



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA TVORBY TŘÍSKY POMOCÍ DIGITÁLNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VOJTĚCH TICHÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POLZER, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vojtěch Tichý

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery

v anglickém jazyce:

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

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu obrábění soustružením dochází k utváření třísky, což je děj, který nelze detailně sledovat lidským okem. Podstatné změny nebo rozdíly utváření třísky je však možno zaznamenat a následně analyzovat prostřednictvím specializovaných softwarů a hardwarových zařízení (digitálních vysokorychlostních kamer).

Cíle diplomové práce:

- vytvořit výrobní dokumentaci k vlastnímu navrženému upínači digitální vysokorychlostní kamery, pro její uchycení k nožovému suportu soustruhu SV18R
- navrhnout experiment a zaznamenat proces třískového obrábění (soustružení) digitální vysokorychlostní kamerou TroubleShooter 1000
- ověřit funkčnost utvařeče třísky soustružnického nože při různých řezných podmínkách

Seznam odborné literatury:

KLOCKE, Fritz. Manufacturing processes 1: turning, milling, drilling. 1st ed. New York: Springer, 2011, p. cm. ISBN 978-364-2119-781.

KRAR, Stephen F. Technology of machine tools. 7th ed. McGraw-Hill: , 2011, x, 925 s. ISBN 978-007-3510-835.

TSCHÄTSCH, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

Machining: fundamentals and recent advances. Editor J Davim. London: Springer, c2008, xiii, 361 s. ISBN 978-1-84800-212-8.

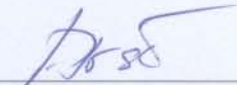
Rsm: a key to optimize machining. S.l.: Anchor Academic Publishin, 2014. ISBN 978-395-4892-099.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21.11.2014





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou vysokorychlostních kamer a jejich využití v různých odvětvích lidské činnosti, především potom využitím ve výzkumu třískového obrábění. Jsou zde shrnuty důležité znalosti potřebné pro tvorbu vysokorychlostního záznamu a výběr vhodného objektivu. Práce je zaměřena na vytvoření vysokorychlostního záznamu procesu vzniku a utváření třísky při soustružnické operaci vnější zapichování za použití rozdílných typů utvařečů třísky. Cílem je ověřit tak jejich funkčnost v určitém rozmezí hodnot posuvu na otáčku.

Klíčová slova

Vysokorychlostní digitální kamera, parametry objektivů, tvorba třísky, soustružení, zapichování, vyměnitelná břitová destička, utvařeč třísky.

ABSTRACT

This thesis covers matters related to high-speed digital cameras and their usage in various spheres of human activities, mainly in research of chip forming. Thesis summarises important knowledge needed for creation of high-speed recordings and choice of suitable lenses. Focus is taken on creation of high-speed recordings of chip forming process in turning operation outside grooving by using of different types of chipformers. Main goal is to verify its functionality in specific value range of feed per revolution.

Key words

High-speed digital camera, lens parameters, chip forming, turning, grooving, cutting insert, chipformer.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TICHÝ, V. *Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 96 s. 3 přílohy. Vedoucí diplomové 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 na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Vojtěch Tichý

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Mgr. Michalu Jílkovi za pomoc při přípravě experimentu a v neposlední řadě děkuji panu Ing. Václavu Tichému za pomoc při výrobě držáku vysokorychlostní kamery.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	10
1 Digitální vysokorychlostní kamerový systém.....	11
1.1 Historie záznamu vysokorychlostního děje	11
1.2 Historický vývoj vysokorychlostních kamer	12
1.3 Současnost na trhu s vysokorychlostními kamerami	13
1.4 TroubleShooter 1000	16
1.5 Oblasti použití.....	17
1.5.1 Použití v medicíně	18
1.5.2 Použití ve sportu	18
1.5.3 Použití v oblasti přírodních věd.....	19
1.5.4 Použití v průmyslu	20
1.6 Důležité znalosti pro tvorbu vysokorychlostního záznamu	23
1.6.1 Viditelné spektrum světla	24
1.6.2 Snímací prvek	25
1.6.3 Barevná hloubka	26
1.6.4 Rozlišení	27
1.6.5 Citlivost ISO	28
1.6.6 Rychlost záznamu	28
1.6.7 Rychlost závěrky.....	30
1.6.8 Objektivy	32
1.6.9 Ohnisková vzdálenost.....	35
1.6.10 Clona.....	36
1.6.11 Zorný úhel objektivu.....	37
1.6.12 Zaostřitelná vzdálenost	39
2 Teorie z oblasti tvorby třísky při soustružení	41
2.1 Teoretický model řezání	41
2.2 Pěchování třísky.....	43
2.3 Určení úhlu střížné roviny ϕ	44
2.4 Faktory ovlivňující povrchovou vrstvu obrobku	46
2.5 Základní rozdělení třísek	47

2.6	Třísky při obrábění kovů.....	48
2.7	Tvar třísek podle objemového součinitele W	49
2.8	Způsoby lomu třísky	50
2.9	Oblast utváření vhodných třísek	51
2.11	Funkce utvařeče třísky	52
2.12	Vznik třísky u soustružnické operace zapichování.....	53
2.13	Princip soustružnické operace vnější zapichování.....	53
2.14	Řezné síly a výkon.....	55
2.15	Geometrie vyměnitelné břitové destičky určené pro zapichování.....	56
3	osvětlení scény.....	58
3.1	Třídění světelných zdrojů	58
3.2	Vliv vzdálenosti zdroje světla.....	58
3.3	Teplota chromatičnosti	60
3.4	Index podání barev.....	61
3.5	Světelný tok	61
3.6	Intenzita osvětlení	61
3.7	Světelná účinnost zdroje	62
3.8	Svítivost	63
3.9	Jas.....	63
4	experimentální část	64
4.1	Volba stroje.....	64
4.2	Volba obrobku	65
4.3	Volba kamery a její umístění	66
4.4	Volba objektivu.....	68
4.5	Držák vysokorychlostní kamery	69
4.6	Volba způsobu nasvícení	70
4.7	Volba upnutí VBD	71
4.8	VBD s produkce společnosti Pramet použité v experimentu	72
4.8.1	Experiment s VBD LFMX 3.10-0.20 SN-M2	72
4.8.2	Experiment s VBD LFMX 3.10-0.20 EN-F1	76
4.9	VBD s produkce společnosti Iscar použité v experimentu	79
4.9.1	Experiment s VBD GFN-3-IC354	79
4.9.2	Experiment s VBD GFN-3J-IC328.....	83
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	88

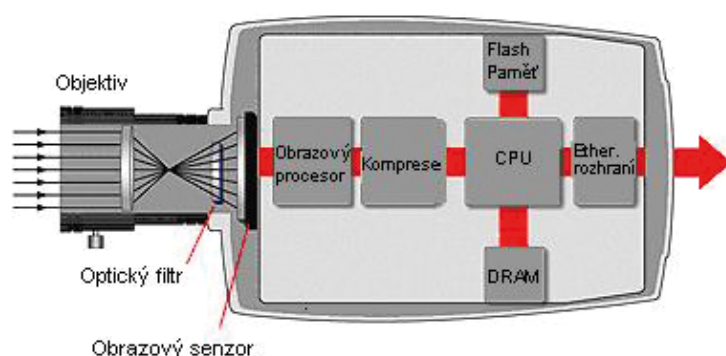
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	93
SEZNAM PŘÍLOH.....	96

ÚVOD

Lidské oko není schopno zachytit velmi rychlé děje a náš mozek je vyhodnocuje zcela individuálně, a to v závislosti na denní době, osvětlení, věku, únavě, oční vadě a dalších proměnných faktorech. Proto se v současnosti ke zkoumání a následné analýze rychlých dějů ve většině odvětvích lidské činnosti využívají vysokorychlostní kamery. Jedním z využití těchto kamer ve strojírenství je záznam vzniku a utváření třísky při soustružení. Záznam lze zpomalit, rozfázovat a zjistit možné nedostatky, vyplývající z materiálu, chodu stroje, či lidského faktoru. Poznatky lze využít ke zefektivnění i desetiletí fungujících výrobních procesů. Tato práce se zabývá problematikou vysokorychlostních kamer a jejich využitím k záznamu vzniku a utváření třísky při soustružnické operaci vnější zapichování, návrhem dostatečně nastavitelného držáku kamery s ohledem na možnosti objektivů, upevněním držáku do suportu soustruhu SV 18 R. Jsou zváženy možnosti vhodného umístění kamery a osvětlení scény. Je popsáno použití rozdílných typů utvařečů třísky s cílem ověření jejich funkčnosti v určitém rozmezí hodnot posuvu na otáčku. Ze zhotovených záznamů jsou vytvořeny obrazové sekvence.

1 DIGITÁLNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROVÝ SYSTÉM

Digitální vysokorychlostní kamera je optoelektronické zařízení, jehož hlavním využitím je tvorba obrazového záznamu vysokorychlostních dějů. Takovýto záznam, dostatečně zpomalený, se dá zkoumat buď vizuálně nebo také s použitím softwaru. V takovém případě se do záznamu zadá sledovaný bod a následně se může určit změna jeho polohy, rychlosti a zrychlení během zkoumané sekvence. Pro vytvoření relevantního výstupu z takové analýzy je nutné, aby se zájmový bod pohyboval v jedné rovině, která je kolmá na osu pohledu rychloběžné kamery a součástí zmiňované roviny je i výchozí referenční bod.



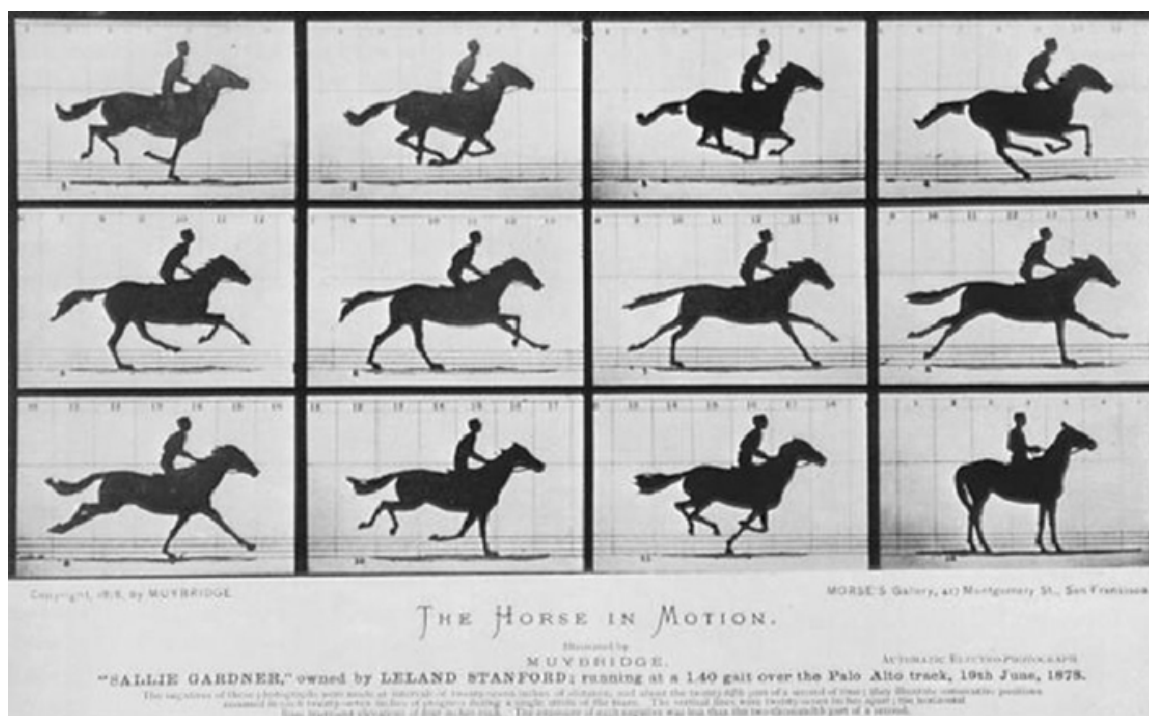
Obr. 1.1 Princip funkce kamery [34].

Na jakém principu taková kamera zjednodušeně funguje je ilustrováno na obrázku 1.1 a dá se popsat přibližně takto. Světelné paprsky projdou objektivem na snímací prvek kde jsou převedeny na elektrický náboj. Obrazový procesor jej převede na digitální signál, který je následně zkomprimován na příslušný formát.

Vzniklý záznam se potom uloží na flash paměť. Ten je možné shlédnout přímo na displeji kamery, pokud to její konstrukce dovoluje, nebo odeslat do počítače. V následujících kapitolách budou důležité vlastnosti pro tvorbu vysokorychlostního záznamu více přiblíženy. Zmíněny budou i oblasti použití. [2] [33]

1.1 Historie záznamu vysokorychlostního děje

Poznávání světa a jeho zákonitostí je přirozenou lidskou vlastností odpradávná. V možnostech lidského zraku není vyhodnotit vysokorychlostní děj, proto se v historii objevovaly různé dohady nad jeho průběhem. První velký úspěch v zaznamenání vysokorychlostního děje je připisován Edwardu Jamesovi Muggeridgeovi, který byl známý také jako Eadweard J. Muybridge (1830-1904). Snažil se dokázat, že existuje moment, kdy tryskem pohybující se kůň nedotýká země ani jednou končetinou. To se tomuto britskému fotografovi podařilo na území USA v roce 1878. Sekvence snímků z této doby zachycuje obrázek 1.2. Pro jeho vytvoření bylo použito 12 fotoaparátů, kdy spoušť každého z nich spustil sám kůň. Kůň svým pohybem natáhl provázek, který vedl přes dráhu závodiště. Byly použity velmi krátké expoziční časy v řádech tisícín sekundy a záznam byl proveden pomocí mokrého kolodiového procesu. Pro zvýraznění siluety koně bylo použito bílé pozadí. Tento průkopník vysokorychlostního záznamu za svůj život značně zdokonalil fotografické přístroje pro tento účel a vytvořil nespočet studií různých pohybů. Předpověděl také nutnost použití cílové fotografie, což se 25. června 1980 potvrdilo při dostihu v New Jersey, kdy byla cílová fotografie poprvé použita. [29] [30]



Obr. 1.2 Sekvence snímků Eadwearda Muybridge pořízená v roce 1878 [29].

Na výzkum Eadwearda Muybridga navázal Harold Edgerton (1903-1990). Považuje se za vynálezce stroboskopu, který při svých pokusech hojně využíval. Princip byl v cyklickém intenzivním nasvícení scény na velmi krátkou dobu. Pomocí synchronizace se záznamovým zařízením tvořil chronofotografický záznam. Jeho výzkum sekvenční fotografie tak položil základy pro vznik vysokorychlostních kamer. [29] [30]

1.2 Historický vývoj vysokorychlostních kamer

Za první vysokorychlostní kameru, jak je tento pojem chápán dnes, je možné považovat model s názvem Instar od společnosti Video Logic Corp. Jako záznamové médium zde byla použita páska, kdy bylo možné dosáhnout záznamové frekvence až 240 fps. Tento model se dostal na trh během 70. let minulého století. Další vývoj se ubíral různými směry, z nichž některé se ukázaly jako slepé uličky. Dalším historickým milníkem ve vývoji lze označit kameru MASD 1000 a následně i MASD SP2000 od firmy Kodak uvedenou na trh v roce 1980. Zde bylo možné snímat až 2000 snímků za sekundu při rozlišení 192 x 240 obrazových bodů, při snížení kvality záznamu bylo možné zachytit až 12000 fps. Systém využíval černobílého záznamu. V tehdejší době byla pořizovací cena přibližně 140000 USD. Další vývoj vysokorychlostních kamer předurčil vynález digitálního snímacího prvku CCD později CMOS. První vysokorychlostní kamera využívající digitálního snímače obrazu se objevila roku 1990. Byla vyvinuta firmou Kodak s obchodním názvem Ektapro EM1012 a dokázala vytvořit záznam až 1000 fps v rozlišení 240x192. Při snížení záznamové kvality na 240x16 bylo možné zachytit až 6000 snímků za

sekundu. Modelová řada Ektapro se dále vyvíjela, na obr 1.3 je ilustrován jeden z prvních exemplářů této řady. Digitální vysokorychlostní kamery se vyvíjely dál až do dnešních dní. Především postupným zlepšováním digitálního záznamu obrazu, což vedlo k vyššímu rozlišení a rychlosti záznamu. Dále se prodlužuje doba, kterou lze zaznamenat při vysokém rozlišení nebo snímkovací frekvenci. [31]



Obr. 1.3 Digitální vysokorychlostní kamerový systém Ektapro EM1012 [32].

1.3 Současnost na trhu s vysokorychlostními kamerami

V dnešní době se na trhu s digitálními vysokorychlostními kamerami pohybuje velké množství výrobců. V tabulce 1.1 je možné vidět shrnutí těch nejzavedenějších spolu se třemi aktuálně prodávanými modely. Ty se liší různými vlastnostmi, především pak kolik dokáží maximálně zachytit snímků za vteřinu a v jakém rozlišení. Důležitým faktorem je také cena. Při výběru kamery je nejnütnější brát zřetel na účel použití a povahu výzkumu.

Podle konstrukce lze současné vysokorychlostní digitální kamery rozdělit takto:

- Kompaktní sestava - K vytvoření záznamu nepotřebují přídavná zařízení, mají integrovaný displej, což umožňuje lepší orientaci při výběru kompozice a také sledovat výslednou sekvenci přímo na kameře. Typickým představitelem je model TS3-100 od společnosti FastecImaging uvedený na obrázku 1.4. Největší

výhoda tohoto typu konstrukce je zejména skladnost a možnost požití zařízení kdekoli je potřeba. To je vhodné především pro použití v terénu ,ať už jde o přírodovědný výzkum nebo analýzu pohybu strojírenských zařízení. Mezi další výhody se řadí také nižší pořizovací cena. Naopak nevýhoda tohoto typu konstrukce je nižší dosažitelná snímkovací frekvence. [40]



Obr. 1.4 Kompaktní sestava TS3-100 od společnosti FastecImaging [40]

- Modulární sestava - Pro vytvoření záznamu potřebují další zařízení jako počítač nebo přídatný displej CDU (control display unit). Zmiňovaný typ se používá především v laboratořích zařízených pro tento druh výzkumu. Jako je například zkoumání balistiky a ničivých účinků projektilů nebo také nárazové zkoušky automobilů. U tvorby podobných druhů záznamu je zapotřebí scénu snímat z více pohledových míst s použitím většího počtu kamer. Typickým představitelem je model HiSpec 5 od společnosti FastecImaging uvedený na obrázku 1.5. Mezi nevýhody tohoto typu konstrukce se řadí vyšší náročnost na prostor a zpravidla vyšší pořizovací cena. Naopak výhodou je možnost dosažení větší rychlosti záznamu a lepšího rozlišení. [40]





Obr. 1.5 Modulární sestava HiSpec 5 od společnosti FastecImaging [40]

Tab. 1.1 Výrobci VRK a jejich současné modely [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41].

Název a web společnosti	Prodáváný model	Obrázek (první)
FASTVISION http://www.fast-vision.com/	FastCamera 215	
	FastCamera 40	
	FastCamera13	
MIKROTRON http://www.mikrotron.de/	MotionBLITZ EoSens® mini	
	MotionBLITZ®Cube4	
	eosens TS3	
OPTRONIS http://www.optronis.com/	CR1000x3	
	CR450x3	
	CR600x2	
QUALISYS http://www.qualisys.com/	Oqus 7+	
	Oqus 5+	
	Oqus 3+	
VISIONRESEARCH http://www.visionresearch.com/	v1211	
	Flex4K	
	Miro 3	
FASTECIMAGING http://www.fastecimaging.com/	TS3-100	
	HiSpec 5	
	HiSpec 4	

Tab. 1.1 Výrobci VRK a jejich současné modely [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41].- pokračování

Název a web společnosti	Prodáváný model	Obrázek (první)
OLYMPUS http://www.ix-cameras.com/	i-SPEED 3	
	i-SPEED TR	
	i-SPEED 7	
PHOTRON http://www.photron.com/	FASTCAM SA2	
	FASTCAM BC2 HD	
	FASTCAM Mini UX50	

1.4 TroubleShooter 1000

Digitální vysokorychlostní kamera TroubleShooter 1000 je jedním ze starších modelů z produkce společnosti FastecImaging, uvedena na trh v roce 2007. Jde o jednu z prvních kompaktních sestav, ilustruje obrázek 1.5. Tato kamera je v majetku Ústavu strojírenské technologie a její použití je uvažováno pro experimentální část této práce. Záznam se dá provádět buď ručně nebo také pomocí programu CamLink, když se soustava připojí k počítači pomocí USB rozhraní. S parametry této kamery se bude možné setkat dále v této práci některé jsou shrnuty v tabulce 1.2 ostatní potom v příloze 1.

Tab. 1.2 Vybrané parametry kamery TroubleShooter 1000 [24].

Model	Troubleshooter 1000
Snímací prvek	CMOS, 640x480, barevný, 24 bit
Objektiv	Výměnný, standardní C upevnění
Maximální počet snímků za sekundu [fps]	1000
Max. rozlišení snímků při max. fps	640x480
Rozměry [mm]	152x127x100
Hmotnost [kg]	1
Vestavěný displej	LCD 5"



Obr. 1.5 Digitální vysokorychlostní kamera TroubleShooter 1000.

1.5 Oblasti použití

Se snižující se cenou elektronických komponentů a rostoucím počtu producentů digitálních vysokorychlostních kamer začíná být výsledná cena zařízení příznivá pro čím dál větší počet konečných spotřebitelů a odvětví. Jejich uplatnění je všude tam, kde je zapotřebí nějakým způsobem analyzovat vysokorychlostní děj. Může jít o výzkum v některém vědním oboru, použití při různých zkouškách výrobků a materiálu nebo také ve výrobním procesu. Možných využití je celá řada, není snadné je nějakým způsobem kategorizovat, protože každé použití kamery je svým způsobem specifické.

Podle oborů mohou být roztříděny takto:

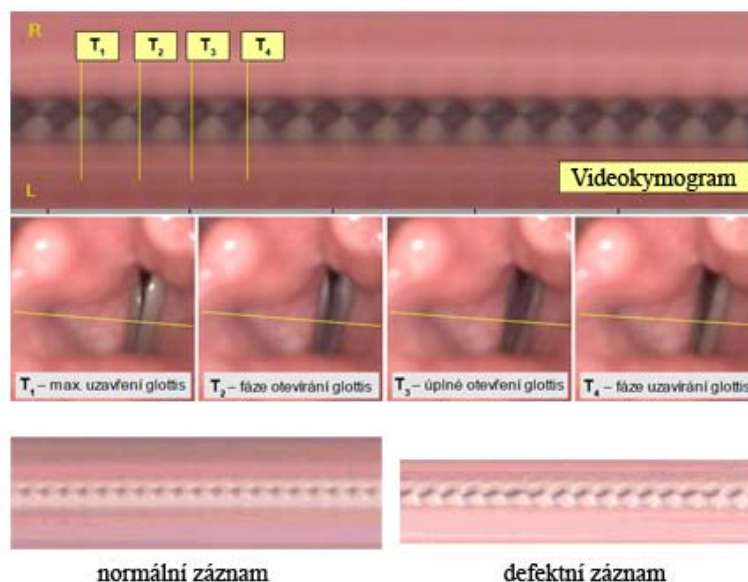
- Medicína
- Sport
- Přírodní vědy
- Průmysl

1.5.1 Použití v medicíně

Jednou s nejzavedenějších metod používanou v medicíně je videokymografie, používá se k diagnostice hlasivek u pacientů s chrapotem. Je prováděna například pomocí přístroje WOLF, který je uveden na obrázku 1.6. Ten dokáže zachytit až 8000 snímků za sekundu a následně sestavit tzv. videokymogram, pomocí integrovaného softwaru. Tímto způsobem lze sledovat funkci hlasivek při jednotlivých fázích cyklu jejich otevírání a zavírání. Dle vyhodnocení amplitudy kmitů lze detekovat defektní hlasivku nebo karcinom. Nepravidelnému kmitání hlasivek se dá potom zabránit například chirurgickým zákrokem. Obrázek 1.7 vystihuje jednotlivé fáze hlasivky a je zde uveden také normální a defektní videokymogram. Další možností použití digitálních vysokorychlostních kamer v oblasti medicíny je v ortopedii nebo rehabilitaci při analýze pohybu jako diagnostický nástroj.[42][43]



Obr. 1.6 Přístroj WOLF [42].

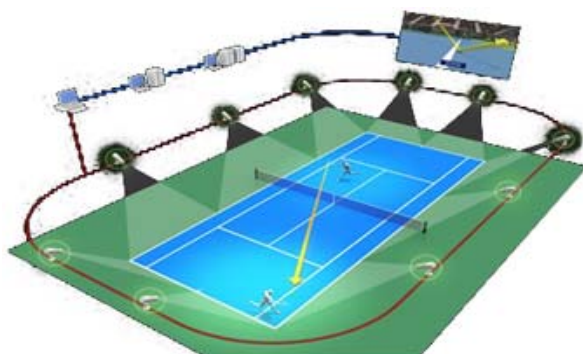


Obr. 1.7 Fáze hlasivek a příklad videokymogramu [43].

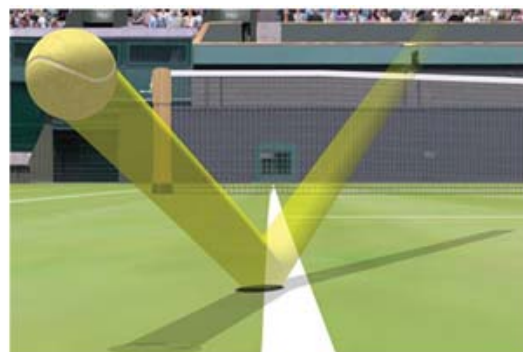
1.5.2 Použití ve sportu

Dalším odvětvím kde je technologie vysokorychlostních kamer s digitálním záznamem hojně využívána je sport. Někde je technologie odmítána, jinde pomáhá určit vítěze. Typickým příkladem takového využití je v tenise. Míček se pohybuje vysokou rychlostí a pouhým okem zaznamenat jestli už spadl do autu nebo ne je někdy nemožné, proto byl vyvinut systém s názvem Jestřábí Oko (Hawk Eye). Deset rychloběžných kamer je umístěno na přesně daných místech okolo kurtu, jak je uvedeno na obrázku 1.8, snímají pohyb míčku ze svých zorných úhlů. Takto vzniklá data jsou analyzována pomocí softwaru v počítači a v podobě animace, podobné jako na obrázku 1.9, jsou odeslány rozhodčímu. Na vyžádání si mohou hráči takovýto záznam nechat předvést, což zamezuje případným sporům. Tento systém dokáže předpovědět trajektorii míče krátce po odpalu a určit jeho

rychlost, tvoří také různé statistiky zápasu jako úspěšnost podání atd. V dnešní době je možné se setkat s vysokorychlostními kamerami takřka ve všech sportovních odvětvích. Významnou roli hrají také v přípravě sportovců, kdy pomáhají analyzovat pohyb a tím zlepšovat techniku hry. [44]



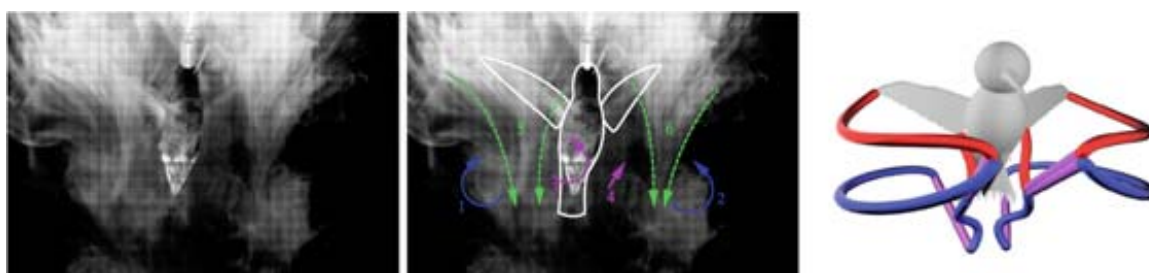
Obr. 1.8 Umístění kamer [44]



Obr. 1.9 Příklad animace [44]

1.5.3 Použití v oblasti přírodních věd

Zde je možné zařadit ověřování fyzikálních zákonů v různých situacích, výzkum přírody jako takové v podobě analýzy pohybu živočichů nebo proudění kapalin a plynů. Pro ilustraci některých možných použití je na obrázku 1.10 zachycen výzkum pohybu kolibříka v letu. Vznikl v laboratoři při záznamové frekvenci 1000 snímků za sekundu. Záznam byl proveden s několika úhly najednou pro určení potřebných pohybů křídel pro udržení ptáka v letu při prouděch vzduchu, které jsou v přírodě běžné. [45]



Obr. 1.10 Výzkum pohybů kolibříka v letu [45]

Výzkumy podobného druhu mohou mít přesah i do průmyslu. Mnoho zařízení, které lidé využívají vzniklo na základě poznatků přírodních dějů. Například konstrukce robotů bývá často inspirována způsobem pohybu některých živočichů. Je zde možné zařadit zkoumání materiálů při silovém působení nebo záznam průběhu chemických reakcí, výbuchu a podobně. Použití je možné také ve vzdělávání, přípravě vědeckopopulárních nebo zábavných video záznamů.

1.5.4 Použití v průmyslu

V různých odvětvích průmyslu jsou vysokorychlostní kamerové systémy hojně využívány a to buď pro výzkum, inovace nebo testování produktů. Pro vykreslení situace zde bude zmíněno jen několik nejzavedenějších. Od výrobních linek se očekává především rychlý a precizní chod. Jejich nastavení a seřízení, aby nedocházelo ke zbytečné zmetkovitosti, je prováděno právě pomocí rychlostních kamer. Na obrázku 1.11 je snímek se záznamu chodu zařízení, které je určeno pro zátkování lahví. Podobným způsobem lze také diagnostikovat poruchy strojů. [46]



Obr. 1.11 Zátkovací zařízení [46]

V automobilním průmyslu se vysokorychlostní záznam využívá především k vyhodnocení testů bezpečnosti motorových vozidel. Je provedena nárazová zkouška do různých míst automobilu. Obrázek 1.12 zachycuje jednu ze zkoušek na modelu Fiat Panda. To má za cíl najít slabá místa v konstrukci karoserie a bezpečnostních prvků. Následně se vyhodnotí vliv na bezpečí posádky vozu nebo chodců. Grafický výstup zachycuje obrázek 1.13. [47]



Obr. 1.12 Náraz [47]



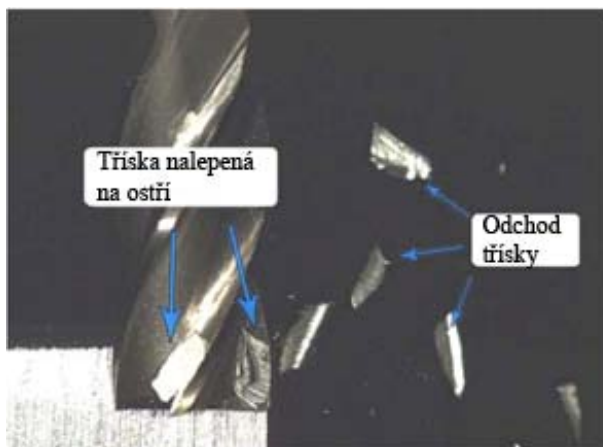
Obr. 1.13 Grafické vyhodnocení [47]

Další velice známé využití je v oblasti zbrojního průmyslu, kde se analyzuje chod zbraňových systémů nebo balistika projektilu. Předmětem zájmu je proudění plynu při výstupu z ústí hlavně a jeho vliv na pohyb projektilu. Následně je sledována dráha letu střely, zda nedochází k vychýlení či rotaci. V neposlední řadě potom dopad projektilu, způsob jeho deformace a zanechané ničivé účinky. Na obrázku 1.14 je možné vidět část záznamu tzv. vnější balistiky, je určena k pozorování stability střely a její rychlosti. [48]

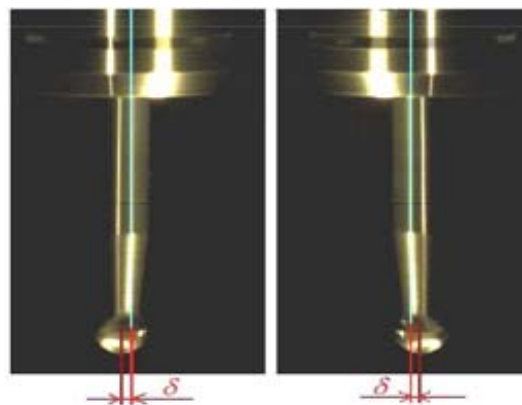


Obr. 1.14 Ukázka vnější balistiky [48].

Nejdůležitější aplikací z hlediska tématu této práce je použití rychlostních kamer ve výzkumu z oblasti obrábění. Provádí se většinou bez použití chladicí kapaliny, pro lepší viditelnost. Scénu je nutné vhodně nasvítit. Jde především o optimalizaci řezného procesu. U operace frézování se sleduje především odchod třísky ze zóny řezu, jak je uvedeno na obrázku 1.15, je zde patrný jev nalepení třísky na ostří, což je nežádoucí. Dále je možné zjistit radiální házivost frézy jak je ilustrováno na obrázku 1.16. Tento záznam byl pořízen při 90000 otáčkách vřetene za minutu a snímkovací frekvenci 3164 fps s dobou expozice pro jeden snímek 310 μ s. Fréza má průměr 3mm. Tyto podmínky měly za následek neostrost snímku ale pro pozorování vychýlení je dostačující. [49]

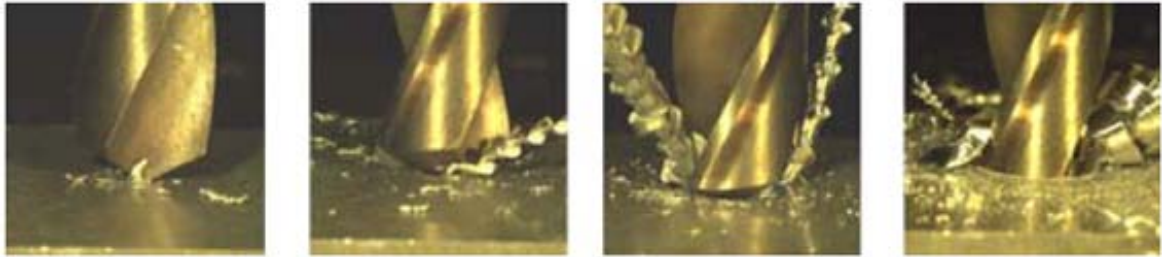


Obr. 1.15 Odchod třísky [49].



Obr. 1.16 Radiální házivost frézy [49].

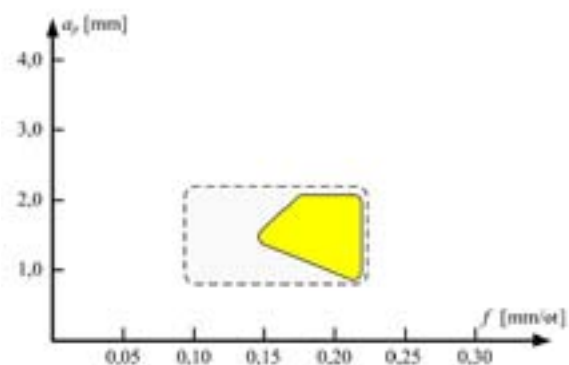
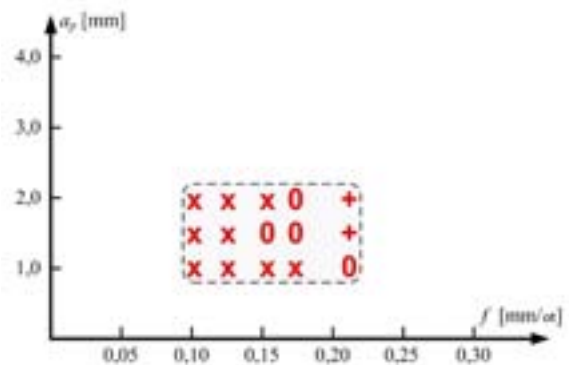
Další důležitou operací obrábění je vrtání, zde je předmětem zájmu především jakost utvořené třísky a její plynulý odchod pomocí odvodových drážek. Analýze podléhá i geometrie ostří a její vliv na proces. Na obrázku 1.17 je uvedena sekvence záznamu, která vznikla při záznamové frekvenci 2700 snímků za sekundu a expozičním čase 319 μ s. Jsou zde patrné různé fáze procesu vrtání. [49]



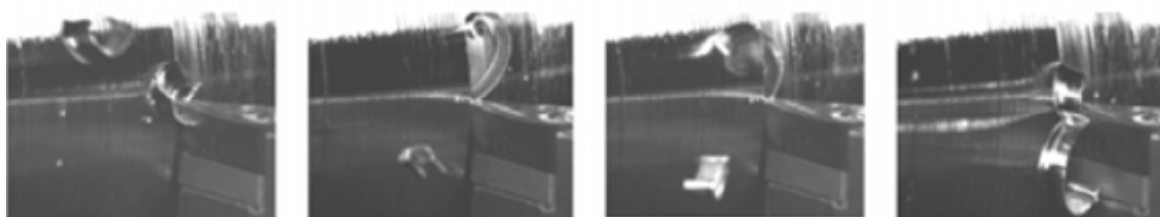
Obr. 1.17 Sekvence zachycující fáze procesu vrtání [49].

