

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA TVORBY TŘÍSKY POMOCÍ DIGITÁLNÍ
VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY
ANALYSIS OF CHIP FORMING MECHANISM WITH A HIGH-SPEED DIGITAL CAMERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ANTONÍN KOPŘIVA

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POLZER, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Antonín Kopřiva

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

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery

v anglickém jazyce:

Analysis of chip forming mechanism with a high-speed digital camera

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu technologií třískového obrábění dochází k procesům, které nelze postřehnout lidským okem. Tyto podstatné změny je možno zaznamenat a následně analyzovat prostřednictvím specializovaných softwarů a hardwarových zařízení.

Cíle diplomové práce:

- vytvořit rozbor využití a druhů vysokorychlostních digitálních kamer ve 21. stol.
- navrhnout a zaznamenat proces třískového obrábění digitální vysokorychlostní kamerou TroubleShooter
- analyzovat reálnou rychlost a zrychlení řezného nástroje v procesu obrábění frézováním
- dílčí výsledky práce publikovat v odborné literatuře

Seznam odborné literatury:

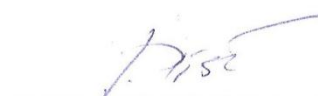
1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. (Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. Překlad M. Kudela.), 1. vyd., Praha, Scientia, s.r.o., 1997. 857 p. ed. J. Machač, J. Řasa, ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. POLZER, A.; DVOŘÁK, J. Internetový portál pro CNC a CAD/CAM technologie. [online]. 2010. Dostupné na WWW: <http://cadcam.fme.vutbr.cz/>
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Odborné publikace. Praha, MM publishing s.r.o. 2008. 235 p. ISBN 978-80-254-2250-2.
4. HUMÁR, A. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. 1. vyd. Brno, CCB spol. s r.o., 1995, 265s., ISBN 80-85825-10-4.
5. SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3
6. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online]. Dostupné na [www](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf): http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf.
7. KOUŘIL, K., MARŠÍČEK, R. Nástroje pro produktivní obrábění. In Sborník odborné konference Frézování III. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín. Brno, 2003, ISBN 80-214-2436-2, s.
8. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání. Září 2004. ISSN 1212-2572., s. 84-96.
9. KOČMAN, K. Speciální technologie obrábění. Druhé přepracované a doplněné vydání. Brno: PC-DIR Real, s.r.o. 1998, 213 s. ISBN 80-214-1187-2.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

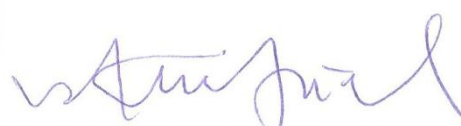
V Brně, dne 19.11.2010

L.S.



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu





prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá základní teorií vysokorychlostních kamer, jejich využitím v průmyslu a představením některých kamer, které jsou dostupné na trhu. Bylo provedeno několik experimentů, zabývajících se například správnou volbou objektivu, osvětlením scény nebo třeba nastavením kamery. Pro lepší průběh měření bylo navrženo a zhotoveno speciální příslušenství a následně byly provedeny experimenty se zavrtáváním frézy do vybraných materiálů. V dalším experimentu byly analyzovány rychlosti a zrychlení frézovacího nástroje pomocí softwaru MotionMeasure.

Klíčová slova

Vysokorychlostní kamera, osvětlení, tvorba třísky, analýza.

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to present the main theory concerning high-speed cameras, their usefulness in industry and to present the cameras available at the market. A few experiments have been done focused on the right choice of an objective, lighting of the scene or setting of the cameras. A special equipment has been invented for a better process of measuring followed by experiment aimed at boring a cutter in materials chosen beforehand. The speed and the acceleration of the cutter was analyzed by means of MotionMeasure software in another experiment.

Key words

High Speed Camera, illumination, chip forming, analysis.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPŘIVA, Antonín. *Název: Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 63s., 10 příloh. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Analýza tvorby třísky pomocí vysokorychlostní digitální kamery“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Bc. Antonín Kopřiva

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné rady a za čas, který mi během zpracování diplomové práce věnoval. Dále děkuji panu Pavlu Svobodovi a panu Milanu Rusiňákovi za pomoc při přípravách experimentů a také panu Štěpánu Svobodovi za jeho rady a předvedení moderní kamery Fastec HiSpec 1.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Vysokorychlostní kamery.....	10
1.1 Historie snímání vysokorychlostních dějů.....	11
1.1.1 Historie vysokorychlostní fotografie.....	11
1.1.2 Historie vysokorychlostních kamer.....	12
1.2 Využití vysokorychlostních kamer ve vědě a průmyslu.....	14
1.2.1 Využití vysokorychlostních digitálních kamer ve strojírenském průmyslu.....	14
1.2.2 Využití vysokorychlostních digitálních kamer ve vojenském průmyslu.....	15
1.2.3 Využití vysokorychlostních digitálních kamer v lékařském průmyslu.....	16
1.2.4 Využití vysokorychlostních digitálních kamer v zoologii.....	18
1.2.5 Využití vysokorychlostních digitálních kamer ve sportovním odvětví.....	18
2 Osvětlení snímané scény.....	19
2.1 Faktory osvětlení scény.....	19
2.1.1 Vzdálenost mezi snímaným objektem a zdrojem světla.....	19
2.1.2 Zorné pole.....	20
2.1.3 Intenzita a typ světelného zdroje.....	20
2.1.4 Kontrast mezi snímaným objektem a pozadím.....	20
2.1.5 Odraz od povrchu snímaného objektu.....	21
2.1.6 Typy obrazového senzoru.....	21
2.1.7 Barva a tón obrazu.....	21
2.1.8 Nastavení kamery.....	21
2.2 Typy světel pro nasvícení.....	21
2.2.1 Denní světlo.....	21
2.2.2 Žárovky.....	22
2.2.3 Žárovky s wolframovým vláknem.....	22
2.2.4 Xenonové žárovky.....	23
2.2.5 HMI světla.....	24
2.2.6 Studené světlo.....	24
2.2.7 LED světlo.....	25
2.2.8 Blikající stroboskopické (bleskové) světlo.....	26
2.2.9 Stroboskopické LED světlo.....	26
2.2.10 Laser.....	27
3 TroubleShooter 1000.....	28
4 Teorie frézování a Princip tvorby třísky při frézování.....	30
4.1 Řezné rychlosti při frézování.....	30
4.2 Analýza průřezu třísky při frézování.....	31
4.2.1 Čelní frézování.....	31
4.2.2 Válcové frézování.....	32
5 Primární experimenty.....	35
5.1 Zjišťování minimálních a maximálních zaostřitelných vzdáleností.....	35
5.2 Testování hloubek ostrosti.....	38

6	Analýza tvorby třísky pomocí vysokorychlostní digitální kamery	40
6.1	Parametry experimentu a příslušenství k němu.....	40
6.1.1	Volba obráběcího stroje	40
6.1.2	Volba obráběcího nástroje	41
6.1.3	Volba objektivu	41
6.1.4	Volba stativu.....	43
6.1.5	Volba osvětlení	44
6.2	Volba řezných podmínek	45
6.3	Průběh experimentu	46
6.3.1	Záznam zavrtávání frézy do polyoxymetylénu	46
6.3.2	Záznam zavrtávání frézy do neměkčeného PVC.....	47
6.3.3	Záznam zavrtání frézy do umělého dřeva.....	47
6.3.4	Záznam zavrtání frézy do bukového dřeva.....	48
6.3.5	Záznam zavrtání frézy do siluminu.....	49
6.3.6	Zavrtávací zkoušky v praxi	49
6.4	Měření zařízením HiSpec 1	50
7	Analýza rychlosti a zrychlení frézovacího nástroje	51
7.1	Představení experimentu.....	51
7.1.1	G60 versus G64	53
7.1.2	Příkazy BRISK a SOFT	53
7.1.3	Příkazy FFWON a FFWOF	54
7.2	Analýzy vybraných režimů.....	54
7.2.1	Analýza režimu G60 SOFT FFWOF	55
7.2.2	Analýza režimu G64 SOFT FFWOF	55
7.2.3	Analýza režimu G60 BRISK FFWOF	55
7.2.4	Analýza režimu G64 BRISK FFWOF	56
7.2.5	Analýza režimu G60 SOFT FFWON.....	56
7.2.6	Analýza režimu G64 SOFT FFWON	57
	Závěr	58
	Seznam použitých zdrojů	59
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	62
	Seznam příloh	63

ÚVOD

Vysokorychlostní kamery nacházejí v současné době v průmyslu čím dál větší uplatnění, protože nám umožňují pozorovat děje, které bychom nebyli schopni lidským okem zaznamenat (např. děje dlouhé několik milisekund).

Využití vysokorychlostní kamery pozorujeme například v odvětvích vědy a průmyslu, kde se již vývoj „zastavil“ a nezbyvá, než děje optimalizovat, k odborným analýzám, které vedou k dalšímu vývoji technologií, k hledání závad ve výrobě, anebo třeba jen k pozorování jevů, s nimiž se setkáváme v každodenním životě. Když se potom na využití vysokorychlostních kamer zaměříme blíže, zjistíme, že je můžeme využívat například ke zkoumání balistických testů (viz. Obr. 1), crash testů v automobilovém průmyslu (viz. Obr. 2), ke zkoumání chodů výrobních linek, k pozorování dějů vzniklých během obrábění a jiných výzkumů.



Obr. 1 Snímek pořízený během balistických testů (15)



Obr. 2 Snímek pořízený během crash testu (16)

Výhoda vysokorychlostních kamer oproti kamerám klasickým spočívá v tom, že u klasických kamer bývá hodnota snímkovací frekvence často 25 snímků za sekundu, naproti tomu u vysokorychlostních kamer se pohybujeme v tisících snímků za sekundu, což je znatelný rozdíl.

Obsahem této diplomové práce bude představení základních informací týkajících se vysokorychlostních kamer, jejich nastavení, jejich příslušenství a také několik experimentů.

1 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

Vysokorychlostní kamera je optoelektronické zařízení, které umožňuje v případě potřeby zaznamenat téměř každý rychlý děj či proces. Princip tohoto zařízení spočívá ve vysoké frekvenci snímkování.

Tato rychlost je oproti klasické kameře mnohonásobně vyšší (asi o 2-4 řády). U klasických kamer je rychlost snímkování 25 snímků za sekundu, u kamer vysokorychlostních se již rychlost snímkování pohybuje v řádech tisíců až desetitisíců snímků za sekundu - při vyšším rozlišení. Některé kamery (například FASTCAM SA5 od firmy Photron) dokáží při malém rozlišení nasnímat mnohonásobně víc snímků. Například výše uvedený FASTCAM SA5 dokáže při rozlišení 64 x 16 obrazových bodů snímat i milion snímků za sekundu. [1]

Jen pro porovnání: představme si děj, který trvá 10 milisekund (1/100 sekundy). Pokud jej budeme snímat klasickou digitální kamerou o snímkovací frekvenci 25 snímků za sekundu, jsme schopni pořídit snímek každých 40 ms. Z takového děje bychom běžnou kamerou zabrali maximálně 1 snímek, a to ještě stěží. Pokud ale bude použita vysokorychlostní kamera a snímkovací frekvence 1000 Hz, bude nasnímáno 10 snímků, což by mohlo být dostačující.

S rostoucím počtem snímků se ale začíná objevovat jeden z problémů vysokorychlostních kamer, a sice množství zpracovávaných dat. Zatímco u kamery klasické se při několikasekundovém záznamu v nižším rozlišení (640 x 480 obrazových bodů) pohybujeme v hodnotách desetin megabytů, tak při vysokorychlostním záznamu ve stejném rozlišení se velikost snímku pohybuje ve stovkách až tisících megabytů. Proto je tedy takřka nezbytné mít snímávací zařízení propojené se zařízením, které disponuje větším datovým úložištěm (například notebook nebo flash disk).

Tab.1.1 Kapacitní tabulka digitální vysokorychlostní kamery TroubleShooter 1000 (2)

Záznamová rychlost (počet snímků za sekundu)	Standardní paměť (2 184 snímků)	Rozšířená paměť (4 368 snímků)
50 (PAL)	43.7 sekund	87.4 sekund
60 (NTSC)	36.4 sekund	72.8 sekund
125	17.4 sekund	34.8 sekund
250	8.7 sekund	17.4 sekund
500	4.4 sekund	8.8 sekund
1000	2.2 sekund	4.4 sekund

Se zvětšující se frekvencí snímkování klesá rozlišení záznamu a ten se stává pro některé oblasti nepoužitelným.

Pro dobrou kvalitu záznamu je ale nejdůležitější kvalitní osvětlení scény. Například při snímání vysokofrekvenčních záznamů (třeba desetitisíce snímků za sekundu) bude denní slunce zcela nedostatečné (na záznamu může být buď šero, nebo úplná tma). V těchto případech se tedy používá vysoce výkonných svítidel, jako jsou například halogenová svítidla s vysokým příkonem

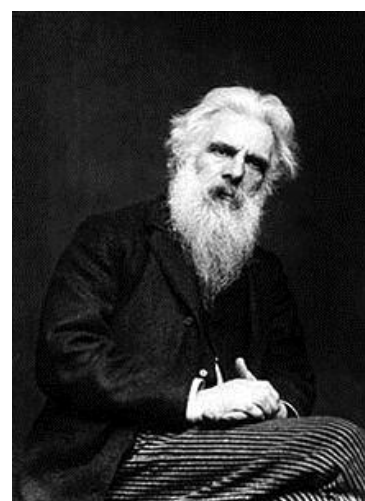
(v řádech kilowattů) nebo LED svítidla. Pro balistické experimenty se často používá osvětlení pomocí synchronizovaných výbojkových blesků. [1]

Vysokorychlostní digitální kamery dokáží kromě kvalitativního analyzování provádět analyzování kvantitativní - za využití okamžitých fyzikálních veličin. Jelikož můžeme jednotlivým snímkům přiřadit relativní čas, jsme schopni ze sledu obrázků následně určit vektory zrychlení a rychlosti, rychlosti změnu tvaru těles a podobně. Přesnost této analýzy je ale do značné míry ovlivněna kvalitou záznamu, parametry objektivu a jeho nastavením. Pokud je použit kvalitní objektiv a je dobře nastaven (zkalibrován), přesnost analýzy může být vysoká. [1]

1.1 Historie snímání vysokorychlostních dějů

1.1.1 Historie vysokorychlostní fotografie

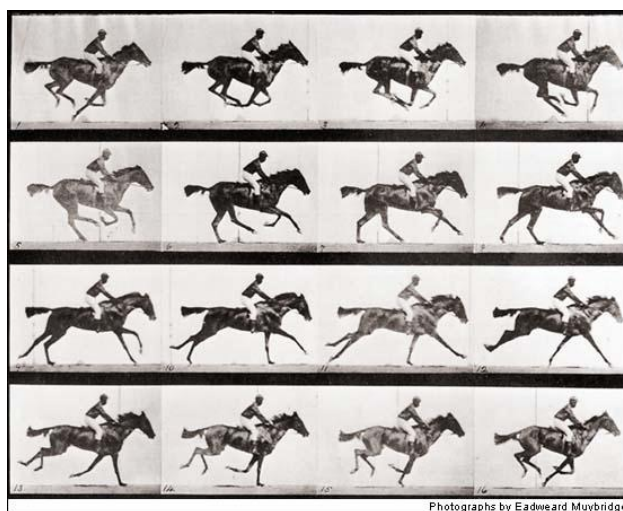
První pokusy, týkající se vysokorychlostních kamer se datují do 80. let 19. století. Jsou připisovány Edwardu Jamesovi Muybridgeovi (1830-1904, známému také pod jménem Eadward J. Muybridge), který je považován za průkopníka vysokorychlostní fotografie. Princip jeho pokusů spočíval v současném použití několika fotoaparátů zároveň, nutno dodat, že na svou dobu používal Eadward J. Muybridge (Obr. 1.1) velmi krátké expoziční časy (až 1/6000 sekundy). Byl zakladatelem zoopraxiskopu a kinematoskopu, což jsou zařízení určená k promítání pohyblivých obrázků, přičemž klasický celuloidový kinofilm ještě nebyl znám. [10]



Obr. 1.1 Eadward J. Muybridge (17)

Jeho první studie pohybu byla provedena roku 1873, po tom, když se železniční magnát a chovatel koní Leland Stanford vsadil o 25000 amerických dolarů, že se klusající kůň v určitém momentu jeho klusu nedotýká ani jedním kopytem země. Tato sázka se Muybridgeovi zalíbila a rozhodl se Stanfordovi pomoci toto tvrzení dokázat. [10]

Jeho pokus spočíval v tom, že podél závodní dráhy z jedné strany umístil bílé pozadí a z druhé strany umístil 24 fotoaparátů, jejichž závěrky byly přivázány provázky, a tyto byly nataženy napříč přes závodní dráhu. V okamžiku, kdy kůň přerhl provázek, došlo



Obr. 1.2 Sled snímků vzniklých z pokusu Eadwarda J. Muybridge (18)

k uvolnění pružinové závěrky a následně k zaznamenání fotografie na mokrou kolodiovou desku. Sled snímků je znázorněn na obrázku 1.2. [10]

Tyto pokusy trvaly Muybridgeovi 6 let, modifikoval během nich řadu nových fotoaparátů a provedl více než 20000 snímků, než nakonec prokázal pravdu Stanfordského tvrzení. Roku 1882 Muybridge během rozhovoru pro časopis Nature prohlásil: „*V blízké budoucnosti budou výsledky důležitých závodů záviset na fotografii, která bude určovat vítěze*“. 25. června 1880 během koňských závodů v New Jersey, se jeho předpověď naplnila – byla použita první cílová fotografie. [10]

Jedním z dalších hlavních průkopníků oblasti vysokorychlostní fotografie byl Harold Edgerton (1903-1990), jehož výzkumy položily základy pro vysokorychlostní kamery. Jako nejlepší zdroj světla pro jeho pokusy se mu zdála být stroboskopická světla, pomocí kterých dokázal snímat jevy, které lidské vnímací orgány nedokáží zaznamenat (rozbití žárovky, let kulky a jiné). Jeho pokusy vedly také k vynálezu nočního vidění, podvodního fotografování a podobně. Na obrázku 1.3 je znázorněn pan Edgerton během pokusu s prasknutím balónku. [12]



Obr. 1.3 Snímek pořízený během Edgertonova pokusu s prasknutím balónku (19)

1.1.2 Historie vysokorychlostních kamer

Hlavní rozvoj vysokorychlostních kamer nastal v počátku 70. let 20. století. Roku 1970 pak již firma Video Logic Corporation (VLC) představila vysokorychlostní systém Instar, jenž byl schopen snímkovat s frekvencí až 240 snímků za sekundu. Dalším prosazovaným systémem byl systém značky Unilux, který využívala například společnost Sony, jenž dokázal zaznamenat 10 sekund dat o snímkovací frekvenci až 120 snímků za sekundu. [11]

V dalším průběhu 80. let 20. století docházelo k prudkému vývoji v oblasti vysokorychlostních kamer a koncem 80. let firma NAC představila novou technologii NAC 200, která jako první nabízela i barevné zpracování obrazu. V této době se na trh začala prosazovat i jiná fotografická společnost – Polaroid. Ta představila systém Mekel 300, který dokázal snímkovat s frekvencí až 300 snímků za sekundu. Firma Polaroid systém Mekel 300 prodávala až do roku 1982, než se naplno začala věnovat natáčení filmů. [11]

Roku 1980 se na trh vysokorychlostních kamer dostavila i další velká fotografická firma – Kodak. Jejich MASD – 1000 a následně i MASD SP2000 (černobílý záznam, schopný zaznamenat až 2000 snímků za sekundu při plném rozlišení 192 x 240 obrazových bodů, při menším rozlišení byl systém schopen zaznamenat až 12000 snímků za sekundu). I přesto, že systém MASD SP2000 (viz. Obr. 1.4) stál přibližně 140000 amerických dolarů a jeho odbyt nebyl moc velký, byla firma Kodak s jeho prodejem spokojena. [11]



Obr. 1.4 Vysokorychlostní kamera Kodak MASD (20)

Roku 1991 vytvořila firma Photron kamerový systém 4540, který začala vydávat pod záštitou známějšího gigantu – Kodaku. Tento systém byl schopen při plném rozlišení (256 x 256 obrazových bodů) zaznamenat až 4500 snímků za sekundu a při použití nižšího rozlišení až 40500 snímků za sekundu. Maximální paměť zařízení byla 1,1 sekundy, což byla zároveň maximální délka jedné sekvence. Cena tohoto zařízení se pohybovala stejně jako cena Kodaku MASD SP2000 (viz. obr. 1.5) okolo 140000 USD. [11]



Obr. 1.5 Vysokorychlostní kamera Kodak 4540 a její příslušenství (21)

Počínaje rokem 1994 na trh s vysokorychlostními kamerami vstoupila i další firma – Redlake Imaging. Ta nejprve uvedla na trh systém MotionScope MS 300, poté taky MS 250 a MS 500. Ty později nahradila přístroji HR 250 a HR 500. [11]

Firma Redlake Imaging ale změnila již navždy trh s vysokorychlostními kamerami, a sice díky malým pořizovacím nákladům. V dalších letech už poskočil vývoj rapidně dopředu. [11]

1.2 Využití vysokorychlostních kamer ve vědě a průmyslu

Vysokorychlostní digitální kamery mají v dnešní době široké spektrum využití. Můžeme se s nimi setkat například:

- ve strojírenském průmyslu,
- v lékařském průmyslu,
- ve vojenském průmyslu,
- v zoologii,
- ve sportovním průmyslu,
- v biomechanice,
- v automobilovém průmyslu,
- v elektrotechnice,
- a jiných odvětvích.

