

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 TRÍSKY POMOCÍ DIGITÁLNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

ANALYSIS OF CHIP FORMING MECHANISM WITH A HIGH-SPEED DIGITAL CAMERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

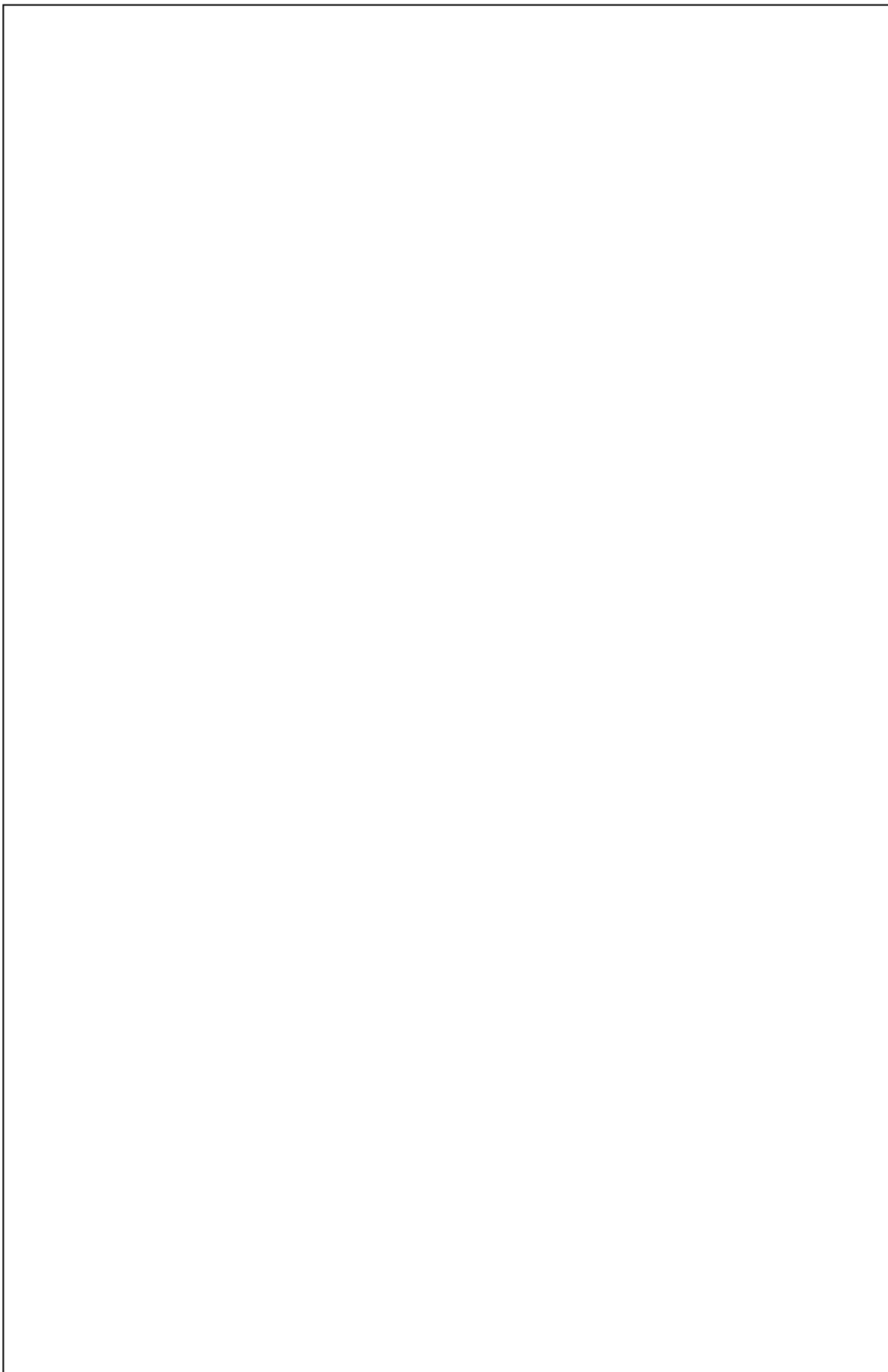
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÁCLAV FRŇKA

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POLZER, Ph.D.

BRNO 2010



Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá popisem možností vysokorychlostních digitálních kamer a jejich využitím v různých průmyslových odvětvích. Pojednává o mechanismu tvorby třísky při ortogonálním soustružení. Dále jsou provedeny experimenty, zaměřené na porovnání a volbu správného objektivu a způsobu osvětlení. Tyto poznatky jsou následně využity při získání záznamu tvorby třísky pomocí vysokorychlostní digitální kamery.

Klíčová slova

Vysokorychlostní digitální kamera, tvorba třísky, způsoby osvětlení, parametry objektivů.

ABSTRACT

This thesis is focused on possibilities of high-speed digital cameras and their use in different fields of industry. It describes the mechanism of chip forming in orthogonal turning. Subsequently experiments focused on comparison and select the right lens and method of illumination are implemented. These findings are then used in obtaining the record of chip forming by using high-speed digital camera.

Key words

High-speed digital camera, chip forming, methods of illumination, lens parameters.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRŇKA, V. Analýza tvorby třísky pomocí vysokorychlostní digitální kamery. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. s., příloh. Vedoucí práce. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

Datum

.....
Bc. Václav Frňka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za odborné vedení a množství cenných rad při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Ing. Tomáši Frňkovi za hodnotné připomínky a Mgr. Jaroslavě Šalomové, Ph.D. za korekturu této práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	9
1 VYSOKORYCHLOSTNÍ DIGITÁLNÍ KAMERY	10
1.1 Oblasti použití vysokorychlostních digitálních kamer	10
1.1.1 Automobilový průmysl	10
1.1.2 Vojenský průmysl	11
1.1.3 Strojírenství	12
1.1.4 Zdravotnictví.....	12
1.1.5 Sport	13
1.2 Historie a vývoj vysokorychlostních kamer	14
1.3 Princip vysokorychlostních kamer	15
1.4 Analogové vs. digitální vysokorychlostní kamery	16
1.5 Srovnání cen různých záznamových zařízení.....	17
1.6 Nastavitelné parametry vysokorychlostní digitální kamery	18
1.6.1 Rozlišení	18
1.6.2 Frekvence snímkování	19
1.6.3 Expozice	19
1.6.4 Nahrávací režimy	20
1.6.5 Čas nahrávání	20
1.6.6 Rychlost přehrávání záznamu.....	20
2 OSVĚTLENÍ PŘI SNÍMÁNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍMI KAMERAMI	22
2.1 Viditelné spektrum světla.....	22
2.2 Geometrie osvětlení	22
2.3 Zdroje osvětlení.....	23
2.3.1 Denní světlo / přirozené světlo.....	24
2.3.2 Běžné žárovky	24
2.3.3 Žárovky s wolframovým vláknem.....	24
2.3.4 Xenonové žárovky.....	25
2.3.5 HMI světla (Hydrargyrum Medium-Arc Iodide)	25
2.3.6 Studené světlo	25
2.3.7 LED osvětlení.....	26
2.3.8 LED Bleskové osvětlení	26
2.4 Eliminace rušivých vlivů	27
2.5 Ekonomické zhodnocení světelných zdrojů.....	27
3 MECHANISMUS TVORBY TŘÍSKY	30
3.1 Proces ortogonálního řezání	30
3.1.1 Základní typy třísek.....	31
3.1.2 Oblasti deformace při tvorbě třísky.....	32
3.1.3 Řezné síly	34
3.1.4 Teplo vzniklé během obrábění	36
3.1.5 Metoda konečných prvků	37
3.2 Analýza tvorby třísky u frézování	38
3.2.1 Průřez třísky při čelním frézování	38

3.2.2 Řezné síly při čelním frézování.....	39
3.3 Tvorby třísky při obrábění nekovových materiálů	40
3.3.1 Obrábění polymerů	40
3.3.2 Obrábění keramiky.....	41
3.3.3 Obrábění dřeva.....	42
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	44
4.1 Parametry použitých objektivů	44
4.1.1 Ohnisková vzdálenost	44
4.1.2 Zorný úhel.....	45
4.1.3 Světelnost.....	46
4.2 Výběr objektivu pro měření	46
4.3 Možnosti osvětlení obráběcích strojů	50
4.3.1 Základní specifikace strojů	50
4.3.2 Výběr vhodného způsobu osvětlení	52
4.4 Tvorba třísky při čelním frézování	55
4.4.1 Plán experimentu	55
4.4.2 Použitý nástroj	56
4.4.3 Obráběný materiál.....	56
4.4.4 Řezné podmínky.....	57
4.4.5 Popis a vyhodnocení experimentu	57
Závěr	60
Seznam použitých zdrojů.....	61
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	65
Seznam příloh.....	67

ÚVOD

Historie vysokorychlostních digitálních kamer započala v polovině 19. století zkoumáním vysokorychlostní fotografie, které prováděl William Henry Fox Talbot. Od té doby se vývoj významně posunul. Dnešní vysokorychlostní digitální kamery se používají pro záznam a následnou analýzu velmi rychlých nebo velmi krátkých časových úseků, které není možné pozorovat pouhým okem nebo obyčejnou kamerou. Vysokorychlostní kamera dokáže zaznamenat jev trvající zlomek vteřiny ve vysoké snímací frekvenci v řádech desetitisíců snímků za vteřinu. Jeho následným zpomaleným přehráním můžeme například odhalit, jak se chová a deformuje okolí při výbuchu nálože.

Vysokorychlostní kamery se používají stále častěji v různých průmyslových odvětvích jako nástroj kontroly procesů a dějů ve výrobě. Hlavním důvodem jejich využití je důraz na zkracování výrobních časů, zvýšení efektivity výroby a tlak na minimalizaci výrobních nákladů.

Aby bylo možno využívat veškeré možnosti, které tato kamera nabízí, je třeba správně nastavit několik důležitých parametrů a porozumět samotnému principu, na kterém vysokorychlostní i běžné kamery pracují. Důležitou součástí vysokorychlostního záznamu je volba správného osvětlení pro jednotlivé děje. Kromě rozboru jednotlivých typů osvětlení se diplomová práce zabývá také porovnáním jejich fyzikálních vlastností a ekonomickou náročností spojenou s náklady na jejich pořízení.

Předkládaný projekt se také věnuje problematice obrábění rozdílných typů materiálů a tvorbě třísky při ortogonálním soustružení a čelním frézování oceli. Teoretické a praktické poznatky jsou v závěru využity k názornému provedení reálného pokusu čelního frézování, které je zaznamenáno kamerou při snímkové frekvenci 1000 snímků za vteřinu.

1 VYSOKORYCHLOSTNÍ DIGITÁLNÍ KAMERY

Pro záznam a následnou projekci dějů, které lidské oko nemůže postřehnout, se v dnešní době velice často využívají vysokorychlostní digitální kamery. Tyto kamery pracují na stejném principu jako analogové, oproti nim však mají daleko kvalitnější obraz.

1.1 Oblasti použití vysokorychlostních digitálních kamer

Vysokorychlostní kamery jsou využívány ve veřejných i soukromých výzkumných institucích, a to především na univerzitách a vývojových odděleních průmyslových společností. Dále jsou využívány v průmyslové výrobě, kde snímají a vyhodnocují děje na výrobních linkách mimo jiné v chemickém, potravinářském, textilním a papírenském průmyslu, a předchází tak jejich zastavení či poškození.

Vzhledem k tomu, že se jedná o bezkontaktní metodu, lze kontrolovat i polotovary pohybující se velmi velkou rychlostí bez zastavení nebo omezení jejich výroby (papírny, válcovny). Dalšími výrobními procesy, které využívají vysokorychlostní video, jsou např. obrábění, tváření a dále také svařování. Při montážní výrobě se vysokorychlostní kamery využívají ke kontrole robotů, manipulátorů a dopravníků. Jedním z příkladů je i zátkování lahví, lepení etiket, a podobně. Vysokorychlostní video se ale může využívat i přímo ke kontrole výrobních strojů. Nejčastější aplikací je v tomto případě kontrola vibrací nebo rezonancí. Jedním z procesů, kterým výrobek prochází na závěr, je balení. I v tomto případě se využívá vysokorychlostních kamer ke kontrole balicích strojů, které již v současné době pracují rychlostmi pro lidské oko nepostřehnutelnými. Pokud je výsledným produktem výrobek, jehož funkce probíhá vysokými rychlostmi (textilní stroje, zbraně apod.), slouží vysokorychlostní video i k finální kontrole funkce výrobku [1].

V dnešní době je jen málo průmyslových odvětví, kde by vysokorychlostní digitální kamery nenašly uplatnění. Například v reklamním odvětví je lze využít při tisku na velkých inkoustových plotrech, kde při soutisku několika barev mohou snímat průchod inkoustu jednotlivými tryskami. Další příklad využití při výrobě reklamy je sledování nože, řezacího vinylové fólie na řezacím plotru. Níže jsou uvedeny ty nejzajímavější příklady použití vysokorychlostních digitálních kamer.

1.1.1 Automobilový průmysl

Nejznámější využití vysokorychlostní kamery pro širokou veřejnost je pravděpodobně u nárazových testů automobilů, které jsou prováděny v každém automobilovém závodě za účelem odhalení nejméně odolných míst karoserie, respektive celého vozu, a jejich následného zdokonalení (obr. 1.1). Tyto testy jsou prováděny i společností Euro NCAP, která nezávisle posuzuje bezpečnost automobilů prodávaných v Evropě. Na obrázku dole je při nárazovém testu zachycen Peugeot 307, který obdržel 4 z 5 možných hvězd za ochranu posádky uvnitř vozu. Na dalším obrázku (obr. 1.2) je prosté grafické vyhodnocení jednotlivých zón řidiče a spolujezdce při čelním i bočním nárazu.



Obr. 1.1 Snímek z nárazového testu od Euro NCAP [35]



Obr. 1.2 Grafické znázornění míry bezpečí dospělé posádky vozu [35]

Při snímání crash testů se používá například Photron Ultima 512 imaging system, což je lehká kamera, která poskytne čisté a ostré barevné snímky v rozlišení 512x512 při frekvenci 2000 fps. Je schopna expozice až 5 mikrosekund a dokáže provést 2D nebo 3D analýzy pohybu z testů. [2]

Dále se vysokorychlostní kamery využívají při zaznamenání proudění vzduchu v aerodynamickém tunelu, při testech brzdového systému, rozmístění air bagů, zkoumání bezpečnostních pásů, pozorování samotného motoru (vstřikování paliva) a mnoha dalších dějů v automobilovém průmyslu.

1.1.2 Vojenský průmysl

Vysokorychlostní kamera se používá v balistických i zbraňových aplikacích, kde dává člověku reálnou fyzikální představu o funkci zbraňových systémů, které mají charakter technicky náročných strojů, pracujících v extrémních podmínkách. Vysokorychlostní kamery umožňují získat velmi specifickými principy záznamu, cenné a jinými metodami nedostupné poznatky pro hodnocení funkčních vlastností zbraní a střeliva. [3]



Obr. 1.3 Zachycený těsný okamžik po výstřelu z pistole [36]

Stejně jako u automobilového průmyslu se i ve vojenském využívají vysokorychlostní kamery při rozbořech proudění vzduchu v aerodynamickém tunelu. Zde se však zkoumají spíše letadla či raketové střely.

Díky možnosti zaznamenání až 200 milionů snímků za sekundu může nejrychlejší vysokorychlostní kamera „zmrazit“ i ty nejrychlejší děje. Je využívána při rozboru rychlého porušení struktury například u neprůstřelné (balistické) vesty (obr. 1.4). Lze vyhodnotit, jak se materiály, z nichž je vyrobena, rozlomí, kolik síly je třeba k takovému lomu a jak by materiály mohly být vylepšeny, aby odolávaly vyšším silám. [4]



Obr. 1.4 Test neprůstřelné vesty [37]

1.1.3 Strojírenství

Ve strojírenství lze najít využití vysokorychlostní digitální kamery při dějích, jako jsou: obrábění, provádění povrchových úprav, tváření, zkoumání chování namáhaných materiálů především v momentě lomu, vibrace strojů, chování motorů, analýza poruch, dynamika kapalin a plynů, analýza pohybu robotů. Možností využití vysokorychlostní digitální kamery při obrábění je velice mnoho a jednou z nich je sledování tvorby třísky při obrábění. Právě toto téma je níže podrobněji probráno.

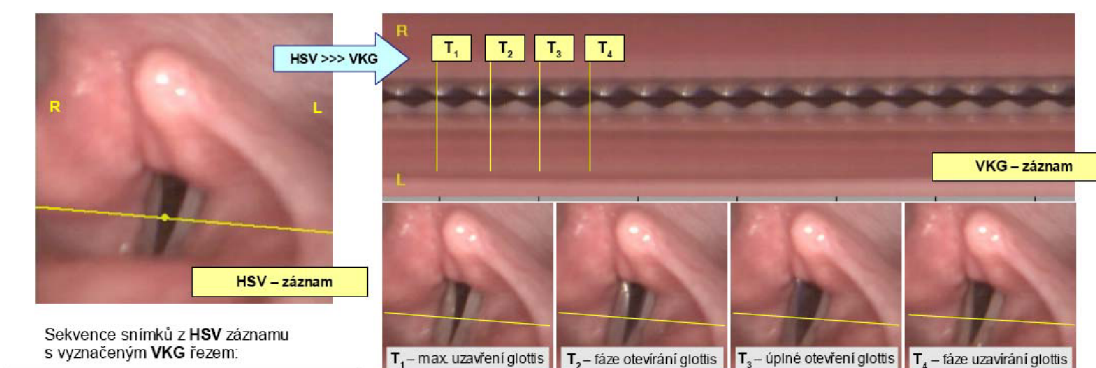
1.1.4 Zdravotnictví

Zajímavé je využití vysokorychlostní kamery u studia rázových vln, kde jsou mimotělní rázové vodní vlny zaměřeny na ledvinové kameny v pacientově těle za účelem jejich rozdrčení a odstranění. Taková mimotělní léčba je běžně používána z důvodu eliminace bolesti a nyní se testuje její využití při léčbě rakoviny. [5]

Ve zdravotnictví se však vysokorychlostní kamery používají především pro zkoumání příčin vadných pohybů jedince. Dále pak u nevšedních projektů, jako je např. zkoumání pohybů bakterií nebo analýza pohybu umělé chlopně v srdci prasete.

Vysokorychlostní kamery (HSV) se také využívají k záznamu videosekvence kmitání hlasivek s vysokou vzorkovací frekvencí, obvykle 4000 snímků za vteřinu. Z takto získané sekvence jednotlivých snímků lze vytvořit snímek nový, který vznikne zobrazením definovaných obrazových bodů (tj. obrazový řez) v časové posloupnosti v délce trvání videozáznamu (obr. 1.5). Takovému snímku se říká videokymogram (VKG). Protože lze touto technikou zobrazovat časový vývoj obsahu libovolného obrazového bodu, jedná se o vizualizaci a studium chování hlasivek v obrazovém řezu a čase. [6]

Na videokymogramu, který tak vznikne, se popisují jednotlivé kmity hlasivek – jejich přítomnost, frekvence, pravo-levá symetrie, tvar laterálních a mediálních okrajů, poměr otevření a zavření hlasivek [6].



Obr. 1.5 Videokymogram hlasivek,
odvozený od záznamu vysokorychlostní kamery [6]

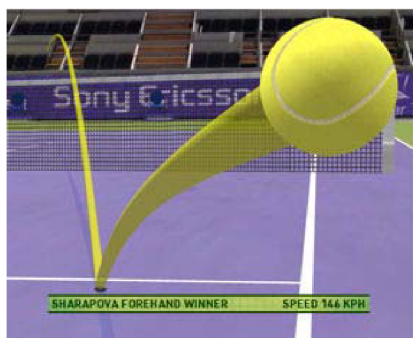
1.1.5 Sport

Ve sportu se vysokorychlostní kamery používají při velkých tenisových turnajích. V systému zvaném Jestřábí oko (Hawk-Eye) jsou okolo kurtu v různých místech a pozorovacích úhlech rozmístěny minimálně 4 vysokorychlostní kamery, které snímají dění na kurtu a s pomocí příslušného softwaru jsou následně zhotoveny animace dokazující, zda míček skončil uvnitř či vně kurtu. Jestřábí oko slouží také k zobrazení herních statistik, jako jsou úspěšnost při prvním druhém podání, rychlost servisu nebo naběhané kilometry jednotlivých hráčů během utkání.

