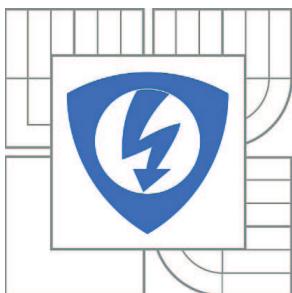


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

TERMOVIZNÍ ZOBRAZOVAČE V TECHNICKÉ DIAGNOSTICE

THERMAL IMAGERS IN TECHNICAL DIAGNOSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

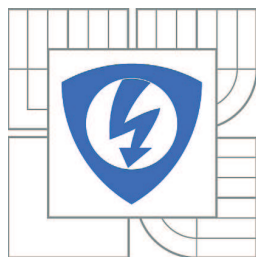
Bc. MARTIN HALTUF

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUDVÍK BEJČEK, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Haltuf

ID: 80570

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Termovizní zobrazovače v technické diagnostice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V návaznosti na semestrální projekty se zabývejte technickou termodiagnostikou pomocí termovizního zobrazovače Fluke Ti55. Zaměřte se zejména na oblast mechanických napětí. Experimentální výsledky analyzujte a porovnejte s standardními diagnostickými metodami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

KREIDL, M.-ŠMÍD, R.: Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu. Měření teploty. BEN Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6 / 9788073001582.

Podle vlastního literárního průzkumu.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 24.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Termovizní zobrazovače v technické diagnostice

Diplomová práce

Bakalářský studijní obor: Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Haltuf

Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá technickou termodiagnostikou pomocí termovizního zobrazovače Fluke Ti55. V úvodní části práce je rozebrán popis bezdotykového měření teploty včetně principu, nejistot měření a měřicího systému. V následujících částech je práce zaměřená na termovizi, termogram, popis termovizního zobrazovače Fluke Ti55 a měření mechanického napětí. V závěrečné části práce je popis a zpracování provedených měření včetně jejich zhodnocení.

Klíčová slova: bezdotykové měření teploty, termogram, termokamera

Brno University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Control and Instrumentation

Thermal imagers in technical diagnosis

Master's thesis

Specialization of study: Cybernetics, control and Measurements

Student: Bc. Martin Haltuf

Supervisor: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Abstract:

In this thesis is dealt the technical term diagnostic with Fluke Ti55 thermo imager. In the introduction of description is analyzed noncontact temperature measurement including principle, uncertainties measurement and measurement system. In other parts of the work is focused on thermal imaging, termogram, description Fluke Ti55 thermo imager and measurement of mechanical stress. The concluding part of the description and processing of measurements, including their evaluation.

Keywords: noncontact temperature measurement, termogram, thermal imager

Bibliografická citace

HALTUF, M. *Termovizní zobrazovače v technické diagnostice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 82 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Termovizní zobrazovače v technické diagnostice" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **24. května 2010**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ludvíku Bejčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **24. května 2010**

.....
podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD	11
2. BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	12
2.1 Úvod do bezdotykového měření teploty	12
2.2 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty	13
2.3 Princip bezdotykového měření teploty	14
2.4 Dokonale černé těleso	16
2.5 Emisivita	17
2.6 Nejistoty měření	18
2.7 Infračervený měřicí systém	20
3. TERMOVIZE	22
3.1 Závislosti tepleného záření	22
3.2 Termografie	24
3.2.1 Pasivní termografie	24
3.2.2 Aktivní termografie	25
3.3 Termogram	26
4. TERMOKAMERA	27
4.1 Vlastnosti termokamery	27
4.2 Mikrobolometrické detektory	28
4.3 Zpracování termogramu	29
5. MECHANICKÉ NAPĚTÍ	31
5.1 Deformace pevných těles	31
5.2 Materiálový model	32
5.3 Měření mechanického napětí	32
5.4 Měření tenzometry	33
6. VLASTNÍ MĚŘENÍ	35
6.1 První měření - Změny teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem na určitý moment	35

6.2 Druhé měření - Změny teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem na určitý moment	38
6.3 Třetí měření - Změny teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem na určitý moment	42
6.4 Čtvrté měření - Změny teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem na určitý moment - nerezová ocel	52
6.5 Páté měření - Změny teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem na určitý moment - nerezová ocel a pertinax (tvrzený papír)	60
6.6 Měření teploty v laboratoři	68
6.7 Možné parazitní vlivy	70
6.8 Rozměry použitých materiálů	72
6.9 Tepelná vodivost použitých materiálů	75
6.10 Použité přístroje	76
7. ZÁVĚR	77
8. LITERATURA	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1-1 Elektromagnetické spektrum v rozsahu od 0,4 μm do 24 μm [13]....	12
Obrázek 2.1-2 Využívaná část elektromagnetického spektra [6].....	13
Obrázek 2.3-1 Spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [13].....	16
Obrázek 2.4-1 Realizace černého tělesa [15].....	17
Obrázek 2.4-2 Černé těleso Omega BB703 [14]	17
Obrázek 2.5-1 Spektrální distribuce [13].....	18
Obrázek 2.6-1 Velikost snímané plochy objektu [20]	20
Obrázek 2.7-1 Infračervený měřicí systém [6]	20
Obrázek 2.7-2 Optický diagram infračerveného snímače teploty [6]	21
Obrázek 3.3-1 Ukázka termogramu černého tělesa	26
Obrázek 3.3-1 Termokamera Fluke Ti55 [12]	27
Obrázek 4.2-1 Mikrobolometrický element matice [15].....	29
Obrázek 4.3-1 Dodávaný software Fluke SmartView IR	30
Obrázek 5.1-1 Příklady deformace pevného tělesa [16]	31
Obrázek 5.2-1 Graf závislosti napětí-deformace [19].....	32
Obrázek 5.3-1 Mechanismus elastické deformace [21]	33
Obrázek 6.8-1 Materiál nikl	72
Obrázek 6.8-2 Materiál titan	72
Obrázek 6.8-3 Materiál železo	73
Obrázek 6.8-4 Materiál hliník	73
Obrázek 6.8-5 Materiál pertinax	73
Obrázek 6.8-6 Materiál nerezová ocel	74
Obrázek 6.8-7 Materiál nerezová ocel	74

SEZNAM TABULEK

Tabulka 6.1-1 Hodnoty naměřené teploty namáhaných materiálů	36
Tabulka 6.2-1 Změna teploty na obou otvorech namáhaného materiálu	38
Tabulka 6.3-1 Teplota šroubu při utažení a povolení - nikl	43
Tabulka 6.3-2 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - nikl	44
Tabulka 6.3-3 Teplota šroubu při utažení a povolení - titan	45
Tabulka 6.3-4 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - titan	46
Tabulka 6.3-5 Teplota šroubu při utažení a povolení - železo	47
Tabulka 6.3-6 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - železo	48
Tabulka 6.3-7 Teplota šroubu při utažení a povolení - hliník	49
Tabulka 6.3-8 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - hliník	50
Tabulka 6.4-1 Teplota šroubu při utažení a povolení - nerezová ocel	53
Tabulka 6.4-2 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - nerezová ocel	54
Tabulka 6.4-3 Teplota šroubu - spojení dvou nerezových ocelí	56
Tabulka 6.4-4 Teplota materiálu - spojení dvou nerezových ocelí	57
Tabulka 6.5-1 Teplota šroubu při utažení a povolení - nerezová ocel	61
Tabulka 6.5-2 Teplota šroubu při utažení a povolení - nerezová ocel	62
Tabulka 6.5-3 Teplota šroubu při utažení a povolení - pertinax	64
Tabulka 6.5-4 Teplota šroubu při utažení a povolení - pertinax	65
Tabulka 6.9-1 Tepelná vodivost použitých materiálů	75

1. ÚVOD

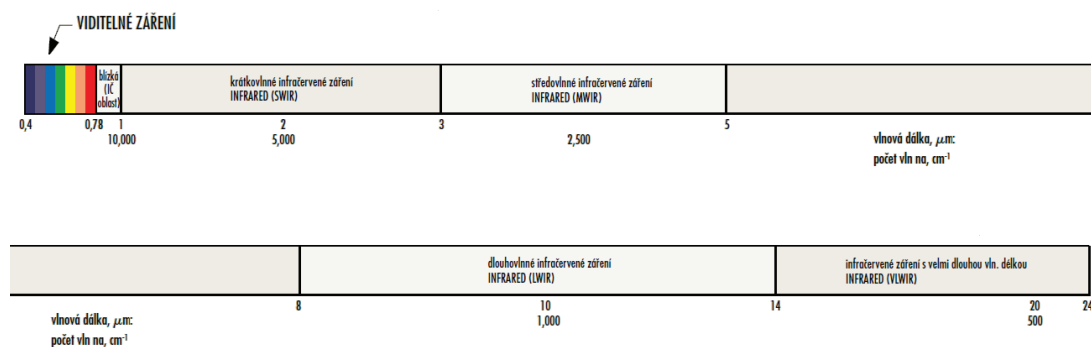
Informace o teplotě je velmi důležitá ať už při výrobě, bezpečnosti nebo jen údržbě. Teplota se dá měřit různými způsoby dotykových nebo bezdotykových snímačů teploty. V některých případech je měření teploty bezdotykově výhodnější. Jedná-li se o místa s horší dostupností, nebezpečná místa nebo jen o měření teploty pohybujících se objektů. Měření bezdotykově je dnes velmi jednoduché a také velmi rychlé. Při měření teploty bezdotykově nedochází k žádnému odebrání teplené energie z měřeného objektu, ale při špatném stanovení emisivity měřeného objektu může dojít i k chybným měření. Jedná se tedy o nedestruktivní metodu měření teploty bez poškození měřeného objektu a bezdotykové měření teploty lze tedy provádět i za provozu.

Zpracovaná práce je zaměřená na termovizní zobrazovač Fluke Ti55 a bezdotykové měření teploty. Popsán je princip bezdotykového měření teploty, nejistoty měření, emisivita, výhody a nevýhody, termovize, aktivní a pasivní termografie, termogram, popis a funkce termokamery. Popsán je i vznik mechanického napětí společně s možným měřením tenzometry. Součástí práce jsou i popisy provedených měření, výsledky měření a zjištěné skutečnosti.

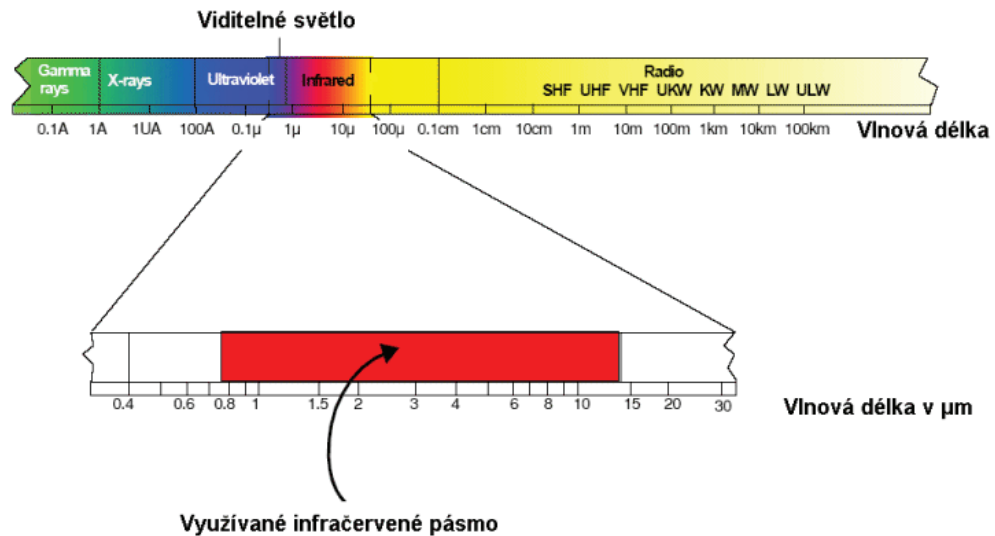
2. BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

2.1 ÚVOD DO BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty

Jak již bylo zmíněno v úvodu bezdotykové měření teploty je velmi jednoduchý a rychlý způsob měření teploty. Každé těleso vyzařuje (emituje) energii ve formě infračerveného záření a to i těleso chladnější než jeho okolí. Tato forma světelného záření není pouhým lidským okem viditelná, ale je možné ji použít pro bezdotykové měření teploty. Lidským okem je viditelný pouze zlomek vyzařované energie. Pokud by bylo možné lidským okem vnímat i infračervené záření, tak bychom viděli velmi dobře i ve tmě. Snímače pro bezdotykové měření teploty pracují s infračervenou částí elektromagnetického spektra vyzařované radiační energie tělesem. Vlnová délka části elektromagnetického záření, která se používá u bezdotykového měření teploty je od 0,4 μm do 24 μm . Jedná se o oblast viditelného spektra od 0,4 μm do 0,78 μm , oblast blízkého infračerveného spektra od 0,78 μm do 1 μm , oblast krátkovlnného infračerveného spektra od 1 μm do 3 μm , oblast středovlnného infračerveného spektra od 3 μm do 5 μm , oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 8 μm do 14 μm a oblast s velmi dlouhou vlnovou délkou infračerveného spektra od 14 μm do 524 μm [13][10].



Obrázek 2.1-1 Elektromagnetické spektrum v rozsahu od 0,4 μm do 24 μm [13]



Obrázek 2.1-2 Využívaná část elektromagnetického spektra [6]

2.2 VÝHODY A NEVÝHODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty

Výhody bezdotykového měření teploty:

- Měření na těžko přístupných místech
- Měření na nebezpečných místech
- Měření pohybujících se objektů
- Měření nebezpečných objektů
- Rychlé snímání teploty v reálném čase
- Zanedbatelný vliv měřicí techniky na objekt
- Žádné mechanické opotřebení měřeného objektu
- Možnost měření velmi vysokých teplot

Nevýhody bezdotykového měření teploty:

- Přesnost ovlivněna povrchovou úpravou
- Neznalost správné hodnoty emisivity povrchu
- Prach, plyn a jiné páry v prostředí ovlivňují přesnost
- Ovlivnění okolní teplotou

2.3 PRINCIP BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty

Každé těleso o povrchové teplotě vyšší než absolutní nula ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$) emituje elektromagnetické záření ve viditelném i neviditelném pásmu spektra odpovídající jeho teplotě. Toto záření se nazývá charakteristické záření, jejíž příčinou je vnitřní pohyb molekul a jejich intenzita pohybu závisí na teplotě objektu. Vyřazované fotonové částice se pohybují rychlostí světla a chovají se dle známých optických zákonů. Vztah mezi množstvím emitovaného záření, jeho vlnovou délkou a teplotou materiálu popisuje Planckův vyřazovací zákon. Tento zákon je základem všech infračervených snímačů teploty. Planckův zákon platí ovšem pouze pro dokonale černé těleso a je nutné brát v úvahu, že reálné objekty se nechovají jako ideální černé těleso [20][7][6].

Poznatky [7]:

- emitované záření se spojitě mění s vlnovou délkou
- při každé vlnové délce se emitované záření zvětšuje s rostoucí teplotou
- spektrální rozložení emitovaného záření se mění s teplotou

Planckův zákon [10]:

$$M_{0\lambda} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

kde $M_{0\lambda}$ je spektrální hustota vyzařování černého tělesa,
 c je rychlost světla ($c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$),
 h je Planckova konstanta ($h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$),
 c_1 je první vyřazovací konstanta
 $(c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 = (3,7417749 \pm 0,0000022) \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2})$,
 c_2 je druhá vyřazovací konstanta
 $(c_2 = h \cdot c / k = (1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K})$,
 λ je vlnová délka záření (m),
 T je termodynamická teplota černého tělesa (K).

Planckův zákon lze vyjádřit jednodušším vztahem pomocí Wienova zákona.

Wienův zákon [10]:

$$M_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (2)$$

kde $M_{0\lambda}$ je spektrální hustota vyzařování černého tělesa,

c_1 je první vyzařovací konstanta

$$(c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 = (3,7417749 \pm 0,0000022) \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}),$$

c_2 je druhá vyřazovací konstanta

$$(c_2 = h \cdot c / k = (1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}),$$

λ je vlnová délka záření (m),

T je termodynamická teplota černého tělesa (K).

Wienův posunovací zákon [8]:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad (3)$$

kde λ_m je vlnová délka záření (m),

b je konstanta (2898 $\mu\text{m} \cdot \text{K}$),

T je termodynamická teplota černého tělesa (K).

S rostoucí teplotou T klesá vlnová délka λ a naopak.

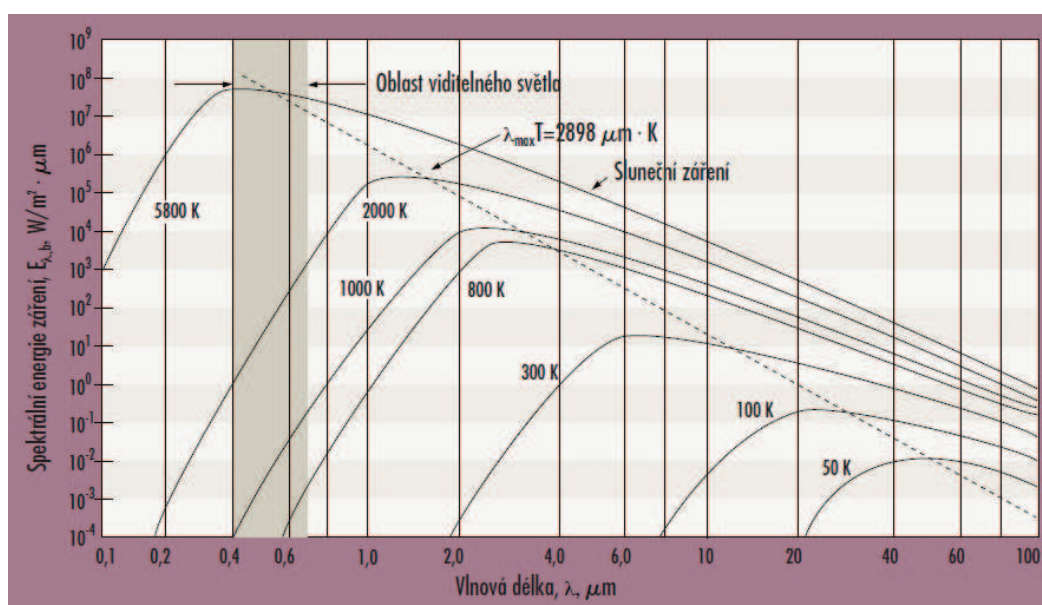
Dalším základním vztahem pro bezdotykové měření teploty je Stefan-Boltzmannův zákon, který udává intenzitu vyřazování pro danou teplotu v celém rozsahu vlnových délek.

Stefan-Boltzmannův zákon [10]:

$$M_0 = \int_0^{\infty} M_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (4)$$

kde M_0 je intenzita vyřazování černého tělesa,
 $M_{0\lambda}$ je spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa,
 λ je vlnová délka záření (m),
 σ je ($\sigma = (5,67051 \pm 0,00019) \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$),
 T je termodynamická teplota černého tělesa (K).

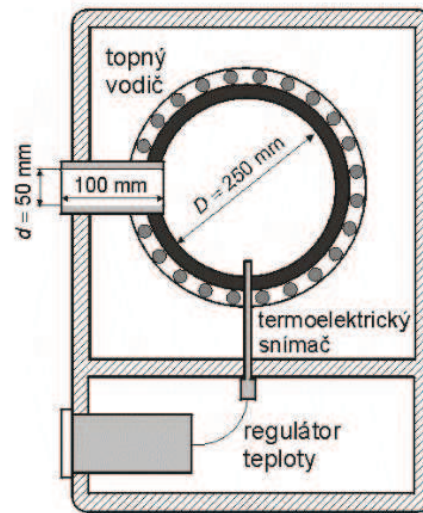
Následující obrázek ukazuje vyzařování tělesa při různých teplotách. Při velmi vysokých teplotách je vyzařované i malé množství viditelného záření.



Obrázek 2.3-1 Spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [13]

2.4 DOKONALE ČERNÉ TĚLESO

Dokonale černé těleso pohlcuje veškeré dopadající záření a je dokonale vyzařujícím tělesem. Dokáže pohltit záření různých úhlů dopadu o libovolné spektrální záři. Zář černého tělesa je ve všech směrech konstantní o hodnota emisivity černého tělesa je rovna jedné [10].



Obrázek 2.4-1 Realizace černého tělesa [15]

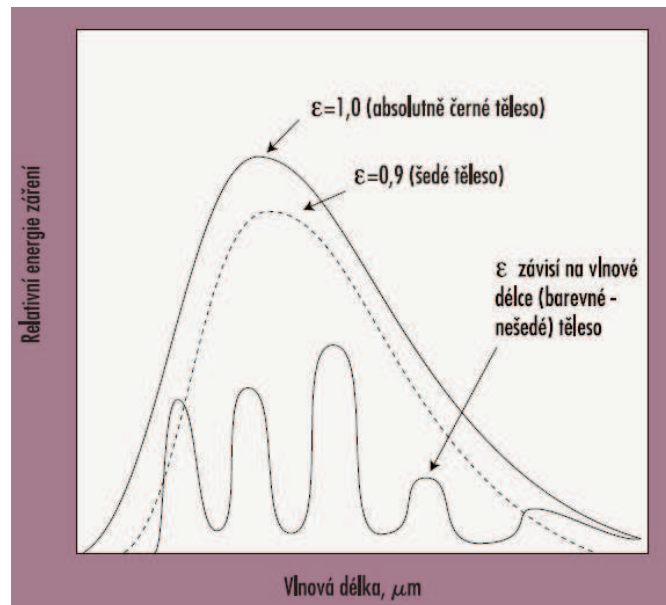


Obrázek 2.4-2 Černé těleso Omega BB703 [14]

2.5 EMISIVITA

Emisivita je vlastnost materiálu související s jeho schopností emitovat tepelné záření. a závisí na jeho jakosti a povrchu. Infračervené snímače teploty jsou kalibrovány pro měření teploty dokonale černého tělesa jehož emisivita je rovna jedné. Při stejné teplotě a vlnové délce nemůže žádný skutečný objekt emitovat více záření než černé těleso. Poměr záření emitovaného reálným objektem k záření emitovaného dokonale

černým tělesem při stejné teplotě a vlnové délce definuje emisivitu měřeného objektu. Reálné objekty mají emisivitu tedy nižší než dokonale černé těleso a to v rozmezí od 0 do 1 [7][3].



Obrázek 2.5-1 Spektrální distribuce [13]

2.6 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistoty měření jsou způsobené chybným nastavením emisivity povrchu materiálu. Možné metody zjištění správné hodnoty emisivity povrchu materiálu [20]:

- **vyhledání emisivity v tabulkách**

Hodnoty emisivity z tabulek by měly být brány jako orientační, protože přesnost dané hodnoty je ovlivněna ještě povrchovou úpravou daného materiálu.

- **ohřátí měřeného vzorku na známou teplotu**

Pokud ohřejeme materiál na předem známou teplotu, můžeme měnit nastavení emisivity až do doby než naměříme úplně stejnou teplotu, ale při nastavování nesmí dojít ke změně dané teploty.

- **použití speciálního nátěru materiálu nebo nálepky se známou emisivitou**

Dnes je k dostání různých druhů nátěru nebo samolepek se známou emisivitou, které lze na daný materiál nanést a měřit správnou hodnotu teploty materiálu.

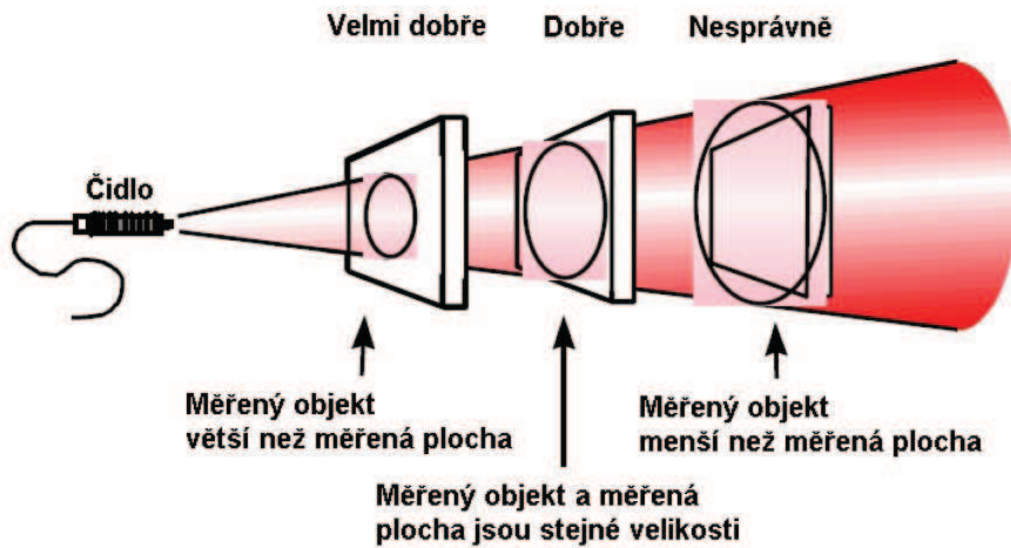
- **použití jiné metody měření povrchové teploty**

Například použití měřicí sondy dodávaného spolu s infračerveným snímačem teploty pro přednastavení hodnoty emisivity.

Nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem. Při průchodu atmosférou může docházet k zeslabení zářivého toku vlivem absorpcí nebo rozptylem infračerveného záření na molekulách plynu, kapkách vody, částicích kouře.

Nejistota měření způsobená nepřesnou korekcí odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt. Teplota okolního prostředí ovlivňuje velikost infračerveného záření a zrovna tak i proudění vzduchu kolem daného objektu. K ovlivnění dochází v závislosti na povrchových vlastnostech materiálu a to buď jeho skutečnou povrchovou teplotou (součinitel absorpce) nebo jeho zdánlivou povrchovou teplotou (součinitel reflexe).

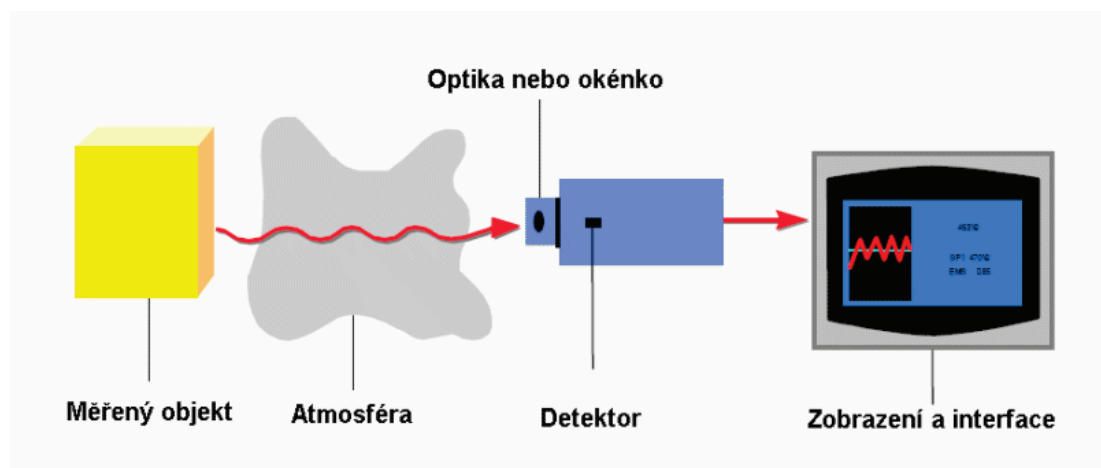
Nejistota způsobena špatným zaměřením měřeného objektu. Ke snímání infračerveného záření bezdotykovým snímačem teploty dochází většinou z kruhové měřené plochy. Měřený objekt musí tedy tuto plochu vyplňovat, jinak je měřená teplota ovlivněna i infračerveným zářením za objektem [20].



Obrázek 2.6-1 Velikost snímané plochy objektu [20]

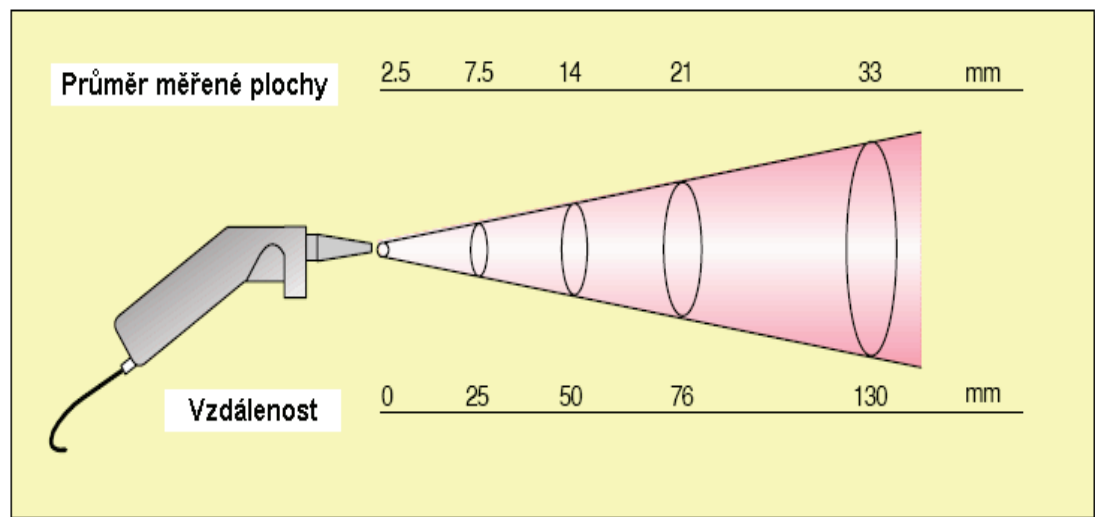
2.7 INFRAČERVENÝ MĚŘICÍ SYSTÉM

Infračervený měřicí systém se skládá z optiky, detektoru a zobrazovacího systému.



Obrázek 2.7-1 Infračervený měřicí systém [6]

Optické rozlišení je definováno poměrem $D:S$, což je průměr měřené plochy D k vzdálenosti S měřicího přístroje od měřeného objektu. Čím větší je tato hodnota, tím lepší je rozlišení měřicího přístroje a tím menší je měřená plocha při dané vzdálenosti. Na následujícím obrázku je zobrazen optický diagram infračerveného snímače teploty (ve vzdálenosti $S=130$ mm je průměr plochy $D=33$ mm, což odpovídá $D:S = 1:4$) [6].



Obrázek 2.7-2 Optický diagram infračerveného snímače teploty [6]

3. TERMOVIZE

Termovizní systémy se dělí na systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu a systémy s maticovými detektory. Dnes se termovizní systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu již nepoužívají a dnešní termovizní kamery používají systém s maticovými mikrobolometrickými detektory. Zpracování signálu je realizováno přímo na čipu prostřednictvím multiplexorů a A/D převodníků v každé řádce matice. Pomocí amplitudového diskriminátoru lze u termovize nastavit libovolné rozmezí teplot a libovolnou paletu barev. Pomocí termovize lze například lokalizovat úniky tepla, různé materiálové vady, opotřebení způsobené třením, izolační stav izolátorů nebo stav pláště elektromotoru. Termovize je tedy základním měřicím zařízením pro infračervenou diagnostiku.

Termovize snímá v určitém úhlu a z určité vzdálenosti emitované tepelné záření o vlnové délce dané vlastnostmi záření. Tento tepelný tok vizualizuje do určeného barevného spektra. Množství tepelného záření emitovaného daným objektem je závislé na emisivitě povrchu, na úhlu snímání, na snímané vlnové délce, na teplotě povrchu měřeného objektu, teplota okolí, proudění vzduchu, vzdálenost od měřeného objektu a rozlišení termokamery [10][3].

3.1 ZÁVISLOSTI TEPELNÉHO ZÁŘENÍ

Možné závislosti tepelného záření emitovaného objektem [3]:

- **Emisivita**

Vlastnosti emisivity byly již popsány v kapitole bezdotykové měření teploty.

- **Úhel snímání**

Při snímání je nutné si uvědomit, že emisivita závisí na úhlu a je pod každým úhlem jiná. Množství vyzářené energie je závislé na úhlu vyzařování. Obecně ale platí, že emisivita je přibližně konstantní do úhlu snímání 60° od kolmice.

Pod většími úhly již emisivita výrazně klesá a objekt má zdánlivě nižší povrchovou teplotu.

- **Vlnová délka**

Termokamery používají dvě hlavní pásma vlnových délek a to krátkovlnné a dlouhovlnné. Emisivita při snímání krátkovlnnými termokamerami hraje větší roli než u dlouhovlnných termokamer. Krátkovlnné termokamery měří v té vlnové délce, kde je emisivita materiálu již výrazně závislá na jeho barvě a chemickém složení.

- **Teplota měřeného objektu**

Termovize zobrazuje povrchovou teplotu měřeného objektu a ne rozložení a průběh teplot v měřeném objektu. Tento fakt je při provádění měření nutno si uvědomovat.

- **Teplota okolí**

Jeli teplota okolí chybně zadána může dojít k nepřesnému vyčíslení povrchové teploty měřeného objektu. Ale mezi jednotlivými body na jednom termogramu zůstane rozdíl teploty stejný.

- **Proudění vzduchu**

Proudění vzduchu kolem měřeného objektu může ovlivnit jeho povrchovou teplotu.

- **Rozlišení termovize**

Počet zobrazovaných bodů je podstatný údaj, který může ovlivnit odečítání teplot. Termokamery snímají objekty s různě velkými teplotními čidly. Každému snímanému bodu je přiřazena určitá teplota a proto záleží na velikosti snímaného bodu. Příkladem je termokamera s rozlišením 120 x 120 bodů, která snímá objekt o velikosti 6 m. Velikost jednoho bodu je tedy 50 mm a to znamená, že bodu o velikosti 50 x 50 mm je přiřazena

průměrná teplota z celé velikosti tohoto bodu. V souvislosti je nutné si uvědomit, že velikost snímaného bodu se zvětšuje s rostoucí vzdáleností. V současnosti se uvádí, že minimální rozlišení pro profesionální diagnostiku je 320 x 240 bodů. Nakonec lze říci, že rozměr bodů klesá s rostoucím rozlišením a lineárně vzrůstá se vzdáleností objektu.

- **Vzdálenost od měřeného objektu**

Vzdálenost termokamery od měřené objektu úzce souvisí s rozlišením dané termokamery. Bude-li velikost snímaného bodu větší než velikost měřeného objektu bude měřené teplota ovlivněna i okolím měřeného objektu. V takovém případě lze termokameru buďto přiblížit, nebo použít jiný objektiv, který je dnes společně s profesionální termokamerou dodáván.

3.2 TERMOGRAFIE

Jedná se o nedestruktivní metodu založenou na zobrazení a vyhodnocení teplotního pole povrchu objektu. Zobrazení teplotního pole se nazývá termogram. Termografie se dělí na pasivní a aktivní termografii a je v současné době oblíbenou technikou, která převádí vyzařované infračervené záření povrchu měřeného objektu na obrazový signál. Signál se zobrazuje na displeji v řadě barevných odstínů znázorňujících určitý teplotní rozsah [10].

3.2.1 Pasivní termografie

Pasivní termografie je zobrazení teplotních polí povrchů objektů, které vyvíjí nebo absorbují teplo. Nejčastěji se jedná o mechanické nebo elektrické zařízení. Pomocí termogramu je možné zjištění opotřebení mechanických dílů vlivem tření nebo u elektrických zařízení nepřipustný ohřev ztrátovým výkonem způsobený elektrickým proudem. Pasivní termografie je měření teplotních polí převážně pro preventivní údržbu daných objektů. Také lze použít pro vyhodnocení úniku tepla vlivem poškozené tepelné izolace. Nevýhodou je možné chybné vyhodnocení termogramu vlivem prostředí a emisivitou povrchu tělesa [10].

3.2.2 Aktivní termografie

Aktivní termografie je založena na řízené stimulaci tepelné vlny v tělese. Tyto tepelné vlny jsou na povrchu těles snímány termokamerou. Defekty v podpovrchové vrstvě se projeví diferencemi v rozložení povrchové teploty. Nejčastější zdroje tepla, které jsou použity mimo těleso: halogenová lampa, pulzní laser, výkonový blesk, xenonová výbojka. Dále mohou být použity zdroje tepla, které vybudí tepelnou stimulaci třením struktury hmoty tělesa prostupující ultrazvukovou vlnou. U elektricky vodivých těles je možná stimulace z externí cívky indukovaných vířivých proudů. Aktivní termografie se dělí na pulzní termografii a lock-in termografii [10].

- **Pulzní termografie**

Tato metoda spočívá v rychlém externím nebo interním ohřevu tělesa a následným vyhodnocení tepelného pole na povrchu tělesa termokamerou. Defekt v tělese způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny. To se na teplotním poli povrchu zobrazí jako oblasti s rozdílnou teplotou. Pro materiály s vysokou hodnotou tepelné vodivosti je potřebná doba trvání pulzu pro ohřev tělesa v řádech milisekund. Pro materiály s nízkou hodnotou tepelné vodivosti je doba trvání v řádu sekund. Teplota pulzního ohřevu musí být taková, aby nedošlo k poškození objektu. Nevýhoda tohoto typu termografie je stejná jako u pasivní termografie a to vliv prostředí a emisivity povrchu tělesa [9][10].

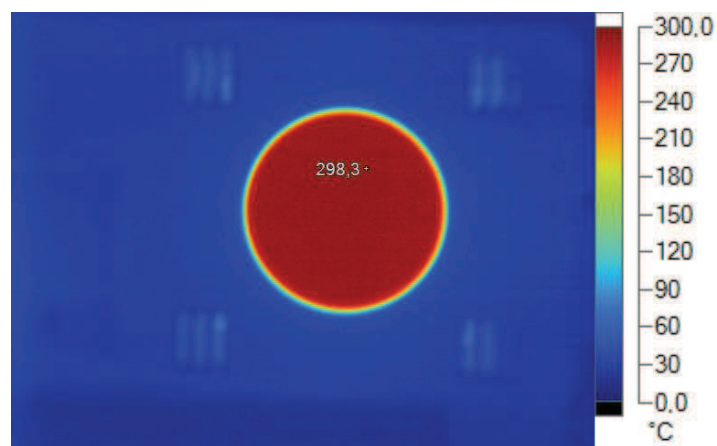
- **Lock-in termografie**

Lock-in termografie je založena na modulaci řízeného tepelného toku dopadající na těleso. Tepelná vlna pronikající dovnitř tělesa se v místě změny struktury materiálu odráží zpět k povrchu tělesa. Na povrchu dochází k interferencím vyřazovaného a primárního záření. Termokamerou lze z každého nasnímaného pixelu stanovit amplitudu a fázový posun. Amplituda signálu z jednotlivých pixelů je ovlivněna pohltivostí a emisivitou povrchu

tělesa. Ve fázi signálu jsou tyto jevy vyloučeny a projeví se pouze informace o povrchové teplotě [9][10].

3.3 TERMOGRAM

Termogram respektive infračervený snímek je obraz teplotních polí pořízený termokamerou. Termovizní snímky vizualizují tepelný tok přiřazením barevné palety různým teplotám. Stejný snímek lze zobrazit v různých barevných paletách a tím zvýraznit různá místa na snímku. Na termokameře Fluke Ti55 lze nastavit tyto palety barev: šedá, invertovaná šedá, modro-červená, kovová, jantarová, invertovaná jantarová. Termovizní snímky mohou být radiometrické a neradiometrické. Neradiometrické snímky jsou pouze zobrazující. Z radiometrických snímku je možné vyčítání teplot povrchu objektu. V plně radiometrickém snímku lze provádět měření teplot a upravit parametry snímku i po jeho uložení. Dnešní termokamery nabízejí kromě termogramu i běžnou fotografii měřeného objektu. Možné je i jejich prolínání [17].



Obrázek 3.3-1 Ukázka termogramu černého tělesa

4. TERMOKAMERA

K měření tepelného toku byla použita přenosná termokamera řady FlexCam. Jedná se o typ Fluke Ti55 s funkcí IR Fusion – prolínání obrázků. Tato funkce umožňuje prolínání obrázků viditelného spektra s termovizními obrázky. Termokamera Fluke Ti55 je plně radiometrická a je učená pro měření teploty a současné zobrazování a analýzu teplotních polí.



Obrázek 3.3-1 Termokamera Fluke Ti55 [12]

4.1 VLASTNOSTI TERMOKAMERY

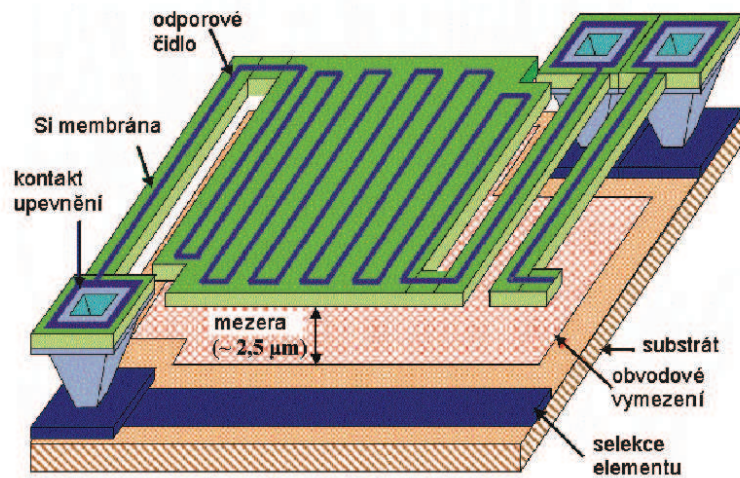
Vlastnosti termokamery Fluke Ti55 [5]:

Rozlišení detektoru:	320 x 240 pixelů
Typ detektoru:	320 x 240 ohniskový rovinný svazek, nechlazený mikrobolometr
Snímková frekvence:	60 Hz
Teplotní rozsahy:	-20 až 100 °C -20 až 350 °C 250 až 600 °C
Přesnost:	±2 °C nebo ±2 %
Spektrální citlivost:	8 až 14 μm
Teplotní citlivost:	≤ 0,05 °C při 30 °C

Pracovní teplota okolí:	-10 až 50 °C
Elektronický zoom:	2x, 4x, 8x, (2x, 4x při funkci IR Fusion)
Nastavení emisivity:	od 0,01 do 1,00 po 0,01 krocích
Minimální vzdálenost:	0,15 m
Režimy měření:	střední bod, střední okénko (oblast min./max., průměr), pohyblivá místa/okénka, textové vysvětlivky stanovené uživatelem, izotermy, automatická detekce studeného a horkého bodu
Objektivy:	standardní 20 mm, širokoúhlý 10,5 mm, teleobjektiv 54 mm
Laser:	laserové zaměřování, třída II
Nastavení:	datum, čas, emisivita, teplota pozadí, teplotní jednotky
Provozní teplota:	-10 °C až +50 °C
Odolnost:	IP54, odolnost krytí vůči vodě a prachu
Hmotnost:	1,95 kg včetně baterie

4.2 MIKROBOLOMETRICKÉ DETEKTORY

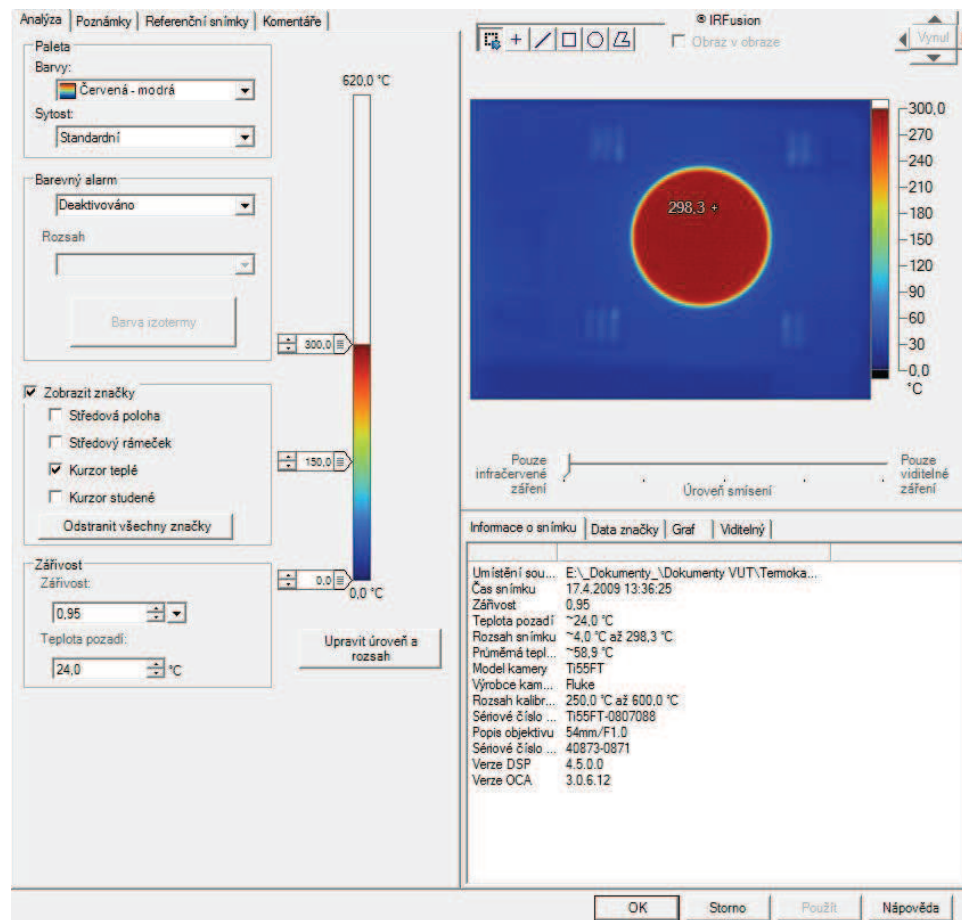
Bolometrické detektory infračerveného záření snímají oteplení detektoru teplotně závislým odporovým materiálem. Jedná se tedy o pohlcené záření, které způsobí změnu teploty odporového materiálu a jeho následnou změnu elektrického odporu. Používá se tenkovrstvé mikroelektronické technologie z odporových materiálů. Mikrobolometrické senzory se v termovizních systémech používají jako plošné detektory s maticovým uspořádání. Matice obsahují 320 x 240 až 640 x 480 elementů [10].



Obrázek 4.2-1 Mikrobolometrický element matice [15]

4.3 ZPRACOVÁNÍ TERMOGRAMU

Zpracování termogramu z termokamery umožňuje většinou dodávané programové vybavení společně s termokamerou. U termokamer firmy Fluke k tomuto účelu slouží dodávaný software Fluke SmartView IR. Tento výkonný software je modulární souprava nástrojů pro analýzu pořízených termogramů. Software například umožňuje nastavení základních parametrů, vykreslením teplotních polí, vyhodnocení minimální, střední a maximální hodnoty libovolné části obrazu, vyhodnocení teploty v libovolném místě obrazu, nastavení emisivity pro libovolnou část a místo v obraze, změnu palety barev a přidání komentářů. V několika snadných krocích daný software vytvoří i kompletní zprávu jednoho i více termogramů [4].



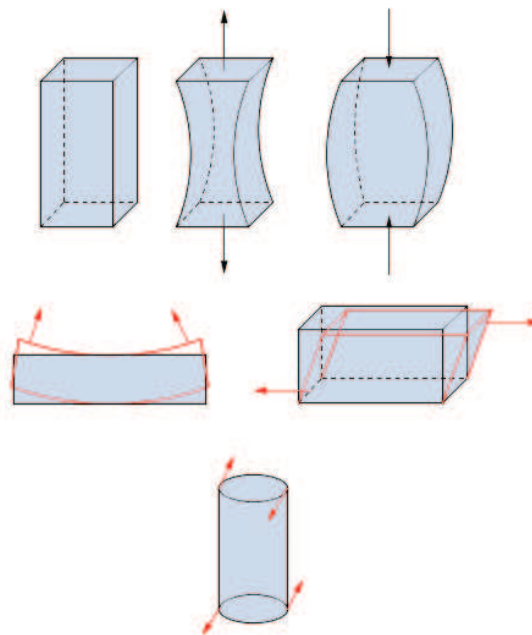
Obrázek 4.3-1 Dodávaný software Fluke SmartView IR

5. MECHANICKÉ NAPĚTÍ

Mechanické napětí (působení vnitřních sil) a deformace (změna tvaru tělesa) představují odezvu na jeho vnější zatížení. Pro jejich stanovení se používají především odporové tenzometry. Tenzometry umožňují měření statických i dynamických deformací v širokém rozsahu zatížení a teplot [18].