1.2.1 Využití vysokorychlostních digitálních kamer ve strojírenském průmyslu

Díky vysoké snímkovací frekvenci se mohou vysokorychlostní kamery úspěšně využívat ve strojírenském průmyslu. Jelikož vynalézání nových obráběcích technologií je již takřka nemožné, je třeba se snažit o pečlivou analýzu a zdokonalování technologií stávajících. A k tomu nám velkou měrou může pomoci právě vysokorychlostní kamera.

Ve strojírenském průmyslu se tedy často můžeme setkat s pozorováním toků rychlých výrobních linek (viz. obr. 1.6), se seřizováním strojů anebo také například s analýzou tvorby třísky různých obráběcích technologií.

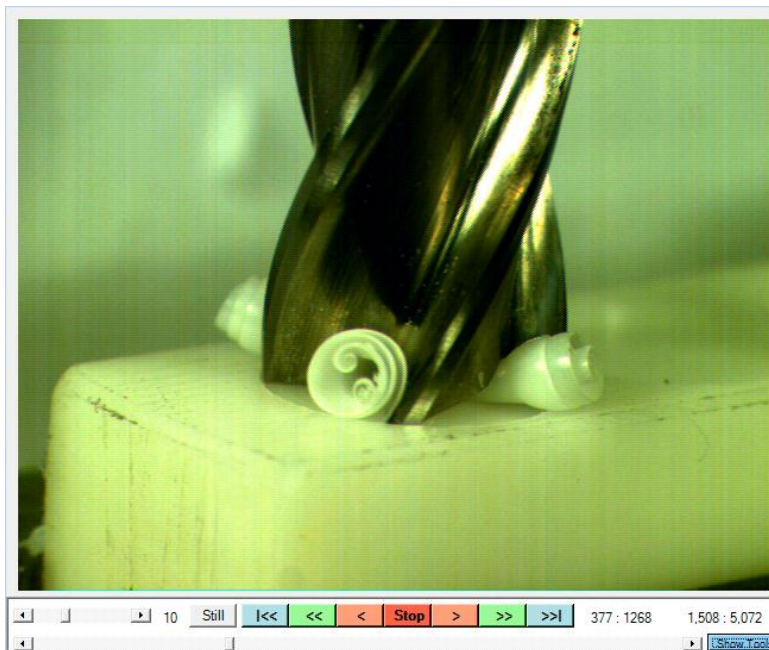
Vysokorychlostní kamera na rychlé výrobní lince nemusí sloužit jen pro nastavení linky, s její pomocí můžeme totiž i analyzovat již zaběhnuté výrobní procesy, které jsou pro nás kontraproduktivní. Takovými analýzami je možné často zabránit následným poruchám linky. [13]



Obr. 1.6 Snímek pořízený při snímání rychlé výrobní linky na zátkování lahví (13)

V rámci analýzy tvorby třísky se dá vysokorychlostní kamerou zkoumat například vhodnost zvolené geometrie nástroje, zrychlení a rychlost třísky odcházející z místa řezu nebo třeba i samotné nastavení stroje.

Na obrázku 1.7. vidíme snímek pořízený během záznamu frézování plastu POM (Polyoxymetylén).



Obr. 1.7 Snímek pořízený při frézování plastu POM

1.2.2 Využití vysokorychlostních digitálních kamer ve vojenském průmyslu

Jelikož je vysokorychlostní kamera ideální zařízení pro zkoumání velice rychlých dějů, dá se velice dobře využít při balistických experimentech.

Některé střely je možné pozorovat lidskýma očima i bez použití speciální videotechniky, například rychlokamer. Jedná se většinou o projektily letící menší rychlostí (např. letící šíp), nebo vybavené speciálními prvky identifikujícími jejich polohu (střela s hořící stopkou, raketa nebo třeba dělostřelecká střela s generátorem dnového výtoku). [1]

K pozorování jiných střel, které nedokážeme lidským okem zachytit, používáme videotechniku, například vysokorychlostní kamery. Jedná se především o střely okolozvukové (Machovo číslo $Ma \cong 1$) a nadzvukové ($M > 1$). Tyto střely totiž za letu nevyzařují záření ve viditelném spektru a tak je nutné použití videotechniky.[1]

Vzorec pro výpočet Machova čísla (1):

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (1.1)$$

Kde „v“ je rychlost tělesa (v našem případě projektilu a „c“ je rychlost zvuku v daném prostředí).

Samotná analýza balistických experimentů pomocí vysokorychlostních kamer se potom dělí na několik úseků, jako jsou například: [1]

- **Vnitřní balistika** – zabývá se zkoumáním chování projektilu uvnitř hlavně - v tomto typu balistiky je použití vysokorychlostních kamer značně omezeno,
- **Přechodová balistika** – zkoumání chování projektilu na ústí hlavně (viz. obr. 1.8, zjišťujeme například výtok plynů z hlavně, můžeme také testovat ústíová zařízení, jako jsou například tlumiče plamene, tlumiče hluku a jiné doplňky),
- **Vnější balistika** – analyzuje se pohyb střely na dráze, zjišťuje se její rychlost (postupného a rotačního pohybu) a její stabilita
- **Koncová balistika** – sledování dopadu projektilu na cíl nebo i pronikání střely cílem,
- **Ranivá balistika** – zjišťování působení projektilu na tkáň, nebo jejich náhrady.

Ve vojenském průmyslu lze videotechniku používat také například ke zkoumání a kontrole funkce samonabíjecích a automatických zbraní, nebo zkoumání výbuchů munice a klasických výbušnin. [1]



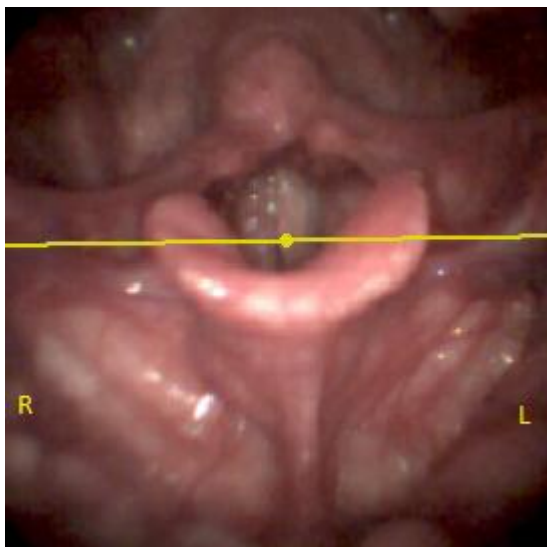
Obr. 1.8 Výtok plynů při výletu projektilu z ústí hlavně
(22)

1.2.3 Využití vysokorychlostních digitálních kamer v lékařském průmyslu

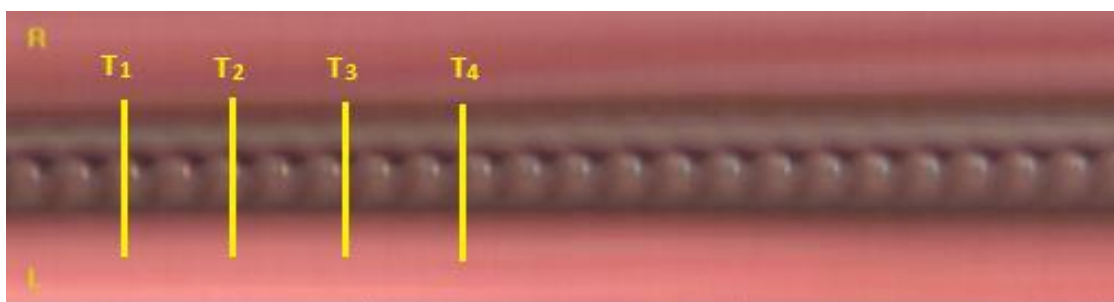
V lékařském průmyslu lze vysokorychlostní kamery využívat například ke kontrolám poruch hlasu. Zde se provádí záznam kmitání hlasivek s vysokou snímkovací frekvencí (asi 4000 snímků za sekundu, jeden ze snímků je na obrázku 1.9). Díky obtížným podmínkám záznamu (snímacího elementu, osvětlení scény, frekvence snímání a dalším) se volí nižší rozlišení záznamu, obvykle 256 x 256 obrazových bodů. [3]

Po provedení záznamu dostáváme tzv. videokymogram (znám pod zkratkou VKG, viz. obr. 1.10), který je zobrazení definovaných obrazových

bodů v časové posloupnosti v délce trvání záznamu, na kterém jsou poté určovány kmity hlasivek, jsou-li přítomny (jejich frekvenci, symetrii, poměry otevření a zavření hlasivek). [3]



Obr. 1.9 Snímek hlasivek pomocí vysokorychlostní kamery (3)



Obr. 1.10 Videokymogram sestavený z jednotlivých snímků (3)

Kde: **T1** – úplné uzavření hlasivek
T2 – fáze otevírání hlasivek
T3 – úplné otevření hlasivek
T4 – fáze uzavírání hlasivek



Obr. 1.11 Detail fáze T1 (3)



Obr. 1.12 Detail fáze T3 (3)

1.2.4 Využití vysokorychlostních digitálních kamer v zoologii

V zoologii se vysokorychlostní kamery často využívají ke zkoumání života zvířat, rostlin nebo některých přírodních jevů.

Na obrázku 1.13 je například snímek pořízený během záznamu, na kterém loví zamaskovaný chameleon kobylku, přičemž několikrát prodlouží svůj jazyk. Na obrázku 1.14 vidíme snímek pořízený během útoku žraloka lidožravého na dospělého tuleně.



Obr. 1.13 Snímek chameleona lovícího kobylku (23)



Obr. 1.14 Žralok lidožravý během lovu tuleně (24)

1.2.5 Využití vysokorychlostních digitálních kamer ve sportovním odvětví

Vysokorychlostní kamera může být rovněž velice nápomocná ve sportovním odvětví, kde ji mohou využívat například výrobci nového sportovního vybavení, trenéři vrcholových sportovců (ať již k analýze jejich sportovních výkonů nebo k účelům jejich tréninkového zdokonalování). Vysokorychlostní kamera může být také užita jako pomůcka pro rozhodčí.

Na obrázku 1.15 vidíme snímek ze záznamu pořízeného během fotbalového utkání.



Obr. 1.15 Snímek z vysokorychlostního záznamu pořízený během fotbalového utkání (25)

2 OSVĚTLENÍ SNÍMANÉ SCÉNY

Jak již bylo řečeno, vysokorychlostní kamery potřebují pro kvalitní provedení záznamu mnohem více světla než kamery klasické. V praxi se dá říci, že když se rychlost záznamu zdvojnásobí, zdvojnásobí se také potřebné množství světla [4]. V osvětlení hraje hlavní roli světelný tok, jenž má za hlavní jednotku Lumen, který je vedlejší jednotkou SI. Poměrně důležitou informací pro nás je, že příkon není u svítidel měřítkem výkonu a intenzity světla [4]. V praxi to potom vypadá tak, že můžeme mít několik svítidel s 1000 wattovou žárovkou, ale jejich účinnost v závislosti na typu daného reflektoru a paprsku se může lišit i o 100% a více. [4]

Z důvodu účinnosti použitého světla a kvality pořízeného snímku je tedy nutná pečlivá volba osvětlení scény. Snažíme se zvolit osvětlení, které nám kvalitně osvětlí naši scénu a přitom nedochází k větším únikům světla mimo scénu, čímž si zajistíme maximální účinnost osvětlení a zároveň nízké náklady na elektrickou energii.

2.1 Faktory osvětlení scény

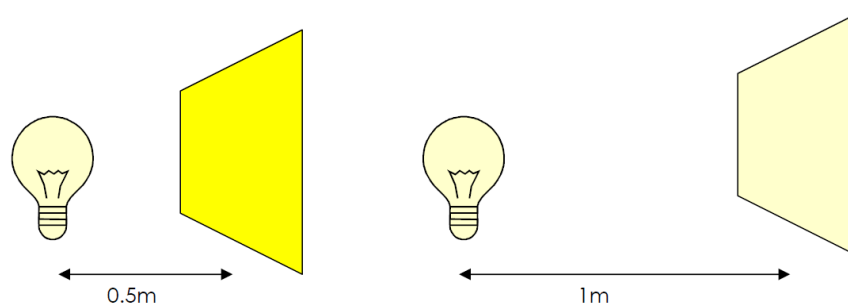
I přesto, že existuje velké množství výpočtů ohledně světla, přímý vzorec k určení potřebného typu osvětlení neexistuje. Osvětlení snímaného objektu je dáno několika činiteli, jako jsou například dle firmy AOS Technologies AG [5] :

- vzdálenost mezi snímaným objektem a zdrojem světla,
- viditelné pole,
- typ světelného zdroje a jeho intenzita,
- kontrast mezi snímaným objektem a pozadím,
- odraz od povrchu snímaného objektu,
- typ obrazového senzoru (černobílý nebo barevný),
- barva a tón obrazu,
- nastavení kamery.

2.1.1 Vzdálenost mezi snímaným objektem a zdrojem světla

Čím blíže je zdroj světla k pozorovanému objektu, tím více jasů můžeme na snímaném objektu pozorovat. Obecně platí to, že pokud zdvojnásobíme pozorovací vzdálenost mezi snímaným objektem a zdrojem světla, tak bude hodnota jasů 4krát menší, což naznačuje Obr. 2.1. Pokud vzdálenost ztrojnásobíme, jas se zmenší 9krát. [5]

Snažíme se tedy umístit zdroj světla co nejbliže snímanému objektu.



Obr. 2.1 Vzdálenost snímaného objektu a zdroje světla (5)

2.1.2 Zorné pole

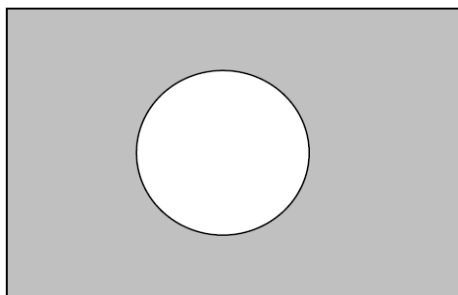
Úzce souvisí se vzdáleností mezi snímaným objektem a zdrojem světla. Spočívá v tom, že pokud chceme nasvítit celé viditelné pole, musí být vzdálenost zdroje(ů) světla a snímaného objektu větší a pokud chceme nasvítit pouze snímaný objekt, musí být tato vzdálenost menší. [5]

Musíme tedy pečlivě vybírat velikost viditelného pole a snažit se, aby nebylo příliš velké. Taky je nutné zamyslet se nad tím, jestli je, nebo není nutné vysoké nasvícení pozadí (viz. Obr. 2.2 a Obr. 2.3). V praxi to potom znamená, že pokud budeme potřebovat pozadí hodně nasvítit, budeme potřebovat velké množství světla.

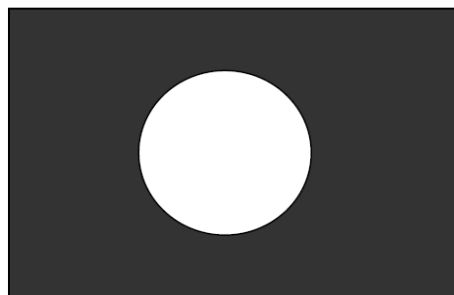
2.1.3 Intenzita a typ světelného zdroje

Jednotlivá světla se mezi sebou liší. Některá jsou více jasnější, některá méně. Například sluneční světlo je jasnější než světlo žárovky. [5]

Ohledně intenzity je třeba brát zřetel na výkon žárovky. Je doporučeno použít nejsilnější vhodné světlo, jež je k dispozici. (např. pokud máme jednu žárovku o výkonu 500W a pět žárovek o výkonu 100W, je lepší použít jednu žárovku o výkonu 500W). [5]



Obr. 2.2 Vysoké nasvícení pozadí(5)

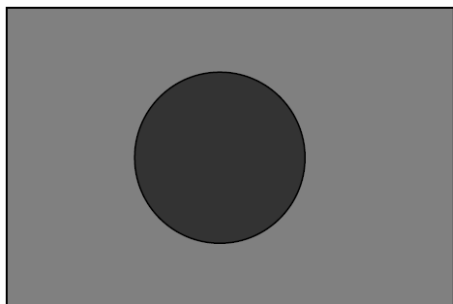


Obr. 2.3 Nízké nasvícení pozadí (5)

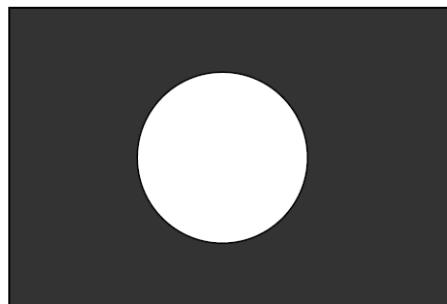
2.1.4 Kontrast mezi snímaným objektem a pozadím

Nasvícení tmavého objektu před tmavým pozadím spotřebuje daleko více světla než nasvícení světlého objektu před tmavým pozadím. [5]

Z tohoto důvodu se snažíme dosáhnout maximálního kontrastu (při vysokém kontrastu je potřeba méně světla pro nasvícení a analýza záznamu se provádí lépe). Kontrast lze zvýšit například bílým nátěrem, pokud je to možné.



Obr. 2.4 Nasvícení tmavého objektu před tmavým pozadím (5)



Obr. 2.5 Nasvícení světlého objektu před tmavým pozadím (5)

Na obrázku 2.4 je viditelný nízký kontrast, analýza záznamu bude tedy těžce proveditelná. Naopak tomu na obrázku 2.5 je vysoký kontrast a analýza bude oproti obrázku 2.4 snazší.

2.1.5 Odraz od povrchu snímaného objektu

Snažíme se dostat bílý, lesklý povrch. Kovy ale někdy mohou odrážet příliš mnoho světla. V těchto případech je nutné intenzitu světla snížit. K tomu nám mohou pomoci například speciální spreje. [5]

2.1.6 Typy obrazového senzoru

Kvůli barevnému filtru potřebují barevné kamery 2krát až 4krát více světla než kamery černobílé. Je tedy nutné, aby bylo určeno, zda je nutné použít kameru barevnou, nebo stačí užití kamery černobílé. [5]

2.1.7 Barva a tón obrazu

Spočívá v tom, že bílá barva je více reflexní než barva černá. Snažíme se dostat jasné barvy objektu. [5]

2.1.8 Nastavení kamery

Snažíme se co nejvíce optimalizovat nastavené parametry (počet snímků za sekundu, atd.).

2.2 Typy světel pro nasvícení

Zde jsou uvedeny některé z vhodných typů světel, které lze použít k nasvícení scény pro vysokorychlostní kameru:

- denní světlo,
- žárovky,
- xenonové žárovky,
- metal - halogenová světla,
- studené světlo,
- LED světlo,
- blikající stroboskopická trubice,
- LED stroboskopické světlo,
- laser.

2.2.1 Denní světlo

Použití je možné pouze v některých typech aplikací (venkovních), za předpokladu jasné oblohy. Jeho intenzitu můžeme zlepšit přidavnými reflektory. Dá se použít například k testování automobilů nebo zkouškám balistiky. [5]

Tab.2.1 Vyhodnocení světelného zdroje – denní světlo (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení					
	-	-	-	-	+	++
Intenzita						
Teplota chromatičnosti						
Náklady						
Vyzařované teplo						
Blikající	Ne					

2.2.2 Žárovky

Klasické žárovky nejsou v oblasti vysokorychlostního záznamu moc používané, kvůli jejich nízké intenzitě a malé teplotě chromatičnosti. Světlo bliká podle frekvence sítě.[5]

Na obrázku 2.6 je zobrazena klasická žárovka a na obrázku 2.7 snímek pořízený pomocí osvětlení 60Wattovou žárovkou.

ab.2.2 Vyhodnocení světelného zdroje – žárovky (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení					
	--				++	
Intenzita						
Teplota chromatičnosti						
Náklady						
Vyzařované teplo						
Blikající	Ano					



Obr. 2.6 Klasická žárovka o výkonu 60 W (26)



Obr. 2.7 Nasvícení objektu pomocí 60 W žárovky (5)

2.2.3 Žárovky s wolframovým vláknem

Podobné klasickým žárovkám. Mají ale vyšší účinnost a teplotu chromatičnosti (asi 3600 K, klasické žárovky cca. 3200 K). Navíc je lze spustit pomocí stejnosměrného napájení, aby se zamezilo nežádoucímu blikání. [5]

Žárovky s wolframovým vláknem jsou snadno dostupné, a to v širokých rozmezech výkonů (od 5 do 250 W). Dají se použít k nárazovým zkouškám vozidel, průmyslovým a výzkumným aplikacím s malým zorným polem. [5]

Na obrázku 2.8 můžeme vidět wolframovou žárovku, na obrázku 2.9 je zobrazený snímek provedený pomocí žárovky s wolframovým vláknem za použití stejnosměrného zdroje napětí, aby bylo eliminováno nežádoucí blikání. [5]

Tab.2.3 Vyhodnocení světelného zdroje – žárovky s wolframovým vláknem (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení					
	--				++	
Intenzita						
Teplota chromatičnosti						
Náklady						
Vyzařované teplo						
Blikající	Ne (pokud je použito stejnosměrné napájení)					

2.2.4 Xenonové žárovky

Jedná se o světla velmi světlá a intenzivní. V poslední době velmi často používané například v automobilovém průmyslu do reflektorů a nebo v kancelářském průmyslu do promítaček. [5].

