



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**MĚŘENÍ TEPELNÝCH VLIVŮ U OBRÁBĚCÍCH
STROJŮ**

TEMPERATURE MEASUREMENT OF A MACHINE TOOL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Petr Novotný
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Dominik Hermanský
Akademický rok:	2017/18

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

Měření tepelných vlivů u obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření rozložení teplot se využívá v oblasti predikce teplotního chování obráběcích strojů. Snímače se liší vlastní konstrukcí, způsobem zpracování signálu, přesností měření atd. Předmětem práce bude rešerše v oblasti snímání teploty a jednoduchá praktická úloha.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Rešerše v oblasti bezdotykových senzorů
3. Měření s využitím vhodných snímačů
4. Vyhodnocení výsledků měření

Seznam doporučené literatury:

VAVŘÍČKA, Roman. Bezkontaktní způsoby měření teploty. 1. vyd. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013. Sešit projektanta - pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02515-3.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

INCROPERA, Frank P. Fundamentals of Heat Transfer. 1. vyd. New York: John Wiley, 1981. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Cílem této práce je seznámit se s problematikou měření teploty, různými druhy bezdotykového měření teploty a druhy bezdotykových měřidel. Taktéž je snahou vysvětlit základní pojmy a poznatky z oblasti obráběcích strojů a jejich teplotního zatížení. Součástí práce je vyzkoušení těchto poznatků pomocí měření ve společnosti Intemac Solutions s.r.o. Získané poznatky jsou poté vyhodnoceny pomocí grafů a tabulek.

ABSTRACT

The aim of this work is to get acquainted with the problems of temperature measurement, various types of non-contact temperature measurement and types of non-contact gauges. It also tries to explain the basic concepts and knowledge from the field of machine tools and their thermal load. Part of the thesis is to test this knowledge using measurements at Intemac Solutions s.r.o. The acquired knowledge is then evaluated using graphs and tables

KLÍČOVÁ SLOVA

Teplota, teplo, měření teploty, emisivita, infračervené záření, detektory, pyrometr, termokamera, termografie, termogram, termodiagnostika.

KEYWORDS

Temperature, heat, temperature measurement, emissivity, infrared radiation, detectors, pyrometer, thermocamera, thermography, thermogram, thermodiagnostics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVOTNÝ, P. *Měření tepelných vlivů u obráběcích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dominik Hermanský.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Dominika Hermanského a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Novotný Petr

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Dominikovi Hermanskému za odborné vedení, konzultace ke studované problematice a věcné připomínky při zpracovávání mé bakalářské práce. Poděkování patří také mé rodině, která mě podobu mého studia podporovala.

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	ZÁKLADÍ POJMY.....	17
2.1	Teplota	17
2.2	Teplo	17
2.3	Přenos tepla	18
3	BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	19
3.1	Základní veličiny a pojmy pro bezdotykové měření	19
3.1.1	Infračervené záření	19
3.1.2	Černé těleso	19
3.1.3	Šedé těleso	20
3.1.4	Prostupnost	20
3.1.5	Pohltivost	21
3.1.7	Emisivita	22
3.2	Zákony měření	22
3.2.1	Stephan-bolzmannův zákon	22
3.2.2	Planckův zákon	23
3.2.3	Weinův zákon	24
3.2.4	Kirchhoffův zákon	24
3.2.5	Weinův posuvný zákon	24
4	BEZDOTYKOVÉ SNÍMAČE TEPLoty.....	25
4.1	Tepelné senzory infračerveného záření	25
4.2	Kvantové senzory infračerveného záření	27
5	PYROMETRY.....	29
6	TERMOVIZE.....	30
7	VÝHODY, NEVÝHODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ	32
8	OBRÁBĚCÍ STROJE.....	33
9	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	38
9.1	Zadání úkolů	38
9.2	Použitá měřicí zařízení a pomůcky	38
9.3	Experiment	39
10	ZÁVĚR	44
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
12	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ.....	47
12.1	Seznam tabulek.....	47
12.2	Seznam obrázků.....	47

1 ÚVOD

Teplota jako jedna ze základních fyzikálních veličin je součástí každé hmoty a na každou hmotu také působí. Proto je neodmyslitelně spjata s roztažností a taková roztažnost ovlivňuje všechny objekty a to jak plynné, kapalně i pevné.

Vzhledem k tomu, že teplota a její měření je dlouhodobým zájmem odborníků vzniklo mnoho metod a postupů na její měření. V neposlední řadě vznikají i stále nové přístroje k tomuto určené. V současnosti je možné měřit tepotu jak kontaktními měřidly, tak i bezkontaktními přístroji. Každý z těchto způsobů má své přednosti ale i nevýhody.

V dnešním technickém světě je důležité vědět s co největší přesností, do jaké míry teplota ovlivňuje vlastnosti strojů a přístrojů. Proto je jako jedna ze základních veličin ve velkém zájmu odborníků. Na vliv teploty se zájmem obracejí již i výrobci obráběcích strojů, neboť u těchto strojů bývá velký požadavek na přesnost práce s různými typy materiálů.

Tato bakalářská práce se věnuje základnímu seznámení s tematikou měření teploty a také se věnuje problematice deformací obráběcích strojů způsobených změnami teploty. V první části se čtenář seznámí se základními pojmy a fyzikálními zákony, které neodmyslitelně souvisí s bezkontaktním měřením teploty. Dále se zde dočte o přístrojích, kterými je bezkontaktní měření realizovat. Kromě toho se v první části věnuji i základům obráběcích strojů a vlivu teploty na ně. Druhou část jsem věnoval využití získaných teoretických poznatků v praxi, kdy jsem na konstrukci obráběcího stroje měřil změny teplot v závislosti na zatížení a to jak kontaktním i bezkontaktním způsobem. Pro realizaci tohoto pokusu jsem si vybral laboratoře výzkumného centra společnosti Intemac Solutions s.r.o. v Kuřimi.

2 ZÁKLADNÍ POJMY

2.1 Teplota

Teplota T (K) je fyzikální veličina, která patří do skupiny sedmi základních veličin SI. Teplota nám charakterizuje termodynamický stav jakékoliv makroskopické soustavy. Jednotkou teploty je Kelvin (K) vedlejší jednotkou stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$) a Fahrenheitův stupeň ($^{\circ}\text{F}$). Teplota tělesa nemá žádnou horní mez, ale spodní mez existuje. Je to nejnižší teplota, kterou nazýváme absolutní nula. Tato teplota nám udává na Kelvinově stupnici nulu (0 K; $-273,15^{\circ}\text{C}$). K absolutní nule se lze přiblížit, avšak nelze jí dosáhnout. [2] [3]

Celsiova teplota

Celsiova teplota se značí obvykle písmenem t . Jednotkou je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$).

Celsiova teplota je definována vztahem:

$$t = T - 273,15 [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

Fahrenheitova teplota

Fahrenheitova teplota je značena písmenem t_F . Jednotkou je stupeň Fahrenheitova ($^{\circ}\text{F}$).

Fahrenheitova teplota je definována vztahem:

$$t_F = \frac{9}{5} \cdot t + 32 [^{\circ}\text{F}] \quad (2)$$

Fahrenheitova stupnice je dnes používá převážně v USA, Austrálii, Japonsku, omezeně pak v Kanadě a Velké Británii. [2] [3]

2.2 Teplo

Teplo Q [J] – jde formu přenosu energie mezi soustavou a jejím okolím. Teplo není stavovou veličinou. Pro výpočet předávané tepla se využívá tzv. kalorimetrická rovnice: [1]

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (3)$$

m – hmotnost [Kg]

c – měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T_1 – Teplota soustavy na počátku

T_2 – Teplota soustavy na konci

2.3 Přenos tepla

Přenos tepla nám udává, jakým způsobem dochází k přenosu požadované množství tepla do nebo ze soustavy. A zdali můžeme přenést teplo na rozumně velké ploše a v reálném čase.

Máme tři základní druhy přenosu tepla:

- Vedením tepla (kondukce)

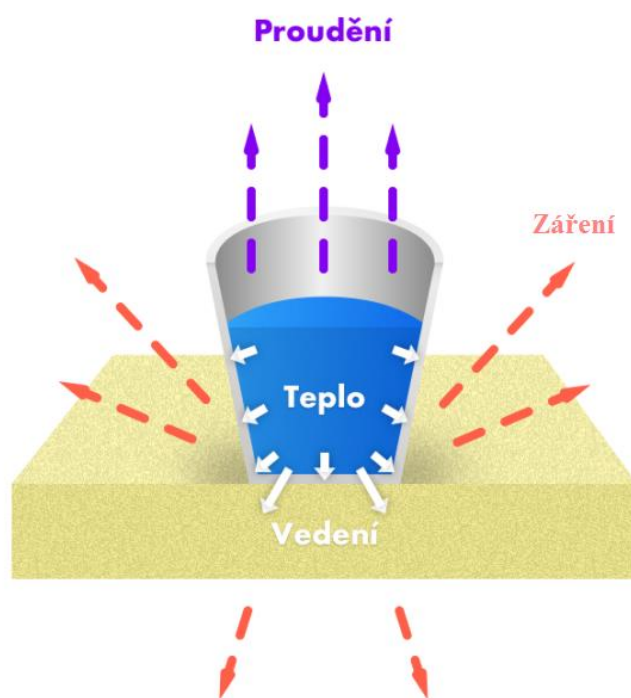
Jedná se o přenos tepelné energie mezi sousedními tělesy, přičemž energie přechází vždy z teplejšího tělesa na studené. Oproti konvekci nedochází při kondukcí k přenosu látky. [1]

- Konvekce (přenos tepla prouděním)

Jde o přenos tepla, při kterém tepelná energie přechází prostřednictvím pevného, kapalného nebo plynného transportního média na jiná tělesa, kapaliny nebo plyny. [1]

- Záření (radiace)

Povrch každého tělesa, který má teplotu vyšší než 0[K] vyzařuje energii. Tento proces je označován jako záření. K tomuto dochází i u kapalin a plynů. Tento proces může probíhat i ve vakuu, na rozdíl od konvekce a kondukce, neboť nevyžaduje přítomnost hmotné látky. [1]



Obr. 1 Přenos tepla (4)

