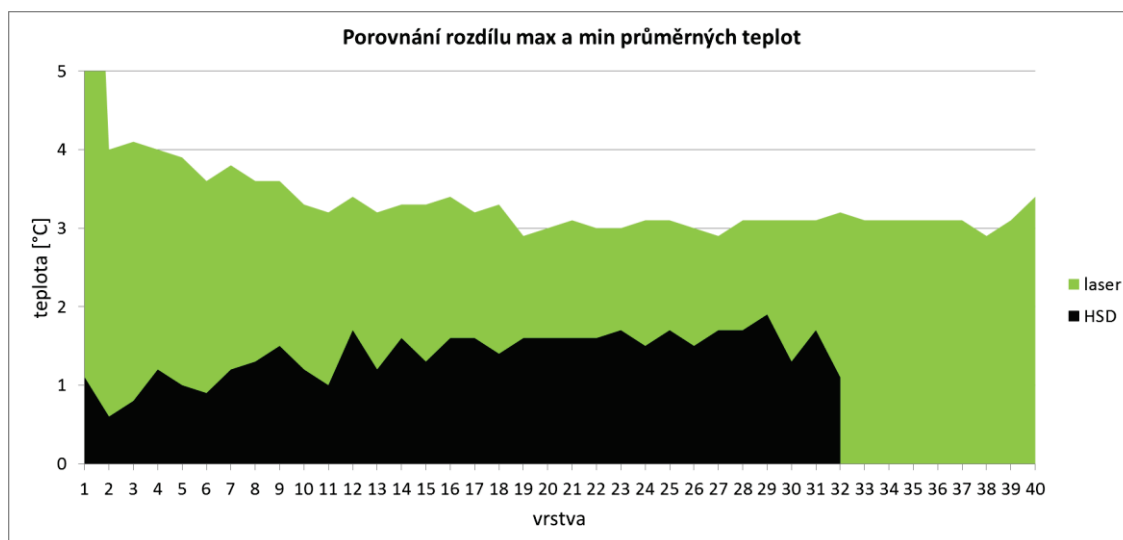
čekání na ustálení automatizován pomocí SW pro ovládání laseru. U HSD byly jednotlivé odvrtávací kroky spouštěny ručně. Částečně mohly být výsledky také ovlivněny tím, že systém HSD odvrtávání byl umístěn volně v místnosti (kde mohlo působit proudění vzduchu) oproti laserovému odvrtávání, které probíhalo v zakrytovaném prostoru laserového zařízení.



Graf 21 Průměrná teplota laser

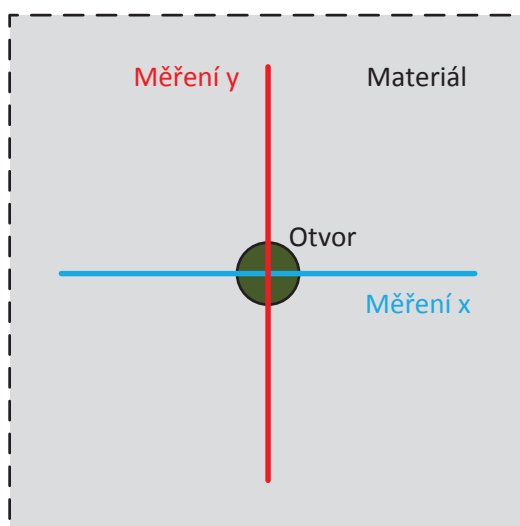


Graf 22 Průměrná teplota HSD

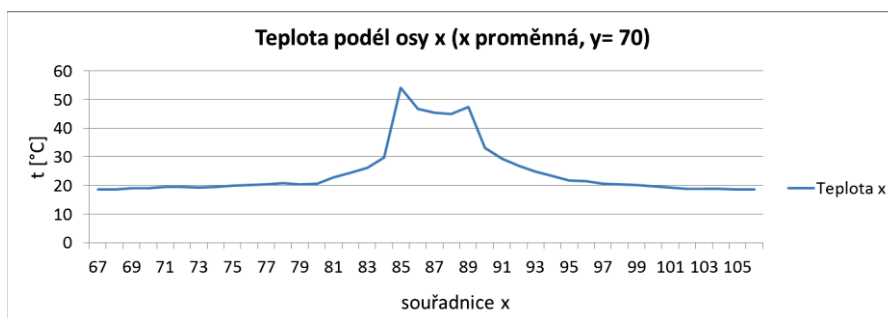


Graf 23 Rozdíly mezi průměrnými teplotami laser a HSD

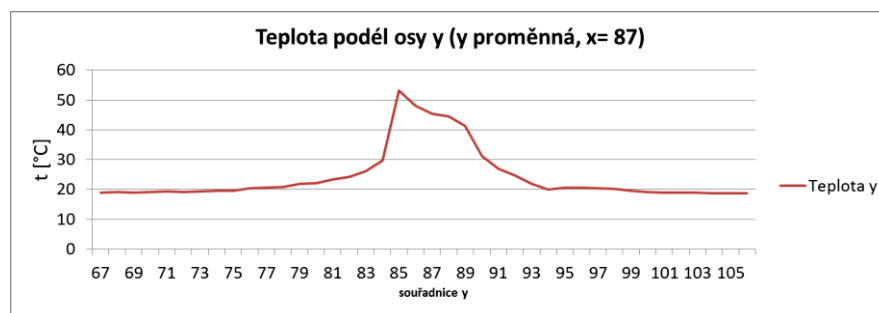
U laseru bylo díky pozorování shora možné změřit teplotní profil podél osy x a y během odvrtávání. Nejvyšší změřené teploty byly v ose x 54,2 °C a v ose y 53,2 °C. Zvláště na ose x jsou zřejmé dva extrémní teploty, což může být způsobeno okrajovou konturou, kterou se zakončoval každý odvrtávací krok. U frýzy bylo vzhledem k umístění kamery a umístění HSD systému takové měření neproveditelné.



