TECHNOLOGIE LASEROVÉHO POPISU SKLA

JIŘÍ TOMAŠTÍK

Bakalářská práce
2011

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jiří TOMAŠTÍK**
Osobní číslo:	**T08571**
Studijní program:	**B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Technologická zařízení**
Téma práce:	**Technologie laserového popisu skla**

Zásady pro vypracování:

1. **Teorie laserových technologií**
2. **Využití laseru při značení součástí**
3. **Provedení experimentálního značení**
4. **Vyhodnocení výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Ptáček, L.:Nauka o materiálu I a II. Akadem. nakl. CERM, 2002
2. Barcal, J.: Nekonvenční metody obrábění. Vydavatelství ČVUT, skripta ČVUT, Praha 1989
3. Kocman, K.: Speciální technologie I. 1. vyd. VUT Brno 1987.

Vedoucí bakalářské práce:	**Ing. Josef Hrdina** Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce:	**14. února 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**3. června 2011**

Ve Zlíně dne 12. ledna 2011

L.S.

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan

doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Tomaštík Jiří Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby [1)];
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 [2)];
- beru na vědomí, že podle § 60 [3)] odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 [3)] odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15.8.2011

.....

[1] zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

[2] zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

[3] zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na využití laseru, který našel uplatnění v mnoha vědních oborech. Teoretická část je zaměřena na historii laseru, druhy laseru, laserový popis a jeho výhody a nevýhody. Praktická část řeší nejvhodnější nastavení technologických podmínek laseru pro optimální jakost povrchu při popisu skla. Závěr tvoří zhodnocení praktické části.

Klíčová slova: laser, jakost povrchu, sklo

ABSTRACT

This bachelor work is concentred at laser utilization which is useful in many other sciencebranches. Theoretical part is describing history of laser, sort of laser, description of laser and his advantages and disadvantages. Practical part solves the most suitable setting of technological requirement of laser for optimal quality of surface at description of glass. The finally part of bachelor work is evaluation of practical part.

Keywords: laser, quality of surface, glass

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Josefu Hrdinovi za jeho odborné vedení a rady.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD **9**
I TEORETICKÁ ČÁST **10**
1 LASER **11**
1.1 POPIS LASERU 13
1.2 TYPY LASERU 15
2 LASEROVÉ POPISOVÁNÍ **22**
2.1 VÝHODY A NEVÝHODY LASEROVÉHO POPISOVÁNÍ 23
2.2 SKLO 24
2.3 POPIS SKLA 25
II PRAKTICKÁ ČÁST **27**
3 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI **28**
3.1 ZKUŠEBNÍ VZORKY 28
3.2 ZAŘÍZENÍ POUŽITÉ V PRAKTICKÉ PRÁCI 30
3.2.1 Talysurf CLI 500 30
3.2.2 Plotrový laser ILS 3NM 31
4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT **33**
4.1 VZORKY BEZ POVRCHOVÉ ÚPRAVY 33
4.1.1 Vzorek č. 1 35
4.1.2 Vzorek č. 2 36
4.1.3 Vzorek č. 3 37
4.1.4 Vzorek č. 4 38
4.1.5 Vzorek č. 5 39
4.1.6 Vzorek č. 6 40
4.2 VZORKY S POVRCHOVOU ÚPRAVOU 42
4.2.1 Vzorek č.7 42
4.2.2 Vzorek č.8 43
4.2.3 Vzorek č. 9 44
4.2.4 Vzorek č. 10 45
4.2.5 Vzorek č. 11 46
ZÁVĚR **47**
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY **48**
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK **49**
SEZNAM OBRÁZKŮ **50**
SEZNAM TABULEK **52**
SEZNAM PŘÍLOH **53**

ÚVOD

Laser je nedílnou součástí lidstva už přes 50 let. Své uplatnění našel v mnoha vědních oborech, ale i v běžných lidských činnostech. Lasery se používají všude tam, kde se něco měří a dávkuje, používají se v telekomunikacích, v tiskárnách, ovládly řadu postupů v medicíně. Laser se stal nástrojem pro řadu průmyslových aplikací, ať již jde o svařování, řezání nebo v poslední době se rozvíjející mikro-obrábění.

Jednou z možností aplikace laseru při mikro-obrábění je popisování různých materiálů, kterým se zabývá i tato bakalářská práce. Popisování laserem je technologie vysoce přesná, rychlá, ekologická, technologicky nenáročná, s vysokou produktivitou výroby a efektivností. Ve srovnání s jinými technikami popisu a značení výrobků nabízí laserový popis řadu výhod.

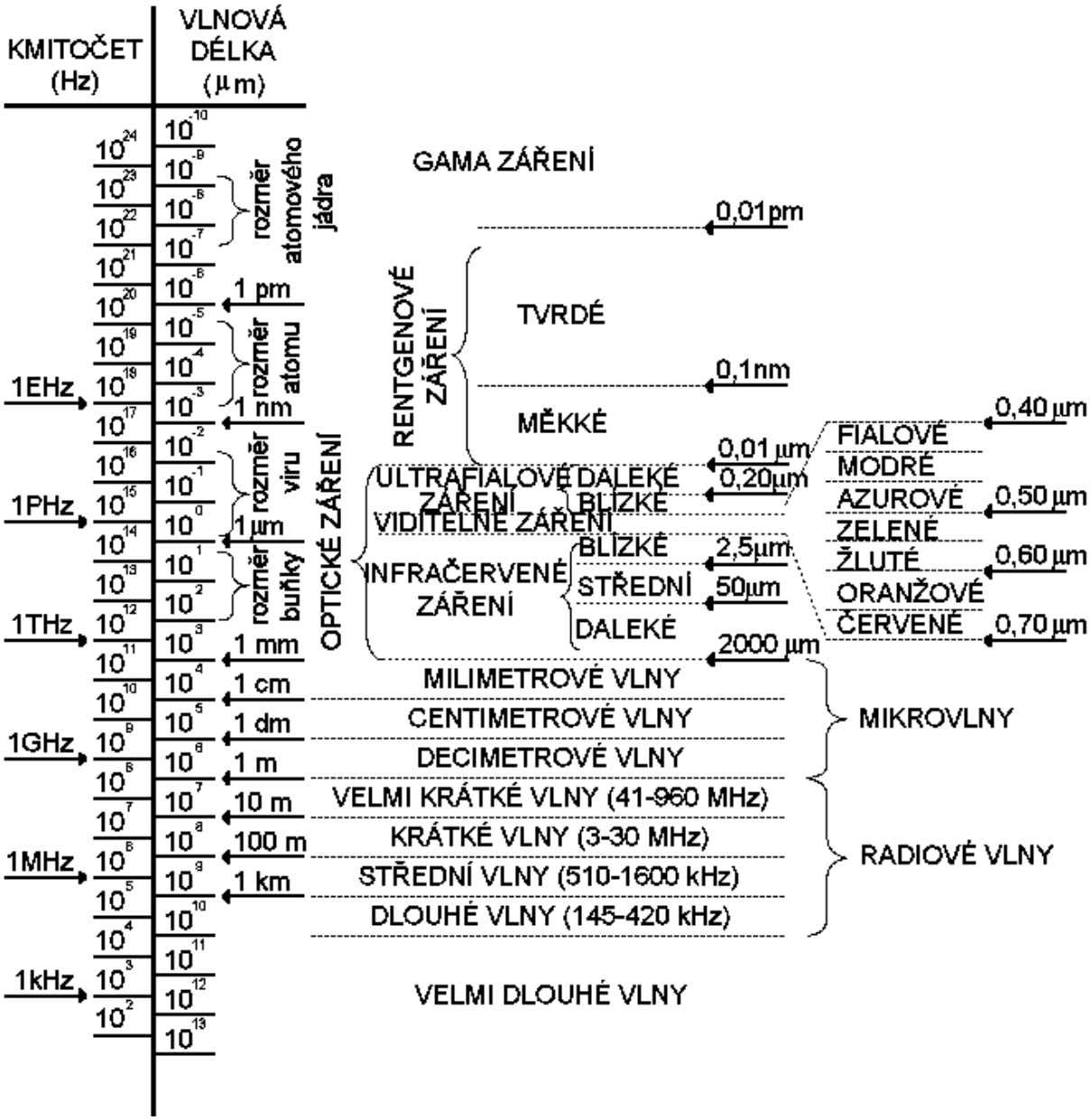
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASER

Slovo LASER bylo vytvořeno z počátečních písmen anglického popisu činnosti tohoto zařízení (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesilování světla pomocí stimulované emise záření). Princip laseru předpověděl již v roce 1916 Albert Einstein. Ovšem na první zkonstruovaný laser si lidstvo muselo počkat téměř 50 let a to se stalo v roce 1960, kdy fyzika a technologie, zejména polovodičových struktur dosáhly potřebného stupně vývoje. Tímto rokem se odstartovala postupná realizace různých typů laserů, lišících se použitou aktivní látkou a způsobem čerpání.

U laserů rozeznáváme tři základní parametry. Tím prvním je vlnová délka. Vlnové délky laserového záření spadají od mikrovlnné oblasti přes infračervené tepelné záření a viditelné světlo až po rentgenové paprsky. Přehled vlnových délek a odpovídajících frekvencí elektromagnetického záření je na obr. 1. Dalšími dvěma parametry určujícími kvalitu laseru jsou pak výkon a životnost. (6)

Laser je tedy přístroj zkonstruovaný na principech kvantové mechaniky, generující záření zcela unikátních vlastností, které má nesčetné množství aplikací. Laser umožňuje generovat extrémně krátké světelné impulsy.



Obr. 1. Tabulka vlnových délek a frekvencí známých elektromagnetických záření.

1.1 Popis laseru

Činnost laseru je založena na principu indukované emise, který Albert Einstein předpověděl již v roce 1916.

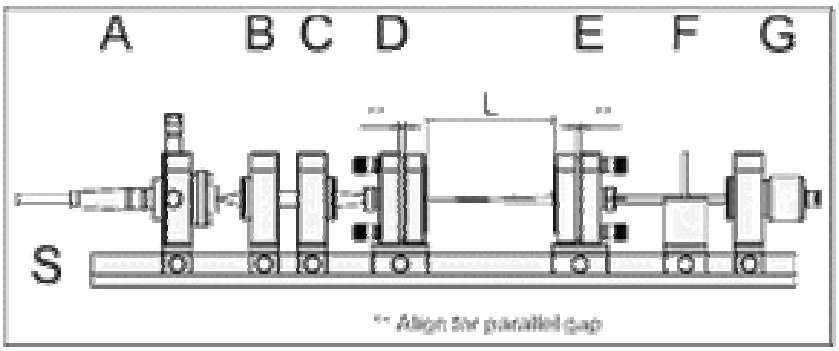
Při popisu principu laseru se setkáváme s těmito třemi základními pojmy:

1. Inverze populace: Situace, při které je na vybuzené hladině více elektronů než na hladině základní. Toto se může docílit vhodným čerpáním aktivní látky. Toto čerpání může být optické (výbojka nebo dioda), elektrické (výboj nebo proud procházející p-n přechodem), chemické (chemické reakce vytvářející vhodné molekuly nebo ionty), čerpání jadernými reakcemi a.j. (2)

2. Aktivní prostředí: Látka, ve které se elektrony nebo molekuly dají vhodným čerpáním vybudit na požadovanou pracovní hladinu, ze které pak můžou emitovat záření. Pracovní látkou může být plyn (He:Ne laser, oxid uhličitý), kapalina (Rhodamin-barvivo) ,krystal (rubín, Nd:YAG, Er:YAG), polovodič (GaAs, GaAsN), molekuly (XeCl, XeF) nebo plazma (C^{5+}).

3. Otevřený rezonátor (obr. 3): Dutina, do které se vkládá aktivní látka a která zajišťuje jev zpětné vazby. Většinou je tvořena dvěma zrcadly, ze kterých je jedno polopropustné a druhé odrazné. V podstatě jde o to, že emitovaná vlna z aktivní látky se odráží nazpět a při zpětném přechodu vzbuzuje další a další vynucené emise fotonů.

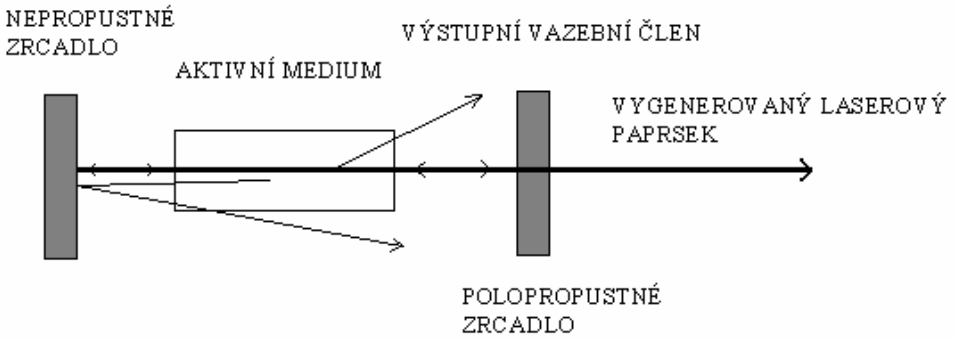
Pro realizaci laseru je třeba zvolit takové aktivní prostředí, ve kterém lze vytvořit inverzi-populace energetických hladin elektronu a současně zabezpečit pomocí otevřeného rezonátoru kladnou zpětnou vazbu pro zesilování generovaného záření. (2)



Obr. 2. Schéma laseru

S - optická lavice, **A** - laserová dioda, **B** - spojná čočka, **C**- sférická spojná čočka**,**

D - Nd:YAG krystal, **D**-**E** - optický rezonátor, **G** - detektor výstupního záření



Obr. 3. Schéma rezonátoru

1.2 Typy laseru

Lasery s pevnou fází

Tímto pojmem rozumíme typ laseru, jejichž aktivní prostředí je tvořeno ionty skupiny železa (např. Cr^{3+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, apod.) nebo ionty vzácných zemin (např. Nd^{3+},Sm^{2+}, Eu^{3+}, apod.), případně jiných prvku. Tyto ionty tvoří v podstatě nečistoty v hostitelském krystalu a jsou zdrojem stimulovaného záření.