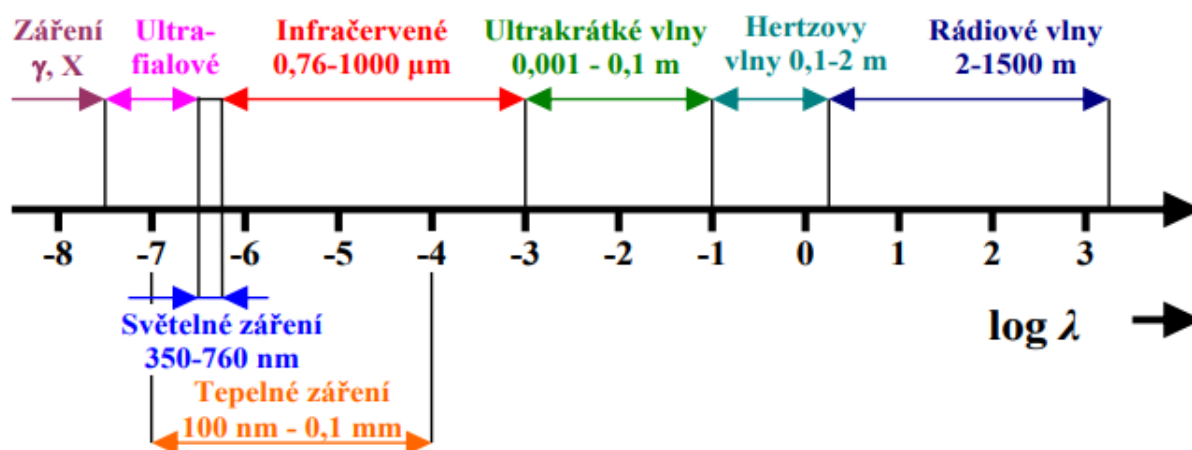
3 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLOTY

Bezdotykové měření teploty se zabývá měření povrchové teploty objektu na základě elektromagnetického záření vysílaného objektem a přijímaného detektorem. Bezdotykové měření teploty využívá teorie absolutně černého tělesa a Kirchhoffova, Stefan-Boltzmanova, Planckova i Wienova zákona. Bezdotykové měření využívá záření vlnové délky od $0,4 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$. Tento rozsah nám umožňuje měření teplot v rozmezí od -40°C do $+10000^\circ\text{C}$ [2]

3.1 Základní veličiny a pojmy pro bezkontaktní měření

3.1.1 Infračervené záření

Infračervené záření je elektromagnetické záření, které se nachází v oblasti s vlnovou délkou větší než viditelné světlo, ale menší než mikrovlnné záření. Infračervené záření zahrnuje oblast vlnové délky $760\text{nm} - 1\text{mm}$. [4]



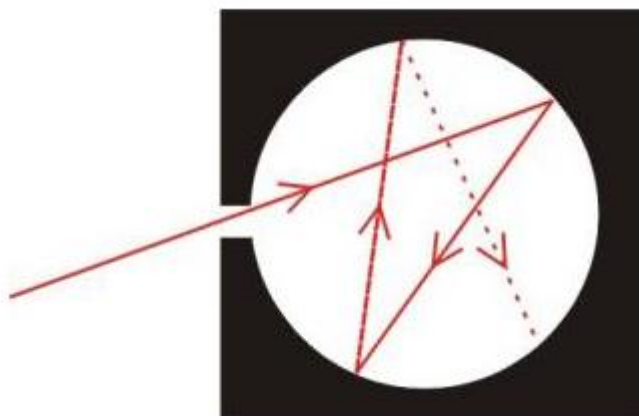
Obr. 2 Elektromagnetické spektrum (5)

3.1.2 Černé těleso (2)(6)

Černé těleso (černý zářič) je ideální těleso, které dokonale pohlcuje veškeré dopadající záření, které dopadá na jeho povrch. Absorpce nezávisí na úhlu dopadu ani na vlnové délce. Černé těleso je ideální zářič. Při všech vlnových délkách a stejné teplotě pohltí a vyzařuje nejvíce energie ze všech možných těles nezávisle na použitém materiálu. Emisivita černého tělesa je $\varepsilon = 1$. Pro kalibraci pyrometrů se používá černý zářič, který má emisivitu v rozmezí $1 > \varepsilon > 0.99$.

Jako černé těleso se nemusí chovat jen těleso, které má černou barvu. Například světlé povrchy jako sníh a led nebo bíle natřené povrchy se blíží záření černého tělesa. Za černé těleso můžeme také považovat tělesa, která mají výrazně větší objem, než je povrch, kterým záření vyzařují do okolí. Proto můžeme považovat za černé těleso například slunce.

Jako model černého tělesa se využívá dutina obr. 3. Vnitřní povrch dutiny je natřen matnou černou barvou. Do dutiny se malým otvorem dostane parsek (záření), kde se zde opakovaně odrazí od stěn. Stěny černého tělesa v ideálním případě mají nulovou odrazivost, takže pohltí veškeré záření, které na ně dopadne. Takže se malý otvor navenek jeví jako černé těleso. [2] [4]



Obr. 3 Model černého tělesa (19)

3.1.3 Šedé těleso

Je to těleso, jehož emisivitu je možno považovat za konstantní v dosti značném rozsahu vlnových délek. Takový zářič označujeme, jako šedé těleso. U něj je emisivita a pohltivost vždy menší než jedna a to znamená, že při stejné teplotě povrchu je intenzita vyzařování šedého tělesa menší než u černého tělesa. [2] [20]

3.1.4 Propustnost

Z propustností záření se musí počítat především u snímání objektů na větší vzdálenost. Například u měření povrchu budov. Záření je zeslabeno při průchodu atmosférou a to především rozptylem a absorpcí. Zeslabení záření je způsobeno především molekulami plynu, kapkami vody a dalšími různými částicemi, které jsou obsaženy v atmosféře. [2] [4]

Propustnost (transmittance) záření je dána vztahem:

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda t} \tau_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (4)$$

τ_λ ...spektrální propustnost dané vlnové délky

τ ...propustnost v úhrnném spektru

Φ_t ...prostupující zářivý tok (výkon přenášený zářením)

Φ_d ...dopadající zářivý tok (výkon přenášený zářením)

3.1.5 Pohltivost

Pohltivost udává, jaké množství záření bylo pohlceno měřeným objektem.

Pohltivost (absorbance) záření je dána vztahem:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda a} \alpha_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (5)$$

α_λ ...spektrální pohltivost dané vlnové délky

α ...pohltivost v úhrnném spektru

Φ_a ...pohlcený zářivý tok (výkon přenášený zářením)

Φ_d ... dopadající zářivý tok (výkon přenášený zářením) [2] [4]

3.1.6 Odrazivost

Odrazivost závisí na charakteru povrchu, teplotě a druhu materiálu. Odrazivost nám udává množství světla, které se odrazí od materiálu k poměru množství světla, které na materiál dopadlo. [2]

Odrazivost (reflexi) záření je dána vztahem:

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda r} \rho_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (6)$$

ρ_λ ...spektrální odraznost dané vlnové délky

ρ ...odraznost v úhrnném spektru

Φ_r ...pohlcený zářivý tok (výkon přenášený zářením)

Φ_d ... dopadající zářivý tok (výkon přenášený zářením) [2] [4]

3.1.7 Emisivita

Emisivitu definujeme jako poměr intenzity tepelného záření u reálného tělesa k intenzitě tepelného záření u černého tělesa při stejné teplotě.

Emisivita pro stejný povrch není konstantní, ale závisí na celé řadě parametrů, např.:

- úhlu odklonu od normály povrchu,
- teplotě povrchu objektu
- vlnové délce
- barvě povrchu měřeného objektu
- struktuře povrchu apod.

Emisivita pro černé těleso je rovna $\varepsilon=1$. U reálného tělesa platí, že $0<\varepsilon\leq 1$. [2] [20]

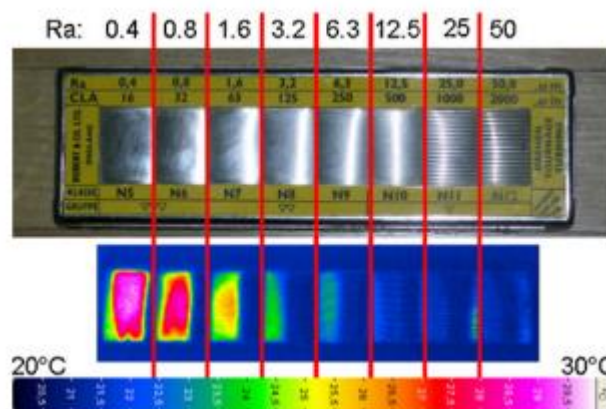
Pro emisivitu platí vztah:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) M_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty M_{0\lambda} d\lambda} \quad (7)$$

M_0 ... intenzita vyzařování černého tělesa,

$M_{0\lambda}$... spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa,

$\varepsilon(\lambda, T)$... emisivita [2] [4]



Obr. 4 Vzájemný vztah drsnosti povrchu a teploty sledovaný termokamerou při stejné emisivitě (23)

3.2 ZÁKONY ZÁŘENÍ (pro černé těleso)

3.2.1 Stefan-Boltzmannův zákon

Nám říká, že černé těleso nebo černý povrch, vyzařuje tepelné záření v množství, které je úměrné čtvrté mocnině absolutní teploty povrchu či tělesa. [1]

$$M_0 = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (8)$$

σ ... Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

3.2.2 Planckův zákon

Vyjadřuje závislost intenzity záření na vlnové délce a teplotě

$$M_{0\lambda} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (9)$$

$M_{0\lambda}$... spektrální hustota vyzařování černého tělesa

h ... Planckova konstanta ($6,6260755 \cdot 10^{-34}$ J.s)

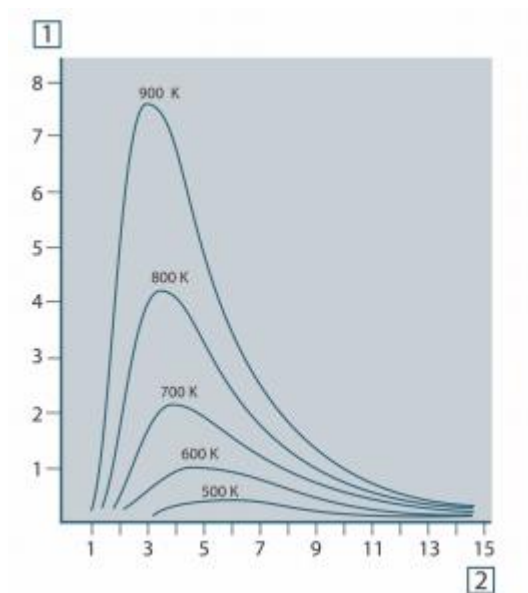
c ... rychlost světla (299792458 m·s⁻¹)

λ ... vlnová délka záření (m)

k ... Boltzmannova konstanta ($1,380658 \cdot 10^{-23}$ J·K⁻¹)

T ... termodynamická teplota černého tělesa (K) [2] [4]

Jedná se o zářivost černého tělesa, vztaženou na jednotku vlnové délky λ . Její spektrální hustotu intenzity vyzařování můžeme vidět na obr 5.