Z každého snímku zaslaného jednotlivými kamerami do systému je rozpoznána skupina pixelů, které korespondují s odrazem míče. Poté je spočítána 3D pozice míče pro každý ze snímků kamer díky porovnání jeho pozice využitím alespoň dvou rozdílně umístěných kamer ve stejném čase. Sled snímků vytvoří animaci trajektorie letu míče. Díky databázím v systému software také dokáže vypočítat budoucí trasu a dopad míče. [7]

Tvůrce Jestřábího oka, The Hawk-Eye Innovations, uvádí, že jejich systém má průměrnou chybu 3,6 mm. Jestliže je obvyklá velikost tenisového míče 65 až 68 mm, znamená to, že tato chyba je vzhledem k velikosti míče pouhých 5 %. Pro srovnání 5 % velikosti míče je chmýří, které jej obklopuje. [8]

V dnešní době se Jestřábí oko (br. 1.6), systém který byl původně vyvinut pro posuzování sporných momentů v kriketových utkáních, používá také při kulečnicku, kde může například ukázat, jak by měl hráč zahrát, aby se mu co nejlépe povedl úder. Jestřábí oko také zobrazí různé varianty, jak by se mohla hra vyvíjet, a to i z divácký atraktivních pohledů, jako je kamera „umístěná“ přímo v hrané kouli. Další využití tohoto systému je ve fotbalových utkáních, kde se může s jistotou říci, zda-li míč překročil brankovou čáru, nebo ne.



Obr. 1.6 Animace vytvořena pomocí Jestřábího oka [8]

1.2 Historie a vývoj vysokorychlostních kamer

Historie vysokorychlostní kamery se váže na vznik vysokorychlostní fotografie, která byla poprvé zaznamenána Williamem Henry Fox Talbotem (obr. 1.7) v roce 1852. Pomalá závěrka a malá clona byly dostačující ke snímání statických předmětů, ale nebyly způsobily k fotografování pohybujících se předmětů. Právě Fox Talbot měl zájem o vyhotovení fotografií objektů v pohybu a hledal vhodné alternativní metody. Alternativou k pomalé závěrce a malé cloně bylo užití krátketrvajícího, vysoceintenzivního světla, kterým mohl být objekt dostatečně osvětlen. [9]

K vytvoření vysokorychlostní fotografie použil Fox Talbot fotoaparát s otevřenou závěrkou, přičemž mohl v zatemněné místnosti vidět snímání předmět. Osvětlení vyřešil pomocí tzv. Leydenské láhve, předchůdce kondenzátoru, která mohla díky nabíjení elektrostatickou indukcí nasbírat velké množství elektrického náboje, jež bylo najednou uvolněno ve formě krátkého intenzivního záblesku. [9]

Při demonstraci pro The Royal Society (Britskou národní akademii vědy) nalepil stránku novin The Times na kolo, které roztočil velkou rychlostí. Za použití záblesku z Leydenské láhve krátce osvětlil rychle se otáčející stránku a vyfotografoval malou část novin. Po vyvolání negativu byla stránka zcela čitelná, pohybující se předmět byl dokonale zmrazen a vysokorychlostní fotografie byla na světě. [9]



Obr. 1.7 William Henry Fox Talbot [38]

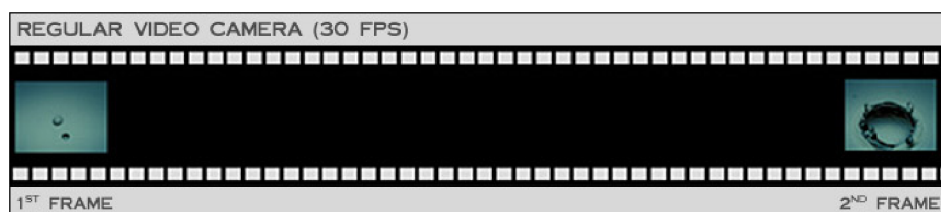
Vývoj vysokorychlostních kamer, takových jaké známe dnes, započal v 60. letech 20. století, ale první model byl vyroben počátkem 70. let minulého století. Firma Video Logic Corp. přišla s vysokorychlostním videosystémem (za použití pásky jako záznamového media), který se nazýval Instar a mohl zapisovat až 240 fps. Zároveň přišla se svojí vysokorychlostní kamerou i firma Unilux, která zapisovala na disky značky Sony rychlostí 120 fps, tento typ zápisu však neměl dlouhého trvání. [2]

Zvýšení výkonu přišlo až v letech 1980–1982, kdy firma Kodak MASD představila SP2000. Tento na pásce založený monochromatický systém byl schopen zaznamenat 2 000 snímků v plném rozlišení (240x192) a až 12 000 menších snímků za sekundu. Tento vysokorychlostní kamerový systém stál přibližně \$140 000. [2]

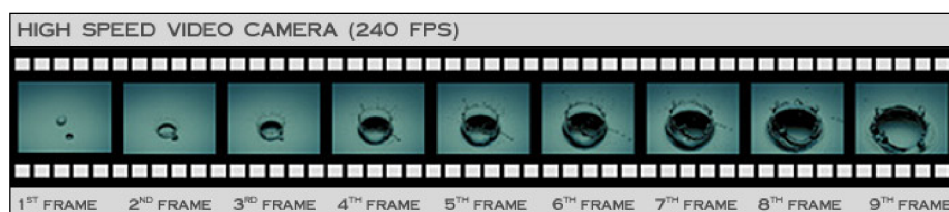
První digitální vysokorychlostní kamera byla vynalezena v roce 1990 a byla to Ektapro EM1012 od firmy Kodak a dokázala snímat 1 000 fps v rozlišení (240x192) a 6 000 fps v rozlišení (240x16). [2]

1.3 Princip vysokorychlostních kamer

Běžná video kamera zachytí 25–30 snímků za sekundu (fps). Vysokorychlostní kamery zachycují více než to, od 60 snímků až přes 1 000 000 snímků za sekundu (obr. 1.9). Následně záznam přehrají v obvyklé zobrazovací frekvenci (25–30 fps)[10]. Vše může být samozřejmě přehráno v ještě nižších libovolných frekvencích, případně lze prohlížet pouze jednotlivé snímky. Vysokorychlostní kamera je v podstatě optický senzor s vysokou snímkovací frekvencí spojený s nahrávacím zařízením.



Obr. 1.8 Záznam pořízený běžnou kamerou [10]



Obr. 1.9 Záznam pořízený vysokorychlostní kamerou [10]

Běžné a vysokorychlostní kamery mají princip snímání obrazu stejný. Světlo odražené od snímaného objektu prochází objektivem a přes soustavu zrcadel dopadá na světlocitlivý snímací čip (v minulosti na snímací elektronku). Tam je přeměněno na elektrický proud, který elektronika kamery zpracuje buď na analogový televizní obraz, nebo dnes častěji na digitální obraz. Používají se přitom především CCD a CMOS snímače obrazu. V amatérských CCD videokamerách se používá jeden snímač, na jehož

pixelech jsou nanесeny filtry, které propouští jen jednotlivé RGB kanály. U poloprofesionálních kamer se používají snímače tři. Obraz je cestou rozložen soustavou polopropustných zrcadel nebo hranolem na jednotlivé složky, ze kterých každá barva RGB dopadne na jiný snímač. [10]

U běžných kamer senzor vždy snímá jen jediný bod z obrazu, takže postupuje pixel po pixelu až do té doby, dokud nenasnímá všechny pixely na snímku. Vysokorychlostní kamery obsahují více speciálních senzorů přeměňujících fotony na elektrony, které jsou uspořádány v paralelní struktuře [2]. Obvykle tato čidla pracují při frekvenci několik desítek megahertz. To znamená, že maximální rychlost čtení pixelů za sekundu a maximální frekvence snímání jsou omezené. Když chce někdo zvýšit tuto jmenovitou frekvenci, bude muset snížit počet pixelů ve snímku, protože je pevně stanoveno maximum výstupních dat. Jestliže bude takto postupovat, může tak místo několika tisíc snímků za sekundu, získat více než 100 000 fps. Samozřejmě jsou pak tyto snímky provedeny ve velmi malém rozlišení, což uživateli snímajícímu například chůzi může jen uškodit, protože výsledné snímky jsou v tak nízkém rozlišení, že téměř nelze přečíst, co na nich je. Další nevýhodou takového zvyšování frekvence snímání jsou extrémní nároky na osvětlení snímaného děje kvůli několikanásobně kratšímu času expozice.

1.4 Analogové vs. digitální vysokorychlostní kamery

Snímač obrazu (CCD, popř. CMOS) dodává v obou systémech analogový obrazový signál. V klasickém analogovém systému se obrazový signál v elektronických obvodech kamery pouze upravuje a pak je kabelem přiváděn v analogovém tvaru na vstup externího převodníku obrazu (framegrabber). Teprve zde se převodníkem A/D mění z analogového tvaru na digitální a potom se po sběrnici PCI přivádí do hlavní paměti PC.

Všechny signály se přenášejí jedním drátem, takže vertikální a horizontální synchronizační signály a vlastní obrazový signál se překrývají [11].

V moderních digitálních kamerách se analogový obrazový signál snímače (CCD) digitalizuje převodníkem A/D přímo v kameře, což samo zaručuje lepší kvalitu obrazu než u analogového systému. Digitalizovaný signál se vede přes sériové rozhraní do hlavní paměti PC. Na rozdíl od analogového přenosu jsou všechny synchronizační a obrazové signály zcela odděleny. [11]

Současné digitální rychlokamery mají proti analogovým výhodu nejen ve vyšší variabilitě volitelné frekvenci záznamu, ale i v celkové době snímání děje, která je omezena pouze kapacitou paměťového média a také možností snímání děje i v čase před spuštěním kamery.

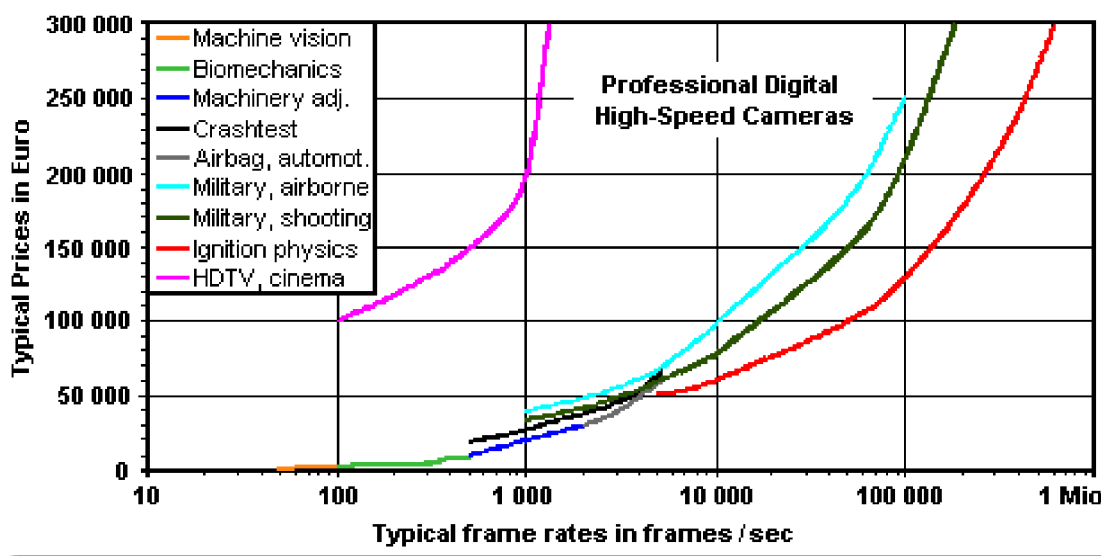
Digitální záznam lze navíc ihned po jeho provedení prohlédnout na externím monitoru, posoudit, zda je zdařilý a v případě neúspěchu jej opakovat (je-li to ovšem možné). Určitým problémem je závislost rozlišení obrazového záznamu na frekvenci snímání, která vyplývá z omezené rychlosti datových toků ze záznamových čipů na paměťové médium. To v

praxi znamená, že při nejvyšších rychlostech snímání je rozlišení záznamu tak nízké, že je obraz pro například balistické aplikace nepoužitelný. [3]

1.5 Srovnání cen různých záznamových zařízení

Zatímco počítačový systém běžně zobrazuje 50 až 60 polovičních snímků za sekundu, 1000 snímků za sekundu je 20–40krát rychlejší. Z tohoto pohledu se cena vysokorychlostních kamer zdá být přiměřená.

Enormní ceny (graf 1.1), jsou způsobeny na jedné straně zařízeními snímajícími ve vysokém rozlišení, na straně druhé vědeckými měřicími systémy, používající speciální technologie, které jsou částečně navrženy a postaveny samotnými vědci a inženýry. [12]



Graf 1.1 Přibližné ceny vysokorychlostních digitálních kamer v letech 2008/2009 [12]

Počáteční cena pro nové vybavení s rozlišením VGA v černobílé a se snímkovací frekvencí 500 fps stojí méně než € 10 000. Při ještě nižší snímkovací frekvenci okolo 200 fps se cena pohybuje okolo € 2 500. Pro srovnání se v cenové relaci do € 1 000 prodávají některé standardní kamery, schopné nějakých stovek polovičních i úplných snímků za sekundu. Na druhou stranu je třeba u těchto kamer akceptovat skutečně poněkud nízkou kvalitu obrazu a téměř nemožnost následně upgradovat. Nemluvě o malé možnosti propojení pro kontrolní signál. „Horní třída“ kamer, snímajících rozlišení v megapixelech při 1 000 fps, vychází na několik deseti tisíců eur, vysokorychlostní fotoaparáty snímající 100 000 fps stojí dokonce sta tisíce eur. K tomu je třeba připočítat ještě náklady na vybavení, především na drahé osvětlení, ovládací a zobrazovací software. [12]

Komponenty, především pak senzory, jsou vyvíjeny s obrovskými technickými nároky. Jsou produkovány v malých sériích s nízkým výnosem, navíc procházejí mnoha kontrolami a testy, proto jsou tak nákladné. Samotný senzor často stojí mnohem více než ty nejvýkonnější kompaktní fotoaparáty. Vývoj a výroba celého systému jsou samozřejmě daleko nákladnější než

u běžných fotoaparátů a kamer. Vysokorychlostní digitální kamery pořizují snímky ve speciálním formátu a nejsou kompatibilní s videorekordéry či televizory. Právě speciální elektronika uvnitř této kamery nebo uvnitř kontrolní jednotky vytváří standardní videosignál.

1.6 Nastavitelné parametry vysokorychlostní digitální kamery

Pořídít záznam vysokorychlostní digitální kamerou (obr. 1.9) není velký problém, aby však onen záznam byl dobře viditelný a srozumitelný, je třeba správně nastavit několik nedílných součástí kamery včetně jejího samotného seřízení. Mezi ty nejdůležitější parametry u vysokorychlostních kamer patří zejména rozlišení, nastavení počtu snímků za sekundu, expoziční čas a citlivost. Dalšími ovlivňujícími činiteli jsou osvětlení snímaného předmětu včetně odstínění ve většině případů nevyhovujícího pozadí. V neposlední řadě je nutné mít odpovídající software pro analýzu nasnímaných dějů a spolehlivé zobrazovací a záznamové zařízení.



Obr. 1.10 Vysokorychlostní digitální kamera Troubleshooter 1000 [13]

1.6.1 Rozlišení

Rozlišení snímače pohybu je obecně formulováno jako počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru. Pixel je definován jako nejmenší jednotka snímku, která může být samostatně zaměřena a čtena. V současnosti vysokorychlostní kamery snímají v rozlišení od 64x16 do 2048x2048 pixelů. Rozlišení je obvykle limitováno obrazovým snímačem. [13]

Základním pravidlem pro snímání vysokorychlostních dějů je zachycení nejmenších objektů minimálně dvěma pixely v horizontálním zorném poli kamery. [13]

Rozlišení snímače může být také vyjádřeno jako dvojice čar na milimetr (line pairs per millimeter – lp/mm). Označení „dvojice čar na milimetr“ vyjadřuje počet, kolik přechodů z černé na bílou čáru může být provedeno v jednom milimetru. Pro výpočet teoretického limitního rozlišení senzoru v lp/mm je třeba použít opak dvojnásobné velikosti pixelu. Níže (1.1) je příklad výpočtu teoretického limitního rozlišení snímače s 16 mikronovým pixelem. [13]

$$(1 \div (2 \times \text{rozměru pixelu})) \times 1000 = 1 \div (2 \times 16) \times 1000 = 31.25 \text{ lp/mm} \quad (1.1)$$

1.6.2 Frekvence snímkování

Je měřena ve snímcích za sekundu (frames per second – fps), rychlost snímkování je jedním z nejdůležitějších prvků při analýze pohybu. Určuje se v závislosti na rychlosti zaznamenávaného děje, velikosti snímané oblasti a počtu snímků, které je třeba vyhotovit, aby byla detailně zaznamenána celá událost. Například při nastavení frekvence 1000 fps je obraz zaznamenán každou jednu milisekundu. Jestliže děj trvá 15 milisekund, kamera z celé události zachytí 15 snímků. Kdyby nastavená frekvence byla příliš malá, kamera by nezaznamenala dostatek snímků k provedení srozumitelné a přesné analýzy. Naopak jestliže je nastavena daleko vyšší frekvence, než je nutné, dojde k zbytečnému zahlcení a zpomalení softwaru a obsazení zbytečně velké části paměti. V jiných případech zatěžuje vysoká frekvence snímání kameru na úkor vysokého rozlišení. Toto se stává, jestliže je snímkování nastaveno vyšší, než je schopnost kamery nahrávat při plném rozlišení. U většiny dnešních kamer je možno navolit optimální frekvenci snímkování při nižším rozlišení. Při takto rychlém snímání je obětována výška a šířka obrazu, na druhou stranu však snímací frekvence může být až šedesátkrát vyšší než při plném rozlišení. V současnosti nejrychlejší kamery dokáží vyhotovit 7000 fps v plném rozlišení (1024x1024) nebo více než 1,3 milionu fps v horší kvalitě. [2]

Jestliže má uživatel vysokorychlostní digitální kamery určité požadavky na frekvenci snímkování, je třeba se důkladně podívat na parametry zařízení a zjistit jaké je skutečné rozlišení při dané frekvenci snímkování. Některé nedokonalé vysokorychlostní kamery využívají techniku zvanou „line doubling“ k zvýšení jejich schopnosti záznamu v plném rozlišení při vyšší záznamové frekvenci. Jenomže skutečné rozlišení při uvedené frekvenci je ve skutečnosti nižší a pixely na displeji jsou interpolovány, aby vyplnily obrazovku. Toto není problém v tom případě, že není zamýšleno takovéto snímky využívat k analýze. Jestliže je nutné je použít k měření, je nezbytné znát skutečné rozlišení, jedině tak je možno měření opravit pomocí přepočítání. Kamery pracující s technikou „line doubling“ většinou obsahují snímací senzor, navržený pro běžné videokamery. Díky tomuto čidlu je cena zařízení daleko nižší než u vysokorychlostních kamer. Aby takovýto senzor mohl snímat ve vyšší frekvenci, než pro jakou je určen, je nutné redukovat množství snímaných dat (snížit rozlišení). Proto je nezbytné se ujistit, zda schopnosti kamery odpovídají požadovaným nárokům na zaznamenání sledovaného děje. [2]

1.6.3 Expozice

Každý digitální fotoaparát či kamera měří expozici tak, aby mohl nastavit středně šedou scénu, odrážející 18% dopadajícího světla. Při snímání scény s převažující bílou nebo černou barvou však dochází ke zkreslení snímku. Pro správnou expozici je důležité sladit expoziční čas, clonu a citlivost. Expoziční čas je doba po kterou je vystaven snímací senzor (nebo film) dopadajícímu světlu. Clona je téměř kruhový otvor v objektivu, který reguluje přístup světla do optické soustavy. Množství světla dopadajícího na snímač však udává clonové číslo (F), které postihuje závislost ohniskové vzdálenosti na průměru

clony. Citlivost snímače (ISO) je u většiny vysokorychlostních snímacích senzorů ekvivalentní hodnotě expozičního čísla mezi 125 ISO a 480 ISO při barevném a až do 3200 ISO při monochromatickém záznamu [2]. Citlivost je velice důležitý faktor k dosažení čistých snímků. Jestliže citlivost kamery není dostatečně vysoká pro snímání objektu dané scény, je třeba více otevřít clonu.

Při nedostatečném osvětlení může obraz být:

- podexponovaný, detail se ztrácí ve tmě;
- nevyvážený, nízká reprodukce barev;
- rozmazaný, má malý kontrast (dynamický rozsah scény je menší než dynamický rozsah obrazu).