5.1 DEFORMACE PEVNÝCH TĚLES

Působením vnějších sil mohou pevná tělesa měnit svůj tvar i rozměr. Tento jev se nazývá deformace a dělí se na deformaci pružnou - elastickou nebo na deformaci tvárnou - plastickou. První zmíněná deformace získá po skončení působení původní tvar a druhá zmíněná deformace po skončení původní tvar již nezíská. Podle způsobu působení vnějších sil na deformované těleso rozeznáváme pět druhů deformací. Deformaci tahem, deformaci tlakem, deformace ohybem, deformace smykem a deformace kroucením [16].

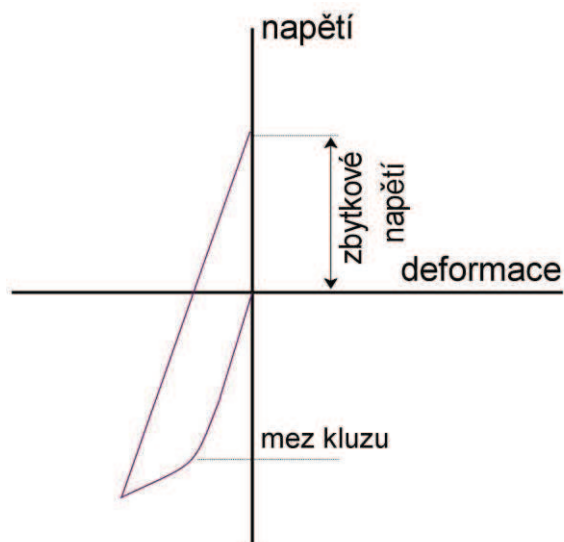


Obrázek 5.1-1 Příklady deformace pevného tělesa [16]

Deformace tahem vzniká působením dvou stejně velkých sil opačného směru směřující ven z tělesa. Deformace tlakem vzniká při působení dvou stejně velkých sil proti sobě. Deformace ohybem nastává u nosníku podepřené na obou jeho koncích. Deformace smykem je deformace způsobená působením síly na horní a dolní podstavu tělesa v opačném směru. Deformace kroucením je způsobena dvěma stejnými silovými dvojicemi, jejichž momenty sil jsou opačné [16].

5.2 MATERIÁLOVÝ MODEL

Materiálový model popisuje vztah mezi napětím a deformací.



Obrázek 5.2-1 Graf závislosti napětí-deformace [19]

5.3 MĚŘENÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ

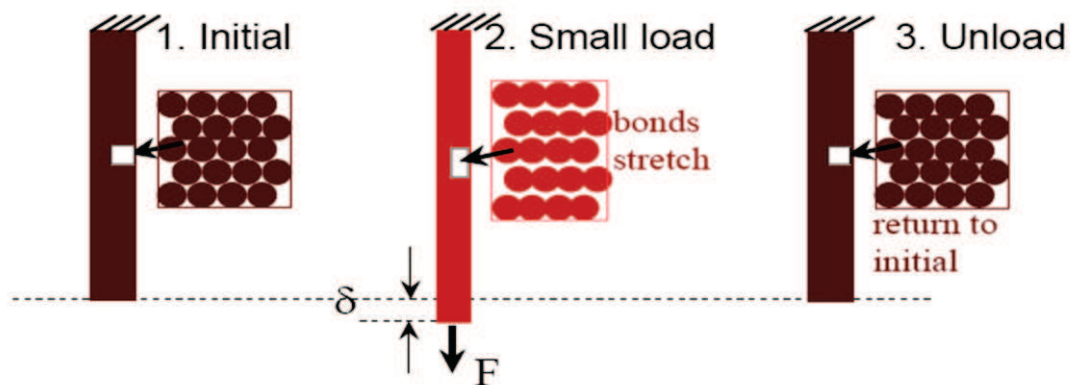
Vznik mechanického napětí je způsoben vlivem vnitřních sil v tělese, které brání v jeho deformaci. Podle tvaru závislosti mezi napětím a elastickou deformací se materiály dělí na materiály s lineární závislostí a na materiály s nelineární závislostí. Pro materiály s lineární závislostí platí Hookeův zákon [21].

Hookeův zákon [21]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_e \quad (5)$$

kde σ je mechanické napětí,
 ε_e je poměrné délkové prodloužení,
 E je modul pružnosti v tahu.

Při elastické deformaci se atomy v uzlových bodech mřížky vlivem působení vnějšího zatížení oddálí nebo přiblíží, aniž by došlo k jejich přesunu do jiného uzlového bodu. Po odlehčení se atomy vrátí do své původní rovnovážné polohy. Překročí-li vnější zatížení určitou mez, vytvoří se v materiálu plastická deformace [21].



Obrázek 5.3-1 Mechanismus elastické deformace [21]

5.4 MĚŘENÍ TENZOMETRY

Tenzometry se uplatní v senzorech mechanických veličin a vyrábějí se v kovovém a polovodičovém provedení. Jsou-li tenzometry napájené stejnosměrným nebo střídavým proudem mění svůj ohmický odpor při vystavení mechanické deformaci. U kovových tenzometrů je změna odporu způsobena změnou průřezu drátku měřící mřížky a její délky, u polovodičových tenzometrů je způsobena především změnou jejího měrného odporu, což je projev piezorezistentního jevu. Rozdílné fyzikální

principy vedou k odlišným technickým vlastnostem obou druhů tenzometrů a tedy i k rozdílným oblastem jejich použití. Kovové tenzometry se uplatňují tam, kde je vyžadována velká přesnost, zatímco polovodičové tenzometry tam, kde je třeba velká citlivost. Nevýhodou a současně parazitním vlivem, která ovlivňuje přesnost měření tenzometry je teplota. Proto se tenzometry používají v zapojených do můstku s kompenzačním členem teploty.

Použití kovových tenzometrů jsou často využívány k měření povrchových deformací kriticky namáhaných součástek i pro měření rozsáhlých deformačních polí složitě namáhaných mechanických konstrukcí. Nejrozsáhlejší měření jsou prováděna v automobilovém a leteckém průmyslu. Polovodičové tenzometry jsou používané výhradně v senzorech mechanických veličin. K měření deformačních polí se používají velmi výjimečně. Předností polovodičových tenzometrů je asi 60 krát vyšší citlivost než kovových tenzometrů [2].

6. VLASTNÍ MĚŘENÍ

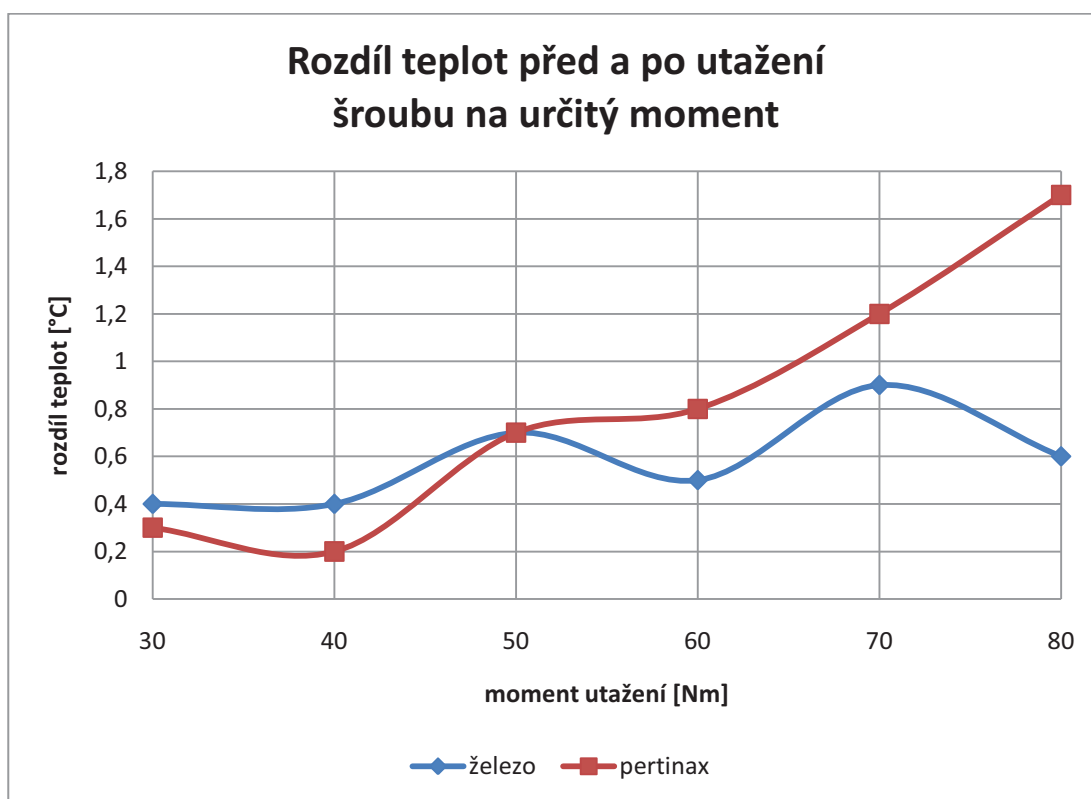
6.1 PRVNÍ MĚŘENÍ - ZMĚNY TEPLoty NAMÁHANÉHO MATERIÁLU UTAŽENÝM ŠROUBEM NA URČITÝ MOMENT

Do otvoru materiálu byl vložen neutažený šroub s maticí a celý materiál byl upevněn do svěráku. Termokamerou byla změřena teplota materiálu. Poté byl šroub utažen momentovým klíčem na určitý moment a opět změřena teplota již namáhaného materiálu. Před každým utažením šroubu na určitou hodnotu momentu byla matice povolena. Výsledky měření a rozdíly teplot materiálu před a po utažení šroubu jsou uvedeny v tabulce a vyneseny do grafu.

Objektiv termokamery:	20 mm
Rozsah termokamery:	-20 °C až 100 °C
Emisivita:	1
Okolní teplota:	26 °C
Vzdálenost:	0,5 m
Materiál:	železo, pertinax
Typ šroubu:	šroub šestihran, pevnost 8.8, průměr 10 mm, lesklý
Moment utažení:	30 Nm, 40 Nm, 50 Nm, 60 Nm, 70 Nm, 80 Nm

Tabulka 6.1-1 Hodnoty naměřené teploty namáhaných materiálů

moment [Nm]	železo [°C]	pertinax [°C]
30 před utažením	27,2	27,6
30 po utažení	27,6	27,9
30 rozdíl	0,4	0,3
40 před utažením	27,4	28,1
40 po utažení	27,8	28,3
40 rozdíl	0,4	0,2
50 před utažením	27,4	28,3
50 po utažení	28,1	29,0
50 rozdíl	0,7	0,7
60 před utažením	27,5	28,6
60 po utažení	28,0	29,4
60 rozdíl	0,5	0,8
70 před utažením	27,4	28,6
70 po utažení	28,3	29,8
70 rozdíl	0,9	1,2
80 před utažením	27,4	28,6
80 po utažení	28,0	30,3
80 rozdíl	0,6	1,7



Z výsledném grafu vyplývá, že rozdíl teplot v okolí utaženého šroubu stoupá s vyšší hodnotou momentu utažení šroubu pouze u materiálu pertinax. Při tomto měření nebyly odstraněny možné parazitní vlivy, které budou v následujících měření postupně odstraňovány. Měřené materiály neměly žádnou povrchovou úpravu a jednalo se o dva materiály s různou tepelnou vodivostí. Při měření nebyla nijak zohledňována hodnota emisivity, ale jelikož se jedná o rozdíl teplot na stejném povrchu jednoho materiálu, je hodnota emisivity nastavena na konstantní hodnotu. Materiál nebyl nijak odizolován od žebér použitého svěráku. Utahování šroubu probíhalo na hlavě šroubu a mohlo tedy docházet i k zvyšování teploty vlivem tření hlavy šroubu a popřípadě i tření momentového klíče. Před utahováním šroubu na následující hodnotu momentu byl šroub povel. Problémem tohoto typu měření byla také rozdílná doba mezi utažením šroubu a sejmutí termogramu na termokameře.

6.2 DRUHÉ MĚŘENÍ - ZMĚNY TEPLOTY NAMÁHANÉHO MATERIÁLU UTAŽENÝM ŠROUBEM NA URČITÝ MOMENT

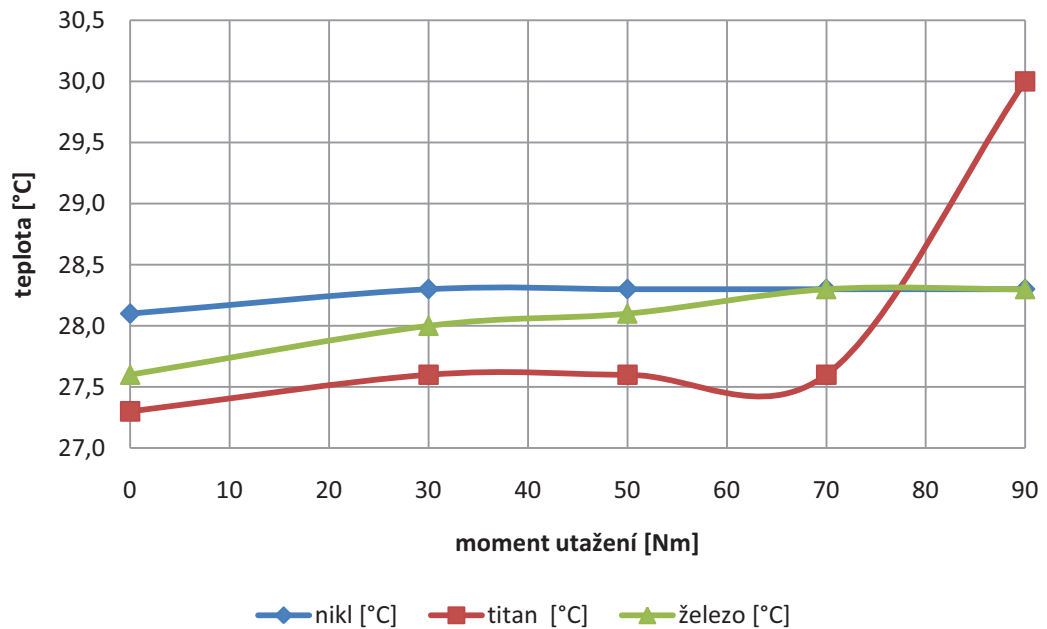
Do otvoru materiálu byl vložen neutažený šroub s maticí a materiál byl upevněn do svěráku. Termokamerou byla změřena teplota materiálu. Poté byl šroub utažen momentovým klíčem na určitý moment a opět změřena teplota již namáhaného materiálu. K utahování šroubu docházelo postupně. Před každým utažením šroubu na další hodnotu momentu nedocházelo již k povolání šroubu jako v předešlém měření. Měření bylo provedeno dvakrát a pokaždé se jednalo o první měření na vytvořeném otvoru daného materiálu. Změřené hodnoty teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem jsou uvedeny v tabulce a vyneseny do grafu.

Objektiv termokamery:	20 mm
Rozsah termokamery:	-20 °C až 100 °C
Emisivita:	1
Okolní teplota:	26 °C
Vzdálenost:	0,3 m
Materiál:	nikl, titan, železo
Typ šroubu:	šroub šestihran, pevnost 8.8, průměr 10 mm, lesklý
Moment utažení:	0 Nm, 30 Nm, 50 Nm, 70 Nm, 90 Nm

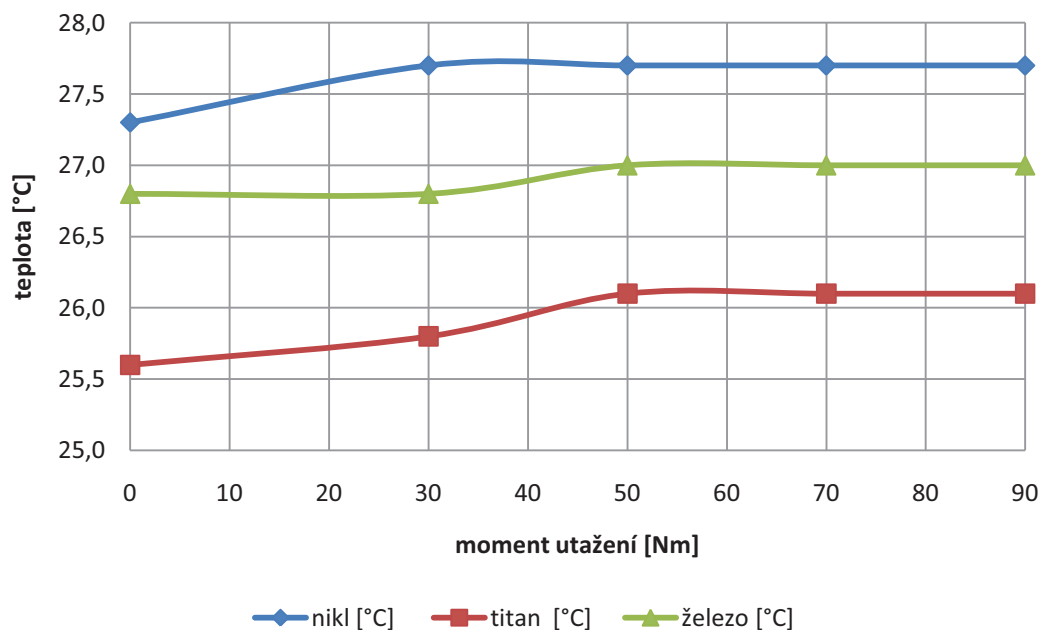
Tabulka 6.2-1 Změna teploty na obou otvorech namáhaného materiálu

moment utažení [Nm]	nikl otvor 1 [°C]	nikl otvor 2 [°C]	titan otvor 1 [°C]	titan otvor 2 [°C]	železo otvor 1 [°C]	železo otvor 2 [°C]
0	28,1	27,3	27,3	25,6	27,6	26,8
30	28,3	27,7	27,6	25,8	28,0	26,8
50	28,3	27,7	27,6	26,1	28,1	27,0
70	28,3	27,7	27,6	26,1	28,3	27,0
90	28,3	27,7	30,0	26,1	28,3	27,0

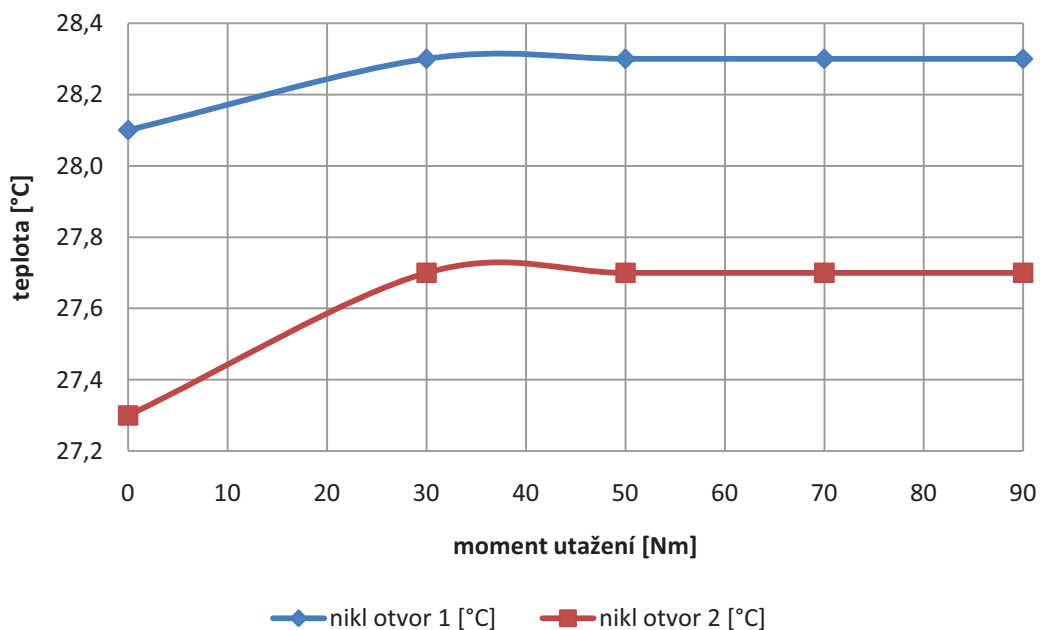
Změna teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem na určitý moment - otvor 1



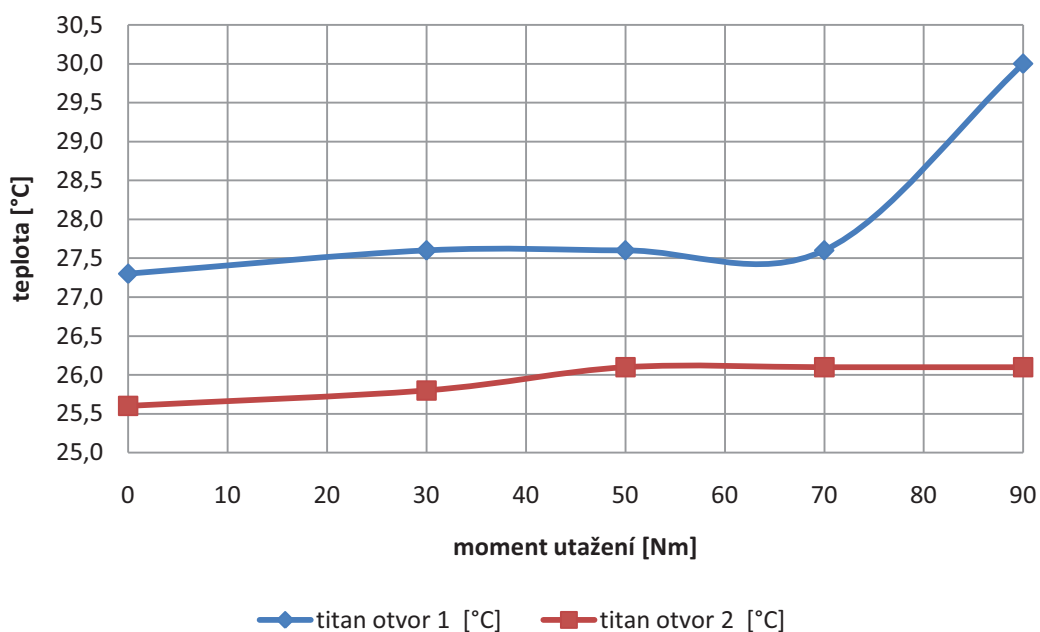
Změna teploty namáhaného materiálu utaženým šroubem na určitý moment - otvor 2

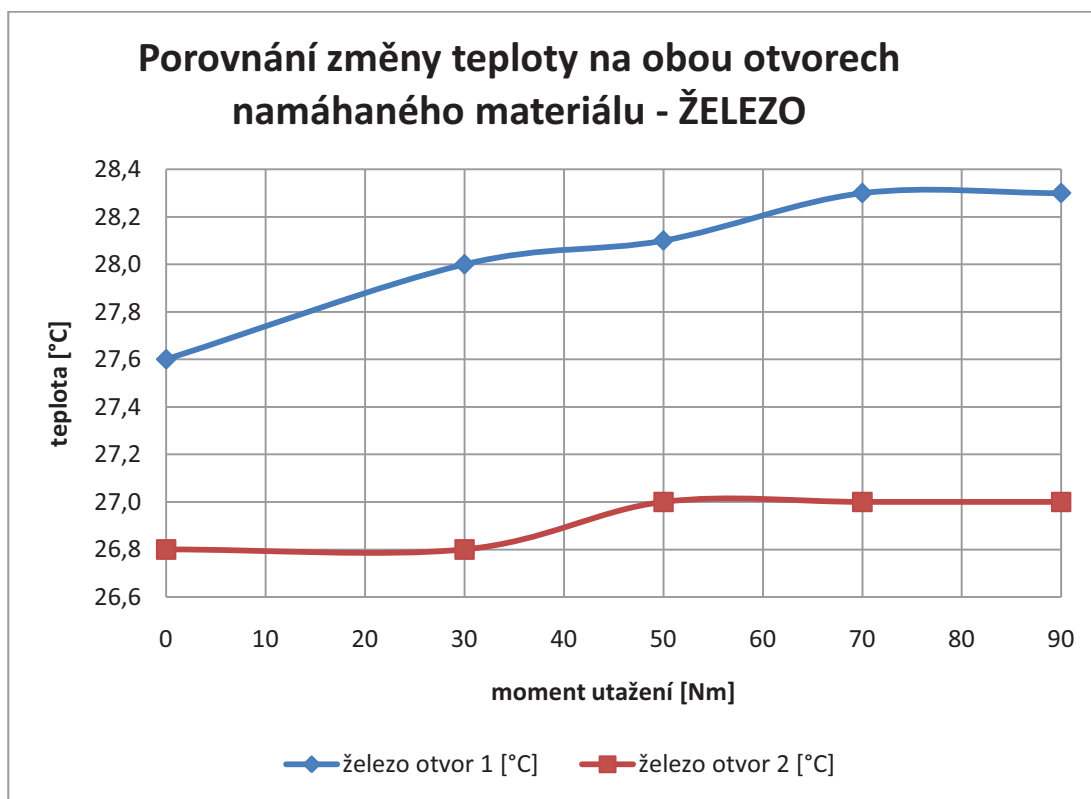


Porovnání změny teploty na obou otvorech namáhaného materiálu - NIKL



Porovnání změny teploty na obou otvorech namáhaného materiálu - TITAN





Z naměřených hodnot a výsledných grafů vyplývá, že moment utažení šroubu se na změnu teploty projevuje převážně jen při prvním utažení šroubu. Poté již změna není znatelná. Možnou příčinou těchto výsledků je zvolený způsob utahování šroubu. Utahování šroubu na určitý moment probíhalo postupně a před utažením na vyšší hodnotu momentu nedocházelo k povolení šroubu. Měřené materiály neměly žádnou povrchovou úpravu, jako v předešlém měření byla hodnota emisivity nastavená na konstantní hodnotu. Materiál byl již odizolován od žeber svěráku, byla také zkrácena vzdálenost termokamery od měřeného materiálu a tím i zmenšené zorného pole termokamery. Stále však utahování šroubu a snímání probíhalo ze strany hlavy šroubu a mohlo tedy docházet k již zmíněnému tření a také časové prodlevě mezi utažením šroubu a sejmutím termogramu termokamerou.

