



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE VYSOKOTYCHLOSTNÍCH KAMEROVÝCH SYSTÉMŮ

APPLICATIONS OF HIGH SPEED CAMERA SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZBYNĚK ZÁVESKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LUBOŠ KOTEK PH.D

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Zbyněk Závěský

kteřý/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Aplikace vysokorychlostních kamerových systémů

v anglickém jazyce:

Applications of High-Speed Camera Systems

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracovat rešerši na dané téma, aplikace

Cíle bakalářské práce:

- základní pojmy a možnosti VKS
- literární a internetový průzkum

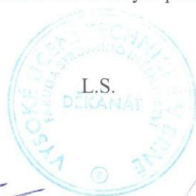
Seznam odborné literatury:

Vladimír Pata - Vysokorychlostní kamerové systémy (CERM, 2006)

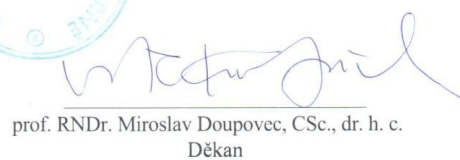
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Kotek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 26.11.2013




doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

!



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na vysokorychlostní kamery, a to zejména na jejich využití v praxi. Práce se zabývá charakteristikou kamery, historickým vývojem a okolnostmi potřebnými k dobré kvalitě nahrávky. Dále byly pomocí vysokorychlostní kamery nahrány dva konkrétní příklady, které jsou zde detailně vylíčeny. Jedná se o měření broušení a testování střelné zbraně.

Klíčová slova

Vysokorychlostní kamery, popis vysokorychlostních kamer, použití vysokorychlostních kamer v praxi.

ABSTRACT

This bachelor's work is focused on high-speed cameras and their uses in praxis. This thesis is occupying characteristic of cameras, historical evolution and circumstances for taking a good quality record. Two records were taken with high-speed camera and these records were described and evaluated. First measurement was about grinding operations the second one was about testing shooting gun.

Key words

High-speed camera, description high speed cameras, uses high-speed cameras in praxis.

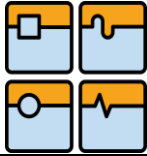


PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Aplikace vysokorychlostních kamerových systémů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Zbyněk Závěský



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Luboši Kotkovi, Ph. D. za vedení, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 historie	10
1.1 Historie vysokorychlostní fotografie.....	10
1.2 Historie vysokorychlostních kamer.....	11
2 Současné kamerové systémy	13
2.1 Olympus i-Speed LT	13
2.2 Olympus i-Speed 3.....	13
2.3 Phantom v2010.....	14
2.4 Photron Fastcam IS-1M	14
3 Vysokorychlostní Kamery	16
3.1 Popis vysokorychlostní kamery	16
3.2 Princip vysokorychlostní kamery.....	18
3.3 Osvětlení	19
3.3.1 Laserové osvětlení	19
3.4 Směr světla	20
4 Aplikace vysokorychlostních kamer v průmyslu.....	22
4.1 Využití ve zkušebnictví.....	22
4.1.1 Rázové zkoušky	22
4.1.2 Automobilový průmysl	23
4.1.3 Řezné nástroje a tvorba třísky.....	24
4.1.4 Zbrojní průmysl	25
4.2 Využití ve výrobě.....	27
4.2.1 Výrobní linky	27
4.2.2 Strojové vidění.....	27
4.3 Věda a výzkum.....	28
4.3.1 Rychlost světla.....	28
4.3.2 Biologie.....	29
5 Praktická část.....	30
5.1 Testování zbraně a nábojky.....	30



5.2	Brnroušení	32
5.2.1	Měření rychlosti odletu třísek	32
5.2.2	Popis měření	32
5.2.3	Naměřené a vypočtené hodnoty.....	33
5.2.4	Teoretické hodnoty	34
5.2.5	Měření.....	35
5.2.5.1	Materiál 11 600.....	35
5.2.5.2	Materiál 14 220.....	36
5.2.5.3	Materiál Radeco.....	36
5.2.5.4	Materiál cementováno kaleno.....	37
5.3	Zhodnocení měření.....	39
	ZÁVĚR	40
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	45
	SEZNAM TABULEK	46
	SEZNAM PŘÍLOH.....	47

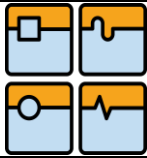


ÚVOD

V současné době se stále častěji setkáváme s rostoucími požadavky na kvalitu výrobků. Výrobní procesy a operace probíhající v průmyslu jsou velmi rychlé děje, které běžným záznamovým zařízením nebo lidským okem, nejsme schopni zachytit. Proto se staly běžnou součástí výroby vysokorychlostní kamery, které mají schopnost celý probíhající děj nahrát ve zrychleném záznamu, který umožňuje zpomalené přehrávání, a my jsme poté schopni děj analyzovat. Důkladným zkoumáním výrobního procesu můžeme odstranit případné závady a celý výrobní proces zdokonalit.

Vysokorychlostní kamery můžeme uplatnit například v analýze deformace materiálu, diagnostice závad výrobních zařízení, balistických testech, průmyslové endoskopii, vizualizaci proudění, ve výzkumu, vědě a mnohých dalších oborech. U všech těchto oborů je velmi důležitá přesnost a kvalita práce, neboť i nepatrná nepřesnost může vést k zastavení celé výroby.

V této práci se tedy zaměřím na možné využití vysokorychlostních kamer v praxi, jejich stručný popis a princip pořizování záznamu. Konkrétní využití vysokorychlostních kamer. V praktické části se budu zabývat měřením broušení a testováním expanzní zbraně.



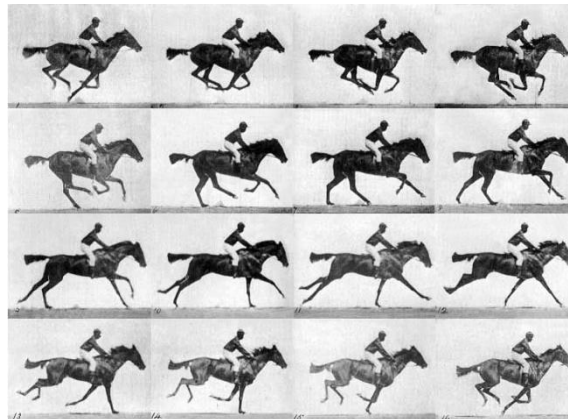
1 HISTORIE

1.1 Historie vysokorychlostní fotografie

Dříve než vznikl vysokorychlostní záznam, byla vynalezena vysokorychlostní fotografie. Jako za počátek vysokorychlostní fotografie může být považován pokus Williama Henryho Talbota v roce 1851. K vytvoření první vysokorychlostní fotografie použil Talbot fotoaparát s otevřenou závěrkou. Pokus spočíval v připevnění stránky novin na kolo, které se otáčelo velkou rychlostí před kamerou v zatemněné místnosti. Jako zdroj světla použil leydenskou láhev, předchůdce kondenzátoru, která byla schopna nastřádat velké množství elektrického náboje a schopna jej najednou uvolnit ve formě krátkého intenzivního záblesku. Díky tomuto záblesku byl schopen vyfotit rychle se otáčející kolo. Po vyvolání negativu bylo kolo dokonale zmražené a výsledná fotografie zcela čitelná. Tímto pokusem byla vytvořena první vysokorychlostní fotografie. [1,2]

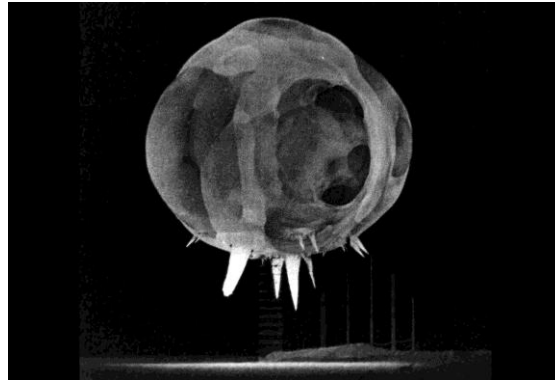
Vysokorychlostní fotografie je definována jako sled fotografií zachycených kamerou, která je schopna vyfotit minimálně 128 snímků za sekundu a alespoň tři po sobě jdoucích snímků. [1,2]

První pokus o vytvoření vysokorychlostní fotografie v praxi bylo v roce 1872, kdy se kalifornský guvernér Leland Stanford vsadil, že kůň při cvalu má všechny čtyři nohy nad zemí. Úkolem byl pověřen Eadweard Muybridge. První pokusy zachycení koně nad zemí běžným fotoaparátem byly neúspěšné. Vyvinul tedy systém zapojení více fotoaparátů s provázky, které byly natažené přes trať a v okamžiku, kdy je kůň přešel, byly postupně uvolňovány pružinové závěrky fotoaparátů. Fotografie byly pořízené na 20“×24“ mokřích kolódiových deskách. [1,1]



Obrázek 1. Kůň v pohybu [1].

Velkým posunem k vývoji vysokorychlostních fotografií přispěl Harold Edgerton. Začal zkoumat stroboskopický jev a tím zmrazit rychlý pohyb. Nasvícení scény stroboskopickým světlem mu pomohlo zachytit i velice rychlé děje a jevy, které již nejsou pro lidské oko viditelné. Pomocí stroboskopického děje tedy mohl zaznamenat let kulky nebo detonace. [1,2]



Obrázek 2. Nukleární exploze [1].