Xenonové žárovky (viz. Obr. 2.10) jsou náchylné k vytváření rušivých odlesků na snímaných objektech a na pozadí. Používají se rovněž k nárazovým zkouškám automobilů a k průmyslovým a výzkumným aplikacím. [5]

Tab.2.4 Vyhodnocení světelného zdroje – xenonové žárovky (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení				
	-	-	-	-	+
Intenzita					
Teplota chromatičnosti					
Náklady					
Vyzařované teplo					
Blikající	Ano (kolem 20 kHz)				



Obr. 2.8 Žárovka s wolframovým vláknem o výkonu 100 W (27)



Obr. 2.9 Nasvícení objektu pomocí 100 W žárovky s wolframovým vláknem(5)



Obr. 2.10 Xenonová výbojka (28)

2.2.5 HMI světla

Metal halogenová světla (HMI světla) navzdory vysoké ceně a složité výrobě, jsou velmi používaným typem osvětlení pro vysokorychlostní záznamy. Velké HMI systémy jsou používány v automobilovém průmyslu k provádění nárazových zkoušek. [5].

HMI světla (viz. Obr. 2.11) potřebují ke svému provozu napájecí a kontrolní zařízení. Potřebují nějaký čas, aby se dostaly na svoji plnou intenzitu (asi 5500 K).

Tab.2.5 Vyhodnocení světelného zdroje – oblouková HMI světla (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení					++
Intenzita						
Teplota chromatičnosti						
Náklady						
Vyzařované teplo						
Blikající	Ne					



Obr. 2.11 HMI světlo (29)

2.2.6 Studené světlo

Studené světlo je vytvářeno pro speciální aplikace. Je tvořeno zdrojem světla (nejčastěji xenonovým nebo HMI) a k napájení je použit optický kabel. Vzájemná interakce Ar, Hg a P v tubě vede ke vzniku tzv. studeného světla. Toto světlo je používáno především ke snímání objektů, u kterých nám vadí vyzařované teplo (např. snímání chemikálií, fauny a předmětů v medicíně). Při nasvícení studenými světly je ale nutné počítat s malým zorným polem. [5]

Tab.2.6 Vyhodnocení světelného zdroje – studené světlo (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení					++
Intenzita						
Teplota chromatičnosti						
Náklady						
Vyzařované teplo						
Blikající	Ne					



Obr. 2.12 Studené světlo (30)



Obr. 2.13 Nasvícení objektu pomocí studeného světla a optického kabelu (5)

2.2.7 LED světlo

Je nutné, aby bylo použito kvalitního stejnosměrného napájení – zamezí se tím blikání. Jelikož existuje vysoké množství tvarů, mohou se LED světla (viz. Obr. 2.14) používat pro mnoho typů osvětlení (v tmavém poli, ve světlém poli, k bočnímu osvětlení, atd.). LED světla se dají použít pro snímání detailních snímků s nízkou snímkovací frekvencí (cca 250 fps). [5]

Díky nízkému vyzařovanému teplu a vysoké intenzitě světla se LED světla při vysokorychlostním snímání často používají.

Tab.2.7 Vyhodnocení světelného zdroje – LED světlo (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení				
	-	-		+	+
Intenzita					
Teplota chromatičnosti					
Náklady					
Vyzařované teplo					
Blikající	Ne (pokud je použito stejnosměrné napájení)				



Obr. 2.14 LED světlo (14)

2.2.8 Blikající stroboskopické (bleskové) světlo

Vysoká energie blesku může často vést ke vzniku elektromagnetického šumu, který může narušovat experiment. [5]

Samotný blesk eliminuje pohybové rozostření, proto je tento typ osvětlení vhodným typem pro snímání rychle se pohybujících objektů. Dále se dá tento typ osvětlení úspěšně používat při snímání detailních záběrů s vysokou potřebou světla. [5]

Blikající stroboskopické světlo můžeme vidět na obrázku 2.15.

Tab.2.8 Vyhodnocení světelného zdroje – blikající stroboskopické světlo (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení				
	-	-		+	+
Intenzita					
Teplota chromatičnosti					
Náklady					
Vyzařované teplo					
Blikající	Synchronizováno s kamerou				



Obr. 2.15 Blikající stroboskopické světlo (31)

2.2.9 Stroboskopické LED světlo

Oproti blikajícímu stroboskopickému světlu je zde sice velká výhoda v tom, že nedochází ke vzniku elektromagnetického šumu, ale naopak je u stroboskopického LED světla oproti blikajícímu stroboskopickému světlu menší účinnost. Existuje několik verzí tohoto světla (např. s bílým, žlutohnědým a infračerveným LED světlem). Světlo se dá dobře ovládat nastavením délky blesku. [5]

Stejně jako blikající stroboskopické světlo, i stroboskopické LED světlo (Obr. 2.16) dokáže eliminovat pohybové rozostření, a tak je vhodné ke snímání rychle se pohybujících objektů. Rovněž je vhodné pro snímání detailů s nutností vysokého nasvícení. [5]

Na obrázku 2.17 vidíme nasvícení objektu pomocí stroboskopického LED světla

Tab.2.9 Vyhodnocení světelného zdroje – LED stroboskopické světlo (5)

Charakteristika světelného zdroje	Hodnocení				
	-	-	-	-	++
Intenzita					
Teplota chromatičnosti					
Náklady					
Vyzařované teplo					
Blikající	Synchronizováno s kamerou				



Obr. 2.16 Stroboskopické LED světlo (32)



Obr. 2.17 Nasvícení objektu pomocí stroboskopického LED světla StroboLED V3 white (5)

2.2.10 Laser

V poslední době se na trh dostávají laserová světla (např. světla Cavilux), které jsou založeny na pulzním diodovém laseru, který dokáže objekt nasvítit až milionkrát za sekundu, přičemž energie světelného pulzu se pohybuje okolo několika set wattů a jas může být až milionkrát vyšší než například u běžné žárovky. [6]

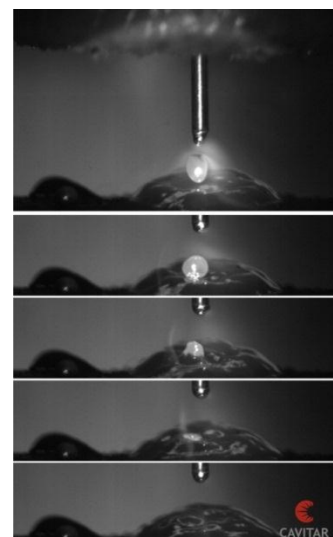
Systém Cavilux se používá většinou v případech, kdy použití klasického osvětlení nestačí (například snímání rychlých drobných předmětů nebo horkých a velmi jasných objektů – např. svařování). [6]

Díky systému Cavilux se například můžeme při svařování podívat do jádra celého procesu, a to i přes obrovský jas tohoto procesu, což nám umožňuje okamžitou kontrolu jakosti svarů.

Na obrázku 2.18 vidíme pohled do jádra svařování díky systému Cavilux.

Příklady použití laserového osvětlovacího systému Cavilux:

- pro snímání svařování,
- ke kontrole provozu rychlých výrobních linek v průmyslovém odvětví,
- osvětlení pro vysokorychlostní snímací techniku,
- osvětlení pro vědu a výzkum.



Obr. 2.18 Detailní pohled na svařování díky systému Cavilux (31)

3 TROUBLESHOOTER 1000

Kamery TroubleShooter byly jedny z prvních vysokorychlostních kamer (ne – li vůbec první), jenž byly skutečně mobilní a daly se vzít kamkoliv do terénu. Kamera Troubleshooter 1000 je zobrazena na obrázku 3.1 a její specifikace jsou uvedeny v tabulce 3.1.



Obr. 3.1 TroubleShooter 1000

Tab.3.1 Specifikace vysokorychlostní kamery TroubleShooter 1000 (2)

Označení	TroubleShooter 1000
Detektor	Maticový typu CMOS
Typ senzoru	Barevný (24 bitů)
Maximální rozlišení	640 x 480 obrazových bodů
Možné režimy záznamu	Ruční a Trigger
Rozměry [mm]	152 x 127 x 100
Hmotnost [kg]	1
Monitor	LCD 5“

Výrobcem kamery je společnost Fastec Imaging, což je jedna z nejvýznamnějších firem působících v tomto oboru. Další významní výrobci vysokorychlostních kamer jsou uvedeni v tabulce 3.2.

Čenově jsou ale kamery od firmy FASTEC Imaging nejvýhodnější, cena u ostatních výrobců může být i dvojnásobná (při stejné konfiguraci kamery).

I přes to, že je kamera TroubleShooter 1000 vydávána už několik let, stále patří ke špičce ve svém oboru, hlavně v okruhu přenosných kamer.

Tab.3.2 Přehled nejvýznamnějších výrobců vysokorychlostních kamer a některých jejich výrobků.

Firma	Výrobek
FASTEC Imaging	TroubleShooter TroubleShooter LE FASTEC InLine FASTEC HiSpec
Photron	FASTCAM SA4 FASTCAM SA5
Phantom	Phantom HD Gold Phantom 65 Phantom Flex
Olympus	i-SPEED LT i-SPEED 2 i-SPEED TR i-SPEED 3 i-SPEED FS
RedLake	M5 NR4 NR5 Y5 Y6 HG-100K HG-LE

Volba kamery ovšem hodně závisí na požadavcích měřené situace. Pokud například sledujeme nějaký malý, ale vysoce rychlý děj a stačí nám nízké rozlišení, je vhodné pořízení kamery s vysokou snímkovací frekvencí, jako je například již dříve zmíněný FASTCAM SA5 od společnosti Photron, jenž dokáže při rozlišení 64 x 16 obrazových bodů nasnímat milion snímků za sekundu. Naproti tomu, pokud chceme snímat s pěknou kvalitou obrazu, jsme schopni snímat i v HD rozlišení. Například zařízením Phantom HD Gold můžeme snímat například v HD rozlišení 1920 x 1080 se snímkovací frekvencí 1000 snímků za sekundu. [36]



Obr. 3.2 Phantom HD Gold (36)

4 TEORIE FRÉZOVÁNÍ A PRINCIP TVORBY TRÍSKY PŘI FRÉZOVÁNÍ

Během frézování prochází obráběné materiály vysokou rychlostí svými mezními stavy (např. mezním stavem pružné napjatosti, plastické deformace, nebo mezního stavu oddělení částic materiálu formou lomového porušení). [8]

Jelikož je při frézování vysoká rychlost přetvoření, probíhají jednotlivé mezní stavy vysokou rychlostí (např. oproti tahovým zkouškám) a je velmi těžké jednotlivé fáze rozeznat. [8]

Také hodnoty měrné řezné síly nebo meze pevnosti jsou při frézování oproti hodnotám naměřeným standardními mechanickými zkouškami daleko vyšší (např. při technologii broušení i 1000krát). [8]

4.1 Řezné rychlosti při frézování

Hlavním řezným pohybem je při frézování řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] (viz. vztah 4.1) a koná jej nástroj (fréza). Vedlejší pohyb – posuv pracovního stolu koná pracovní stůl a je definován posuvovou rychlostí stolu v_f [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$] (viz. vztah 4.2). Na obrázku 4.1 je znázorněno složení hlavního a vedlejšího pohybu ve výsledný efektivní pohyb při nesousledném frézování. [8]

Vzorec pro výpočet řezné rychlosti (8):

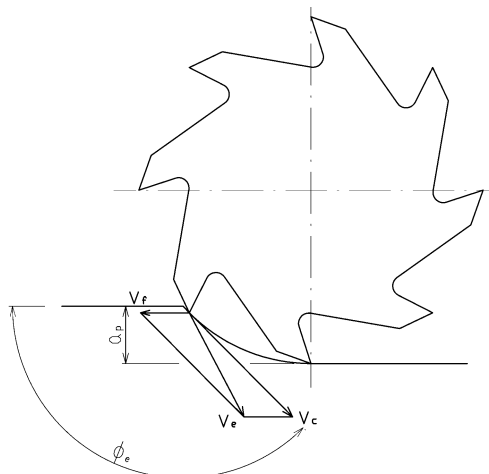
$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (4.1)$$

Vzorec pro výpočet posuvové rychlosti stolu (8):

$$v_f = \frac{f_z \cdot z \cdot n}{1000} \quad (4.2)$$

Výsledný efektivní pohyb ve je potom roven (8):

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (4.3)$$



Obr. 4.1 Složení hlavního a vedlejšího pohybu ve výsledný efektivní pohyb při sousledném frézování (8)

4.2 Analýza průřezu třísky při frézování

Jedny ze základních typů frézování jsou frézování válcové a čelní. Je nutné mít na paměti, že při všech typech frézování se nám s polohou zubu mění tloušťka třísky (viz. obr. 4.2), tříska je vždy dělená a v záběru často bývá i více zubů najednou. [8]

4.2.1 Čelní frézování

Vzorec pro výpočet jmenovité tloušťky třísky (8):

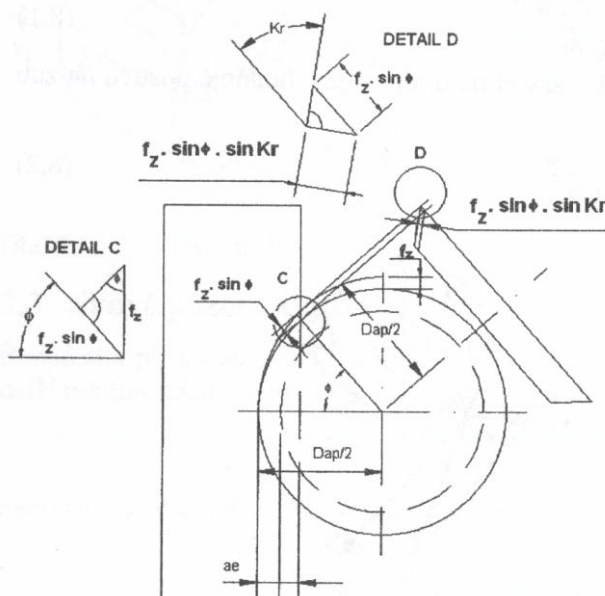
$$h_D = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \phi \quad (4.4)$$

Jmenovitá šířka třísky b_{Di} - výpočet pro úhel κ_r (8):

$$b_{Di} = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (4.5)$$

Jmenovitý průřez třísky – výpočet pro i -tý zub (8):

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \phi_i \quad (4.6)$$



Obr. 4.2 Schéma průřezu třísky při čelním frézování (8)

Výpočet síly působící na zub frézy – pro i -tý zub (8):

$$F_{Ci} = A_{Di} \cdot k_{Ci} \quad (4.7)$$

Výpočet celkové řezné síly působící na frézu (8):

$$F_C = \sum_{i=1}^{z_z} A_{Di} \cdot k_{Ci} \quad (4.8)$$

Kde: z_z ... počet zubů frézy (zubů v záběru) [-]

Ze vztahů vyplývá, že při frézování dochází k cyklickému namáhání frézovacích nástrojů, což má za následek vznik nadměrného opotřebení nástroje a chvění. [8]

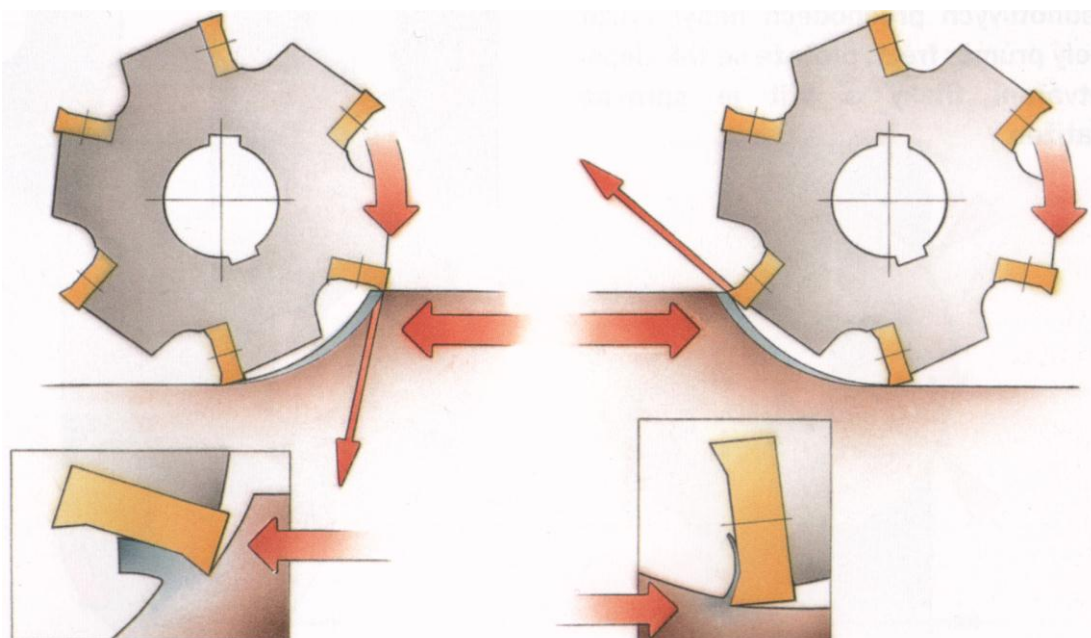
Cyklickému namáhání se tedy snažíme předejít například: [8]

- volbou vhodnější geometrie frézovacího nástroje,
- volbou vhodnější rozteče frézovacího nástroje (např. frézovací hlava s nepravidelnou roztečí zubů).

Správné volbě frézovacího nástroje je nutné vždycky věnovat důkladnou pozornost, poněvadž se jedná o nástroje ekonomicky náročné. [8]

4.2.2 Válcové frézování

Válcové frézování se podle vzájemného pohybu mezi nástrojem a pracovním stolem dělí na frézování sousledné a nesousledné.



Obr. 4.3 Sousledné frézování (9)

Obr. 4.4 Nesousledné frézování (9)

Sousledné frézování je frézování, při němž se obráběný materiál pohybuje ve směru rotace nástroje, jak je vidět na obrázku 4.3.

Z obrázku je patrné, že při sousledném frézování (někdy bývá také označováno jako sousměrné frézování) je na počátku záběru jednoho zubu průřez třísky maximální a při výjezdu ze záběru je průřez třísky minimální (při obvodovém frézování je na konci záběru tloušťka třísky nulová), díky čemuž se například zabrání hladicímu efektu, omezení vysokých teplot a nedochází k mechanickému vytvrzení. Díky uspořádání pohybů se navíc fréza snaží obrobek vtáhnout pod sebe, což je dalším přínosem sousledného frézování. [9]

Při nesousměrném frézování (někdy nazýváno jako konvenční frézování) se obráběný materiál pohybuje proti směru nástroje, což je vidět na obrázku 4.4.

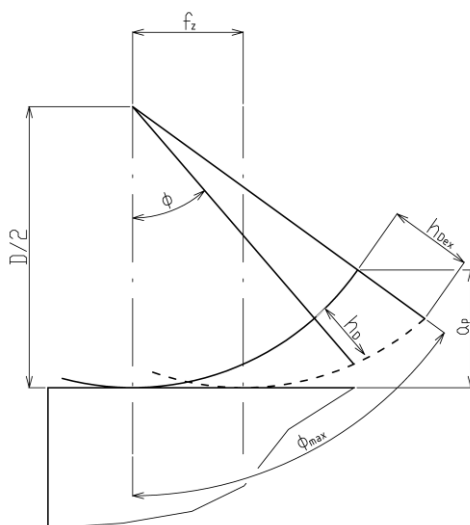
Jak je vidět, u nesousledného frézování je počáteční tloušťka třísky nulová a postupně narůstá (viz. obr. 4.5), což se nám projeví na velkých řezných silách, které se snaží frézu odtláčit z místa řezu. Frézu je tedy nutné tlačit do místa záběru, což vede k nežádoucím jevům, jako jsou například vznik hladícího efektu, vysokých teplot, mechanického vytvrzení a tyto síly se navíc snaží odtáhnout obrobek z místa řezu. [9]

Někdy se během frézování tříška nalepí nebo navaří na břit a dostane se tak do dalšího záběru. Stane-li se tak při frézování nesousledném, může se takto nalepená tříška zaseknout mezi obrobek a nástroj a může dojít ke zlomení vyměnitelné břitové destičky. Pokud se tak ale stane při frézování sousledném, tříška je o obrobek normálně přeříznuta a není vystavena žádnému nebezpečí, což je jedna z dalších výhod sousledného frézování oproti frézování nesouslednému. [9]

Pokud je možné použít variantu sousledného frézování, je vždy preferovanou volbou pro válcové frézování. [9]

Pokud se ale například během frézování mění velikost přídavku, případně obráběcí stroj nedokáže eliminovat tzv. mrtvý chod stroje, je lepší zvolit variantu nesousledného frézování. [9]

Výpočet řezné síly u válcového frézování je oproti výpočtu pro čelní frézování značně odlišný, což je způsobeno především změnou tloušťky třísky při válcovém frézování, což je vidět na obrázku 4.5.



Obr. 4.5 Schéma změny tloušťky třísky při válcovém frézování (8)

Vzorec pro výpočet tloušťky třísky (8):

$$h_D = f_z \cdot \sin \phi \quad (4.9)$$

Vzorec pro výpočet maximální tloušťky třísky při dosažení úhlu Φ_{\max} (8):

$$h_{D \max} = 2 \cdot f_z \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} \quad (4.10)$$

Pomocí úprav počátečních vztahů a konečné integrace lze odvodit vzorec pro výpočet průřezu třísky (8):

$$A_D = f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2} \cdot (\cos \phi_{1i} - \cos \phi_{2i}) \quad (4.11)$$

Pokud je znám průběh měrné řezné síly, lze po dalších úpravách odvodit vztah pro výpočet elementární řezné síly (8):

$$F_C = c_0 \cdot \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sin \phi^{1-mc} \cdot d\phi \quad (4.12)$$

Řezné síly se během válcového frézování mění v závislosti na opotřebením nástroje. Na počátku frézování je fréza díky své geometrii doslova vtahována do řezu, ke konci, až je nástroj otupený, je obráběným materiálem doslova odtlačována. Nárůst řezné síly otupením nástroje je ve většině případů markantní, často se pohybujeme s nárůstem řezných sil 200%, někdy i 300%. Analýzou takového nárůstu sil pomocí dynamometrů lze zjistit průběh opotřebením. Tyto analýzy jsou sice velmi nákladné, ale rovněž velmi přínosné. [8]

5 PRIMÁRNÍ EXPERIMENTY

Bylo provedeno několik experimentů, které jsou rozebrány v následujících kapitolách.

