



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**MĚŘENÍ DEFORMACE STATOROVÉHO KROUŽKU
TURBODMYCHADLA PŘI TEPLTNÍM ZATÍŽENÍ**

DEFORMATION MEASUREMENT OF TURBOCHARGER NOZZLE RING UNDER TEMPERATURE LOAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lucie Kovářová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	Bc. Lucie Kovářová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Měření deformace statorového kroužku turbodmychadla při teplotním zatížení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá měřením deformace statorového kroužku mechanismu variabilní regulace lopatek turbodmychadla v důsledku termálního zatížení. Práce vyžaduje ověření přesnosti měřicí metody pomocí komponentního testování a následný návrh konstrukčního řešení pro měření na turbodmychadle. Měřené výsledky deformace komponenty během reprezentativního teplotního cyklu poskytnou důležité informace potřebné pro její návrh, s předpokladem pozdějšího uplatnění pro validaci komplexního FEA modelu turbodmychadla.

Cíle diplomové práce:

Rešerše metod pro měření deformace za vysokých teplot.

Porovnání a zhodnocení jednotlivých měřících metod a výběr vhodné metody pro měření deformace na turbodmychadle.

Ověření přesnosti vybrané měřicí metody pomocí komponentního testování.

Návrh konstrukční úpravy turbodmychadla za účelem měření deformace za provozu.

Měření deformace komponenty během reprezentativního teplotního cyklu na testovacím zařízení zvaném „Gas stand“.

Seznam doporučené literatury:

HOFMANN, Karel. Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: přeplňování spalovacích motorů. 2 vyd. Brno: SNTL, 1985.

SCHRÖDER, Gottfried. Technická optika. 2 vyd. Praha: SNTL, 1981.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřením deformace statorového kroužku mechanismu variabilní regulace lopatek turbodmychadla při teplotním zatížení. V první části stručný popis turbodmychadla, v druhé části jsou uvedeny metody měření deformace. Hlavní část práce obsahuje provedení komponentního testování vybraných měřicích metod a dále aplikaci těchto měřicích metod při měření deformace statorového kroužku turbodmychadla. Test je proveden na testovacím zařízení s plynovým hořákem, který simuluje podmínky teplotního zatížení turbodmychadla, jímž je vystaveno na motoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Turbodmychadlo, statorový kroužek, deformace, laserový inteferometr, metoda DIC

ABSTRACT

The thesis is about deformation measurement of the nozzle ring in variable nozzle turbine mechanism under temperature load. In the first part, there is a brief description of the turbocharger. In the second part, methods of deformation measurement are mentioned there. The main part of the thesis includes component testing of selected measuring methods and their application for measuring deformation of the nozzle ring on the turbocharger. Test is done on a gas stand which simulates the thermal load conditions of the turbocharger, same which is exposed to on the engine.

KEYWORDS

Turbocharger, nozzle ring, deformation, laser interferometer, DIC method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOVÁŘOVÁ, L. *Měření deformace statorového kroužku turbodmyhadla při teplotním zatížení*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 64 s. Vedoucí diplomové práce Jozef Dluhoš

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jozefa Dlugoše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2019

.....

Lucie Kovářová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Jozefu Dlužošovi, Ph.D., za formální a faktické rady, které zajistily patřičnou úroveň práce, za jeho ochotu a vedení. Dále patří poděkování firmě Garrett Motion Inc. v Brně, bez které by tato práce nemohla vzniknout a také pracovníkům ve firmě, kteří pomáhali při uskutečnění experimentální části této práce, sdíleli své rady, zkušenosti a připomínky.

Především chci poděkovat rodině a blízkým, za jejich podporu během celého studia.

OBSAH

Úvod.....	9
1 Turbodmychadlo	10
2 Metody měření deformace.....	13
2.1 Mechanické metody.....	13
2.2 Elektrické metody.....	14
2.3 Optické metody	19
2.4 Ultrazvuková metoda.....	25
3 Porovnání metod a návrh měřicího konceptu	27
4 Komponentní test	31
4.1 Konstrukční řešení komponentního testu.....	31
4.2 Měření pomocí laserového interferometru.....	33
4.3 Měření kamerou.....	33
4.4 Test a vyhodnocení	35
4.5 Analytický výpočet roztažnosti	36
4.6 Vyhodnocení dat z pyrometru	37
4.7 Vyhodnocení dat z laserového interferometru	37
4.8 Vyhodnocení dat z optického měření kamerou	39
4.9 Zhodnocení.....	42
5 Návrh konstrukčního měření	44
5.1 3D model turbodmychadla a rozložení zařízení.....	44
5.2 Teplotní senzory	46
5.3 Výroba dílů.....	46
5.4 Adaptéry.....	48
5.5 Držáky laserových hlavic.....	49
6 Test.....	50
6.1 Testovací zařízení s plynovým hořákem.....	50
6.2 Cyklus zatížení	50
6.3 Termokamera.....	51
6.4 Měření laserem	52
6.5 Vyhodnocení dat.....	52
Závěr	58
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	64

ÚVOD

V současné době je většina spalovacích motorů přeplňovaná, a to z větší části pomocí turbodmychadla. To platí v případě dieselových i zážehových motorů. V první řadě je turbodmychadlo nedílnou součástí moderních automobilů kvůli efektivitě, druhým důvodem je zvýšení výkonu. Je tomu tak především kvůli přísným emisním normám, a také kvůli snaze o nízkou spotřebu. Většina automobilek volí tuto cestu při snaze využívat efektivnější a účinnější možnosti spalování. Díky turbodmychadlu se zvýší účinnost při zachování zdvihového objemu.

Turbodmychadlo je značně komplexní díl, jsou na něj kladeny vysoké nároky. Teploty spalování se zvyšují a s tím souvisí požadavky na teplotní stálost a odolnost použitých materiálů. Přesnost výroby je neméně důležitá, rotující části musí být velmi přesně vyváženy. Dále je tu také tlak na snižování výrobních nákladů, přesnost spolupráce s motorem a třeba i nároky na použití nových olejů.

Nedílnou součástí turbodmychadla je jeho regulace, která přizpůsobuje plnicí tlak aktuálním potřebám motoru. Historicky se více používala regulace s obtokovým kanálem, později přišla technologie variabilní geometrie turbíny. Ta se ale používala převážně u dieselových motorů, které mají nižší teploty výfukových plynů. S vývojem materiálů zažívá v současnosti regulace s variabilní geometrií turbíny rozvoj i u motorů zážehových.

Tato práce se zabývá deformací statorového kroužku, který nese naklápěcí lopatky u regulace variabilní geometrie turbíny. Deformace probíhá během teplotního zatížení. Výsledek měření deformace poslouží k návrhu uložení statorového kroužku.

1 TURBODMYCHADLO

Turbodmychadlo zvyšuje výkon motoru tím, že přivádí do sání motoru stlačený vzduch, který se smísí s palivem a spálí v motoru. Základní dvojicí součástí turbodmychadla tvoří kompresorové kolo namontované na jednom konci hřídele v kompresorové skříni a turbínové kolo na druhém konci hřídele umístěné v turbínové skříni.

Typicky je turbínová skříň oddělená od skříně kompresoru a mezi turbínovou a kompresorovou skříň je skříň ložisková, ve které je uloženo ložisko a hřídel. Tvar turbínové skříně definuje prstencová komora, která obklopuje turbínové kolo a usměřňuje výfukové plyny z motoru. Turbínové kolo je poháněno energií z proudících výfukových plynů a pohání kompresorové kolo. Kompresorové kolo nasává okolní vzduch, stlačuje ho a přeplňuje spalovací prostor. [1], [2]

Přínosy turbodmychadla:

- Vyšší střední efektivní tlak p_e [MPa]
- Vyšší točivý moment motoru M_t [N·m]
- Nižší měrná spotřeba paliva m_p [g·kW⁻¹·h⁻¹]
- Vyšší měrný výkon motoru P_v [kW·dm⁻³]

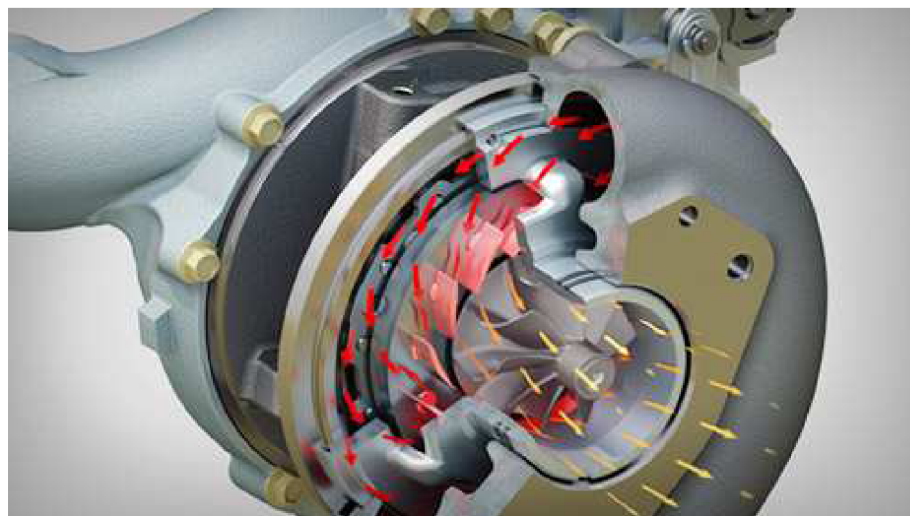
Mezi nevýhody patří:

- Zpoždění plnicího tlaku
- Protitlak ve výfukovém systému

Turbodmychadlo je vystaveno náročným provozním podmínkám. Během životního cyklu odolává vysokým teplotám a tlakům, působením vibrací od motoru a vozidla, musí dobře zvládat vysoké otáčky a rychle reagovat na změnu. [21]

Přehled o provozních podmínkách:

- Teplota vstupujících výfukových plynů z motoru až 1050°C
- Otáčky rotoru n_{TC} až 280 000 min⁻¹ (omezení konstrukcí kompresorového kola)
- Obvodové rychlosti kol v_0 až 580 m·s⁻¹



Obr. 1 Regulace naklápěcími lopatkami [49]

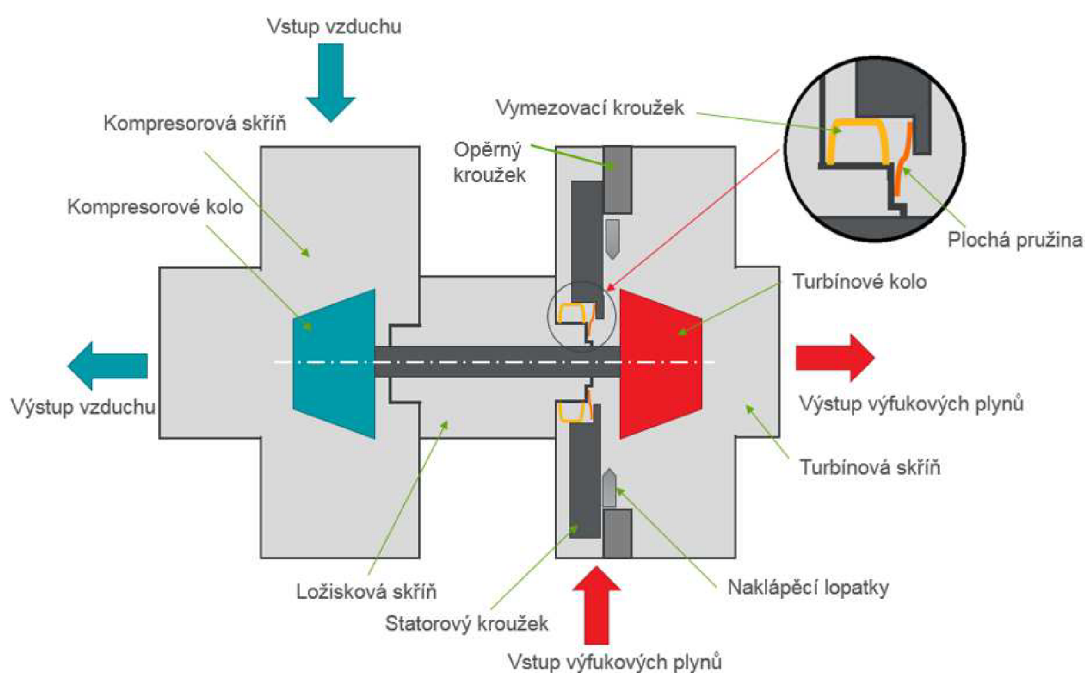
Při zvyšování výkonu motoru je nutné zajistit požadovaný výkon v celém provozním rozsahu a regulovat plnicí tlak. Jedním typem regulace je turbodmychadlo s regulací variabilní geometrií turbíny, která obsahuje variabilní lopatky v turbínové skříni pro regulaci toku výfukových plynů k turbínovému kolu (viz Obr. 1). Turbínové kolo je navrženo na nejvyšší hmotnostní tok a geometrie lopatek na střední oblast regulace. Dříve se tato technologie používala zejména u vznětových motorů, a to kvůli teplotám výfukových plynů, které jsou u zážehových motorů vyšší. Nyní se tento typ regulace díky odolnějším materiálům používá i u motorů zážehových. Prosazuje se hlavně z důvodu možnosti regulace tlaku v plném rozsahu otáček. Vlivem této variability je charakteristika turbíny popsána několika dílčími mapami pro různá natočení rozváděcích lopatek (běžně okolo 8). Dalším důvodem pro rozšíření tohoto typu regulace je využití Millerova cyklu. Tento pracovní cyklus má prodlouženou expanzi, při kterém je využíváno delší (popřípadě kratší) doby otevření sacích ventilů. Díky Millerově cyklu je zvýšena termodynamická účinnost motoru, snižují se teploty výfukových plynů, které snižují u regulace turbodmychadla pomocí variabilní geometrie turbíny nároky na odolnost použitých materiálů vůči vysokým teplotám. [3]

Při regulaci turbodmychadla se využívá principu rovnice kontinuity, menší průřez znamená vyšší rychlost tekutiny (v tomto případě výfukových plynů). Různé natočení rozváděcích lopatek mění úhel a velikost absolutní rychlosti plynů působících na turbínové kolo, které má stále stejnou průtočnou plochu. V nízkých otáčkách motoru je třeba zvýšit tlakový spád na turbínové kolo, aby bylo dosaženo vyššího točivého momentu. Rozváděcí lopatky se na statorovém kroužku natočí (přivřou se) a zmenší tak průřez tzn. zvýší rychlost proudění výfukových plynů. Proud plynů působí na vnějším průměru lopatek turbínového kola, zvýší se rychlost turbínového a kompresorového kola a tím i plnicí tlak, což umožňuje zvýšit točivý moment motoru. U vysokých otáček motoru se rozváděcí lopatky otevřou. Turbodmychadlo v tomto režimu pojme velký průtok výfukových plynů, dosáhne plnicího tlaku (který je v celém rozsahu přibližně konstantní), ale nepřesáhne jeho mezní hodnotu.

Nevýhodou jsou vysoké nároky na přesnost výroby mechanismu, které zvyšují jeho cenu. Natáčení rozváděcích lopatek se realizuje pneumaticky nebo pomocí krokového či lineárního elektromotoru.

Pro správnou funkci lopatek musí být statorový kroužek nesoucí lopatky dobře umístěn (radiálně i axiálně) a vystředěn vzhledem k poloze turbínového kola (viz Obr. 2). Stator je umístěn v prostředí s vysokou teplotou (až 1000°C), toto prostřední s tepelnou proměnlivostí způsobuje deformace, creep nebo plastizaci dílů. Těmto nežádoucím účinkům je vystavena zejména plochá pružina. Pružina axiálně předepíná statorový kroužek, vůči opěrnému kroužku, který je pevně spojen s turbínovou skříň. Radiálně je statorový kroužek vystředěn vymešovacím kroužkem. Jakmile plochá pružina ztratí svou schopnost aplikovat správnou axiální předepínací sílu na statorový kroužek, dochází k nežádoucím efektům. Správná velikost předepnutí statorového kroužku omezuje jeho vibrace, které způsobují nadměrná opotřebení, zejména naklápěcích lopatek a jiných pohyblivých částí, které jsou součástí mechanismu. Při současném zvyšování nároků na efektivitu, se kterou je spojena vysoká teplota a jízdních cyklech, které zahrnují rychlé náběhy teplot se zvyšují i nároky na přesnost a odolnost uložení statorového kroužku. Při úplné ztrátě předpětí může dojít k jeho posunutí a kolizi s turbínovým kolem.[4], [5]

Cílem této práce je experimentální měření deformace a posunu statorového kroužku, protože výsledky tohoto měření umožní předejít ztrátě předpětí správným nadimenzováním ploché pružiny. Na základě dat z měření o pohybu statorového kroužku bude zkalibrován výpočtový model, pomocí kterého se zajistí správný návrh.



Obr. 2 Turbodmychadlo s variabilní geometrií turbíny a jeho části

2 METODY MĚŘENÍ DEFORMACE

K vyřešení problému deformování satorového kroužku je třeba ověřit platnost výsledku výpočtového modelu pomocí experimentálního měření, případně zpřesnit jeho předpoklad. Rešeršní část je proto zacílena na možné metody měření deformace.

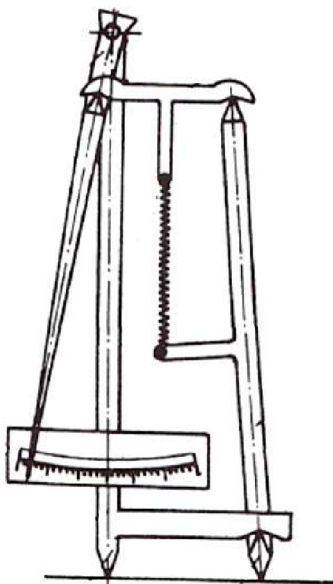
Metody měření deformace lze rozdělit do několika základních skupin. Metody kontaktní, mechanické a elektrické, a metody bezkontaktní optické.

2.1 MECHANICKÉ METODY

V historii se pro měření deformace používaly přístroje založené na mechanické bázi, využívalo se prvků jako je páka, závit, klín, převody a jejich kombinace. Tyto metody nejsou vhodné pro měření strmých gradientů deformace a dynamická měření. Přesnost ovlivňují faktory jako tření, ztrátový zdvih, hmotnost a setrvačnost. Není možný dálkový přenos. Nejznámějším mechanickým tenzometrem je tenzometr Huggenbergerův, viz Obr. 3. Zvětšení vzdálenosti mezi jeho dvěma břity je pákovým mechanismem převedeno na stupnici. Délková změna je díky pákovému mechanismu zvětšena až 3000krát.

Podobným zástupcem mechanických tenzometrů je tenzometr Martensův. Díky přidané optice dalekohledu je možné ze stupnice odečítat přesnější hodnoty deformace.

Další možností měření deformací mechanickou metodou je pomocí strunového tenzometru. Struna je napnutá a připevněná k měřenému tělesu ve dvou bodech. Deformace tělesa se přenáší na napjatou strunu, tím se mění její vlastní frekvence. Změna frekvence vlastních kmitů určí změnu vzdálenosti mezi pevnými body struny. [6]



Obr. 3 Huggenbergerův tenzometr [6]

2.2 ELEKTRICKÉ METODY

Jsou nejčastěji používanou metodou měření deformace (především odporová tenzometrie). Hlavní výhodou je jejich přesnost, citlivost a rychlost měření i při vysokém počtu vyšetřovaných míst. Výstupem může být analogový nebo digitální signál.

2.2.1 TENZOMETRY

Elektrické tenzometry přeměňují poměrné prodloužení měřené součásti na elektrickou veličinu. Umožňuje to dálkový přenos měřených údajů, a tím měření na těžce dostupných místech. Také umožňují měření dynamických dějů. Tenzometry lze dělit podle charakteru výstupní elektrické veličiny:

Indukční – poměrné prodloužení se transformuje na změnu impedance cívky. Princip je založen na změně indukčnosti, ta se uskutečňuje změnou velikosti vzduchové mezery v magnetickém obvodu, změnou polohy jádra v cívce nebo změnou magnetické permeability jádra.