Obr.5 Planckův zákon, Osa:1 spektrální hustota intenzity vyzařování

Osa:2 Vlnová délka (λ)

3.2.3 Wienův zákon

Wienův zákon pro aplikaci pyrometrie můžeme vyjádřit vztahem:

$$M_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (10)$$

$M_{0\lambda}$... spektrální hustota vyzařování černého tělesa

c_1 ...první vyzařovací konstanta $((3,7417749 \pm 0,0000022) \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2})$

c_2 ...druhá vyzařovací konstanta $((1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K})$

λ ... vlnová délka záření

T ...termodynamická teplota [2] [4]

3.2.4 Kirchhoffův zákon

Kirchhoffův zákon nám říká, že poměr intenzity vyzařování M zdroje tepla k absorpci (pohltivosti) α závisí pouze na termodynamické teplotě tělesa. Nezáleží tedy na povrchové úpravě tělesa či chemickém složení. Pro zář je Kirchhoffův zákon vyjádřen vztahem: [2] [4]

$$\frac{M}{\alpha} = f(T) \quad (11)$$

M ... intenzita vyzařování zdroje

α ... pohltivost

T ... termodynamická teplota

3.2.5 Wienův posuvný zákon

Wienův zákon posuvu nám říká, že jak roste teplota tělesa, posouvá se maximum spektrální emisivity ke kratším vlnovým délkám.

$$\lambda_{max} T = 2898,6 \quad [\lambda m \cdot K] \quad (12)$$

Wienův zákon posuvu je důležitý pro výběr čidla podle rozsahu měření. [2] [4]

4 BEZDOTYKOVÉ SNÍMAČE TEPLoty

Senzory (detektory) tepelného záření se dělí do dvou skupin a to podle interakce fotonů s daným materiálem:

- Tepelné
- Kvantové

4.1 Tepelné senzory infračerveného záření

Tepelné detektory dělíme na:

- Termoelektrické
- Pyroelektrické
- Bolometrické

Termoelektrické detektory

Termoelektrické detektory, které jsou také nazývány jako termoelektrické baterie. Termoelektrické detektory využívají tepelného jevu, jako je např. Seebeckova jevu. Konstruuji se jako sériově řazené termočlánky, a to ve formě tenkých kovových pásků o tloušťce cca 30 μm . Nebo jsou zhotoveny jako pásky pomocí technologií tenkých vrstev nebo SI technologií. Jako termoelektrické materiály se nejčastěji používají např. Bi, Sb dopované Se a Te. Počet termoelektrických spojů je 100.

Seebeckův jev uvádí, že jsou-li dva různé vodiče (polovodiče) spojeny na koncích, získáváme dva jejich spoje. Pokud je na spojích rozdílná teplota vzniká termoelektrické napětí, které můžeme detekovat.

Termoelektrické detektory mohou detekovat IR záření o vlnových délkách 1 -18 μm a teplotním rozsahu – 20 až 500 $^{\circ}\text{C}$

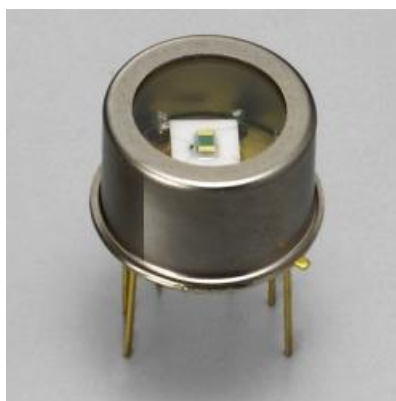
Výhodou termoelektrických detektorů je široký spektrální rozsah bez potřeby vnějšího napájení. Nevýhodou je velký vnitřní odpor. [2] [3] [4] [8] [9]

Pyroelektrické detektory

Pracují na principu pyroelektrického jevu neboli změny spontánní polarizace při změně teploty. Obecně lze říct, že pyroelektrický jev je schopnost materiálu generovat dočasný elektrický potenciál při změně jeho teploty. Při dopadu infračerveného záření na povrch detektoru vzniká na povrchu elektrický náboj, který se dále měří. Pyroelektrický jev vykazují pyroelektrika s trvalou polarizací nebo také některá feroelektrika, u kterých se orientace vytvoří silným elektrickým polem (např. TGS, PZT keramika, PVDF).

Rozsah využití u vlnové délky infračerveného záření je 5 až 14 μm a teploty cca – 50 až 400°C

Detektory nacházejí uplatnění v kouřových detektorech nebo v detektoru pohybu. [2]
[9]



Obr.6a Pyroelektrické detektory Obr. 6b Termoelektrický detektor P6606-110
(27)

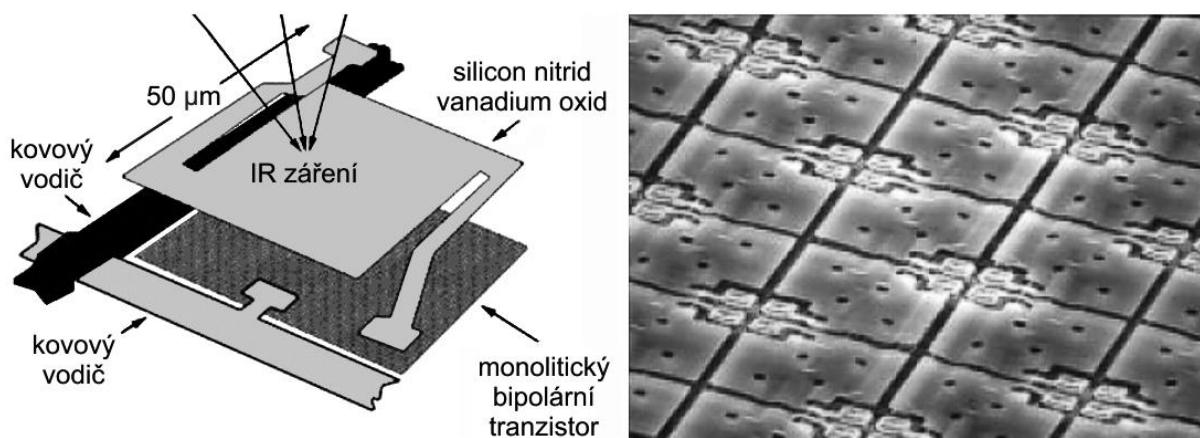
Bolometrické detektory

Princip bolometrického detektoru infračerveného záření je znám od konce 19. století. Bolometry jsou citlivé tepelné detektory, které jsou konstruovány pro použití v infračerveném pásmu od 8 μm do 15 μm .

Bolometry se vyrábí z teplotně závislých odporových materiálů. Nejčastěji se pro výrobu používají tenkovrstvé mikroelektrické technologie na bázi odporových materiálů z oxidů MgO, MnO, NiO, TiO₂ aj. Nejčastěji se vyrábí v podobě integrovaných obvodů, které obsahují uspořádání několika desítek, stovek a tisíců bolometrů do matice (uspořádání FPA – Focal Plane Array). Takto uspořádané bolometry se označují jako mikrobolometrické senzory.

Pohlcení záření způsobí změnu teploty a tím i změnu elektrického odporu. Změnou elektrického odporu Bolometru můžeme tedy určit množství dopadajícího záření. Bolometry musí být izolovány od rušivých vlivů okolí vakuovým pouzdem.

Zhotovuje se jako vhodně tvarovaný tenký pásek z čistého kovu (platina) s vývody na galvanometr. Největší uplatnění nachází mikrobolometrické senzory v termokamerách. [2] [9]



Obr. 7 Schéma mikrobolometru – detail uspořádání matice FPA (2)

4.2 Kvantové detektory infračerveného záření

Kvantové detektory využívají fyzikálního jevu, při němž dopadajícími částicemi světla nebo tepelného záření tzv. fotony nastává generace párů elektron – díra. Elektron se dostane z valenčního pásu do vodivostního pásu v energetickém pásovém modulu polovodiče. Po uvolnění elektronu zůstane v elektronovém obalu ionizovaného atomu prázdné místo, které se nazývá díra. Ionizovaný atom se pak chová jako elementární kladný náboj. Uvolněný elektron se může v polovodiči volně pohybovat. Rovněž tak díra se pohybuje a to tak, že ionizovaný atom převezme do elektronového obalu chybějící elektron ze sousedního neutrálního atomu. Tento atom se pak ionizuje a stává se dírou a nositelem kladného náboje. [2 str. 175] Pohyb elektronů i děr je v polovodiči zcela náhodný.

Kvantové detektory jsou polovodičové detektory Si, Ge, PbS, Te aj. Podle typu polovodiče se dělí na :

- Intrinsické
- Extrinsické

Intrinsické

Intristický detektor se označuje jako fotorezistor. Vyrábí se z chemicky čistého (vlastního) polovodiče.