U velmi krátkých časů expozice je obtížné si představit, že jakákoliv mechanická závěrka dokáže takto krátký čas realizovat. Mechanická závěrka se tak kombinuje se závěrkou elektronickou. Elektronická závěrka pracuje na jednoduchém principu, kdy elektronika sbírá náboj ze senzoru pouze po určitou dobu, která je kratší než otevření mechanické závěrky. Po zbylou dobu, kdy je však stále mechanická závěrka otevřená, se náboj ze senzoru již nepoužije. [14]

1.6.4 Nahrávací režimy

Vysokorychlostní kamery běžně používají dva základní typy záznamového média, paměť DRAM nebo videokazetu. Některé vysokorychlostní kamery ukládají nasnímaná data přímo na pevný disk počítače, většina však používá paměti DRAM, jejichž nejpoužívanější nahrávací mód se nazývá kontinuální záznam. U tohoto typu záznamu kamera nahrává bez přestávky, nahrazuje dříve zaznamenané snímky novými až do té doby, kdy nastane událost a zastaví se snímání. Další flexibilnější možnost je nastavení, kolik snímků bude zachyceno před a po zaznamenaném ději. [2]

1.6.5 Čas nahrávání

Čas nahrávání vysokorychlostního kamerového systému se odvíjí od doby trvání takového děje, jenž přinese významné informace k analýze pohybu [2]. Tento čas však také záleží na zvolené frekvenci snímkování a na množství dostupné paměti záznamového média. Dnes se používají především DRAM karty, jejichž kapacita se sice stále zvyšuje, avšak stále není dostačující [2]. Nicméně většina vysokorychlostních dějů trvá tak krátkou dobu, že 2000 snímků při rychlosti záznamu 1000 fps je k jejich nahrání obvykle více než dost. Například délka trvání nárazu automobilu při crash testech činí 0,3 s a doba potřebná k nafouknutí airbagu v automobilu je pouhých 0,035 s.

1.6.6 Rychlost přehrávání záznamu

Důvodem využívání vysokorychlostní kamery je získání sekvence snímků vysokorychlostního děje, které je možné prohlížet ve zpomaleném záznamu. Čas zvětšení popisuje stupeň zpomalení zaznamenaného děje při jeho následném přehrávání. Pro zjištění velikosti zvětšení času se vydělí rychlost nahrávání rychlostí přehrávání. Například u záznamu, který byl

nasnímán při 1000 fps a následně přehrán rychlostí 30 fps je časové zvětšení 33:1. Jedna vteřina reálného času při přehrávání potrvá 30 sekund. Při přehrávání stejného záznamu rychlostí 1 fps, bude vteřina trvat více než 16 minut. Většina systémů umožňuje přehrávání dopředu i zpět při různých rychlostech. Je velice důležité zaznamenat pouze nezbytné děje a informace, jinak dlouhé záznamy mohou zabrat hodiny než budou přehrány. Níže jsou uvedeny některé příklady. [2]

Snímkovací frekvence [Hz]	250	500	1000	4500	30000
Doba trvání děje [s]	20	50	2	0,11	0,5
Počet nahraných snímků	5000	30000	1500	500	15000
Doba trvání při přehrávání 30 snímcích za sekundu [s]	167	1000	50	17	500
Doba trvání při přehrávání 1 snímku za sekundu [min]	83	500	25	8	250

Tab. 1.1 Nárůst doby trvání přehrávaného záznamu [2]

2 OSVĚTLENÍ PŘI SNÍMÁNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍMI KAMERAMI

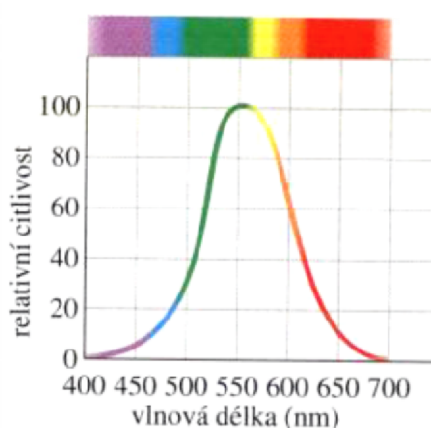
Způsob, intenzita a typ osvětlení jsou stejně tak důležité jako kvalita a vlastnosti samotného záznamového zařízení. Správné osvětlení by mělo zaručit maximální kontrast snímaných oblastí, které nás zajímají. Pro zjištění toho, jak a čím objekt osvětlit, je třeba analyzovat vzájemné působení světelného zdroje a pozorovaného objektu.

2.1 Viditelné spektrum světla

Dle zjištění Jamese Clerka Maxwella je světelný paprsek postupná vlna, tvořená elektrickým a magnetickým polem – elektromagnetická vlna [15]. Část elektromagnetické vlny, která je viditelná lidským okem, se nazývá viditelné spektrum. Hranice viditelné oblasti nejsou dobře definovány, protože křivka citlivosti oka se asymptoticky blíží nule na dlouhovlnné i krátkovlnné straně (příloha 1). Jestliže se hranice viditelnosti určí jako vlnové délky, při nichž klesne citlivost na 1 % své maximální hodnoty, vychází interval mezi 430 a 690 nm (obr. 2.1) a střed viditelné oblasti leží asi u 555nm. Lidské oko však může vnímat i vlnové délky za těmito hranicemi, intenzita světla však musí být dostatečně vysoká [15].

Vlnová délka je vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body vlnění, které kmitají ve fázi. Mění se délka v závislosti na druhu prostředí, kterým světlo prochází.

V dnešní době je podle rychlosti světla, stejně jako jakéhokoliv jiného magnetického vlnění ve vakuu, činící 299 792 458 m/s definována standardní délka 1 m jako vzdálenost, kterou světlo urazí právě za 1/299792458 sekundy.



Obr. 2.1 Relativní citlivost oka k elektromagnetickým vlnám [15]

2.2 Geometrie osvětlení

Geometrie osvětlení je mimo jiné dána složením svazku světla. Ten je buď rovnoběžný – kolimované světlo s rovnoběžnými paprsky, nebo difuzní – paprsky jsou rovnoměrně rozloženy ve všech směrech [16]. Složení světla užívaného pro osvětlování dějů snímaných vysokorychlostní kamerou je mezi

těmito dvěma typy vyzařování. Rovnoběžné paprsky zvýrazňují kontrast způsobený strukturou a členitostí povrchu, ty rozptýlené jej naopak zmenšují.

U snímaného objektu záleží na [16]:

- velikosti absorpce nebo odrazivosti světla objektu, která určuje kontrast a lesk;
- strukturu a členitost povrchu objektu;
- tvaru a velikosti objektu;
- průsvitnosti a průhlednosti částí povrchu.

Umístění světla za nebo vedle objektivu jsou nejběžnější metody osvětlení objektu. Celoplošné a zadní podsvícení však někdy mohou být vhodné k odstranění stínů vytvořených čelním zdrojem světla. Aby se zabránilo zrcadlovému odrazu, světlo se umísťuje za objektiv. Boční osvětlení, kdy je světlo v úhlu ze strany, může produkovat velmi příjemné osvětlení. U nízkokontrastních předmětů může takovéto umístění světla zlepšit detail. Celoplošné osvětlení se využívá k odstranění stínů nebo jiných tmavých míst, ale může být také užito ke snížení blikání lamp. Toto osvětlení bývá umístěno ze strany nebo shora. Zadní osvětlení může být použito k podsvícení translucenčních předmětů například v mikroskopii, při analýzách tkání, nebo vzdušných toků. Všechny tyto techniky osvětlení jsou však důležité pro získání vysoce kvalitního snímku. [2]

Mimo to, jakým směrem jsou paprsky světla namířeny a kde jsou zdroje světla umístěny, záleží i na samotné interakci dopadajícího světla a snímaného tělesa.

2.3 Zdroje osvětlení

Je mnoho typů světelných zdrojů, které jsou použitelné při natáčení vysokorychlostního záznamu. Ne všechny mají stejný jas, například sluneční svit je jasnější než LED osvětlení. Místo použití spousty světelných zdrojů jistého druhu by jiný typ světla mohl být menší, lepší a pravděpodobně i méně nákladný. Také je nutné vzít v potaz, že některé zdroje světla přemění poměrně velkou část spotřebované elektrické energie na teplo. To má za následek nejen zbytečně vysokou spotřebu elektřiny, ale také nebezpečí nadměrného zahřátí osvětlované oblasti, které může mít nežádoucí účinky např. při snímání chemikálií nebo zvířat. Dále je nutné vědět, že při barevném snímání je třeba 2–4krát více světla než u monochromatického záznamu a že tmavý objekt oproti tomu světlému potřebuje daleko větší zdroj světla a přitom má špatný kontrast a je u něj obtížnější provést analýzy pohybu [13]. U metalických předmětů je však problém s odrazem světla od jejich povrchu, jedna z možností je použití matného postřiku.

To správné světlo je třeba zvolit s ohledem na několik faktorů: typ světla, jednotnost světelného zdroje, intenzita světla, barva světla, frekvence blikání, velikost, zaměření paprsku a požadavky na manipulaci. [2]

2.3.1 Denní světlo / přirozené světlo

Kdyby nemělo denní světlo velice malou intenzitu, jednalo by se takřka o ideální zdroj světla. Lze jej využít pouze za jasného počasí při venkovních záběrech, jako jsou například nárazy aut či balistické testy.

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita	[Red bar]		
Teplota chromatičnosti	[Green bar]		
Cena	[Green bar]		
Zahřívání	[Green bar]		
Blikání	Ne		

Obr. 2.2 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.3.2 Běžné žárovky

Pro snímání vysokorychlostní kamerou se užívají jen zřídka, protože mají slabou intenzitu a nízkou barevnou teplotu (obvykle kolem 3200K). Je lepší používat 100 W žárovky místo 40 či 60 W, které vyzařují silně oranžové světlo.

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita	[Red bar]		
Teplota chromatičnosti	[Yellow bar]		
Cena	[Green bar]		
Zahřívání	[Red bar]		
Blikání	Ne		

Obr. 2.3 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.3.3 Žárovky s wolframovým vláknem

Stejně jako u výše zmíněných žárovek se stále jedná jen o žárovku s jejími všemi nevýhodami. Nicméně má vyšší efektivitu, vyšší teplotu chromatičnosti (3600K) a lze ji napojit na stejnosměrný proud, aby se zabránilo blikání. Tyto wolframové žárovky jsou levně a široce dostupné ve výkonech od 5 do 250 W. Běžným typem lampy s wolframovým vláknem je halogenová lampa. Halogenové lampy jsou velice výkonné, ale při jejich používání je třeba si dát pozor na vysokou teplotu, kterou produkují. Žárovky s wolframovým vláknem se obvykle používají při testech nárazů automobilů (na přístrojové desce) a při průmyslových nebo výzkumných aplikacích s malým zorným polem.

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita	[Yellow bar]		
Teplota chromatičnosti	[Yellow bar]		
Cena	[Green bar]		
Zahřívání	[Red bar]		
Blikání	ne (napájení stejnosměr. proudem)		

Obr. 2.4 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.3.4 Xenonové žárovky

Jedná se o něco modernější žárovky, používané pro osvětlení automobilů. Pracují pod vysokým napětím a frekvencí, a proto je u nich třeba kontrolního zařízení. Xenonové světla jsou velice jasná a pronikavá. Jejich zdroj je náchylný k vytváření rušivých odrazů na objektech a pozadích. Jsou využívána, stejně jako žárovky s wolframovým vláknem na přístrojových deskách při testování nárazů automobilů a také pro průmyslové a výzkumné aplikace.

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita			
Teplota chromatičnosti			
Cena			
Zahřívání			
Blikání		asi 20 kHz	

Obr. 2.5 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.3.5 HMI světla (*Hydrargyrum Medium-Arc Iodide*)

Je to osvětlovač, který k vyprodukování světla používá namísto zářící baňky elektrický oblouk. HMI světla využívají elektronické nebo magnetické zařízení, které vytvoří zážehový puls a reguluje oblouk. Vyzařované světlo je jak ve viditelném spektru, tak i v ultrafialovém. Tento světelný zdroj má obvykle UV filtr, který nepropouští škodlivé záření. HMI světla jsou vyvážené světelné zdroje, které generují intenzivní bílé světlo. Tato světla jsou vysoce kvalitní a tomu odpovídá i jejich cena. Jejich výhodou je 2–5krát vyšší efektivita než u žárovek, tudíž potřebují méně energie a neprodukují tolik tepla. Jejich světelný výkon je asi 100 lm/W. Barevná teplota HMI svítidel je přibližně 5600 K, což je přibližně teplota denního světla. Jsou používány v automobilových testovacích centrech v podobě velkých světelných panelů k osvětlení oblasti nárazů.

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita			
Teplota chromatičnosti			
Cena			
Zahřívání			
Blikání		ne	

Obr. 2.6 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.3.6 Studené světlo

Je vyzařované za nízkých teplot zdrojem, který není rozžhavený (fluorescence, fosforescence, bioluminiscence a triboluminiscence). Na většinu světelných zdrojů je možno napojit více světelných vodičů. Fluorescentní zdroj světla má na konci každé tuby elektrody a tuba je naplněna argonem a v malém množství rtuť. Při aplikaci těchto látek na elektrody je rtuť při reakci s argonem vypařována. Rtuť vyzařuje ultrafialové

záření, které naráží na stěnu tuby, pokryté fosforem. Fosfor následně přeměňuje ultrafialové záření na světlo nacházející se ve viditelném spektru. Většina fluorescentních lamp vyzařuje dominantní zelenou barvu, která není velice vhodná pro vyvážený světelný zdroj. Studené světlo bylo vytvořeno k osvětlení dějů, kde je potřeba detailního osvětlení v malém zorném poli bez nežádaného tepelného vyzařování. Využívá se při osvětlení zvířat, chemikálií a v biomedicině.

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita		[Green bar]	
Teplota chromatičnosti		[Green bar]	
Cena		[Yellow bar]	
Zahřívání		[Green bar]	
Blikání		ne	

Obr. 2.7 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.3.7 LED osvětlení

Osvětlovače s LED jsou v současné době na vzestupu. Dnes již existuje velký výběr LED různých barev. Diody totiž nepotřebují vysoké napětí a jejich světelný tok se snadno reguluje. Stárnou relativně pomalu a mají dlouhou životnost. Čip diody LED jsou v podstatě bodovým zdrojem. Výsledný tvar světelného svazku diody LED závisí na způsobu zapouzdření, což je třeba brát v úvahu při konstrukci osvětlovače [17].

LED osvětlení je v mnoha ohledech velmi vhodné pro aplikace strojového vidění, ale většinou není dost intenzivní pro osvětlení předmětů snímaných vysokorychlostní kamerou. K zabránění blikání je dobré použít vysoce kvalitní a silný zdroj stejnosměrného napětí. LED diody se aplikují při snímání zblízka a v malé frekvenci snímání (do 250 fps).

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita		[Red bar]	
Teplota chromatičnosti		[Green bar]	
Cena		[Yellow bar]	
Zahřívání		[Yellow bar]	
Blikání		ne (napájení stejnosměr. proudem)	

Obr. 2.8 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.3.8 LED Bleskové osvětlení

Vytváří vysoce intenzivní světelný záblesk a je třeba jej synchronizovat s kamerou. Tento typ osvětlení nevytváří žádný elektromagnetický ruch a je k dostání v bílé a okrové barvě nebo v IR spektru záření. Tento záblesk prakticky odstraní rozmazané pohyby a lze jednoduše ovládat jeho počátek. Využívá se v aplikacích náročných na osvětlení (snímání při vysoké frekvenci) a je ideální pro snímání velice rychle se pohybujících předmětů.

Vlastnost světla	-	Hodnocení	+
Intenzita			
Teplota chromatičnosti			
Cena			
Zahřívání			
Blikání			
	synchronizováno s kamerou		

Obr. 2.9 Hodnocení světelného zdroje [44]

2.4 Eliminace rušivých vlivů

Při užití správně zvoleného osvětlovače jako jediného zdroje světla by nebylo obtížné docílit stejných světelných podmínek při opakovaném snímání dějů. Dosáhnout neměnných světelných podmínek je však velice složité, jelikož téměř vždy na osvětlovaný předmět nebo oblast působí také nějaký další, nestálý zdroj světla. Většinou se jedná o denní, průběžně se měnící světlo nebo běžné osvětlení výroby. Parametry takovýchto nežádoucích zdrojů osvětlení, závisících na denní a roční době, počasí a dalších podmínkách jsou nepředvídatelné. Ovlivnění snímaného děje těmito nežádoucími zdroji může vést ke zkreslení zaznamenaných údajů, špatné kvalitě snímku nebo k nežádoucím odrazům světla od povrchu objektu.

Nejjednodušším řešením je tyto nežádoucí zdroje světla odstínit. V případě, že je odstínění okolních zdrojů světla technicky nemožné, využívá se osvětlovač, který je schopen vytvořit řádově vyšší osvětlení než okolní zdroje světla. Vliv rušivého světla pak působí jen relativně malé změny v celkovém osvětlení. Příkon a světelný tok tohoto výkonnějšího osvětlovače je velice vysoký, tudíž se zapíná pouze po dobu snímání vysokorychlostní kamerou. Mimo jiné je takto silný světelný zdroj také silně nepříznivý pro pracovníky, kteří s ním manipulují a pohybují se v jeho blízkosti. [16]

Účinnost osvětlení může také kolísat v závislosti na intenzitě prachu a jiných nečistot nacházejících se v prostředí, ale také na samotném zdroji světla. Při práci ve velice prašném prostředí je dokonce někdy nutné osvětlovač pravidelně čistit. Stálé nebo nahodilé snížení svítivosti je negativní jev, který může vést k zvýšení chyby měření, případně k zaznamenání nepoužitelných snímků.

2.5 Ekonomické zhodnocení světelných zdrojů

Z výše uvedených informací o různých druzích osvětlovačů, používaných pro nasvícení dějů snímaných vysokorychlostní kamerou, vyplývá nejednoznačnost při volbě nejlepšího typu svítidla. Vždy záleží na podmínkách, ve kterých bude světlo použito.

Těmito podmínkami například jsou:

- místo a čas pořizování záznamu (interiér, exteriér – dostatečně silné denní světlo skýtá ideální podmínky pro nahrávání pomalejších dějů),
- děj, který je nahráván (záleží na době jeho trvání – při velice krátkých událostech lze využít LED bleskové osvětlení, které je synchronizováno

- se spouští kamery. U rychle probíhajících dějů, kde je třeba zaznamenat více snímků za vteřinu je také nutné použít silnější světelné zdroje),
- vzdálenost kamery od zaznamenávaného děje (při velice krátkých vzdálenostech nelze využívat halogenové osvětlovače z důvodu vysokého množství energie, která je přeměňována na teplo. Uplatnění zde nachází fluorescentní lampy, vydávající tzv. studené světlo. Naopak při snímání většího zorného pole z větší vzdálenosti, jako při crash testech se mohou využít panely složené s LED osvětlení),
 - rozptyl světelného zdroje (v některých situacích je platnější rozptýlené světlo, jindy jsou naopak vyžadovány osvětlovače s rovnoběžným svazkem paprsků),
 - četnost a celková doba využití osvětlovačů (při vydatném užívání světel se vyplatí investovat do LED osvětlení, které je provázeno vyššími vstupními náklady, oproti běžným halogenovým světlům, na druhou stranu však úspornost diod může vést k návratnosti prvotních investic během několika málo let). LED osvětlovače jsou oproti běžným osvětlovacím systémům s vláknem téměř nezničitelné.

Dle kapitoly 2.3 byly vybrány různé typy osvětlovacích zařízení s co nejpodobnějším příkonem (tab. 2.1). Následně se dle osvětlovače s nejvyšší životností (60 000 hod.) určil u každého ze světel počet osvětlovačů, který tuto životnost pokryje a sečetla se jejich cena. Z příkonu bylo spočítáno celkové množství spotřebované elektrické energie a vynásobilo se hodnotou 5 Kč, které se v dnešní době blíží průměrná cena elektrické energie. Po sečtení hodnot vyšly náklady na pořízení a provoz jednotlivých světel. V rámci možností byly vybírány světelné zdroje s patičí R7 a hodnotou elektrického napětí 230 V. Dvě světla na konci tabulky 2.1 jsou žárovky obsažené v osvětlovacích zařízeních, které poskytla firma Vision Research ÚK FSI. U těchto světel nebyla připočítána cena za zdroj a příslušenství. Nezkrácená tabulka se nachází v příloze 2.

