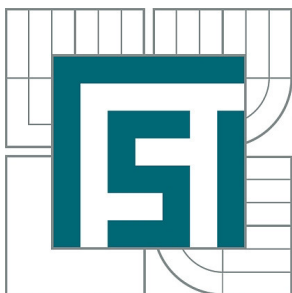




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## ANALÝZA TEPLOTNÍCH DEFORMACÍ PLASTOVÉHO DÍLU POMOCÍ OPTICKÉ DIGITALIZACE

ANALYSIS OF THERMAL DEFORMATION OF THE PLASTIC PART USING OPTICAL DIGITIZING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADEK CAGAŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ANETA ZATOČILOVÁ

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Radek Cagaš

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

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

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

### **Analýza teplotních deformací plastového dílu pomocí optické digitalizace**

v anglickém jazyce:

### **Analysis of thermal deformation of the plastic part using optical digitizing**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je analýza hystereze plastového dílu po opakovaném zahřívání užitím metody: měření pomocí fotogrammetrického systému Tritop.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Cíl práce, vědecká otázka a pracovní hypotéza
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Bibliografie

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva, laboratorní protokol, 3D digitální data (model)

Typ práce: experimentální

Účel práce: vzdělávání

Seznam odborné literatury:

- [1]LUHMANN, Thomas, et al. Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK:Whittles Publishing, 2011. Fundamental methods, p. 510. ISBN 978-184995-057-2.
- [2]Atos Triple Scan User Manual - Hardware. Braunschweig (Germany): Gom, mbH, 2012.
- [3]ATOS Professional 7.5 Manual: Scanning With ATOS - Basic. Braunschweig (Germany): Gom, mbH, 2011.
- [4]TRITOP - User Information: Photogrammetric Cameras Nikon D300 and D300s. Braunschweig (Germany): Gom, mbH, 2008.
- [5]TRITOP Professional V7.5 Manual: Photogrammetry - Basic, Inspection - Basic. Braunschweig (Germany): Gom, mbH, 2011.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aneta Zatočilová

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 10.12.2012

L.S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

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

---

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá měřením teplotních deformací plastového vzorku. Teoretická část popisuje systémy pro optickou digitalizaci a jejich využití pro měření deformace. Vlastní práce se zabývá popisem systému Tritop a jeho použitím pro měření. Další části se zabývají procesem měření a zpracováním naměřených údajů. V poslední části je uveden souhrn a zhodnocení naměřených údajů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotogrammetrie, teplotní deformace, Tritop, hystereze, digitalizace

## **ABSTRACT**

The Bachelor thesis deals with measuring of thermal deformation of a plastic sample. The theoretical part describes optical digitization and its use in measuring the sample's deformation. The next part describes the Tritop and its use in measuring. Other parts of the thesis deal with the measuring process and recording and processing of acquired data. In the last section the measured data are summarized and evaluated.

## **KEY WORDS**

Photogrammetry, thermal deformation, Tritop, hysteresis, digitizing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

CAGAŠ, R. Analýza teplotních deformací plastového dílu pomocí optické digitalizace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aneta Zatočilová.

---



---

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza teplotních deformací plastového dílu pomocí optické digitalizace“ vypracoval samostatně. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, konzultací, odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne .....

---

.....

Podpis

---





---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval Ing. Anetě Zatočilové za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky, za laskavost, vstřícnost a pomoc při měření.

Dále bych chtěl poděkovat firmě SV Olšovec s.r.o. za výrobu přípravku potřebného pro měření

Na závěr bych rád poděkoval rodičům za podporu během celého studia.

---



**OBSAH**

<b>Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Přehled současného stavu poznání</b> .....	<b>13</b>
1.1 Metody měření 3D souřadnic .....	13
1.1.1 Triangulační princip .....	14
1.1.2 Měření doby letu.....	15
1.1.3 Interferometrie .....	15
1.2 Systémy pro snímání povrchu s aktivním zobrazením.....	16
1.2.1 Projekce s aktivním vzorem .....	16
1.2.2 Projekce s pasivním vzorem.....	16
1.3 Fotogrammetrie .....	17
1.3.1 Dělení fotogrammetrie.....	17
1.3.2 Blízká fotogrammetrie.....	19
1.4 Přehled literatury .....	19
1.4.1 Odborné články .....	19
1.4.2 Případové studie .....	20
<b>2 Cíl práce, vědecká otázka a pracovní hypotéza</b> .....	<b>22</b>
<b>3 Materiál a metody</b> .....	<b>23</b>
3.1 Měřený objekt.....	23
3.2 Fotogrammetrický systém TRITOP .....	23
3.3 Přípravek pro měření .....	25
3.4 Software Tritop deformation .....	26
3.5 Použité statistické metody pro zpracování výsledků.....	27
<b>4 Výsledky</b> .....	<b>29</b>
4.1 Deformace po vytažení plastového dílu z pece .....	29
4.2 Teplotní hystereze.....	30
4.3 Vyhodnocení opakovatelnosti měření .....	32
<b>5 Diskuze</b> .....	<b>36</b>
<b>6 Závěr</b> .....	<b>38</b>
<b>7 Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>39</b>
<b>8 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin</b> .....	<b>41</b>
<b>9 Seznam obrázků</b> .....	<b>42</b>
<b>10 Seznam tabulek</b> .....	<b>43</b>
<b>11 Seznam příloh</b> .....	<b>44</b>

## ÚVOD

V osmdesátých letech došlo společně s vývojem počítačů i k velkému rozvoji digitální fotogrammetrie, kterou je možné vyhodnotit 3D geometrické informace z 2D digitálních fotografií. Fotogrammetrie se dělí na dvě hlavní oblasti: letecká fotogrammetrie, která využívá snímky pořízené letecky pro vytváření map, a pozemní fotogrammetrie, která využívá snímky pořízené z povrchu země poskytující detailní rozměrové informace o objektech.

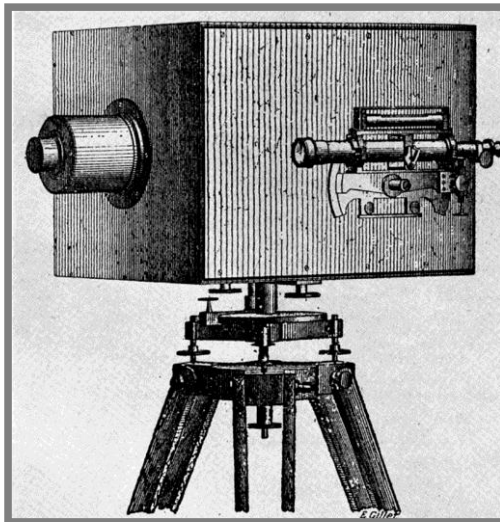
Blízká fotogrammetrie je v průmyslu často používána z důvodu vysoké flexibility, vysoké přesnosti při měření velkých objektů, neovlivnění měřeného předmětu dotykem a vysoké rychlosti měření velkých objektů. Fotogrammetrie je také vhodná pro zjišťování deformací objektů. Po změření 3D souřadnic objektu v nedeformovaném a deformovaném stavu se dá snadno určit směr a velikost jeho deformace.

Od 90. let se vyvíjí metoda 3D skenování. Při tomto procesu jsou automaticky změřeny prostorové souřadnice velkého množství bodů na povrchu objektu.

3D skenery se běžně využívají ve strojírenství, geodezii, při tvorbě počítačových her, geologii, designu nebo architektuře.

Jedno z možných využití obou metod ve strojírenství je například při měření tolerance tvaru a polohy součástí, které by nebylo možné změřit jinou technologií, a jejich porovnání s CAD modelem nebo daty, která mohou být výstupem simulace metody konečných prvků. Při kombinaci fotogrammetrie a 3D skenování je možné využít výhody obou metod a dosáhnout vysoké přesnosti a produktivity měření.

Cílem této bakalářské práce je popsat postup, kterým je možné určit a vyhodnotit deformace libovolného objektu. Tento metodický přístup může následně sloužit komunikoli, pro určování nejen teplotních deformací, ale i deformací způsobených vnějším silovým působením.



Obr. 0-1 Jedna z prvních fotogrammetrických kamer, Braunner 1859 [1]

## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

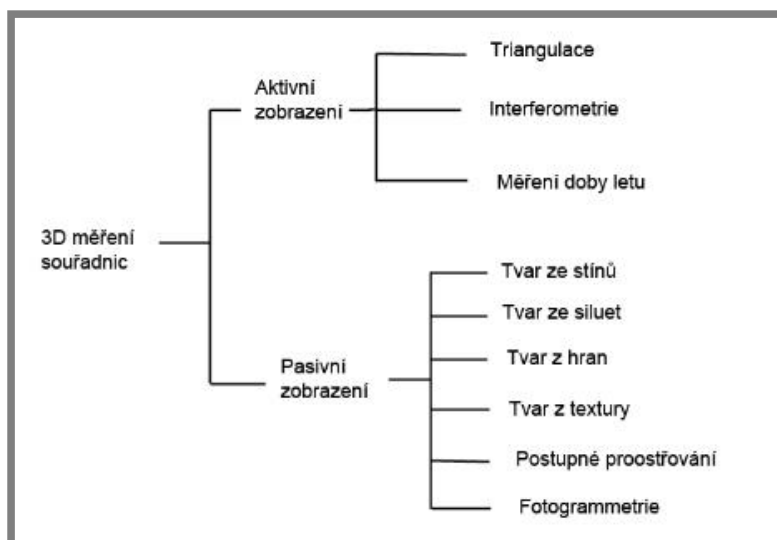
Jedna z prvních zmínek o použití počítačového zpracování obrazu a měření deformací objektu pochází z počátku osmdesátých let. Při vývoji této metody se porovnávala deformace zachycená v obrazovém materiálu s přímo změřenou deformací. Po použití této metody pro experimenty, byl proces měření zpřesněn a začleněn do softwaru pro numerické vyhodnocování deformace z obrazových dat. [4]

Pro získání digitálního obrazu se běžně používají digitální fotoaparáty. Při použití analogových fotoaparátů se musí snímky převést do digitální podoby např. skenováním. Nevýhodou ovšem je přidání digitálního šumu do obrazu. [4]

Pro účely fotogrammetrického měření se nejčastěji používají průmyslové kamery. V nich byly častěji používány CCD snímače, protože výstupní obraz byl daleko kvalitnější než při použití CMOS snímačů. Dnešní CMOS snímače naopak mají nižší hmotnost, menší rozměry a spotřebu energie, což je důvod, proč se používají v přenosných fotoaparátech. Nevýhodou většiny CMOS fotoaparátů je postup, kterým fotoaparát manipuluje s daty během jejich ukládání. Pro všechny obrazové body se totiž nepoužívá jeden zesilovač, jako je tomu u CCD čipů, ale každý bod má svůj zesilovač, který může zesilovat nepatrně jinak než zesilovače okolních bodů. Při tomto zesílení dochází k přidání digitálního šumu do fotografií a případné chybě měření. [4]

### 1.1 Metody měření 3D souřadnic

Systémy pro určování 3D souřadnic lze podle druhu osvětlení a následného zpracování naměřených dat dle [6] rozdělit podle schématu uvedeného na obr. 1-1.

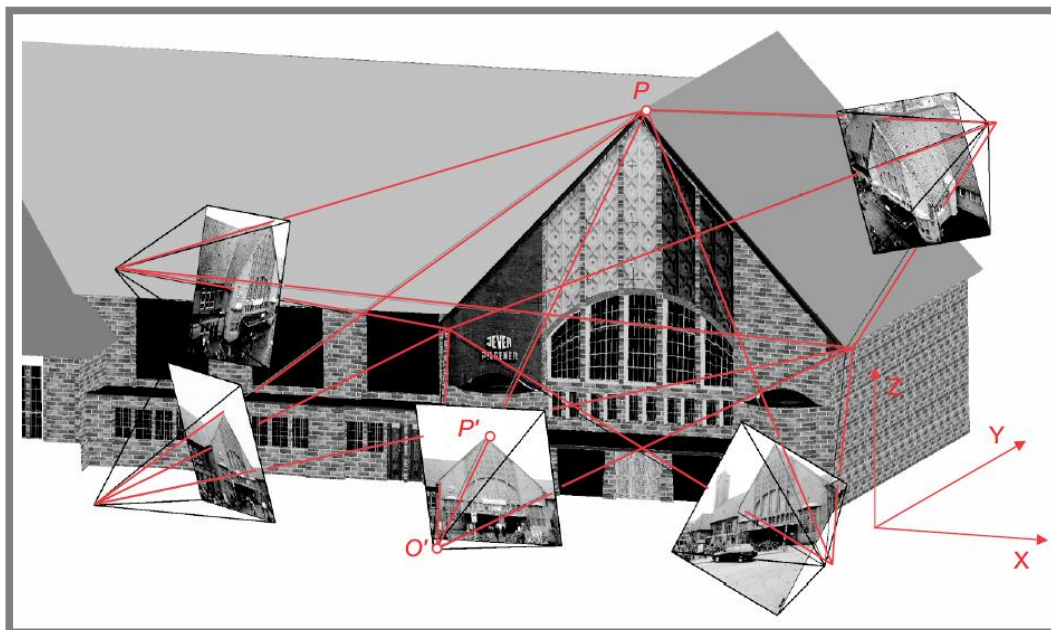


Obr. 1-1 Rozdělení optických měřících metod (podle [6])

Systémy s pasivním zobrazováním nepoužívají při měření žádné speciální zdroje světla, při měření postačí denní světlo. Systémy s aktivním zobrazováním, na rozdíl od pasivních, potřebují k měření speciální zdroj světla, který má specifickou barvu, vlnovou délku a tvar promítaného vzoru. [6]

### 1.1.1 Triangulační princip

Poloha fotoaparátu vůči objektu je určena pomocí rekonstrukce svazku paprsků ze snímků z každé polohy fotoaparátu. Každý bod  $P'$  spolu s odpovídajícím středem promítání  $O'$  určují pro daný snímek prostorovou orientaci svazku paprsků k odpovídajícímu bodu objektu  $P$ . Pokud je známa zobrazovací geometrie ve fotoaparátu a poloha fotoaparátu vzhledem k objektu, potom může být určena poloha jakéhokoliv bodu, která se určí z průsečíku alespoň dvou paprsků. [1]



Obr. 1-2 Princip fotogrammetrie [1]