Kapacitní – poměrné prodloužení se transformuje na změnu kapacity kondenzátoru. Základem snímače jsou dvě nebo více elektrod. V závislosti na měnící se délce vzorku se mění vzdálenost mezi elektrodami, a tím i jejich kapacita.

Odporové – poměrné prodloužení je transformováno na změnu odporu. [7]

ODPOROVÉ

Odporové tenzometry měří nepřímo mechanické napětí na povrchu součásti pomocí deformace tenzometru, která způsobuje změnu odporu. Využívají zúžení odporové dráhy při jejím protažení při neměnném měrném odporu materiálu. To vychází z faktu, že elektrický odpor vodiče je přímo závislý na délce a nepřímo úměrný jeho průřezu. Převážně jsou vyráběny ze slitiny konstantan (55% mědi a 45% cínu), protože její odpor se téměř nemění při změně teploty. Dalšími zástupci odporových tenzometrů jsou tenzometry uhlíkové.

Uhlíkové

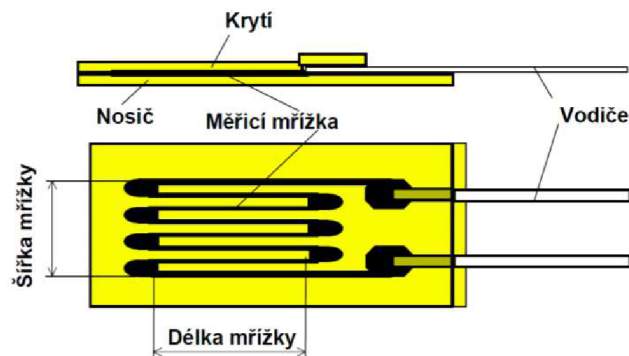
Uhlíkové destičky jsou připevněny k povrchu součásti. Změnou délky měřené součásti dochází ke změně tlaku mezi destičkami, čímž se mění jejich dotyková plocha a odpor.

Kovové

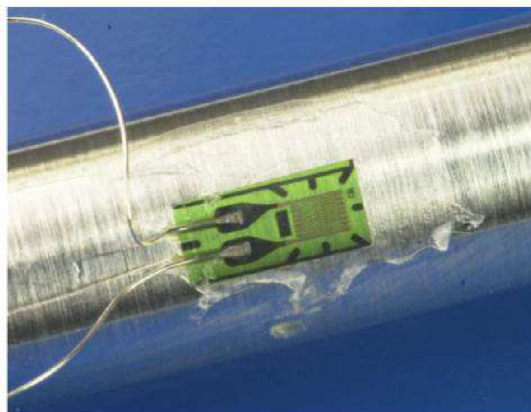
Používají se tenzometry s elektrickým odporem 120 až 600 Ω . Aby byla změna odporu co největší, používá se vodič ve tvaru meandru, aby byla zvětšena jeho efektivní délka. Při protažení vodiče dochází i k protažení tenzometru. Zvětší svoji délku a zmenší průřez. Změní se jeho odpor, při protažení se zvýší, při kompresi sníží.

Drátkové tenzometry jsou vyrobeny z velmi tenkého odporového drátu (0,01 až 0,02 mm), který má dobrou linearitu mezi odporovou změnou a poměrným prodloužením a zároveň malý součinitel tepelné roztažnosti. Drátek je nalepený na nevodivé podložce pevně spojené se vzorkem.

Fóliové tenzometry (viz Obr. 4) jsou vyrobeny z fólie o tloušťce 5 až 15 μm litograficky nanesené na podložce, viz Obr. 5. Oproti drátkovým snímačům lépe odvádí teplo, to umožňuje větší proudové zatížení, a tím se zvýší citlivost na změnu délky. Citlivost $\varepsilon_{\text{MIN}} = \text{cca } 1 \mu\text{m/m}$. Tento typ je dnes nejpoužívanější. [8]



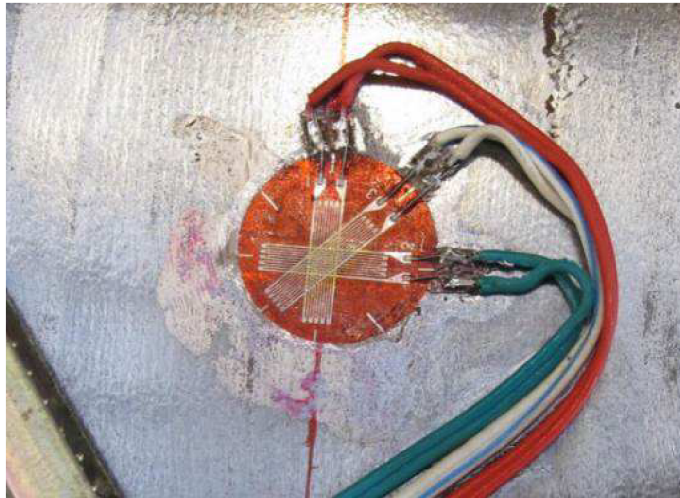
Obr. 4 Fóliový tenzometr [8]



Obr. 5 Fóliový tenzometr aplikovaný na měřené součásti [9]

Jednoduchý tenzometr měří deformaci pouze v jedné ose. V ose, která je shodná s podélnou osou senzoru. Kombinací tenzometrů do různých os lze měřit deformace ve více směrech, jednotlivé mřížky musí být galvanicky izolovány. [9], [6]

- Jednoduchý tenzometr – měření deformace v jednom směru
- Tenzometrické kříže – měří deformaci ve dvou kolmých směrech
- Tenzometrické šípky – měření smykových napětí a krouticích momentů
- Tenzometrické růžice – velikost a směr hlavních napětí na povrchu součásti viz Obr. 6
- Membránové – měření napětí na membránách
- Řetězce – pro měření gradientu napětí



Obr. 6 Tenzometrická růžice na měřené součásti [9]

Důležitý parametr tenzometru je citlivost. Je definována jako bezrozměrné číslo vyjadřující poměr mezi relativní změnou odporu a hodnotou poměrného prodloužení. [10]

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon \quad (1)$$

kde: R_0 je odpor tenzometru při výchozím stavu

ΔR je přírůstek odporu při poměrném prodloužení

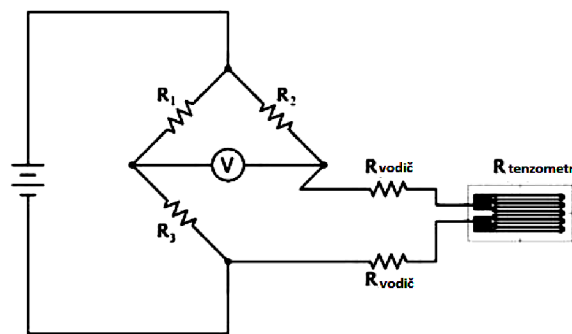
$\varepsilon (= \Delta l / l)$ je poměrné prodloužení

k je konstanta citlivosti tenzometru

K dalším parametrům patří jmenovitý odpor uváděný v ohmech a koeficient teplotní kompenzace uváděný v ppm (vyjadřuje poměrnou délkovou změnu materiálu na jeden teplotní stupeň). Ten vyjadřuje poměrnou změnu délky materiálu na jeden teplotní stupeň, délku aktivní části a maximální napětí můstku.

Deformace součástí jsou obecně velmi malé, to způsobí pouze malé změny v odporech tenzometrů. Z tohoto důvodu se pro přesnější měření používají můstkové metody, např. čtyřmůstek s jedním aktivním tenzometrem, půlmůstek se dvěma aktivními tenzometry apod.

Nejčastěji používaný je Wheatstonův můstek, viz Obr. 7. Skládá se ze dvou napěťových děličů. Odpor je posuzován podle velikosti výstupního napětí. Výstupní napětí je rozdíl výstupních napětí jednotlivých děličů napětí nezávisle na absolutní hodnotě napětí. Změna odporu kteréhokoliv ze čtyř odporů způsobí úměrnou změnu výstupního napětí. Citlivost se zvýší s počtem použitých tenzometrů. Například při použití čtyř tenzometrů jsou dva použity na tah a dva na tlak. Při změně teploty, která negativně ovlivňuje vodivost a způsobuje teplotní roztažnost, dvojice tenzometrů vyrovnají změnu a teplotní působení se neprojeví.



Obr. 7 Zapojení Wheatstoneova můstku

U těchto snímačů se při střídavém zatěžování projevuje hystereze. Jsou také ovlivňovány dalšími faktory jako např. vlhkost prostředí (snížení izolačního odporu vůči součásti), elektromagnetické pole (střídavé magnetické pole může způsobit indukci v přírodních kabelech), způsob zatěžování nebo geometrie měřené součásti. [10], [11]

POLOVODIČOVÉ

Tento typ tenzometrů je založen na piezoresistivním jevu, díky kterému mění svůj měrný odpor, viz Obr. 8. Ohmický odpor může být 60 až 1000 Ω .

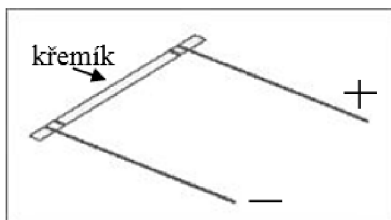
Tyto senzory se používají zejména pro dynamická měření. Využívají piezoelektrického jevu, který je založen na elastické deformaci a orientaci elektrických dipólů v krystalové struktuře. Piezokrystal generuje elektrické napětí při jeho deformaci, nebo opačně, deformuje se v elektrickém poli (elektrostrikce¹). Vzniklý elektrický náboj je přímo úměrný působící síle. S deformací krystalické mřížky působením vnější síly souvisí i změna měrného elektrického odporu – piezoresistivní jev. Existuje několik druhů materiálů s těmito vlastnostmi. Rozdělení podle struktury:

- Krystalické piezoelektrické látky (monokrystaly)
- Polykrystalické piezoelektrické látky (piezoelektrická keramika)
- Organické polymery (piezoelektrické polymery)

Při vysokých teplotách dochází u jakéhokoliv materiálu ke ztrátě těchto vlastností, důvodem je narušení uspořádání iontů. Ke ztrátě piezoelektrického jevu dochází skokově, tato teplota se nazývá Curieova. Je proto nezbytné chlazení snímače. Výhodou jsou jeho rozměry, jednoduchost a možnost měřit v nejširším frekvenčním rozsahu (až 100 kHz). Generují signál s chybou okolo 1%. Mezi negativní vlastnosti patří hystereze, vliv teploty, stárnutí a také nemohou být použity k měření statických sil.

¹ Závislost elektrostrikce je kvadratická na rozdíl od přímé závislosti piezoelektrického jevu.

Piezoelektrické senzory se používají jako měřiče deformace, síly, výchylky či tlaku nebo jako akcelerometry. Nemohou být použity pro měření statických sil, pouze dynamických, protože piezokrystal generuje napětí pouze v průběhu deformace. [12], [13], [14]



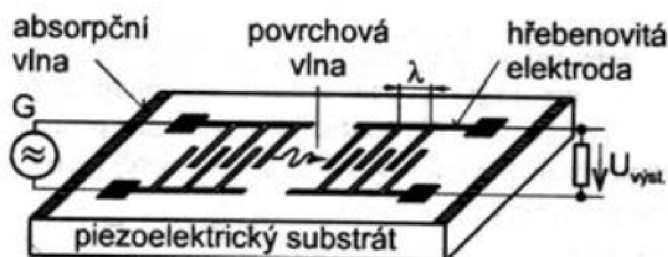
Obr. 8 Polovodičový tenzometr

2.2.2 SENZORY S POVRCHOVOU AKUSTICKOU VLNOU

Senzory mohou měřit pohyb, zrychlení, teplotu, tlak i chemické složení látek a další veličiny. Základem senzoru je piezoelektrická destička se dvěma hřebenovými elektrodami (interdigitálními měniči), viz Obr. 9. Akustická povrchová vlna se šíří podél povrchu pružného materiálu. Změnu elektrické energie na mechanickou ve formě akustické vlny zajišťuje piezoelektrický materiál. Vlna má podélnou a vertikální složku, která vzniká rozechvěním materiálu, na kterém je senzor připevněn. Při deformaci pružného prvku se mění mechanická rezonanční frekvence. Amplituda a rychlost povrchové vlny je různá podle vlastností materiálu nebo okolního prostředí. Obvykle exponenciálně klesá směrem do hloubky. Interdigitální převodníky mění akustickou vlnu na elektrickou a zpět díky piezoelektrickému jevu materiálu.

Výhodou senzoru s povrchovou akustickou vlnou je nízký útlum vlny při průchodu pevným materiálem, zachovává si konstantní rychlost.

Tento systém senzorů se používá v automobilovém průmyslu, např. pro monitorování tlaku v pneumatikách. [12], [15], [16], [17], [18]



Obr. 9 Senzor s povrchovou akustickou vlnou [15]

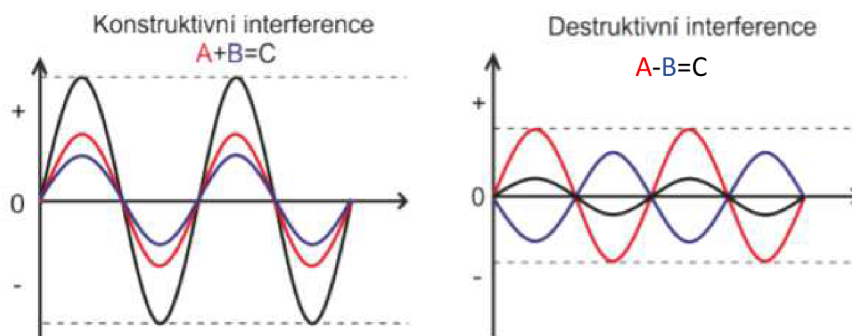
2.3 OPTICKÉ METODY

Světlo je podle Maxwellovy teorie elektromagnetické vlnění. Skládá se z magnetické a elektrické vlny, které kmitají v navzájem na sebe kolmých rovinách. Šíří se v příčných vlnách. Barvu světla určuje frekvence vlnění. Viditelné spektrum vlnových délek je 390 až 770 nm (fialová až červená).

Výhodou optických snímačů je bezkontaktnost a vyšší přesnost. Lze měřit podélnou i příčnou deformaci. Data mohou být zaznamenávána po celou dobu testu. Pořizovací cena je ale vyšší než u elektrických senzorů. Podmínkou je viditelnost vyšetřovaného místa.

2.3.1 LASEROVÉ INTERFEROMETRY

Interferometry jsou založeny na principu skládání nebo rušení dvou vlnění. Vlnění musí mít stejnou vlnovou délku (jsou závislé na využití monochromatických zdrojů světla), mohou však být fázově posunutá. Podle toho, jestli fázový posun nastává nebo ne, se jedná o konstruktivní či destruktivní interferenci. Při konstruktivní interferenci je fázové posunutí obou vlnění nulové, v případě destruktivní interference je vlnění opačné, viz Obr. 10. [22]

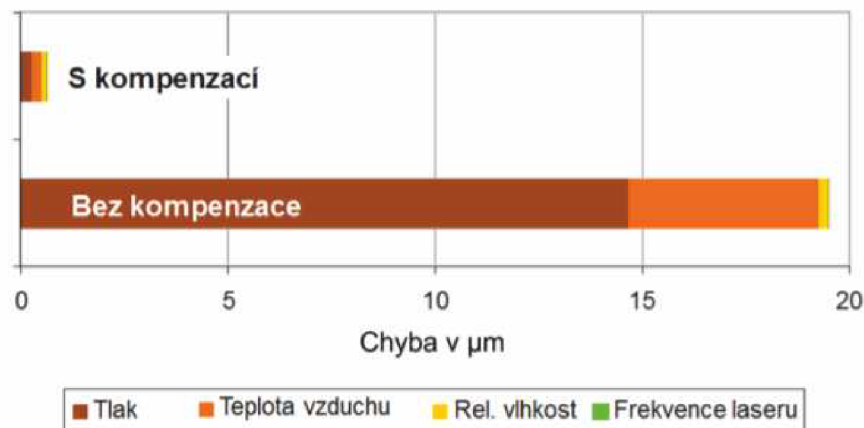


Obr. 10 Princip interference [24]

Zdrojem vlnění je u laserových interferometrů elektromagnetické záření ve formě koherentního, monochromatického úzkého svazku, nebo-li usměrněný paprsek tvořený z fotonů – laserový paprsek. Nejčastější jsou hélium-neonové lasery, laserové diody a vláknové lasery. [23]

Interferometry byly určeny především pro vysoce přesná měření vzdálenosti, rovinnosti, kolmosti a postupem času se přidala i měření rychlostí a zrychlení, s tím souvisí i měření vibrací. Jednou z výhod je, že mezi měřeným objektem a interferometrem může být velká vzdálenost. Přesnost může být až 1 μm , musíme ovšem počítat s kompenzační chybou.

Ke zvýšení přesnosti měření je zapotřebí kompenzační jednotka. Měření není většinou prováděno v ideálních podmínkách jako je vakuum, tlak vzduchu se liší s nadmořskou výškou a také vlhkost vzduchu je proměnná (jedná se především o vlastnosti, které ovlivňují index lomu světla). Z tohoto důvodu kompenzační jednotka na základě souboru dat přijatých ze snímačů kompenzuje naměřená data a tím zvyšuje výslednou přesnost, viz Obr. 11. [24]



Obr. 11 Vliv kompenzace na chybu měření [24]

Rozšířeným zástupcem této měřicí metody je laserový vibrometr, viz Obr. 12, což je dvoupaprskový laserový interferometr. Vibrometr měří fázový rozdíl mezi referenčním paprskem a měřicím paprskem. Měřicí paprsek je nastaven na zkoumaný objekt, odražené světlo od objektu je zpětně shromažďováno a porovnáváno s referenčním paprskem. Většina vibrometrů je heterodynních. K jednomu z paprsků se přidává kmitočtový posun o známých parametrech.

Měření je plynulé a bezkontaktní, má široký rozsah použití. Výhodou je vysoká přesnost, ale ta je spojena se složitou instalací a nastavením měřicího zařízení. Laser je schopen vyhodnocovat deformaci pouze ve směru tečném k dopadajícímu paprsku na objekt.

Existuje několik druhů laserových vibrometrů:

- Jednobodový vibrometr
- Skenovací vibrometr – k jednobodovému vibrometru jsou přidána vychylovací zrcátka, umožňuje to paprskem pohybovat po ploše objektu
- 3D vibrometr – k měření všech tří složek rychlosti objektu, má tři nezávislé paprsky
- Rotační vibrometr – slouží k měření otáček nebo úhlové rychlosti
- Diferenciální vibrometr – zachycuje rozdíl mezi dvěma místy na měřeném objektu
- Vícepaprskový vibrometr – měří rychlost objektu na několika místech
- Samosměšovací vibrometr – má kompaktní optickou hlavu, která obsahuje fotodiodu
- Spojitý vibrometr – zachycuje pohyb povrchu na více místech [25]



Obr. 12 Laserový vibrometr [26]

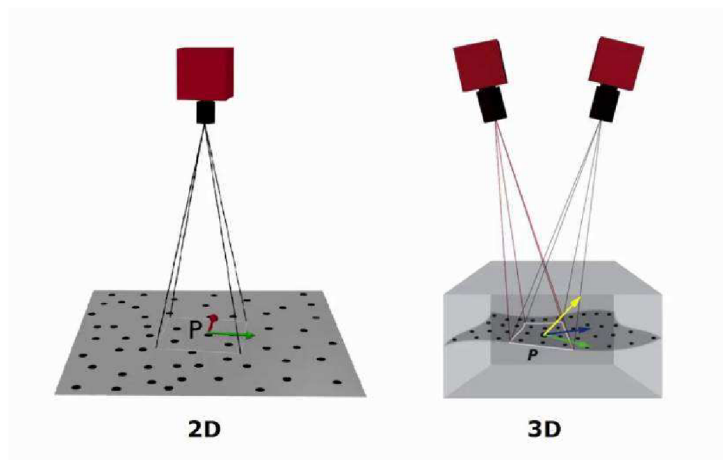
2.3.2 STEREOOMETRICKÉ A FOTOGAMMETRICKÉ METODY

Měření křivosti, deformace a napětí. Objekt je snímán pomocí dvou kamer z různých úhlů. Tato metoda měla uplatnění v geodézii, až později byla používána i pro měření deformací, posuvů či napětí.