1.2 Historie vysokorychlostních kamer

Brzy po vysokorychlostních fotografiích přišly na svět vysokorychlostní kamery. Bylo to v roce 1930, kdy byl Bell Telephone Laboratories jedním z prvních zákazníků pro kamery vyvinuté firmou Eastman Kodak. Bell Labs používal systém, který nahrával na 16 mm filmu s rychlostí až 1000 obrázků za sekundu a měl 30 metrovou nahrávací kapacitu. Dalším modelem lepší a rychlejší kamery byl Fastmax od firmy Bell Labs. Fastmax byl schopný nahrávat rychlostí až 5000 obrázků za sekundu. Tuto kameru nakonec Bell Labs prodala firmě western Electric a ta ji prodala společnosti Wollensak Optica. V této společnosti se dále vyvíjela, až dosáhla na rychlost nahrávání 10000 obrázků za sekundu. [2]

V roce 1960 představila firma Redlake Laboratories vysokorychlostní kameru s rotujícím hranolem, která nahrávala na 16 mm film s rychlostí až 10000 obrázků za sekundu. V téže roce vyvinula firma Foto-Sonics několik modelů s rotujícím hranolem, které nahrávaly na 35mm a 70mm film. [2]

V roce 1980 přišly na trh kamery, které uměly pořídit barevný záznam. S takovou kamerou přišla na trh jako první firma NAC a poté představila společnost Palaroid systém Makel 300, který byl schopný nahrávat se snímkovací frekvencí až 300 snímků za sekundu. [2]



Obrázek 3. Vysokorychlostní kamera CX-1 [3].



Důležité body při vývoji vysokorychlostní kamery:

- 1980 – První vysokorychlostní kamera využívající VHS záznam (HSV-200),
- 1983 – První vysokorychlostní kamera specializována pro vojenské účely,
- 1985 – První vysokorychlostní kamera specializována pro využití ve vzduchu,
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající S-VHS záznam (HSV-1000),
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající technologii CMOS,
- 1994 – První barevná vysokorychlostní digitální kamera (Memrecam Ci),
- 1994 – První vysokorychlostní digitální kamera využívající CMOS technologii,
- 1995 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera,
- 1997 – První vysokorychlostní kamerový systém schopný ukládat digitální i analogový záznam na pásku S-VHS,
- 2003 – První jednočipová vysokorychlostní digitální kamera s HD,
- 2005 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera s full HD.



2 SOUČASNÉ KAMEROVÉ SYSTÉMY

2.1 Olympus i-Speed LT

Vysokorychlostní kamera i-speed LT je základním typem, který byl navržen pro jednoduchost nastavení kamery a snímání děje. Konstrukce kamery je navržena speciálně pro průmyslové prostředí. Typické využití je při zpracovávání diagnostik v průmyslu. [4]

Vlastnosti i-Speed LT:

- 800 x 600 rozlišení senzoru,
- Schopnost nahrávání 2000 obrázků za sekundu,
- On-board funkce editace,
- Živé prohlížení snímků a okamžité přehrávání,
- Výběr z možností paměti a tím prodloužení času záznamu,
- Kamera je rozšiřitelná až na i-Speed 2.



Obrázek 4. Olympus i-Speed LT [4].

2.2 Olympus i-Speed 3

Tato kamera je nejnovějším výrobkem z řady Olympus i-speed. Poskytuje vysoké rozlišení a extrémně nízkou citlivost na světlo. Nahrávací rychlost je 150 000 snímků za sekundu s maximálním rozlišením 1280×1024 obrázkových bodů při snímkové frekvenci do 2000 snímků za sekundu, což z této kamery dělá ideální nástroj pro výzkumné stanice k analýze na vysoké úrovni. [4]



Obrázek 5. Olympus i-Speed 3 [4].

2.3 Phantom v2010

Výkonná jedno megapixelová digitální vysokorychlostní kamera. Díky své flexibilitě si našla svoje uplatnění ve vědě a výzkumu. Kamera dokáže nahrávat s vysokým rozlišením na ultra-vysokých rychlostech.

Kamera je vybavena obrazovým senzorem využívající čip CMOS, který může ušetřit až 22 gigapixelů za sekundu z ukládaných dat. Díky tomu může kamera dosáhnout při plném rozlišení 1280×800 megapixelů, více než 22 000 obrázků za sekundu. Maximální rychlost při rozlišení 128×16 pixelů je 1 000 000 obrázků za sekundu. [5]



Obrázek 6. Phantom v2010 [5].

2.4 Photron Fastcam IS-1M

Ultrarychlá kamera Photron Fastcam IS-1M patří k nejrychlejším přístrojům pro vysokorychlostní snímání při vysokém rozlišení obrazu 312×260 pixelů. Kamera byla navržena tak, aby při tomto rozlišení zachytila širokou škálu extrémně rychlých dějů až do rychlosti 1 000 000 snímků za sekundu, a to i při špatných světelných podmínkách. Kamera je vhodná pro analýzu a měření většiny ultrarychlých jevů jako jsou například



pohyb kapiček inkoustu u technologií „ink jet“, spalování, šíření trhlin, dynamiku výbuchů aj. [5]



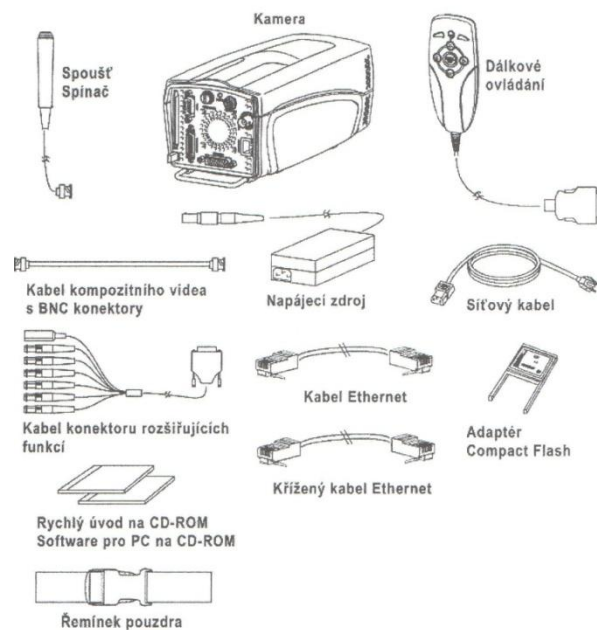
Obrázek 7. Photron Fasrcam IS-1M [5].



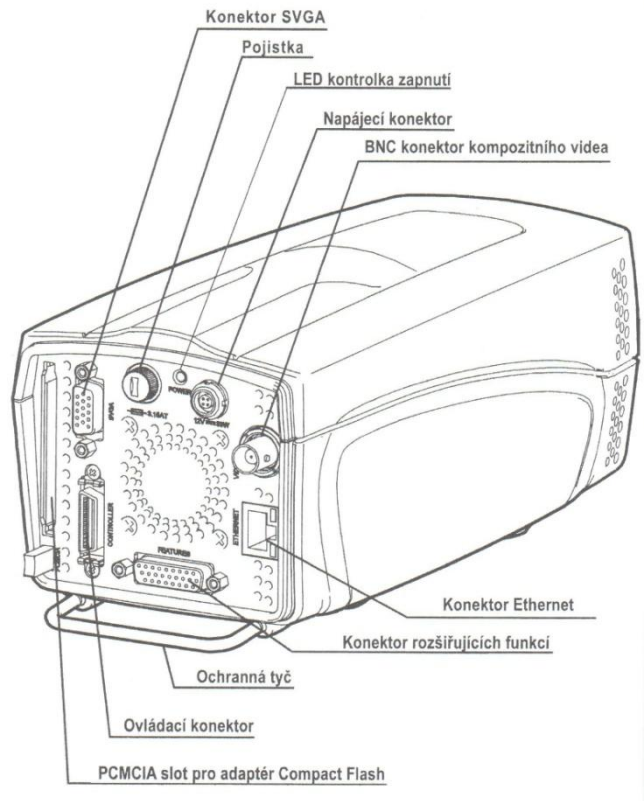
3 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

3.1 Popis vysokorychlostní kamery

Vysokorychlostní kamera je optoelektronické zařízení, které zaznamenává snímky velmi vysokou záznamovou frekvencí (tisíce až milióny snímků za vteřinu). Díky relativně nízké přehrávací frekvenci můžeme zobrazit, změřit a pochopit události, které probíhají ve skutečném čase i několik milisekund. Pro lidské oko, nebo běžné kamery, je zcela nemožné takhle rychlé děje zachytit. [7]



Obrázek 8. Příslušenství [6].



Obrázek 9. Připojovací schéma[6].

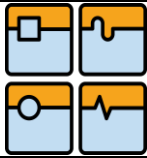
Základní rozdělení:

- Kamery s displejem a ovládacími prvky přímo na kameře (přenosné),
- Kamery s externím zařízením (PC, CDU- Controller Display Unit). Těmto kamerám se říká stacionární.

Stacionární kamery vynikají především výbornými technickými parametry umožňující provádět záznam i při špatném osvětlení. Kamery se především uplatňují pro záznam rychlých dějů v průmyslu (tisíců až miliónů obrázků), a to na výrobních, balicích a třídících linkách, v aplikovaném výzkumu a vývoji.



Obrázek 10. Stacionární kamera IL 3 [8].



Přenosné kamery jsou nejrozšířenější díky vestavěnému ovládacímu panelu a obrazovce, což umožňuje okamžité využití a analýzu ve výrobě nebo ve venkovních prostorách (sportovní aktivity). Snímkovací frekvence je 25-1000 Hz, která je dostačující pro požadavky běžné výroby. [8]



Obrázek 11. Přenosná kamery TS 3 [8].

Druhy záznamu:

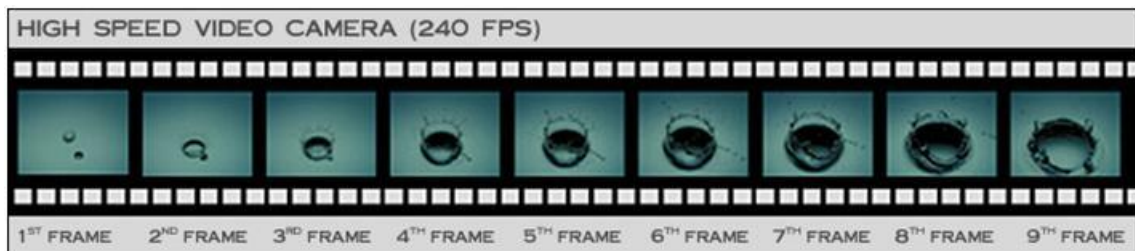
- Barevný,
- Černobílý - záznam může být v určitých situacích výhodnější, neboť je menší objem zpracovaných a přenesených dat.