6.3 TŘETÍ MĚŘENÍ - ZMĚNY TEPLoty NAMÁHANÉHO MATERIÁLU UTAŽENÝM ŠROUBEM NA URČITÝ MOMENT

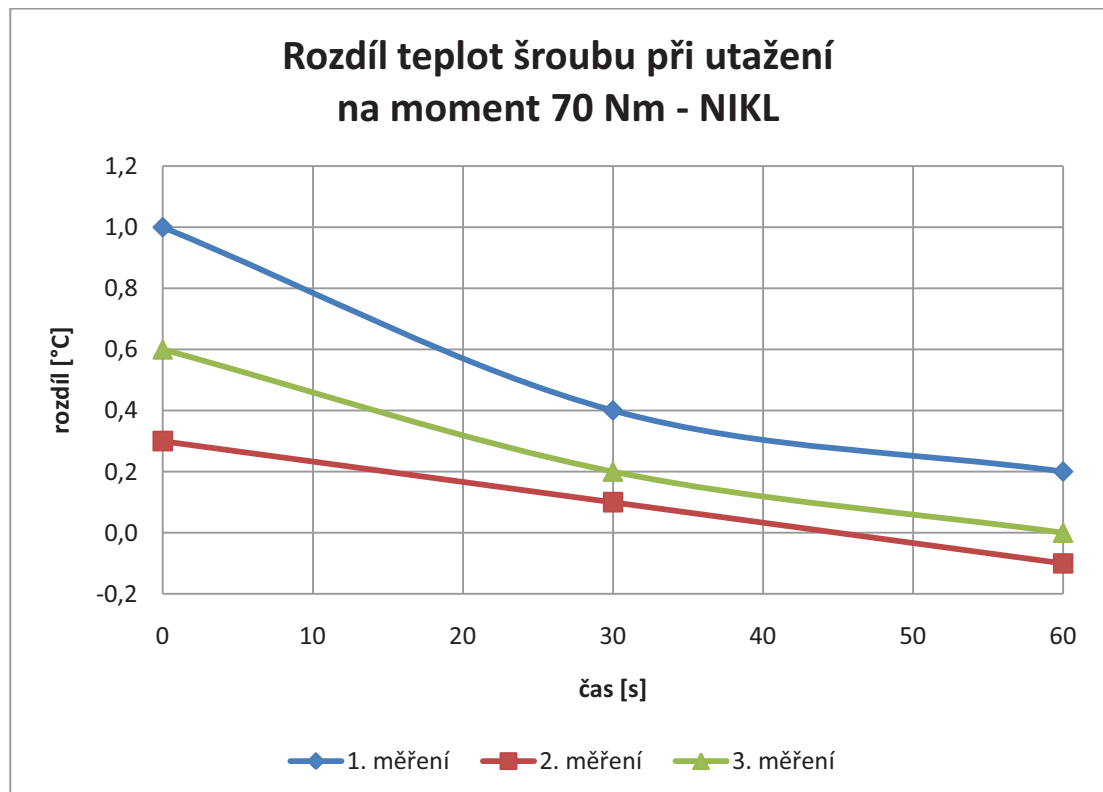
Do otvoru materiálu byl vložen neutažený šroub s maticí a celý materiál byl upevněn do svěráku. Termokamerou byla změřena teplota materiálu. Poté byl šroub utažen momentovým klíčem na určitý moment a opět změřena teplota již namáhaného materiálu. Před každým utažením šroubu na určitou hodnotu momentu byla matice povolena. Výsledky měření a rozdíly teplot materiálu před a po utažení šroubu jsou uvedeny v tabulce a vyneseny do grafu. Měřenou hodnotou byla teplota hlavy šroubu a teplota materiálu a to při utahování i povolování šroubu.

Objektiv termokamery:	20 mm
Rozsah termokamery:	-20 °C až 100 °C
Emisivita:	1
Okolní teplota:	22 °C
Vzdálenost:	0,2 m
Materiál:	nikl, titan, železo, hliník
Typ šroubu:	šroub šestihran, pevnost 8.8, průměr 10 mm, matný a černý
Moment utažení:	70 Nm

- Materiál nikl:

Tabulka 6.3-1 Teplota šroubu při utažení a povolení - nikl

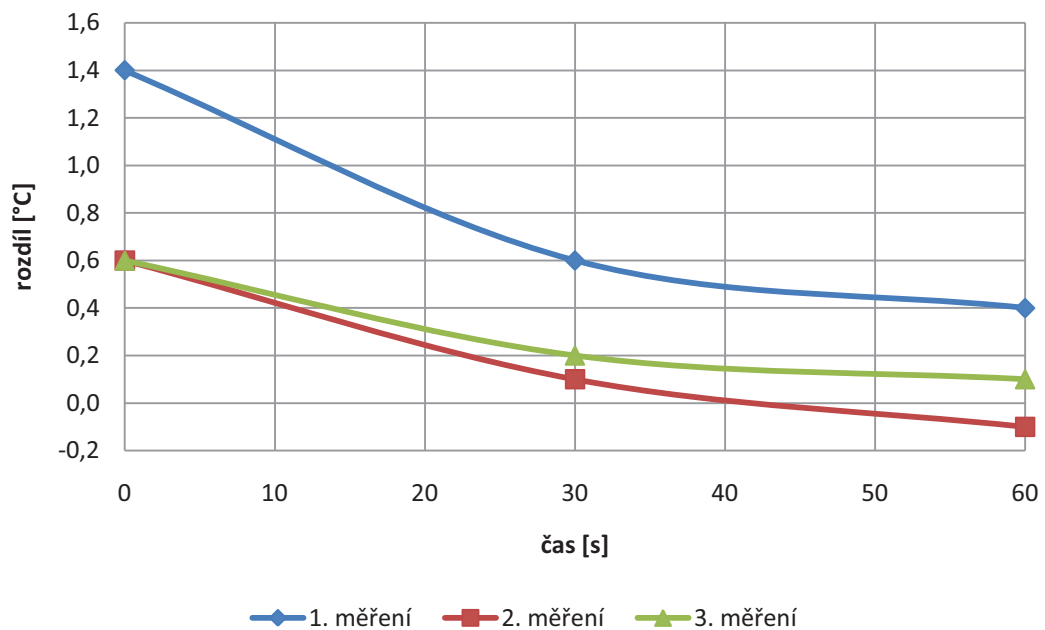
šroub	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před	26,1	25,8	26,0	25,7	26,0	25,8
po	27,1	26,2	26,3	26,2	26,6	26,0
rozdíl	1,0	0,4	0,3	0,5	0,6	0,2
30 sekund po	26,5	26,3	26,1	26,3	26,2	26,4
rozdíl	0,4	0,5	0,1	0,6	0,2	0,6
60 sekund po	26,3	26,3	25,9	26,3	26,0	26,3
rozdíl	0,2	0,5	-0,1	0,6	0,0	0,5



Tabulka 6.3-2 Teplota materiálu při utažení a povolání šroubu - nikel

materiál	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolání	utažení	povolání	utažení	povolání
čas [s]						
před	25,4	25,3	25,5	25,3	25,4	25,5
po	26,8	25,9	26,1	25,4	26,0	25,8
rozdíl	1,4	0,6	0,6	0,1	0,6	0,3
30 sekund po	26,0	25,2	25,6	25,3	25,6	25,3
rozdíl	0,6	-0,1	0,1	0,0	0,2	-0,2
60 sekund po	25,8	25,2	25,4	25,3	25,5	25,4
rozdíl	0,4	-0,1	-0,1	0,0	0,1	-0,1

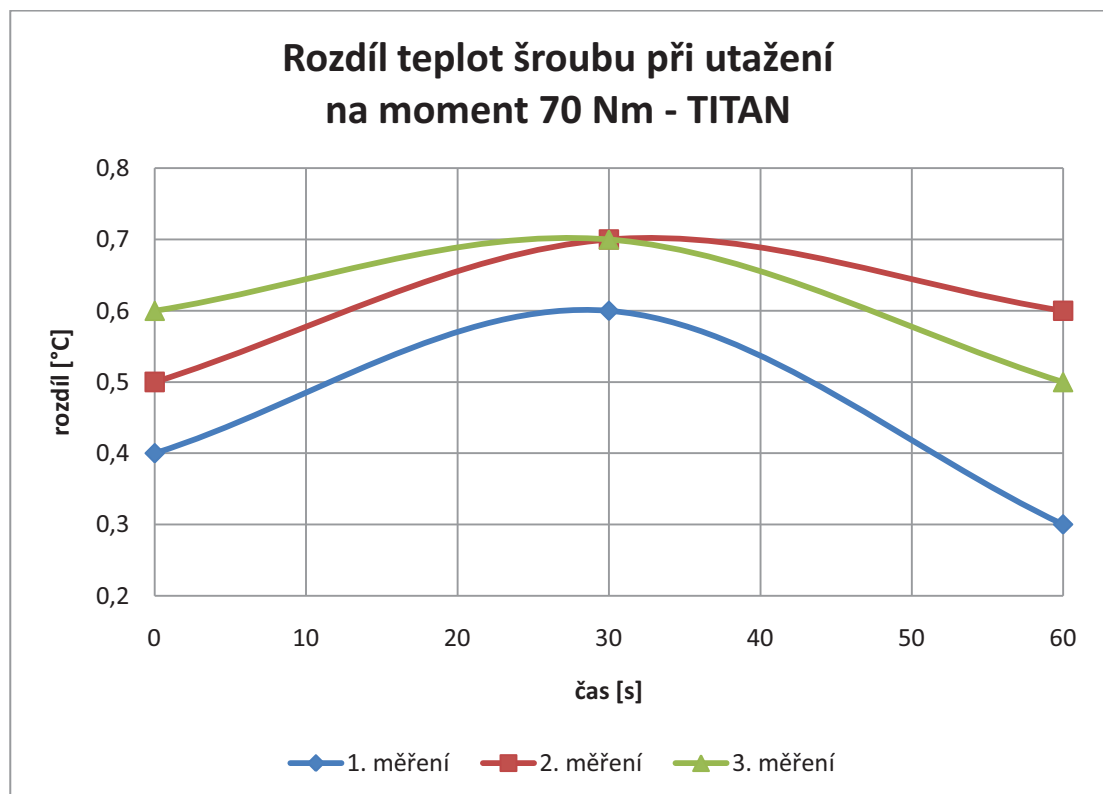
Rozdíl teplot materiálu při utažení
na moment 70 Nm - NIKL



- **Materiál titan:**

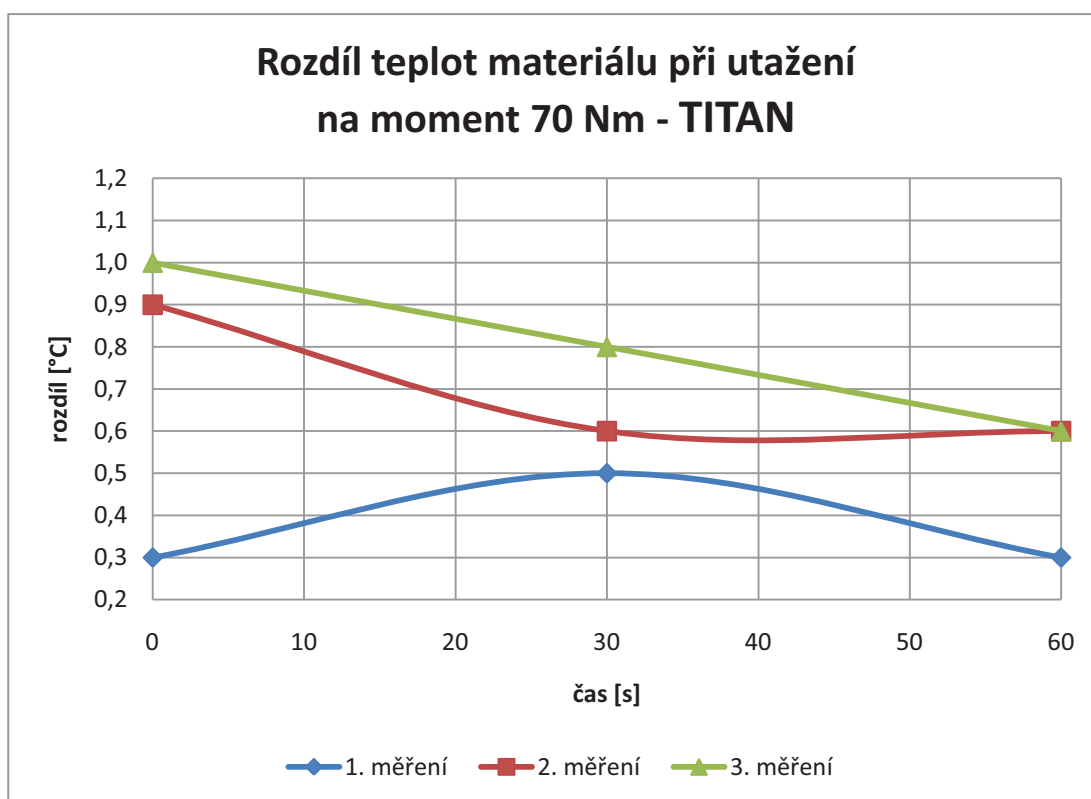
Tabulka 6.3-3 Teplota šroubu při utažení a povolení - titan

šroub	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před	25,2	25,1	25,3	25,4	25,3	25,3
po	25,6	27,4	25,8	25,8	25,9	25,5
rozdíl	0,4	2,3	0,5	0,4	0,6	0,2
30 sekund po	25,8	27,4	26,0	26,5	26,0	26,3
rozdíl	0,6	2,3	0,7	1,1	0,7	1,0
60 sekund po	25,5	27,2	25,9	26,5	25,8	26,4
rozdíl	0,3	2,1	0,6	1,1	0,5	1,1



Tabulka 6.3-4 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - titan

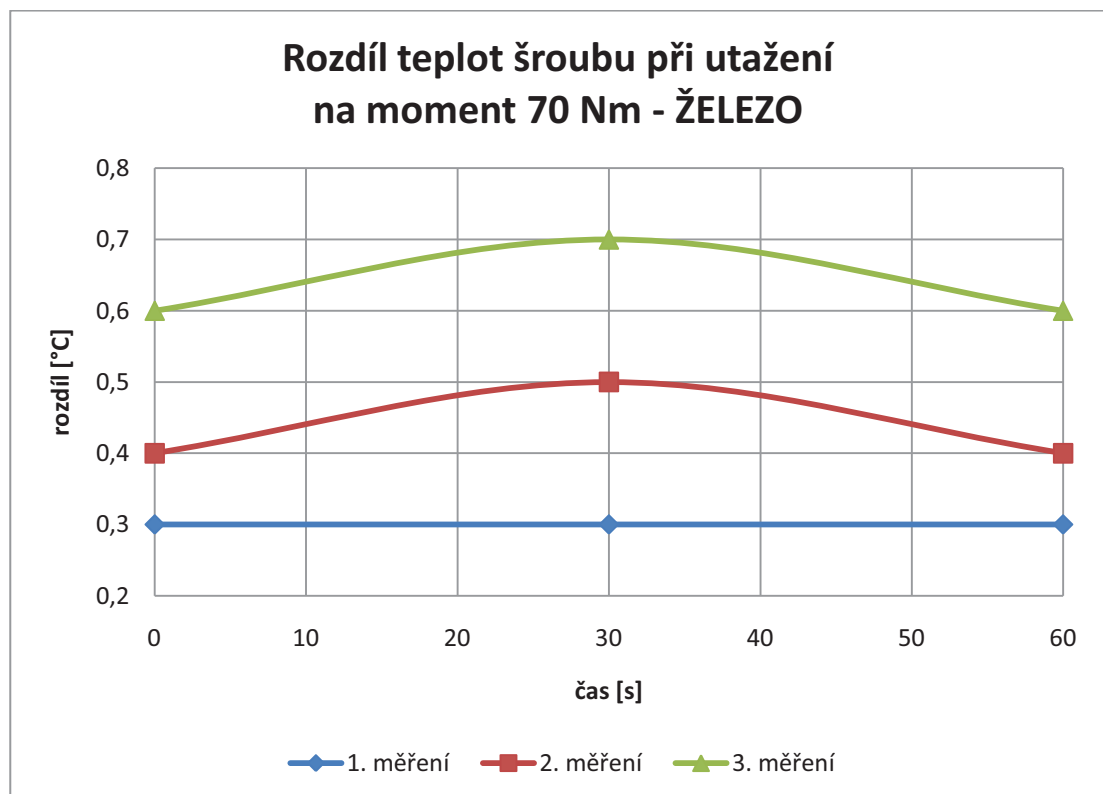
materiál	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
čas [s]						
před	25,0	25,1	25,0	25,2	24,9	25,2
po	25,3	26,3	25,9	25,7	25,9	25,3
rozdíl	0,3	1,2	0,9	0,5	1,0	0,1
30 sekund po	25,5	25,8	25,6	25,6	25,7	25,4
rozdíl	0,5	0,7	0,6	0,4	0,8	0,2
60 sekund po	25,3	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4
rozdíl	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,2



- Materiál železo:

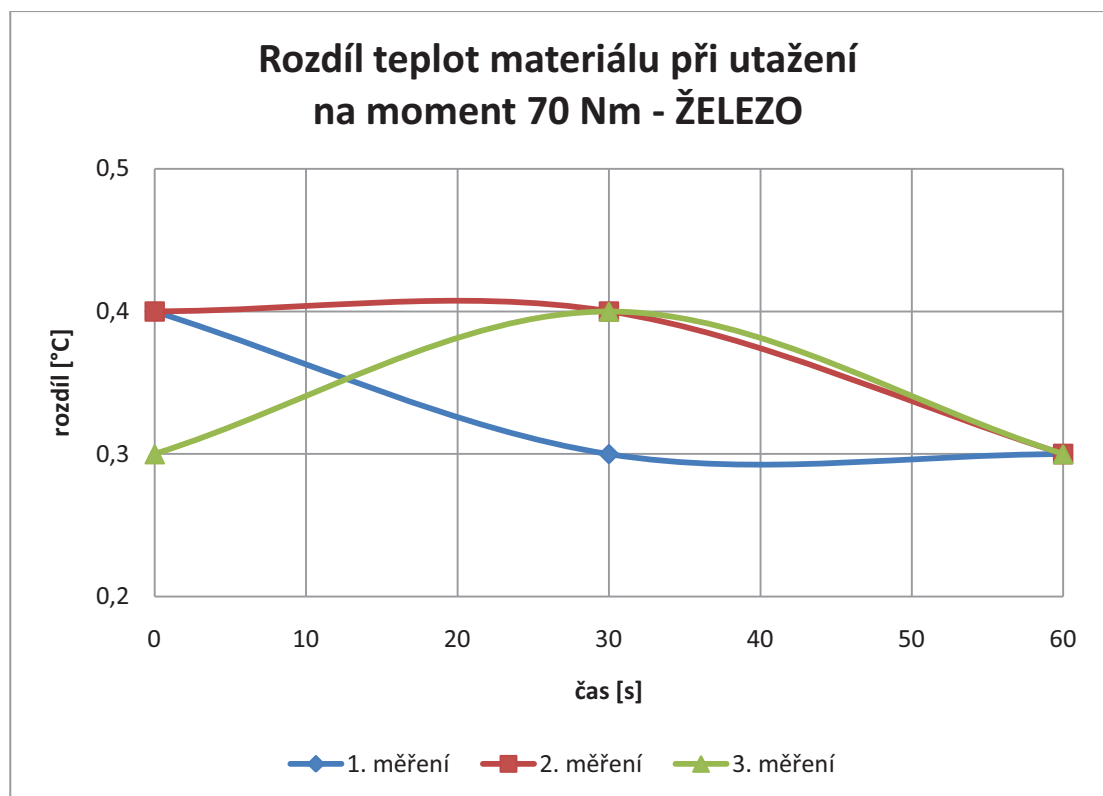
Tabulka 6.3-5 Teplota šroubu při utažení a povolení - železo

šroub	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před	24,8	24,8	24,9	25,2	25,2	25,4
po	25,1	25,3	25,3	25,2	25,8	25,6
rozdíl	0,3	0,5	0,4	0,0	0,6	0,2
30 sekund po	25,1	25,6	25,4	25,7	25,9	26,1
rozdíl	0,3	0,8	0,5	0,5	0,7	0,7
60 sekund po	25,1	25,5	25,3	25,6	25,8	26,0
rozdíl	0,3	0,7	0,4	0,4	0,6	0,6



Tabulka 6.3-6 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - železo

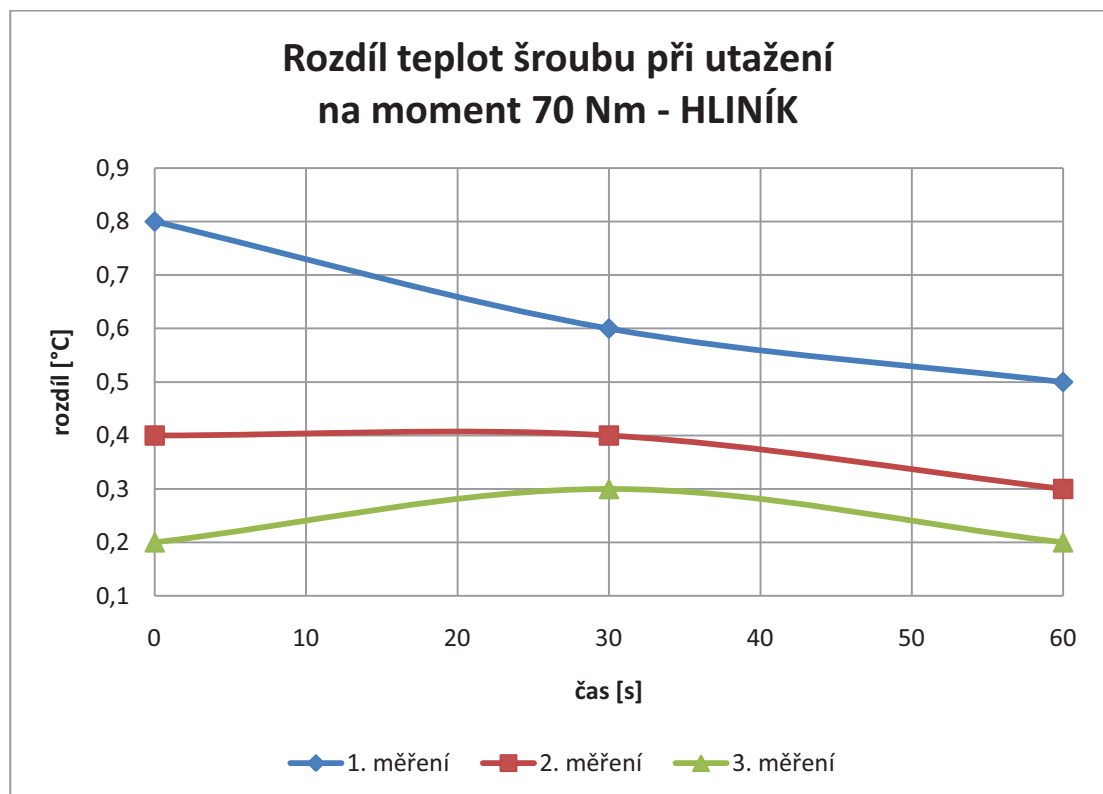
materiál	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
čas [s]						
před	25,0	25,1	25,0	25,2	24,9	25,2
po	25,3	26,3	25,9	25,7	25,9	25,3
rozdíl	0,3	1,2	0,9	0,5	1,0	0,1
30 sekund po	25,5	25,8	25,6	25,6	25,7	25,4
rozdíl	0,5	0,7	0,6	0,4	0,8	0,2
60 sekund po	25,3	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4
rozdíl	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,2