Základní parametr fotogrammetrického snímku je měřítko fotografie  $m$ , které definuje vztah mezi vzdáleností objektu  $h$  a vzdáleností obrazu  $c$  (obr. 1-3). Stejný je i vztah mezi vzdáleností objektu  $X$ , v obrazové rovině, a odpovídající vzdáleností v prostoru obrazu  $x'$ . Měřítko fotografie je možné spočítat dle vztahu (1) uvedeného v [1].

$$m = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} \quad (1)$$

kde:

$m$  (-)..... měřítko fotografie

$h$  (m)..... vzdálenost objektu

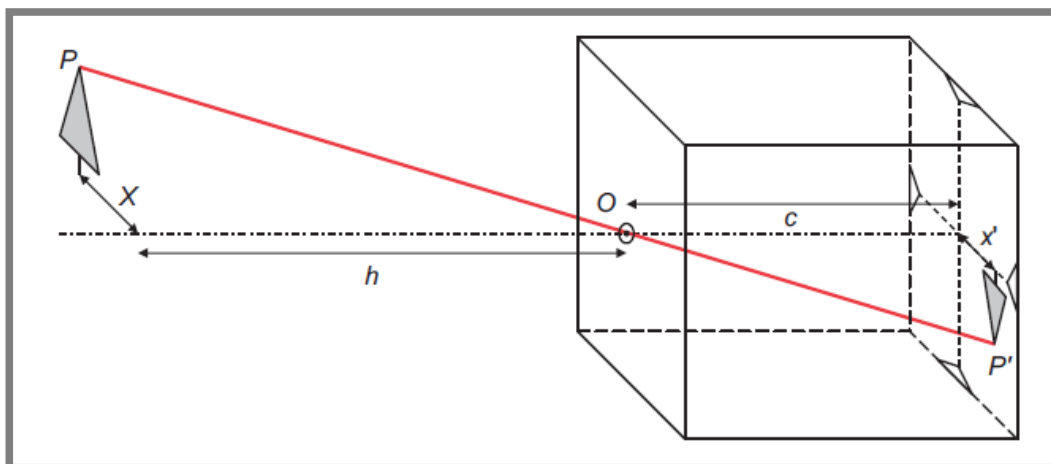
$c$  (m)..... vzdálenost obrazu

$X$  (m) ..... poloha objektu vzhledem k ose snímku

$x'$  (m)..... poloha obrazu vzhledem k ose snímku

Měřítko fotografie je vždy rozhodujícím faktorem při řešení rozměrů objektů, protože jakékoli nepřesnosti v rozměrech na fotografii se v poměru měřítka znásobí vůči objektu. [1]

Na principech triangulace běžně pracují fotogrammetrické systémy, systémy s proužkovou projekcí, metody postupného proostřování a metody využívající k rekonstrukci tvar stínů. [1]

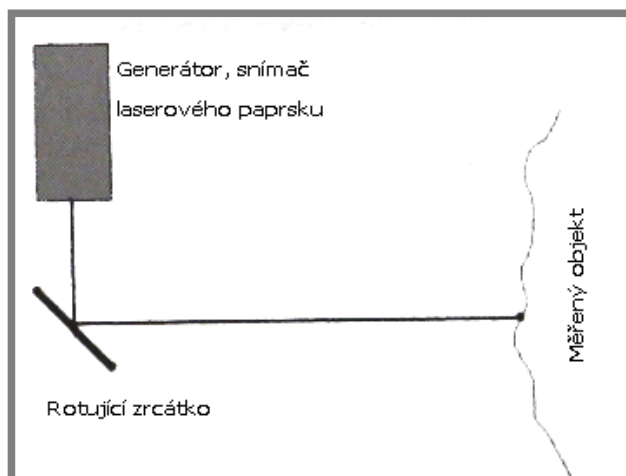


Obr. 1-3 Dírková komora fotoaparátu [1]

### 1.1.2 Měření doby letu

Přístroje, které k měření prostorových souřadnic nevyužívají triangulační princip, mohou pracovat například na principu měření doby letu laserového paprsku. Měřicí systém pracující na tomto principu vyšle laserový puls. Laserový paprsek se odrazí od měřeného objektu ke snímači, kterým je zachycen. Poloha skenovaného bodu je tedy určena matematicky ze dvou úhlů natočení, udávající směr paprsku, a vzdálenosti skenovaného bodu, která může být snadno určena ze změřené doby letu paprsku od generátoru k měřenému objektu a zpět ke snímači. [3]

1.1.2



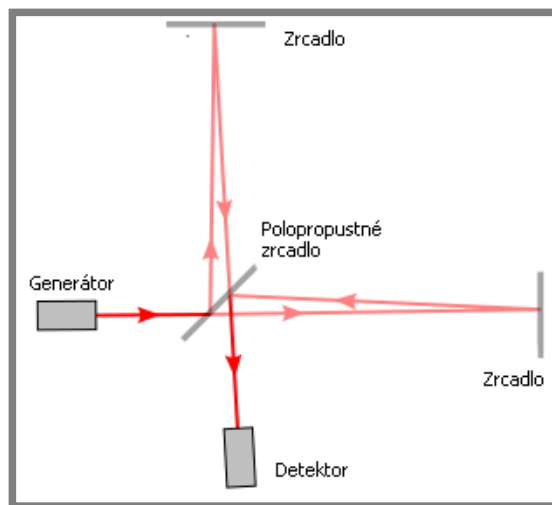
Obr. 1-4 Princip měření doby letu [3]

### 1.1.3 Interferometrie

Skenovací systém využívající princip interferometrie (obr. 1-5) je podobný systémům, které pracují na principu měření doby letu. Na rozdíl od nich ovšem využívají ke své činnosti vlnové podstaty světla. Laserový paprsek je vyslán generátorem na polopropustné zrcadlo, pomocí kterého je rozdělen na dva paprsky. Jeden paprsek pokračuje směrem k měřenému objektu, od kterého je odražen zpět na polopropustné zrcadlo a následně na detektor. Druhý paprsek je přes zrcadlo, jehož poloha je zná-

1.1.3

ma, odražen na detektor. Po složení obou paprsků se z jejich fázového rozdílu určí vzdálenost objektu a skeneru. [3]



Obr. 1-5 Princip interferometrie [9]

## 1.2 Systémy pro snímání povrchu s aktivním zobrazěním

Obecně platí, že plošný snímací systém se používá, když se digitalizuje prostorový tvar libovolné prostorové plochy. Vzor, který se promítá na povrch, je změřen a tím je definován povrch modelu. Podle [1] lze tyto systémy rozdělit podle principu na kterých pracují:

### 1.2.1 Projekce s aktivním vzorem

Geometrie promítnutého vzoru je známá a je používána při výpočtech. Také je známa relativní poloha projektoru, kamery a snímaného objektu a vlnová délka promítnutého vzoru. K zaznamenání povrchu je nutná alespoň jedna kamera, která zaznamenává odražené světlo z povrchu objektu. Systémy s projekcí aktivního vzoru lze dále rozdělit:

- stacionární proužková projekce,
- dynamická proužková projekce (metoda fázového posunu),
- projekce kódovaného světla,
- systém s více kamerami a proužkovou projekcí,
- fázogrammetrie. [1]

### 1.2.2 Projekce s pasivním vzorem

K měření nejsou potřeba žádné informace o kalibraci ani orientaci projektoru nebo promítnutého vzoru. Promítnutý vzor jednoduše poskytuje viditelnou strukturu, která definuje povrch. Grafická rekonstrukce objektu se poté provádí fotogrammetricky tak, že se srovnává obraz nejméně ze dvou kamer, které zaznamenávají promítnutý vzor. Systémy s projekcí pasivního vzoru lze dále rozdělit:

- vícekamerový systém s bodovou projekcí,
- vícekamerový systém s mřížkovou projekcí,



- vícekamerový systém s náhodnou bodovou projekcí. [1]

Systémy využívající projekci s pasivním a aktivním vzorem mohou být vzájemně kombinovány. Například může být použita rychlá metoda využívající aktivní zobrazení pro hrubé měření povrchu, která bude následně zpřesněna vícekamerovou metodou pracující s pasivním zobrazením. Stejným způsobem je možné kombinovat tyto metody s bodovým fotogrammetrickým měřením. [1]

### 1.3 Fotogrammetrie

1.3

---

Fotogrammetrie je metoda měření, při které se odvodí tvar nebo poloha objektu z jedné nebo více fotografií, na kterých je tento objekt zaznamenán. V podstatě může být objekt měřen fotogrammetricky v libovolné situaci, kdy může být fotograficky zaznamenán. Hlavním cílem fotogrammetrického měření je trojrozměrná rekonstrukce objektu v digitální (prostorové souřadnice, odvozené geometrické prvky) nebo grafické podobě (náčrty, mapy). [1]

Pro rekonstrukci objektu z fotografií je nutné mít informace o průběhu měření. To zahrnuje například informace o zdroji světla, povrchu objektu, médiu, kterým putuje světlo, nebo o fotoaparátu a technologii zpracování obrazu. Následně jsou v zaznamenaném obrazu analyzovány jednotlivé body objektu, díky jejich tvaru, jasu nebo barvě. Pro každý obrazový bod může být určena jeho poloha na snímku a jeho barva, a úroveň šedi. Z těchto měření a matematických transformací mezi obrazovým a objektovým prostorem může být vymodelován měřený objekt. [1]

#### 1.3.1 Dělení fotogrammetrie

1.3.1

---

##### Podle polohy místa, odkud byl snímek pořízen

- Letecká fotogrammetrie

Pro leteckou fotogrammetrii je typické, že místo, odkud jsou snímky pořizovány, je na palubě letadla. Snímky se dříve často používaly pro tvorbu fotomap. Poloha a orientace letadla vůči zemi se nejčastěji určuje pomocí GPS, aby se usnadnilo následné zpracování snímků. [1], [2]

- Družicová fotogrammetrie

Družicová fotogrammetrie je v dnešní době nejčastěji používaná pro tvorbu map, které jsou poskládány z jednotlivých snímků tzv. fotomapy. [1], [2]

- Pozemní fotogrammetrie

Pro pozemní fotogrammetrii je charakteristické, že místo, odkud jsou pořízeny snímky, je umístěno na Zemi. Často je toto místo nepohyblivé. Pokud je velikost objektu a vzdálenost, na kterou se objekt měří menší než 300 m, jedná se o blízkou fotogrammetrii. [1], [2]

##### Podle množství snímků, které použijeme při vyhodnocování

- Jednosnímková fotogrammetrie

Snímky pořízené jednosnímkovou fotogrammetrií se vyhodnocují každý samostatně. Protože z jednoho snímku není možné vyhodnotit prostorové souřadnice jednotlivých bodů, mohou se touto metodou vyhodnotit pouze souřadnice rovinné. Proto se jednosnímková fotogrammetrie používá nejčastěji pro měření objektů, které mají přibližně rovinnou plochu, která ale může být i šikmá. [1], [2]

- Vícesnímková fotogrammetrie

Pro určování 3D souřadnic se používá vícenímková fotogrammetrie. Měřený předmět musí být zobrazen na více snímcích, jeho prostorové souřadnice je potom možno spočítat ze snímkových souřadnic. Pokud je poloha os kamer, kterými jsou snímky pořízeny různoběžná, použije se při vyhodnocení snímků metoda triangulace. Pokud mají kamery osy záběrů rovnoběžné, jedná se o stereofotogrammetrii. [1], [2]

### **Podle způsobu záznamu a převodu snímkových souřadnic na prostorové souřadnice**

- Analogová fotogrammetrie

Analogové metody se často vyznačují oddělením procesu záznamu obrazu a jeho zpracování. Snímky se pořizují v místě měření na drahých analogových fotoaparátech. Následně jsou snímky vyvolány v laboratoři. Proto není možné přímo během měření kontrolovat kvalitu snímků. Následně jsou fotografie měřeny pomocí specializovaných nástrojů. Nejprve se určí prostorová orientace snímků a poté se snímky fotogrammetricky zpracují. Tento postup je drahý, zdlouhavý a náročný, protože vyžaduje komplexní fotogrammetrické znalosti, vybavení a dovednosti. Začlenění analogových systémů například do automatických systémů řízení jakosti také není možné. [1], [2]

- Digitální fotogrammetrie

Fotogrammetrické metody prošly zásadními změnami společně s rozvojem digitálních zaznamenávacích systémů a systémů pro jejich digitální zpracování. Při využití digitálního online záznamu je možné celé fotogrammetrické měření a vyhodnocení provést v řádu minut přímo na místě měření. Pro vyhodnocení se nejčastěji používá plně automatizovaný software. Takto automatizovaný systém mohou poté používat i uživatelé bez detailních znalostí fotogrammetrických principů. Digitální zpracování je vhodné například pro řízení jakosti, kdy může dojít k automatické změně výrobního procesu na základě fotogrammetrických výsledků. [1], [2]

Mezi další používané metody patří:

- analytická fotogrammetrie,
- videogrammetrie,
- panoramatická fotogrammetrie,
- přímková fotogrammetrie (line photogrammetry),
- rovinná fotogrammetrie (plane table photogrammetry). [1]

### **Podle druhu výstupních dat**

Fotogrammetrické systémy poskytují prostorové souřadnice měřených objektů. Z těchto souřadnic mohou být odvozeny další tvary a rozměry. Může se jednat například o čáry, vzdálenosti, plochy nebo kvalitativní údaje jako je srovnání návrhu a změřených údajů. [1], [2]

- Grafické

Grafickým výstupem fotogrammetrických dat může být například náčrt na kreslicím stole. Tato metoda je v dnešní době na ústupu, protože získaná data nejsou v elektronické podobě, a jejich převod vyžaduje další práci. Navíc jsou vyhodnocená data často zatížena nepřesností konstrukce. [1], [2]

- Číselné (numerické)

Souřadnice jednotlivých pixelů jsou automaticky spočítány pomocí algoritmu, následně jsou uloženy do paměti, aby se mohly dále zpracovávat. Výstupní data mohou být ve formě rastrové nebo vektorové (body, polygony, plochy). [1], [2]

### 1.3.2 Blízká fotogrammetrie

1.3.2

---

Na rozdíl od letecké a družicové fotogrammetrie má blízká fotogrammetrie daleko širší možnosti aplikace. Nejčastěji je blízká fotogrammetrie používá při snímání kulturních a architektonických památek, v průmyslové výrobě pro kontrolu kvality nebo při optimalizaci výrobního procesu, v lékařství a pro soudní a vědecké aplikace. Zaznamenávací systém může být tvořen jednoduchými kamerami, kamerami s vysokým rozlišením, vysokosnímkovými kamerami nebo soustavou kamer. Přenos zaznamenaných snímků do vyhodnocovacího zařízení může být koncipována online nebo offline. [5]

Online systém určuje 3D souřadnice neustále s každým zaznamenaným snímkem. Používá se například pro řízení strojů a robotů v průmyslu. U offline systému je proces záznamu obrazu a jeho vyhodnocení odděleno a můžou se provádět odděleně na různých místech, v různý čas a různými lidmi. [5]

Výstupními daty blízké fotogrammetrie jsou nejčastěji 3D souřadnice, které je možno dále zpracovat a vytvořit plošné modely nebo 3D animované objekty. [5]

V následující kapitole je uveden přehled literatury zabývající se měřením deformací za použití systémů, které pracují na fotogrammetrických principech.