Vysokorychlostní záznam u operace soustružení je přínosný především v možnosti podrobně zkoumat vznik třísky na základě daného utvařeče a její následný lom. Sekvenci správného vytvoření a lomu třísky je možné vidět na obrázku 1.18. Nezřídka se stane, že tříška vzniká jiným způsobem než je předikováno. Tento jev je předmětem zkoumání. Obrázek 1.19 prezentuje podstatu ověřování doporučených řezných podmínek výrobcem. To se provádí především u těžkoobrobitelných materiálů nebo také tam, kde se předpokládají lokální nehomogenity ve struktuře. Provádí se i u běžných materiálů pro optimalizaci procesu. I přes podmínky předepsané výrobcem pro danou břitovou destičku, mohou při soustružení vznikat třísky nežádoucích tvarů, které mohou vést až k poškození obrobku nebo nástroje. Pokus spočívá ve sledování vzniku třísky za různých řezných podmínek. Následně se rozřídí do kategorií, kdy X znamená nepřijatelný, 0 přijatelný a + reprezentuje žádoucí formu třísky. Z takto vzniklých dat se potom může sestavit oblast použití dané břitové destičky pro konkrétní aplikaci. Účinnost utvařečů je lepší při použití vyšších hodnot hloubky řezu a posuvu. Příklad pracoviště pro zmiňovaný výzkum zachycuje obrázek 1.20, je zde patrné jak důležitou roli hraje vhodné osvětlení scény, uvedeno je také zjednodušené schéma celého pokusu. Pro lepší interpretaci výsledků bývají podobná pracoviště ještě doplněna termokamerou a dynamometrem. [49]

a_p [mm]	f [mm/ot]				
	0,100	0,120	0,150	0,170	0,210
1,0	X	0	X	X	X
1,5	X	X	X	X	X
2,0	X	X	X	X	X



Obr. 1.19 Pokus pro ověření doporučených řezných podmínek [49].



Obr. 1.18 Sekvence utváření třísky při soustružení [49].



Obr 1.20 Pracoviště pro výzkum tvorby třísky v oblasti soustružení [49].

1.6 Důležité znalosti pro tvorbu vysokorychlostního záznamu

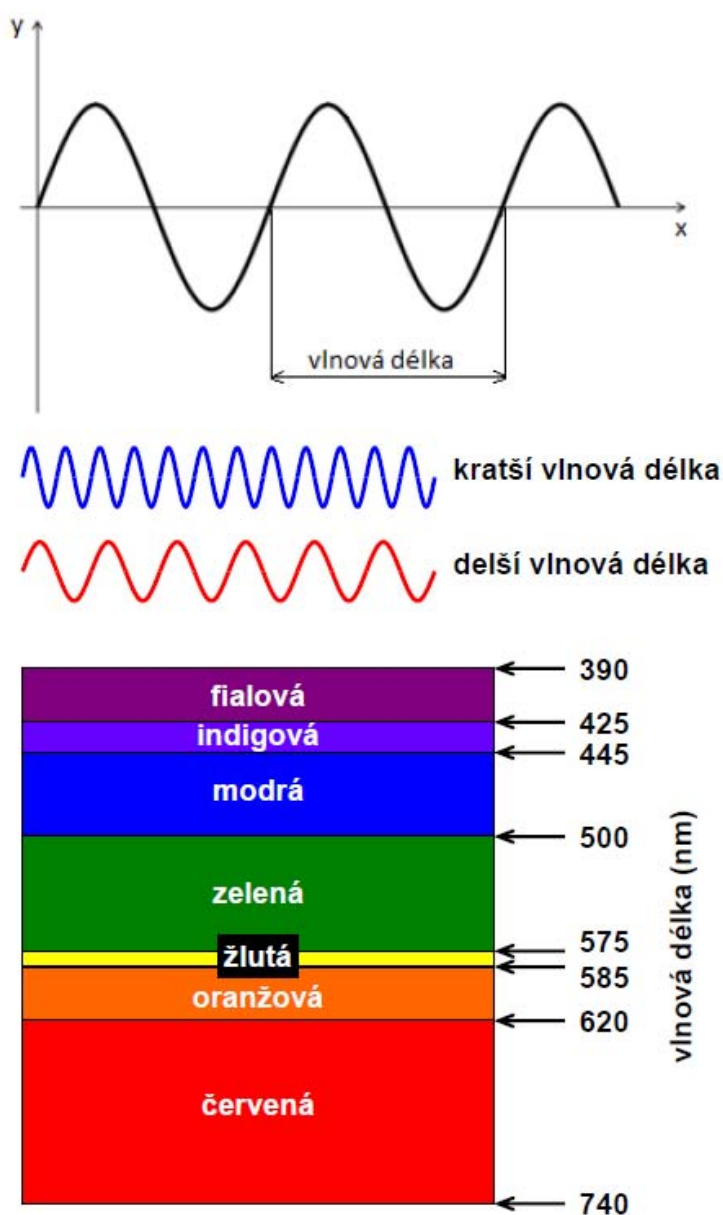
Následující strany mají za cíl představit důležité znalosti pro tvorbu digitálního vysokorychlostního záznamu vhodné pro kameru i výběr objektivu.

1.6.1 Viditelné spektrum světla

Světlo se dá charakterizovat jako elektromagnetické vlnění nebo proud částic podle kvantové fyziky. Z hlediska elektromagnetického vlnění je popsáno jako vlna s vlnovou délkou λ , frekvencí f_r a rychlostí c . Tyto veličiny se dají sjednotit vztahem:

$$c = f_r \cdot \lambda \quad (1.1)$$

kde: λ [m] - vlnová délka, f_r [s^{-1}] - frekvence, c [$m \cdot s^{-1}$] - rychlost



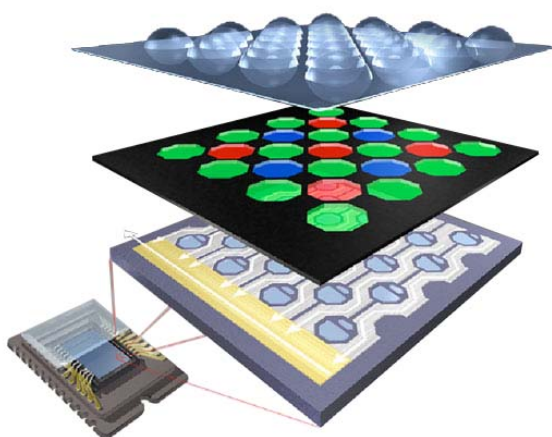
Rychlost je závislá na prostředí ve kterém se vlnění pohybuje např. vzduch, voda, vakuum. Ve vakuu se c rovná rychlosti světla a to $299\,792\,458\,m \cdot s^{-1}$. Vlnovou délkou se dá chápat jako vzdálenost sousedních vln a určuje jakou barvu bude lidské oko vnímat.

Rozmezí vnímatelného spektra leží přibližně mezi 390 až 740 nanometrů vlnové délky, jak je uvedeno na obrázku 1.21, toto rozmezí se také nazývá světlo. Jsou zde vyobrazeny jen čisté barvy, ve skutečnosti jsou tyto barvy různě smíchány, což tvoří reálný obraz snímaného objektu. Nad hranicí viditelného spektra se nachází tzv. infračervené světlo (od cca 740 nm) a pod hranicí světlo ultrafialové (od cca 390 nm) Tyto neviditelné části spektra může zachytit např. termokamera. [13] [14] [15]

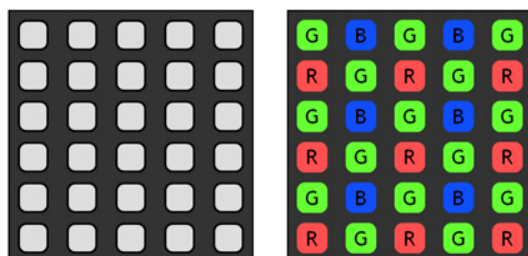
Obr. 1.21 viditelné spektrum světla [13].

1.6.2 Snímací prvek

Obrazový snímač nebo také čip je v podstatě polovodičová součástka citlivá na světlo, jenž umožňuje přeměnit dopadající světelné paprsky na elektrický náboj. Jedny z nejpoužívanějších snímacích prvků v dnešní době jsou CCD snímač (Charged coupled device) a CMOS snímač (Complementary metal oxid semiconductor), mohou být buď barevné (RGB) nebo monochromatické.



Obr. 1.21 konstrukce CCD snímače [17].



Obr. 1.22 Rozdíl mezi monochromatickým a barevným filtrem [18].

Tyto snímače pracují na podobném principu, detailní rozdíl lze najít podrobněji v odborné literatuře. V této práci bude jejich funkce přibližena pouze okrajově. Je však nutné je zmínit, protože jsou to klíčové součásti vysokorychlostních kamer a předurčují jisté parametry záznamu jako je rozlišení, barevná hloubka, citlivost ISO a v neposlední řadě také velikost světločivné plochy snímače. Zjednodušený princip funkce snímacího prvku je tedy následující. Světelný paprsek dopadne na mikroočku, pro zesílení intenzity světla, dále pokračuje na tzv. Bayerův filtr, který jej rozloží do barev RGB a to následně zachytí světločivná buňka, která následně vytvoří pixel s příslušnou barvou. Každý pixel je tvořen čtyřmi buňkami, červenou, modrou a zelenou, kde poslední zmiňovaná je zastoupena dvakrát. Nabývají hodnot 0 až 255 a jejich výsledná kombinace potom tvoří barvu a světlost pixelu. Obrázek 1.21 představuje konstrukci CCD snímače, obr. 1.22 potom rozdíl mezi a monochromatickým barevným filtrem. [16].

Mezi výše zmiňovanými typy senzoru jsou jisté rozdíly. Především rychlost záznamu je u senzoru typu CMOS mnohem větší a příznivější je také energetická náročnost, v neposlední řadě potom schopnost snímat jen výřezem snímacího prvku. To zapříčiní mnohem rychleji redukovat rozlišení, což je příznivé pro ukládání dat vysokorychlostních sekvencí. Tato skutečnost vede k tomu, že se využívají u digitálních vysokorychlostních kamer. Naopak u CCD senzoru je možné dosáhnout většího rozlišení a výsledné kvality obrazu. Některé rozdíly mezi těmito senzory jsou shrnuty v tabulce 1.3. [16]

Tab. 1.3 Rozdíly mezi snímacím prvkem CCD a CMOS [16].

Snímací prvek	CCD	CMOS
Cena	vysoká	nízká
Rozměry řešení	vyšší	nízké
Spotřeba	vysoká	nízká
Kvalita obrazu	vysoká	nižší až nízká
Rozlišení	vysoké	střední
Komplexnost čipu	vysoká	nižší až nízká
Fill faktor (činná plocha)	vysoký	nízký až střední
Digitální šum	nízký	vysoký
Rychlost	nižší až vysoká	vysoká
Dynamický rozsah	vysoký	nižší
Možnost výřezu	ne	ano

1.6.3 Barevná hloubka

Barevná hloubka ,nebo také bitová barva, charakterizuje kolik různých barev je schopen pojmout jeden pixel obrazu. S rostoucím počtem barev rostou také nároky na paměťová media. Vzhledem k tomu ,že lidské oko je schopno zaznamenat přibližně 10 milionů barev je 24 bitová barva dostatečná .Ovšem při větší hodnotě má obraz větší kvalitu, především potom u velkoformátového tisku. V barevném modelu RGB je každá barva tvořena jedním kanálem, v tomto případě je možné se setkat také se zápisem například osmibitový kanál. Barva poskládaná ze tří osmibitových kanálů potom odpovídá 24 bitům na pixel, což tvoří jeden s nejpoužívanějších formátů JPEG. Na obrázku 1.23 je porovnání různých barevných hloubek, je zde patrné jak při 256 barvách je zřetelný nedokonalý přechod jednotlivými odstíny.



Obr. 1.23 Porovnání barevných hloubek 16 milionů barev a 256 barev [19].

V tabulce 1.4 je potom shrnuta závislost bitů na pixel s výsledným počtem barev, které mohou být v pixelu zastoupeny, zmíněné jsou zde i jejich názvy nebo označení. Barevná hloubka je úzce spjata s velikostí záznamu jak ukáže následující příklad. Předtím je nutné připomenout některé pojmy jako 1 byte (B) ,ten odpovídá 8mi bitům (b), kdy jeden bit je základní jednotka dat nabývající hodnotu 1 nebo 0. Je nutné ještě zmínit, že kilobyte (kB) je 1024 násobkem B. Například digitální vysokorychlostní kamera Troubleshooter 1000

může zaznamenat 1000 snímků za sekundu při rozlišení 640 x 480 a barevné hloubce 24 b/px. Z následujícího vyplývá kolik je třeba paměťové kapacity na jeden snímek:

$$640 \cdot 480 \cdot 24 = 7372800b = 921600B = 900kB = 0,8789MB$$

Při frekvenci 1000fps je potom zapotřebí paměťová kapacita na jednu sekundu záznamu:

$$0,8789 \cdot 1000 = 878,9MB$$

Stejná kamera s černobílým snímacím prvkem v 8-bitové kvalitě při zachování stejných podmínek by potřebovala na 1s záznamu pouze:

$$640 \cdot 480 \cdot 8 = 2457600b = 307200B = 300kB = 0,292MB \rightarrow 0,292 \cdot 1000 = 292MB$$

Z uvedeného plyne, že vyšší barevná hloubka snímání se značně projeví na větší potřebě kapacity paměťových médií. S využitím černobílého snímacího prvku se dá pořídít delší záznam, potřebuje také méně světla k zhotovení kvalitního záznamu. [23] [19] [24]

Tab. 1.4 Porovnání barevných hloubek a jejich označení [21] [22].

Bitů na pixel	Počet možných barev na pixel	Název nebo použití
1	$2^1 = 2$ barvy	Mono Color, bit → 1 = bílá, 0= černá
4	$2^4 = 16$ barev	Basic Color, CGA
8	$2^8 = 256$ barev	EGA
15	$2^{15} = 32\,768$ barev	VGA
16	$2^{16} = 65\,536$ barev	High Color, XGA
24	$2^{24} = 16\,777\,216$ barev	True Color, SVGA, JPEG
32	$2^{32} = 4\,294\,967\,296$ barev	Super True Color
36	$2^{36} = 68\,719\,476\,736$ barev	RAW
48	$2^{48} = 281\,474\,976\,710\,656$ barev	Deep Color, TIFF, PNG, PSD

1.6.4 Rozlišení

Základní stavební jednotkou je pixel, ten nese informaci o barvě a jasu. Každý obraz má určitý počet pixelů v horizontální a vertikální rovině např. 640 x 480. Když budou tyto hodnoty vynásobeny, tak utvoří celkový počet pixelů pro daný obraz. Takové rozlišení se dá potom zapsat jako 0,372 Mpx. Kolik může mít výsledný záznam maximální rozlišení závisí především na velikosti snímacího prvku. Je to důležitá veličina pro možnost zvětšení záznamu a pozorování detailu nebo následného tisku obrázku, kde je možné se setkat s veličinou DPI (dots per inch), která udává počet obrázkových bodů na palec. U nejpoužívanějších vysokorychlostních kamer současnosti je nejrozšířenějším rozlišením 1280 x 1024. [25]

1.6.5 Citlivost ISO

U některých vysokorychlostních kamer je možné nastavit i ISO neboli světelnou citlivost snímacího prvku, která může pomoci vytvořit kvalitní záznam i za nižšího osvětlení. Nevýhodou tohoto způsobu je ovšem snížení kvality záznamu ve smyslu ztráty detailů a vzniku šumu, ten se dá však částečně softwarově odstranit. ISO se nejčastěji pohybuje v rozmezí 80 až 3200 a dá se říct, že čím bude hodnota menší, tím bude kvalitnější i fotka. Za předpokladu, že je zajištěno dostatečné osvětlení, což je z hlediska vysokorychlostního záznamu jedním z nejslabších míst. Jestliže se světelná citlivost snímacího prvku zvýší na dvojnásobek, tak úměrně poklesne i potřeba světla, a to na polovinu. Na obrázku 1.24 je srovnání záznamu pořízeného za stejných podmínek pouze s proměnlivou hodnotou ISO, konkrétně potom 100 a 1600. Je zde patrné jak vypadá vzniklý šum a ztráta detailu. [26]



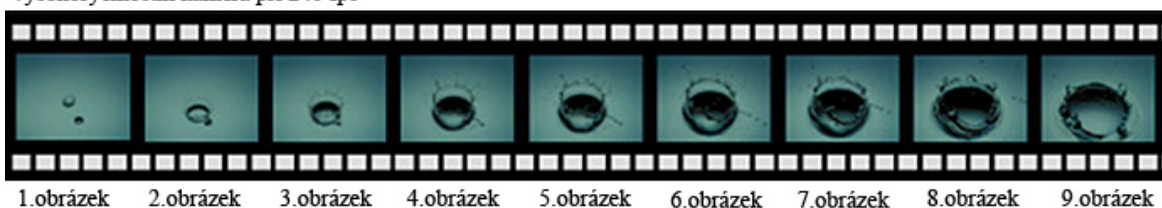
Obr. 1.24 Srovnání světelné citlivosti ISO při hodnotě 100 a 1600 [1].

1.6.6 Rychlost záznamu

Nejvíce vypovídající vlastností o vysokorychlostní kameře je kolik snímků za sekundu může zaznamenat. Tato rychlost záznamu, frekvence snímání či kmitočty se značí fps (frames per second), v některé literatuře je možné se setkat i jednotkou HZ. Lidské oko vnímá obraz jako plynulý při od 25 fps, proto jsou na tuto záznamovou rychlost konstruovány konvenční kamery, kde vyšší frekvence není nutná. Pokud je zapotřebí zkoumat nějaký děj, nejčastěji ve formě pohybu, jenž trvá zlomek sekundy, je nutné k tomu využít kameru vysokorychlostní, která umožňuje takovýto děj zaznamenat. Tento záznam lze později přehrát zpomaleně a tímto způsobem se dá potom daný děj analyzovat. V současnosti u běžně používaných vysokorychlostních kamer od společností Olympus nebo Fastecimaging se záznamová rychlost pohybuje okolo 20000 fps. Obrázky 1.25 a 1.26 demonstrují rozdíl mezi snímávací frekvencí u vysokorychlostní a konvenční kamery, z prvního zmiňovaného obrázku je možné vyčíst, že za 33,33 ms vytvořila vysokorychlostní kamera 8 snímků při kmitočtu 240 fps naopak druhý zmiňovaný obrázek přísluší záznamu konvenční kamerou při 30 fps, kdy se za stejnou časovou jednotku zhotoví pouze 1 snímek. Políčka na konci těchto obrázků demonstrují opakující se cyklus. Z čehož se dá vyvodit, že za 66,66 ms by byly konvenční kamerou zachyceny pouze dvě políčka, kdežto při použití vysokorychlostní kamery jich bude 16 a to je pro zkoumání nějakého děje propastný rozdíl.

Maximální kmitočet snímání úzce souvisí s hardwarovým vybavením kamery především typem snímacího prvku, dále procesorem a v neposlední řadě pak kapacitou RAM nebo Flash paměti. U vysokého kmitočtu snímání vzrůstají nároky na rychlé zpracování a uložení snímaných obrazů, to je většinou limitující a musí se snížit počet pixelů tvořící jeden snímek. Potom je možné získat velké množství snímků za sekundu v řádech milionů, ale výsledné rozlišení je tak nicotné, že je prakticky pro zkoumání děje nepoužitelné. Příklad snížení velikosti obrazu v závislosti na zvýšení záznamové rychlosti je ilustrován tabulkou 1.5. Jsou zde uvedeny vybrané hodnoty možných záznamových rychlostí vysokorychlostní kamery (model TS3-100S od společnosti FastecImaging) a počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru, který je možné zaznamenat. [2][20]

Vysokorychlostní kamera při 240 fps



1.obrázek 2.obrázek 3.obrázek 4.obrázek 5.obrázek 6.obrázek 7.obrázek 8.obrázek 9.obrázek

Obr. 1.25 Vysokorychlostní kamera → frekvence 240fps, za 1/30s vytvořeno 8 políček [20].

Běžná kamera při 30 fps



1.Obrázek

2.Obrázek

Obr. 1.26 Konvenční kamera → frekvence 30fps, za 1/30s vytvořeno 1 políčko[20].

Tab. 1.5 Velikost obrazu v závislosti na záznamové rychlosti u modelu TS3-100S [27].

Záznamová rychlost [fps]	Počet pixelů horizontálně	Počet pixelů vertikálně
125	1280	1024
1250	800	600
2000	512	512
5000	356	268
10000	228	166
15000	192	120
20000	160	100

1.6.7 Rychlost závěrky

Aby se podařilo vytvořit kvalitní ostrý záznam je dalším důležitým parametrem, který je potřeba zvolit, čas závěrky nebo také doba expozice. Je to vlastně doba, po kterou může na snímací prvek dopadat světlo a zaznamenává se obraz jednoho snímku. Na obrázku 1.27 je tento jev demonstrován u digitální fotografie, kdy při zachování ostatních podmínek je snímek vlevo exponován 2s a ten na pravé straně 3,125 ms. Tento jev je důležitý především u záznamu pohybu. Dlouhá doba expozice vede k rozmazanému snímku, krátká dokáže naopak pohyb tzv. zmrazit. Je nutné brát ohled na skutečnost, že při kratší době expozice dopadne na snímací prvek méně světla a tím rostou nároky na osvětlení.



Obr. 1.27 Rozdíl mezi snímekem s dobou expozice 2s a 3,125ms [1]

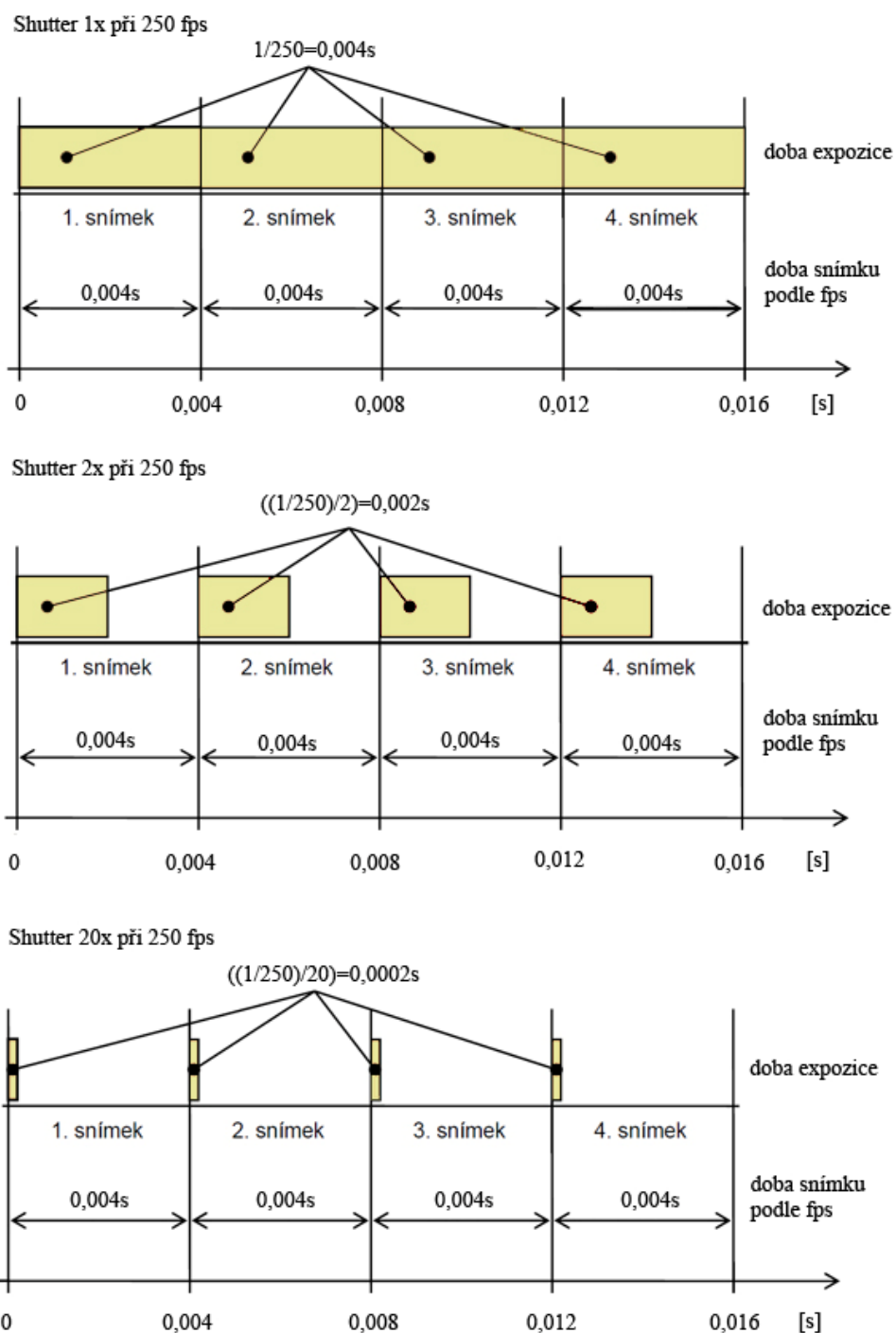
Výše zmiňovaný parametr se u digitálních vysokorychlostních kamer popisuje jako shutter. Jde vlastně o elektronickou závěrku, která může zkrátit dobu expozice jednotlivých snímků. Hodnota shutter udává zkrácení pořizovací doby snímku danou rychlostí záznamu. Pro případ, kdy je nastavena snímací frekvence na 1000 fps, je čas pro pořízení jednoho snímku 1/1000 s, s využitím shutteru hodnoty 2 se tento čas zkrátí na polovinu viz

$((1/1000)/2) = 1/2000s$. Hodnoty shutteru, které je možné nastavit na kameře TroubleShooter 1000 jsou uvedeny v tabulce 1.6.

Tab. 1.6 Možné nastavení shutteru u TroubleShooter 1000 [24].

Typ kamery	TroubleShooter 1000
Shutter - Možnost zkrácení expozice	1x, 2x, 3x, 4x, 5x, 10x, 20x

Na následujícím obrázku 1.28 je graficky zpracováno jak se mění doba expozice při použití funkce shutter 1x, 2x a 20x. U všech vyobrazení je uvažována rychlost záznamu 250 fps. Zkrácení doby expozice se používá především u sledování velmi rychlých dějů, například balistické zkoušky, kdy samotná záznamová rychlost nestačí obraz dostatečně zmrazit. Jakmile se začne jevit záznam jako rozmazaný je vhodné této funkce využít, nutné je však počítat s vyššími nároky na osvětlení scény. [2] [24] [28]



Obr. 1.28 Grafické znázornění doby expozice při použití funkce shutter 1x, 2x a 20x.

1.6.8 Objektivy

Objektivů existuje celá řada, dělí se především podle ohniskové vzdálenosti, což předurčuje i jejich vhodnost pro daný účel, a také podle světelnosti, což je vlastně nejnižší clonové číslo objektivu. Čím je toto číslo menší, tím objektivem projde více světla na snímací prvek a je možné použít kratší čas pro expozici nebo také vyšší rychlost závěrky. Pro zhotovení kvalitního záznamu je výběr vhodného objektivu velice důležitý. V následujících stranách budou vlastnosti objektivů přiblíženy důkladněji především potom ty co jsou v majetku Ústavu strojírenské technologie (viz obr. 1.29) a jsou použitelné pro digitální vysokorychlostní kameru Troubleshooter 1000 a proto i pro záznam experimentu její pomocí. Tyto objektivy jsou pro přehlednost označeny zkratkami OA, OB až OF, které se vyskytují dále na grafickém znázornění minimální zaostřitelnosti nebo zorných úhlů. V tabulce 1.7 jsou potom shrnuty základní parametry těchto objektivů. Následující strany mají za cíl připravit srozumitelné podklady pro rychlý výběr objektivu pro konkrétní účel.



Obr. 1.29 Objektivy v majetku ÚST použitelné pro vysokorychlostní kameru.

Tab. 1.7 Shrnutí parametrů objektivů [7].

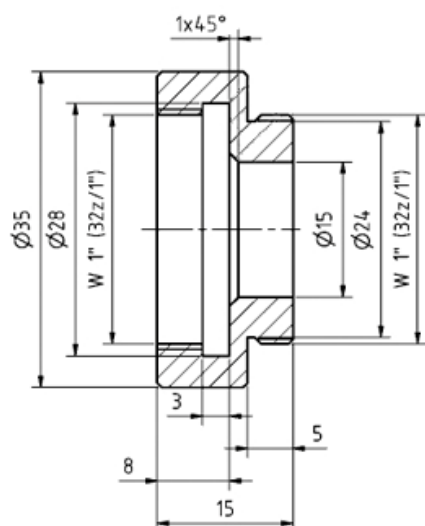
Označení pro přehlednost	OA	OB	OB (makro)	OC	OD	OE	OF
Označení objektivu	50mm F0,95	75mm F1,8	Makro F1,8	12mm F1,2	6mm F1,2	3,6mm F1,6	25mm F0,95
Ohnisková vzdálenost -f [mm]	50	12,5 až 75	Makro	12	6	3,6	25
Minimální clonové číslo - F [-]	0,95	1,8	1,8	1,2	1,2	1,6	0,95
Maximální clonové číslo- F [-]	16	22	22	16	16	16	16
Velikost snímacího prvku [mm]	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
Vypočtený zorný úhel [°]	10,058	38,784 až 6,715	77	40,273	72,508	101,421	19,964
Zorný úhel zaokrouhlený na celé stupně [°]	10	39 až 7	77	40	73	101	20
Vzdálenost minimálního zaostření [mm]	485	840	34	99	19	9	400
Vzdálenost maximálního zaostření [mm]	∞	∞	∞	250	94	75	∞

Základní rozdělení objektivů může být takové :

- Rybí oka, $f =$ cca 8 - 15 mm, jsou schopny zobrazit zorný úhel 180° , v některých případech i 220° , dochází zde k záměrnému soudkovému zkreslení perspektivy.

- Velmi širokoúhlé, $f = \text{cca } 14 - 24 \text{ mm}$, velký zorný úhel, deformovaná perspektiva
- Širokoúhlé, $f = \text{cca } 24 - 35 \text{ mm}$, zaostřují na krátké vzdálenosti, změna perspektivy když je snímán objekt blízko
- Střední ohniska, $f = \text{cca } 30 - 100 \text{ mm}$, dobrá světelnost, proporcionální perspektiva
- Normální objektiv, $f = 50 \text{ mm}$, zorný úhel podobný lidskému zraku a to $45^\circ - 50^\circ$, přirozená perspektiva
- Teleobjektivy, $f = \text{cca } 100 - 300 \text{ mm}$, potlačují perspektivu, malá světelnost, malý zorný úhel, pro záznam vzdálených objektů
- Silné teleobjektivy, $f > 300 \text{ mm}$, potlačená perspektiva, nízná světelnost, malý zorný úhel, pro záznam značně vzdálených objektů
- makro objektivy, $f = \text{cca } 70 - 150 \text{ mm}$, zaostření na velmi krátkou vzdálenost, snímání objektů malých rozměrů zaznamenaná v měřítku 1:1, je možnost i zvětšení

V dnešní době jsou nejrozšířenější objektivy tzv. zoomy, vyznačují se proměnlivou ohniskovou vzdáleností. Mezi výhody takových objektivů patří zejména univerzálnost, kdy mohou zachytit různé záznamy u kterých by bylo zapotřebí více objektivů s pevným ohniskem. Mezi nevýhody lze zařadit především menší světelnost a také jejich konstrukční složitost, kdy je zapotřebí daleko více čoček než u standardních objektivů. [8] [9] [10]



Obr. 1.30 Mezikroužek použitelný pro objektivy.

Mezi vysokorychlostní kameru a výše zmiňované objektivy je možné ještě vložit distanční kroužek, který je vyobrazen na obrázku 1.30. Mezikroužky se používají pro zachycení většího detailu a ve spojení s klasickým objektivem mohou nahradit makroobjektiv. Jejich vlastností je, že zkracují vzdálenost na kterou je možné zaostřit, a to jak minimální, tak i maximální, proto je možné pořizovat záznam s menší vzdálenosti, ale také nebude už možné zaostřit na nekonečno. Dají se proto smysluplně použít na objektivy s ohniskovou vzdáleností 50 a více. Mezi nevýhody jejich použití patří zejména snížení světelnosti. [11]

Změny které použití mezikroužku přinese pro uvažované objektivy jsou shrnuty v tabulce 1.8, jde především o změnu vzdálenosti na kterou lze zaostřit. Tato změna u některých objektivů, především těch s nízkou hodnotou ohniskové vzdálenosti, je činí pro experiment nepoužitelnými, protože maximální zaostřitelná vzdálenost se příliš přiblíží. V tabulce je tato skutečnost zaznamenána jako NE a je odtud zřejmé že s využitím mezikroužku se dá uvažovat o použití objektivů označených OA a OB.

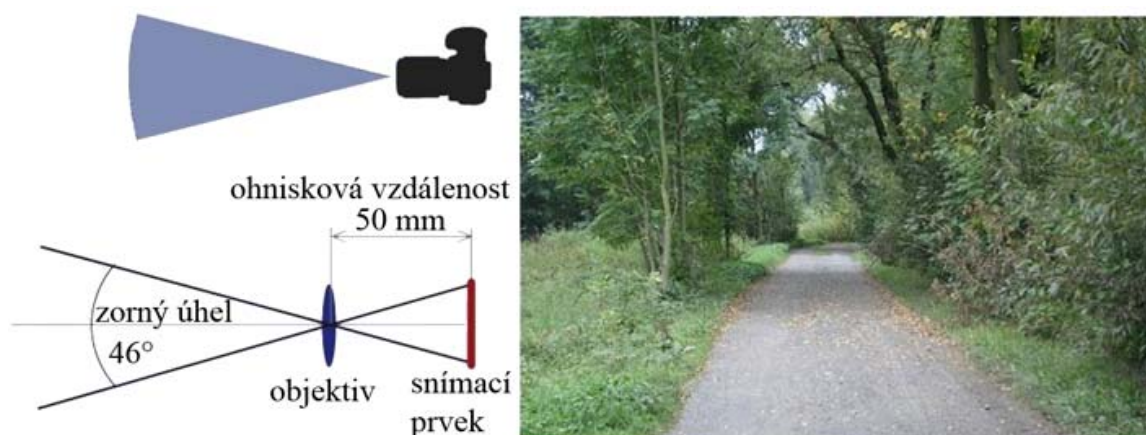
Tab. 1.8 Změna parametrů objektivů při použití mezikroužku [7].

Označení pro přehlednost	OA	OB	OB (makro)	OC	OD	OE	OF
Označení objektivu	50mm F0,95	75mm F1,8	Makro F1,8	12mm F1,2	6mm F1,2	3,6mm F1,6	25mm F0,95
Vzdálenost minimálního zaostření [mm]	140	350	NE	NE	NE	NE	NE
Vzdálenost maximálního zaostření [mm]	220	500	NE	NE	NE	NE	3,5

1.6.9 Ohnisková vzdálenost

Ohnisková vzdálenost je dalším parametrem objektivu a dá se charakterizovat jako vzdálenost mezi čočkou a snímacím prvem, ve které se přenesou zaostřený obraz. Ohnisková vzdálenost se značí f a je úzce spjata s velikostí zorného úhlu objektivu. Podle její hodnoty se také rozdělují objektivy do různých kategorií použití, protože s různým f se také mění zachycená perspektiva, která se může různě deformovat. Soudkové zkreslení perspektivy vzniká při velmi malém f objektivu nebo při blízké vzdálenosti snímaného objektu. Na obrázku 1.31 a 1.32 je vyobrazen rozdíl v pohledu objektivem s ohniskovou vzdáleností 50 mm a 18 mm. Je zde patrné jak se snižující se hodnotou f narůstá zorný úhel objektivu. Pro zachycení požadované kompozice je ohnisková vzdálenost důležitou veličinou, chceme-li objekt snímat s blízké vzdálenosti volíme objektiv s nízkým číslem f .

Naopak, pokud je nutné pořizovat záznam z větší vzdálenosti, je třeba zvolit objektiv s vyšší ohniskovou vzdáleností. [4][1]



Obr. 1.31 Pohled objektivem s ohniskovou vzdáleností 50mm [1].



Obr. 1.32 Pohled objektivem s ohniskovou vzdáleností 18mm [1].

1.6.10 Clona

Dalším důležitým parametrem pro kvalitu záznamu je clona, ta se většinou nastavuje na objektivu. Clonové číslo se značí F a je dále upraveno dle vztahu:

$$F = f/d \quad [-] \quad (1.2)$$

kde: $f[\text{mm}]$ = ohnisková vzdálenost

$d[\text{mm}]$ = průměr otvoru clony

Nejčastěji je však možné se setkat se zápisem clonového čísla jako f/F , pro příklad $f/2,8$. Nejmenší hodnota clonového čísla představuje také světelnost daného objektivu. Nejvíce používaná je tzv. irisová clona, ta je kruhového tvaru a reguluje se s ní průchod světla přes objektiv směrem na záznamový čip kamery. Při větším F tedy projde za určitou časovou jednotu méně světla. Takovou změnou lze regulovat hloubku ostrosti. Ta je definována jako rozmezí v němž se jeví výsledný obraz pro lidské oko jako ostrý. Velikost tohoto rozmezí závisí především na vzdálenosti snímaného objektu, na ohniskové vzdálenosti objektivu a na již zmiňovaném clonovém čísle. Příklad vlivu změny clonového čísla na hloubku ostrosti je uveden na obrázku 1.33. Oba snímky jsou pořízeny za stejných podmínek pouze s jinou hodnotou clonového čísla. U výjevu vlevo je hodnota $F = 3,5$ a je zde patrné, že je ostrý pouze snímaný objekt, kdežto u snímku vpravo $F = 13$ začíná být ostré i pozadí. Z obrázku je ještě patrné, že se zvyšujícím se clonovým číslem hloubka ostrosti roste a při použití ještě vyššího F by snímaný objekt splynul s pozadím. [1][2][3]



Obr.1 Vliv změny clonového čísla na hloubku ostrosti [1].