5.1 Zjišťování minimálních a maximálních zaostřitelných vzdáleností

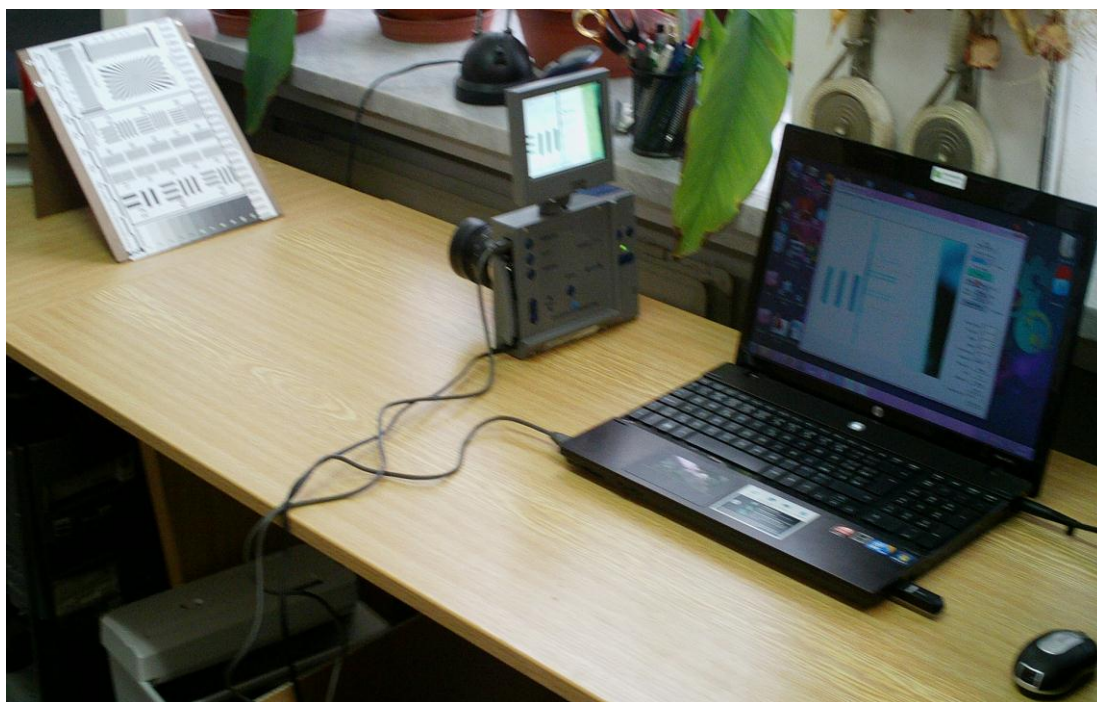
Tento experiment se zabýval použitelnou vzdáleností jednotlivých objektivů. Bylo zjišťováno, kterým z dostupných objektivů lze zaostřovat na jakou vzdálenost.

Fakulta strojního inženýrství má k dispozici 6 objektivů, které se dají použít pro snímání vysokorychlostní kamerou TroubleShooter 1000. Přehled těchto objektivů je uveden v tabulce 5.1.

Tab.5.1 Přehled použitelných objektivů vlastněných FSI

Číslo objektivu	Ohnisková vzdálenost [mm]	Clonové číslo [-]
Objektiv č. 1	3,6	F1,6
Objektiv č. 2	6	F1,2
Objektiv č. 3	12	F1,2
Objektiv č. 4	25	F0,95
Objektiv č. 5	50	F0,95
Objektiv č. 6	12,5-75	F1,8

Princip tohoto experimentu (viz. obr. 5.1) spočíval v tom, že kamerou byla snímána fotografická tabulka (viz. obr. 5.4), která se používá ke zjišťování rozlišitelnosti objektivů, pomocí které byla zjištěna minimální a maximální zaostřitelná vzdálenost (zaostřovalo se na minimální a poté na maximální vzdálenost). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.2. a na obr. 5.3.



Obr. 5.1 Princip primárního experimentu

Tab.5.2 Přehled změřených minimálních a maximálních zaostřitelných vzdáleností

Číslo objektivu	Minimální zaostřitelná vzdálenost [mm]	Maximální zaostřitelná vzdálenost [mm]
a) Objektiv č. 1	9	75
b) Objektiv č. 2	19	94
c) Objektiv č. 3	99	250
d) Objektiv č. 4	400	∞
e) Objektiv č. 5	485	∞
f) Objektiv č. 6 (režim makro)	34	∞
g) Objektiv č. 6 (f=75 mm)	840	∞

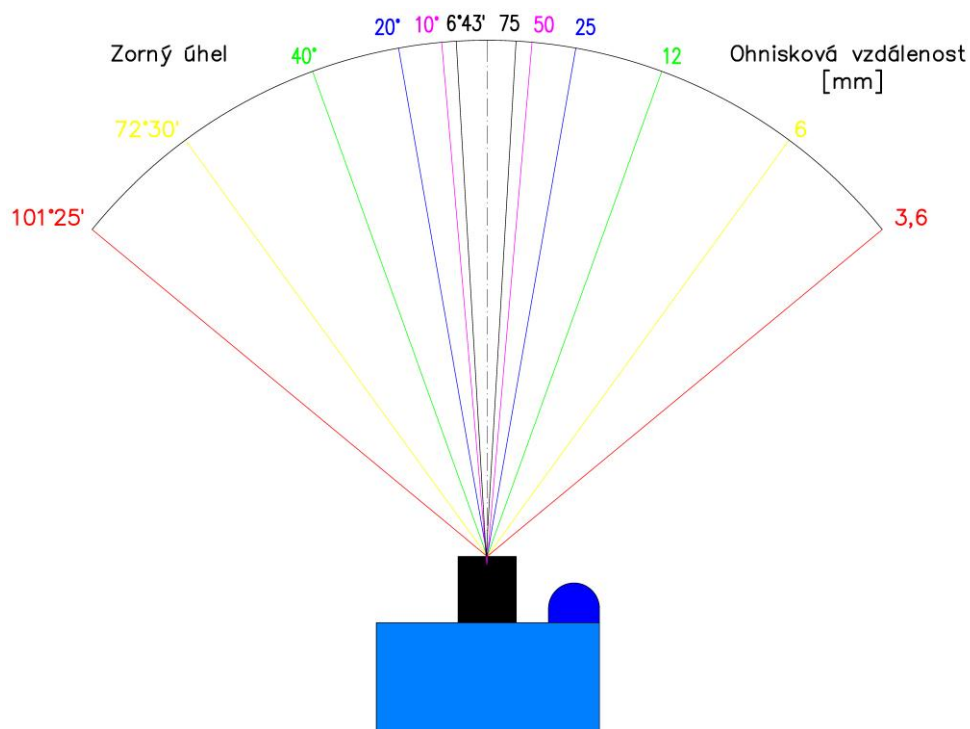
Aby mohl být vytvořen obrázek minimálních a maximálních zaostřitelných vzdáleností jednotlivých objektivů (obr. 5.3.), musel být ještě pro každý objektiv vypočten jeho zorný úhel (hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.3 a na obr. 5.2).

Zorný úhel určuje oblast scény, kterou je možno snímat. Je přímo závislý na velikosti senzoru záznamového zařízení (d), jenž je v našem případě 8,8 mm a vzdálenosti ohniska objektivu (f).

Vzorec pro výpočet zorného úhlu (7):

$$\alpha = 2 \cdot \arctg [d / (2 \cdot f)] \quad (5.1)$$

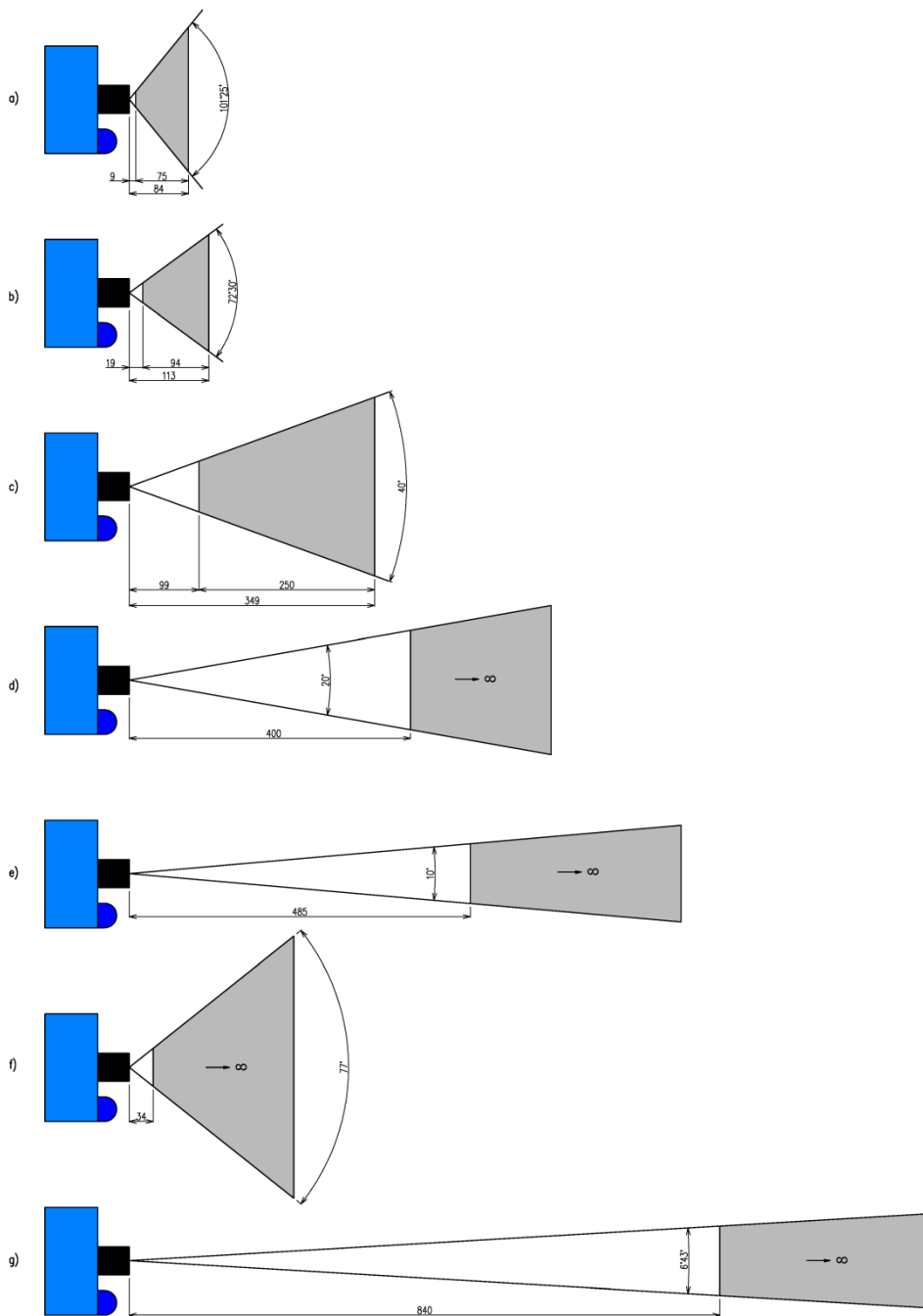
Z uvedeného vzorce je patrné, že s rostoucí ohniskovou vzdáleností velikost zorného úhlu klesá, což je vidět i na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Závislost ohniskové vzdálenosti a zorného úhlu

Tab.5.3 Přehled vypočtených hodnot zorného pole jednotlivých objektivů

Objektiv	Velikost senzoru [mm]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Vypočtený zorný úhel [°]
3,6mm F1,6	8,8	3,6	101°25'
6mm F1,2	8,8	6	72°30'
12mm F1,2	8,8	12	40°
25mm F0,95	8,8	25	20°
50mm F0,95	8,8	50	10°
Makro F1,8	8,8	Makro	77°
75mm F1,8	8,8	75	6°43'



Obr. 5.3 Zaostritelné vzdálenosti jednotlivých objektivů

V tabulce 5.4 jsou uvedeny maximální velikosti snímaných objektů pro dané objektivy.

Tab.5.4 Hodnoty minimálních velikostí sledovaných objektů

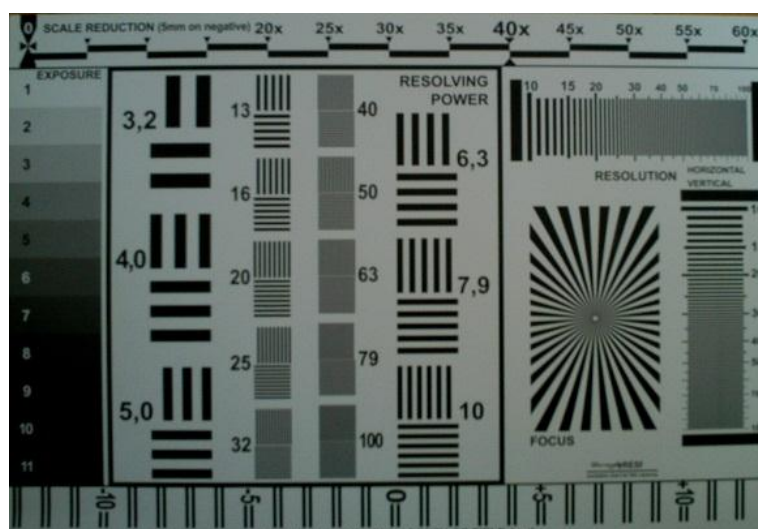
Objektiv	Minimální zaostřitelná vzdálenost [mm]	Zorný úhel [°]	Maximální velikost objektu [mm]
3,6mm F1,6	9	101°25'	44
6mm F1,2	19	72°30'	56
12mm F1,2	99	40°	115
25mm F0,95	400	20°	130
50mm F0,95	485	10°	79
Režim makro F1,8	34	77°	54
75mm F1,8	840	6°43'	77

5.2 Testování hloubek ostrosti

Tento pokus byl prováděn ze stejného důvodu jako předchozí experiment, a to z důvodu rychlého výběru správného objektivu.

Rozmístění pokusu bylo stejné jako při primárním experimentu, jenž je znázorněn na obrázku 5.1.

Samotný experiment spočíval opět ve snímání fotografické tabulky (viz. obr. 5.4) určené ke zjišťování optických vlastností objektivů. Objektiv byl umístěn do libovolné vzdálenosti, která se nacházela v rozmezí změřeném v primárním experimentu. Z této vzdálenosti bylo zaostřeno na hodnotu 0 na svislé stupnici určené ke zjišťování hloubky ostrosti (oblast tabulky nazvaná Sharpness matching / Depth of field). Poté byla clona objektivu otevřena na maximum a vizuálně z LCD monitoru odečtena hodnota hloubky ostrosti. Poté byla clona zacloněna na maximum a opět byla odečtena hloubka ostrosti. V této fázi ale nastaly již první problémy – nedostatek světla. Naměřené hodnoty jednotlivých hloubek ostrostí jsou uvedeny v tabulce 5.5.



Obr. 5.4 Fotografická tabulka ke zjišťování optických vlastností objektivů

Tab.5.5 Přehled změřených hodnot hloubek ostrosti jednotlivých objektivů

Objektiv	Měřená vzdálenost [mm]	Clonové číslo c [-]	Hloubka ostrosti [mm]	
3,6mm F1,6	80	C=1,6	+17,5	-10
		C=16	+ stovky mm	- stovky mm
6mm F1,2	120	C=1,2	+11	-10
		C=16	+ stovky mm	- stovky mm
12mm F1,2	145	C=1,2	+5	-5
		C=16	+ stovky mm	- stovky mm
25mm F0,95	460	C=0,95	+25	-10
		C=16	+ stovky mm	- stovky mm
50mm F0,95	580	C=0,95	+10	-10
		C=16	+ řády m	- řády m
Makro F1,8	150	C=1,8	+10	-5
		C=22	+ řády m	- řády m
75mm F1,8	960	C=1,8	+25	-25
		C=22	+ řády m	- řády m

Nutno dodat, že toto jsou hodnoty naměřené v laboratorních podmínkách a od hodnot, které budou naměřeny na dílně FSI VUT v Brně se mohou značně lišit.

6 ANALÝZA TVORBY TRÍSKY POMOCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ DIGITÁLNÍ KAMERY

V této kapitole bude popsán průběh experimentu, jenž proběhl na půdě FSI VUT v Brně. Snímanou situací bylo zvoleno zavrtávání frézy do různých materiálů:

- POM,
- neměkčený PVC,
- silumin,
- přírodní dřevo (buk),
- umělé dřevo.

6.1 Parametry experimentu a příslušenství k němu

Tato část se zabývá naplánováním všech aspektů celého experimentu. Nejprve bude provedena v této části volba obráběcího stroje, obráběcího nástroje, obráběného materiálu, objektivu, stativů a osvětlení.

6.1.1 Volba obráběcího stroje

Jako obráběcí stroj byla zvolena vertikální konzolová frézka FV 25 CNC A (viz. obr. 6.1). Tento stroj je vhodný zejména pro výrobu malých, tvarově složitých součástí a jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 6.1. Frézka je vyrobena ve firmě Obráběcí stroje Olomouc s.r.o. a je řízena systémem Heidenhain iTNC 530.

Na soustružnické dílně FSI VUT v Brně je možno využít ještě frézku MCV 1210. Pohyb v pěti osách je pro nás ale při našem experimentu zbytečný, navíc frézka FV 25 CNC A nám nabízí větší prostor pro nasvícení scény.



Obr. 6.1 Frézka FV 25 CNC A (33)

Tab.6.1 Parametry frézky FV 25 CNC A (34)

Parametr stroje	Hodnota
Podélný posuv X [mm]	760
Příčný posuv Y [mm]	355
Svislý posuv Z [mm]	152
Upínací délka stolu [mm]	1300
Upínací šířka stolu [mm]	350
Upínací kužel vřetena	ISO40
Maximální otáčky vřetene [min^{-1}]	6000
Maximální posuvová rychlost stolu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	2500

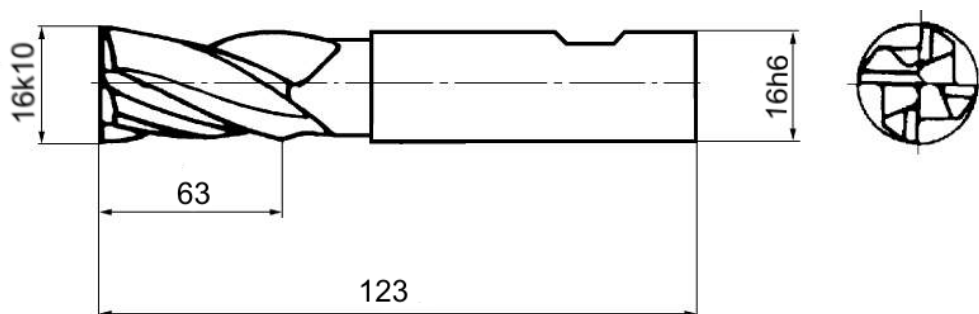
6.1.2 Volba obráběcího nástroje

Naše technologie frézování bude provedena čelní válcovou frézou dlouhého provedení od výrobce ZPS – FN a.s. (viz. obr. 6.2). Rozměry nástroje a doporučené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Jedná se o frézu vyrobenou z vysoce kvalitní rychlořezné oceli, s vysokou houževnatostí a teplotní odolností, která je opatřena upínacím systémem Weldon. Dá se použít pro materiály s mezí pevnosti do 900 MPa. Obecně je potom tato fréza vhodná například pro frézování automatových a konstrukčních ocelí, litých ocelí, nízkolegovaných nástrojových ocelí, zušlechťených ocelí, litiny, nerezavějících ocelí, slitin Cr – Ni nebo slitin hliníku. [35]

Tab.6.2 Parametry frézy (35):

Dk10 [mm]	Dh6 [mm]	l [mm]	L [mm]	Z [-]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]
16	16	63	123	4	16	1,6	0,044



Obr. 6.2 Čelní válcová fréza průměru 20 mm (35)

6.1.3 Volba objektivu

Z výsledků naměřených v minulých kapitolách se nám jako ideální objektiv jeví zoomovací objektiv s ohniskovou vzdáleností 12,5 – 75 mm a objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm. Pomocí těchto objektivů dokáže TroubleShooter 1000 při dostatečném osvětlení nasnímat pěkné snímky s vysokou hloubkou ostroty.

Aby byla tato práce posunuta ještě dál, byl navržen speciální mezikroužek o délce 15 mm, určený k prodloužení ohniskové vzdálenosti (tedy vzdálenosti mezi objektivem a snímacím senzorem), což vede ke změně zaostřitelné vzdálenosti (minimální i maximální zaostřitelná vzdálenost se zmenší). Dostaneme se tedy na ještě větší detail snímku.



Obr. 6.3 Mezikroužek z duralu o délce 15 mm

Mezikroužky jsou v makrofotografii často používány, přičemž jsou dodávány v celých sadách a jednotlivé díly se dají mezi sebou kombinovat. Díky tomu, že na naší fakultě nejsou mezikroužky k dispozici, byl na naší fakultě FSI VUT v Brně vytvořen z duralu (EN AW - 6060) mezikroužek speciální, o délce 15 mm, osazený dvěma C zá-

vity (jeden vnitřní a druhý vnější), jenž je zobrazen na obrázku 6.3 a jehož dílenský výkres je uveden v příloze 1. Tento mezikroužek byl následně ještě načerněn, a to z důvodu lepších optických vlastností.