Mechanismus funguje tak, že dojde ke změně v pohyblivosti nábojů ve chvíli, kdy dojde ke kontaktu dopadajících fotonů s vrstvou polovodiče. Vodivost je v takovém případě funkcí fotonového toku. Detektor funguje tedy na základě vnějšího elektrického pole, do nějž je přiváděno vnější napětí. Elektrické pole zapříčiní unášení nosičů náboje a následně prochází vnějším obvodem elektrický proud. [2] [5] [9]

Extrinsické

Tento detektor využívá PN strukturu nevlastních polovodičů, v nichž koncentrace příměsi ovlivňuje hustotu nosičů nábojů. Polovodič typu N znamená, že atom příměsi polovodiče má nadbytečný valenční elektron, a proto je nazýván dotovaný polovodič. U polovodiče typu P atom naváže elektron polovodiče, dotovaný polovodič pak má majoritním nosičem díry. [2]
[9]



Obr. 8 Fotodiodový detektor (27)

5 PYROMETRY

Pyrometr je též nazýván jako bezdotykový teploměr, případně radiační nebo infračervený teploměr. Původ názvu pyrometr je z doby, kdy se bezdotykové teploměry používaly k měření vysokých teplot. Radiační teploměr měří energii vyzařovanou objektem, od toho je odvozen i jeho název. Infračervený (dále jen IČ) teploměr využívá vlnových délek měřeného záření tzv. spektrum. Dle oblasti spektra můžeme pyrometry dělit do několika skupin např. úhrnové, pásmové, poměrové, monochromatické a další. [2] [5] [9]

Úhrnové pyrometry

Úhrnové pyrometry využívají k měření Stefan–Boltzmannův zákon (viz kapitola 3.2.1). Tyto teploměry můžeme též nazývat širokopásmové, neboť pracují s vlnovou délkou od 0,4 až 2,5 μm do 20 μm . Jako měřicí detektor se používá baterie termočlánku, borometr, termistor nebo pyrometr. V současnosti se nejvíce využívají mikroborometry. [4] [9]

Pásmové pyrometry

Pásmové pyrometry jsou spektrálně selektivní pyrometry, které měří záření na těleso. Pracují v relativně úzkém rozmezí vlnových délek. Šířka pásma měření je od 10nm do jednotek μm . Pásmový pyrometr pracuje s pásmem vlnových délek, které je odvislé od spektrální citlivosti kvantového senzoru záření, spektrální propustnosti optiky, atmosféry a optického filtru. Tyto pyrometry využívají k měření teploty Planckův zákon (viz kapitola 3.2.2). Na tyto pyrometry může nahlížet jako na zdánlivě monochromatické, ale to pouze v případě, že lze zajistit dokonalou propustnost optiky, neboť měří ve velmi úzkém vlnovém pásmu. Z tohoto důvodu jej nelze vyrobit. [4] [9]

Poměrové pyrometry

Pracují na principu poměru záře dvou různých vlnových délek na povrchu objektu. Vychází z Planckova zákona, na jehož základě lze říci, že pro každou teplotu je poměr září jednoznačně jiný. [4] [9]



Obr. 9 Pyrometr IMPAC IGA 15 plus (13)

6 TERMovIZE

Dělení dle termovizního systému

- s opticko-mechanickým rozkladem obrazu
- bez rozkladu obrazu – maticovým detektorem

Opticko-mechanický rozklad obrazu znamená, že se snímají jednotlivé body objektu řízenou optickou osou. Na měřeném objektu se postupně zorné pole termovize zaměřuje na všechny jeho plochy. Rozklad obrazu se provádí otočnými hranoly nebo zrcadly v optické části kamery.

Maticový detektor pro termovizní kamery používají chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové FPA detektory. U FPA detektorů se využívá Stirlingových chladičů nebo termoelektrické chladiče, které pracují na principu Peltierova jevu. Programy, kterými jsou kamery vybaveny, umožňují vykreslení teplotního profilu v libovolném místě měřeného objektu, vyhodnocení maximální a střední teploty ve zvoleném místě měřeného objektu, vyhodnocení teploty v libovolném místě na objektu. Dále umožňují barevné vykreslení zvolených teplotních bodů, nastavení různých hodnot emisivit, použití různých palet barev a podobně. Je důležité ovšem upozornit na fakt, že termovize pracuje v neviditelném spektru záření, kde žádné barvy neexistují. Přiřazení barev jednotlivým teplotním hodnotám je umělé.

Pro termovizní kamery se používají převážně dvě pásma vlnových délek a to krátkovlnné v rozpětí 2 μm až 5 μm a dlouhovlnné v rozpětí 7 μm až 13 μm .

Na základě barevné viditelnosti teplotního pole objektu můžeme sledovat funkce zařízení, které jsou spojené s absorpcí nebo vyzařováním tepla. Tímto způsobem je možné lokalizovat materiálové vady či opotřebení, která jsou zapříčiněna třením nebo také defekty vnitřních dílů objektu. Existují dva způsoby, které umožňují diagnostikovat defekty uvnitř materiálu. Jedná se o pulzní termografii a lock-in termografii. [2] [5] [9] [11]

Pulzní termografie

Její základem je rychlé (pulzní) ozařování objektu z interního nebo externího zářiče. Následně je z povrchu tělesa teplota snímána pomocí termovizní kamery. Teplotní pulzy trvají od několika milisekund do několika sekund. Doba trvání závisí na materiálu, z něho je objekt vyroben. Pokud je v materiálu objektu nehomogenita, promítne se na v určitém čase na tepelném obrazu objektu. Využití této termografie je například při tomografii u leteckých vrtulí z kompozitních materiálů. [2] [9] [11]

Lock-in termografie

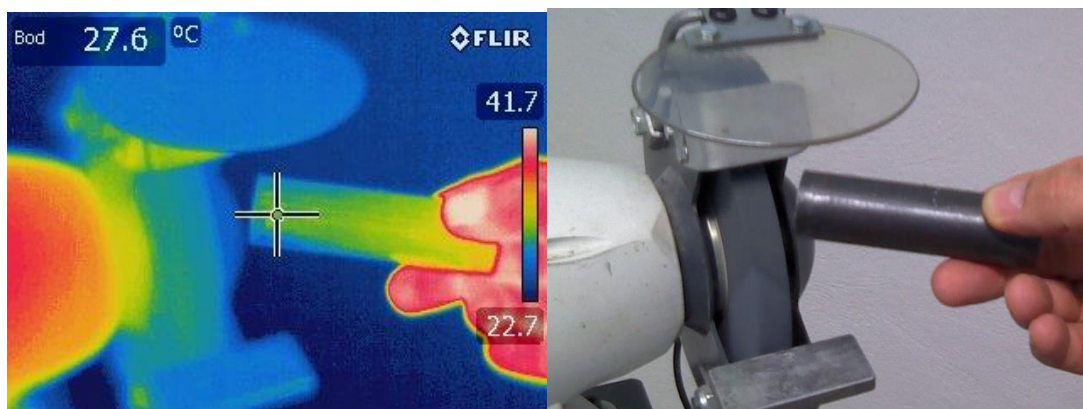
Tato metoda je založena na modulaci řízeného tepelného toku, který dopadá na měřený objekt. Tepelná vlna (obvykle sinusová) proniká do měřeného objektu, kde se v případě defektu materiálu odrazí zpět k povrchu objektu. Na povrchu pak dochází k interferencím s původním vlněním. Termokamera následně snímá obrazce modifikované tepelné vlny, odražené z vnitřku měřeného objektu. Termokamera následně zobrazí pouze informace o teplotě těsně pod povrchem tělesa a informaci o teplotě v hloubce materiálu. [2] [9] [11]

Praktické využití termokamery

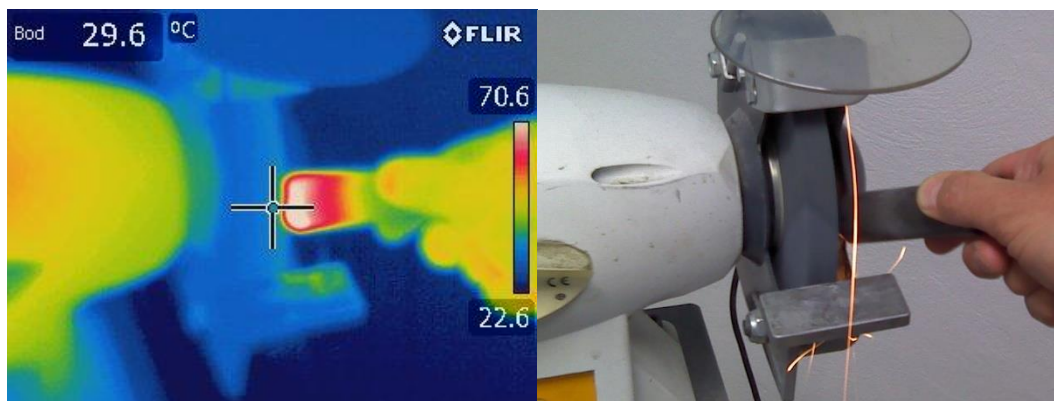
Termokamery se ve většině případů využívají k orientačnímu měření teplot u obráběcích strojů, budov při zjišťování úniků tepla, zjišťování vedení rozvodů teplé vody ve zdech staveb.

Názorná ukázka využití termokamery při broušení (viz obr. č. 10 a obr. č. 11) zdroj vlastní.

Realizace této ukázky proběhla ve firmě Intemac,solution s.r.o. v Kuřimi v laboratoři výzkumného centra. Na obrázku č. 10 je vidět snímání teploty termokamerou před broušením, kdy je teplota povrchu broušeného předmětu 27,6°C. Na obr. č. 11 je názorně viditelné zahřátí broušené plochy předmětu na přibližnou teplotu 70°C.



