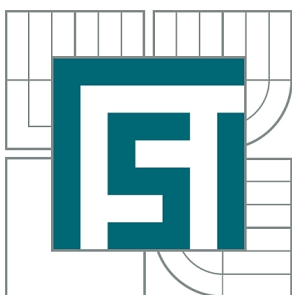




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLOT V PRŮBĚHU SOUSTRUŽENÍ

CONTACTLESS MEASUREMENT OF SURFACE TEMPERATURES DURING TURNING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ MERENDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POLZER, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jiří Merenda

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

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

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

### **Bezdotykové měření povrchových teplot v průběhu soustružení**

v anglickém jazyce:

### **Contactless measurement of surface temperatures during turning**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bezdotykové měření povrchových teplot se používá v mnoha oblastech lidské činnosti. Vlastní proces měření může být poměrně rychlý, avšak následné odborné vyhodnocení termogramů je mnohdy velmi komplikované. Rovněž plánování vhodného experimentu musí zohledňovat řadu vnějších vlivů.

Cíle diplomové práce:

Začlenění bezdotykového měření povrchových teplot mezi ostatní metody měření teploty. Návrh a praktická realizace experimentu s použitím kamery ThermoCAM SC2000. Analýza vytvořených termogramů v prostředí softwaru Researcher.

Seznam odborné literatury:

AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. (Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. Překlad M. Kudela.), 1. vyd., Praha, Scientia, s.r.o., 1997. 857 p. ed. J. Machač, J. Řasa, ISBN 91-97 22 99-4-6.

POLZER, A.; DVOŘÁK, J. Internetový portál pro CNC a CAD/CAM technologie. [online]. 2006. Dostupné na WWW: <http://cadcam.fme.vutbr.cz/>

KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno:

Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

DRASTICH, A.: Netelevizní zobrazovací systémy. VUT Brno, FEI, ÚBEMI, ISBN: 80-214-1974-1

PAVELEK, Milan. Termomechanika. 3. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. červen 2003. 284s. ISBN 80-214-2409-5.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je začlenění bezdotykového měření povrchových teplot mezi ostatní metody měření teploty. Technická příprava pro experimentální měření na obráběcím stroji. Porovnání vlivu řezných podmínek na vývoj povrchové teploty obrobku při obráběcím procesu soustružení s použitím kamery ThermaCAM SC2000. Na závěr je uvedeno ekonomické zhodnocení bezdotykové měření povrchových teplot.

### **Klíčová slova**

IR, termovize, měření teploty, soustružení

## **ABSTRACT**

The goal of this thesis is the incorporation of the contactless measurement of surface temperature among other methods of temperature measurement. Technical preparation for experimental measuring on the machine-tool. Comparison of influence of cutting conditions on the development of surface temperature of workpiece during the machining process with usage of the camera ThermaCAM CS2000. The economical analysis of the contactless measurement of surface temperature is determined in the last part of this thesis.

### **Key words**

IR, thermovision, measurement temperature, turning

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MERENDA, J. *Bezdotykové měření povrchových teplot v průběhu soustružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 84 s. 2 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Bezdotykové měření povrchových teplot v průběhu soustružení** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 26. 5. 2011

.....  
Bc. Jiří Merenda

## **Poděkování**

Za účinnou podporu, obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. a všem, u kterých jsem našel cennou pomoc a rady při řešení problematiky.

**OBSAH**

|  |    |
|--|----|
| Abstrakt .....   | 4  |
| Prohlášení .....   | 5  |
| Poděkování .....   | 6  |
| Obsah .....  | 7  |
| Úvod.....  | 8  |
| 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....   | 9  |
| 1.1 Definice základních pojmů .....  | 9  |
| 1.2 Metody měření teplot .....   | 12 |
| 1.2.1 Dotykové teploměry.....  | 12 |
| 1.2.2 Bezdotykové teploměry.....   | 16 |
| 1.3 Základy bezdotykového měření teploty .....                             | 19 |
| 1.3.1 Schéma bezdotykového měření povrchových teplot .....                 | 19 |
| 1.3.2 Využití termovizní kamery.....                                       | 21 |
| 1.3.3 Průchod infračerveného záření atmosférou: .....                      | 24 |
| 1.4 Emisivita.....   | 24 |
| 1.5 Popis obráběcího procesu soustružení.....                              | 27 |
| 1.6 Řezné prostředí .....  | 30 |
| 2 TEORETICKÝ ROZBOR MĚŘENÍ .....   | 33 |
| 2.1 Podélné soustružení.....   | 34 |
| 2.2 Vnitřní soustružení.....   | 35 |
| 2.3 Čelní soustružení.....   | 36 |
| 2.4 Zapichování .....  | 36 |
| 2.5 Způsoby měření teploty při soustružení .....                           | 37 |
| 3 PŘÍPRAVA A REALIZACE EXPERIMENTŮ.....                                    | 41 |
| 3.1 Příprava na měření termovizní kamerou FLIR SC2000.....                 | 46 |
| 3.1.1 Zapojení termovizní kamery.....                                      | 46 |
| 3.1.2 Stanovení emisivity měřeného objektu .....                           | 47 |
| 3.1.3 Zajištění vhodného pracovního prostředí.....                         | 49 |
| 3.1.4 Volba optimální ochranné fólie .....                                 | 50 |
| 3.1.5 Umístění termovizní kamery vůči měřenému objektu .....               | 52 |
| 3.1.6 Nastavení vstupních hodnot pro bezdotykové měření .....              | 55 |
| 3.2 Experimentální měření povrchové teploty při vnitřním soustružení ..... | 56 |
| 3.3 Experimentální měření povrchové teploty při podélném soustružení....   | 62 |
| 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....                                    | 71 |
| 4.1 Přehled trhu nabízených termovizních kamer .....                       | 71 |
| 4.2 Ekonomické hodnocení obráběcího procesu .....                          | 74 |
| 4.3 Náklady na měření termovizní kamerou .....                             | 75 |
| Závěr .....  | 78 |
| Seznam použitých zdrojů .....  | 80 |
| Seznam použitých symbolů a zkratk.....                                     | 84 |
| Seznam příloh.....   | 84 |

## ÚVOD

Teplota je jednou z nejdůležitějších veličin ovlivňující téměř všechny stavy a procesy v přírodě. Obecně systematické měření teploty ve všech odvětvích lidské činnosti přináší možnost prevence vzniku požárů, poruchových stavů. V oblasti průmyslu přispívá měření teploty ke kontrole stavu výrobků, zařízení, strojů nebo přispívá k ověření už provedených oprav. Další efektivní využití nachází v úspoře nákladů vynaložených na energii z důvodu nedostatečné izolace popřípadě nedostatku v systému vytápění.

U obráběcích procesů při tvorbě třísky dochází ke vzniku a následnému šíření tepla z místa řezu do obrobku, třísky a nástroje. Vzniklé teplo je důsledkem přeměny mechanické energie vynaložené na tvorbu třísky na energii tepelnou. Poměr přechodu tepla z místa řezu do nástroje je přibližně 10 – 15 %, do obrobku 5 - 10 % a do třísky odchází nejvíce tepla v rozmezí 75 - 80 %. Vzniklé teplo ovlivňuje jak trvanlivost nástroje, tak strukturu a kvalitu povrchu obrobku.<sup>3</sup>

Pro měření teploty během obráběcího procesu se využívá jak dotykových teploměrů, tak bezkontaktního způsobu. S využitím termovizní kamery dosahují naměřené výsledky velkého přínosu z hlediska pozorování chování a rozložení teploty na měřeném objektu. V důsledku rychlého technického pokroku se ceny termovizních kamer stávají přijatelnější a měření termovizní kamerou o to dostupnější. Cena základního modelu termovizní kamery FLIR i3 začíná od 25000 Kč.

Tato diplomová práce zhodnocuje měření povrchových teplot obráběné součásti pomocí termovizní kamery ThermaCAM SC2000 v obráběcím procesu soustružení.



## 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Rozdělení metod pro měření teplot se dělí na základní dva typy a to dotykové teploměry a bezdotykové teploměry. Obě dvě metody zde budou popsány s uvedením dalšího členění. Celá práce bude převážně zaměřena na použití termovizní kamery, která bude využita i pro experimentální část.

### 1.1 Definice základních pojmů

Před samotným rozбором řešené problematiky je důležité si uvést některé základní pojmy úzce související s touto problematikou.

#### Teplota

Teplota je základní fyzikální veličinou a základní termodynamickou stavovou veličinou. V důsledku změny teploty se mění různé fyzikální vlastnosti látek, které lze využít pro měření teploty. Například změna magnetických vlastností látek, změna elektrických odporů a pro nás důležitou změnu intenzity a kvalitu vyzařování z povrchu látky (tělesa). Pomocí této změny budeme moci určit teplotu na povrchu měřeného objektu. Teplota je jedna z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy měření nepřímé. Jednotkou teploty je stupeň Kelvina. Přepočítání teplot z Celsiovy na Kelvinovu stupnici:  $T [^{\circ}\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273,15$ .  
1, 2, 11

#### Teplo

Tepelná energie (teplo) vzniká přeměnou jiných známých druhů energií, jako chemické, jaderné, zářivé, mechanické, elektrické a magnetické. Teplo je forma energie a rovná se celkové kinetické a potenciální energii všech molekul. Pro danou látku je množství tepelné energie závislé na hmotnosti, měrné tepelné kapacitě.<sup>4, 15</sup>

## Teplotní pole

Teplotní pole udává rozložení teplot v daném časovém okamžiku ve všech bodech sledovaného prostoru. Existují dva druhy teplotních polí a to teplotní pole stacionární (ustálené) a nestacionární (neustálené). U stacionárního teplotního pole se teplota v jednotlivých bodech nemění a u nestacionárního se naopak teplota v jednotlivých bodech mění v závislosti na čase.<sup>4</sup>

## Přenos tepla

Přenos tepla či sdílení tepla je celkově složitý děj. Během tohoto děje dochází k přenosu tepelné energie mezi tělesy o nestejně teplotě nebo uvnitř tělesa mezi místy o nestejně teplotě. Při jeho popisu zavádíme řadu zjednodušení, která nám pak usnadní tvorbu modelů pro matematický popis sledovaných dějů. Přenos tepla v reálných situacích v různých zařízeních je obvykle kombinací dvou nebo i všech tří způsobů přenosu tepla. V našem případě u experimentální části bude uskutečněn přenos tepla vedením mezi soustavou nástroj, obrobek a tříska. Bezdotykové měření tepla termovizní kamerou, využívá přenos tepla zářením. Sdílení tepla se dělí na tři druhy:<sup>4, 12</sup>

### a) Vedení tepla prouděním (konvekcí)

Přenos tepla prouděním nastane tehdy, když částice mění v prostoru svoji polohu ve větším měřítku. Přitom s sebou unášejí svoji energii. Podmínkou je existence látkového prostředí. Tento děj probíhá jen v plynech a kapalinách. Proudění tepla často nastává v kombinaci s vedením tepla. Zahříváme-li např. kapalinu na plotýnce, částice kapaliny s nižší hustotou se přemísťují k hladině (přenos prouděním) a zároveň si částice srážkami předávají svoji kinetickou energii (přenos vedením). Proudění látek může být volné nebo nucené. Tepelné proudění nelze oddělit od vnějšího pohybu hmotného prostředí a přichází proto v úvahu pouze u tekutin (kapalin a vzdušin). V čisté formě neexistuje, neboť jak uvnitř proudící tekutiny, tak na rozhraní mezi tekutinou a pevným tělesem, je vždy doprovázeno vedením tepla. Přenos tepla mezi tekutinou a pevným povrchem při jejich přímém styku se nazývá přestup tepla. Hodnota součinitele přestupu tepla závisí na fyzikálních charakteristikách te-

kutiny, tedy na tvaru obtékaného tělesa, směru proudění vzhledem k jeho povrchu a rychlosti proudění tekutiny.<sup>4,5</sup>

### **b) Vedení tepla vedením (kondukcí)**

Přenos tepla nastává tehdy, vyměňují-li si svoji kinetickou energii částice látky, které spolu sousedí. Podmínkou je existence spojitého látkového prostředí, ve vakuu vedení tepla nenastane. Vedení tepla umožňuje nejintenzivnější přenos tepelné energie. Vedení tepla probíhá v látkách všech skupenství. Fyzikální podstata děje spočívá v pohybu strukturních částic hmoty. V plynech se uskutečňuje difúzí molekul a atomů, v kapalinách a dielektrických pevných tělesech pružným vlněním, v kovech difúzí volných elektronů. Děj způsobený interakcí mezi bezprostředně sousedícími částicemi v daném tělese. Přenos tepla ve směru klesající teploty. Při vedení tepla částice látky v oblasti s vyšší teplotou předávají část své střední energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v místech s nižší teplotou, tj. mají nižší střední energii. S šířením tepla prostřednictvím vedení se nejčastěji můžeme setkat v tělesech z pevných látek, jejichž různé části mají rozdílné teploty. Teplo se může šířit vedením také v kapalinách a plynech. Zde se však především uplatňuje přenos tepla prouděním.<sup>4, 5, 12</sup>

### **c) Vedení tepla sáláním (zářením, radiací)**

Přenos tepla zářením se uskutečňuje prostřednictvím elektromagnetického vlnění, které vzniká důsledkem tepelného stavu těles. Sálání je přirozená vlastnost těles a můžeme říci, že při něm každé těleso vysílá záření. Dopadne-li záření na jiné těleso, je částečně pohlceno, část se odrazí a část prochází tělesem. U záření, které dopadne nebo prochází tělesem, dochází k částečné přeměně zářivé energie na energii tepelnou. Pohltivost a odrazivost záření u těles závisí především na jakosti povrchu a také na barvě povrchu. V praxi má tento poznatek význam například při konstrukci bílé chladničky, aby se co nejvíce záření odrazilo, v létě nosíme především světlé oblečení. Pro přenos tepla zářením není potřeba žádné hmotné prostředí, protože jde o elektromagnetické vlnění.<sup>4, 12</sup>

## 1.2 Metody měření teplot

Se změnou teploty látek se mění řada dalších veličin, které jsou poměrně snadno měřitelné a umožňují tedy měření teploty. Podle toho jestli měřící zařízení přijde do styku s látkou, jejíž teplotu je měřená, existuje dělení měřícího zařízení na kontaktní a bezkontaktní. Podle fyzikální veličiny, která na teplotu reaguje a pomocí které je teplota indikována, rozdělují se teploměry do několika skupin.<sup>5</sup>

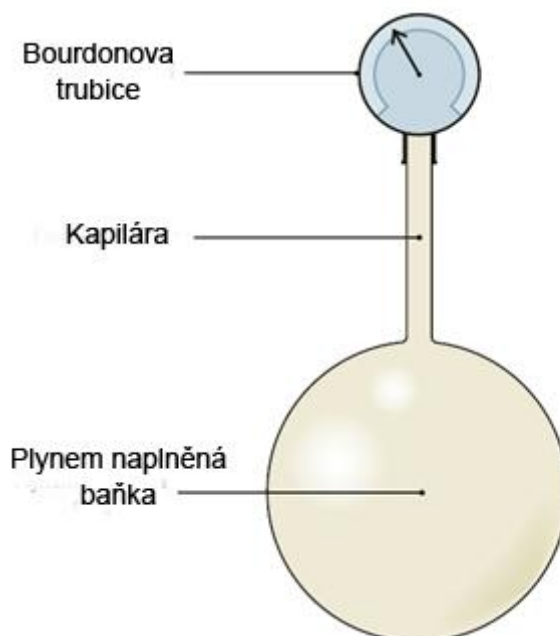
### 1.2.1 Dotykové teploměry

U dotykových teploměrů dochází ke kontaktu měřícího zařízení s měřeným objektem. V důsledku dotyku či nedokonalého dotyku čidlem teploměru může dojít k nepřesnému naměření měřených hodnot nebo k ovlivnění teplotního pole na měřeném povrchu. Z tohoto pohledu je třeba volit čidla menších rozměrů a s malou tepelnou kapacitou. Zajistit dokonalý kontakt čidla s měřeným povrchem a to přitlačením, připájením k vodivé destičce a přitlačení. Dotykové teploměry nelze použít vždy, někdy to poloha, tvar měřeného objektu nedovolí. Podle potřeby je třeba volit správný typ teploměru jak z hlediska funkčnosti, tak časové náročnosti prováděného měření. Dalším omezením dotykových teploměrů je měřený teplotní rozsah, který je závislý na použitém měřícím zařízení. Dále je uvedeno rozdělení dotykových teploměrů.<sup>1</sup>

### Dilatační teploměry

Pracují na principu změny délky nebo objemu látky s teplotou. Schéma plynového teploměru je na obrázku 1.1. Dilatační teploměry dále dělíme podle skupenství použité teploměrné látky na dilatační teploměry plynové, kapalinové a teploměry využívající roztažnost pevných látek. Plynové teploměry s operační teplotou až do 600 °C a přesností  $\pm 1$  °C jsou vhodné pro průmyslové použití. Kapalinové teploměry využívají tyto látky, obvykle je to etanol (který má bod tání -114 °C a bod varu 78 °C) nebo rtuť (s bodem tavení -39 °C a bodem varu 357 °C). Rtuťový teploměr se využívá pro klinické použití a má

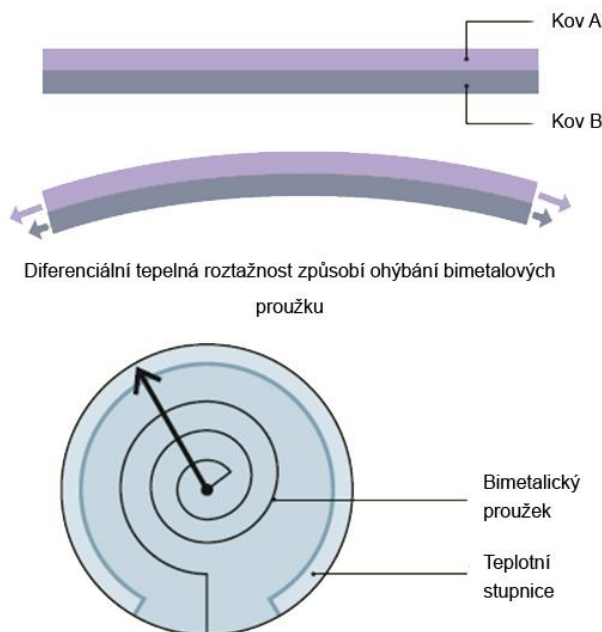
pouze stupnici od 35 °C až do 42 °C, což umožňuje zvýšení přesnosti v tomto rozmezí. Nevýhodou rtuťových teploměru je pomalá odezva v řádu 2 – 3 minut. <sup>1, 5, 15</sup>



Obr. 1.1 Schéma plynového teploměru <sup>15</sup>

### Bimetalové teploměry

Bimetalové proužky na obrázku 1.2 jsou tvořeny ze dvou kovů s různými koeficienty tepelné roztažnosti, které jsou spojeny dohromady. Typicky používaný materiál je mosaz a invar (slitina železa a niklu s nízkou roztažností). Diferenciální teplotní roztažnost kovů způsobuje, že se pás ohýbá. Tato funkce může být použita k aktivaci mikrospínače u termostatu a teplotní kompenzaci u některých u odpařovačů. Teploměry využívají dlouhý pás zatočený do spirály nebo šroubovice, což zvyšuje citlivost měření, aniž by byl nástroj příliš objemný. Spirála má jeden konec pevný a druhý je připevněn na ukazateli teploty. Změny teploty způsobí, že ukazatel se pootočí na stupnici. Bimetalové teploměry jsou robustní, relativně levné s pracovním rozsahem do 600 °C a s přesností  $\pm 1$  % plného rozsahu stupnice. V průběhu času dochází k opotřebení, které vede ke vzniku nepřesného měření, z tohoto důvodu je nutná periodická kalibrace. <sup>5, 15</sup>

Obr. 1.2 Bimetalický proužek a teploměr <sup>15</sup>

### Tlakové teploměry

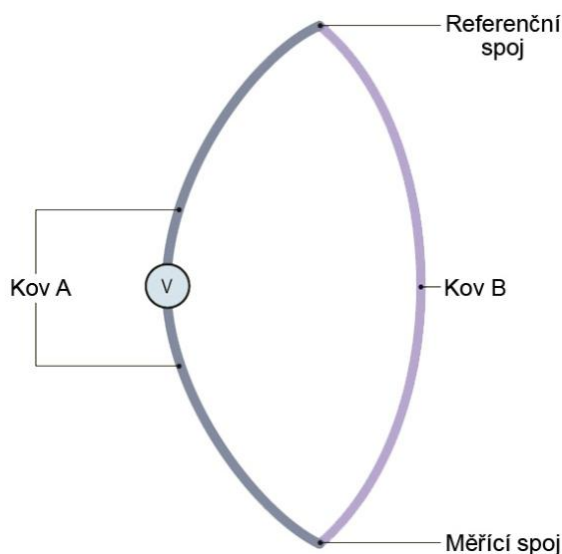
Tlakové teploměry jsou nádoby konstantního objemu naplněné plynem, u něhož se v širokém rozsahu teplot mění tlak lineárně s teplotou. Měření teploty je převedeno na měření tlaku tekutiny v uzavřeném objemu. Podle skupenství teploměrné látky dělíme tlakové teploměry na plynové, kapalinové a parní. Plynové teploměry tlakové bývají naplněny vodíkem, heliem, neonem, dusíkem či suchým vzduchem, který se svými vlastnostmi blíží nejvíce ideálnímu plynu. Kapalinové tlakové teploměry mohou být naplněny rtuť, metylalkoholem apod. <sup>1, 5</sup>

### Odporové teploměry

Odpor elektricky vodivých látek a polovodičů je obecně závislý na teplotě. Tato metoda je založena na principu změny elektrického odporu látek s teplotou. Díky této závislosti dokážeme odporovým teploměrem určit námi měřené teplo. Aplikace odporových teploměřů je vhodná, chceme-li použít naměřené signály pro další elektrické zpracování naměřených hodnot, tedy v oblasti automatizace, regulace a v oblasti měření s využitím počítačů. <sup>1, 5</sup>

### Termoelektrické teploměry

Termoelektrické teploměry jsou založeny na principu Seebackova jevu, kdy převádějí teplotní rozdíl na termoelektrické napětí. Jde tedy o zdroje elektrického proudu, jejichž elektromotorické napětí se řídí rozdílem teplot. Termoelektrické teploměry jsou vybaveny termoelektrickými čidly – termočlánky. Termočlánek představuje dva různé vodiče, které jsou na jednom konci spojené nejlépe svařením nebo pájením a na druhém konci jsou připojeny na svorkovnici. Schéma termočlánku je na obrázku 1.3, kdy se měří teplotní rozdíl mezi spoji, referenční spoj musí mít konstantní teplotu. Alternativou je měření referenčního spoje jiným zařízením a následným použitím korekčního faktoru dojdeme ke stejné hodnotě výsledku. Výhodou termočlánků je rychlá odezva, nízká cena a relativně malé rozměry termočlánekového spoje. V závislosti na použitých kovech a typu termočlánku lze měřit teploty v rozsahu od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $2760\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jak uvádí Omegaeng.cz<sup>21</sup> pro měření teploty do  $2760\text{ }^{\circ}\text{C}$  lze použít wolfram-rheniové termočlánek o velikosti drátu  $0,076\text{ mm}$ , obrázek 1.4. Přesnost termočlánku se pohybuje mezi  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Termočlánky lze využívat i pro dynamická měření nebo měření teplot povrchů.<sup>1, 5, 15, 21</sup>