3.2 Princip vysokorychlostní kamery

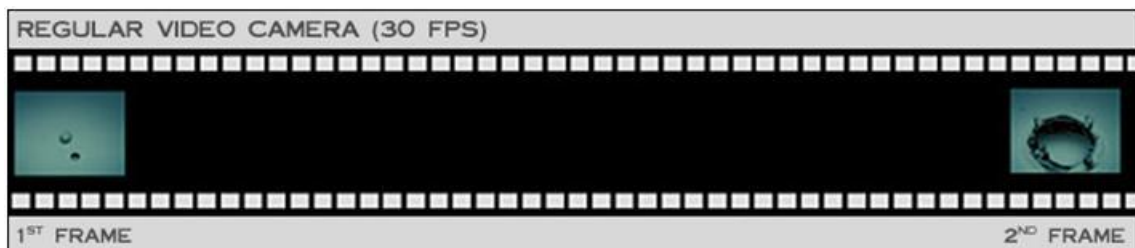
Základním faktorem kamer je záznamová frekvence. Standardní kamery mají 25 Hz, což je pro většinu pohybových problémů příliš málo. Základní kamerou lze pořídit snímek jen každých 40 ms. Z události trvající 150 ms máme tedy jen 3,7 snímků. Vysokorychlostní kamerou zaznamenávající 1000 snímku za sekundu při stejně trvající události máme ale snímků 150.

Klasické a vysokorychlostní kamery mají princip snímání obrazu stejný. Světlo se odráží od snímaného předmětu a prochází objektivem přes soustavu zrcadel a čoček. Dále následuje separace barev pomocí filtrů. Poté dochází ke generaci elektrických signálů pro jednotlivé body a nakonec se ze signálů vytvoří digitální data. O tento děj se stará obrazový senzor využívající čip CCD nebo CMOS. Oba senzory využívají fotocitlivé buňky umístěné na ploše čipu, které zaznamenají proud fotonů, a podle jeho velikosti určí jas obrazu. Oba čipy také využívají barevné filtry sloužící k rozdělení obrazu na tři základní barevné složky: červenou, zelenou a modrou. Pokud známe v každém dostatečně malém bodě jas zelené, červené a modré barvy, jsme schopni zobrazit všechny barvy vnímatelné lidským zrakem. [9]

Díky digitálnímu záznamu můžeme použít získaná data ke kvalitní analýze s využitím aktuálních hodnot fyzikálních veličin. U jednotlivých obrázků záznamu lze přiřadit reálný relativní čas a tím je možné stanovit vektory rychlosti a zrychlení pohybujících se prvků nebo sledovat rychlosti změny tvaru těles. [9]



Obrázek 12. Záznam při snímkovací frekvenci 30 obrázků za sekundu [10].



Obrázek 13. Záznam při snímkovací frekvenci 240 obrázků za sekundu [10].

3.3 Osvětlení

Nejdůležitější podmínkou pro kvalitní záznam je, aby snímané těleso bylo velmi dobře nasvíceno, neboť s vyšší frekvencí snímání klesá rozlišení záznamu. Se zvyšující se rychlostí záznamu budeme také potřebovat čím dál tím více světla. Při užití vysokých frekvencí snímání může být záznam i za přímého slunečního záření, šerý, nebo úplně tmavý. Pro dosažení kvalitního záznamu je proto nutné přidat světelných zdrojů, jako například halogenová, laserová, nebo výbojková svítidla o příkonu několika kilowatů, LED svítidla a jako nejpoužívanější pro balistické potřeby se pro nasvícení scény používají série synchronizovaných výbojkových blesků. [11]

Typ osvětlení, je stejně důležitý jako množství světla při pořizování snímků při vysoké rychlosti. Typ osvětlení zvolíme podle kritérii

- a) v jakém prostředí
- b) frekvenci snímání
- c) odrazivosti objektu
- d) barvě

existuje celá řada řešení osvětlení — standardní, nebo specializované, které se používají k osvětlení vysoce rychlostních dějů. [11]

3.3.1 Laserové osvětlení

Speciální lasery mohou být impulsivní na specifické míry intenzity a barvy. Díky vysoké opakovací frekvenci pulzních laserů, můžeme dosáhnout účinné doby trvání závěrky v rozmezí obvykle od 30 ns – 250 ns na frekvencích až 50 kHz bez nutnosti použití zesilovače obrazu. Laser je nutné seřídit tak, aby jeho frekvence odpovídala frekvenci počtu snímků za sekundu. Typické použití laserového osvětlení je v balistice, kde běžné rychlosti dějů přesahují 700 m/s. Další výhodou použití pulzních laserů je, že při svícení



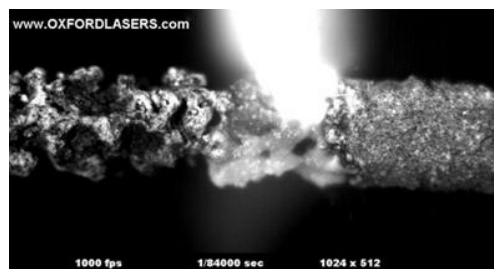
nevyzařují příliš velké teplo a tudíž nejsou snímané objekty ovlivněny tepelným účinkem (tavení vláken, ohřívání plastů). [12]

Vysokorychlostní snímání extrémně jasných objektů

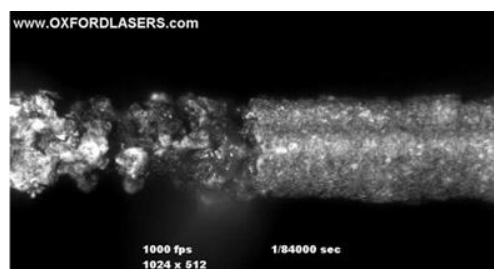
Jako extrémně jasné objekty můžeme označit činnosti jako je svařování, spalování nebo výbuchy. Použitím klasických osvětlovačů by nám vznikl přesvětlený nebo zcela bílý záznam. Aby bylo možné tedy zachytit tyto děje, je potřeba toto nežádoucí světlo odstranit, nebo aspoň většinu. Máme tedy dvě možnosti jak eliminovat nežádoucí světlo:

a) Spektrální filtrace

Při spalovacím procesu jako je například svařování, je vyzařováno světlo, které pokrývá široké spektrum světla. Abychom toto světlo eliminovali, musíme na objektiv kamery připevnit filtr, který blokuje většinu světla v určitých vlnových délkách. Filtrem bude procházet velmi úzké pásmo vlnových délek (typicky ± 5 nm) o jediné vlnové délce laseru. [12]



Obrázek 14. Svařování bez filtru [12].



Obrázek 15. Svařování s filtrem [12]

b) Časové filtrování

Každý záznam má určitou dobu expozice, což je vystavení filmu nebo senzoru kamery světlu z nahrávané scény. Dlouhá expozice bude mít tedy za následek jasnější obraz. Délku expozice můžeme měnit a jejím snížením můžeme snížit jas obrazu. [12]

3.4 Směr světla

Dalším kritériem pro kvalitní obraz je směr světla:

- Poosvětlení,



- Rozptýlené osvětlení,
- Souosé osvětlení,
- Přímé osvětlení

Nejvíce v praxi se používá přímé osvětlení. Je to všeobecné a jednoduché osvětlení, kde zaměříme hlavní zdroj světla rovnou do snímané oblasti. Světlo musí být pečlivě zaostřeno a zacíleno. Kvalitu celého záběru můžeme zvýšit tím, že do snímané oblasti namíříme ještě reflektor a tím dosáhneme vyšší rychlosti snímání.



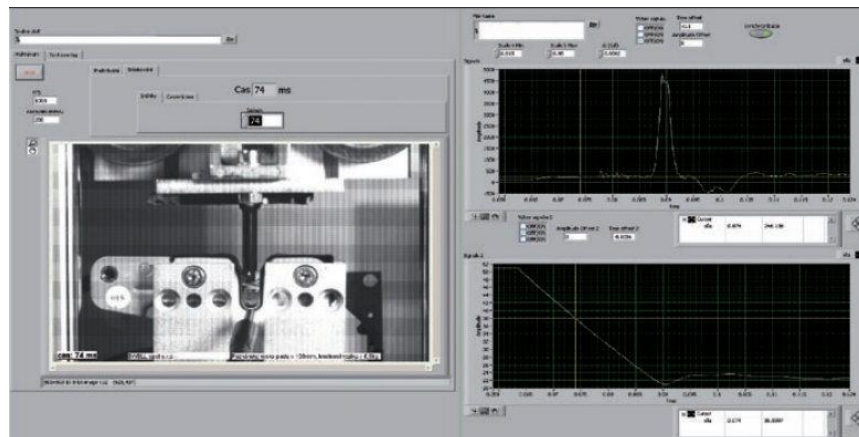
4 APLIKACE VYSOKORYCHLOSTNÍCH KAMER V PRŮMYSLU

V dnešní době se většina velkých firem snaží o co nejrychlejší a neefektivnější výrobu, která bude jak spolehlivá, tak i bezpečná. Pro docílení těchto bodů je potřeba důkladné analýzy výroby, všech pohybů spojovaných s výrobou, jako jsou robotické ruce a automatizované linky. Proto, aby vše fungovalo, jak má, se používají vysokorychlostní kamery, aby se zjistilo, jestli nedochází někde ke kolizím nebo ke ztrátám jak času, tak i výkonu. Touto analýzou můžeme odstranit závady a daný proces zrychlit. Využití vysokorychlostních kamer, můžeme rozdělit do tří hlavních oblastí:

- Zkušebnictví,
- Věda a výzkum,
- Výroba.