Obr. 10 Ukázka teploty před broušením



Obr. 11 Ukázka teploty při broušení

7 VÝHODY A NEVÝHODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ

Výhody bezkontaktního měření teploty:

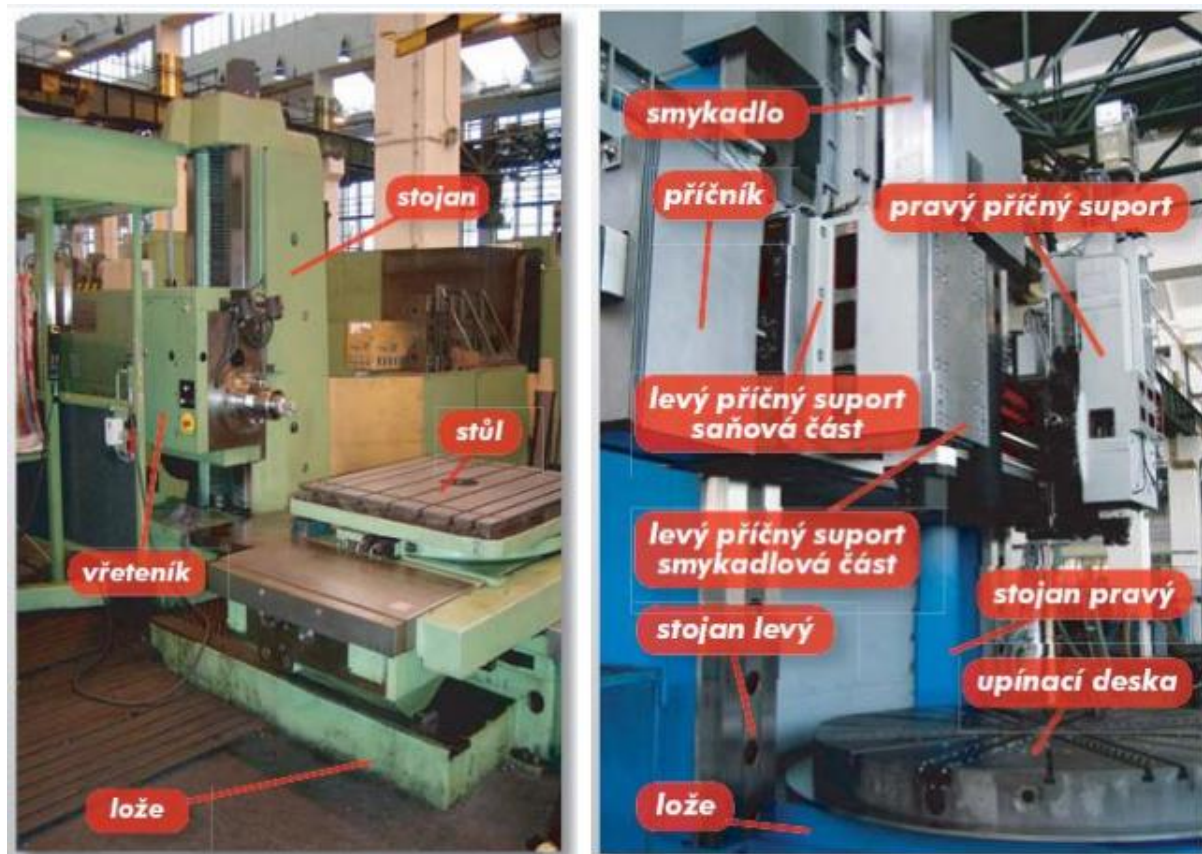
- vliv měřicí techniky na měřený objekt je zanedbatelný
- umožňuje měření pohybujících se těles
- lze měřit teploty velmi vysokých hodnot (až 3 000°C)
- nedochází k chybě měření při vzájemném dotyku čidla měřidla a objektu
- umožňuje změření celé plochy objektu (2D termokamery) [2] [4]

Nevýhodami bezkontaktního měření jsou:

- možnost chybného nastavení termokamery při špatné znalosti emisivity povrchu měřeného objektu
- možnost vzniku chyb při špatně zadané optické propustnosti mezi čidlem a měřeným tělesem (prach, vlhkost, částice kouře apod.)
- chyba při měření, která bývá zpravidla $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- vliv okolního záření na termokameru
- vyšší náklady spojené s pořízením přístroje
- nutná opakovaná kalibrace – ideálně po každém měření [2] [4]

8 OBRÁBĚCÍ STROJE

Definice obráběcího stroje: *“Obráběcí stroj je výrobní stroj, který umožňuje dát obrobku žádaný geometrický tvar a jakost povrchu oddělováním materiálu ve formě třísek řezným nástrojem”*. [16 str. 4]



Obr. 12 Popis konstrukčních částí obráběcího stroje (26)

Hlavní části obráběcích strojů

Lože – část stroje kvádového tvaru, kde většinou převládá délka nebo šířka nad výškou. Zpravidla spojuje základní části stroje v jeden celek. Na loži jsou upevněny vodící plochy (pro další části stroje) a případně dosedací plochy pro připojení (uložení) dalších základních částí.

Podstavec - Má stejné vlastnosti jako lože a však bez vodících ploch. Slouží pro uložení dalších základních částí stroje.

Základová deska – jedná se o podstavec stroje plochého tvaru. Na základové desce je vytvořené drážkování pro upnutí stolu nebo obrobku.

Stojan - část stroje kde výška stojanu je větší než šířka nebo délka. Na stojanu najdeme vodící nebo dosedací plochy. Podle jejich polohy rozlišujeme stojan na svislý nebo šikmý.

Sloup - Sloup je část stroje válcového tvaru, kde průměr je menší než výška. Využívá se k ustavení částí stroje, jako jsou (vřeteníku, stolu, ramena).

Konzola - Část stroje nacházející se zpravidla v základní rovině ve svislém směru. Podle umístění dosedacích ploch je konzola vodorovná, šikmá nebo svislá.

Příčnick - vodorovně uložená část stroje s délkou je větší než šířka a výška. Na jednom nebo dvou stojanech je většinou příčnick pohyblivě uložen, zároveň jsou na něm vodící plochy pro suport a vřeteník.

Příčka (most) - část ve tvaru kvádru, kde s délkou značně převládá nad výškou a šířkou. Spojuje horní konce stojanů.

Rameno - část stroje s délkou větší než je výška nebo šířka. Jeden konec ramene je volný a druhý je uložen pohyblivě na sloupu nebo stojanu. Vodící plochy jsou na přední svislé straně a slouží pro uložení vřetene.

Vřeteník - součást zpravidla kvádrotvaru, v němž je uloženo vřeteno, případně i převodové ústrojí pro změnu otáček vřetena.

Saně - je to součást stroje pohybující se přímočaře po vodících plochách základní části. Saně musí být kratší než vodící plochy základní části.

Smykadlo – pohyblivá součást, která se pohybuje přímočaře po vodících plochách základní části nebo saní. Zpravidla bývá delší než vodící plochy základní části.

Stůl – část, která bývá plochého tvaru s vodorovnou upínací plochou obdélníkového, čtvercového nebo kruhového tvaru, na níž je upínán obrobek. Při možnosti pohybu stolu ve dvou směrech k sobě kolmých, se stůl nazývá křížový, jestliže jím lze otáčet, či částečně natáčet, nazýváme jej otočný (natáčivý).

Support – součást stroje umožňující pohyb saní či smykadel, dále umožňuje také nastavení nástroje do potřebné polohy a pohyb obrobku v požadovaném směru.

Vodící šroub - pohybový šroub, zajišťující pohyb suportu. Může být jedno nebo vícechodý, a bývá zpravidla s lichoběžníkovým závitem. Slouží k pohybu suportu při řezání závitu.

Posuvný šroub – tato součást stroje umožňuje pohyb pouze posun saní a dalších pohyblivých strojních částí. Jedná se o pohybový šroub jedno nebo několikachodý, který mívá zpravidla lichoběžníkový závit. [21]

Základní třídění obráběcích strojů

Obráběcí stroje třídíme do dvou základních skupin konvenční a číslicově řízené obráběcí stroje. Konvenční obráběcí stroje dělíme dále podle druhu relativního pohybu nástroje a obrobku na obráběcí stroje s relativním pohybem rotačním (např. soustruh, frézky, brusky apod.) a relativním pohybem přímočarým (např. hoblovky, protahovačky apod.). S narůstajícím rozvojem technologie obrábění a tedy i obráběcích strojů nelze pohyby jednoznačně odlišit (honování, lapování), proto je výstižnější dělení dle pracovního charakteru stroje na univerzální, speciální a jednoúčelové. [15] [16] [17]

Tepelné deformace obráběcích strojů

Obráběcí stroje v chodu zvláště při obrábění, jsou vystaveny nerovnoměrným teplotním změnám. Tepelné deformace, které vznikají, mají vliv na relativní polohu mezi nástrojem a obrobkem. Tepelné deformace probíhají pomalu a projevují se až po několika hodinách po spuštění. Příčiny oteplování jsou následující:

- vlastní řezný proces,

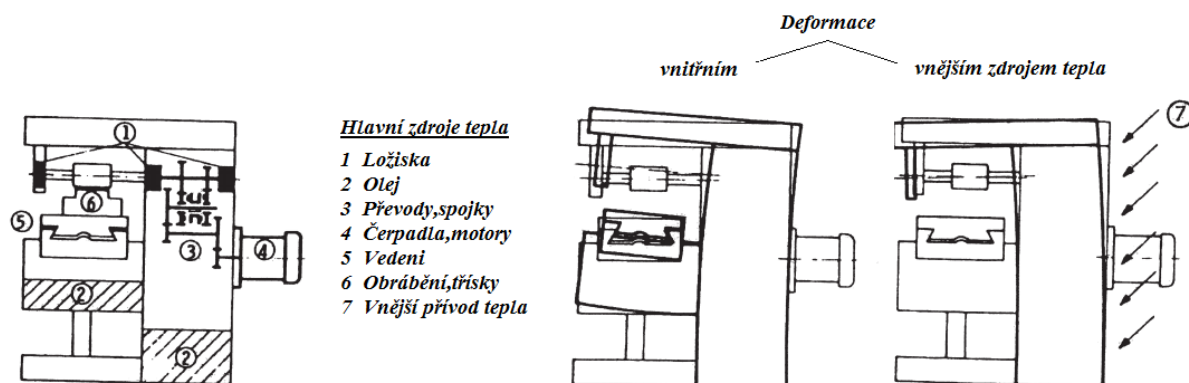
- zdroje tepla v pohonu a mechanismech stroje
- vnější zdroje tepla mimo stroj
- vlastní řezný proces

Teplo vznikající při obrábění přechází do obrobku, do nástroje a do třísek. Teplem, které přechází ze stroje na obrobek, se tento deformuje. Teplo přecházející do nástroje se odvádí z břitu do tělesa nástroje, odkud přechází do okolí. [15] [16] [17]

Zdroje tepla v obráběcích strojích

Vnější zdroje tepla

Oteplování stroje vnějšími zdroji se projevuje nepříznivě v případě, kdy dochází k oteplování nerovnoměrně. To může nastat ozářením stroje. Např. na jednu stranu stroje svítí slunce, které tak způsobí nerovnoměrnou dilataci stojanu a tím jeho naklopení, což se může projevit ve směně relativního polohy nástroje vůči obrobku. [15] [16] [17]



Obr. 13 Vliv tepelných deformací na frézce (15)

Vnitřní zdroje tepla

Vnitřní zdroje tepla jsou takové, které vnikají v přímé souvislosti s konstrukcí obráběcího stroje, tedy způsobují posunutí nástroje kvůli deformaci nebo rozšíření strojních prvků v důsledku změn teploty.