Obr. 1.3 Schéma termoelektrického článku<sup>15</sup>



Obr. 1.4 Wolfram-rheniový termočlánek <sup>21</sup>

### Krystalové teploměry

Tyto teploměry využívají princip změny kmitočtu krystalového výbrusu v rezonančním poli tranzistorového oscilátoru v důsledku změny teploty. Teplotně závislý kmitočet je porovnáván s referenčním kmitočtem a z naměřené difference kmitočtů se určuje difference teplot. Teplotní součinitel kmitočtu je konstantní v rozsahu teplot od  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$  a odchylka linearity činí  $0,05\text{ }\%$ . <sup>1</sup>

### Tekuté krystaly

Tekuté krystaly jsou určeny pro teploty v rozsahu od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$  s přesností  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nevýhodou je jejich pomalá odezva v rozmezí  $15 - 20$  sekund. Používají se ve formě fólií, které se na měřený povrch přitisknou. Další typ se nanáší nátěrem. V závislosti na aktuální teplotě se tekuté krystaly různě zbarvují, což lze vyhodnotit vizuálně nebo zaznamenat fotograficky. Vizuální vyhodnocení nám nabízí zviditelnění rozložení teplot na povrchu tělesa. Zabarvení tekutých krystalů je vratné. <sup>1, 15</sup>

### 1.2.2 Bezdotykové teploměry

U bezdotykových teploměrů nedochází ke kontaktu měřícího zařízení s měřeným objektem. Nedochází tedy k ovlivnění měření a měřeného objektu. Celý proces měření je ovšem ovlivněn dalšími aspekty jako vlhkost a prašnost prostředí, radiční záření okolního prostředí, vzdálenost mezi měřeným objektem a měřícím zařízením, emisivita měřeného objektu. Je tedy nutné tyto



ovlivňující vlivy odstranit pomocí zajištění korektního měřicího prostředí a správného nastavení měřicího přístroje. Bezdotykové měření povrchových teplot je rychlé a lze je použít i pro nepřístupná nebo nebezpečná místa. Dále je uvedeno rozdělení bezdotykových teploměrů. <sup>1, 5</sup>

### **Radiační teploměry**

Tyto přístroje slouží především k bezdotykovému měření teplot povrchů těles, což bývá v mnohých případech jedinou možnou alternativou. V praxi se můžeme setkat s různými typy radiačních teploměrů, jako jasové pyrometry, pyrometry na celkové záření, pyrometry pásmové a další. Jistou výhodou jsou relativně dobré dynamické vlastnosti, ale chyby měření jsou značné a pohybují se někdy až v desítkách Kelvina. Při sledování teploty radiačními teploměry je nutné respektovat konkrétní emisivitu sledovaného objektu a radiační teplotu okolního prostředí. <sup>1, 5</sup>

- **Jasové pyrometry** umožňují bezdotykové měření teploty objektu porovnáním záření vysílaného objektem se zářením vlákna žárovky, jehož jas řídíme změnou žhavicího proudu, nebo pomocí šedého klínu. Filtrovaný obraz měřeného objektu se pozoruje optickým systémem, ve kterém je umístěno porovnávací vlákno a čtení se provede, jakmile vlákno žárovky zmizí. <sup>1</sup>
- **Pyrometry na celkové záření** soustřeďují optickým systémem (čočkou nebo zrcadlem) veškerou energii vyzářenou měřeným objektem (nebo jeho částí) do jednoho bodu. Selekcce pásma vlnových délek je provedena pomocí filtrů a pomocí selektivních detektorů záření, ke kterým patří fotonky, fotočlánky, fotodiody, fototranzistory apod. Z napětí na detektoru, z velikosti zobrazené části sledovaného objektu, z šířky pásma vlnových délek, ze známé emisivity objektu a z účinnosti zobrazovacího zařízení lze usuzovat na teplotu měřeného objektu. Tyto pyrometry nacházejí své uplatnění tam, kde mezi pyrometrem a přístrojem je prostředí s absorpčními pásmy, kterým je třeba se při měřeních vyhnout. <sup>1</sup>

Obr. 1.5 Infrateploměr s vestavěným měřičem vzdálenosti <sup>21</sup>

### Termovizní kamera

Termovizní kamera umožňuje na podobných principech jako radiační teploměry měřit bezdotykově teploty povrchů těles. Navíc však dokáže vizuálně zobrazit na monitoru přístroje či počítače teplotní pole celého sledovaného objektu, což umožňuje lepší sledování souvislosti pozorovaných jevů, popřípadě zkoumat dynamický vývoj teplotního pole po celém objektu. Díky speciálnímu softwaru nám naměřené hodnoty umožňuje dále zpracovávat a následně vyhodnocovat. Termovizní kamera patří mezi nákladná, ale velmi užitečná zařízení pro měření v technice prostředí. Umožňuje například rychlou kontrolu tepelných ztrát a kvalitu izolace, identifikaci úniků tepla z tepelných rozvodů, monitorování činnosti různých zařízení, výzkum v oblasti přenosu tepla apod. Termovizní kamera je určena pro měření v rozsahu teplot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  s rozlišením až  $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přesnost měření se pohybuje v rozmezí jedné až dvou procent, u nejmodernějších dosahuje hodnoty  $\pm 1\%$ . Termovizní kamery se liší provedením dle konkrétního použití. Na obr. 1.6 a) je zobrazena termovizní kamera určená pro automatizaci, na obr. 1.6 b) pro elektrotechniku a na obr. 1.6 c) pro výzkum a vývoj. <sup>1, 8</sup>



a)

b)

c)

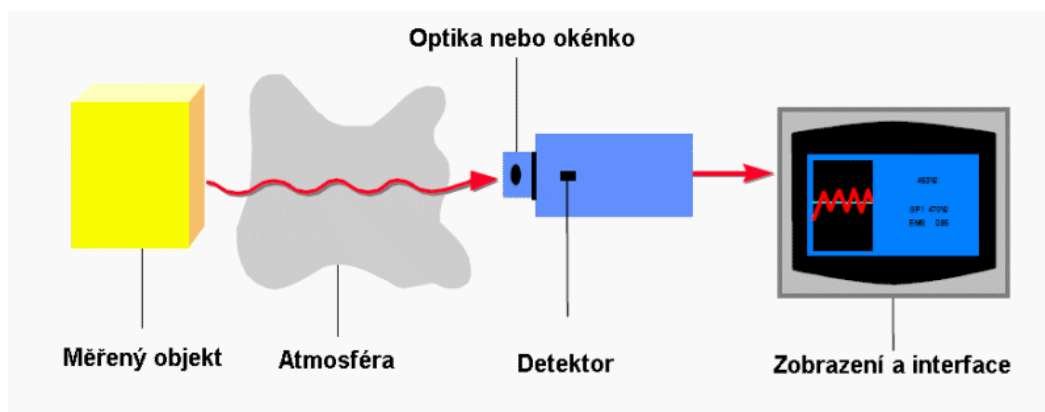
Obr. 1.6 Přehled typů termovizních kamer <sup>8</sup>

### 1.3 Základy bezdotykového měření teploty

U bezdotykového měření se využívá jedné vlastnosti, kterou disponují všechna tělesa, jejichž teplota je větší než 0 K a to, že vysílají teplotní elektromagnetické záření. Příčinou vzniku IR záření je mechanický pohyb molekul, kde intenzita pohybu je závislá na teplotě objektu. Pohyb molekul představuje přemísťování náboje, je vyzařováno elektromagnetické záření. Při konstantní teplotě tělesa je nejintenzivnější teplotní záření v určité vlnové délce, podle níž lze určit teplotu povrchu tělesa. Princip je založen na měření teplotního záření a k měření se využívá zákonů tepelného záření, ke kterým patří především Planckův zákon, Wienův zákon a Stefanův-Boltzmannův zákon. Podle Planckova zákona záření platí, že čím vyšší je teplota tělesa, tím intenzivnější záření těleso vysílá a současně klesá vlnová délka záření.<sup>1, 5, 11</sup>

#### 1.3.1 Schéma bezdotykového měření povrchových teplot

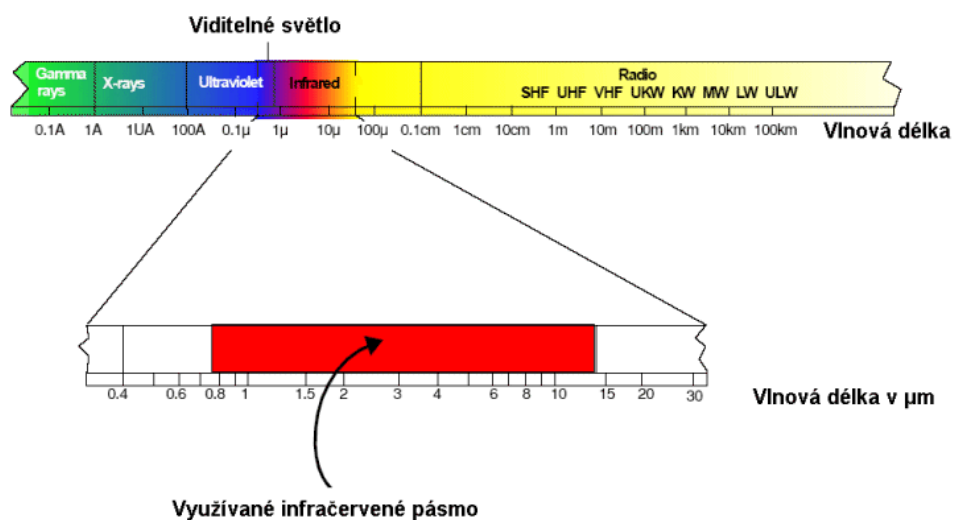
Vyzařované infračervené záření z měřeného objektu je pomocí optického systému soustředěno na detektor, jehož elektrický signál se dále zpracovává v elektronických obvodech a výstupem je pak údaj na displeji nebo termogram na monitoru vyhodnocovacího zařízení viz obrázek 1.7<sup>13</sup>



Obr. 1.7 Schéma bezdotykového měření<sup>11</sup>

Bezdotykové měření teploty je měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem zá-

ření vlnové délky od 0,4  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ . Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$  se označuje jako tepelné záření. <sup>2</sup>



Obr. 1.8 Oblasti elektromagnetického spektra <sup>11</sup>

Tab. 1.1 Oblasti elektromagnetického spektra <sup>2</sup>

| Rozsah elektromagnetického spektra [ $\mu\text{m}$ ] |      | Oblast elektromagnetického spektra          |
|--|------|---|
| od   | do   |   |
| 0,4  | 0,78 | oblast viditelného spektra                  |
| 0,78   | 1    | oblast blízkého infračerveného spektra      |
| 2  | 3    | oblast krátkovlnného infračerveného spektra |
| 3  | 5    | oblast středovlnného infračerveného spektra |
| 5  | 25   | oblast dlouhovlnného infračerveného spektra |

Oblasti elektromagnetického spektra jsou zobrazeny na obrázku 1.8. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozsahu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Energie vyzařovaná tělesy prudce vzrůstá s jejich teplotou. Podle Stefan-Boltzmannova zákona upraveného s ohledem na vlastnosti skutečných těles, je intenzita vyzařování dána vztahem: <sup>2</sup>

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (1.1)$$

$\varepsilon$  = experimentálně určený emisní součinitel [-],

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannova konstanta,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ ,

T = teplota povrchu tělesa (absolutní) [K].

#### **Výhody bezdotykového měření teploty:**

- rychlost měření,
- měřicí technika neovlivní měřený objekt,
- možnost měření teploty rotujících a pohybujících se objektů,
- měření teploty nebezpečných nebo špatně dostupných objektů,
- lze měřit i velmi vysoké teploty až do 3000 °C,
- možnost měření velmi rychlých změn teploty,
- možnost měřit rozložení povrchové teploty a dále data počítačově zpracovat.<sup>2, 11</sup>

#### **Nevýhody bezdotykového měření teploty:**

- měřený objekt musí být pro infračervený teploměr opticky viditelný. Vysoké úrovně prachu nebo kouře snižují přesnost měření,
- lze měřit pouze povrchovou teplotu,
- nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa, prostupnosti prostředí mezi čidlem a objektem,
- nejistota měření způsobená nepřesnou korekcí odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.<sup>2, 11</sup>

### **1.3.2 Využití termovizní kamery**

Termovizní kamera najde uplatnění v celé oblasti lidské činnosti. Termovizní kamera slouží k měření rozložení teploty na povrchu měřeného objektu a k diagnostickým účelům. Využití nachází jak v armádě, stavebnictví, průmyslu, v lékařství, tak u hasičů či policie. V dnešní době lze využít termovizní kameru i v oblasti bezpečnosti. Termovizní kamery umožňují zobrazit infračervené zá-

ření tělesa tak, aby jej bylo možné pozorovat (vizualizace). Toho se využívá například pro: <sup>4</sup>

- hledání úniků tepla z budov,
- úniku plynu,
- sledování elektrických vedení a jejich poškození,
- určení poruchy vyhledáním nehomogenit teplotního pole,
- neinvazivní detekci zánětů pod kůží,
- měření rozložení teploty pro účely vědy a výzkumu,
- automatizaci procesů,
- detekci pohybu osob v zabezpečených objektech,
- noční vidění. <sup>4</sup>

Detailnější popis využití termovizní kamery a infračerveného záření v konkrétních oblastech lidské činnosti dle typu konstrukce snímaného zařízení od společnosti FLIR. Zde je uvedeno pouze částečné využití pro získání stručného přehledu, co všechno tato technika nabízí. Více informací naleznete na webových stránkách<sup>8</sup> společnosti FLIR.

### **Bezpečnost**

Široké uplatnění najde termovizní kamera jak u policie, hasičů, tak u armády. Hasičům pomáhají s orientací ve tmě, vidět skrz kouř nebo detekovat zahřáté objekty, které by mohli vést k opětovnému vznícení. Policii dává výhodu při pronásledování nebo hledání osob v naprosté tmě, kouři popřípadě schovanými za keřem či mezi větvemi stromů. Termovizní kamery lze v oblasti bezpečnosti využít i k ochraně majetku, převážně se jedná o velké prostory například solární elektrárny, kde je potřeba ohlídat majetek před odcizením a to někdy na velice rozsáhlé ploše. Bezpečnostní systém s využitím termovizních kamer je zde velice efektivní způsob, jak zajistit ochranu majetku každý den a to po celý rok. Vše zařídí automaticky předem nastavený softwarový systém s využitím termovizních kamer a jejich vlastností, které poskytují. <sup>8</sup>

### Doprava

Zde společnost FLIR nabízí systém PathfindIR™. Jedná se o IR zobrazovací systém k zlepšení nočního vidění. Hlavním cílem systému je pomoc snížit nebezpečí doprovázející řízení za zhoršených podmínek nebo řízení dopravního prostředku v noci. Systém PathfindIR™ pomáhá řidiči vidět na větší vzdálenost, vidět možné ohrožení v blízkosti dopravních cest, kdy dokážete rozpoznat chodce, zvířata nebo objekty v naprosté tmě, kouři a sněhu, tím vám poskytuje více času k reakci a tak redukuje vznik potenciálního nebezpečí. Využití najde například u nákladních automobilů, autobusů nebo i stavebních vozů. Tento systém operuje mezi  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rozdíly viditelnosti s použitým systémem PathfindIR™ a bez něj lze sledovat na obrázku 1.9.<sup>8</sup>

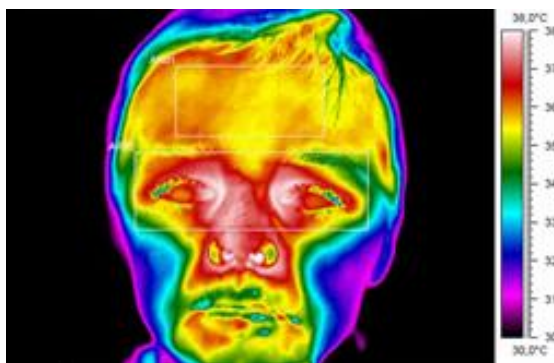


Obr. 1.9 Pohled bez a s použitím systému PathfindIR™<sup>8</sup>

### Zdravotnictví

Termovizní kamera slouží jako efektivní technika studování povrchové teploty těla. Vysoký výkon termovizní kamery poskytuje citlivý diagnostický nástroj pro celou řadu klinických a experimentálních situací od diagnostiky rakoviny prsu po detekci virových onemocnění. Virová onemocnění, jako jsou například SARS, prasečí chřipka a další, je nutné rychle a neinvazivně de-

tekovat spolehlivou metodou, kterou nabízí termovizní kamera. Detekce je založena na teplotě lidského těla. <sup>8</sup>



Obr. 1.10 FLIR kamera automaticky detekuje nejvyšší hodnoty teploty ve zvoleném místě. Barva nám usnadňuje rozhodnutí, zda člověk potřebuje další vyšetření či nikoliv. <sup>8</sup>

### 1.3.3 Průchod infračerveného záření atmosférou:

Jak uvedl doc. Ing. Aleš Drastich, CSc. <sup>6</sup> infračervená zářivá energie před vlastní detekcí prochází atmosférou. V závislosti na vlastnostech atmosféry, její transparenční pro infračervené záření, může dojít k parazitní modulaci signálového radiačního toku - jeho útlumu. Zeslabení zářivého toku při průchodu atmosférou může být způsobeno jednak přímou absorpcí a jednak rozptylem na molekulách plynů, kapkách vody, částicích kouře atd. Na snižování transparence atmosférického prostředí se podílí zejména molekuly  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$  a  $CO$ . Jinak je tomu při aplikacích radiometrických systémů např. v těžkých průmyslových provozech, kde zvýšená koncentrace některých plynů a par může podstatnou měrou ovlivnit velikost detekované zářivé energie. V laboratorních podmínkách můžeme předpokládat, že vliv atmosféry na signálový radiační tok je zanedbatelný. Při měření absolutní teploty  $T$  je velmi důležité, aby byl koeficientu emisivity v celém zorném poli konstantní. <sup>6</sup>

## 1.4 Emisivita

Emisivita je mírou schopnosti daného předmětu vyzařovat infračervenou energii, která nese informaci o jeho teplotě. Emisivita může nabývat hodnot od



0 (lesklé zrcadlo) do 1,0 (černé těleso). Většina organických, nabarvených nebo zoxidovaných povrchů má emisivitu blízkou hodnotě 0,95. Proto mají některé jednodušší teploměry emisivitu pevně nastavenou na tuto hodnotu. Dokonalejší přístroje disponují možností uživatelského nastavení emisivity, aby ji bylo možno lépe přizpůsobit skutečným podmínkám měření. Hodnota emisního součinitele se pohybuje u pevných těles se zrcadlově leštěným povrchem u některých kovů a slitin (Al, Au, Ag, Cu, bronz) v rozmezí hodnot 0,02 – 0,06, nejvyšší hodnotu mají drsné povrchy (omítka, dřevo, červené cihly), ale i olejové barvy, porcelán a sklo, kdy se hodnoty pohybují v rozmezí 0,82 – 0,96. U plynů vykazují vyzařovací schopnost pouze silnější vrstvy plynů tří a víceatomových. Neznečištěné plyny jedno- a dvou atomové se na přenosu tepla zářením nepodílejí vůbec, nebo jen nepatrně. <sup>4, 11</sup>

Emisivita  $\varepsilon$  je poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při téže teplotě. Pro emisivitu platí vztah: <sup>2</sup>

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) M_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{0\lambda} d\lambda} \quad (1.2)$$

Kde:

$M_0$  je intenzita vyzařování černého tělesa [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$M_{0\lambda}$  spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$\varepsilon(\lambda, T)$  emisivita (je funkci vlnové délky a teploty).

### Určení emisivity měřeného objektu

Pro stanovení emisivity měřeného objektu existují různé metody. Dokonce můžete vyhledat emisivitu konkrétního materiálu v experimentálně zjištěných tabulkách. Z důvodu závislosti povrchové úpravy a teploty materiálů na rozdílnou intenzitu vyzařování jsou hodnoty nalezené v tabulkách pouze orientační. Z tohoto důvodu se doporučuje určit emisivitu konkrétního materiálu správnými metodami stanovení emisivity.

**Metody stanovení emisivity:**

- 1) Zahřátím objektu na známou teplotu a změřením této teploty přesným měřicím zařízením např. pomocí termočlánu. Současně se na termovizní kameře nastavuje emisivita tak, aby se ukázala shodná teplota. <sup>14</sup>
- 2) Pro relativně nízké teploty lze jako zaměřovací plochu využít „speciální samolepící štítek“ ThermaSpot s přesně stanovenou emisivitou 0,96. Na termovizní kameře se tato emisivita nastaví a změří se správná teplota objektu. Při měření mimo tento štítek se nastaví emisivita tak, aby byla teplota na indikátoru shodná s předchozím měřením. <sup>14</sup>
- 3) Měřený objekt se pokryje černou barvou pro dosažení emisivity odpovídající emisivitě černé barvě, což je 1,0. Pro přesnější měření je třeba použít speciální barvu, která má přímo určenou emisivitu. Např. barva ThermaSpray 800, který se na měřenou plochu jednoduše nastříká. Známá emisivita se pak nastaví na měřidlo a změří se teplota měřeného objektu. Tento způsob nám zajistí konstantní emisivitu po celém měřeném objektu. <sup>14</sup>

Tab. 1.2 Vybrané hodnoty emisivity <sup>23</sup>

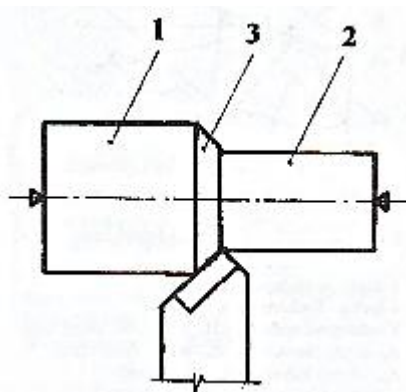
| Materiál                                     | Teplota [°C] | $\lambda$ [μm] | Emisivita |
|--|--------------|----------------|-----------|
| Ocel nerezová: typ 18 -8, leštěná            | 20           |                | 0.16      |
| Ocel nerezová: typ 18 -8, okysličená při 800 | 60           |                | 0.85      |
| Ocel: drsný povrch                           |              | 8.14           | 0.96      |
| Ocel: galvanizovaná                          |              | 8.14           | 0.28      |
| Ocel: leštěná                                | 100          |                | 0.07      |
| Ocel: rezavá, červená                        |              | 8.14           | 0.69      |
| Ocel: tvářená, leštěná                       |              | 8.14           | 0.28      |
| Ocel: válcovaná (za tepla)                   |              | 8.14           | 0.24      |

V tabulce 1.2 vybraných hodnot emisivity lze pozorovat, že pro materiál ocel se hodnota emisivity pohybuje v rozmezí 0,07 až 0,96. Tento rozsah hodnot je způsobený rozdílným povrchem objektu, který velkou částí ovlivňuje hodnotu emisivity.

## 1.5 Popis obráběcího procesu soustružení

Jak uvedl prof. Ing. Karel Kocman ve své knize Teorie obrábění II <sup>3</sup>. Při obrábění dochází k oddělování částic materiálu obrobku břitem nástroje. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku se specifikuje jako řezný proces. Soustružení je obráběcí metoda používaná pro zhotovení součástí rotačních tvarů, při níž se většinou případů používají jednobřité nástroje různého provedení. Z mnoha hledisek představuje soustružení nejjednodušší způsob obrábění a také velmi frekventovanou metodu využívanou ve strojírenství. <sup>3</sup>

Při obrábění existují tři základní plochy na obráběné součásti. Plochy jsou zobrazeny na obrázku 1.11. Přechodová plocha je plocha, která se nachází v místě řezu.