4.1 Využití ve zkušebnictví

Do této kategorie se řadí zkoušky mechanických vlastností materiálů, a to odolnost vůči nárazu a průrazu, rázů a tlaku. Dále se kamera využívá při zkouškách celých výrobků, kde se kontroluje vliv vibrací, rázu, deformací a tlaku. Největší uplatnění kamer ve zkušebnictví je v automobilovém průmyslu, analyzování vlastností materiálů, v leteckém a zbrojním průmyslu.

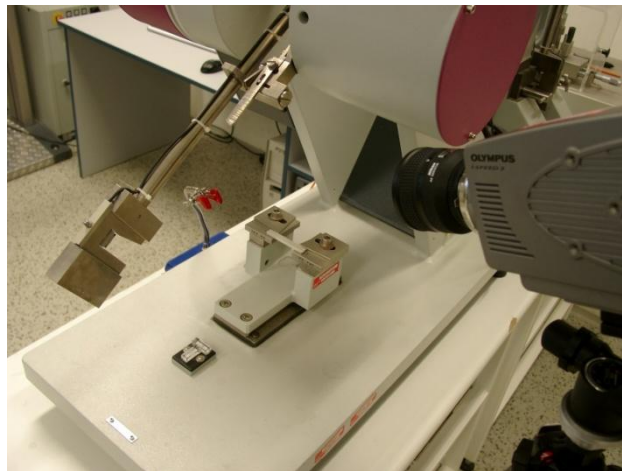


Obrázek 16. Kontrola činnosti zámku [13].

4.1.1 Rázové zkoušky

Mechanické vlastnosti jsou finální vlastnosti daného materiálu, které určují konečné vlastnosti výrobku. Proto je potřeba důkladná analýza materiálu, pro zlepšování mechanických vlastností konstrukčních materiálů. [14]

Rázové zkoušky určují lomovou houževnatost materiálu tj. odolnost materiálu vůči křehkému lomu. Zkoušení odolnosti materiálu vůči křehkému lomu může mít různé účely: posouzení pravděpodobnosti výskytu křehkého lomu daného materiálu namáhaného za určitých podmínek, výběr nejvhodnějšího materiálu, kontrola kvality při výrobě, vyšetření příčin lomů vyskytnutých v provozu, získání údajů pro potřeby konstrukce (např. nejvyšší provozní teplota, maximální přípustná délka trhliny). [14]



Obrázek 17. Zkouška rázem [14].

4.1.2 Automobilový průmysl

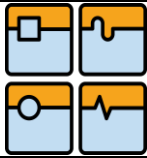
V automobilovém průmyslu je využití vysokorychlostních kamer velice rozmanité, od plnohodnotných crash testů (bariérových testů), až po analýzu pohybů stěračů. Proto se na každou aplikaci kladou různé požadavky, jaké má kamera splňovat.

Bezpečnost se zde stává prioritou, na kterou se klade velký důraz, a právě vysokorychlostní kamery stojí za stále se zlepšující se vlastnostmi bezpečnostních prvků u aut, neboť kamera je schopna zaznamenat veškerou deformaci při nárazu. Náraz se odehrává ve zlomku vteřiny, a proto je nutné použít vysokorychlostních kamer, aby se zaznamenaly všechna důležitá data pro vyhodnocení testu. Protože je bezpečnost na prvním místě, automobil musí projít sérií testů.[15]

A to při:

- Čelní nárazová zkouška při rychlosti 64 km/hod do přesazené neformovatelné bariéry,
- Boční nárazová zkouška při rychlosti 50 km/hod,
- Boční náraz do stromu při rychlosti 29 km/hod,
- Zkoušky bezpečnosti chodců při rychlosti 40 km/hod.

U těchto všech zkoušek se důkladně sledují a analyzují aktivní a pasivní bezpečnostní prvky a dále síly, které při nárazu působí na jednotlivé části lidského těla (viz obr. 18). Díky vysokorychlostní kameře můžeme tedy sledovat rychlost vystřelení airbagů, utahování bezpečnostních pásů, vstřikování paliva v motoru, účinnost brzdových systémů, proudění vzduchu v aerodynamickém tunelu a pohyby figurín, které představují lidského tělo. [15]

**Ochrana:**

výborná adekvátní dostatečná slabá velmi slabá

Obrázek 18. Grafické znázornění míry bezpečnosti [16].

Určení rizika poranění pasažérů se určuje pomocí informací získaných z figurín a zejména důkladnou analýzou vysokorychlostního záznamu. Na jednotlivých částech lidského těla jsou připevněny body, které kamera snímá. Po přezkoumání záznamu a za použití speciálního softwaru se vyhodnotí, jak velké síly při nárazu působí. Vyhodnocují se zranění jak řidiče tak i u spolujezdce, pasažérů v zadní části vozu, dětí, autosedaček s dětmi a dokonce i chodců. [15]



Obrázek 19. Crash test [16].

4.1.3 Řezné nástroje a tvorba třísky

Rozbor a posuzování utváření třísek (různých tvarů a velikostí) a jejich odvádění, je při obrábění rozhodující faktor úspěšnosti. [17]

Řezné nástroje se stále více a více zdokonalují, ať je to jednotlivý prvek, jako je řezný materiál, povlak, makro- a mikrogeometrie břitu, těleso nástroje či upínač, nebo celé nástrojové sestavy. Tento vývoj spěje k vyšším životnostem břitu, odolnosti vůči působení teplot, nižším silám při obrábění a lepším dynamickým vlastnostem. Jelikož se v obrábění vyskytují velmi rychlé děje, je zapotřebí využití vysokorychlostní kamery, abychom byli schopni přesnému porozumění a posuzování mechanismu utváření třísek. Pomocí kamery můžeme sledovat řezný proces, u kterého se zaměřujeme především na trvanlivost břitu, tvorbu třísky nebo vliv práce nástrojů na kvalitu obrobku (drsnotu povrchu). Celková kvalita a efektivita obrábění je ovlivněna trvanlivostí břitu daného nástroje, správnou volbou řezných podmínek (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu), chlazením, strategií obrábění a upnutím nástroje (tuhost, vyložení). [17]



Vhodná tvorba třísky, zejména u automatizované výroby soustružením, je velmi důležitá. Špatná tvorba třísky může vést k poškození obrobku a také nástroje.

Provedením rozboru utváření třísek a jeho zohlednění při výběru vhodných řezných podmínek, může přinést zlepšení odvádění třísek a funkce a výkonnosti řezného nástroje. Zvýšení produktivity, zlepšení ochrany před poškozením nástroje a omezení prostojů stroje tak vede k úsporám času i peněz. [18]



Obrázek 20. Funkce nástroje a tvorba třísky [17].

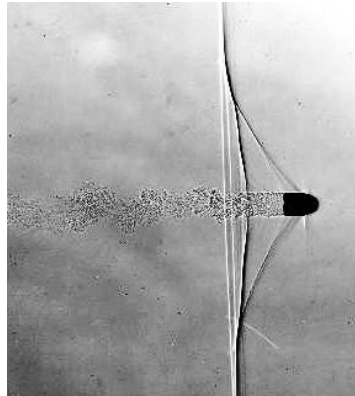
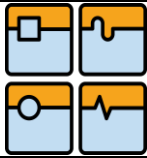
4.1.4 Zbrojní průmysl

Ve zbrojním průmyslu jsou extrémně krátké a rychlé děje, a proto zde našla vysokorychlostní kamera velké uplatnění. Kamery jsou důležité jak ve směru experimentální balistiky, tak i v analyzování funkčnosti a chování zbraní během střelby.

Při balistických testech umožňuje kamera sledovat celý průběh výstřelu zbraně, až do dopadu střely na cíl, popřípadě proniknutí střely cílem. Při výstřelu se zejména zaměřujeme na trajektorii, rychlost — jak pohybovou tak i rotační, průraznost a deformaci střely. Dále je velká pozornost kladena na chování střely při použití různých úst'ových doplňků, jako je tlumič hluku, kompenzátor zdvihu, úst'ová brzda a tlumič plamene. Taktéž se zkoumá dopad střely na překážku a vyhodnocuje se účinnost a průraznost střely. Účinnost a průraznost střely se vyhodnocuje díky několika střeleckým pokusům s různými tvary kulky a různými úhly dopadu. [7]



Obrázek 21. Test průraznosti střeli [19].



Obrázek 22. Test průraznosti třely [19].

Dalším důležitým bodem je analýza funkce střelných zbraní. Vysokorychlostní záznam je důležitý pro konstruktéry, aby viděli funkčnost zbraně během střelby. Vyhodnocuje se celý průběh funkčního cyklu při výstřelu. Zaznamenávají se tedy pohyby všech prvků, které mohou ovlivňovat funkčnost zbraně a to hlavně při nabíjení zbraně a pohybu závěru. [7]

Dalším bodem, co se týká použití vysokorychlostních kamer v balistice, jsou experimentální záznamy výbuchu munice a samostatných výbušnin (postup rázových a detonačních vln a jejich ničivé následky, rozptyl střepin). Detonace jsou pravděpodobně nejrychlejší děje ve speciální technice (řádově až 10 tisíc metrů za sekundu). [7]

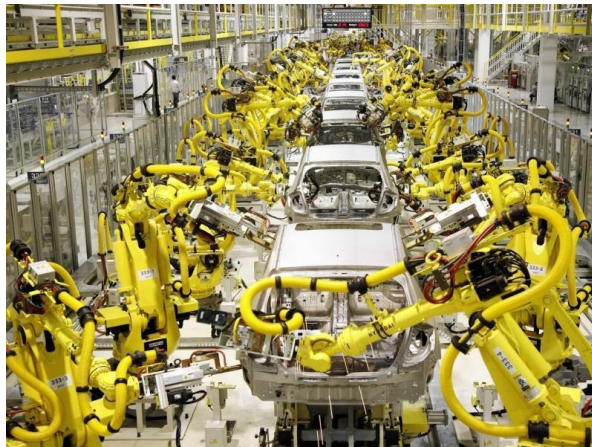


4.2 Využití ve výrobě

4.2.1 Výrobní linky

Obzvláště u automatizovaných výrobních linek jsou vysokorychlostní kamery velmi důležité. Výrobní linky slouží k maximálnímu výkonu, a aby vše fungovalo jak má, je potřeba výrobu optimalizovat. Veškeré pohyby na výrobních linkách jsou ve velmi přesné a hlavně rychlé. Všechny pohyby mechanismů musí na sebe přesně navazovat, protože i při nepatrné nepřesnosti (špatné uzátkování lahve), dojde k zastavení stroje a mnohdy i složitějšímu zásahu obsluhy a to může vést k vyšší poruchovosti nebo zmetkovitosti výroby. Uplatnění kamer na linkách je:

- nastavování, seřizování a diagnostika strojů a zařízení,
- prediktivní údržba,
- na výrobních, balících a třídících linkách,
- na etiketovacích strojích,
- na dopravnících,
- na obráběcích, řezacích a stříhacích stojích. [20]



Obrázek 23. Výrobní linka [21].