Takovým zástupcem je metoda DIC. Výhodou je bezkontaktnost a vysoká citlivost, přičemž lze sledovat širokou škálu měřených veličin při zachycení množství bodů. Díky tomu je metoda schopná analyzovat i nehomogenní deformace ve zkoumané oblasti. Základem je digitální korelace obrazu, její rozvoj nastal spolu s pokrokem v oblasti digitálních fotografií.

Principem je snímání vzoru na povrchu součásti (např. bílý podklad a černé skrvny). Oblast součásti se rozdělí virtuální mřížkou. Vzniklé podoblasti, neboli fazety, slouží ke korelaci před a po deformaci součásti. Díky tomu je možné určit posunutí z deformace jednotlivých bodů. Přesnost je vyšší než je rozlišení kamery.

V případě rovinné deformace je zapotřebí jedna kamera kolmá na povrch objektu, tím je možné zjistit deformaci vzorku v rovnoběžné rovině s kamerou. Pro prostorovou analýzu je využíváno více kamer, při použití dvou je to stereoskopie, viz Obr. 13. Vzorek je nahráván z různých směrů. Po zadání poloh kamer, zvětšení objektivů, kalibračních parametrů apod. je systém schopen vypočítat absolutní pozice každého z bodů. [27]



Obr. 13 Znárodnění metody 2D a 3D-DIC [28]

VIDEOKAMERA

Bezkontaktní metoda pro vyšetřování deformací pomocí záznamu z kamery. Tato kamera ve vysokém rozlišení zaznamenává obraz v reálném čase. Na vzorek musí být naneseny kontrastní body, tečky nebo řádky, například pomocí sprejů.

Záznam se nahrává na přenosný disk, nebo lépe pomocí optického kabelu, který má vysokou přenosovou rychlost datového toku, do počítače. Nejdůležitějším faktorem této metody je kvalita záznamu. Posouzení deformace probíhá pomocí algoritmů ve vyhodnocovacích programech.

Program sleduje středy značek na vzorku a jejich pozici. Nesleduje pouze značky, ale jejich středy kvůli eliminaci chyb při protažení značek při deformování vzorku. Při výběru dvou značek se sleduje podélná deformace, při výběru čtyř bodů i příčná deformace. Celkovou deformaci algoritmus zjistí z pozice bodů před působením namáhání a na konci testu. [19]

VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA

Vysokorychlostní kamera, neboli HSC (high speed camera), vytváří obrazový záznam s vysokou frekvencí snímání. Kamery snímají s rychlostí od tisíce až po statisíce snímků za sekundu. Existují barevné i černobílé, přičemž černobílá je výhodnější z důvodu menšího objemu dat k přenesení a zpracování. Při frekvenci snímání 20 000 fps (snímků za sekundu) a rozlišení 250 x 200 bodů, se každou vteřinu ukládá 1GB dat. Datový tok je omezený, stejně jako úložiště. Z toho důvodu se se zvyšující rychlostí snímání snižuje rozlišení.

Vysokou frekvenci snímání lze využít především u rychlých dějů nebo u vysoké rychlosti zatěžování. K jednotlivým snímkům je přiřazen čas pořízení, porovnáním po sobě následujících snímků je možné porovnat změny tvaru.

Po dobu celého záznamu nesmí dojít ke změně vzdálenosti mezi kamerou a měřeným tělesem. Změna vzdálenosti znamená i změnu zorného pole. To by vneslo chybu do vyhodnocení deformace. Kamera musí být pevně uchycena. [19], [20]

2.3.3 FOTOELASTICIMETRIE

Metoda umožňuje zjišťování napěťových polí při zatěžování součástí. Je založena na dvou optických jevech, polarizaci světla a relativním dvojlomu.

Podle způsobu provedení měření ji lze rozdělit na rovinnou fotoelasticimetrii, analyzuje se rovinná a jednoosá napjatost na rovinných modelech, prostorovou fotoelasticimetrii, při které lze analyzovat napěťová pole v prostorovém modelu součásti nebo reflexní fotoelasticimetrii, která umožňuje analýzu napěťových polí na povrchu tělesa. Záření určité vlnové délky, které materiálem projde, se pomocí výpočetní techniky z opticky neviditelného spektra převede a zobrazí. Při rovinné a prostorové fotoelasticimetrii se napětí zobrazují na modelech z opticky aktivního materiálu, zatímco u reflexní fotoelasticimetrie se na povrch tělesa nalepí tenká aktivní vrstva. Takto je možné sledovat napěťová pole po celém povrchu součásti nebo v celém modelu, nejen v některých místech jako u tenzometrických měření, viz Obr. 14.

Polarizace světla nastává, když se kmitání světla usměrní do jedné roviny (při šíření světelného paprsku dochází k jeho kmitání v rovinách kolmých na směr šíření). K usměrnění může dojít odrazem, lomem nebo dvojlomem. V praxi se polarizace světelného paprsku uskutečňuje díky polarizátoru. Dočasný dvojlom vzniká vyvoláním umělé anizotropie u izotropních materiálů. Nejprve se světlo šíří všemi směry stejnou rychlostí, po deformaci součásti se světelný paprsek začne šířit různou rychlostí do různých směrů. K dočasnému dvojlomu může dojít i vlivem zbytkových napětí, které vznikají při výrobním procesu.

Napětí v tělese se zobrazí po umístění vzorku mezi dva zkřížené polarizační filtry. Pokud ve vzorku není napětí, nedochází ke dvojlomu a vzniká tmavé pole. Při výskytu napětí se objeví izokliny a izochromaty. Izokliny jsou tmavá místa, která znázorňují směry hlavních napětí. Isochromaty jsou barevné oblasti, zobrazují místa s rozdílným napětím. Pro jednotlivé odstíny barev je rozdíl napětí konstantní. [31], [32], [33], [34]

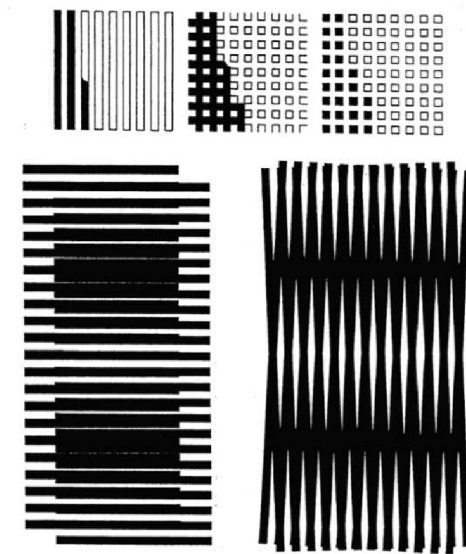


Obr. 14 Fotoelasticimetrie [29]

2.3.4 MŘÍŽKOVÉ A MOIRÉ METODY

Metody jsou založeny na interferenci světla na optických mřížkách. Průchodem světla vznikne rozdíl mezi deformovanou měřicí a referenční mřížkou, vytvoří se moiré pruhy. První mřížka je pevně spojena s povrchem součásti, při deformaci součásti dojde i k deformaci mřížky. Druhá referenční mřížka se přiloží na mřížku první. Při prosvícení materiálu lze po zatížení pozorovat deformaci na první mřížce díky vzniku tmavých a světlých pruhů – moiré pruhů. Tím získáme velikost posuvů bodů na povrchu součásti.

Existuje více druhů mřížek, které se pro měření mohou použít, viz Obr. 15. Mřížka čárová má široké tmavé a světlé pruhy, dále mřížky s nestejně širokými pruhy, mřížky bodové a křížové. [34]



Obr. 15 Různé druhy mřížek [34]

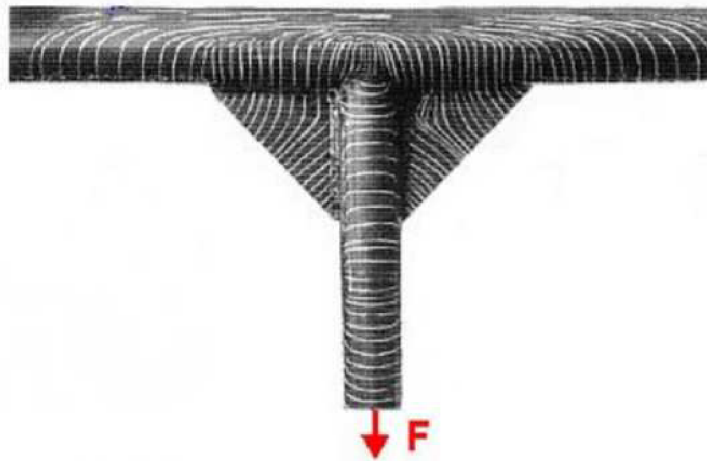
2.3.5 METODA KŘEHKÝCH LAKŮ

Technika křehkého laku pro napětíovou analýzu a deformace funguje na principu porušení a popraskání vrstvy křehkého povlaku, který byl aplikován na zkoumaný povrch. Povlak se nastříká na povrch a nechá se vytvrdit vzduchem nebo teplem, aby se dosáhlo jeho křehkých vlastností. Když dojde k zatížení součásti, povlak popraská. K popraskání dochází tam, kde je napětí největší, tím zjistíme místa koncentrace napětí. Trhliny uvádějí směr maximální deformace v těchto bodech, protože jsou vždy kolmé ke směru hlavního napětí, viz Obr. 16. Postup je jednoduchý a relativně levný, na nejkomplicovanějších tvarech jsou okamžité kvalitativní informace o pozici a koncentraci napětí. Ovšem přesnost je pouze okolo 10 až 20%, protože je ovlivněna velkým množstvím faktorů jako je teplota, vlhkost, tloušťka laku apod. Tato metoda se používá například ke zjištění míst, kde je vhodné umístit tenzometry. Praskliny jsou často viditelné bez jakékoli dodatečné pomůcky.

Povrch součásti musí být hladký a čistý. Nanášení laku závisí na typu použitého laku. Může být nastříkán nebo natřen, obecně je výhodnější nástřík, kdy vzniká rovnoměrnější tloušťka

povlaku. Jiné typy laku jsou nanášeny ve formě vosku nebo prášku, přičemž vyžadují předehřev povrchu součásti. Optimální tloušťka laku je obvykle do 1 mm.

Aby bylo možné stanovit citlivost laku, a tím zjistit přesnější hodnoty o deformacích, je nutné potáhnout stejným způsobem jako zkoumanou součást i kalibrační tyčku, u které je známé rozložení napětí podél délky. Poté je tyčka stlačována, dokud nezačíná praskat lak, pozice, ve které začíná lak praskat, udává napětíovou citlivost laku. [35], [34]



Obr. 16 Popraskaný lak vlivem zatížení [36]

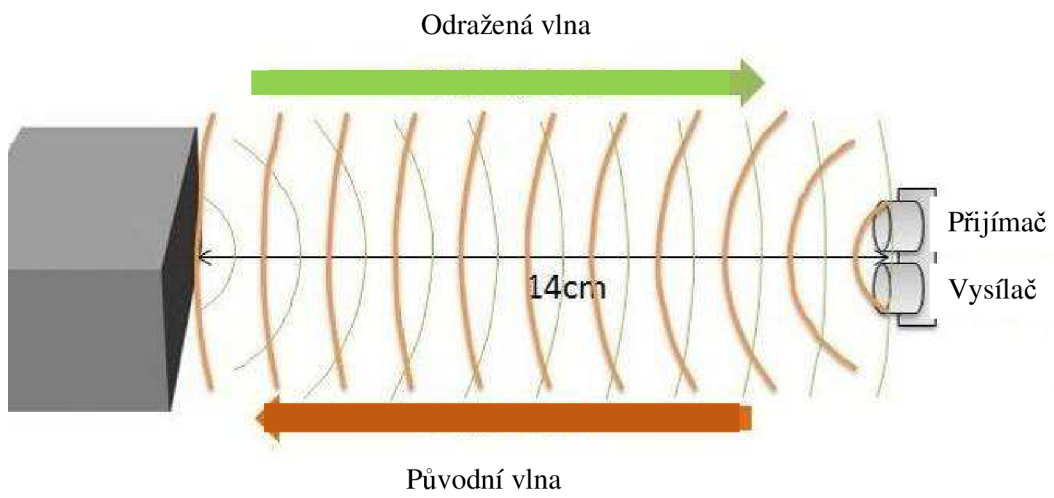
2.4 ULTRAZVUKOVÁ METODA

Pro měření vzdálenosti se používají ultrazvukové měřiče. Je to bezkontaktní nedestruktivní metoda fungující na principu změny rychlosti ultrazvukových vln. Pokud se součást ve směru ultrazvuku deformuje, rychlost šíření se mění. Na tomto principu fungují dvě metody, průchodová a impulsová odrazová.

Metoda průchodová měří procházející akustický tlak nebo dobu průchodu ultrazvukových vln. Má dvě souosé sondy na protilehlých stranách zkoumaného prostředí, jedna sonda je vysílač vlnění, druhá přijímač.

Metoda impulsová odrazová měří dobu průchodu a akustický tlak odraženého impulsu. Má jednu sondu, která je zároveň vysílač i přijímač. Vzdálenost je určena dobou od vyslání impulsu po přijetí odraženého vlnění, viz Obr. 17.

Tato metoda je vhodná do náročných prostředí, kde se vyskytuje prach, pára, kouř apod. Nerozšířenější použití je detekce předmětů, detekují se i kapalné, sytké či průhledné materiály. Na druhou stranu má menší přesnost měření. Používá se převážně k měření větších vzdáleností, kdy je chyba okolo 5%. [37], [39], [40]



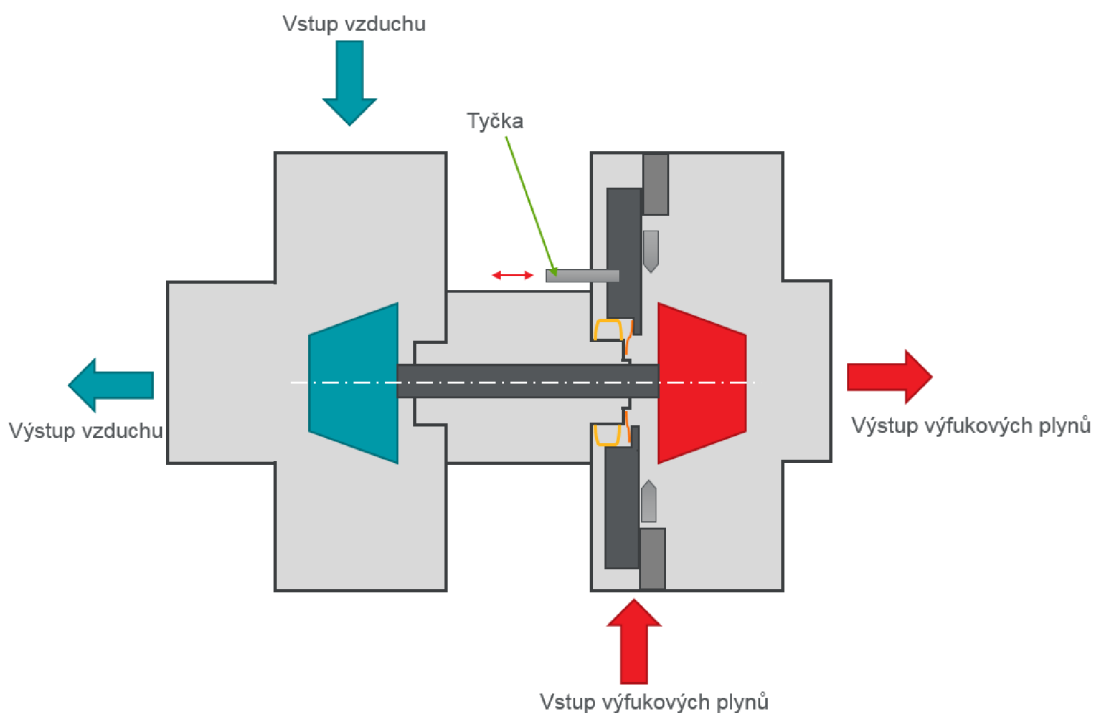
Obr. 17 Princip odražení ultrazvukových vln [38]

3 POROVNÁNÍ METOD A NÁVRH MĚŘICÍHO KONCEPTU

Po získání přehledu o možných měřicích metodách deformace, je nutné zvolit vhodnou metodu pro měření deformace statorového kroužku. Výběrová analýza bude provedena pomocí rozhodovací Pughovy matice. Jako první je zapotřebí určit kritéria na použitou měřicí metodu pro řešení konkrétního případu.

Deformace statorového kroužku, který bude vyšetřován, probíhá v uzavřeném prostoru mezi ložiskovou a turbínovou skříň. Další nepříznivé okolnosti pro měření této deformace během testu na testovacím zařízení s plynovým hořákem (viz kapitola 6) jsou také vysoká teplota, nečistoty proudících plynů, vibrace od otáčejícího se rotoru apod. Z těchto důvodů je jako možné řešení problému uvažováno přenesení deformace vně turbodmychadla, kde je okolní prostředí příznivější, tím se také zvyšuje okruh použitelných měřicích metod.

Návrh řešení spočívá v zašroubování pomocné tyčky do statorového kroužku. Tímto způsobem je deformace statorového kroužku převedena na pohyb vně jednotky, viz Obr. 18. Deformace statorového kroužku je převedena na relativní pohyb pomocné tyčky vůči referenční ploše na ložiskové skříni. Axiální pohyb tyčky je předmětem měření.



Obr. 18 Schéma řešení měření deformace statorového kroužku

Pro tento koncept je třeba určit kritéria a požadavky na měřicí metodu. Důležitým parametrem je odolnost vůči teplotě. I když bude tyčka vyvedena mimo turbínovou skříň, její teplota bude stále velmi vysoká, bude zahřívána sálajícím teplem od povrchu turbínové skříně i přenosem tepla od měřeného statorového kroužku. Dále je nutná odolnost proti ostatním rušivým parametrům (nejen vysoká teplota, ale také vibrace, proudící vzduch, nečistoty a podobně, by mohly ovlivňovat měření), to nejlépe splňují bezdotykové měřicí metody. Samozřejmě, že zvolená metoda měření musí být nedestruktivní. Dalším důležitým omezením

je rozlišitelnost. Předpokládaný pohyb tyčky bude v řádech setin milimetru, proto musí mít měřicí metoda vysokou přesnost a malou chybu v měření. V neposlední řadě je důležitým faktorem dostupnost pořízení potřebných zařízení.

Rozhodovací matici tvoří určená kritéria ve sloupcích a metody z kapitoly 2 v řádcích. Hodnocení je bodově rozděleno od 1 do 5, přičemž 1 znamená nevhodnost použití a naopak 5 výbornou použitelnost, viz Tab. 1. Dvě metody s nejvyšším získaným součtem budou uvažovány dále pro experiment. Obě metody a jejich výsledky budou vzájemně porovnány, aby měl experiment co nejlepší výsledky.