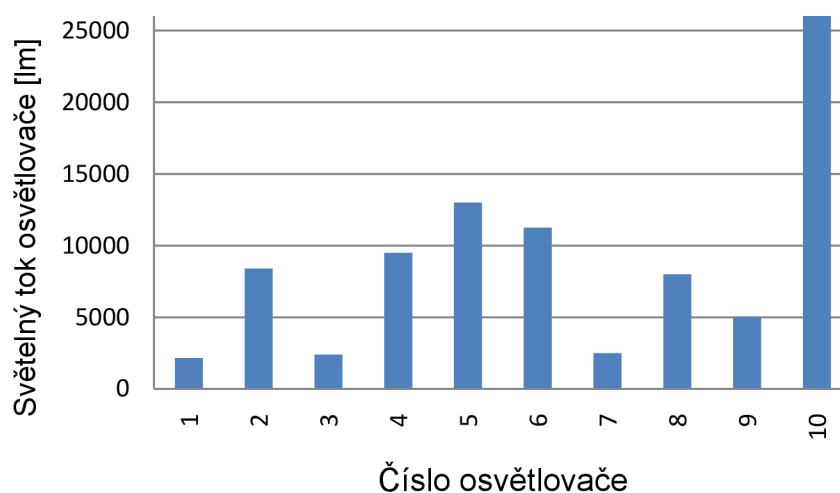
Typ osvětlovače	Příkon	Sv. tok	Cena	Životnost	Náklady
	[W]	[lm]	[kc]	[h]	[tis. Kč]
Běžná žárovka [1]	150	2160	22	800	46,65
Běžná žárovka [2]	500	8400	257	800	169,275
Halogenová lampa [3]	150	2400	62	2000	46,86
Halogenová lampa [4]	500	9500	113	2000	153,39
Xenonová žárovka [5]	450	13000	20430	800	1667,25
HMI světlo [6]	150	11251	3950	750	361
LED osvětlení [7]	57	2500	5297	50000	27,694
Fluorescentní zářivka [8]	150	8000	6553	60000	51,533
Halogenová lampa s reflektorem MR16 [9]	250	5000	466	50	634,2
Halogenová studiová žárovka [10]	1000	26000	370	200	411

Tab. 2.1 Porovnání vlastností jednotlivých typů světla

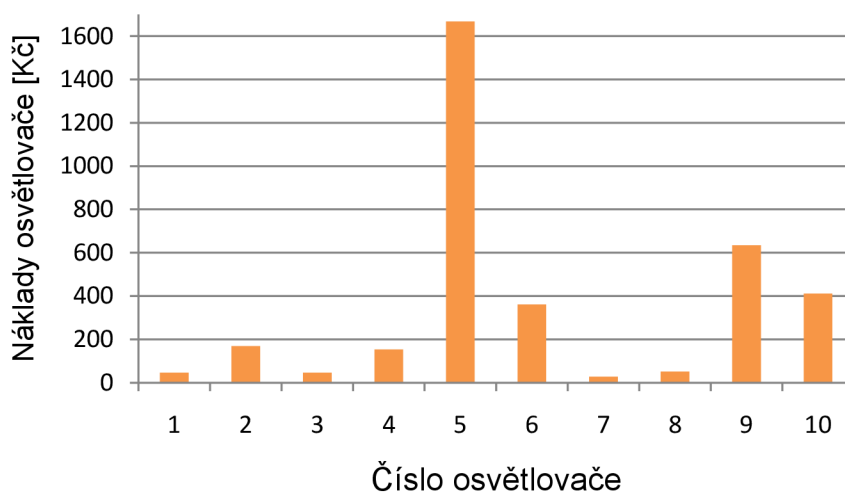
$$N = (P \cdot 60000 \cdot 5) + \frac{60000}{\check{Z}} \cdot C \quad (2.1)$$

Kde N [Kč] jsou náklady na pořízení a spotřebovanou energii osvětlovačem po dobu 60 000 hodin, P je příkon světla v kW, \check{Z} [hod.] je životnost světla a C představuje cenu daného světla.

Na základě zjištěných a vypočítaných údajů byly vytvořeny grafy zobrazující světelný tok [lm] a náklady jednotlivých světel.



Graf 2.1 Porovnání světelného toku osvětlovačů



Graf 2.2 Porovnání nákladů na osvětlovače

Při porovnání nákladů u jednotlivých světel vychází jako nejlépe svítící halogenová žárovka číslo 10, jejíž náklady na provoz jsou výrazně vyšší než u nejlevnějšího typu osvětlení. Jasně nejdražší je xenonová žárovka číslo 5. Nejvýhodnější poměr cena/výkon mají fluorescenční zářivka č. 8 a halogenová lampa č. 4. Fluorescenční, studené světlo však oproti halogenovým lampám nemá usměrněný světelný paprsek.

3 MECHANISMUS TVORBY TŘÍSKY

Fyzikální mechanismy probíhající při tvorbě třísky se dějí během okamžiku a obráběný materiál prochází velmi rychle mezním stavem [18]:

- pružné napjatosti,
- plastické deformace,
- oddělení částic materiálu formou lomového porušení.

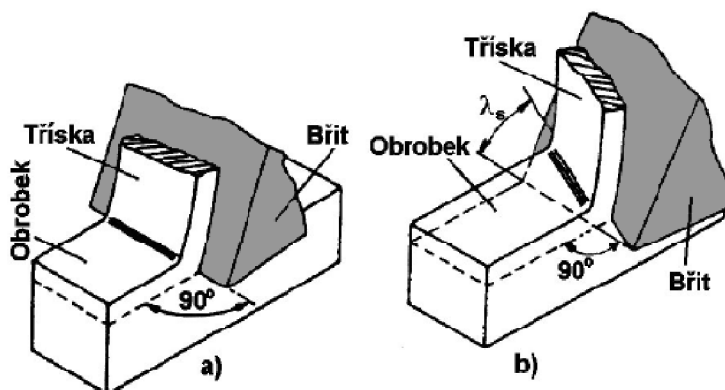
3.1 Proces ortogonálního řezání

Prioritním výstupem při procesu řezání jsou parametry obrobené plochy. Působením nástroje na obrobek při řezání vzniká napětí, na něž materiál klade odpor. V důsledku toho se ustálí pole řezání, které má výrazné charakteristiky stavu napjatosti, teploty a deformace. [19]

Pro vysvětlení procesu řezání, při kterém vzniká tříška, se používá systém ortogonálního (pravoúhlého) řezání (Obr. 3.1). Tento proces plošné plastické deformace je nejjednodušším druhem řezání a spočívá v kolmosti ostří na směr řezného pohybu. Aby bylo možno takovýto model uskutečnit, je třeba zachovat určité vlastnosti [20, 21]:

- užití dokonale ostrého nástroje;
- dodržení úhlu hřbetu tak, aby nedocházelo ke styku nástroje a obrobku;
- smykovou rovinu, která se šíří dopředu od břitu nástroje;
- kolmost ostří nástroje vzhledem ke směru hlavního pohybu;
- konstantní hloubku řezu;
- šířku obrobku, která je menší než šířka nástroje;
- konstantní rychlost řezání a tvorbu plynulé třísky.

Proces řezání je procesem intenzivní plastické deformace podél roviny maximálních smykových napětí – smykové roviny. Při relativním pohybu nástroje vůči obrobku působí na odebíranou vrstvu materiálu vnější zatížení, které v této vrstvě vyvolává napětí. Odebíraná vrstva obrobeného materiálu se pružně deformuje, dokud napětí nepřekročí mez pružnosti. Zvýšení napětí nad tuto mez vede k plastické deformaci odřezávané vrstvy materiálu a dochází ke skluzovému pohybu dislokací. [20, 21]



Obr. 3.1 Realizace řezného procesu:
a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [19]

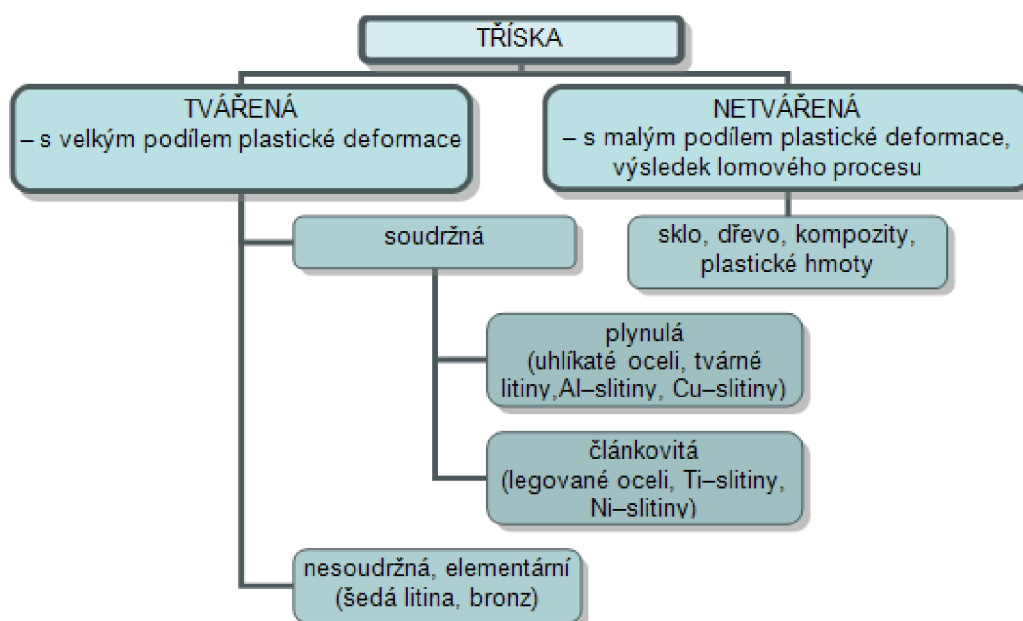
U krystalických a nekystalických látek je mechanismus vzniku a oddělování třísky odlišný. Teoretické a experimentální studie krystalických materiálů, převážně používaných v dnešní době ve strojírenské praxi, jsou prováděny zejména pro případ ortogonálního obrábění. [19]

3.1.1 Základní typy třísek

Hlavním faktorem určujícím formování třísky je hloubka řezu a posuv nástroje podél povrchu obrobku. Hloubka řezu určuje šířku třísky a podstatně ovlivňuje tvar třísky. Hlavní typy třísek jsou obloukovité a spirálovité třísky a základním požadavkem je dosáhnout jednoho z těchto dvou přijatelných typů třísky ve vhodné délce. Podstatnou roli při formování třísky má i úhel nastavení a poloměr hrotu. U téhož rezného břitu bude při různých hloubkách řezu docházet k formování a obvykle i lomu třísky různým způsobem. [22]

Druhy třísek nejsou vzhledem k rozmanitosti jejich tvarů označovány jednotně. V tabulce 3.1 je uvedeno základní rozdělení tvarů třísek pro různé materiály. Tvářené třísky však mohou být rozděleny v závislosti na průběhu rezného procesu na [21]:

- plynulé článkovité soudržné třísky, vznikající u většiny ocelí;
- plynulé soudržné lamelové třísky, vznikající u většiny korozivzdorných ocelí;
- tvářené elementární třísky, vznikající u většiny litin;
- nepravidelně článkovité plynulé třísky, vznikající u většiny vysoce legovaných materiálů;
- tvářené plynulé soudržné třísky, vznikající při malých rezných silách, např. při obrábění hliníku;
- dělené segmentové třísky, vznikající při velkých rezných silách a vysokých teplotách řezání, např. při obrábění tvrdých materiálů;
- plynulé segmentové třísky, vznikající při obrábění titanu.



Tab. 3.1 Základní rozdělení druhů třísek [18]

Při obrábění se doporučuje kvůli bezpečnosti, manipulaci s třískami, chlazení při obrábění a z hlediska automatizace výrobních procesů produkovat třísky dělené, krátké. Takovéto třísky lze jednodušeji odstranit z obráběcího stroje, oddělit od nich řeznou kapalinu odstředováním a případně je lisovat. Dělené, krátké třísky jsou produkovány díky [18]:

- využití strukturních fází, zaručujících vznik drobných třísek (automatové oceli s vyšším obsahem síry a manganu);
- usměrnění a lámání třísek o hřbetní plochu nástroje pomocí čelních utvařečů třísek;
- usměrnění a lámání třísek o obrobenou plochu obrobku (pouze u hrubování);
- přerušování posuvu nástroje po určité době nebo délce obrábění s časovou prodlevou, zaručující zlomení třísky po zvolené délce nebo času obrábění.

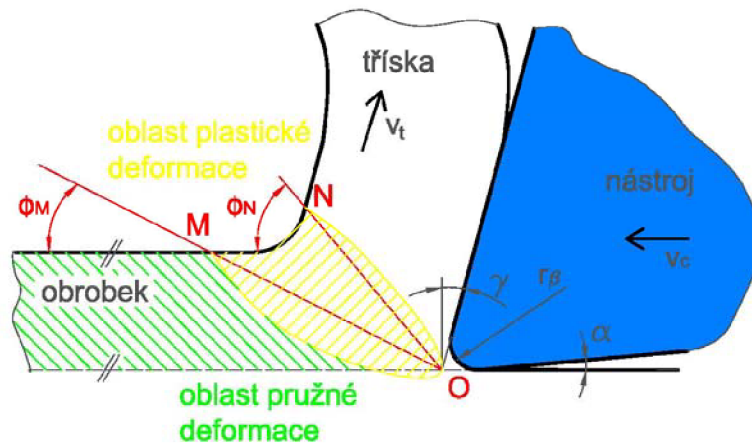
Norma ISO 3685 nepojednává pouze o trvanlivosti nástroje (T–v závislost) a měření forem opotřebení, obsahuje také základní rozdělení třísek, které je znázorněno v tabulce 3.2.

Tvar	Přímé	Kroucí se nahoru		Kroucí se do strany	Kroucí se nahoru a do strany		Přirozeně lámání třísky
	Stužkové třísky	Vinuté třísky	Spirálové třísky	Vinuté šroubovitě třísky	Kuželové šroubovitě tř.	Obloukovité třísky	
Vhodné	Krátké 	Krátké 		Krátké 	Krátké 	Dělené/Spojené 	Elementární 
Nežádoucí	Dlouhé 	Dlouhé 	Ploché 	Dlouhé 	Dlouhé 		
	Smotané 	Smotané 	Kuželovité 	Smotané 	Smotané 		Jehlovité 

Tab. 3.2 Rozdělení třísek dle ISO 3685 [39]

3.1.2 Oblasti deformace při tvorbě třísky

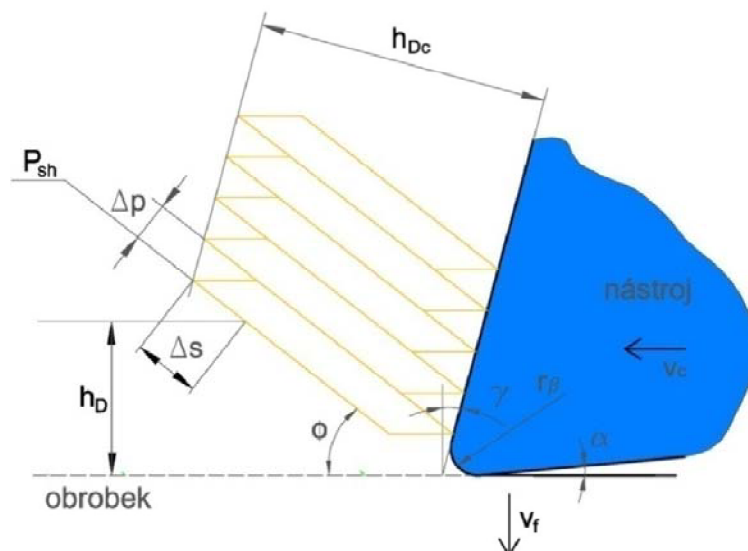
Pokud napětí působící na odebíranou vrstvu materiálu, vzniklé pohybem nástroje vůči obrobku, nepřestoupí mez pružnosti materiálu, odebíraná vrstva se pružně deformuje. Jestliže se napětí zvýší nad tuto mez, dochází k plastické deformaci, jež začíná v rovině MO a končí v rovině mezi body N a O (obr. 3.2). Stav napjatosti, velikost a tvar oblasti MNO závisí na deformačních a zpevňovacích schopnostech obráběného materiálu, řezné rychlosti a nástrojových ortogonálních úhlech čela a řezu. [21]



Obr. 3.2 Oblasti deformací v odřezávané vrstvě

Tvorba třísky je proces, který je možno rozdělit do dvou fází, v nichž je obrobek plasticky deformován pěchováním před špičkou nástroje, a když je pak dosažena kritická mez napětí, dojde k poruše v oblasti stříhové roviny, vznikající mezi špičkou nástroje a povrchem obrobku. Výsledkem tohoto děje jsou plynulé článkovité soudržné třísky, složené z mírně deformovaných segmentů, oddělených úzkými pásy intenzivně stříženého materiálu. [23]

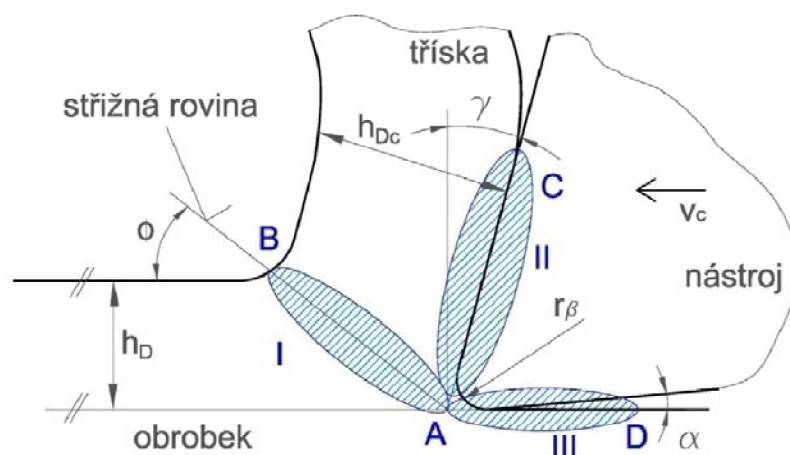
Při vyšších rychlostech řezání začne oblast plastické deformace splývat a zjednodušeně lze říci, že ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v rovině stříhu P_{sh} , jejíž poloha je určena úhlem roviny stříhu Φ . Na obr. 3.3 je znázorněn pohled na pracovní rovinu P_{fc} v hlavním bodě ostří. [24]



Obr. 3.3 Zjednodušený model tvorby elementů třísky

Kořen třísky je oblast materiálu, kde účinkem řezného nástroje dochází k přetváření obráběného materiálu na třísku (obr. 3.4). Kořen třísky zahrnuje přibližně tři oblasti výrazné plastické deformace [18, 20]:

- oblast primární plastické deformace materiálu I – v rovině maximálních smykových napětí vymezené rovinou AB (skloněnou pod úhlem střižné roviny Φ). Právě v této oblasti je největší plastická deformace a materiál nad touto čarou je deformován smykovým procesem, avšak tříška pod touto čarou není deformována. Oproti modelu však oblast v těsné blízkosti ostří nástroje není rovinná, nýbrž zakřivená do tvaru logaritmických spirál, sledujících místa vzniku maximálních smykových napětí;
- vytvořená tříška je ve styku s čelem nástroje až do bodu C, oblast sekundární plastické deformace materiálu II – mezi body AC zahrnuje tření;
- oblast terciální plastické deformace materiálu III mezi body AD zahrnuje tření nástroje o obrobený povrch materiálu a má vliv na výslednou kvalitu obrobeného povrchu;

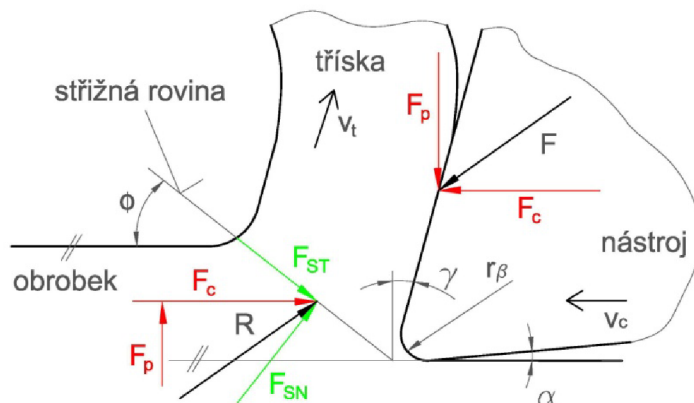


Obr. 3.4 Oblasti plastických deformací v kořenu třísky

3.1.3 Řezné síly

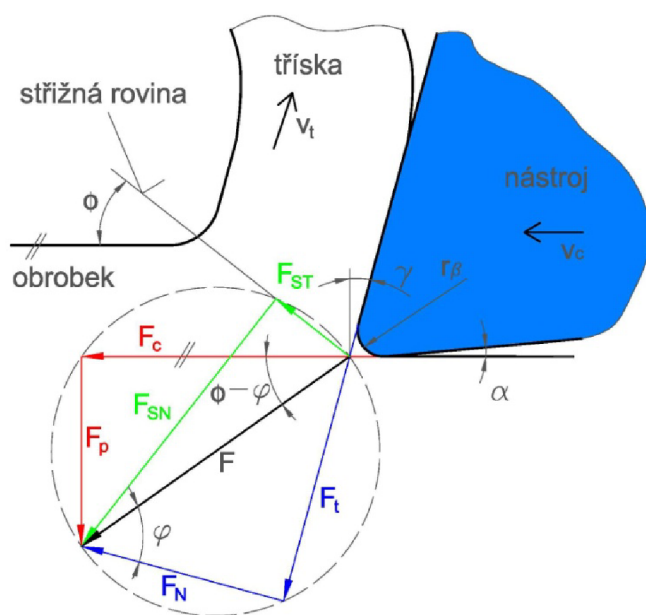
Mezi samotným čelem nástroje, obrobkem a třískou působí dvě základní síly F a R , jejichž vztah je určen rovnicí (3.1). Síla pro obrábění F , nacházející se mezi čelem nástroje a třískou se rozkládá na řeznou – horizontální sílu F_c a posuvovou – vertikální sílu F_p (obr. 3.5). Na čele nástroje se skládá z tečné F_T a normálové F_N složky sil. V rovině maximálních smykových napětí se tečná složka značí F_{ST} a normálová F_{SN} . [18, 20]

$$F = - R \quad (3.1)$$



Obr. 3.5 Působení sil na třísku

Jestliže se tyto síly vynesou v místě špičky ostří nástroje, vznikne diagram řezných sil sestavený Merchantem, kde všechny složky sil leží na Thaletově kružnici (obr. 3.6).