K čerpání aktivních iontu na výchozí energetickou hladinu laseru se používá většinou impulsových výbojek (podobných fotoblesků), nebo speciálních žárovek. Pro impulsový provoz se nejčastěji používají xenonové výbojky. Lasery s pevnou fází pracující v trvalém provozu je nutno chladit, poněvadž v aktivní látce se rozptyluje tak velký výkon, že nedokonale chlazený krystal by se mohl úplně roztavit.

Rubínový laser

První laser, který byl realizován, pracoval s rubínem jako aktivní látkou. Rubínový laser pracuje jako tříhladinový. Pro své výhodné vlastnosti je rubínu jako aktivní látky používáno dodnes. Muže pracovat v impulsovém provozu za pokojové teploty a při trvalém provozu za teploty tekutého dusíku (77K). Aktivní ionty Cr^{3+} tvoří nečistoty v krystalu Al_2O_3 (safír). Safír Al_2O_3 je bílý a po aktivování ionty chromu se změní na rubín zbarvený růžově. Typická koncentrace je 0,05% váhového množství Cr_2O_3 v Al_2O_3, což odpovídá asi 1019 iontů na cm^3. Rubín se vybrousí do tvaru válečku s osou rovnoběžnou nebo kolmou na optickou osu krystalu. Váleček bývá dlouhý 5 až 10 cm a jeho průměr se pohybuje v mezích 6 až 10 mm.

Účinnost tohoto laseru závisí na tom, jak se podaří soustředit čerpací záření do aktivního prostředí. Systém s rubínem v ose šroubovicové výbojky je velmi málo účinný, neboť jeho prahová budící energie je poměrně velmi vysoká, až 103 J. Lepší účinností lze dosáhnout, umístí-li se rubín a výbojka do ohniskových os válce s eliptickým průřezem. (4)

Plynové lasery

Předností těchto laseru je možnost získat malé šířky spektrální linie výstupního světla, dále jejich vysoká účinnost (CO_2 laser 40%), nevýhodou jejich značné rozměry. Plynové lasery se používají především jako zdroje trvalého stimulovaného záření. Jako aktivní látky se používají bud směsi inertních plynu (He – Ne), nebo samotné inertní plyny Ne, Ar, Kr, Xe. Molekulárního laseru CO_2 se využívá k přechodům energetických hladin, vzniklých vibračním pohybem atomu v molekule a rotačním pohybem molekuly jako celku. Vzdálenosti vibračních hladin spadají do infračervené oblasti, zatímco rotační do oblasti milimetrových a submilimetrových vln. Čerpání plynových laseru se uskutečňuje nejčastěji pomocí vysokofrekvenčního elektrického výboje přímo v trubici s aktivním plynem nebo směsí plynu.

Laser He – Ne

Plynový laser se skládá ze tří hlavních částí: aktivního plynu (směs He – Ne), Fabry – Perotova rezonátoru a čerpacího zdroje. Směs plynu v poměru přibližně He:Ne = 10:1, s tlakem přibližně 1 torru je uzavřena ve skleněné nebo křemenné trubici. Délka trubice se pohybuje okolo 1 m. Průměr trubice bývá menší než 1 cm. Na oba konce trubice jsou natavena okénka. Normála k ploše okénka svírá s osou trubice Brewsteruv úhel _B, čímž jsou zabezpečeny minimální ztráty pro světlo polarizované v rovině nákresu. (4)

Argonový iontový laser

Je to nejvýkonnější zdroj záření ve viditelné oblasti (dosahuje se výkonu až 500 W).

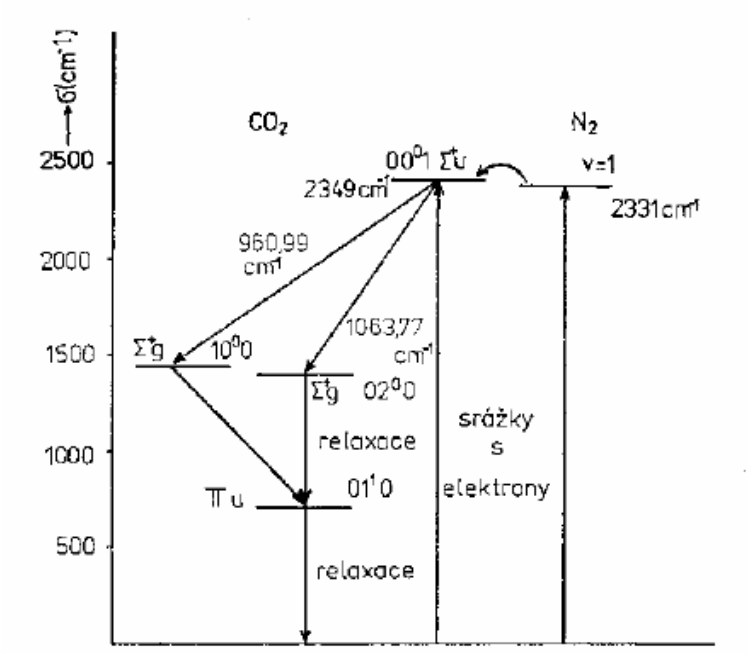
CO_2 laser

CO_2 - laser, dnes nejvýkonnější plynový laser s velkou účinností, byl objeven v roce 1964 C. K. M. Patelem. CO_2 je běžnou součástí atmosféry, jeho tříatomová molekula O = C = O má vysokou symetrii. U CO_2 - laseru se k zesilování využívá přechodu mezi vibračními

hladinami molekuly, takže laser generuje záření v infračervené oblasti spektra. Mechanismus buzení je možno vysvětlit na zjednodušeném schématu energetických hladin molekuly CO_2 a hladin významné příměsi – dusíku. Pro první CO_2 - laser bylo k excitaci použito doutnavého výboje. Buzení horní laserové hladiny (antisymetrická valenční vibrace 00°1 viz. obr.4) má velkou pravděpodobnost, takže při buzení srážkou s elektrony v doutnavém výboji muže dojít k inverzní populaci mezi ní a hladinou symetrické valenční vibrace 10°0 nebo hladinou druhé harmonické 02°0. Vyprazdňování spodních laserových hladin postupuje pres deformační vibraci 0110. Molekula CO_2 vykazuje tři typy vibrací: symetrickou valenční, antisymetrickou valencí a deformační.

Impulsních TEA CO_2 laseru se špičkovým výkonem v okolí 1MW se v poslední době široce používá k tzv. laserovému značkování výrobku. Při něm se jedním impulsem laseru zapíše na povrch výrobku značka, kód nebo celý nápis. Podstata tohoto procesu je v tom, že laserovým svazkem, který je vhodně zformován předem připravenou clonkou a jednoduchou optickou čočkou nebo zrcadlem, se odpaří tenká povrchová vrstvička materiálu, čímž se změní struktura povrchu nebo se odhalí základní vrstva, která má jiné vlastnosti než povrchová vrstvička, např. může mít jinou barvu. Nejčastěji se jedná o odstranění tenké vrstvy barvy z povrchu papíru, kovu nebo plastu.

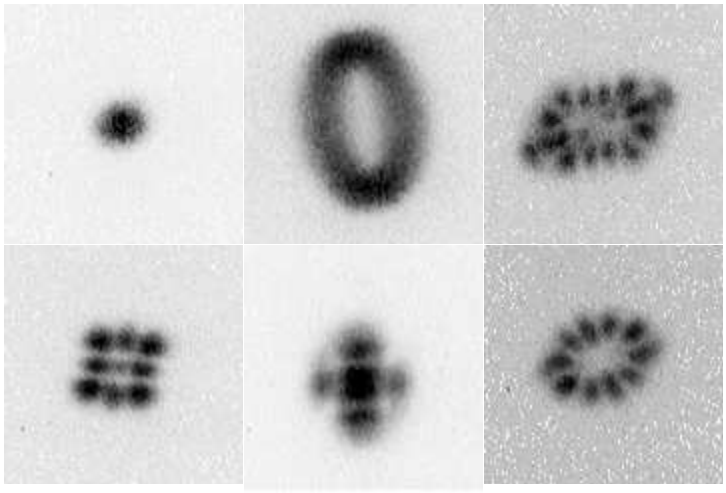
Výhodou tohoto způsobu značkování je vyšší kvalita značky – její lepší citlivost, odolnost proti otěru a vyloučení přímého kontaktu mezi značkujícím zařízením a výrobkem. Základním parametrem určujícím kvalitu procesu je hustota dopadající energie. Je to nejvýkonnější plynový laser s velkou účinností. (3)



Obr. 4. Schéma energetických hladin CO2–laseru s vyznačením vibračních hladin dusíku

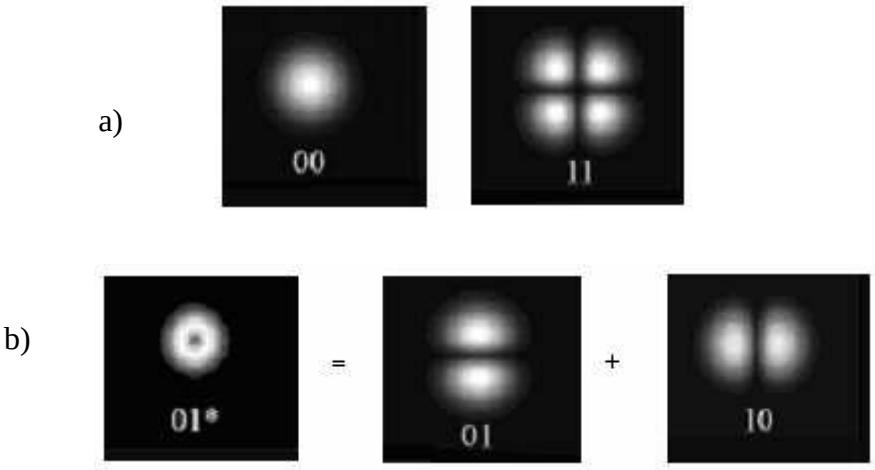
Módy CO_2 laseru

Laserové záření vygenerované v rezonátoru má určitou hustotu energie. Tvar průřezu svazku záření je významně závislý nejen na vlnové délce fotonu, ale též na souososti, vzdálenosti a zakřivení zrcadel a na průměru laserové trubice (u CO_2 laseru výbojové trubice). Tvar průřezu svazku, neboli mód, je označován TEM (Transverse electromagnetic). Teoreticky muže být vytvořeno nekonečné množství módu, ale jen některé mají praktické průmyslové uplatnění. V příčném průřezu paprsek vytváří bud jen jednoduchou stopu – základní mód – anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci – mód –v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru, viz. obr. 5. (4)



Obr. 5. Příčné struktury svazku zachycené CCD kamerou

Vybrané módy jsou uvedeny na obr. 5. Na obr. 6 a) jsou příklady osově symetrických módu. V symbolech $TEM_{m,n}$ vyjadřují indexy m, n pocty minim intenzity ve směrech dvou na sebe kolmých os. Na obr. 6 b) jsou příklady středově symetrických módů. V symbolech $TEM_{m,n}$ potom značí: m – počet minim intenzity ve směru radiusu příčného řezu svazkem, n – polovinu poctu minim intenzity po obvodu příčného řezu svazkem. Módy označené symboly $TEM_{m,n}$ jsou superpozicemi dvou stejných módu $TEM_{m,n}$, vzájemně pootočených o 90°. (4)



Obr. 6. Vybrané módy TEM s a) osou, b) středovou symetrií

Polovodičový laser

Polovodičové lasery jsou poměrně rozšířeným typem laseru. Vyznačují se vysokou účinností, běžně až 50%. Pracují jak v kontinuálním, tak pulzním režimu a mohou dosahovat relativně vysokých výstupních výkonů při velmi kompaktním uspořádání. Polovodičový laser je tvořen v podstatě přechodem p-n miniaturního krystalu GaAs (gallium arsenid). Po vzniku prvního diodového laseru GaAs bylo postupně vytvořeno velké množství polovodičových laseru, pracujících na přechodech p-n.

Barvivové lasery

Jsou založeny na stimulované emisi v roztocích organických barviv. Jsou to lasery, které lze ladit v širokém rozsahu vlnových délek. Hrubého nastavení vlnové délky emitovaného záření lze dosáhnout volbou barviva, jemné nastavení volbou rozpouštědla. Provozují se jak v pulzním provozu tak kontinuálním režimu. Dosahované výkony jsou řádově 10 W.