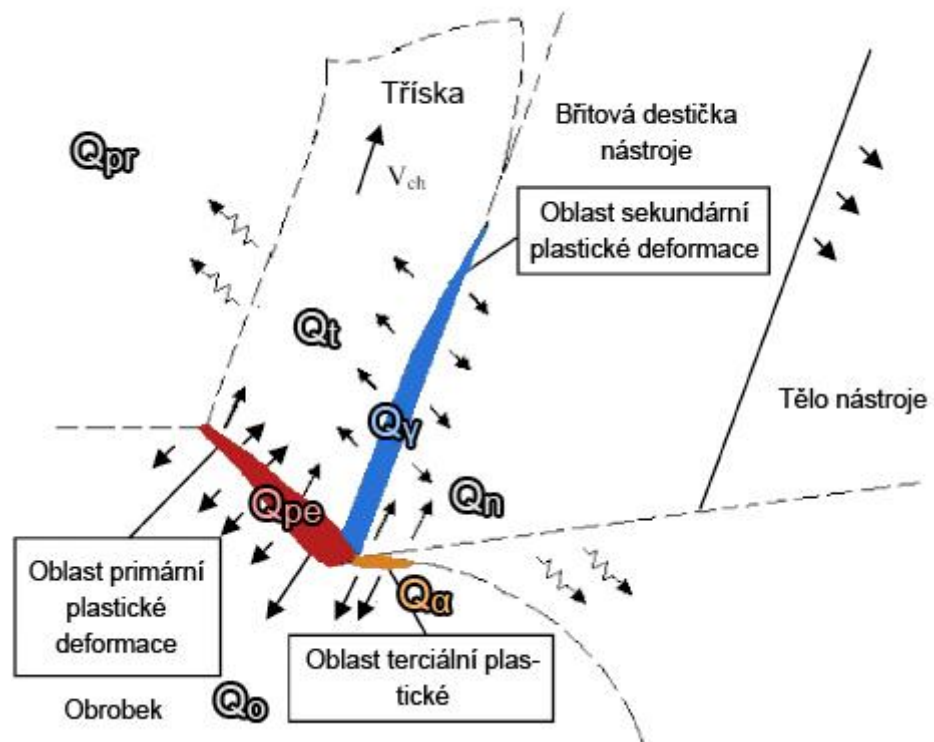
Obr. 1.11 Plochy na obráběné součásti 1) obráběná plocha, 2) obrobená plocha, 3) přechodová plocha <sup>3</sup>

### Tepelná bilance řezného procesu

Během obráběcího procesu se téměř veškerá práce řezání transformuje v teplo. Teplo řezného procesu  $Q_e$ , vzniklé při odebrání určitého množství materiálu, je přibližně rovné práci řezného procesu  $E_e$ , takže  $Q_e \cong E_e$ .<sup>3</sup>

Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces, protože:

- negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- ovlivňuje petchování a zpevňování obráběného materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.<sup>10</sup>



Obr. 1.12 Vznik a odvod tepla při obrábění<sup>22</sup>

Hlavní zdroj tepla při obrábění viz obrázek 1.12, vzniká v oblasti primární plastické deformace ( $Q_{pe}$  - v důsledku plastických a elastických deformací) při tvoření třísky, v oblasti sekundární plastické deformace ( $Q_{\gamma}$  - v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou) a v oblasti ( $Q_{\alpha}$  - v důsledku tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku). Vzniklé teplo je odváděno třískou ( $Q_t$ ), nástrojem ( $Q_n$ ), obrobkem ( $Q_o$ ) a řezným prostředím ( $Q_{pr}$ ). Na základě

předpokladu, že vzniklé a odvedené teplo musí být v rovnováze, lze vytvořit rovnici tepelné bilance řezného procesu v následujícím tvaru: <sup>10</sup>

$$Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_n + Q_{\alpha} + Q_{pr} \quad [J] \quad (1.3)$$

Podíl jednotlivých složek tepla, odváděného třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím, závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především řezné rychlosti), řezném prostředí (způsobu chlazení a mazání) a na geometrii břitu řezného nástroje.

Největší část tepla vzniklého při obrábění je u řezných procesů, které využívají nástroj s definovatelnou geometrií, odváděna ze zóny řezání třískou. Teplota třísky zatěžuje řezný nástroj jen tak dlouho, pokud je s ním v kontaktu.

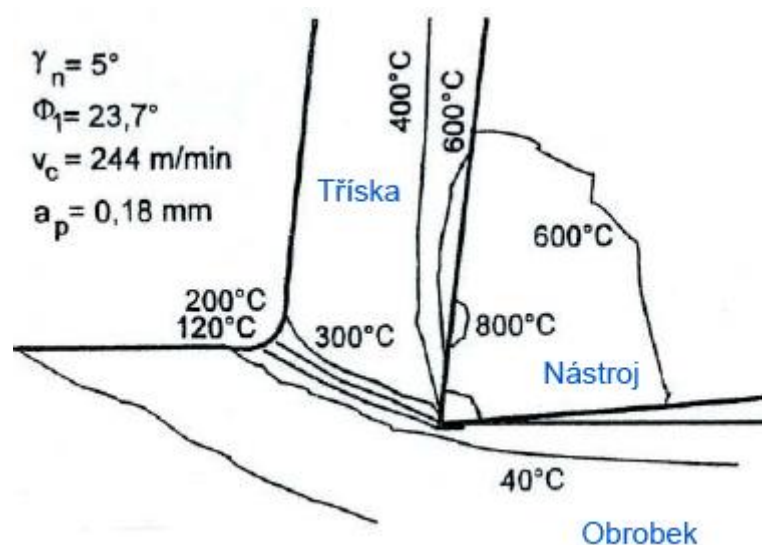
Na obrázku 1.13 lze pozorovat rozložení teplotního pole při procesu obrábění. Z hlediska efektivnosti procesu řezání jsou podíly tepelné energie odvedené jednotlivými účastníky řezného procesu důležité z následujících důvodů:

- **teplo odvedené nástrojem:** velké množství tepla odvedené nástrojem znamená vysokou teplotu nástroje - teplota výrazně zvyšuje intenzitu opotřebení a proto dochází ke snížení trvanlivosti a životnosti nástroje,

- **teplo odvedené obrobkem:** pokud do obrobku přechází velké množství vzniklého tepla, má to negativní vliv na kvalitu obrobeného povrchu a to zejména s ohledem na tahová vnitřní pnutí, která podstatně snižují spolehlivost součástí při jejich funkci,

- **teplo odvedené řezným prostředím:** velké množství tepla odvedené okolním prostředím znamená, že do nástroje a obrobku přejde menší díl vzniklého tepla, čímž se zmenší jeho negativní vlivy na nástroj a obrobek,

- **teplo odvedené třískou:** (podobně jako u tepla odvedeného řezným prostředím). <sup>3, 10</sup>



Obr. 1.13 Rozložení teplotního pole při procesu obrábění <sup>17</sup>

## 1.6 Řezné prostředí

Podle literatury<sup>9</sup> jsou za hlavní ekologické problémy strojírenské výroby dnes považovány především aplikace procesních kapalin, které mnohdy zlepšují průběh nebo výsledek jednotlivých technologických procesů, ale po ukončení jejich funkce jsou velmi těžko ekologicky zlikvidovatelné.<sup>9</sup>

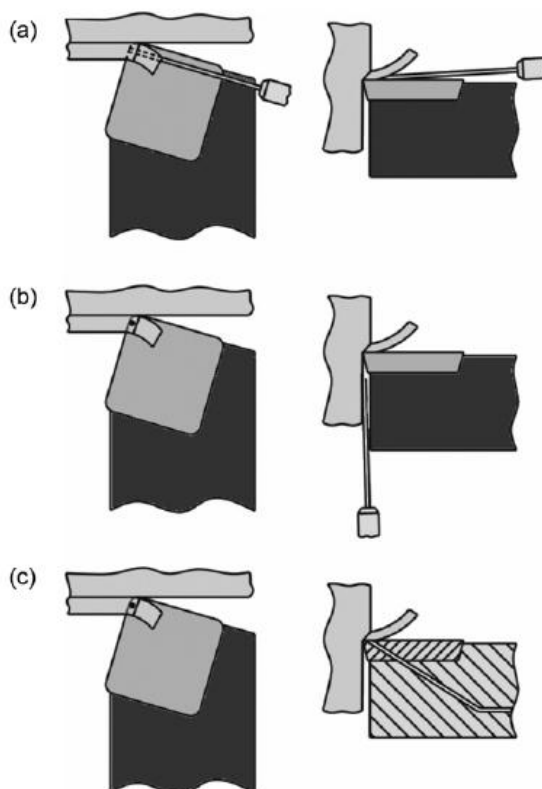
Procesní kapaliny nachází uplatnění pouze u obrábění při nižších řezných rychlostech (do 50 m/min), kdy se její aplikací, vedle dalších účinků, také snižuje množství tepla odvedeného do nástroje.<sup>17</sup> Nejčastěji používané procesní média jsou kapaliny, plyny a mlhy. Z technologického a provozního hlediska se na řezné prostředí specifikují určité požadavky, k nimž patří zejména: chladicí, mazací a čistící účinek, provozní stálost, ochranný účinek, zdravotní nezávadnost a přiměřené náklady. Moderní procesní kapaliny plní požadavek na vyrovnaný chladicí a mazací účinek. Druhy procesních kapalin jsou vodné roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechtěné řezné oleje, syntetické kapaliny. Mezi nejpoužívanější řezné kapaliny patří emulzní kapaliny.<sup>3</sup>

Způsob přívodu řezné kapaliny do zóny řezání významně ovlivňuje parametry řezného procesu, zejména trvanlivost břitu nástroje a jakost obrobekové plochy. Podchlazování řezné kapaliny na teplotu nižší než je teplota okolí,

přispíváme ke zvýšení trvanlivosti nástrojů. Podchlazení na nižší teploty je omezeno stálostí řezné kapaliny u emulzí a houstnutím u řezných olejů. Snížením teploty řezné kapaliny na teploty pod bodem mrazu znamená, že je nutné použít jiné složení řezné kapaliny. Takováto úprava může přinést zvýšení výkonů obrábění. Vnitřní chlazení je metodou, která přináší výrazné zvýšení výkonu obrábění. Při soustružení je tato metoda vhodná pro nástroje se slinutými karbidy. Tím se dá zvýšit řezná rychlost o 5 až 15 %.<sup>3</sup>

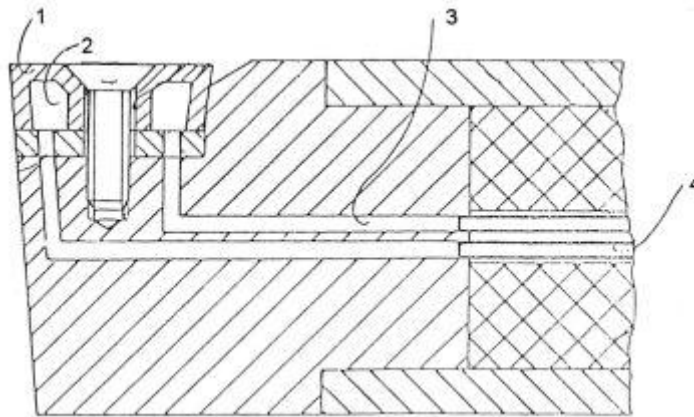
### Způsoby chlazení při obráběcím procesu

Na obrázku 1.14 jsou uvedeny základní způsoby přívodu procesní kapaliny.



Obr. 1.14 Způsoby přívodu procesní kapaliny a) mezi čelem nástroje a třískou, b) mezi hřbetem nástroje a obrobkem, c) do místa řezu přes k ostří skrz nástroj<sup>29</sup>

Vnitřní chlazení břitové destičky na obrázku 1.15 má výhodu, probíhajícího chlazení v blízkosti zdroje tepla. Přínosem je zvýšení trvanlivosti nástroje nebo možnost obrábět při vyšších řezných rychlostech. Mimo proudící kapaliny lze využít pro vyplnění prostoru v břitové destičce, také tekutinu či tuhý materiál s vysokou tepelnou vodivostí.<sup>31</sup>



Obr. 1.15 Dutá vyměnitelná břitová destička umožňuje chlazení dna břitové destičky bezprostředně pod obrábějícím břitem 1) vyměnitelná břitová destička, 2) dutina vyměnitelné břitové destičky, 3) kanálek pro odvod chladicí tekutiny, 4) kanálek pro přívod chladicí kapaliny<sup>31</sup>



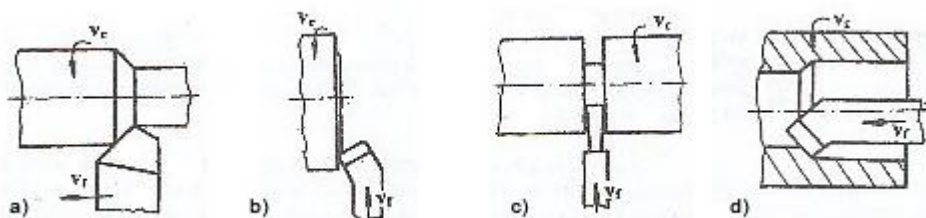
## 2 TEORETICKÝ ROZBOR MĚŘENÍ

Pro experimenty bude použit obráběcí stroj soustruh SV 18 umístěný v dílnách FSI VUT v Brně. Rozměry a tvar soustruhu nám nedovolí umístění termovizní kamery pomocí stativu do potřebné vzdálenosti pro zajištění minimální zaostřitelné vzdálenosti z důvodu potřebného rozlišení měřené plochy. Je tedy zapotřebí navrhnout přípravek pro umístění kamery přímo na stroj a to do potřebné vzdálenosti od měřené součásti. Problematika je dále popsána v kapitole 3.1.5. Není možné měřit teplotu v místě řezu opět v důsledku nedostatečného prostoru pro umístění termovizní kamery u místa styku obráběcího nástroje s obrobkem. Nadále se tedy budeme zabývat pouze měřením povrchové teploty obrobku. V této kapitole jsou dále teoreticky navrženy některé varianty způsobů soustružení s uvedením výhod, nevýhod a problémů, kterými jsou provázány v důsledku použitého obráběcího stroje.



Obr. 2.1 Obráběcí stroj – soustruh SV 18 <sup>30</sup>

Teoreticky uvažované způsoby obrábění pro možnost realizace experimentálního měření teploty (obr. 2.2).



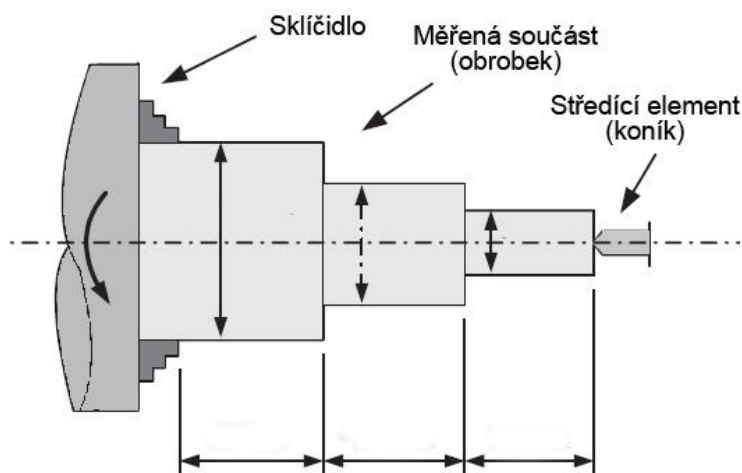
Obr. 2.2 Způsoby soustružení

a) podélné, b) čelí, c) zapichování, d) vnitřní soustružení

## 2.1 Podélné soustružení

Tento způsob obrábění nabízí pozorovat souběžně přechodovou, obráběnou a obrobenou plochu. Díky odletující třísce je nutné během měření termovizní kamerou použít ochranný box s filtrem, abychom předešli případnému poškození. Pro měření povrchové teploty bude využito rotačního pohybu součásti, který teplo odváděné z místa řezu přenáší po celém obvodu součásti. Je tedy možné měřit teplotu z druhé strany obrobku, kde je dostatečné místo pro umístění termovizní kamery jak dokládá obrázek 2.4. I když se jedná o vnitřní soustružení, tak umístění termovizní kamery zůstává stejné. V důsledku vysokých otáček obrobku ( $430 \text{ min}^{-1}$ ) je místo řezu přeneseno na druhou stranu obrobku v době menší než desetina sekundy a teplota je srovnatelná s teplotou po celém obvodu součásti.

Nemůžeme měřit ani s použitím procesní kapaliny, i když je použito ochranného boxu. Jak je uvedeno v kapitole 4.1.4, kde je experimentálně zjištěno, že voda ve velké míře ovlivní hodnotu měřené teploty, pomocí svojí 77,3% propustnosti IR záření. Při součtu těchto ovlivnění dojde k velkému poklesu měřené teploty oproti skutečné teplotě. Teplo odváděné do obrobku dosahuje řádově hodnot desítek stupňů Celsia, proto se může stát, že v důsledku použití ochranné fólie a zároveň chlazení bude měřená teplota dosahovat hodnot teploty okolí. Následkem měřená součást splyne s okolím a nedojde pomocí termovizní kamery k zaznamenání naměřených teplot. Při podélném soustružení z obráběné plochy dochází k odstranění nanesené speciální barvy se známou emisivitou. Z tohoto důvodu je nutné před dalším měřením povrch opět opatřit speciální barvou. Dochází k zamezení opakovatelnosti měření v krátkém časovém horizontu při použití jedné měřené součásti. K tomuto tématu byl zpracován experiment, který je popsán v kapitole 3.5.

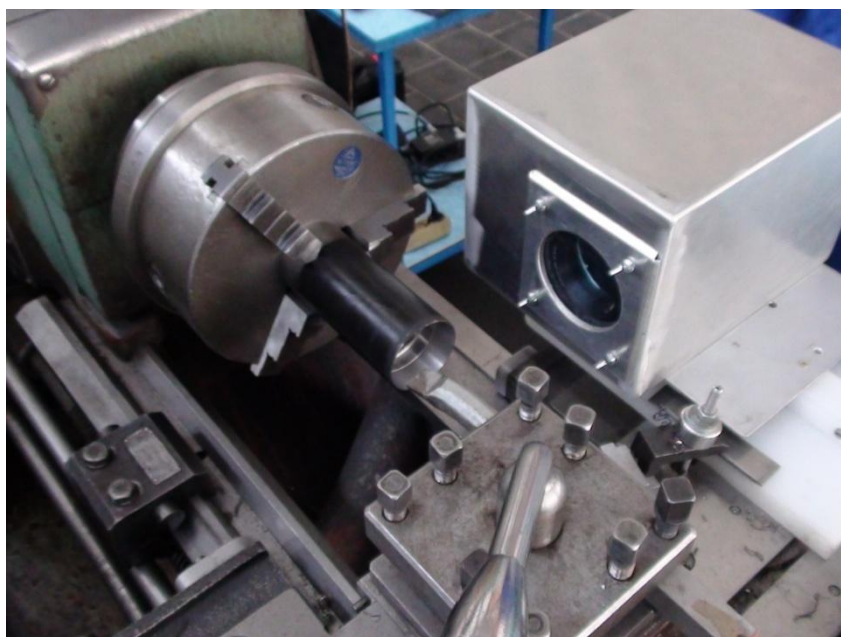


Obr. 2.3 Podélné soustružení u obrobku s rozdílnými průměry <sup>24</sup>

Ve studii <sup>24</sup> je realizován experiment k tomuto způsobu obrábění, ze kterého se bude vycházet u experimentální části.

## 2.2 Vnitřní soustružení

Řešení je obdobné jako u podélného soustružení s tím rozdílem, že u tohoto soustružení je obráběcí proces uskutečněn uvnitř součásti. Lze využít během obrábění procesní kapaliny, ale pouze za daných podmínek měření. Procesní kapalina nám ovlivní vnější povrch součásti i měření v důsledku působení odstředivé síly dochází ke stříkání procesní kapaliny od okraje součásti. Dochází k nanesení těchto kapek na ochranný filtr nebo objektiv. Podmínkou použití procesní kapaliny je vzdálenost měřené oblasti od okraje do takové míry, u které nedochází k působení procesní kapaliny v důsledku odstředivé síly na vnějším povrchu součásti. Obrobená a přechodová plocha vzniká na vnitřní straně součásti a nedochází tedy k odstranění nanesené speciální barvy. Nanesená barva se nachází na vnější straně součásti. Výhodou je možnost opakovatelnosti měření, ale s rozdílnou tloušťkou stěny. Opakování měření lze realizovat bez nutnosti opětovného nanášení speciální barvy. Měření tedy probíhá neustále na jedné součásti. Lze snímat pouze teplo přenesené přes stěnu objektu na vnější povrch.



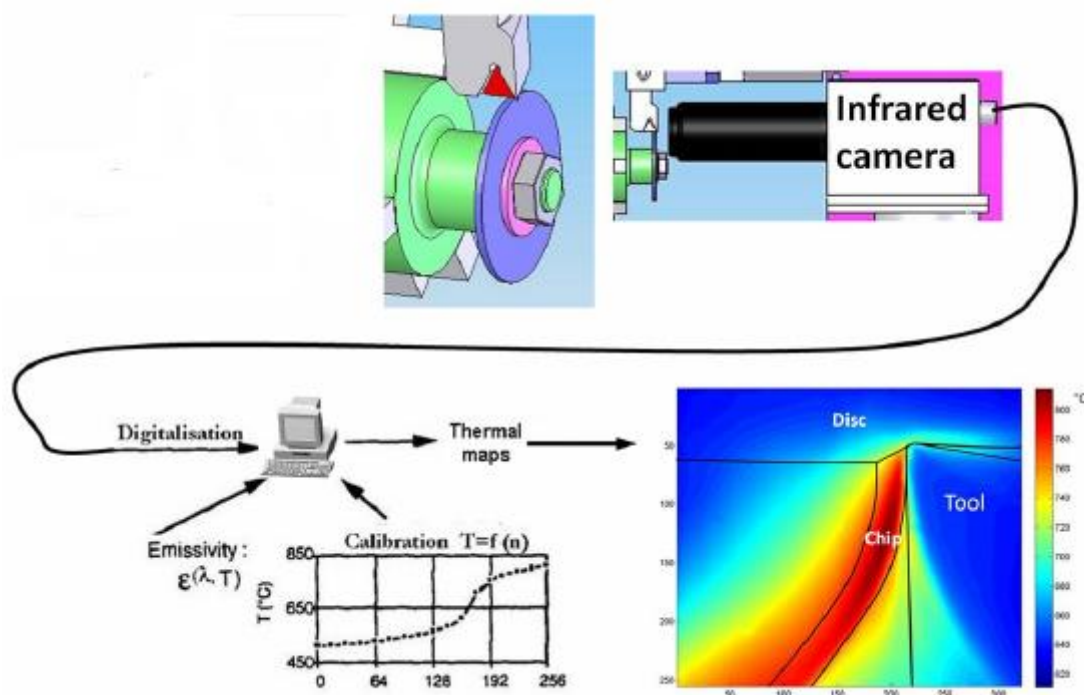
Obr. 2.4 Řešení na zvoleném obráběcím stroji pro vnitřní i podélné soustružení

### 2.3 Čelní soustružení

Při tomto způsobu obrábění nedosáhneme konstantní řezné rychlosti, ale pouze konstantních otáček a to v důsledku změny průměru obráběného obrobku během obrábění. I zde vytvářená tříska může poškodit kameru a je potřeba použít ochranný box. V důsledku nedostatku místa na umístění termovizní kamery kolmo na měřenou plochu, v našem případě se jedná o čelo obrobku, není možné tento experiment realizovat v našich podmínkách. Kamera nemůže být umístěna na loži nesoucí nožovou hlavu, protože při obrábění dochází k jejímu pohybu a následkem toho by došlo k vyjetí kamery z místa měření. Z důvodu příčného pohybu nožové hlavy nemůže být umístěna ani na podélném loži, kde se pohybuje koník. Dochází k překrytí měřené plochy nástrojem a nožovou hlavou.