Při větším zaclonění objektivu rostou požadavky na intenzitu světla nebo dobu expozice. Aby byl vysokorychlostní záznam použitelný, je potřeba velké množství světla, proto je v tomto ohledu použití vysokých clonových čísel omezeno.

1.6.11 Zorný úhel objektivu

Jakou výšeč nebo jak velký záběr obrazu je možné daným objektivem zaznamenat, tak by se dal charakterizovat zorný úhel, samozřejmě ještě záleží na tom v jaké vzdálenosti je objekt snímání. Zorné úhly jednotlivých objektivů použitelné pro experiment jsou pro přehlednost a rychlý výběr shrnuty v obrázku 1.34 a 1.35. pro objektiv s proměnlivým f a možností režimu makro je uvažována minimální a maximální hodnota.

Je zde zřejmé ,že čím je menší f , tím větší je naopak Z . Velikost zorného úhlu závisí na ohniskové vzdálenosti a rozměrech snímacího prvku, na který je zachytáván obraz. Pro výpočet zorného úhlu platí vztah.

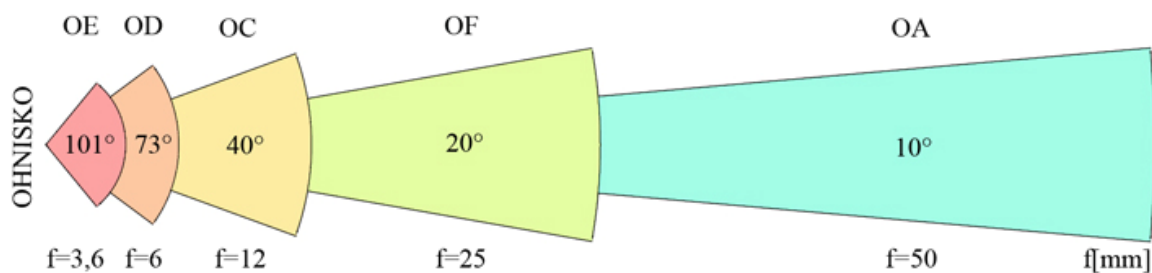
$$Z = 2 \cdot \arctg\left(\frac{S_{hv}}{2 \cdot f}\right) \quad (1.3)$$

kde: $Z[^\circ]$ – zorný úhel objektivu

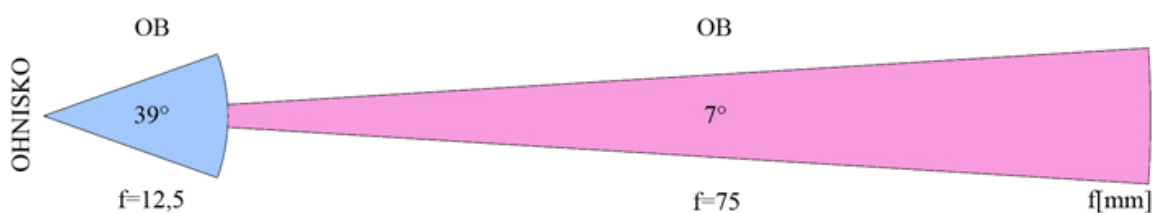
$S_{hv}[\text{mm}]$ – rozměr snímacího prvku kde h představuje horizontální vzdálenost a v vertikální, zorný úhel se potom počítá pro tyto vzdálenosti

$f[\text{mm}]$ – ohnisková vzdálenost

Pro výpočet zorného úhlu pro vysokorychlostní digitální kameru Troubleshooter 1000 použitou pro experiment jsou uvažovány rozměry snímacího prvku v horizontálním i vertikálním směru 8,8x8,8 [7]



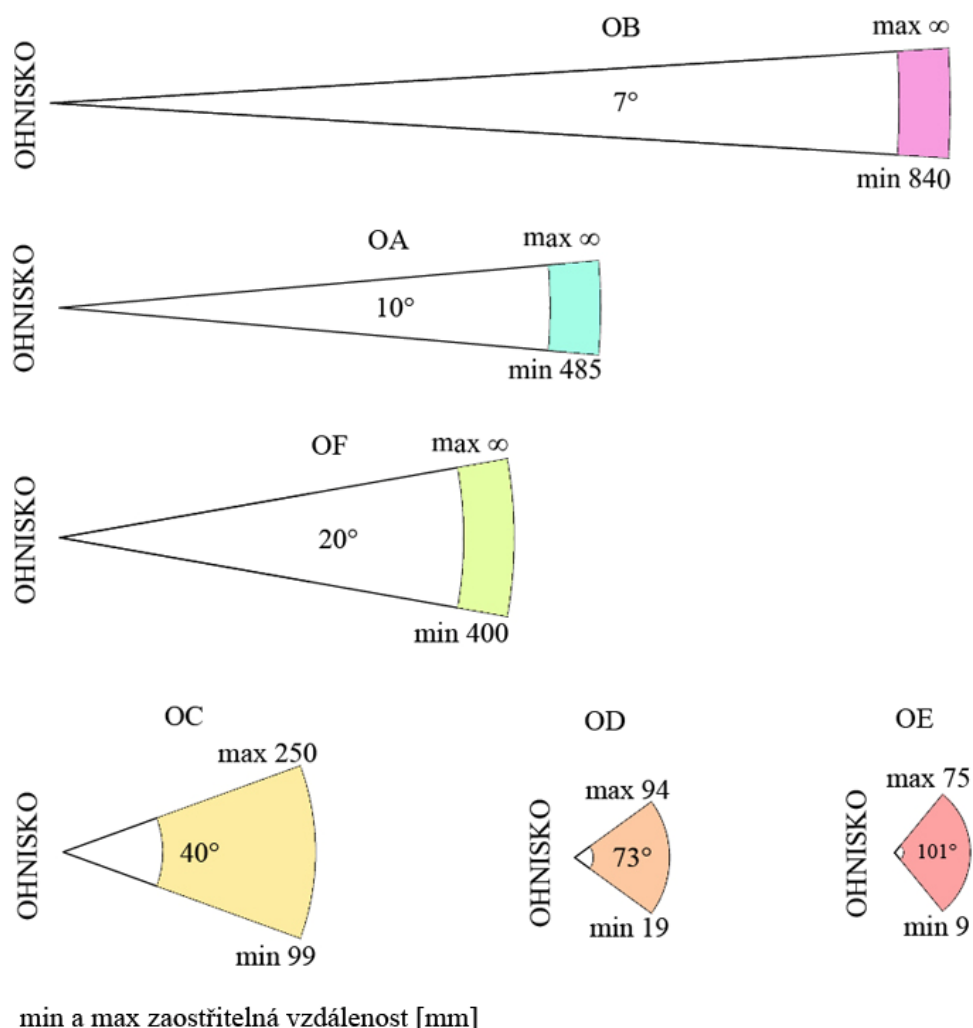
Obr. 1.34 Zorné úhly objektivů bez proměnlivé ohniskové vzdálenosti



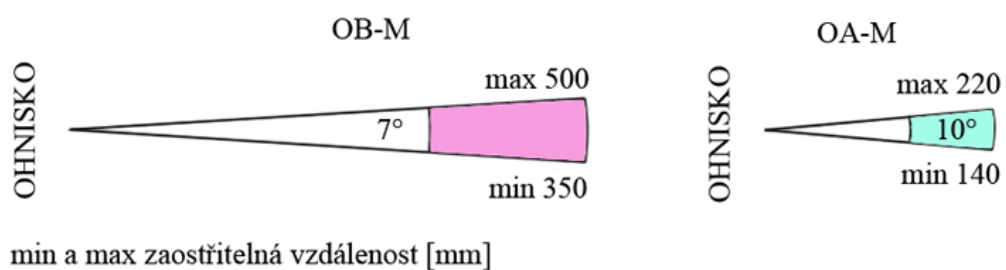
Obr. 1.35 Zorné úhly pro objektiv s označením OB, proměnlivé f .

1.6.12 Zaostritelná vzdálenost

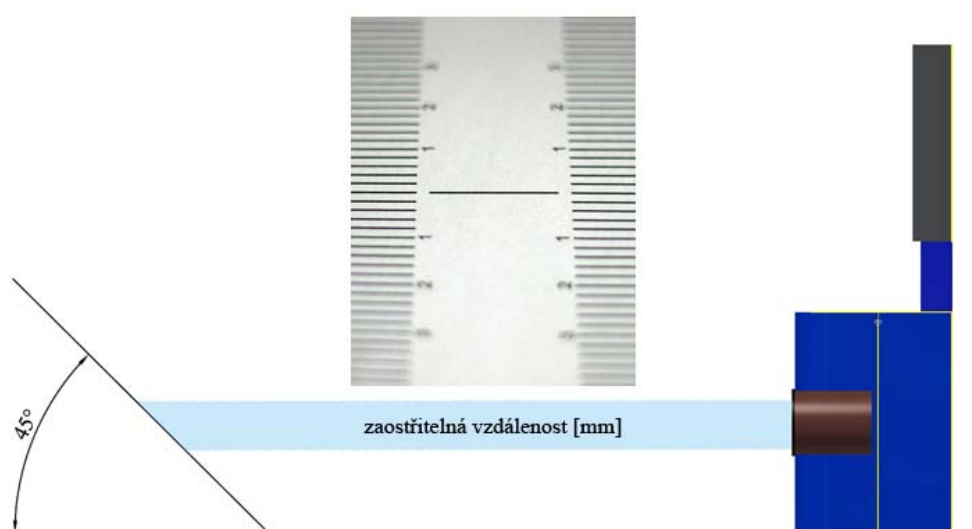
Pro správný výběr objektivu na danou aplikaci je vzdálenost ,na kterou je možné zaostřit, asi nevíce vypovídající vlastností. Je dána konstrukcí objektivu a souvisí s hloubkou ostrosti a nastavením clonového čísla. Rozlišuje se minimální a maximální zaostritelná vzdálenost, kdy oba tyto termíny určují mezní vzdálenost kamery od snímaného objektu, kdy se obraz ještě jeví jako ostrý. Tato vlastnost se dá určit experimentálně, kdy je v určitém odstupu snímána fotografická tabulka skloněná pod úhlem 45° , jak je uvedeno na obrázku 1.36. Tímto způsobem se dá také zjistit schopnost vykreslení detailů nebo také ověřit hloubku ostrosti. Pro přehlednost a rychlý výběr vhodného objektivu pro danou situaci jsou zaostritelné vzdálenosti vyobrazeny v měřítku na obrázku 1.37 a 1.38. První zmiňovaný se zabývá standardními objektivy vhodnými pro experiment a druhý potom vyobrazuje změnu při použití distančního kroužku zmiňovaného výše v této práci. [12]



Obr. 1.37 min. a max. zaostritelná vzdálenost objektivů.



Obr. 1.38 min. a max. zaostřitelná vzdálenost objektivů s využitím mezikroužku.



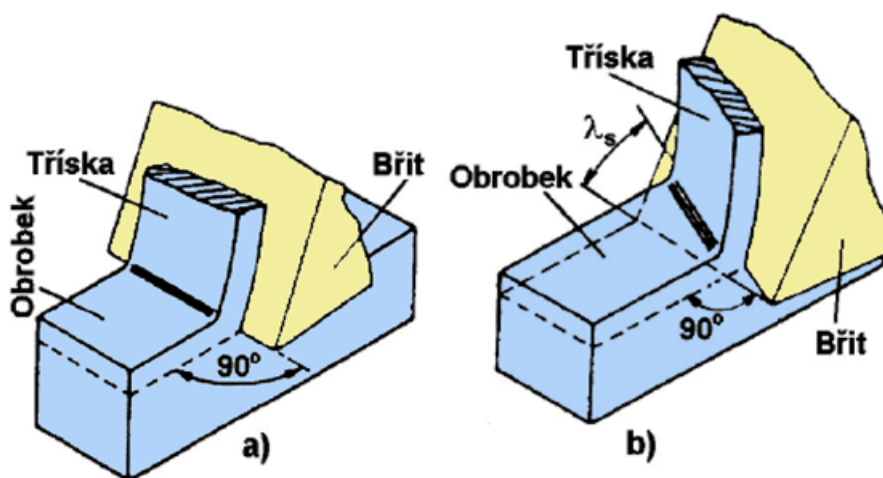
Obr. 1.36 experimentální zjištění zaostřitelné vzdálenosti.

2 TEORIE Z OBLASTI TVORBY TŘÍSKY PŘI SOUSTRUŽENÍ

Na následujících stranách bude nastíněna potřebná teorie z oblasti soustružení a vzniku třísky, potřebná pro návrh experimentu a následné vyhodnocení.

2.1 Teoretický model řezání

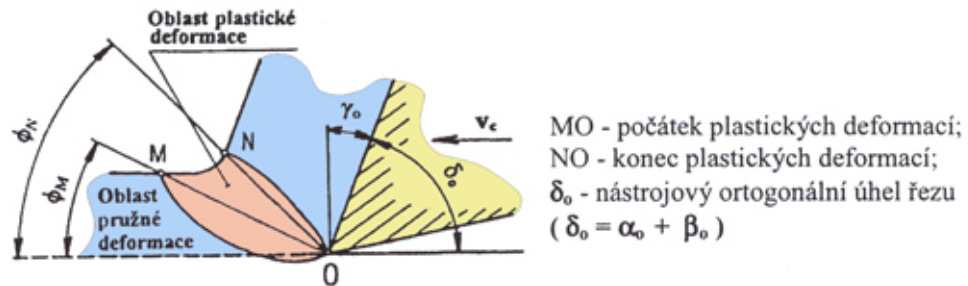
Řezání se dá označit jako proces obrábění, kdy se pomocí řezného břitu nástroje odebrává materiál z obrobku ve formě třísky. Je realizováno v systému stroj - nástroj - obrobek, kdy výstupním parametrem bývá kvalita obrobenej plochy. Rozlišují se dva základní případy řezání ortogonální a obecné, jak je uvedeno na obrázku 2.1. První zmiňované (a) probíhá v jedné rovině. Ostří je kolmé na směr řezného pohybu. Modelu ortogonálního řezání se většinou využívá v literatuře k vysvětlení procesu plastické deformace při tvorbě třísky. V praxi je možné s se s tímto způsobem setkat např. u soustružnické operace zapichování, při protahování nebo frézování nástrojem s přímými zuby. Obecné řezání (b) je v praxi rozšířenější, uvažuje se všude tam kde je nutné proces popsat ve více rovinách, jako například při vrtání, podélném soustružení nebo frézování nástrojem se zuby ve šroubovici. [50][51][52][53]



Obr. 2.1 Realizace řezného procesu a) ortogonální řezání b) obecné řezání [50].

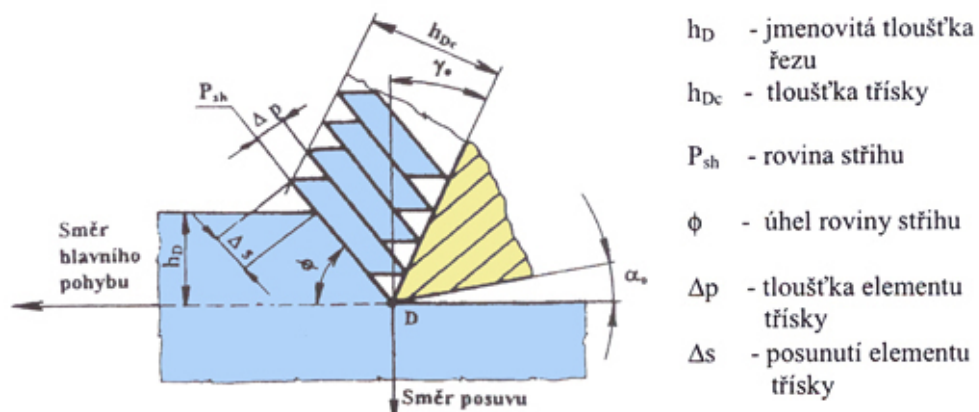
Samotný proces řezání závisí především na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu. V zóně řezu dojde ve velmi krátkém časovém úseku ke třem mezním stavům za sebou. Jako první nastane pružná napjatost, následuje deformace plastická a třetím stavem je lom, kdy dojde k oddělení třísky od materiálu obrobku. Vlivem plastické deformace vzniká u krystalických materiálů tvářená tříška, naopak křehký lom nebo štěpení vzniká primárně u materiálů nekystalických, to potom vede k netvářené třísce. Oblast primární plastické deformace v zóně řezu je uvedena na obrázku 2.2, napětí je způsobeno relativním pohybem nástroje vůči obrobku, který vyvolá ve vrstvě materiálu vnější zatížení. Oblast je označena

jako OMN a její velikost a tvar závisí na řezné rychlosti v_c , nástrojovém ortogonálním úhlu řezu δ_0 a nástrojovém ortogonálním úhlu čela γ_0 . Důležitým faktorem pro tuto oblast jsou především fyzikální vlastnosti deformovaného materiálu. [50][51][53]



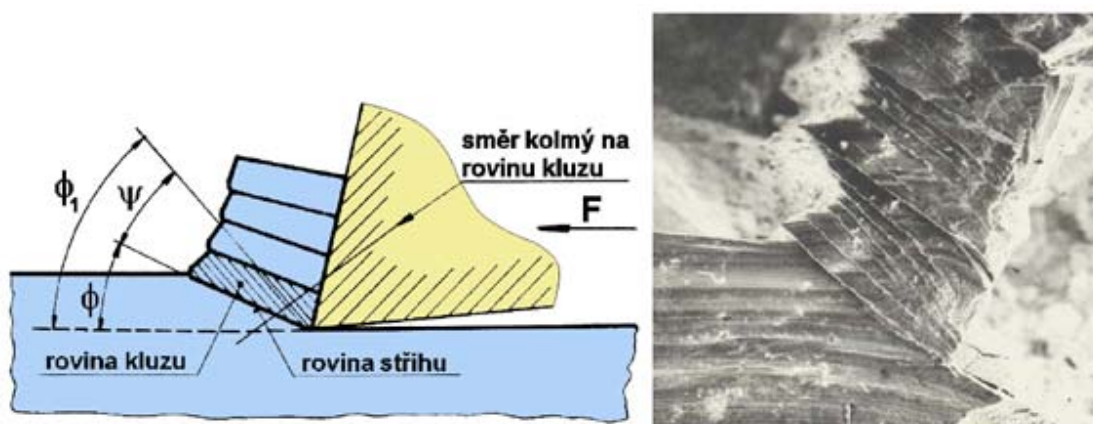
Obr. 2.2 Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě. [51]

Počátek plastických deformací představující křivku MO a konec plastických deformací, určené spojnici NO se při vysokých řezných rychlostech prakticky spojí. Vlivem zvýšeného napětí nad mez pružnosti začne docházet ve vhodně orientovaných krystalických plochách k plastickému skluzu, to vede k deformaci materiálu. Z výše uvedeného vyplývá teoretický zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání, uvedené na obrázku 2.3. Element třísky vznikne vlivem plastického skluzu v rovině stříhu P_{sh} . Tato rovina s největší koncentrací napětí je určena úhlem Φ , který je závislý mimo jiné na směru hlavního pohybu a geometrii břitu. Při dalším pohybu nástroje směrem do materiálu dochází k posunu a pěchování elementů třísky před břitkem nástroje, děje se tak v kolmém směru na skluzné roviny. Tímto mechanismem dále roste napětí. Při dosažení meze stříhu se element třísky odlomí. [50][51][53]



Obr. 2.3 Zjednodušený model tvorby elementů třísky při ortogonálním řezání. [51]

Obrázek 2.4 znázorňuje srovnání teoretického modelu a reálného metalografického výbrusu, kde jsou patrné postupně vzniklé kluzné roviny a jednotlivé elementy třísky. [50]



Obr. 2.4 Model a metalografický výbrus znázorňující vznik třísky [50].

2.2 Pěchování třísky

K pěchování třísky dochází při jejím odchodu ze zóny řezu vlivem plastických deformací v oblasti primární plastické deformace. V modelu ortogonálního řezání se vychází z předpokladu, že za určitou časovou jednotku vzniklý objem třísek se rovná objemu odebrané vrstvy. Tuto skutečnost vystihuje následující vztah: [50][51][53][55]

$$A_D \cdot v_c \cdot 10^{-3} = A_{Dc} \cdot v_t \cdot 10^{-3} \quad [\text{dm}^3 \text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde: $A_D [\text{mm}^2]$ - jmenovitá plocha řezu

$A_{Dc} [\text{mm}^2]$ - plocha průřezu třísky

$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$ - řezná rychlost

$v_t [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$ - rychlost třísky

Součinitel pěchování třísky je označen Λ a je vyjádřen následujícím vztahem:

$$\Lambda = \frac{A_{Dc}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} > 1 \quad [-] \quad (2.2)$$

Plocha průřezu třísky A_{Dc} a jmenovitá plocha řezu A_D se dá vyjádřit ve tvaru:

$$A_{Dc} = h_{Dc} \cdot b_{Dc} \quad [\text{mm}^2] \quad (2.3)$$

$$A_D = h_D \cdot b_D \quad [\text{mm}^2] \quad (2.4)$$

kde: h_D [mm] - jmenovitá tloušťka řezu, h_{Dc} [mm] - tloušťka třísky

b_D [mm] - jmenovitá šířka řezu, b_{Dc} [mm] - šířka třísky

Z hlediska praktického řešení se předpokládá, že $b_{Dc} \cong b_D$, potom platí:

$$\Lambda = \frac{h_{Dc}}{h_D} \quad [-] \quad (2.5)$$

Odměření tloušťky vzniklé třísky h_{Dc} , například mikrometrem s kulovými doteky, lze následně pro danou hodnotu h_D vypočítat součinitel pěchování.

Součinitel pěchování lze také vyjádřit pomocí délky relativní dráhy nástroje vzhledem k obrobku a korespondující třísky, jak ilustruje obrázek 2.5. Potom platí vztah:

$$\Lambda = \frac{\Delta l}{\Delta l_c} \quad [-] \quad (2.6)$$

kde: Δl [mm] - relativní délka nástroje vzhledem k obrobku, Δl_c [mm] - délka třísky

Při tomto způsobu stanovení hodnoty Λ se vychází z parametrů odřezané třísky a použije se následující vztah:

$$\Lambda = \frac{10^3 \cdot G_t}{l_c \cdot \rho_t \cdot A_D} \quad [-] \quad (2.7)$$

kde: G_t [g] - hmotnost třísky, ρ_t [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] - hustota materiálu třísky,

l_c [mm] - délka třísky, A_D [mm^2] - jmenovitá plocha řezu

2.3 Určení úhlu střižné roviny ϕ

Úhel střižné roviny ϕ lze vyjádřit i pomocí součinitele pěchování třísek Λ . Na obrázku 2.5 jsou znázorněny geometrické souvislosti tohoto poznatku. Na základě rovnice (2.5) a obecného trojúhelníku ABD platí:

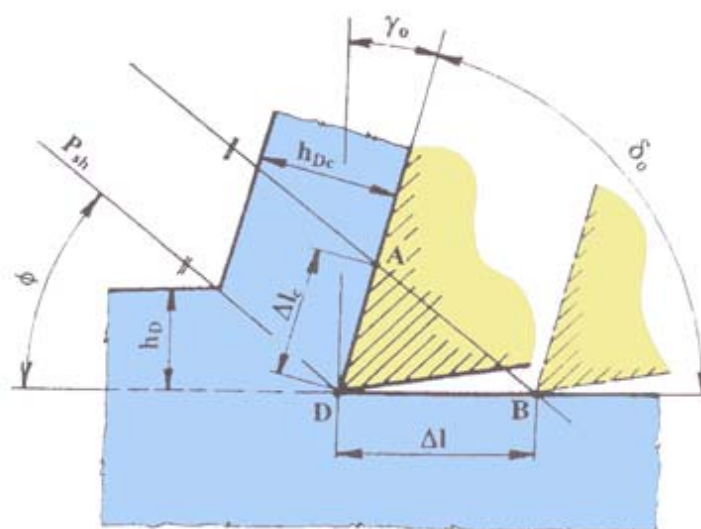
$$\Lambda = \frac{\cos \gamma_0}{\text{tg} \phi} + \sin \gamma_0 \quad \text{případně:} \quad \Lambda = \frac{\sin(180 - \phi - \delta_0)}{\sin \phi} = \frac{\sin(\phi + \delta_0)}{\sin \phi}$$

Po úpravě výše uvedených rovnic je možné získat vztah:

$$\phi = \operatorname{arctg} \left[\frac{\cos(\gamma_0)}{\Lambda - \sin(\gamma_0)} \right] \quad (2.8)$$

kde: γ_0 [°] - nástrojový normálový úhel čela

δ_0 [°] - ortogonální úhel řezu



Obr. 2.5 Geometrické souvislosti pěchování třísky v modelu ortogonálního řezání [54].

Teorii jak vyjádřit úhel střižné roviny ϕ je celá řada, liší se především pojetím autora k danému problému. Za základní vyjádření se považuje Merchantova teorie, ta je založena na rovnosti sil ve střižné rovině. Úvaha je založena na modelu ortogonálního řezání, kde je možné celkovou řeznou sílu určit vztahem:

$$F = \frac{R_{ms} \cdot h_D \cdot b_D}{\sin \phi \cdot \cos(\varphi_t + \delta_0 + \phi - 90^\circ)} \quad (2.9)$$

kde: F [N] - celková řezná síla, R_{ms} [MPa] - mez kluzu ve smyku

h_D [mm] - jmenovitá tloušťka řezu, b_D [mm] - jmenovitá šířka řezu

δ_0 [°] - ortogonální úhel řezu

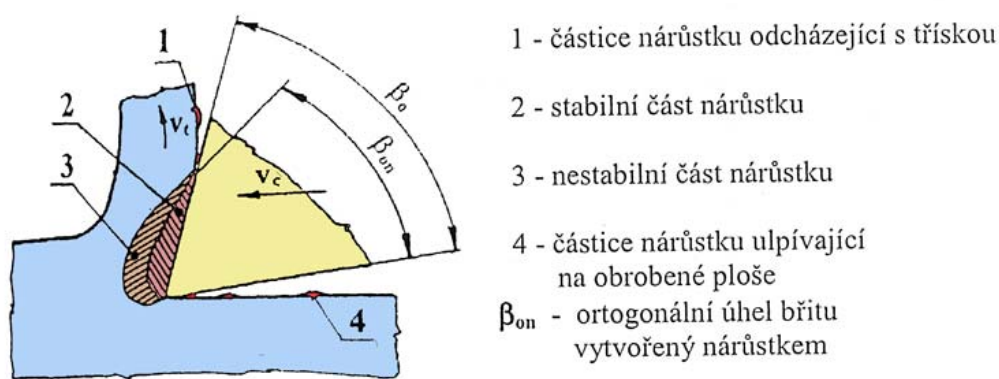
φ_t [°] - třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje

Dalšími úvahami a úpravami (více v literatuře [51]) lze úhel střížné roviny ϕ popsat následujícím vztahem:

$$\phi = 90^\circ - \frac{\varphi_t + \delta_0}{2} \quad (2.10)$$

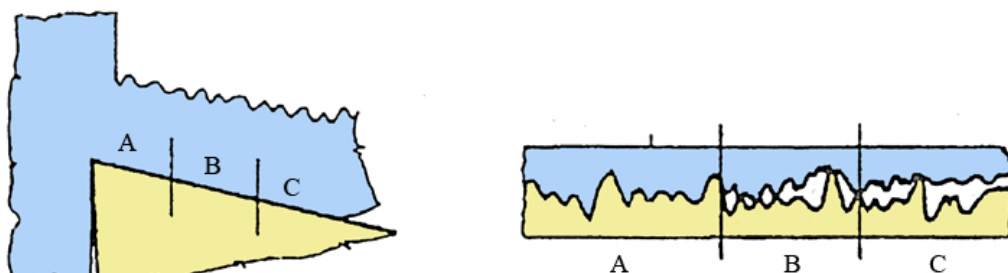
2.4 Faktory ovlivňující povrchovou vrstvu obrobku

Jedním s nejdůležitějších faktorů ovlivňujících jakost povrchu při obrábění je vznik nárůstku nebo změna mechanických vlastností vlivem řezného procesu v povrchové vrstvě. Vznik nárůstku je nežádoucí jev, který může vzniknout za určitých řezných podmínek pro daný materiál. Vlivem vysokých teplot (až 1200 °C) a tlaků (řádově 10^3 až 10^4 MPa) vzniká mezi třískou a povrchovou plochou čela nástroje tavenina kovu. Oblast vzniku nárůstku je patrná z obrázku 2.6, jde vlastně o studený návar materiálu obrobku na břit nástroje, tvoří se a porušuje periodicky v rozmezí frekvencí 10^2 až 10^3 Hz. [53][54][51]



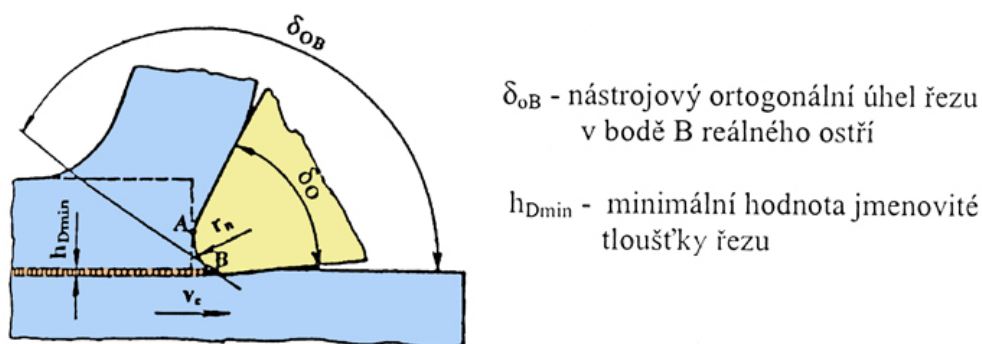
Obr. 2.6 Tvorba a rozpad nárůstku [51].

Vznik nárůstku doprovází ulpívání roztaveného kovu na obrobené části obrobku a vzniklé třísky, což vede ke zhoršené kvalitě povrchu. V některých případech může vznik nárůstku chránit břit nástroje proti opotřebení, vzniklý materiál má odlišnou strukturu od obrobku a vyznačuje se vysokou pevností a tvrdostí. Vzniká zejména u materiálů tvárných, které mají sklon k deformačnímu zpevnování, v oblasti nízkých řezných rychlostí. Kontakt třísky s plochou nástroje znázorňuje obrázek 2.7, jsou zde znázorněny tři základní oblasti. V oblasti A ulpívá materiál třísky na nástroji, tzv. váznutí, působí zde největší tlak a teplota. V těsné blízkosti čela nástroje se vlivem zadržování sníží rychlost pohybu třísky až k nulové hodnotě. Vlivem vnitřního pohybu mezi vrstvami třísky, jehož rychlost roste s rostoucí vzdáleností od čela nástroje, je potom zajištěn odchod třísky z místa řezu. V oblasti B dochází k adhezi a difuzi, vznik mikrosvárů. Ke kluzu a volnému oddělení třísky od hřbetu nástroje dojde až v oblasti C. Mezi nejběžnější způsoby zabránění vzniku nárůstku patří změna řezných podmínek nebo použití vhodných řezných kapalin s vysokým mazacím účinkem, pomůže také změna geometrie nástroje. [53][54][51]



Obr. 2.7 Kontakt mezi třískou a čelem nástroje [54].

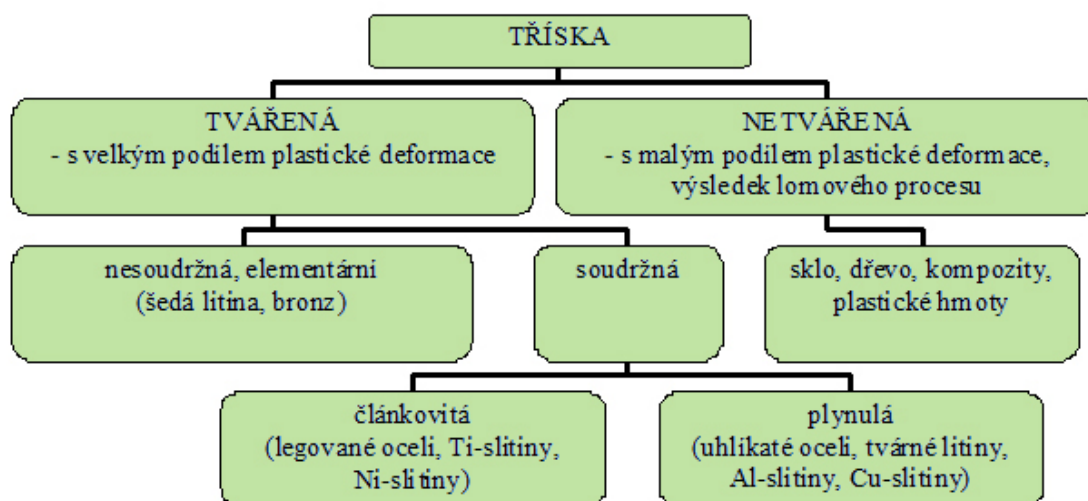
Povrchová vrstva obrobene části je ovlivněna změnou mechanických vlastností vlivem řezného procesu a to především v podobě strukturní změny, zpevnění, vznikem vad nebo zbytkových napětí. Reálné ostří břitu je vždy nějakým způsobem zaobleno, jak ilustruje obrázek 2.8. Tato skutečnost vede k tomu že, budoucí povrch obrobene plochy vzniká do jisté míry tvářením. Velikost zaoblení také určuje minimální hodnotu jmenovité hloubky řezu, která je pro dané řezné podmínky realizovatelná. Zpevnění povrchové vrstvy vzniká vlivem primárních plastických deformací, které zasahují mnohdy pod úroveň budoucího povrchu. Následná zpevněná povrchová vrstva lze kvantifikovat hodnotou mikrotvrlosti, kdy největší je na povrchu a pak pozvolna klesá. Vlivem zmiňovaného mechanismu může dojít k poškození povrchu ve formě vzniku trhlin nebo odlupování částí materiálu.[54][51]



Obr. 2.8 Vliv zaoblení ostří na povrch obrobku [51].

2.5 Základní rozdělení třísek

Tvar třísky vzniklé při obrábění je závislý především na vlastnostech materiálu obrobku, geometrii nástroje a řezných podmínkách (řezná a posuvná rychlost). Důležitá je také tribologie procesu v rozhraní tříška - nástroj. Výsledný tvar třísky je důležitý z hlediska bezpečnosti a efektivnosti procesu obrábění. Základní rozdělení třísek podle druhů je uvedeno na obrázku 2.9. [51][55]



Obr. 2.9 Základní rozdělení druhů třísek [55].

Třísky zařazené ve skupině tvářená tříška vznikají plastickým skluzem a dělí se na soudržné a nesoudržné. První zmiňovaná vzniká především u ocelí, tvářených litin nebo slitin s hlavním zastoupením hliníku nebo mědi. Před oddělením je materiál intenzivně plasticky tvářen. Vznik částečně tvářené třísky, nebo také elementární, je obvyklý pro obrábění litiny, bronzů a jiných křehkých kovových materiálů. Netvářená tříška vzniká křehkým lomem bez předešlého tváření, typická je pro obrábění dřeva nebo plastů. [51][55]

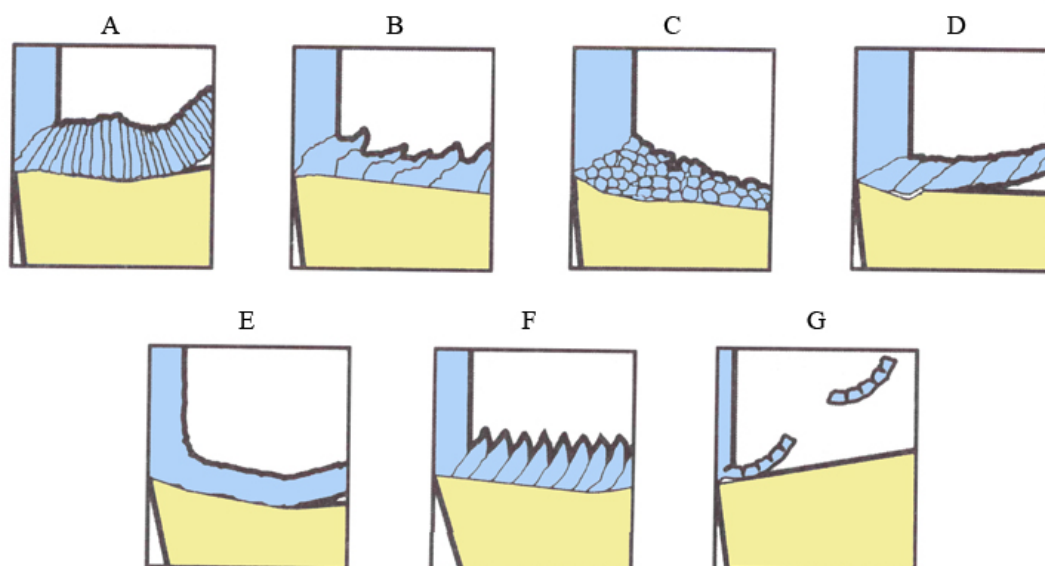
2.6 Třísky při obrábění kovů

Utváření vhodného tvaru třísky při obrábění kovů a následný kontrolovaný odchod ze zóny řezu souvisí významně s výslednou kvalitou obrobenej plochy a přesností rozměrů. Podle materiálu obrobku se dají třísky zařadit do sedmi základních typů, jak je uvedeno na obrázku 2.10. [51][54]

- A - Plynulá článkovitá soudržná tříška vznikající u většiny ocelí
- B - Plynulá soudržná lamelová tříška vznikající u většiny korozivzdorných ocelí
- C - Tvářená elementární tříška vznikající u většiny litin
- D - Nepravidelně článkovitá plynulá tříška vznikající u většiny vysoce legovaných materiálů
- E - Tvářená plynulá soudržná tříška vznikající při malých řezných silách, např. při obrábění hliníku

- F - Dělená segmentová tříška vznikající při velkých řezných silách a vysokých teplotách řezání, např. při obrábění tvrdých materiálů

- G - Plynulá segmentová tříška vznikající při obrábění titanu



Obr. 2.10 Základní druhy tvářených třísek při obrábění kovů [54].