Chemické lasery

K buzení aktivního prostředí přispívá energie uložená v chemické vazbě. Používají se především pro vojenské účely. Klasickým chemickým laserem je HF – laser. Jeho aktivní prostředí se vytváří při excitaci směsi molekulárního vodíku s molekulárním fluorem v plynném stavu. (4)

Excimerové lasery

Používají se jako aktivní prostředí tzv. excitované dimery. Jsou to směsi vzácných plynu s halogeny, u nichž k vytvoření chemické vazby muže dojít jen v excitovaném stavu. Excitují-li se molekuly obou složek směsi, dojde ke vzniku sloučeniny, která je na energeticky vyšší hladině. Když přejde molekula do základního stavu, automaticky se rozpadne, a tím vyprazdňuje nižší energetickou hladinu a zachovává tak inverzi obsazení. Excimerové lasery jsou významnými zdroji v ultrafialové oblasti optického záření (193 – 351nm). Výkon komerčních laseru dosahuje několika desítek Wattů. (3)

2 LASEROVÉ POPISOVÁNÍ

Během posledních dvou desetiletí se značení a gravírování stalo jednou z nejrozšířenějších laserových aplikací jak v průmyslu, tak i v oblasti reklamy, výroby dárkových předmětů a dokonce i umění. Popisování pomocí laserové technologie představuje dokonalé propracování popisovaného nápisu či grafiky jak po technické, tak i po estetické stránce. Oproti jiným metodám laserové značení vyniká trvanlivostí naneseného nápisu či grafického motivu, flexibilitou, vysokou rychlostí popisu a nízkými provozními náklady. Navíc se jedná o nekontaktní způsob značení. Také se popisování používá u vstřikovacích, odlévacích a lisovacích forem, které se používají v plastikářském, gumárenském a hutním průmyslu. Laserové značení se používá ke značení finálních výrobků nebo dílu. Propisovacím prostředkem je světelný paprsek, který vytváří na povrchu materiálu s vysokou přesností stálý, velmi kontrastní a mechanicky odolný popis. Popis probíhá bez přímého kontaktu s materiálem, nedochází k mechanické deformaci, ani k znečištění povrchu popisovaného materiálu. Vynikající grafická kvalita vyplývá z mimořádně přesného a jemného zpracování písmen, znaku a grafických předloh. Popisovat se dají plochy rovinné i válcové, po kružnici či jinak zakřivené, popisovat lze i na nepřístupných místech. Laserové značení má velkou trvanlivost a je nesmazatelné. Výhodou je rychlost, vysoká produktivita a nízká cena popisu. Flexibilita laserových strojů umožňuje nanášení jak alfanumerických kódů, například sériových čísel, čárových kódů, tak i vektorové grafiky nebo rastrových obrázku. Ve speciálních aplikacích, ku příkladu při precizním značení či rytí kovu, nejčastěji ve zlatnictví.

Laserový svazek vedou dvě galvanometrická zrcadla a je přenesen optickou soustavou na popisovaný výrobek. Zrcadla se pohybují ve 2D prostoru, to znamená, že mění svou polohu v ose x a y. Tímto způsobem dochází k laserovému popisu. Laserové popisování můžeme tedy chápat jako psaní perem. Požadovaný symbol popisu se vytváří v programech jako jsou CAD, CAM apod.

2.1 Výhody a nevýhody laserového popisování

- vytváří trvalé popisy s neomezenou trvanlivostí

- umožňuje výjimečně výrazné kvalitní značky

- popisuje množství různých materiálu včetně plastických hmot, kompozitu, keramiky, pryže, kovu a slitin

- píše přímo na výrobek, a tak odstraňuje náklady na nálepky a zjednodušuje výrobní proces

- popisuje nepravidelné nebo zakřivené povrchy

- automatické razení dat umožňuje trvalou identifikaci výrobku a jeho sledovatelnost

- velmi malá písmena popisu vytvářejí čitelné značky i drobného tisku

- je to bezkontaktní metoda, která minimalizuje napětí v materiálu

- pracuje vysokou rychlostí a snižuje výrobní náklady

- snadno vytváří složitou grafiku i texty

- podporuje popis čárových kódů a jiných symbolů

- je to čistý a bezpečný postup, který nevyžaduje použití kyseliny, inkoustu, rozpouštědla

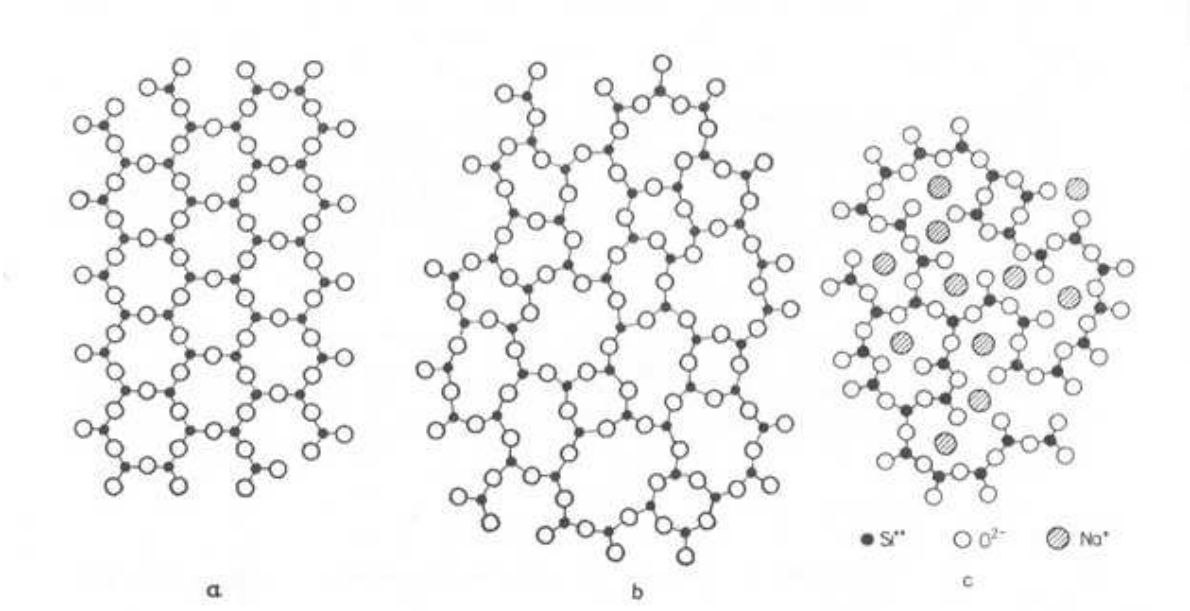
- nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady laserů

- ne všechny materiály můžou být popsány v požadované kvalitě

2.2 Sklo

Sklo patří k velmi významným materiálům s širokým uplatněním v průmyslu, stavebnictví, architektuře i umění. Ve stavebnictví se nejčastěji používá k zasklívání okenních a dveřních otvorů. Významně se uplatňuje také jako architektonický prvek, kdy hraje výraznou úlohu při vytváření interiérů a exteriérů.

Sklo je anorganický amorfní (nekrystalický) materiál, vyrobený tavením vhodných surovin a následným řízeným ochlazením vzniklé skloviny bez krystalizace. Skelný stav vzniká plynulým přechodem ze stavu kapalného do stavu pevného, při ochlazování skla dochází k plynulému růstu viskozity až na tak vysokou hodnotu, že se materiál navenek jeví jako pevná látka.Na rozdíl od krystalických látek postrádá struktura skla pravidelné, symetrické a periodické uspořádání základních stavebních jednotek na delší vzdálenosti.(obr. 7) (3)

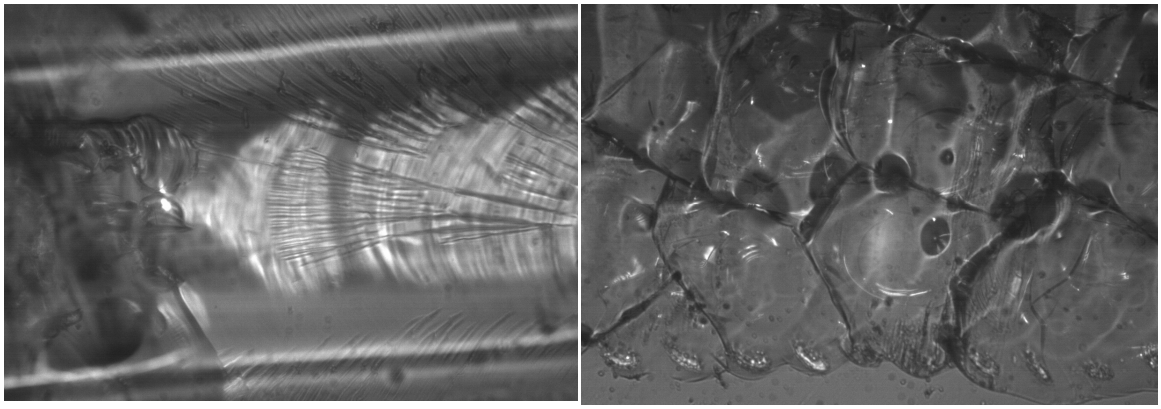


Obr. 7. Plošné znázornění rozdílů mezi: a - strukturou křemene, tj. krystalického SiO_2, b - skelného SiO_2, c - sodnokřemičitého skla.

Z chemického hlediska jsou běžná skla tuhým roztokem různých křemičitanů sodných, draselných, vápenatých, případně olovnatých nebo barnatých, které jsou doprovázeny dalšími sloučeninami, zejména oxidy kovů.
Jednou z nejpoužívanější a nejčastější soustavou skla je - Na_2O – CaO - SiO_2 – křemičité sodnovápenaté sklo. Sklovina tohoto složení slouží pro výrobu plochého, obalového a užitkového skla.(3)

2.3 Popis skla

Dekorace skla laserem je jistou modifikací laserového řezání. V místě dopadu laserového záření na povrch skla dojde k částečnému odpaření a natavení skloviny a k jejímu povrchovému popraskání (Obr. 8). Na vzniklých trhlinách dochází k rozptylu světla a tím se dociluje zářivého vzhledu dekoru. Pro dekoraci skla se využívá laserů, jejichž záření je sklem dobře absorbováno, např. kontinuálního CO_2 laseru. Novinkou v dekoraci skla laserem je prostorový popis do skla. 3D laserové gravitování je speciální metoda, která nám umožňuje vytvářet různé typy obrázků ve třech dimenzích do křišťálových kostek. Toto bylo umožněno vylepšením laserové technologie Nd:YAG. Laserový paprsek proniká stěnou kostky a v určeném místě mění strukturu křišťálu vytvořením tisíce drobných rytin, ze kterých se hotový obraz skládá. Předlohy se navrhují pomocí modelovacího 3D programu. (4)



Obr.8 Ukázka popraskání a natavení povrchu po dopadu laserového záření

Laser vytváří na povrchu materiálu s vysokou přesností stálý, mechanicky odolný, velmi kontrastní a jinak nenapodobitelný popis. Vše probíhá v jediné krátké operaci bez použití chemických přísad a inkoustů nebo mechanických zásahů do struktury materiálu. Výška znaků je obvykle zlomky až jednotky milimetrů, tloušťka odpařené vrstvy materiálu je v řádu mikrometrů.

Laserem je možné označovat všechny materiály, jako kalené i nekalené oceli a litiny, titan, mosaz, bronz, hliník a jeho slitiny, slinutý karbid, zlato, keramiku, drahé kameny, plasty, dřevo, sklo, gumu, papír, kůži atd. Popisovaný povrch může být broušený, pískovaný, lakovaný, černěný, smaltovaný, opatřený povlakem chromu, zinku, titankarbidu, titannitridu, keramickým povlakem apod. Laserem lze popisovat rovinné, válcové i jinak zakřivené plochy, a to i na málo přístupných místech (5)

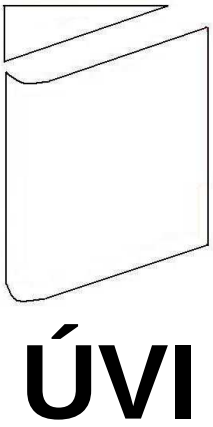
II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na vliv jakosti plochy popisované laserem, pro různé povrchové úpravy materiálu a různé technologické podmínky laseru. Následně pak bude provedeno vyhodnocení vlivu různých technologických podmínek na jakost povrchu.

3.1 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky použité pro bakalářskou práci jsou z materiálu - Na_2O – CaO - SiO_2 – křemičité sodnovápenaté sklo. Polotovar byl zvolen ve formě desky s rozměry 100x100x7mm. Plochy určené k značení laserem byly různě povrchově upraveny a následně popsány laserem. Pro popis jsem si zvolil logo UTB se zkratkou Ústavu Výrobního Inženýrství (Obr. 9)



Obr. 9. Navržené logo

Tab. 1. seznam vzorků, povrchová úprava, rychlost a výkon laseru.

Číslo vzorku	povrchová úprava	výkon laseru (%)	posuv laseru (%)
vzorek č. 1.	žádná, čiré sklo	50	70
vzorek č. 2.	žádná, čiré sklo	30	50
vzorek č. 3.	žádná, čiré sklo	50	30
vzorek č. 4.	žádná, čiré sklo	50	100
vzorek č. 5.	žádná, čiré sklo	70	50
vzorek č. 6.	žádná, čiré sklo	100	50
vzorek č. 7.	broušené	100	30
vzorek č. 8.	pískované	100	50
vzorek č. 9.	vypálená barva	80	100
vzorek č. 10.	nevypálená barva	25	100
vzorek č. 11.	Sklářské barvivo	100	80

3.2 Zařízení použité v praktické práci

3.2.1 **Talysurf CLI 500** (Obr. 10)

Univerzální systém měření textury povrchu, který je umožněn volbou měření buď indukčním dotykovým způsobem Form Talysurf, nebo bezdotykovým způsobem reprezentovaným laserovou triangulační sondou a CLA konfokálním snímačem. Vyniká mimořádnou rychlostí a přesností měření v režimu 2D a 3D.

Je určen především pro měření malých součástí. Pro instalaci přístroje stačí půdorysná plocha stolu 500x310 mm.

Technické údaje:

měřící prostor: 50 x 50 x 50 mm

přesnost posuvného mechanismu:

- přímost profil (L) 50mm

  ± 0,3 μm

- rovinnost plocha (LxL) 50mm

  ± 0,5 μm

-rychlost měření: 30 ; 15 ; 10 ; 5 ; 1 ; 0,5 mm/s

rychlost polohování (X-Y) max. 30 mm/s

Obr. 10. Přístroj Talysurf CLI 500

3.2.2 Plotrový laser ILS 3NM

Pro popis navrženého loga na zkušební vzorky byl použit laser typového označení ILS 3NM (Obr. 11) Značící laserový systém ILS 3NM je zařízení vhodné pro značení a řezání. Připojuje se stejně jednoduše jako laserová tiskárna. Zdrojem laserového záření je CO_2 v několika výkonových variantách. Splňuje podmínky pro zařazení do třídy bezpečnosti 1. Výhodou tohoto zařízení je již připevněný pojezdový stůl a otevírací čelní dvířka. Ty slouží pro značení nekonečně dlouhých desek. Laser může pracovat pomocí softwaru Corel Draw nebo Auto-CAD. Se strojem lze popisovat, gravírovat a řezat širokou škálu materiálů, například plasty, pryž, kůži, sklo, povlakovaný kov, kámen, dřevo, keramiku. Technické parametry zařízení jsou uvedeny v Tab. 2.