### 2.4 Zapichování

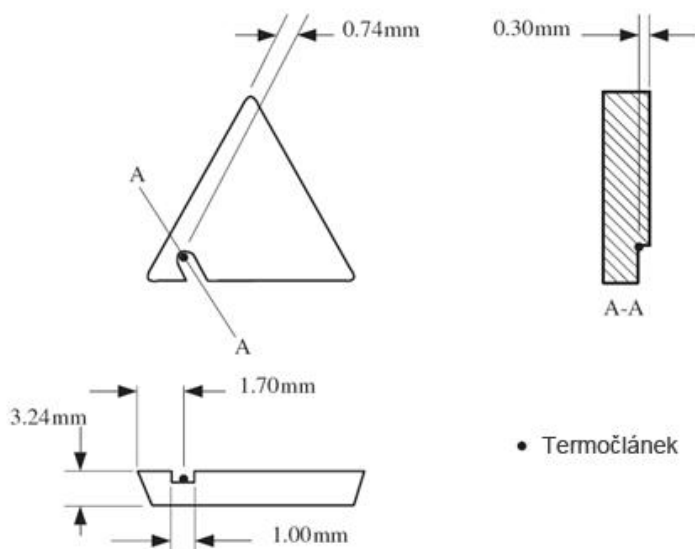
Obdobný způsob jako čelní soustružení uvedené v kapitole 2.3 s tím rozdílem, že do měření zasahuje tloušťka stěny mezi místem obrábění a měřícím zařízením. Řešení umístění termovizní kamery je stejné jako čelního soustružení. Částečně zde zároveň působí i nevhodná radiální síla.

Obr. 2.5 Možný způsob měření při zapichování<sup>18</sup>

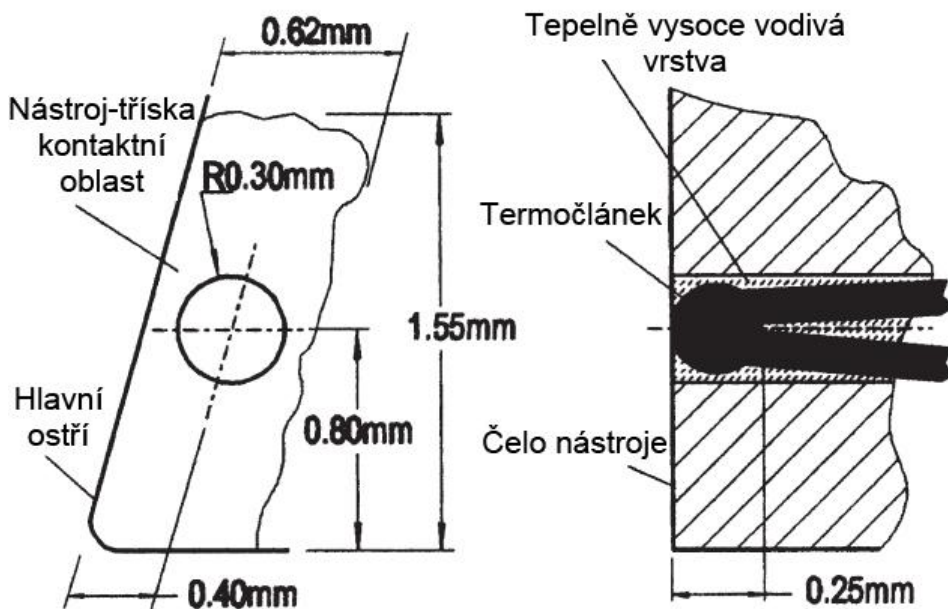
## 2.5 Způsoby měření teploty při soustružení

Při aplikaci standardních měřících metod lze měřit střední teplotu všech stykových ploch mezi nástrojem a obrobkem, která se označí jako teplota řezání. Měření lze provádět různými typy termočlánků, přičemž značný problém je umístění měřícího spoje termočlánku co nejbližší ke stykové ploše nástroje a třísky.<sup>3</sup> Při měření teploty použitím bezkontaktního měření s využitím termovizní kamery, lze pozorovat rozložení teplotních polí jak na nástroji, obrobku tak i na třísce. Záleží na vhodném umístění termovizní kamery směrem k měřené oblasti.

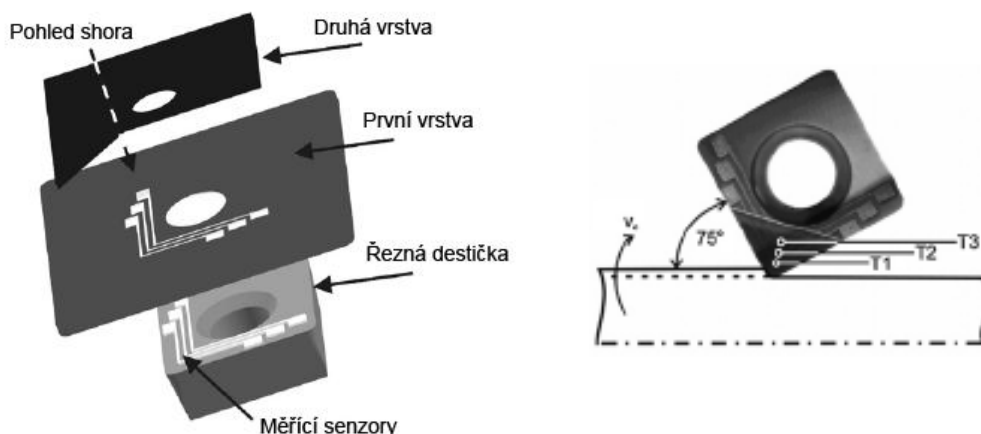
Způsoby umístění termočlánků v nástroji použitých při provedených experimentech uvedených v literatuře. Umístění na obr. 2.6 zde použili speciálně vyrobené drážky u špičky nástroje, do které se umístil termočlánek.

Obr. 2.6 Umístění termočlánek v nástroji <sup>24</sup>

Umístění termočlánek v otvoru vyvrtaném skrz nástroj na obr. 2.7 Otvor s termočlánekem je vyplněn vysoce vodivou vrstvou silikonové pasty pro dobrou vodivost mezi termočlánekem a nástrojem. <sup>26</sup>

Obr. 2.7 Umístění termočlánek v nástroji <sup>26</sup>

Nová metoda ke zlepšení měření teploty na nástroji při soustružení využívá teplotních senzorů v podobě tenkých vrstev nanesených přímo na nástroj. Pro vrstvy menší než 1 mm je použito materiálu Ni a NiCr. Na obr. 2.8 jsou zobrazeny tři měřicí části umístěny od špičky nástroje ve vzdálenosti 1,2 mm, 1,4 mm a 1,6 mm. Výsledkem je vývoj teploty na nástroji v průběhu obrábění.<sup>27</sup>

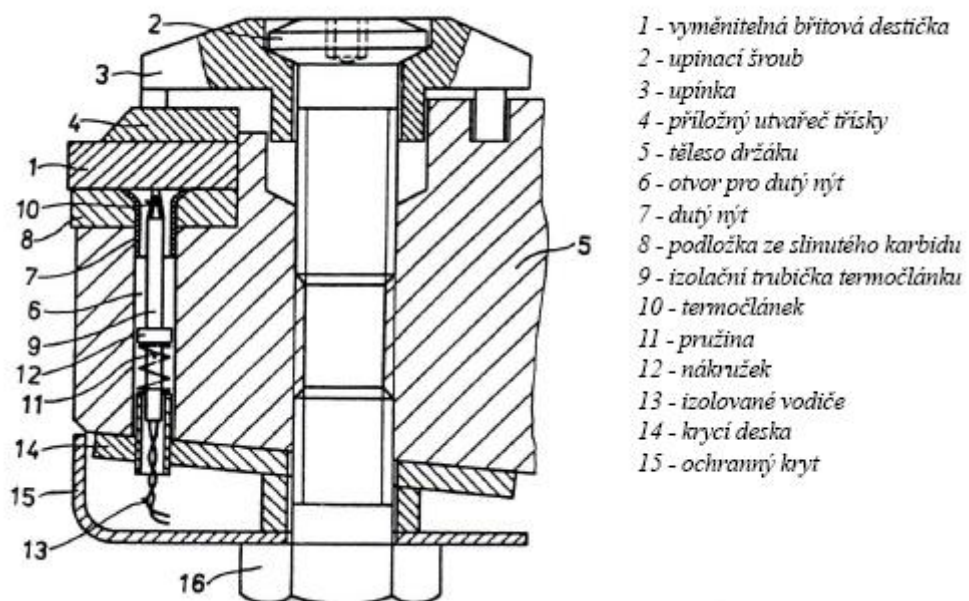


Obr. 2.8 Umístění tenké měřicí vrstvy na nástroj<sup>27</sup>

Na obr. 2.9 a 2.10 je umístění termočlánu ve středu břitové destičky a konkrétně na místě v destičce určenému pro uchycení k nástroji. Jedná se o zařízení pro měření teploty břitové destičky soustružnického nože nacházející se na VUT v Brně. Tento nástroj navrhnul doc. Ing. Anton Humár, CSc.



Obr. 2.9 Zařízení pro měření teploty vyměnitelné břitové destičky



Obr. 2.10 Schéma zařízení pro měření teploty vyměnitelné břitové <sup>10</sup>

### Oblasti měření teplot u obráběcího procesu soustružení

Tři důležité oblasti měření teploty u obráběcího procesu jsou tyto:

1. **Oblast místa řezu** – zde dochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a v důsledku toho ke vzniku třísky. Lze zde naměřit nejvyšší teplotu, která se pohybuje ve stovkách stupňů Celsia v závislosti na zvolených řezných podmínkách. Množství tepla vzniklé v místě řezu ovlivňuje jak trvanlivost nástroje, tak kvalitu obrobku. <sup>3</sup>
2. **Obrobek** – teplota obrobku dosahuje pouze desítek stupňů Celsia. Pro měření termovizní kamerou, ale nejvhodnější varianta.
3. **Vznikající tříška** – odvádí z místa řezu největší množství tepla. Není jednoduché zachytit odlétávající třísku a proto je ideální pohled do oblasti utváření třísky, zde lze zachytit nejlepší pozici třísky.
4. **Nástroj** – Největší teplota se nachází na břitu nástroje. Problematické měření termovizní kamerou z hlediska prostoru pro vhodné umístění vzhledem ke špičce nástroje. Najdou zde uplatnění termočlánky (viz kapitola 2.5).



### 3 PŘÍPRAVA A REALIZACE EXPERIMENTŮ

V této části bude řešena problematika experimentálního měření povrchové teploty obráběcího procesu soustružení. První experiment byl proveden na válcové součásti podélným soustružením. Druhý byl uskutečněn pomocí vnitřního soustružení na trubkové součásti. Výsledkem experimentu bude porovnání vlivu řezné rychlosti obrábění, vliv velikosti hloubky řezu, vliv tloušťky stěny u trubkové součásti v závislosti na vývoji teploty během obrábění. Dále bude uvedena nutná příprava na samotný experiment, která je z časového hlediska daleko náročnější na provedení.

#### Měřené součásti

Bude použito dvou typů součástí a to pro dva typy obráběcího procesu soustružení. První typ je polotovár ocelová válcová tyč o průměru 59 mm, délce 150 mm a materiálu 11 600 ČSN 42 6526. Druhý typ polotovaru bude ocelová trubka o průměru 57 mm, délce 130 mm s tloušťkou stěny 3 mm.

#### Měřicí zařízení

Pro měření bude využita tato měřicí technika. Zařízení pro bezkontaktní typ měření teploty tělesa termovizní kamera ThermaCAM SC2000. Teplotu okolí změříme termometrem YK-2001, vlhkost okolí vlhkoměrem YK-2001 TM.

#### Termovizní kamera ThermaCAM SC2000 od firmy FLIR

Termovizní kamera nám kromě naměřené teploty poskytne díky vizualizaci graficky znázorněné rozložení povrchových teplotních polí a vývoj teploty v závislosti na čase, a to v celém rozsahu oblasti snímané termovizní kamerou. Technické parametry kamery ThermaCAM SC2000 zobrazené na obrázku 3.1 jsou uvedeny v tabulce 3.1. Pro měření teploty u realizovaných experimentů je třeba použít předsádku 64/150, která se umístí na objektiv kamery. Předsádka nám umožní dosáhnout potřebného rozlišení u měření součástí o malých rozměrech, jak je dále řešeno v kapitole 3.1.5.

Tab. 3.1 Technické parametry termokamery FLIR SC2000 <sup>23</sup>

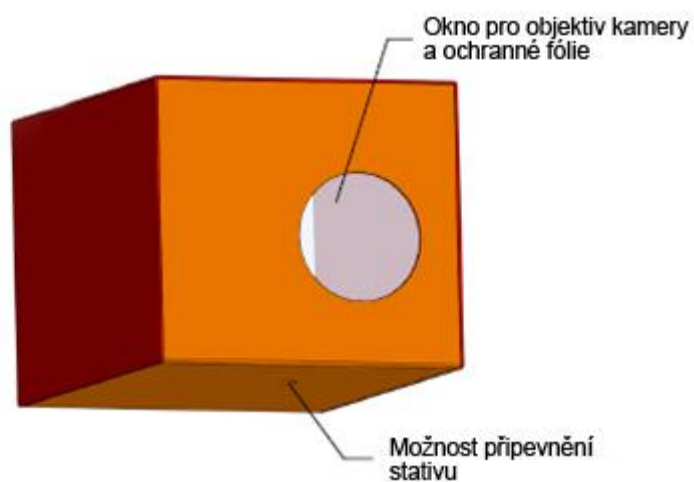
|  |   |
|--|---|
| <i>Rozsah měřených teplot objektu:</i> | -40 až +120 °C, rozsah 1<br>0 až +500 °C, rozsah 2<br>od 350 do +1500 °C, příslušenství                             |
| <i>Přesnost měření:</i>                | ± 2 %   |
| <i>Teplotní citlivost:</i>             | < 0.08 °C při teplotě objektu + 30 °C   |
| <i>Zorné pole (H x V):</i>             | 24° x 18° /0,5 m  |
| <i>Typ detektoru:</i>                  | FPA, nechlazený mikrobolometr<br>320 x 240 pixelů   |
| <i>Spektrální rozsah:</i>              | 7.5 - 13 mm, vestavěný filtr<br>pro "odříznutí" na 7.5 mm   |
| <i>Video výstup:</i>                   | Standard VHS nebo S-VHS   |
| <i>Hledáček:</i>                       | Barevný LCD (TFT)   |
| <i>Disk.jednotka PC-karty:</i>         | Jedna zásuvka pro PC-kartu Typu II nebo III.<br>Může být použita karta FLASH nebo hard-disk<br>(kompatibilní s ATA) |
| <i>Ukládání obrazu:</i>                | Plně dynamické, 14-ti bitové  |
| <i>Bateriový systém:</i>               | Jedna vyměnitelná baterie NiMH  |
| <i>Doba provozu:</i>                   | Normálně 2 hodiny (jedna baterie)   |
| <i>Okolní (pracovní) teplota:</i>      | -15 až + 50 °C  |
| <i>Okolní (skladovací) teplota:</i>    | -40 až + 70 °C  |
| <i>Krytí:</i>                          | Kovový kryt, IP 54  |
| <i>Uchycení na stativ:</i>             | 1/4" - 20   |
| <i>Hmotnost:</i>                       | 1.9 kg bez baterie<br>2.3 kg s baterií  |
| <i>Rozměry:</i>                        | 209 x 122 x 130 mm  |
| <i>Video kamera:</i>                   | 640 x 480 pixelů  |



Obr. 3.1 Termovizní kamera FLIR SC2000 <sup>23</sup>

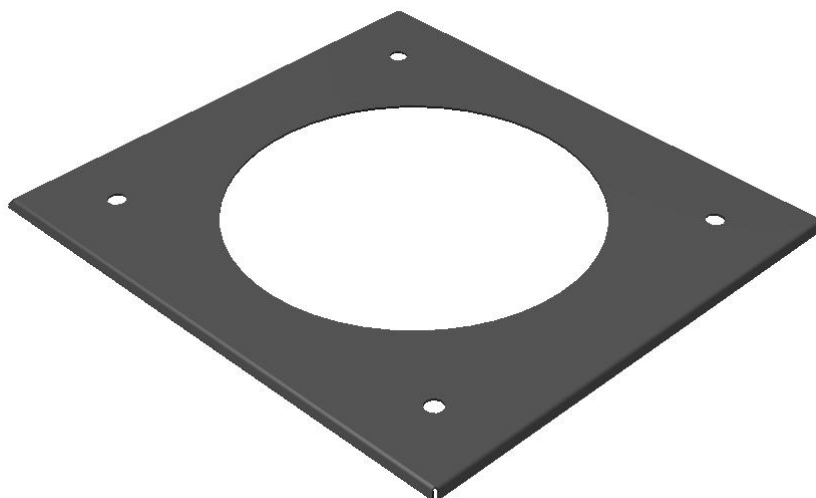
### Ochranný box

Pro naše použití bude využit ochranný box od Ing. Tomáše Frňky, který ho zpracoval ve své diplomové práci. Cílem je ho obohatit o další užitečné prvky. Jak je uvedeno v jeho práci <sup>14</sup> termovizní kamera ThermoCAM SC2000 od firmy FLIR patří do střední třídy a zaručuje zpracování z kvalitních tvrze-ných plastů a těsnících pryží. Zařízení je tedy vhodné pro časté použití do te-rénu a dokáže pracovat i v extrémních venkovních podmínkách, kde zvládá práci v nepřetržitém provozu a odolává prachu nebo vlhkosti. V některých pří-padech je však třeba IR kamerové zařízení zabezpečit proti mechanickému poškození nebo vniknutí vody a drobných částic pomocí speciálního ochran-ného pouzdra. Speciální pouzdra, která lze dokoupit k přístrojům, lze ovšem použít jen omezeně. Vysoké ceny a často omezené použití chránících zařízení nás nutí vyrábět vlastní pouzdra. V našem případě je potřeba termokameru zabezpečit proti vysokým teplotám a možnosti mechanického poškození díky dopadání třísky při obrábění nebo případné manipulaci. Jako materiál pouzdra bude použita hliníková slitina AlMg3 o tloušťce 2 mm. Materiál i tloušťka za-bezpečí plně ochrannou funkci a lehký hliníkový materiál minimálně změní hmotnostní a manipulační parametry kamery. <sup>14</sup>



Obr. 3.2 Původní 3D model ochranného pouzdra <sup>14</sup>

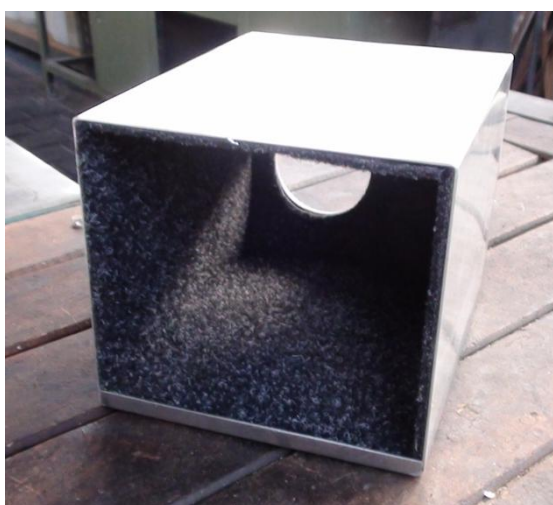
Pro realizaci experimentů bylo nutné navrhnout speciální uchycení ochranné fólie u otvoru určenému pro umístění objektivu. Navržené způsob se skládá ze dvou plechů obdélníkového tvaru, které jsou přichyceny k ochrannému boxu pomocí šroubů s křídlovou matkou pro snadnou manipulaci bez nutnosti použít jakéhokoliv nářadí. Na obrázku 3.3 je zobrazen jeden z použitých plechů jako vrchní kryt pro uchycení ochranného filtru.



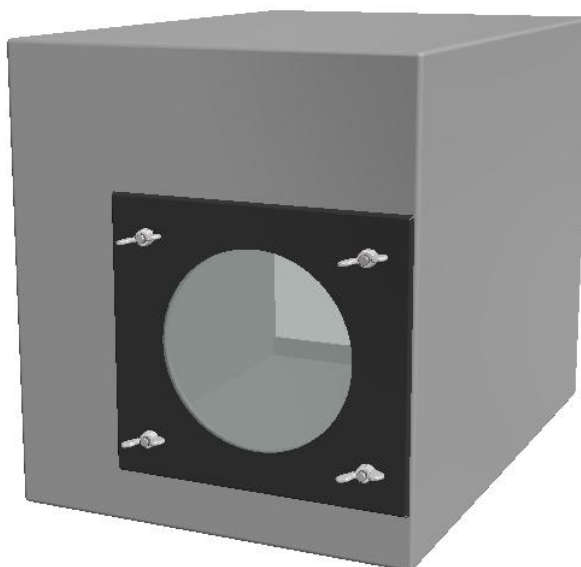
Obr. 3.3 3D model krytu pro přichycení ochranného filtru

Materiál použitých plechů je slitina hliníku AlMg3. Charakteristické vlastnosti materiálu jsou velmi dobrá odolnost proti korozi, dobrá svařitelnost a

vhodnost pro povrchové úpravy a barvení. Vnitřní prostor ochranného boxu je nutné opatřit vhodným materiálem, tak aby nedošlo k mechanickému poškození kamery v důsledku manipulace. Pro vyplnění vnitřních ploch postačí obyčejný koberec, který dostatečně zajišťuje ochranu kamery před případným poškozením. Koberec je připevněn na stěny ochranného boxu pomocí oboustranné lepicí pásky. Zhotovený ochranný box, kde je zobrazeno zpracování vnitřních prostorů, je vyobrazen na obr. 3.4 a na obr. 3.5 je umístění speciálního uchycení pro ochrannou fólii.



Obr. 3.4 Vnitřní prostory ochranného boxu



Obr. 3.5 3D model zobrazující speciální uchycení ochranné fólie

### 3.1 Příprava na měření termovizní kamerou FLIR SC2000

Pro korektnost celého měření se musí před samotným měřením správně připravit nastavení termovizní kamery a zajistit vhodné pracovní prostředí. Musí se stanovit správně emisivita měřeného objektu, kterou lze určit různými způsoby, jak bylo zmíněno v kapitole 1.4.1.