- Materiál hliník:

Tabulka 6.3-7 Teplota šroubu při utažení a povolení - hliník

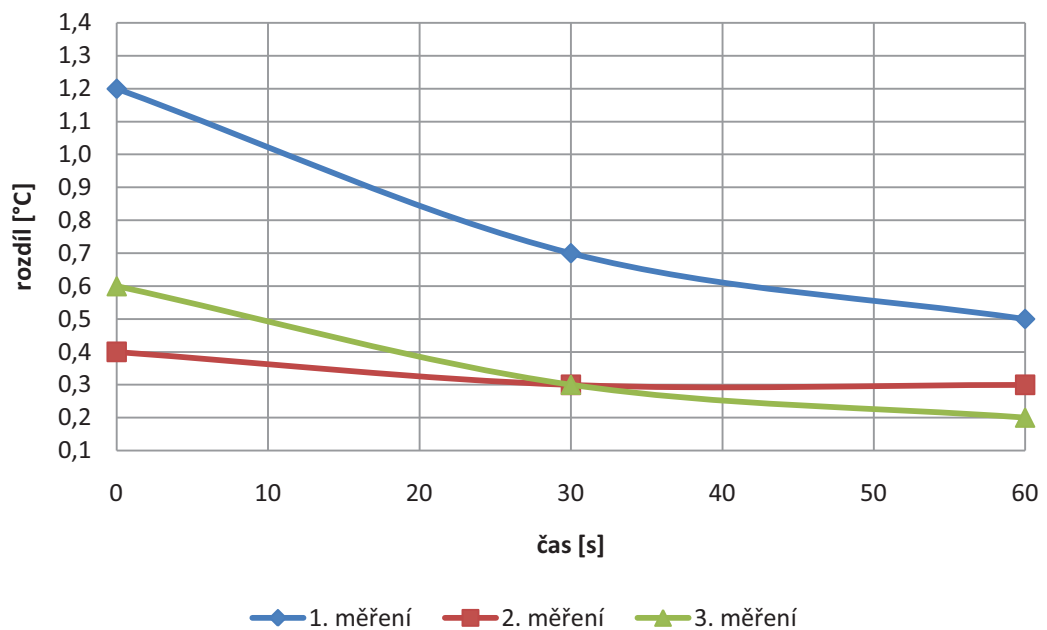
šroub	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před	23,4	23,5	23,6	23,8	24,0	24,0
po	24,2	23,8	24,0	24,1	24,2	24,4
rozdíl	0,8	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4
30 sekund po	24,0	24,3	24,0	24,5	24,3	24,6
rozdíl	0,6	0,8	0,4	0,7	0,3	0,6
60 sekund po	23,9	24,2	23,9	24,3	24,2	24,6
rozdíl	0,5	0,7	0,3	0,5	0,2	0,6



Tabulka 6.3-8 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - hliník

materiál	1. měření		2. měření		3. měření	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
čas [s]						
před	23,3	23,3	23,4	23,6	23,8	23,8
po	24,5	23,5	23,8	23,8	24,4	24,0
rozdíl	1,2	0,2	0,4	0,2	0,6	0,2
30 sekund po	24,0	23,5	23,7	23,7	24,1	24,0
rozdíl	0,7	0,2	0,3	0,1	0,3	0,2
60 sekund po	23,8	23,4	23,7	23,7	24,0	24,0
rozdíl	0,5	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2

Rozdíl teplot materiálu při utažení
na moment 70 Nm - HLINÍK



Do výsledných tabulek byly zahrnuty hodnoty rozdílu teplot materiálu, jak při utahování šroubu na určitý moment, tak při povolování šroubu. Do výsledných grafů byly zahrnuty pouze rozdíly teplot při utahování šroubu. Výsledná hodnota rozdílu teplot je vypočítána z teploty před a po utažení šroubu na určitý moment. Následně byly vypočítány rozdíly teplot před a po utažení v určitém čase. Z naměřených hodnot a výsledných grafů vyplývá, že sice dochází ke změnám teploty během utahování šroubu na určitý moment, ale u každého materiálu je průběh změny jiný a v některých případech není stejný ani u téhož materiálu. Zvolené vynesené průběhy rozdílu teplot před a po utažení šroubu v určitém čase bylo z důvodu, že ve zvoleném postupu měření nebylo možné docílit toho, aby počáteční teplota materiálu byla úplně stejná. Všechna tři měření na jednom materiálu následovaly po sobě v ten samý den a byly provedeny na stejném momentu utažení šroubu. Všechny čtyři materiály mají povrchovou úpravu naneseným černým matným lakem. Použité šrouby mají taktéž stejnou povrchovou úpravu černou matnou barvou a tudíž nastavení emisivity bylo jak pro materiál, tak pro hlavu šroubu stejné. Uchycení materiálu bylo ve svislé poloze a ne ve vodorovné, jako v předešlých měření. Toto svislé upevnění bylo včetně odizolování od žeber svěráku, ve kterém byl materiál upevněn. Utahování šroubu tedy již nebylo na straně snímané termokamerou, ale na straně matice. Nedochozelo tedy k působení tření hlavy šroubu a momentového klíče při otáčení hlavy. Snímaná teplota mohla být nejen na materiálu, ale i na hlavě šroubu. Díky svislému upevnění materiálu mohlo dojít i ke zmenšení vzdálenosti termokamery od měřeného materiálu a tím i zmenšení zorného pole termokamery. Během všech měření bylo zamezeno nechtěnému proudění vzduchu zábranami. Oproti předešlému měření bylo snímání prováděno video sekvencí a bylo možné tedy přesnějšího odečtení hodnoty teploty. Nedochozelo již k prodlevě mezi utažením šroubu a uložením termogramu.

6.4 ČTVRTÉ MĚŘENÍ - ZMĚNY TEPLoty NAMÁHANÉHO MATERIÁLU UTAŽENÝM ŠROUBEM NA URČITÝ MOMENT - NEREZOVÁ OCEL

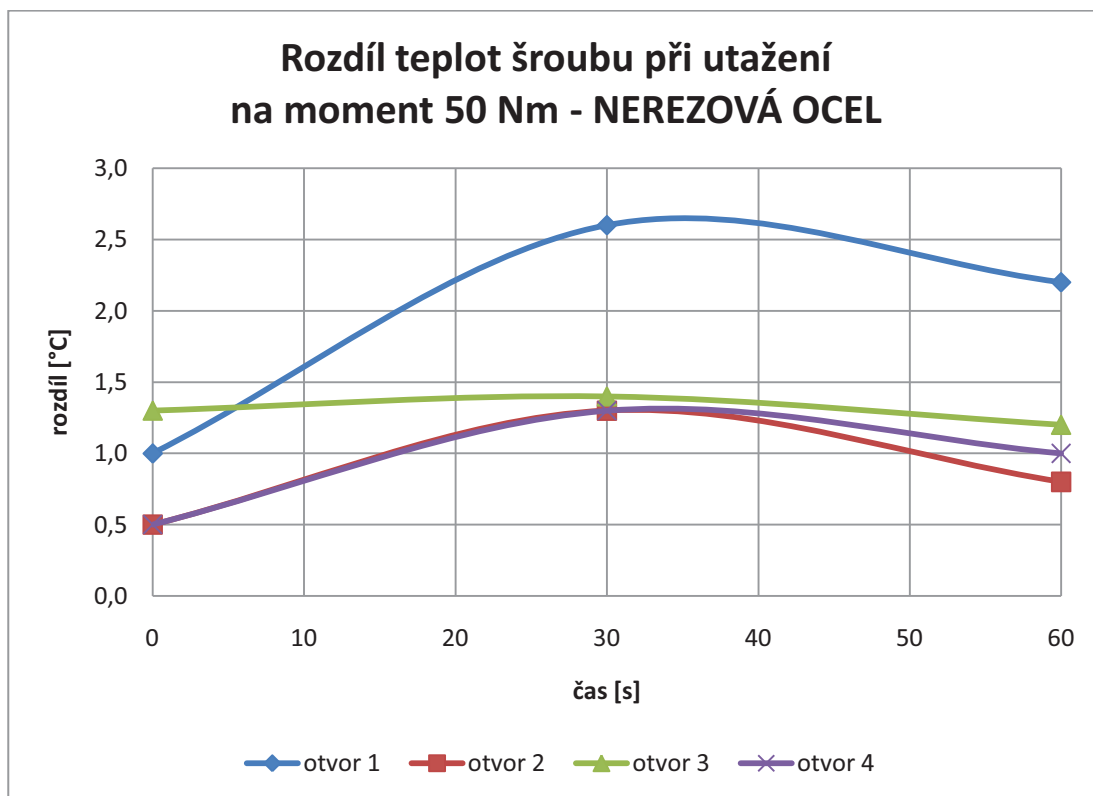
Do otvoru materiálu byl vložen neutažený šroub s maticí a celý materiál byl upevněn do svěráku. Termokamerou byla změřena teplota materiálu. Poté byl šroub utažen momentovým klíčem na určitý moment a opět změřena teplota již namáhaného materiálu. Před každým utažením šroubu na určitou hodnotu momentu byla matice povolena. Výsledky měření a rozdíly teplot materiálu před a po utažení šroubu jsou uvedeny v tabulce a vyneseny do grafu. Měřenou hodnotou byla teplota hlavy šroubu a teplota materiálu a to při utahování i povolování šroubu.

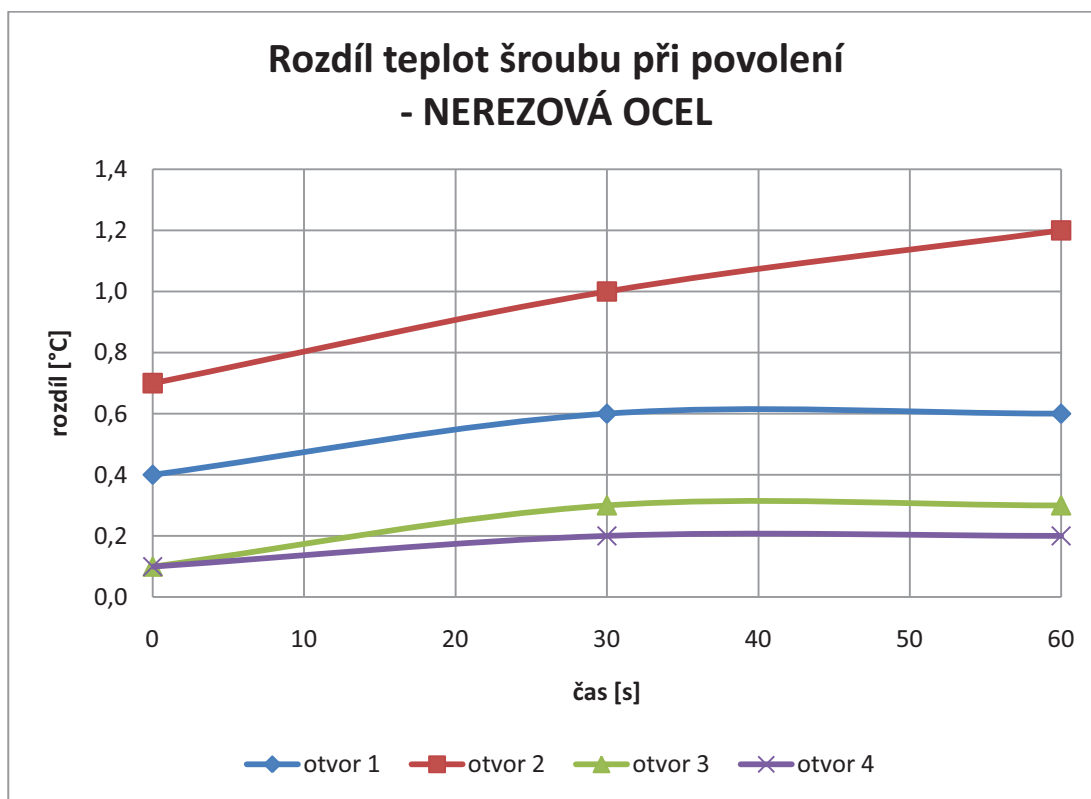
Objektiv termokamery:	20 mm
Rozsah termokamery:	-20 °C až 100 °C
Emisivita:	1
Okolní teplota:	22 °C
Vzdálenost:	0,2 m
Materiál:	nerozová ocel
Typ šroubu:	šroub šestihran, pevnost 8.8, průměr 10 mm, matný a černý
Moment utažení:	50 Nm, 70 Nm

Následující měření je prvním měřením utažení šroubu na určitý moment na daném otvoru.

Tabulka 6.4-1 Teplota šroubu při utažení a povolení - nerezová ocel

šroub	1. otvor - 50 Nm		2. otvor - 50 Nm		3. otvor - 50 Nm		4. otvor - 50 Nm	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před	24,5	24,7	25,1	25,1	25,4	25,5	24,6	25,3
po	25,5	25,1	25,6	25,8	26,7	25,6	25,1	25,4
rozdíl	1,0	0,4	0,5	0,7	1,3	0,1	0,5	0,1
30 sekund po	27,1	25,3	26,4	26,1	26,8	25,8	25,9	25,5
rozdíl	2,6	0,6	1,3	1,0	1,4	0,3	1,3	0,2
60 sekund po	26,7	25,3	25,9	25,9	26,6	25,8	25,6	25,5
rozdíl	2,2	0,6	0,8	0,8	1,2	0,3	1,0	0,2

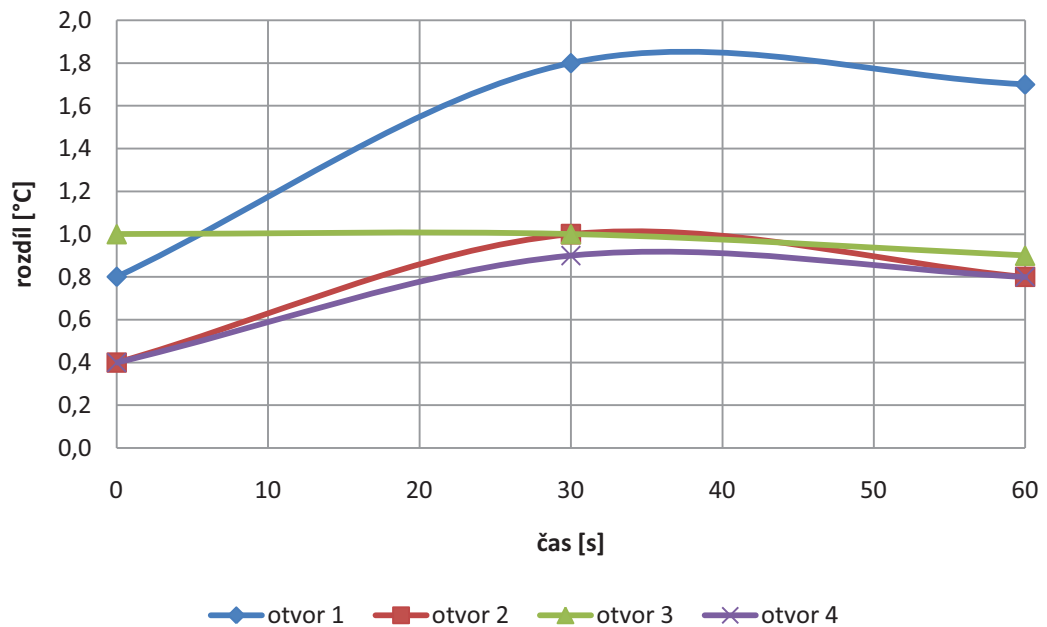




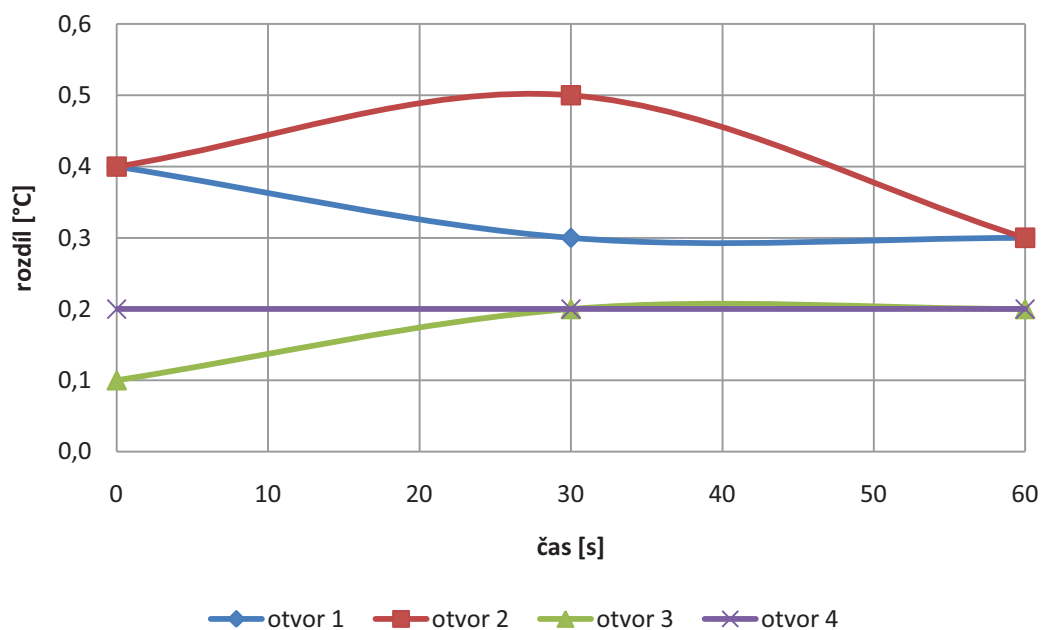
Tabulka 6.4-2 Teplota materiálu při utažení a povolení šroubu - nerezová ocel

materiál	1. otvor - 50 Nm		2. otvor - 50 Nm		3. otvor - 50 Nm		4. otvor - 50 Nm		
	čás [s]	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před		24,4	24,6	24,9	25,0	25,3	25,4	24,6	25,4
	po		25,2	25,0	25,3	25,4	26,3	25,5	25,0
rozdíl		0,8	0,4	0,4	0,4	1,0	0,1	0,4	0,2
30 sekund po		26,2	24,9	25,9	25,5	26,3	25,6	25,5	25,6
	rozdíl		1,8	0,3	1,0	0,5	1,0	0,2	0,9
60 sekund po		26,1	24,9	25,7	25,3	26,2	25,6	25,4	25,6
	rozdíl		1,7	0,3	0,8	0,3	0,9	0,2	0,8

Rozdíl teplot materiálu při utažení na moment 50 Nm - NEREZOVÁ OCEL



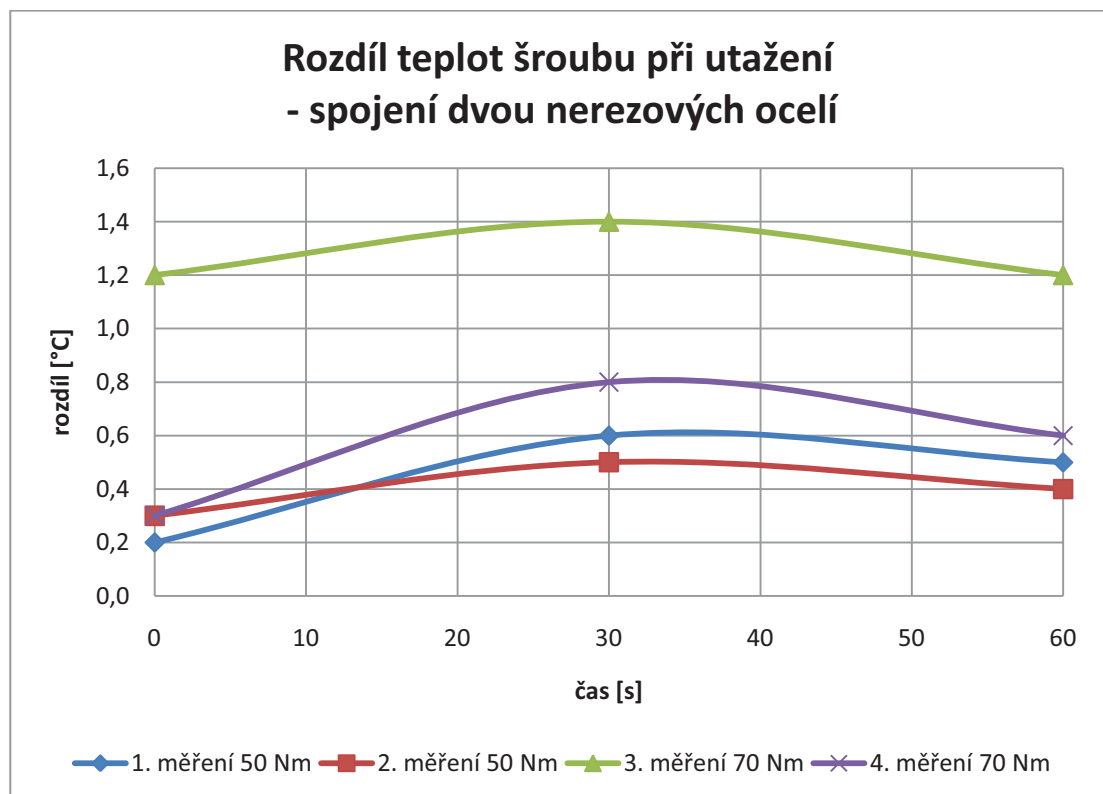
Rozdíl teplot materiálu při povolení - NEREZOVÁ OCEL

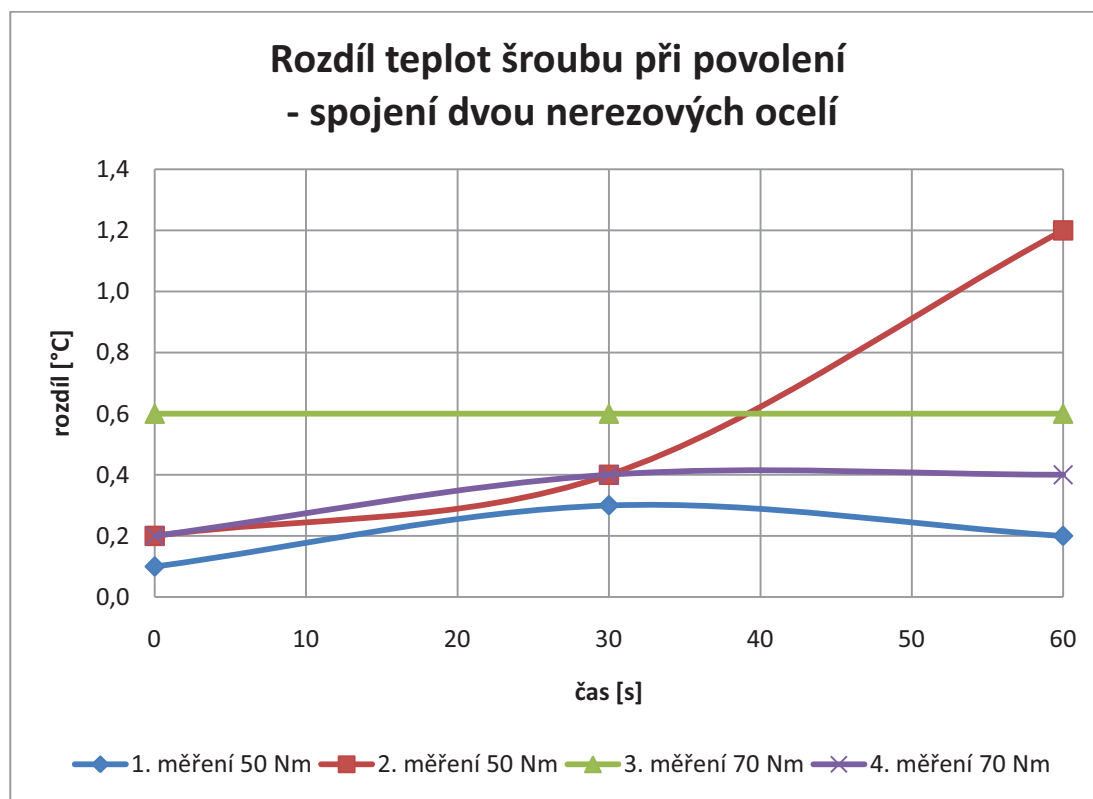


Následující měření bylo provedeno utahováním šroubu na určitý moment dvou spojených nerezových ocelí.