Obr. 11. Laser ILS 3NM

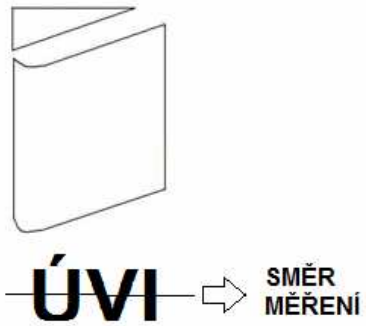
Laser ILS 3NM	
Výkon	**100W**
Vnější rozměry	**900(D) x 865(H) x 990(V)**
Pracovní pole	**660 x 495 x 210(V) mm**
Rozlišení	**1000, 500, 333, 250, 200, 166 DPI**
Řízení rychlosti posuvu	**Nastavitelné od 1 do 1524 mm/sec**
Řízení výkonu laseru	**Nastavitelné od 0 do 100% výkonu**
Nastavení ohniskové vzdálenosti	**Automatické**
Operační mody	**Rastrové gravírování , vektorové řezání**
Komunikační rozhraní	**USB, LPT1, LAN**
Integrovaná paměť	**64 MB – max 99 souborů**
Displej panel zobrazuje	**seznam vzorů, síla laseru, gravírovací ryclost, čas průběhu, načtené soubory, nastavení a diagnostiku stroje**
Napájeni	**~110 / ~240 V**
Chlazeni	**Vzduchové**

Tab. 2. Technické parametry laseru ILS 3NM

4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Praktická část měření se dělí na dvě skupiny. První skupinou jsou vzorky bez povrchové úpravy. U těchto vzorků je měřena dosažená hloubka stopy v závislosti na posuvu a výkonu laseru. Hloubka stopy byla měřena na přístroji Talysurf CLI 500. Přístroj vyhodnotí strukturu povrchu a provede vyjmutí profilu 2D z povrchu 3D. Výstupem této analýzy je graf, který nám znázorňuje vypálenou stopu v řezu. Směr měření je znázorněn na obr. 12. Graf je dále upraven korekcí a vyrovnáním. Z důvodu vyhodnocení je graf převeden na *x, y* souřadnice. Dané číselné hodnoty jsem zpracoval v programu Microsoft Excel.

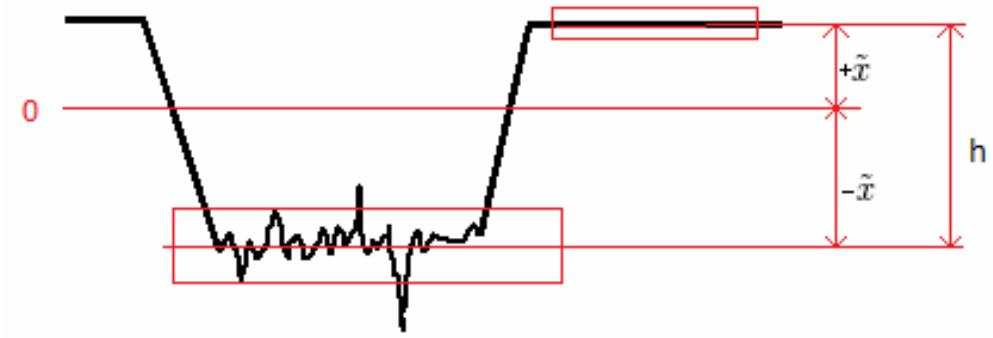
Druhou skupinou jsou vzorky s povrchovou úpravou. U této skupiny jsou hodnoceny různé faktory, které jsou popsány u každého vzorku zvlášť.



Obr. 12. Grafické znázornění směru měření

4.1 Vzorky bez povrchové úpravy

Po vložení grafu do programu Microsoft Excel jsem graf ořezal, jak je znázorněno na obr. 13. Oblasti v červených obdélnících jsou zdrojová data pro výpočet. V programu jsem vypočítal hodnoty $+\tilde{x}$, $-\tilde{x}$, *h*.



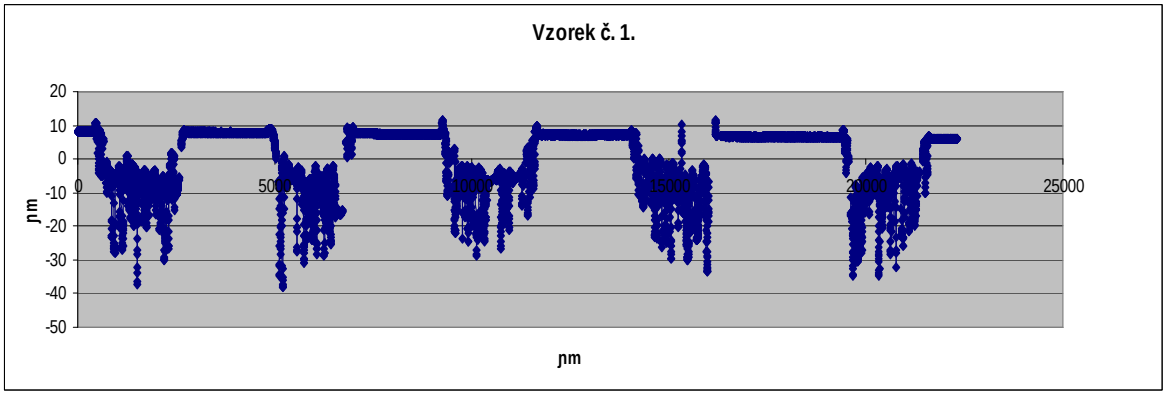
Obr. 13. grafické znázornění vyhodnocení měření

4.1.1 Vzorek č. 1

Výkon laseru: 50%

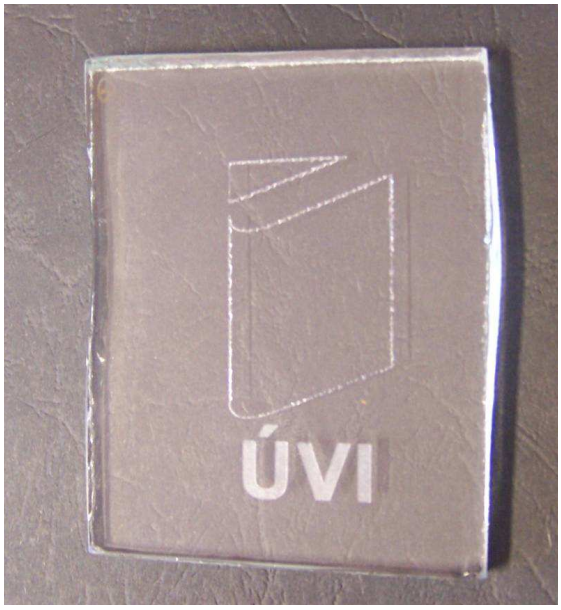
Posuv laseru: 70%

Obr. 14. Graf stopy v řezu vzorku č. 1



Tab. 3. Naměřené hodnoty vzorku č. 1

Vzorek č.1					
medián + (µm)	7,37				
medián - (µm)	-7,12	-7,09	-6,21	-9,20	-7,27
hloubka h (µm)	14,49	14,46	13,59	16,58	14,65
PRŮMĚRNÁ HLOUBKA (µm)	**14,75**				



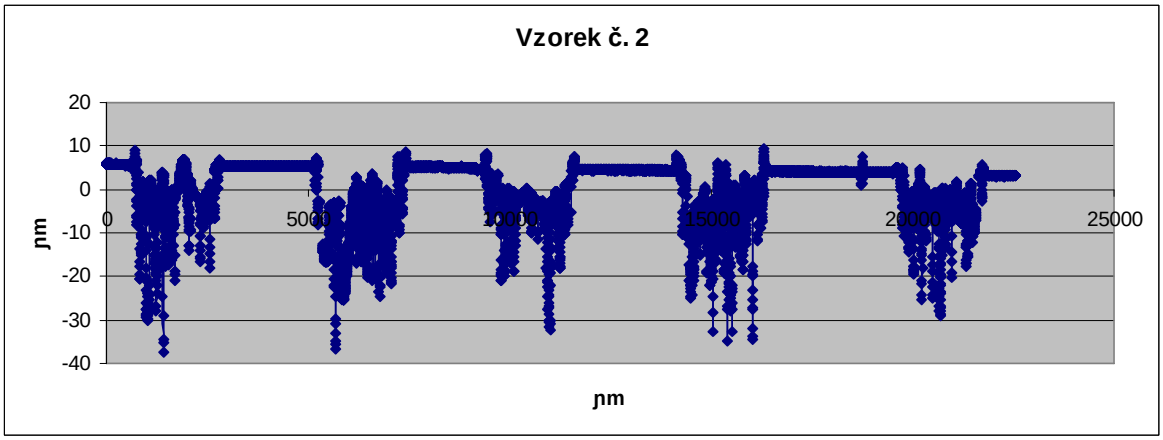
Obr. 15. Vzorek č. 1

4.1.2 Vzorek č. 2

Výkon laseru: 30%

Posuv laseru: 50%

Obr. 16. Graf stopy v řezu vzorku č. 2



Tab. 4 Naměřené hodnoty vzorku č. 2

Vzorek č.2					
medián + (µm)	4,556				
medián - (µm)	-2,025	-8,919	-3,636	-5,594	-3,740
hloubka h (µm)	6,582	13,475	8,193	10,151	8,296
PRŮMĚRNÁ HLOUBKA (µm)	**9,34**				

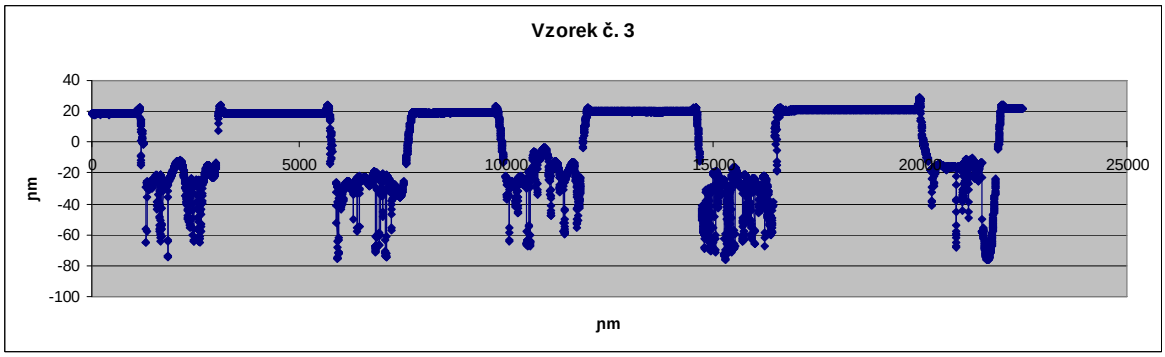
Obr. 17. Vzorek č. 2

4.1.3 Vzorek č. 3

Výkon laseru: 50%

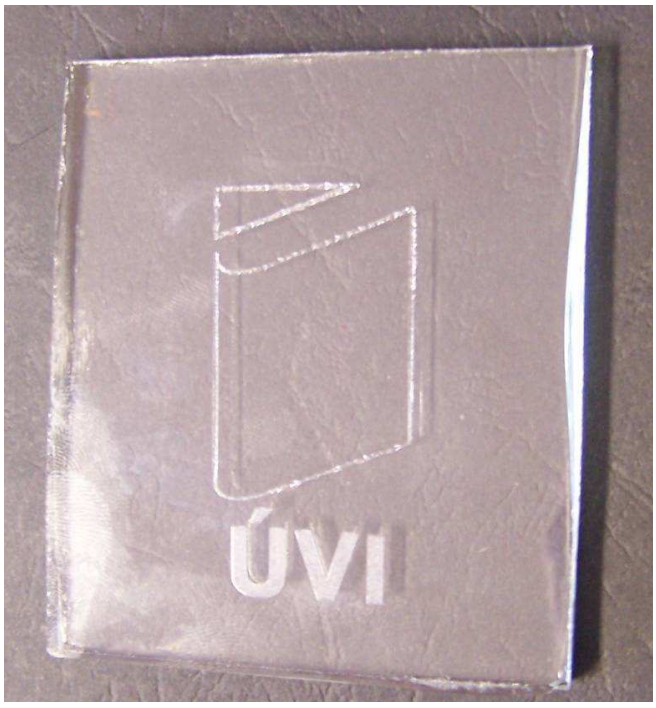
Posuv laseru: 30%

Obr. 18. Graf stopy v řezu vzorku č. 3



Tab.5 Naměřené hodnoty vzorku č. 3

Vzorek č.3					
medián + (µm)	19,039				
medián - (µm)	-24,258	-26,612	-21,600	-30,863	-16,346
hloubka h (µm)	43,297	45,651	40,638	49,901	35,384
PRŮMĚRNÁ HLOUBKA (µm)	**42,97**				