Obr. 3.6 Rozložení složek řezných sil

Pomocí horizontální složky F_c a vertikální složky F_p se dají určit všechny složky síly F . Horizontální a vertikální složky lze změřit pomocí dynamometrů nebo nepřímou pomocí wattmetrických soustav. [18]

$$F_{ST} = F_c \cdot \cos \phi - F_p \cdot \sin \phi \quad (3.2)$$

$$F_{SN} = F_c \cdot \sin \phi + F_p \cdot \cos \phi = F_{ST} \cdot \operatorname{tg}(\phi + \varphi - \gamma_0) \quad (3.3)$$

Podobně je možné určit sílu tečnou a normálovou:

$$F_T = F_p \cdot \sin \gamma_0 + F_c \cdot \cos \gamma_0 \quad (3.4)$$

$$F_N = F_p \cdot \cos \gamma_0 - F_c \cdot \sin \gamma_0 \quad (3.5)$$

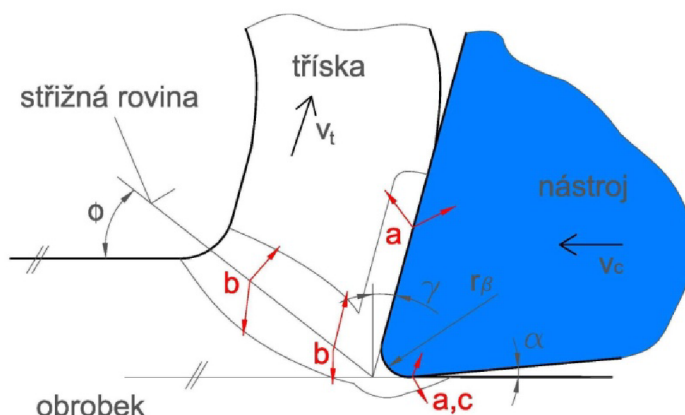
Součinitel tření na čele nástroje $\mu = \tan \varphi$ se dá určit ze vztahu:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{F_p \cdot \sin \gamma_0 + F_c \cdot \cos \gamma_0}{F_p \cdot \cos \gamma_0 - F_c \cdot \sin \gamma_0} = \frac{F_c + F_p \cdot \tan \gamma_0}{F_p - F_c \cdot \tan \gamma_0} \quad (3.6)$$

3.1.4 Teplo vzniklé během obrábění

Prakticky veškerá mechanická energie potřebná ke vzniku třísky je přeměněna na energii tepelnou. Zanedbatelný zbytek energie je v podobě elastické energie uložen v deformovaných třískách a ve zbytkové napjatosti obrobeného povrchu [18]. Na obr. 3.7 jsou znázorněny různé oblasti interakce mezi třískou, nástrojem a obrobkem při obrábění. Každá z pěti zobrazených oblastí, které ve skutečnosti není možné přesně oddělit, má odlišný způsob vzniku tepelné energie. Z obrázku níže je patrné, že teplo tvořící se při procesu obrábění vzniká různými způsoby [25]:

- teplo způsobené jako proces tření mezi třískou a čelem nástroje a mezi obrobenou plochou a špičkou nástroje;
- teplo vznikající dislokačními a destruktivními procesy nastávajícími v atomové struktuře odebíraného materiálu v rovině stříhu během deformace a řezání materiálu;
- teplo vzniklé deformačními procesy, způsobenými interakcí mezi hřbetem nástroje a právě obrobeném povrchu obrobku.



Obr. 3.7 Vznik tepla při obrábění [25]

Vzhledem k velkému množství variant parametrů rezného nástroje, obrobeného materiálu a rezných podmínek nelze konkrétně určit, v kterých místech je jaká teplota. Minimální změny geometrie nástroje mohou vést k velkým změnám vznikajícího tepla. Obecně se teplo odcházející do třísky,

nástroje a obrobeného materiálu rozděljuje poměrově dle Pregera nebo Vieregga (tab. 3.3).

	Preger	Vieregge
Nástroj	10 %	3,3 %
Obrobek	10 %	4 %
Tříska	80 %	92,7 %

Tab. 3.3 Rozdělení řezné energie při obrábění na sucho [25]

3.1.5 Metoda konečných prvků

K zjištění toho, jak celý proces vzniku třísky probíhá, se z důvodu simulace dynamického děje šíření trhlin ve velkých rychlostech a na topologicky složitých prostorových sítích využívá explicitní metody konečných prvků – MKP. [26]

MKP je obvykle využívána pro získání znalostí o deformacích a teplotách působících během procesu řezání a také pro porozumění podnětům způsobujícím přeskupení obrobené vrstvy obrobku. Mechanismus tvorby třísky má významný vliv na síly objevující se během obráběcího procesu. [27]

Základním principem explicitní MKP je užití druhého Newtonova zákona, jenž je definován v určitém okamžiku a vyjádřen v maticovém tvaru. Metoda konečných prvků vychází z obecné rovnice pohybu:

$$M \cdot \ddot{U}(t) + C \cdot \dot{U}(t) + K \cdot U[t] = F(t) \quad (3.7)$$

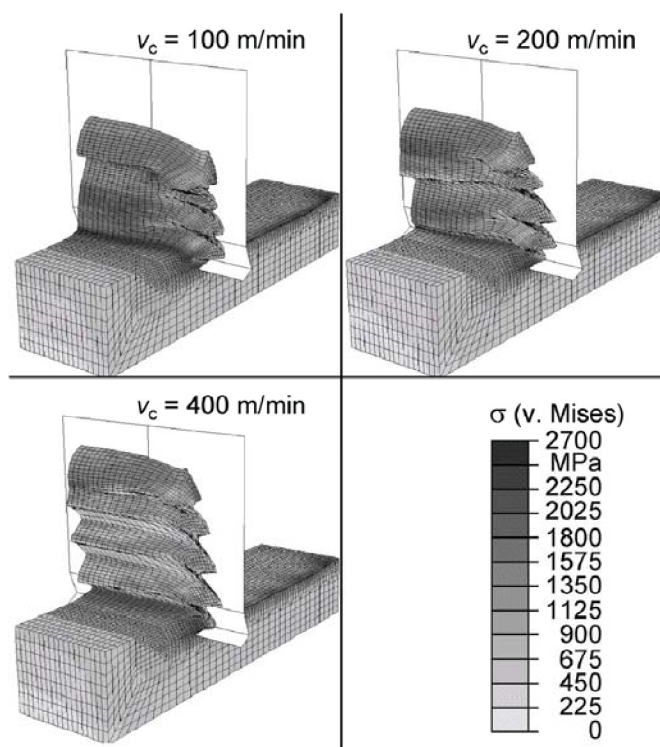
Kde M je matice hmotnosti, C je matice tlumení, K je matice tuhosti, U je matice posuvu a F je matice zatížení. Tato rovnice je časově závislá, pro její řešení je nutná časová integrace. [26]

Hlavní výhody explicitní MKP oproti implicitní jsou [26]:

- jednoduchý kód;
- není třeba sestavovat matice tuhosti [K];
- nelinearity zahrnuté do vektoru vnitřních sil (snadné nastavení kontaktu);
- není třeba inverze matic;
- malá požadovaná paměť.

Programy modelující ortogonální řez ve 2D a 3D dokáží realisticky simulovat tvorbu třísky a díky možnosti modelování řezných sil, tepelných změn a napětí v obráběném materiálu napomáhají lépe porozumět celému procesu řezání. Model vychází ze zadaných řezných podmínek, jako jsou: řezná rychlost, posuv a hloubka řezu, a současně bere v potaz geometrii nástroje a vlastnosti obráběného materiálu. Mezi nejznámější programy patří ABAQUS/Explicit, který na obr. 3.8 zobrazuje tvorbu třísky ze slitiny niklu – Inconel 718. Tento děj je simulován za různých řezných rychlostí a konstantní posuvové rychlosti a hloubce řezu. Zatímco při $v_c=100$ m/min je patrný vývoj plynulé třísky, při $v_c = 200$ m/min je již tříska segmentová. Při řezných

rychlostech vyšších než $v_c = 200$ m/min se tvoří již jen segmentové třísky, zde pak lze také pozorovat zřetelné rozšiřování třísky. [27, 28]



Obr. 3.8 Simulace tvorby třísky v programu ABAQUS za různých rezných rychlostí [27]

3.2 Analýza tvorby třísky u frézování

Jestliže se zjišťuje průřez třísky při frézování, je třeba vzít v potaz některé procesy, jež ovlivňují tento způsob obrábění [18, 20]:

- v záběru může být současně i několik břitů (při analýze plochy odebírané vrstvy obráběného materiálu se však pro zjednodušení uvažuje záběr jednoho břitu);
- záběr břitu je periodicky přerušovaný (třísky je vždy dělená);
- při záběru břitu průřez třísky a silové zatížení není konstantní (mění se tloušťka odřezávané vrstvy materiálu).

3.2.1 Průřez třísky při čelním frézování

U čelního frézování se průměr třísky odvíjí od úhlu záběru vstupu a výstupu zubu (obr. 3.9). Jmenovitá tloušťka třísky h_{Di} je dána vztahem [18, 20, 21]

$$h_{Di} = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.8)$$

Jmenovitá šířka třísky b_{Di} pro úhel κ_r (je pro libovolný úhel φ konstantní)

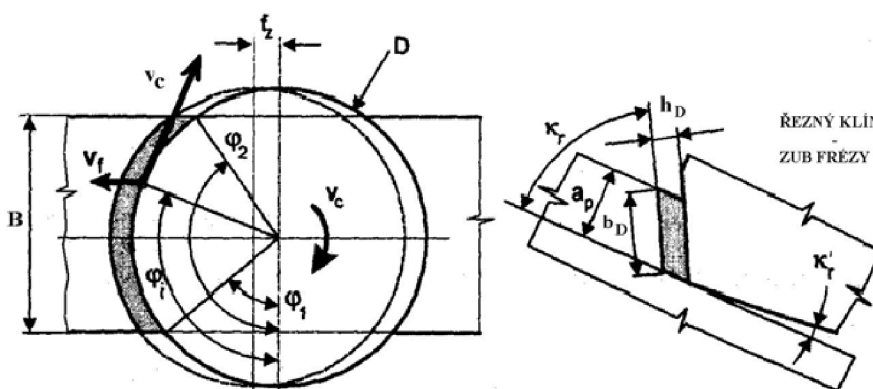
$$h_{Di} = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.9)$$

Jmenovitý průřez třísky pro i-tý zub

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.10)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky $A_{D \max}$ je při $\varphi = 90^\circ$

$$A_{D \max} = f_z \cdot a_p \quad (3.11)$$



Obr. 3.9 Průřez třísky při čelním frézování [18]

3.2.2 Řezné síly při čelním frézování

Při čelním frézování dochází kvůli přerušovanému řezu břitů nástroje k cyklickému zatěžování frézovací hlavy, a tak může docházet k vibracím celé soustavy, obzvláště při obrábění opotřebovanými břitovými destičkami, které se u takového nárazového silového zatížení nevhodně opotřebovávají. Tomuto lze zabránit volbou vhodné geometrie a vhodné rozteče zubů frézovací hlavy. [18, 21]

Úhel nastavení kr neboli úhel hlavního ostří frézy zásadním způsobem ovlivňuje tloušťku a směr odchodu vznikajících třísek. Geometrie VBD je rozdělena na tři oblasti s různým účinkem v řezu: geometrie pro lehký řez (L), univerzální geometrie (M) a geometrie pro těžké obrábění. [29]

Rozteč u je vzdálenost od libovolného místa jednoho břitu ke stejnému místu na dalším břitu. Rozteč u fréz může být: hrubá (L), těsná (M) nebo velmi těsná (H). Zvolená rozteč ovlivňuje stabilitu, potřebný příkon a vhodný materiál obrobku. Efektivním způsobem omezení vibrací je využití nerovnoměrné rozteče, kde jsou nestejně mezery mezi zuby frézy.

Specifikace řezných sil vychází ze silových poměrů na jednom břitu nástroje, nacházejícím se v poloze určené úhlem φ_1 . Řezná síla F_{ci} se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} [18, 21]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} \quad (3.12),$$

kde měrná řezná síla k_{ci} je dána vztahem:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_{Di}^{1-x}} \quad (3.13).$$

Jelikož je však při frézování v záběru několik zubů současně, závisí výsledek řezné síly F_c na počtu zubů v záběru z_z a na jejich poloze vzhledem k obrobku.

$$F_c = \sum_{i=1}^{z_z} k_{ci} \cdot A_{Di} \quad (3.14)$$

3.3 Tvorby třísky při obrábění nekovových materiálů

U třískového obrábění, což je oddělování třísky z materiálu břitem řezného nástroje za působení řezné síly, se typ třísky odvíjí především od geometrie a materiálu nástroje, řezných podmínek a vlastností obráběného materiálu. Tvar třísky se liší nejen při srovnání rozdílných materiálů, ale například u dřeva nelze tvorbu třísky při stejných řezných podmínkách z důvodu nehomogenní struktury vždy přesně zaručit.

3.3.1 Obrábění polymerů

Obrábění plastů se využívá především v kusové a malosériové výrobě, kde není výhodnější vyrábět formy (prototypové díly, součásti unikátních a těžko dostupných zahraničních strojů). Dále se využívá při výrobě velkorozměrových dílů a při použití takového typu plastu, jehož chemické vlastnosti nedovolují použití obvyklých zpracovatelských postupů.

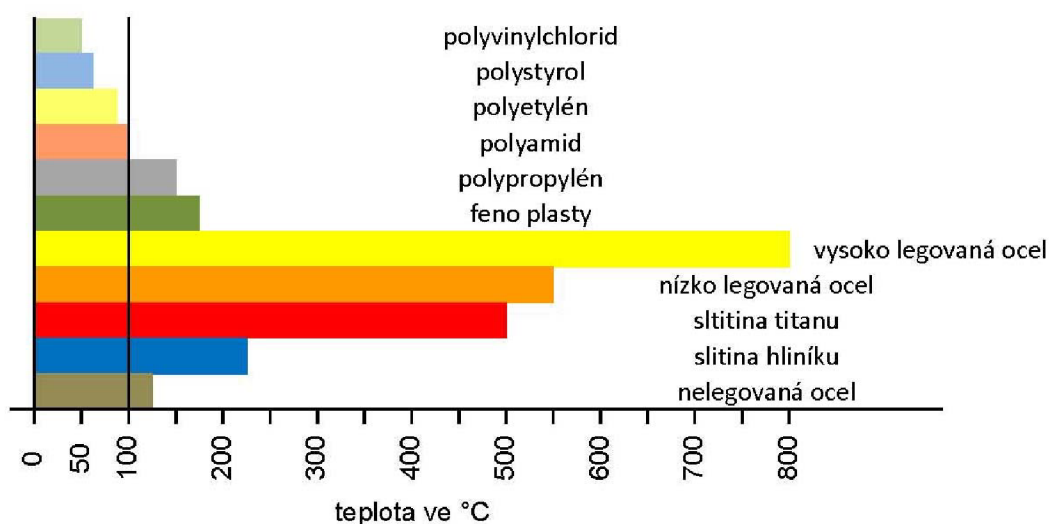
Obrábění plastů musí respektovat některé odlišnosti vlastností a chování polymerů oproti kovům a je třeba tomu přizpůsobit parametry technologického procesu [31]. Teplota vznikající třením nástroje o obrobek při obrábění plastických hmot nesmí narůstat příliš vysoko. Špatná tepelná vodivost plastů způsobuje soustředění tepla v oblasti obrábění. Maximální teploty pro použití plastů ve srovnání s kovy jsou poměrně nízké (tab. 3.4). Pro plasty je typická nízká tepelná vodivost. Rozložení odvádění teplot při obrábění v poměru nástroj 85 %, obrobek 5 % a tříska 10 % je u plastů opačné než při obrábění kovových materiálů. U reaktoplastů, které jsou zesítovány tvářením vlivem tepla a tlaku, dochází ke spalování materiálu. Termoplasty naopak měknou. Při obrábění plastických hmot je nutné zajistit dobrý odvod třísek a intenzivní chlazení, které je většinou prováděno stlačeným vzduchem. [30]

Při obrábění reaktoplastů vznikají krátké, lámavé třísky. Dlouhé, dobře oddělitelné třísky pak vznikají u termoplastů. Ve srovnání s kovy mají plasty dvakrát až třikrát menší řezný odpor a spotřebují tak méně energie. Při obrábění plastických hmot mohou být voleny vyšší řezné rychlosti (graf 3.1).

	Řezná rychlost [m/min]			Posuv [mm/min]		
	Soustružení	vrtání	frézování	soustružení	vrtání	frézování
Duromery	200–250	60–80	200–500	0,1–0,3	0,1	0,1–0,3
Tvrdé PVC	1000–1500	200	až 1000	0,1–0,2	0,1–0,5	0,3
Polyamidy	300–1000	až 100	až 1000	0,1–0,3	0,1–0,5	0,3

Tab. 3.4 Vybrané řezné podmínky při obrábění plastů [30]

Nízký modul pružnosti plastů a nižší tuhost obrobku může komplikovat upínání i samo obrábění. Vhodné jsou nižší řezné a upínací síly, působící ve více bodech. Tenkostěnné ploché díly lze upnout vakuovými deskami a pro tenkostěnná pouzdra se používají upínací trny z důvodu zabránění deformacím. [31]



Graf 3.1 Maximální hranice teplot pro použití plastických hmot a kovů [30]

3.3.2 Obrábění keramiky

Keramika, nejstarší konstrukční materiál je dnes při vyztužení vláknou používán v mnoha oblastech strojírenství, energetiky a technologie. Například pro neprůstřelné vesty, spalovací komory proudových letadel, lopatky čerpadel, brzdové kotouče automobilů, vysoce namáhaná ložiska, těsnící kroužky, ozubená kola, koncové měrky a tvářecí a obráběcí nástroje. Součásti z konstrukčních keramik jsou vyráběny odléváním nebo lisováním. Třískové obrábění keramiky se v praxi využívá pouze v případech, kde je kladen důraz na dosažení větší přesnosti obrobku.

Výhody použití keramiky jako konstrukčního materiálu spočívají ve velké hodnotě modulu pružnosti, tvrdosti, žáruvzdornosti, nízké hmotnosti oproti kovům, malou teplotní roztažností a také v odolnosti vůči abrazi a proti korozi. Nevýhodou keramiky je její křehkost. Je velice citlivá na poškození povrchu vznikem povrchových trhlin.

Pro konečné obrábění keramiky nejsou vhodné nástroje s definovanou geometrií břitu (nástroje s břity z povlakovaných SK i z KNB). Jakost obrobku

plochy je špatná a zároveň odolnost proti opotřebení břitu je velmi malá. Většinou se keramika brousí, lapuje nebo honuje. Soustružení nebo frézování některých druhů keramiky se provádí s předehřevem materiálu před břitem nástroje pomocí laseru. [32]

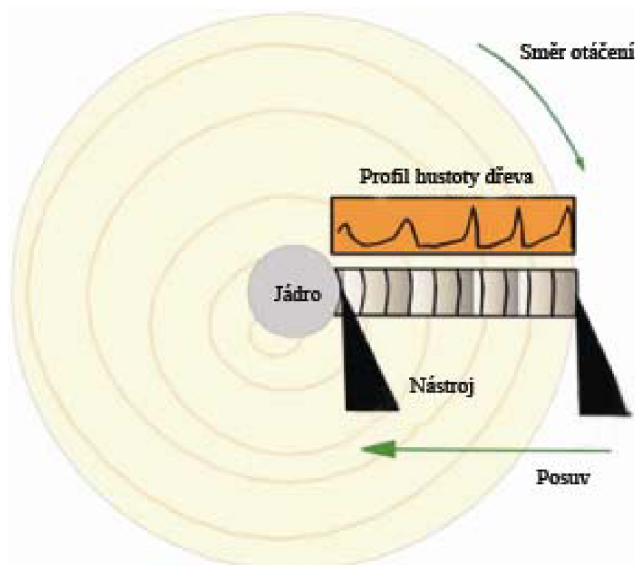
O obrobitelnosti keramiky vyztužené vlákny není v současnosti dostatek poznatků. Po zkouškách obrobitelnosti C/C – Si C keramiky vyztužené vlákny se ukázalo, že pro vrtání děr jsou vhodné stopkové trubkové diamantové brousící nástroje s přívodem chladicí kapaliny tělesem nástroje. Materiál je odebírán procesem iniciace a šíření mikrotrhlin, zrna jsou namáhána plastickou deformací, vznikající při tváření vzniklé třísky. [32]

Z posledních výzkumů na North Carolina State University vyplývá, že právě testovaný nový způsob obrábění keramických materiálů za užití malého elektrického napětí může být daleko jednodušší a levnější. Jedná se o intenzitu mezi 25 a 200 volty na centimetr. Toto elektrické napětí vyvolá změny v atomové vazbě a umožní jednotlivým krystalům jednodušší vzájemný posuv a materiál se stává plastický a mnohem snadněji obrobitelný. [33]

3.3.3 Obrábění dřeva

Existují dva základní způsoby obrábění dřeva. Prvním z nich je beztržkové obrábění, odebíraný materiál je v tomto případě zároveň požadovaným výrobkem. U tržkového obrábění vzniká vedlejší produkt ve formě třísek.