## 1.4 Přehled literatury

1.4

---

### 1.4.1 Odborné články

1.4.1

---

#### **Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology, [10]**

**Clive S. Fraser, Björn Riedel**

Článek se zabývá měřením koeficientu tepelné roztažnosti, ocelových pásů pomocí třech pevně umístěných CCD kamer, v průběhu ochlazování z teploty 1100 °C na pokojovou teplotu. Měření probíhalo v pravidelných intervalech, přičemž doba potřebná ke změření jednoho pásu byla přibližně 2 hodiny. Článek ukazuje užití fotogrammetrie v podmínkách, kdy je užití jiného způsobu měření 3D souřadnic vyloučeno. Při použití vyvinutého systému pro měření při velmi vysokých teplotách se ukázalo, že relativní přesnost použité metody je 0,7-1,3 mm, což je dostatečná přesnost pro stanovení požadovaného koeficientu tepelné roztažnosti.

#### **Large field-of-view deformation measurement for transmission tower based on close-range photogrammetry, [11]**

**Zhenzhong Xiao, Jin Liang, Dehong Yu, Anand Asundi**

Článek se zabývá měřením deformací přenosové věže pomocí fotogrammetrického systému XJTUSD. Tento měřicí systém byl použit, protože měření deformací pomocí tenzometrů není vhodné pro deformace, které neleží v jedné rovině. Metoda ko-

nečných prvků často poskytuje odlišné výsledky od výsledků experimentálních kvůli vysoké složitosti konstrukce. Deformace byla způsobena zatížením, které se postupně zvyšovalo po 30 až 40 tunách z hodnoty 0 tun až na konečných 322 tun. Vždy při konstantní deformaci byla pořízena sada snímků, ze kterých byla pomocí softwaru XJTUSD vyhodnocena deformace. Článek dále popisuje postup, kterým se dá velmi rychle a jednoduše zjistit přesnost daného fotogrammetrického systému.

#### **Shape Monitoring of a Beam Structure from Measured Strain or Curvature, [12]**

**R. Glaser & V. Caccese & M. Shahinpoor**

Článek popisuje experimentální postup při vývoji dostatečně přesné metody pro určení tvaru průhybové čáry nosníků, která by byla použitelná v reálném čase. Při vytváření matematického modelu, který popisuje průhyb nosníků, byly použity hodnoty zakřivení prutu naměřené pomocí tenzometrů. Výsledky určené tímto modelem byly porovnány s experimentálně naměřenými hodnotami pomocí fotogrammetrického systému a lineárních potenciometrů měřících průhyb. Odchylka, zjištěná při porovnání hodnot z numerického modelu a hodnot získaných fotogrammetrickým měřením, se běžně pohybovala v rozmezí od 1,37 do 2,25%.

Článek také popisuje jaký je minimální počet senzorů pro měření zakřivení, aby bylo dosaženo požadované skutečné a vypočtené odchylky numerického modelu od reálných hodnot.

---

### **1.4.2 Případové studie**

#### **GOM (2009)**

##### **Deformation Analysis of Car Components, [13]**

Článek popisuje možnosti použití fotogrammetrického systému Tritop pro měření lokálních a globálních deformací v automobilním průmyslu. Při testování jsou prototypy automobilů vystaveny různým druhům zatížení (teplotní změny až o 130 °C, dlouhodobé měření stability nebo přetěžovací testy). Aby bylo zjištěno, jak se bude vzájemně ovlivňovat deformace karoserie a interiéru. Pro vyhodnocování deformací se používá speciální modul softwaru Tritop určený k vyhodnocování deformací, který má přehledný výstup v podobě vektorů a barevné mapy promítnuté do 2D snímků. 2D snímky s promítnutými hodnotami odchylek umožňují odhalit slabá místa konstrukce a přijmout opatření pro jejich odstranění.

#### **GOM (2008)**

##### **Development of a Dimensionally Stable Lightweight Structure for the LISA Pathfinder Science Module, [14]**

Studie se zabývá kontrolou termo-elastických vlastností konstrukce určené pro hledání gravitačních vln ve vesmíru. Pro zajištění měřicí přesnosti musela být konstrukce vyrobena z materiálů s nízkou tepelnou roztažností, která byla ověřena na hotovém výrobku. Pro měření roztažnosti jednotlivých částí konstrukce byla použita laserová interferometrie. Pro měření roztažnosti konstrukce jako celku byl použit systém Tritop. Konstrukce byla měřena v klimatické komoře v rozmezí teplot 10 °C až 40 °C. Data neměřená oběma metodami byla vzájemně porovnána a byla určena výsledná deformace konstrukce.

Druhá část článku pojednává o využití naměřených dat k vytvoření numerického modelu určeného pro vyhodnocování deformace konstrukcí tvořených sendvičovým jádrem pomocí metody konečných prvků.

#### **GOM (2008)**

##### **3D Digitizing of the X-38 Space Vehicle, [15]**

Článek se zabývá postupem při navrhování záchranného modulu, určeného pro evakuaci astronautů zpět na zem. Během návrhu byly prováděny testy letu a přistání na vyrobeném modelu, který velikostně odpovídal 80% skutečnému modulu. Tento model byl digitalizován, aby mohly být jeho rozměry a tvar porovnány s počítačovým modelem.

Při měření byl povrch modulu nejprve opatřen kódovanými a nekódovanými body a měřítkovými tyčemi, aby mohla být definována jejich přesná poloha pomocí systému Tritop. Následně byl celý povrch digitalizován pomocí systému Atos s využitím dat naměřených Tritopem. Po porovnání rozměrů modelu byla naměřená data zpracována a byl vytvořen CAD model, který byl použit jako základ pro další simulaci.

#### **FIG Working Week (2012)**

##### **Dynamic deformation monitoring of a transmission tower undergoing failure testing by close range terrestrial photogrammetry [16]**

##### **Jeff NEEDHAM, Ben DASH**

Článek se zabývá testováním stožárů elektrického vedení. Tyto testy byly prováděny, z důvodu lepšího porozumění chování jejich struktury a základům během dynamického zatěžování například během krátkých, silných poryvů větru. Pro fotogrammetrické měření byl z důvodu cenové dostupnosti zvolen fotogrammetrický software PhotoModeler. K zaznamenání obrazu bylo ze stejného důvodu pořízeno 11 fotoaparátů Canon 1000D. Všechny fotoaparáty byly propojeny s jedním počítačem, aby mohly být snímky pořízeny ve stejný okamžik. Stožáry byly zatěžovány navijáky, které byly nastaveny tak, aby simulovaly statické a dynamické zatížení. Během měření bylo pořízeno několik set sad snímků, každou vteřinu jedna sada. Článek ukazuje možný postup při měření velkých pohybujících se objektů, který by byl velmi obtížný a cenově nedostupný pokud by se nepoužilo fotogrammetrických systémů.

## **2 CÍL PRÁCE, VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA**

Cílem bakalářské práce je posouzení vlivu opakovaného zahřívání plastového dílu na teplotní deformace a hysterezi mezi jednotlivými ohřevy. Prostorové souřadnice měřených bodů mezi jednotlivými ohřevy budou měřeny pomocí fotogrammetrického systému Tritop. Systém Tritop bude také použit pro následné vyhodnocení deformace. Jedná se o simulaci úlohy, při které se analyzují statické deformace. Získané hodnoty deformací budou sloužit pro ověření výsledků získaných simulací metodou konečných prvků při výuce.

Dílčí cíle práce jsou konstrukce měřicího přípravku, ověření opakovatelnosti měření a vlivu lidské chyby na přesnost systému Tritop.

Cílem práce je zjištění, jaká je souvislost mezi teplotou ohřevu, velikostí a směrem deformace a jak se bude materiál deformovat během následujícího ochlazování.

Při zahřívání dochází u většiny pevných látek ke zvětšení jejich objemu. To je způsobeno tím, že kinetická energie molekul se zvýší a jejich rovnovážné polohy, kolem kterých kmitají, se od sebe vzdálí. Při následném chladnutí naopak dojde ke smrštění materiálu. Očekávané chování materiálu je, že během ohřevu v peci zvětší svoje rozměry. Zatímco během následného chladnutí dojde ke smrštění materiálu a případné deformaci způsobené vnitřním pnutím v lisovaném plastovém dílu a vysokou čelností jeho povrchu.

### 3 MATERIÁL A METODY

Teplotní deformace byly měřeny na plastovém dílu, který je částí krytu vzduchového filtru. Tento kryt byl přišroubován k měřicímu přípravku tak, aby se vůči němu během celého měření nepohyboval. Kryt s přípravkem byl změřen nejprve před prvním ohřevem, aby mohla být určena referenční poloha měřených bodů. Následně byl kryt společně s měřicím přípravkem ohřát v peci postupně na (50, 90, 130 a 150) °C. Pec byla rozehrátá na danou teplotu ještě před vložením měřeného dílu dovnitř. Díl byl do pece vložen vždy na jednu hodinu. Po vytažení z pece byl díl okamžitě jedenkrát změřen, aby mohlo být určeno, jak se deformoval před jeho vychladnutím. Po vychladnutí měřeného dílu a přípravku na vzduchu na pokojovou teplotu bylo vždy provedeno pět dalších měření, aby bylo možné určit velikost tepelné hystereze a přesnosti při opakování měření. Pro celé měření a vyhodnocení byl použit fotogrammetrický systém Tritop společnosti GOM.

#### 3.1 Měřený objekt

3.1

Jako měřený objekt byla zvolena polovina plastového krytu (obr. 3-2), ve kterém bývá uložen vzduchový filtr. Tento kryt (obr. 3-1) je poté používán v osobních a nákladních vozech, proto se na jeho povrchu nachází výstupky, kterými je kryt upevněn v motorovém prostoru vozu. Kryt má přibližné rozměry (170×205×180) mm. Je vyroben z polypropylenu Xenonpren PP-TD20, který se používá pro plastové díly vyráběné vstřikováním především v automobilovém průmyslu. Tento materiál obsahuje jako plnivo 20% mastku. Při vstřikování je materiál tvářen tlakem (80÷100) MPa. Průměrné smrštění tohoto materiálu při chladnutí je 1,5%. [19]



Obr. 3-1 Kompletní kryt vzduchového filtru

Obr. 3-2 Měřený díl

#### 3.2 Fotogrammetrický systém TRITOP

3.2

Systém Tritop umožňuje rychlé a přesné změření prostorových souřadnic. Protože tématem práce je měření deformací, použije se pro vyhodnocení naměřených dat

nadstavbový modul Tritop deformation, který je určený pro měření a posuzování statických deformací.

Systém Tritop se skládá z fotoaparátu s bleskem a objektivem, počítače, měřítkových tyčí, kódovaných a nekódovaných bodů. Další používané příslušenství zahrnuje Wi-Fi router a orientační kříže.

Tab. 3-1 Parametry měřicího systému [17]

Použitý fotoaparát	Nikon D300
Rozlišení čipu	12,2 Mpx
Přenos snímků do počítače	Wi-Fi/paměťová karta
Kalibrace	Automatická kalibrace
Přesnost zařízení podle přijímacího protokolu, který se řídí normou	VDI 2634/1
Provozní teplota	(-40 ÷ 120) °C
Velikost měřeného objektu	(0.1 × 0.1) m <sup>2</sup> až (10 × 10) m <sup>2</sup>
Průměrná délková odchylka	0,0051 mm

Před samotným měřením se musí na měřený předmět umístit kódované a nekódované body a měřítkové tyče. Kódované body slouží pro lepší prostorovou orientaci snímku a určení místa, odkud byl snímek pořízen. Při měření je vhodné, aby každý kódovaný bod byl na co největším počtu snímků, protože tím dojde ke zvýšení přesnosti měření. V místě, kde jsou na objektu nekódované body, budou při výpočtu určeny 3D souřadnice těchto bodů. Aby bylo možné určit tyto souřadnice, musí se každý bod



Obr. 3-3 Nekódované a kódované body, orientační kříže a měřítkové tyče [7]

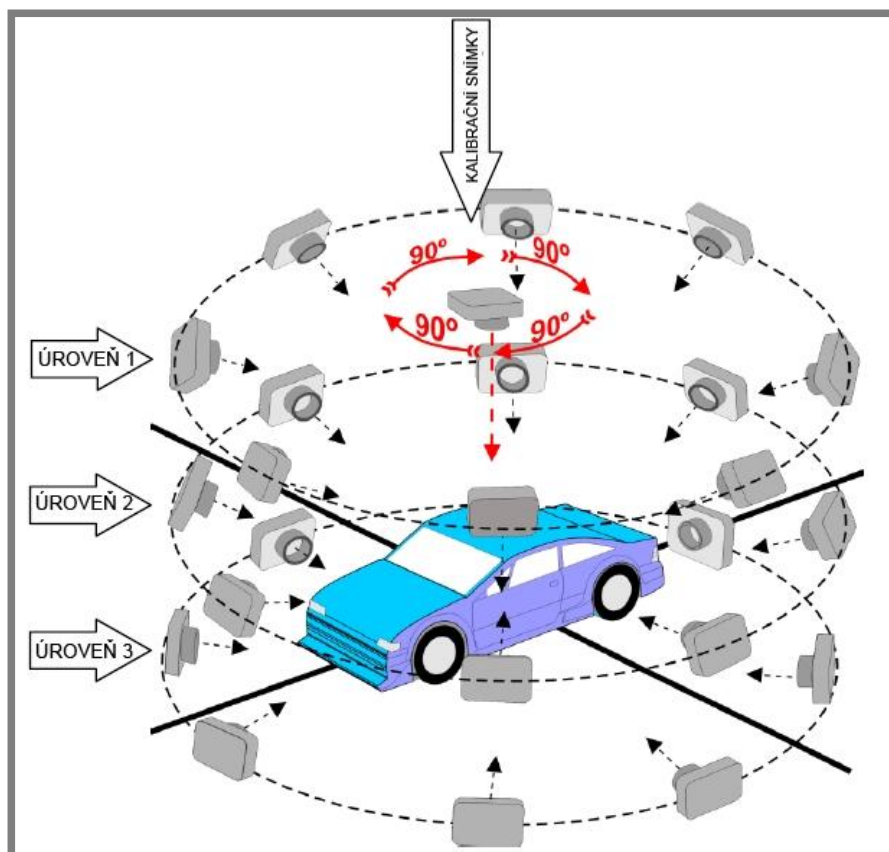
nacházet minimálně na třech snímcích. Při měření byly použity body o průměru 3 mm. Měřítkové tyče slouží k přepočtu vzdálenosti v naměřených datech na skutečnou vzdálenost. To je umožněno tím, že mají přesný a známý rozměr. Při měření byly použity dvě měřítkové tyče o délce 950 mm. Kolem měřeného objektu se také rozmisťují orientační kříže, na kterých se nachází 9 kódovaných bodů. Tyto kříže se používají, aby se zvýšil počet kódovaných bodů na snímcích.