2.7 Tvar třísek podle objemového součinitele W

Požadavky na rozměr a tvar třísek lze také kvantifikovat pomocí objemového součinitele třísek W, jak je uvedeno na obrázku 2.11. Pro výpočet hodnoty W platí následující vztah:



$$W = \frac{V_t}{V_m} [-] \quad (2.11)$$

kde: V_t [dm^3] - objem volně ložených třísek

V_m [dm^3] - objem odebraného materiálu korespondující s V_t

Třísky by měly mít co nejmenší objem a tvar vhodný k jednoduchému odstranění z prostoru obráběcího stroje. Nevhodné jsou dlouhé plynulé třísky, které se mohou namotat na nástroj, poškodit obrobek nebo nástroj, zvyšuje se také riziko poranění obsluhy stroje při manipulaci s obrobkem. Vhodné jsou naopak třísky malých rozměrů, kterých lze docílit vhodnou geometrií řezného nástroje, především utvářeče třísky. Důležité jsou také řezné podmínky, především řezná rychlost a posuv. V neposlední řadě hraje důležitou roli také materiál obrobku a nástroje. Pro rozbití na segmenty lze také použít lamač třísek, ten

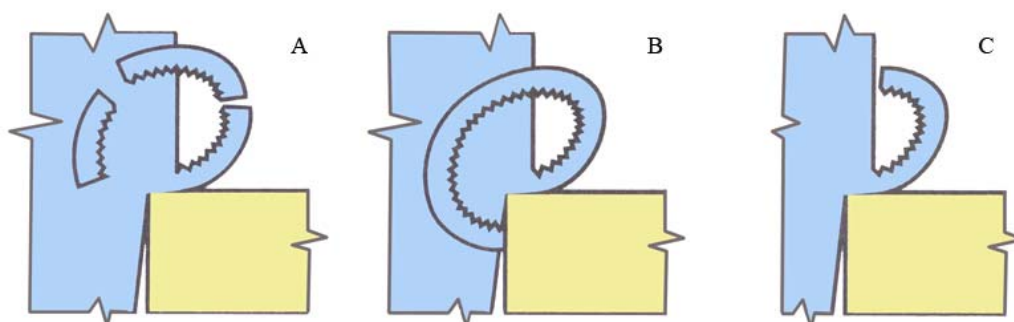
je ve své nejjednodušší formě překážka vestavěná do směru odchodu třísky. Působí však velmi nepříznivě na výkon stroje. [52][53]

TVAR TŘÍSEK		W	TVAR TŘÍSEK		W
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

Obr. 2.11 Hodnocení tvarů třísek podle objemového součinitele [53].

2.8 Způsoby lomu třísky

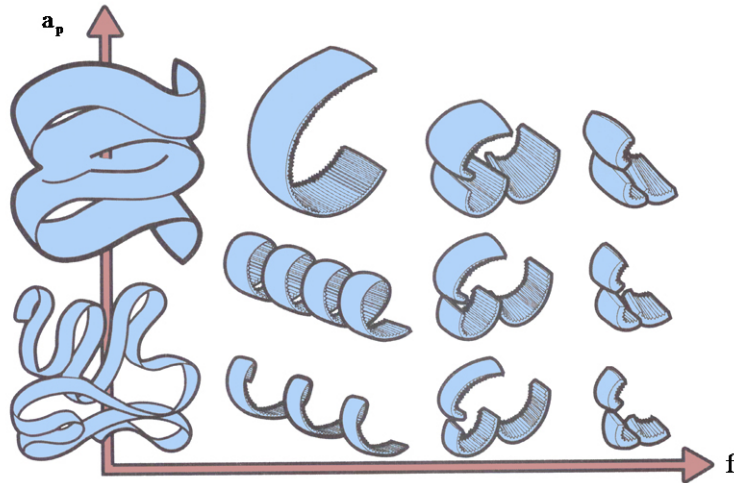
Lom soudržné třísky vznikající u soustružení se dá popsat třemi základními způsoby, jak demonstruje obrázek 2.12. Způsob s označením A představuje samočinný lom, u tohoto jevu je nutné aby tříska odcházela správným směrem a nedošlo tak k nekontrolovanému odchodu třísky. U způsobu s označením B se tříska zlomí při nárazu na nástroj, to může nepříznivě ovlivnit zatížení v oblasti břitu, vyvolat tzv. kladivový efekt. Tento úkaz může také negativně ovlivnit jakost obrobenej plochy, především v případě pokud se tříska dostane opět do blízkosti řezné zóny. Způsob s označením C představuje lom třísky při nárazu na obrobek, respektive na jeho neobrobenou část. K nasměrování třísky pro kontrolovaný odchod ze zóny řezu a následný lom na menší části slouží utvařec třísky, vytvarovaný přímo do čela vyměnitelné břitové destičky. [54][57]



Obr. 2.12 Základní způsoby lomu třísky [54].

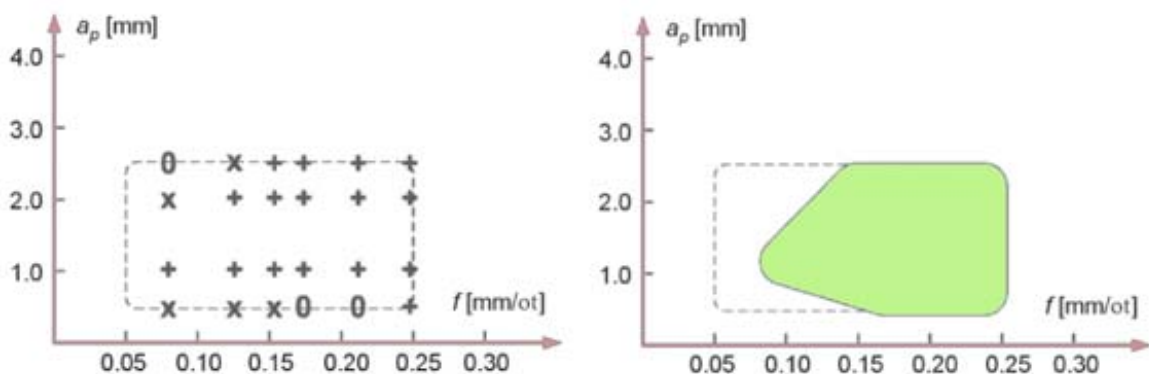
2.9 Oblast utváření vhodných třísek

Pro dosažení vhodných třísek při soustružení a tím i kvalitního a rozměrově přesného povrchu je třeba zvolit vhodnou břitovou destičku s určitou geometrií a tvarem utvařeče třísek. Požadovaný tvar takovýchto třísek je především článkovitý nebo ve formě krátkých šroubovic. Na obrázku 2.13 je uveden graf závislosti šířky záběru ostří a_p na posuvu za otáčku f . [54]



Obr. 2.13 Tvar třísek v závislosti na šířce záběru ostří a posuvu na otáčku. [54]

Takovýto graf je vždy individuální pro danou břitovou destičku, její geometrii a tvar utvařeče. Důležité je také rozmezí použitelných řezných rychlostí. Zmiňované veličiny jsou vždy závislé na materiálu obrobku. Producenti vyměnitelných břitových destiček se slinutých karbidů uvádějí vždy pro jednotlivý produkt oblast použití, tzv. aplikační diagram. Příklad takového aplikačního diagramu je uveden v pravé části obrázku 2.14, ten je možné sestavit na základě vzniklých třísek, na jejich tvaru a jakosti, což představuje levá část zmiňovaného obrázku. [49][54][56][57]

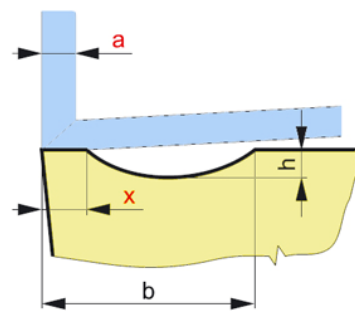


Obr. 2.14 Aplikační diagram břitové destičky na základě tvaru a jakosti vzniklých třísek. [56]

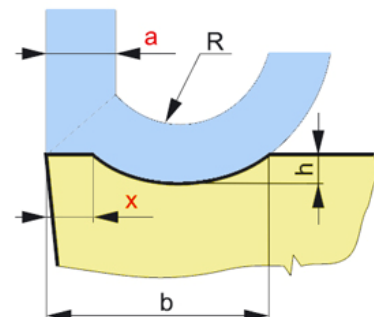
Diagram vznikl použitím břitové destičky za různých řezných podmínek a následnému roztřídění vzniklých třísek do kategorií. Kde X znamená nepřijatelný, 0 přijatelný a symbol + reprezentuje žádoucí formu třísky. Z takto vzniklých dat se může sestavit aplikační diagram i pro konkrétní aplikaci. [49][54][56][57]

2.11 Funkce utvařeče třísky

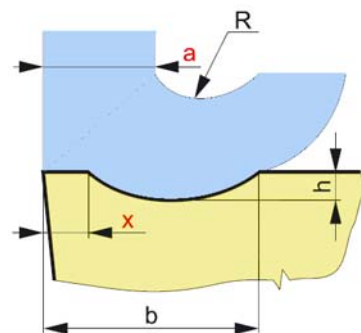
Schopnost efektivně utvářet třísku a následně ji usměrnit ke kontrolovanému odchodu ze zóny řezu, případně dopomoci k lomu na elementy, je významnou vlastností bříty. Tvar vyměnitelné břitové destičky, funkční pro řezný proces je složen z kombinace utvařečů třísek, fazetek, úhlů a zaoblení ostří. Optimalizováním těchto veličin, především výběrem vhodné břitové destičky, se zefektivňuje daný řezný proces. Značnou část čela břitové destičky zabírá utvařeč třísek, existují různé typy, které se liší vhodností použití. Každý typ tvařeče pracuje správně v určitém rozmezí posuvů a hloubek řezu dle funkčního diagramu. Následující obrázky reprezentují situace utváření třísky a její závislost na šířce stabilizační fazetky x , na jejím úhlu γ_x a šířce záběru ostří a_p nebo posuvu na otáčku f . Úhel nastavení K_r je u vyobrazených případů 90° . Obrázek 2.15 znázorňuje situaci, kdy tříska nevnikne do utvařeče, to je způsobeno tím, že tloušťka odřezávané vrstvy v obrázku označená a je výrazně menší než šířka fazetky x , v tomto případě není tříska nijak utvářena. Obrázek 2.16 reprezentuje žádoucí jev, kdy je výše posuvu f , a tím i větší tloušťka odebírané vrstvy a větší než vzdálenost x . V tomto případě tříska vniká do utvařeče, kde je následně zakřivena podle parametrů utvařeče. Na obrázku 2.17 je potom vyobrazena situace, kdy je posuv pro daný utvařeč příliš vysoký, nejprve dojde k nadměrnému utváření, až drcení třísky. Při dalším zvýšení posuvu už tříska utvařeč mine a k vytvoření nedojde. Maximální posuv, při kterém dojde ke zmiňovanému jevu a tříska žlábkový utvařeč mine, je závislá na vzdálenosti výstupní hrany žlábků od ostří b a na hloubce žlábků h . [54][58]



Obr. 2.15 $a < x$ [58]



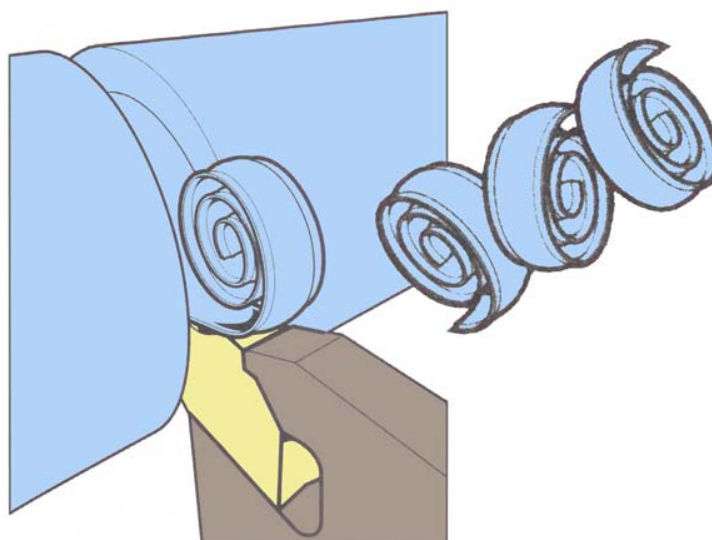
Obr. 2.16 $a > x$ [58]



Obr. 2.17 $a \gg x$ [58]

2.12 Vznik třísky u soustružnické operace zapichování

Při zapichování vznikají obráběné plochy po obou stranách ve směru posuvu, jak je demonstrováno na obrázku 2.18. Tato skutečnost vede ke zvýšeným nárokům na vhodnou geometrii utvařeče z hlediska nutnosti odvést vhodným způsobem třísku ze zóny řezu tak, aby nedošlo k poškození stěn drážky. Utvořená tříska musí být užší než drážka a její tvar by neměl nabývat podobu dlouhých nepříznivě stočených a zkroucených třísek. V ideálním případě se tříska prohne podél šířky pomocí utvařeče a v podélném směru se stočí do spirály, následně se po dosažení určitého počtu závinů spirály odlomí. Pro takovéto utváření třísek musejí nastat vhodné podmínky mezi které patří správná poloha břitu vůči obrobku, dobrý stav utvařeče třísek a břitu, úhel nastavení hlavního ostří a velikost posuvu, případně i použití procesní kapaliny. Na výslednou třísku má vliv také materiál obrobku, šířka břitové destičky a zvolený tvar utvařeče. Vyvážení vhodných třísek se dá také dosáhnout přerušením posuvu, kdy se zamezí vzniku dlouhých šroubovic, které vznikají většinou na začátku obrábění. Pro vznik žádoucích tvarů třísek u operace zapichování je vhodné použít břitové destičky s neutrální geometrií, kdy úhel hlavního ostří $K_r = 0$. [54]



Obr. 2.18 Vznik třísky při zapichování. [54]

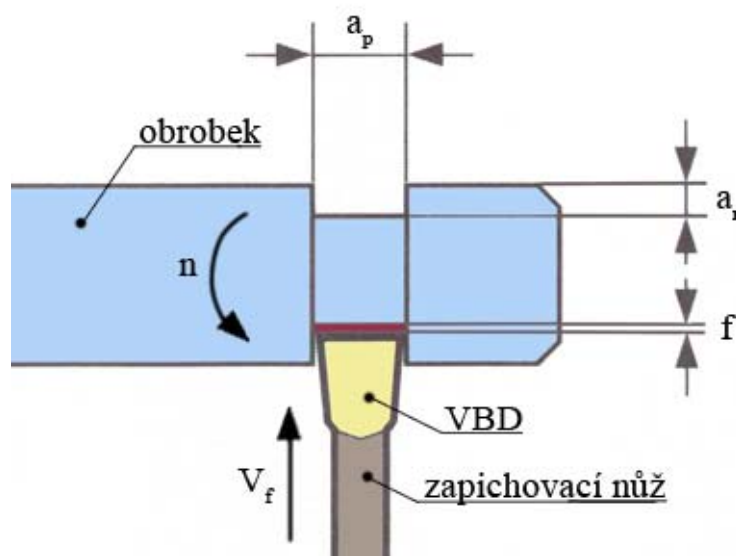
2.13 Princip soustružnické operace vnější zapichování

Základní princip vnějšího zapichování spočívá v kontaktu rotujícího obrobku a přímočaře se pohybujícího nástroje od obvodu obrobku k jeho ose. Hlavní pohyb vykonává obrobek a vedlejší nástroj, přičemž výsledná trajektorie opisuje tvar Archimedovy spirály. S rostoucí hloubkou zápichu klesá plynule řezná rychlost. Na obrázku 2.19 je uveden náskres procesu

kde: a_p [mm] - šířka záběru ostří, a_r [mm] - hloubka zápichu

f [mm] - posuv na otáčku, n [min^{-1}] - otáčky obrobku

V_f [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - posuvová rychlost



Obr. 2.19 Schéma procesu zapichování.[54]

Rotace obrobku při určitých otáčkách n zajišťuje hlavní pohyb, ten je kvantifikován pomocí řezné rychlosti dané následujícím vztahem.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.12)$$

kde: v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - řezná rychlost, D [mm] - průměr obrobku, π [-] - Ludolfovo číslo

Rychlost vedlejšího posuvného pohybu v_f je potom definována následovně.

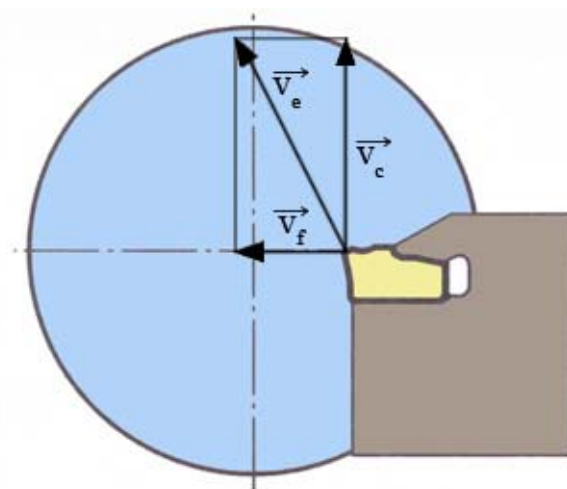
$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad (2.13)$$

kde: v_f [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - posuvová rychlost, f [mm] - posuv na otáčku

Celková rychlost se dá potom vyjádřit jako vektorový součet posuvové a řezné rychlosti, jak ilustruje obrázek 2.20. Platí zde následující vztah:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (2.14)$$

kde: v_e [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - celková rychlost



Obr. 2.20 Směry vektorů řezné, posuvové a celkové rychlosti při zapichování. [54]

Rozměr odřezané vrstvy při zapichování, kde úhel nastavení hlavního ostří $K_r = 0^\circ$, lze učit dle šířky záběru ostří a_p a velikosti posuvu f . Jak je zmíněno v kapitole o přechování třísky jmenovitá plocha řezu A_D lze vyjádřit vztahem: [53][55]

$$A_D = a_p \cdot f = h_D \cdot b_D \quad (2.15)$$

2.14 Řezné síly a výkon

Síly působící v řezném procesu mezi obrobkem a nástrojem se dají určit z empirických vztahů pro jednotlivé složky sil nebo pomocí měrného řezného odporu v závislosti na průřezu třísky. Experimentálně se síly určují pomocí dynamometrů a záznamových systémů. Následující vztahy určují výslednou řeznou sílu pomocí jednotlivých složek, směr působení ilustruje obrázek 2.21. [53][55]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2.16)$$

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (2.17)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad (2.18)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad (2.19)$$

kde: F [N] - celková řezná síla, F_c [N] - řezná síla,

F_f [N] - posuvová síla, F_p [N] - pasivní síla

C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} - materiálové konstanty

X_{Fc} , X_{Ff} , X_{Fp} - exponenty vlivu šířky záběru a_p

Y_{Fc} , Y_{Ff} , Y_{Fp} - exponenty vlivu posuvu f

Řezná síla se dá určit také na základě měrného řezného odporu, ten zohledňuje materiál obrobku, jeho tvrdost a pevnost, geometrii nástroje a v neposlední řadě také tloušťku odřezávané vrstvy. Síla ve směru hlavního ostří vztažená na průřez třísky o velikosti 1 mm^2 , tak lze definovat měrný řezný odpor, lze také popsat následujícím vztahem: [53][55]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (2.20)$$

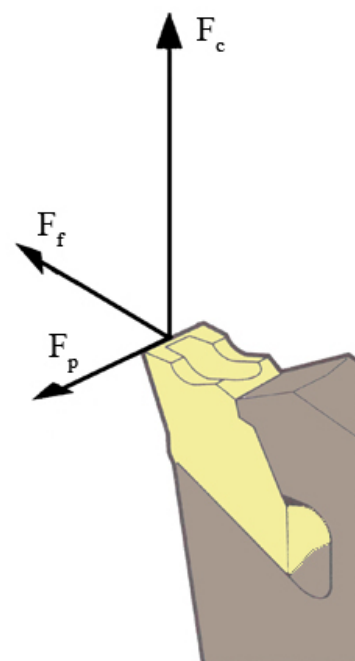
kde: k_c [MPa] - měrný řezný odpor nebo také měrná řezná síla

Řezný výkon je značen P_c , jde o součin řezné síly F_c a řezné rychlosti v_c , výsledná hodnota je uváděna v [kW] a určí se dle následující rovnice:[53][55]

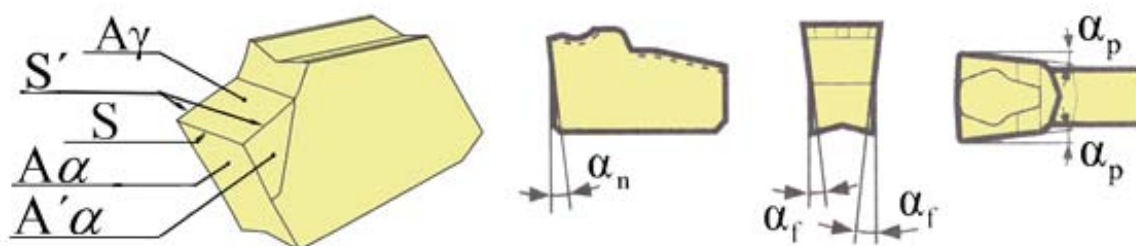
$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^6} \quad (2.21)$$

2.15 Geometrie vyměnitelné břitové destičky určené pro zapichování

Volba vyměnitelné břitové destičky s vhodnou geometrií zefektivní daný řezný proces. Geometrické prvky lze definovat plochami a úhly a jsou rozděleny dle funkce. Jejich nastavení ovlivňuje trvanlivost, silové i tepelné zatížení VBD, také ovlivní stabilitu procesu řezání, potřebný výkon a v neposlední řadě také kvalitu obrobku a jakost vzniklých třísek. Základní geometrické prvky a jejich značení je uvedeno na obrázku 2.22. Obrázek 2.23 ilustruje rozdělení VBD podle úhlu nastavení hlavního ostří K_r . Břitové destičky pro zapichování, kde je tento úhel nulový se značí N tzv. neutrální. Pro upichování jsou používány břitové destičky označením RH tzv. pravořezné nebo LH tzv. levořezné. Úhel nastavení hlavního ostří zde bývá několik málo stupňů. Jeho funkce je především zamezit vytvoření výstupku v blízkosti osy obrobku a zajistit tak kvalitně obrobenu plochu na oddělené části. [53][54]



Obr. 2.21 Rozložení složek celkové řezné síly [54]



Obr. 2.22 Označení základních geometrických prvků u VBD určené pro zapichování. [54][59]

A_γ - čelo - plocha po které odchází tříška, obsahuje utvařeč, řezná část nástroje

A_α - hlavní plocha - plocha přikloněná k obráběné ploše obrobku

A'_α - vedlejší hřbet - plocha přikloněná k obrobené ploše obrobku

α_f - úhel nastavení vedlejšího hřbetu

α_n - úhel nastavení hlavní plochy

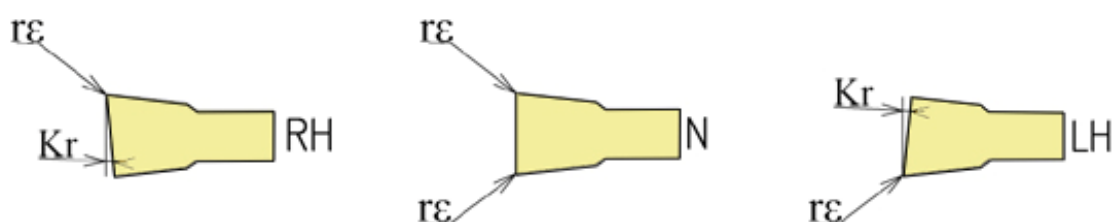
α_p - úhel nastavení čela

S - hlavní ostří - řezná hrana, určuje šířku řezu a třísky

S' - vedlejší ostří - řezná hrana může sloužit k dokončovací operaci

r_ε - rádius mezi hlavním a vedlejším ostřím,

K_r - úhel nastavení hlavního ostří



Obr. 2.23 Základní typy nastavení hlavního ostří [59]

3 OSVĚTLENÍ SCÉNY

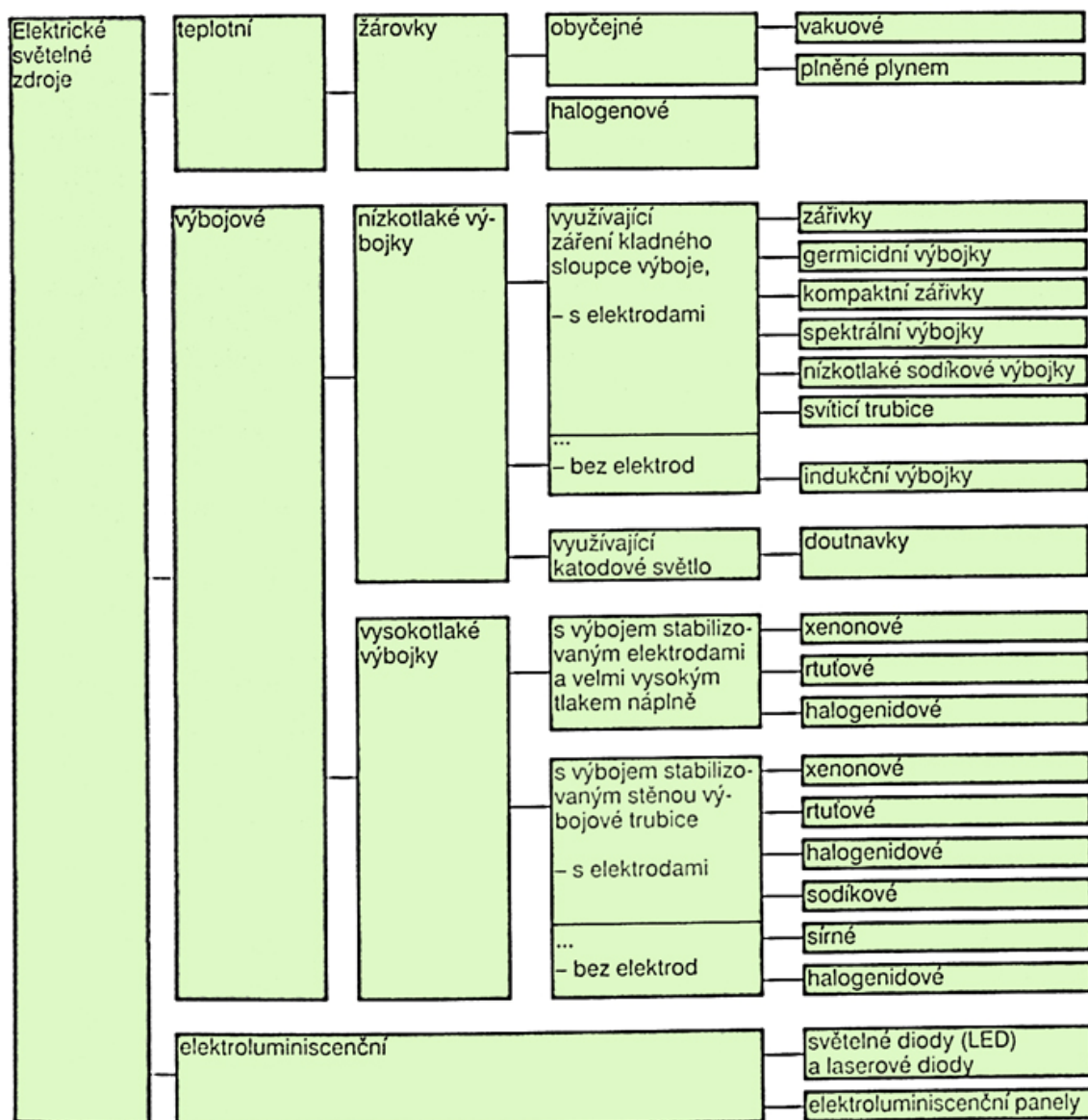
Důležitým parametrem pro tvorbu kvalitního vysokorychlostního záznamu je jakost osvětlení snímané scény. Výběr a realizace optimálního nasvícení by vydalo na samostatnou rozsáhlou studii. V kapitole jsou shrnuty základní pojmy z této problematiky důležité pro výběr světelného zdroje, uvedeno je také rozdělení dle typu. Výběr vhodného osvětlení snímaného objektu závisí na spoustě parametrů jako je vzdálenost mezi objektem a světelným zdrojem, typem a intenzitou světelného zdroje, teplotou chromatičnosti vydávaného světla a jeho indexu podání barev. Vlastnosti důležité pro vysokorychlostní záznam jsou také kontrast mezi snímaným objektem a jeho pozadím nebo odlesk paprsků od objektu. Ten jde částečně eliminovat změnou úhlu, pod kterým je scéna daným osvětlovacím prvkem nasvícena nebo také úpravou povrchu. Pro eliminování zmiňovaného jevu lze také použít filtr pro rozptýlení a změkčení světla, což ovšem sníží jeho intenzitu. V neposlední řadě jsou důležité také vlastnosti vysokorychlostní kamery, zejména typ snímacího prvku, kdy u černobílého záznamu je zapotřebí 2 až 4krát méně světla než u barevného. Další vlastnosti kamery a jejího příslušenství, které ovlivňují světlost záznamu, jako například rychlost záznamu a závěrky, světelnost objektivu, použitá clona nebo užití distančního kroužku jsou více přiblíženy v kapitole s názvem důležité znalosti pro tvorbu vysokorychlostního záznamu. Pro experiment je uvažováno nasvětlení scény pomocí lamp vybavených halogenovými žárovkami o příkonu 500 W a světelným tokem 9500 lm. Mají přijatelnou teplotu chromatičnosti a výborný index podání barev srovnatelný s denním světlem. Nevýhodou tohoto typu nasvětlení je množství vyzařovaného tepla a relativně slabá intenzita. Vhodnější pro daný účel by bylo bodové studené osvětlení například s využitím vysokotlaké xenonové výbojky, která má dostatečně velkou intenzitu osvětlení a dobré vlastnosti v podobě teploty chromatičnosti a indexu podání barev. [5][6]

3.1 Třídění světelných zdrojů

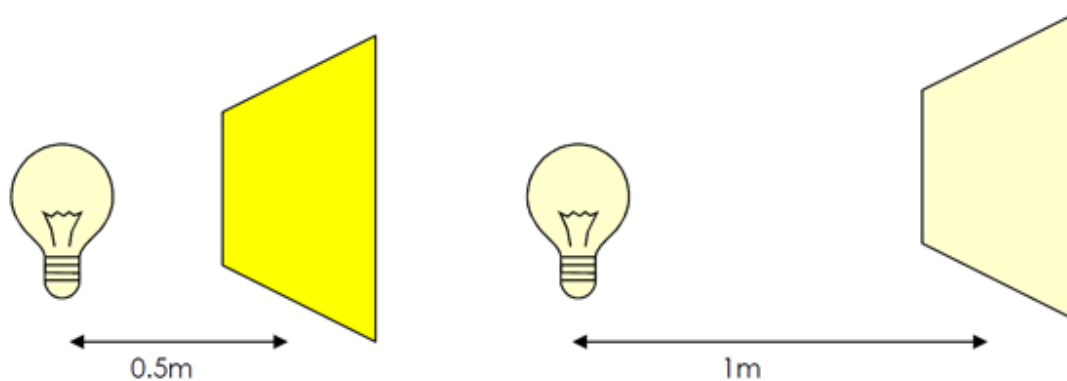
Světelné zdroje se dají definovat jako tělesa vyzařující optické, zpravidla viditelné záření. Mezi přírodní se může řadit sluneční svit nebo blesk, případně měsíční světlo. Rozdělení umělých, konkrétně elektrických světelných zdrojů je uvedeno v obrázku 3.1. Jde vlastně o zdroje světla, ze kterých lze vybrat vhodné pro použití u nasvětlení scény vysokorychlostního záznamu. Výrobci zmiňovaných světelných zdrojů většinou uvádějí údaje jako světelný tok, příkon, případně světelná účinnost a životnost. [5]

3.2 Vliv vzdálenosti zdroje světla

Obrázek 3.2 demonstruje důležitost faktoru vzdálenosti zdroje světla od snímaného objektu. Pokud se tato vzdálenost zdvojnásobí bude pozorovaná intenzita nasvícení objektu čtyřikrát menší. To je způsobeno skutečností, že se čtyřikrát zvětší nasvětlená plocha. Platí tedy pravidlo, že intenzita světla klesá s druhou mocninou vzdálenosti zdroje světla od scény záznamu. [5]



Obr. 3.1 Struktura třídění světelných zdrojů. [5]



Obr. 3.2 Vliv vzdálenosti zdroje světla od snímaného objektu. [6]

3.3 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti nebo také barevná teplota je označována jako T_c a její jednotkou je Kelvin. Toto označení vychází z úvahy, že když se rovná záření vycházející z posuzovaného zdroje světla a z absolutně černého tělesa, tak potom teplota absolutně černého tělesa se rovná teplotě chromatičnosti posuzovaného zdroje světla. Zmiňovaná veličina slouží k popsání barevného tónu vyzařovaného světla, v tomto ohledu je možné se setkat s označením světla jako studené nebo teplé. Barevné znázornění teplot chromatičnosti ilustruje obrázek 3.3, v tabulce 3.1 jsou potom shrnuty hodnoty T_c vybraných světelných zdrojů. [5]



Obr. 3.3 Barevné znázornění teplot chromatičnosti. [5]

Tab. 3.1 Teploty chromatičnosti vybraných světelných zdrojů [5].

Světelný zdroj	Teplota chromatičnosti T_c [K]	Světelný zdroj	Teplota chromatičnosti T_c [K]
Plamen svíčky	1500	Indukční výbojka	2700 až 4000
Západ slunce	2000	Rtuťová výbojka	3200 až 4200
Vysokotlaká sodíková výbojka	2000	Zatažená obloha	7500
Žárovka	2700	Halogenová výbojka	3000 až 5900
Měsíční světlo	3400	Kompaktní žárovka	2700 až 6500
Denní světlo	5500	Světelná dioda (LED)	2600 až 8000
Halogenová žárovka	2800 až 3100	Vysokotlaká xenonová výbojka	5600 až 6000

3.4 Index podání barev

Index podání barev je značen R_a u některých výrobců osvětlení je možné se setkat i se zápisem jako CRI (Color Rendering Index). Zmiňovaná veličina nabývá hodnot od 0 do 100 a vyjadřuje věrnost vjemu barev u osvětlených předmětů v závislosti na použitém zdroji světla. Hodnota 100 udává věrné podání barev jako by byla scéna nasvícena pouze přímým slunečním svitem. Naopak hodnota 0 vyjadřuje situaci, kdy barvy nejsou rozeznatelné vůbec. V tabulce 3.2 jsou shrnuty hodnoty R_a pro vybrané světelné zdroje. [5]

Tab 3.2 Index podání barev vybraných světelných zdrojů [5].