Při obrábění dřeva záleží na směru, kterým je obráběno. Dřevo by se mělo vždy obrábět ve směru vláken. Především pak u dřeva se zvlněnými vlákny jako je například borovice, nebo u sukovitých druhů dřeva, odklon od obrábění ve směru vláken ztěžuje proces obrábění. Na obr. 3.10 je vidět, jak se hustota dřeva zvyšuje v oblastech kolem letokruhů. Velký vliv na obrobitelnost dřeva má kromě jeho druhu také vlhkost. Obrobitelnost suchého a zdravého dřeva je ve srovnání s vlhkým dřevem, prorostlým houbami daleko jednodušší.



Obr. 3.10 Vliv nestálé hustoty dřeva na řezné síly [42]

obráběný materiál	měkké dřevo	tvrdé dřevo
řezná rychlost [m/min]	3000–4800	2400–3600

Tab. 3.5 Doporučené hodnoty řezných rychlostí [43]

Obecně se při obrábění dřeva doporučuje volit vyšší řezné rychlosti (tab. 3.5). U spodních truhlářských frézek pak řezná rychlost nesmí být nikdy nižší než 2400 m/min. Zvyšuje se pak nebezpečí zpětného rázu obrobku. [43]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část projektu se zabývá experimenty vedoucími k výběru vhodného objektivu a osvětlení pro snímání vysokorychlostní digitální kamerou TroubleShooter 1000, jejíž schéma a popis je obsažen v příloze č. 3. Získané poznatky jsou následně využity pro co nejkvalitnější a nejdetailnější záznam tvorby třísky při čelním frézování. Tento experiment proběhl na pětiosém obráběcím centru a tříosé frézce, nacházející se v soustružnické dílně FSI VUT v Brně.

4.1 Parametry použitých objektivů

Ústav strojírenské technologie vlastní kromě vysokorychlostní digitální kamery TroubleShooter 1000 od firmy Fastec Imaging také 6 různých objektivů s C-závitem (obr. 4.1), které je možno použít pro snímání tímto zařízením. Výběr toho správného objektivu pro určitý děj je velice důležitý a závisí především na ohniskové vzdálenosti a světlosti clony objektivu. Následující kapitoly se zabývají porovnáním jednotlivých objektivů a výběrem toho nejvhodnějšího na základě provedeného experimentu.



Obr. 4.1 Objektivы pro kameru TroubleShooter 1000

4.1.1 Ohnisková vzdálenost

Na výběru správného a kvalitního objektivu záleží stejně jako na použitém osvětlení při expozici či výběru kamery, na kterou je objektiv nasazen. Je známo, že ideální objektiv neexistuje, a tak je třeba vždy podle požadovaných parametrů zvolit ten nejvhodnější pro danou situaci. Primárním účelem objektivu je dopravení světla na senzor, tento klíčový parametr objektivu udává světelnost. Zorný úhel, jenž je objektivem přenášen na senzor, je definován ohniskem objektivu.

Je všeobecně známo, že objektivы se dělí do dvou základních skupin – s proměnným ohniskem (tzv. zoomy) a s pevným ohniskem. V technických parametrech uváděné ohnisko objektivu však platí jen při zaostření objektivu na nekonečno. Při zaostření na kratší vzdálenost bude mít objektiv ohnisko vždy o něco delší. Nejlepší a nejsvětelnější jsou objektivы s pevným ohniskem, protože jejich konstrukční složitost, zejména počet vzájemně pohyblivých součástí, je o řád nižší než u zoomů. [34]

Z hlediska ohniskové vzdálenosti (f) lze běžné objektivy rozdělit na [34]:

- rybí oka (8 mm) – extrémně širokoúhlé objektivy s úmyslnou deformací perspektivy;
- širokoúhlé (10–30 mm) – interiéry, architektura, krajina, reportáž;
- střední (základní) ohniska (30–100 mm) – základní objektivy, přirozené zobrazení, portrét;
- normální objektiv (50 mm) – odpovídá zornému úhlu lidského oka;
- teleobjektivy (100–300 mm) – portrét, reportáž, krajina;
- silné teleobjektivy (>300 mm) – příroda, sport;
- makroobjektivy – měřítko 1:1, liší se minimální zaostřovací vzdáleností
- Tilt-Shift – architektura (korekce sbíhání linií do „flašky“)
- mirror – silné teleobjektivy (600 mm) konstruované na principu hvězdářského dalekohledu.

Ústav strojírenské technologie má k dispozici 6 objektivů (tab. 4.1), které mohou být použity pro snímání vysokorychlostní digitální kamerou TroubleShooter 1000. Pět objektivů má pevné ohnisko v rozmezí od 3,6 mm do 50 mm a jeden má proměnné ohnisko (tzv. zoom). U objektivů s proměnným ohniskem platí uváděná světelnost při zaostření objektivu na nekonečno, světelnost je vždy horší při zaostření na kratší vzdálenosti.

Pořadové číslo objektivu	1	2	3	4	5	6
Ohnisková vzdál. f [mm]	3,6	6	12	25	50	12,5–75
Světelnost	f/1,6	f/1,2	f/1,2	f/0,95	f/0,95	f/1,8

Tab. 4.1 Parametry jednotlivých objektivů

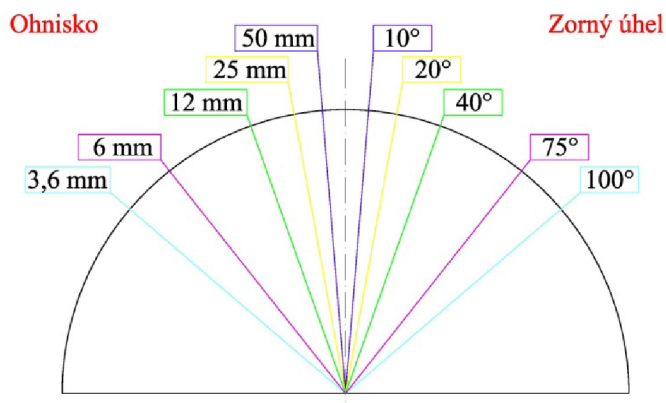
4.1.2 Zorný úhel

Velikost zorného úhlu se odvíjí od ohniskové vzdálenosti objektivu a od velikosti senzoru kamery. Zorný úhel se zvětšuje se zmenšující se ohniskovou vzdáleností a se zvětšující se velikostí senzoru. V případě vysokorychlostní kamery užitá v projektu má senzor rozměry 9×9 mm. Níže na obrázku jsou uvedeny velikosti zorného úhlu pro jednotlivé použité objektivy, jež byly vypočítány dle vzorce (4.1).

$$Z = 2 \times \arctg \left(\frac{S_{hv}}{f \times 2} \right) \quad (4.1),$$

kde je: Z – zorný úhel objektivu [°],

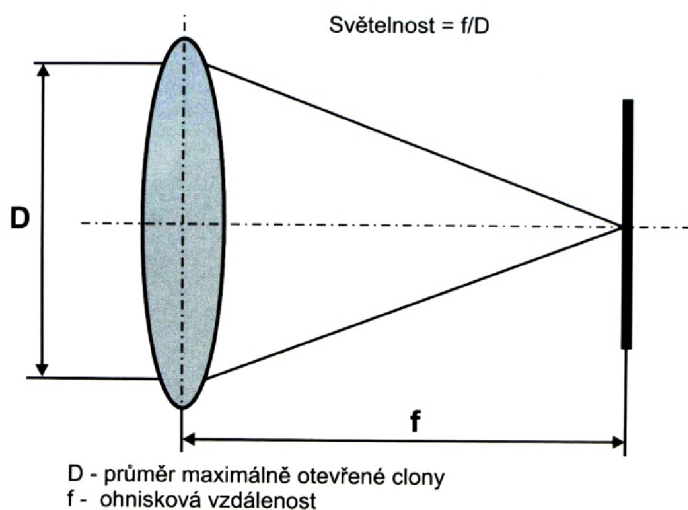
S_{hv} – rozměr senzoru [mm], po dosazení horizontálního rozměru senzoru se vypočítá horizontální vyzařovací úhel a naopak,
 f – ohnisková vzdálenost [mm].



Obr. 4.2 Vztah ohniskové vzdálenosti a zorného úhlu objektivu

4.1.3 Světelnost

Světelnost neboli minimální clonové číslo neboli maximálně otevřená clona je klíčový parametr každého objektivu. Zjednodušeně řečeno udává, kolik světla je objektiv schopen dopravit na senzor. Fyzikálně je světelnost definována jako poměr ohniskové vzdálenosti (f) ku průměru maximálně otevřené clony objektivu (D). Clona je jediný parametr, který určuje hloubku ostrosti snímku bez vlivu na jeho kompozici. [34]



Obr. 4.3 Znárodnění světelnosti objektivu [34]

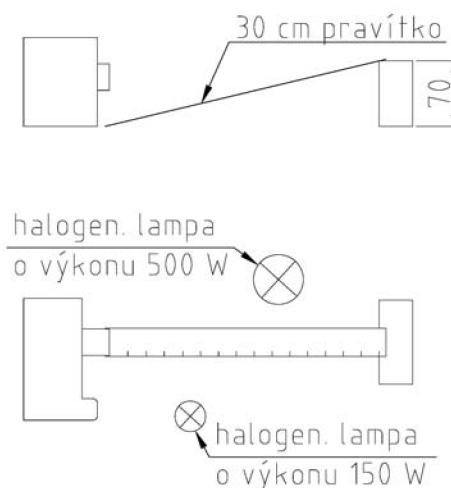
4.2 Výběr objektivu pro měření

Z šesti objektivů (tab. 4.1) byl pro detailní snímání nástroje a třísky při frézování vybrán jeden na základě požadavků na vlastnosti objektivu, kterými jsou:

- hloubka ostrosti záběru,
- kvalita a jasnost obrazu,
- světelnost,
- zorný úhel objektivu.
- detail snímku

První měření, které bylo provedeno za účelem srovnání těchto vlastností u jednotlivých objektivů, probíhalo za osvětlení dvěma halogenovými lampami o výkonu 500 W a 150 W. Podstata tohoto pokusu spočívala v testování a porovnávání hloubky ostrosti a celkové kvality zaznamenaných snímků jednotlivých objektivů. Snímaným předmětem bylo podložené 30 cm dlouhé pravítko (obr. 4.4). Vysokorychlostní digitální kamera, respektive software Fastec Imaging CamLink, který slouží k zápisu a analýze snímků, měl nastaveny následující parametry:

- rychlost nahrávání 250 fps,
- rychlost přehrávání 30 fps,
- rychlost závěrky 1x,
- spouštěcí bod „end“,
- velikost snímku 640×480,
- světelný zdroj žárovka.



Obr. 4.4 Schéma rozmiřtění jednotlivých objektů při snímání

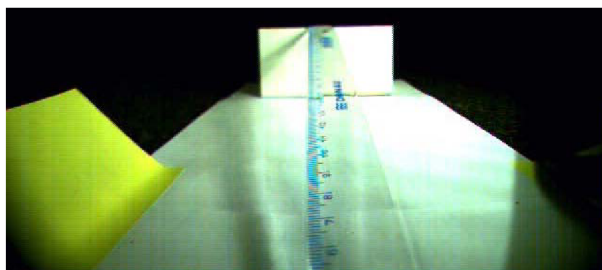
Druhou částí experimentu, provedeného za účelem porovnání objektivů, bylo zjištění krajních vzdáleností, na které mohou jednotlivé objektivy kvalitně zaostřit předmět, jímž byla břitová destička upevněná na frézovací hlavě. Tohle měření proběhlo za stejného osvětlení jako předchozí a břitová destička byla umístěna na podložku, která v posledním porovnávání podpírala třiceticentimetrové pravítko.

U všech objektivů byly zjištěny minimální použitelné vzdálenosti mezi objektivem a břitovou destičkou. Limit pro maximální vzdálenost předmětu od objektivu byl stanoven na 1500 mm. Už i tato hodnota je však příliš velká a při detailním snímání nepoužitelná. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce (tab. 4.2).

Pořadové číslo objektivu	1	2	3	4	5	6
Ohnisková vzdál. f [mm]	3,6	6	12	25	50	12,5–75
Minimální vzdál. [mm]	10	30	105	520	570	880
Maximální vzdál. [mm]	800	1000	1400	>1500	>1500	>1500

Tab. 4.2 Minimální a maximální pozorovací vzdálenosti

Jako první byl pro snímání pravítka použit objektiv s ohniskovou vzdáleností 3,6 mm a s nepříliš dobrou světelností $f/1,6$ (obr. 4.5). Zorný úhel tohoto objektivu je 100° . Jedná se o širokoúhlý objektiv s deformací perspektivy. Ideální vzdálenost od snímaného objektu leží mezi 20 a 100 mm. Při těchto vzdálenostech objektiv poskytuje dostatečně detailní záběr. Nelze jej použít při snímání z větších vzdáleností z důvodu velikého zmenšení snímaného předmětu.



Obr. 4.5 Snímek vyhotovený objektivem s ohniskovou vzdáleností 3,6 mm

Na obrázku 4.6 je záběr vysokorychlostní kamery skrze objektiv s ohniskovou vzdáleností 6 mm a světelností $f/1,2$. Tuto světelnost má i objektiv s ohniskem vzdáleným 12 mm (obr. 4.7). Při srovnání obou snímků je patrné, že osvětlení u nich je při 250 fps dostatečné, snímání při 1000 fps je u objektivů se světelností $f/1,2$ již na hraně pozorovatelnosti. Hloubka ostrosti záběru a kvalita je u objektivu č. 3 výrazně lepší. Oba objektivy pak dokáží zaostřit na poměrně krátkou vzdálenost, což je výhodné pro získání detailního záběru. Optimální vzdálenost od zaznamenávaného předmětu je pro objektiv č. 2 mezi 50 a 200 mm, pro objektiv č. 3 pak 120 až 500 mm.

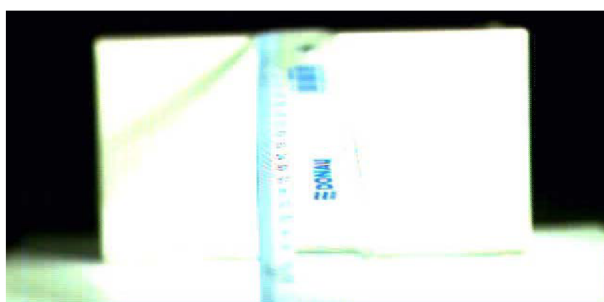


Obr. 4.6 Snímek vyhotovený objektivem s ohniskovou vzdáleností 6 mm



Obr. 4.7 Snímek vyhotovený objektivem s ohniskovou vzdáleností 12 mm

Následující objektivy bylo nutné posunout dále od měřeného objektu. Objektiv na obrázku 4.8 byl posunut o 30 cm dále od pravítka a objektiv č. 5 byl posunut ještě o dalších 20 cm (obr. 4.9). Nebylo zde však dosaženo stejně dobré hloubky ostrosti obrazu, jako u předešlých objektivů. Na snímcích je patrná velká světelnost, jež se shodně rovná hodnotě $f/0,95$. Výhoda objektivu s ohniskovou vzdáleností 50 mm spočívá v možnosti snímání procesu řezání z natolik bezpečné vzdálenosti, aby bez použití ochranného krytu nebyly objektiv ani kamera poškozeny a díky dobré světelnosti, také v možnosti snímání obrábění rychlostí 1000 fps. Objektiv č. 4 dokáže zaznamenávat relativně ostré snímky s dobrou rozpoznatelností a detailem pozorovaného předmětu přibližně ve vzdálenosti od 550 do 900 mm, objektiv č. 5 pak 600 až 1200 mm. Zde však již záleží na individuálních požadavcích na jednotlivé výstupy měření.



Obr. 4.8 Snímek vyhotovený objektivem s ohniskovou vzdáleností 25 mm



Obr. 4.9 Snímek vyhotovený objektivem s ohniskovou vzdáleností 50 mm

Posledním testovaným objektivem je objektiv s proměnnou ohniskovou vzdáleností v rozmezí 12,5–75 mm (obr. 4.10). Snímek se při prvním pohledu na obrázek níže jeví jako jeden z nejostřejších, avšak u tohoto typu objektivů je problém ve světelnosti, jež má hodnotu $f/1,8$. U objektivů pro standardní fotoaparáty by tato hodnota byla více než dobrá, avšak pro vysokorychlostní kameru s malým snímacím senzorem není takováto světelnost při pořizování záznamu vyšší snímkovací frekvencí dostatečná. Jelikož cílem tohoto projektu je získat snímky při frekvenci 250–1000 fps za stejných nebo mírně lepších světelných podmínek, tento objektiv nenajde ve snímání třískového obrábění uplatnění. Dalším negativem tohoto objektivu je minimální vzdálenost na kterou dokáže zaostřit. Jedná se o hodnotu 880 mm.



Obr. 4.10 Snímek vyhotovený objektivem s proměnnou ohniskovou vzdáleností 12,5–75 mm

4.3 Možnosti osvětlení obráběcích strojů

Pracovní prostor obráběcího centra MCV 1210 je osvětlen dvěma zářivkami, jejichž výkon je dostatečný pro běžné pozorování obrábění tohoto stroje. Při zaznamenávání dějů uvnitř obráběcího centra pomocí vysokorychlostní digitální kamery je však toto osvětlení absolutně nevyhovující. Nejen protože výkon těchto zářivek není dostačující, ale především jejich blikání, vztahující se k frekvenci napájecí sítě je nepřijatelné.

4.3.1 Základní specifikace strojů

Vertikální obráběcí centrum: MCV 1210

Výrobce: Tajmac – ZPS, a. s., Zlín

Řídicí systém: Siemens Sinumerik 840D

Pojezdy: osa X – 1000 mm

osa Y – 1800 mm

osa Z – 600 mm

rozměr pracovního stolu: 1200 × 1000 mm



Obr. 4.11 Vertikální obráběcí centrum MCV 1210 [40]

Univerzální vertikální frézka s CNC řízením: FV 25 CNC A

Výrobce: Obráběcí stroje Olomouc, spol. s r. o.

Řídicí systém: Heidenhain iTNC530

Pojezdy: osa X – 760 mm

osa Y – 355 mm

osa Z – 152 mm

rozměr pracovního stolu: 1300 × 350 mm



Obr. 4.12 Univerzální frézka FV 25 CNC A [41]

4.3.2 Výběr vhodného způsobu osvětlení

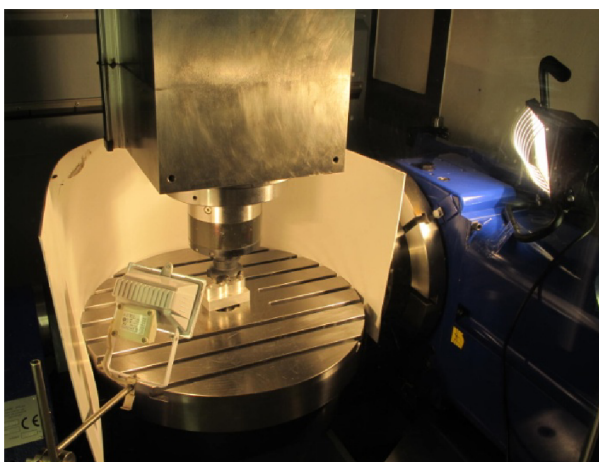
Předmětem tohoto pokusu bylo zjištění, jak nejlépe osvětlit pracovní část obráběcích strojů. Z důvodu maximálního omezení spotřeby elektrické energie se tento experiment prováděl s pomocí 150W a 500W halogenové lampy, které nasvécovaly frézovací hlavu z různých úhlů a zároveň byly stříhány stínící materiály, které měly za úkol rozptýlit a mírnit světlo. Na vysokorychlostní digitální kameru, snímající různé způsoby osvětlení byl nasazen objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm a světelností $f/0,95$. Tento objektiv byl vybrán, jelikož jeho světelnost $f/0,95$ zaručuje vysokou propustnost světla na snímač. Také je s ním možno zachycovat snímky z poměrně velké a zároveň bezpečné vzdálenosti, kde již nehrozí poškození vysokorychlostní digitální kamery odlétávajícími třískami a zároveň kamera není přehřívána velkým teplem, které halogenové lampy vyzařují.