Při samotném měření se nejprve z jednoho místa vyfotí čtyři kalibrační snímky, které jsou pootočený o 90°. Poté se pořizují snímky z různých stran objektu a v různých výškách. Obvykle jsou tři úrovně přibližně po osmi snímcích. Během měření fotoaparát postupně odesílá snímky do počítače, který je průběžně zpracovává, aby se



zkrátila doba potřebná pro vyhodnocení. Po dokončení měření jsou na snímcích lokalizovány kódované a nekódované body, měřítkové tyče a na základě triangulačního principu jsou automaticky spočítány prostorové souřadnice všech bodů.

Tritop deformation umožňuje porovnat jednotlivé fáze, ve kterých byl objekt zaznamenán. To znamená, že z prvního měření se vytvoří referenční poloha měřených bodů, která odpovídá stavu před zatížením. U každého dalšího měření, které odpovídá následujícímu zatěžování, je možné přímo porovnat odchylky změřených bodů od referenční polohy bodů.



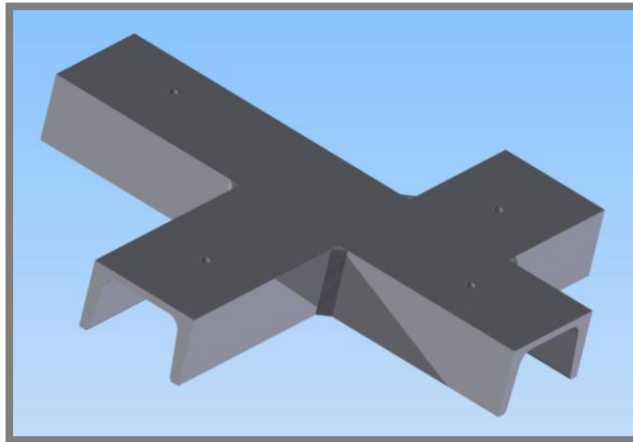
Obr. 3-4 Úrovně při pořizování snímků systémem Tritop [7]

### 3.3 Přípravek pro měření

Protože TRITOP deformation posuzuje deformace měřeného objektu relativně vůči objektu, který se během zatěžování nedeformuje, bylo nutné vyrobit přípravek, který tyto požadavky splňuje.

Přípravek byl zvolen jako svarek z důvodu jeho nízké výrobní ceny a snadného opracování dosedacích ploch, aby přípravek správně dosedal na podložku a při měření se nepohyboval. Vyžlínáním svarku se z něj navíc odstraní všechny vnitřní pnutí po svařování a svarek se nebude při opakovaném zahřívání deformovat. Pro upnutí svarku k přípravku jsou použity čtyři vruty, které se dotáhnou do děr určených pro spojení plastového dílu s protikusem. Navíc, aby se snížila plocha dotyku přípravku a plastového dílu a tím velikost ovlivnění deformace plastového dílu přípravkem, jsou mezi ně vloženy ocelové distanční kroužky.

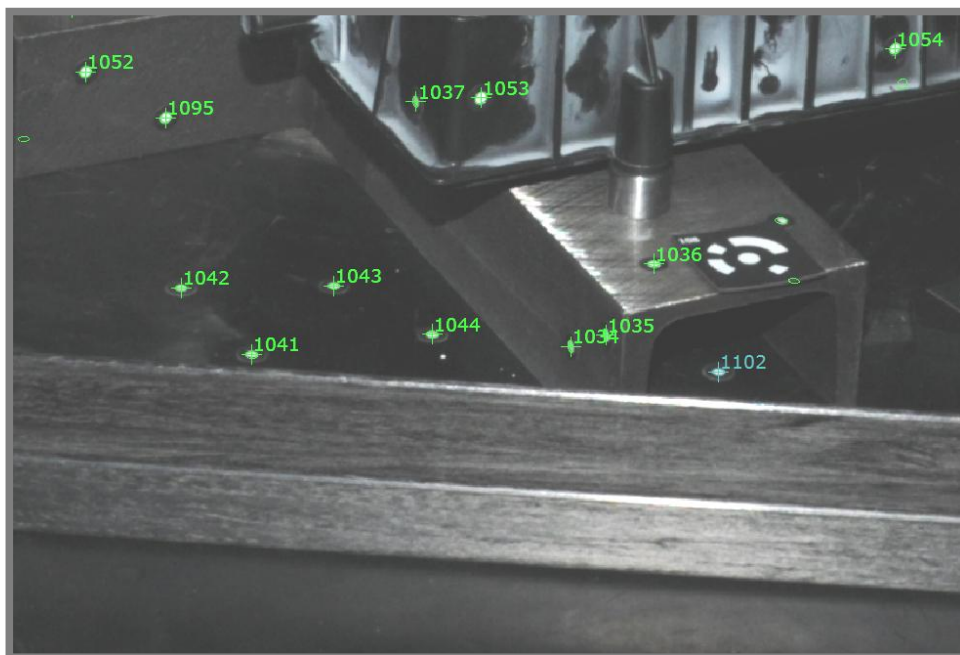
Výkres svarku měřicího přípravku je součástí práce jako příloha 7 .



Obr. 3-5 Model měřicího přípravku

### 3.4 Software Tritop deformation

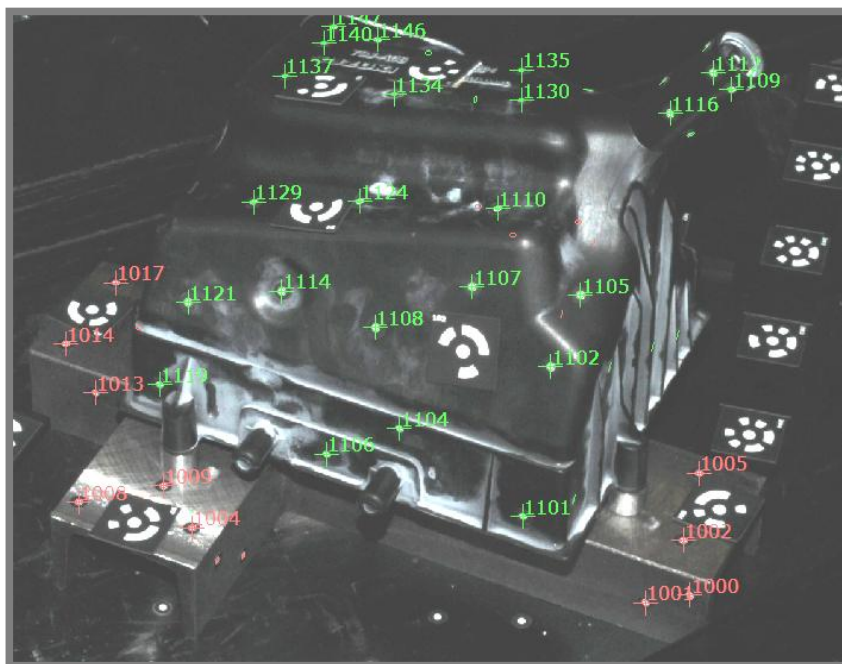
Po dokončení samotného měření bylo nutné ze zaznamenaných dat odstranit body, které systém našel mimo měřený díl nebo upínací přípravek, protože tyto body by snížily přesnost a navíc se při různých teplotách ohřevu nacházejí jinde vůči měřenému objektu.



Obr. 3-6 Body nacházející se mimo měřený objekt nebo přípravek

Následně se vyberou body na přípravku a označí se jako statické body (static points, červené body na obr. 3-7). Poté se vyberou body na měřené součásti a vytvoří se z nich druhá komponenta. Systém v jednotlivých měřeních analyzuje stejné body a zobrazí odchylky orientace a počet bodů, které nenalezl. Mezi další údaje, které software poskytuje, patří:

- deformace jednotlivých bodů, které nejsou označeny jako statické body,
- odchylka měřítkových tyčí – ke každému měření jsou potřeba dvě měřítkové tyče, systém poté může porovnat jejich odchylky vzájemně vůči sobě,
- odchylka projektu – odchylka spočítaná z odchylek jednotlivých snímků a odchylek měřítkových tyčí, ze všech zaznamenaných snímků. [7]



Obr. 3-7 Body nalezené na měřeném objektu

### 3.5 Použité statistické metody pro zpracování výsledků

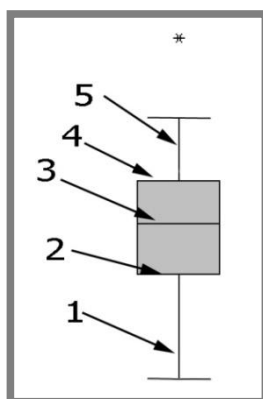
3.5

- Krabicový diagram

Krabicový graf je vhodný pro popis deformací, protože pro každé měření graficky zobrazuje pět hodnot, které popisují statistické rozdělení dat.

Význam jednotlivých čar v krabicovém diagramu:

- 1 dolní vnitřní hradba, její maximální délka je 1,5 krát výška rámečku nebo po minimální hodnotu souboru pokud leží v tomto intervalu,



Obr. 3-8 krabicový diagram

- 2 první kvartil (Q1) udává hranici, pod kterou leží 25 % hodnot,
- 3 medián (Q2,  $\tilde{x}$ ) udává hranici, pod kterou leží 50 % hodnot,
- 4 třetí kvartil (Q3) udává hranici, pod kterou leží 75 % hodnot,
- 5 horní vnitřní hradba, její maximální délka je 1,5 krát výška rámečku nebo po maximální hodnotu souboru pokud leží v tomto intervalu. [18]

Body, které leží za vnitřní hradbou (jsou vzdálenější od mediánu), jsou označeny \*. [18]

- Aritmetický průměr se dle [18] spočte:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$n$  (-) .....rozsah statistického souboru  
 $x_i$  (mm,px) .....hodnota deformace, odchylky  
 $\bar{x}$  (mm,px) .....aritmetický průměr

- Medián:

Je hodnota, která rozděluje počet hodnot v souboru seřazené podle velikosti na dvě stejné poloviny. Na rozdíl od aritmetického průměru je medián méně citlivý na extrémně odchýlené hodnoty. Dle se [18] spočte:

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} & \text{pro lichá } n \\ \frac{1}{2} \left[ x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] & \text{pro sudá } n \end{cases} \quad (3)$$

$\tilde{x}$  (mm).....medián

- Rozptyl

Je základní charakteristikou variability statistického souboru. Dle [18] se spočte:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

$s^2$ (mm<sup>2</sup>, px<sup>2</sup>)...rozptyl

- Směrodatná odchylka se dle [18] spočte:

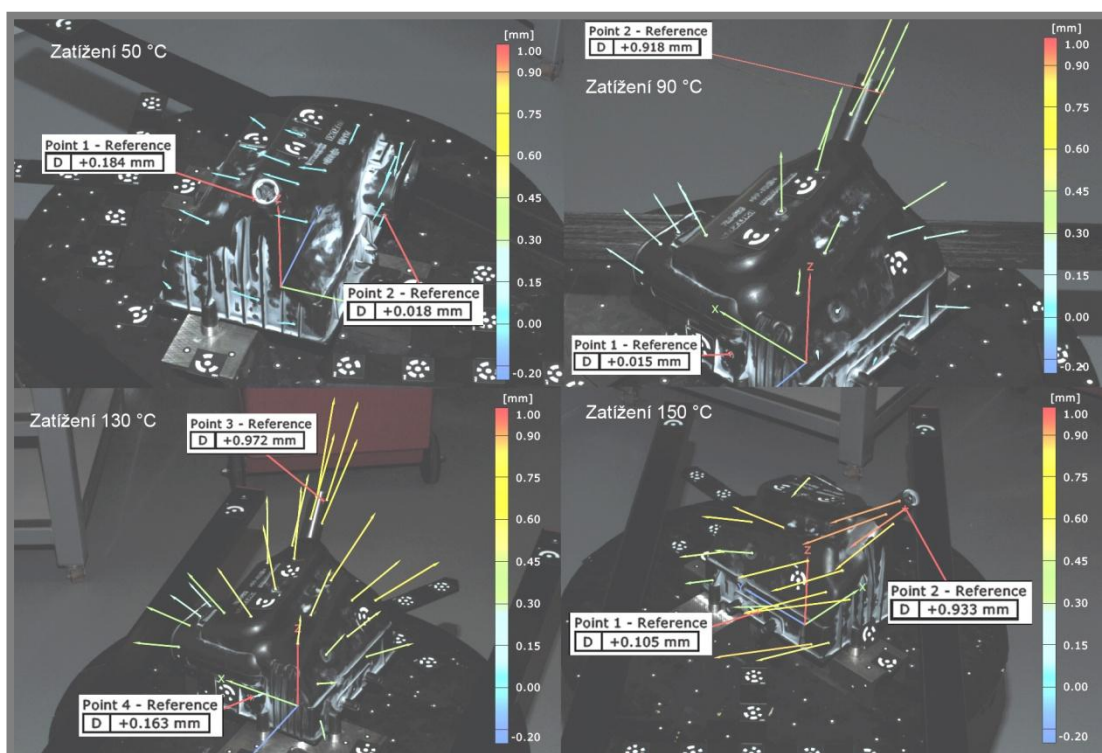
$$s = \sqrt{s^2} \quad (5)$$

$s$ (mm, px).....směrodatná odchylka

## 4 VÝSLEDKY

## 4.1 Deformace po vytažení plastového dílu z pece

Z měření provedených okamžitě po vytažení z pece je patrné, že nejvíce deformovaná je část, která je nejdále od upínacího přípravku. Vektory na obr. 4-1 ukazují směr, kterým se měřený díl deformoval. Vektory při ohřevu na teploty ohřevu 50, 90, 130 °C směřují přibližně od upínacího přípravku. Při ohřevu na teplotu 150 °C jsou vektory orientované přibližně rovnoběžně s upínací plochou přípravku. Značky na obr. 4-1 ukazují polohu nejméně a nejvíce deformovaných bodů.