Světelný zdroj	Index podání barev	Světelný zdroj	Index podání barev
Vysokotlaká sodíková výbojka	25	Kompaktní zářivka	80 až 90
Rtuťová výbojka	40 až 60	Vysokotlaká xenonová výbojka	90
Halogenová výbojka	60 až 90	Žárovka	100
Indukční výbojka	80	Halogenová žárovka	100
Světelná dioda (LED)	80	Denní světlo	100

3.5 Světelný tok

Světelný tok lze popsat jako schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem. Je značen Φ a podstatou je vyjádření množství přenesené energie, pomocí fotonů, ze světelného zdroje do okolí za jednotku času. Jednotkou veličiny je lumen (lm), závisí na vlnové délce záření λ a zářivém toku Φ_e . [5]

3.6 Intenzita osvětlení

Intenzita osvětlení nebo také osvětlivost případně osvětelnost, s označením E , je fotometrická veličina určená velikostí světelného toku dopadající na plochu o velikosti 1 m^2 . Jednotkou veličiny je lux (lx) a lze popsat pomocí následujícího vzorce: [5]

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (3.1)$$

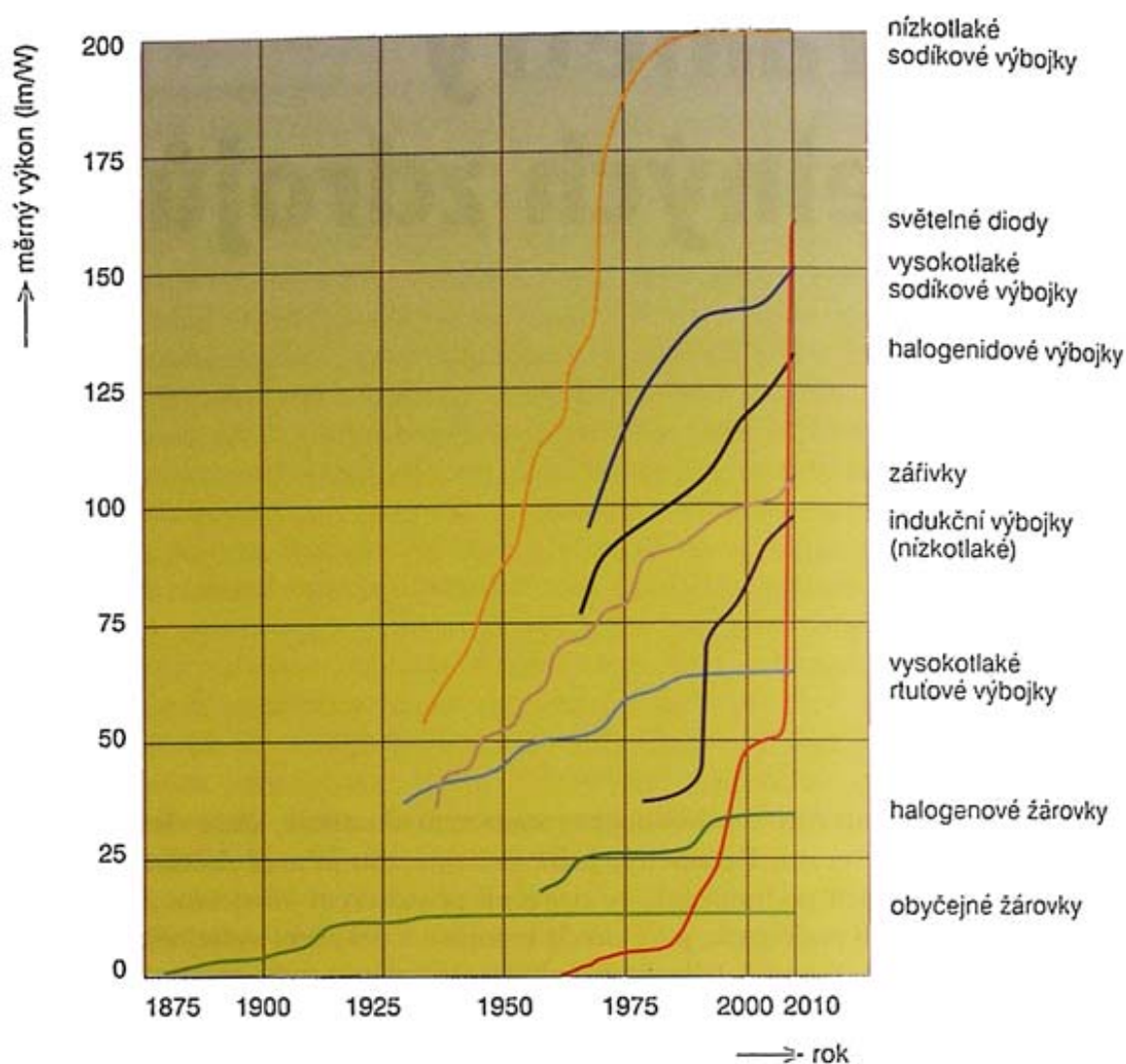
Kde: E [lx] - intenzita osvětlení

Φ [lm] - světelný tok od zdroje

S [m²] - plocha dopadu paprsků

3.7 Světelná účinnost zdroje

Světelná účinnost zdroje nebo také měrný světelný výkon je jedním s nejdůležitějších ukazatelů jakosti zdroje a vyjadřuje efektivnost přeměny elektrické energie na světelnou, jednotkou je lumen na watt (lm/W). Obrázek 3.4 ilustruje měrný světelný výkon vybraných zdrojů a jeho historický vývoj. [5]



Obr. 3.4 Měrný světelný výkon vybraných zdrojů a jeho historický vývoj. [5]

3.8 Svítivost

Svítivost s jednotkou candela (cd) patří mezi základní jednotky SI. Lze stanovit pouze pro bodové zdroje se zanedbatelnou velikostí vzhledem ke vzdálenosti referenčního bodu. Vyjadřuje hustotu světelného toku v prostoru v různých směrech od zdroje. Lze vyjádřit jako: [5]

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3.2)$$

Kde: I [cd] - svítivost

$d\Omega$ [sr] - element prostorového úhlu, do kterého zdroj svítí

$d\Phi$ [m²] - element světelného toku od zdroje do $d\Omega$

3.9 Jas

Jas nebo také měrná svítivost je možné definovat jako svítivost na jednotku plochy. Jednotka jasu je candela na metr čtvereční a značí se L. Lze popsat následujícím vztahem: [5]

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos \alpha_k} \quad (3.3)$$

Kde: L [cd · m⁻²] - jas

I [cd] - svítivost

α_k [°] - úhel odklonu paprsků od kolmice normály elementu plochy

dS [m²] - element ozařované plochy

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je zaměřena na ověření funkce utvařače třísky při soustružnické operaci zapichování a to u vybraných vyměnitelných břitových destiček. Byly vybrány dvojce destiček s podobnou geometrií a tvarem utvařače od různých výrobců, konkrétně Iscar a Pramet. Dle zmiňovaných producentů se liší břitové destičky také materiálem povlaku. U všech provedených experimentů byla dodržena stejná počáteční řezná rychlost a stejný průměr obrobku. Pro lepší podmínky pro sledování vysokorychlostní kamerou byly experimenty provedeny bez použití řezné kapaliny. Dalším cílem je ověřit řezné podmínky doporučené výrobcí, především posuv na otáčku a zaznamenat vzniklé třísky.

4.1 Volba stroje

Pro zhotovení experimentů byl zvolen soustruh SV 18 RD. Jde o univerzální hrotový soustruh z produkce TOS Trenčín. Vhodný je především z hlediska různých možností umístění přídavného osvětlení, potřebného pro snímání vysokorychlostní kamerou a také splňuje požadavky potřebné pro vybrané řezné podmínky u jednotlivých zápichů. Stroj použitý při experimentu je vyobrazen na obrázku 4.1 a na následujících řádcích jsou uvedeny některé technické parametry: [60]

- oběžný průměr nad ložem 380 mm
- oběžný průměr nad suportem 215 mm
- maximální počet otáček 2800 min⁻¹
- stroj je vybaven plynulou regulací otáček
- maximální krouticí moment včetně 207 Nm
- rozsah podélného posuvu na otáčku 0,02 - 2,8 mm
- rozsah příčného posuvu na otáčku 0,01 - 1,4 mm
- výkon motoru při maximálních otáčkách 10 kW
- rozměr suportu pro čtyři nože 125 x 125
- rozměry stroje (š x d x v) 950 x 3200 x 1520 mm
- vzdálenost hrotu 750 mm
- hmotnost stroje 2100 kg



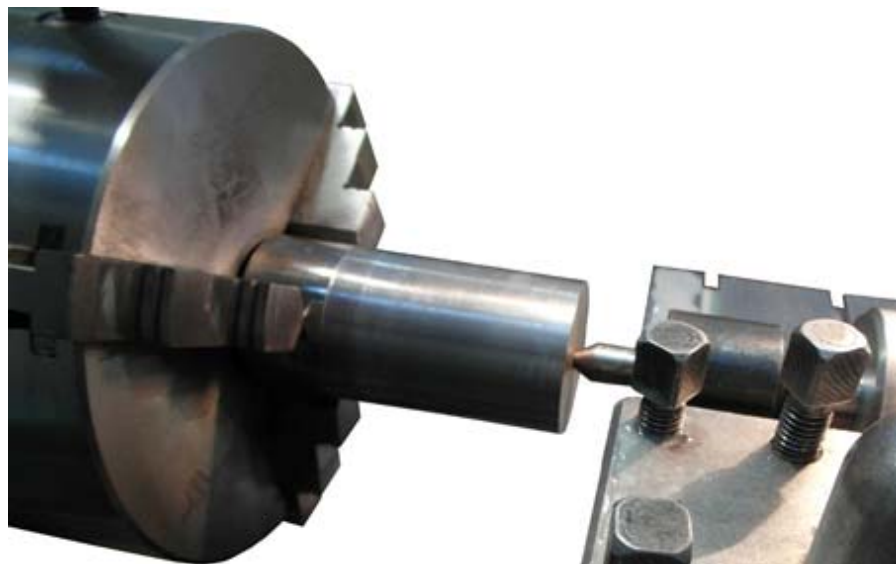
Obr. 4.1 Soustruh 18RD použitý při experimentu.

4.2 Volba obrobku

Pro experimentální část byl vybrán polotovar z oceli 11 600, dle ČSN 41 1600, o délce 140 mm. Počáteční průměr byl 60 mm, následně proběhlo zarovnání podélným soustružením na $\varnothing 59$ mm, který byl výchozí pro jednotlivé experimenty. Upnutý polotovar je znázorněn na obrázku 4.2, jedná se o tyč válcovanou za tepla, normalizačně žíhanou a popouštěnou. Některé vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tabulce 4.1. Podle výrobců vyměnitelných břitových destiček Iscar a Pramet patří zmiňovaný materiál do skupiny P označené modrou barvou. Tato skutečnost je důležitá pro správný výběr doporučených řezných podmínek. [61][58]

Tab. 4.1 některé vlastnosti oceli 11 600 podle ČSN 41 1600 [61].

název vlastnosti	značka a jednotka	hodnota
mez kluzu	R_e [MPa]	315
mez pevnosti	R_m [MPa]	570-710
tažnost	A_5 [%]	15
max. obsah fosforu	P [mh.%]	0,0045
max. obsah síry	S [mh.%]	0,04
max. obsah dusíku	N [mh.%]	0,009
hustota	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	7850
obrobitelnost (soustružení, vrtání, frézování)		14b



Obr. 4.2 Upnutý polotovár.

4.3 Volba kamery a její umístění

Jak už bylo nastíněno výše v této práci, pro experimentální část byla použita vysokorychlostní kamera TroubleShooter1000 z produkce společnosti FastecImagin. Kamera byla propojena s osobním počítačem vybaveným softwarem CamLink a MotionMeasure. První zmiňovaný software slouží k ovládání kamery přímo z počítače. Druhý slouží k přehrání záznamu a výběru vhodné sekvence, která lze následně upravit a uložit ve zvoleném formátu. Program MotionMeasure umožňuje také analyzovat pohyb zvoleného bodu v záznamu a určit tak jeho rychlost a zrychlení, dráha bodu však musí ležet v jedné rovině, kolmé na osu pohledu, výstupem může být graf nebo soubor dat. Experimenty byly realizovány na pracovišti vyobrazeném na obrázku 4.3, který znázorňuje vzájemné propojení vysokorychlostní kamery a PC, je zde patrná i intenzita osvětlení vyvolaná čtyřmi halogenovými lampami o příkonu 500 W. Obrázek 4.4 zachycuje detailněji uchycení kamery do stativové hlavy, která je dále upnuta do držáku kamery a ten do suportu soustruhu SV 18 RD.



1 - vysokorychlostní kamera, 2 - držák kamery, 3 - PC vybavený softwarem CamLink a MotionMeasure

Obr. 4.3 Celkový pohled na vzniklé experimentální pracoviště.



1 - vysokorychlostní kamera TroubleShooter 1000, 2 - nastavitelná stativová hlava, 3 - držák kamery

Obr. 4.4 Detailnější pohled na uchycení kamery a osvětlení.

4.4 Volba objektivu

Pro experiment byl vybrán objektiv s označením OA, který má velmi příznivou světelnost 0,95 a ohniskovou vzdálenost 50mm, která zajišťuje zorný úhel 10° . Tato skutečnost zaručuje dostatečnou velikost zorného pole, potřebnou k zachycení experimentu. Pro snížení zaostřitelné vzdálenosti byl použit distanční kroužek, zmiňovaný výše v této práci, ten je umístěn mezi kameru a daný objektiv. S použitím distančního kroužku klesla minimální zaostřitelná vzdálenost z původních 485mm na 140mm, což je pro realizaci experimentu s použitím zmiňovaného objektivu příznivější. Grafické znázornění zaostřitelné vzdálenosti objektivu s označením OA a stejného objektivu s použitím distančního kroužku, označeného potom jako OA-M, je uvedeno v kapitole zaostřitelná vzdálenost. Aby nedošlo k poškození objektivu vlivem odcházející třísky ze zóny řezu a dalšími vlivy, je přední čočka chráněna silikonovým kroužkem s průhlednou ochranou vrstvou. Celá soustava objektivu spolu se zmiňovanými prvky je uvedena na obrázku 4.5.

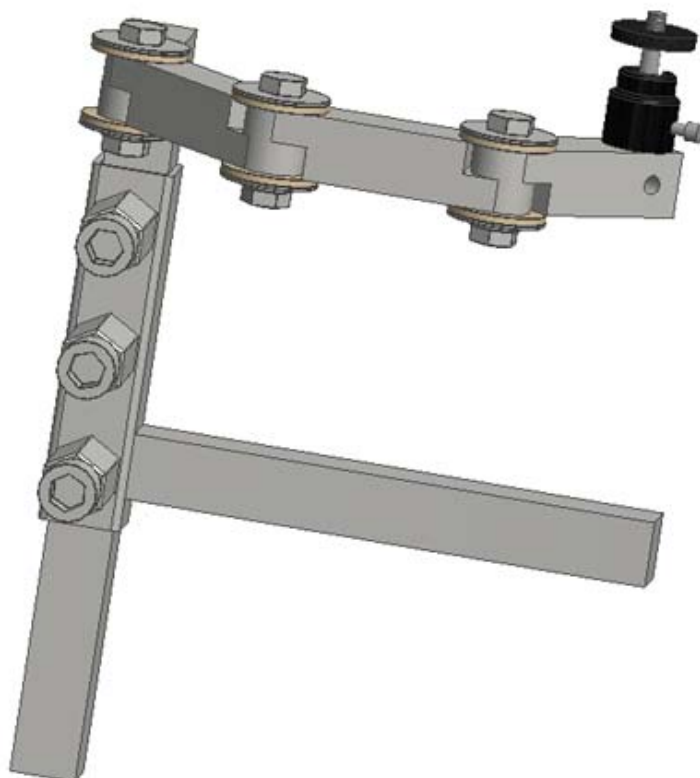


1 - ochranný silikonový kroužek, 2 - objektiv s označením OA, 3 - distanční mezikroužek

Obr. 4.5 Objektiv s označením OA s dalším vybavením použitý při experimentu.

4.5 Držák vysokorychlostní kamery

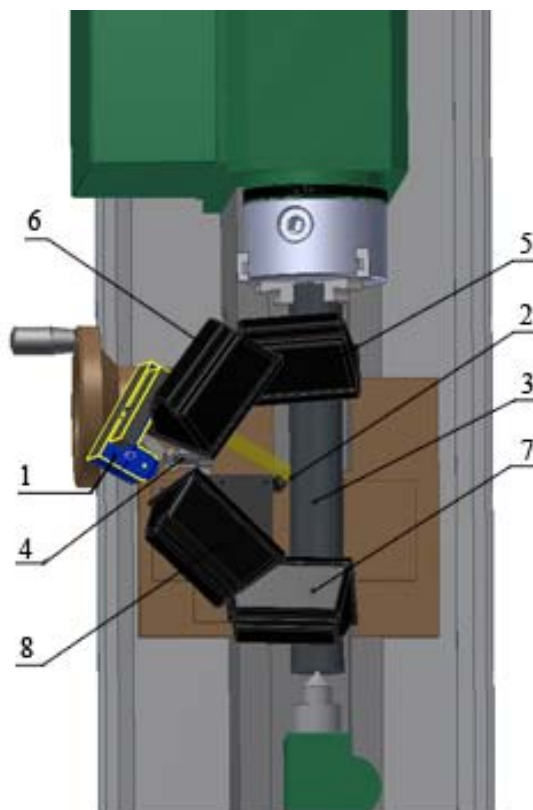
Pro zachycení požadované scény je třeba vysokorychlostní kameru upnout do suportu soustruhu. Při pohybu soustružnického nože je tak zajištěna stálost snímané scény a ostrost obrazu. K tomuto účelu byl navrhnut a vyroben držák kamery, jehož model je vyobrazen na obrázku 4.6. Při tvorbě návrhu byla brána zřetel především na variabilitnost nastavení, umožnění zaznamenat scénu z co nejvíce pohledů a úhlů s ohledem na zaostřitelnou vzdálenost vybraného objektivu. Některé možnosti upnutí do suportu a následného nastavení zmiňovaného držáku jsou uvedeny v příloze 3. V příloze 2 je potom uvedena výkresová dokumentace. Kromě prvku zajištění je držák vyroben z plného čtvercového profilu 20x20, což zajišťuje dostatečnou tuhost a zamezuje tak nežádoucím vibračním soustavám. Kamera je potom upnuta pomocí nastavitelné stativové hlavy, která je šroubovým spojem zajištěna ke koncovému členu držáku.



Obr. 4.6 Model držáku kamery.

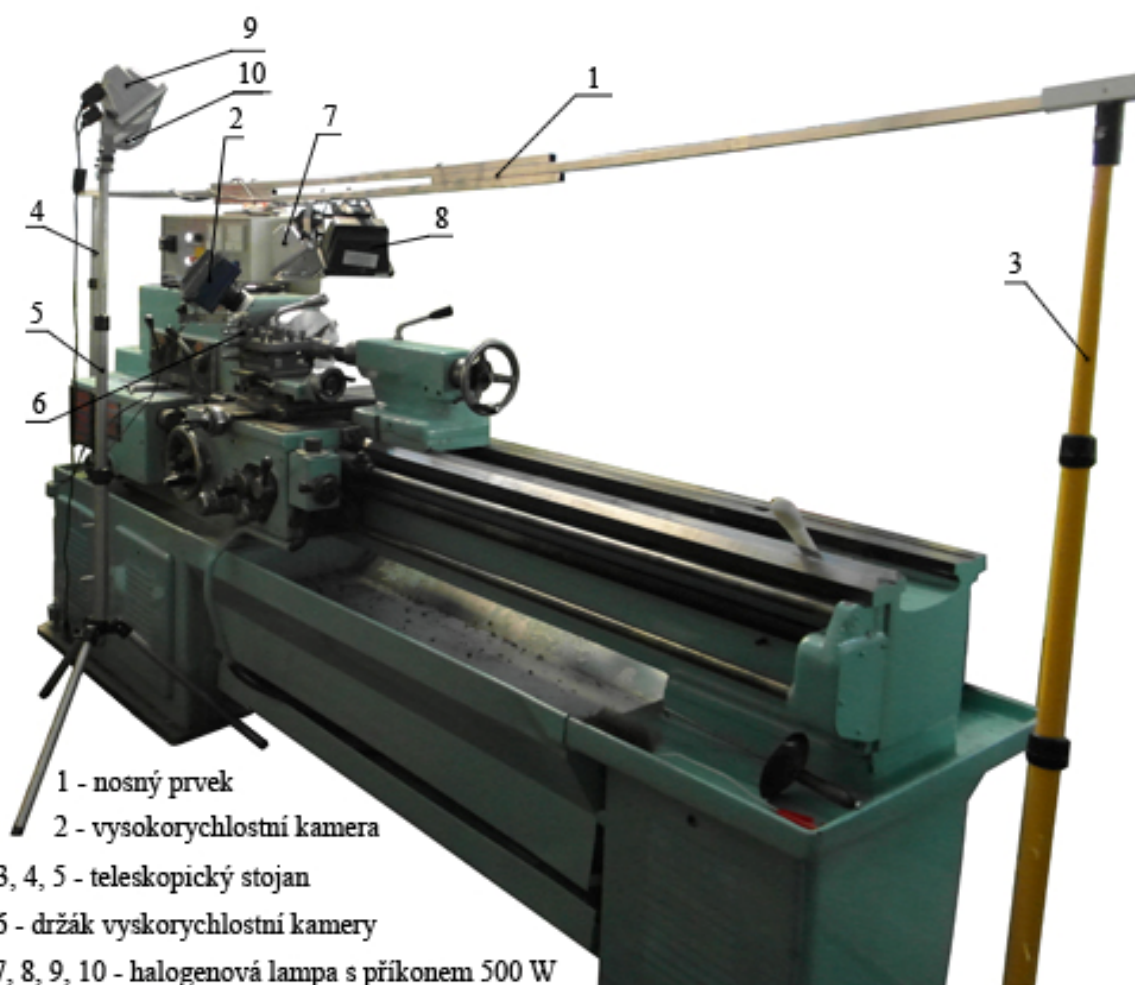
4.6 Volba způsobu nasvícení

Vhodné nasvícení scény je jedním s nejdůležitějších parametrů pro tvorbu kvalitního vysokorychlostního záznamu. Pro experiment bylo zvoleno nasvícení pomocí čtyř halogenových lamp, každé o příkonu 500 W. Uvažovaný model rozmístění je uveden na obrázku 4.7, praktické řešení potom zachycuje obrázek 4.8. Zmiňovaný zdroj světla byl zvolen především pro jeho dostupnost. I přes některé nevýhody především v podobě značného množství vyzařovaného tepla a relativně slabé intenzitě světla pro experimentální část vyhovuje. Pro vyšší záznamovou rychlost nebo hodnotu funkce shutter je nutné zvolit jiný způsob nasvícení, například pomocí intenzivního bodového studeného světla umístěného co nejbližší ke snímané scéně. Při úvaze rozmístění halogenových reflektorů byla brána zřetel především na možnost variace umístění a nastavení úhlu nasvícení, což je důležité především pro eliminaci případných odlesků. Praktické řešení umístění světel bylo provedeno pomocí teleskopických stojanů. Mezi dva stojany, umístěnými na protilehlých stranách stroje, byl uchycen nosný prvek ve směru rovnoběžném s obrobkem. Pomocí této konstrukce byly přivedeny dva halogenové reflektory do těsné blízkosti oblasti kontaktu soustružnického nože s obrobkem. Z větší vzdálenosti osvětlovaly snímanou scénu ještě dvě halogenové lampy uchycené na stojanu umístěném za vysokorychlostní kamerou. Napájení světel bylo řešeno tak, aby bylo možné všechny ovládat jedním spínačem. Tato skutečnost byla důležitá především kvůli možnosti rychlého zapnutí světel pouze v potřebné době záznamu a eliminovat tak přílišné sálání tepla, které by mohlo ovlivnit experiment nebo také poškodit záznamové zařízení.



1 - vysokorychlostní kamera TroubleShooter 1000
 2 - snímaná scéna, 3 - obrobek, 4 - držák kamery
 5, 6, 7, 8 - halogenová lampa s příkonem 500 W

Obr. 4.7 Model teoretické úvahy
 osvětlení experimentu.



Obr. 4.8 Praktické řešení osvětlení při experimentu.

4.7 Volba upnutí VBD

Pro upnutí všech vyměnitelných břitových destiček použitých v experimentech byl zvolen soustružnický nůž a planžeta pro vnější soustružení ze sortimentu společnosti Pramet s katalogovým označením nože MS-EN-2020 K a planžety XLCFN 250215-3.00. Soustava použitá v experimentech je uvedena na obrázku 4.9.



Obr. 4.9 Nůž a planžeta potřebná pro upnutí VBD použitých v experimentech.

4.8 VBD s produkce společnosti Pramet použité v experimentu

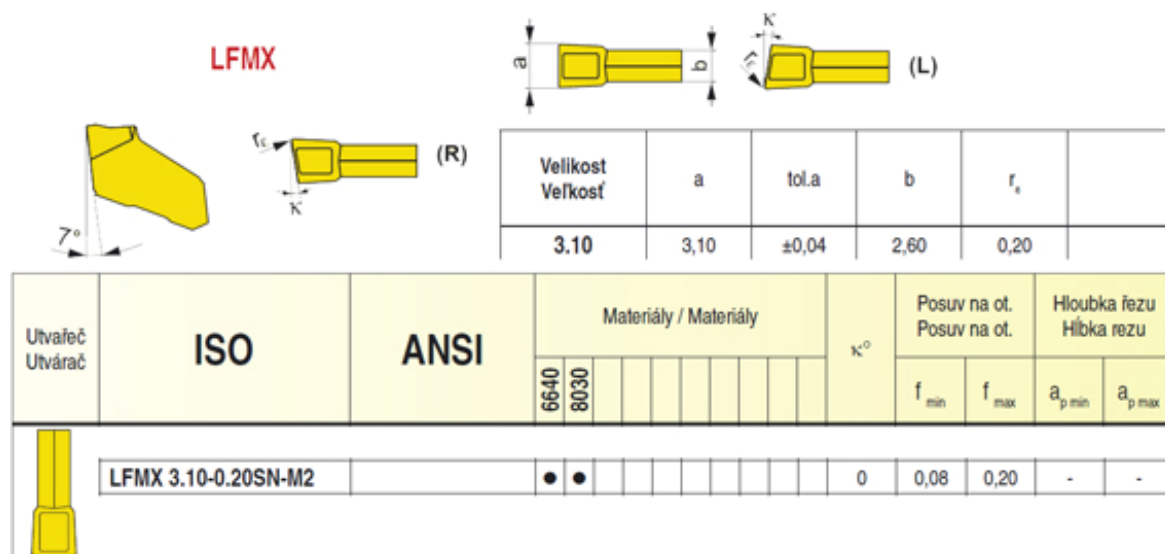
Od společnosti Pramet byly v experimentu použity dvě vyměnitelné břitové destičky určené pro zapichování s úhlem nastavení hlavního ostří $K_r = 0$. Konkrétně šlo o břitové destičky s katalogovým označením LFMX 3.10-0.20 SN-M2 a LFMX 3.10-0.20 EN-F1, kde poslední dva znaky určují, že je o rozdílné typy utvařeče třísky. Zmiňované VBD se liší zejména tvarem utvařeče, ostatní parametry jako materiál povlaku, šířka nebo velikost hlavního ostří jsou stejné. Katalogové označení materiálu povlaku zmiňovaných VBD je 8030, jde o velmi houževnatý materiál s vysokou otěruvzdorností a provozní spolehlivostí. Z hlediska použití je dosti univerzální, je určen především k závitování, upichování, zapicování nebo kopírovacímu soustružení. [58]

4.8.1 Experiment s VBD LFMX 3.10-0.20 SN-M2

S využitím vyměnitelné břitové destičky Pramet LFMX 3.10-0.20 SN-M2, byly provedeny čtyři experimenty. Podstatou byly zápichy, bez užití řezné kapaliny, do hloubek jeden a dva milimetry vzdálené od sebe 2 mm, z důvodu nižší teplotní ovlivnitelnosti. Jednotlivé experimenty jsou označeny A01 až A04 a shrnutí jejich řezných podmínek je uvedeno v tabulce 4.2, která obsahuje také údaje o posuvové rychlosti za sekundu s důvodu představy o rychlosti děje při záznamu vysokorychlostní kamerou. Jedním z cílů bylo ověřit funkčnost utvařeče, jehož detailní pohled je uveden na obrázku 4.10. Třísky vzniklé se zmiňovaným typem utvařeče M2 jsou uvedeny v obrázcích 4.11 až 4.14, s detailních pohledů napravo obrázku je patrná skutečnost, že se zvyšující se hodnotou posuvu roste funkce utvařeče ve smyslu jeho plnění materiálem. Dle teoretické predikce by měly mít třísky tvar Archimedovy spirály a za dobu řezného procesu by se jich měl vytvořit větší počet. V experimentech se většinou vytvořila jedna tříska ve tvaru šroubovice, náznak spirály je většinou patrný na začátku nebo na konci třísky. Grafické vyjádření oblasti řezných podmínek použitých v experimentech spolu s funkčním diagramem je uvedeno na obrázku 4.15, jde vlastně o ověření řezných podmínek doporučených výrobcem. Údaje poskytované výrobcem jsou potom na obrázku 4.16 .



Obr.4.10 Detail utvařeče.



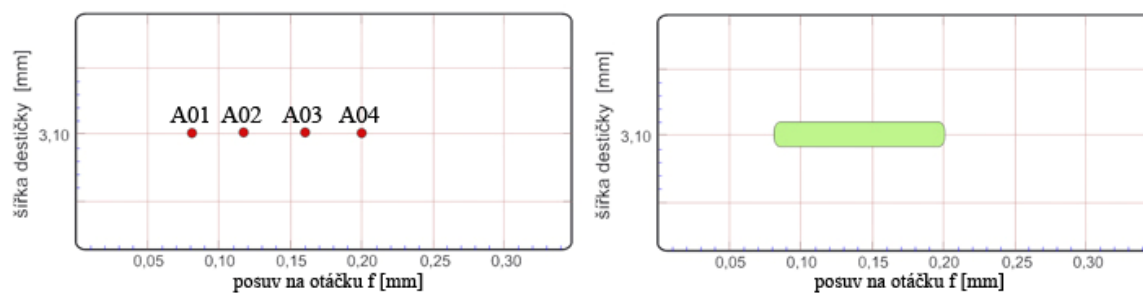
Velikost	a	tol.a	b	r_e	
3.10	3,10	$\pm 0,04$	2,60	0,20	

Utvářec Utvárac	ISO	ANSI	Materiály / Materiály								κ°	Posuv na ot. Posuv na ot.		Hloubka řezu Hĺbka rezu	
			6640	8030								f_{min}	f_{max}	$a_{p min}$	$a_{p max}$
	LFMX 3.10-0.20SN-M2		•	•							0	0,08	0,20	-	-

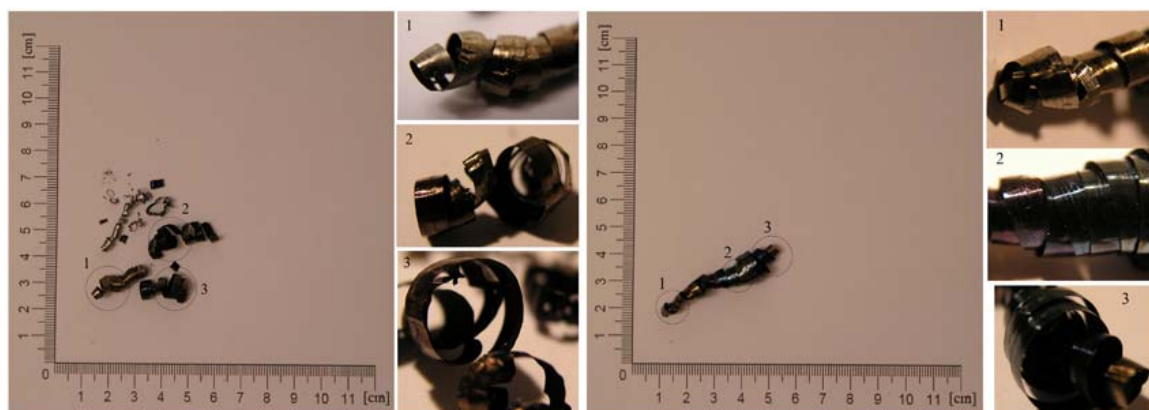
Obr. 4.16 Údaje od výrobce [59]

Tab.4.2 Shrnutí řezných podmínek jednotlivých experimentů.

Typ vyměnitelné břitové destičky	Pramet LFMX 3.10-0.20 SN-M2			
Označení experimentu	A01	A02	A03	A04
Posuv na otáčku f [mm]	0,08	0,12	0,16	0,2
Řezná rychlost v_c [$m \cdot \min^{-1}$]	130	130	130	130
Šířka záběru ostří a_p [mm]	3,1	3,1	3,1	3,1
Hloubka zápichu a_r [mm]	1	1	2	2
Průměr obrobku D [mm]	59	59	59	59
Otáčky n [\min^{-1}]	701,36	701,36	701,36	701,36
Posuvová rychlost v_f [$mm \cdot \min^{-1}$]	56,1	84,16	112,21	140,27
Posuvová rychlost za sekundu [$mm \cdot s^{-1}$]	0,935	1,402	1,870	2,337

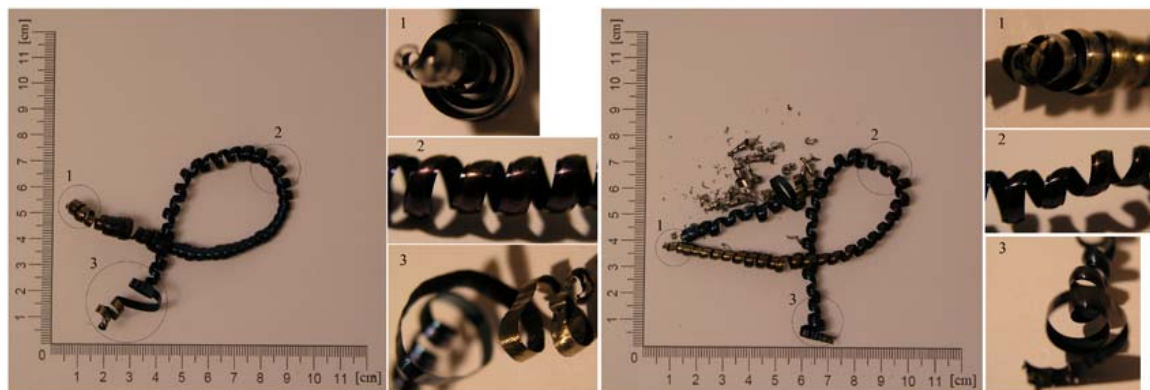


Obr. 4.15 Grafické vyjádření oblasti průběhu experimentů.



Obr. 4.11 experiment A01

Obr. 4.12 experiment A02

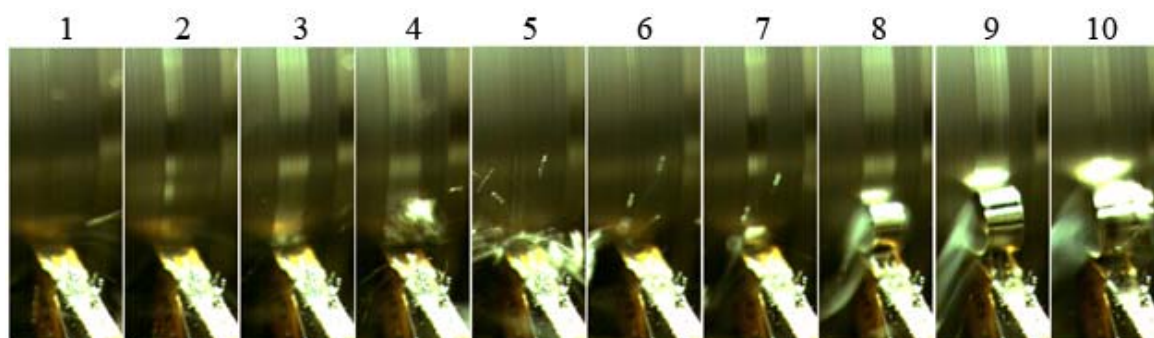


Obr. 4.13 experiment A03

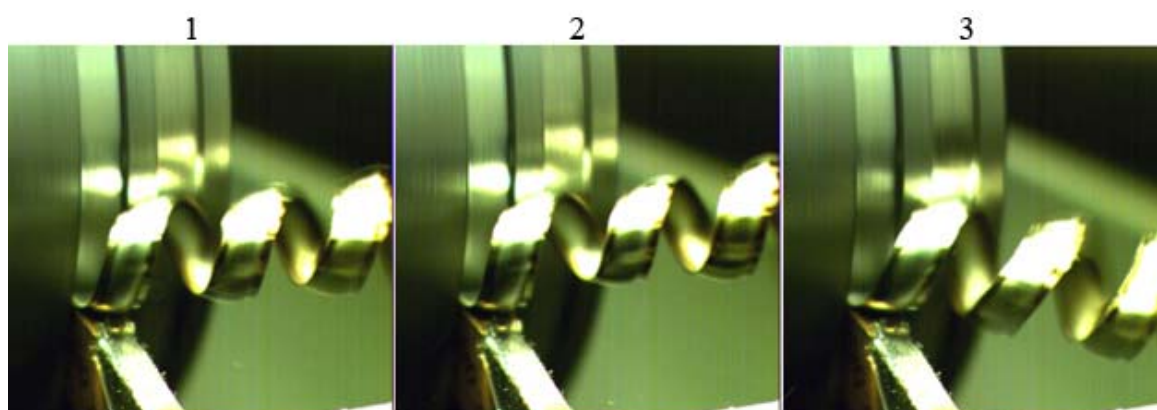
Obr. 4.14 experiment A04

Vysokorychlostní kamerou byl zaznamenán experiment A03 jehož průběh je zachycen na obrázcích 4.17, 4.18 a 4.19. Tyto sekvence byly sestaveny z vybraných políček videozáznamu, který byl pořízen v rozlišení 640x480 s frekvencí snímkování 125 fps. Funkce shutter byla nastavena na hodnotu 1x, což odpovídá rychlosti závěrky 8 ms. Sekvence uvedená na obrázku 4.17 zachycuje radiální házení, kde na snímku 1 je patná neobrobená plocha, políčka 2, 3 a 4 vykazují známky kontaktu s nástrojem a na snímku 6 je zase možné vidět neobrobenou plochu. Políčka s označením 7 až 10 potom demonstrují vznik třísky. Tato skutečnost je nejlépe patrná na dostatečně zpomaleném videozáznamu, který nemůže pouhá sekvence obrázků plně nahradit. Sled políček vyobrazený na obrázku

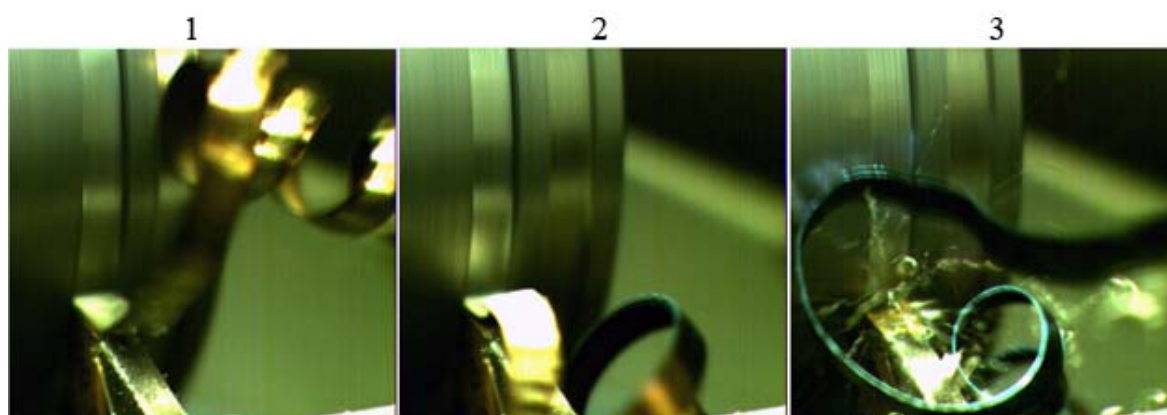
4.18 demonstruje odchod třísky ze zóny řezu přibližně v polovině celého procesu, je zde patrné jak dochází ke zkroucení třísky do tvaru šroubovice vlivem kontaktu s obrobkem. Tato skutečnost je nežádoucí s hlediska možného poškození jiných již obrobených ploch. Sekvence s označením 4.19 potom vyobrazuje poslední fázi, a to odlomení třísky a následné začištění dna zápichu.