Mezikroužek byl poté namontován mezi objektiv a vysokorychlostní kameru a bylo pozorováno, jak se změnila minimální a maximální zaostřitelná vzdálenost. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.3 a na obrázku 6.4.

Tab.6.3 Hodnoty minimálních a maximálních zaostřitelných vzdáleností při použití mezikroužku o délce 15 mm.

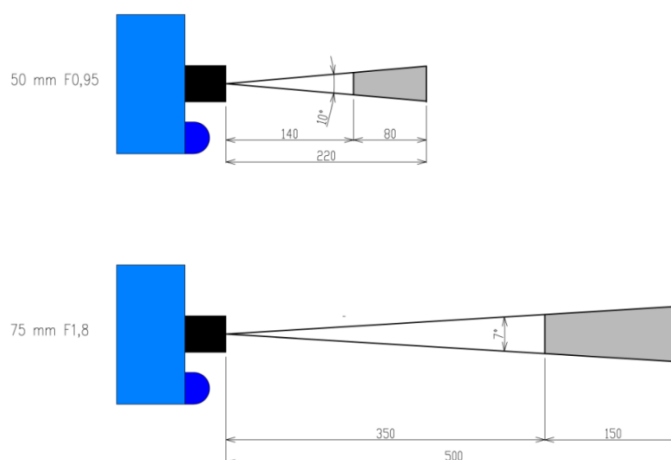
Číslo objektivu	Minimální zaostřitelná vzdálenost [mm]	Maximální zaostřitelná vzdálenost [mm]
3,6 mm F1,6	Nepoužitelný	Nepoužitelný
6 mm F1,2	Nepoužitelný	Nepoužitelný
12 mm F1,2	Nepoužitelný	Nepoužitelný
25 mm F0,95	Nepoužitelný	3,5
50 mm F0,95	140	220
Režim makro F1,8	Nepoužitelný	Nepoužitelný
75 mm F1,8	350	500

Naměřené hodnoty změněných zaostřitelných vzdáleností jsou znatelné a pro měření velice pozitivní. Pokud bude použit ke snímání objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm se světelností F0,95, anebo zoomovací objektiv s ohniskovou vzdáleností 75 mm a světelností F1,8, dosáhne se v kombinaci s mezikroužkem vysokého detailu snímaného objektu.

Pomocí stupnice přiloženého pravítka byly zjištěny hodnoty maximálních velikostí snímaných objektů při minimální zaostřitelné vzdálenosti. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Tab.6.4 Hodnoty maximálních velikostí snímaných objektů.

Objektiv	Maximální velikost objektu [mm x mm]
50 mm F0,95	25 x 19
75 mm F1,8	39 x 30



Obr. 6.4 Hodnoty minimálních a maximálních zaostřitelných vzdáleností při použití mezikroužku o délce 15 mm.

Díky tomu, že objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm (viz. obr. 6.5) má velice příznivou velikost zorného pole (25 mm x 19 mm), byl vybrán jako vhodný objektiv pro snímání našeho děje.



Obr. 6.5 Objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm a světelností F0,95

Aby nedošlo k poškození objektivu, byl vyroben silikonový kroužek, který byl během experimentů nasazen na objektiv. Tento kroužek je zobrazen na obrázku 6.6.



Obr. 6.6 Silonová krytka objektivu

6.1.4 Volba stativu

Díky volbě objektivu s ohniskovou vzdáleností 50 mm, kombinovaným s naším mezikroužkem o délce 15 mm, je nutné snímat ze vzdálenosti

140 mm. Jelikož se na naší fakultě nenachází pro tuto vzdálenost vhodný stativ, byl pro toto měření zhotoven stativ speciální, jenž je zobrazen na obrázku 6.7 a jehož výkresy jsou uvedeny v příloze 2., 3., 4., 5., 6.

Tento stativ je tvořen z ocelové základové desky, dvou mosazných tyčí a jednoho šroubu s vnitřním šestihřtanem. První mosazná tyč o průměru 13 mm je zašroubována závitem M8 do základové desky a na druhém konci tyče je přes křídlatý šroub vytvořen kloub, přes který je k první mosazné tyči připojena druhá mosazná tyč, na druhém konci opatřená závitem pro fotografické přístroje (Whitworthův závit $\frac{1}{4} W$), který slouží pro bezpečné upnutí kamery. První mosazná tyč byla vyrobena ve 2 délkách (50 a 80 mm), z důvodu možnosti nastavení snímací výšky vysokorychlostní kamery.



Obr. 6.7 Stativ určený k upnutí kamery

6.1.5 Volba osvětlení

Díky tomu, že světelná náročnost vysokorychlostního záznamu je vysoká, na volbu světel byl kladen velký důraz. K osvětlení našeho pokusu byly zajištěny 3 pětisetwattové lampy. Jejich rozmístění je vidět na obrázku 6.8.



Obr. 6.8 Rozmístění světel při experimentu

6.2 Volba řezných podmínek

I přes doporučené řezné podmínky našeho nástroje byly zvoleny hodnoty jiné. Jako obráběné materiály byly totiž zvoleny materiály, u kterých můžeme zvýšit posuv na zub, aby naše výsledky byly zřetelnější. Zvolené řezné podmínky experimentu jsou uvedeny v tabulce 6.5.

Při frézování plastů je hlavní zřetel brán na hloubku třísky a_p a ta byla zvolena na hodnotu 2 mm. Posuvová rychlost stolu byla původně zvolena 1200 milimetrů za minutu a počet otáček byl zvolen na 2000 otáček za minutu. Díky použití mezikroužku ale došlo k posunutí optické soustavy a následnému úbytku světla dopadajícího na senzor. V úvahu tedy přicházeli 2 možnosti: snížit počet otáček a posuvovou rychlost stolu, nebo scénu více nasvítit a zvednout hodnotu závěrky. Kvůli vysokému vyzařovanému teplu tedy byla snížena hodnota otáček na 50 otáček za minutu a hodnota posuvové rychlosti stolu na 30 milimetrů za minutu. Ze zvolených hodnot posuvové rychlosti stolu a otáček hlavního vřetene byl poté proveden výpočet posuvu na zub (vztah 6.1).

Tab.6.5 Zvolené hodnoty řezných podmínek:

a_p [mm]	a_e [mm]	v_f [mm·min ⁻¹]	n [min ⁻¹]
2	16	30	50

Výpočet posuvu na zub:

$$f_z = \frac{v_f}{Z \cdot n} = \frac{30}{4 \cdot 50} = \underline{\underline{0,15 \text{ mm}}} \quad (6.1)$$

Pro frézování PVC, umělého dřeva a bukového dřeva byly zvoleny podmínky následující (viz. tab. 6.6). Posuv na zub se oproti podmínkám pro polyoxymetylén nijak nezměnil.

Tab.6.6 Zvolené hodnoty řezných podmínek:

a_p [mm]	a_e [mm]	v_f [mm·min ⁻¹]	n [min ⁻¹]
0,5	16	30	50

Pro zavrtávání frézy do siluminu byly zvoleny opět jiné podmínky, přičemž byla zvýšena hodnota otáček na 100 otáček za minutu, viz tabulka 6.7..

Tab.6.7 Zvolené hodnoty řezných podmínek:

a_p [mm]	a_e [mm]	v_f [mm·min ⁻¹]	n [min ⁻¹]
0,5	16	30	100

Výpočet posuvu na zub:

$$f_z = \frac{v_f}{Z \cdot n} = \frac{1200}{4 \cdot 4000} = \underline{\underline{0,075 \text{ mm}}} \quad (6.2)$$

6.3 Průběh experimentu

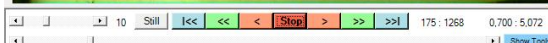
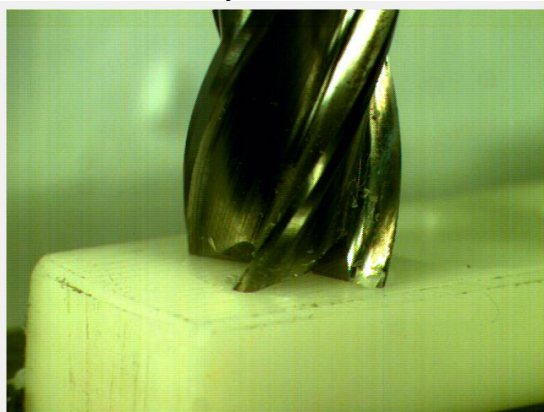
Jak již bylo zmíněno, díky použití mezikroužku byl získán vysoký detail záznamů, ale musely být sníženy parametry experimentu. Použité nastavení kamery je obsaženo v tabulce 6.8.

Tab.6.8 Nastavení kamery během experimentu

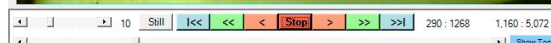
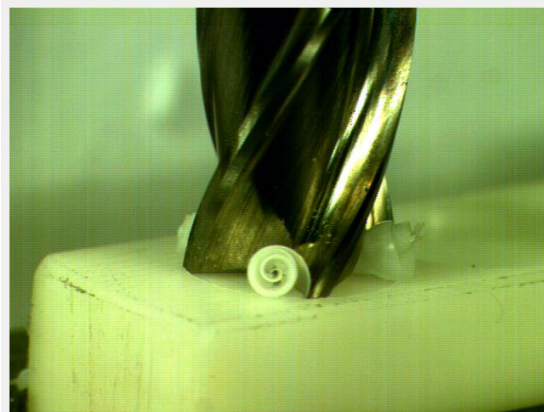
Parametr	Hodnota
Snímkovací frekvence [fps]	250
Rozlišení	640 x 480
Rychlost závěrky	1X

6.3.1 Záznam zavrtávání frézy do polyoxymetylénu

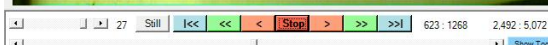
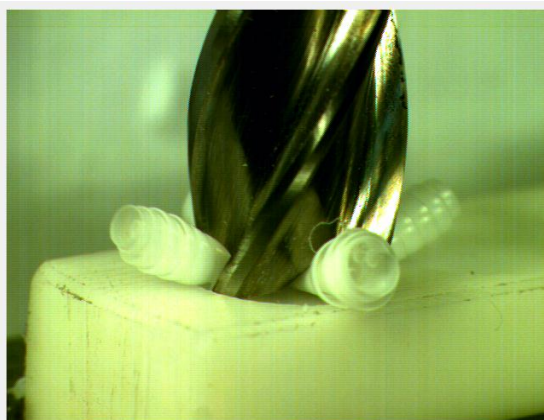
Nasnímané sekvence byly relativně ostré. Na obrázku 6.9 je vidět počátek utváření třísky během zavrtávání frézy, na obrázku 6.10 je potom vidět postupná tvorba třísky v zubové mezeře. Na obrázku 6.11 je snímek, na kterém už jsou třísky velkých rozměrů a na obrázku 6.12 už dochází k odlomení třísky.



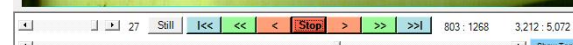
Obr. 6.9 Počátek utváření třísky při zavrtávání frézy



Obr. 6.10 Rozvíjející se průběh utváření třísky při zavrtávání frézy



Obr. 6.11 Pokročilé stádium tvorby třísky

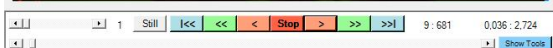
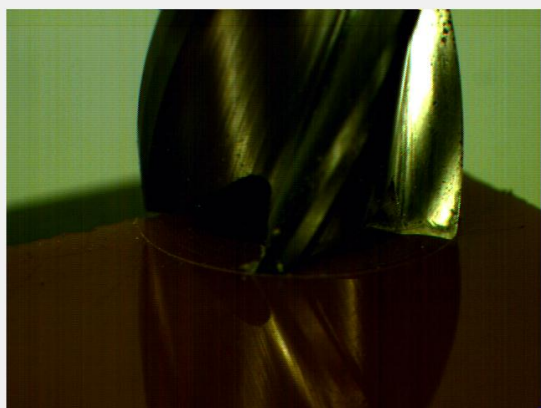


Obr. 6.12 Odlamování třísek na konci zavrtávání

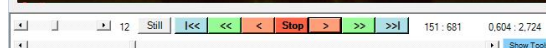
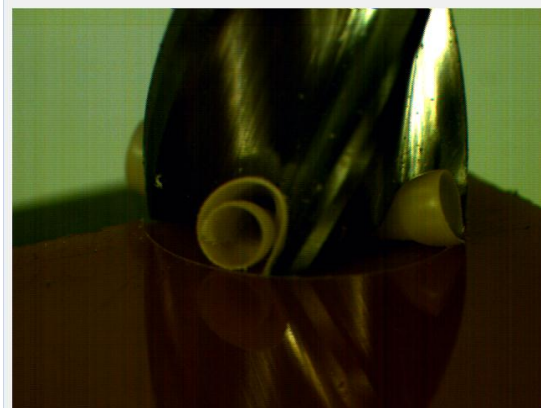
6.3.2 Záznam zavrtávání frézy do neměkčeného PVC

Díky barvě polyvinylchloridu je na snímcích vidět oproti polyoxymethylénu lepší kontrast. Na snímku 6.13 je vidět počátek utváření třísky při zavrtávání do PVC, na obrázku 6.14 je vidět postupná tvorba třísky v zubové mezeře, na obrázku 6.15 je snímek pokročilé tvorby třísky před odlomením a na snímku 6.16 již dochází k úplnému odlomení třísky.

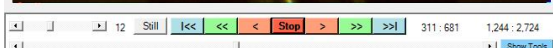
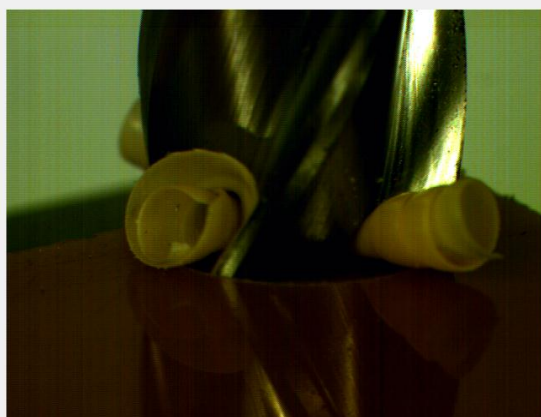
Z průběhu zavrtávání do obou plastů je názorně vidět, že oba plasty tvoří pěknou plynulou třísku.



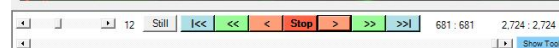
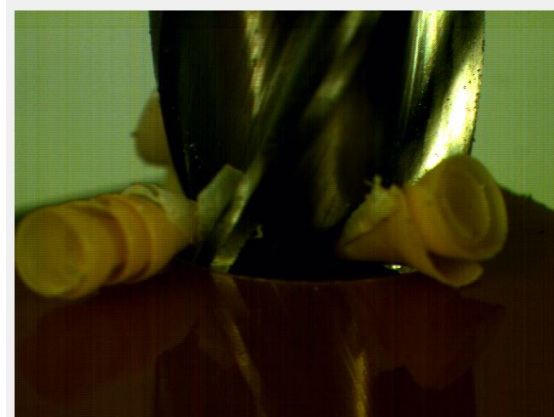
Obr. 6.13 Počátek utváření třísky při zavrtávání frézy



Obr. 6.14 Rozvíjející se průběh utváření třísky při zavrtávání frézy



Obr. 6.15 Pokročilé stádium tvorby třísky

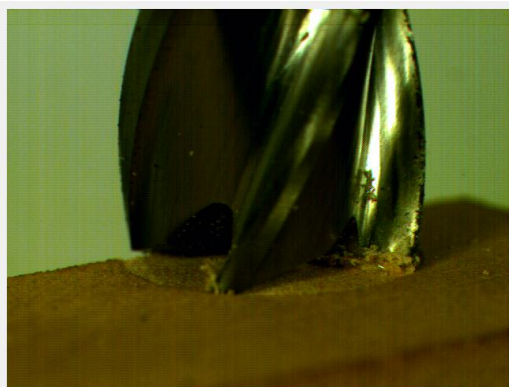


Obr. 6.16 Odlamování třísek na konci zavrtávání

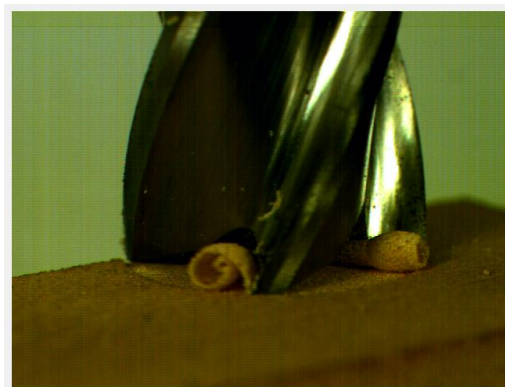
6.3.3 Záznam zavrtání frézy do umělého dřeva

Při zavrtávání frézy do umělého dřeva byla vytvářena tříska jemná a pórovitá, avšak relativně plynulá.

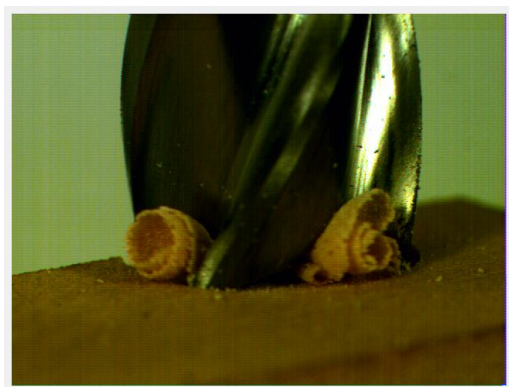
Sled snímků na obrázcích je stejný jako v předchozích případech, a to takový: Na obrázku 6.17 jsou vidět počátky utváření třísky v zubové mezeře, na obrázku 6.18 je vidět postupná tvorba třísky v zubové mezeře, na obrázku 6.19 je vidět pokročilé stádium tvorby třísky a na obrázku 6.20 dochází k odchodu třísky z místa řezu.



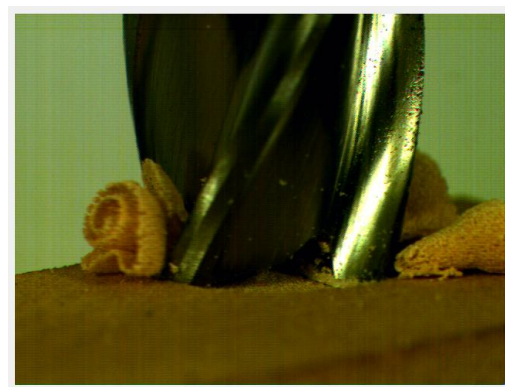
Obr. 6.17 Počátek utváření třísky při zavrtávání frézy



Obr. 6.18 Rozvíjející se průběh utváření třísky při zavrtávání frézy



Obr. 6.19 Pokročilé stádium tvorby třísky

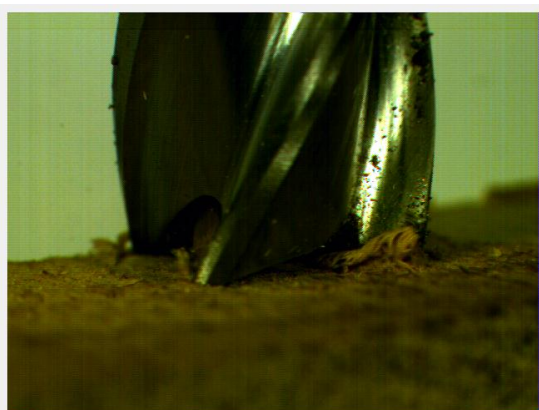


Obr. 6.20 Odlamování třísek na konci zavrtávání

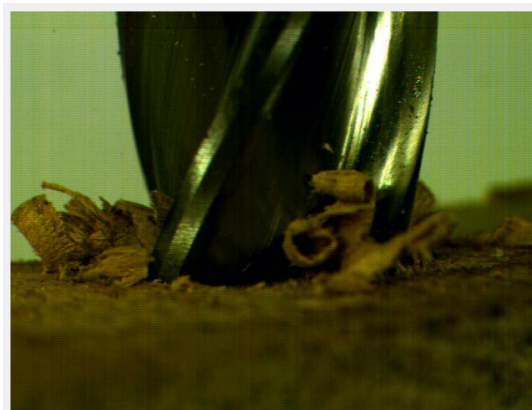
6.3.4 Záznam zavrtání frézy do bukového dřeva

Během tohoto experimentu se třísky chovala dle očekávání, byly hodně drobné a malé.

Na obrázku 6.21 je vidět počátek tvorby třísky v zubové mezeře, na obrázku 6.22 je potom vidět tvorba malých a drobných třísek.