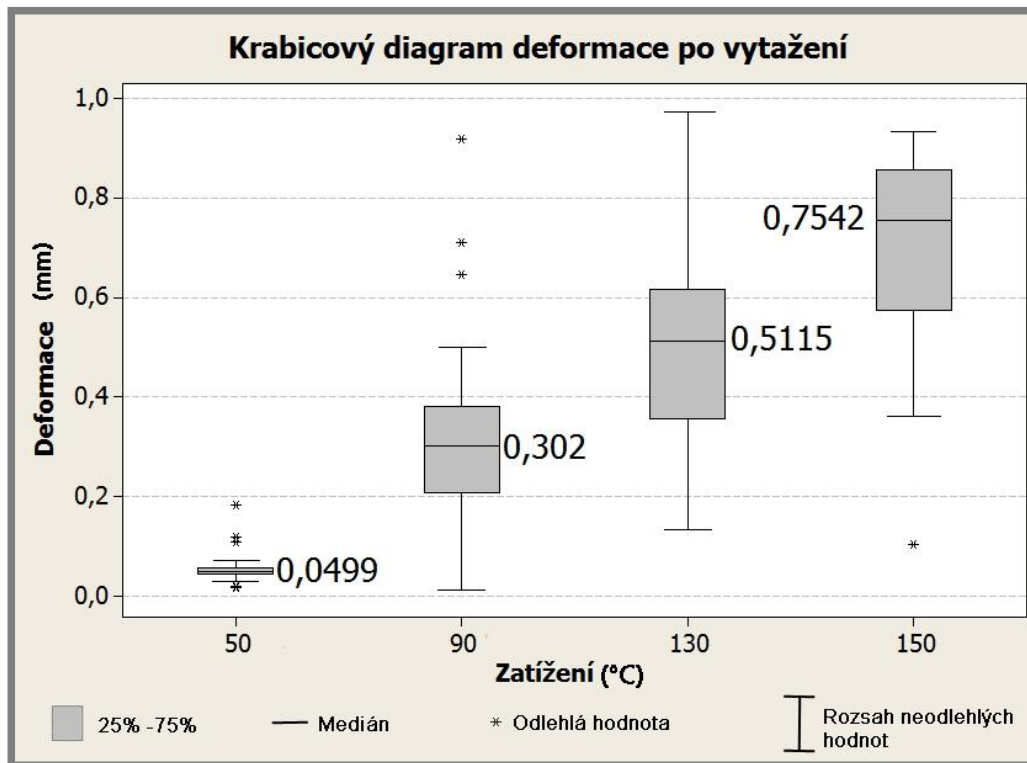
Obr. 4-1 Deformace měřeného dílu po vytažení z pece

Tab. 4-1 ukazuje hodnoty deformace, které byly určeny na základě deformací všech analyzovaných bodů. Deformace jednotlivých bodů v průběhu všech měření provedených okamžitě po vytažení z pece jsou uvedeny v příloze 1.

Tab. 4-1 Deformace měřeného dílu po vytažení z pece

Teplota	Deformace			
	Minimální (mm)	Maximální (mm)	Průměrná (mm)	Medián (mm)
50 °C	0,018	0,183 9	0,053 6	0,049 9
90 °C	0,015	0,918 1	0,313 8	0,302
130 °C	0,135 1	0,971 8	0,513 2	0,511 5
150 °C	0,104 6	0,933 1	0,711	0,754 2

Obr. 4-2 ukazuje krabicový diagram, který je sestaven z deformací všech bodů.



Obr. 4-2 Krabicový diagram deformace měřeného dílu po vytažení z pece

## 4.2 Teplotní hystereze

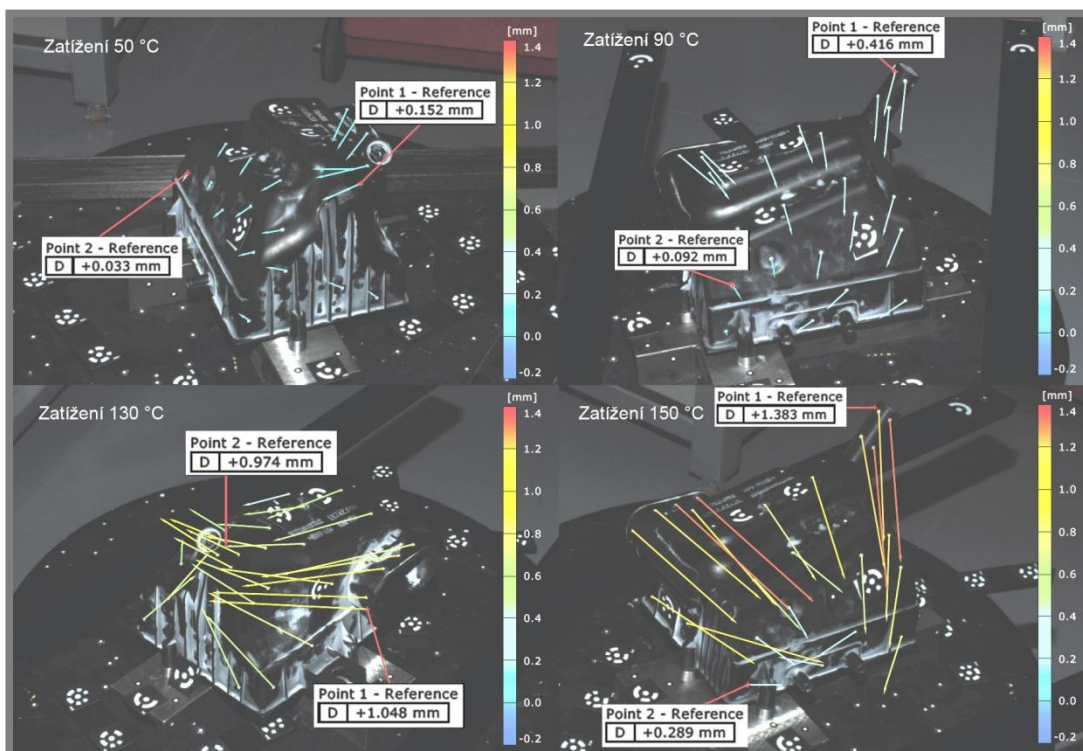
Pro vyhodnocení deformace po vychladnutí byl z naměřených souborů vybrán soubor s názvem `plastovy_dil_1.1`, ze kterého byly exportovány tabulky s deformací všech bodů. Tyto tabulky jsou součástí práce jako příloha 2.

V jednotlivých měřeních jsou deformace všech bodů určeny relativně k jejich referenční poloze, která je určena měřením bez ohřevu.

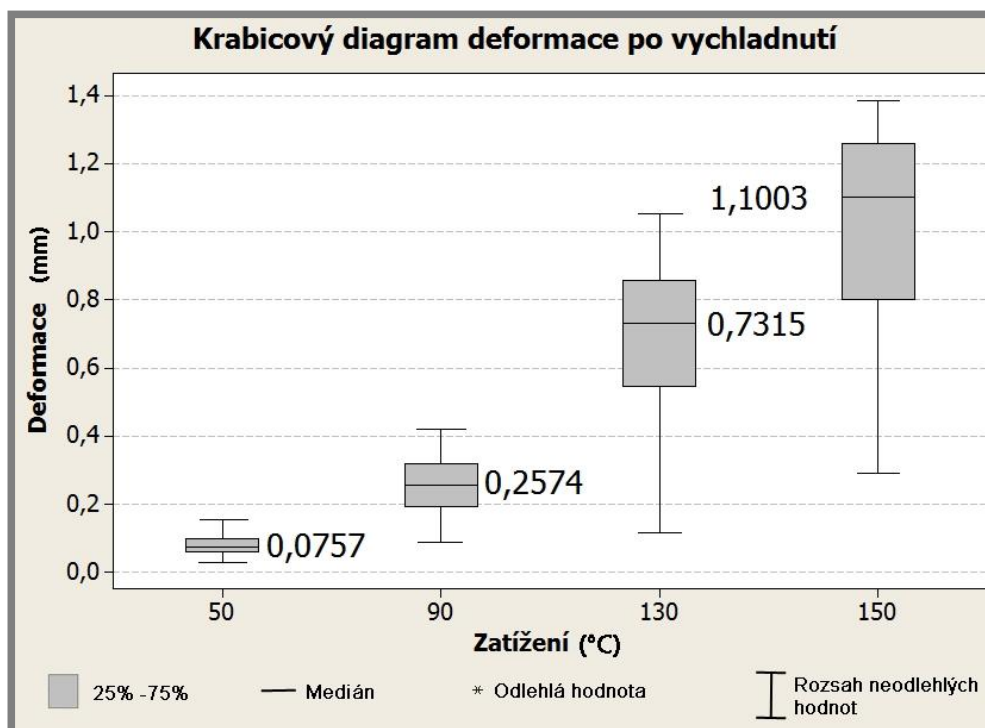
Tab. 4-2 Deformace měřeného dílu po vychladnutí na pokojovou teplotu

Teplota	Deformace			
	Minimální (mm)	Maximální (mm)	Průměrná (mm)	Medián (mm)
50 °C	0,032 8	0,152 5	0,079 2	0,075 7
90 °C	0,092 3	0,416 2	0,257 7	0,257 4
130 °C	0,119 7	1,047 7	0,687 9	0,731 5
150 °C	0,289 4	1,383 2	1,005 1	1,100 3

Obr. 4-3 ukazuje velikost a směr deformace měřeného dílu po vytažení z pece. Popisy na obrázku označují body s maximální a minimální velikostí deformace, s výjimkou zatížení 130 °C, kde nebylo možné zobrazit oba body v jednom obrázku. Z obrázku je patrné, že se plastový díl po každém ohřevu a následném vychladnutí deformoval přibližně stejným směrem. Směr vektoru deformace je odlišný od směru deformace měřené před vychladnutím dílu. Porovnání směru deformace horkého dílu a dílu po vychladnutí je uvedeno v přílohách 3 až 6.



Obr. 4-3 Deformace měřeného dílu po vychladnutí



Obr. 4-4 Krabicový diagram deformace měřeného objektu po vychladnutí

Obr. 4-4 znázorňuje krabicový diagram deformace všech bodů, tento graf je vykreslen z hodnot deformací uvedených v příloze 2.

### 4.3 Vyhodnocení opakovatelnosti měření

Během všech měření byla mimo sledování deformace jednotlivých bodů, sledována také celková odchylka měření a odchylka měřítkových tyčí, které jsou vhodné k určení opakovatelnosti měření. Tyto odchylky jsou uvedeny v tab. 4-3 a tab. 4-4. Z těchto hodnot byl spočítán aritmetický průměr, rozptyl a směrodatná odchylka, s využitím vztahů (2), (4) a (5), aby mohlo být určeno, jak si jsou naměřené hodnoty blízké.

Tab. 4-3 Odchylky projektů v rámci jedné teploty ohřevu

Teplota	Číslo měření	Přesnost projektu (px)	Aritmetický průměr $\bar{x}$ (px)	Rozptyl $s^2$ (px <sup>2</sup> )	Směrodatná odchylka $s$ (px)
Bez ohřevu	0	0,041 4	0,041 5	$1,062 4 \cdot 10^{-6}$	0,001
	1	0,041 4			
	2	0,039 8			
	3	0,043			
	4	0,041 6			
	5	0,041 9			
50 °C	0	0,036 4	0,036 8	$7,264 \cdot 10^{-6}$	0,002 7
	1	0,035 3			
	2	0,035 4			
	3	0,033 5			
	4	0,038 9			
	5	0,040 9			
90 °C	0	0,074 6	0,036 9	$3,256 \cdot 10^{-7}$	0,000 6
	1	0,036 4			
	2	0,036 1			
	3	0,037 7			
	4	0,037			
	5	0,037 2			
130 °C	0	0,133	0,036 1	$7,264 \cdot 10^{-7}$	0,000 9
	1	0,034 7			
	2	0,037 1			
	3	0,036 1			
	4	0,036 9			
	5	0,035 9			
150 °C	0	0,082 8	0,043 3	$4,113 6 \cdot 10^{-6}$	0,002
	1	0,042 7			
	2	0,040 9			
	3	0,045			
	4	0,046 3			
	5	0,041 7			