Obr. 4.17 Experiment A03 - sekvence zachycuje začátek zapichování a radiální házení.



Obr. 4.18 Experiment A03 - sekvence zachycuje tvorbu třísky uprostřed řezného procesu.



Obr. 4.19 Experiment A03 - sekvence zachycuje odlomení třísky a začištění dna zápichu.

4.8.2 Experiment s VBD LFMX 3.10-0.20 EN-F1

S využitím vyměnitelné břitové destičky Pramet LFMX 3.10-0.20 EN-F1 byly provedeny tři experimenty. Podstatou byly zápichy bez užití řezné kapaliny do hloubky dva milimetry ,vzdálené od sebe 2 mm z důvodu nižší teplotní ovlivnitelnosti. Jednotlivé experimenty jsou označeny B01 až B03 a shrnutí jejich řezných podmínek je uvedeno v tabulce 4.3, která obsahuje také údaje o posuvové rychlosti za sekundu z důvodu představy o rychlosti děje při záznamu vysokorychlostní kamerou. Jedním z cílů bylo ověřit funkčnost utvařeče, jehož detailní pohled je uveden na obrázku 4.20. Třísky vzniklé se zmiňovaným typem utvařeče F1 jsou uvedeny v obrázcích 4.21 až 4.23, z detailních pohledů napravo obrázku je patrná skutečnost, že se zvyšující se hodnotou posuvu roste funkce utvařeče ve smyslu jeho plnění materiálem. Dle teoretické predikce by měly mít třísky tvar Archimedovy spirály a za dobu řezného procesu by se jich měl vytvořit větší počet. V experimentech se většinou vytvořila jedna tříska ve tvaru šroubovice, náznak spirály je většinou patný na začátku nebo na konci třísky. Grafické vyjádření oblastí řezných podmínek použitých v experimentech spolu s funkčním diagramem je uvedeno na obrázku 4.24, jde vlastně o ověření řezných podmínek doporučených výrobcem. Údaje poskytované výrobcem jsou potom na obrázku 4.25 .



Obr. 4.20 Detail utvařeče.

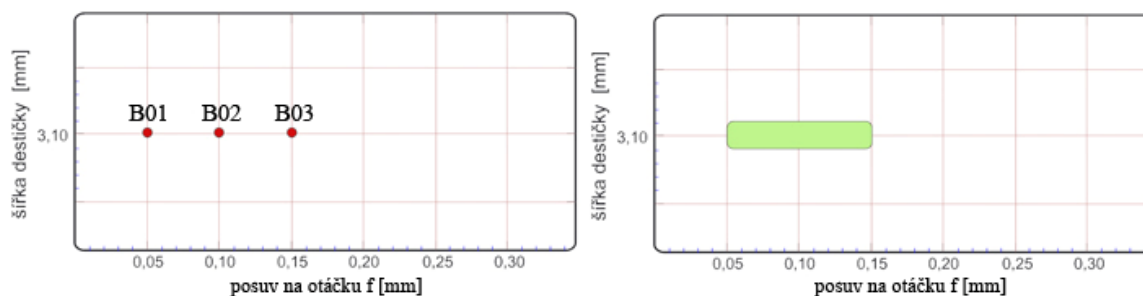
Velikost Velikost'	a	tol.a	b	r _s				
	3.10	3,10	±0,04	2,60	0,20			

Utvařeč Utvarač	ISO	ANSI	Materiály / Materiály								κ°	Posuv na ot. Posuv na ot.		Hloubka řezu Hĺbka rezu	
			6640	8030								f _{min}	f _{max}	a _{p min}	a _{p max}
	LFMX 3.10-0.20EN-F1		○	●							0	0,05	0,15	-	-

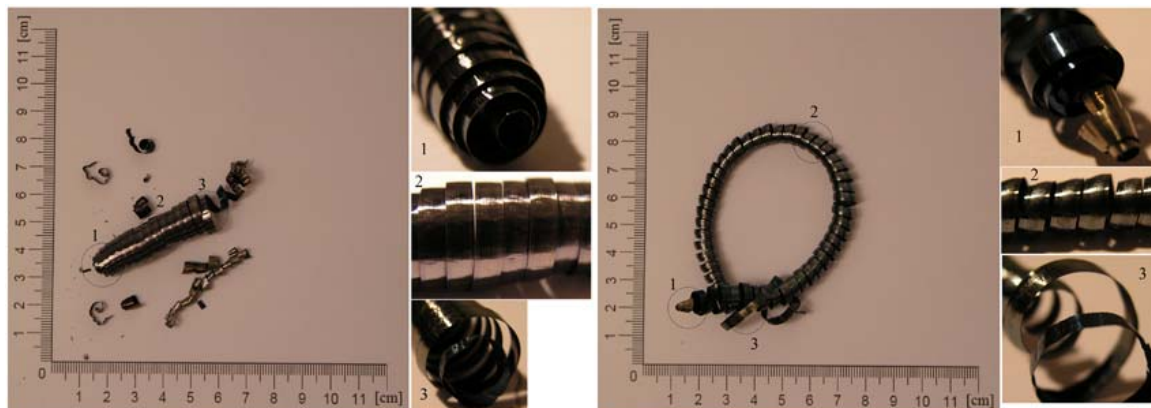
Obr. 4.25 Údaje od výrobce [59]

Tab.4.3 Shrnutí řezných podmínek jednotlivých experimentů.

Typ vyměnitelné břitové destičky	Pramet LFMX 3.10-0.20 EN-F1		
Označení experimentu	B01	B02	B03
Posuv na otáčku f [mm]	0,05	0,1	0,15
Řezná rychlost v_c [$m \cdot \text{min}^{-1}$]	130	130	130
Šířka záběru ostří a_p [mm]	3,1	3,1	3,1
Hloubka zápichu a_r [mm]	2	2	2
Průměr obrobku D [mm]	59	59	59
Otáčky n [min^{-1}]	701,36	701,36	701,36
Posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	35,06804	70,13608	105,2041
Posuvová rychlost za sekundu [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,584467	1,168935	1,753402



Obr.4.24 Grafické vyjádření oblasti průběhu experimentů.



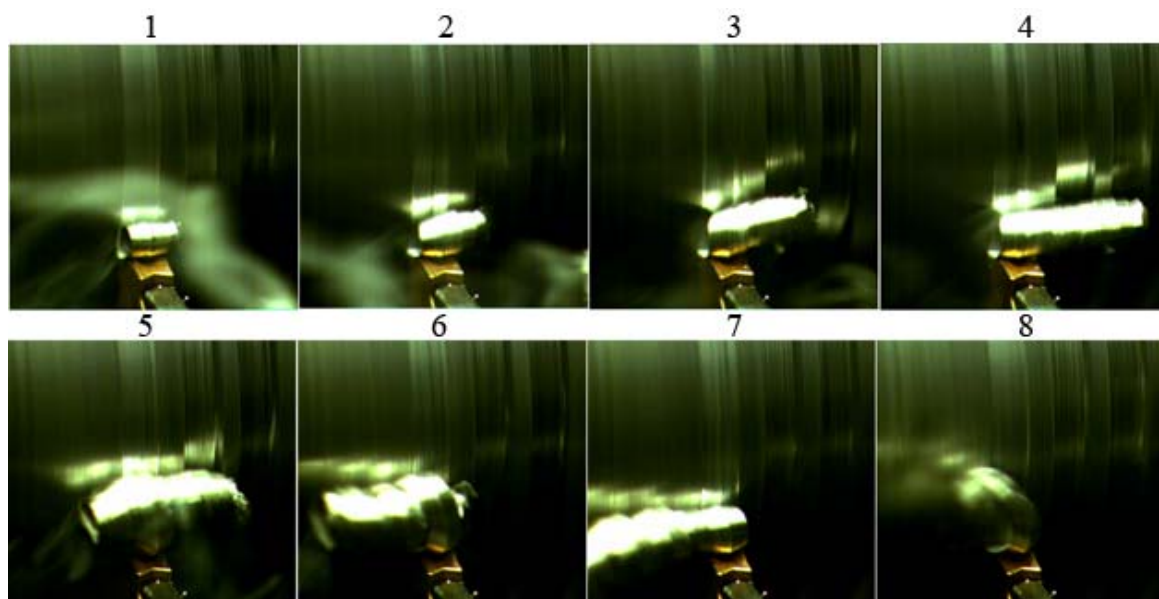
Obr. 4.21 experiment B01

Obr. 4.22 experiment B02

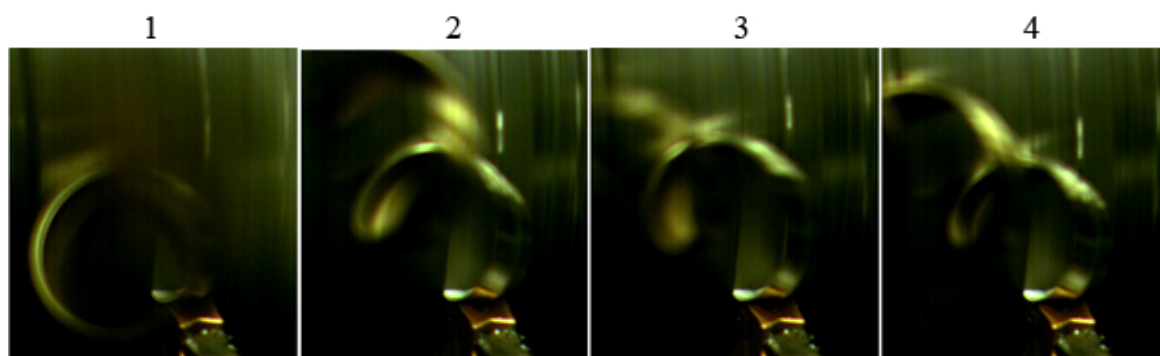


Obr. 4.23 experiment B03

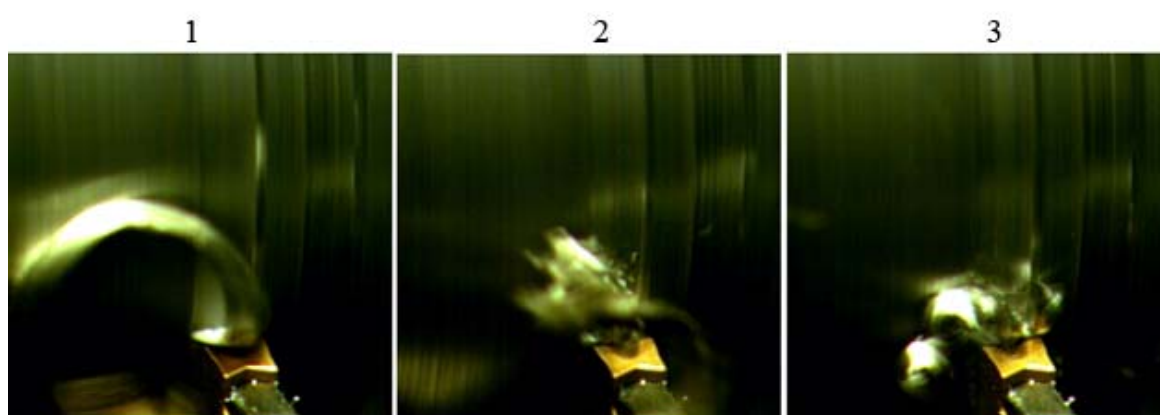
Vysokorychlostní kamerou byl zaznamenán experiment B02 jehož průběh je zachycen na obrázcích 4.26, 4.27 a 4.28. Tyto sekvence byly sestaveny z vybraných políček videozáznamu, který byl pořízen v rozlišení 640x480 s frekvencí snímkování 125 fps. Funkce shutter byla nastavena na hodnotu 2x, což odpovídá rychlosti závěrky 4 ms. Je patné, že díky tomuto nastavení jsou snímky oproti předchozímu experimentu s označením A03 tmavší. Sekvence uvedená na obrázku 4.26 zachycuje moment vzniku třísky, kdy nejprve se začne vyvíjet směrem doprava a po krátkém časovém intervalu změní směr. Políčko 8 reprezentuje okamžik kdy se spirálovitě smotaná tříska začne vyvíjet do tvaru šroubovice vlivem kontaktu s obrobkem. Zmiňovanou skutečnost lépe reprezentuje sled snímků na obrázku 4.27, kde je patrná funkce utvařeče a mechanismus odchodu třísky. Nastalý odchod třísky je nepříznivý ve smyslu možnosti poškození již obrobených ploch na obrobku nebo také stěn zápichu. Sekvence s označením 4.28 potom vyobrazuje poslední fázi, a to odlomení třísky a následné začištění dna zápichu.



Obr. 4.26 Experiment B02 - sekvence zachycuje začátek tvorby třísky.



Obr. 4.27 Experiment B02 - sekvence zachycuje odchod třísky uprostřed řezného procesu.



Obr. 4.28 Experiment B02 - sekvence zachycuje odlomení třísky a začištění dna zápichu.

4.9 VBD s produkce společnosti Iscar použité v experimentu

Od společnosti Iscar byly v experimentu použity dvě vyměnitelné břitové destičky určené pro zapichování s úhlem nastavení hlavního ostří $K_r = 0$. Konkrétně šlo o břitové destičky s katalogovým označením GFN-3-IC254 a GFN-3J-IC328, kde prostřední znaky oddělené pomlčkami určují, že je o rozdílné typy utvařeče třísky. Zmiňované VBD se liší zejména tvarem utvařeče, materiál povlaku je srovnatelný. Nepatrně se liší v šířce nebo velikosti hlavního ostří. Katalogové označení materiálu a povlaku zmiňovaných VBD je IC354 a IC328, jde o houževnaté substráty s TiN/TiCN PVD povlakem určené převážně pro aplikace zapichování a upichování uhlíkových, legovaných a nerez ocelí při středních a vyšších řezných rychlostech. [62][63]

4.9.1 Experiment s VBD GFN-3-IC354

S využitím vyměnitelné břitové destičky Iscar GFN-3-IC354, byly provedeny čtyři experimenty. Podstatou byly zápichy, bez užití řezné kapaliny, do hloubky dva milimetry, vzdálené od sebe vždy 2mm, z důvodu nižší teplotní ovlivnitelnosti. Jednotlivé experimenty jsou označeny C01 až C04 a shrnutí jejich řezných podmínek je uvedeno v

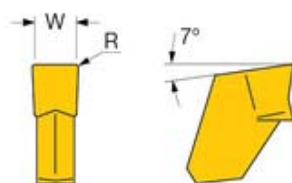
tabulce 4.4, která obsahuje také údaje o posuvové rychlosti za sekundu s důvodu představy o rychlosti děje při záznamu vysokorychlostní kamerou. Jedním z cílů bylo ověřit funkčnost utvařeče, jehož detailní pohled je uveden na obrázku 4.29. Třísky vzniklé se zmiňovaným typem utvařeče GFN-3 jsou uvedeny v obrázcích 4.30 až 4.33, z detailních pohledů napravo obrázku je patrná skutečnost, že se zvyšující se hodnotou posuvu roste funkce utvařeče ve smyslu jeho plnění materiálem. Dle teoretické predikce by měly mít třísky tvar Archimedovy spirály a za dobu řezného procesu by se jich měl vytvořit větší počet. V experimentech se většinou vytvořila jedna tříska ve tvaru šroubovice, náznak spirály je většinou patrný na začátku nebo na konci třísky. Grafické vyjádření oblasti řezných podmínek použitých v experimentech spolu s funkčním diagramem je uvedeno na obrázku 4.34, jde vlastně o ověření řezných podmínek doporučených výrobcem. Údaje poskytované výrobcem jsou potom na obrázku 4.35.



Obr. 4.29 Detail utvařeče.

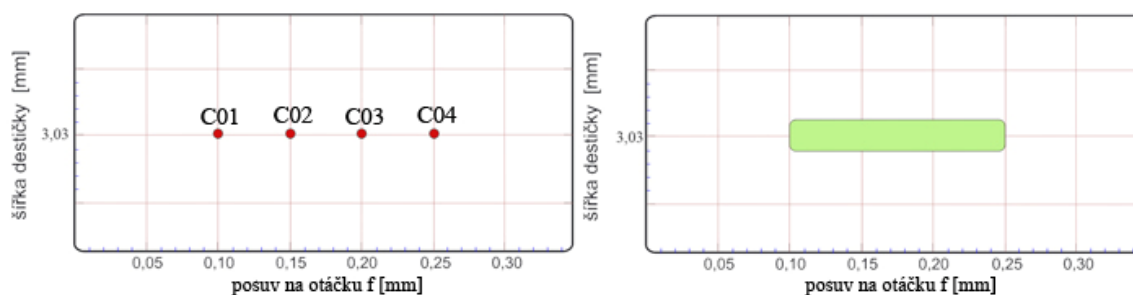
Tab. 4.4 Shrnutí řezných podmínek jednotlivých experimentů.

Typ vyměnitelné břitové destičky	Iscar GFN-3-IC354			
Označení experimentu	C01	C02	C03	C04
Posuv na otáčku f [mm]	0,1	0,15	0,2	0,25
Řezná rychlost v_c [$m \cdot \text{min}^{-1}$]	130	130	130	130
Šířka záběru ostří a_p [mm]	3,03	3,03	3,03	3,03
Hloubka zápichu a_r [mm]	2	2	2	2
Průměr obrobku D [mm]	59	59	59	59
Otáčky n [min^{-1}]	701,36	701,36	701,36	701,36
Posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	70,13	105,2	140,27	175,34
Posuvová rychlost za sekundu [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	1,168	1,753	2,337	2,922



Designation	W	W tol (±)	R±0.05	fg (min)	fg (max)	Tough ← → Hard Grade & Vc
GFN 3	3.03	0.04	0.20	0.10	0.25	IC28 IC328 IC1028 IC354 IC250 IC908 IC30N IC20 IC428

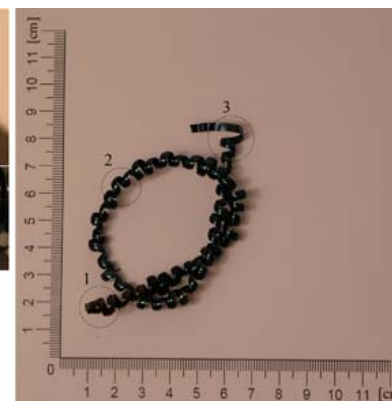
Obr. 4.35 Údaje od výrobce [63]



Obr. 4.34 Grafické vyjádření oblasti průběhu experimentů.



Obr. 4.30 experiment C01



Obr. 4.31 experiment C02



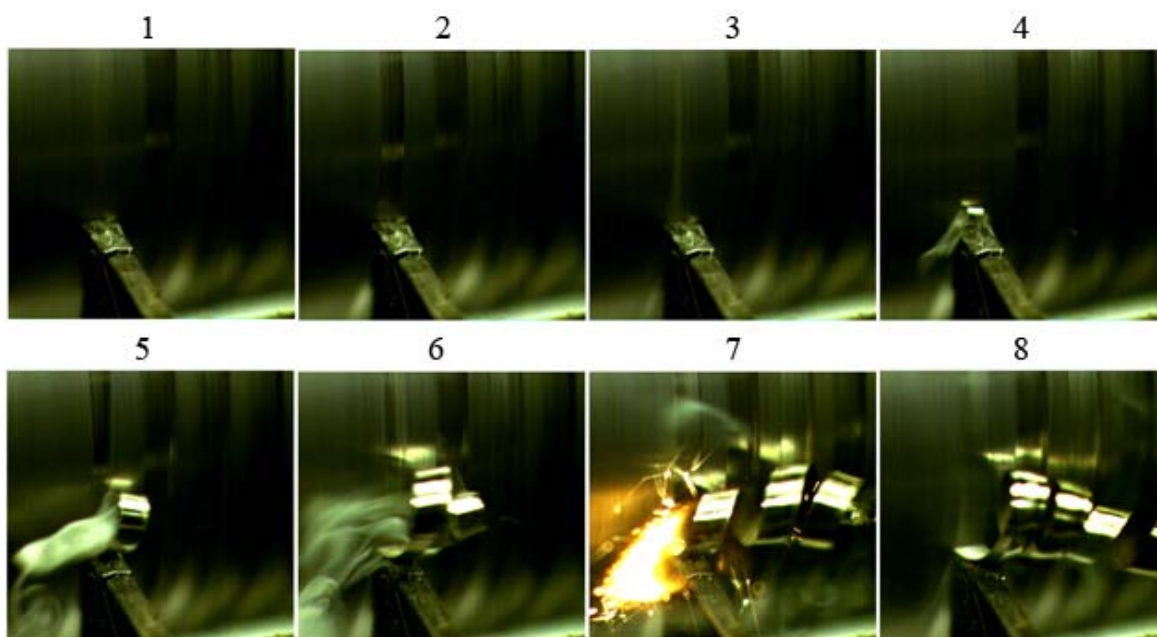
Obr. 4.32 experiment C03



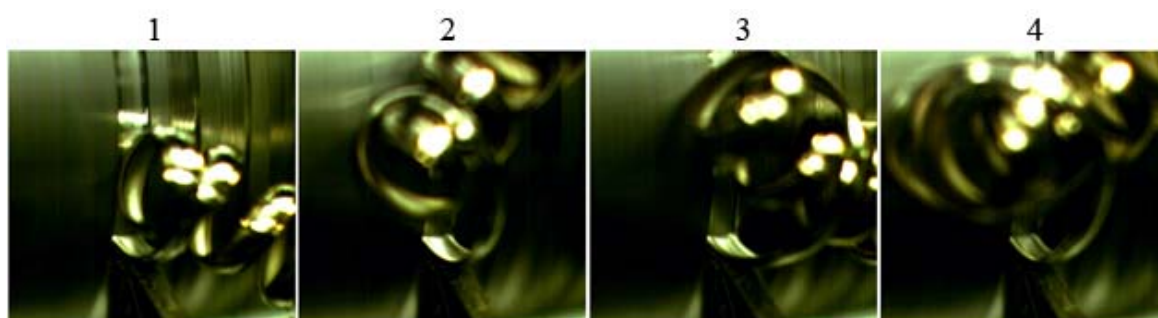
Obr. 4.33 experiment C04



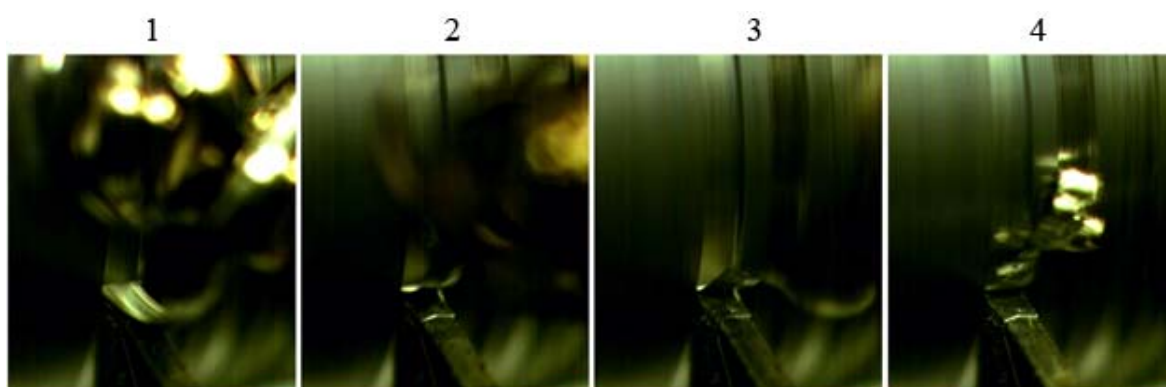
Vysokorychlostní kamerou byl zaznamenán experiment C03, jehož průběh je zachycen na obrázcích 4.36, 4.37 a 4.38. Tyto sekvence byly sestaveny z vybraných políček videozáznamu, který byl pořízen v rozlišení 640x480 s frekvencí snímkování 125 fps. Funkce shutter byla nastavena na hodnotu 3x, což odpovídá rychlosti závěrky 2,66 ms. Je patné, že díky tomuto nastavení jsou snímky oproti předchozím experimentům s označením A03 a B02 zase o něco tmavší, tato skutečnost je vyvážena lepší ostrostí snímků především v rovině zaostření a její blízkosti. Sekvence uvedená na obrázku 4.36 zachycuje radiální házení a to především ve snímcích 1 až 4 kdy je patná neobrobená plocha, následně se na obrobku objeví známka kontaktu s ostřím a na následujícím poli je zase viditelná neobrobená plocha. Tento děj plynule naváže na začátek tvorby třísky, který je patrný na snímcích 4 až 8. Pole 7 potom zachycuje vznik jiskry. Sled políček vyobrazený na obrázku 4.37 demonstruje odchod třísky ze zóny řezu přibližně v polovině celého procesu, je zde pěkně patrná funkce utvařeče ve smyslu tvarování výsledného průřezu třísky. Na samotnou třísku zde není příliš zaostřeno vlivem větší blízkosti k objektivu. Sekvence s označením 4.38 potom vyobrazuje konec řezného procesu daného experimentu s ukázkou odlomení třísky a následného začištění dna zápichu, kdy vznikají drobné elementární třísky.



Obr. 4.36 Experiment C03 - sekvence zachycuje radiální házení a začátek tvorby třísky.



Obr. 4.37 Experiment C03 - sekvence zachycuje odchod třísky uprostřed řezného procesu.



Obr. 4.38 Experiment C03 - sekvence zachycuje odlomení třísky a začištění dna zápichu.

4.9.2 Experiment s VBD GFN-3J-IC328

S využitím vyměnitelné břitové destičky Iscar GFN-3J-IC328, byly provedeny tři experimenty. Podstatou byly zápichy bez užití řezné kapaliny do hloubky dva milimetry, vzdálené od sebe vždy 2mm z důvodu nižší teplotní ovlivnitelnosti. Jednotlivé experimenty jsou označeny D01 až D03 a shrnutí jejich řezných podmínek je uvedeno v tabulce 4.5, která obsahuje také údaje o posuvové rychlosti za sekundu z důvodu představy o rychlosti děje při záznamu vysokorychlostní kamerou. Jedním z cílů bylo ověřit funkčnost utvařeče, jehož detailní pohled je uveden na obrázku 4.39. Třísky vzniklé se zmiňovaným typem utvařeče GFN-3J jsou uvedeny v obrázcích 4.40 až 4.42, s detailních pohledů napravo obrázku je patrná skutečnost, že se zvyšující se hodnotou posuvu roste funkce utvařeče ve smyslu jeho plnění materiálem. Dle teoretické predikce by měly mít třísky tvar Archimedovy spirály a za dobu řezného procesu by se jich měl vytvořit větší počet. V experimentech se většinou utvořila jedna tříška ve tvaru



Obr. 4.39 Detail utvařeče.

šroubovice, náznak spirály je většinou patný na začátku nebo na konci třísky. Grafické vyjádření oblasti řezných podmínek použitých v experimentech spolu s funkčním diagramem je uvedeno na obrázku 4.43, jde vlastně o ověření řezných podmínek doporučených výrobcem. Údaje poskytované výrobcem jsou potom na obrázku 4.44.

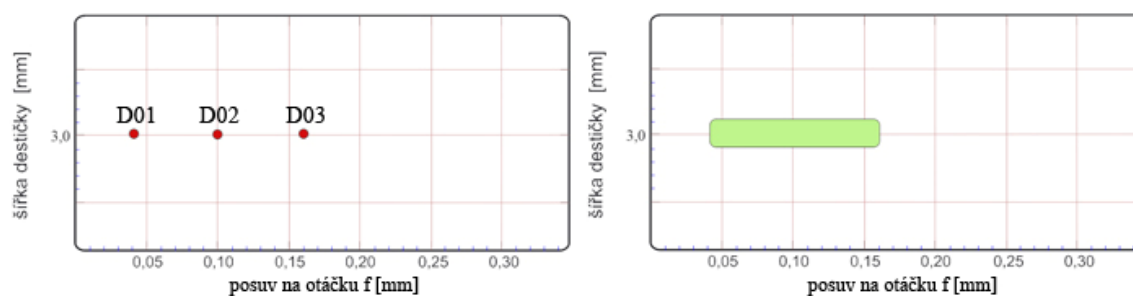
Tab. 4.5 Shrnutí řezných podmínek jednotlivých experimentů.

Typ vyměnitelné břitové destičky	Iscar GFN-3J-IC328		
Označení experimentu	D01	D02	D03
Posuv na otáčku f [mm]	0,04	0,1	0,16
Řezná rychlost v_c [$m \cdot \text{min}^{-1}$]	130	130	130
Šířka záběru ostří a_p [mm]	3	3	3
Hloubka zápichu a_r [mm]	2	2	2
Průměr obrobku D [mm]	59	59	59
Otáčky n [min^{-1}]	701,36	701,36	701,36
Posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	28,05	70,14	112,22
Posuvová rychlost za sekundu [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,468	1,169	1,87



Designation	W	W tol (±)	R	R±toler	fg (min)	fg (max)	Tough ← → Hard Grade & Vc
GFN 3J	3.00	0.03	0.25	0.050	0.04	0.16	IC28 IC328 IC1028 IC354 IC250 IC908 IC20

Obr. 4.44 Údaje od výrobce [63]



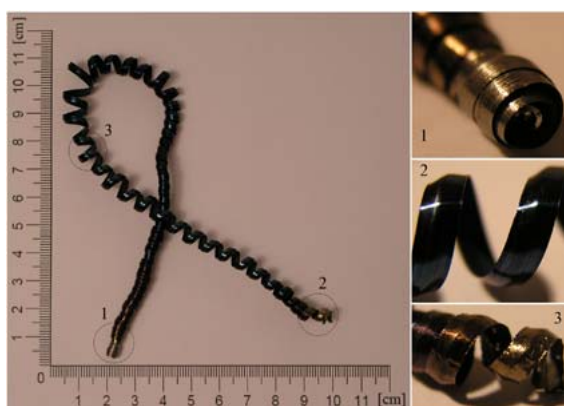
Obr. 4.43 Grafické vyjádření oblasti průběhu experimentů.



Obr. 4.40 experiment D01

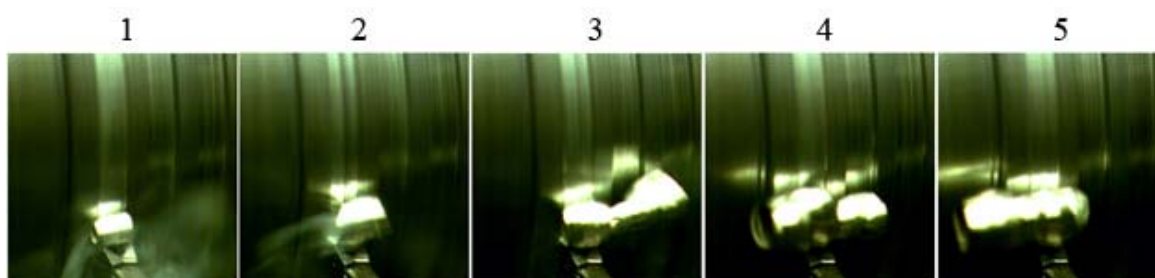


Obr. 4.41 experiment D02

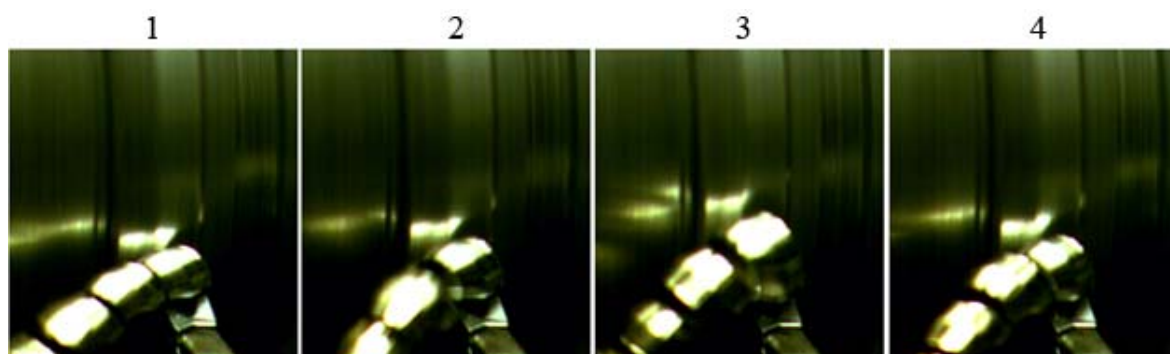


Obr. 4.42 experiment D03

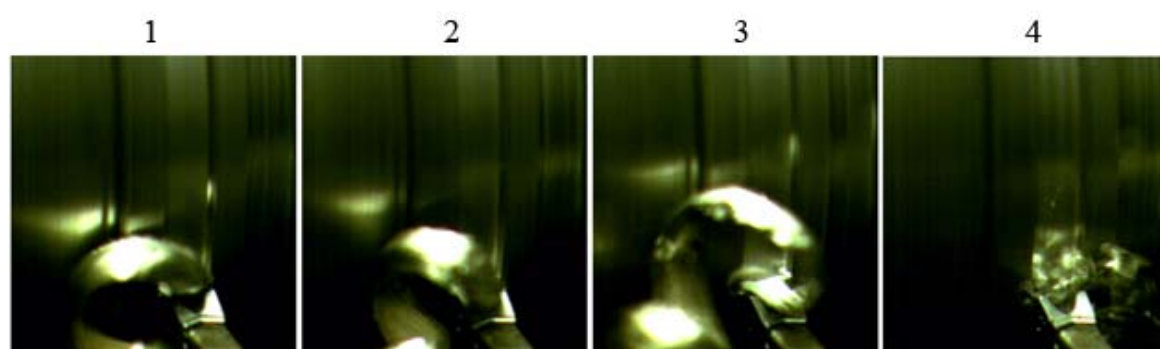
Vysokorychlostní kamerou byl zaznamenán experiment D02 jehož průběh je zachycen na obrázcích 4.45, 4.46 a 4.47. Tyto sekvence byly sestaveny z vybraných políček videozáznamu, který byl pořízen v rozlišení 640x480 s frekvencí snímkování 125 fps. Funkce shutter byla nastavena na hodnotu 2x, což odpovídá rychlosti závěrky 4 ms. Sekvence uvedená na obrázku 4.45 zachycuje moment vzniku třísky, kdy nejprve se začne vyvíjet směrem doprava a po krátkém časovém intervalu změni směr na opačnou stranu. Tento děj plynule naváže na sekvenci uvedenou v obrázku 4.46, která demonstruje odchod třísky během řezného procesu. Sled snímků uvedený na obrázku 4.47 představuje potom poslední fázi, a to odlomení třísky a následné začištění dna zápichu, kdy začínají vznikat drobné elementární třísky.



Obr. 4.45 Experiment D02 - sekvence zachycuje začátek tvorby třísky.



Obr. 4.46 Experiment D02 - sekvence zachycuje odchod třísky ze zóny řezu.



Obr. 4.47 Experiment D02 - sekvence zachycuje odlomení třísky a začištění dna zápichu.

ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na možnost využití vysokorychlostní kamery pro analýzu tvorby třísky při soustružnické operaci vnější zapichování. Jedním z cílů bylo ověřit řezné podmínky doporučené výrobcem vyměnitelné břitové destičky. Zaznamenat proces vzniku a utváření třísky za požití rozdílných typů utvařečů třísky a ověřit tak jejich funkčnost v určitém rozmezí hodnot posuvu na otáčku. Dalším cílem bylo navrhnout a vyrobit dostatečně nastavitelný držák vysokorychlostní kamery, s ohledem na možnosti objektivů, který půjde uchytit do suportu soustruhu SV 18 R. V neposlední řadě potom navrhnout experiment s vhodným umístěním kamery a osvětlením scény. Dále vybrat vhodný objektiv a podmínky záznamu. Shrnutí diplomové práce:

- Diplomová práce se zabývá představením nejběžnějších digitálních vysokorychlostních kamer současnosti a jejich oblastí využití. Zaměřeno je především na oblast využití ve výzkumu třískového obrábění.
- Jsou zde shrnuty důležité znalosti pro tvorbu vysokorychlostního záznamu jako je typ snímacího prvku, barevná hloubka, rozlišení a citlivost ISO. Důkladněji je rozebrána rychlost záznamu a závěrky, což patří mezi nejdůležitější parametry pro tvorbu vysokorychlostní nahrávky.
- Pozornost je věnována také objektivům a jejich příslušenství, vhodným pro daný typ kamery. Jsou shrnuty jejich vlastnosti a vytvořen přehled pro rychlý výběr pro danou aplikaci. Také jsou objasněny některé pojmy, důležité pro kvalitu vysokorychlostního záznamu.
- Je brán zřetel také na vhodnost osvětlení snímané scény.
- Práce se také věnuje teorii z oblasti tvorby třísky při soustružení, především potom u zapichování.
- V praktické části byly realizovány experimenty za použití čtyř vyměnitelných břitových destiček, byly vybrány dvojce s podobnou geometrií a tvarem utvařeče od rozdílných výrobců. Tyto dvojce destiček se lišily také materiálem povlaku. Předmětem experimentů bylo u každé VBD ověřit rozsah posuvů doporučených výrobcem za stejné řezné rychlosti bez použití řezné kapaliny. Jeden z experimentů byl vždy zaznamenán vysokorychlostní kamerou s cílem zachytit vznik a tvorbu třísky při užití dané VBD a tvaru utvařeče. Vzniklé třísky byly většinou dlouhé ve tvaru šroubovice s náznakem spirály na začátku nebo na konci, což je dle teoretické predikce nestandardní tvar. Jednou z příčin této skutečnosti bylo nepřesné upnutí nástroje a obrobku, což bylo spolu s radiální házivostí obrobku dokázáno vysokorychlostním záznamem. Další vliv na vzniklý tvar třísek měla také absence procesní kapaliny. Ze vzniklých záznamů lze také pozorovat mechanismus vzniku třísky, přes tvorbu a odchod ze zóny řezu rozdílnými způsoby, až po odlomení třísky a začištění dna zápichu. Zajímavý je především odchod ze zóny řezu, kdy dochází k různým kontaktům s obrobkem, což modeluje výsledný tvar třísky. Vzhledem k použití distančního kroužku, který zvýšil potřebu světla pro záznam, byla použita záznamová rychlost u experimentů 125 fps. Změna u jednotlivých záznamů je pouze v nastavení funkce shutter. U nastavení na hodnotu 1x vykazoval záznam známky přsvícení a neostrosti, u 2x se jevil záznam dostatečně ostrý a světelně vyvážený. Při nastavení shutteru na hodnotu 3x byl obraz ostrý ale málo světlý.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Digitální fotografie. In: *Střední lesnická škola a Střední odborná škola sociální* [online]. Šluknov: Střední lesnická škola a Střední odborná škola sociální, last modified 15-Nov-2012 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: http://www.lesnicka-skola.cz/gallery/clanky3501/2012-10-13_digitalni_fotografie.pdf
2. PATA, Vladimír. *Vysokorychlostní kamerové systémy*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 92 s. ISBN 80-7204-480-X.
3. Understanding Aperture. In: *Photographytips* [online]. Miller Media Solutions, ©2013 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://www.photographytips.net/understanding-aperture-3/>
4. PIHAN, Roman. *Mistrovství práce s DSLR: vše co jste chtěli vědět o digitální zrcadlovce a nikdo vám to neuměl vysvětlit*. Vyd. 2. Praha: Institut digitální fotografie, 2007. Objektivy, s. 32-72. ISBN 80-903210-8-9.
5. HABEL, Jiří et al. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
6. SEGER, Chris. *Colloquium on „Illumination for High Speed imaging“* [online]. Switzerland: AOS Technologies AG, Juny 2006 [cit. 2015-04-10]. 18 s. Dostupné z: http://www.aostechnologies.com/fileadmin/user_upload/PDFs/Process_Monitoring/Colloquium_Illumination.pdf
7. KOPŘIVA, Antonín. *Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery*. Brno: 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
8. Jak vybrat objektiv. *MEGAPIXEL* [online]. ©2001–2015 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.megapixel.cz/jak-vybrat-objektiv>
9. Rozdělení objektivů a jejich charakteristické vlastnosti. In: *Photo.mysteria.cz* [online]. 2002 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://photo.mysteria.cz/clanky/objekt6.html>
10. LIBICH, Jan. Co musí umět každý objektiv, aby fotky stály za to: podrobný průvodce. *Technet.cz* [online]. Praha: Mafra, 28-04-2007 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/co-musi-umet-kazdy-objektiv-aby-fotky-staly-za-to-podrobny-pruvodce-11m-/tec_foto.aspx?c=A071108_120848_tec_foto_jlb
11. DOLEJŠÍ, Tomáš. Fotíme makro s mezikroužky. In: *Fotorádce.cz* [online]. 20.05.2014 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.fotoradce.cz/fotime-makro-s-mezikrouzky-clanekid1521>
12. ATKINS, Bob. Focus Trstiny. In: *Photo.net* [online]. Waltham: NameMedia, 2003 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://photo.net/learn/focustest/>
13. KOLÁŘ, Jan. Není světlo jako světlo aneb Jak to vidí rostliny. In: *Ústav experimentální botaniky AV ČR* [online]. Praha: Ústav experimentální botaniky, 2007 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: http://www.ueb.cas.cz/cs/system/files/users/public/kolar_27/PDF_soubory/postery_rostliny_svetlo.pdf

14. *Optika jednoduše* [online]. Přerov: Radim Vaculík – septima A, ©2006 [cit. 2015-03-03]. Dostupný z: <http://optika.kuratkoo.net/vlastnosti.htm>
15. TAYLOR, Stehen B. Geomorphology G322: introduction to Aerial Photographs. In: *Western Oregon University* [online]. Oregon: Western Oregon University, Last Modified 04-02-12, s. 50-54. [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <https://www.wou.edu/las/phycsi/taylor/g322/airphoto.pdf>
16. ŠURKALA, Milan. Fotomobily: snímací čipy CMOS vs. CCD. *Digimanie* [online]. 5.10.2009 [cit. 2015-03-13]. ISSN 1214-2190. Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>
17. ASKEY, Phil. Fujifilm FinePix F700 Review. In: *Digital Photography Review* [online]. September 2003 [cit. 2015-04-01]. Dostupný z: <http://www.dpreview.com/reviews/fujifilmf700>
18. GŘEŠ, Tomáš. HI-TECH VISIONX COMPONENTS: kamery pro průmyslové aplikace objektivy, světla, komunikace, software školení, návrhy, studie. In: *Ústav mechatroniky a technické informatiky* [online]. Liberec: Ústav mechatroniky a technické informatiky, ©2014 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.mti.tul.cz/files/seminar13/gres.pdf>
19. Základní postupy: zpracování obrazu - 2. JPEG, RAW, TIFF a další formáty. *Fotografování* [online]. ©2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.fotografovani.cz/fotopraxe/zakladni-postupy1/zpracovani-obrazu-2-jpeg-raw-tiff-a-dalsi-formaty-151836cz>
20. High speed imaging orientation. *Photron: high speed cameras* [online]. USA: Photron, ©2015 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.photron.com/index.php?cmd=camera>
21. *Počítačová grafika III-barevná hloubka* [online prezentace]. Kostelec nad Orlicí: OA TGM, c2015 [cit. 2011-09-09]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCsQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.oakostelec.cz%2Fmoodle%2Fpluginfile.php%2F3027%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2FSynek%2F2Dgrafika%2F1_prednasky_2D_Gpc_v_PDF%2Fprednasky_ve_formatu_PPT%2F03_Gpc2D_barevna_hloubka.ppt%3Fforcedownload%3D1&ei=OKMdVfjJob_UsCyhKAI&usq=AFQjCNHqQXQUBoqHpWdN0Ywetojxzathg&sig2=IZ2I3cHBtuWihDCWoQ4HGg
22. DANNHOFEROVÁ, Jana. *Velká kniha barev: kompletní průvodce pro grafiky, fotografie a designéry*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2012. Barvy v počítačové grafice. Kapitola 4, s. 229-238. ISBN 978-80-251-3785-7. Dostupné z: <http://knihy.cpress.cz/?p=actions&action=download/file&value=files&id=112003>
23. Snímací čip. In: *Az foto* [online]. Brno: AZ FOTO s.r.o., [20--?] [cit. 2015-30-04]. Dostupné z: http://www.azfoto.cz/informace/digital_pod_lupou/snimaci_cip
24. TroubleShooter. In: *Transam Trading Co.* [online] ©2008 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.transam.gr/files/PDFs/TroubleShooter.pdf>

25. HALIŠKOVÁ, Ivana. *Přenos geografických informací pomocí telekomunikačních prostředků*. Brno, 2007. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/77730/prif_m/
26. DOBROVODSKÝ, Jan. Fotoškola 7 – expoziční parametry: citlivost ISO. In: *FotoAparát.cz: rádce fotografa* [online]. 25.5.2012 [cit. 2015-04-06]. ISSN 1214-049X. Dostupné z: <http://www.fotoaparat.cz/article/11144/1>
27. Fastec Imaging: high-speed imaging in the palm of your hand: TS3-100S. In: *TechImaging* [online]. San Diego: Fastec Imaging, c20--? [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://downloads.techimaging.com/datasheets/ts3_100-s.pdf
28. FASTEC IMAGING: TroubleShooter High-Speed Camera: Operator's Manual. In: *Loligo Systems* [online]. Denmark: Loligo Systems ApS, 2007-06 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: http://www.loligosystems.com/upload/files/TroubleShooter_Operators_Manual.pdf
29. VERSLUIS, Michel. High-speed imaging in fluids. *Experiments in Fluids* [online]. 2013, vol. 54, issue 2 [cit. 2015-04-10], 55 s. ISSN 0723-4864. DOI: 10.1007/s00348-013-1458-x. Dostupné z: http://doc.utwente.nl/82672/1/high-speed_imaging_review_rev1_Michel_Versluis_2012.pdf
30. Eadweard Muybridge. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Floria): Wikipedia Foundation, last modified on 21 April 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge
31. MEJZLÍK, Tomáš. Vysokorychlostní kamera v akci. *TV FREAK* [online]. 11.11.2010 [cit. 2015-04-22]. ISSN 1802-1328. Dostupné z: <http://www.tvfreak.cz/vysokorychlostni-kamera-v-akci/3762>
32. Kodak Ektapro motion analyser systems & components : information, resources & history. In: *Mike's Electric Stuff* [online]. Mike Harrison, ©1998-2014 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: http://www.electricstuff.co.uk/ektapro_info.html
33. PUCHOLT, Zdeněk. Rychloběžná kamera. In: *Pokusy z fyziky* [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, Katedra experimentální fyziky, 4. 1. 2014 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://pokusy.upol.cz/iga/iga-2013/fyzika-netradicne/rychlobezna-kamera-11/>
34. ŠEVČÍK, Jiří. Princip činnosti, typy a komunikační rozhraní IP kamer. *TZB-info* [online]. 21.10.2013 [cit. 2015-05-02]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: http://elektro.tzb_info.cz/10480-princip-cinnosti-typy-a-komunikacni-rozhrani-ip-kamer
35. FAST-VISION MEDIA. *Fastvision: the future of smart cameras* [online]. Nashua: FastVision, LLC, ©2010 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.fast-vision.com/>
36. MIKROTRON MIKROCOMPUTER. *Mikrotron* [online]. Unterschleissheim: Mikrotron GmbH, ©2012-2015 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.mikrotron.de/>
37. OPTRONIS GMBH. *Optronis: make time visible* [online]. Kehl: Optronis GmbH, ©2013 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.optronis.com/>

38. QUALISYS AB. *Qualisys: Motion Capture Systems* [online]. Gothenburg: Qualisys, ©2013 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.qualisys.com/>
39. VISION RESEARCH – AMETEK. *Vision Research- Ametek: materials analysis division* [online]. USA: Vision Research Inc., ©1999-2015 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.visionresearch.com/>
40. FASTEC IMAGING CORPORATION. *Fastec imaging* [online]. San Diego: Fastec Imaging Corporation, ©2012 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.fastecimaging.com/>
41. IX CAMERAS. *IX Cameras* [online]. Locks Hill: IX Cameras Inc., ©2015 cit. [2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.ix-cameras.com/>
42. KASTNER, Jan. Videokymografie a digitální kymografie, kymografické nálezy u pacientů po thyreoidektomii. *Endoskopie* [online]. 2009, roč. 18, č. 2 [cit. 2015-04-28], s. 64-66. ISSN 1804-6096. Dostupné z: <http://www.casopisendoskopie.cz/pdfs/end/2009/02/06.pdf>
43. VOHLÍDKOVÁ, Monika, PEŠTA, Jiří a SLÍPKA, Jaroslav. Využití vysokorychlostní kamery při sledování poruchy hlasu. In: *71. kongres České společnosti otorinolaryngologie a chirurgie hlavy a krku, Poster section, Olomouc, 2008* [online]. Plzeň: KIV, 2008, aktualizováno 2015-01-19 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.kiv.zcu.cz/~novyp/foniatry/orl-olomouc08.pdf>
44. Jak funguje jestřábí oko? *Jestřábí oko-zaostřeno na tenis* [online]. ©2012 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.jestrabioko.cz/Jak_funguje_Jestrabi_oko/
45. POURNAZERI, Sam. Hummingbirds generate bilateral vortex loops during hovering: evidence from flow visualization. *Experiments in Fluids* [online]. Heidelberg: Springer-Verlag, December 2012, vol. 54:1439 [cit. 2015-04-13], 11 s. ISSN 1432-1114. DOI 10.1007/s00348-012-1439-5. Dostupné z: http://www.academia.edu/2451321/Hummingbirds_generate_bilateral_vortex_loops_during_hovering_evidence_from_flow_visualization
46. SVOBODA, Štěpán. Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodu strojů a výrobních linek. *Automa – časopis pro automatizační techniku* [online]. Děčín: AUTOMA, ©2015 [cit. 2015-04-08]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=32518
47. Fiat Panda. In: *Crashtest* [online]. Bratislava: SOYAMEDIA, ©2005 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.crashtest.cz/?idca=42>
48. HOWARD, Hall. External Ballistics. Part I, Physics, Projectiles and Transitional Ballistics. In: *Argus Academy* [online]. May 26, 2014 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://aegisacademy.com/community/external-ballistics-part-i/>
49. SŁODKI, Bogdan, ZĘBALA, Wojciech a MAŃKOVA, Ildiko. Selected Examples of High Speed Camera Application in Cutting Process Research. *Manuf. and Ind. Eng.* [online]. 2012, vol. 11, no. 1 [cit. 2015-05-04], s. 53-56. ISSN 1338-6549. Dostupné z: <http://www.fvt.tuke.sk/journal/pdf12/1-pp-53-56.pdf>

50. ČEP, Robert a PETRŮ, Jana. *Experimentální metody v obrábění: [učební text]* [elektronický zdroj]. Vyd. 1. Ostrava: VŠB – TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. Požadavky na systém: Adobe Acrobat Reader, internetový prohlížeč. ISBN 978-80-248-2533-5.
51. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
52. MÁDL, Jan et al. *Technologie obrábění*. 1. díl. Praha: ČVUT, 2000. 79 s. ISBN 80-01-02091-6.
53. HUMÁR, Anton. *Technologie I, Technologické obrábění*. 1. část. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003. 138 s. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabení/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
54. SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Překlad Miroslav Kudela. 1. české vyd. Praha: Scientia, ©1997. 1 sv. (různé stránkování). ISBN 91-972299-4-6.
55. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
56. SŁODKI, Bogdan. Chipformers reliability in inconel 625 longitudinal turning. *Management and Production Engineering Review* [online]. 2013, vol. 4, num. 2 [cit. 2015-04-10], s. 93-101. DOI: 10.2478. Dostupné z: <http://www.degruyter.com>
57. SŁODKI, Bogdan. Selected sequences of chip breaking process in turning nickel based superalloys. *Advances in manufacturing Science and Technology* [online]. 2011, vol. 35, no. 2 [cit. 2015-04-10], s. 30-36. Dostupné z: <http://www.yadda.icm.edu.pl>
58. PRAMET. *Soustružení* [online]. Šumperk: Pramet Tools, 2014 [cit. 2015-04-10]. 397 s. Dostupné z: <http://www.bemet.cz/img/cms/PRAMET/soustruzeni-2014-cz.pdf>
59. SECO. *Soustružení* [online]. Brno: Seco Tools, c2015 [cit. 2015-04-10]. 528 s. Dostupné z: http://legacy.secotools.com/upload/europe/czech_republic/mn2006/Turning_CZ.pdf
60. Manuál soustruhů SV18 RD A SV18 RB [online]. In *Tumlikovo: Metal Cutting Technologies*, c2010 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.tumlikovo.cz/wpcontent/uploads/2010/manualy/soustruhSV18RD_RB.rar
61. FÜRbacher, Ivan et al. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity. Základní dílo - aktuální stav: srpen 2002 - včetně 16. doplňku*. Praha: Dashöfer, 2002. 1 sv. (v různém stránkování). ISBN 80-86229-02-5.
62. Přehled rezných materiálů IS [online]. In *Iscar*, ©2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.iscar.com/Ecat/WZ/iscar_grade_chart.pdf
63. ISCAR IBAQUS. *Iscar Electronic catalog* [online]. ISCAR, c2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CCD	[-]	Charge Coupled Device
CMOS	[-]	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRI	[-]	Color Rendering Index
fps	[-]	Frames per second
PC	[-]	Personal Computer
RGB	[-]	Red Green Blue
ÚST	[-]	Ústav strojírenské technologie
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A'_α	[-]	vedlejší hřbet
A_D	[mm ²]	jmenovitá plocha řezu
A_{Dc}	[mm ²]	plocha průřezu třísky
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
a_r	[mm]	hloubka zápichu
A_α	[-]	hlavní plocha
A_y	[-]	čelo - plocha po které odchází tříska
b_D	[mm]	jmenovitá šířka řezu
b_{Dc}	[mm]	šířka třísky
c	[m · s ⁻¹]	rychlost
d	[mm]	průměr otvoru clony
D	[mm]	průměr obrobku
dS	[m ²]	element ozařované plochy
$d\Omega$	[sr]	element prostorového úhlu, do kterého zdroj svítí
E	[lx]	intenzita osvětlení
f	[mm]	ohnisková vzdálenost
f	[mm]	posuv na otáčku
F	[-]	clonové číslo

F	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
f_r	[s ⁻¹]	frekvence
G_t	[g]	hmotnost třísky
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka řezu
h_{Dc}	[mm]	tloušťka třísky
I	[cd]	svítivost
k_c	[MPa]	měrný řezný odpor
K_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
L	[cd · m ⁻²]	jas
l_c	[mm]	délka třísky
n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
P_c	[kW]	řezný výkon
R_a	[-]	Index podání barev
R_{ms}	[MPa]	mez kluzu ve smyku
r_ε	[-]	rádus mezi hlavním a vedlejším ostřím
S	[-]	hlavní ostří
S	[m ²]	plocha dopadu paprsků
S'	[-]	vedlejší ostří
S_{hv}	[mm]	rozměr snímacího prvku
T_c	[K]	teplota chromatičnosti
v_c	[m · min ⁻¹]	řezná rychlost
v_c	[m · min ⁻¹]	řezná rychlost
v_e	[m · min ⁻¹]	celková rychlost
v_f	[m · min ⁻¹]	posuvová rychlost
V_m	[dm ³]	objem odebraného materiálu korespondující s V _t
v_t	[m · min ⁻¹]	rychlost třísky
V_t	[dm ³]	objem volně ložených třísek

W	[-]	objemový součinitel třísek
Z	[°]	zorný úhel objektivu
α_f	[°]	úhel nastavení vedlejšího hřbetu
α_k	[°]	úhel odklonu paprsků od kolmice normály elementu plochy
α_n	[°]	úhel nastavení hlavní plochy
α_p	[°]	úhel nastavení čela
γ_0	[°]	nástrojový normálový úhel čela
δ_0	[°]	ortogonální úhel řezu
Δl	[mm]	relativní délka nástroje vzhledem k obrobku
Δl_c	[mm]	délka třísky
λ	[m]	vlnová délka
Λ	[-]	součinitel přechování třísky
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ_t	[g · cm ⁻³]	hustota materiálu třísky
Φ	[lm]	světelný tok
ϕ	[°]	úhel střížné roviny
ϕ_t	[°]	třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje

SEZNAM PŘÍLOH


- Příloha 1 Parametry vysokorychlostní digitální kamery TroubleShooter 1000
Příloha 2 Výkresová dokumentace k držáku vysokorychlostní kamery.
Příloha 3 Možnosti upnutí a nastavení držáku vysokorychlostní kamery.

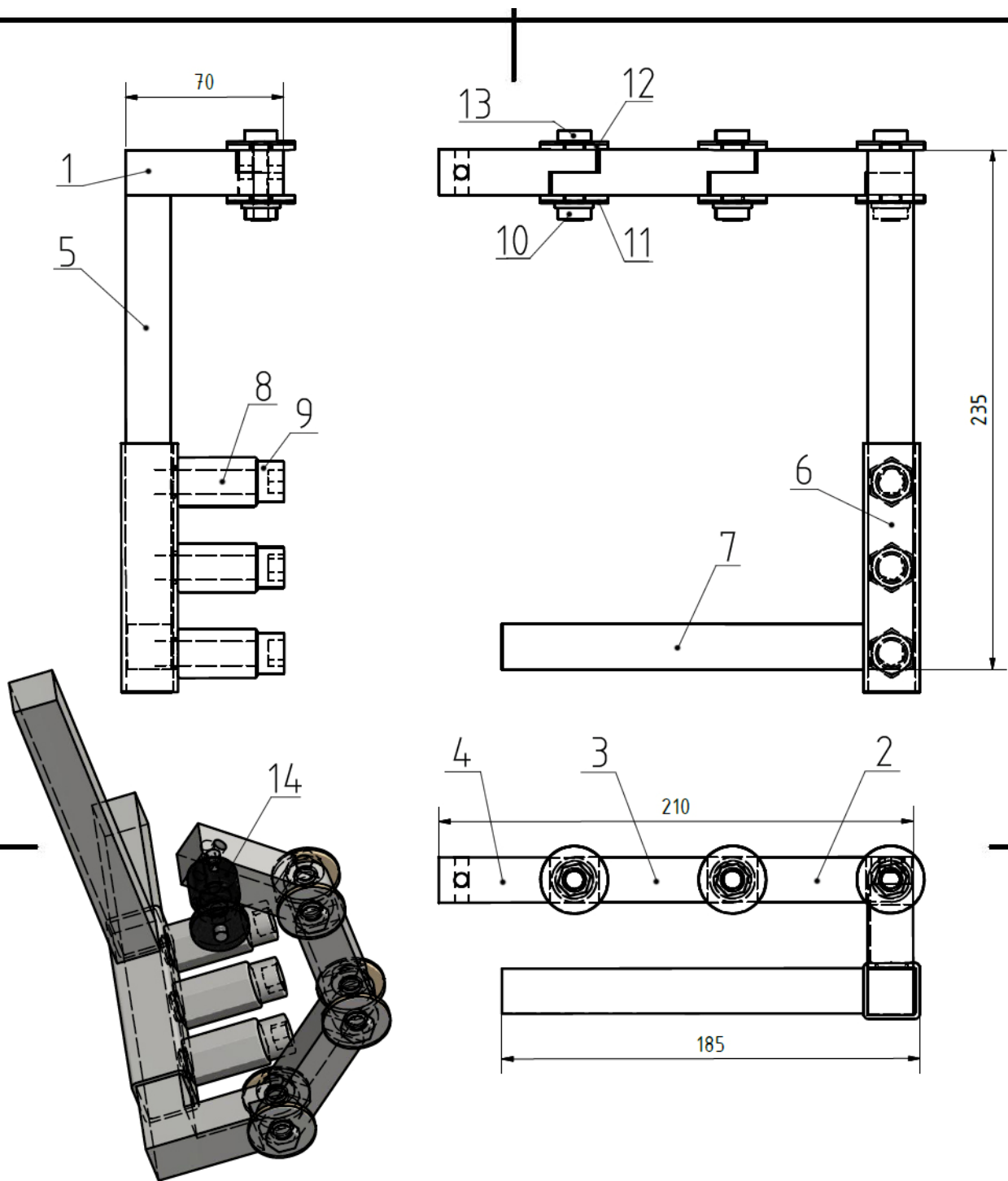
PŘÍLOHA 1

MODEL	TroubleShooter 1000	
DETEKTOR	Rozlišení 640x480 CMOS maticový detektor, barevný (24-bitové rozlišení)	
RYCHLOST ZÁVERKY	1x, 2x, 3x, 4x, 5x, 10x a 20x záznamové rychlosti	
REŽIM ZÁZNAMU	<p>Ruční Záznam začne po stisknutí spouště. Pokračuje v záznamu do opětovného stisknutí spouště.</p> <p>Trigger Záznam začne po stisknutí spouště. Pokračuje v záznamu snímku do doby, než je aktivován externí trigger. Pozice nastavitelného triggeru stanoví, kolik snímku má být uloženo před a po triggeru.</p>	
RYCHLOST PREHRÁVÁNÍ	Po jednotlivých snímcích, nebo rychlostí 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 25, 30, 50, 60, 125, 250, 500 a 1000 snímku za sekundu, dopředu a nazpět.	
VIDEO MONITOR	Vestavěný, 5“ LCD barevný monitor.	
OVLÁDACÍ FUNKCE	Nastavení, Výběr, Záznam, Stop, Přehrávání, Dopředu, Zpět, Download, Zapnutí/Vypnutí	
VSTUPY/VÝSTUPY	USB-2 port, Compact flash, IR, Trigger, Pulse In, Pulse Out, DC napájení	
EXTERNÍ TRIGGER	Sepnutí kontaktu nebo standardní TTL signál, do 30 V DC	
SYNCHRONIZACE	Více TroubleShooter kamer je možno synchronizovat pomocí funkce phase-lock	
SOFTWARE	Zahrnuje software CamLink pro záznam, přehrávání a stažení do PC. Snímky jsou přetaženy a uloženy ve formátu avi. Rovněž obsahuje MotionMeasure software pro rozbor a rychlý a jednoduchý výpočet hodnot jako jsou zrychlení a rychlost.	
OBJEKTIVY	Standardní C-upevnění	
NAPÁJENÍ	4 D monočlánky nebo 110/220 V AC adaptér	
ROZMĚRY	180 x 140 x 90, 1 kg	
Záznamová rychlost [fps]	Standardní paměť - 2184 snímků	Rozšířená paměť - 4368 snímků
50 (PAL)	43,7 s	87,4 s
60 (NTSC)	36,4 s	72,8 s
125	17,4 s	34,8 s
250	8,7 s	17,4 s
500	4,4 s	8,8 s
1000	2,2 s	4,4 s

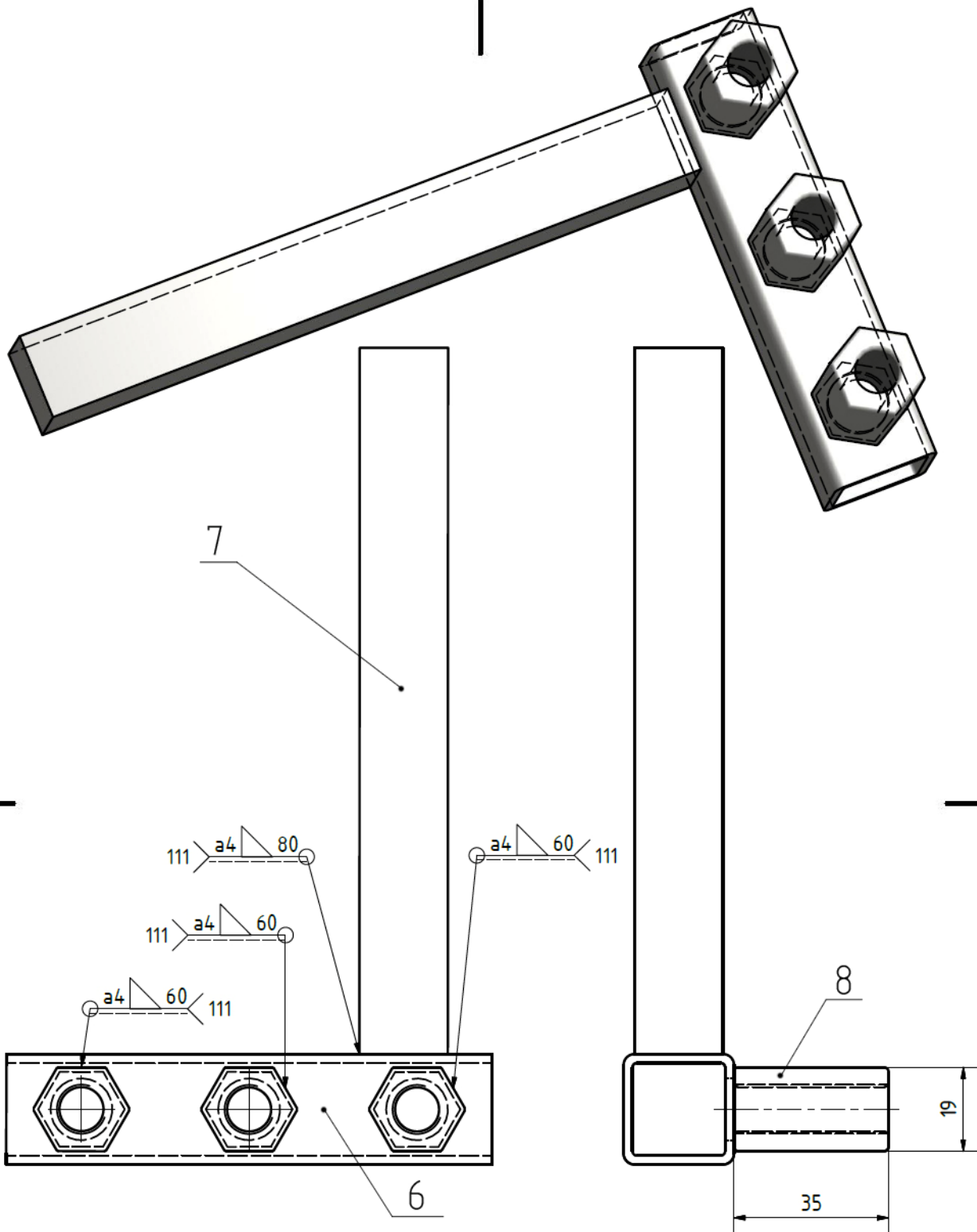
PŘÍLOHA 2

Číslo polož.	Název - označení Výkres - norma	Polotovary Materiál	Hmot.	J	Množ.
1	ZAČÁTEČNÍ ČLEN	<input type="checkbox"/> 20-1000 ČSN 42 5549	0,18	kg	1
	SOUCAST_01	S235JR			
2	VODÍČÍ ČLEN A	<input type="checkbox"/> 20-1000 ČSN 42 5549	0,202	kg	1
	SOUCAST_02	S235JR			
3	VODÍČÍ ČLEN B	<input type="checkbox"/> 20-1000 ČSN 42 5549	0,202	kg	1
	SOUCAST_03	S235JR			
4	KONCOVÝ ČLEN	<input type="checkbox"/> 20-1000 ČSN 42 5549	0,172	kg	1
	SOUCAST_04	S235JR			
5	TYČ POSUVNÁ	<input type="checkbox"/> 20-1000 ČSN 42 5549	0,659	kg	1
	SOUCAST_05	S235JR			
6	PRVEK ZAJIŠTĚNÍ	TR 4HR 25x2-400 ČSN 42 5720	0,148	kg	1
	SOUCAST_06	S235JRH			
7	TYČ UPNUTÁ	<input type="checkbox"/> 20-1000 ČSN 42 5549	0,502	kg	1
	SOUCAST_07	S235JR			
8	MATICE PR M12x36 Zn		0,064	kg	3
	DIN 6334				
9	ŠROUB M12x45 Zn (imbus)		0,059	kg	3
	DIN 912/A2				
10	MATICE M8 s přírubou rohatka		0,007	kg	3
	DIN 6923/A2				
11	PODLOŽKA 8,4x30x1,5		0,006	kg	6
	AN 9054/A4				
12	PODLOŽKA 9x30x1 (pryž)		0,002	kg	6
13	ŠROUB M8x35		0,02	kg	3
	DIN 933				
14	STATIVOVÁ HLAVA				
-	ELEKTRODA E46 2B				
	ČSN EN 499 05 5005				

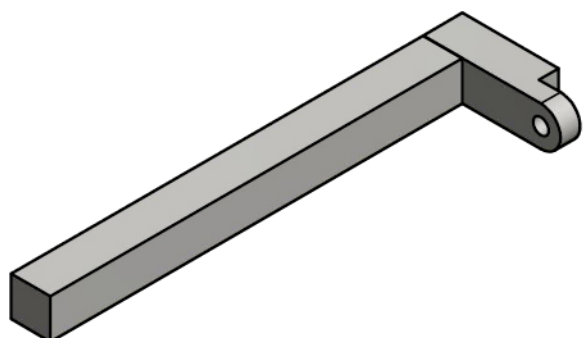
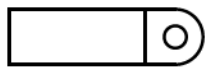
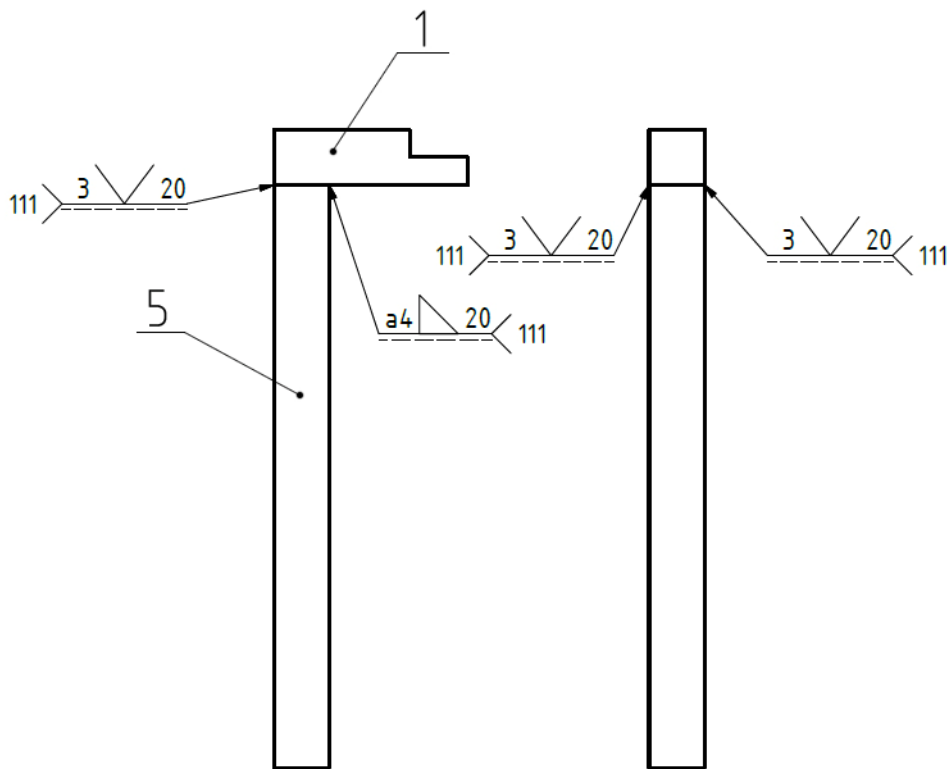
	Druh dokumentu	KUSOVNÍK	Název DRŽÁK KAMERY
	Kreslil	Vojtěch Tichý	
	Schválil		Číslo dokumentu KUSOVNIK__01
	Datum vydání	12.03.2015	
			List 1/11