Obr. 6.21 Počátek utváření třísky při zavrtávání frézy

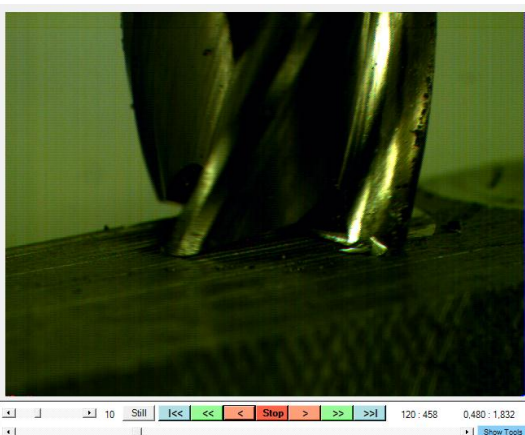


Obr. 6.22 Tvorba malých a drobných třísek při zavrtávání do bukového dřeva

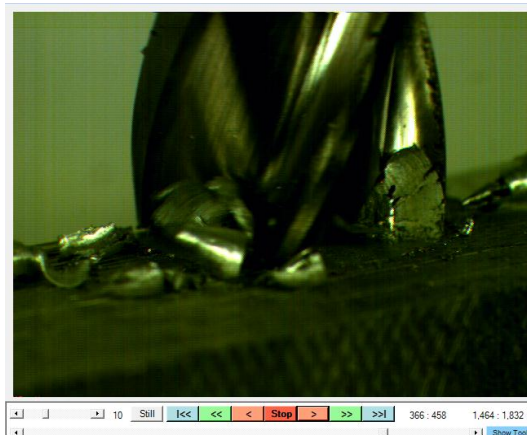
6.3.5 Záznam zavrtání frézy do siluminu

Při zavrtávání frézy do siluminu byl kvůli lepšímu průběhu frézování zvýšen počet otáček na 100 otáček za minutu. Jak bylo předpokládáno, třísky byly malé a dosti drobné.

Na obrázku 6.23 je vidět počátek tvorby třísky v zubové mezeře a na obrázku 6.24 je zachycena tvorba malých a drobných třísek.



Obr. 6.23 Počátek utváření třísky při zavrtávání frézy

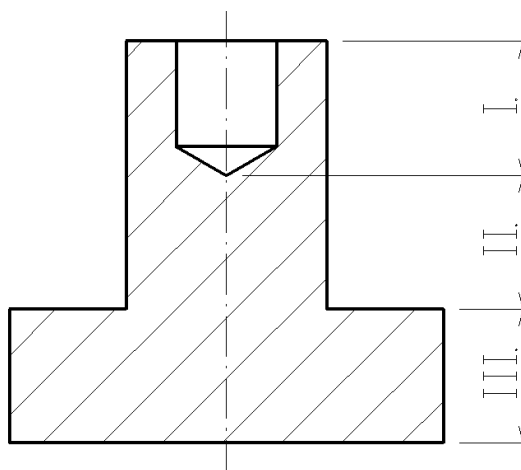


Obr. 6.24 Tvorba malých a drobných třísek při zavrtávání do siluminu

6.3.6 Zavrtávací zkoušky v praxi

V praxi se zavrtávací zkoušky často provádí na odstupňované přírubě (viz. obr. 6.25), přičemž v 1. fázi se fréza zavrtává do mezikruží s vnějším průměrem o velikosti průměru frézovacího nástroje, v 2. fázi se fréza zavrtává do plného průměru, shodného s průměrem nástroje a ve třetí fázi se fréza zavrtává do plného materiálu.

Tyto zkoušky jsou poté vyhodnocovány například pomocí dynamometrů.



Obr. 6.25 Fáze při zavrtávací zkoušce

Díky časové a materiálové náročnosti ovšem byla provedena pouze fáze III., a tedy zavrtání frézy do plného materiálu.

6.4 Měření zařízením HiSpec 1

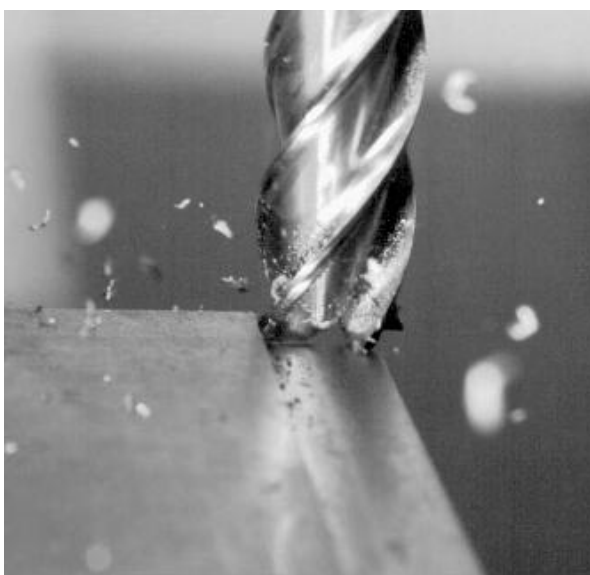
Na půdě FSI VUT v Brně se naskytla díky návštěvě pana Štěpána Svobody ze společnosti SpektraVision s.r.o. krátká možnost vyzkoušet si práci se zařízením Fastec HiSpec 1 od výrobce Fastec Imaging. Jedná se o moderní kameru, jejíž parametry můžeme nalézt v tabulce 6.9.

Tab.6.9 Specifikace vysokorychlostní kamery Fastec HiSpec 1 (39)

Označení	Fastec HiSpec 1
Detektor	Typu CMOS
Typ senzoru	Černobílý nebo Barevný
Maximální rozlišení	1280 x 1024 obrazových bodů
Rozměry [mm]	63 x 63 x 65 s objektivem
Hmotnost [kg]	0.28

Díky vysoké světelné citlivosti této kamery (černobílá verze má světelnou citlivost 3200 ISO) je možné i při relativně nízkém osvětlení scény (za použití jednoho LED světla s příkonem 60W – viz. přílohy 7. a 8.) nasnímat kvalitní a ostré snímky (viz. obr. 6.26).

Jedny z dalších výhod kamery Fastec HiSpec 1 spočívají například v malé velikosti celého zařízení, v možnosti úpravy zorného pole přímo v softwaru nebo třeba v doplnění funkce autosave.



30.3.2011 14:22:58 -0173,8[ms] 000003304
 HiSpec 1 Fastec 336x324 @ 4000fps 245µs
 tvorba třísky (zpomaleno 200x)
 záznam pořídil: SpektraVision s.r.o.

Obr. 6.26 Počátek utváření třísky při zavrtávání frézy

7 ANALÝZA RYCHLOSTI A ZRYCHLENÍ FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE

Tato kapitola se bude zabývat analyzováním rychlostí a zrychlení frézovacího nástroje použitého na frézovacím centru MCV 1210 (viz. obr. 7.1) vybaveným řídicím systémem Sinumerik 840D, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 7.1.



Obr. 7.1 Frézovací centrum MCV 1210 (37)

Tab.7.1 Parametry frézky FV 25 CNC A (37)

Parametr stroje	Hodnota
Podélný posuv X [mm]	1000
Příčný posuv Y [mm]	800
Svislý posuv Z [mm]	600
Upínací délka stolu [mm]	1200
Upínací šířka stolu [mm]	1000
Upínací kužel	Weiss, Kessler
Upínací kužel vřetena	ISO40, HSK - A63
Maximální otáčky vřetene [min^{-1}]	18000

Díky programu MotionMeasure, jenž je dodáván firmou Fastec Imaging jako speciální měřící software pro kameru TroubleShooter, jsme schopni pomocí kreslení měřících přímek analyzovat okamžitou velikost rychlosti a zrychlení nasnímaných dějů, v našem případě se jednalo o 8 CNC režimů, jenž budou rozebrány v další kapitole.

7.1 Představení experimentu

Pokud na CNC strojích obrábíme tvarově složité součásti s vyšší přesností (např. formy), často využíváme různých CNC režimů. Některé z nich budou představeny v této kapitole.

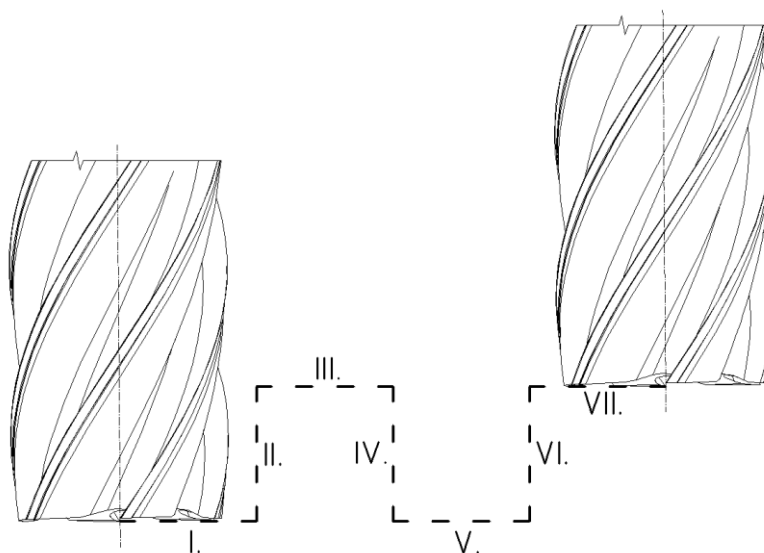
Jako snímané režimy byly vybrány režim G60 a G64. Tyto CNC režimy byly navíc kombinovány s příkazy BRISK, SOFT, FFWOF a FFWON. Seznam analyzovaných režimů je uveden zde:

- G60 SOFT FFWOF,
- G64 SOFT FFWOF,
- G60 BRISK FFWOF,
- G64 BRISK FFWOF,
- G60 SOFT FFWON,
- G64 SOFT FFWON.

Tyto CNC režimy byly součástí jednoduchého CNC programu. Níže je uveden CNC program pro režim G60 BRISK FFWOF:

```
G90
G54
G60 BRISK FFWOF
G0 X0 Y0 Z0
F10000
G1 X10
Z10
X20
Z0
X30
Z10
X40
G4 F5
G0 X0 Y0 Z0
M30
```

Dráha frézovacího nástroje byla tedy následující (viz. obr. 7.2):



Obr. 7.2 Sled analyzovaných úseků

V dalších podkapitolách jsou rozebrány jednotlivé příkazy a jejich vzájemné kombinace.

7.1.1 G60 versus G64

Jak je již známo, při tvorbě CNC programu dochází k postupnému přetváření CAD souboru na soubor CAM a následně pomocí postprocesoru na výsledný CNC program. [38]

Aby bylo možné vyrobit hladké a složité plochy, musíme je aproximovat malými ploškami, přičemž vznikají malé odchylky. Z takto vytvořených plošek (mnohostěnů) jsou procesorem za dodržení předem stanovených podmínek vytvářeny CNC bloky. [38]

Pokud bude použit režim G60, nástroj musí dodržet přesný průchod v každém uzlu, do kterého je naprogramován. Jelikož jsou plošky miniaturní, plošek je velké množství a nástroj se prakticky na plnou rychlost nerozjede. Tento režim je tedy prakticky vhodný k vrtání.

Existuje-li potřeba obrábět složité tvary s vyšší rychlostí a harmonizací chování posuvů, použijeme režim řízení pohybu po dráze s funkcí Look Ahead a s brzděním jen v rozích – režim G64. Tento režim je založený na 2 funkcích: na funkci Look Ahead a funkci automatického zaoblování rohů. [38]

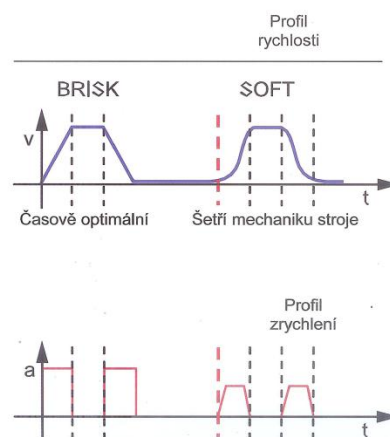
Funkce Look Ahead spočívá v tom, že řídicí systém zjišťuje profil rychlosti v několika následujících blocích. Funkce automatického zaoblování rohů spočívá v tom, že systém díky systému Look Ahead rozpozná rohy v následujících blocích a je schopen je automaticky zaoblit (nedochází k přesnému najíždění do naprogramovaných rohových bodů), což vede k vyšší rychlosti režimu G64 oproti režimu G60. [38]

7.1.2 Příkazy BRISK a SOFT

V poslední době je v průmyslu kladen čím dál větší důraz na minimalizaci opotřebování strojů, nástrojů aj. Z důvodu minimalizace opotřebení nástroje vznikl například režim SOFT.

Pokud je použit příkaz BRISK (příkaz bez omezení trhavých pohybů), dosáhne se skokových změn zrychlení, což vede k časově optimální práci, ale na úkor rychlosti trpí mechanika stroje.

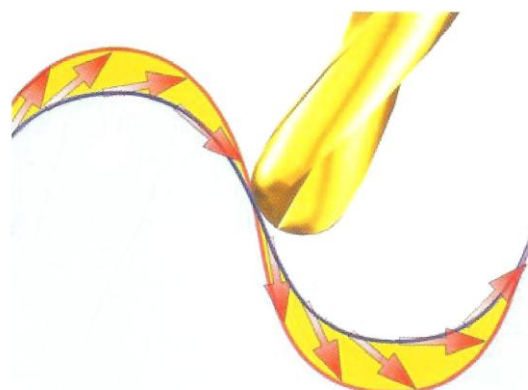
V opačném případě, je-li použit příkaz SOFT (příkaz s omezením trhavých pohybů), výrazně se šetří mechanika stroje, avšak práce již není časově optimální. Další výhodou příkazu SOFT je skutečnost, že jakost povrchu při použití tohoto příkazu je oproti příkazu BRISK kvalitnější (díky omezení rezonancí stroje). Profily rychlostí a zrychlení jsou znázorněny na obrázku 7.3. [38]



Obr. 7.3 Profily rychlostí a zrychlení pro příkazy SOFT a BRISK (38)

7.1.3 Příkazy FFWON a FFWOF

Díky mechanice stroje (především z důvodu setrvačnosti stroje) dochází při obrábění k tzv. vlečné chybě, která způsobuje chybu korektury. Tato chyba korektury spočívá v tom, že z důvodu setrvačnosti má frézovací nástroj snahu naprogramovanou konturu tangenciálně opouštět, což vede ke vzniku odlišné kontury, což je nežádoucí. Princip této situace je zachycen na obrázku 8.4. Díky dopředné regulaci FFWON ale stroj dokáže tuto chybu eliminovat. [38]



Obr. 7.4 Vznik chyby korektury při obrábění (38)

Příkazy BRISK, SOFT, FFWON a FFWOF se mezi sebou často kombinují. Například: pokud chceme dosáhnout vysoce přesné dráhy nástroje a přitom šetřit mechaniku stroje, je vhodná kombinace SOFT + FFWON. Naopak, pokud si vystačíme s nižší kvalitou povrchu, nebo jsme omezeni možnostmi stroje či jeho softwaru, je vhodné zvolit kombinaci SOFT + FFWOF. Kombinace příkazů BRISK a FFWON takřka ztrácí smysl a pokud chceme obrábět vysokou rychlostí a nezáleží nám na kvalitě povrchu (zejména hrubování), je vhodné volit kombinaci BRISK + FFWOF.

7.2 Analýzy vybraných režimů

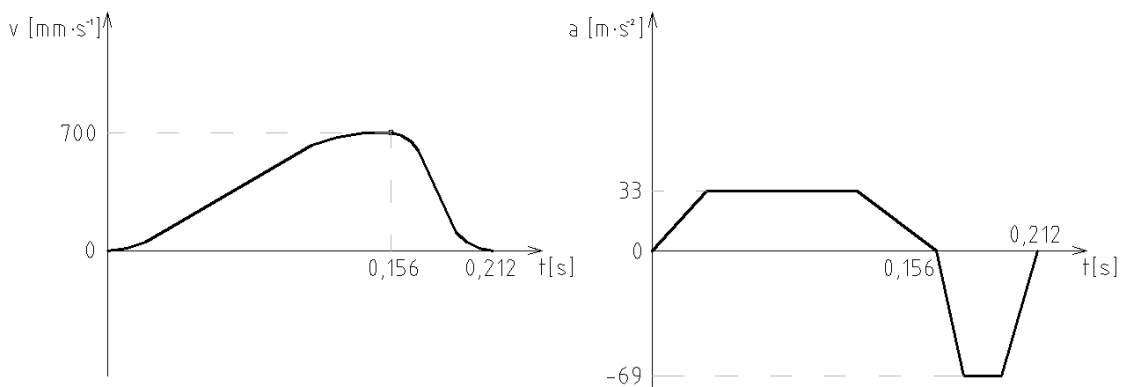
V této kapitole budou jednotlivě analyzovány nasnímané CNC režimy. Z časových důvodů byla provedena analýza rychlosti a zrychlení pouze na úsecích III. a VII. Nutno dodat, že rychlosti a zrychlení se na obou úsecích takřka rovnají. Pomocí kreslení měřících přímků v programu MotionMeasure byla následně provedena analýza rychlosti a zrychlení frézovacího nástroje a byly vytvořeny grafy rychlostí a zrychlení v závislosti na čase. Celkové časy projetí všemi úseky jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Tab.7.2 Celkové časy projetí všemi úseky (I. až VII.)

CNC režim	Čas projetí všemi úseky I. až VII. [s]
G60 SOFT FFWOF	2,296
G64 SOFT FFWOF	2,28
G60 BRISK FFWOF	1,92
G64 BRISK FFWOF	0,876
G60 SOFT FFWON	1,764
G64 SOFT FFWON	0,88

7.2.1 Analýza režimu G60 SOFT FFWOF

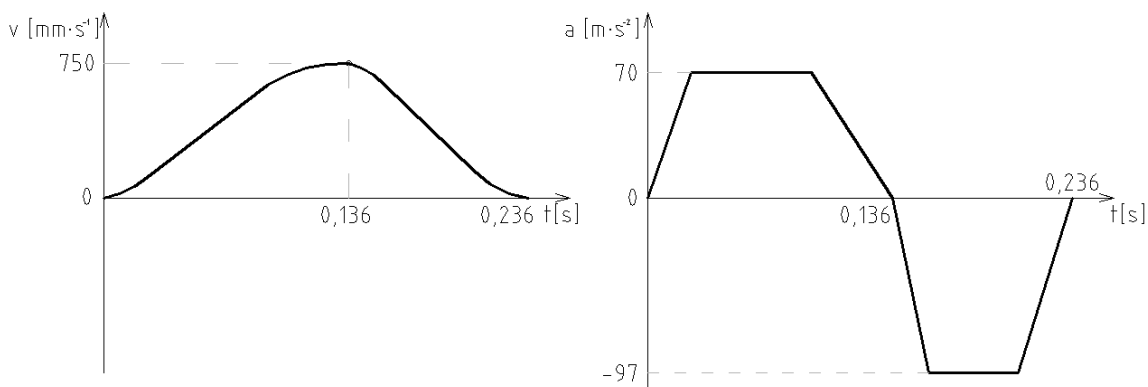
Jak se dalo očekávat, režim G60 je v kombinaci s příkazy SOFT a FFWOF nejpomalejším režimem ze všech analyzovaných režimů. Celková doba všech měřených úseků (I. až VII.) je zde rovna hodnotě 2,296 sekundy a průběhy rychlosti a zrychlení na úseku III. jsou znázorněny na obrázku 7.5.



Obr. 7.5 Průběh rychlosti a zrychlení při režimu G60 SOFT FFWOF na úseku III.

7.2.2 Analýza režimu G64 SOFT FFWOF

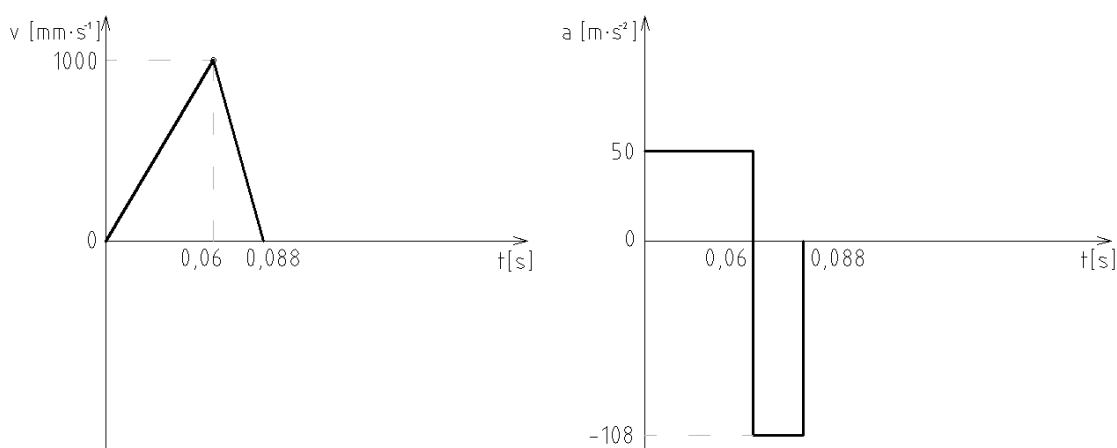
Na tomto případu je jasně vidět výhoda režimu G64. I přes to, že je čas projetí jednotlivými úseky o něco delší, je celkový čas projetí všemi úseky (2,28 sekundy) o něco kratší oproti stejné konfiguraci s režimem G60. Na obrázku 7.6 je znázorněn průběh rychlosti a zrychlení naměřených na úseku III.



Obr. 7.6 Průběh rychlosti a zrychlení při režimu G64 SOFT FFWOF na úseku III.