#### 3.1.1 Zapojení termovizní kamery

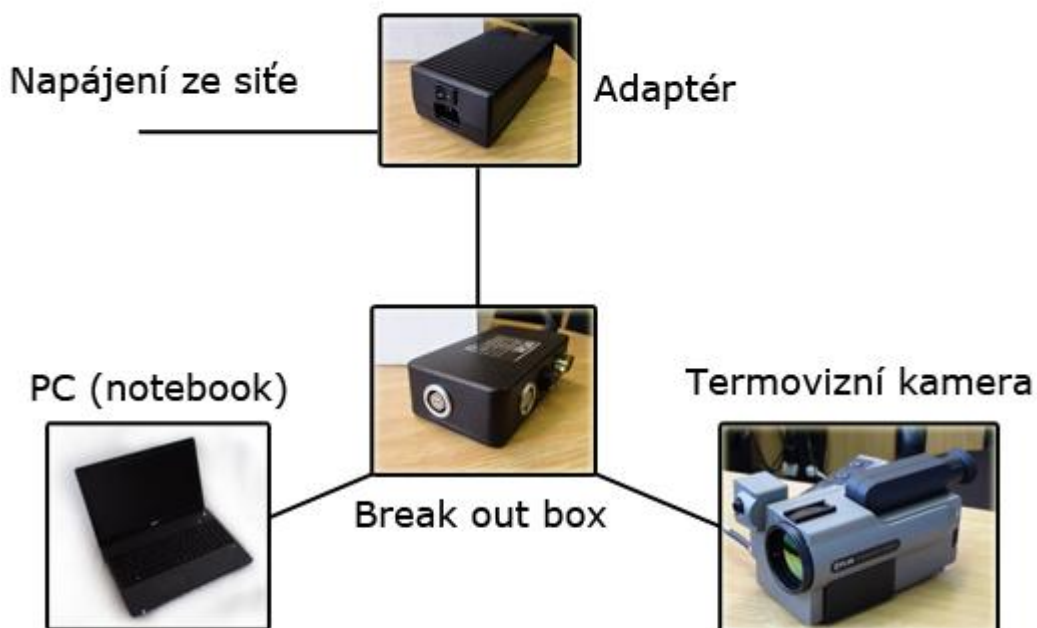
Během měření je využito externího zobrazovacího zařízení obrazovky počítače, který je s kamerou propojen pomocí PCMI karty. Na počítači je použito speciálního programu Researcher, který nám poskytuje snadné a rychlé ovládání kamery. Ovládání pomocí počítače a programu Researcher je možné měřit kamerou z bezpečné vzdálenosti a zároveň bez přítomnosti obsluhy během měření, nedochází k odrážení IR záření vyzařující z obsluhy na měřený objekt. Termovizní kamera byla připojena do sítě bez využití baterie. Ze sítě šlo napětí do adaptéru HiTRON HES61-11B, který nám převádí napětí z 220 V na 13,5 V. Z adapterů jde zapojení do BREAK OUT BOXU (panel s konektory pro zapojení počítače, kamery a externího monitorů) od společnosti FLIR SYSTEMS, ze kterého pokračují dva konektory, jeden vede do PC a druhý do kamery. Schéma zapojení termovizní kamery je zobrazeno na obrázku 3.6.

Tab. 3.2 Technické parametry přístroje HiTRON HES61-11B

| AC INPUT     | DC OUTPUT                      |
|--------------|--------------------------------|
| 100 - 240 V~ | 13,5 V -3,7 A<br><br>MAX. 55 W |
| 1,3 - 0,6 A  |                                |
| 60/50 HZ     |                                |
| -            |                                |

Tab. 3.3 Technické parametry přístroje BREAK OUT BOXU

| BREAK OUT BOX          |         |
|------------------------|---------|
| P/N                    | 194 257 |
| S/N                    | 3320199 |
| FLIR Systems AB Sweden |         |
| Made in Sweden         |         |



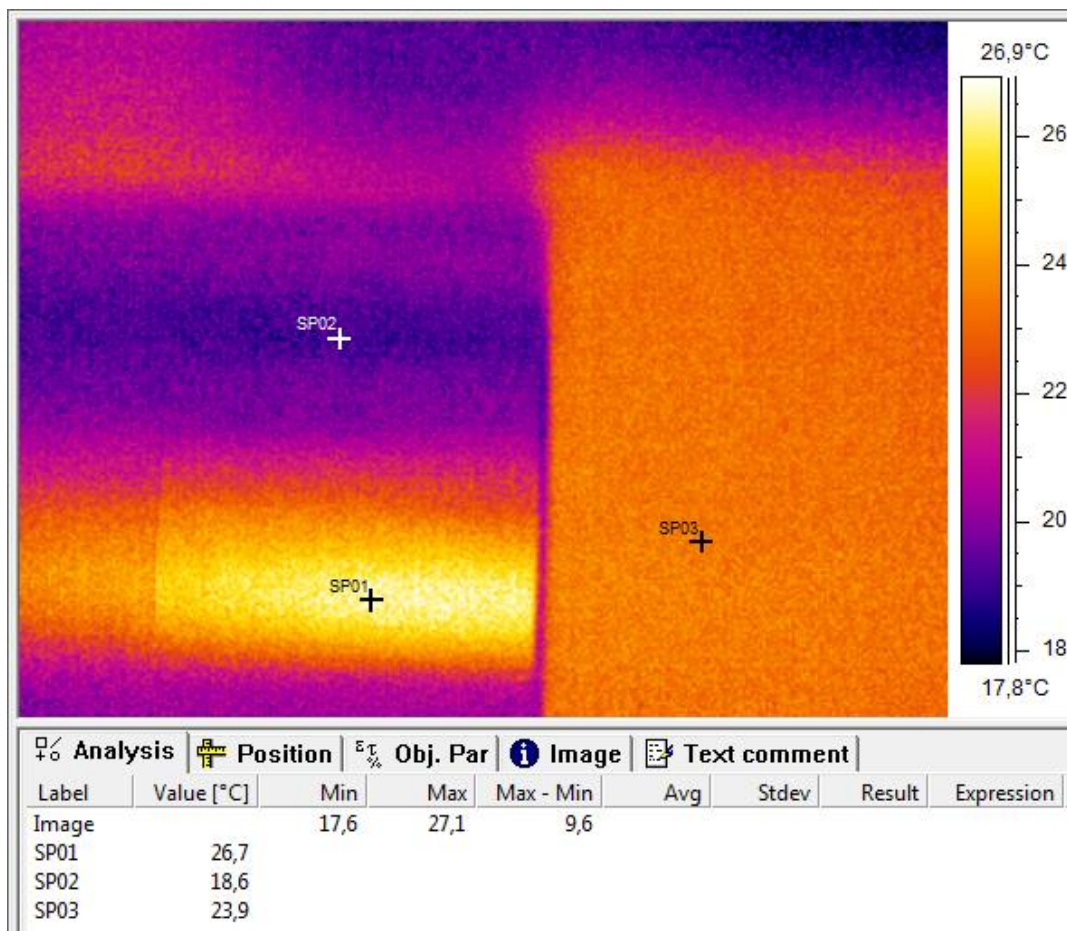
Obr. 3.6 Schéma zapojení termovizní kamery ThermoCAM SC2000

### 3.1.2 Stanovení emisivity měřeného objektu

Správné stanovení emisivity nám poskytne získání přesně naměřených hodnot. Pro dosažení konstantní hodnoty emisivity po celém povrchu bude použita speciální barva se známou emisivitou pro úpravu povrchu před bezkontaktním měřením teploty. V našem případě to bude typ ThermoSpray 800 s těmito parametry: <sup>20</sup>

- černá nevodivá sprejová barva,
- vysoká emisivita  $\varepsilon = 0,96$ ,
- odolná do vysokých teplot až 800 °C,
- odolná vůči otěru a chemickým látkám,
- jednoduchá a rychlá aplikace na měřený objekt,
- objem 400 ml. <sup>20</sup>

### Důvod proč použít speciální barvu ThermaSpray 800

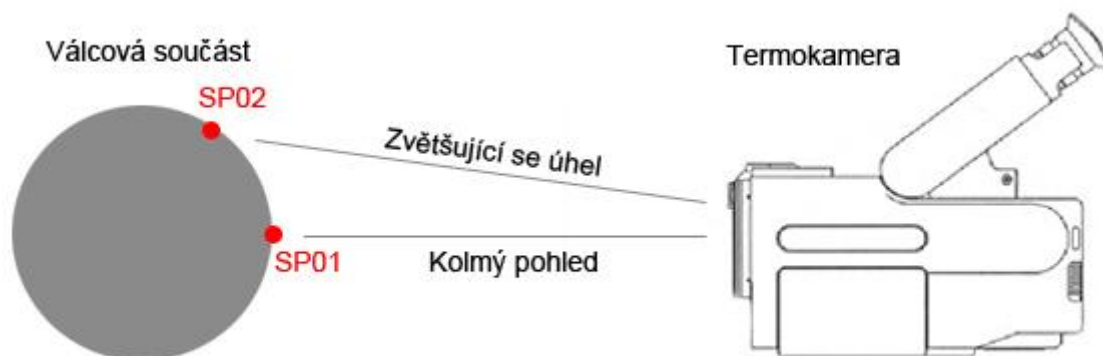


Obr. 3.7 Rozdílná naměřená teplota na válcové součásti vlivem rozdílného typu povrchu

Na obr. 3.7 můžeme pozorovat u válcové součásti teplotní rozdíl povrchu nastříkaného a nenastříkaného speciální barvou ThermaSpray 800 s hodnotou emisivity 0,96. Bod SP03 je umístěn na povrchu opatřeném speciální barvou a dosahuje teploty 23,9°C. Body SP01 a SP02 jsou umístěny na obrobené lesklé ploše, na které není speciální barva. Emisivita lesklých materiálů nabývá hodnot kolem 0,1 a konkrétně tabulková hodnota leštěné oceli je 0,07.<sup>23</sup> Teplota obou bodů dosahuje zcela odlišných hodnot v důsledku špatně určené emisivity. Hlavní rozdíl v teplotě u bodů SP01 a SP02 je v jejich poloze umístění na válcové součásti. Bod SP01 je umístěn na válcové ploše, která leží kolmo k objektivu termovizní kamery a teplota bodu je 26,7 °C. Bod SP02



díky tvaru měřené součásti je umístěn na válcové součásti viz obr. 3.8 a dosahuje teploty 18,6 °C. Z toho plyne, při zvětšujícím se úhlu měření od kolmého pohledu na měřenou součást klesá emisivita. Pro měřené součásti v procesu obrábění není vhodné stanovit emisivitu povrchu pouze podle tabulkových hodnot.



Obr. 3.8 Umístění bodu SP01 a SP02 vzhledem k válcové součásti

### 3.1.3 Zajištění vhodného pracovního prostředí

V kapitole 1.3.3 se řešil průchod infračerveného záření atmosférou. Pro náš experiment bude využita soustružnická dílna nacházející se na fakultě FSI VUT v Brně, která nám zajistí vhodné pracovní prostředí bez jakýchkoliv nevhodných plynů nacházejících se v ovzduší dílny. Chyby způsobené špatným průchodem infračerveného záření atmosférou nevzniknou. Další problém, který ovlivní měření, je použití procesní kapaliny během obráběcího procesu. Z toho to důvodu bude celé experimentální měření prováděno výhradně za sucha, bez využití procesních kapalin.

K ovlivnění měření dochází i v důsledku odrazu od operátora obráběcího stroje a obsluhy termovizní kamery, kteří stojí u měřeného objektu. V tomto směru je důležité, aby na měřený objekt nedopadaly žádné odrazy z okolí, proto musí být během měření zajištěn dostatečný prostor bez rušivých vlivů. Mezi tyto vlivy se řadí lidé a jejich pohyb kolem měřené součásti během probíhajícího měření. Experiment prováděn na soustruhu SV 18 bez možnosti počí-

tačového řízení vyžaduje přítomnost obsluhy během obráběcího procesu. Je tedy nutné zajistit odstínění obsluhy od měřené součásti.

Možné řešení odstínění obsluhy stroje případně obsluhy kamery může řešit ochranný kryt vyznačený červenou barvou, který je zobrazený na obrázku 3.10. V případě použití tohoto řešení je nutné pro účinné odstínění momentálně průhledný kryt tvořen plexisklem nahradit materiálem, který nepropustí IR záření např. plech. Po dovření ochranného krytu na obrázku 3.10 žlutý rámeček, dojde k odstínění i obsluhy pohybující se za kamerou. Umístění kamery je na obrázku 3.10 znázorněno modrou barvou.



Obr. 3.10 Odstínění měřené součásti od rušivých elementů <sup>30</sup>

### 3.1.4 Volba optimální ochranné fólie

Na experimentu při zjišťování propustnosti IR záření vybranými materiály byla provedena spolupráce s kolegou Bc. Michalem Kmentou, který tuto problematiku využil při obráběcím procesu frézování.

Ing. Tomáš Frňka ve své diplomové práci <sup>14</sup> srovnával použití alternativních ochranných filtrů, jakož to náhradu za drahé standardně dodávané IR okna od firmy HAWK. Z vyhodnocení testovaných ochranných filtrů není ani jeden druh pro náš případ vyhovující. Při měření se bude teplota přibližně pohybovat v rozsahu od 25 °C do 80 °C. Nejvhodnější testovaný filtr (speciální fólie NV 45) byl schopen zaznamenat teplotu až od hodnoty 51 °C. <sup>14</sup> Z tohoto důvodu byla připravena řada běžně dostupných materiálů (tabulka 3.4) a pomocí

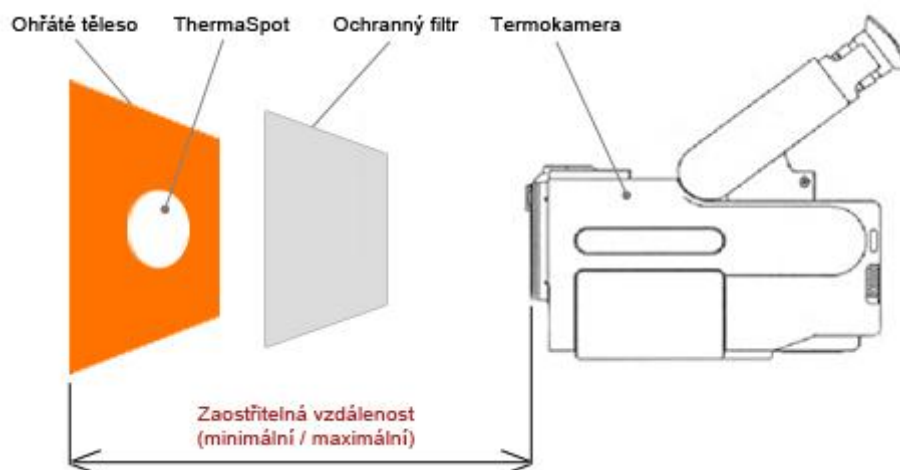
experimentálního zjištění se určila jejich propustnost v IR spektru. Názorně se ukázalo, že i když je objekt pro naše oko zcela průhledný, neznámá to, že je zcela průhledný pro termovizní kameru. Například běžná kancelářská fólie dosahovala propustnost pouze 46 % oproti tomu celá bílá a neprůhledná igelitová taška dosahovala propustnosti 87 %.

### Postup stanovení propustnosti IR záření jednotlivých materiálů

Okolní podmínky u experimentu byly naměřeny a zaznamenány v programu Researcher 2001. Teplota okolí dosahovala hodnot 30,2 °C, relativní vlhkost byla naměřena 23,5 %. Jako zdroj tepla pro experiment bude ohřátá součást. Na součást se umístí speciální samolepící štítek ThermaSpot o známé emisivitě  $E = 0,96$ . Tento štítek slouží k úpravě povrchu před bezkontaktním měřením teploty. Kamerou ThermaCam SC2000 změříme teplotu zahřáté součásti. Poté mezi kameru a zahřátou součást vložíme vybraný materiál filtru a opětovně změříme teplotu zahřáté součásti. Porovnáním těchto dvou naměřených hodnot zjistíme propustnost zvoleného materiálu. Schéma experimentálního měření je vyobrazeno na obrázku 3.11. a naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tab. 3.4 Zjištěné hodnoty propustnosti vybraných materiálů

| Název materiálu                  | Teplota bez ochranné fólie [°C] | Teplota s ochrannou fólií [°C] | Propustnost v IR spektru [%] |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Mikrotenový sáček - jedná vrstva | 85,5                            | 81,4                           | 95                           |
| Potravinářská fólie              | 80,7                            | 76                             | 94                           |
| Mikrotenový sáček - dvě vrstvy   | 84,5                            | 76,5                           | 91                           |
| Eurofolie - jedna vrstva         | 85,9                            | 74,8                           | 87                           |
| Igelitová taška                  | 85,3                            | 74,1                           | 87                           |
| Eurofolie - dvě vrstvy           | 86,3                            | 66,6                           | 77                           |
| Fólie A4 - kancelářská           | 86,9                            | 39,9                           | 46                           |



Obr. 3.11 Schéma experimentálního zjištění propustnosti filtrů

### Volba vhodného materiálu pro ochranný filtr

Během procesu soustružení dochází k neustálému odlétávání třísek. Z důvodu polohy umístění termovizní kamery, kdy je mezi místem řezu (místo tvorby třísky) a kamerou umístěna měřená součást, by mělo docházet k sporadickému, ne-li žádnému kontaktu ochranného filtru s třískou. Dle optimální propustnosti a vhodných parametrů materiálů je vyhovující jako filtr použít potravinářskou fólii s propustností 94 % s lepšími mechanickými vlastnostmi než má mikrotenový sáček jednovrstvý, který dosahuje propustnosti 95 %. Odolnost proti porušení má potravinářská fólie lepší než jednovrstvý mikrotenový sáček.

Na závěr pokusem s kapkou vody zjistíme, zda voda rovněž ovlivní naměřenou hodnotu teploty. Naměřená teplota zdroje byla 79 °C, po nanesení kapky vody na speciální štítek ThermoSpot klesla teplota na 61,1 °C. Kapka vody tedy dosahuje propustnosti 77,3 %. Po odpaření vody z povrchu nebylo zaznamenáno žádné tepelné ovlivnění měřeného vzorku. Při použití většího množství vody dosahovala propustnost mnohem nižších hodnot. Z toho plyne, že se zvyšujícím množstvím vody klesá její propustnost.

### 3.1.5 Umístění termovizní kamery vůči měřenému objektu

Na tomto experimentu se opět podílel kolega Bc. Michal Kmenta. Termovizní kamera by měla nejlépe směřovat kolmo k měřenému objektu z důvodu

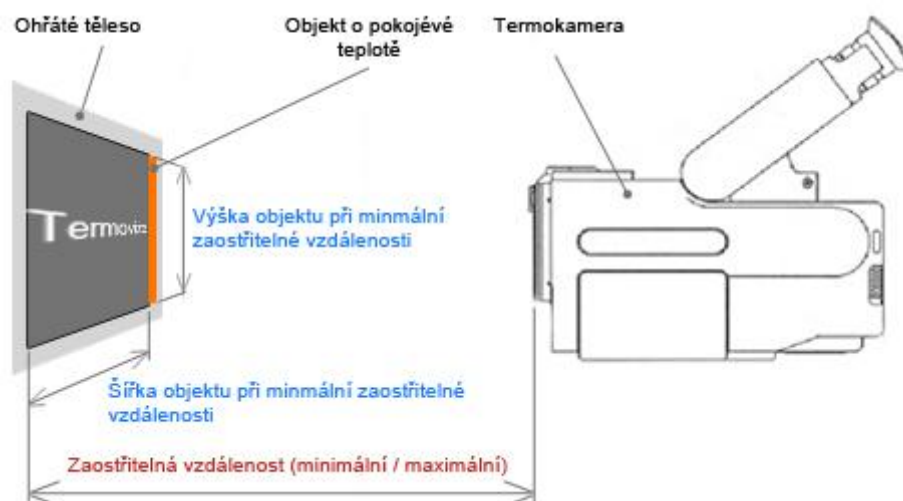
zajištění co nejpřesnějších hodnot měření. Vzdálenost objektivu kamery od měřeného objektu byla experimentálně stanovena na 90 mm, což je minimální zaostřovací vzdálenost objektivu s použitou předsádkou 64/150. Pro dosažení potřebné vzdálenosti a výšky od měřeného objektu byl vytvořen přípravek, který je umístěn na pohyblivém loži soustruhu, kde se nachází i nožová hlava s upnutým nástrojem. Jelikož přípravek s termovizní kamerou je umístěn na pohyblivém loži soustruhu, dosáhneme tak vzájemně zajištěného pohyby termovizní kamery s nástrojem. Umístění přípravku na soustruhu můžete vidět na obrázku 3.12. Použití při měření je zobrazeno na obrázku 3.15.



Obr. 3.12 Umístění přípravku na lože soustruhu SV 18

### Experimentální zjištění maximální a minimální zaostřovací vzdálenosti

Pro určení zaostřovací vzdálenosti termovizní kamery ThermaCAM SC2000 s objektivem 25°, tak s využitím předsádky 64/150 bylo využito experimentálního měření. Schéma měření je zobrazeno na obrázku 3.13. Průběh určení minimální zaostřovací vzdálenosti byl proveden pomocí ohřátého tělesa na teplotu vyšší, než je teplota okolí. Ohřáté těleso obsahovalo nápis, který nám nadále pomáhal. Nastavením termovizní kamery na minimální zaostření a následným posouváním ohřátého tělesa určíme vzdálenost, při které je nápis nejostřejší a tím zjistíme minimální zaostřovací vzdálenost. Ke stanovení maximálních rozměrů obrazu, který je termovizní kamera schopna zachytit při použití minimální zaostřitelné vzdálenosti bylo použito pomocného objektu o pokojové teplotě, který díky teplotnímu rozdílu byl na obrazovce zřetelně viditelný. Následně stačilo pouze odečíst vzdálenost části pomocného objektu zobrazeného na obrazovce kamery. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.5. Obdobné měření bylo provedeno i při určení maximální zaostřovací vzdálenosti.



Obr. 3.13 Schéma měření zaostřitelné vzdálenosti

Tab. 3.5 Experimentálně zjištěné hodnoty při maximální a minimální zaostřitelné vzdálenosti

|                                  | Minimální zaostřitelná vzdálenost |                         | Maximální zaostřitelná vzdálenost |                         |
|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
|                                  | Objektiv                          | Objektiv +<br>předsádka | Objektiv                          | Objektiv +<br>předsádka |
| Vzdálenost měřeného objektu [mm] | 270                               | 90                      | Nekonečno                         | 160                     |
| Šířka měřeného objektu [mm]      | 110                               | 40                      | -                                 | 65                      |
| Výška měřeného objektu [mm]      | 80                                | 28                      | -                                 | 48                      |

Z tabulky 3.5 vyplývá, že nám předsádka umožní zobrazit při minimální zobrazovací vzdálenosti plochu o rozměrech 40 x 28 mm a to s maximálním rozlišením 320 x 240 pixelů, které umožňuje kamera ThermaCAM SC2000. Tím nám umožňuje získat přesnější měření. Se samotným objektivem by zobrazovací plocha byla 110 x 80 mm, ale při stejném rozlišení 320 x 240 pixelů. Tedy větší obraz, ale horší rozlišitelná schopnost měřené součásti.

### 3.1.6 Nastavení vstupních hodnot pro bezdotykové měření

Před samotným experimentem je důležité si zaznamenat hodnoty okolních podmínek a podmínek pro nastavení měřícího zařízení viz tabulka 3.6. Zde náleží sem hodnoty teploty okolí, vlhkosti prostředí, vzdálenost měřícího zařízení od měřeného objektu, zvolený měřící teplotní rozsah a zjištěná emisivita měřeného povrchu.