Obr. 27 Měření teplotního profilu při odvrtávání laserem



Graf 24 Teplotní profil osa x



Graf 25 Teplotní profil osa y

Shrnutí

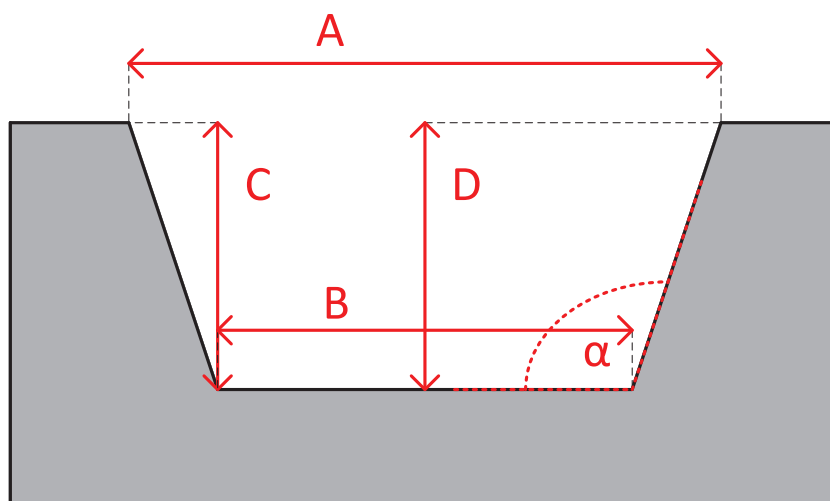
Z výše uvedených grafů lze soudit, že rozdíl teplot mezi odvrtáváním a ustáleným stavem je u laseru přibližně dvojnásobný (viz graf 23). Tepelně je tedy materiál ovlivněn více. Na tomto grafu je také patrné, že pro laser bylo využito více odvrtávacích kroků než pro HSD frézu (proto graf HSD končí již na vrstvě 32 oproti laseru na 40)

Dle teplotního profilu se během laserového odvrtávání pohybovaly nejvyšší změřené teploty u laseru do 55°C.

5.2.6 Řezy materiálu a struktura

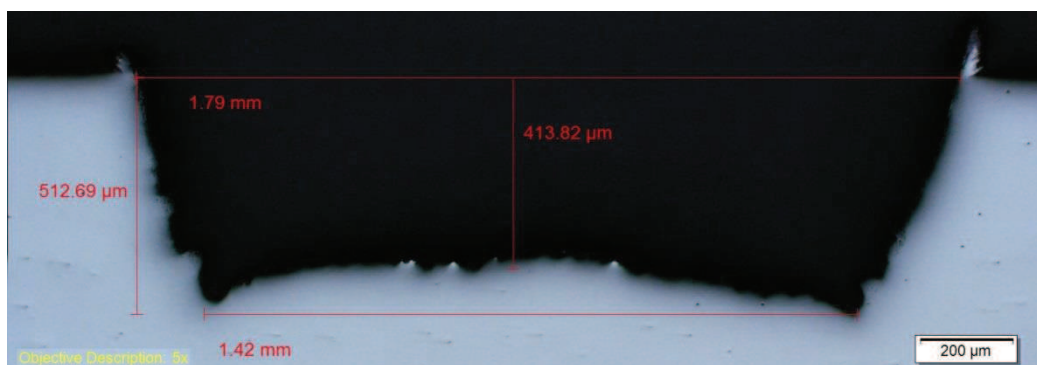
Tvar a rozměry

Na řezu byl vyhodnocen tvar otvorů a měřeny rozměry. Jako ideální tvar otvoru by byl obdélník, tj. kolmé hrany, rovné dno, dodržené rozměry a stejné rozměry hladiny a dna otvoru. Protože u HSD technologie byl záměrně vrtán otvor hlubší, než byl potřeba, do tabulek byla zanesena hodnota „rozdíl hloubka střed hloubka okraj“ která tvar otvoru v tomto případě popisuje lépe než absolutní porovnávaná hodnota dosažené hloubky. Obdobně bylo pracováno i s hodnotami průměru otvoru. Hodnoty byly vyneseny do grafů, které znázorňují odchylku mezi ideální a skutečnou změřenou hodnotou jednotlivých parametrů.