7.2.3 Analýza režimu G60 BRISK FFWOF

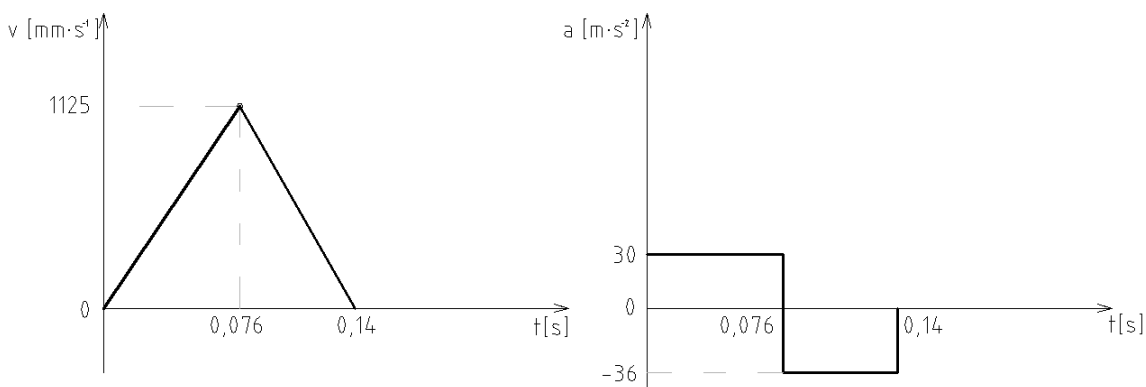
Analýza tohoto cyklu opět proběhla podle očekávání. Rychlost nástroje v jednotlivých úsecích byla vysoká, ale díky režimu G60 byl celkový čas projetí všemi úseky relativně dlouhý (1,92 sekundy). Na obrázku 7.7 jsou zobrazeny průběhy rychlosti a zrychlení na úseku III.



Obr. 7.7 Průběh rychlosti a zrychlení při režimu G60 BRISK FFWOF na úseku III.

7.2.4 Analýza režimu G64 BRISK FFWOF

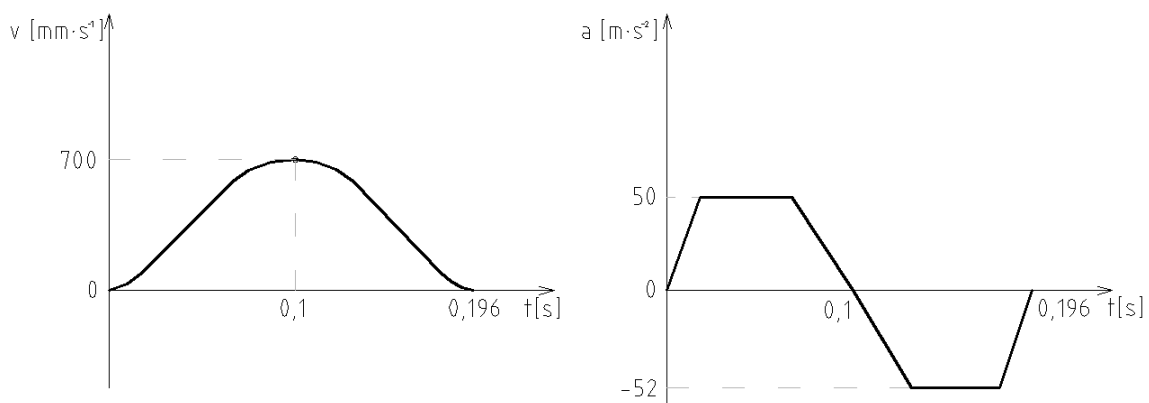
V kontrastu s předchozím režimem je tento režim velice rychlý, což se dalo očekávat. Celkový čas projetí všemi úseky je v tomto režimu roven 0,876 sekundy, což z tohoto režimu činí nejrychlejší režim ze všech analyzovaných. Na obrázku 7.8 je zobrazen průběh rychlosti a zrychlení během průjezdu III. úsekem.



Obr. 7.8 Průběh rychlostí a zrychlení při režimu G64 BRISK FFWOF na úseku III.

7.2.5 Analýza režimu G60 SOFT FFWON

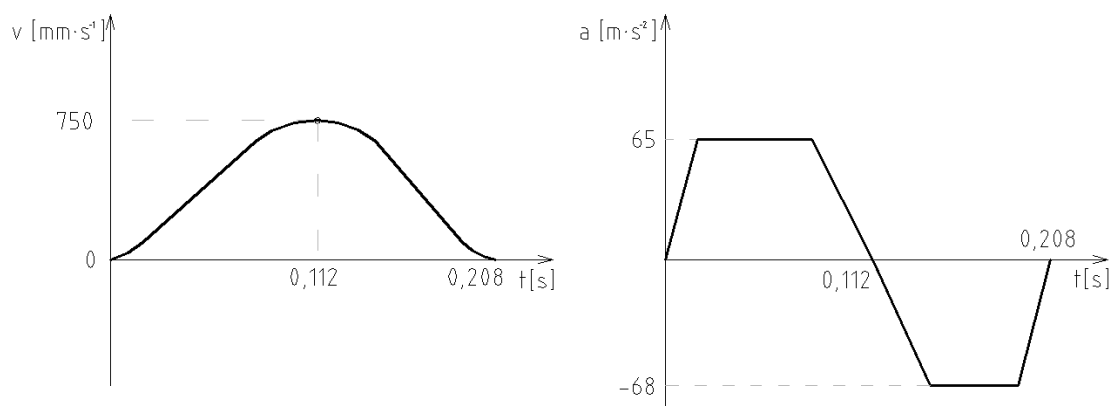
Analýza tohoto režimu proběhla opět podle očekávání. Režim je například oproti režimu předchozímu relativně pomalý, ale tato skutečnost je vykompenzována vyšší přesností výroby a šetřením mechaniky stroje. Celkový čas průjezdu všemi úseky je při tomto režimu roven hodnotě 1,764 sekundy a průběhy rychlosti a zrychlení při průjezdu úsekem III. jsou znázorněny na obrázku 7.9.



Obr. 7.9 Průběh rychlosti a zrychlení při režimu G60 SOFT FFWON na úseku III.

7.2.6 Analýza režimu G64 SOFT FFWON

Při této analýze se nám opět projevila výhoda režimu G64 oproti režimu G60. Čas dílčích úseků je opět nepatrně delší, ale celkový čas průjezdu všemi úseky je oproti režimu G60 SOFT FFWON kratší (1,496 sekundy). Na obrázku 7.10 jsou znázorněny průběhy rychlosti a zrychlení při průjezdu úsekem III.



Obr. 7.10 Průběh rychlosti a zrychlení při režimu G64 SOFT FFWON na úseku III.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá představením vysokorychlostních kamer a jejich využitím v praxi. Pojednává o principu tvorby třísky při operaci frézování. Dále se zabývá návrhem a výrobou speciálního příslušenství pro experimentální část (stativ, mezikroužek, krytka objektivu), analýzou zavrtávání frézovacího nástroje do vybraných materiálů a analýzou rychlostí a zrychlení frézovacího nástroje, měřených pomocí kreslicích přímek v programu Motion-Measure. Výstupy z experimentální části jsou:

- Prakticky byly dokázány dva hlavní problémy vysokorychlostních kamer – nasvícení scény a množství zpracovávaných dat.
- Byly provedeny primární experimenty, které vedly k volbě vhodného objektivu. Díky potřebě vyššího detailu snímané scény byl zhotoven speciální mezikroužek, který při použití vysokorychlostní kamery v kombinaci s objektivem 50mm F0,95 snížil minimální zaostřitelnou vzdálenost z hodnoty 485 mm na hodnotu 140 mm a poskytl vysoký detail snímané scény (25 x 19 mm). Aby bylo možno snímat ze vzdálenosti 140 mm, bylo nutné zhotovit také speciální stativ, určený k pevnému upnutí kamery k pracovnímu stolu frézky a krytku objektivu, aby nedošlo k poškození objektivu.
- Mezikroužek sice umožnil získat vysoký detail a posunul experiment za hranice běžných možností, ale také změnil hranici optické soustavy a zapříčinil úbytek světla dopadajícího na snímací senzor. To vedlo k tomu, že i při maximálním nasvícení snímané scény množství světla nestačilo a rychle se otáčející nástroj byl rozmazaný. Nabízely se dvě možnosti řešení. Buďto snížit počet otáček při stávajícím osvětlení, nebo ponechat počet otáček, zvýšit hodnotu závěrky a scénu ještě více nasvítit. Z důvodu vysokého vyzařovaného tepla ze stávajících světel byla zvolena první varianta. Počet otáček byl tedy snížen z hodnoty plánovaných 2000 otáček za minutu na hodnotu 100 otáček za minutu. Bylo ověřeno, že volba vysokorychlostní kamery je velmi důležitá a pokud není nutné pořizovat zařízení s barevným obrazovým senzorem, je lepší pořídit zařízení s černobílým senzorem, které má větší světelnou citlivost.
- V experimentech s analyzováním rychlosti a zrychlení frézovacího nástroje bylo proměřeno reálné nastavení pohonů obráběcího stroje pomocí analýzy dvou CNC režimů v kombinaci s příkazy BRISK, SOFT, FFWON a FFWOF. Dle předpokladů bylo změřeno, že nejpočetnějším režimem ze všech měřených je režim G60 v kombinaci s příkazem SOFT a FFWOF (celkový čas průjezdu měřeným úsekem 2,296 sekundy), což je kombinace určená k šetření obráběcího stroje a nedá se využít při CAD/CAM. Naopak nejrychlejší je režim G64 v kombinaci s příkazem BRISK a FFWOF (celkový čas průjezdu měřeným úsekem 0,876 sekundy), který je vhodný například pro hrubování s nízkou kvalitou povrchu.
- Rovněž bylo zjištěno, že pro kvalitní analýzu rychlosti a zrychlení je důležitá vysoká snímkovací frekvence, která vede k většímu množství dat a tedy i ke kvalitnější analýze záznamu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOMENDA, Jan; NOVÁK, Miroslav. *Http://www.rucevzhuru.cz* [online]. 2008 [cit. 2011-02-22]. Co je vysokorychlostní kamera?. Dostupné z WWW: <<http://www.rucevzhuru.cz/index.php/component/content/article/53-rychlokamery/133-vysokorychlostni-kamera.html>>.
2. *Www.fastecimaging.com : Portable High-Speed Digital Video Camera* [online]. 2009 [cit. 2011-05-24]. Fastec TroubleShooter. Dostupné z WWW: <http://www.fastecimaging.com/pdf/PDF/TroubleShooter_Datasheet.pdf>.
3. VOHLÍDKOVÁ, Monika, et al. *Http://www.kiv.zcu.cz* [online]. 2008 [cit. 2011-02-22]. Využití vysokorychlostní kamery při sledování poruchy hlasu. Dostupné z WWW: <<http://www.kiv.zcu.cz/~novyp/publ/orl-olomouc08.pdf>>.
4. *Http://www.visinst.com* [online]. 2008 [cit. 2011-02-24]. Lighting for high-speed imaging. Dostupné z WWW: <<http://www.visinst.com/Lighting.html>>.
5. SEGER, Chris. *Http://www.aostechnologies.com* [online]. Verze 1.0. 2006 [cit. 2011-02-24]. Colloquium Illumination. Dostupné z WWW: <http://www.aostechnologies.com/fileadmin/user_upload/PDFs/Process_Monitoring/Colloquium_Illumination.pdf>.
6. *Http://www.imagogroup-benelux.com* [online]. 2010 [cit. 2011-02-26]. Laser Illumination. Dostupné z WWW: <http://www.imagogroup-benelux.com/vim/index.php?option=com_content&view=article&id=96&Itemid=89>.
7. PIHAN, Roman. *Http://www.fotoroman.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-03-18]. Zorný úhel. Dostupné z WWW: <http://www.fotoroman.cz/glossary2/2_zorny_uhel.htm>.
8. FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. první. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
9. SANDVIK Coromant, Sandviken: *Technická příručka obrábění - soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. 2005. 601 s
10. *Http://zivotopis.osobnosti.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Eadweard Muybridge. Dostupné z WWW: <<http://zivotopis.osobnosti.cz/eadweard-muybridge.php>>.
11. *Http://www.highspeedimaging.com* [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. 101 History of High-Speed Imaging. Dostupné z WWW: <http://www.highspeedimaging.com/high-speed_camera_and_high-speed_imaging_applications.cfm>.
12. *Http://zivotopis.osobnosti.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Harold Eugene Edgerton. Dostupné z WWW: <<http://zivotopis.osobnosti.cz/harold-eugene-edgerton.php>>.
13. SVOBODA, Štěpán. *Http://www.odbornecasopisy.cz* [online]. 2004 [cit. 2011-04-29]. Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodu strojů a výrobních linek. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518>.
14. *Http://www.nordiclights.com* [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. N460 LED. Dostupné z WWW: <http://www.nordiclights.com/pdf/Product_sheets/N460LED.pdf>.

15. [Http://www.flickr.com](http://www.flickr.com) [online]. 8.3.2009 [cit. 2011-04-29]. Patriot!. Dostupné z WWW: <<http://www.flickr.com/photos/steveaux/3513700578/>>.
16. [Http://www.nacinc.com](http://www.nacinc.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Autosafety2. Dostupné z WWW: <<http://www.nacinc.com/images/autosafety2.jpg>>.
17. [Http://upload.wikimedia.org](http://upload.wikimedia.org) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Muybridge. Dostupné z WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/07/Muybridge-2.jpg/220px-Muybridge-2.jpg>>.
18. [Http://beantime.files.wordpress.com](http://beantime.files.wordpress.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Muybridge. Dostupné z WWW: <<http://beantime.files.wordpress.com/2008/07/muybridge.jpg?w=300&h=242>>.
19. [Http://web.mit.edu](http://web.mit.edu) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Harold Edgerton. Dostupné z WWW: <http://web.mit.edu/invent/iow/images/flashes_balloon.gif>.
20. [Http://www.korins.com](http://www.korins.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Kodak MASD. Dostupné z WWW: <<http://www.korins.com/english/maker/kodak/42i.jpg>>.
21. [Http://www.techsales.pro](http://www.techsales.pro) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Kodak 4540. Dostupné z WWW: <<http://www.techsales.pro/sites/prodimages/kodak-4540-ektapro-high-speed-video-camera-251630-a.jpg>>.
22. [Http://4.bp.blogspot.com](http://4.bp.blogspot.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Speed photography. Dostupné z WWW: <http://4.bp.blogspot.com/_mmBw3uzPnJI/RxZpURGOj8I/AAAAAAAAAJvM/fXUX_WKtVuY/s400/speed_photography_035.jpg>.
23. [Http://msnbcmedia1.msn.com](http://msnbcmedia1.msn.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Chameleon. Dostupné z WWW: <http://msnbcmedia1.msn.com/j/MSNBC/Components/Slideshows/_product/ion/ss-100722-high-speed-photos/ss-100722-high-speed-photos-01.grid-8x2.JPG>.
24. [Http://www.nealromanek.com](http://www.nealromanek.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Great white shark. Dostupné z WWW: <http://www.nealromanek.com/blog/uploaded_images/gw-785222.jpg>.
25. [Http://3.bp.blogspot.com](http://3.bp.blogspot.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Fotbal. Dostupné z WWW: <http://3.bp.blogspot.com/_EgB3E8yC6to/S_ift5oJefI/AAAAAAAAACYU/k3MMNzXg7H4/s1600/Kecelakaan+dalam+olahraga+%28%29.jpg>.
26. [Http://zarovky.poselsvetla.cz](http://zarovky.poselsvetla.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Žárovka. Dostupné z WWW: <http://zarovky.poselsvetla.cz/files/240/zarovka-60w_e27-cira.jpg>.
27. [Http://upload.wikimedia.org](http://upload.wikimedia.org) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Wolframová žárovka. Dostupné z WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Wolfram-Halogengl%C3%BChlampe.png>>.
28. [Http://www.autodily-remi.cz/](http://www.autodily-remi.cz/) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Xenonová výbojka. Dostupné z WWW: <<http://www.autodily-remi.cz/admin/pictures/0000000149.jpg>>.
29. [Http://yitang.chinaifactory.cn](http://yitang.chinaifactory.cn) [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. HMI. Dostupné z WWW: <<http://yitang.chinaifactory.cn/imglibs/images/180-1191920969039-big.jpg>>.

30. *Http://upload.ecvv.com/* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Studené světlo. Dostupné z WWW: <http://upload.ecvv.com/upload/Product/20094/China_Three_primary_colours_cold_light20094141548486.jpg>.
31. *Http://www.actionaudioandvisual.com* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Strobe light. Dostupné z WWW: <http://www.actionaudioandvisual.com/wp-content/uploads/wpsc/product_images/strobe_light.jpg>.
32. *Http://www.pssl.com* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Strobe LED. Dostupné z WWW: <<http://www.pssl.com/images/ProdImage01/500/MINI-STROBE-LED.jpg>>.
33. *Http://www.nastrojarna-hakrbrno.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. FV 25 CNC A. Dostupné z WWW: <http://www.nastrojarna-hakrbrno.cz/_img/strojni-park-fv25-b.jpg>.
34. *Http://www.rametchm.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. FV 25 CNC A. Dostupné z WWW: <<http://www.rametchm.cz/picture/stroje/FV25CNCA.pdf>>.
35. *Http://www.zps-fn.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-05-01]. Fréza válcová čelní - dlouhá, 1 zub přes střed, CODE: 121518.200. Dostupné z WWW: <<http://www.zps-fn.cz/freza-valcova-celni-dlouha-1-zub-pres-stred-code-121518-200-29415.html>>.
36. *Http://osprey-media.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-06]. Phantom HD Gold. Dostupné z WWW: <<http://osprey-media.com/blog/images/phantomHD/2.png>>.
37. *Http://www.tajmac-zps.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-05-18]. MCV 1210. Dostupné z WWW: <http://www.tajmac-zps.cz/img/1210_otoc-stul_5os.jpg>.
38. *Výroba nástrojů a forem : SINUMERIK 810D/840D*. vydání 01. [s.l.] : [s.n.], 2004. 114 s.
39. *Http://www.fastecimaging.com* [online]. 2010 [cit. 2011-05-20]. Fastec HiSpec 1. Dostupné z WWW: <http://www.fastecimaging.com/pdf/PDF/FastecImaging_HiSpec1_Datasheet_Mar2010_LowRes.pdf>.

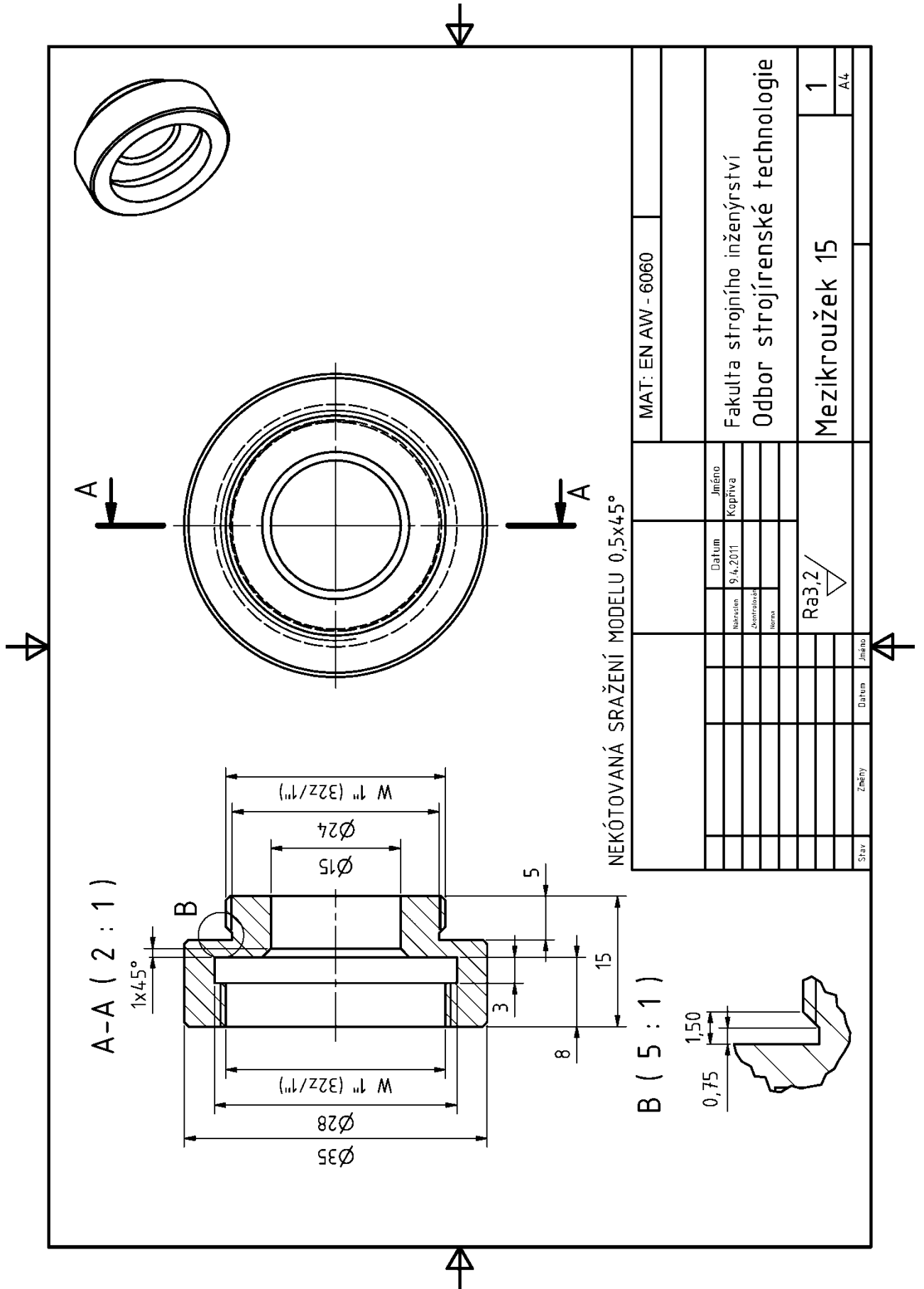
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_d	mm^2	Jmenovitý průřez třísky
a_p	mm	Šířka záběru ostří
α	$^\circ$	Zorný úhel objektivu
b_d	mm	Jmenovitá šířka třísky
c	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost zvuku v daném prostředí
d	mm	Velikost obrazového senzoru
D	mm	Průměr frézy
F_c	N	Řezná síla
h_d	mm	Jmenovitá tloušťka třísky
h_{dmax}	mm	Maximální tloušťka třísky
f	mm	Ohnisková vzdálenost
f_z	mm	Posuv na zub
Φ	$^\circ$	Úhel roviny stříhu
k_c	MPa	Měrná řezná síla
κ_r	$^\circ$	Úhel nastavení hlavního ostří
L	Mm	Vzdálenost objektu od objektivu
n	min^{-1}	Počet otáček hlavního vřetene
R	mm	Poloměr frézy
s_{ξ}	mm	Strana šroubovice
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost tělesa
v_e	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Efektivní rychlost stolu
v_c	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Řezná rychlost
v_f	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Posuvová rychlost stolu
Z	-	Počet zubů
Z_z	-	Počet zubů v záběru