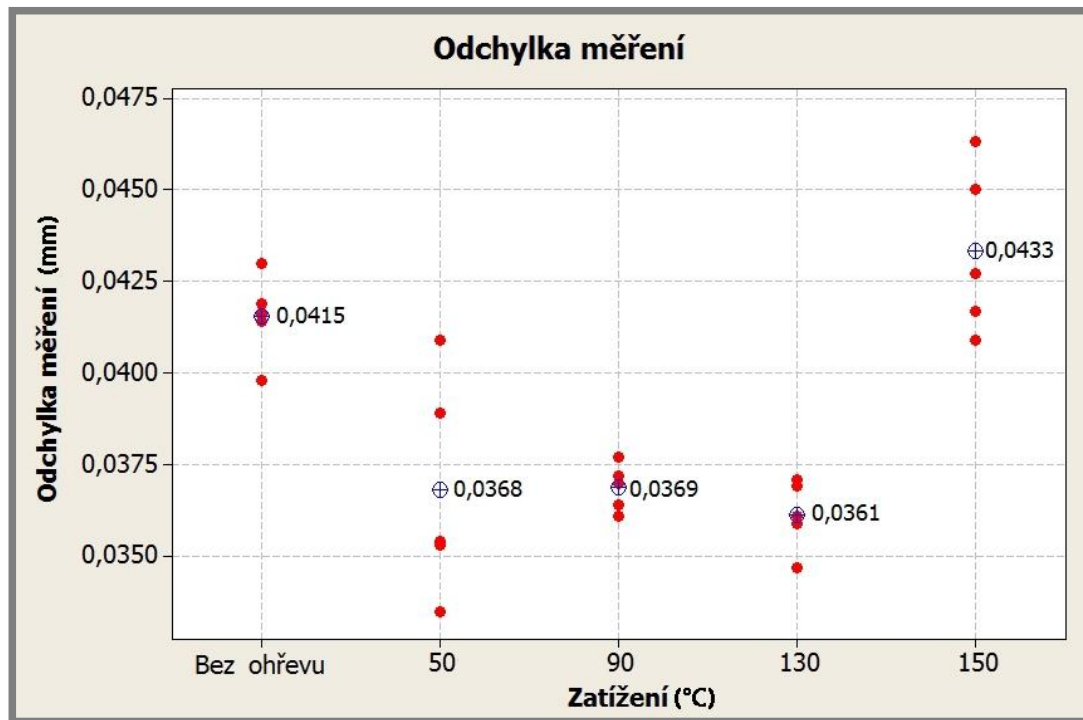


Tab. 4-4 Odchytky měřítkových tyčí v rámci jedné teploty ohřevu

Teplota	Číslo měření	Odchytky měřítkových tyčí (mm)	Aritmetický průměr $\bar{x}$ (mm)	Rozptyl $s^2$ (mm <sup>2</sup> )	Směrodatná odchytká $s$ (mm)
Bez ohřevu	0	0,004 7	0,004 2	$2,218\ 4 \cdot 10^{-6}$	0,001 5
	1	0,004 2			
	2	0,005 5			
	3	0,002 6			
	4	0,006 1			
	5	0,002 4			
50 °C	0	0,002 1	0,002 5	$4,488 \cdot 10^{-6}$	0,002 1
	1	0,002 5			
	2	0,006 4			
	3	0,000 6			
	4	0,002 4			
	5	0,000 6			
90 °C	0	0,001 4	0,002 2	$1,826\ 4 \cdot 10^{-6}$	0,001 4
	1	0,002 4			
	2	0,000 9			
	3	0,003 6			
	4	0,003 8			
	5	0,000 5			
130 °C	0	0,124 5	0,004 2	$2,853\ 6 \cdot 10^{-6}$	0,001 7
	1	0,003 8			
	2	0,006 2			
	3	0,006 1			
	4	0,002 5			
	5	0,002 3			
150 °C	0	0,000 6	0,002 2	$7,864 \cdot 10^{-7}$	0,000 9
	1	0,001 7			
	2	0,003 2			
	3	0,002 5			
	4	0,000 8			
	5	0,003			

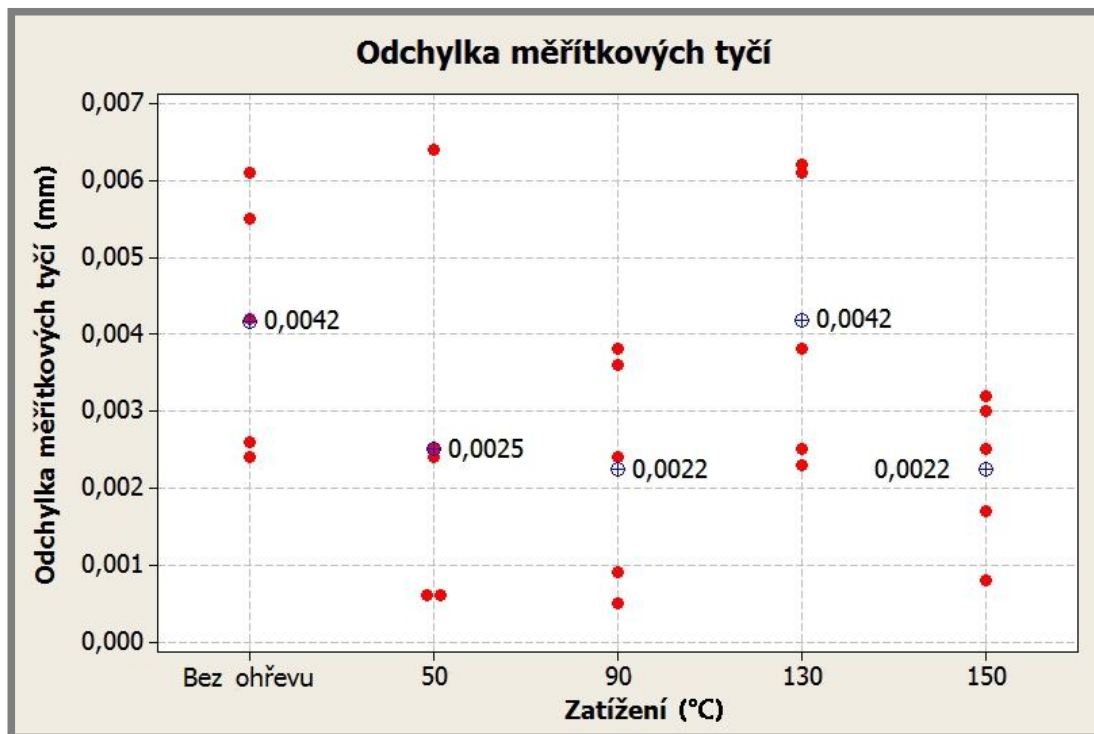
Číslo měření, které se nachází ve druhém sloupci tab. 4-3 a tab. 4-4 udává soubor, ze kterého jsou odchytky odečteny. Měření s označením 0, je měření po vytažení z pece, kdy plastový díl ještě nebyl vychladlý. Tyto hodnoty byly do tabulky přidány pro srovnání s hodnotami naměřenými po vychladnutí dílu.

Obr. 4-5 zobrazuje odchylky měření, které jsou uvedeny v tab. 4-3. V grafu jsou také zobrazeny aritmetické průměry jednotlivých měření.



Obr. 4-5 Hodnoty odchylek jednotlivých měření s vyznačením jejich aritmetického průměru

Obr. 4-6 zobrazuje odchylky měřítkových tyčí v jednotlivých měřeních. Tyto odchylky jsou uvedeny v tab. 4-4. Graf dále obsahuje hodnoty aritmetických průměru z daných souborů měření.



Obr. 4-6 Hodnoty odchylek měřtkových tyčí s vyznačením jejich aritmetického průměru

## 5 DISKUZE

Díky měření se potvrdila pracovní hypotéza, která říkala, že měřený plastový díl po zahřátí v peci zvětší své rozměry a při následném chladnutí je naopak zmenší.

Cílem práce bylo zjistit velikost deformace při jednotlivých teplotách ohřevu a velikost hystereze po vychladnutí dílu. Tyto údaje mohou sloužit pro porovnání výsledků získaných metodou konečných prvků.

Z naměřených údajů je patrné, že s rostoucí teplotou se zvětšuje velikost deformace. Hodnoty deformace změřené po vychladnutí, jsou při vyšších teplotách ohřevu vyšší než deformace horkého dílu okamžitě po vytažení z pece (tab. 5-1). Směry deformace v obou těchto měřeních jsou navíc značně odlišné. Horký měřený díl se nejvíce deformoval směrem od měřicího přípravku. Naopak po vychladnutí došlo k jeho smrštění směrem k přípravku. Směry deformace jsou znázorněny v přílohách 3 až 6. Z hodnot odchylek projektu, které jsou uvedeny v tab. 4-3, vyplývá, že měření horkého dílu, před tím než stihl vychladnout, má při vyšších teplotách (90, 130, 150) °C vyšší odchylky. To je způsobeno vysokou rychlostí chladnutí plastového dílu, který vychladl na pokojovou teplotu během několika minut, čímž měnil své rozměry v průběhu měření.

Tab. 5-1 Medián a maximální deformace při jednotlivých teplotách ohřevu

Zatížení	Deformace po vytažení z pece		Hysterezní deformace	
	Medián (mm)	Maximální (mm)	Medián (mm)	Maximální (mm)
50 °C	0,0499	0,1839	0,0757	0,1525
90 °C	0,302	0,9181	0,2574	0,4162
130 °C	0,5115	0,9718	0,7315	1,0477
150 °C	0,7542	0,9331	1,1003	1,3832

Protože všechna měření v rámci jedné teploty ohřevu byla provedena při stejných světelných podmínkách a při stejném rozmístění měřítkových tyčí, kódovaných a nekódovaných bodů lze z odchylek projektů a odchylek měřítkových tyčí určit, do jaké míry jsou si tyto hodnoty podobné na základě jejich směrodatných odchylek. Směrodatná odchylka je hodnota, která nejvíce vypovídá o tom, jak se mezi sebou hodnoty v rámci statistického souboru vzájemně liší. Čím je směrodatná odchylka menší, tím jsou si hodnoty v souboru bližší. Z hodnot uvedených v tab. 4-3 plyne, že maximální hodnota směrodatné odchylky, vypočítané z jednotlivých odchylek projektu při daných podmínkách, je 0,002 7 px. Z tab. 4-4 je patrné, že maximální hodnota směrodatné odchylky vypočítané z odchylek měřítkových tyčí je 0,002 1 mm.

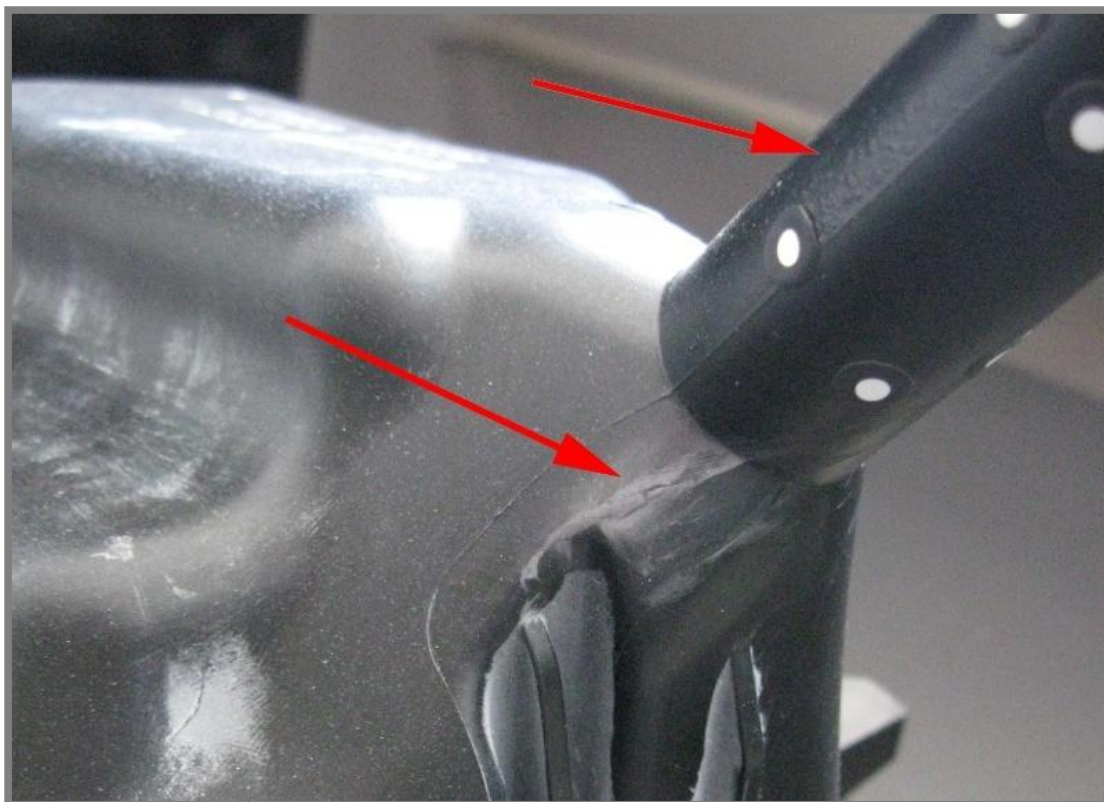
Přesnost měření značně ovlivňuje řada faktorů, mezi nejdůležitější patří [7]:

- příprava měřených objektů-zejména vhodné umístění kódovaných a nekódovaných bodů, které by měly být rovnoměrně rozmístěny na povrchu měřeného objektu,
- umístění objektu na fotografiích-objekt by měl být přibližně ve středu fotografie, pokud to umožňují jeho rozměry, body umístěné na objektu by měly být přibližně rovnoměrně rozmístěny na fotografiích,
- vzdálenost pro pořizování snímků by měla být během měření přibližně konstantní,

- dodržení úrovní pro pořizování snímků-místa, odkud jsou snímky pořizovány, by měly být rovnoměrně rozmístěny okolo měřeného objektu,
- volba měřítkových tyčí – měly by mít délku přibližně rovnu maximálnímu rozměru měřeného objektu.

Určitá nepřesnost byla do měření vnesena tím, že některé nekódované body, které se nacházely na spodní straně měřeného dílu, byly špatně viditelné. Proto byly zachyceny pouze na dvou fotografiích a bylo nutné je ručně označit jako body na objektu.

Teplota ohřevu 150 °C je pravděpodobně hraniční teplota nedestruktivního měření, na kterou je možno použitý materiál ohřát. Při této teplotě se totiž v místě přechodu válcové části objevily na povrchu rýhy a pod povrchem nepatrné bublinky (obr. 5-1).



Obr. 5-1 Rýhy a bubliny na měřeném dílu po ohřevu na 150 °C

## 6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat chování plastového dílu při opakovaném ohřívání na různé teploty. Tento cíl se podařilo splnit. Splněny byly také dílčí cíle práce.

V teoretické části práce byly popsány metody, které se používají pro optickou digitalizaci objektů s důrazem na blízkou fotogrammetrii, fotogrammetrické systémy a jejich využití při měření deformací.

Pro měření byl navržen a vyroben přípravek, který byl nezbytný pro upevnění měřného dílu a následné určení deformace. Veškeré měření bylo provedeno systémem Tritop. Pro následné zpracování byl použit modul Tritop Deformation 6.3.

Z naměřených dat byl určen směr a velikost deformace plastového dílu ihned po jeho vytažení z pece, před tím než stihl vychladnout. Dále byla určena velikost a směr jeho deformace po vychladnutí. Pro jednotlivé teploty ohřevu byly stanoveny velikosti odchylek projektu a měřítkových tyčí, ze kterých je možné posoudit přesnost systému Tritop při opakovaném měření.