Takovými zdroji jsou:

- čerpadla a motory
- hydraulické systémy, převodovky
- ložiska
- převodové a hydraulické oleje
- řezání a hrubování
- vedení
- transformátory a elektromagnety

- třecí spojky a brzdy,
- pasivní odpory hnacího ústrojí

Rozdělení teplotních chyb

Termální chyby lze rozdělit do dvou kategorií. V první jsou chyby, které mění polohu (posunutí) stroje, ale nezmění polohu osy. Jsou označovány jako PITE (position independent thermal errors). Druhou kategorií jsou chyby, jenž se mění v závislosti na poloze osy i na teplotě. Nazývají se PDTE (position dependent thermal errors).

Pro praxi to znamená, že při zjištění teplotní chyby obráběcího stroje, je nezbytné určení kategorie tepelné chyby a tuto následně vhodným opatřením kompenzovat. [22]

Měření teplotních deformací

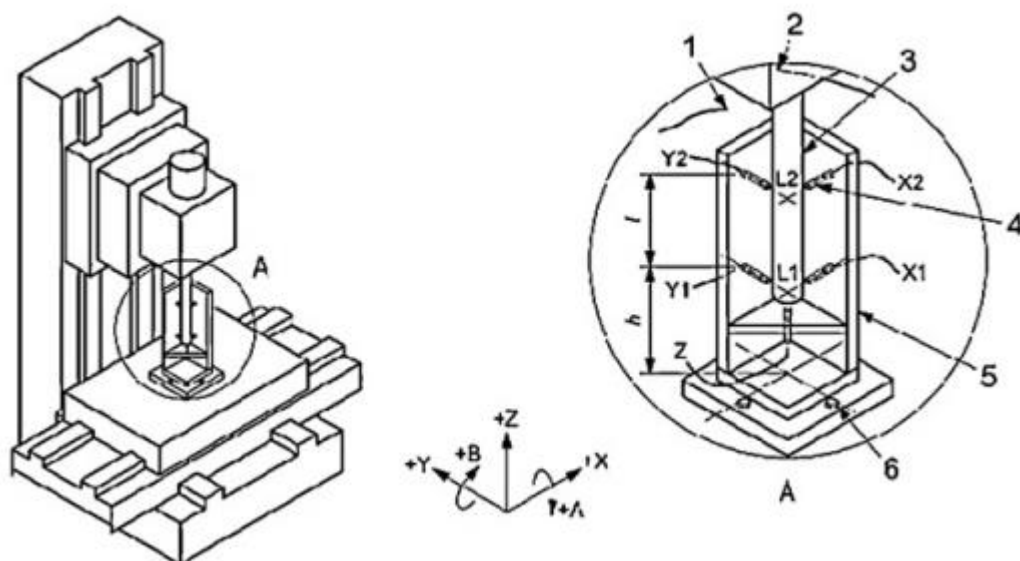
V současnosti existuje více způsobů měření deformací (polohy a orientace) obráběcích strojů. Ovšem je nutné říci, že ne všechny metody mohou být použity pro měření tepelných chyb, neboť jsou technicky náročné a mají velké technické požadavky na měření.

Na základě vědeckých poznatků o zdrojích tepla obráběcích strojů bylo Mezinárodní organizací pro standardizaci (ISO) vydáno několik norem, které poskytují metody pro systematickou analýzu teplotního chování obráběcích strojů a mimo jiné je jejich snahou navrhnout takovou konstrukci obráběcího stroje, která bude symetrická a bude vhodně izolovat zdroje tepla a bude využívat materiály s nízkou tepelnou vodivostí. Tyto normy jsou:

- ISO 230-3 (2007) - tepelné deformace obráběcích strojů
- ISO 10791-10 - tepelné deformace obráběcích center
- ISO 13041-8 - tepelné deformace soustružnických strojů

Normy obsahují systematickou analýzu tepelného chování obráběcích strojů s vřeteny. Tato analýza obsahuje ETVE (environmental temperature variation error). Což jsou tepelné deformace způsobené rotujícími vřeteny a tepelné deformace způsobené pohyblivými lineárními osami. [23]

Obrázek číslo 14 ukazuje uspořádání zkoušky ETVE pro zjištění tepelných deformací způsobené rotujícím vřetenem a tepelné deformace způsobené lineárními osami.



Legenda

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 snímač teploty okolního vzduchu | 4 snímač lineárního přestavení |
| 2 snímač teploty ložiska vřetene | 5 přípravek |
| 3 zkušební trn | 6 přípravek přišroubování ke stolu |

Obr. 14 Uspořádání zkoušky pro obráběcí stoj se svislou osou vřetene (23)

V praxi se pro analýzu tepelných deformací způsobených otáčením rotujících os se využívají dotykové snímače, jejichž nevýhodou je to, že při měření musí být vřeteno zastaveno. Proto se častěji používají bezdotykové sondy a to indukční nebo kapacitní. Dotykové sondy se využívají mezi jednotlivými technologickými operacemi, kdy se do vřetene stroje upne sonda, a na desku se připevní referenční body. Pro určování samotných deformací rámu se používají tenzometry. V posledních letech se pro měření teplotních změn na konstrukcích obráběcích strojů používají termokamery.[23]

Kompenzace tepelných deformací

Základním úkolem kompenzací je minimalizace teplotních deformací (teplotní stabilizace) obráběcích strojů. Prioritou je v tomto směru je důslednost zamezení existence tepelných mostů mezi zdrojem tepla a částmi, které mají vliv na přesnost stroje. Jedním z mnoha konstrukčních řešení je například vhodné umístění zásobníku olejů, pracovních chladiců apod. do konstrukce stroje případně odděleně od něj.

Aktivní chlazení je jednou z možností kompenzace tepelné deformace. Jde o chlazení jednotlivých částí stroje např. ložiska, kuličkových šroubů apod. Tento proces je konstrukčně řešen tak, že jejich nejbližší okolí je obtékáno chladícím médiem, který odvádí vznikající teplo.

Další vhodnou kompenzací teplotní deformace stroje, která je uplatňována v praxi, je vhodné programování pracovního cyklu.

Softwarová kompenzace obráběcího stroje se vytváří na základě poznání vlastností stroje. Znamená to minimalizaci vlivů deformací rámu na přesnost stroje, neboť hotový stroj nemusí obsahovat měřicí čidla apod. Na základě získaných dat o deformaci se zadají do matic řídicího systému korekční hodnoty, případně jsou potřebné kompenzace dopočítávány z aktuálně naměřených dat.[24]

9 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

Součástí této bakalářské práce je i jednoduché praktické měření. Jeho úkolem bylo vyzkoušet aplikaci výše uvedených teoretických poznatků v přímé praxi. Měření bylo provedeno ve firmě Intemac Solutions, s r.o., výzkumném a inovativním centru v Kuřimi. Tato společnost je zaměřena na výzkum a vývoj v oblasti výrobních strojů.

9.1 Zadání úkolu

V rámci experimentu ověřte teoretické znalosti v praxi, s termokamerou značky FLIR T440 a programem Flir tools od stejné společnosti proved'te měření, při kterém se s termokamerou naučíte pracovat a následně budete vyhodnocovat termogramy. Určete teoretickou hodnotu emisivity měřeného tělesa a získaná data porovnejte s výsledky kontaktního měření. V úloze budete měřit simulaci zahřívání na rámu obráběcího stroje, který byl nahrazen upínacími kostkami.

9.2 Použitá měřicí zařízení a pomůcky

- Termokamera FLIR T440

Tato termokamera je určena především pro průmyslové měření, především technickou diagnostiku.



Obr. 15 Termokamera FLIR T440 (25)

Technické parametry	
Rozlišení senzoru	320 x 240 Mpx
Teplotní citlivost	0.040°C
Teplotní rozsah	-20 °C až +1 200 °C
Ostření	Automatické i manuální
Měřicí funkce	5 bodů, 5 oblastí
Přesnost	±2 °C nebo ±2 %
Nastavitelná emisivita	0,01 až 1

Tab. 1 Technické parametry termokamery FLIR T440 (25)

- Datalogger - National Instruments řada NI cRIO-9022
- Digitální vlhkoměr
- Izolační páska
- Kontaktní čidla Pt1000/3850 (přesnost ±0,1°C)
- Konstrukce upínacích kostek reprezentující rám výrobního stroje
- Láh - očištění rámu
- Páska s emisivitou $\epsilon=0,96$
- Pasta DOW CORNING DC340
- Počítače
- Program FLIR TOOLS
- Rezistory - 4x150W, 2x300W
- Sestava složená z kuličkového šroubu, rámu, matice a pohonu
- Sprej s emisivitou $\epsilon=0,96$
- Stojan na Termokameru značka Manfrotto