Tab. 3.6 Naměřené a stanovené hodnoty před samotným měřením

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| Teplota okolí                                 | 23,2 °C                        |
| Relativní vlhkost                             | 36%                            |
| Použitá ochranná fólie                        | Potravinářská fólie            |
| Použitý zaznamenávací a vyhodnocovací program | Researcher 2001                |
| Zvolený měřicí rozsah                         | 0 - 500 °C                     |
| Snímkovací frekvence                          | 50 Hz                          |
| Použitý objektiv                              | 25 ° s použitím před-<br>sádky |
| Zvolená emisivita                             | 0,96                           |
| Vzdálenost                                    | 0,1 m                          |

Software pro zachycení a vyhodnocení termogramů Reascher 2001 nám nabízí volbu tří měřících teplotních rozsahů, první je -40 – 120 °C, druhý 0 – 500 °C a poslední 350 – 1500 °C. Je možné měřit teplotu až do 2000 °C, ale pouze za použití dodatečného příslušenství.

### 3.2 Experimentální měření povrchové teploty při vnitřním soustružení

V této části je řešeno experimentální zjištění vlivu tloušťky stěny na vývoj teploty při vnitřním soustružení. Experiment byl proveden ve třech opakovaných za konstantních řezných podmínek obrábění, ale s rozdílnou tloušťkou stěny. U tohoto experimentu je použita trubková součást o průměru 56 mm a tloušťce stěny 3 mm. Parametry byly vymezeny, jak je uvedeno v tabulce 3.7, s ohledem na použitý řezný nástroj, dle doporučených parametrů stanovených výrobcem. Z hlediska tolerance  $\pm 10$  ot/min při nastavení otáček obrobku u soustruhu SV 18 byla zanedbána změna otáček při změně tloušťky stěny součásti. Otáčky součásti jsou vypočítané pomocí středního průměru 54,4 mm stanoveného z maximální hodnoty průměru 57 mm a minimální hodnoty průměru 53 mm. Podle vzorce (3.1) pro zvolenou řeznou rychlost 80 m/min vychází otáčky součásti na  $470 \text{ min}^{-1}$ .

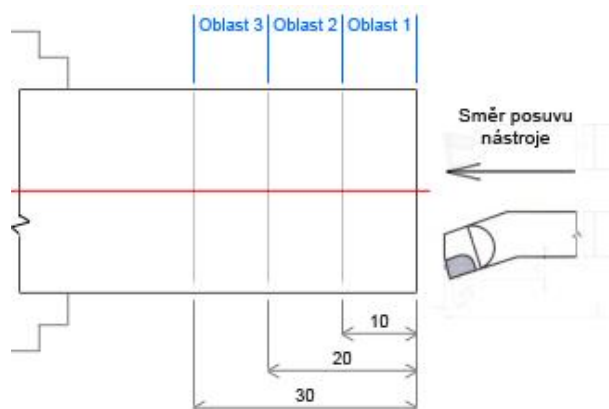


$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi[-] \cdot D[\text{mm}] \cdot n[\text{min}^{-1}]}{1000[-]} = [\text{m/min}] \quad (3.1)$$

Tab. 3.7 Nastavené řezné parametry pro vnitřní soustružení

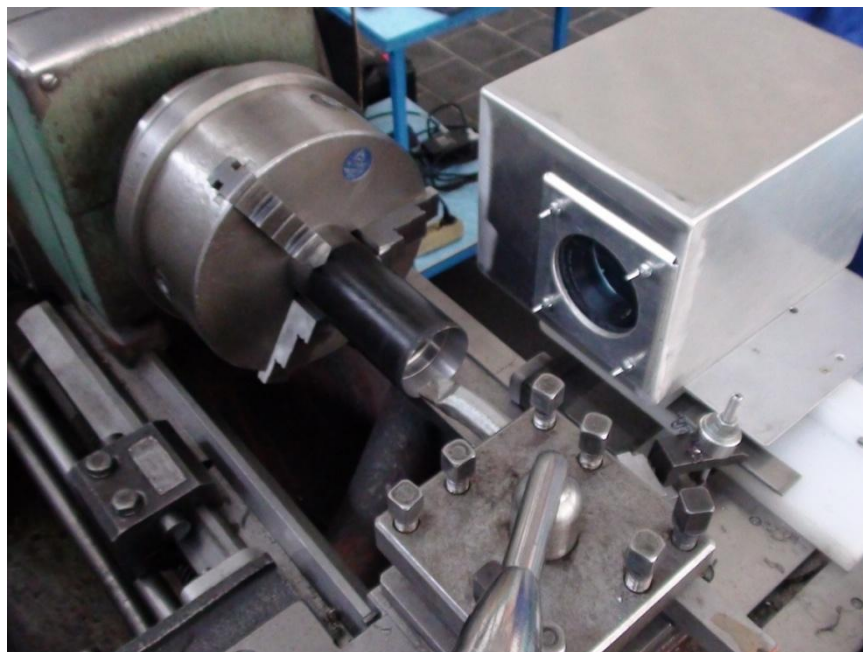
| Měření          | $v_c[\text{m/min}]$ | $n[\text{min}^{-1}]$ | $s[\text{mm}]$ | $a_p[\text{mm}]$ | $f_{ot}[\text{mm}]$ |
|-----------------|---------------------|----------------------|----------------|------------------|---------------------|
| <b>Oblast 1</b> | 1                   |                      | 3              |                  |                     |
|                 | 2                   | 80                   | 470            | 2,5              | 0,1                 |
|                 | 3                   |                      | 2              |                  |                     |
|                 | 4                   |                      | 1,5            |                  |                     |
| <b>Oblast 2</b> | 5                   |                      | 3              |                  |                     |
|                 | 6                   | 80                   | 470            | 2,5              | 0,1                 |
|                 | 7                   |                      | 2              |                  |                     |
|                 | 8                   |                      | 1,5            |                  |                     |
| <b>Oblast 3</b> | 9                   |                      | 3              |                  |                     |
|                 | 10                  | 80                   | 470            | 2,5              | 0,1                 |
|                 | 11                  |                      | 2              |                  |                     |
|                 | 12                  |                      | 1,5            |                  |                     |

Pro oblast 1 probíhalo měření, jak je uvedeno na obrázku 3.14 od levé stěny součásti do délky 10 mm a byly provedeny celkem čtyři měření. Během jednoho měření na stejné délce se postupně odebírala tříska 0,5 mm od hodnoty tloušťky stěny 3 mm do hodnoty tloušťky stěny 1 mm. Následovalo měření v oblasti 2, které probíhalo ve vzdálenosti 10 mm od okraje součásti do délky 20 mm a nakonec poslední oblast 3 ve vzdálenosti od okraje součásti 20 mm do délky 30 mm.



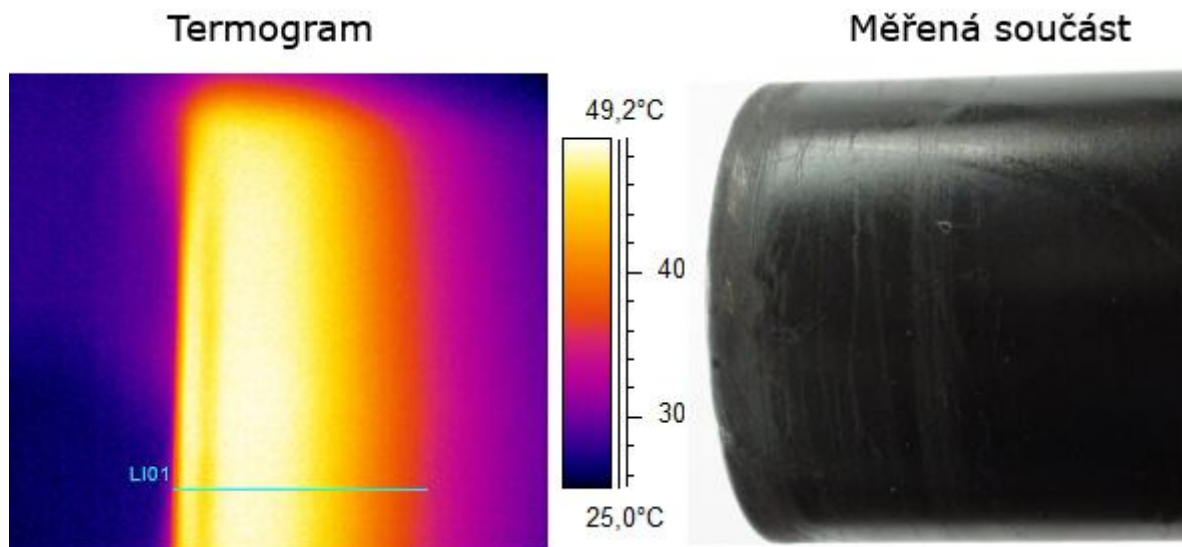
Obr. 3.14 Vyznačené měřené oblasti na součásti při pohledu se shora

Během měření byl použit ochranný box, ale jeho využití bylo potřeba pouze u měření v oblasti 1, kdy tříška ještě odlétávala směrem k termovizní kameře. U dalších měření už tříška odcházela pouze částečně, a to v přímém směru ven z obráběné součásti, při kterém nedocházelo k ohrožení kamery. Ve větší míře zůstala tříška uvnitř součásti a vyťahovala se až po dokončení měření.



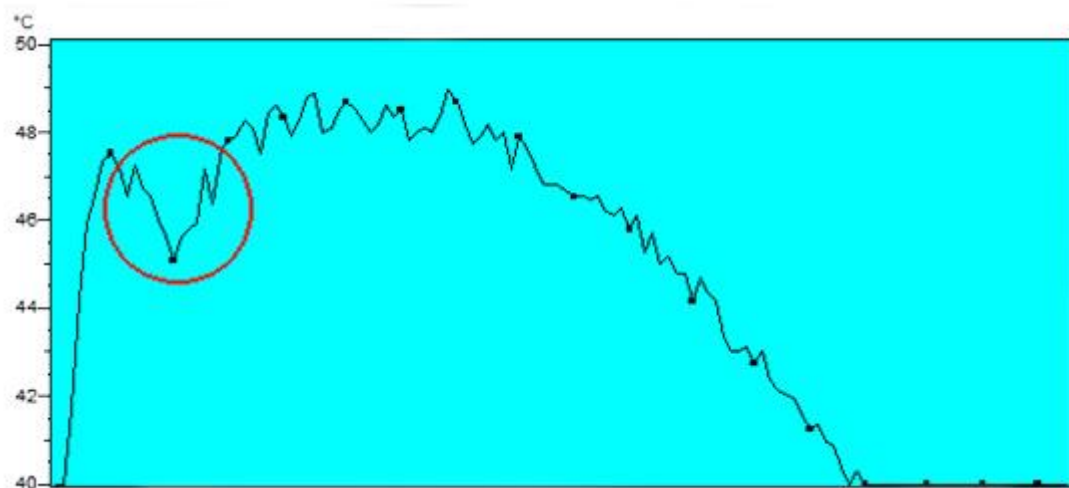
Obr. 3.15 Měření povrchové teploty při vnitřním soustružení

U oblasti 1 v důsledku pozice měření na samotném okraji součásti docházelo při odlétávání třísky k zachycení teplot třísky během měření, což nám znehodnocovalo měření. Měření ovlivňoval další problém, který způsobovala tříška a její namotávání na okraj součásti, kdy docházelo k poškrábání povrchu (obr. 3.16) opatřeného speciální barvou. Poškrábaný povrch nedosahoval stejné emisivity, jako povrch nepoškrábaný a v některých částech povrchu byla speciální barva zcela odstraněna. Následně docházelo k prosvítávání základního materiálu s rozdílnou hodnotou emisivity. Rozdílné hodnoty emisivity na povrchu měřeného tělesa mají vliv na přesnost měření.



Obr. 3.16 Poškrábaný povrch měřené součásti a jeho zobrazení na termogramu

Obrázek 3.16 názorně ukazuje, jak se zobrazí poškrábaný povrch s nanesenou speciální barvou na termogramu. Rozdíl teploty způsobený poškrábaným povrchem je zobrazen pomocí profilové čáry LI01 na obrázku 3.17, kde je na označeném místě patrný skok teploty. Přibližný teplotní rozdíl mezi poškrábaným a nepoškrábaným povrchem je 2,5 °C.

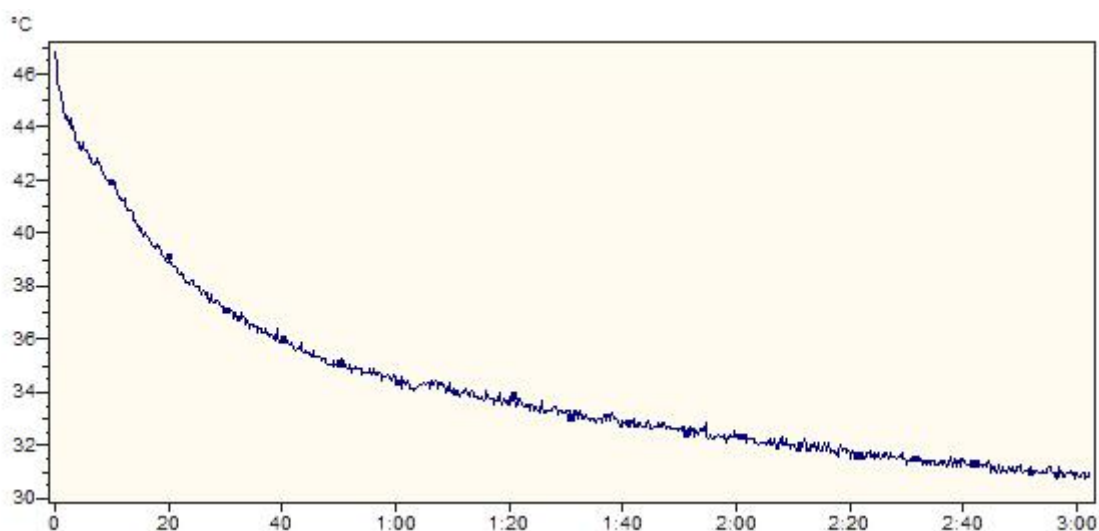


Obr. 3.17 Profilová čára LI01 z termogramu na obrázku 3.18

Poslední problém, který znehodnocoval měření, byla teplota zahřátého místa po předchozím měření. V důsledku malého množství objemu materiálu

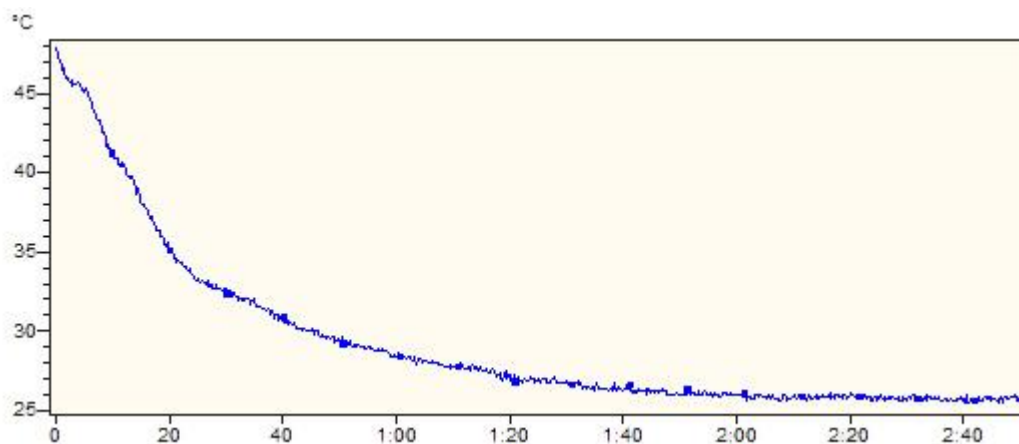
obráběné součásti docházelo během obrábění k rychlému ohřevu, ale pomalému ochlazení na původní hodnotu. Bylo tedy nutné po každém měření součást ochladit zpět na původní teplotu, aby bylo možné naměřené hodnoty srovnávat. Z důvodu uvedených chyb bylo opakování číslo jedna posouzeno jako měření bez reálných výsledků a tedy čistě zkušební.

Při měření oblasti 2 byly experimentálně zjišťovány doby nutné pro vychladnutí měřené oblasti na původní teplotu. Stále otáčející se součást byla v prvním případě chlazena pouze na volném vzduchu obrázek 3.18, ve druhém případě s využitím stlačeného vzduchu foukaného na součást obrázek 3.19.



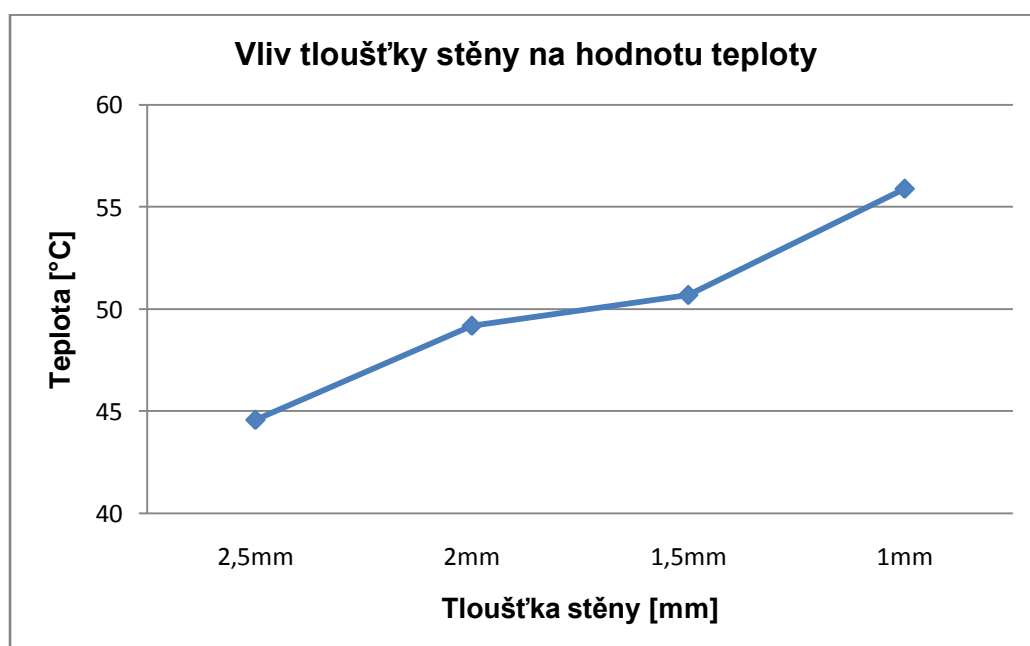
Obr. 3.18 Graf chladnutí na volném vzduchu

Při chlazení na volném vzduchu probíhalo chlazení za stálého chodu stroje a rotující součásti, ale bez nástroje v řezu. Doba nutná pro vychladnutí na původní teplotu okolo 26 °C je větší než 3 minuty. V době 3 minut byla naměřena teplota rovna 31,3 °C. Při chlazení zahřáté součásti stlačeným vzduchem za rotující součásti obrázek 3.22 došlo k zchlazení součásti na teplotu 26 °C do 2 minut a následně další 1 minutu teplota klesala velice pomalu, kdy po 1 minutě poklesla pouze na teplotu 25,5 °C.



Obr. 3.19 Graf chladnutí pomocí stlačeného vzduchu

U měření oblasti 3 odstraněním všech ovlivňujících vlivů bude zjištěna závislost tloušťky stěny při obrábění na vývoj teploty. Tuto závislost lze pozorovat na obrázku 3.20. Každé měření začínalo na teplotě  $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  s tolerancí  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato tolerance nám nějak neovlivní měření a je tedy vyhovující. Zajištění shodné počáteční teploty řeší chlazení pomocí stlačeného vzduchu. Celé měření probíhalo hluboko uvnitř trubky, kdy nedocházelo k zaznamenání odletujících třísek.



Obr. 3.20 Vliv tloušťky stěny na hodnotu teploty

Z grafu vyplývá závislost tloušťky stěny součásti na hodnotu teploty. Se snižující se tloušťkou stěny roste teplota. Rozdíl tloušťky stěny o 1 mm způsobí rozdíl teploty na povrchu obrobku o 11 °C. Teplota v místě řezu může tedy teoreticky vzrůst skoro o 100 °C, pokud se bude uvažovat cca 10% přechod tepla z místa řezu do obrobku.

### 3.3 Experimentální měření povrchové teploty při podélném soustružení

V této části je řešeno experimentální zjištění vlivu řezné rychlosti a hloubky řezu na vývoj teploty při soustružení. Experiment byl modifikován dle již provedeného experiment, který je uveden ve zdroji <sup>24</sup>. Původní experiment je zaměřen na porovnání vzniku tepla na rozdílných hodnotách průměru součásti při stejné řezné rychlosti. V našem případě byl navržen experiment u součásti se stejným průměrem roven 59 mm, ale rozdílnými řeznými rychlostmi a hloubkou řezu. Řezné parametry byly stanoveny s ohledem na použitý řezný nástroj (viz tabulka 3.8), a to dle doporučených parametrů stanovených výrobcem.

Tab. 3.8 Nastavené řezné parametry

| Měření | $v_c$ [m/min] | $n$ [ot/min] | $a_p$ [mm] | $f_{ot}$ [mm] |
|--------|---------------|--------------|------------|---------------|
| 1      | 80            | 430          | 2          | 0,14          |
| 2      | 120           | 650          | 2          | 0,14          |
| 3      | 160           | 860          | 2          | 0,14          |
| 4      | 80            | 430          | 1          | 0,14          |
| 5      | 120           | 650          | 1          | 0,14          |
| 6      | 160           | 860          | 1          | 0,14          |

Jak už bylo zmíněno v kapitole 2.1 je nutné použít ochranný box, aby nedošlo k poškození termovizní kamery odletujícími třískami. Při měření se utvářely dva zcela rozdílné druhy třísek. Dlouhá nedělená tříška obrázek. 3.21, která nám díky svému nahromadění na nástroji poškrábala obráběnou plochu opatřenou speciální barvou.



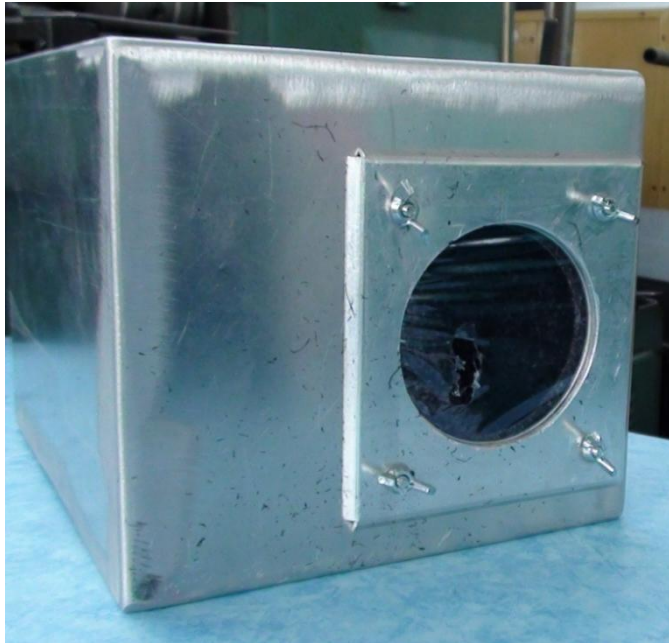
Obr. 3.21 Dlouhá nedělená tříska

Druhá tříska, která se utvářela během obrábění, je drobná článkovitá tříska zobrazena na obrázku 3.22. Tato tříska může poškodit objektiv díky své rychlosti a směru letu.