V průběhu práce byl také vytvořen návod, pro používání fotogrammetrických systémů Tritop 6.3 a Tritop 7.5. Návod popisuje jednotlivé kroky, od požadavků, které je nutné dodržet při volbě měřícího přípravku, přes přípravu digitalizovaných objektů, samotné měření a zpracování naměřených dat, až po tvorbu zprávy z naměřených údajů.

Výsledky uvedené v této práci mohou v navazujícím studiu nebo ve cvičeních sloužit, pro porovnání s výsledky deformace určené metodou konečných prvků. Vytvořený návod může studentům sloužit ve cvičeních, aby samostatně dokázali provést obdobné měření a vyhodnocení deformace součásti zatížené silově nebo tepelně.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. p. 510. ISBN 978-184995-057-2.
- [2] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 200 s. ISBN 9788001042496.
- [3] PAVELKA, Karel a Jindřich HODAČ. *Fotogrammetrie 3: digitální metody a laserové skenování*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2008, 190 s. ISBN 9788001039786.
- [4] SHARPE, William N. *Springer handbook of experimental solid mechanics. 1. Ed. Berlin: Springer, 2008, s. 565-600. ISBN 9780387268835.*
- [5] SHEKAR, Shashi a Hui XIONG. *Encyclopedia of GIS: with 90 tables. 1. Ed. New York, NY: Springer, 2008, s. 855-860. ISBN 9780387308586.*
- [6] REMONDINO, Fabio a Sabry EL-HAKIM. Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record*. 2006, roč. 21, č. 115, s. 269-291. ISSN 0031868x. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>.
- [7] TRITOP Professional V7.5 Manual: Photogrammetry - Basic, Inspection - Basic. Braunschweig (Germany): Gom, mbH, 2011.
- [8] TRITOP - User Information: Photogrammetric Cameras Nikon D300 and D300s. Braunschweig (Germany): Gom, mbH, 2008.
- [9] Interferometry. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 2007-04-01 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Interferometer.svg>
- [10] FRASER, Clive S a Björn RIEDEL. Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000, roč. 55, č. 4, s. 268-276. ISSN 09242716. DOI: 10.1016/S0924-2716(00)00024-1. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271600000241>
- [11] XIAO, Zhenzhong, Jin LIANG, Dehong YU a Anand ASUNDI. Large field-of-view deformation measurement for transmission tower based on close-range photogrammetry. *Measurement*. 2011, roč. 44, č. 9, 1705–1712. ISSN 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.07.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224111002272>

- [12] GLASER, R., V. CACCESE a M. SHAHINPOOR. Shape Monitoring of a Beam Structure from Measured Strain or Curvature. *Experimental Mechanics*. 2012, roč. 52, č. 6, s. 591-606. ISSN 0014-4851. DOI: 10.1007/s11340-011-9523-y. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11340-011-9523-y>
- [13] GOM mbH. *Deformation Analysis of Car Components*. 2009. Dostupné z: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/car\\_deformation\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/car_deformation_EN.pdf)
- [14] GOM mbH. *Development of a Dimensionally Stable Lightweight Structure for the LISA Pathfinder Science Module*. 2008. Dostupné z: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/lisa\\_pathfinder\\_scm\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/lisa_pathfinder_scm_EN.pdf)
- [15] GOM mbH. *3D Digitizing of the X-38 Space Vehicle*. 2008. Dostupné z: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/x38\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/x38_EN.pdf)
- [16] NEEDHAM, Jeff a Ben DASH. Dynamic deformation monitoring of a transmission tower undergoing failure testing by close range terrestrial photogrammetry. In: *FIG Working Week 2012: Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage* [online]. 2012 [cit. 30.3.2013]. Dostupné z: [http://www.fig.net/pub/fig2012/papers/ts05h/TS05H\\_needham\\_dash\\_5867.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2012/papers/ts05h/TS05H_needham_dash_5867.pdf)
- [17] GOM mbH. *Optical Measuring Techniques: GOM: Industrial 3D Measurement Techniques* [online]. 2012 [cit. 2013-01-25]. Dostupné z: <http://www.gom.com/home.html>
- [18] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 3. dopl. vyd. Brno: CERM, 2007, 170 s. ISBN 9788021433809.
- [19] XENON - Xenopren PP TD 20. CHEMISTS' COLLECTIVE XENON. XENON: Tworzywa barwione, kolorowe, sztuczne, koncentraty barwiące, producent tworzyw sztucznych [online]. 2009 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: [http://xenon.com.pl/pl/xenopren\\_pp\\_td\\_20\\_en.php](http://xenon.com.pl/pl/xenopren_pp_td_20_en.php)



**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN****8**

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
2D	Dvourozměrný
3D	Třírozměrný
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
GPS	Global Positioning System
Mpx	Megapixel
px	Pixel
Wi-Fi	Metoda bezdrátové komunikace v počítačových sítích

<b>Symbol</b>	<b>Popis</b>
$c$ (m)	vzdálenost obrazu
$Q1$ (mm)	první kvartil
$Q2, \tilde{x}$ (mm)	medián
$Q3$ (mm)	třetí kvartil
$X$ (m)	poloha objektu vzhledem k ose snímku
$h$ (m)	vzdálenost objektu
$m$ (-)	měřítko fotografie
$n$ (-)	rozsah souboru
$s$ (mm, px)	směrodatná odchylka
$s^2$ (mm <sup>2</sup> ,px <sup>2</sup> )	rozptyl
$x'$ (m)	poloha obrazu vzhledem k ose snímku
$x_i$ (mm)	hodnota deformace
$\bar{x}$ (mm,px)	aritmetický průměr

**9 SEZNAM OBRÁZKŮ**

<b>Obr. 0-1</b> Jedna z prvních fotogrammetrických kamer, Braunner 1859 [1].....	12
<b>Obr. 1-1</b> Rozdělení optických měřících metod (podle [6]).....	13
<b>Obr. 1-2</b> Princip fotogrammetrie [1].....	14
<b>Obr. 1-3</b> Dírková komora fotoaparátu [1].....	15
<b>Obr. 1-4</b> Princip měření doby letu [3].....	15
<b>Obr. 1-5</b> Princip interferometrie [9].....	16
<b>Obr. 3-1</b> Kompletní kryt vzduchového filtru .....	23
<b>Obr. 3-2</b> Měřený díl .....	23
<b>Obr. 3-3</b> Nekódované a kódované body, orientační kříže a měřítkové tyče [7] .....	24
<b>Obr. 3-4</b> Úrovně při pořizování snímků systémem Tritop [7] .....	25
<b>Obr. 3-5</b> Model měřícího přípravku .....	26
<b>Obr. 3-6</b> Body nacházející se mimo měřený objekt nebo přípravek.....	26
<b>Obr. 3-7</b> Body nalezené na měřeném objektu.....	27
<b>Obr. 3-8</b> krabicový diagram .....	27
<b>Obr. 4-1</b> Deformace měřeného dílu po vytažení z pece.....	29
<b>Obr. 4-2</b> Krabicový diagram deformace měřeného dílu po vytažení z pece .....	30
<b>Obr. 4-3</b> Deformace měřeného dílu po vychladnutí .....	31
<b>Obr. 4-4</b> Krabicový diagram deformace měřeného objektu po vychladnutí .....	31
<b>Obr. 4-5</b> Hodnoty odchylek jednotlivých měření s vyznačením jejich aritmetického průměru.....	34
<b>Obr. 4-6</b> Hodnoty odchylek měřítkových tyč s vyznačením jejich aritmetického průměru.....	35
<b>Obr. 5-1</b> Rýhy a bubliny na měřeném dílu po ohřevu na 150 °C .....	37

**10 SEZNAM TABULEK****10**

---

<b>Tab. 3-1</b> Parametry měřicího systému [17] .....	24
<b>Tab. 4-1</b> Deformace měřeného dílu po vytažení z pece.....	29
<b>Tab. 4-2</b> Deformace měřeného dílu po vychladnutí na pokojovou teplotu .....	30
<b>Tab. 4-3</b> Odchyly projektů v rámci jedné teploty ohřevu.....	32
<b>Tab. 4-4</b> Odchyly měřítkových tyčí v rámci jedné teploty ohřevu .....	33
<b>Tab. 5-1</b> Medián a maximální deformace při jednotlivých teplotách ohřevu.....	36

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

---

<b>Příloha 1</b> Deformace všech bodů na měřeném dílu po vytažení z pece .....	45
<b>Příloha 2</b> Deformace všech bodů na měřeném dílu po vychladnutí na pokojovou teplotu .....	47
<b>Příloha 3</b> Směry deformace při ohřevu na teplotu 50 °C.....	49
<b>Příloha 4</b> Směry deformace při ohřevu na teplotu 90 °C.....	50
<b>Příloha 5</b> Směry deformace při ohřevu na teplotu 130 °C.....	51
<b>Příloha 6</b> Směry deformace při ohřevu na teplotu 150 °C.....	52

### **Výkresová dokumentace:**

**Příloha 7** PŘÍPRAVEK..... 3-B-01/00

**Příloha 8** Návod pro měření deformací systémem Tritop 6.3

**Příloha 9** Návod pro měření deformací systémem Tritop 7.5

**Příloha 1** Deformace všech bodů na měřeném dílu po vytažení z pece

Poznámka: Text NaN znamená, že daný bod nebyl při měření nalezen

ID bodu	zatížení 50 °C	zatížení 90 °C	zatížení 130 °C	zatížení 150 °C
1100	NaN	0,043 3	0,332 0	0,104 6
1101	0,040 0	0,198 6	0,562 1	0,851 3
1102	0,054 5	0,137 4	0,474 1	0,369 1
1103	0,063 2	0,208 6	0,291 6	0,364 1
1104	0,052 9	0,194 1	0,510 9	0,573 0
1105	0,049 9	0,150 6	0,471 5	0,494 4
1106	0,050 2	0,151 7	0,511 3	NaN
1107	0,054 4	0,254 2	0,641 3	0,773 1
1108	0,050 8	0,125 5	0,470 7	0,439 7
1109	0,056 8	0,225 6	0,591 4	0,726 8
1110	0,054 4	0,176 6	0,472 5	0,781 7
1111	0,046 3	0,314 1	0,529 5	0,610 1
1112	0,055 1	0,299 9	0,617 1	0,749 0
1113	0,049 7	0,302 0	0,560 8	0,842 1
1114	0,052 9	0,350 0	0,714 5	NaN
1115	0,039 4	0,015 0	0,162 9	0,781 7
1116	0,030 5	0,117 7	0,356 3	0,748 9
1117	0,045 8	0,369 1	0,574 3	0,648 5
1118	0,038 3	0,356 5	0,550 6	NaN
1119	0,056 2	0,343 8	0,698 4	0,907 1
1120	0,047 2	0,381 2	0,591 3	0,755 3
1121	0,061 5	0,407 4	0,768 2	0,902 9
1122	0,183 9	0,918 1	0,672 5	0,933 1
1123	0,119 1	0,298 4	0,587 5	0,830 5
1124	0,067 4	0,414 8	0,685 2	0,820 0
1125	0,108 9	0,496 6	0,765 4	0,754 2
1126	NaN	0,409 7	0,971 8	0,849 8
1127	NaN	0,347 3	0,882 5	0,910 2
1128	0,047 3	0,367 1	0,564 0	0,726 8
1129	NaN	0,646 7	0,776 4	0,890 4
1130	0,049 8	0,424 5	0,495 4	0,856 9
1131	0,060 6	0,308 8	NaN	0,919 6
1132	NaN	0,708 8	0,809 0	0,927 3
1133	0,044 5	0,485 9	0,522 2	0,686 4
1134	0,019 9	0,211 8	0,465 7	NaN
1135	0,033 3	0,419 0	0,511 5	0,752 4

<b>ID bodu</b>	<b>zatížení 50 °C</b>	<b>zatížení 90 °C</b>	<b>zatížení 130 °C</b>	<b>zatížení 150 °C</b>
1136	0,035 6	0,346 8	0,509 4	NaN
1137	0,045 9	0,290 1	0,434 3	0,551 2
1138	0,054 3	0,138 2	0,135 1	0,574 1
1139	0,036 5	0,353 7	0,282 7	0,879 0
1140	0,043 8	0,461 2	0,533 3	0,886 8
1141	0,047 3	0,334 0	0,354 9	0,918 1
1142	NaN	NaN	NaN	0,758 4
1143	0,045 8	0,245 8	0,271 3	0,667 4
1144	0,055 5	0,268 4	0,336 6	0,498 3
1145	0,054 7	0,232 2	0,327 7	0,419 1
1146	0,045 8	0,223 3	0,266 6	0,668 8
1147	0,068 2	NaN	NaN	0,470 4
1148	0,020 4	0,274 7	0,250 3	NaN
1149	0,018 0	NaN	0,257 6	NaN