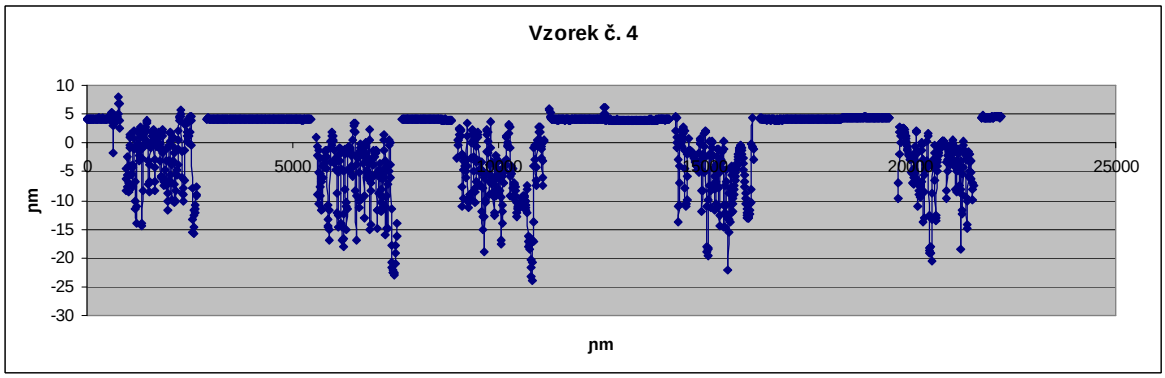
Obr. 19. Vzorek č. 3

4.1.4 Vzorek č. 4

Výkon laseru: 50%

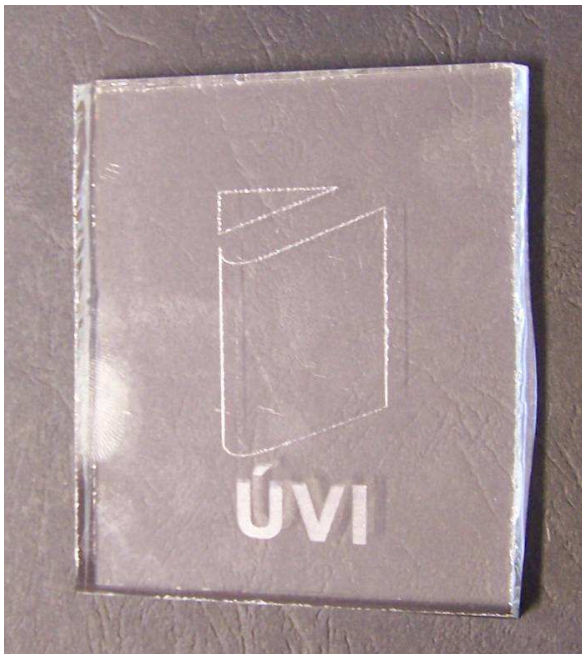
Posuv laseru: 100%

Obr. 20. Graf stopy v řezu vzorku č. 4



Tab. 6 Naměřené hodnoty vzorku č. 4

Vzorek č.4					
medián + (µm)	4,076				
medián - (µm)	-1,515	-4,580	-5,948	-4,049	-2,865
hloubka h (µm)	5,591	8,656	10,024	8,125	6,941
PRŮMĚRNÁ HLOUBKA (µm)	**7,87**				



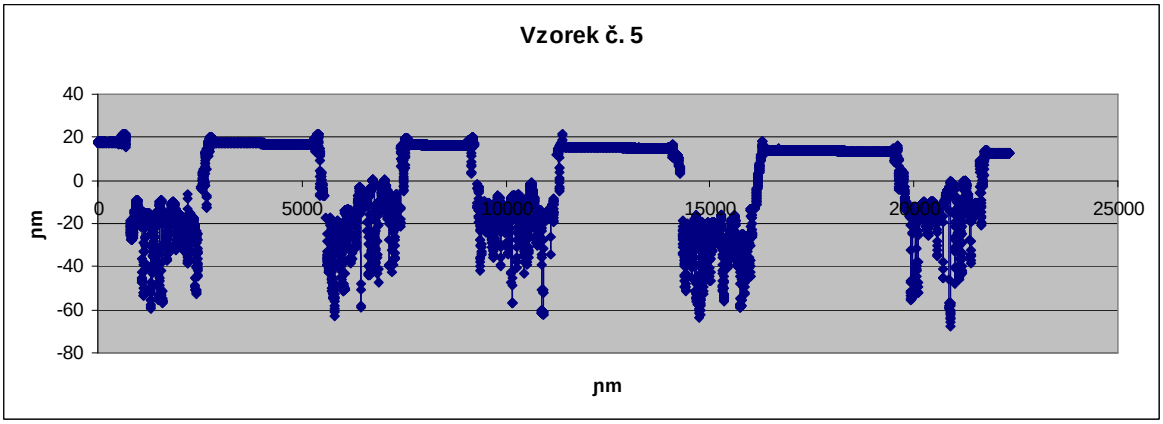
Obr. 21 Vzorek č. 4

4.1.5 Vzorek č. 5

Výkon laseru: 70%

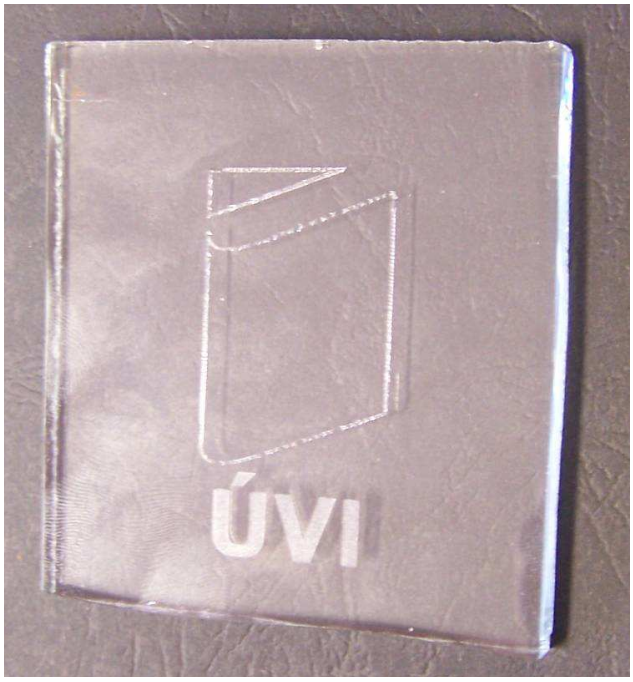
Posuv laseru: 50%

Obr. 22 Graf stopy v řezu vzorku č. 5



Tab. 7 Naměřené hodnoty vzorku č. 5

Vzorek č.5					
medián + (µm)	16,34				
medián - (µm)	-18,90	-16,08	-14,10	-27,50	-12,67
hloubka h (µm)	35,24	32,42	30,44	43,84	29,00
PRŮMĚRNÁ HLOUBKA (µm)	**34,19**				



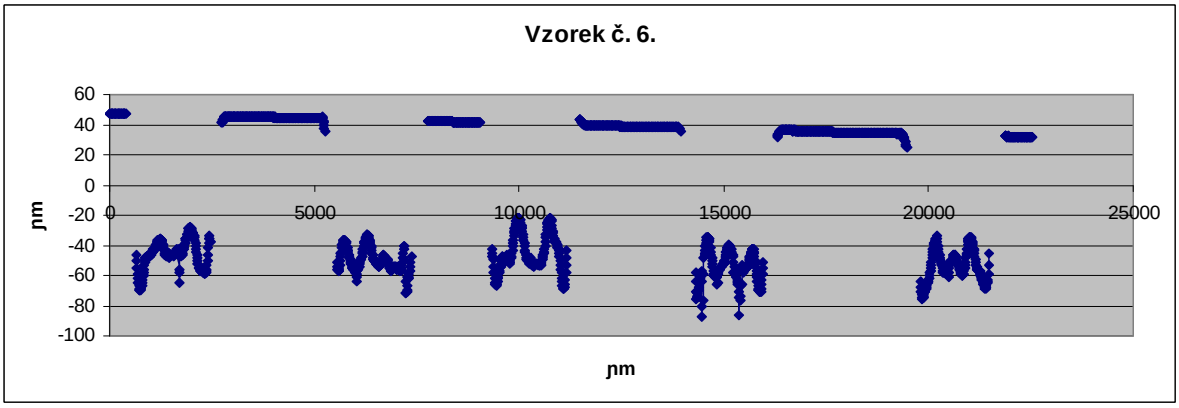
Obr. 23 Vzorek č. 5

4.1.6 Vzorek č. 6

Výkon laseru: 100%

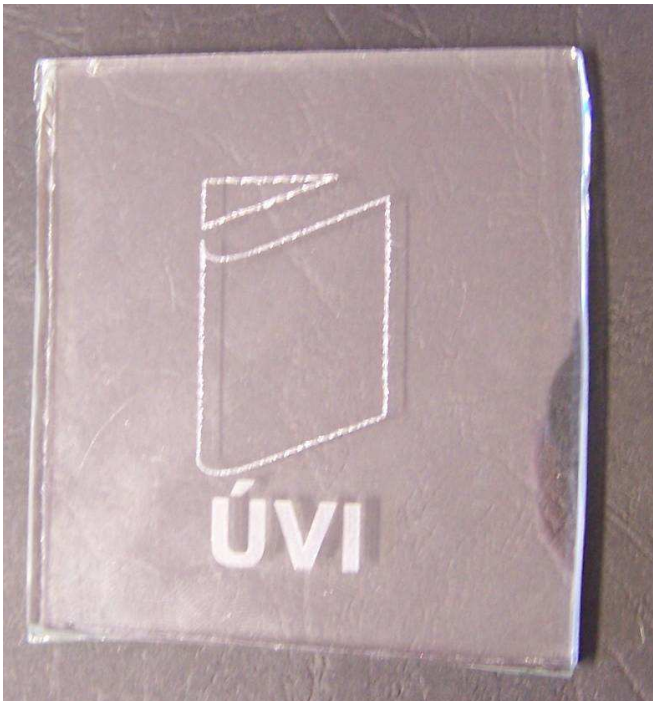
Posuv laseru: 50%

Obr. 24. Graf stopy v řezu vzorku č. 6



Tab. 8 Naměřené hodnoty vzorku č. 6

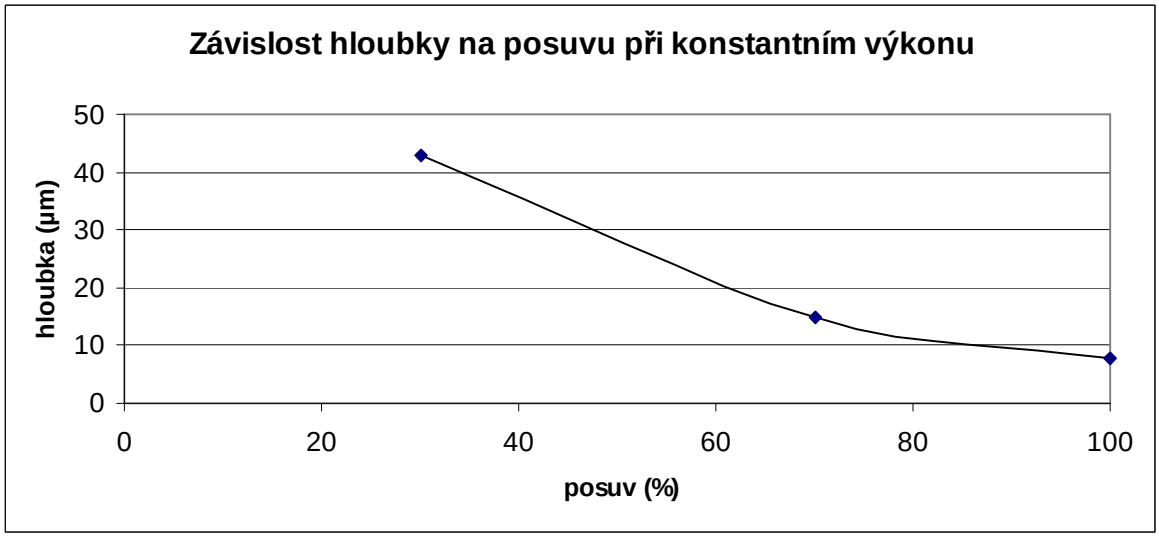
Vzorek č.6					
medián + (µm)	38,76				
medián - (µm)	-45,88	-51,31	-48,23	-55,02	-54,98
hloubka h (µm)	84,64	90,07	87,00	93,78	93,75
PRŮMĚRNÁ HLOUBKA (µm)	**89,85**				



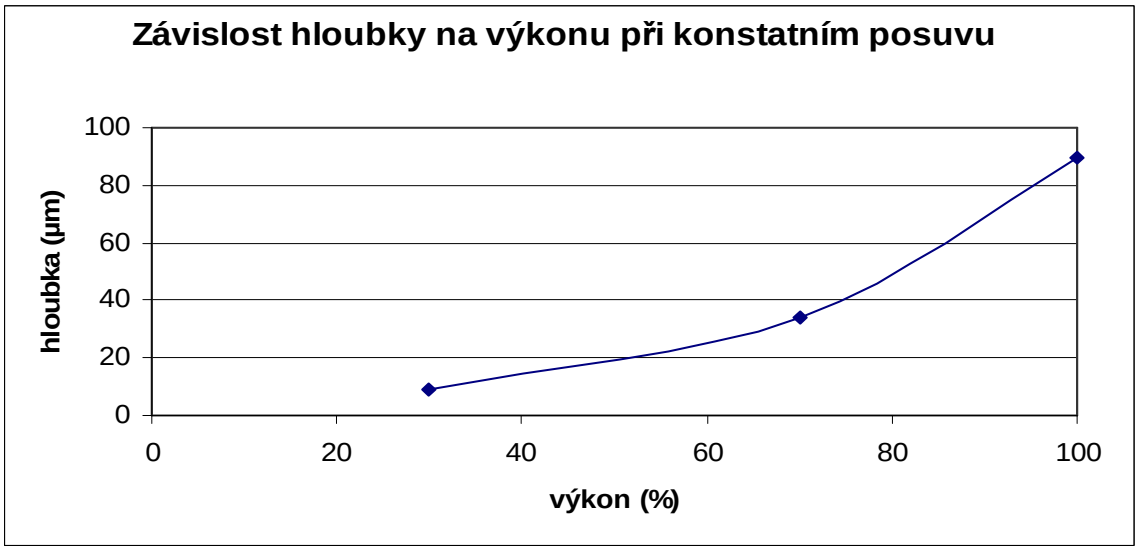
Obr. 25 Vzorek č. 6

Vzorek č.	výkon (%)	posuv (%)	hloubka (µm)
3	50	30	42,97
1	50	70	14,75
4	50	100	7,87
2	30	50	9,34
5	70	50	34,19
6	100	50	89,85