Tabulka 6.4-3 Teplota šroubu - spojení dvou nerezových ocelí

šroub	1. měření - 50 Nm		2. měření - 50 Nm		3. měření - 70 Nm		4. měření - 70 Nm	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před	24,7	24,9	25,2	25,4	25,9	25,9	25,9	25,9
po	24,9	25,0	25,5	25,6	27,1	26,5	26,2	26,1
rozdíl	0,2	0,1	0,3	0,2	1,2	0,6	0,3	0,2
30 sekund po	25,3	25,2	25,7	25,8	27,3	26,5	26,7	26,3
rozdíl	0,6	0,3	0,5	0,4	1,4	0,6	0,8	0,4
60 sekund po	25,2	25,1	25,6	25,7	27,1	26,5	26,5	26,3
rozdíl	0,5	0,2	0,4	0,3	1,2	0,6	0,6	0,4

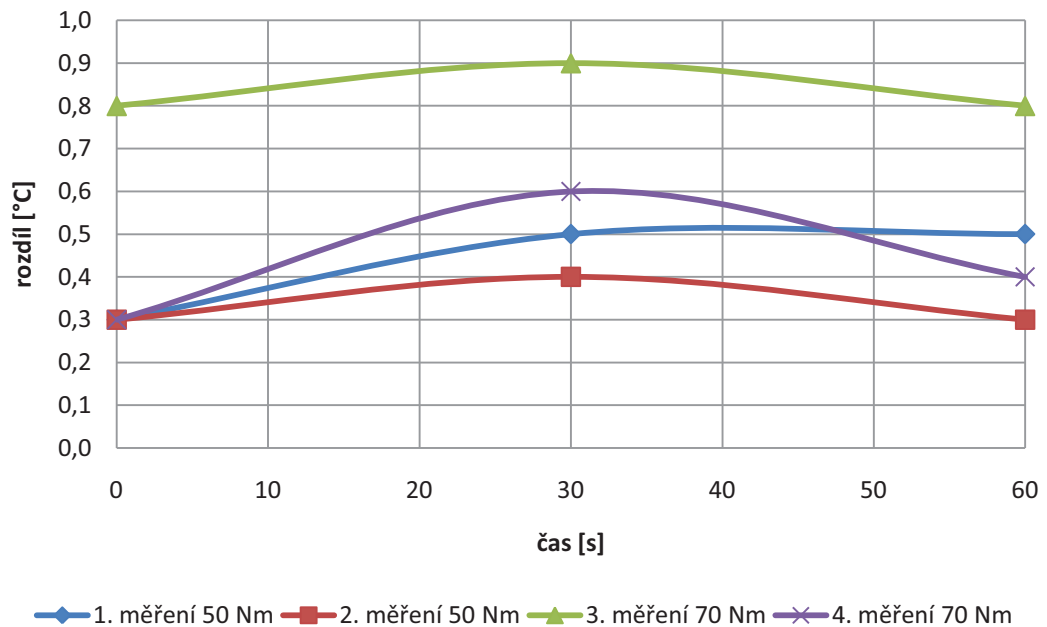




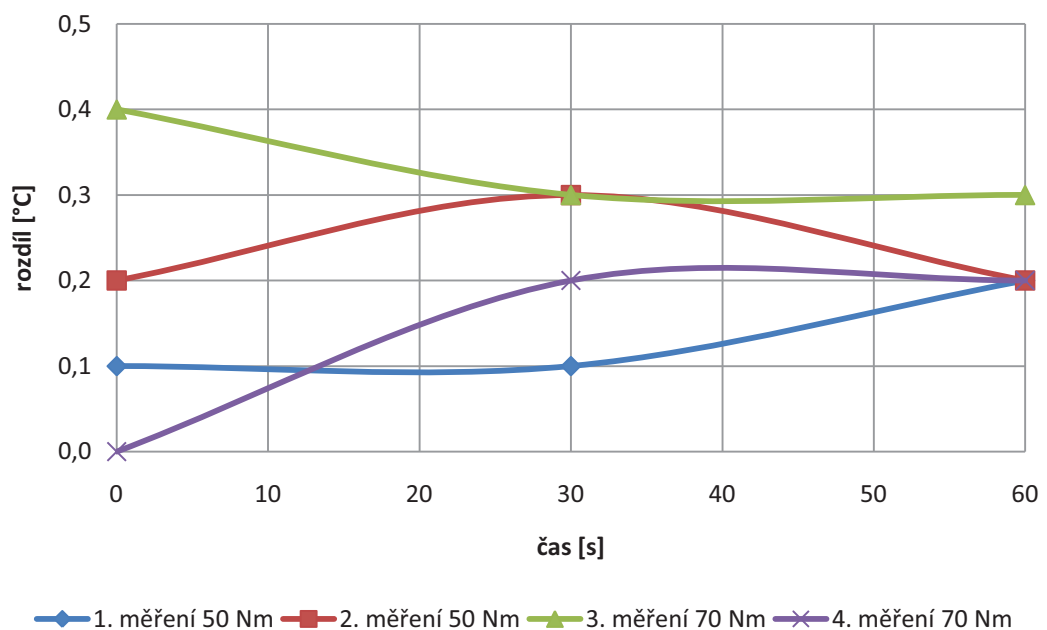
Tabulka 6.4-4 Teplota materiálu - spojení dvou nerezových ocelí

materiál	1. měření - 50 Nm		2. měření - 50 Nm		3. měření - 70 Nm		4. měření - 70 Nm		
	časn [s]	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před		24,5	24,7	25,0	25,1	25,9	25,9	25,9	25,9
	po	24,8	24,8	25,3	25,3	26,7	26,3	26,2	25,9
rozdíl		0,3	0,1	0,3	0,2	0,8	0,4	0,3	0,0
30 sekund po		25,0	24,8	25,4	25,4	26,8	26,2	26,5	26,1
	rozdíl		0,5	0,1	0,4	0,3	0,9	0,3	0,6
60 sekund po		25,0	24,9	25,3	25,3	26,7	26,2	26,3	26,1
	rozdíl		0,5	0,2	0,3	0,2	0,8	0,3	0,4

Rozdíl teplot materiálu při utažení - spojení dvou nerezových ocelí



Rozdíl teplot materiálu při povolení - spojení dvou nerezových ocelí



Provedené měření probíhalo za stejných podmínek a stejným způsobem, jako předešlé měření. Materiál nerezová ocel má povrchovou úpravu, šroub taktéž, nastavení emisivity je stejné, vzdálenost termokamery od měřeného materiálu je stejná, je zamezeno proudění vzduchu, materiál je odizolovaný od žeber svěraku a je svisle upevněn, utahování probíhá na matici a snímání hodnot teploty je pomocí video sekvence za strany hlavy šroubu.

První čtyři grafy zobrazují rozdíl teplot prvního měření na vytvořeném otvoru v materiálu. Z výsledných grafů a naměřených hodnot vyplývá, že průběh rozdílů teploty po utažení šroubu v určitém čase má ve všech případech utažení podobný tvar. Také ale z výsledných průběhů vyplývá, že při utažení na stejný moment 50 Nm není rozdíl teplot stejný. Zobrazeny jsou též i průběhy změny teploty materiálu a hlavy šroubu při povolování. Na těchto průbězích je vidět, že i po povolení šroubu dochází k ohřátí materiálu, i když už ne tak, jako při utáhnutí.

Následující čtyři grafy znázorňují opět stejný průběh rozdílů teplot v různých časech po utažení šroubu. Nyní se však nejednalo pouze o utažení šroub na jenom materiálu, ale o utažení šroubu dvou totožných materiálů. Utahování šroubu proběhlo na moment 50 Nm a 70 Nm. Jak je vidět z přiložených grafů při větším momentu utažení je rozdíl teplot materiálu větší, i když se rozdíly teplot liší a nejsou při stejném momentu utažení stejné. Při povolení šroubu taktéž vzniká rozdíl teplot, ale zde již nezáleží na jaký moment byl šroub utažen.

6.5 PÁTÉ MĚŘENÍ - ZMĚNY TEPLoty NAMÁHANÉHO MATERIÁLU UTAŽENÝM ŠROUBEM NA URČITÝ MOMENT - NEREZOVÁ OCEL A PERTINAX (TVRZENÝ PAPIR)

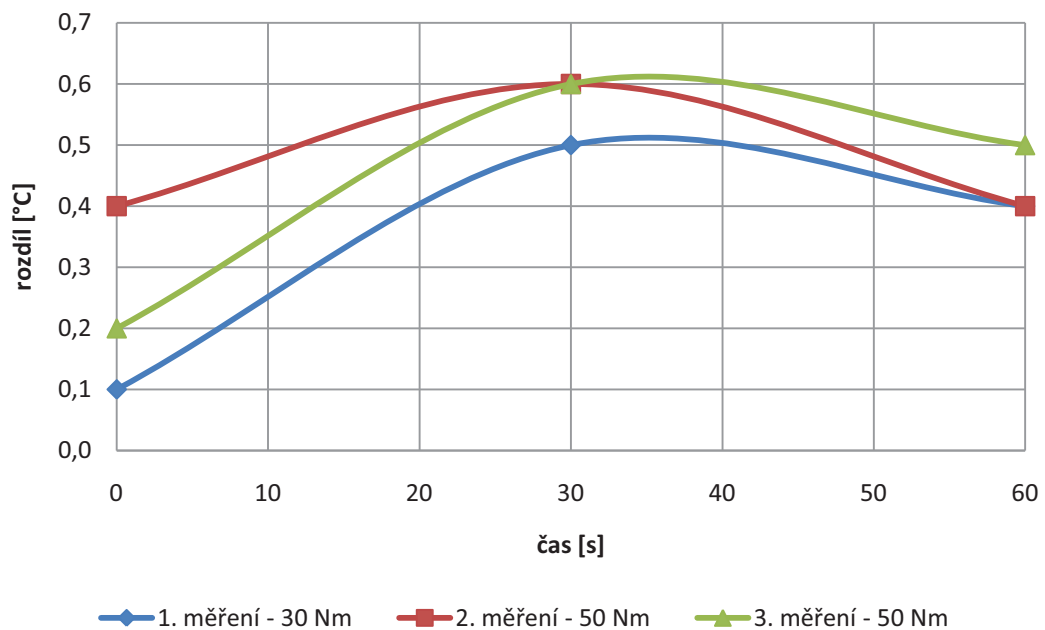
Do otvoru materiálu byl vložen neutažený šroub s maticí a celý materiál byl upevněn do svěráku. Termokamerou byla změřena teplota materiálu. Poté byl šroub utažen momentovým klíčem na určitý moment a opět změřena teplota již namáhaného materiálu. Před každým utažením šroubu na určitou hodnotu momentu byla matice povolena. Výsledky měření a rozdíly teplot materiálu před a po utažení šroubu jsou uvedeny v tabulce a vyneseny do grafu. Měřenou hodnotou byla teplota hlavy šroubu a teplota materiálu a to při utahování i povolování šroubu.

Objektiv termokamery:	20 mm
Rozsah termokamery:	-20 °C až 100 °C
Emisivita:	1
Okolní teplota:	22 °C
Vzdálenost:	0,2 m
Materiál:	nerozová ocel, pertinax
Typ šroubu:	šroub šestihran, pevnost 8.8, průměr 10 mm, matný a černý
Moment utažení:	30 Nm, 50 Nm

Tabulka 6.5-1 Teplota šroubu při utažení a povolání - nerezová ocel

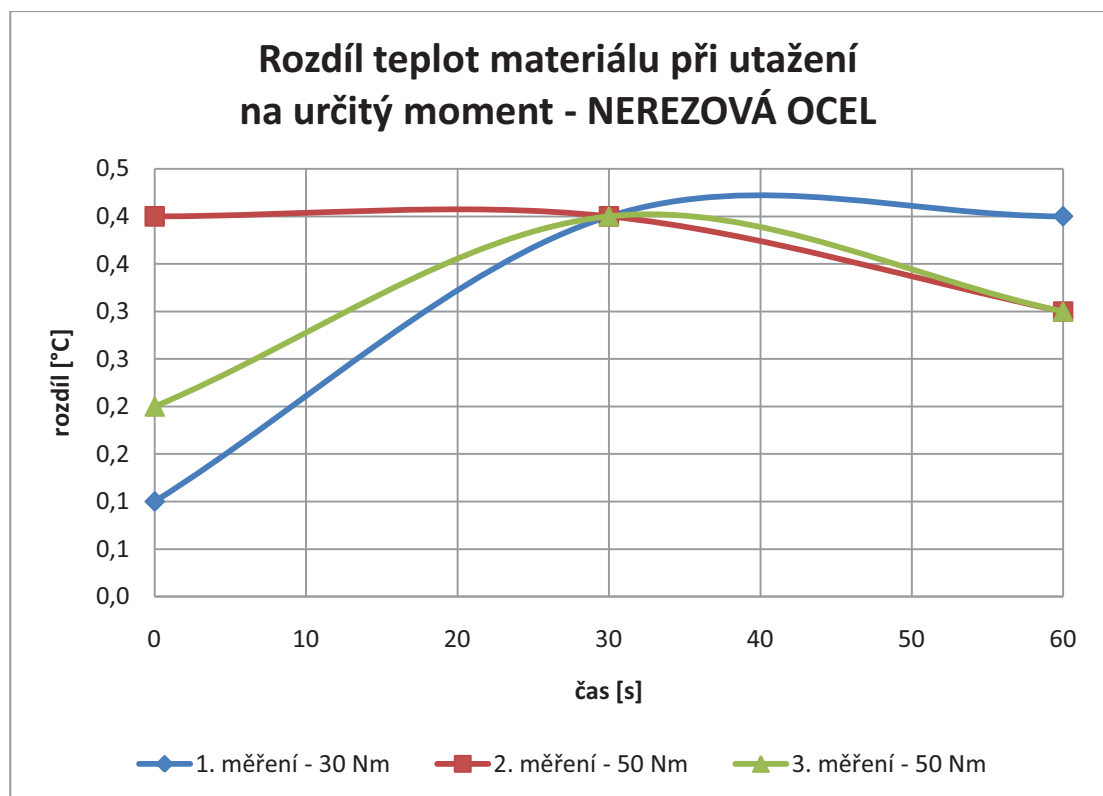
šroub	1. měření - 30 Nm		2. měření - 50 Nm		3. měření - 50 Nm	
	utažení	povolání	utažení	povolání	utažení	povolání
před	25,6	25,6	25,7	25,7	25,6	25,8
po	25,7	25,7	26,1	25,8	25,8	25,9
rozdíl	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1
30 sekund po	26,1	25,8	26,3	25,9	26,2	26,1
rozdíl	0,5	0,2	0,6	0,2	0,6	0,3
60 sekund po	26,0	25,8	26,1	25,9	26,1	26,1
rozdíl	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3

Rozdíl teplot šroubu při utažení
na určitý moment - NEREZOVÁ OCEL

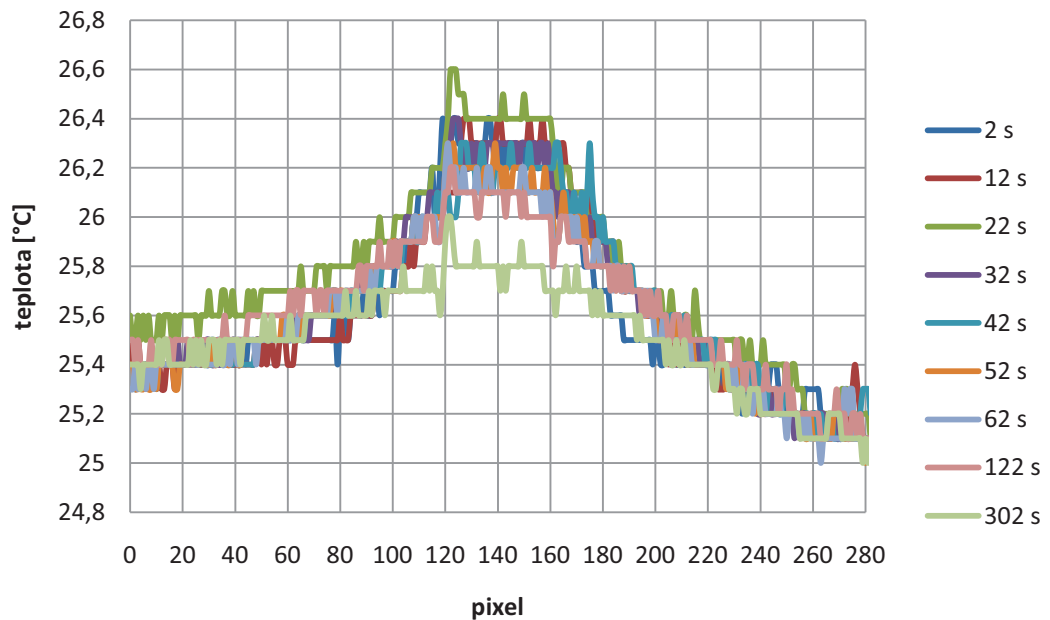


Tabulka 6.5-2 Teplota šroubu při utažení a povolení - nerezová ocel

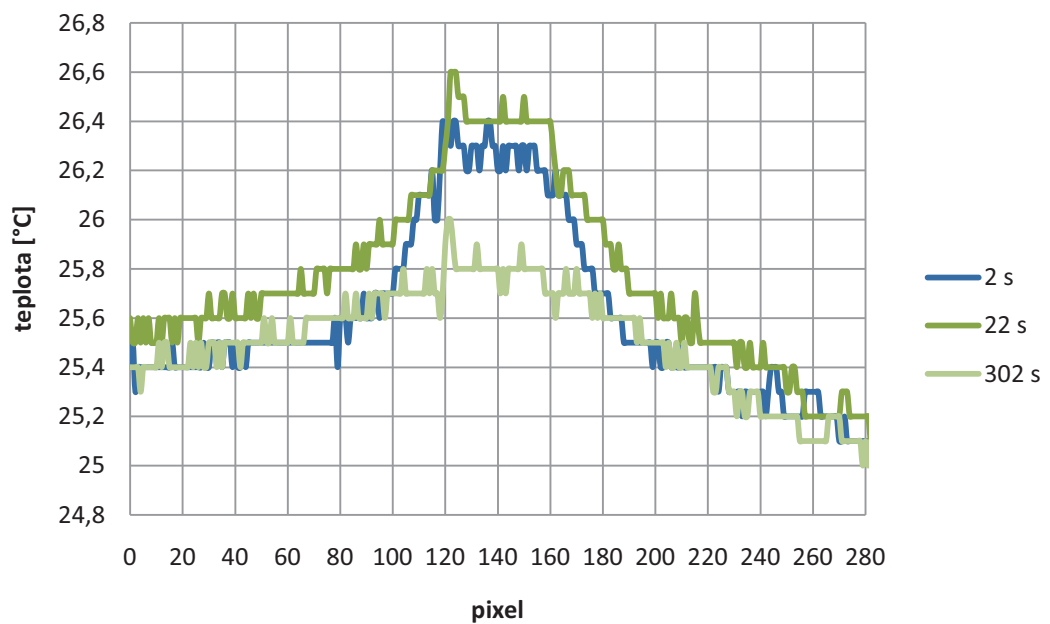
materiál	1. měření - 30 Nm		2. měření - 50 Nm		3. měření - 50 Nm		
	čas [s]	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
před		25,6	25,6	25,7	25,7	25,6	25,8
	po	25,7	25,7	26,1	25,8	25,8	25,9
	rozdíl	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1
60 sekund po		26,0	25,8	26,1	25,8	26,0	26,0
	po	26,0	25,8	26,1	25,8	26,0	26,0
	rozdíl	0,4	0,2	0,4	0,1	0,4	0,2
1 minuta po		26,0	25,8	26,0	25,8	25,9	25,9
	po	26,0	25,8	26,0	25,8	25,9	25,9
	rozdíl	0,4	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1



Izotermy měnící se teploty v čase materiálu NEREZOVÁ OCEL



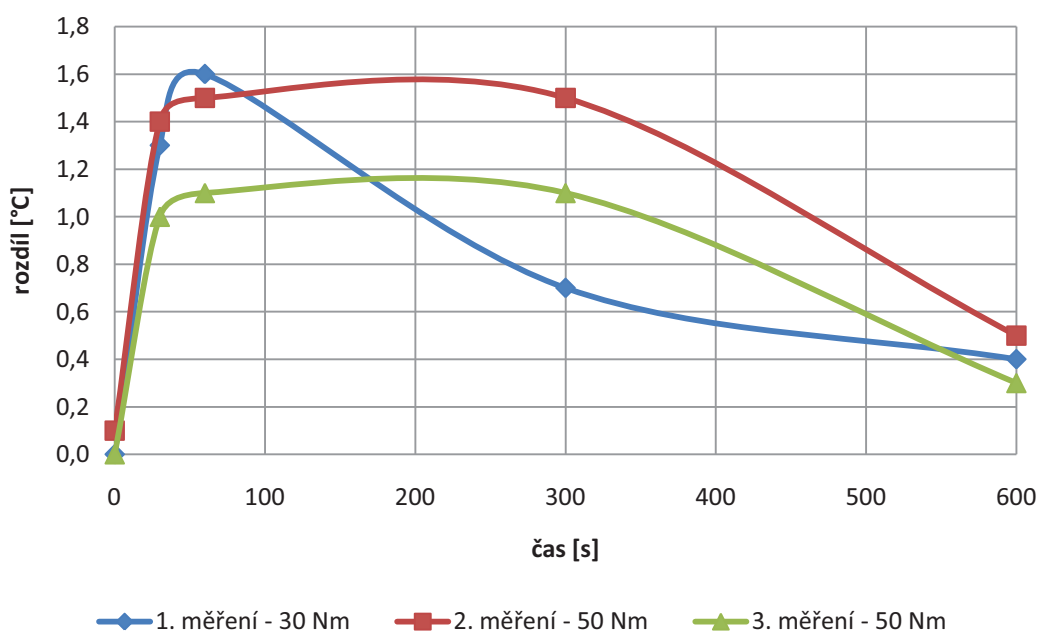
Izotermy měnící se teploty v čase materiálu NEREZOVÁ OCEL



Tabulka 6.5-3 Teplota šroubu při utažení a povolení - pertinax

šroub	1. měření - 30 Nm		2. měření - 50 Nm		3. měření - 50 Nm	
	utažení	povolení	utažení	povolení	utažení	povolení
čas [s]						
před	24,9	25,1	25,3	25,4	25,8	-
po	24,9	25,2	25,4	25,5	25,8	-
rozdíl	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	-
30 sekund po	26,2	25,8	26,7	26,2	26,8	-
rozdíl	1,3	0,7	1,4	0,8	1,0	-
60 sekund po	26,5	25,8	26,8	26,4	26,9	-
rozdíl	1,6	0,7	1,5	1,0	1,1	-
300 sekund po	25,6	25,6	26,1	26,2	26,4	-
rozdíl	0,7	0,5	0,8	0,8	0,6	-
600 sekund po	25,3	25,3	25,8	25,8	26,1	-
rozdíl	0,4	0,2	0,5	0,4	0,3	-