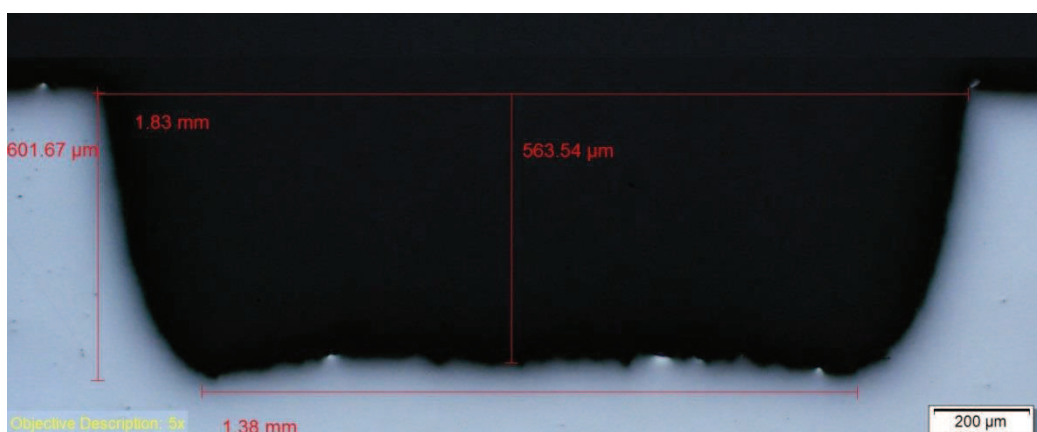


Obr. 28 Schéma měření otvoru

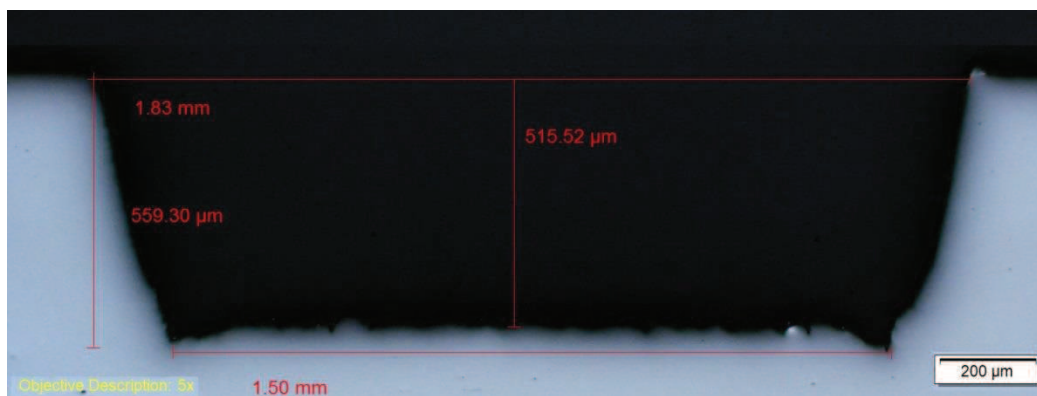
Laserem byly vytvořeny 3 otvory s různým nastavením (viz tab. 22). Frézou bylo použito jen jedno nastavení a byl tedy vyvrtán jeden otvor. Materiál byl rozříznut a dobroušen přesně do poloviny otvorů (tedy do nejširšího místa), zalit zalévací hmotou a vyleštěn. Následující snímky byly pořízeny na mikroskopu Olympus LEXT OLS3000 s nastaveným 5 násobným zvětšením. Otvory byly proměřeny pomocí SW mikroskopu.