4.2.2 Strojové vidění

Strojové vidění se využívá v průmyslu pro systémy automaticky zpracovávající obraz z kamer. Tyto kamery zaznamenávají možné vady na vyrobených produktech. Po vyhodnocení vad pak tyto systémy vykonávají automatizovanou činnost – vyřazení vadných produktů z výroby, upozornění obsluhy stroje na chybu, kontrolu počtu výrobků, úpravu nastavení výrobní linky. [22]

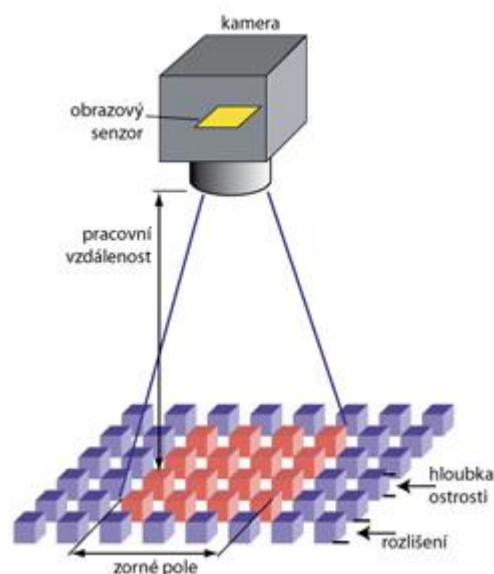
Výhody strojového vidění:

- Automatizace monitoringu kvality,
- Zvýšení efektivity a úspora ve výrobě,
- Kontrola vstupního materiálu,
- Automatické propojení s dalšími systémy,



- Výhody oproti lidskému vyhodnocení,
- Statistické srovnání a vyhodnocení,
- Bezkontaktní měření. [12]

Největší výhodou strojového vidění je kontrola vstupního a výstupního materiálu (objektu), kde systém zpracovává a vyhodnocuje kvalitu materiálu, čímž eliminuje možnost výskytu nevhodných kusů od kusů bez vad. Na výstupu dále kontroluje například přítomnost všech dílů a možných vad vzniklých při výrobě. [12]



Obrázek 24. Strojové vidění [22].

4.3 Věda a výzkum

V této kategorii jsou vysokorychlostní kamery využívány všude tam, kde je třeba zachytit procesy, které jsou lidskému oku a běžným kamerám zcela neviditelné. Využití vysokorychlostní kamery je tedy obrovské, například zkoumání blesků, pohybu a aerodynamiky zvířat a rychlost světla. Zachycením rychlosti světla se dostáváme na úplnou hranici rychlosti, protože se nic nepohybuje ve vesmíru rychleji než světlo.

4.3.1 Rychlost světla

Kamerám, které zaznamenávají rychlost světla, se už neříká vysokorychlostní, ale ultrarychlá kamera. Tato kamera umí zachytit miliardu snímků za sekundu, což je dostatečná rychlost na zachycení rychlosti světla. Experiment spočíval na zachycení rychlosti světla procházející litrovou plastovou lahví. Skutečná doba expozice jednotlivých snímků je dva trilióny za sekundu a výsledná vizualizace zobrazuje pohyb světla na zhruba půl bilionu snímků za sekundu. Záznam je pořízený nepřímou stroboskopickou metodou, a tímto můžeme nahrávat milióny opakujících se měření. Celá sestava se skládá z pěti set senzorů, které se střídají ve snímání scény. Z nasbíraných dat se následně vytvořil záznam, kde je vidět pohyb fotonů při kontaktu s různými materiály. Tomuto systému se říká „konečný“ obrazový systém. [23]



Tento systém je založený na fotoaparátu se sériovým snímáním, který pomocí clony utvoří úzkou štěrbinu a vznikne tak obraz světelných částic nebo fotonů, které štěrbinou procházejí. Samotné vytvoření videa zachycujícího rychlost světla však trvalo celou hodinu, protože k vytvoření dvojrozměrného obrazu museli vědci tento experiment provést opakovaně. [23]



Obrázek 25. Rychlost světla v láhvi [23].

4.3.2 Biologie

Vysokorychlostní kamery se staly biologií základním kamenem. Využití se zaměřuje na studii pohybu ptáků, netopýrů, ale i pohybů lidského těla.

Největší inspirací v biologii je sledování pohybu křídel kolibříka. Kolibříci totiž mají velmi jemné pohyby. S každým máchnutím křídel se křídla jinak tvarují a ohýbají. S analýzou pohybu křídel se poté vědci tyto pohyby uplatnit v robotice, aby přiměli drobné roboty k přesnému letu. Využití takových robotů by mohlo být užitečné pro armádu nebo pátrání a záchranu. [24]



Obrázek 26. Využití v biologii [24].



5 PRAKTICKÁ ČÁST

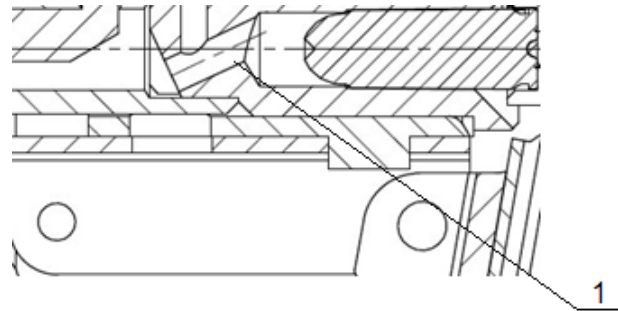
5.1 Testování zbraně a nábojky.

Zbraň kategorie D je volně prodejná od 18 let bez zbrojního průkazu. Nabíjí se s neuzamčeným závěrem, což znamená, že proti tlaku výstřelu a odporu střely působí jenom hmotnost závěru a síla pružiny. Původní verze byla vyrobena na slabší nábojku, ale jak se posléze ukázalo, expanzní nábojka byla problematická kvůli podávání nábojky do nábojové komory a zbraň se zasekávala. Také kvůli menší výkonnosti nábojky musel být malý přechodový kanálek (obr. 28), což je špatně, kvůli zanášení zplodinami. Proto se přešlo na větší nábojku. U této verze s větší nábojkou musel být zhotoven přesný přechodový kanálek. Proto bylo potřeba provést sérii výstřelů, kdy se každý výstřel nahrával vysokorychlostní kamerou a zkoumalo se chování zbraně a pohyb závěrky (viz. Příloha 1). Dále se muselo vyřešit nabíjení, neboť po vystřelení pár ran ze zbraně vypadl vytahovač nábojů a tím se zbraň ucpala. Pomocí vysokorychlostní kamery se zjistilo, že při výstřelu je v komoře stále velký tlak, který uniká dozadu a má takovou sílu, že odtlačí pružinu s čepem, jenž jistí vytahovač proti výpadku. Hlavní problém tedy byl tlak. Jestliže bude tlak příliš malý, závěrka nedojede do zadní úvratě a nenabere náboj a zbraň se zasekne. Naopak jestliže tlak bude příliš velký, závěrka narazí na doraz zadní úvratě a tím se přenesou energie do celé zbraně a způsobí rázy (pohyb závěrky viz příloha 1). [27]

Na následující expanzní nábojce je vidět, jak je důležitý správný poměr tlaků ve zbrani. Při odpálení expanzní nábojky dojde k hoření prachové složky, která vytvoří uvnitř vztlak. Správně se má nábojka v zaškracené části roztáhnout a roztaženou částí má uniknout tlak vzniklý z výstřelu. Tento tlak odchází do hlavně a vzniklá energie se přesouvá na závěr, který se poté začne otvírat. V našem případě došlo k tomu, že přechodový kanálek byl příliš malý a tím pádem tlak nepoklesl tak rychle, aby při otvírání závěrky došlo k bezpečnému vytažení náboje. Náboj se začal vytažovat příliš brzy a kvůli velkému tlaku v nábojové komoře se nábojka roztrhla (viz. obr. 27) [27]



Obrázek 27. Expanzní nábojka.



Obrázek 28. Přechodový kanálek.

Kde: 1 přechodový kanálek

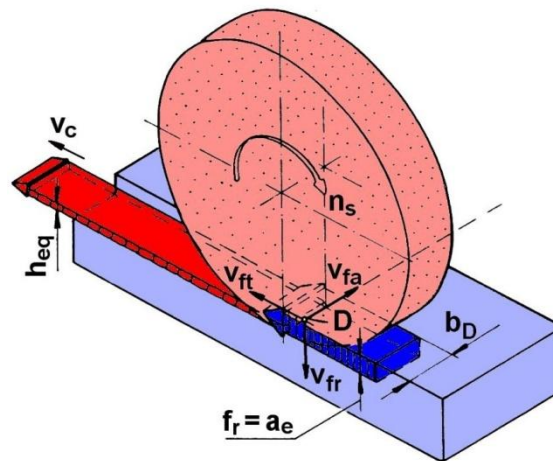


5.2 Brnoušení

5.2.1 Měření rychlosti odletu třísek

Mým úkolem bylo změřit pomocí vysokorychlostní kamery proces broušení. Broušení se uskutečnilo na rovinné brusce s běžným kotoučem s keramickým pojivem. Broušení se ve většině případů používá pro dokončovací operace, a tudíž je zde kladen důraz na přesnost rozměrů a jakost obroběných ploch.