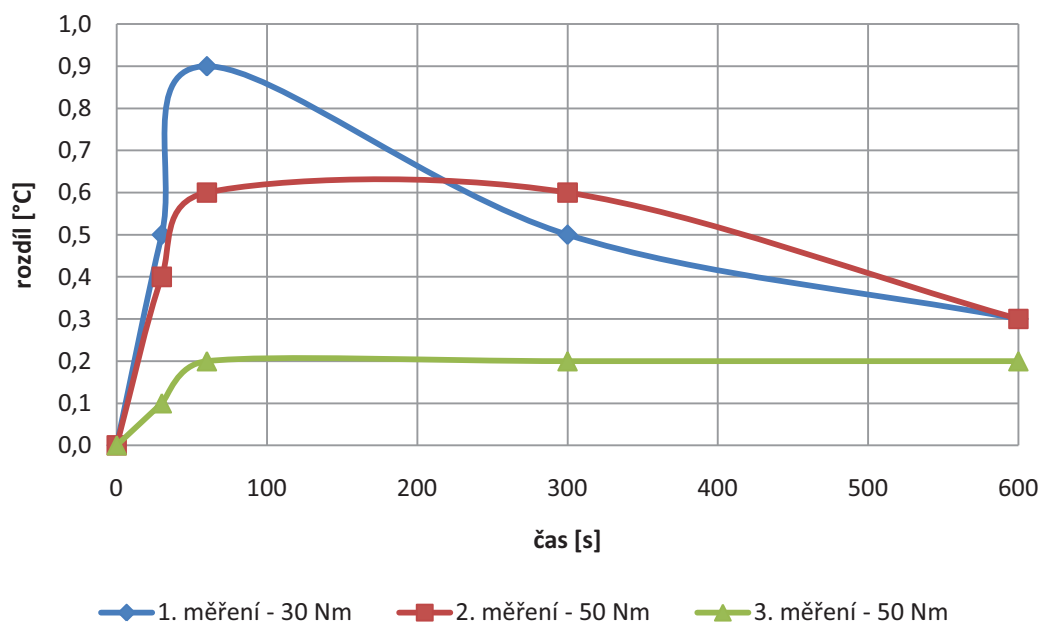
Rozdíl teplot šroubu při utažení
na určitý moment - PERTINAX



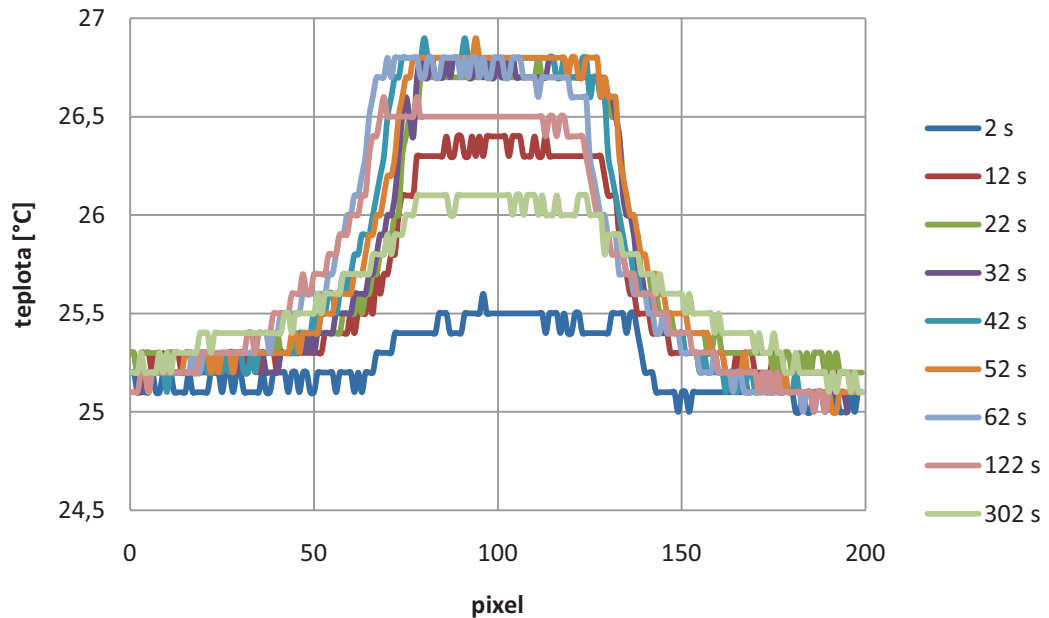
Tabulka 6.5-4 Teplota šroubu při utažení a povolení - pertinax

materiál	1. měření - 30 Nm		2. měření - 50 Nm		3. měření - 50 Nm							
	číslo	čas [s]	číslo	čas [s]	číslo	čas [s]						
před	utažení	24,9	povolení	25,0	utažení	25,3	povolení	25,3	utažení	25,8	povolení	-
	po	24,9	25,0	25,3	25,3	25,8	-					
	rozdíl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-					
30 sekund po	utažení	25,4	povolení	25,1	utažení	25,7	povolení	25,3	utažení	25,9	povolení	-
	rozdíl	0,5	0,1	0,4	0,0	0,1	-					
	60 sekund po	25,8	25,1	25,9	25,5	26,0	-					
rozdíl	0,9	0,1	0,6	0,2	0,2	-						
300 sekund po	utažení	25,4	povolení	25,3	utažení	25,8	povolení	25,8	utažení	26,1	povolení	-
	rozdíl	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	-					
	600 sekund po	25,2	25,2	25,6	25,7	26,0	-					
rozdíl	0,3	0,2	0,3	0,4	0,2	-						

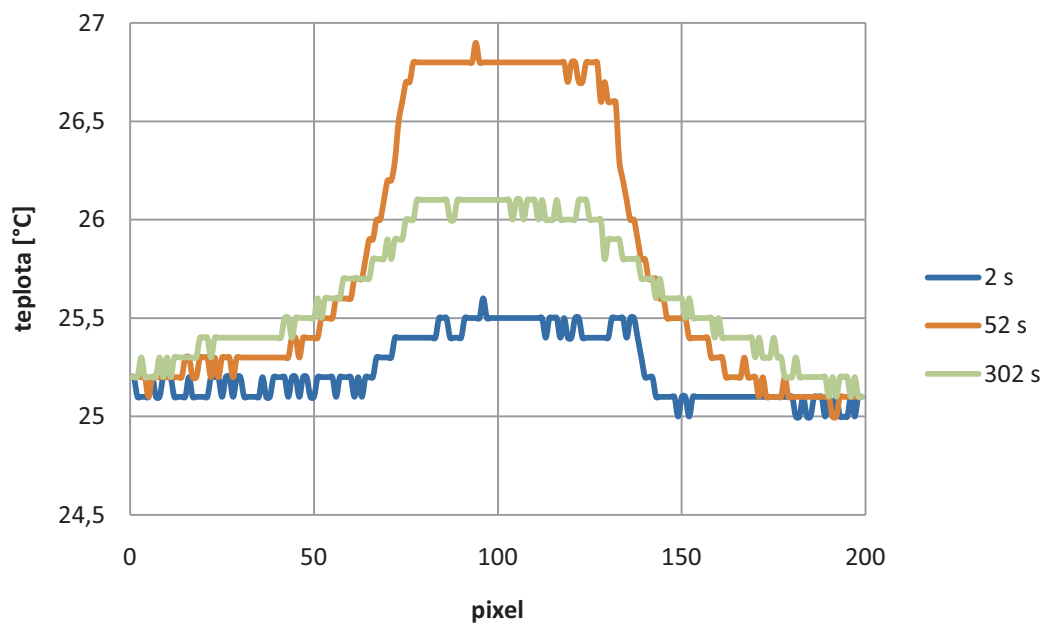
Rozdíl teplot materiálu při utažení na určitý moment - PERTINAX



Izotermy měnící se teploty v čase materiálu PERTINAX



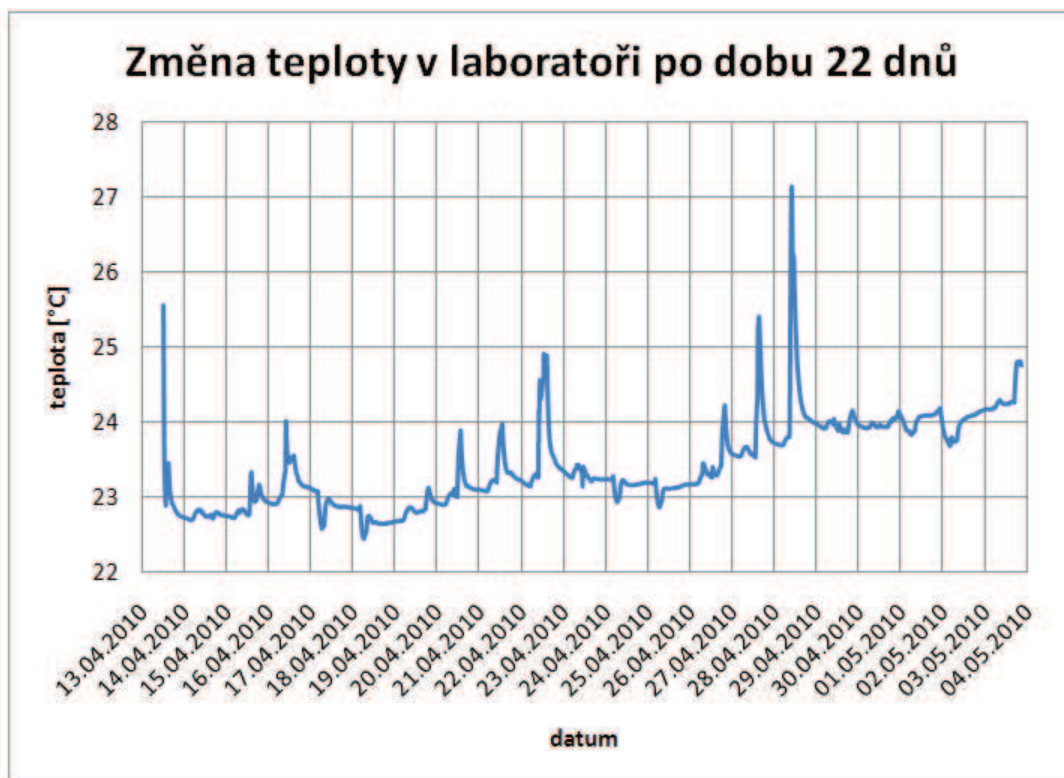
Izotermy měnící se teploty v čase materiálu PERTINAX



Opět se jedná o stejný průběh měření, jako v předešlých dvou případech. Nyní však měření proběhlo na dvou různě vodivých materiálech. Na nerezové oceli a na pertinaxu. Měření proběhlo v jednom případě na momentu 30 Nm a ve zbylých dvou na momentu 50 Nm. Do grafů byly vyneseny pouze rozdíly teplot materiálu a šroubu při utažení. U materiálu nerezová ocel má průběh rozdílu teplot v čase opět podobný průběh jako v předešlém měření. U materiálu pertinax je průběh podobný jen s rozdílem, že pokles teploty trvá daleko déle. Je zde i vidět, že pokles rozdílu teplot je při nižším momentu utažení rychlejší než při vyšším momentu. U každého materiálu je zde zobrazen i výsledný graf vzniklých izoterm v různém čase. Jedná se o izotermy procházející materiálem a hlavou šroubu v jejím středu.

6.6 MĚŘENÍ TEPLoty V LABORATOŘI

Nejedná se o žádné referenční měření teploty, ale pouze o informační měření teploty v místnosti laboratoře. Měření bylo provedeno z důvodu ověření, jak se mění teplota v dané místnosti. Toto měření bylo provedeno z důvodu ověření si, jestli teplota měřených materiálů je jiná při první měření po vstupu do místnosti, než teplota toho samého materiálu po delší době měření. Na grafech je zobrazena změna teploty v místnosti během noci a během dne včetně toho jestli se v místnosti někdo nachází nebo nenachází. Měření bylo provedeno teploměrem s datalogerem. Teploměr s datalogerem je zařízení umožňující ukládání naměřených hodnot teploty do své paměti. Po připojení k počítači je možné uložené hodnoty teploty z datalogeru přečíst. Dataloger se tedy skládá z teplotního senzoru, elektronických obvodů, paměti a baterie.





Z výsledných grafů a naměřených hodnot, že teplota se během všech 22 měřených dnů měnila. Podle vedených záznamů o vstupu a odchodu z laboratoře je možné říci, že teplota v laboratoři vzroste vždy, když se v místnosti někdo nachází. Na druhém grafu je zobrazený průběh teploty jednoho dne, při měření změny teploty materiálu utaženého šroubem. Vstup do laboratoře byl v 9:50 a odchod z laboratoře ve 14:45. Jak je vidět z výsledného grafu po vstupu teplota vzroste o 1,6 °C. Po odchodu začne klesat.

6.7 MOŽNÉ PARAZITNÍ VLIVY

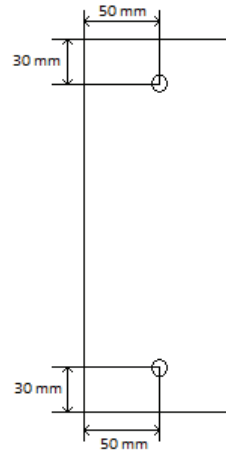
Během měření změny teploty namáhaného materiálu může docházet k různým parazitním vlivům.

1. prodleva při odečítání hodnot teploty mezi utažením a uložením termogramu
Tento možný parazitní jev, který mohl vzniknout, byl odstraněn použitím video sekvence z termokamery, z které byly následně naměřené hodnoty vyčítány.
2. rozsah zabíraného okolí termokamerou
Aby zabíraný rozsah okolí byl co nejmenší, došlo k přiblížení termokamery k měřenému materiálu a tím i zmenšení jejího zorného pole. Vliv zorného pole termokamery se na měřeních ale neprojevil.
3. předání tepla třením momentového klíče o daný materiál
Jelikož byl použit šestihranný šroub a utahování šroubu bylo ze strany snímané termokamerou mohlo dojít k nechtěnému tření klíče o materiál při utahování šroubu. Tento problém byl vyřešen jiným upevněním materiálu do svěráku a utahováním na matici. Nedocházelo taktéž ani k pohybu měřené hlavy šroubu.
4. odraz teploty okolí od lesklých materiálů
Tento parazitní jev byl vyřešen stejnou povrchovou úpravou všech použitých materiálů i šroubů matnou černou barvou.
5. předání teploty dotykem lidského těla materiálu
Při měření bylo nutné nedotýkat se měřeného materiálu a po manipulaci s materiálem a šrouby bylo nutné vyčkat na ustálení teploty.

6. možná deformace okolí otvoru materiálu utažením šroubu
Jelikož některá měření byla provedena na nových otvorech, tak se tento parazitní jev při zvolené metodě měření neprojevil.
7. vliv okolí na měřenou teplotu
Při měření bylo zamezeno proudění vzduchu, aby se zamezilo možnému ochlazování materiálu.
8. rozměry materiálu
Některá měření byla provedena na stejném materiálu, a proto se tento parazitní jev při zvolené metodě měření neprojevil.
9. vliv žeber svěráku
Tento vliv byl odstraněn odizolováním materiálu od žeber svěráku.
10. předání tepla materiálu šroubem, který je taktéž namáhán
Možné řešení je odizolování šroubu od materiálu.

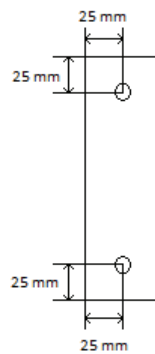
6.8 ROZMĚRY POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

- materiál nikl - 245 x 100 x 3 mm



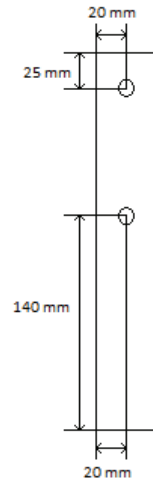
Obrázek 6.8-1 Materiál nikl

- materiál titan - 160 x 50 x 5 mm



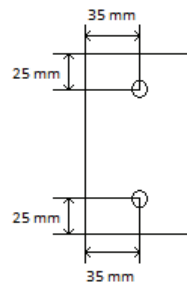
Obrázek 6.8-2 Materiál titan

- materiál železo - 255 x 40 x 5 mm



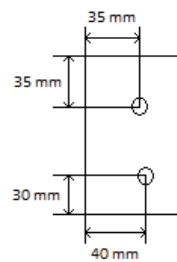
Obrázek 6.8-3 Materiál železo

- materiál hliník - 120 x 70 x 8 mm



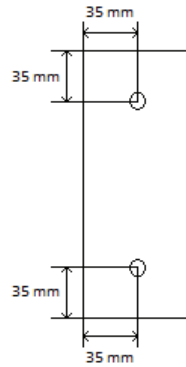
Obrázek 6.8-4 Materiál hliník

- materiál pertinax - 105 x 70 x 10 mm



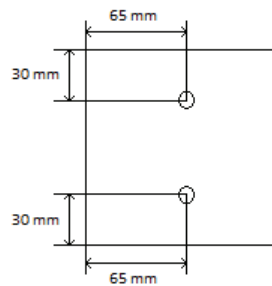
Obrázek 6.8-5 Materiál pertinax

- materiál nerezová ocel menší - 180 x 70 x 1 mm



Obrázek 6.8-6 Materiál nerezová ocel

- materiál nerezová ocel větší - 120 x 120 x 1 mm



Obrázek 6.8-7 Materiál nerezová ocel

6.9 TEPELNÁ VODIVOST POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Tabulka 6.9-1 Tepelná vodivost použitých materiálů

Materiál	vodivost při [°C]	tepelná vodivost λ [W/mK]
nikl	20	90
titan	20	20
železo	20	80
hliník	20	240
pertinax	20	0,2
nerezová ocel	20	16

6.10 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

Tyto přístroje byly použity během všech měření.

- Termokamera FLUKE Ti55 S/N: 0807088
- Objektiv 20 mm / F0,8 S/N: 40948-8916
- Svěrák YORK 100 S/N: -
- Momentový klíč BGS technic
1/2 28 až 210 Nm S/N: -
- Teploměr s datalogerem
Tinytag TK-4014 -40 °C až +85 °C - S/N: 377188

7. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zabývat se technickou termodiagnostikou pomocí termovizního zobrazovače Fluke Ti55, zejména se zaměřením na oblast mechanických napětí. V teoretické části práce je rozebrán popis bezdotykového měření teploty včetně principu, nejistot měření a měřicího systému. Dále popis termovize, termogramu, aktivní a pasivní termografie, popis termovizního zobrazovače Fluke Ti55 a nakonec popis měření mechanického napětí. V druhé části práce je popis a zpracování provedených měření včetně jejich zhodnocení.

Z provedených měření, naměřených hodnot a výsledných grafů vyplývá, že dochází ke změnám teploty během utahování šroubu na určitý moment, ale u každého materiálu je průběh změny jiný a v některých případech není stejný ani u téhož materiálu. Tato změna teploty se projevovala i při povolování šroubu. Zvolené vynesené průběhy rozdílu teplot před a po utažení šroubu v určitém čase bylo z důvodu, že ve zvoleném postupu měření nebylo možné docílit toho, aby počáteční teplota materiálu byla úplně stejná.

První dvě provedené měření byly pouze experimentální a nebyly v nich odstraněny možné parazitní vlivy. Utahování šroubu momentovým klíčem na určitý moment probíhalo ze strany snímání, což se později ukázalo jako nevýhodné z důvodu nechtěného tření momentového klíče a hlavy šroubu při otáčení.

Následující tři měření již probíhaly s odstraněnými zjištěnými parazitními vlivy, které by mohli ovlivnit výsledky měření. Všechny použité materiály a šrouby měli povrchovou úpravu naneseným černým matným lakem. Uchycení materiálu ve svěráku bylo ve svislé poloze a ne ve vodorovné, jako v předešlých dvou měření. Toto svislé upevnění bylo včetně odizolování od žeber svěráku, ve kterém byl materiál upevněn. Utahování šroubu tedy již nebylo na straně snímané termokamerou, ale na straně matice. Nedochovalo tedy k působení tření hlavy šroubu a momentového klíče při otáčení hlavy. Snímaná teplota mohla být nejen na materiálu, ale i na hlavě šroubu. Díky svislému upevnění materiálu mohlo dojít i ke zmenšení vzdálenosti termokamery od měřeného materiálu a tím i zmenšení zorného pole termokamery. Během všech měření bylo zamezeno nechtěnému

proudění vzduchu zábranami. Oproti předešlým dvěma měření bylo snímání prováděno video sekvencí a bylo možné tedy přesnějšího odečtení hodnoty teploty.

Při zvolené metodě měření a přes odstranění všech zjištěných parazitních vlivů, které mohli mít vliv na výsledek měření se nepodařilo docílit jednoznačného určení na jaký moment byl daný šroub utažen.

8. LITERATURA

- [1] BROŽ, J., ROSKOVEC, V., VALOUCH, M.: *Fyzikální a matematické tabulky*, SNTL, Praha 1980.
- [2] ČERNOHORSKÝ, J.: *Když se řekne ... Tenzometry*, AUTOMATIZACE 48, 2005, č. 1, s. 63.
- [3] ENERGY CONSULTING SERVICE: *Využití infrakamery a bezdotykových teploměru ve stavebnictví* [online], 2009.
<http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Efekt_infrakamera_final.pdf>
- [4] FLUKE: *Software SmartView IR* [online].
<http://www.fluke.cz/comx/show_product.aspx?locale=czcs&pid=35667>
- [5] FLUKE: *Termokamera Fluke Ti55* [online].
<http://www.fluke.cz/comx/show_product.aspx?pid=35657&product=thg&type=3&locale=czcs>
- [6] HUŠEK, M.: *Princip bezdotykového měření teploty* [online], 2010.
<<http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>>
- [7] KABEŠ, K.: *Infračervené pyrometry*, AUTOMATIZACE 48, 2005, č. 9, s. 536-542.
- [8] KADLEC, K.: *Měření teploty* [online], 2009.
<<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/3-FPBT09-Teplota.pdf>>
- [9] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- [10] KREIDL, M.: *Měření teploty*, BEN, Praha 2005, ISBN80-7300-145-4.
- [11] MIKULČÁK, J., KLIMEŠ, B., ŠIROKÝ, J., ŠŮLA, V., ZEMÁNEK, F.: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*, SPN, Praha 1990, ISBN 80-04-24962-0.