Tab. 9. Přehled hloubky při zadané rychlosti a posuvu



Obr. 26. Graf závislosti hloubky na rychlosti při konstantním výkonu(50%)



Obr. 27. Graf závislosti hloubky na výkonu při konstantním posuvu (50%)

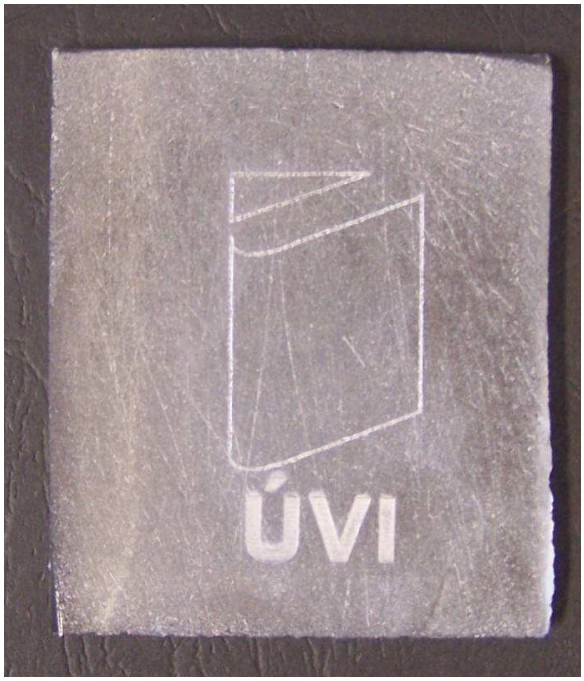
Podle očekávání je hloubka větší s rostoucím výkonem (Obr. 27). U posuvu je průběh opačný. S rostoucím posuvem hloubka klesá(Obr. 26). Dosažené hloubky se dá využít při dalším zpracování (např. barvení). Problém u popisu laserem vzniká při vektorovém vypalování. Při velkém výkonu a nebo naopak malém posuvu vznikají viditelné prasklinky. Nejlepšího výsledku bylo dosáhnuto u vzorku č. 4, kdy při vektorovém popisu nejsou prasklinky viditělné. U tohoto vzorku byl použit výkon 50% a posuv 100%.

4.2 Vzorky s povrchovou úpravou

Povrchová úprava u skla je často používána pro dekoraci skla. Pro dekoraci se využívá laserů, jejichž záření je sklem dobře absorbováno, např. kontinuálního CO_2 laseru. Hlavním faktorem je tedy celkový vzhled.

4.2.1 Vzorek č.7

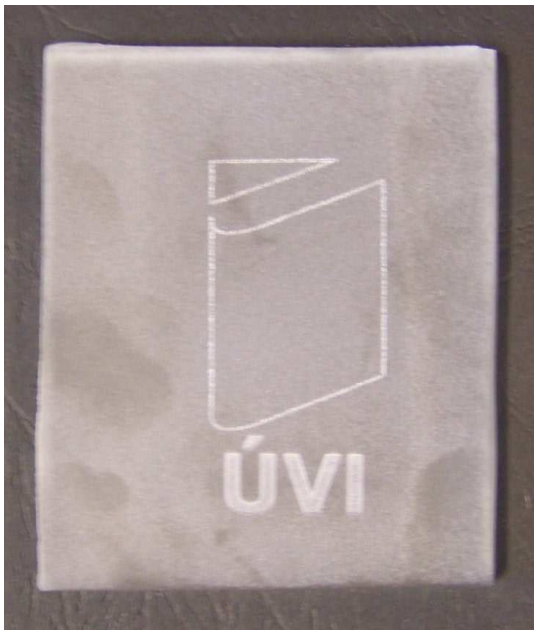
U tohoto vzorku je povrch upraven broušením. Povrch je tedy matný a zčásti neprůhledný. To je do jisté míry výhodou, jelikož při vypálení stopy laserem můžou vznikat drobné prasklinky, které u čirého skla jsou vidět. Nevýhodou u brouseného povrchu je, že je povrch narušen drobnými rýhami, které navíc můžou být viditelné.



Obr. 28 Vzorek č. 7, broušený povrch

4.2.2 Vzorek č.8

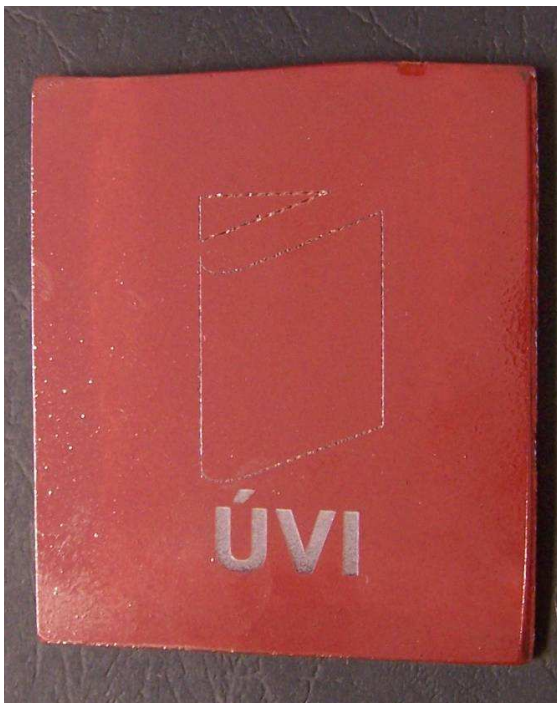
Technologie pískování se často používá u reklamního zboží. Proto je opět hlavním faktorem vzhled. Pískování je dnes stále se rozšiřující širokospektrální technika tryskání různých druhů abraziv, čímž se nejčastěji očistí, zdrsní, nebo jinak upraví požadovaná plocha pískovaného předmětu. Povrch má podobné vlastnosti jako povrch broušený. Výhodou je jednolitost povrchu a není narušená struktura materiálu jako u broušení.



Obr. 29. vzorek č.8, pískovaný povrch

4.2.3 Vzorek č. 9

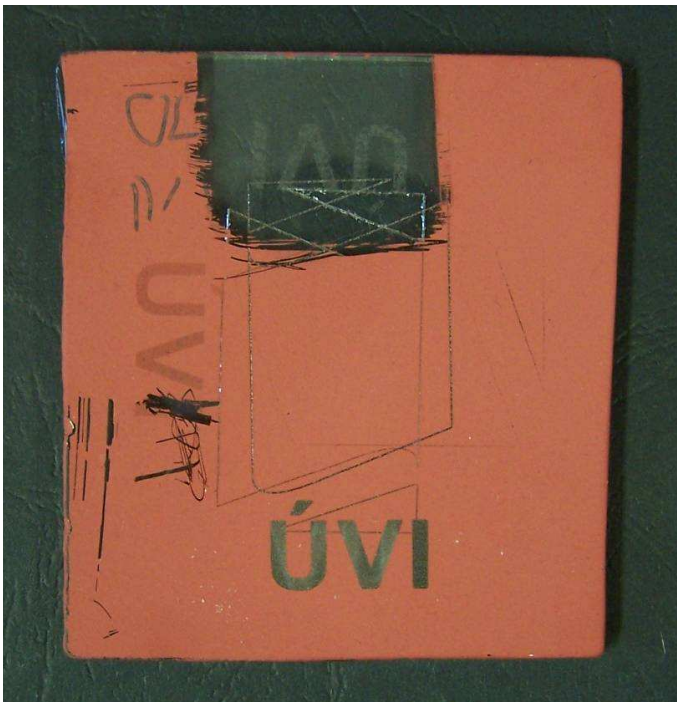
Vzorek byl před vypálením zvoleného loga laserem natřen barvou a barva byla vypálena. Před samotnou malbou je třeba daný podklad řádně odmastit. Poté je povrch natřen a nátěr musí zaschnout. Základem jsou jemně mleté směsi lehce tavitelného bezbarvého skla s barvícími látkami a pojidlem. Barva se pro fixaci vypaluje po dobu 40 minut na 160°C. Po vypálení má povrch vynikající odolnost vůči světlu a ani časem nebledne. Barvy jsou vodou ředitelné. Natřený povrch je neprůhledný, ovšem v místě vypálení je barva odstraněna a materiál se stává průhledný.



Obr. 30. Vzorek č. 9 s barveným povrchem

4.2.4 Vzorek č. 10

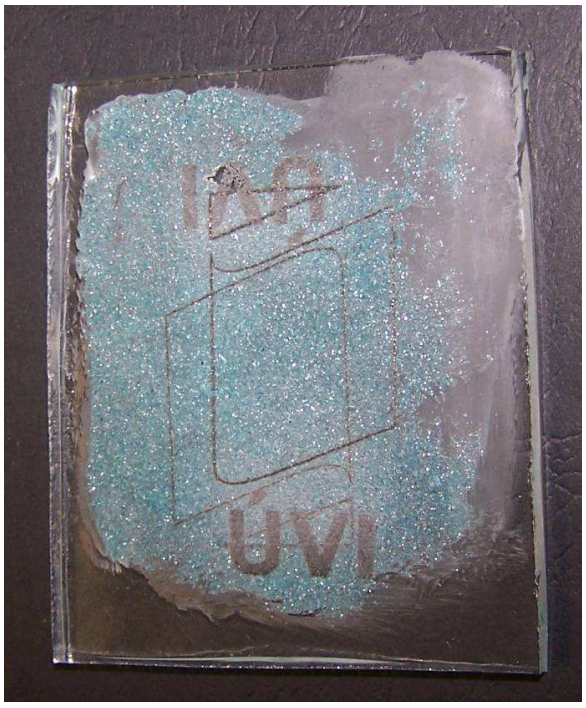
Stejně jako u vzorku č. 9 i na tento povrch byla nanesena barva. Ovšem nebyla už vypálena. Cílem bylo zjistit, zda-li se účinkem laseru barva nataví a vypálí se do povrchu skla. Při malém výkonu laseru paprsek neproniknul ani na povrch skla a odpařil pouze malou vrstvu barvy. Při vyšším výkonu laser odpařil vrstvu barvy i vrstvu skla. Pokus tedy neprokázal, že by za pomocí laseru šla barva vypálit.



Obr. 31. Vzorek č. 10 s nevypálenou barvou

4.2.5 Vzorek č. 11

Na povrch vzorku byl nalepen rozemletý barevný rubín. Prášek jsem nalepil z důvodu chlazení laseru vzduchem.Tato technologie se používá k barvení skla. Rubíny se tvarují do šišek (válcových tyčí příslušných barev), které se potom mohou rozemlet na jemný prášek. Foukané sklo se smočí v takto připraveném prášku. Cílem bylo zjistit, zda-li se působením laseru prášek spolu se sklem nataví a sklo se zbarví. Vznikl ovšem stejný problém jako u předchozího vzorku. Při malém výkonu laseru se odpařila pouze tenká vrstva prášku. Při vyšším výkonu, laser pronikl na povrch skla a vrstva prášku se odpařila. Zabarvení skla laserem za použití rozemletého rubínu se nezdařilo.



Obr. 32. Vzorek č.11 s rozemletým rubínem.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zkoumat vliv různých technologických podmínek pro popis skla laserem.

V teoretické části jsem se věnoval historii laseru, principu, druhům laseru a jeho využití pro technologii popisování. Praktická část obsahuje přípravu vzorků, použité zařízení a naměřené hodnoty.

U vzorků bez povrchové úpravy byla měřena hloubka vypálené stopy. Naměřené hodnoty dokazují, že vztah mezi hloubkou a výkonem jsou přímo úměrné. Čím vyšší výkon tím větší hloubka. U rychlosti je průběh opačný. S rostoucí rychlostí je hloubka menší. Velký rozdíl je mezi gravírováním plochy a vektorovým popisem. Zatímco u gravírování si můžeme dovolit použít vyšší výkon aniž by byl povrch nebo okraj vypáleného obrazce poškozen, tak u vektorového popisu je poškození viditelné. Nejlepšího výsledku dosáhl vzorek č. 4. U vektorového popisu nejsou viditelné praskliny. Proto volím jako optimální podmínky pro popis skla nastavení laseru na výkon 50% a posuv 100%.

U vzorků s povrchovou úpravou jsem hodnotil různá kritéria. Z výsledků vzorků č. 10 a 11 vyplívá, že laser není schopný působením teploty vypálit barvu nebo natavit rozemletý rubín. Důvodem bude vysoká teplota laseru při vypalování. Materiál se odpařuje, a proto není možné míchání jednotlivých vrstev. U broušeného, pískovaného a barveného povrchu je výhodou částečná až úplná neprůhlednost, která může zakrýt případné vady po vypálení.