9.3 Experiment

9.3.1 Simulace tepelného zatížení rámu obráběcího stroje

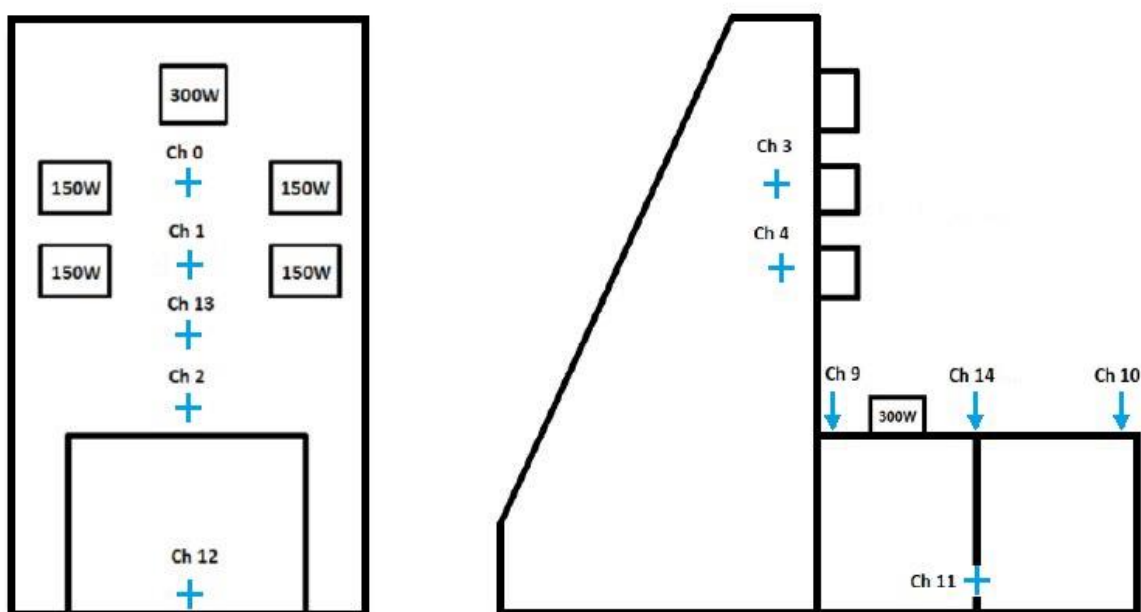
Příprava

Experiment spočíval v teplotním zatížení litinového rámu na zkušebním pracovišti. Tento rám byl nejprve očištěn lihem v místech, kam byly následně nasazeny tepelné rezistory. Stejně byly

očištěny i rezistory. Následně byla na tato místa nanesená teplovodivá pasta, aby zvýšila tepelnou vodivost. Rezistory byly k rámu přichyceny šrouby a odizolované vatou tak, aby docházelo k přenosu tepla jen mezi rámem a rezistory. Následně byl na odizolovaný rezistor připevněn hliníkový izolační kryt. Následovala zkouška funkčnosti rezistorů a zjištění reálných výkonů.

Podobným způsobem proběhla příprava a montáž kontaktních čidel teploty. Snímače i místa, kam měly být umístěny, byly očištěny lihem a potřeny teplovodivou pastou. Pomocí magnetů byla čidla připevněna na osy rámu a odizolována vatou, kvůli okolním vlivům. Poté byla čidla zapojena do dataloggeru, který byl propojen s počítačem.

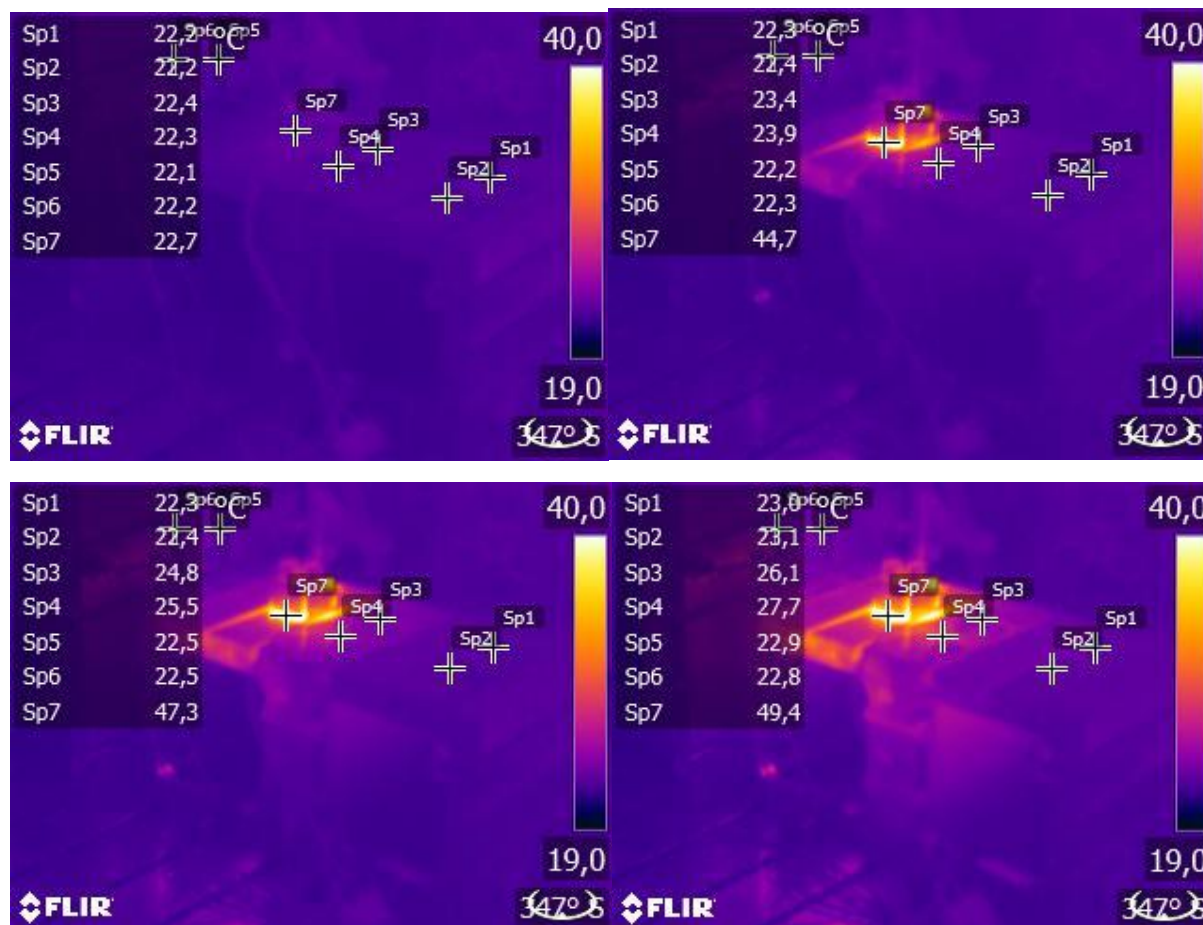
Posledním krokem přípravy bylo umístění termokamery do potřebné vzdálenosti. Byla zvolena tak, aby zabírala, co největší plochu a přitom nebyla rušena vnějšími vlivy a aby s ní během experimentu nemuselo být manipulováno. Kamera byla napojena na počítač s programem FLIR TOOLS. Po spárování termokamery byly zadány hodnoty teploty okolí (22°C), emisivity ($\varepsilon = 0,96$) a relativní vlhkosti (37%). Následovalo změření okolních vlivů a nastavení sledovaných bodů, což byla místa s dotykovými senzory. Interval pořizování fotografií byl stanoven na jednu fotografii za 5 minut. Na každých 10 sekund byly nastaveny kontaktní snímače teploty.



Obr. 16 Náskres umístění senzorů na rámu obráběcího stroje

Měření

Konkrétní měření bylo započato v 11:25 hod., kdy byly zapnuty rezistory. Po jejich zahřátí začalo měření teploty, což bylo v 11:42 hod. Následovalo spuštění zbylých rezistorů v 13:17 hod. Poslední snímek z termokamery byl vyhotoven v čase 15:32 hod.



Obr. 17 Průběh zahřívání

Výsledky a vyhodnocení experimentu

Při provedeném experimentu bylo získáno velké množství dat, která byla následně zpracována do tabulek. V těchto tabulkách jsou uvedené hodnoty v omezeném množství, neboť s plnými daty by tabulky byly příliš rozsáhlé. Nicméně tato omezení uvedených dat nezakresluje přesnost provedených měření ani výsledků uvedených v této práci.

V rámci experimentu byly porovnávány hodnoty kontaktního a bezkontaktního měření teploty v místě senzoru Ch-10. Přesnost tohoto měření byla $\pm 0,1^\circ\text{C}$. K tomuto byly vytvořeny grafy závislosti času na teplotě v bezprostřední blízkosti k tomuto čidlu.

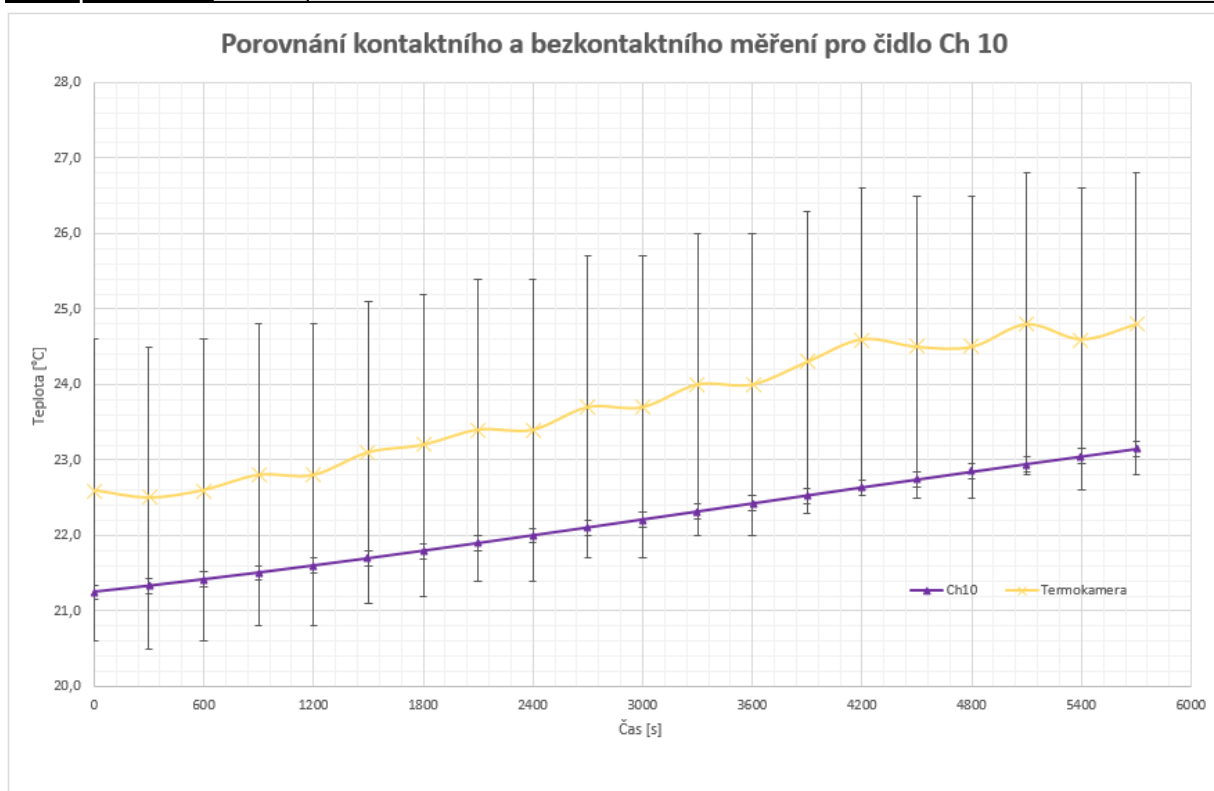
Při měření byla zjištěna vysoká nepřesnost bezkontaktního měření ($\pm 2^\circ\text{C}$). Tato nepřesnost byla způsobena vlivem okolních vlivů – provádění dalšího experimentu ve stejné laboratoři a vysoká fluktuace lidí. Tím vším došlo k ovlivnění odražené teploty rámu. Kontaktní

senzory měření nebyly těmito vlivy nijak postiženy, neboť byly dostatečně od těchto vlivů odizolovány vatou.