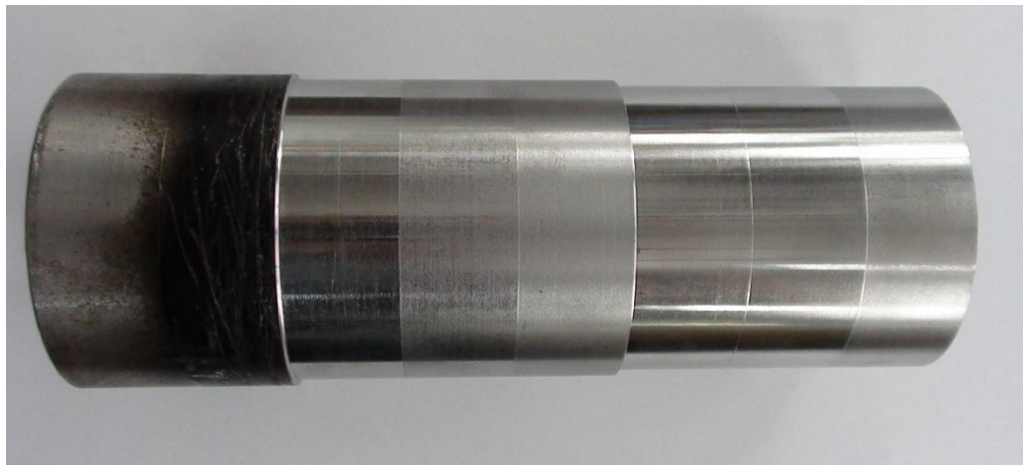
Obr. 3.22 Krátká dělená tříska

Během měření číslo 3 došlo k protržení ochranného filtru obrázek 3.23. I když došlo k protržení ochranného filtru, přes to splnil svůj úkol a ochránil objektiv kamery od poškrábání či případného poškození. Následně bylo nutné před dalším měření ochranný filtr vyměnit.



Obr. 3.23 Protržený ochranný filtr

Na už obrobenej součásti obrázek 3.24 lze pozorovat patrné rozdíly kvality opracovaného povrchu v závislosti na řezné rychlosti při zachování konstantního posuvu.

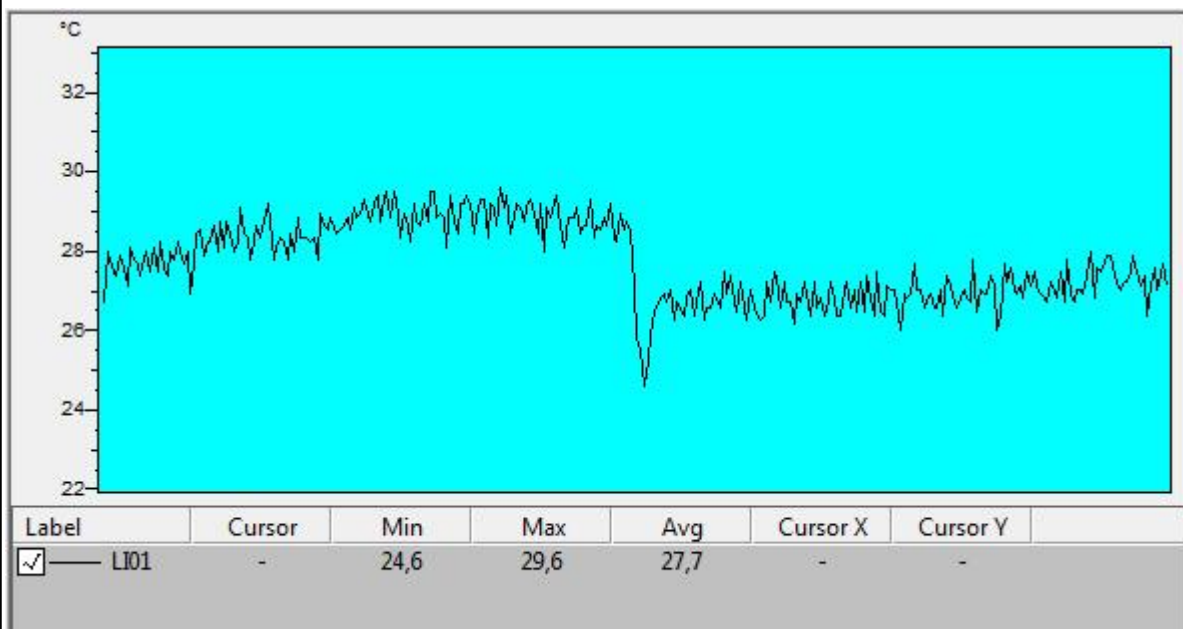


Obr. 3.24 Obrobená válcová součást

Z obrázku 3.25 je patrný rozdíl měřených teplot na povrchu obrobeném a obráběném, kde je dán rozdíl stanovenou emisivitou. Rozdíl těchto teplot je pouze kolem 1 °C. Emisivita byla stanovena pro obráběný povrch 0,96, ale obrobená plocha vykazuje jiné parametry povrchu s emisivitou rozdílných hod-

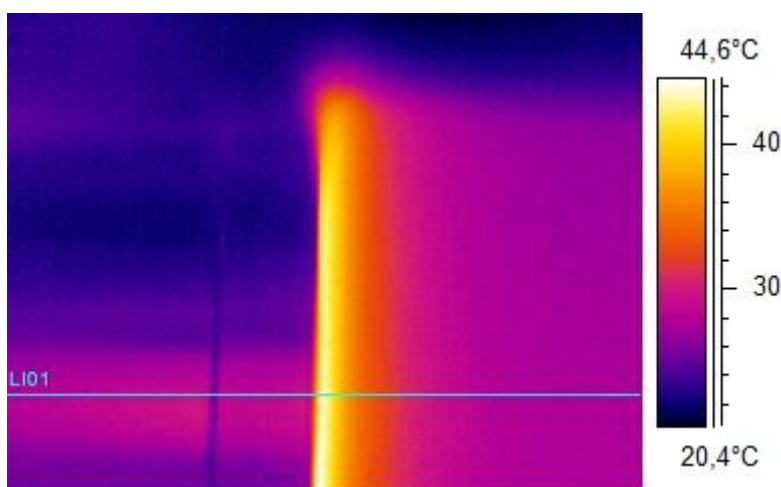


not. Teplota naměřená na obrobené ploše neodpovídá reálné teplotě. Taktěž teplota na obrobené a obráběné ploše neodpovídá reálné teplotě, protože je naměřená teplota nižší o hodnotu propustnosti ochranného filtru.

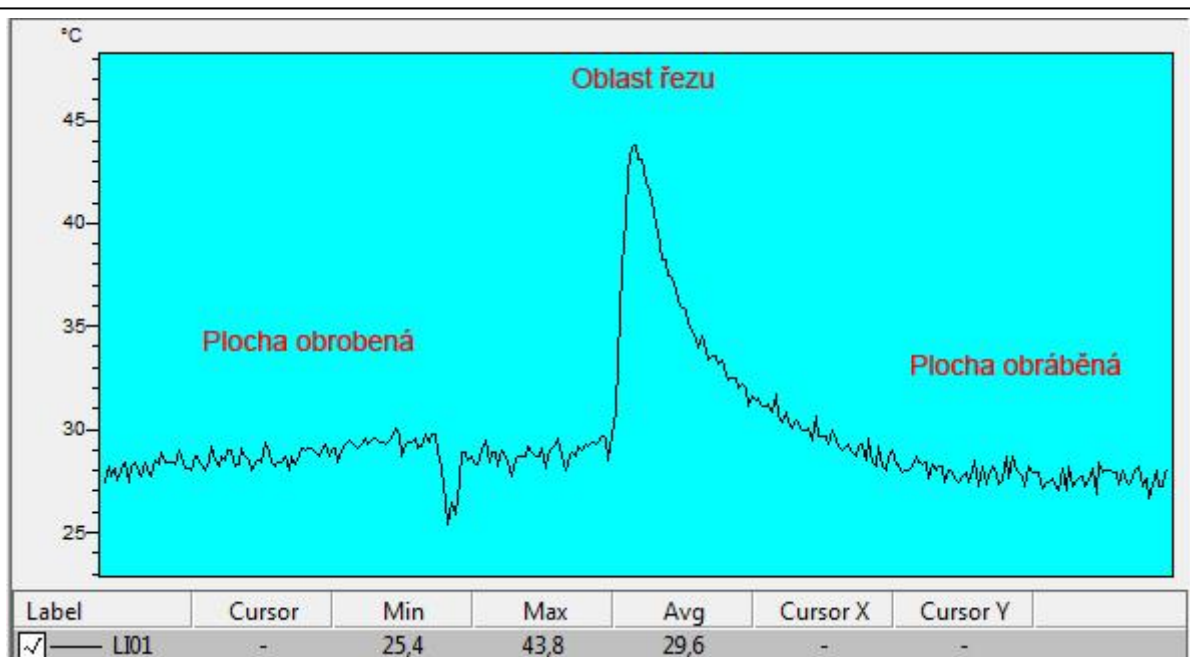


Obr. 3.25 Rozdíl měřených teplot na ploše obrobené a obráběné vyjádřený pomocí profilové čáry vytvořené v programu Researcher

Porovnání ploch můžete vidět na obrázku 3.26, kde jsou plochy zobrazeny v IR spektru a na dalším obrázku 3.27 je zobrazena profilová čára přímky LI01 v závislosti na teplotě.



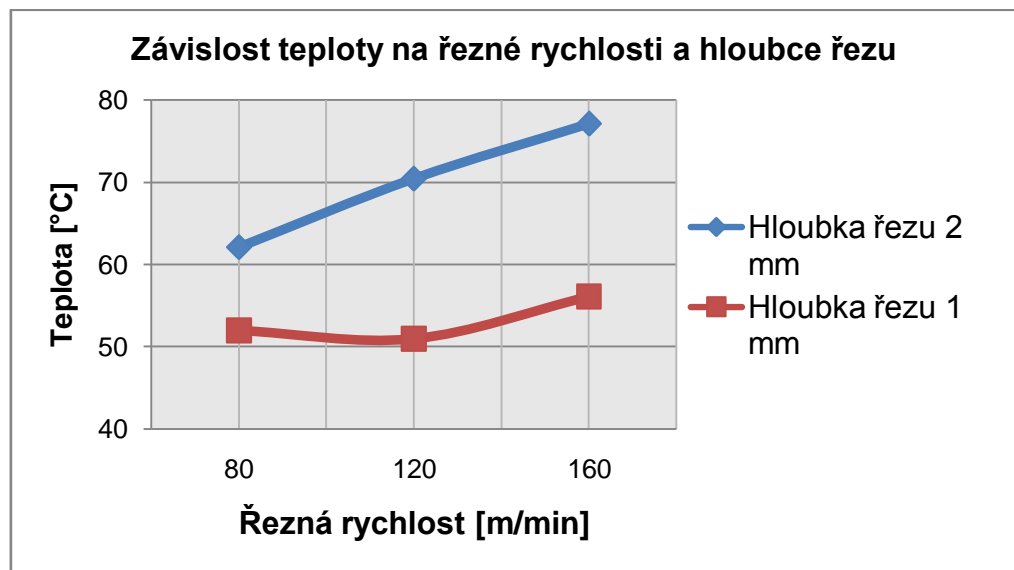
Obr. 3.26 Plochy v IR spektru



Obr. 3.27 Porovnání naměřené teploty povrchu u plochy obrobené, obráběné a přechodové pomocí profilové čáry LI01 vytvořené v programu Researcher.

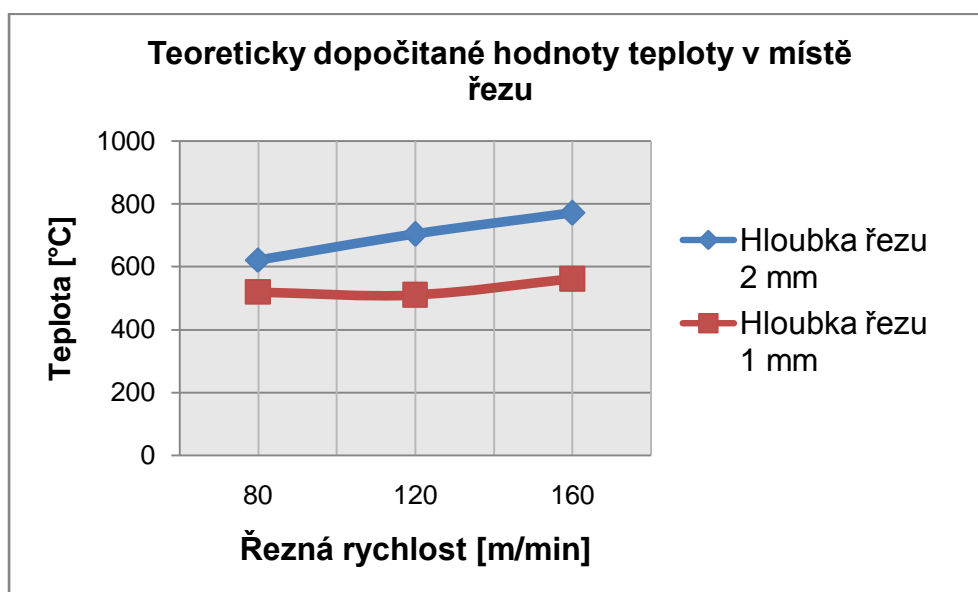
Skok na profilové čáře v obrázku 3.27 v oblasti plochy obrobené je způsobený přechodem na součásti o velikosti 0,5 mm. Zároveň lze pozorovat tepelné ovlivnění plochy obráběné v důsledku vysoké teploty v místě řezu. Tato teplota se dál šíří ve směru obrábění do oblasti obráběné plochy.

V důsledku zahřívání obrobku během soustružení docházelo od začátku měření k postupnému nárůstu teploty, kdy se teplota na začátku a na konci obrábění liší až o 25 °C. Naměřené maximální hodnoty teploty se vyskytovaly vždy u konce měření. U měření číslo 6 se nám navíc podařilo zaznamenat teplotu třísky, která dosahovala hodnot kolem 140°C.



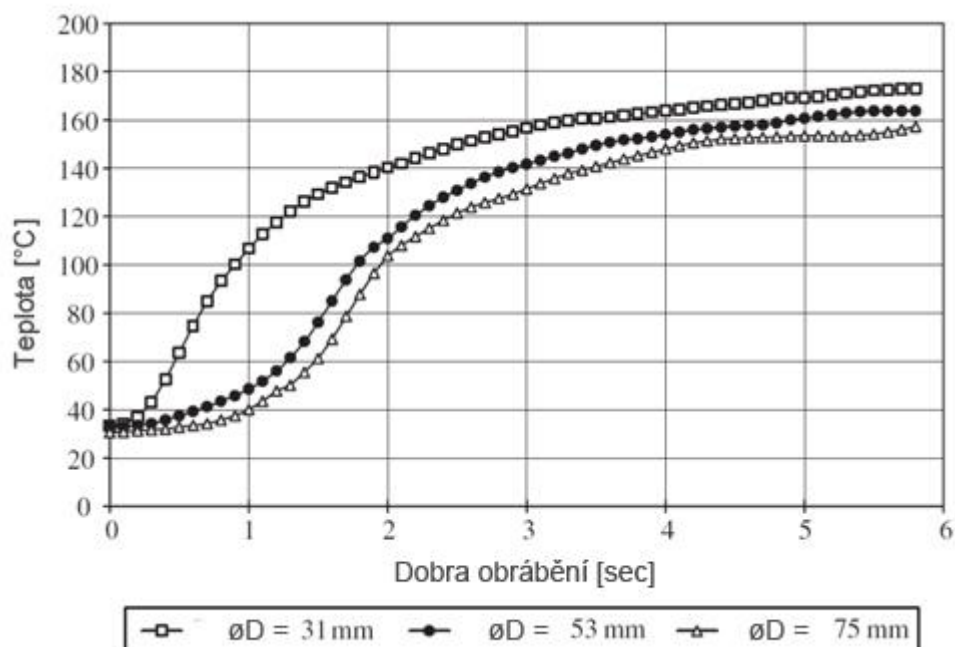
Obr. 3.28 Závislost řezných podmínek na hodnotu povrchové teploty obrobku (řezné podmínky:  $\varnothing D = 59$  mm,  $f = 0,14$  mm/ot a obrábění na sucho)

Na obr. 3.28 je zobrazen graf s přepočítanými hodnotami dle použitého filtru. Z grafu vyplývá závislost řezné rychlosti a hloubky řezu na vývoj teploty. Jak hloubka řezu, tak velikost řezné síly ovlivňuje teplotu. Při hloubce řezu 1 mm nedochází u změny řezné rychlosti k razantnímu rozdílu teplot. Mezi řeznou rychlostí 80 m/min a 160 m/min, což je vlastně dvojnásobná řezná rychlost, je teplotní rozdíl kolem 4 °C. Naopak při hloubce řezu 2 mm je už teplotní rozdíl mezi těmito rychlostmi kolem 15 °C. Pokud tedy budeme teoreticky uvažovat, že obrobek přejímá z místa řezu cca 10 % teploty a dojde u obrobku k nárůstu teploty o 15 °C, tak v místě řezu teoreticky dojde k nárůstu o 150 °C.

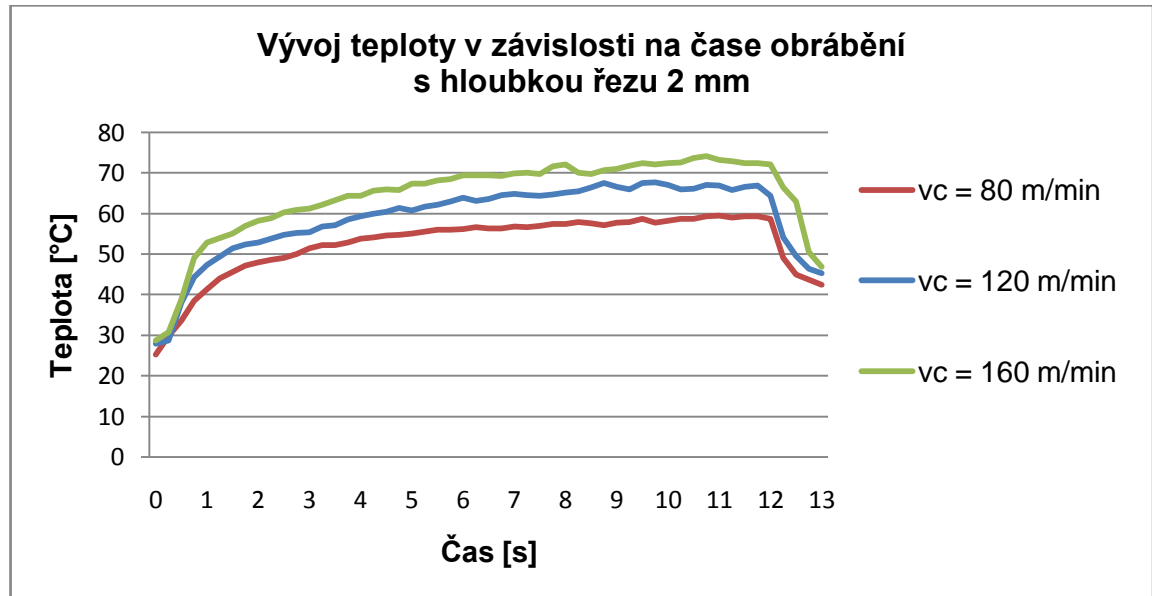


Obr. 3.29 Teoreticky dopočítané hodnoty teploty v místě řezu z hodnot naměřených na obrobku, při uvažování že obrobek přejímá 10 % teploty z místa řezu

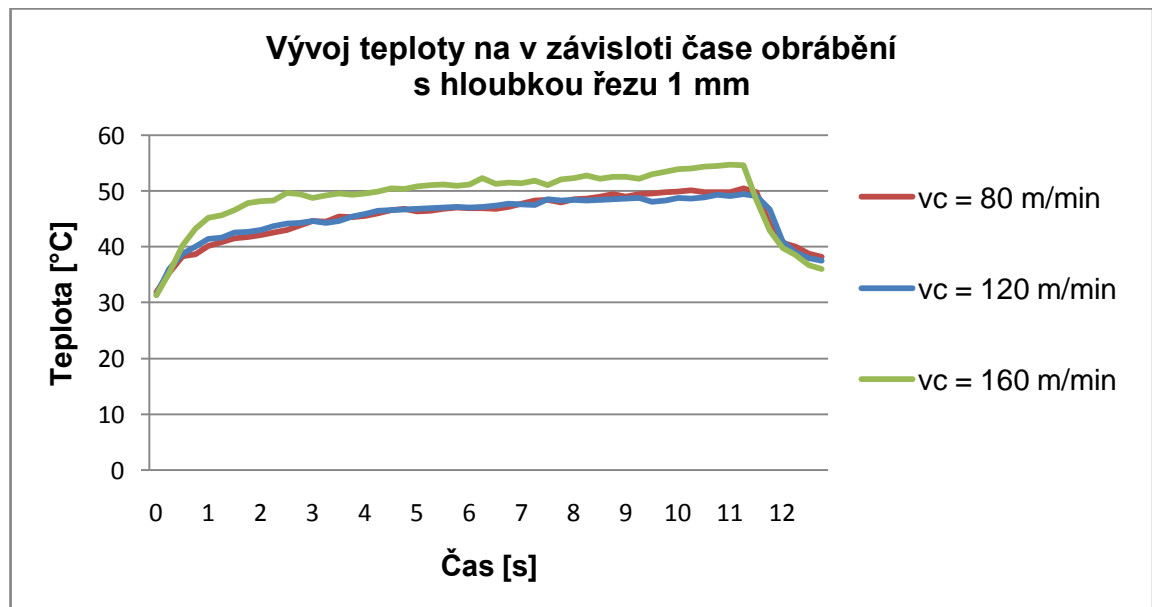
Jak je uvedeno ve studii <sup>24</sup> a na obrázku 3.30 závislost teploty nástroje na době obrábění je srovnatelný se závislostí teploty obrobku na době obrábění, viz obrázek 3.31 a obrázek 3.32.



Obr. 3.30 Závislost teploty nástroje na době obrábění u součásti s rozdílnými průměry  $D=31\text{ mm}$ ,  $53\text{ mm}$ ,  $75\text{ mm}$  (řezné podmínky:  $a_p = 2\text{ mm}$ ,  $v_c = 20\text{ m/min}$ ,  $f_{ot} = 0,15\text{ mm/ot}$  a obrábění na sucho) <sup>24</sup>



Obr. 3.31 Závislost teploty obrobku na době obrábění s konstantním průměrem součásti a konstantní hloubkou řezu (řezné podmínky:  $a_p = 2$  mm,  $\varnothing D = 59$  mm,  $f_{ot} = 0,14$  mm/ot a obrábění na sucho)



Obr. 3.32 Závislost teploty obrobku na době obrábění s konstantním průměrem součásti a konstantní hloubkou řezu (řezné podmínky:  $a_p = 1$  mm,  $\varnothing D = 59$  mm,  $f_{ot} = 0,14$  mm/ot a obrábění na sucho)

Na začátku obrábění dochází k prudkému nárůstu teploty mezi první a druhou sekundou. Dále nastupuje pomalý vývoj teplot, který neustále roste až do konce obrábění v důsledku postupného zahřívání součásti. Jakmile nastane ukončení obráběcího procesu, dojde k rychlému poklesu teploty. Z obou grafů vyplývá, že jak řezná rychlost, tak průměr obráběné součásti má vliv na velikost hodnoty teploty při obrábění. Se zmenšujícím průměrem součásti, tak se zvyšující řeznou rychlostí roste teplota.