Tab. 1 Pughova matice

Metoda		Požadavky					Součet		
		Název	Obrázek	Bezdotykovost	Odolnost vůči teplotě	Rozlišitelnost		Odolnost vůči rušení	Dostupnost
Elektrická	Mechanická			1	2	2	3	5	13
	Tenzometry			1	1	5	4	5	16
	Polovodičové			1	1	5	4	5	16
Optické	Senzor s povrchovou akustickou vlnou			1	1	5	3	5	15
	Laserový interferometr			5	5	5	4	2	21
	Digitální metoda			5	5	4	4	3	21
	Fotoelasticitmetrie			1	2	2	3	5	13
	Mřížková a Moiré metoda			1	1	4	3	5	14
	Metoda křehkých láků			1	3	1	1	5	11
Ultrazvuk			5	5	2	3	4	19	

Z Pughovy matice je zřejmé, že všechny kontaktní metody jsou vyřazeny převážně z důvodu vysokých teplot. Dále je omezující potřebná přesnost, která rovněž vyřadila z výběru množství metod. Na základě získaných informací a jejich výsledků byly vybrány dvě metody, laserový interferometr a digitální kamera.

4 KOMPONENTNÍ TEST

Cílem komponentního testu je porovnat přesnost měření předem vybraných měřicích metod, optické měření deformace pomocí vysokorychlostní kamery a pomocí laserového interferometru. Porovnání přesnosti měření je vyhodnoceno podle rozdílu mezi analyticky vypočtenou a experimentálně naměřenou hodnotou.

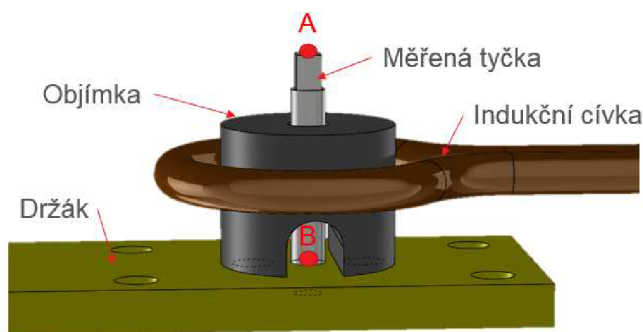
Porovnávanou hodnotou je tepelná roztažnost tyčky. Tepelná roztažnost je pozorována u dvou různých materiálů, nerezové oceli 1.4301 a korundové keramiky C795. Nerezová tyčka má větší koeficient teplotní roztažnosti, po zahřátí vykazuje větší rozdíl rozměrů. Kvůli tomu by vnášela do měření pohybu statorového kroužku vůči ložiskové skříni větší chybu, slouží jen pro porovnání přesnosti měřicích metod. Keramická, která má menší koeficient teplotní roztažnosti, bude použita při testu ke sledování pohybu statorového kroužku. Díky malé roztažnosti a malé tepelné vodivosti, vnáší do měření menší chyby. Tyčka je předem vyrobena, aby mohla být použita i v následném testu, kdy se zašroubuje do statorového kroužku turbodmychadla a bude se díky ní sledovat axiální pohyb statorového kroužku při tepelném zatížení proměnném v čase.

Tyčka je vyrobená ze slinuté korundové keramiky a má podle výrobce koeficient teplotní roztažnosti $6 \text{ až } 8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ při teplotě $20 \text{ až } 600^\circ\text{C}$ (uvažována je hodnota platná pro vyšší teploty). Její délkový rozměr je 35 mm a průměr 5 mm. [41]

4.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KOMPONENTNÍHO TESTU

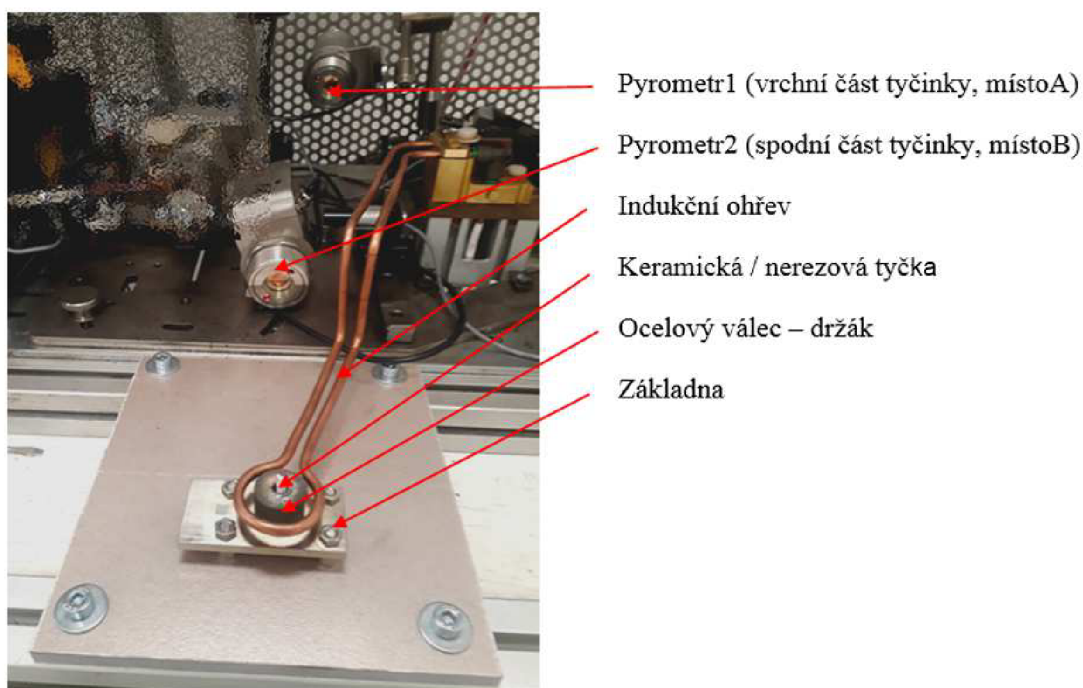
Pro porovnání roztažnosti mezi analytickou a experimentální roztažností, je třeba u komponentního testu nastavit podmínky testování tak, aby minimalizovaly odchylky podmínek měření. Ohřev na požadovanou teplotu probíhá rovnoměrně po celé délce tyčky pomocí indukce. Tyčka je stabilně a pevně uchycena. Je důležité mít čisté, bezprašné prostředí, bez působení vibrací.

Konstrukční řešení je provedeno v softwarovém prostředí Solidworks, viz Obr. 19. Pro pevné uchycení je pro tyčku navržen držák, do kterého se tyčka zašroubuje, stejně jako do statorového kroužku. Pro rovnoměrný ohřev je vymodelována objímka, která je indukčně zvenku ohřívána. Přenos tepla na tyčku bude zajištěn konvekcí tepla z objímky přes vzduchovou mezeru. Držák tyčky je pevně uchycen ke stolu pomocí šroubů.



Obr. 19 Model držáku v prostředí Solidworks

Po výrobě potřebných dílů měření proběhlo v prostorách laboratoří firmy Garrett na testovací lavici. Realizace je znázorněna na Obr. 20. Ke kontrole homogenity teplot na tyčce jsou přidány dva pyrometry, které měří teplotu tyčky na obou koncích.



Obr. 20 Příprava komponentního testu

Pyrometr je přístroj pro bezkontaktní měření teploty. Využívá elektromagnetické záření (infračervené světlo) k určení teploty součásti. Pokud má pyrometr určit teplotu povrchu co nejpřesněji, musí být znám emisní koeficient objektu. Z tohoto důvodu je na oba konce tyčky nanese speciální barva určená pro homogenizaci povrchu měřeného objektu s emisivitou 0,96. Pro snadné zamíření pyrometrů je k dispozici laserový zaměřovač. Dva viditelné červené paprsky označují skutečnou vzdálenost od měřeného povrchu součásti, viz Obr. 21. [42]



Obr. 21 Pyrometr se zaměřovačem [43]

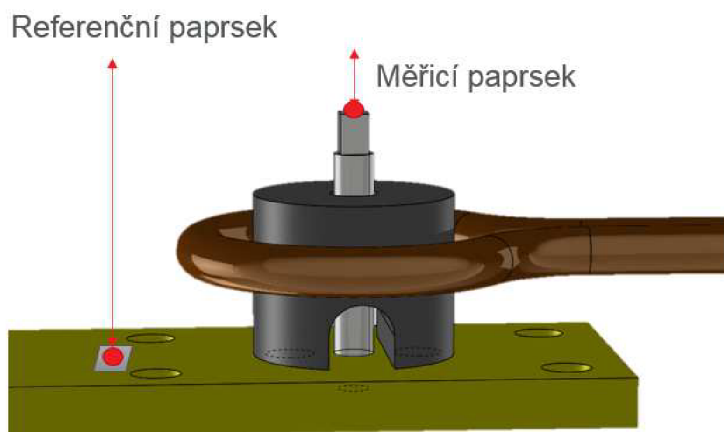
4.2 MĚŘENÍ POMOCÍ LASEROVÉHO INTERFEROMETRU

K měření prodloužení tyčky je použit interferometr od firmy Polytec, složený z modulárního kontroléru OFV-5000 a snímací hlavičky OFV-552.

Modulární interferometrický kontrolér OFV-5000 je založen na principu heterodynní interferometrie. Je schopen měřit se vzorkovací frekvencí až 24 MHz, rychlosti $\pm 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a výchylky od pikometrů až po metry. Paprsek hélíum-neonového laseru musí být namířen na zkoumaný objekt, kde se odrazí a rozptýlený se vrátí zpět. Vibrace nebo změna délky vytváří fázově nebo frekvenčně posunutý paprsek, ze kterého lze v jednotce vyhodnotit informace o objektu. Z frekvenčně modulovaného signálu získáváme informace o rychlostech, z fázové modulace získáme data polohová. Přesnost s použitím výchylkového dekodéru uvnitř kontroléru je až 15 nm ve frekvenčním rozsahu do 350 kHz.

Snímací hlavička OFV-552 obsahuje zdroj laserového paprsku. Díky dvěma paprskům umožňují hlavičky přímé měření rozdílu mezi dvěma sledovanými body. S kontrolérem jsou propojeny kabelem, signál je zpracováván se vzorkovací frekvencí 100 Hz. Snímací hlavička umožňuje automatické ostření například z kontroléru nebo vzdáleně přes sběrnici z počítače i manuální ostření paprsku přímo na objektivu. Hlavička používá viditelný laser, který je bezpečný pro zrak a zajišťuje dobrou optickou citlivost, umožňuje měřit intenzitu přijímaného signálu. [25], [44]

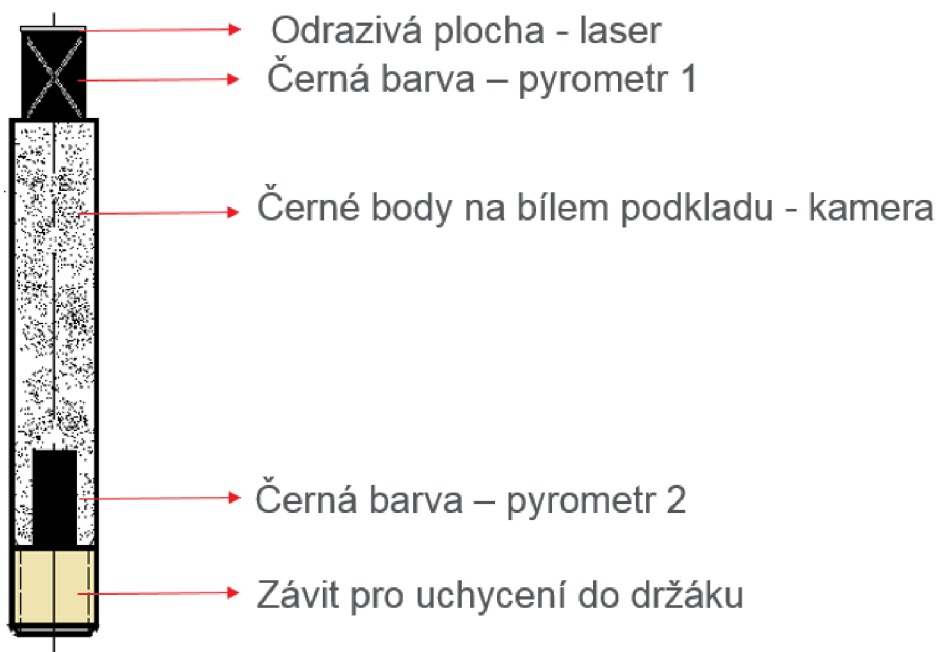
Jeden paprsek je zacílen na vrchní část tyčky, druhý referenční paprsek je zaměřen na základní desku, viz Obr. 22. Z rozdílu těchto dvou signálů je získána roztažnost tyčky během celého jejího ohřevu. Výsledkem je tedy závislost prodloužení na čase.



Obr. 22 Zacílení laseru

4.3 MĚŘENÍ KAMEROU

Aby ze záznamu kamery bylo možné odečíst změnu délky, musí být na povrchu tyčky vytvořeny referenční body, viz Obr. 23. Základní nástřík byl vytvořen barvou s vysokou odrazivostí a tepelnou odolností do 800°C. Referenční body jsou vytvořeny rozprášením černého spreje s vysokou emisivitou. Dosažená jemnost rozprášení je velmi dobrá, velikost bodů je řádově v tisícinách milimetru.



Obr. 23 Příprava tyčky

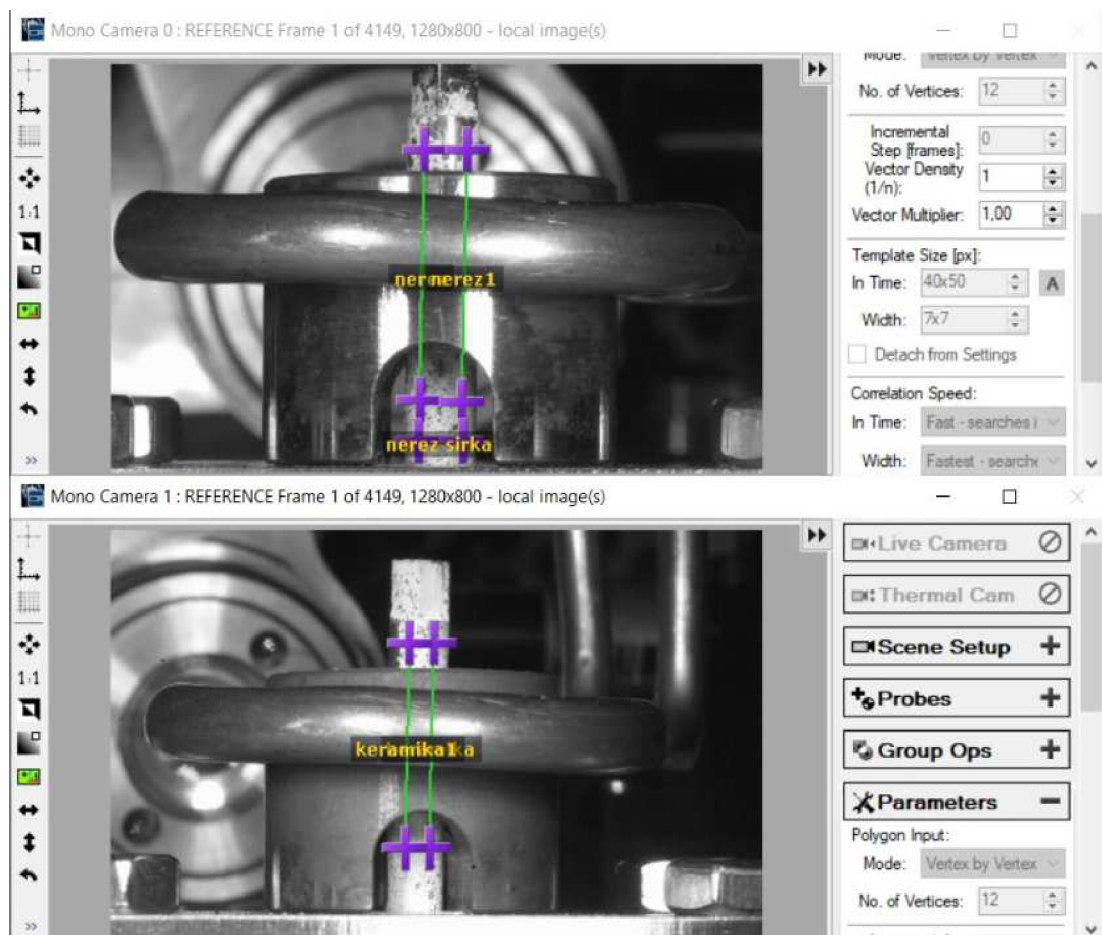
Jako záznamové zařízení je použita kamera Phantom Miro LAB 110. Jedná se o vysokorychlostní kameru s možností zaznamenávání 1600 snímků za sekundu a rozlišením 1280 x 800 pixelů a monochromatickým záznamem. Vnitřní paměť úložiště má kapacitu 120GB. Jednou z pokročilých funkcí je automatické spouštění, které je výhodné pro synchronizaci počátku měření. Pro zvýšení kontrastu záznamu jsou ke kameře připojena přídatná světla.

Vyhodnocení videozáznamu z kamery je provedeno v softwaru Mercury RT, který pracuje na principu DIC. Tento software je schopen analyzovat posuny, deformace, deformační rychlosti, zakřivení a další parametry. Pomocí jedné kamery lze měřit 2D souřadnice, toto je označováno jako 2D-DIC. Vyhodnocení může probíhat podle několika principů:

- Referenční obraz – U této metody je vybrán referenční obraz, nejjednodušší a nejvhodnější je vybrat obraz ze začátku série snímků, nedeformovaný a nezatížený měřený objekt. Pohyb nebo posunutí bodů je sledováno v čase, jednotlivé snímky se porovnávají s počátečním referenčním obrazem.
- Inkrementální korelace – V případě, že se během testu objekt výrazně mění, takže snímky deformovaného objektu nelze porovnávat s referenčním obrazem, může být použita inkrementální korelace. Každý snímek je porovnáván s jeho předchozím snímkem. Inkrementální korelace dává přírůstkové posuny mezi jednotlivými snímky. Celkový posun z počátečního referenčního obrazu nedeformovaného objektu se vypočte jako součet přírůstkových posunů. Nevýhodou této metody je, že se sčítáním posunů se sčítají také chyby. Chyba se zvyšuje s rostoucím počtem snímků.