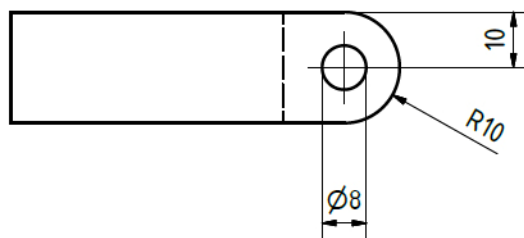
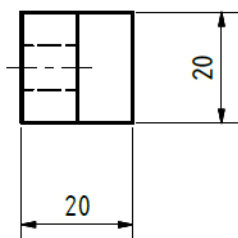
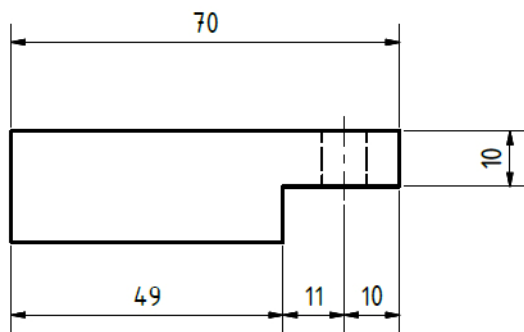
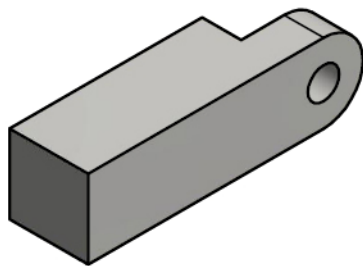
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost	ISO 2768-mK
				1:2	Tolerování	ISO 8015
					Promítání	
Materiál	Polotovary	Hmotnost	2,458 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016		
	Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVENÍ		Název DRŽÁK KAMERY		
	Kreslil	Vojtěch Tichý				
	Schválil			Číslo dokumentu SESTAVA_01		
	Datum vydání	12.03.2015				
						List 2 / 11



Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko		Přesnost ISO 2768-mK	
				1:1		Tolerování ISO 8015	
						Promítání	
Materiál		Polotovary		Hmotnost 0,842 kg		CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
	Druh dokumentu VÝKRES SVARKU		Název PRVEK UPNUTÝ				
	Kreslil Vojtěch Tichý						
	Schválil		Číslo dokumentu SVAREK__01				
	Datum vydání 12.03.2015						
List 3/11							



Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost ISO 2768-mK
				1:2	Tolerování ISO 8015
					Promítání
Materiál	Polotovár	Hmotnost	0,839 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
	Druh dokumentu	VÝKRES SVARKU		Název PRVEK VÝSUVNÝ	
	Kreslil	Vojtěch Tichý			
	Schválil			Číslo dokumentu SVAREK__02	
	Datum vydání	12.03.2015			
List 4/11					

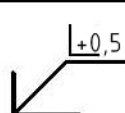
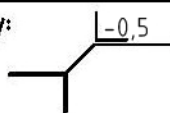


Struktura povrchu:

$Ra\ 6,3$



Hrany:



Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mK

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál S235JR

Polotovar 20-10000 ČSN 42 5549

Hmotnost 0,18 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI

Kreslil Vojtěch Tichý

Schválil

Datum vydání 12.03.2015

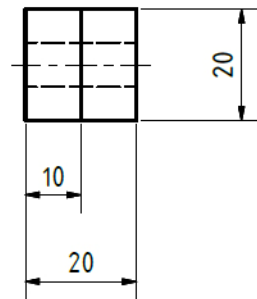
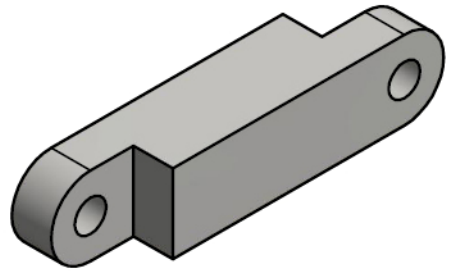
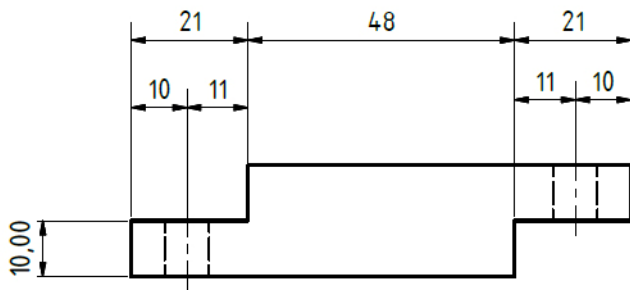
Název

ZAČÁTEČNÍ ČLEN

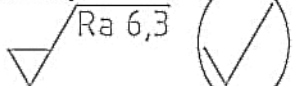
Číslo dokumentu

SOUCAST_01

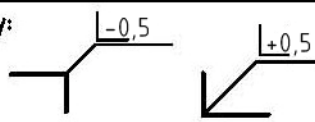
List 5/11



Struktura povrchu:



Hrany:



Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mK

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál S235JR

Polotovar □20-10000 ČSN 42 5549

Hmotnost 0,202 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI

Kreslil Vojtěch Tichý

Schválil

Datum vydání 12.03.2015

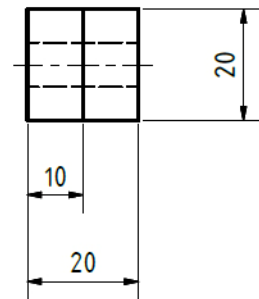
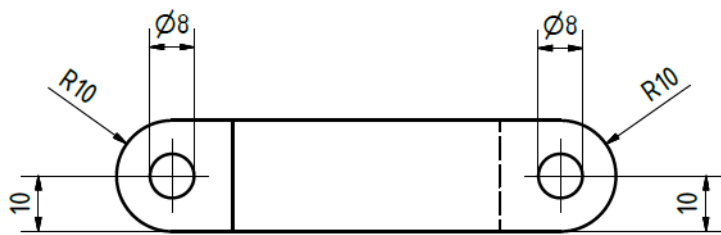
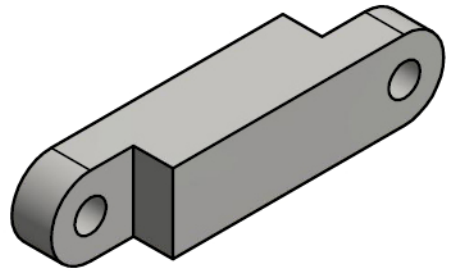
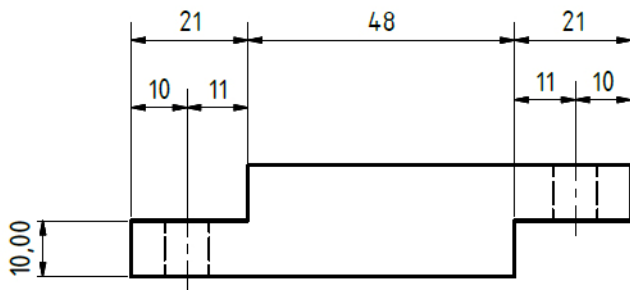
Název

VODÍČÍ ČLEN A

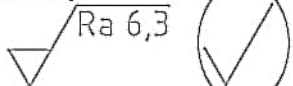
Číslo dokumentu

SOUCAST_02

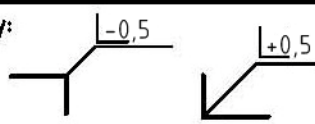
List 6/11



Struktura povrchu:



Hrany:



Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mK

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál S235JR

Polotovár □20-10000 ČSN 42 5549

Hmotnost 0,202 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI

Kreslil Vojtěch Tichý

Schválil

Datum vydání 12.03.2015

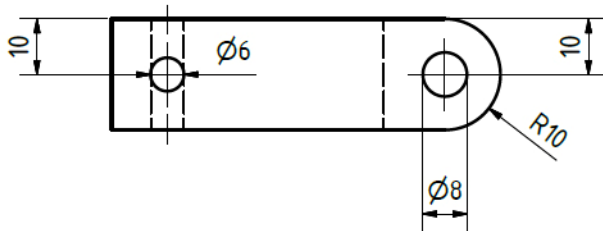
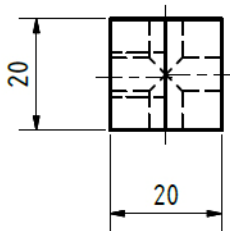
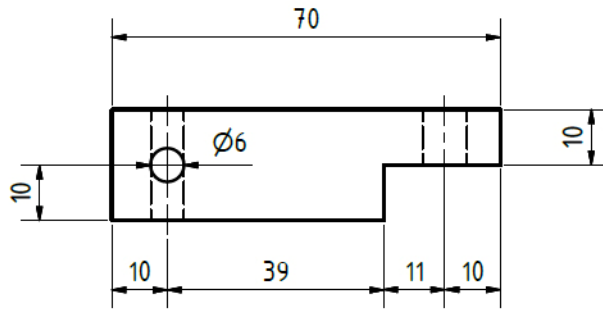
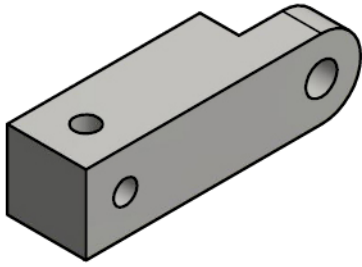
Název

VODÍČÍ ČLEN B

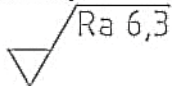
Číslo dokumentu

SOUCAST_03

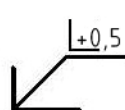
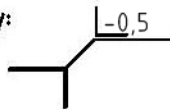
List 7/11



Struktura povrchu:



Hrany:



Měřítko

1:1

Přesnost ISO 2768-mK

Tolerování ISO 8015

Promítání

Materiál S235JR

Polotovar □ 20-10000 ČSN 42 5549

Hmotnost 0,172 kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016



Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI

Kreslil Vojtěch Tichý

Schválil

Datum vydání 12.03.2015

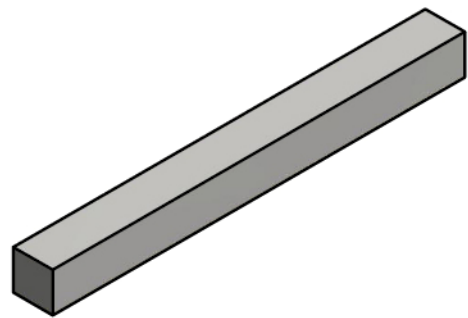
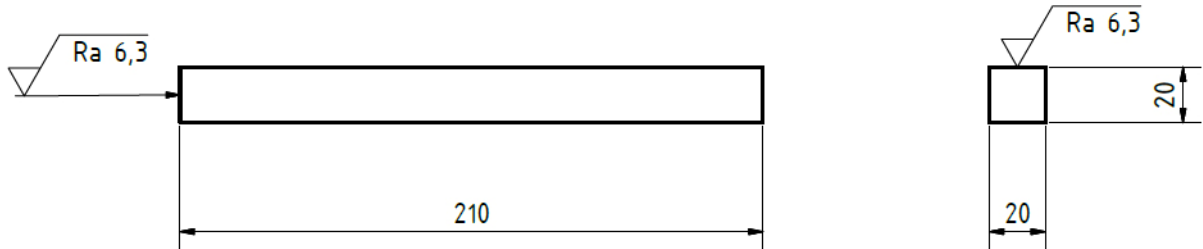
Název


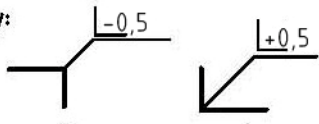


KONCOVÝ ČLEN

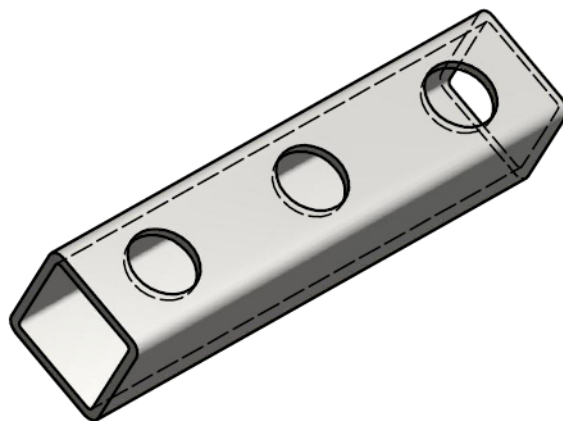
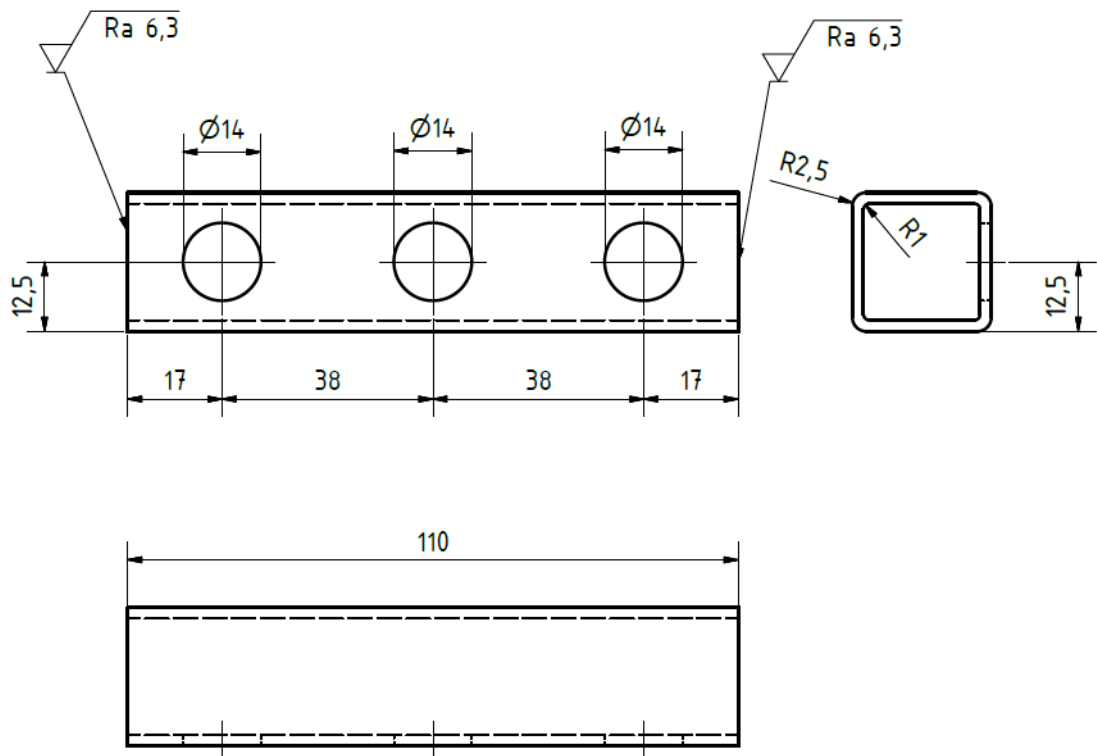
Číslo dokumentu

SOUCAST__04

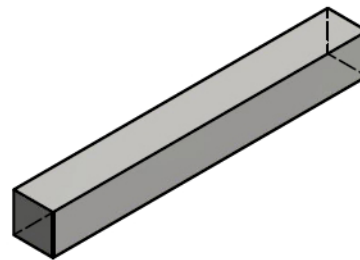
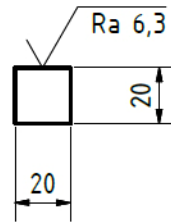
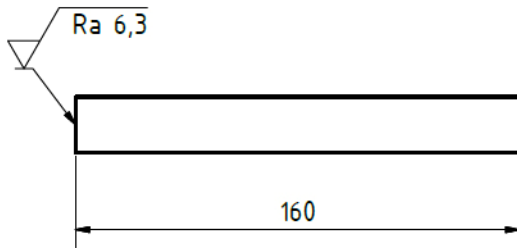
List 8/11



Struktura povrchu: 	Hrany: 	Měřítko 1:2	Přesnost ISO 2768-mK
			Tolerování ISO 8015
			Promítání 
Materiál S235JR	Polotovár <input type="checkbox"/> 20-10000 ČSN 42 5549	Hmotnost 0,659 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
	Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI	Název TYČ VÝSUVNÁ	
	Kreslil Vojtěch Tichý		
	Schválil	Číslo dokumentu SOUCAST__05	
Datum vydání 12.03.2015			List 9/11



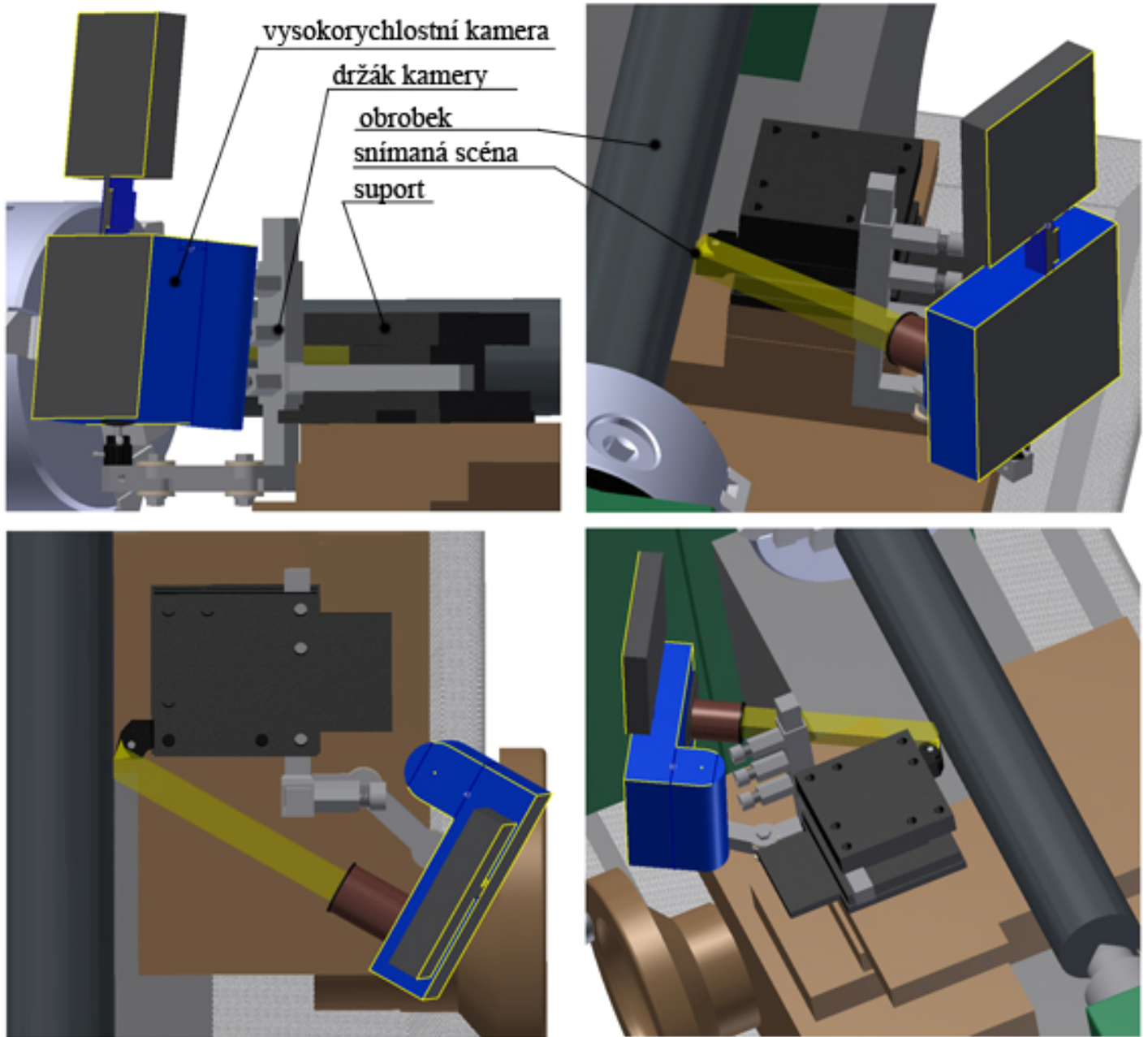
Struktura povrchu:	Hrany:	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768-mK
			Tolerování ISO 8015
			Promítání
Materiál S235JRH	Polotovar TR4HR25x2-400ČSN425720	Hmotnost 0,148 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
	Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI	Název PRVEK ZAJIŠTĚNÍ	
	Kreslil Vojtěch Tichý		
	Schválil	Číslo dokumentu SOUCAST_06	
Datum vydání 12.03.2015			List 10 / 11



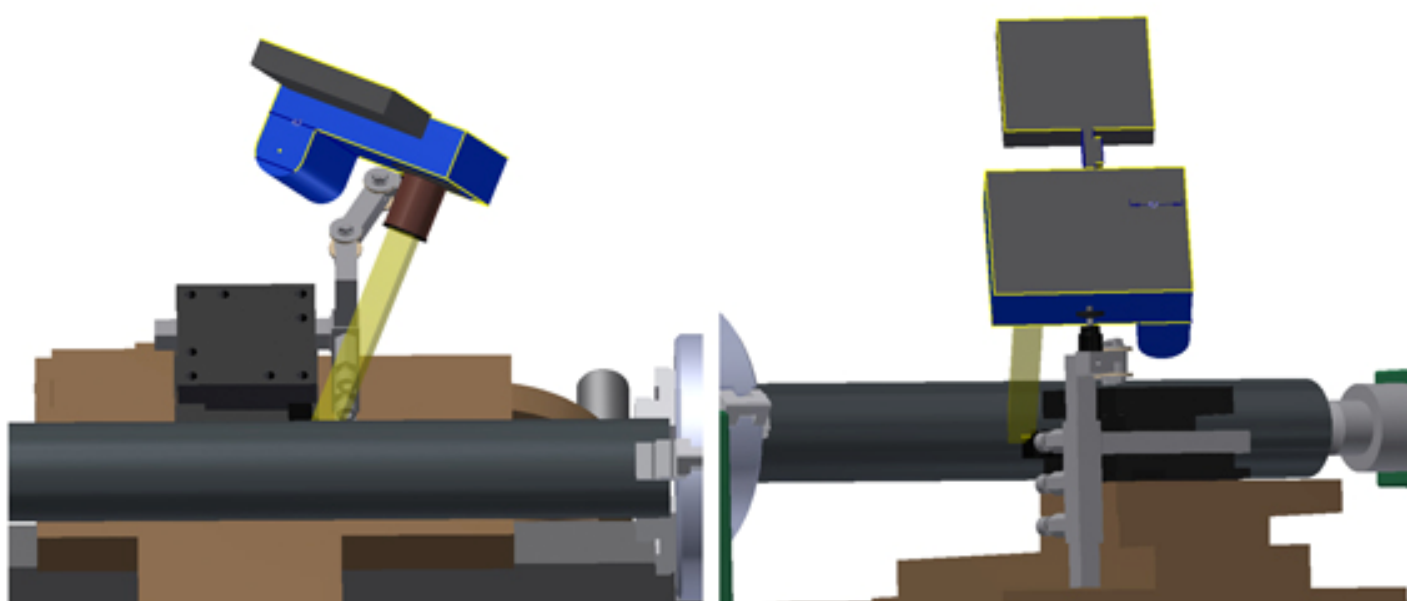
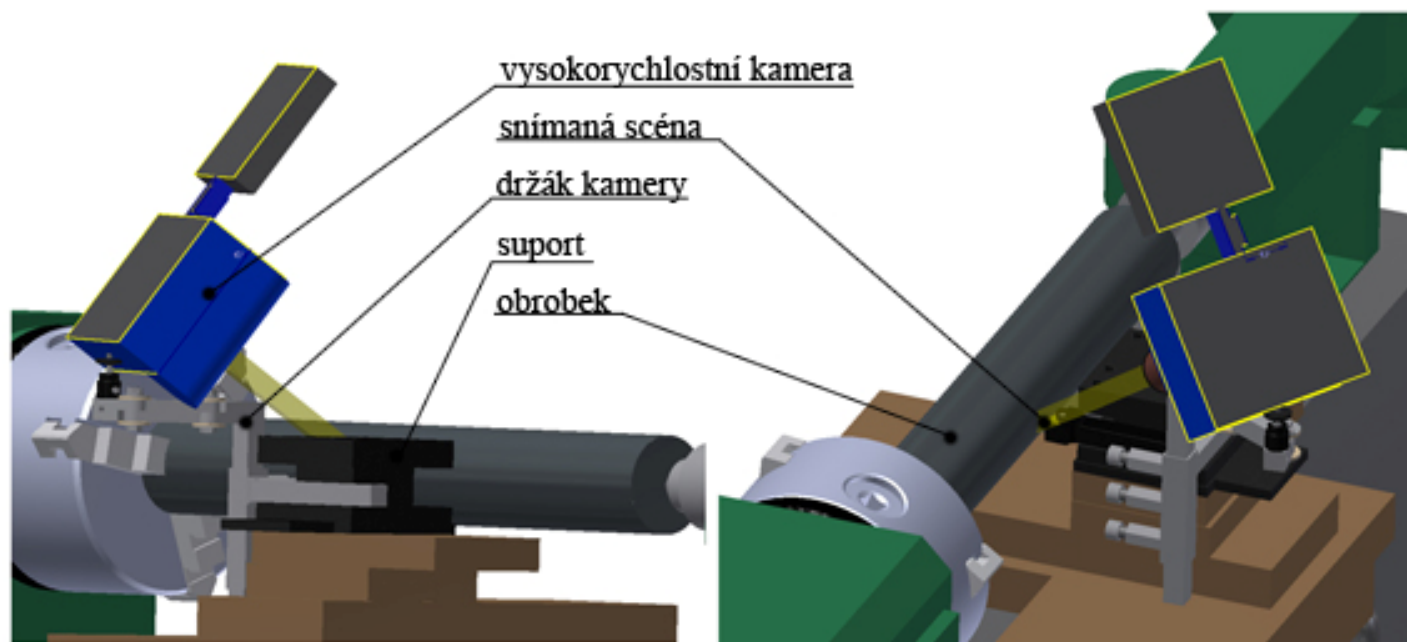
Struktura povrchu: 	Hrany: 	Měřítko 1:2	Přesnost ISO 2768-mK
			Tolerování ISO 8015
			Promítání
Materiál S235JR	Polotovár □20-10000 ČSN 42 5549	Hmotnost 0,502 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
	Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI	Název TYČ UPNUTÁ	
	Kreslil Vojtěch Tichý		
	Schválil	Číslo dokumentu SOUCAST__07	
Datum vydání 12.03.2015	List 11/11		

PŘÍLOHA 3

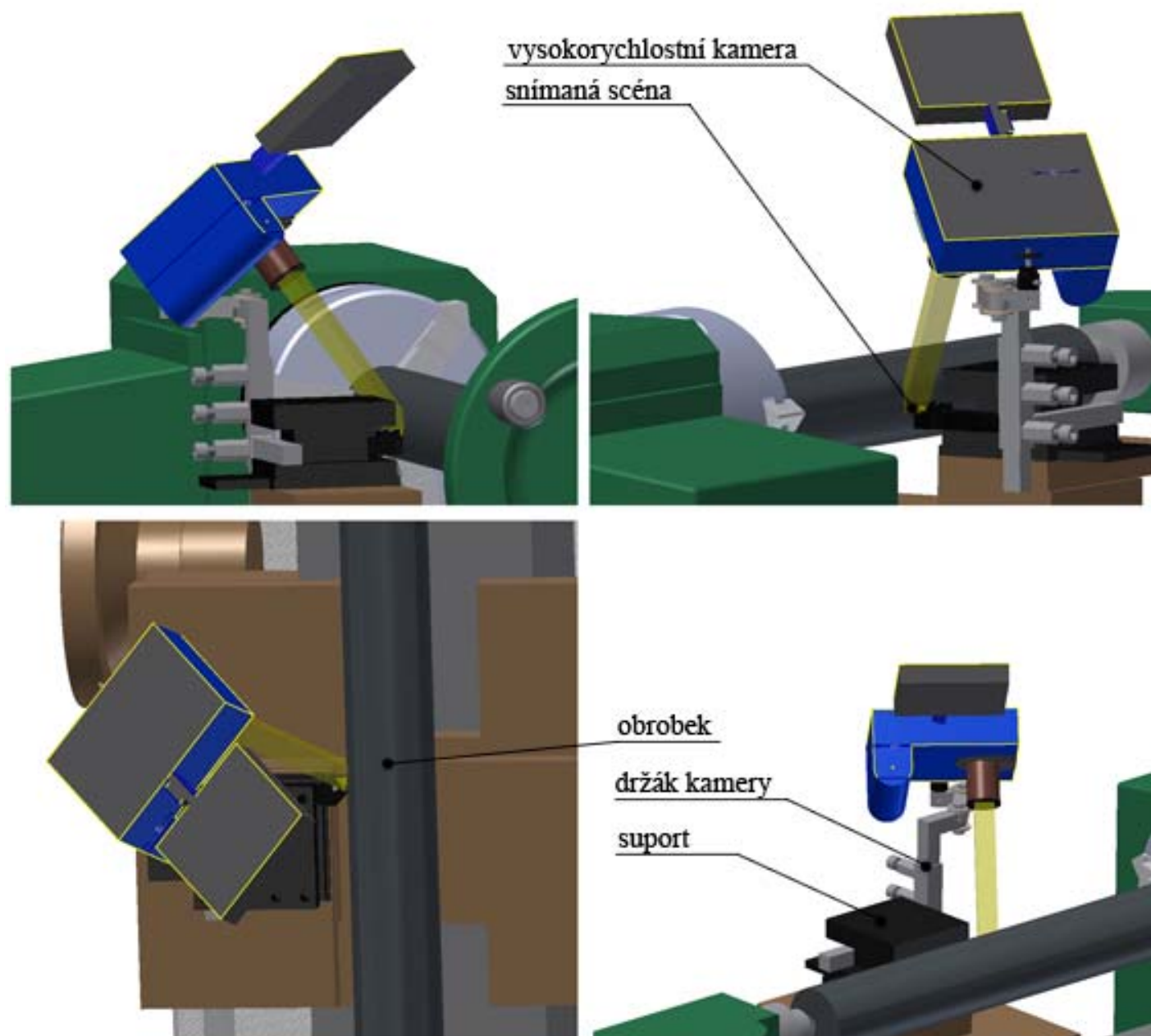
Způsob nastavení A



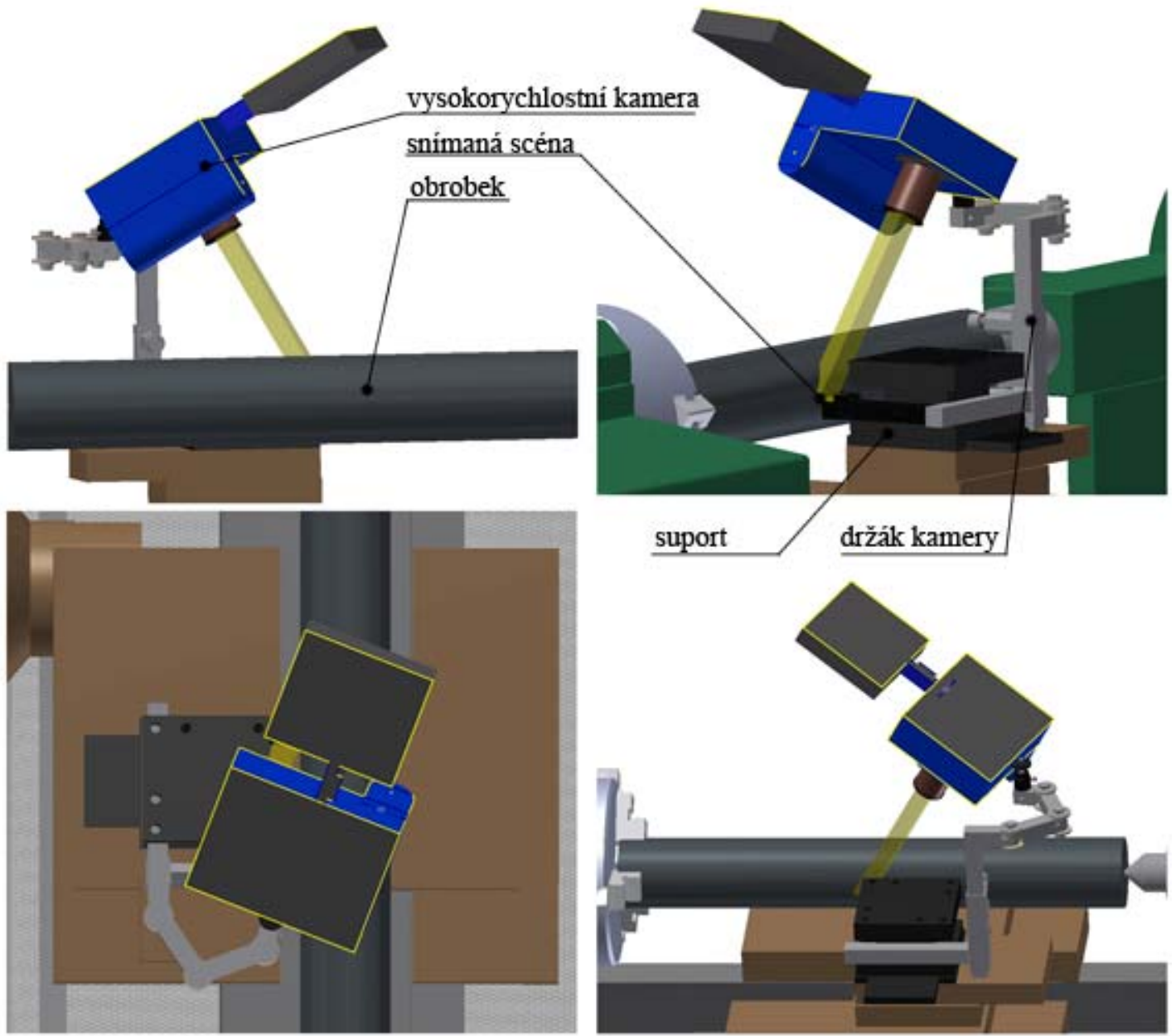
Způsob nastavení B



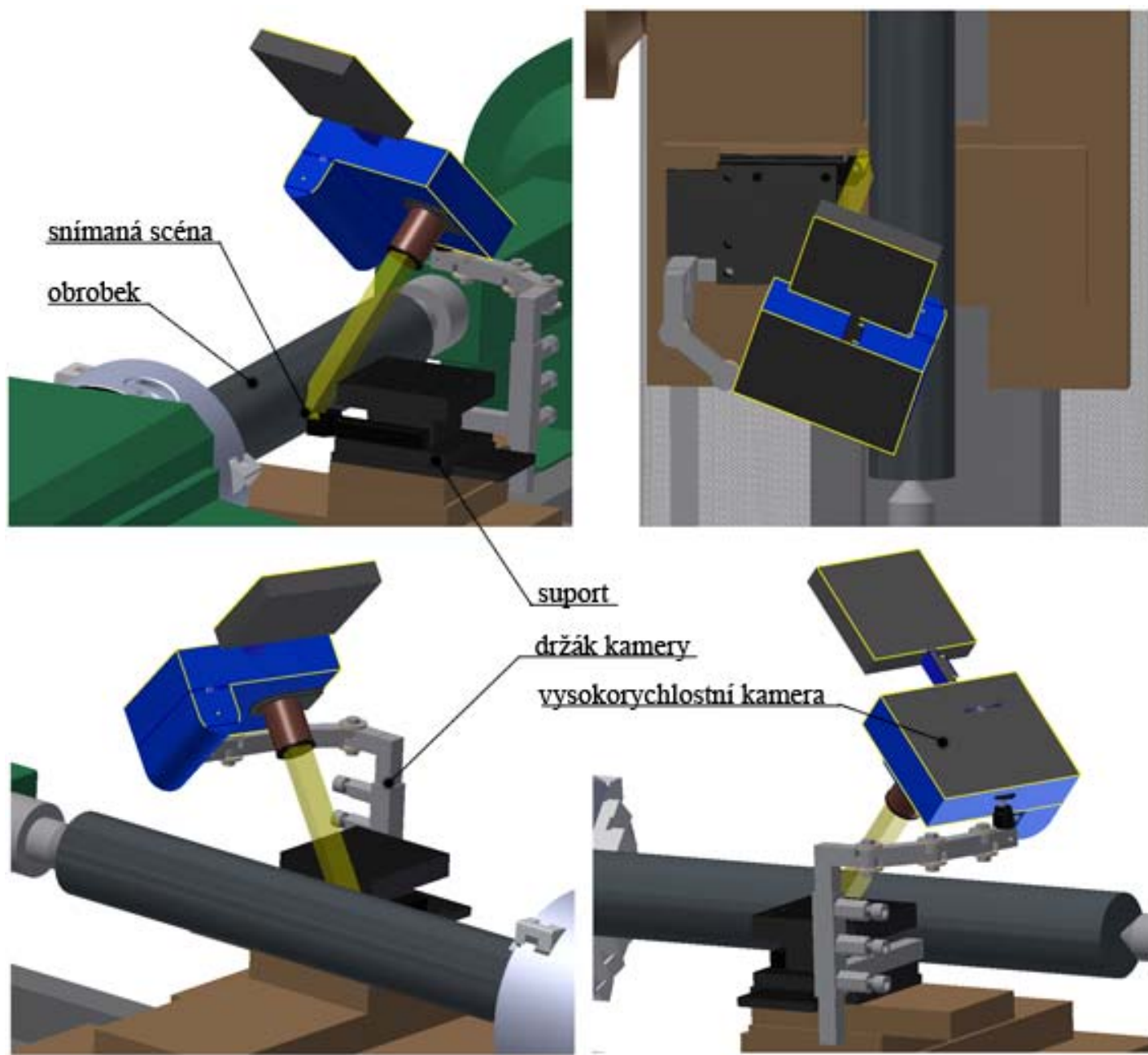
Způsob nastavení C



Způsob nastavení D



Způsob nastavení E



Způsob nastavení F