Rovinné broušení je dokončovací operace, u které odebíráme velmi drobné částičky třísky mnohobřítým nástrojem (brusným kotoučem). U tohoto způsobu broušení dosahujeme drsnosti povrchu R_a 1,6 až 0,2 μm . Je možné brousit tvrdé kalené a cementované součásti, linuté karbidy i jiné tvrdé kovové a nekovové materiály. [25]



Obrázek 29. Schéma broušení [25].

V mém úkolu jsem měřil broušení čtyř materiálů:

- 11600,
- 14220,
- Radeco,
- Neznámý materiál, který byl cementován a kalen.

Cílem úkolu bylo nahrát brousící proces u těchto čtyř materiálů. Celé měření se provádělo dvakrát a to poprvé s laserovým osvětlením a podruhé s osvětlením LED. Poté ze zpomaleného záběru určit a porovnat rychlosti odlétávajících třísek, porovnat skutečnou úhlovou rychlost kotouče vypočtenou ze zpomaleného záběru s teoretickou úhlovou rychlostí vypočtenou pomocí zadaných hodnot.

5.2.2 Popis měření

V prvé řadě bylo potřeba sestavit vysokorychlostní kameru tak, aby byla postavena kolmo na snímání vzorek, abychom neměli zkreslenou letovou dráhu třísky kvůli výpočtům. Vysokorychlostní kamera byla postavena dále od stroje, kvůli možnému poškození objektivu od odlétujících třísek. Dalším krokem bylo nasvícení scény. V prvním kole měření byl použit jako zdroj světla velmi silný laser s objektivem s filtrem. Protože hlavním cílem experimentu bylo zjištění rychlostí třísek, museli být třísky na zpomaleném



záznamu dobře viditelné. To se nám s touto konfigurací nepovedlo. Pomocí experimentálního nahrávání, kdy jsme měnili bílé pozadí za tmavé a též nastavení kamery, se nám konečně povedlo třísky na zpomaleném záznamu zviditelnit. Konečné nastavení kamery tedy bylo kombinací rychlé závěrky a bez filtru na objektivu. Pro oba typy měření zůstalo nastavení kamery stejné, jen se měnil zdroj světla. Po úspěšné instalaci kamery jsme mohli přistoupit k měření. Na magnetickou desku sloužící k upnutí materiálu jsme museli dávat vzorky tak, aby byly v měřené scéně. Poté bylo potřeba najet na materiál, nastavit hloubku záběru a vyčkat na spuštění kamery. Protože jsme jako zdroj světla používali velmi silný laser, nebylo možné sledovat průběh broušení, kvůli možnému odrazu fotonů do očí, čímž mohlo vést k poškození. Při druhém měření s použitím LED osvětlení, bylo sledování broušení bez problému, neboť nebezpečí poškození očí nehrozí.

5.2.3 Naměřené a vypočtené hodnoty

Abychom mohli zjistit otáčky kotouče, bylo nutné na kotouč udělat značku, podle které poznáme, kolikrát se kotouč otočí za jednotku času.

Naměřený čas za jednu otáčku kotouče byl ve všech pěti případech měření stejný a to:

$$t = 0,0242 \text{ s}$$

Výpočet otáček kotouče podle vztahu (1.1).

$$n = \frac{60}{t} \quad (1.1)$$

$$n = \frac{60}{0,0242}$$

$$n = 2479,33 \text{ ot/min}$$

kde n [min⁻¹] - otáčky kotouče.

Výpočet řezné rychlosti byl proveden podle vztahu (1.2).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad (1.2)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot 211,5 \cdot 2479,33}{60 \cdot 1000}$$

$$v_c = 27,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde: v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,

D [mm] - průměr obrobku,

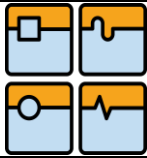
n [min⁻¹] - otáčky kotouče.

Z obrázku 1. vyplývá, že teoretická rychlost odletu třísek se rovná řezné rychlosti.

$$v_{\text{třísek}} = 27,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet úhlové rychlosti podle vztahu (1.3)

$$\omega = 2 \times \pi \times n \quad (1.3)$$



$$\omega = 2 \times \pi \times 41,3$$

$$\omega = 259,63 \text{ rad/s}$$

kde: ω [rad/s] - úhlová rychlost,
 n [min⁻¹] - otáčky kotouče.

5.2.4 Teoretické hodnoty

Pro rovinné broušení s obyčejným kotoučem s keramickými pojivky vyplývají tyto řezné podmínky:

- Hloubka záběru 0,04 mm – 0,005 mm
- Řezná rychlost 20 – 125 m.s⁻¹s⁻¹
- Rychlost posuvu stolu 8 – 18 m.min⁻¹
- Příčný posuv stolu 1/10_(0,1) šířky BK

Výpočet otáček brusného kotouče byly spočteny podle vztahu (1.4).

$$n = \frac{v_c \times 1000 \times 60}{\pi \times D} \quad (1.4)$$

$$n = \frac{27,45 \times 1000 \times 60}{\pi \times 212}$$

$$n = 2478,5 \text{ ot/min}$$

kde: v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,
 D [mm] - průměr obrobku,
 n [min⁻¹] - otáčky kotouče.

Výpočet úhlové rychlosti podle vztahu (1.3)

$$\omega = 2 \times \pi \times 41,31$$

$$\omega = 259,57 \text{ rad/s}$$



5.2.5 Měření

5.2.5.1 Materiál 11 600

je to neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku. Tato ocel je vhodná na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž se nevyžaduje svařitelnost. Ocel je vhodná pro součásti, které jsou vystavovány velkému měrnému tlaku, jakou jsou například hřídele, osy, ozubená kola. [26]

Mechanické vlastnosti oceli:

- nejmenší mez kluzu Re 294 MPa,
- Pevnost v tahu Rm 588 až 706 MPa.

Průběh měření:

Pomocí vysokorychlostní kamery jsme sledovali průběh broušení a odlet třísek. Z nahrávky je zřejmé, že je materiál dobře obrobitelný. Na zpomaleném záznamu s použitím laserového osvětlení jsou vidět takřka všechny odlétávající třísky, a proto je složité sledovat jednu určitou třísku pro výpočet rychlosti. Naopak při osvětlení LED jsou vidět pouze větší třísky, které jsou žhavější než ostatní, a proto se dají lépe sledovat.

Výpočet rychlosti při osvětlení (viz příloha 2).

a) laserem:

výpočet rychlosti třísek podle vztahu (1.5)

$$v = \frac{l}{t} \quad (1.5)$$

$t = 0,0116$ s; $t = 0,0118$ s; $t = 0,011$ s; $t = 0,0122$ s

Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$$v_1 = 9,18 \text{ m/s}, v_2 = 9,025 \text{ m/s}, v_3 = 9,68 \text{ m/s}, v_4 = 8,72 \text{ m/s}$$

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 9,15 \text{ m/s}$$

b) LED

Čas, který tříska uletí za dráhu $l = 106,5$ mm

$t = 0,0106$ s; $t = 0,0098$ s; $t = 0,0094$ s; $t = 0,0102$ s;

Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$$v_1 = 10,04 \text{ m/s}, v_2 = 9,025 \text{ m/s}, v_3 = 11,32 \text{ m/s}, v_4 = 10,44 \text{ m/s}$$

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 10,20 \text{ m/s}$$



5.2.5.2 Materiál 14 220

ocel Mn-Cr k cementování a ke kyanování. Ocel je dobře tvařitelná za tepla, po žhání na měkko i za studena, se zaručeným rozmezím prokalitelnosti. Ocel je dobře obrobitelná a svařitelná. [26]

Mechanické vlastnosti oceli:

- Nejmenší mez kluzu Re 440 Mpa,
- Pevnost v tahu Rm 640 až 930 Mpa.

Průběh měření:

U tohoto materiálu jsme mohli sledovat velmi dobrou obrobitelnost. Na záznamu s osvětlením LED je vidět velké množství odlétávajících třísek oproti materiálu 11600, což je způsobeno větší velikostí třísek, a tím pádem i větší teplotou. Díky tomu můžeme říci, že materiál 14 220 je lépe obrobitelnější než materiál 11600 (viz příloha 3).

Výpočet rychlosti při osvětlení:

a) Laser

Čas, který tříska uletí za dráhu $l = 98,25$ mm

$t = 0,0068$ s; $t = 0,0081$ s; $t = 0,0072$ s; $t = 0,0058$ s

Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$v_1 = 14,44$ m/s, $v_2 = 12,12$ m/s, $v_3 = 13,64$ m/s, $v_4 = 16,93$ m/s

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 14,28 \text{ m/s}$$

b) LED

Čas, který tříska uletí za dráhu $l = 97,4$ mm

$t = 0,0078$ s; $t = 0,0094$ s; $t = 0,0064$ s; $t = 0,0084$ s

Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$v_1 = 12,48$ m/s, $v_2 = 10,36$ m/s, $v_3 = 15,21$ m/s, $v_4 = 11,59$ m/s

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 12,41 \text{ m/s}$$

5.2.5.3 Materiál Radeco

Radeco (19 810) je rychlořezná ocel, která se používá pro výrobu vysoce namáhaných řezných nástrojů určených pro obrábění kovových součástek v tepelně nezpevněném stavu. Používá se hlavně na výrobu soustružnických a upichovacích nožů, nožů do automatů, fréz, výstružníků. [26]

**Průběh měření**

U tohoto materiálu je zřejmé, že je materiál velmi tvrdý a špatně obrobitelný. Na záznamu s použitím laserového osvětlení není vidět skoro nic. Třísky jsou tak malé, že nejsou skoro vidět, a proto bylo obtížné vůbec nějakou třísku sledovat. Naopak při LED osvětlení, jsou vidět pouze větší třísky a také můžeme pozorovat, že se většina třísek lepí na kotouč (viz příloha 4).