- Dělená korelace – Kompromis mezi metodami. Série snímků může být rozdělena do dílčích sekcí. Uvnitř sekcí je posun vyhodnocován metodou referenčního obrazu a poté jsou jednotlivé posuny sčítány. [45], [46]

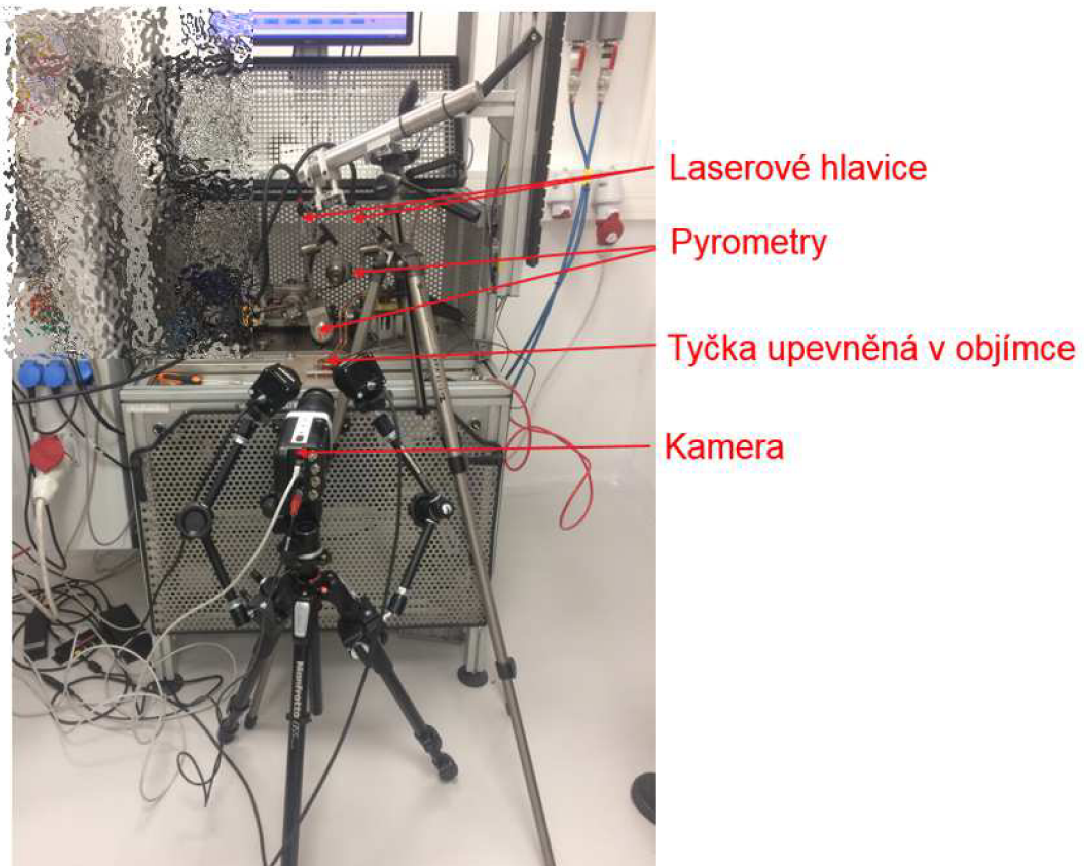
Pro účely komponentního testu je použita metoda vyhodnocování s referenčním obrazem, viz Obr. 24.



Obr. 24 Ukázka odečítání vzdálenosti v softwarovém prostředí

4.4 TEST A VYHODNOCENÍ

Na Obr. 25 je znázorněno rozložení zařízení na testovací lavici. Během testu je držák tyčky indukčně ohříván do té doby, než oba pyrometry naměří teplotu okolo 600°C. Celý ohřev je zaznamenáván kamerou a současně laserovým interferometrem. Po ohřátí na požadovanou teplotu se teplota tyčky sníží pomocí tlakového vzduchu a měření je pětkrát opakováno pro obě materiálové varianty.



Obr. 25 Připravený test na testovací lavici v laboratorních prostorách firmy Garrett

4.5 ANALYTICKÝ VÝPOČET ROZTAŽNOSTI

Ke stanovení přesnosti vybraných měřících metod je vypočítána roztažnost analyticky podle tabulkových hodnot. Výsledek analytického výpočtu slouží k porovnání naměřených hodnot. Prodloužení tyčky (Δl) je přímo úměrné počáteční délce tyčky (l_0), součiniteli tepelné roztažnosti (α) a změně teploty (Δt). Předpokládané roztažení při ohřevu na $t_2=600^\circ\text{C}$ (uvažujeme $t_1=20^\circ\text{C}$) vychází z rovnice [47]:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \quad (2)$$

- Keramická tyčka – koeficient teplotní roztažnosti z tabulkových hodnot dle výrobce:

$$\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

$$\Delta l = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 35 \cdot 580$$

$$\Delta l = 0,1624 \text{ mm}$$

- Nerezová tyčka z materiálu 1.4301 - koeficient teplotní roztažnosti z tabulkových hodnot dle výrobce:

$$\alpha = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$$

$$\Delta l = 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 35 \cdot 580$$

$$\Delta l = 0,365 \text{ mm}$$

4.6 VYHODNOCENÍ DAT Z PYROMETRU

Sledované hodnoty teploty na obou koncích tyčky se příliš neliší. Jako příklad v Tab. 2 jsou uvedeny teploty během jednoho z testů.

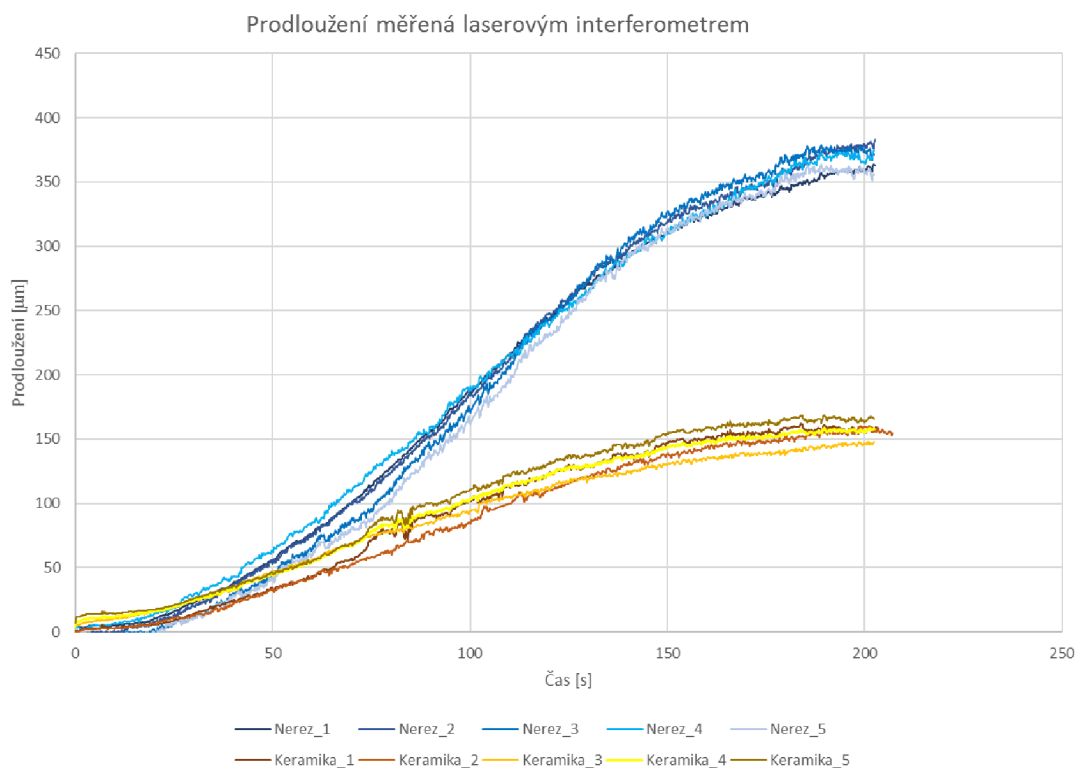
Tab. 2 Hodnoty teplot na konci měření

Teplota [°C]	Materiál	
	Nerezová	Keramická
Pyrometr 1	609	604
Pyrometr 2	588	598
Průměr	598.5	601

Z tabulky je zřejmé, že odchylka teploty po délce tyčky při ohřevu na 600°C se liší o 11°C v případě nerezové tyčky a o 6°C v případě keramické tyčky. Rozdíl teploty je mezi 1 až 2%. Rozdíl teplot je zanedbán a uvažuje se rovnoměrné prohřátí tyčky po celé její délce.

4.7 VYHODNOCENÍ DAT Z LASEROVÉHO INTERFEROMETRU

Data z laserového interferometru z opakovaného měření nerezové tyčky i keramické tyčky jsou pro porovnání vložena do jediného grafu, viz Obr. 26.



Obr. 26 Závislost roztažnosti v čase při zahřívání zachycená laserovým interferometrem

Z grafu lze vyčíst prodloužení na konci ohřevu na 600°C zapsané do Tab. 3.

Tab. 3 Prodloužení tyček na konci ohřevu

Test	Prodloužení [μm]	Průměr [μm]
Nerezová_1	363	370
Nerezová_2	381	
Nerezová_3	372	
Nerezová_4	375	
Nerezová_5	359	
Keramická_1	158	157
Keramická_2	154	
Keramická_3	148	
Keramická_4	158	
Keramická_5	166	

Pro nerezovou tyčku je určeno prodloužení jako průměrná hodnota z pěti testů 370 μm , pro keramickou 157 μm .

Po experimentálním změření hodnot je prodloužení tyčky přepočítáno na koeficient roztažnosti materiálu, který je porovnán s tabulkovými hodnotami.

- Keramická tyčka – prodloužení vycházející z experimentu je 0,157 mm.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t}$$

$$\alpha = \frac{0,157}{35 \cdot 578,5}$$

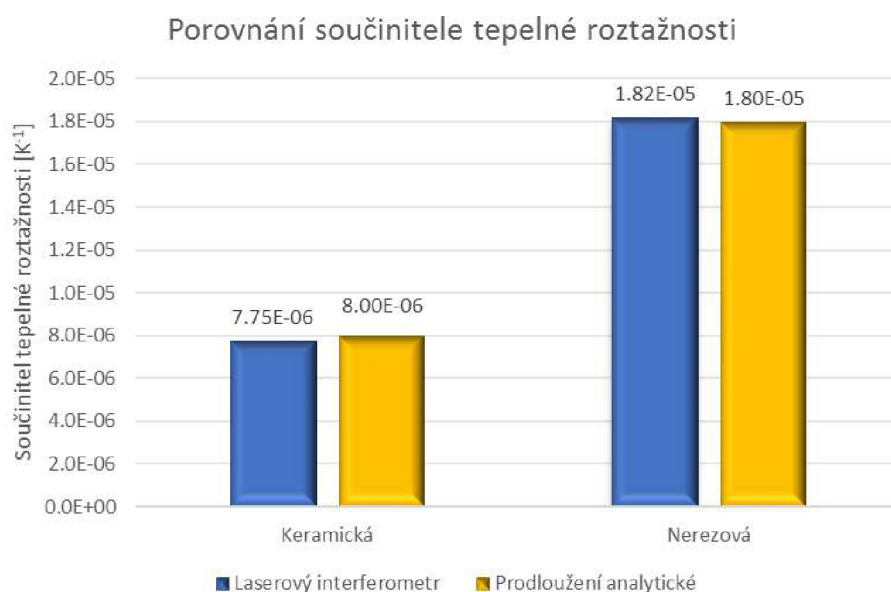
$$\alpha = 7,754 \cdot 10^{-6}$$

- Nerezová tyčka - prodloužení vycházející z experimentu je 0,370 mm.

$$\alpha = \frac{0,370}{35 \cdot 581}$$

$$\alpha = 1,820 \cdot 10^{-5}$$

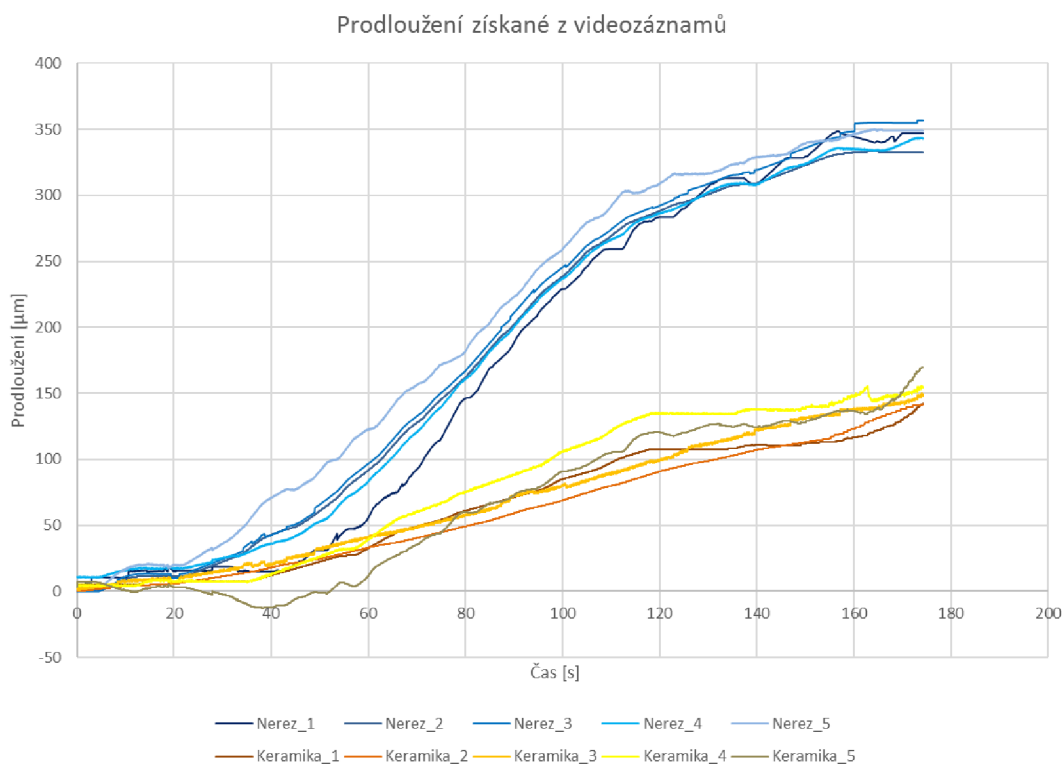
Výsledné hodnoty jsou shrnuty v barovém grafu, kde je viditelný rozdíl mezi měřením a výpočtem, viz Obr. 27. V případě keramické tyčky se průměr naměřených hodnot liší o 3,07% od analyticky vypočítané hodnoty. U nerezové tyčky je průměr naměřených hodnot větší o 1,11%.



Obr. 27 Barový graf shrnující rozdíly ve vypočtených hodnotách součinitele tepelné roztažnosti

4.8 VYHODNOCENÍ DAT Z OPTICKÉHO MĚŘENÍ KAMEROU

Vyhodnocení dat z kamery je časově náročnější než u laserového interferometru, jehož výstupem je rozdíl paprsků. Výsledky jsou vyobrazeny v následujícím grafu, viz Obr. 28.



Obr. 28 Prodloužení nerezové tyčky odečtené z videozáznamů

Z grafu lze vyčíst prodloužení na konci ohřevu na 600°C zapsané do Tab. 4.

Tab. 4 Prodloužení tyček na konci ohřevu

Test	Prodloužení [μm]	Průměr [μm]
Nerezová_1	333	343
Nerezová_2	333	
Nerezová_3	357	
Nerezová_4	343	
Nerezová_5	349	
Keramická_1	142	151
Keramická_2	141	
Keramická_3	148	
Keramická_4	154	
Keramická_5	170	

Pro nerezovou tyčku je určeno prodloužení jako průměrná hodnota z pěti testů 343 μm, pro keramickou 151 μm.

Po experimentálním změření hodnot je prodloužení tyčky přepočítáno na koeficient roztažnosti materiálu, který je porovnán s tabulkovými hodnotami.

- Keramická tyčka – prodloužení vycházející z experimentu je 0,151 mm.

$$\alpha = \frac{0,151}{35 \cdot 578,5}$$

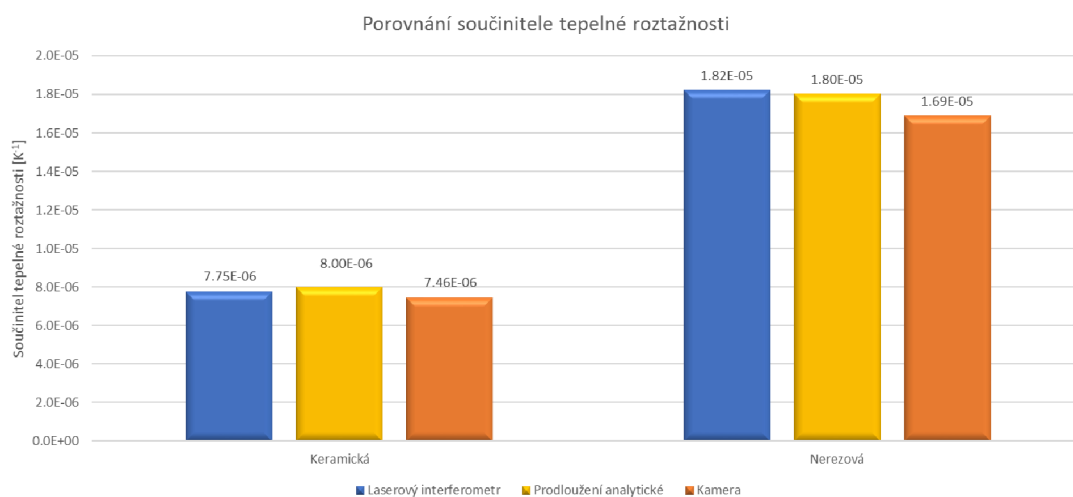
$$\alpha = 7,458 \cdot 10^{-6}$$

- Nerezová tyčka - prodloužení vycházející z experimentu je 0,343 mm.

$$\alpha = \frac{0,343}{35 \cdot 581}$$

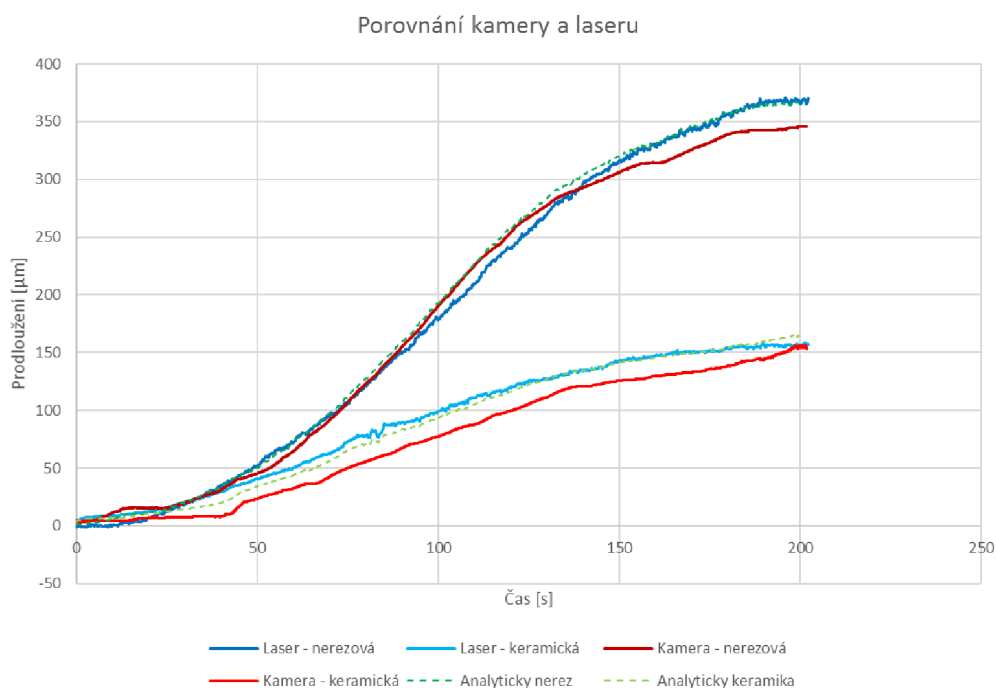
$$\alpha = 1,687 \cdot 10^{-5}$$

V následujícím barovém grafu jsou uvedeny výsledné hodnoty součinitele tepelné roztažnosti z měření laserovým inteferometrem i z měření kamerou (viz Obr. 29). Průměrná hodnota určená měření kamerou se od analyticky vypočítané hodnoty liší v případě keramické tyčky o 6,77% a v případě nerezové o 6,28%.



Obr. 29 Přehled výsledků

Porovnání měřících metod lze také zobrazit v grafu jako průměrnou závislost z pěti měření (viz Obr. 30).