**Příloha 2** Deformace všech bodů na měřeném dílu po vychladnutí na pokojovou teplotu

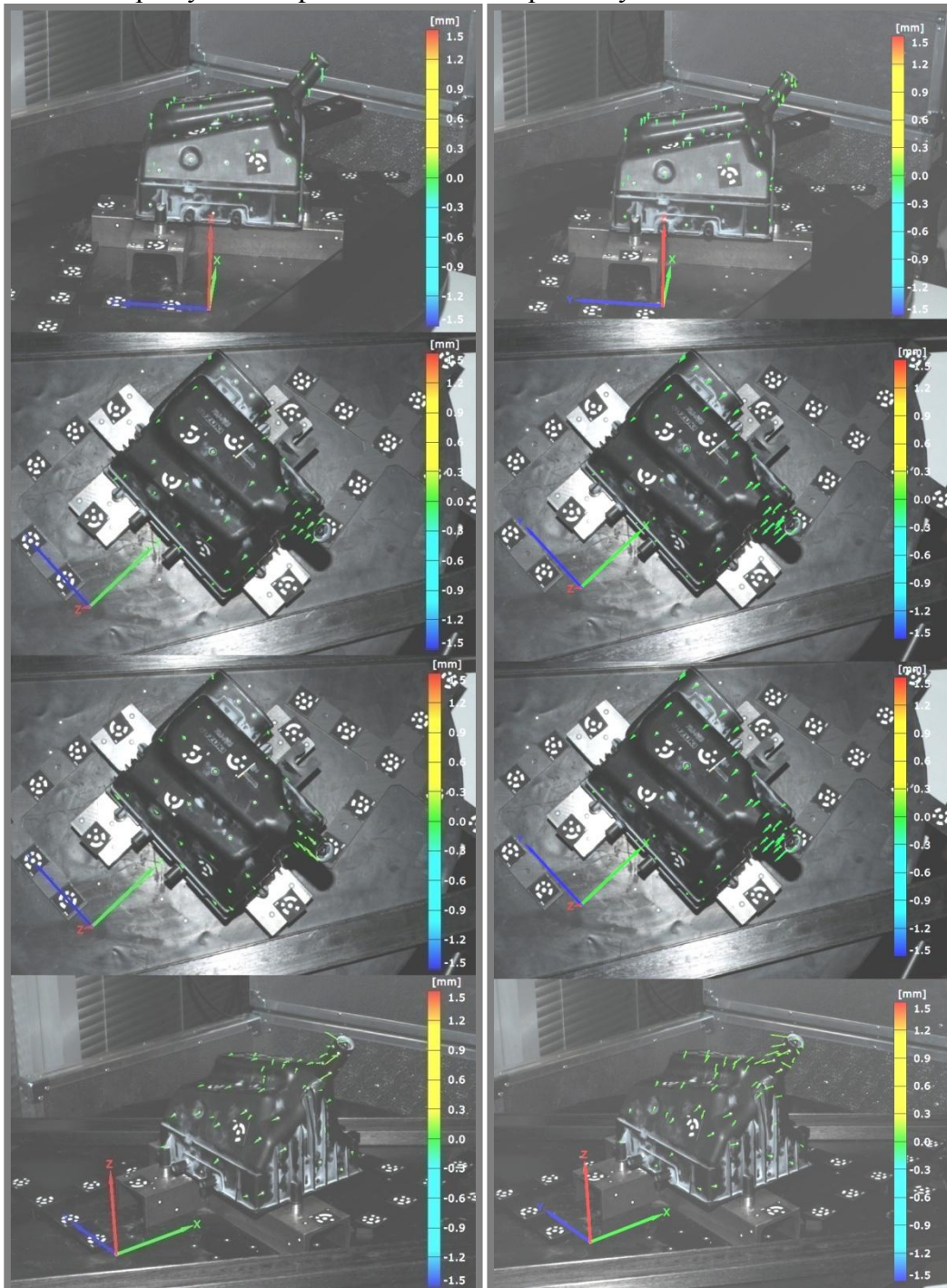
Poznámka: Text NaN znamená, že daný bod nebyl při měření nalezen

ID bodu	zatížení 50 °C	zatížení 90 °C	zatížení 130 °C	zatížení 150 °C
1100	0,067 7	0,184 5	0,585 8	0,766 8
1101	0,058 7	0,188 0	0,500 0	0,810 8
1102	0,072 4	0,229 1	0,553 1	0,816 8
1103	0,075 5	0,226 9	0,748 4	1,090 9
1104	0,056 9	0,191 2	0,329 2	0,365 9
1105	0,082 5	0,245 1	0,599 5	0,841 5
1106	0,038 2	0,164 8	0,282 0	0,428 2
1107	0,075 7	0,214 1	0,481 5	0,695 0
1108	0,050 3	0,155 7	0,302 2	NaN
1109	0,125 2	0,390 8	0,961 7	1,352 9
1110	0,074 8	0,234 3	0,542 5	NaN
1111	0,042 5	0,137 2	0,700 5	1,077 7
1112	0,118 9	0,386 7	0,931 5	1,319 7
1113	0,111 0	0,315 8	0,856 6	1,265 3
1114	0,042 1	0,109 2	0,211 8	0,290 9
1115	0,152 5	0,321 8	0,828 9	1,254 2
1116	0,111 0	0,345 4	0,855 5	1,326 5
1117	0,127 4	0,307 0	0,841 4	1,235 6
1118	0,151 7	0,416 2	0,923 4	1,200 9
1119	0,035 4	0,129 7	0,119 7	0,289 4
1120	0,074 0	0,387 5	0,965 3	1,333 6
1121	0,032 8	0,092 3	0,243 8	0,368 7
1122	0,115 5	0,354 8	0,846 9	1,204 6
1123	0,100 3	0,373 5	0,973 6	1,383 2
1124	0,066 9	0,178 9	0,418 6	0,621 4
1125	0,077 8	0,302 0	0,819 4	1,215 7
1126	0,100 9	0,361 4	0,865 3	1,242 6
1127	0,036 1	0,148 5	0,663 2	NaN
1128	0,061 1	0,250 9	0,703 6	0,974 9
1129	0,047 6	0,146 1	0,360 4	0,546 5
1130	0,084 8	0,256 0	0,648 2	0,949 7
1131	0,088 0	0,282 7	0,740 0	0,972 3
1132	0,072 4	0,275 7	0,766 7	1,026 3
1133	0,048 6	0,193 2	0,653 6	1,109 6
1134	0,075 6	0,214 3	0,535 5	0,757 0

<b>ID bodu</b>	<b>zatížení 50 °C</b>	<b>zatížení 90 °C</b>	<b>zatížení 130 °C</b>	<b>zatížení 150 °C</b>
1135	0,078 6	0,270 3	0,723 0	NaN
1136	0,053 1	0,258 8	0,807 1	1,340 5
1137	0,067 0	0,191 0	0,548 6	NaN
1138	0,071 5	0,271 1	0,756 4	1,183 5
1139	0,060 2	0,285 8	0,858 4	1,336 0
1140	0,082 2	0,232 9	0,676 5	1,038 8
1141	0,079 1	0,354 8	1,003 4	NaN
1142	0,068 4	0,245 6	0,687 4	NaN
1143	0,076 4	0,365 8	1,047 7	NaN
1144	0,092 3	0,321 6	0,914 8	1,328 5
1145	0,104 0	0,248 9	0,718 9	1,059 3
1146	0,094 9	0,303 1	0,866 2	1,310 9
1147	0,098 3	0,282 9	0,820 9	1,152 9
1148	0,097 0	0,273 9	0,801 8	1,161 6
1149	0,082 0	0,266 3	0,803 8	1,168 8



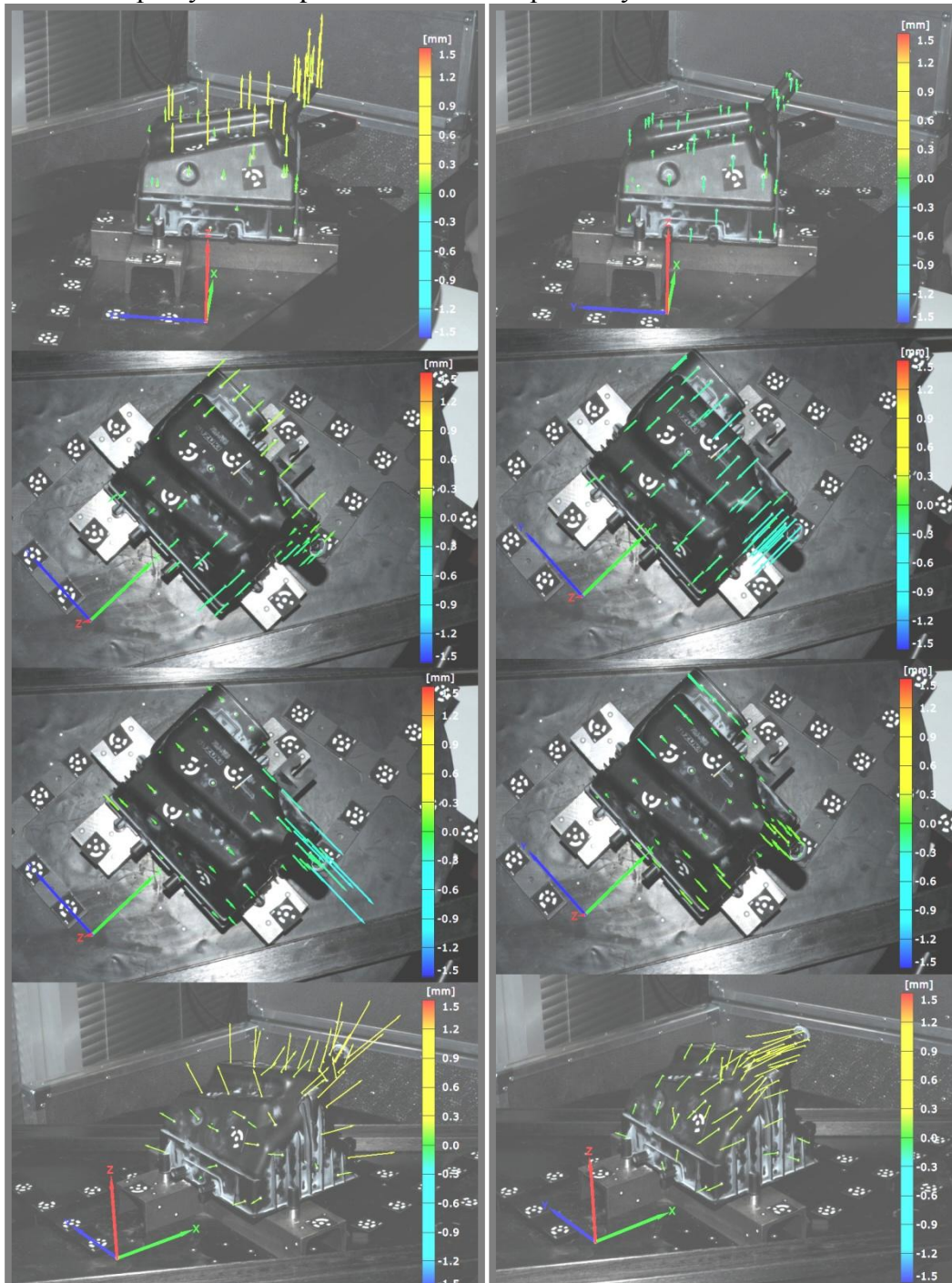
**Příloha 3** Směry deformace při ohřevu na teplotu 50 °C  
Deformace po vytažení z pece      Teplotní hystereze



**Příloha 4** Směry deformace při ohřevu na teplotu 90 °C

Deformace po vytažení z pece

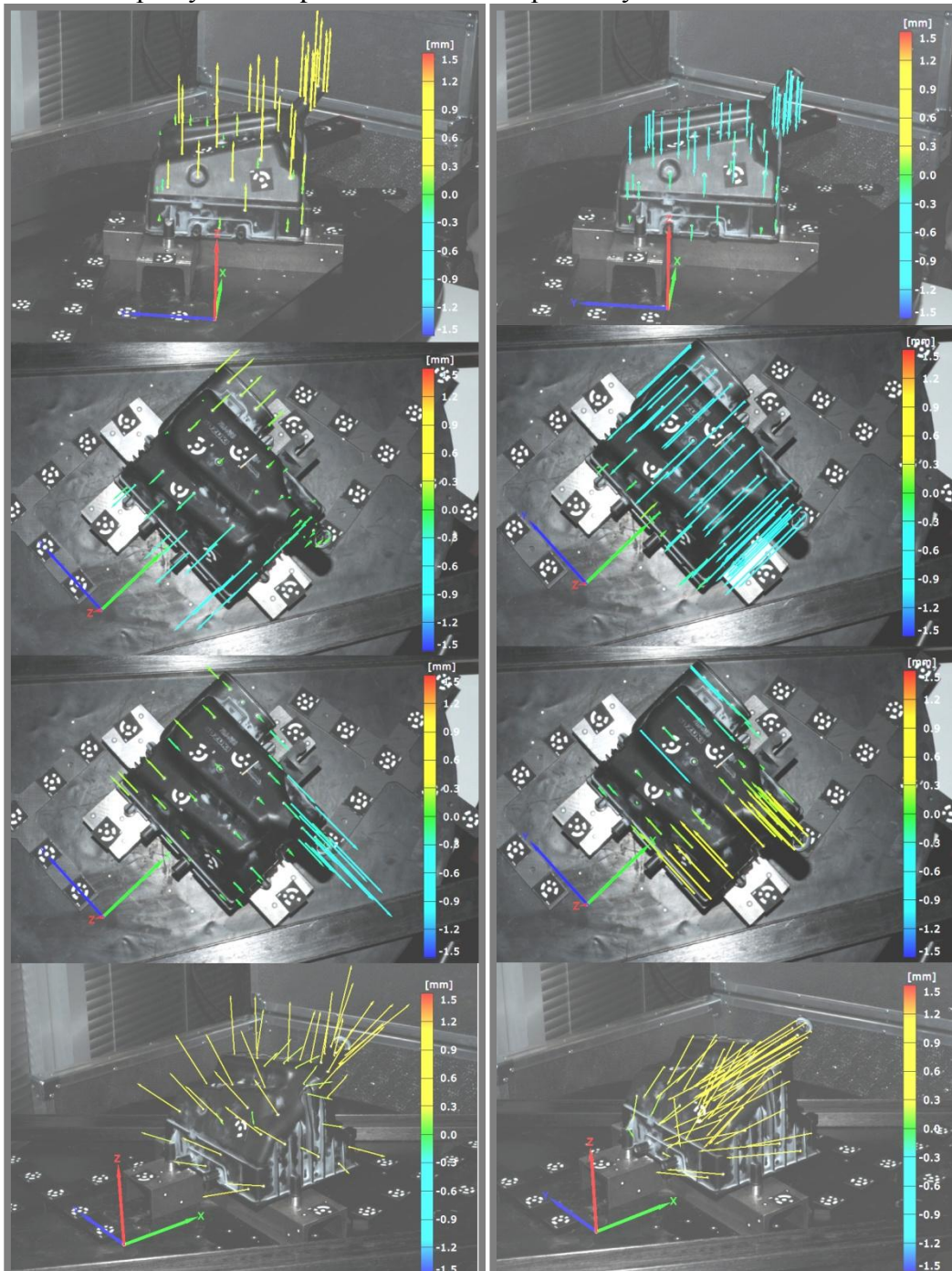
Teplotní hystereze



**Příloha 5** Směry deformace při ohřevu na teplotu 130 °C

Deformace po vytažení z pece

Teplotní hystereze



**Příloha 6** Směry deformace při ohřevu na teplotu 150 °C

Deformace po vytažení z pece

Teplotní hystereze