Výpočet rychlosti při osvětlení:

a) Laserem

Čas, který tříska uletí za dráhu $l = 117,71$ mm

$t = 0,0084$ s; $t = 0,0094$ s; $t = 0,0088$ s; $t = 0,0122$ s

Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$v_1 = 14,01$ m/s, $v_2 = 12,52$ m/s, $v_3 = 13,37$ m/s, $v_4 = 9,64$ m/s

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 12,38 \text{ m/s}$$

b) LED

Čas, který tříska uletí za dráhu $l = 66,5$ mm

$t = 0,0044$ s; $t = 0,0038$ s; $t = 0,0084$ s; $t = 0,0084$ s

Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$v_1 = 15,11$ m/s, $v_2 = 17,5$ m/s, $v_3 = 7,91$ m/s, $v_4 = 7,91$ m/s

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 12,10 \text{ m/s}$$

5.2.5.4 Materiál cementováno kaleno

Neznámý materiál, u kterého se vědělo pouze to, že byl cementován a kalen.

Průběh měření:

Na zpomaleném záznamu je vidět, že je tento materiál je špatně obrobitelný. Při laserovém osvětlení vidíme velmi drobné třísky a v malém počtu. Při použití LED osvětlení, si můžeme povšimnou velkých žhavých třísek, které jsou ve skutečnosti brusné částice kotouče. Sledování jedné určité třísky pro výpočet rychlosti, je v tomto případě velmi složitý (viz příloha).

Výpočet rychlosti při osvětlení:

a) Laserem

Čas, který tříska uletí za dráhu $l = 66,19$ mm

$t = 0,0042$ s; $t = 0,0028$ s; $t = 0,0056$ s; $t = 0,0056$ s



Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$$v_1 = 15,75 \text{ m/s}, v_2 = 23,63 \text{ m/s}, v_3 = 11,81 \text{ m/s}, v_4 = 11,81 \text{ m/s}$$

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 15,75 \text{ m/s}$$

b) LED

Čas, který tříska uletí za dráhu $l = 72,51 \text{ mm}$

$$t = 0,0052 \text{ s}; t = 0,0056 \text{ s}; t = 0,0052 \text{ s}; t = 0,0062 \text{ s}$$

Rychlosti třísek pro jednotlivé naměřené časy t_1, t_2, t_3, t_4 byly spočteny podle vzorce (1.5)

$$v_1 = 13,94 \text{ m/s}, v_2 = 12,94 \text{ m/s}, v_3 = 13,94 \text{ m/s}, v_4 = 11,69 \text{ m/s}$$

Výsledný průměr rychlosti třísek je:

$$v = 13,12 \text{ m/s}$$

Tabulka 1. Rychlost třísek s vypočítanou rychlostí.

	Lasertové osvětlení	LED osvětlení	Vypočítaná rychlost třísek
Materiál	rychlost třísek	rychlost třísek	
11 600	9,145 m/s	10,20 m/s	27,45 m/s
14 220	14,28 m/s	12,41 m/s	27,45 m/s
Radeco	12,38 m/s	12,10 m/s	27,45 m/s
Cement.kaleno	15,75 m/s	13,12 m/s	27,45 m/s

Směrodatná odchylka je dána vztahem (1.6) a (1.7)

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - v)^2 \quad (1.6)$$

$$\sigma = \sqrt{x} \quad (1.7)$$

kde: N - počet měření,
 v_i [m/s] - naměřená rychlost,
 v [m/s] - průměrná rychlost
 σ - směrodatná odchylka



Tabulka 2. Směrodatné odchytky

Materiál	Laserové osvětlení		LED osvětlení	
	Průměrná rychlost třísek	Směrodatná odchytky	Průměrná rychlost třísek	směrodatná odchytky
11 600	9,15m/S	0,34	10,20 m/s	0,82
14 220	14,28 m/s	1,74	12,41 m/s	1,78
Radeco	12,38m/s	1,67	12,10 m/s	4,28
Cement.kaleno	15,75 m/s	4,82	13,12 m/s	0,92

5.3 Zhodnocení měření

Cílem tohoto měření bylo zhodnotit a porovnat broušení odlišných druhů materiálu. Ze zpomalených záznamů broušení jsem zjistil, že materiály 11 600 a 14 220 jsou dobře obrobitelné, což bylo patrné z charakteristických vlastností oceli. Naopak materiály Radeco a ocel cementovaná a kalená, jsou velmi špatně obrobitelné a při broušení se třísky lepí na kotouč.

V tabulce 1 můžeme vidět porovnání rychlostí třísek podle druhu osvětlení a také teoretickou rychlost třísek. Velké rozdíly jsou způsobeny tím, že při měření rychlosti vybrané třísky, mohla mít zakřivenou trajektorii a tím se dráha třísky zvětšila. Další ovlivňující faktor velkých rozdílů je, že třísku, kterou měříme na dráze 1, je brzděna odporem vzduchu a tím klesá její rychlost.

V tabulce 2 je zaznamenána směrodatná odchytky, která nám říká, o jakou míru jsou vzdáleny naměřené hodnoty rychlostí k průměrné naměřené rychlosti. Ve většině případů je směrodatná odchytky velká, což mohlo být způsobeno tím, že každá třísky má jinou velikost a dráhu, tím pádem je odpor vzduchu odlišný a tím i výsledná rychlost pro konkrétní třísku.



ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit čtenáře s problematikou vysokorychlostních kamer a jejich využití v praxi. Popsat stručný vývoj kamer a uvést některé typy současných vysokorychlostních kamer. Dále jsem se zaměřil na základní rozdělení a uvedl jsem princip natáčení a důležité podmínky pro kvalitní záznam.

V mé práci se zabývám využitím vysokorychlostních kamerových systémů v průmyslu. Uvedl jsem zde nejdůležitější využití ve výrobě, vědě, výzkumu a zkušebnictví a popsal, jak se kamery v daném odvětví využívají.

Hlavní částí mé bakalářské práce je praktická část, kde jsem se zabýval testováním expanzní zbraně a rovinného broušení. Na těchto dvou příkladech je ukázáno, jak se využívá vysokorychlostní kamera k analýze daného problému v praxi. Například u expanzní zbraně bylo velmi důležité nastavení tlaků v nábojové komoře. To se nám povedlo právě díky vysokorychlostní kameře. U broušení jsem z vysokorychlostního záznamu sledoval průběh obrábění, vyhodnocoval rychlosti třísek a hodnotil, zda je obráběný materiál dobře nebo špatně obrobitelný. Na závěr jsem zhotovil tabulky, kde jsou zřetelně vidět rozdíly rychlostí třísek v praxi naměřených od rychlostí dosažených pomocí výpočtů.

Výhodou vysokorychlostních kamer je optimalizace výroby, dosažení úspor výrobních nákladů a hlavně času. V dnešní době, kdy se dbá na kvalitu a bezpečnost výroby je vysokorychlostní kamera velmi důležitou součástí výroby.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] *High-speed photography*. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA):Wikimedia Foundation, 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_photography
- [2] Endelman L. Lincoln. *A BRIEF HISTORY OF HIGH SPEED PHOTOGRAPHY 1851-1930* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://people.rit.edu/andpph/text-hs-history.html>.
- [3] *Capabilities and history* [online] [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/highspeedcamerasite/Home/capabilities-and-history>.
- [4] *Vysokorychlostní kamery* [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/cs/hsv-products/>.
- [5] *Photron Cameras* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.techimaging.com/photron>.
- [6] PATA, Vladimír. *Vysokorychlostní kamerové systémy*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 92s. ISBN 80-720-4480-X.
- [7] KOMENDA, Jan. *Co je to vysokorychlostní kamera* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.rucevzhuru.cz/index.php/component/content/article/53-rychloukamery/133-vysokorychlostni-kamera.html>
- [8] *Spektra vision* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.spektravision.cz/produkty/vysokorychlostni-rychlobezne-digitalni-kamery-fastec-imaging-a-analyza-rychlych-deju/>
- [9] MEJZLIK, Tomáš. *Vysokorychlostní kamera v akci* [online]. 2010 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.tvfreak.cz/vysokorychlostni-kamera-v-akci/3762>.
- [10] *Photron Cameras* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.photron.com/index.php?cmd=camera>
- [10] *Systém strojového vidění* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.argutec.eu/systemy-strojoveho-videni>
- [11] *Vision research* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.visionresearch.com/Products/Accessories--Options/Lighting/>
- [12] *Photron cameras solution* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.photron.com/?cmd=casestudy&type=laserillumination>



- [13] *Vysokorychlostní kamera ve vývojové zkušebně* [online]. 2008 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37508.pdf>
- [14] POLÁČEK, Petr. *Krátkodobé zkoušky mechanických vlastností materiálů* [online]. 2011 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kratkodobe-zkousky-mechanickych-vlastnosti-materialu>
- [15] *CRASH TEST* [online]. cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.crashtest.cz/?act=faq>
- [16] *CRASH TEST* [online]. cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.crashtest.cz/?idca=216>
- [17] *Analýza tvorby třísky* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://cs.allreadable.com/vid/10702Af1>
- [18] ZEMAN, Pavel. *Řezné nástroje a testování jejich vlastností* [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-nastroje-a-testovani-jejich-vlastnosti.html>
- [19] *Zpomalený let kulky* [online]. 2011 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://old.stream.cz/uservideo/598102-40-000x-zpomaleny-let-kulky>
- [20] SVOBODA, Štěpán. *Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodů strojů a výrobních linek* [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518.
- [21] *Podívejte se, jak se na Slovensku vyrábějí vozy Kia* [online]. 2008 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/podivejte-se-jak-se-na-slovensku-vyrabeji-vozy-kia-fs9-/automoto.aspx?c=A080916_151719_automoto_fdv
- [22] *Systém strojového vidění* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://www.strojove-videni.cz/default.asp?inc=inc/tp_optika.htm&id=22
- [23] Femto-Photography [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://web.media.mit.edu/~raskar/trillionfps/>
- [24] GILL, Victoria. *Life in super slow-motion* [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/science-environment-23205563>
- [25] HUMÁR, Antonín. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ 3. část* [online]. 2005. vyd. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>