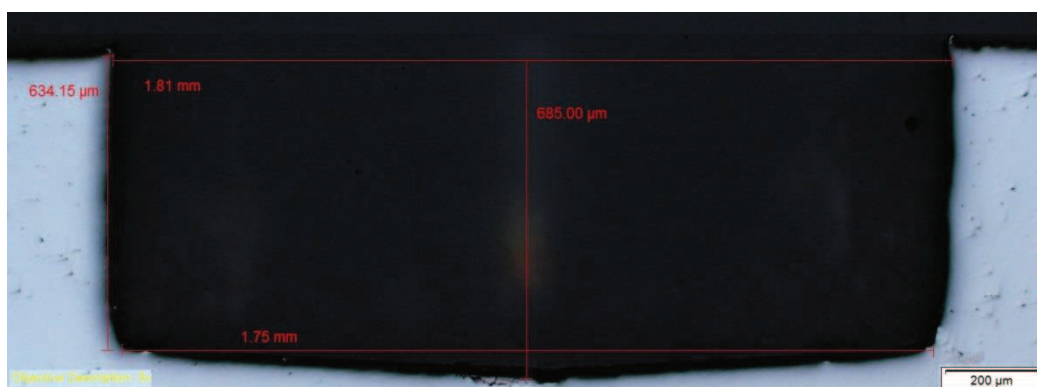
Obr. 29 Laser VF0



Obr. 30 Laser VF1



Obr. 31 Laser VF2



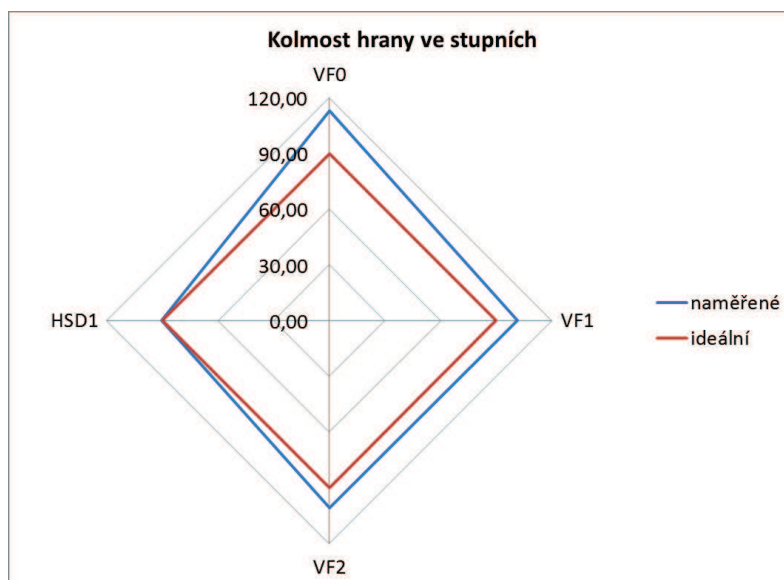
Obr. 32 HSD

Tab. 22 Nastavení laseru a HSD

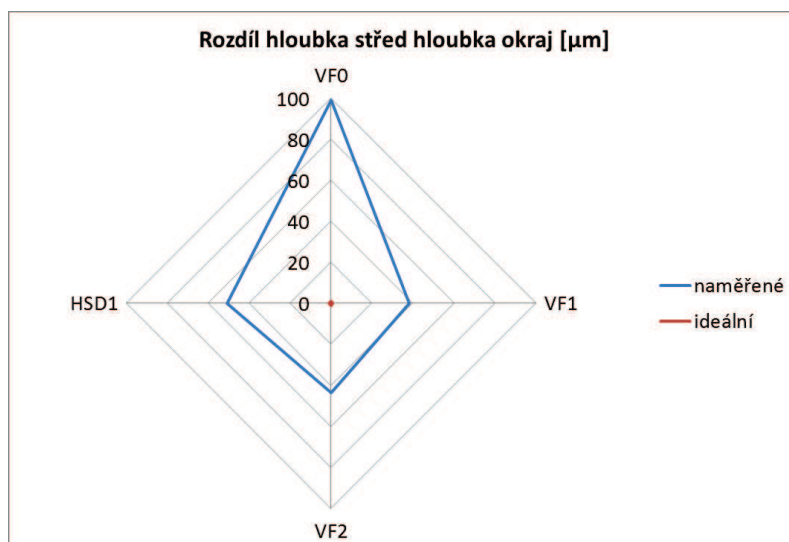
Nastavení	laser			HSD	
	VF0	VF1	VF2		
rychlost posuvu [mm/s]	1300	1300	1300	odběr na 1 krok [μm]	20
frekvence [kHz]	25	65	125	rychlost odběru [mm/min.]	0,9
P [%]	95	95	95		
délka pulsu [ns]	200	65	30		
počet průchodů/posuv o 13 μm	30	90	120		

Tab. 23 Naměřené a dopočítané hodnoty

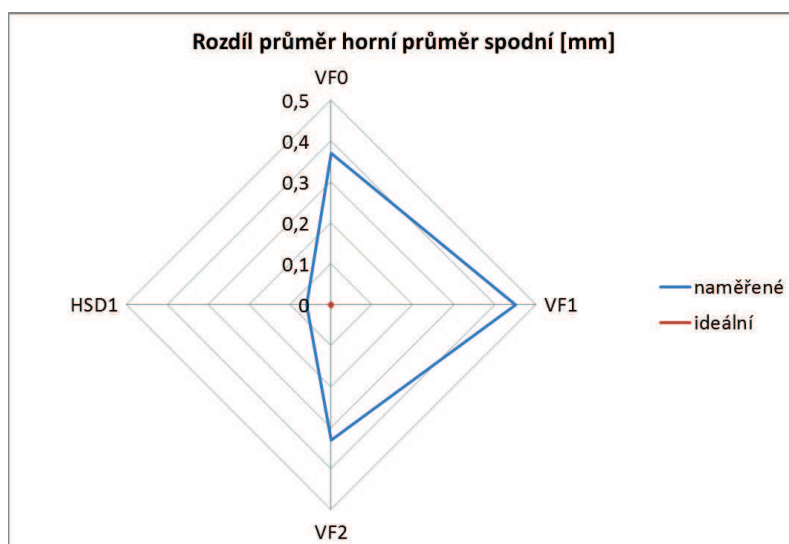
technologie	Laser			HSD	ideální
	VF0	VF1	VF2	HSD1	
A, průměr horní [mm]	1,79	1,83	1,83	1,81	1,80
B, průměr spodní [mm]	1,42	1,38	1,50	1,75	1,80
rozdíl průměr horní průměr spodní [mm]	0,37	0,45	0,33	0,06	0
C, hloubka okraj [μm]	512,69	601,67	559,30	634,15	500,00
D, hloubka střed [μm]	413,82	563,54	515,52	685,00	500,00
rozdíl hloubka střed hloubka okraj [μm]	98,87	38,13	43,78	50,85	0
α, úhel hrany [$^\circ$]	112,97	101,24	100,77	90,43	90,00