Pokus probíhal na pětiosém obráběcím centru a rychlost vřetena, spuštěného nad pracovním stolem byla nastavena na 300 min^{-1} .

Vysokorychlostní digitální kamera byla nastavena následovně:

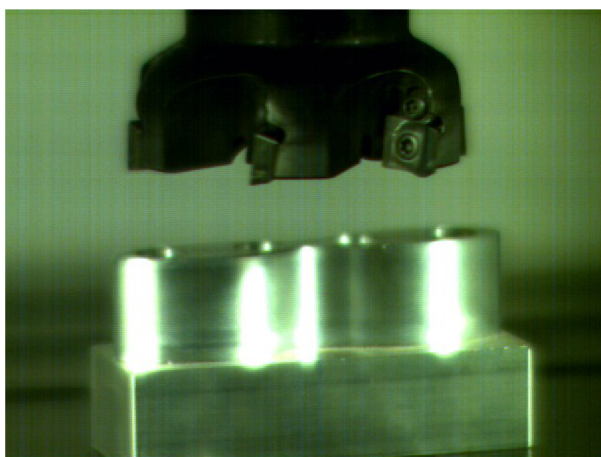
- rychlost nahrávání 1 000 fps,
- rychlost přehrávání 30 fps,
- rychlost závěrky 1x,
- spouštěcí bod „end“,
- velikost snímku 640×480 ,
- světelný zdroj žárovka.

Na počátku byl objekt, jehož povrch se skládal jak z rovných, tak i ze zaoblených ploch, nasvícen následujícím způsobem. Ze vzdálenosti 0,3 m z levé přední strany byl umístěn 150W halogen, který přímo nasvécovoval oblast zájmu, 500W halogen pak byl umístěn vpravo zepředu, ve vzdálenosti 1 m od objektu (obr. 4.13) a mírnil rušivé stíny méně výkonného světla.



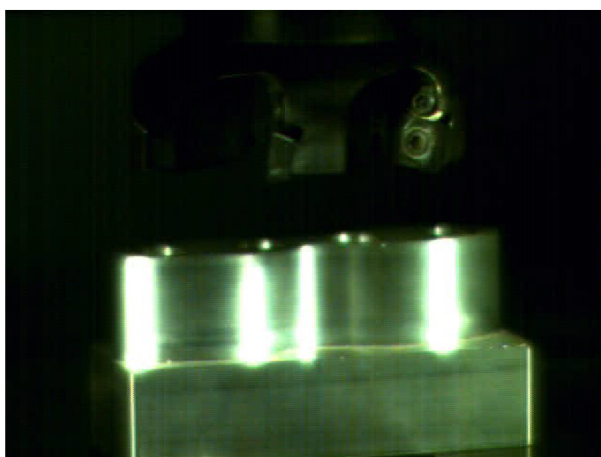
Obr. 4.13 Způsob rozmístění světel při osvětlení zepředu

Při prvním snímání bylo za obrobek a vřeteno zasunuto bílé pěnění PVC o tloušťce 3 mm (obr. 4.14). Toto PVC odráželo světlo z halogenových lamp a vytvořilo pozadí, na kterém dobře vynikl jak obrobek, tak i frézovací hlava. Snímek vytvořený pomocí tohoto osvětlení je poměrně ostrý a v rámci vysoké snímkovací frekvence 1000 fps vyhovující. Přestože byl zadán vstupní parametr světelného zdroje „žárovka“, na většině snímků je patrný nazelenalý odstín celého snímku, který je způsoben omezenými možnostmi snímáčního zařízení.



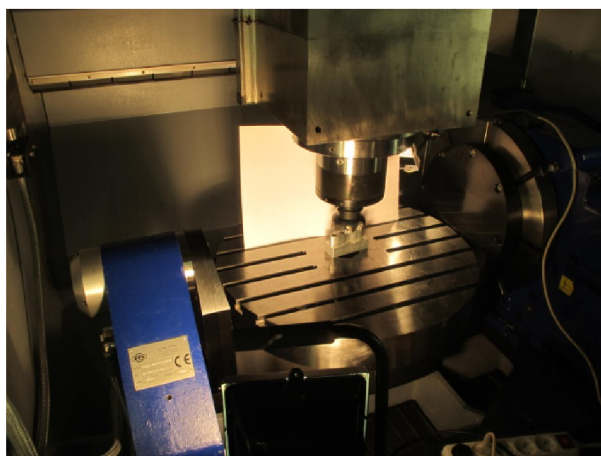
Obr. 4.14 Nasvícení zepředu PVC v pozadí

Snímání bylo opakováno se stejným nasvícením, avšak bez pěnění komatexu v pozadí. Z obrázku 4.15 je patrné, že tento způsob osvětlení není použitelný, jelikož je zde viditelný pouze obrobek. Pozadí je velice tmavé a působí rušivě na celkový dojem z tohoto snímku. Frézovací hlava také splývá s pozadím a ze snímku nelze rozpoznat její obrys.



Obr. 4.15 Nasvícení zepředu

Po získání snímků při osvětlení z přední strany byly halogenové lampy přemístěny. Silnější 500W lampa zůstala vepředu, jen byla přesunuta vlevo. Vzdálenost 1 m byla přitom zachována. Méně výkonné světlo bylo umístěno za snímáňý objekt (obr. 4.16).



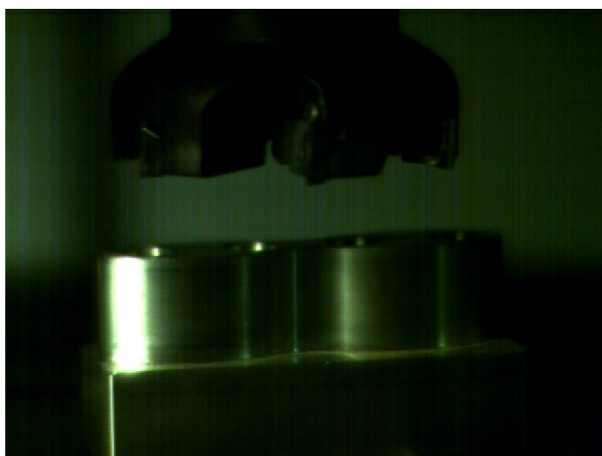
Obr. 4.16 Způsob rozmístění světel při osvětlení zezadu

Při první zkoušce osvětlení po přesunutí halogenů byl mezi 150W světlo a obrobek vsunut kladívkový papír. Halogen byl namířen zpoza kladívkového papíru přes obrobek do objektivu vysokorychlostní digitální kamery. Kladívkový papír přitom sloužil jako rozptylovač světla, takže světlo dopadající na snímač skrze objektiv nebylo příliš intenzivní. Při pohledu na obrázek 4.17 je vidět, že by bylo vhodné za kladívkovým papírem umístit více světel, aby nevznikaly stíny jako v pravé části snímku.



Obr. 4.17 Nasvícení zezadu přes kladívkový papír

Poslední způsob osvětlení spočíval v ponechání 100W světla za obrobkem a odstranění kladívkového papíru. Aby však nedošlo k přesvětlení záznamu, byl obrobek osvětlen pod mírným úhlem tak, že lampa byla namířena mimo objektiv kamery. Tento záznam (obr. 4.18) je velice tmavý a stěží použitelný.



Obr. 4.18 Nasvícení zezadu

Z jednotlivých způsobů osvětlení snímané oblasti obráběcího centra vyšlo nejlépe nasvícení zepředu při použití pěněného PVC v pozadí (obr. 4.14). Tento způsob poskytuje nejlépe osvětlený, poměrně ostrý záznam s nejnižším šumem. Přestože u tohoto způsobu osvětlení stejně jako u všech ostatních je na obrobku vidět odraz halogenového světla od lesklé plochy obrobku, lze tento nedostatek odstranit použitím obrobku hranatého tvaru a jeho natočením pod patřičným úhlem, který bude eliminovat vznik takovýchto odrazů.

4.4 Tvorba třísky při čelním frézování

Tvar a vlastnosti třísky nezáleží jen na řezných podmínkách a vlastnostech materiálu, ale také na velikosti a poloze frézovací hlavy. Doporučený průměr frézy je o 20 až 50 % větší než šířka obrobku. Fréza by měla být umístěna vždy mimo střed obrobku, jinak hrozí vibrace a poškození vřetena stroje. Ideální je umístění blízko středu, jelikož je řez jednotlivými VBD v tomto místě nejkratší a získá se stálejší směr působení sil. Při nutnosti provedení více průchodů, by měl být poměr průměr/šířka přibližně 4/3. Díky správnému zatížení třísky se tak zlepší utváření třísky. [29]

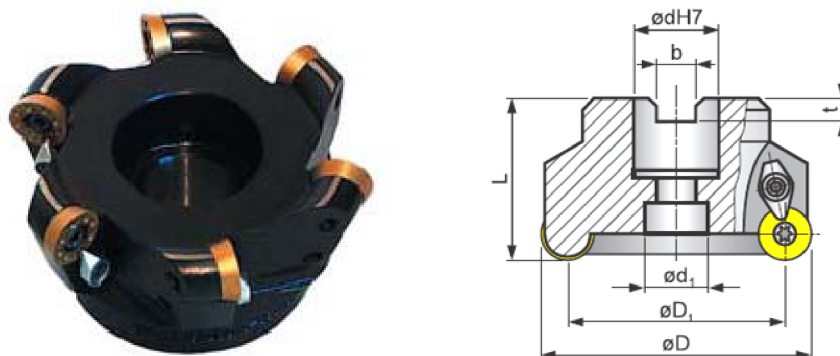
4.4.1 Plán experimentu

Následující vysokorychlostní snímání VBD upnuté na frézovací hlavu, vychází ze správné volby objektivu a osvětlení. Proces obrábění je nasvícen minimálním počtem zdrojů světla s nevelkým výkonem, z důvodu úspory energií. Síly působící na nástroj při takovémto způsobu obrábění jsou již velmi dobře známy, a tak cílem experimentu není sledování silového zatížení působícího mezi nástrojem a obrobkem, nýbrž tvaru a způsobu utváření třísky.

Záznam kvalitního snímku vysokorychlostní digitální kamerou vlastněnou ÚST při snímkovací frekvenci vyšší než 250 fps je velice obtížný. U procesu frézování také přibývá problematika, týkající se správného zaostření na břitovou destičku, měnící svou polohu. Cílem práce je tedy získání co nejvyššího záznamu při snímkování 1000 fps.

4.4.2 Použitý nástroj

Zvoleným obráběcím nástrojem je čelní fréza 80A05R-SMORD16X-B (obr. 4.19) s pěti kruhovými VBD RDEX 1604MOSN-12 (obr. 4.20) od firmy Pramet Tools s. r. o. Výhodou kruhových VBD oproti ostatním je pevnější ostří s několikanásobným pootočením a zvýšený účinek zeslabování třísky pro žáruvzdorné slitiny. Zatížení třískou a úhel nastavení se na těchto VBD mění s hloubkou řezu.

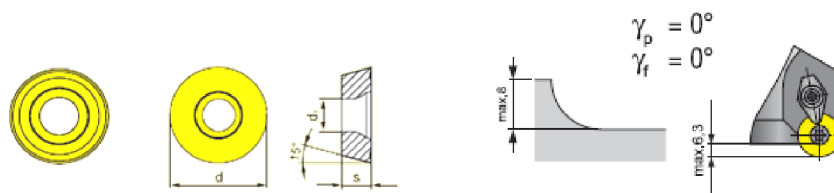


Obr. 4.19 Použitá fréza s kruhovými VBD

Rozměry [mm]

D	D_1	dH7	d_1	L	b	t	Z	m [kg]
80	64	27	38	50	12,4	7	5	1,4

Tab. 4.3 Rozměry frézy s kruhovými VBD [z38]



Obr. 4.20 Schéma použitých VBD

Rozměry [mm]

d	d_1	s
16	5,5	4,76

Tab. 4.4 Rozměry VBD [z38]

4.4.3 Obráběný materiál

Rozměr obrobku: 90x90x50 [mm]

Ocel 12 050 – uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení (označení: ČSN 41 2050). Jedná se o normalizačně žíhanou ocel s obtížnou svařitelností. Využívá se na hřídele turbokompresorů, čerpadel, těžních strojů, elektromotorů a dynam, na větší ozubená kola, šneky, automobilové klikové

hřídele, ojnice, páky řízení, závěsy pružin, vřetena soustruhů, vrtací tyče nebo pro frézovací trny. Její chemické složení je uvedeno v tabulce 4.5.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42	0,50	0,17	max.	max.	max.	max.	max.
0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,04	0,04

Tab. 4.5 Chemické složení oceli 12 050 dle ČSN [%]

4.4.4 Řezné podmínky

a_p [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]
0,5-4	0,2-0,4	220

Tab. 4.3 Vyhledané parametry pro užití VBD

Zvolené hodnoty:

$$a_p = 1 \text{ mm}$$

$$f_z = 0,2 \text{ mm}$$

Výpočet otáček vřetena n

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_1} = \frac{220 \cdot 1000}{\pi \cdot 80} = 875 \text{ min}^{-1}$$

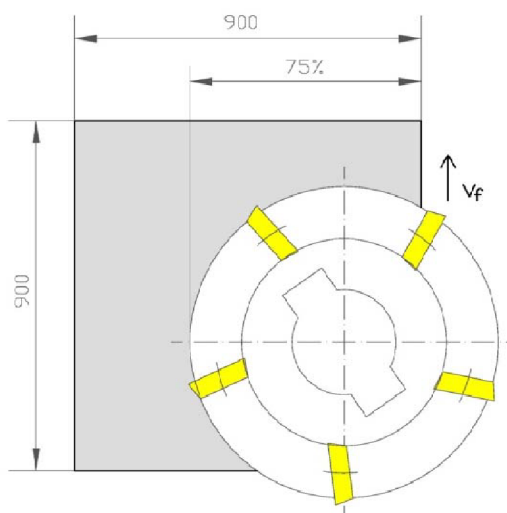
Výpočet rychlosti posuvu stolu v_f

$$v_f = n \cdot f_z \cdot z_n = 875 \cdot 0,2 \cdot 5 = 875 \text{ mm/min}$$

4.4.5 Popis a vyhodnocení experimentu

Měření probíhalo v soustružnické dílně C2, FSI VUT v Brně, ÚST Odbor technologie obrábění. Experiment spočíval ve sledování obráběcího procesu na univerzální tříosé vertikální frézce pomocí vysokorychlostní digitální kamery TroubleShooter 1000. Obráběný materiál, ocel 12 050, byl uchycen pomocí svěráku k pracovnímu stolu stroje. Následoval výběr optimálních řezných podmínek pro čelní frézování (kapitola 4.4.4). Z důvodu vyšší ekologičnosti a maximálního snížení nákladů při obráběcím procesu, byla zvolena metoda suchého obrábění. Umístění frézovací hlavy vůči obráběnému materiálu je naznačeno na obrázku 4.21.

Na základě předešlých experimentů (kapitola 4.2) byl vybrán objektiv s ohniskovou vzdáleností 12 mm, který byl pro provedení daného experimentu vyhodnocen jako nejvhodnější, protože nejlépe zachycuje detail a má dostatečnou hloubku ostrosti záběru. Jelikož pro získání maximálního detailu vyžaduje tento objektiv snímání z velmi malé vzdálenosti, byl vyroben víceúčelový ochranný kryt z čírého PVC o tloušťce 3 mm (příloha 1) bránící třískám vzniklým při obrábění v poškození citlivé vysokorychlostní kamery. Z důvodu jednoduchosti připevnění tohoto krytu k vřeteníku tříosé frézky byl experiment prováděn právě na tomto stroji (obr. 4.22).



Obr. 4.21 Schéma umístění frézy při obrábění

Experiment probíhal za mírného denního světla, procházejícího dovnitř střešními světlíky a okny dílny. Dílna byla navíc osvětlena umělým osvětlením, které však nepokrývalo nároky vysokorychlostní kamery. Bylo tak nutné použít přídavné světelné zdroje. Uspořádání těchto světel vychází z první varianty osvětlení v kapitole 4.3.2. Jedná se o postavení 150W halogenu z levé přední strany a umístění 500W halogenu vpravo zepředu. Dále je za obráběný materiál přichyceno pěněné PVC, které v pozadí pozitivně ovlivňuje světelné podmínky (obr. 4.13).



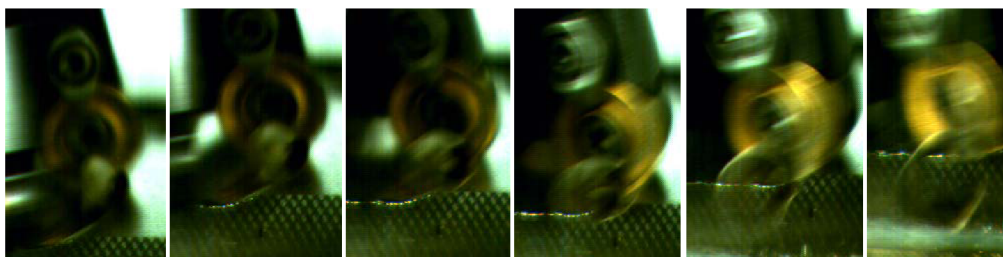
Obr. 4.22 Pohled na kryt, upevněný na vřeteník

Kamera byla pevně uchycena pomocí šroubového spoje ke svěráku, držícímu také obráběný materiál. Takto pak bylo možné sledovat proces obrábění ze vzdálenosti 120 mm. Pomocí USB rozhraní byla kamera propojena s notebookem, obsahujícím software Fastec Imaging CamLink který po spuštění řezného procesu zaznamenával utváření třísky.

Nastavení vysokorychlostní digitální kamery bylo následující:

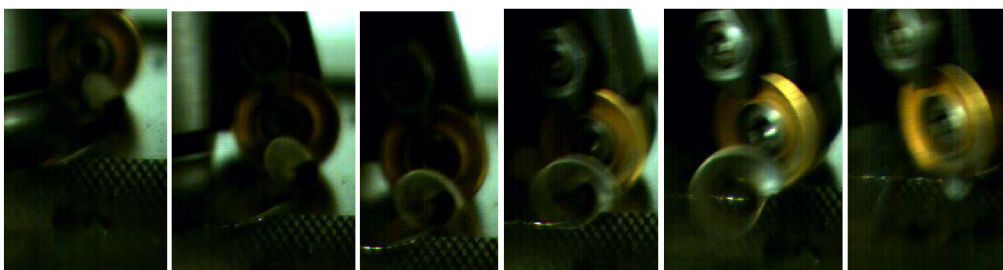
- rychlost nahrávání: 500/1 000 fps,
- rychlost závěrky: 1x,
- spouštěcí bod: 50 %,
- velikost snímku: 640×480 pixelů,
- světelný zdroj: umělé osvětlení.

Pro první měření byla vysokorychlostní kamera nastavena na snímkování 500 fps. Záznam je dosti tmavý a při zastavení sekvence je vidět, že odcházející třísky a pohybující se břitová destička jsou velice rozmazané. Pro analýzu tvorby třísky jsou tyto snímky nepoužitelné. Výběr posloupných snímků z pořízené sekvence je zaznamenán na obr. 4.22.



Obr. 4.22 Sekvence zaznamenaná při 500 fps

U následného experimentu byla rychlost snímkování 1000 fps. I přes horší osvětlení zaznamenané oblasti je při přehrání videosouboru tříska daleko ostřejší (obr. 4.23). Na prvním snímku je břitová destička dosti daleko a je špatně pozorovatelná. Na dalších snímcích však již získává na ostrosti a nejlépe pozorovatelná je na třetím obrázku zleva. Nachází se právě ve vzdálenosti, na kterou byl objektiv zaostřen. Následně na dalších snímcích jsou však destička i třísky hůře zachyceny a na posledním jsou již velice špatně pozorovatelné.