Obr. 30 Porovnání průměrných hodnot z měření kamerou a laserovým interferometrem

4.9 ZHODNOCENÍ

Po vyhodnocení dat do grafů jsou získány odhady prodloužení z obou metod. Odhady jsou dány aritmetickým průměrem jednotlivých naměřených hodnot z nezávislých měření. Je důležité určit nejistotu tohoto odhadu. Určí se jako kombinovaná nejistota z nejistoty Typu A a nejistoty Typu B [48]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3)$$

Kde: u_A je nejistota typu A

u_B je nejistota typu B

Typ A je nejistota určená na základě statistického zpracování dat z opakovaně naměřených údajů, za stejných podmínek. Určí se jako směrodatná odchylka podle vzorce [48]:

$$u = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2} \quad (4)$$

Kde: n je počet prvků

\hat{y} je aritmetický průměr naměřených hodnot y_i

Z naměřených dat jsou v následující tabulce 5 uvedeny vypočtené směrodatné odchylky pro jednotlivá měření.

Tab. 5 Nejistota typu A

u_A [μm]	Laserový interferometr	Kamera
Nerezová tyčka	4	4.88
Keramická tyčka	2.95	5.29

Nejistota typu B se odhaduje na základě dostupných informací. Obě metody měření mají společnou chybu v zaokrouhlování výsledků na $0,5\mu\text{m}$. U měření laserovým interferometrem je přesnost měření 15 nm ve frekvenčním rozsahu do 350 kHz. U měření kamery může být přesnost až 100krát vyšší než její rozlišení díky algoritmu softwaru. Potenciální chybou může být kontrast obrazu, velikost DIC vzoru, zpracování dat (velikost podmnožiny sledovaných bodů). Zvýšení přesnosti na základě potenciálních chyb a zkušeností je uvažováno 20krát vyšší než rozlišení. Rozlišení obrazu je 1280 x 800 pixelů, zabírá obraz o velikosti 30 x 48mm. Z toho vyplývá, že velikost jednoho pixelu je $0,0375\text{mm}$. Přesnost kamery je tedy $1,9\mu\text{m}$.

Jednotlivé nejistoty se sčítají a jejich výsledek je uveden v Tab. 6.

Tab. 6 Nejistota typu B

u_B [μm]	Laserový interferometr	Kamera
Nerezová tyčka	0.515	0.875

Celkové nejistoty jsou podle vztahu (3) pro kombinovanou nejistotu spočteny a uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Celková nejistota

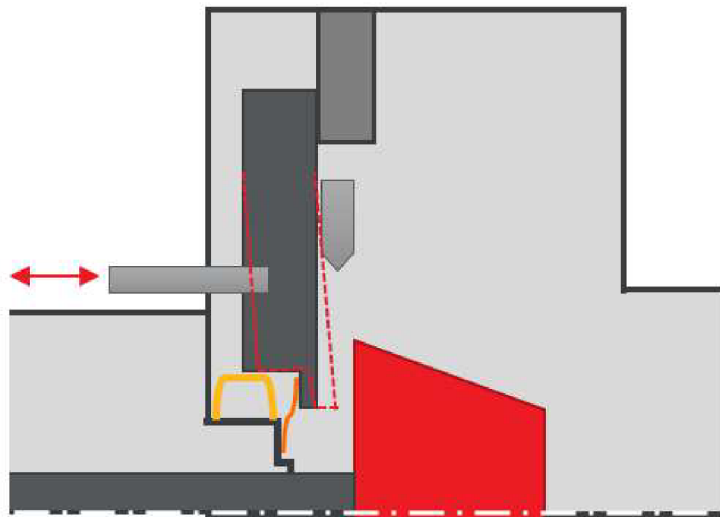
u_C	Laserový interferometr		Kamera	
	[μm]	[%]	[μm]	[%]
Nerezová tyčka	4.03	1.09	4.96	1.45
Keramická tyčka	2.99	1.91	5.36	3.55

Měření laserovým interferometrem se osvědčilo jako velmi dobrá metoda pro měření změny délky tyčky, dosahuje přesnějších výsledků s odchylkou $\sim 2\%$. Měření kamerou je velmi citlivé na rozlišení ve vyšetřované oblasti, to ale může být zlepšeno použitím lepšího objektivu. V tomto případě je odchylka vyšetřování prodloužení keramické tyčky $\sim 4\%$. Další nevýhodou kamery je kapacita jejího datového úložiště. Maximální délka záznamu je při nastaveném rozlišení omezená pouze na 3 minuty, laser v tomto směru nemá takové omezení.

5 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO MĚŘENÍ

Tato kapitola se zabývá návrhem a konstrukčním řešením přípravy turbodmychadla od firmy Garrett a příslušenství na test. Deformace bude zaznamenávána pomocí měřicích metod vybraných ve třetí kapitole.

Statorový kroužek se deformuje nejvíce na jeho vnitřním průměru, kde dosedá plochá přitlačovací pružina, viz Obr. 31. Kvůli deformaci statorového kroužku může pružina ztratit předpětí. Keramickou tyčku, kterou bude sledovat laser i kamera, je třeba do statorového kroužku našroubovat na místo co nejbližší k jeho vnitřnímu průměru aby byl její axiální pohyb co největší. Z boční strany turbodmychadla je tyčka snímána kamerou a z její přední strany je změna polohy zaznamenávána laserovým paprskem.



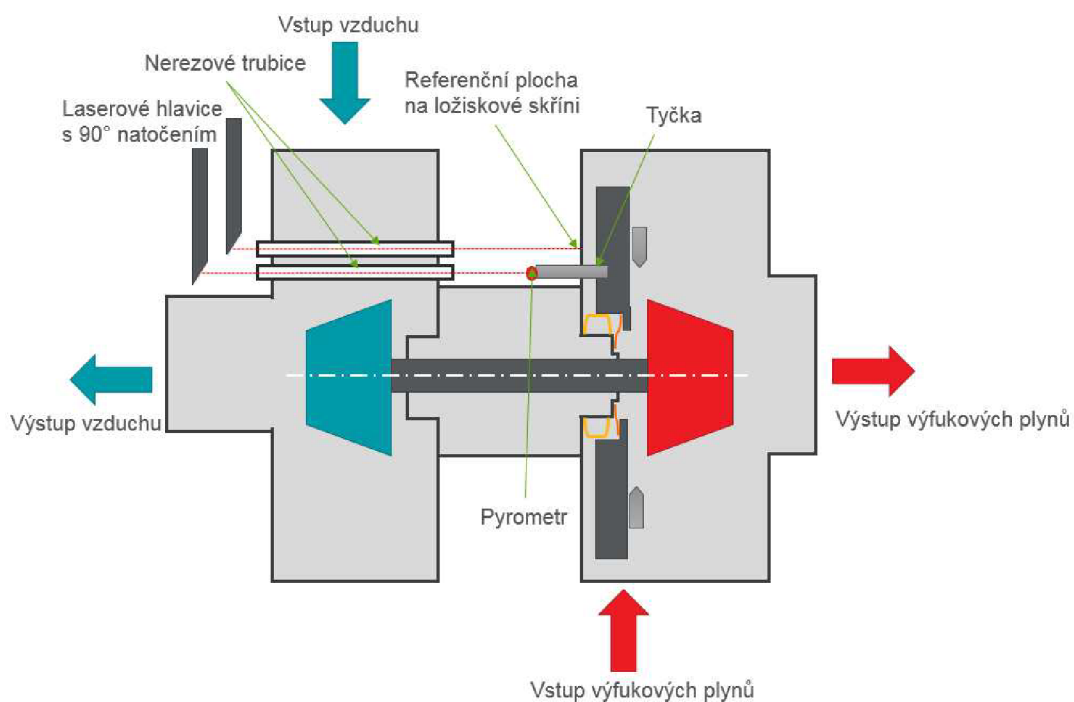
Obr. 31 Deformace statorového kroužku

5.1 3D MODEL TURBODMYCHADLA A ROZLOŽENÍ ZAŘÍZENÍ

Test proběhne na sériovém turbodmychadle od firmy Garrett. Jeho 3D model v programu Catia V6 byl před testem k dispozici. Na tomto modelu je třeba vytvořit veškeré úpravy spojené s instalací laserového interferometru a kamery. Do modelu je třeba správně umístit keramickou tyčku. Do statorového kroužku je vytvořen metrický závit, do kterého se tyčka zašroubuje. V ložiskové skříni je vytvořen otvor, kterým je tyčka vyvedena mimo skříň turbodmychadla.

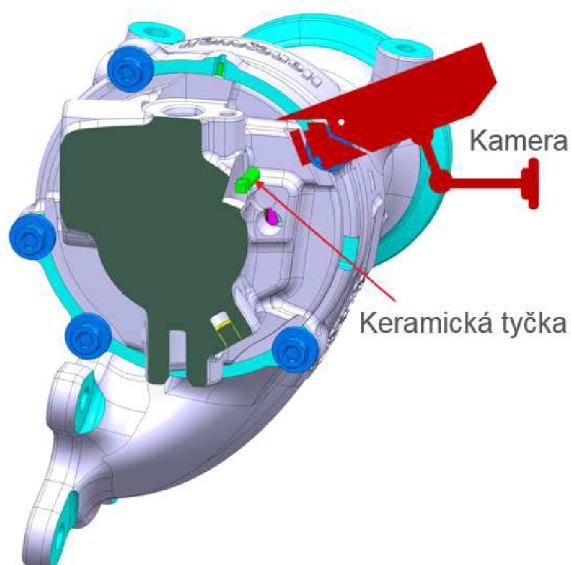
Snímání deformace laserem je zajištěno dvěma hlavicemi (jejich uchycení v kapitole 5.5). Uvnitř každé hlavice je umístěno zrcadlo s 90° natočením, to umožňuje vstupující paprsek shora kolmo natočit směrem do turbodmychadla. Schéma řezu modelem turbodmychadla je zobrazeno na Obr. 32. Jeden paprsek laseru snímá polohu tyčky, druhý referenční polohu plochy na ložiskové skříni. Tato plocha musí být do ložiskové skříně vyfrézována. Aby nedocházelo k přehřívání hlavice, která je omezena maximální teplotou 50°C, je umístěna až za kompresorovou skříň, kde teploty během testu budou nižší. Z tohoto důvodu jsou do kompresorové skříně vytvořeny dva otvory. Otvory vedou skrze

kompresorovou skříň, proto jsou do nich zalisovány nerezové trubice. Takto paprsek prochází trubicí, dopadá na odrazovou plochu vytvořenou na tyčce (či na referenční plochu ložiskové skříni) a vrací se zpět.



Obr. 32 Schéma konstrukčního měření pro měření laserovým inerferometrem

Kamera zachycuje keramickou tyčku z její boční strany, viz Obr. 33.



Obr. 33 Konstrukční řešení pro měření kamerou

Pro dodatečné obrábění na některých částech byly vytvořeny výkresy v programu Catia V6. Po demontáži sériového turbodmychadla na jednotlivé díly, byly tyto operace provedeny na CNC obráběcích strojích.

5.2 TEPLOTNÍ SENZORY

Součástí testu je i sledování teploty v různých místech testované jednotky, které slouží především pro přesnější kalibraci výpočtového modelu celého turbodmychadla.

Do tělesa turbodmychadla byly vytvořeny otvory a drážky pro teplotní senzory na různých místech. Protože použité senzory mají průměr 1 mm, byly pro ně vytvořeny otvory o průměru 1,2 mm. Při montáži jsou jednotlivé senzory nainstalovány do otvorů na své místo a otvory vyplněny lepidlem. Lepidlo se musí v peci vytvrdit, vypékání turbínové skříňě trvá přibližně 6 hodin.

5.3 VÝROBA DÍLŮ

Do kompresorové skříňě je vyfrézována dutina pro laserové hlavice a vyvrtány dva otvory, kterými budou procházet jednotlivé paprsky laseru. Do otvorů jsou zalisovány dvě nerezové trubice 8 x 1 x 45, viz Obr. 34.



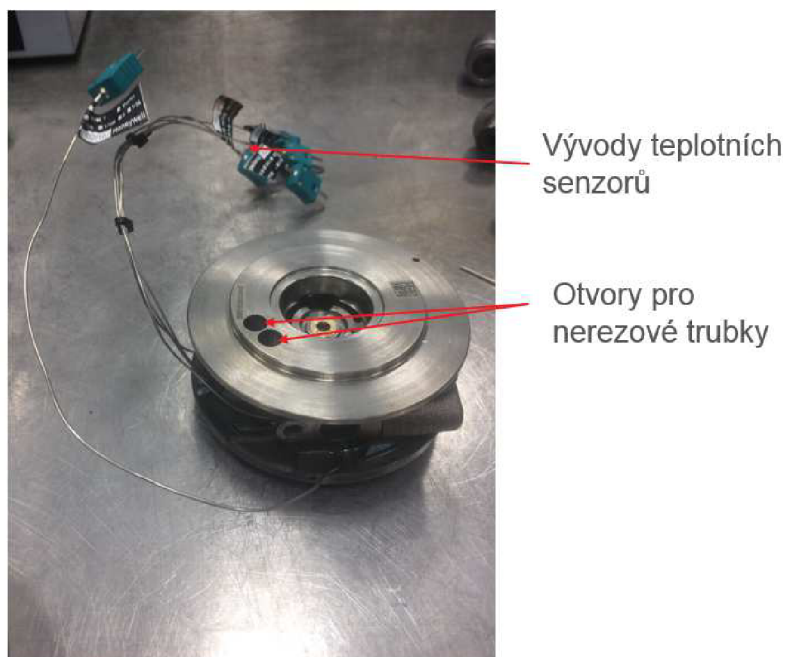
Obr. 34 Kompresorová skříň po úpravě

Do statorového kroužku je vytvořen metrický závit M5 pro keramickou tyčku, viz Obr. 35.



Obr. 35 Statorový kroužek po úpravě s namontovanou tyčkou

Na ložiskové skříni je provedeno více obráběcích operací (viz Obr. 36). Je zde vytvořen především otvor pro keramickou tyčku. Další dva otvory slouží k nasazení ložiskové skříně na nerezové trubky, zalisované do kompresorové skříně. Také je zde vytvořena referenční plocha pro druhý laserový paprsek. Poslední úpravou ložiskové skříně jsou drážky a vývrty pro teplotní senzory.



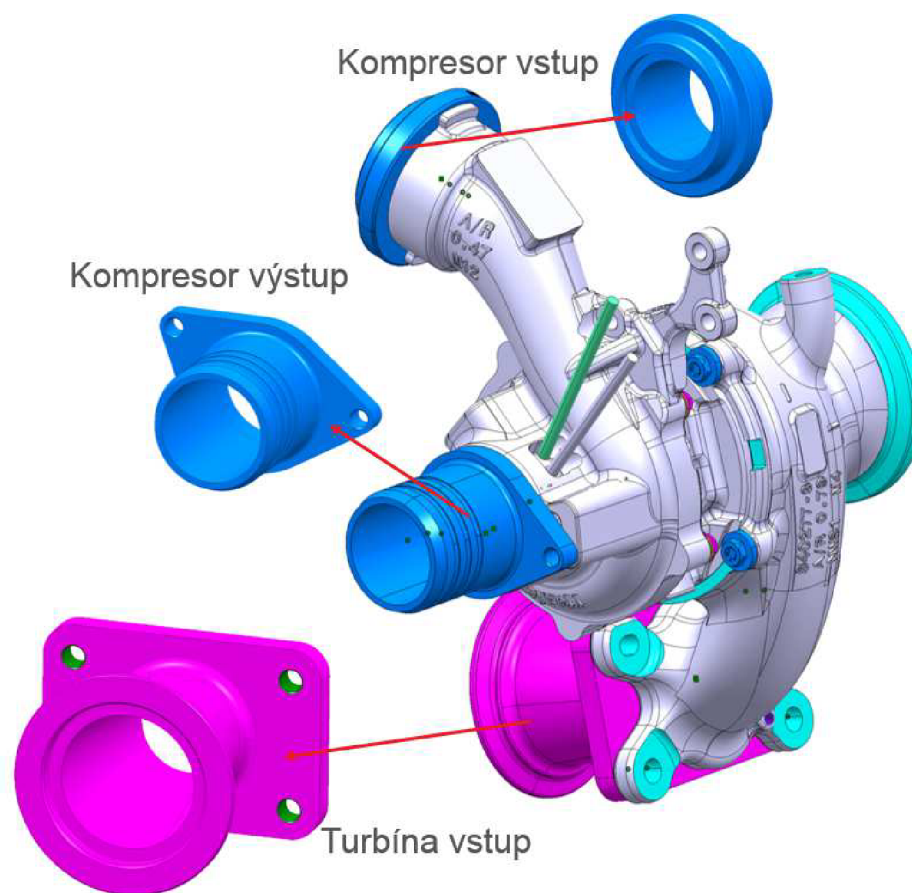
Obr. 36 Ložisková skříň po úpravě

Posledním upravovaným dílem je turbínová skříň, do které jsou nainstalovány dva teplotní senzory o průměru 1mm. Otvory pro ně byly vytvořeny v externí firmě.

Pozice lopatek je nastavena pouze do jedné polohy – plně otevřeno – a nebude se během testu měnit. Z tohoto důvodu jsou nepotřebné součásti, např. aktuátor regulace, vyčleněny z testované jednotky.

5.4 ADAPTÉRY

Celé turbodmychadlo je třeba připojit na testovací zařízení. To znamená vytvoření adaptérů na turbínové vstupní straně i na vstupní a výstupní straně kompresoru (viz Obr. 37). Adaptéry jsou vymodelovány v programu Catia V6. Podle této dokumentace byly vyrobeny externí firmou. Na turbínové straně ze žáruvzdorné nerezové oceli a na straně kompresorové ze slitiny hliníku.

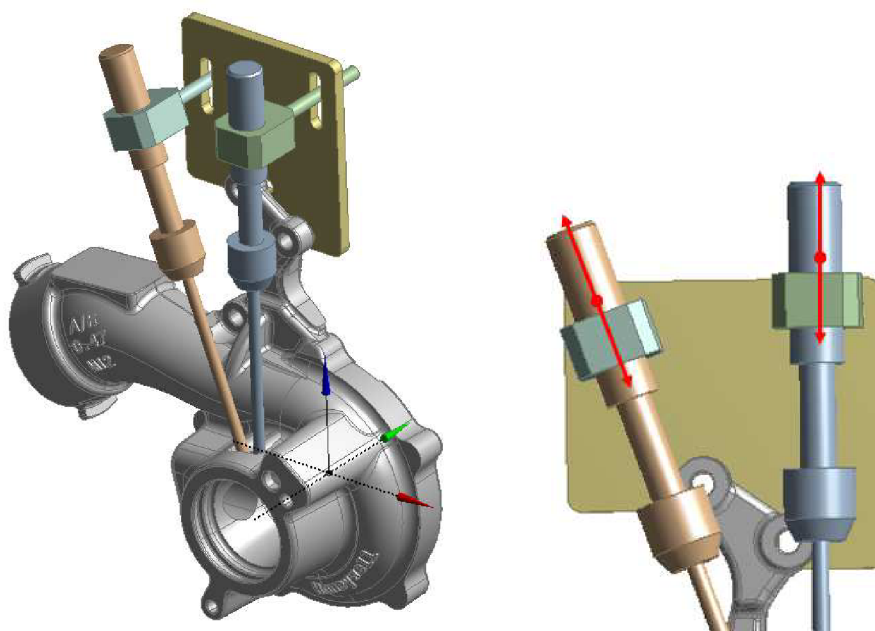


Obr. 37 Adaptéry na testovanou jednotku

5.5 DRŽÁKY LASEROVÝCH HLAVIC

Hlavice laseru, umístěné na straně kompresorové skříně, je třeba uchytit k turbodmychadlu. Výsledky tak nebude ovlivňovat změna polohy turbodmychadla, která je zapříčiněna tepelnou roztažností jednotlivých sekcí testovacího zařízení. Do měření relativní vzdálenosti keramické tyčky a referenční plochy ložiskové skříně, vstupuje pouze samotná roztažnost komponentů turbodmychadla, která může způsobit mírné rozostření paprsku. K tomuto účelu je vytvořen adaptér k uchycení držáku hlavic laseru (viz Obr. 38). Adaptér je uchycen na místě aktuátoru regulace naklápěcích lopatek, který nebude během testu potřebný. Otvory pro šrouby, díky kterým budou držáky hlavic připevněny, mají oválné drážky, aby mohl být paprsek přesně zaměřen na keramickou tyčku. Po zaměření polohy jsou držáky hlavic zajištěny utažením šroubového spoje.