[26] *Mechanické vlastnosti ocelí* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.tprom.cz/tabulky/tabulka4.html>

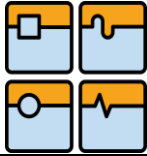
[27] Podle ústního sdělení Tomáše Zendla (člen střeleckého klubu) dne 15. Března 2014

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

s	sekunda
Ms	milisekunda
Ms	mikrosekunda
μm	mikrometr
mm	milimetr
kHz	kilohertz
Hz	hertz
nM	nanometr
Ns	nanosekunda
m/s	metr za sekundu
MPa	megapaskal
Rm	mez pevnost v tahu
Re	mez kluzu v tahu
Ra	drsnost povrchu
km/hod	kilometr za hodinu
Fps	Frame per sekund
VHS	Video Home Systém (=druh záznamu)
S-VHS	uper Video Home Systém (=druh záznamu)
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (=druh snímacího senzoru)
CCD	Charge Coupled Devide (=druh snímacího senzoru)
HD	High definitiv (=rozlišení 1280 x 720 pixelů)
Full HD	Full High definitiv (=rozlišení 1920 x 1080 pixelů)
CDU	Camera Display Unit (=ovladač displeje)
LED	Light Emitting Diodes (=světlo vyzařující dioda)
PC	Personal Computer (=domácí počítač)
BK	brusný kotouč

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1. Kůň v pohybu [1].	10
Obrázek 2. Nukleární exploze [1].	11
Obrázek 3. Vysokorychlostní kamera CX-1 [3].	11
Obrázek 4. Olympus i-Speed LT [4].	13
Obrázek 5. Olympus i-Speed 3 [4].	14
Obrázek 6. Phantom v2010 [5].	14
Obrázek 7. Photron Fasrcam IS-1M [5].	15
Obrázek 8. Příslušenství [6].	16
Obrázek 9. Připojovací schéma[6].	17
Obrázek 10. Stacionární kamera IL 3 [8].	17
Obrázek 11. Přenosná kamery TS 3 [8].	18
Obrázek 12. Záznam při snímkové frekvenci 30 obrázků za sekundu [10].	19
Obrázek 13. Záznam při snímkové frekvenci 240 obrázků za sekundu [10].	19
Obrázek 14. Svařování bez filtru [12].	20
Obrázek 15. Svařování s filtrem [12].	20
Obrázek 16. Kontrola činnosti zámku [13].	22
Obrázek 17. Zkouška rázem [14].	23
Obrázek 18. Grafické znázornění míry bezpečnosti [16].	24
Obrázek 19. Crash test [16].	24
Obrázek 20. Funkce nástroje a tvorba třísky [17].	25
Obrázek 21. Test průraznosti střeli [19].	25
Obrázek 22. Test průraznosti třely [19].	26
Obrázek 23. Výrobní linka [21].	27
Obrázek 24. Strojové vidění [22].	28
Obrázek 25. Rychlost světla v láhvi [23].	29
Obrázek 26. Využití v biologii [24].	29
Obrázek 27. Expanzní nábojka.	30
Obrázek 28. Přechodový kanálek.	31
Obrázek 29. Schéma broušení [25].	32



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Rychlost třísek s vypočítanou rychlostí.....	38
Tabulka 2. Směrodatné odchyly	39



SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|-----------|--|
| Příloha 1 | Znázorněný pohyb závěrky. |
| Příloha 2 | Průběh broušení materiálu 11 600 |
| Příloha 3 | Průběh broušení materiálu 14 220 |
| Příloha 4 | Průběh broušení materiálu Rdeco |
| Příloha 5 | Průběh broušení materiálu Cementováno kaleno |

PŘÍLOHA 1

Pohyb závěrky



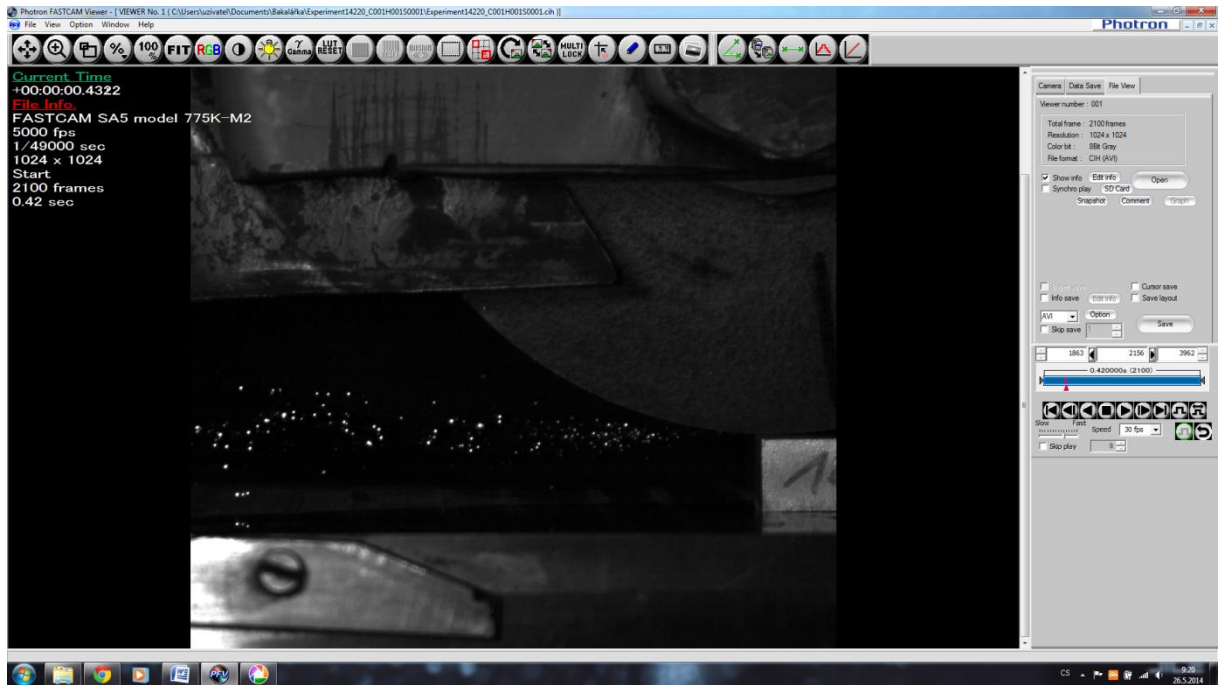
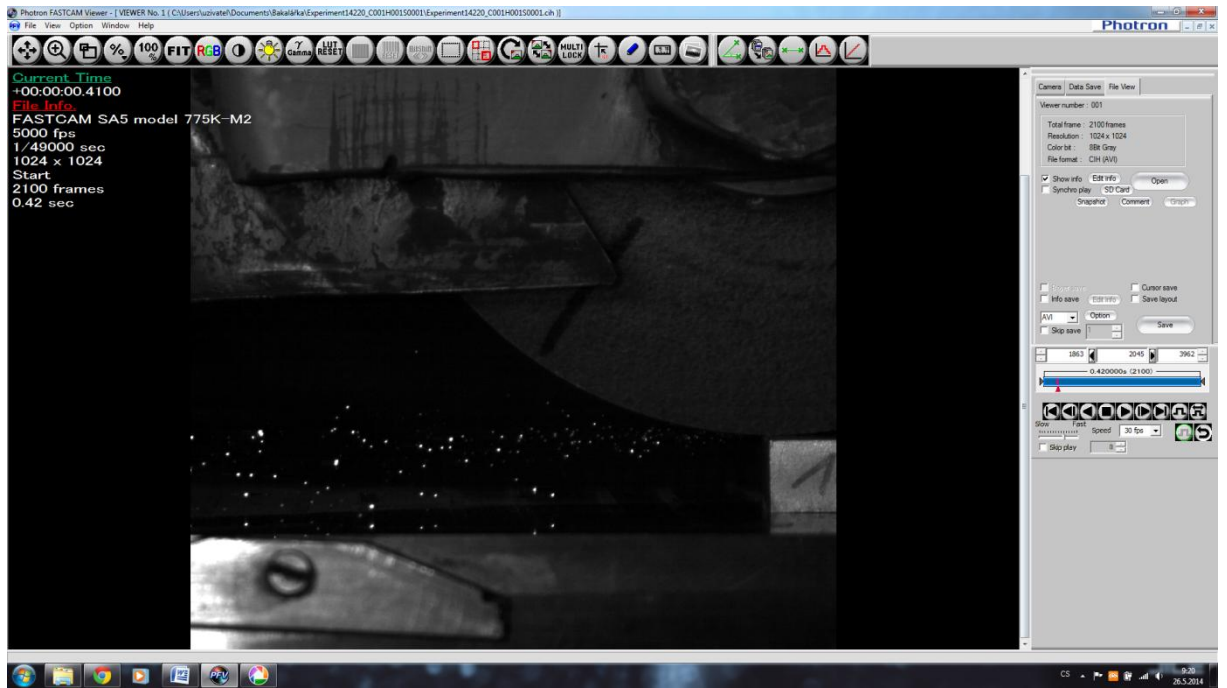
PŘÍLOHA 2

Broušení materiálu 11 600



PŘÍLOHA 3

Broušení materiálu 14 220



PŘÍLOHA 4

Broušení materiálu cementováno kaleno



PŘÍLOHA 5

Broušení materiálu Radeco