- [12] MYMETERSTORE: *Termokamera Fluke Ti55*[online].
<http://www.mymeterstore.com/crm_uploads/fluke_ti55ft_thermal_imager-501x481.jpg>
- [13] NEWPORT ELECTRONICS: *Bezdotykové měření teploty*, Zpravodaj pro měření a regulaci, č. 1.
- [14] OMEGA: *Černé těleso Omega BB703*[online].
<http://www.omega.com/ppt/pptsc_lg.asp?ref=BB703&Nav=>
- [15] ŠMÍD, R.: *Termovize* [online], 2007.
<<http://measure.feld.cvut.cz/usr/staff/smid/lectures/thermo07.pdf>>
- [16] TECHMANIA: *Deformace pevných těles* [online].
<http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=599>
- [17] *Termografie* [online]. <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Termografie>>
- [18] TERMOMECHANIKA TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ: *Měření deformací a mechanických napětí* [online].
<<http://ttp.zcu.cz/cz/vyzkum/mechanicka-mereni/mereni-napeti>>
- [19] TERMOMECHANIKA TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ: *Mechanická měření* [online].
<http://ttp.zcu.cz/files/pdf/MFT_PR08_mechanicka_mereni.pdf>
- [20] VAVŘIČKA, R.: *Bezdotykové měření teploty* [online], ČVUT, Praha.
<<http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>>
- [21] VĚCHET, S.: *Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů* [online]. <<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/02-BUM.ppt>>

SEZNAM SYMBOLŮ

c	<i>rychlost světla ($c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)</i>
c_1	<i>první vyzařovací konstanta</i> $(c_1 = 2\cdot\pi\cdot h\cdot c^2 = (3,7417749\pm 0,0000022)\cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2})$
c_2	<i>druhá vyřazovací konstanta</i> $(c_2 = h\cdot c/k = (1,438769\pm 0,000012)\cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K})$
E	<i>modul pružnosti v tahu</i>
h	<i>Planckova konstanta ($h = 6,6260755\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)</i>
k	<i>Boltzmannova konstanta ($k = 1,380658\cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)</i>
M_0	<i>intenzita vyřazování černého tělesa</i>
$M_{0\lambda}$	<i>spektrální hustota vyřazování černého tělesa</i>
T	<i>termodynamická teplota černého tělesa (K)</i>
ε_e	<i>poměrné délkové prodloužení</i>
λ	<i>vlnová délka záření (m)</i>
λ_m	<i>vlnová délka záření (m)</i>
σ	<i>mechanické napětí</i>

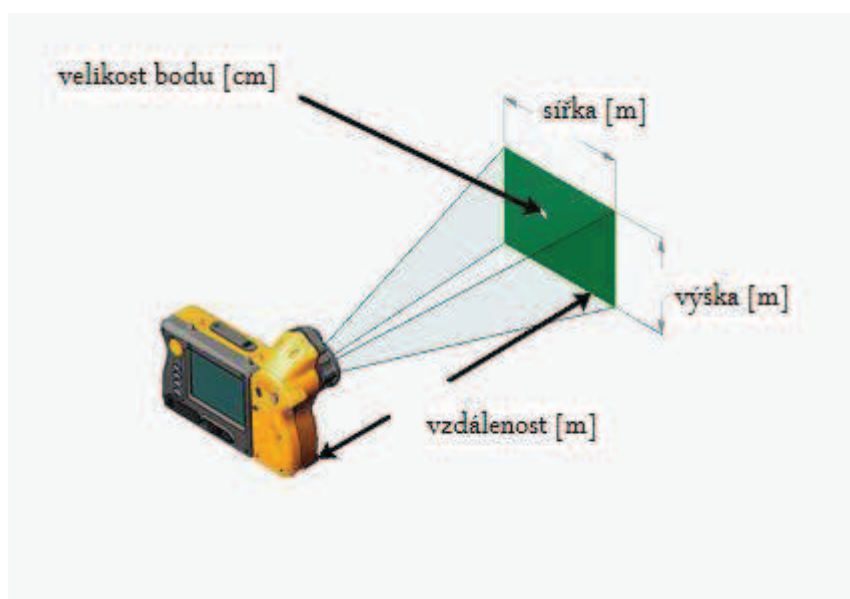
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Příložené CD
- Příloha 2 Zorné pole termokamery FLUKE Ti55
- Příloha 3 Tepelná vodivost pevných látek
- Příloha 4 Fotodokumentace

Příloha 1 – Přiložené CD

- \Diplomova_prace
Diplomová práce v elektronické podobě
- \Pruzkum_trhu
Vypracovaný průzkum trhu prodáváných termokamer
v roce 2009

Příloha 2 – Zorné pole termokamery Fluke Ti55



Obrázek 1 Zorné pole termokamery

Zorné pole termokamery Fluke Ti55 se standardním objektivem 20 mm

Tabulka 1 Hodnoty zorného pole - objektiv 20 mm

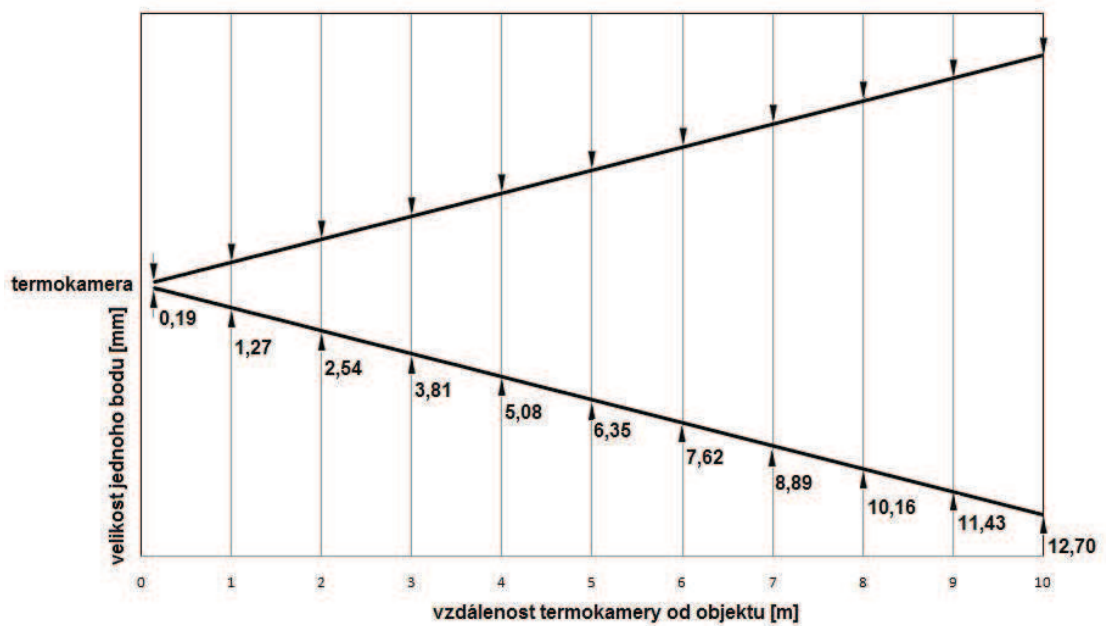
vzdálenost [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
0,15	0,06	0,05	0,019	0,019
0,20	0,08	0,06	0,025	0,025
0,25	0,10	0,08	0,032	0,032
0,30	0,12	0,09	0,038	0,038
0,35	0,14	0,11	0,044	0,044
0,40	0,16	0,12	0,051	0,051
0,45	0,18	0,14	0,057	0,057
0,50	0,20	0,15	0,063	0,063
0,55	0,22	0,17	0,070	0,070
0,60	0,24	0,18	0,076	0,076
0,65	0,26	0,20	0,083	0,083
0,70	0,28	0,21	0,089	0,089
0,75	0,30	0,23	0,095	0,095

Tabulka 2 Hodnoty zorného pole - objektiv 20 mm (pokračování)

vzdálenost [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
0,80	0,33	0,24	0,102	0,102
0,85	0,35	0,26	0,108	0,108
0,90	0,37	0,27	0,114	0,114
0,95	0,39	0,29	0,121	0,121
1,00	0,41	0,30	0,127	0,127
1,25	0,51	0,38	0,159	0,159
1,50	0,61	0,46	0,190	0,190
1,75	0,71	0,53	0,222	0,222
2,00	0,81	0,61	0,254	0,254
2,25	0,91	0,69	0,286	0,286
2,50	1,02	0,76	0,318	0,318
2,75	1,12	0,84	0,349	0,349
3,00	1,22	0,91	0,381	0,381
3,25	1,32	0,99	0,413	0,413
3,50	1,42	1,07	0,444	0,444
3,75	1,52	1,14	0,476	0,476
4,00	1,63	1,22	0,508	0,508
4,25	1,73	1,30	0,540	0,540
4,50	1,83	1,37	0,572	0,572
4,75	1,93	1,45	0,603	0,603
5,00	2,03	1,52	0,635	0,635
6,00	2,44	1,83	0,762	0,762
7,00	2,84	2,13	0,889	0,889
8,00	3,25	2,44	1,016	1,016
9,00	3,66	2,74	1,143	1,143
10,00	4,06	3,05	1,270	1,270
20,00	8,13	6,10	2,540	2,540
30,00	12,19	9,14	3,810	3,810
40,00	16,26	12,19	5,080	5,080

Tabulka 3 Hodnoty zorného pole - objektiv 20 mm (pokračování)

vzdálenost [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
50,00	20,32	15,24	6,350	6,350
60,00	24,38	18,29	0,620	7,620
70,00	28,45	21,34	8,890	8,890
80,00	32,51	24,38	10,160	10,160
90,00	36,58	27,43	11,430	11,430
100,00	40,64	30,48	12,700	12,700
500,00	203,20	152,40	63,500	63,500
1000,00	406,40	304,80	127,000	127,000



Obrázek 2 Zorného pole - objektiv 20 mm

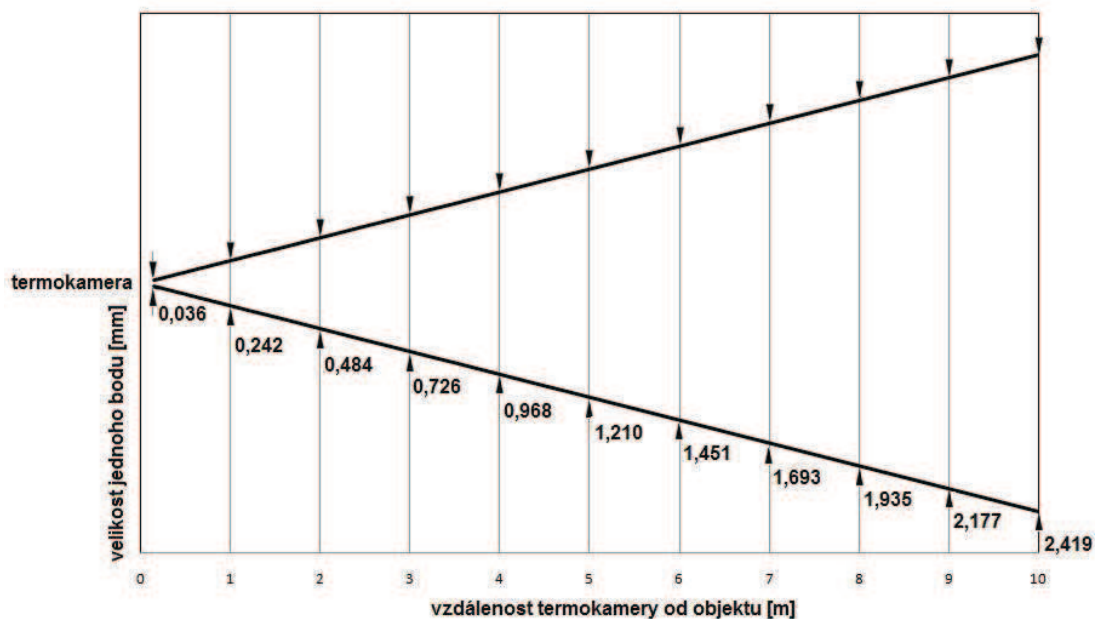
Zorné pole termokamery Fluke Ti55 s objektívom 10,5 mm

Tabulka 4 Hodnoty zorného pole - objektív 10,5 mm

vzdálenosť [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
0,15	0,12	0,09	0,036	0,036
0,20	0,15	0,12	0,048	0,048
0,25	0,19	0,15	0,060	0,060
0,30	0,23	0,17	0,073	0,073
0,35	0,27	0,20	0,085	0,085
0,40	0,31	0,23	0,097	0,097
0,45	0,35	0,26	0,109	0,109
0,50	0,39	0,29	0,121	0,121
0,55	0,43	0,32	0,133	0,133
0,60	0,46	0,35	0,145	0,145
0,65	0,50	0,38	0,157	0,157
0,70	0,54	0,41	0,169	0,169
0,75	0,58	0,44	0,181	0,181
0,80	0,62	0,46	0,194	0,194
0,85	0,66	0,49	0,206	0,206
0,90	0,70	0,52	0,218	0,218
0,95	0,74	0,55	0,230	0,230
1,00	0,77	0,58	0,242	0,242
1,25	0,97	0,73	0,302	0,302
1,50	1,16	0,87	0,363	0,363
1,75	1,35	1,02	0,423	0,423
2,00	1,55	1,16	0,484	0,484
2,25	1,74	1,31	0,544	0,544
2,50	1,94	1,45	0,605	0,605
2,75	2,13	1,60	0,665	0,665
3,00	2,32	1,74	0,726	0,726
3,25	2,52	1,89	0,786	0,786
3,50	2,71	2,03	0,847	0,847

Tabulka 5 Hodnoty zorného pole - objektiv 10,5 mm (pokračování)

vzdálenost [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
3,75	2,90	2,18	0,907	0,907
4,00	3,10	2,32	0,968	0,968
4,25	3,29	2,47	1,028	1,028
4,50	3,48	2,61	1,089	1,089
4,75	3,68	2,76	1,149	1,149
5,00	3,87	2,90	1,210	1,210
6,00	4,64	3,40	1,451	1,451
7,00	5,42	4,06	1,693	1,693
8,00	6,19	4,64	1,935	1,935
9,00	6,97	5,23	2,177	2,177
10,00	7,74	5,81	2,419	2,419
20,00	15,48	11,61	4,838	4,838
30,00	23,22	17,42	7,257	7,257
40,00	30,96	23,22	9,676	9,676
50,00	38,70	29,03	12,095	12,095
60,00	46,45	34,83	14,514	14,514
70,00	54,19	40,64	16,933	16,933
80,00	61,93	46,45	19,352	19,352
90,00	69,67	52,25	21,771	21,771
100,00	77,41	58,06	24,190	24,190
500,00	387,05	290,29	121,000	121,000
1000,00	774,10	580,57	241,900	241,900



Obrázek 2 Zorného pole - objektiv 10,5 mm

Zorné pole termokamery Fluke Ti55 s objektivem 54 mm

Tabulka 6 Hodnoty zorného pole - objektiv 54 mm

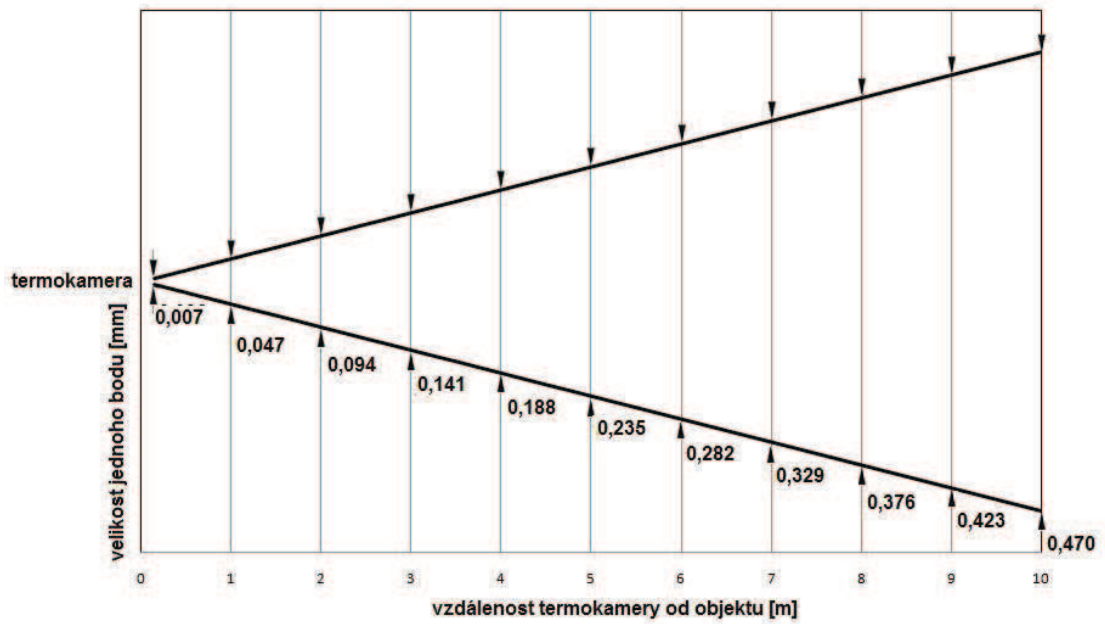
vzdálenost [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
0,15	0,02	0,02	0,007	0,007
0,20	0,03	0,02	0,009	0,009
0,25	0,04	0,03	0,012	0,012
0,30	0,05	0,03	0,014	0,014
0,35	0,05	0,04	0,016	0,016
0,40	0,06	0,05	0,019	0,019
0,45	0,07	0,05	0,021	0,021
0,50	0,08	0,06	0,024	0,024
0,55	0,08	0,06	0,026	0,026
0,60	0,09	0,07	0,028	0,028
0,65	0,10	0,07	0,031	0,031
0,70	0,11	0,08	0,033	0,033
0,75	0,11	0,08	0,035	0,035

Tabulka 6 Hodnoty zorného pole - objektiv 54 mm (pokračování)

vzdálenost [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
0,80	0,12	0,09	0,038	0,038
0,85	0,13	0,10	0,040	0,040
0,90	0,14	0,10	0,042	0,042
0,95	0,14	0,11	0,045	0,045
1,00	0,15	0,11	0,047	0,047
1,25	0,19	0,14	0,059	0,059
1,50	0,23	0,17	0,071	0,071
1,75	0,26	0,20	0,082	0,082
2,00	0,30	0,23	0,094	0,094
2,25	0,34	0,25	0,106	0,106
2,50	0,38	0,28	0,118	0,118
2,75	0,41	0,31	0,129	0,129
3,00	0,45	0,34	0,141	0,141
3,25	0,49	0,37	0,153	0,153
3,50	0,53	0,40	0,165	0,165
3,75	0,56	0,42	0,176	0,176
4,00	0,60	0,45	0,188	0,188
4,25	0,64	0,48	0,200	0,200
4,50	0,68	0,51	0,212	0,212
4,75	0,71	0,54	0,223	0,223
5,00	0,75	0,56	0,235	0,235
6,00	0,90	0,68	0,282	0,282
7,00	1,05	0,79	0,329	0,329
8,00	1,20	0,90	0,376	0,376
9,00	1,35	1,02	0,423	0,423
10,00	1,51	1,13	0,470	0,470
20,00	3,01	2,26	0,941	0,941
30,00	4,52	3,39	1,411	1,411
40,00	6,02	4,52	1,881	1,881

Tabulka 7 Hodnoty zorného pole - objektiv 54 mm (pokračování)

vzdálenost [m]	velikost snímané plochy [m]		velikost bodu [cm]	
50,00	7,53	5,64	2,352	2,352
60,00	9,03	6,77	2,822	2,822
70,00	10,54	7,90	3,293	3,293
80,00	12,04	9,03	3,763	3,763
90,00	13,55	10,16	4,233	4,233
100,00	15,05	11,29	4,704	4,704
500,00	75,26	56,44	23,519	23,519
1000,00	150,52	112,89	47,037	47,037



Obrázek 3 Zorného pole - objektiv 54 mm

Příloha 3 – Tepelná vodivost pevných látek [1][11]

Tabulka 8 Tepelná vodivost pevných látek

Materiál	vodivost při [°C]	tepelná vodivost λ [W/mK]
Antimon	20	18
Beryllium	20	220
Bismut	20	9
Bronz 8-14% Zn	20	65
Bronz 90% Cu + 10% Sn	20	42
Bronz 75% Cu + 25% Sn	20	26
Cer	20	21
Cín	20	70
Draslík	20	98
Dural	20	145
Erbium	20	10
Germanium	20	42
Hafnium	20	22
Hliník 88% Al + 10% Zn + 2% Cu	20	147
Hliník 92% Al + 8% Cu	20	130
Hliník	20	240
Hořčík	20	160
Chrom	20	86
Indium	20	80
Invar	0	11
Iridium	20	145
Kadmium	20	92
Kobalt	20	120
Konstantan	20	23
Křemík	20	84
Lithium	20	72

Tabulka 9 Tepelná vodivost pevných látek (pokračování)

Materiál	vodivost při [°C]	tepelná vodivost λ [W/mK]
Litina	20	63
Mangan	20	22
Měď čistá	0	384
Měď elektrolytická	20	395
Měď technická	0	349
Molybden	20	140
Mosaz červená	20	64
Mosaz žlutá	20	109
Nikl	20	90
Niob	20	35
Ocel chromová 10% Cr	30	22
Ocel chromová 2% Cr	30	40
Ocel chromová 3% Cr	30	37
Ocel chromová 5% Cr	30	30
Ocel manganová 10% Mn	30	12
Ocel měkká	20	47
Ocel niklová 10% Ni	30	26
Ocel niklová 30% Ni	30	13
Ocel niklová 40% Ni	30	10
Ocel niklová 50% Ni	30	13
Ocel niklová 75% Ni	30	26
Ocel tvrzená	20	40
Olovo	0	35
Osmium	20	90
Palladium	20	72
Platina	20	70
Rhenium	20	50
Rhodium	20	150
Rtuť	20	9

Tabulka 10 Tepelná vodivost pevných látek (pokračování)

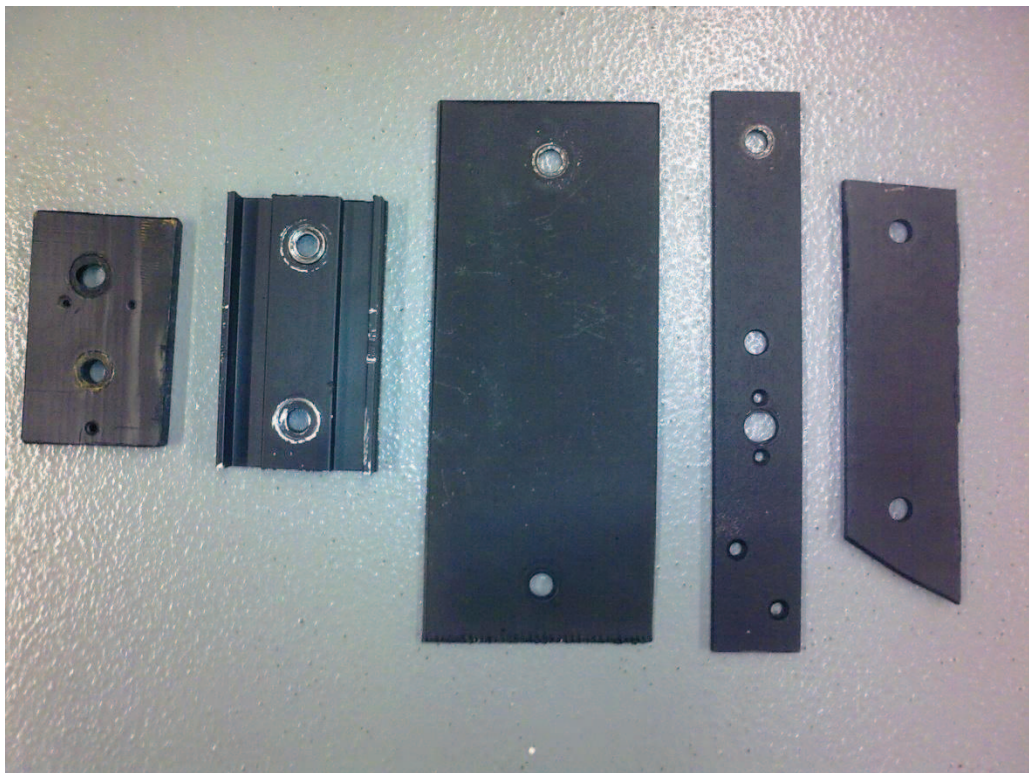
Materiál	vodivost při [°C]	tepelná vodivost λ [W/mK]
Rubidium	20	60
Ruthenium	20	100
Selen	20	0,3
Skandium	20	11
Sodík	20	140
Stříbro	20	419
Tantal	20	55
Thallium	20	40
Thorium	20	40
Titan	20	20
Uhlík diamant	20	650
Uhlík grafit	20	5
Uran	20	28
Vanad	20	26
Widium	20	35
Wolfram	20	170
Woodův kov	20	13
Ytterbium	20	10
Zinek	20	110
Zirkonium	20	21
Zlato	20	312
Železo	20	80

Příloha 4 – Fotodokumentace

Ukázka průběhu měření



Použité materiály s povrchovou úpravou (pentinax, hliník, nikl, železo, titan)



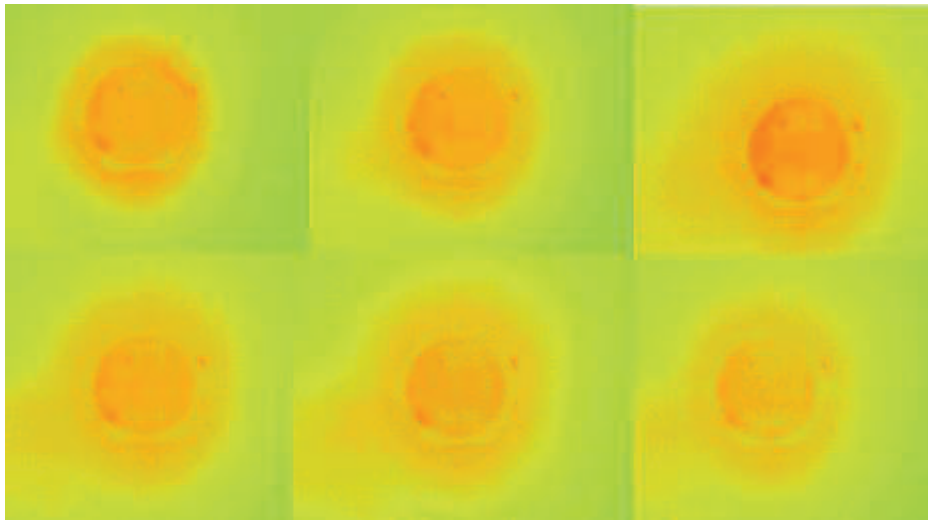
Použité materiály s povrchovou úpravou (nerezová ocel)



Materiál nerezová ocel s vloženým šroubem



Šíření teploty po utažení šroubu na materiálu nerezová ocel po dobu 50-ti sekund



Šíření teploty po utažení šroubu na materiálu pertinax po dobu 5-ti minut