Laserové značení v současnosti patří k nejrozšířenějším průmyslovým aplikacím laserů. Tato technologie umožňuje vytváření nesmazatelného dokonalého propracování nápisu či grafiky, jak po technické, tak i po estetické stránce na povrchu značeného výrobku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Voříšek M. a Navrátil Z.: Optoelektronika , Praha , SNTL 1975

[2] Sochor V.: Lasery a koherentní svazky , Praha , CSAV 1990

[3] http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html

[4] http://www.3dphotocrystal.cz/

[5] http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil

[6] http://dp.bajaja.net/04.html

[7] http://xuv.fbmi.cvut.cz/uploads/50_let_laseru.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$+\tilde{x}$	Medián kladný
$-\tilde{x}$	Medián záporný
H	Hloubka stopy u skel bez povrchové úpravy
LASER	*Light Amplification by Stimulated Emision of Radiation*, což lze přeložit jako „zesílení světla stimulovaou emisí záření“
Er:YAG	Erbium- dopovaného ytrium hliníku granátu
Nd:YAG	Neodymem dopovaný yttrito-hlinitým granátem
He-Ne laser	Helium neonový laser
CO_2 laser	Plynný laser na bázi oxidu uhličitého

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Tabulka vlnových délek a frekvencí známých elektromagnetických záření……12

Obr. 2. Schéma laseru....……...14

Obr. 3. Schéma rezonátoru……...14

Obr. 4. Schéma energetických hladin CO2laseru s vyznačením vibračních hladin dusíku..18

Obr. 5. Příčné struktury svazku zachycené CCD kamerou……..19

Obr. 6. Vybrané módy TEM s a) osou, b) středovou symetrií…….20

Obr. 7. Plošné znázornění rozdílů……...24

Obr. 8 Ukázka popraskání a natavení povrchu po dopadu laserového záření……..25

Obr. 9. Navržené logo……..27

Obr. 10. Přístroj Talysurf CLI 500……...29

Obr. 11. Laser ILS 3NM……..30

Obr. 12. Grafické znázornění směru měření……....32

Obr. 13. Grafické znázornění vyhodnocení měření……..33

Obr. 14. Graf stopy v řezu vzorku č. 1…….....34

Obr. 15. Vzorek č. 1…….34

Obr. 16. Graf stopy v řezu vzorku č. 2…….35

Obr. 17. Vzorek č. 2…….35

Obr. 18. Graf stopy v řezu vzorku č. 3…….36

Obr. 19. Vzorek č. 3…….36

Obr. 20. Graf stopy v řezu vzorku č. 4…….37

Obr. 21. Vzorek č. 4…….37

Obr. 22. Graf stopy v řezu vzorku č. 5…….38

Obr. 23. Vzorek č. 5…….38

Obr. 24. Graf stopy v řezu vzorku č. 6…….39

Obr. 25. Vzorek č. 6…….....39

Obr. 26. Graf závislosti hloubky na rychlosti při konstantním výkonu(50%)……..40

Obr. 27. Graf závislosti hloubky na výkonu při konstantním posuvu (50%)……...40

Obr. 28. Vzorek č. 7…….41

Obr. 29. Vzorek č. 8…….42

Obr. 30. Vzorek č. 9…….43

Obr. 31. Vzorek č. 10……...……44

Obr. 32. Vzorek č. 11……...……....45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. seznam vzorků, povrchová úprava, rychlost a výkon laseru……28

Tab. 2. Technické parametry laseru ILS 3NM……31

Tab. 3. Naměřené hodnoty vzorku č. 1……34

Tab. 4. Naměřené hodnoty vzorku č. 2……35

Tab. 5. Naměřené hodnoty vzorku č. 3……36

Tab. 6. Naměřené hodnoty vzorku č. 4……37

Tab. 7. Naměřené hodnoty vzorku č. 5……38

Tab. 8. Naměřené hodnoty vzorku č. 6……39

Tab. 9. Přehled hloubky při zadané rychlosti a posuvu……40

SEZNAM PŘÍLOH

PI: Ukázka výsledků měření z přístroje Talysurt CLI 500 pro vzorek č.1

PII: Ukázka výsledků měření z přístroje Talysurt CLI 500 pro vzorek č.2

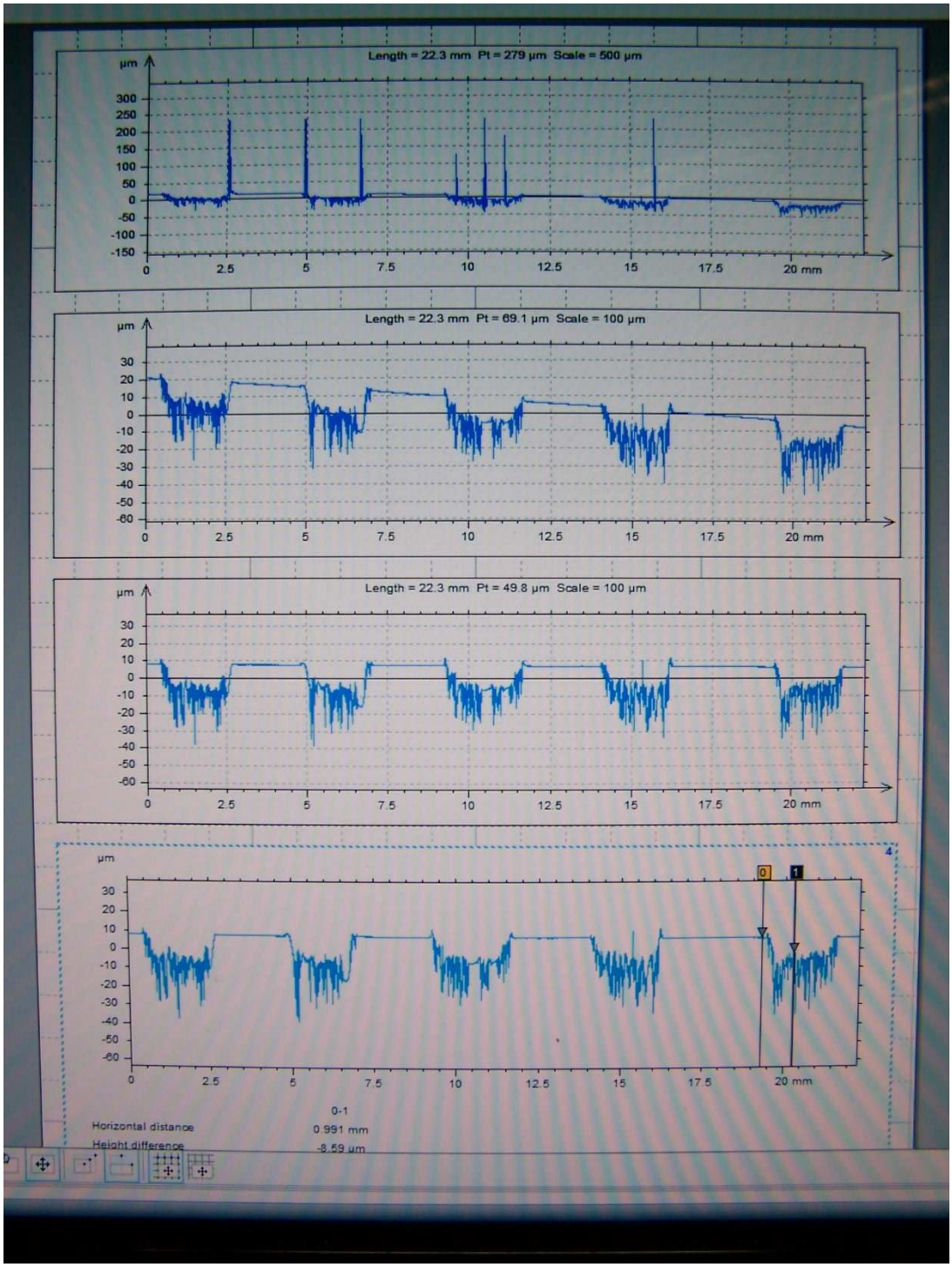
PIII: Ukázka výsledků měření z přístroje Talysurt CLI 500 pro vzorek č.3

PIV: Ukázka výsledků měření z přístroje Talysurt CLI 500 pro vzorek č.4

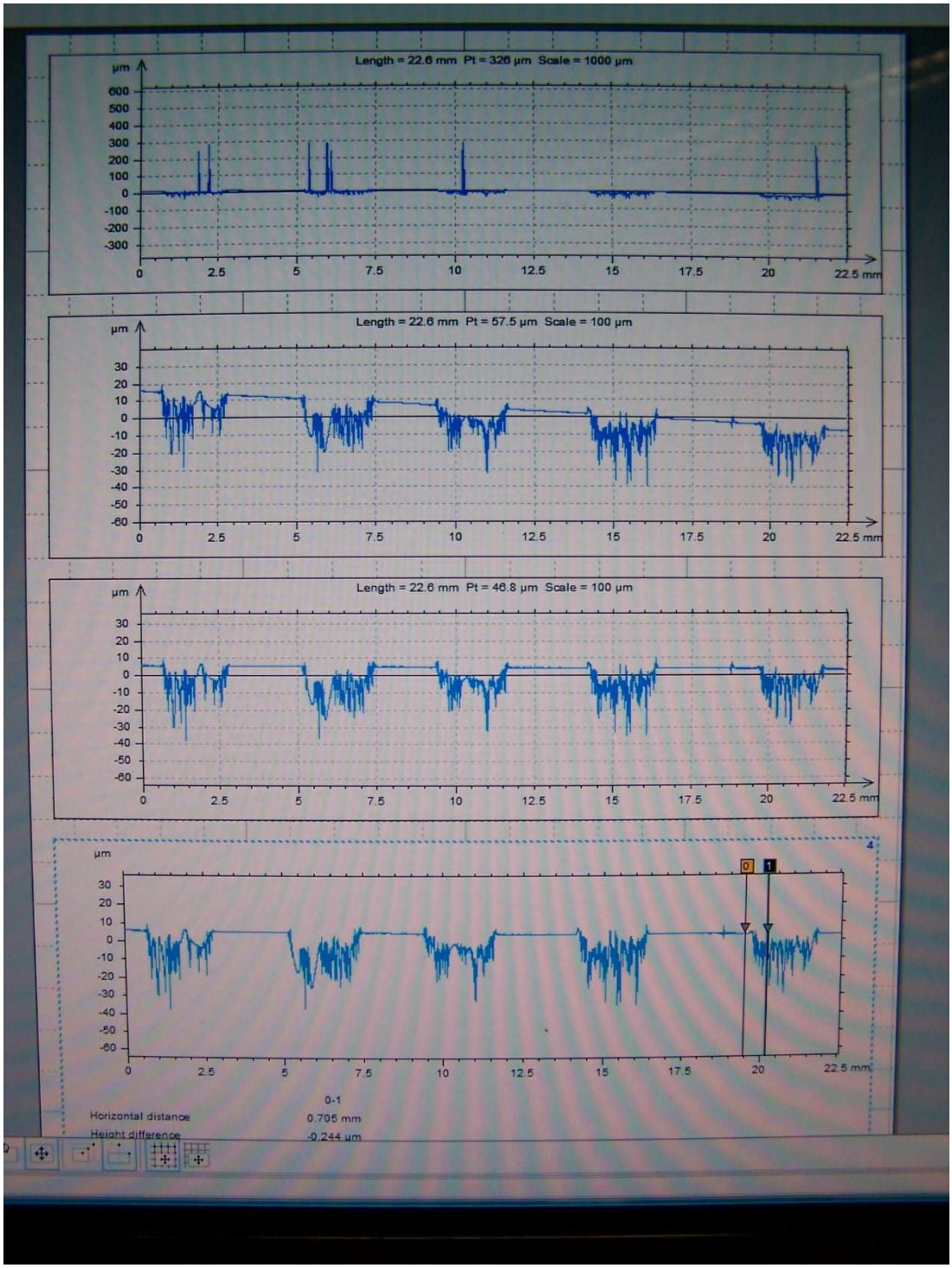
PV: Ukázka výsledků měření z přístroje Talysurt CLI 500 pro vzorek č.5

PVI: Ukázka výsledků měření z přístroje Talysurt CLI 500 pro vzorek č.6

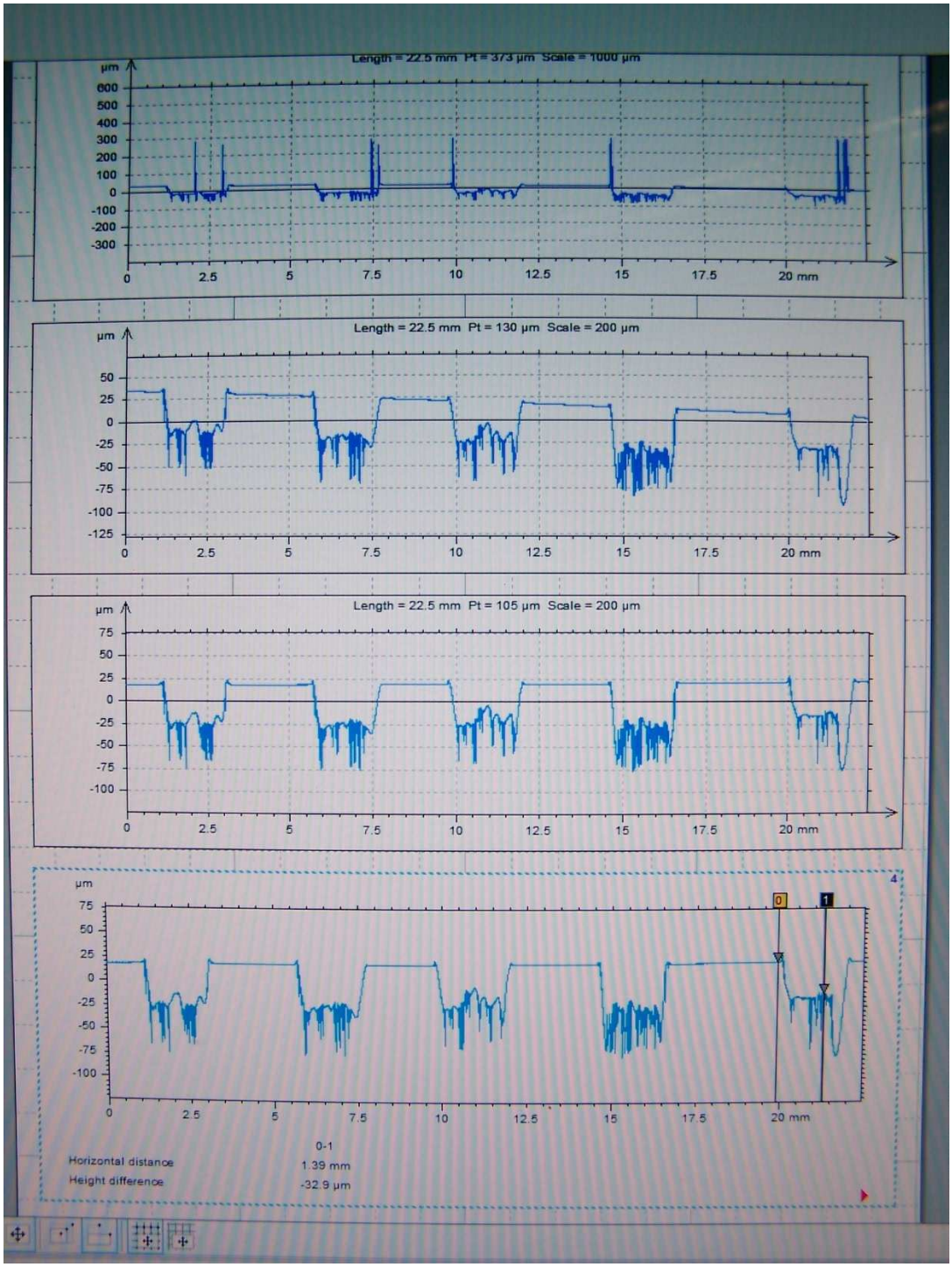
PŘÍLOHA P I: UKÁZKA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Z PŘÍSTROJE TALYSURT CLI 500 PRO VZOREK Č.1