Z grafu vyplývá, že termokamera již na počátku měření pracovala s chybou cca 1,35°C a tato chyba se promítala i do následných výsledků měření. Výstupní hodnoty kontaktních snímačů jsou velmi přesné a jejich hodnota je brána jako referenční.

Tab.2 Hodnoty teplot termokamery a senzoru Ch-10

Čas [s]	Teplota [°C]	
	Termokamera	Senzor Ch-10
0	22,6	21,248041
300	22,5	21,327793
600	22,6	21,414555
900	22,8	21,503834
1200	22,8	21,597891
1500	23,1	21,694149
1800	23,2	21,794436
2100	23,4	21,895948
2400	23,4	21,999949
2700	23,7	22,103638
3000	23,7	22,209908
3300	24	22,316338
3600	24	22,423841
3900	24,3	22,529932
4200	24,6	22,636908
4500	24,5	22,740774
4800	24,5	22,844267
5100	24,8	22,947701
5400	24,6	23,048086
5700	24,8	23,148319



Obr. 18 Graf - Porovnání hodnot bezkontaktního a kontaktního měření

10 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá bezkontaktním měřením teploty a jejím využitím v praxi a zvláště v problematice tepelných deformací obráběcích strojů.

Práce je rozdělena do dvou částí a to teoretické a praktické. V teoretické části se věnuji základním pojmům a definicím a fyzikálním zákonům, které s bezkontaktním měřením úzce souvisí. Dále zde uvádím rozdělení bezkontaktních detektorů, pyrometrů a termokamer, které k bezkontaktnímu měření v současné době slouží. Další součástí teoretické části je popis a základní charakteristika obráběcích strojů. U těchto se věnuji jejich teplotním deformacím a možnostmi jejich měření a také možnými způsoby eliminace tepelných deformací pomocí kompenzací.

Praktická část byla zaměřena na experiment, v němž bylo demonstrováno využití bezkontaktního měření na části výrobního stroje. Tento experiment proběhl ve výzkumném centru Intemac Solutions, s r.o. v Kuřimi, kde byl v laboratoři z upínacích kostek sestaven model rámu obráběcího stroje. Na tomto bylo simulováno tepelné zatížení, které představovalo reálný chod stroje. V práci je popsána příprava a postup experimentu i výčet použitého vybavení. Dále je uveden výčet z naměřených hodnot spolu s grafy a pořízenými fotografiemi. Samotné měření probíhalo, jak uvádím výše bezkontaktním měřením, ale i kontaktními snímači. Získané výstupní hodnoty byly vzájemně porovnány. Vzhledem k tomu, že výrobce termokamery udává toleranci naměřených hodnot $\pm 2^{\circ}\text{C}$, byla tato brána v potaz při vyhodnocování výsledků měření. Výstupní hodnoty kontaktního a bezkontaktního měření, byly prakticky totožné.

Závěrem lze tedy konstatovat, že bezkontaktní měření lze u zjišťování tepelného zatížení obráběcích strojů použít jen v případech, kdy není potřeba pracovat s desetinnými stupni Celzia. Jeho výhodou je možnost pozorovat v aktuálním čase šíření tepla v měřených součástech obráběcího stroje, případně na jeho pohyblivých částech či v součástech, která jsou pro kontaktní čidla méně nebo nejsou vůbec dostupná.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [2] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN isbn80-7300-145-4.
- [3] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. Fyzika. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN isbn978-80-214-4123-1.
- [4] LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN isbn80-7300-180-2.
- [5] SOVA, Jan a Jan KOVÁŘ. Termokamery a pyrometry. Automa [online].2014/2 [cit. 2018-03-08].Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52891.pdf
- [6] REICH Jaroslav, VŠETIČKA Martin, Encyklopedie fyziky: Záření absolutně černého tělesa [online]. [cit. 2018-03-08] Dostupné z : <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/538-zareni-absolutne-cerneho-telesa>.
- [7] PAVELEK, Milan. Termomechanika 19. Přenos tepla záření [online]. [cit. 2018-03-03].Dostupné z:http://otp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/19_Zareni.pdf
- [8] KADLEC, Karel a Jan SOVA. Termokamery a pyrometry – měření, vlastnosti využití. AllForPower[online].2014/01[cit.2018-03-8]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [9] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 2). Automa [online].2014/4[cit.2018-03-08]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52626.pdf
- [10] Záření absolutně černého tělesa[online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/13_act/13_act.htm
- [11] SVOBODA, Jiří. Infračervené termografické (nedestruktivní) testování. Czech Society for Nondestructive Testing [online]. 2012 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/249_p\(1\).pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/249_p(1).pdf)
- [12] ČECHOVÁ, M. Základy pyrometrie [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/9987237-Zaklady-pyrometrie>
- [13] PYROMETR IMPAC IGA 8 PRO. In: Pyrometrcz: LUMASENSE TECHNOLOGIES, INC. [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.pyrometrcz.cz/produkty/mereniteploty/infracervene-teplomery/impac-infracervene-bezkontaktni-mereniteploty/prenosne/pyrometr-impac-iga-15-plus/>
- [14] User's manual, Flir T4xx series. PMC-rentals [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.pmc-rentals.com/wp-content/uploads/Flir-T420-User-Manual.pdf>
- [15]BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN isbn80-214-0361-6.

- [16] PÍČ, Josef a Přemysl BRENÍK. Obráběcí stroje: konstrukce a výpočty. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Technický průvodce. Dostupné také z: <http://kramerus.mzk.cz/search/handle/uuid:0df619f0-a72f-11e2-b6da-005056827e52>
- [17] Mojmir Prokop. Výrobní stroje. I. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně 1985. ISBN isbn55-589-85
- [18] VOJÁČEK, Antonín. Co jsou bolometry a mikrobolometry. Automatizace [online]. 2005 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111601>
- [19] ZÁŘENÍ ABSOLUTNĚ ČERNÉHO TĚLESA. [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/13_act/13_act.htm
- [20] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 1). Automa [online]. 2014/2 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52890.pdf
- [21] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [22] RAMESH, R. M. A MANNAN a A. N POO. Error compensation in machine tools — a review. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2000, vol. 40, issue 9, s. 1257-1284. DOI:10.1016/S0890-6955(00)00010-9. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695500000109>
- [23] MAYR, Josef, Jerzy JEDRZEJEWSKI, Eckart UHLMANN, M. ALKAN DONMEZ, Wolfgang KNAPP, Frank HÄRTIG, Klaus WENDT, Toshimichi MORIWAKI, Paul SHORE, Robert SCHMITT, Christian BRECHER, Timo WÜRZ a Konrad WEGENER. Thermal issues in machine tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2012, vol. 61, issue 2, s. 771-791. DOI:10.1016/j.cirp.2012.05.008. Dostupné: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612002077>
- [24] Konstrukce CNC obráběcích strojů: Teplotní kompenzace. In: NOVOTNÝ, Lubomír. TECHTÝDENÍK: Průmyslový portál [online]. 2013 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecichstroju-4_20378.html
- [25] Termokamera FLIR T440 (Flir T440, Flir [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.termokameryflir.cz/termokamery-flir-t4x0>
- [26] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN isbn978-80-260-6780-1
- [27] Detektory Lao lasery a optika [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/detektory---oem-prvky-119k>

12 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

12.1 Seznam tabulek

Tab. 1 Technické parametry termokamery FLIR T440 (25).....	39
Tab.2 Hodnoty teplot termokamery a senzoru Ch-10	42

12.2 Seznam obrázků

Obr.1 Přenos tepla (4)	18
Obr. 2 Elektromagnetické spektrum (5)	19
Obr. 3 Model černého tělesa (19)	20
Obr. 4 Vzájemný vztah drsnosti povrchu a teploty sledovaný termokamerou při stejné emisivitě (23)	22
Obr. 5 Planckův zákon (14).....	23
Obr. 6a Pyroelektrické detektory	26
Obr. 6b Termoelektrický detektor P6606-11	26
Obr. 7 Schéma mikrobolometru - detail uspořádání matice FPA (2)	27
Obr. 8 Fotodiodový detektor (27).....	28
Obr. 9 Pyrometr IMPAC IGA 15 plus (13)	29
Obr. 10 Ukázka teploty před broušením	31
Obr. 11 Ukázka teploty při broušení	31
Obr. 12 Popis konstrukčních částí obráběcího stroje (26)	33
Obr. 13 Vliv tepelných deformací na frézce (15)	35
Obr. 14 Uspořádání zkoušky pro obráběcí stoj se svislou osou vřetene (23)	36
Obr. 15 Termokamera FLIR T440 (25)	38
Obr. 16 Náskres umístění senzorů na rámu obráběcího stroje	40
Obr. 17 Průběh zahřívání	41
Obr. 18 Graf - Porovnání hodnot bezkontaktního a kontaktního měření	43