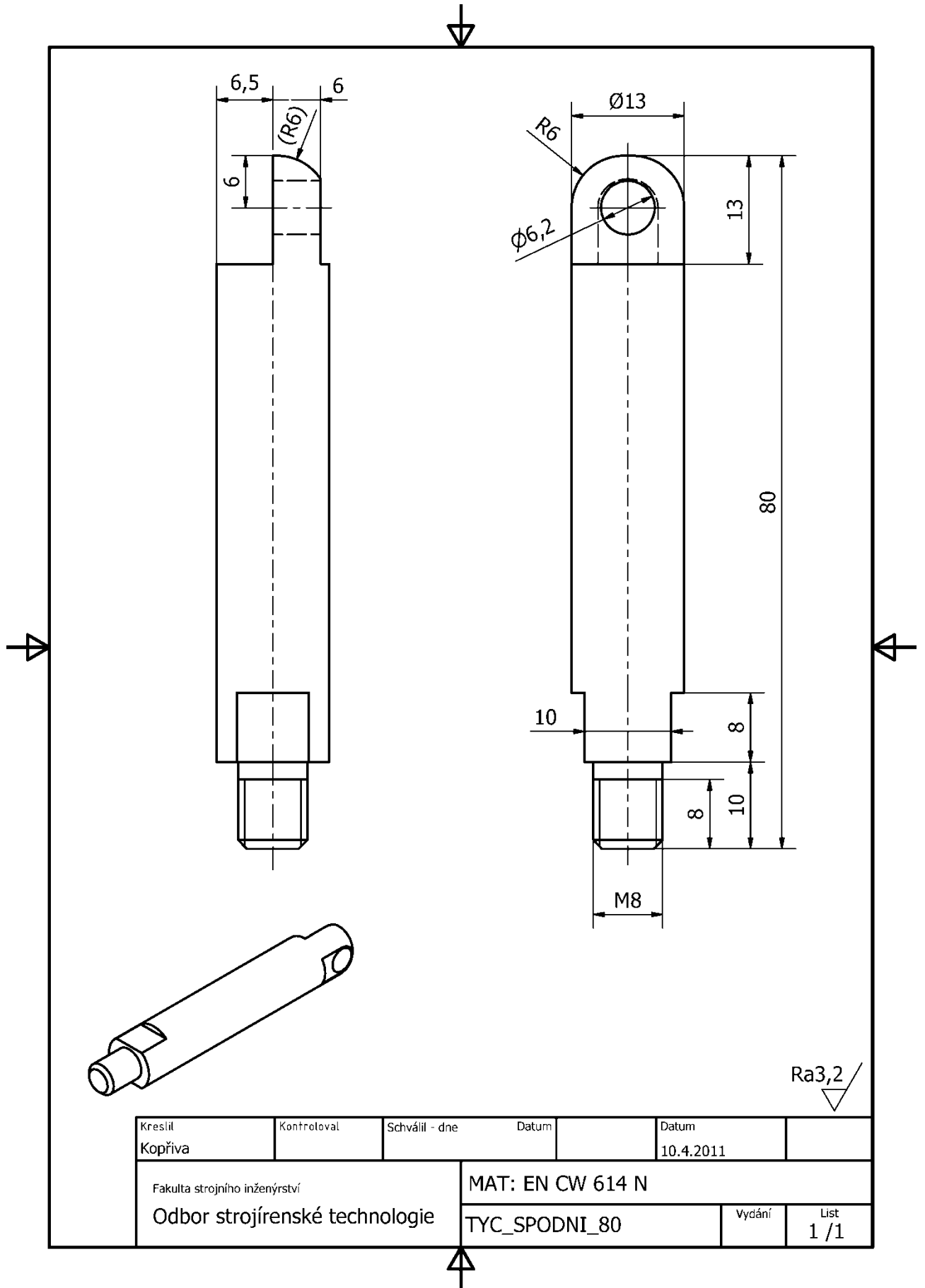
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výrobní výkres mezikroužku
- Příloha 2 Výrobní výkres spodní tyče stativu o délce 50 mm
- Příloha 3 Výrobní výkres spodní tyče stativu o délce 80 mm
- Příloha 4 Výrobní výkres horní tyče stativu o délce 80 mm
- Příloha 5 Výrobní výkres základové desky stativu
- Příloha 6 Výrobní výkres stativu
- Příloha 7 LED světlo vyrobené společností Nordic Lights
- Příloha 8 LED světlo vyrobené společností Nordic Lights
- Příloha 9 Parametry kamery TroubleShooter 1000
- Příloha 10 Hodnoty minimálních a maximálních zaostřovacích vzdáleností

Příloha 1

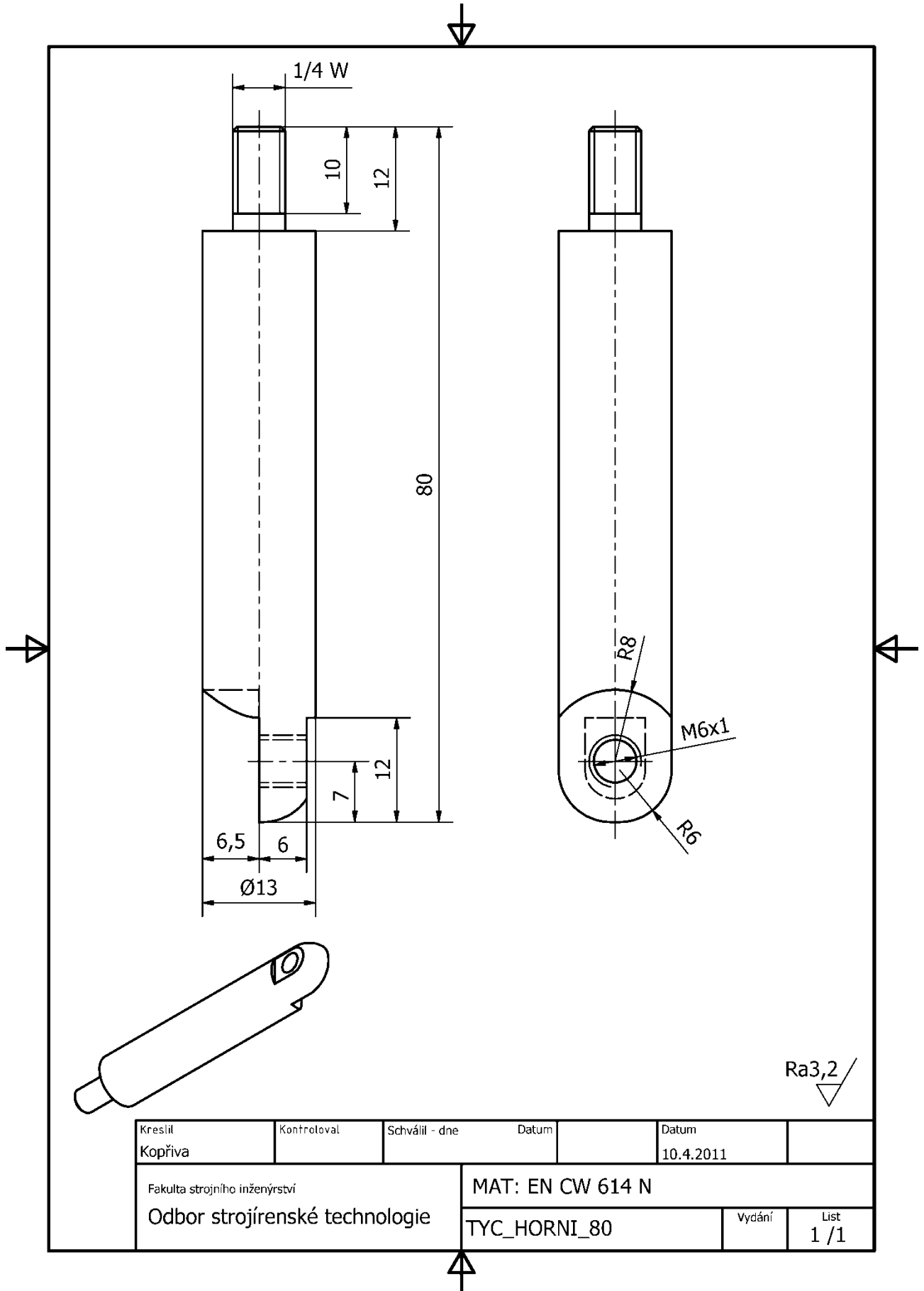


Příloha 3



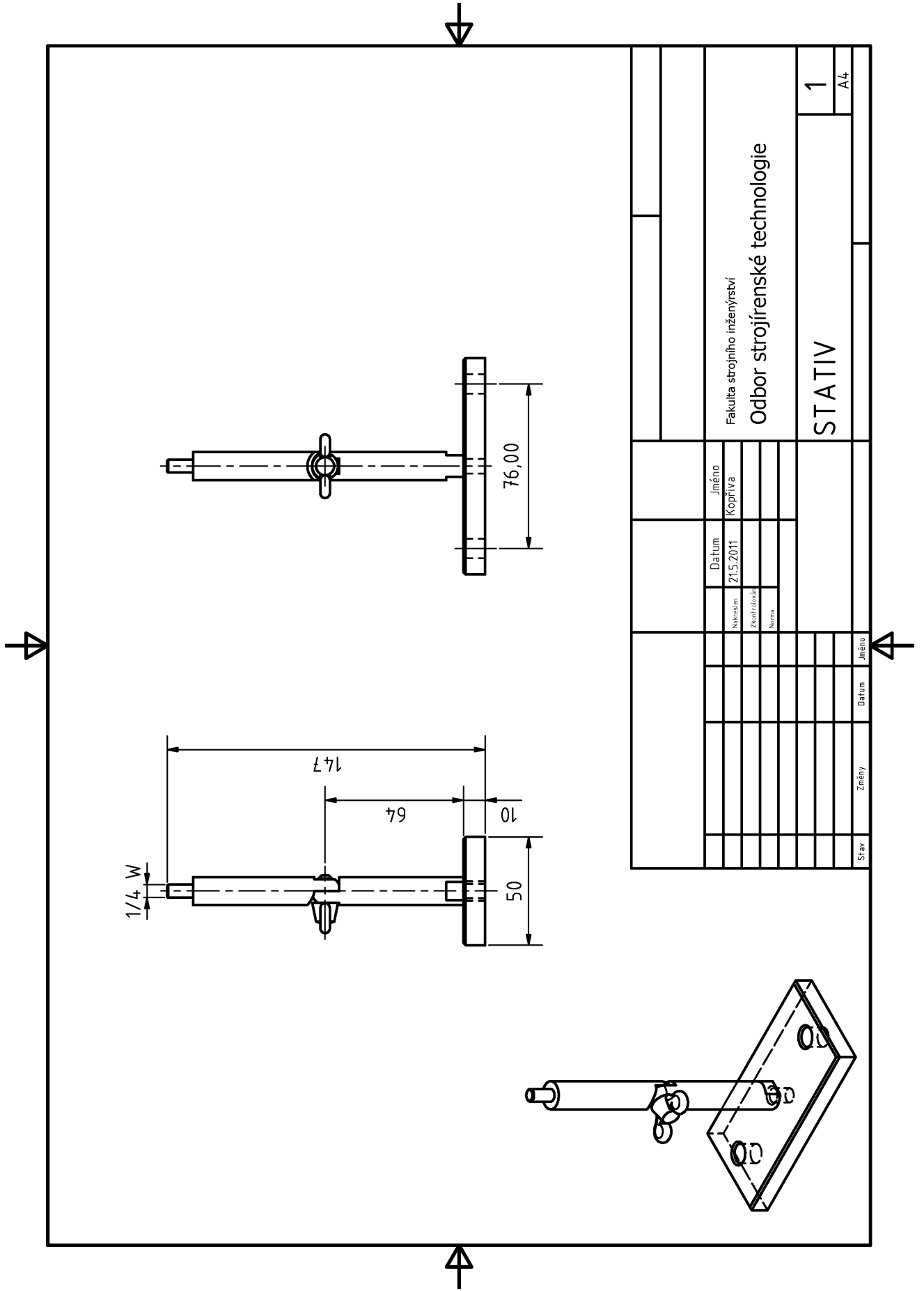
Kreslil Kopřiva	Kontroloval	Schválil - dne	Datum	Datum 10.4.2011	
Fakulta strojního inženýrství Odbor strojírenské technologie			MAT: EN CW 614 N		
			TYC_SPODNI_80	Vydání	List 1 / 1

Příloha 4



Kreslil Kopřiva	Kontroloval	Schválil - dne	Datum	Datum 10.4.2011	
Fakulta strojního inženýrství Odbor strojírenské technologie			MAT: EN CW 614 N		
			TYC_HORNI_80	Vydání	List 1 / 1

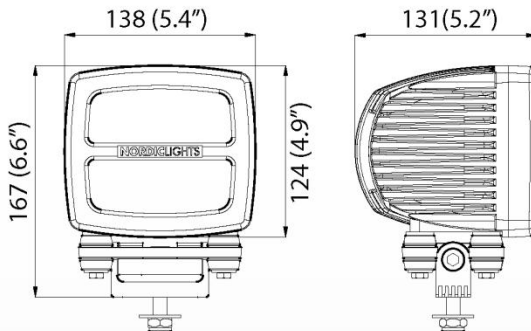
Příloha 6



N460LED

LED technology creates more value through:

- Long lifetime
- High operational safety
- Minimum power consumption, thus energy savings
- Wear- and maintenance-free
- Increased safety through quick switch-on behaviour



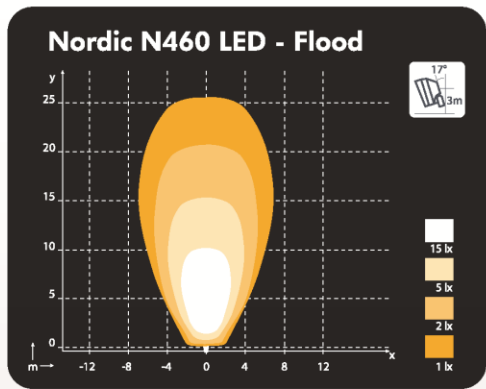
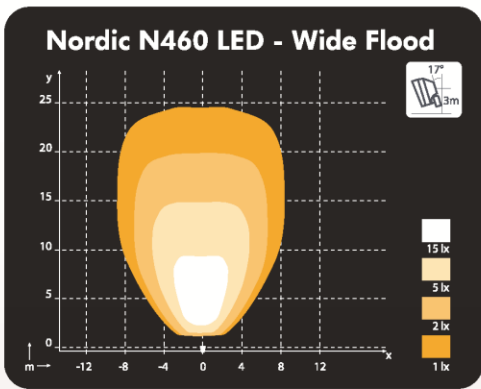
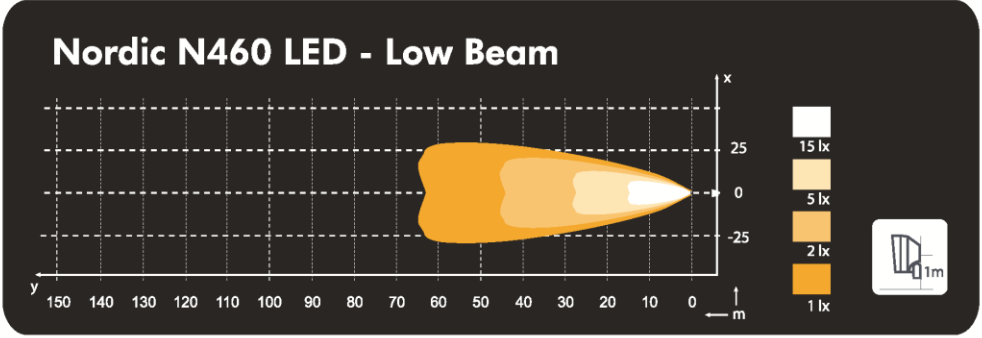
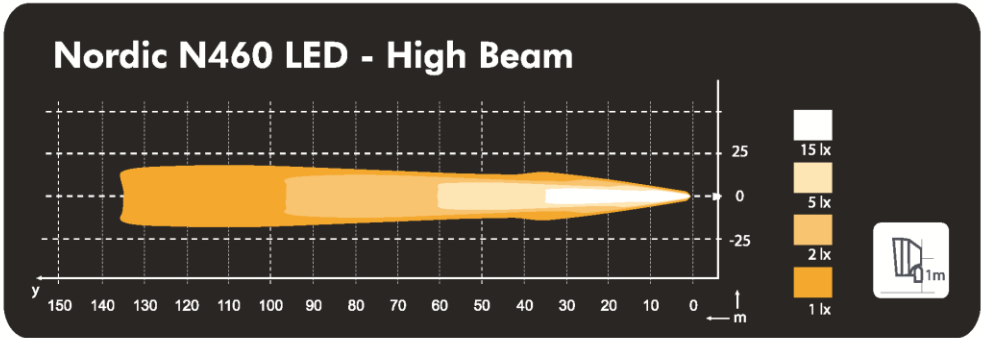
Light Patterns:

- Wide Flood
- Flood
- LoBeam
- HiBeam

N460LED Specifications 

Lumens Output:	2700lm
Nominal Voltage DC:	24V
Power Consumption:	60W
Nominal Current at 24V:	2.5A
Electronics:	Integrated
Connector:	Built-In Deutsch
Mount:	Single Bolt M10
Shock:	60G
Vibration:	20G rms 24-2000Hz
Lens:	PC
Body:	Aluminum
Weight:	2.9 kg
IP Rating:	IP68
Salt Mist:	ISO9227
EMC:	ISO13766, ISO14982 ISO7637-2
Operating Temperature:	-40°C...+85°C
(Overheat protection - activates at +50°C)	

Light Patterns



Příloha 9

MODELY :	TroubleShooter 250, TroubleShooter 500, TroubleShooter 1000.
DETEKTOR :	Rozlišení 640x480 CMOS maticový detektor, černobílý (8-bitové rozlišení) nebo barevný (24-bitové rozlišení)
RYCHLOST ZÁVĚRKY :	1x, 2x, 3x, 4x, 5x, 10x a 20x záznamové rychlosti.
REŽIMY ZÁZNAMU :	<p>Ruční Záznam začne po stisknutí spouště. Pokračuje v záznamu do opětovného stisknutí spouště.</p> <p>Trigger Záznam začne po stisknutí spouště. Pokračuje v záznamu snímků do doby, než je aktivován externí trigger . Pozice nastavitelného triggeru stanoví, kolik snímků má být uloženo před a po triggeru.</p>
RYCHLOST PŘEHRÁVÁNÍ :	Po jednotlivých snímcích nebo rychlostí 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 25, 30, 50, 60, 125, 250, 500 a 1000 snímků za sekundu, dopředu a nazpět.
VIDEO MONITOR :	Vestavěný 5" LCD barevný monitor.
OVLÁDACÍ FUNKCE :	Nastavení, Výběr, Záznam, Stop, Přehrávání, Dopředu, Zpět, Download, Zapnutí/Vypnutí
VSTUPY / VÝSTUPY :	USB-2 port, Compact Flash, IR, Trigger, Pulse In, Pulse Out, DC napájení.
EXTERNÍ TRIGGER :	Sepnutí kontaktu nebo standardní TTL signál, do 30 V DC.
SYNCHRONIZACE :	Více TroubleShooter kamer je možno synchronizovat pomocí funkce phase-lock.
SOFTWARE :	Zahmuje software CamLink pro záznam, přehrávání a stažení do PC. Snímky jsou přetaženy a uloženy ve formátu .avi. Rovněž obsahuje MotionMeasure software pro rozbor a rychlý a jednoduchý výpočet hodnot jako jsou zrychlení a rychlost.
OBJEKTIVY :	Standardní C-upevnění.
NAPÁJENÍ :	4 D monočlánky nebo 110/220 VAC adaptér.
ROZMĚRY A HMOTNOST :	152 x 127 x 100 mm, 1 kg.



SNÍMKŮ ZA SEKUNDU ZÁZNAMOVÁ RYCHLOST	STANDARDNÍ PAMĚŤ 2,184 SNÍMKŮ	ROZŠÍŘENÁ PAMĚŤ 4,368 SNÍMKŮ
50 (PAL)	43.7 sekund	87.4 sekund
60 (NTSC)	36.4 sekund	72.8 sekund
125	17.4 sekund	34.8 sekund
250	8.7 sekund	17.4 sekund
500	4.4 sekund	8.8 sekund
1000	2.2 sekund	4.4 sekund

FASTEC IMAGING™

Výhradní zástupce pro Českou a Slovenskou republiku:
TMV SS spol. s r.o., Studánková 395, 149 00 Praha 4
 Tel.: +420-272 942 720, Fax: +420-272 942 722
 E-mail: info@tmvss.cz <http://www.tmvss.cz>