Obr. 4.23 Sekvence zaznamenaná při 500 fps

Jelikož je objektiv zaměřen pouze na určitou vzdálenost, destičky a třísky do této oblasti vstoupí pouze během krátkého okamžiku, a tak není možné ostře zaznamenat celý průběh utváření třísky. Tento problém by mohl být částečně eliminován použitím stopkové frézy malého průměru. U této frézy by však mohl nastat problém spočívající v složitém záběru detailu ještě menší třísky, než v případě frézovací hlavy.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce obsahuje:

- popis využití vysokorychlostních digitálních kamer v různých průmyslových odvětvích a rozbor jejich možností;
- charakteristiku a porovnání různých světelných zdrojů používaných pro osvětlování dějů, snímaných vysokorychlostními digitálními kamerami;
- vyhodnocení použitelnosti osvětlovačů dle světelného toku a nákladů spojených s pořízením a provozem těchto světel;
- testování objektivů používaných pro záznam vysokorychlostní kamerou TroubleShooter 1000 a následné vyhodnocení a popis jejich možností;
- porovnání a výběr optimálního objektivu pro vysokorychlostní záznam čelního frézování;
- stanovení nejvhodnějšího osvětlení při snímání čelního frézování z minimální vzdálenosti za použití minimálního počtu zdrojů světla;
- návrh a výrobu jednoduchého krytu z čirého PVC, určeného nejen pro pořízení detailního záběru na tříosé frézce FV 25 CNC A;
- záznam vysokorychlostního videa procesu utváření třísky při čelním frézování při snímkovací frekvenci 500 a 1000 snímků za vteřinu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. NĚMEČKOVÁ, Alena. Kontrola nepřístupných prostor a využití vysokorychlostního videa při kontrole strojů a zařízení. *Povrcháři* [online]. 2005, č. 5, [cit. 2010-02-02]. Dostupný z WWW: <http://povrchari.cz/ke-stazeni/200905_povrchari.pdf>. ISSN 1802-9833.
2. *Motion engineering company, inc.* [online]. 2007 [cit. 2010-01-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.highspeedimaging.com/index.cfm>>.
3. KOMENDA, Jan; NOVÁK, Miroslav. *Ruce vzhuru: Co je vysokorychlostní kamera?* [online]. 2008 [cit. 2010-05-22]. Rucevzhuru.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.rucevzhuru.cz/index.php/component/content/article/53-rychlokamery/133-kamery.html>>.
4. MCLEISH, Todd. World's fastest camera shows how things break apart. *The University pacer* [online]. 2000, no. 9, [cit. 2010-01-27]. Dostupný z WWW: <<http://advance.uri.edu/pacer/september2000/story9.htm>>.
5. TAKAYAMA, Kazuyoshi. *Shimadzu.com: Shockwave recorded in one-millionth of a second* [online]. 2005, last updated 2007-08-20 [cit. 2010-05-22]. Shimadzu. Dostupné z WWW: <<http://www.shimadzu.com/products/test/hsvc/oh80jt0000001d6t-att/booe13-02.pdf>>.
6. VOHLÍDKOVÁ, Monika, et al. *Západočeská Univerzita v Plzni: Využití vysokorychlostní kamery při sledování poruchy hlasu* [online]. 2008, poslední změna 16.09.2008 [cit. 2010-02-02]. www.zcu.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.kiv.zcu.cz/~novyp/publ/orl-olomouc08.pdf>>.
7. *Ep.espacenet.com: video processor systems for ball tracking in ball games* [online]. 2007 [cit. 2010-05-22]. European patent office. Dostupné z WWW: <<http://v3.espacenet.com/publicationDetails/description?CC=WO&NR=0141884A1&KC=A1&FT=D&date=20010614&DB=&locale>>.
8. *Hawkeyeinnovations.co.uk: tennis* [online]. 2007 [cit. 2010-02-02]. Hawk-eye. Dostupné z WWW: <http://www.hawkeyeinnovations.co.uk/?page_id=1011>.
9. F. RAY, Sidney. *High Speed Photography and Photonics*. 2 nd edition. Bellingham (Washington): Sidney F. Ray, 1997. 393 s. Dostupné z WWW: <<http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/slomo.html>>. ISBN 0-8194-4527-4.
10. *Photron.com: information on high speed imaging* [online]. 2010 [cit. 2010-01-26]. Photron. Dostupné z WWW: <<http://www.photron.com/index.php?cmd=camera>>.
11. Analogová versus digitální kamera. *Automatizace* [online]. 2004, roč. 47, č. 11, [cit. 2010-01-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=397>>.
12. *Fen-net.de* [online]. 2002, last updated 2010-01-23 [cit. 2010-05-22]. PTS Walter Preiss technology systems. Dostupné z WWW: <http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/wp_frame.html>.

13. *Fastecimaging.com* [online]. 2006, last updated 2010-03-18 [cit. 2010-02-06]. Fastec imaging. Dostupné z WWW: <<http://www.fastecimaging.com/glossary.html>>.
14. PIHAN, Roman. *Fotografovani.cz: expozice* [online]. 2006-03-09 [cit. 2010-02-09]. Fotografovani.cz. Dostupné z WWW: <http://www.fotografovani.cz/art/fozak_df/rom_expozice1.html>.
15. HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. *Fyzika: elektromagnetické vlny – optika – relativita*. Brno: Vutium, 2000. 1198 s. ISBN 80-214-1868-0, ISBN 81-7196-213-9.
16. HAVLE, Otto. Strojové vidění IV: osvětlovače. *Automa* [online]. 2008, č. 4, [cit. 2010-03-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36988.pdf>>.
17. FISCHER, Jan; HAVLE, Otto. Osvětlovače pro systémy strojového vidění. *Automatizace* [online]. červenec – srpen 2005, roč. 48, č. 7 – 8, [cit. 2010-05-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=773>>.
18. FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. teorie obrábění a nástroje, s. 225. ISBN 80-214-2374-9.
19. BRYCHTA, Josef, et al. *Technologie II: 1. díl*. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2007. 126 s. ISBN 978-80248-1641-8.
20. BUMBÁLEK, B. – Fyzikální podstata řezání – Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, FSI [online], 2005, dostupné z [www:http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Opora05_Fyzikalni-podstata-rezani.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Opora05_Fyzikalni-podstata-rezani.pdf).
21. KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
22. AB Sandvik Coromant. *Produktivní obrábění kovů*. Sandviken: Elanders, 1997. 300 s.
23. COTTERELL, M; BYRNE, G. Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008, n. 57, s. 93-96. Dostupný také z WWW: <<http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>>.
24. KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie výroby II: řešené příklady*. Brno: VUT Brno, 2002. 63 s.
25. FLEISCHER, J; PABST, R; KELEMEN, S. Heat Flow Simulation for Dry Machining of Power Train Castings. *Annals of the CIRP*. 2008, n. 56, s. 117-122. Dostupný také z WWW: <<http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>>.
26. ZOUHAR, J. Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské

- technologie, 2009. 104 s, 7s příloh. Vedoucí isertační práce Doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
27. UHLMANN, E; GRAF VON DER SCHULENBURG, M; ZETTIER, R. Finite Element Modeling and Cutting Simulation of Inconel 718. *Annals of the CIRP*. 2007, n. 56, s. 61-64. Dostupný také z WWW: <<http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>>.
28. LIANG, S.Y; SU, J-C. Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining. *Annals of the CIRP*. 2007, n. 56, s. 65-68. Dostupný také z WWW: <<http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>>.
29. AB Sandvik Coromant. *Technická příručka obrábění*. Sandviken: Elanders, 2005. 601 s.
30. FRISCHHERZ, Adolf; SKOP, Paul; KNOUREK, Jiří. *Technologie zpracování kovů*. Praha: SNTL, 2004. 268 s. ISBN 80-902655-5-3.
31. HENKEL, Martin. Třískové obrábění technických dílů z plastů. *MM Průmyslové spektrum*. 2005-02-02, č. 1-2, s. 56. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/>>.
32. Efektivní obrábění keramiky zesílené vlákny. *MM Průmyslové spektrum: Výroba / Obrábění*. 2009-10-01, č. 10, s. 60. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/>>.
33. CONRAD, Hans; YANG, Di. Influence of an applied dc electric field on the plastic deformation kinetics of oxide ceramics. *Philosophical Magazine*. 2010-03-30, Volume 90 Issue 9, s. 1141-1157. Dostupný také z WWW: <<http://news.ncsu.edu/releases/wmsconradceramics/>>. ISSN 1478-6435.
34. PIHAN, Roman. *Mistrovství práce s DSLR: Vše co jste chtěli vědět o digitální zrcadlovce a nikdo vám to neuměl vysvětlit*. Vydání druhé. Praha: Institut digitální fotografie, 2007. Objektivy, s. 32-72. ISBN 80-903210-8-9.
35. *Euroncap.com* [online]. 2001 [cit. 2010-02-02]. EURONCAP. Dostupné z WWW: <http://www.euroncap.com/tests/peugeot_307_2001/107.aspx>.
36. *lh4.ggpht.com* [online]. 2006 [cit. 2010-02-05]. Dostupné z WWW: <http://lh4.ggpht.com/_kTaFrEr_318/SelgwtVjTfI/AAAAAAAAA3c/wAdPD8H9wg8/high%20speed%20photos%20gun%20bullet%20shot%5B2%5D.jpg>
37. CRANE, David. *Defensereview.com* [online]. 2004-27-03 [cit. 2010-05-25]. Dragon Skin Flexible Scalar Body Armor Defeats Rifle Threats. Dostupné z WWW: <<http://www.defensereview.com/dragon-skin-flexible-scalar-body-armor-defeats-rifle-threats/>>.
38. *Kellycountry2000.com* [online]. 2000 [cit. 2010-01-20]. Talbot. Dostupné z WWW: <<http://www.kellycountry2000.com/ozcam/talbot.jpg>>.
39. *ISO 3685*, 1993, Tool-life Testing with Single-Point Turning Tools, Annex G: 41.
40. *Tajmac-zps.cz* [online]. 2005 [cit. 2010-04-17]. Tajmac-ZPS. Dostupné z WWW: <<http://www.tajmac-zps.cz/c1210cz.html>>.

41. *Stroje.bost.sk* [online]. 2007 [cit. 2010-05-23]. Bost. Dostupné z WWW: <<http://stroje.bost.sk/katalog/fv25-cnc-a-zvisla-cnc-frezka>>.
42. Cutting forces in wood machining – Basics and applications in industrial processes. In *Holzforschung, Vol. 62*. Berlin: Walter de Gruyter, 2008. s. 1-11.
43. *Stolari-truhlari.cz* [online]. 2009-08-17 [cit. 2010-05-22]. *Stolari-truhlari.cz*. Dostupné z WWW: <<http://www.stolari-truhlari.cz/clanky/0-vse/detail/62/>>.
44. SEGER, Chris. 2006, [cit. 2010-03-06]. Dostupný z WWW: <http://www.aostechnologies.com/pdf/colloquium_illumination.pdf>.

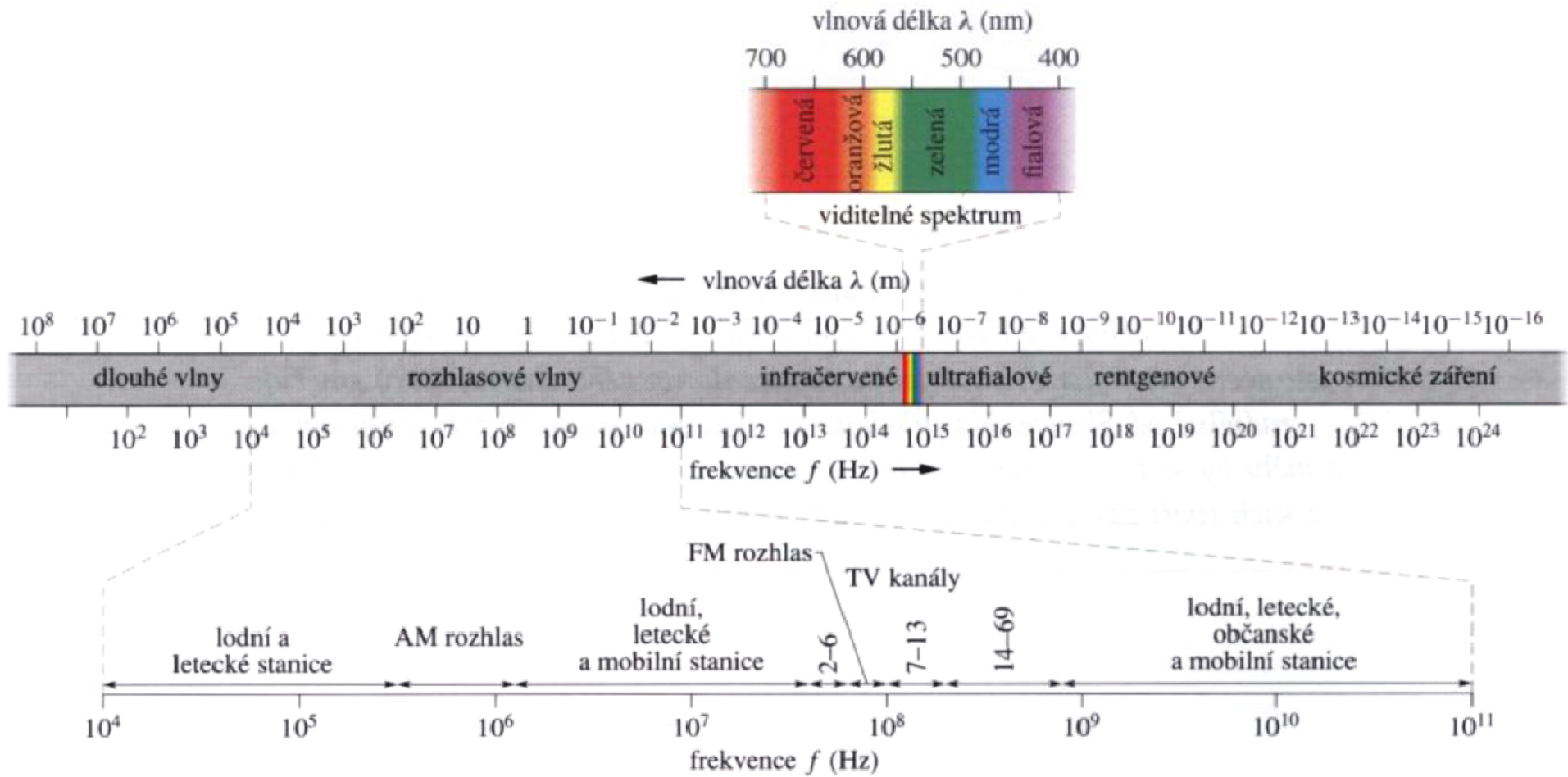
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis symbolu
A_{Di}	[mm ²]	Průřez třísky
C	[-]	Matice tlumení
C_{Fc}	[-]	Konstanta- pro výpočet složky řezné síly
D	[mm]	Průměr maximálně otevřené clony
F	[N]	Výslednice řezných sil
F	[-]	Matice zatížení
F_c	[N]	Řezná síla
F_N	[N]	Normálová síla
F_P	[N]	Posuvová síla
F_{SN}	[N]	Normálová síla v rovině stříhu
F_{ST}	[N]	Tečná síla v rovině stříhu
F_T	[N]	Tečná síla
K	[-]	Matice tuhosti
M	[-]	Matice hmotnosti
P_{fc}	[-]	Pracovní rovina
P_{sh}	[-]	Rovina stříhu
R	[N]	Vnitřní řezný odpor materiálu
S_{hy}	[mm]	Rozměr senzoru
U	[-]	Matice posuvu
Z	[°]	Zorný úhel objektivu
f	[mm]	Ohnisková vzdálenost
f_z	[mm]	Posuv na zub
h_{Di}	[mm]	Jmenovitá tloušťka řezu
k_{Ci}	[MPa]	Měrný řezný odpor
r_β	[mm]	Poloměr zaoblení špičky
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
z_z	[-]	Počet zubů v záběru
φ, φ_1	[°]	Úhel záběru
γ	[°]	Nástrojový úhel čela
γ_o	[°]	Nástrojový ortogonální úhel čela
κ_r	[MPa]	Konstanta závislá na jmenovité tloušťce třísky
α	[°]	Úhel hřbetu
μ	[-]	Součinitel tření na čele nástroje
Φ	[°]	Úhel roviny stříhu
φ_M	[°]	Úhel začátku plastické deformace
φ_N	[°]	Úhel konce plastické deformace

Zkratka	Popis zkratky
A/D	Analog/Digital
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DRAM	Dynamic Random Access Memory
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
HMI	Hydrargyrum Medium-Arc Iodide
HSV	High-Speed Video
IR	Infra Red
ISO	International Organization for Standardization
KNB	Karbid Nitridu Boru
LED	Light Emitting Diode
MKP	Metoda Konečných Prvků
PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PVC	Polyvinylchlorid
RGB	Red Green Blue
SK	Slinutý Karbid
UV	Ultra Violet
VBD	Vyměnitelná břitová destička
VGA	Video Graphics Array
VKG	Videokymogram
fps	Frames per second
lp/mm	Line pairs per millimeter

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Schéma spektra elektromagnetických vln
- Příloha 2 Porovnání vlastností jednotlivých typů světla
- Příloha 3 Schéma a popis kamery TroubleShooter 1000
- Příloha 4 Výkres ochranného krytu



Příloha 2 Porovnání vlastností jednotlivých typů světla

Typ osvětlovače	Označení	Příkon	Sv. tok	Cena	Životnost	Napětí	Náklady
		[W]	[lm]	[kc]	[h]	[V]	[tis. Kč]
Běžná žárovka	CLAS A FR 150	150	2160	22	800	230	46,65
Běžná žárovka	SPC. A T CL 500	500	8400	257	800	230	169,275
Halogenová lampa	Haloline 150	150	2400	62	2000	230	46,86
Halogenová lampa	Haloline 500	500	9500	113	2000	230	153,39
Xenonová žárovka	XBO 450W/1	450	13000	20430	800	17	1667,25
HMI světlo	D-150	150	11251	3950	750	230	361
LED osvětlení	E40 led	57	2500	5297	50000	230	27,694
Fluorescentní zářivka	ENDURA 150 W/830	150	8000	6553	60000	230	51,533
Halogenová lampa s reflektorem MR16	Dedocol	250	5000	466	50	24	634,2
Halogenová studiová žárovka	Fresnel olympus	1000	26000	370	200	230	411

Příloha 3 Schéma a popis kamery TroubleShooter 1000

Detektor: Rozlišení 640x480CMOS maticový detektor, barevný

Rychlost závěrky: 1x, 2x, 3x, 4x, 5x, 10x, 20x

Možnosti režimu záznamu: Start, 25 %, 50 %, 75 %, end. Záznam začne po stisknutí spouště. Pokračuje v záznamu snímku do doby, než je aktivován externí trigger. Jeho pozice stanoví, kolik snímků má být uloženo před a po triggeru.

Rychlost přehrávání: Po krocích, rychlostmi 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 25, 30, 50, 60, 125, 250, 500 a 1000 snímků za vteřinu libovolným směrem.

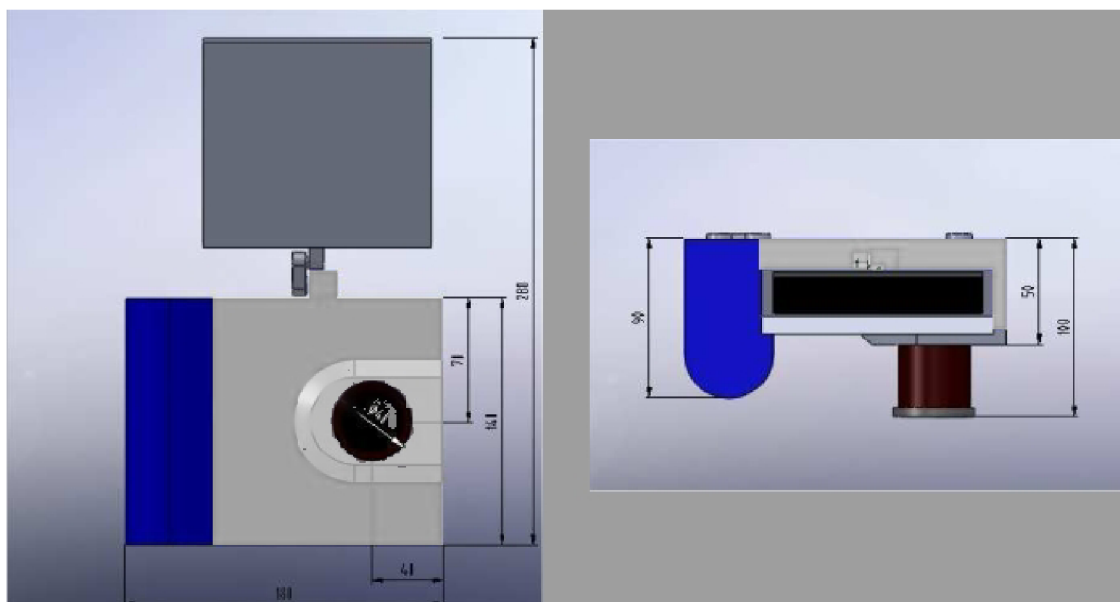
Monitor: 5" LCD, barevný

Vstupy/výstupy: USB, Compact flash, IR, Trigger, Pulse in, Pulse out

Napájení: 110/220 V AC adaptér nebo 4 D monočlánky

Rozměry: 180x140x90, 1,2 kg

Software: CamLink pro záznam, přehrávání a ukládání snímků do PC ve formátu avi nebompeg. MotionMeasure pro rozbor a výpočet rychlosti a zrychlení a pro grafické úpravy zobrazení.



Príloha 4 Výkres ochranného krytu