Laserové hlavice mohou v držácích vertikálně měnit polohu o přibližně 40 mm. Samotná hlavice umožňuje náklon o $\pm 1,5^\circ$. Takto je zajištěna variabilita uchycení a přesného nastavení ve všech osách.



Obr. 38 Držáky laserových hlavic

6 TEST

Hlavním účelem testu je zjistit axiální pohyb statoru během teplotního zatížení na testovacím zařízení s plynovým hořákem.

6.1 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ S PLYNOVÝM HOŘÁKEM

Díky tomuto testovacímu zařízení lze pohánět turbodmychadlo plynem spáleným ve spalovací komoře a simulovat tak podmínky zatížení turbodmychadla, jakým je vystaveno na motoru. Turbodmychadlo je navíc odizolováno od okolních vlivů skutečného motoru jako jsou např. vibrace a je proto zajištěna vyšší opakovatelnost testů. Do spalovací komory je přiváděn zemní plyn, který se smísí se vzduchem. Směs je zapálena elektrickou jiskrou z elektrod, které jsou součástí spalovací komory. Uvolněná energie hoření nahrazuje tepelnou a tlakovou energii výfukových plynů motoru a pohání turbodmychadlo. U plynů se sleduje teplota, tlak a směšovací poměr. Na spalovací komoru je napojena regulační větev teploty spalin, která přimíchává do horkého plynu vycházejícího z hořáku stlačený vzduch. Pomocí něho se reguluje teplota vstupující do turbínové části turbodmychadla. Propojovací vedení mezi hořákem a turbodmychadlem je vybaveno měřicími sekcemi, ve kterých je proudící médium měřeno pomocí teplotních a tlakových senzorů, průtokových měřičů apod.

Dalšími regulačními částmi testovacího zařízení je škrťací klapka před sací částí kompresoru. Díky ní lze simulovat různá omezení průtoku sacího potrubí motoru, např. ucpaný vzduchový filtr. Podobně je také na výstupu z kompresoru škrťací ventil, pomocí kterého lze měnit poměr stlačení kompresoru a průtok vzduchu kompresorem. K simulaci odporu výfukového systému, katalyzátoru, tlumiče apod. slouží další škrťací ventil na výstupu z turbíny.

Součástí jsou také dva důležité okruhy, mazací a chladicí. U mazacího okruhu sloužícího pro mazání ložiska může být použit olej o různých viskózních vlastnostech, upraveny tlaky a teploty oleje, případně může být použit kontaminovaný olej na speciální ložiskové testy. Teplota i průtok mohou být regulovány také na chladicím okruhu. [21]

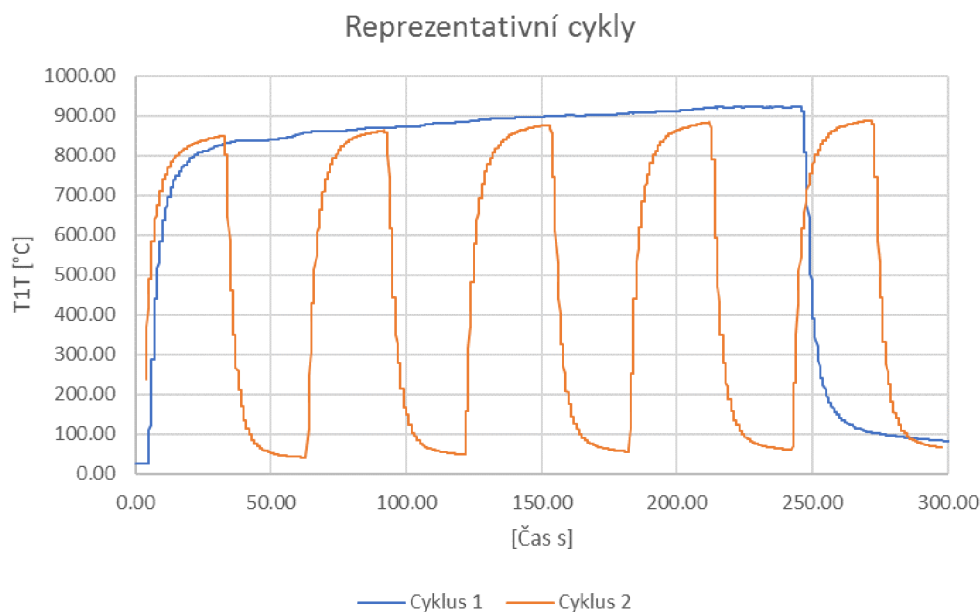
6.2 CYKLUS ZATÍŽENÍ

Cílem naladění testovacího cyklu je přiblížit se na testovacím zařízení s plynovým hořákem stejným teplotním gradientům, které vznikají na reálných motorových měřeních. Testovací cyklus se na testovacím zařízení s plynovým hořákem skládá ze dvou částí. Horká fáze, kdy vedením proudí horké plyny z hořáku a z chladné fáze, kdy je do vedení vpuštěn studený vzduch. Kombinací a přepínáním těchto dvou fází je dosaženo rychlých teplotních změn.

Cyklus je naladěn tak, aby co nejvíce odpovídal reprezentativnímu cyklu na motoru a to zejména jeho teplotním gradientům. Aby bylo dosaženo podobných teplot jako u motoru, v horké fázi 950°C a přibližně 120°C v chladné, je průtok vzduchu na testovacím zařízení uzpůsoben jinak než na motoru a to z důvodu dlouhého vedení od hořáku k turbodmychadlu.

Pro účely testování deformace statorového kroužku, jsou na testovacím zařízení naladěny dva testovací cykly, viz Obr. 39. Oba jsou časově omezeny a to z důvodu malé kapacity datového úložiště kamery, která má při tomto nastavení maximální délku záznamu 5 minut.

První cyklus má rychlý teplotní náběh a poté následují čtyři minuty pozvolného ohřevu. Po čtyřech minutách dojde k přepnutí studeného vzduchu a začne rychlá fáze chlazení. Na tomto cyklu bude pozorovatelné, jak se deformuje statorový kroužek vlivem prohřátí součástí. Druhý cyklus obsahuje rychlé teplotní změny, které se střídají po 30 sekundách. V případě tohoto cyklu je pozorovatelné, jak se mění deformace statorového kroužku vlivem rychlých teplotních změn, tedy střídavého zatížení. Maximální teplota jednotlivých cyklů stoupá společně s rostoucím počtem cyklů.



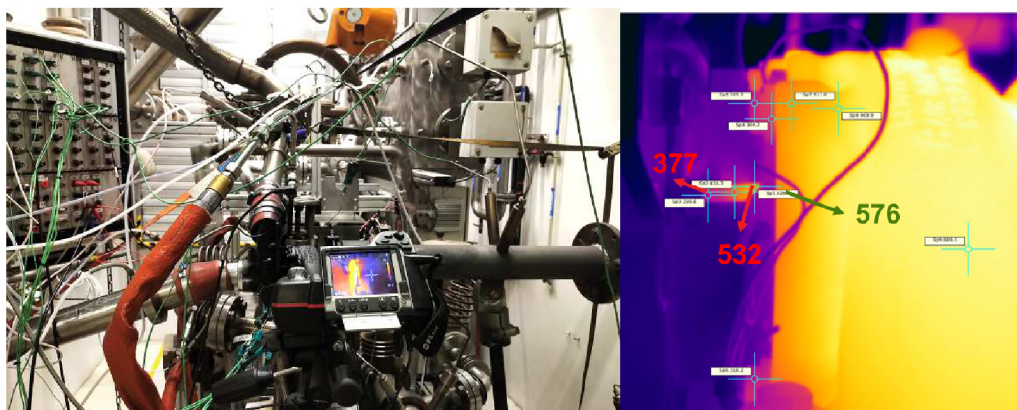
Obr. 39 Testovací cykly na zařízení s plynovým hořákem

Celkově je měření uskutečněno devětkrát. Šeskrát je zaznamenávána poloha tyčky a tři měření slouží k určení povrchových teplot pomocí termokamery (uvedeno v kapitole 6.3).

Mezi jednotlivými testy bylo vedení i turbodmychadlo vychlazeno na stejnou počáteční teplotu, z důvodu porovnatelnosti jednotlivých testů.

6.3 TERMOKAMERA

Pro snadnější vyhodnocení a korelaci je do testovací cely umístěna termokamera, která snímá především teplotní rozložení po tyčce a jejím okolí, viz Obr. 40. Pro měření teploty je na turbodmychadlo nanášena barva o vysoké emisivitě, aby bylo měření přesnější.



Obr. 40 Termokamera během testu

6.4 MĚŘENÍ LASEREM

Na začátku testu je laserový paprsek naladěn tak, aby byl přijímaný odrazový signál co nejkvalitnější. Odrazové plochy jsou pečlivě připraveny, na tyčku i na ložiskovou skříň jsou nalepeny skelné částice o vysoké odrazivosti pomocí lepidla.

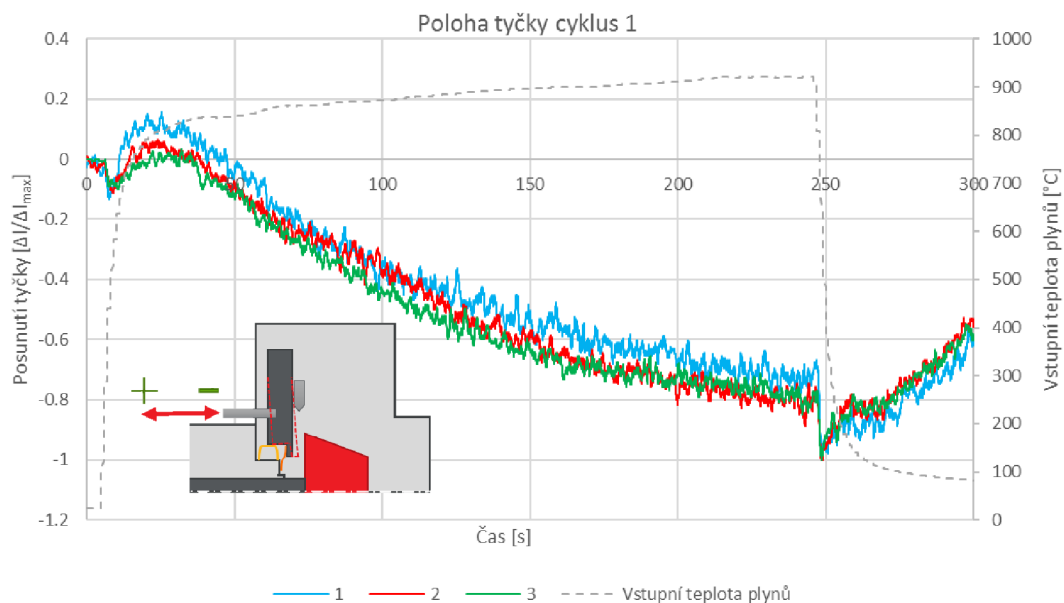
Při spuštění prvního testu se signál z laseru ztratil. Lepidlo použité pro skelné částice shořelo a zničilo odrazivou plochu. Proto byly odrazivé plochy upraveny a skelné částice nanášeny na jiné lepidlo, které odolává vysokým teplotám. Odrazivá plocha zůstala poté již nepoškozena, ovšem nepříznivé okolní podmínky, jako vibrace způsobené otáčením rotoru a proudící horké plyny vystupující mezerou tvořenou vůlí v uložení tyčky, měly za následek opakovaný neúspěch měření laserovým interferometrem.

Z tohoto důvodu je měření laserem neprůkazné a dále je pojednáno pouze o měření provedeném digitální kamerou.

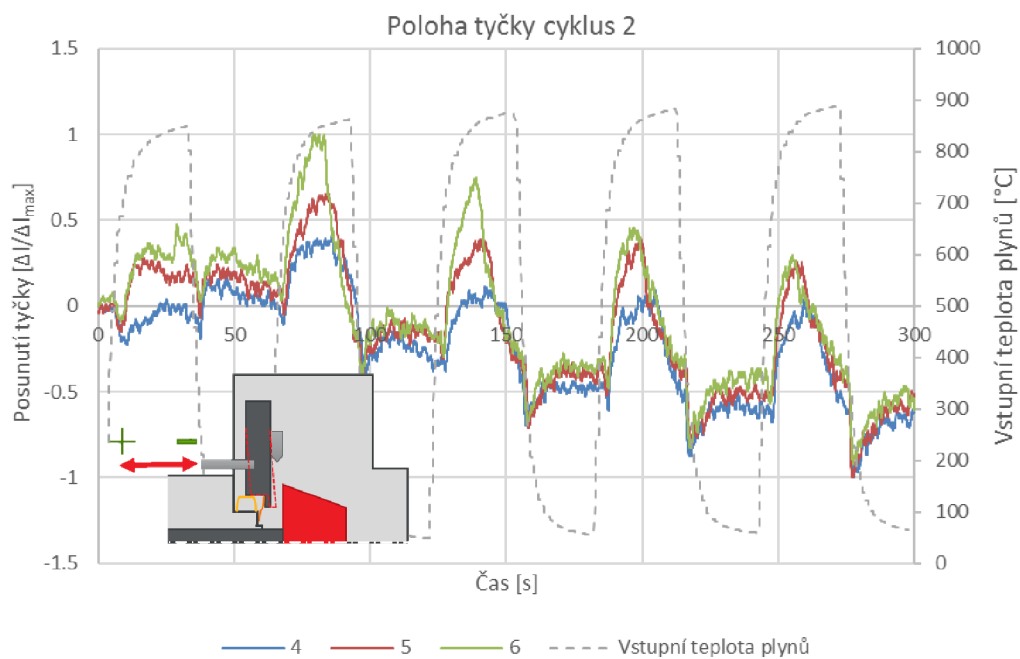
6.5 VYHODNOCENÍ DAT

6.5.1 VYHODNOCENÍ DEFORMACE Z VIDEOZÁZNAMŮ

Záznam je vyhodnocen stejným způsobem jako u komponentního testu. Závislosti posunu tyčky v čase během teplotního zatížení z měření jsou zobrazeny v grafech. Následující grafy zobrazují časový průběh poměru deformace keramické tyčky a její maximální naměřené hodnoty. Měření 1 až 3 obsahují data z testovacího cyklu 1, viz Obr. 41, a měření s číselným označením 4 až 6 obsahují data z testovacího cyklu 2, viz Obr. 42.



Obr. 41 Poloha tyčky během teplotního cyklu 1



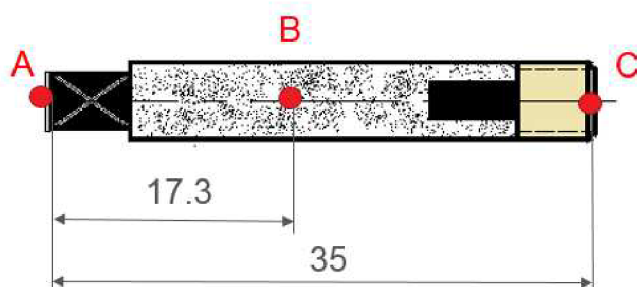
Obr. 42 Poloha tyčky během teplotního cyklu 2

Pokud je posun v kladných hodnotách, znamená to, že tyčka se pohybuje směrem ke kompresorové skříni. Tento posun zvyšuje předpětí na ploché pružině. Opačný posun v mínusových hodnotách znamená, že tyčka se pohybuje směrem do turbínové skříně. Tento pohyb znamená deformaci statorového kroužku a ztátu předpětí ploché pružiny. U prvního cyklu je jednoznačné posunutí tyčky směrem do turbínové skříně. U druhého cyklu je patrná změna deformace, která je spojená se změnou teploty (každých 30 s). S postupným ohřevem každého z cyklů, se posun tyčky směrem do turbíny zvětšuje. Z Obr. 42 je patrný vliv termální setrvačnosti systému, u první teplotní změny je turbodmychadlo vychlazené a u každé následující teplotní změny je turbodmychadlo více prohřáté (i jinak teplotně zdeformované). To má za následek postupné zvětšování posunu tyčky. Oba cykly tedy předpovídají ztrátu předpětí ploché pružiny.

6.5.2 KOMPENZACE POSUNUTÍ

Ve vyhodnocených posunech z videozáznamů je zahrnuta i samotná roztažnost keramické tyčky. Aby byla získána relativní deformace statorového kroužku vůči středové skříni, je třeba tuto roztažnost z grafu odečíst. Vliv roztažnosti ložiskové skříně se dá předpokládat jako zanedbatelný z důvodu aktivního chlazení vodou. Teplota nepřekročila hodnotu 80°C.

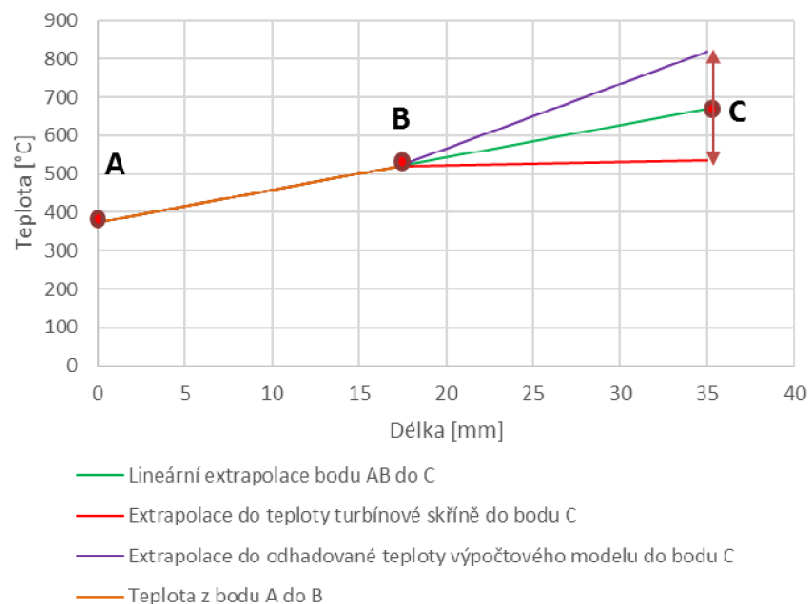
Díky pyrometru je známa teplota konce tyčky v bodě A. Ze záznamu termální kamery, pro testovací cyklus 1, lze odečíst teploty středu tyčky v bodě B a teplotu turbínové skříně. Předpokládané rozložení teplot z bodu A do bodu B je lineární. Z bodu B do bodu C je třeba průběh teplot extrapolovat, viz Obr. 43.



Obr. 43 Znáornění bodů podél délky tyčky

První extrapolací je linearizace teploty z bodu A do bodu C. Druhý odhad je lineární funkce z bodu B do bodu C za předpokladu teploty turbínové skříně odečtené ze záznamu termokamery. Poslední odhad koncové teploty je dán teplotně zkalibrovaným výpočtovým modelem. Rozptyl koncových teplot je zobrazen v následujícím grafu, viz Obr. 44.