Graf 26 Kolmost hrany



Graf 27 Rozdíl hloubka střed hloubka okraj

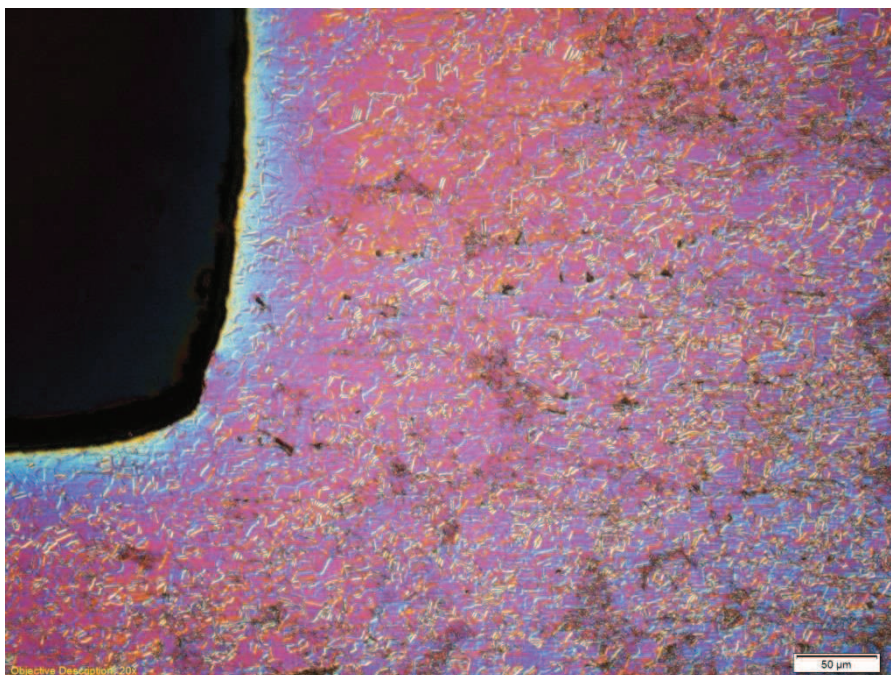


Graf 28 Rozdíl průměr horní průměr spodní

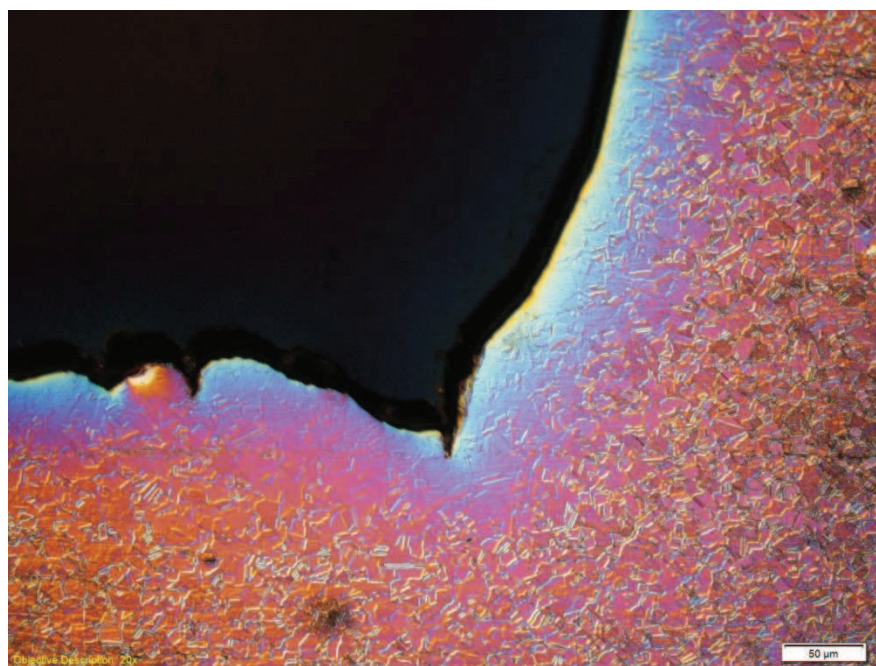
Z výše uvedených grafů je patrné, že ideálnímu stavu se nejvíce blíží technologie HSD. Druhý nejlepší je laser VF2 a za ním VF1. Jako nejhorší se jeví nastavení laseru VF0. U HSD (obr. 32) je patrný důlek uprostřed otvoru. Ten je způsoben vlačováním materiálu dovnitř otvoru, což je důsledek otáčivého pohybu na jednom místě ve středu frézy.

Struktura a ovlivnění materiálu

Zjištění strukturálních změn materiálu bylo provedeno zaleptáním řezů a pozorováním změn pod mikroskopem. Řezy byly zaleptány roztokem HCL a H₂O v poměru 1:1 při zahřátí na teplotu 50°C po dobu 5 minut. Vzorky byly pozorovány v Nomarského diferenciálním interferenčním kontrastu.



Obr. 33 Struktura materiálu v okolí otvoru HSD



Obr. 34 Struktura materiálu v okolí otvoru laser VF2

Shrnutí

Dle materiálových řezů a vyhodnocení tvaru otvorů lze soudit, že otvor vytvořený HSD frézou je kvalitnější než u laseru. Nejbližše se technologii HSD blížilo nastavení laseru VF2 (viz tab. 25). Po zaleptání a zkoumání pod mikroskopy lze z toho, že jsou oblasti odleptané různě, usuzovat, že byl materiál tepelně ovlivněn u laseru více než u HSD. Dle tvaru, velikosti a rozložení zrn bylo určeno, že jde o austenitickou strukturu oceli.

5.3 Vyhodnocení experimentu

V první části experimentu se podařilo optimalizovat parametry laserového odvrtávání pro tři materiály – ocel, křemík a mosaz. Na základě optimalizace bylo zjištěno, že tyto materiály lze dobře odvrtávat a byla zjištěna optimální nastavení parametrů laseru. Pro další část experimentu byla zvolena ocel.