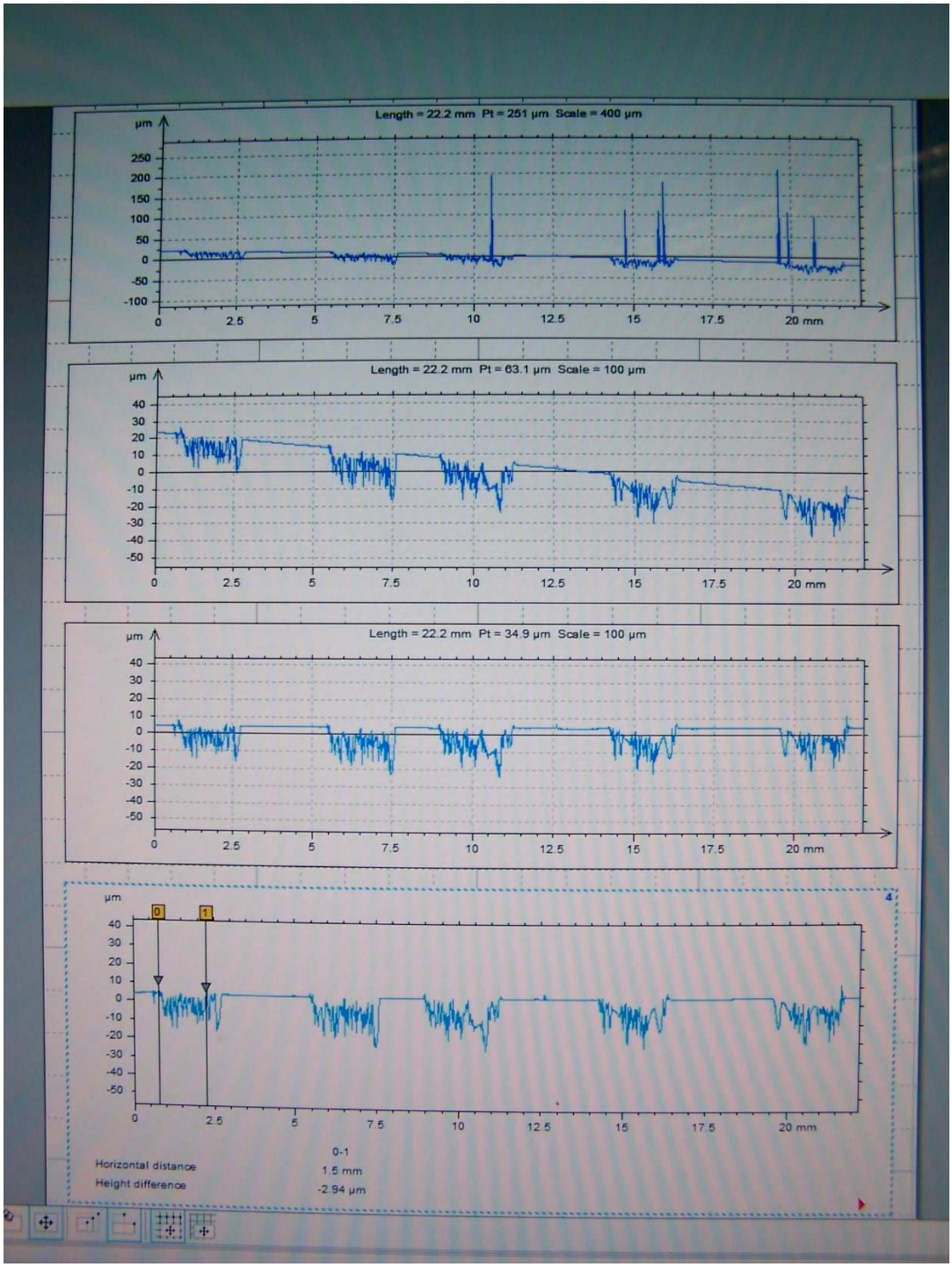
PŘÍLOHA P II: UKÁZKA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Z PŘÍSTROJE TALYSURT CLI 500 PRO VZOREK Č.2



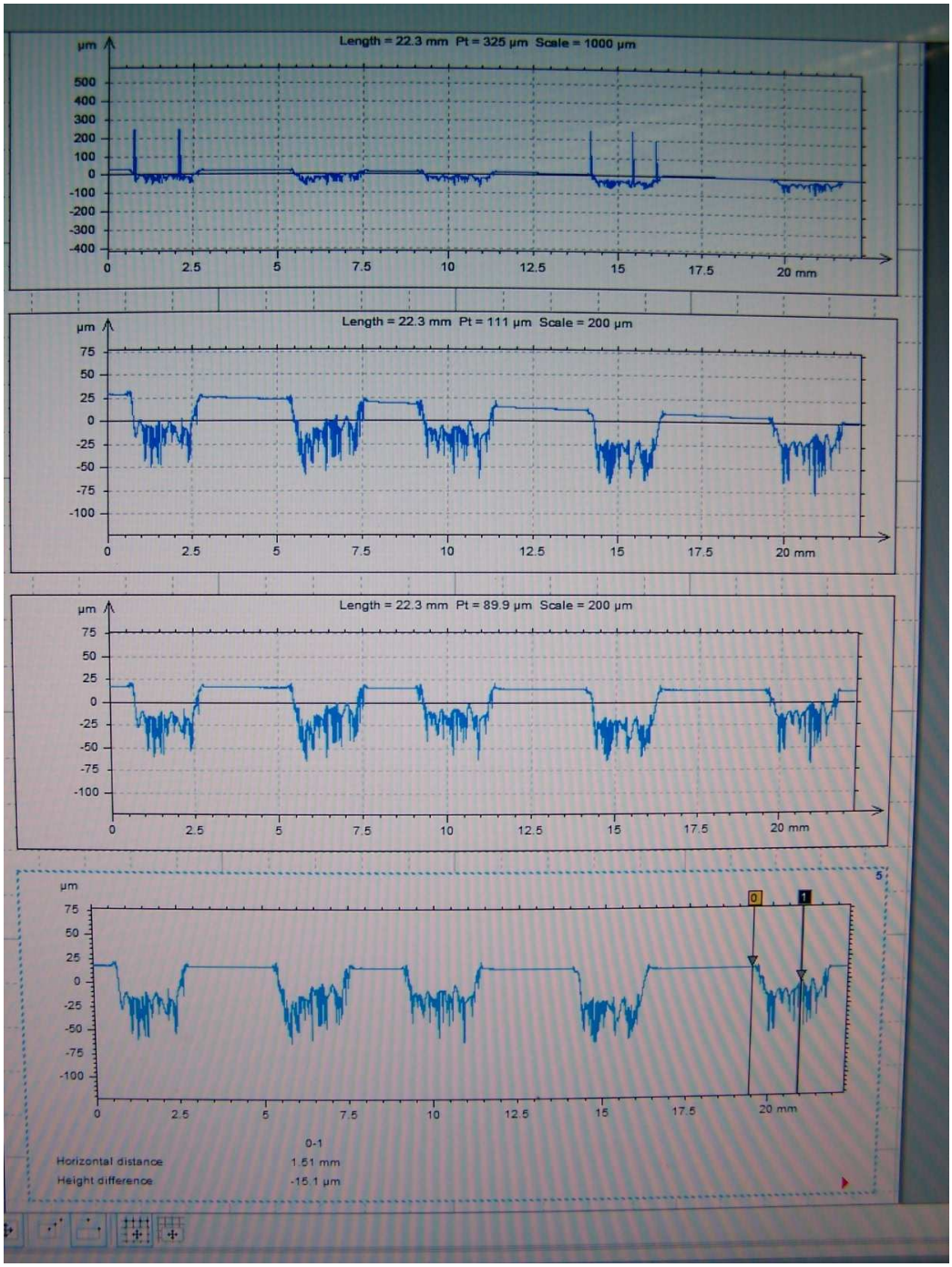
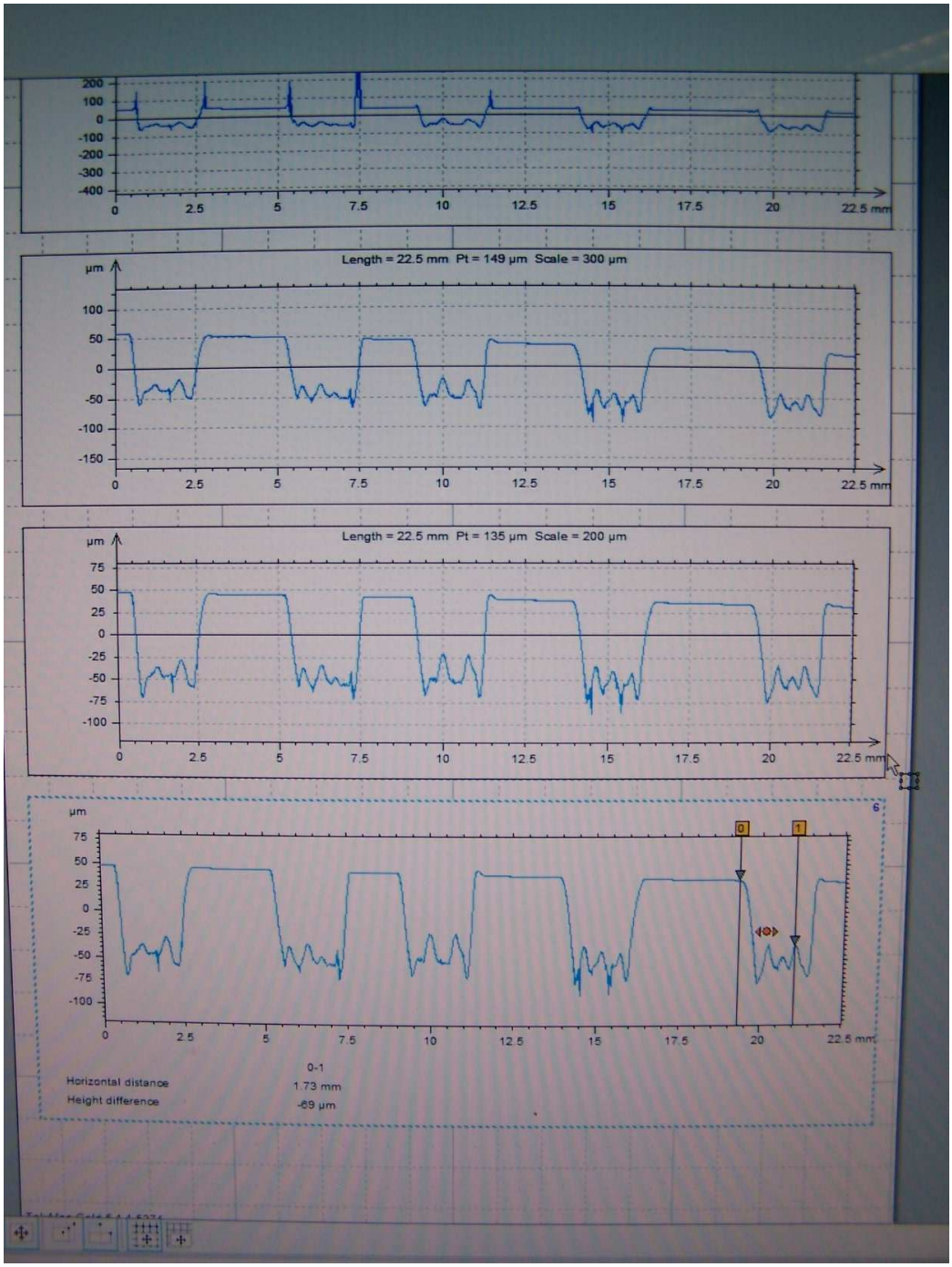
PŘÍLOHA P III: UKÁZKA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Z PŘÍSTROJE TALYSURT CLI 500 PRO VZOREK Č.3



PŘÍLOHA P IV: UKÁZKA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Z PŘÍSTROJE TALYSURT CLI 500 PRO VZOREK Č.4



PŘÍLOHA P V: UKÁZKA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Z PŘÍSTROJE TALYSURT CLI 500 PRO VZOREK Č.5



PŘÍLOHA P VI: UKÁZKA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ Z PŘÍSTROJE TALYSURT CLI 500 PRO VZOREK Č.6