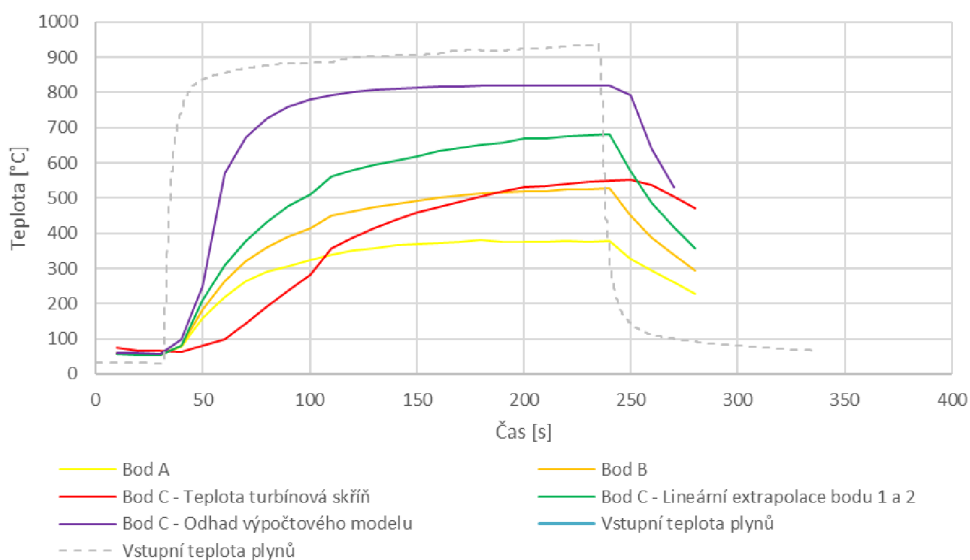
Extrapolace teploty přes délku tyčky



Obr. 44 Extrapolace koncových teplot

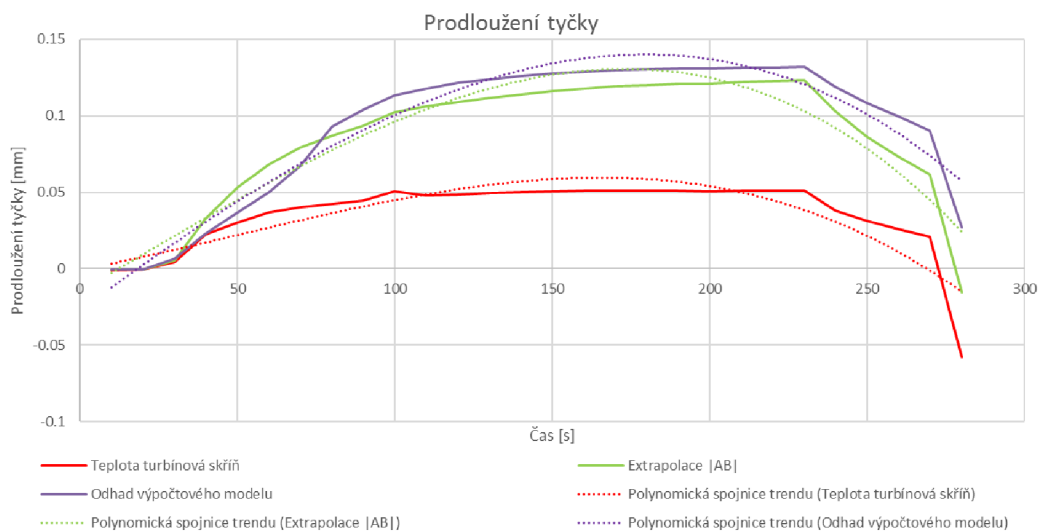
Následně jsou zjištěny teploty v průběhu času a společně s naměřenými hodnotami jsou znázorněny, viz Obr. 45.

Průběh teplot v jednotlivých bodech



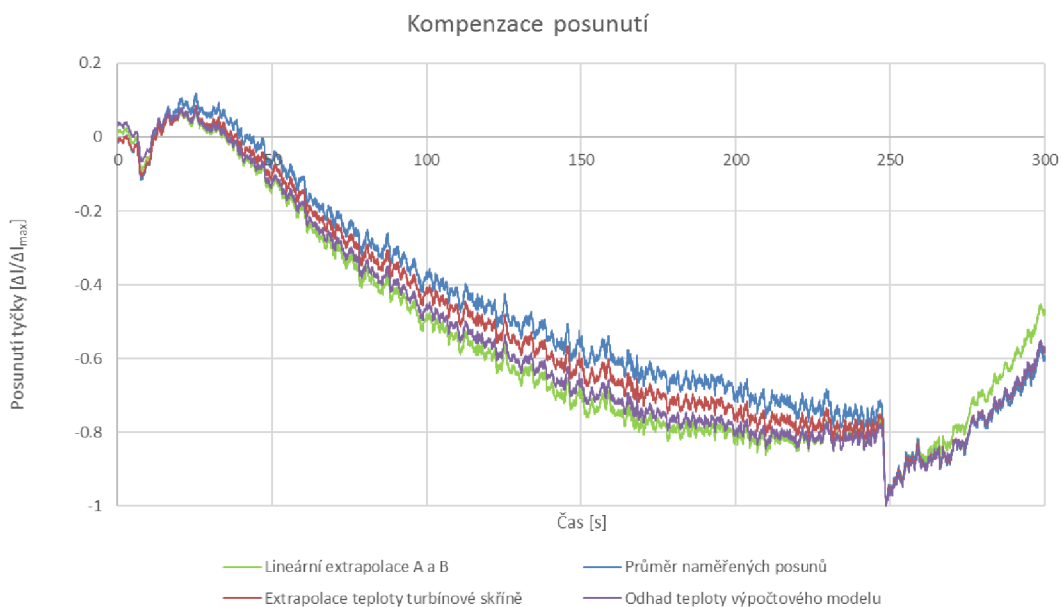
Obr. 45 Průběh teplot v čase

Po zjištění teplotní závislosti na délce tyčky lze určit hodnotu celkového prodloužení tyčky během teplotního cyklu, viz Obr. 46.



Obr. 46 Prodloužení tyčky během testovacího cyklu [AC]

Celkové prodloužení tyčky během testovacího cyklu je odečteno od zprůměrovaných hodnot z naměřeného posunutí na testovacím zařízení s plynovým hořákem a tím je získán rozsah možného posunutí, ve kterém se pohybují reálné hodnoty posunutí tyčky, viz Obr. 47.



Obr. 47 Posunutí tyčky s odečtením tepelné roztažnosti

Rozsah kompenzace roztažnosti na základě rozdílných metod se pohybuje okolo 20%, to prokazuje, že výběr metody určení teploty v bodě C zásadně ovlivňuje výsledek měření.

Pro kompenzací testovacího cyklu 2 není k dispozici záznam z měření termokamerou, stejně tak neexistují pro bod C odhady ve výpočtovém modelu, proto nelze se současnými daty pro cyklus 2 kompenzaci provést. U testovacího cyklu 1 je ovšem prokázána důležitost této kompenzace, která musí být provedena u všech podobných měření.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá měřením deformace statorového kroužku mechanismu variabilní geometrie turbodmychadla během teplotního zatížení.

Na základě nabytých znalostí z rešeršní části byl uskutečněn výběr měřicí metody. Měřicí metody byly vybrány pomocí rozhodovací matice, podle určených kritérií pro měření deformace. Jako nevhodnější metody měření byly vybrány měření pomocí digitální kamery s vyhodnocením záznamu metodou DIC a měření laserovým interferometrem.

Obě metody byly porovnány v jejich použitelnosti a přesnosti na komponentním testu. Měření laserovým interferometrem je oproti měření kamerou přesnější, má menší nejistotu měření (okolo 2%) a data jsou během měření ukládány do počítače, to znamená, že metoda měření laserovým interferometrem není omezená interním úložištěm jako digitální kamera. Měření digitální kamerou má oproti laseru nižší přesnost, ale přesto dosahuje v měření tepelného prodloužení tyčky dobrých výsledků, nejistota je přibližně 4%.

Aby bylo možné měřit deformaci statorového kroužku, který je umístěn uvnitř turbodmychadla, byl vytvořen návrh měření s využitím pomocné tyčky, která je zašroubována do statorového kroužku, převádí deformaci na axiální posun vně turbodmychadla.

Relativní axiální posun tyčky, zašroubované ve statorovém kroužku v turbodmychadle během teplotního zatížení na testovacím zařízení s plynovým hořákem, byl sledován pomocí digitální kamery i laserového interferometru. U laserového interferometru nastal problém s odrazivostí ploch a kvalitou odraženého paprsku, který byl rušen vibracemi a mísením horkého a studeného vzduchu v okolí. Proto je axiální posun tyčky vyhodnocen pouze ze záznamů kamery.

Z testu na testovacím zařízení s plynovým hořákem je patrné, že se statorový kroužek při tepelném zatížení v průběhu reprezentativního testovacího cyklu deformuje na stranu turbínového kola. Tato deformace způsobuje odlehčení ploché předepínací pružiny, což může mít za následek nadměrné opotřebení součástí nebo může dojít k selhání systému.

V kapitole 6.5.2 je prezentována kompenzace tepelné roztažnosti tyčky, s využitím koeficientu tepelné roztažnosti získaného z komponentního testu. Různé metody určení teploty v bodě C představují rozptyl výsledné hodnoty až o 20% a to zásadně ovlivňuje výsledek měření. Pro další zlepšení přesnosti měření by bylo vhodné použít teplotní senzory, které se nainstalují přímo do tělesa tyčky (nejlépe dva, jeden v bodě C a druhý v bodě B).

Výsledky této práce ukazují, že měření kamerou je citlivé na rozlišení obrazu, tomuto je možné předejít pořízením lepšího objektivu. Dalším omezením kamery je její datové úložiště, které značně omezuje dobu měření, je proto účelné odstranit toto omezení přenosem dat z kamery na disk během pořizování záznamu. Pro kvalitnější vyhodnocování metodou DIC je vhodné použít speciální barvy na rozstřík vzoru, který vytvoří jemnější body. Do vyhodnocování vnáší chybu také mísení horkého vzduchu, vycházejícího z turbodmychadla kolem tyčky, s okolním studeným. To způsobuje zkreslování a rozostření obrazu. Tomuto efektu by se dalo zabránit například krytem prostoru, či nuceným ofukem tlakovým vzduchem. Další potenciální chybou může být změna pozice kamery v kolmém směru na rovinu snímání, která je zapříčiněna roztažností testovacích sekcí a měřítko tak není konstantní. Použitím dvou kamer, metodou vyhodnocování 3D-DIC, se této chybě dá předejít.

Výsledky posunu tyčky, včetně všech naměřených teplot v okolí pomocí teplotních senzorů, pyrometru a termokamery, poskytují informace pro korelaci komplexního výpočtového modelu, zpřesnění předpokladů a následný návrh uložení statorového kroužku.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HOFMANN, Karel. *Turbodmychadla a vozidlové turbíny : přeplňování spalovacích motorů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [2] HOFMANN, K. *Alternativní pohony. Studijní opory*, VUT FSI Brno, 2003. 73s.
- [3] ČERNÝ, Roman. *Výpočtová studie Millerova cyklu benzínového motoru turbodmychadlem* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149452. Diplomová práce. VUT Brno.
- [4] CETKOVSKÝ, Martin. *SIMULACE SILOVÉHO ZATÍŽENÍ ROZVÁDĚCÍHO VNT MECHANISMU TURBODMYCHADLA* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27267. Diplomová práce. VUT Brno.
- [5] Turbocharger guide. *Diesel Hub: The diesel owners resource* [online]. c2009-2019 [cit. 2019-05-07].
- [6] MACURA DRSC., prof. Ing. Pavel a Ing. František FOJTÍK, PH.D. *Experimentální metody mechanice: Tenzometrie*. Ostrava: c Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostra, 2013. ISBN ISBN 978-80-248-3018-6.
- [7] KRYSTEK, Jan. *Experimentální mechanika* [online]. Plzeň, 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/krystek/exm2/soubory/EXM2_prednaska_2.pdf. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] KOLAŘÍK, Bc. Radek. *Srovnání konvenčních metod měření deformace s metodou DIC*. Zlín, 2016. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [9] Tenzometrie I. *VŠB* [online]. Ostrava: Technická univerzita Brno, 2010 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~sof007/files/EMvM/p3.pdf>
- [10] Macura, P.: *Experimentální metody v pružnosti a plasticitě*, Skriptum VŠB-TU Ostrava, 2001, 107 s.
- [11] Tenzometrie II. *VŠB* [online]. Ostrava: Technická univerzita Brno, 2010 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~sof007/files/EMvM/p4.pdf>
- [12] Tenkovrstvé piezoelektrické senzory. *Fakulta chemicko-inženýrská* [online]. Praha: VŠCHT Praha [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf?redirected
- [13] Piezoelektrické jevy. *České Vysoké Učení Technické* [online]. Praha: ČVUT Praha, 2012 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf
- [14] Snímače mechanického namáhání – piezoelektrický jev. *ELUC* [online]. Olomouc: ELUC, 2014 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590>

- [15] TESAŘOVÁ, Marcela. Senzory pro měření deformace. *Slideplayer* [online]. SlidePlayer.cz, c2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2905462/>
- [16] HUSÁK, CSC., Prof. Ing. Miroslav. Senzory na principu: Piezoelektrickém, Ultrazvuk, SAW. *DocPlayer* [online]. Praha: ČVUT FEL Praha, 2016 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14442387-5-senzory-na-principu-piezoelektrickem-ultrazvuk-saw-a-senzory-s-piezoelektrickym-principem-b-a-b-a.html>
- [17] TICHÝ, Bc. Jakub. *Filtr s akustickou povrchovou vlnou*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT Brno.
- [18] VOJÁČEK, Antonín. Co je SAW a k čemu slouží. In: *Automatizace.hw* [online]. HW server, c1997-2014, 2007 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007021401>
- [19] SOUKUP, Karel. *Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [20] KOLAŘÍK, Bc. Radek. *Srovnání konvenčních metod měření deformace s metodou DIC*. Zlín, 2016. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- [21] HANDL, Martin. *Optimalizace podmínek testování turbínových kol na plynových hořácích*. Brno, 2017. Diplomová práce. MENDELU.
- [22] OPAT, Jan. *Vybrané metody měření tvaru a deformace ploch a jejich rekonstrukce*. Praha, 2015. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [23] Optické metody II. *Technická univerzita Ostrava* [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~sof007/files/EMvM/p6.pdf>
- [24] WEIGL, Martin. *Měření vibrací*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [25] RAJM, Martin. *Laserový vibrometr s 2D rozkmitáním*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT Brno.
- [26] Laser doppler vibrometer. *Tech Briefs* [online]. Tech brief media group, c2009-2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/features/products-of-the-month/12092>
- [27] KOLAŘÍK, Radek. *Srovnání konvenčních metod měření deformace s metodou DIC*. Zlín, 2016. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [28] GOM Training Webinar - 2D and 3D Image Correlation in Materials and Components Testing. In: *Youtube* [online]. GOM Metrology, 2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Hi7h-33LQaM>
- [29] MACURA, Pavel. Fotoelasticimetrie. In: *Hive Mind* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://hiveminer.com/Tags/macura>

- [30] KUČERA, Vojtěch. *Polarizace světla*. Liberec, 2015. Diplomová práce.
- [31] Polarimetrie. *Polarizace světla* [online]. Olomouc: PřF UP [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: http://polar-peza.euweb.cz/vyuziti_polarizace.html
- [32] MACURA DRSC., prof. Ing. Pacel a Ing. František FOJTÍK, PH.D. *Reflexní fotoelasticimetrie* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-10]. ISBN ISBN 978-80-248-3018-6. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%204%20.pdf
- [33] MACURA DRSC., prof. Ing. Pacel a Ing. František FOJTÍK, PH.D. *Postup při měření a vyhodnocování napětí u fotoelasticimetrie* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-10]. ISBN ISBN 978-80-248-3018-6. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%203%20.pdf
- [34] MACURA DRSC., prof. Ing. Pacel a Ing. František FOJTÍK, PH.D. *Další experimentální metody* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-10]. ISBN ISBN 978-80-248-3018-6. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%209%20.pdf
- [35] EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS: Brittle lacquers. *Science Direct* [online]. Elsevier B.V., c2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/experimental-stress-analysis>
- [36] HÁJEK, Libor. *Měření zbytkových napětí s využitím digitální korelace obrazu*. Praha, 2019. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.
- [37] ŠIMEČEK, Jiří. Možnosti měření a měřicí metody. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/integrita_Simecek2.pdf
- [38] Distance Measurement using Ultrasonic Sensor and Arduino. *Arduino* [online]. Amazon [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://create.arduino.cc/projecthub/silicon-ripley-10/distance-measurement-using-ultrasonic-sensor-and-arduino-9bacd4>
- [39] BARTONÍK, Jan. *Možnosti bezdotykového měření vzdálenosti*. Zlín, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [40] CURTIS, Keith. Použití ultrazvukových měničů pro měření vzdálenosti. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. DPS Elektronika od A do Z, c2019, 2015 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:20858/pouziti-ultrazvukovych-menicu-pro-mereni-vzdalenosti>

- [41] *Estcom: oxidová keramika* [online]. Louny: ESTCOM CZ – oxidová keramika, c2006-2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.estcom.cz/cs/>
- [42] Infračervené snímání teploty – pyrometrie. *LumaSense Technologies* [online]. Těrlicko: PyrometrCZ.cz, c2017 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.pyrometr.cz/produkty/technologicky-prehled/nasetechnologie/infracervene-snimani-teploty-pyrometrie/>
- [43] Infračervené teploměry a termovizní kamery pro bezkontaktní měření. *Micro-Epsilon* [online]. Bechyně: Micro - Epsilon, c2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.micro-epsilon.cz/temperature-sensors/?gclid=EAIaIQobChMItayNuNKH4gIVCOR3Ch2x1AGfEAAYASAAEgJxPvD_BwE
- [44] OFV-551/552 Fiber-Optic Sensor Head. *Polytec* [online]. Berlin: Polytec, c2019, 2017 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_DS_OFV-551552_E_42368.pdf
- [45] A Good Practices Guide for Digital Image Correlation: Standardization, Good Practices, and Uncertainty Quantification Committee. *International digital image correlation society* [online]. International Digital Image Correlation Society (iDICs), c2019, c 2018, , 101 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.32720/idics/gpg.ed1. Dostupné z: http://idics.org/wp-content/uploads/2018/10/DICGoodPracticesGuide_ElectronicVersion-V5g-181022.pdf
- [46] *Sobriety* [online]. Kuřim: Sobriety, c2002-2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.sobriety.cz/>
- [47] Teplotní roztažnost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplotn%C3%AD_rozta%C5%BEnost
- [48] BLAŽEK, Pavel. Stanovení nejistoty měření průměru děr ocelových součástí pomocí rentgenové počítačové tomografie. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [49] High Temperature Ball Bearing VNT™ Turbo. *Garrett motion* [online]. Garrett Motion, c2019, 2012 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/news/video-center/video/ball-bearing-vnt/>
- [50] ŠIMEČEK, Jiří. Možnosti měření a měřící metody. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň: Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/integrita_Simecek2.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>DIC</i>		Digital image correlation
<i>HSC</i>		High speed camera
<i>k</i>	[-]	Konstanta citlivosti tenzometru
<i>l₀</i>	[m]	Počáteční délka tyčky
<i>m_p</i>	[g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹]	Měrná spotřeba paliva
<i>M_t</i>	[N·m]	Točivý moment
<i>n</i>	[-]	Počet prvků
<i>n_{TC}</i>	[min ⁻¹]	Otáčky turbodmyhadla
<i>p_e</i>	[MPa]	Střední efektivní tlak
<i>P_V</i>	[kW·dm ⁻³]	Měrný výkon motoru
<i>R</i>	[Ω]	Elektrický odpor
<i>u_A</i>	[m]	Nejistota typu A
<i>u_B</i>	[m]	Nejistota typu B
<i>u_c</i>	[m]	Kombinovaná nejistota
<i>v₀</i>	[m·s ⁻¹]	Obvodová rychlost
<i>ȳ</i>	[m]	Aritmetický průměr
<i>α</i>	[K ⁻¹]	Součinitel tepelné roztažnosti
<i>Δl</i>	[m]	Prodloužení
<i>Δt</i>	[K]	Změna teploty
<i>ε</i>	[Δl/l]	Poměrné prodloužení