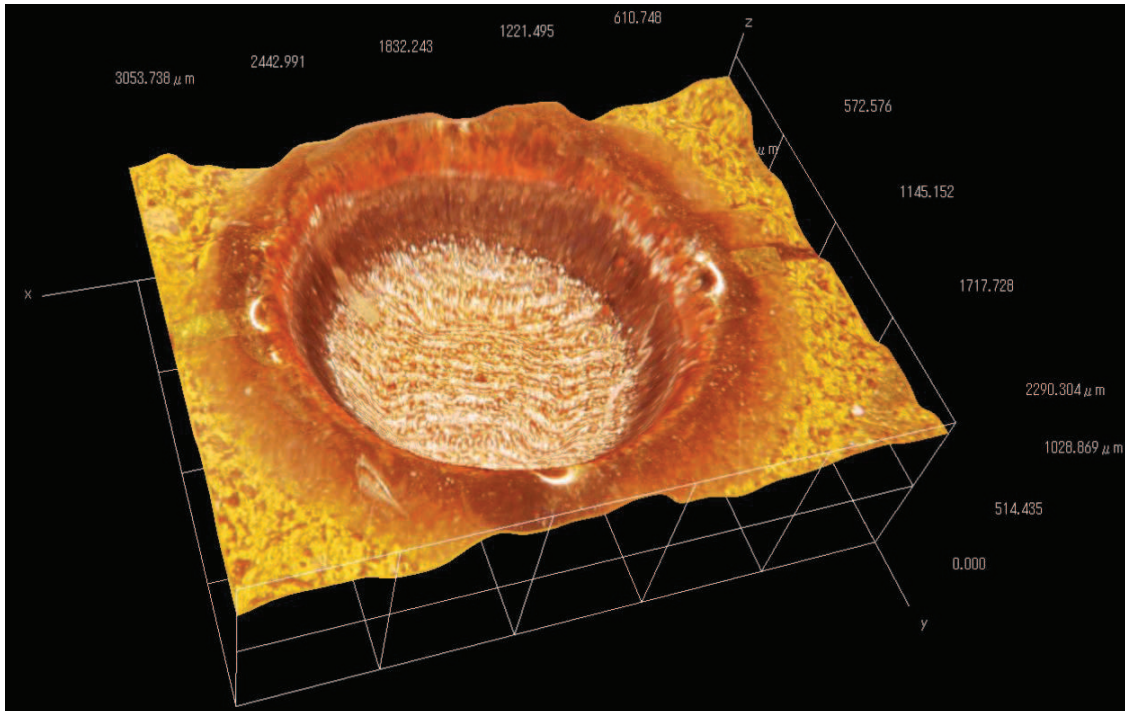
V druhé části experimentu bylo realizováno termomechanické měření na vzorku oceli. Vrtání laserem bylo porovnáváno s vysokorychlostním odvrtáváním frézou. Cílem bylo porovnání ovlivnění materiálu z hlediska deformací, tepelného ovlivnění a analýza tvaru otvorů. Úkolem také bylo navázat na předchozí experimenty a zjistit, zda je použitý typ laseru vhodný pro odvrtávací metodu měření zbytkových napětí.

Z tenzometrických i termovizních dat vyplývá, že ovlivnění materiálu laserem je znatelnější než ovlivnění u HSD technologie. Dle vypočítaných hodnot výsledného zbytkového napětí bylo dosaženo menšího ovlivnění ocelového materiálu pomocí pulzního vláknového laseru než v předchozích experimentech O. Soukupa [11] s pevnolátkovým iontovým laserem Nd:YAG a cermetovým povlakem na litině, a to řádově až o stovky MPa.

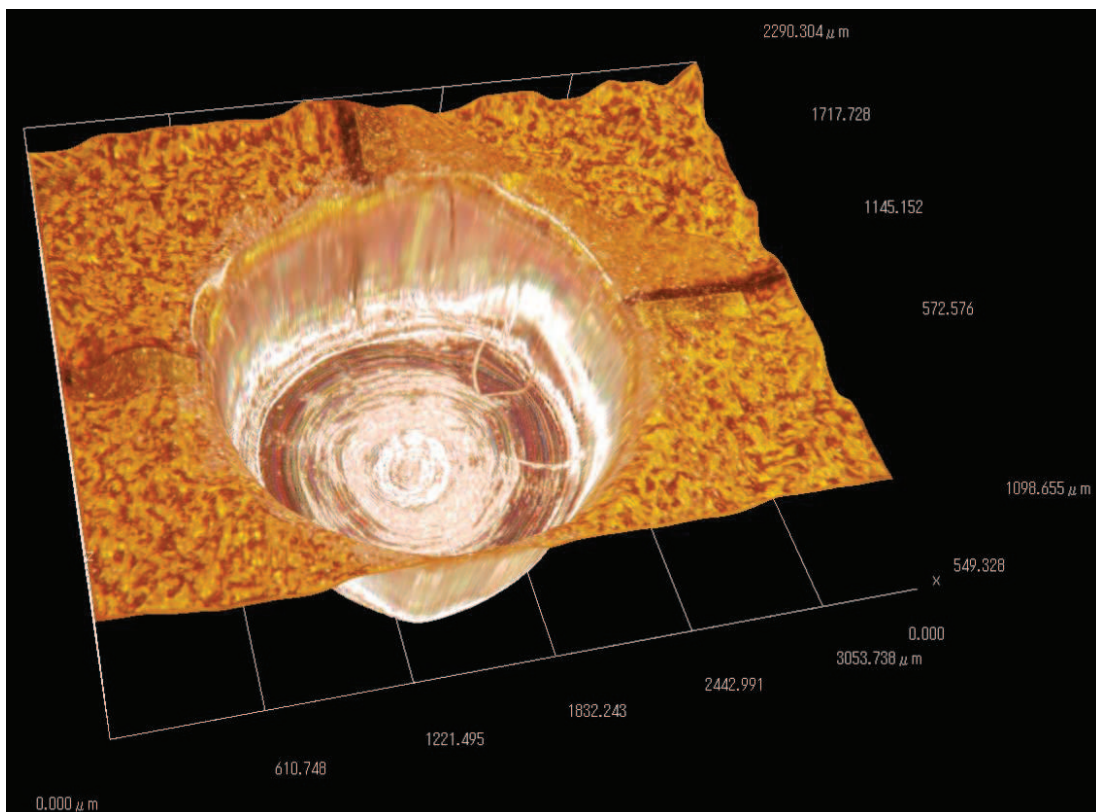
Rozdíly teplot mezi odvrtáváním a ustálením byly u laseru přibližně dvojnásobné oproti HSD. Kvalita vytvořeného otvoru se u HSD frézy velice blíží ideálnímu tvaru. Tvaru otvoru vytvořeného HSD se nejvíce přiblížilo nastavení laseru označené jako VF2. Materiál byl dle zaleptaných řezů tepelně ovlivněn u laseru více než u HSD.

V experimentu byla dodána chybná data pro NTC na vyhodnocení zbytkových napětí pro laser. Jeden odvrtávací krok odebral $14,7 \mu\text{m}$ [26], do vyhodnocovací tabulky bylo ale zadáno $13,23 \mu\text{m}$. Tím jsme se dopustili chyby ve vyhodnocení integrální i EUS metodou. Chyba ovšem není tak významná, aby změnila charakter získaných dat. Odběr materiálu laserem není ve všech krocích zcela konstantní, chyby (ovšem výrazně menší) bychom se tedy dopustili i při zadání hodnoty $14,7 \mu\text{m}$. Řešením by bylo měřit hloubku otvoru po každém odvrtávacím kroku. Jedním z problémů experimentu bylo laserové odvrtání tenzometrické růžice. Odvrtání bylo kontrolováno pouze vizuálně, je tedy možné, že růžice nebyla odvrtána dokonale či že byl částečně narušen i ocelový materiál. Dalším problémem bylo nastavení nulové hloubky u HSD vzhledem k drsnosti materiálu. Termovizní kamera pro laser byla umístěna v ideální pozici, zatímco u HSD byla poloha kamery značně nevhodná. Z technologického hlediska bylo ale její lepší umístění u HSD

systému nemožné. Zajímavou informací by poskytla simulace rozložení teplotního pole přímo v otvoru během jeho vytváření pro obě použité technologie.



Obr. 35 Výsledný otvor vytvořený laserem



Obr. 36 Výsledný otvor vytvořený HSD

Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na termomechanická měření v oblasti laserového vrtání otvorů. V diplomové práci bylo navázáno na předchozí výzkum v této oblasti ovšem za použití vláknového laseru a jiných materiálů. Byly splněny následující úkoly:

- optimalizace parametrů laserového odvrtávání pro ocel, křemík a mosaz
- použití odvrtávací metody pro měření zbytkových napětí (vrtáno laserem a HSD)
- měření a vyhodnocení uvolněných deformací pomocí tenzometrických růžic
- měření a vyhodnocení teplotního pole
- měření a vyhodnocení tvaru otvorů a ovlivnění okolního materiálu

Diplomová práce potvrdila, že vysokorychlostní odvrtávání frézou je etalonem z hlediska kvality otvoru a ovlivnění materiálu. Termovizním měřením i měřením deformací bylo dokázáno, že ovlivňování materiálu laserem je silnější než u HSD. S pulzním vláknovým laserem bylo ovšem dosaženo nižších hodnot zbytkových napětí než v předchozím experimentu s pevnolátkovým laserem typu Nd:YAG. Rozdílem proti předchozímu experimentu bylo také laserové odvrtání středu tenzometrické růžice před samotným měřením zbytkových napětí, které zpřesnilo vyhodnocovaná data. Experiment prokázal, že je možné měřit zbytková napětí odvrtávací metodou za použití pulzního vláknového laseru, výsledky jsou ale oproti HSD ovlivněny samotnou technologií odběru materiálu více.

Z hlediska tvaru otvoru se fréza v řezu nejvíce blížila ideálnímu obdélníkovému tvaru. Ze zaleptaných řezů bylo patrné větší ovlivnění materiálu pro laser.

Nevýhodou použité laserové technologie je tedy větší ovlivnění materiálu a horší kvalita otvoru. Výhodou laserové technologie je její opakovatelnost, přesnost a možnosti nastavení. Velkou výhodou je také fakt, že zde nedochází k opotřebení řezného nástroje oproti znatelnému opotřebení HSD frézy.

Použitá literatura

- [1] NAVRÁTIL, Jiří. Řídicí obvody laserových diod. 2012. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Švarný.
- [2] ANDĚL, Robert. Vrtání mikrootvorů laserem - termomechanické ovlivnění a poškození struktury materiálu v okolí otvoru. 2005. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta strojní. Vedoucí práce Antonín Kříž.
- [3] Trumpf, The Laser as a Tool, Vogel Buchverlag, Wurzburg, 280 s. ISBN-10 3-8343-3072-8
- [4] BELFORTE, Guido. *International journal of mechanics and control* [online]. Torino (Italy), 2005[cit. 2014-03-01]. 6, 1. ISBN 1590-8844. Dostupné z: <http://www.jomac.it/FILES%20RIVISTA/JoMaC05A/JoMaC05A.pdf#page=11>
- [5] JK Lasers: A GSI group company. *Laser Drilling* [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.jklasers.com/laser-drilling>
- [6] TRUMPF Česká Republika: Vrtání. *TRUMPF Česká Republika* [online]. © 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>
- [7] LINTECH, spol. s r.o. *LLS-FXX P: Laserový značící systém*. Domažlice, 2010.
- [8] SCANLAB. *Installation and Operation: SCANcube 10*. Puchheim (GER), 2008.
- [9] PASCHOTTA, Rüdiger. RP Photonics Encyclopedia: Encyclopedia of laser physics and technology. In: *RP Photonics* [online]. 2013 [cit. 2013-12-06]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/master_oscillator_power_amplifier.html

- [10] Laser safety. UNIVERSITY OF KENTUCKY. *University of kentucky: Radiation safety* [online]. Lexington (USA), 2013 [cit. 2013-11-05]. Dostupné z: http://ehs.uky.edu/radiation/laser_fs.html
- [11] SOUKUP, Ondřej. Laserová odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí. 2007. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta aplikovaných věd. Vedoucí práce Michal Švantner.
- [12] ŠVANTNER, Michal. Zjišťování zbytkových napětí ve vícevrstvých strukturách. 2002. Disertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta aplikovaných věd. Vedoucí práce Josef Kuneš.
- [13] VISHAY PRECISION GROUP. *Measurement of residual stresses by the hole-drilling strain gage method*. USA, 2010. Dostupné z: <http://www.vishaypg.com/docs/11053/tn503.pdf>
- [14] SINT TECHNOLOGY. *MTS3000-Restan: Automatic system for residual stress measurement by hole-drilling*. Itálie.
- [15] ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI. *The hole-drilling strain gage method for the measurement of uniform or non-uniform residual stresses AIAS TR-*. Itálie, 2010.
- [16] MAHMOUDI, Amir Hossein, GHANBARI-MATLOOB a Soroush HEYDARIAN. *A Neural Networks Approach to Measure Residual Stresses Using Spherical Indentation* [online]. [cit. 2014-03-15].
- [17] *Termokamera.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/>

- [18] KUNEŠ, Josef, Milan HONNER a Pavel LITOŠ. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Infrared thermography measurement in thermomechanics of technological processes. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. ISBN 80-708-2891-9.
- [19] FLIR. *Thermal imaging for electrical / mechanical diagnostics: Discover a wide variety of applications*. USA, 2013.
- [20] HBM. *Operating manual: Spider8 Spider8-30 and Spider8-01*. Německo, 2013.
- [21] HBM. *Strain gauges*. Německo, 2013. Dostupné z: <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s1265.pdf>
- [22] HBM. *Catman Easy/AP Version 2.2: Quick start guide*. Německo, 2013.
- [23] LU, Jian. *Handbook of measurement of residual stresses*. Upper Saddle River, NJ: Distributed by Prentice Hall PTR, c1996, xv, 238 p. ISBN 01-325-5738-X.
- [24] NATIONAL INSTRUMENTS. *Strain gauge configuration types*. USA, 2006. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/4172/en/>
- [25] KUČERA, Martin. NTC ZČU. Shrnutí prací na optimalizaci parametrů odvrtávání zbytkových napětí. Plzeň, 2013.
- [26] KUČERA, Martin. NTC ZČU. Laserová odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí: Kalibrace odběru vrstev. Plzeň, 2014.
- [27] Engelmayer A.: *Galvanometer Scanning Technology Speeds Up Laser Processing*, SCANLAB AG, Puchheim, Germany, 2005
- [28] VISHAY PRECISION GROUP. *Strain Gage Selection: Criteria, Procedures, Recommendation*. USA, 2010. Dostupné z: <http://www.vishaypg.com/docs/11055/tn505.pdf>

- [29] FOBA, Laser at your service. FOBA. Aser Marking & Laser Engraving in the Medical Technology [online]. 2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: http://www.fobalaser.com/typo3temp/pics/laser-annealed-scalpel-stainless-steel_6abdac827d.jpg
- [30] Strain Gauge Visualization. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/StrainGaugeVisualization.svg>
- [31] Products. ELEXYS. Elexys: Precision physical measurement [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://elexsys.co.za/assets/images/products/304/RosetteGages-01.png>
- [32] Micro-Epsilon TIM160 Infrared Process Imager. INSTRUMART [online]. 2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.instrumart.com/products/32410/micro-epsilon-tim160-infrared-process-imager>
- [33] MICRO-EPSILON. ThermoIMAGER TIM: Compact thermal imager. Německo, 2014. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--thermoIMAGER-TIM--en.pdf>
- [34] Hirox Products. Hirox [online]. 2008 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.hirox-usa.com/products/microscope/index7700.html>
- [35] Olympus New Releases. OLYMPUS. Confocal Laser Scanning Microscope "OLS 3000" [online]. 2004 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.olympus-global.com/en/news/2004a/nr040326ols3e.jsp>