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V dnešní době dochází k častému nahrazení dotykových teploměrů teploměry bezdotykovými, ať už je to pyrometr nebo termovizní kamera. Důvodem této změny je snižující se cena a technologický vývoj měřících zařízení pro bezkontaktní měření povrchových teplot. Pro měření teploty nástroje u obráběcího procesu soustružení se v převážné míře používaly termočlánky. V dnešní době je tato metoda postupně nahrazována měřením pomocí termovizních kamer. Podle zdrojů<sup>32, 33</sup> se ceny termovizních kamer od společnosti FLIR, pro oblast strojírenství pohybují v rozmezí od 25 tis. do 1 mil. Kč. Cena je závislá na požadovaném použití, kdy pro základní diagnostiku a údržbu průmyslových podniků stačí kamera v ceně 25 tis. Kč. Kamera v ceně 1 mil. Kč je určena převážně pro energetickou společnost nebo výrobní závod. Tyto přístroje nám díky nejnovějším technologiím a svojí univerzálnosti přinášejí řadu možností a využití. Relativně vysoká cena se může vrátit s využitím diagnostiky a údržby zařízení.

Použitou kameru ThermaCAM SC2000 od firmy FLIR lze přirovnat k modelu FLIR T335, který má velice podobné parametry, nabízí jen modernější technologie. Například funkci obraz v obraze, dotykový barevný LCD displej o velikosti 3,5", teplotní citlivost  $< 0,05$  °C. Cena modelu FLIR T335 se pohybuje kolem 270 tis. Kč s DPH.

### 4.1 Přehled trhu nabízených termovizních kamer

Zde bude uvedeno rozdělení termovizních kamer podle firmy FLIR pro oblast strojírenství a elektrotechniku. Podle<sup>32, 33</sup> začlenění kamer do čtyř cenových kategorií s uvedením stručného popisu. Hlavní rozdíl v cenách jednotlivých modelů je dán nabízenými měřícími funkcemi (bod, oblast max/min, izoterma) a typu detektorů.

**Kategorie – low cost (25 – 70 tis. Kč s DPH)**

FLIR i3, i5 a i7 – Nejmenší, nejlehčí a cenově nejdostupnější termovizní kamery na trhu. Snadné ovládání bez nutnosti předchozích zkušeností. Dosáhnete kvalitních snímků, které vám ihned poskytnou potřebné informace o naměřené teplotě. Maximální rozlišení IR obrazu 120 x 120 pixelů. <sup>8</sup>



Obr. 4.1 Termovizní kamera FLIR i5 <sup>8</sup>

**Kategorie – standart (70 – 200 tis. Kč s DPH)**

FLIR E-série – Tato série je vhodná pro prediktivní údržbu a plánované kontroly elektrických a mechanických systémů, pro zajištění provozu při maximální účinnosti a bezpečnosti s minimální spotřebou energie. Maximální rozlišení IR obrazu 320 x 240 pixelů. <sup>8</sup>



Obr. 4.2 Termovizní kamera FLIR E-série <sup>8</sup>



**Kategorie – profi (200 – 750 tis. Kč s DPH)**

FLIR T-série byla speciálně vyvinuta pro průmyslové prostředí. Ergonomicky navržené pro snadnou manipulaci s jednoduchým použitím. Díky výměnným objektivům lze kameru použít jak na krátké, tak i na delší vzdálenosti.

FLIR T600-série – Kombinace ergonomie a flexibility T-série s vysokou kvalitou obrazu P-série. T600-série nabízí ostrý IR obraz s rozlišením 640 x 480 pixelů, na kterém lze vidět nejmenší detaily. Nabízí LCD dotykový obraz pro jednoduché a komfortní ovládání. <sup>8</sup>



Obr. 4.3 Termovizní kamera a) T-série, b) T600-série <sup>8</sup>

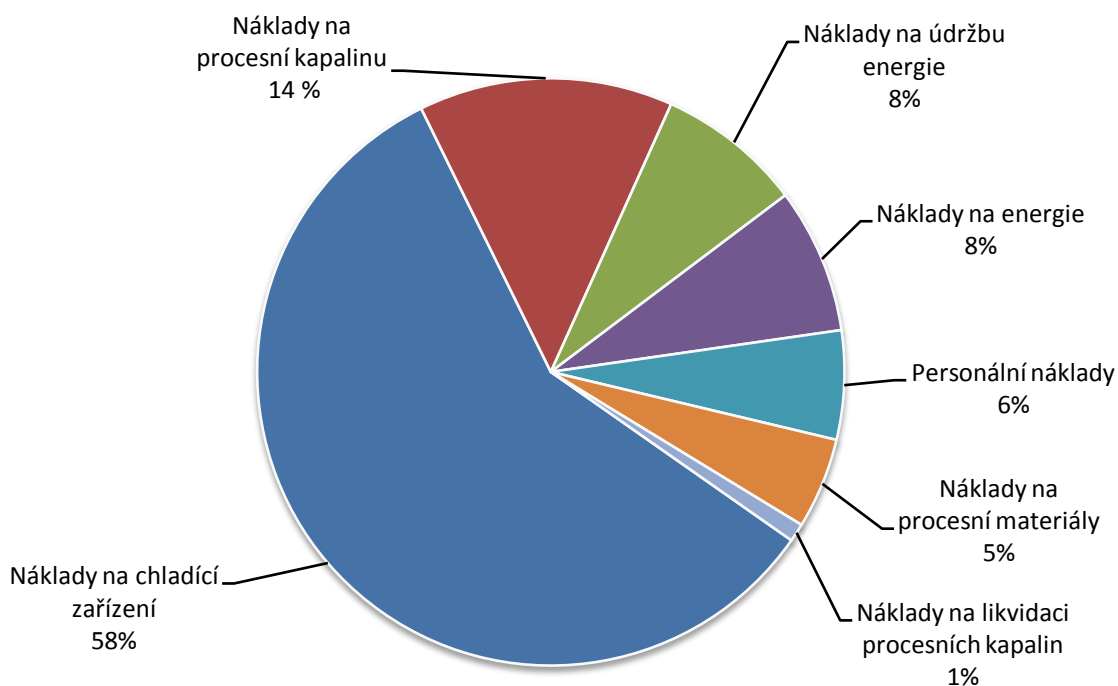
**Kategorie – High-end (750 tis. Kč s DPH a výš)**

FLIR P-série – Určená pro profesionální využití, kde si jsou vědomi výhodami, které tato technologie přináší a dokáží je náležitě využít. Jedná se o energetické společnosti, výrobní závody a pro vědu a výzkum. Kamera je vhodná pro náročné podmínky díky vysoce odolnému hořčíkovému tělu. Nabízí nejlepší teplotní citlivost <math><30 \text{ mK}</math> (8

Obr. 4.4 Termovizní kamera FLIR P-série <sup>8</sup>

## 4.2 Ekonomické hodnocení obráběcího procesu

Při obráběcím procesu je vývoj teploty nejvíce závislý na stanovených řezných podmínkách, popřípadě na způsobu chlazení. Jak je uvedeno v literatuře <sup>9</sup>, tak neustály tlak na snižování výrobních nákladů a cen výrobků i celosvětové ekologické trendy vedou k rozvoji moderních technologií třískového obrábění. Metoda vysokorychlostního obrábění (HSC) podporuje nejen snahu zvýšit efektivitu technologie třískového obrábění, podporuje i cestu suchého obrábění. Mezi hlavní výhody lze zařadit snížení tepelného namáhání řezného nástroje i obrobku v důsledku zvýšení odvodu tepla třískou. Dále pak odpadající náklady na pořízení procesní kapaliny a následně její likvidaci. <sup>9</sup> Studie<sup>25</sup> provedla průzkum na Německém automobilovém průmyslu, ze kterého vychází výše nákladů spojených s výrobními náklady na jeden obrobek. Procesní kapaliny zde zaujímají hodnotu v rozmezí 7 – 17 %, náklady na nástroje představují pouze 2 – 4 % a ostatní náklady tvoří 79 – 91 %. Na obrázku 4.5 je zobrazeno rozložení nákladů související s použitím procesních kapalin.



Obr. 4.5 Rozložení nákladu při požití procesních kapalin <sup>25</sup>

Ekonomické faktory, jako prostředek k hodnocení technologického procesu, zahrnují podstatné investiční a provozní náklady hlavních a pomocných procesů a další ekonomická a organizační hlediska (produktivita, využitelnost materiálů, výnosy hlavního procesu, použitelnost druhotných surovin, zisk z procesů ochrany životního prostředí) <sup>16</sup>

### 4.3 Náklady na měření termovizní kamerou

Bude se jednat pouze o teoretické stanovení nákladů pro bezkontaktní měření povrchové teploty v obráběcím procesu. Pořizovací cena je ve větší míře odvozená od možnosti využití, které nám tyto měřicí přístroje přinášejí.

V tabulce 4.1 jsou uvedeny náklady na přístroje a zařízení potřebné pro uskutečnění měření povrchové teploty bezkontaktním způsobem. Cena termovizní kamery je v dnešní době srovnatelná typem FLIR T335 o ceně 270 tis. Kč s DPH. Nachází se zde přístroje pro určení hodnot okolních podmínek, speciální barva pro stanovení emisivity měřeného objektu, počítač (notebook) a ochranný box. Cena ochranného boxu vychází na 1000 Kč s DPH za použitý

materiál. Cena ochranného filtru je v našem případě téměř zanedbatelná, protože využijeme z celkového množství nakoupeného materiálů maximálně 1 %. Ceny potravinářských fólií se pohybují kolem 80 Kč s DPH za 250 mm širokou a 150 m dlouhou fólii. Cena využití potravinářské fólie dosahuje pouhou 1 Kč. Při použití standardně dodávaných IR oken (ochranný filtr) vhodných pro obráběcí proces lze uvažovat typ C od firmy HAWK s propustností v IR spektru 96 % a s tepelnou odolností materiálu do +250 °C. Cena tohoto filtru je 8400 Kč s DPH. <sup>14</sup> Zanedbatelná je i cena měřených součástí, cena ocelové trubky použité pro experiment je 150 Kč/m a válcované kruhové oceli 500 Kč/m. Po přepočtu na rozměry použitých měřených součástí je cena ocelové trubky 20 Kč s DPH a cena kruhové tyče 75 Kč s DPH. Ovládání a záznam dat je řešen pomocí počítače (notebooku) jednak z důvodu umístění termovizní kamery do ochranného boxu, taky pro ukládání velkého množství dat. Pro potřebu programů si vystačíme i s notebookem pro kancelářské využití v hodnotě kolem 10000 Kč s DPH. Dále by bylo potřeba započítat školení obsluhy pro termovizní měření v průmyslu, které stojí kolem 9500 Kč s DPH.

Tab. 4.1 Cena přístrojů, materiálu, služeb k uskutečnění měření

| BEZKONTAKTNÍ ZPŮSOB MĚŘENÍ TERMOVIZNÍ KAMEROU |                             |
|---|-----------------------------|
| Potřebné příslušenství měření:                | Orientační cena s DPH [Kč]: |
| Termovizní kamera                             | 270000                      |
| Speciální barva ThermaSpray 800               | 360                         |
| Sonda vlhkoměr YK-200PRH                      | 1900                        |
| Sonda IR teploměr YK-200PIR                   | 1700                        |
| Ochranný box pro kameru                       | 1100                        |
| Ochranný filtr pro objektiv (vlastní)         | 1                           |
| Náklady na měřené součásti                    | 95                          |
| Školení termovizní měření v průmyslu          | 9500                        |
| Počítač (notebook)                            | 10000                       |
| <b>CELKOVÁ CENA s DPH</b>                     | <b>294656</b>               |

Celková cena za měření je z 92 % dána náklady na měřicí přístroj, 3 % náklady na školení a počítač (notebook), ostatní náklady jsou zanedbatelné.

Využití termovizní kamery<sup>19</sup> k dalším účelům s cílem získat zpět původní investici, popřípadě dosáhnout zisku. V dnešní době se termovizní kamery využívají při výzkumu a vývoji, diagnostice a údržbě zařízení, strojů a přístrojů, nebo při zateplení staveb, kdy cena termovizního měření obvodového pláště u administrativních či průmyslových staveb v rozsahu až 20-ti termovizních snímků stojí 5300 Kč s DPH. Termovizní měření obvodového pláště u rodinného domu (neomezený počet termovizních snímků) za cenu 2200 Kč s DPH. Vypracování protokolu o termovizním měření v ceně 250 Kč / snímek.

U dalších měření v jiných oblastech než je stavebnictví, se účtuje za termovizní měření dle požadavku objednatele v rozsahu 30-ti termovizních snímků a doby měření nepřekračující 1 hodinu cena 5300 Kč s DPH.

Například při pořizovací ceně termovizní kamery 270 tis. Kč s délkou životnosti minimálně 2 roky (doba záruky). Je nutné pro návratnost investice provést za rok minimálně 26 termovizních měření administrativních či průmyslových staveb nebo 62 termovizních měření rodinných domů nebo vypracovat 540 protokolů o termovizním měření.

Další finanční zdroje lze získat včasnou diagnostikou, která nám může ušetřit náklady spojené se servisem. Tyto náklady se odvíjejí od hodnoty měřeného zařízení.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo provedení experimentu měření povrchové teploty obrobku při obráběcím procesu soustružení. Porovnání vlivu řezných podmínek na vývoj povrchové teploty obroku při obráběcím procesu.

V důsledku odletující třísky je nutné zabezpečit ochranu termovizní kamery před poškozením. Bylo tedy využito už částečně zpracovaného ochranného boxu, ale bylo potřeba navrhnout uchycení ochranného filtru pomocí speciálního krytu, pro připevnění ochranného filtru před okno určené pro objektiv. Z důvodu přechodu 5 - 10 % tepla z místa řezu do obrobku se na povrchu obrobku naměří pouze hodnoty teplot v desítkách (30 - 80) °C. Je tedy nutné volit ochranný filtr takového materiálu, který bude schopný odletující třísky zabránit poškození objektivu termovizní kamery a zároveň bude dosahovat vysoké (> 90%) propustnosti IR spektra. Jako vyhovující materiál byla použita potravinářská fólie s 94% propustností IR spektra.

Při experimentálním měření vlivu tloušťky stěny součásti na vývoj povrchové teploty během vnitřního soustružení, byly zjištěny tři vlivy ovlivňující průběh měření.

- 1) Při utváření dlouhé nedělené třísky docházelo k zachycení třísky na nástroji a k následnému namotání. Tato tříska částečně zasahovala na povrch měřené součásti, kterou otáčivým pohybem poškrábala. Současně došlo k částečnému odstranění nanesené barvy a k následnému ovlivnění hodnoty emisivity. Při opakování měření na stejném místě roste znehodnocení nanesené speciální barvy. Mezi povrchem znehodnoceným a nepoškozeným bylo dosaženo teplotního rozdílu 2,5 °C.
- 2) Ke znehodnocení měření docházelo v případě měření u okraje součásti, kde odletující třísky směrem ven ze součásti, byly zachyceny termovizní kamerou.

3) Tepelné ovlivnění součásti z předcházejícího měření bez dostatečného času na vychlazení způsobilo rozdílné podmínky měření v důsledku změny počáteční teploty.

Řešením těchto tří problémů je měření povrchu součásti v oblasti dostatečně vzdálené od okraje. Tedy v takové vzdálenosti, kdy na zachyceném obrazu termovizní kamery nebude vidět okraj součásti. Tím se odstraní chyby měření způsobené prvními dvěma body. Poslední problém lze vyřešit jednoduše s využitím chlazení součásti po každém měření, dokud nebude teplota před dalším měřením dosahovat původní hodnoty.

Vliv tloušťky stěny, jakož to objemu součásti, působí na hodnotu teploty. Se snižující se tloušťkou stěny roste teplota. Rozdíl tloušťky stěny o 1 mm způsobí rozdíl teploty na povrchu obrobku o 11 °C. Se vzrůstající teplotou obrobku roste i teplota v místě řezu, v nástroji a v odcházející tříse. Jestli do obrobku přechází mezi 5 - 10 % tepla z místa řezu, tak v důsledku změny tloušťky stěny o 1 mm vzroste teoreticky teplota v místě řezu cca o 100 °C.

Teplota obrobku roste v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti. Při hloubce řezu rovno 1 mm je 4°C teplotní rozdíl mezi řeznými rychlostmi 80 m/min a 160 m/min. Naopak při hloubce řezu rovno 2 mm dojde k 15°C teplotnímu rozdílu. Pokud opět teoreticky přepočteme hodnotu teplot do místa řezu, dojde k nárůstu teploty až o 150 °C. Jak jde tedy vidět řezná rychlost má velký vliv na hodnotu teploty, ale zároveň tento vliv umocňuje hloubka záběru.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. PAVELEK, CSC., Doc. Ing. Milan; ŠTĚTINA, Ing. Josef. *Experimentální metody v technickém prostředí*. VUT v Brně : VUT Brno, 2007. 213 s. ISBN 978-80-214-3426-4.
2. KREIDL, CSC., Doc. Ing. Marcel . *Měření teploty : Senzory a měřící obvody*. 1.vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
3. KAREL, Kocman; JAROSLAV, Prokop. *Technologie obrábění*. 2. Vydání. Brno: Akadematické nakladatelství CERM, 2005. 270s. ISBN 80-214-3068-0.
4. BLAHOŽ, Vladimír; KADLEC, Zdeněk. *Základy sdílení tepla*. 2.vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství – 2000. 110 s. ISBN 80-902001-1-7.
5. Schauer, CSc., Doc. RNDr. Pavel. *Termika a záření* VUT v Brně: VUT Brno, 1997. 107 s. ISBN 80-214-0978-9.
6. DRASTICH, A.: *Záření v lékařství 3., Infraradiometrické detekční a zobrazovací systémy*. Brno: VUT v Brně, FEKT, ÚBMI, 1980. 255 s. ISBN: 55-588-80
7. ZÁVODNÝ, O. *Bezkontaktní měření teploty*. Brno: Vysoké ucení technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
8. FLIR Systems [online]. 2010 [cit. 2011-04-20]. Thermal Imaging, Infrared Cameras and Night Vision Systems. Dostupné z WWW: <[www.flir.com](http://www.flir.com)>.
9. PÍŠKA, Miroslav, et al. *Speciální technologie obrábění*. 1. Vydání. Brno: Akadematické nakladatelství CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
10. FOREJT, M. a HUMÁR, A. a PÍŠKA, M. a JANÍČEK, L. *Experimentální metody*. [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Výrobní technologie a průmyslový management“ MS studijního programu „Strojírenství“. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003,83 s. Dostupné na World Wide Web: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
11. GRUNER, Klaus-Dieter. Fluke [online]. 2003 [cit. 2011-03-9]. *Principles of Non-Contact Temperature Measurement*. Dostupné z WWW:



- <[http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR\\_THEORY\\_55514\\_ENG\\_REVB\\_LR.PDF](http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF)>.
12. VOLF, Ivo; JAREŠOVÁ, Miroslava; OUHRABKA, Miroslav. *Fyzikální olympiáda* [online]. 2009 [cit. 2011-03-09]. Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku. Dostupné z WWW: <<http://fo.cuni.cz/texty/texttz.pdf>>.
  13. KADLEC, K. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. 2009 [cit. 2011-03-10]. Bezdotykové měření teploty. Dostupné z WWW: <[http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt\\_fpbt/laboratore/BMT-priprava\\_lab\\_v4.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt_fpbt/laboratore/BMT-priprava_lab_v4.pdf)>.
  14. Frňka, Tomáš. Název: *Bezdotykové měření povrchových teplot ve strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 62 s., 3 příloh. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
  15. DYER, Ian; SRINIVASA, Latha. *Measuring temperature. Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. 2009, 10, s. 256-260. Dostupný také z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
  16. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2011-05-20]. Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni>>.
  17. Beneš, P.; Kříž, A. *Teplotní degradace tenkých otěruvzdorných PVD vrstev*. In *Metal 2006*. Ostrava: Tanger, 2006. s. 1-6. ISBN 80-86840-18-2. Dostupné na WWW: <[www.metal2011.com/data/metal2006/sbornik/papers/62.pdf](http://www.metal2011.com/data/metal2006/sbornik/papers/62.pdf)>.
  18. GRZESIK, W., et al. *INTRAM* [online]. 2005 [cit. 2011-05-20]. *Triboccontact phenomenon in the machining of nodular iron with coated carbide and ceramic tools*. Dostupné z WWW: <[http://web.cluny.ensam.fr/intercut-mugv2010/papers/scientific/Grzesik\\_Intercut2008.pdf](http://web.cluny.ensam.fr/intercut-mugv2010/papers/scientific/Grzesik_Intercut2008.pdf)>.
  19. INFRA KAMERA : *Ceník termovizního měření* [online]. 2010 [cit. 2011-05-15]. Odborné centrum termovizního měření. Dostupné z WWW: <<http://www.infrakamera.cz/cs/cenik.html>>.

20. TMVSS [online]. 2000 [cit. 2011-04-25]. *Měřicí a diagnostická technika*. Dostupné z WWW: <[www.tmvss.cz](http://www.tmvss.cz)>.
21. OMEGAENG. Karviná, Česká republika. Produkty, [online]. [cit. 2011.4.23] Dostupné na WWW:<<http://www.omegaeng.cz>>.
22. ABUKHSHIM, N.A.; MATIVENGA, P.T.; SHEIKH, M.A. *Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2005, 46, s. 782-800. Dostupný také z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
23. FLIR SYSTEMS AB. ThermaCAM PM 695: Návod k obsluze. 2000. 82 s.
24. BOUD, F. Bar diameter as an influencing factor on temperature in turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, 47, s. 223-228. Dostupný také z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
25. KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. *Dry cutting* [online]. [cit. 2011. 5. 16]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
26. HONG, Shane Y.; DING, Yucheng. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* [online]. 2001, 41, [cit. 2011-05-15]. Dostupný z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
27. TILLMANN, W., et al. Development of temperature sensor thin films to monitor turning processes. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2010, 210, [cit. 2011-05-15]. Dostupný z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
28. KORKUT, Ihsan, et al. Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters. *Materials & Design* [online]. 2007, 28, [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
29. KRAMAR, D.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Capability of high pressure cooling in the turning of surface hardened piston rods. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2010, 210, [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.

30. *EMS - SERVIS* [online]. 2007 [cit. 2011-05-21]. Servis obráběcích a tvářecích strojů. Dostupné z WWW: <<http://www.emstechsluzby.cz/web/galerie/opravy.html>>.
31. MM Průmyslové spektrum. *INOVACE.CZ* [online]. 2009 [cit. 2011-05-20]. Chlazení nástrojů: stále aktuální problém. Dostupné z WWW: <<http://www.inovace.cz/for-high-tech/strojirenstvi/clanek/chlazen-nastroju--stale-aktualni-problem/>>.
32. APOEELMOS measurement & control : *Měřicí a regulační technika* [online]. 1991 [cit. 2011-05-19]. Termovizní kamery pro oblast elektro a strojírenství. Dostupné z WWW: <<http://www.apoelmos.cz/cz/info/s-teplota18.htm>>.
33. *MERTEC* [online]. 2007 [cit. 2011-05-20]. Meracie prístroje - Termokamery. Dostupné z WWW: <<http://www.inovace.cz/for-high-tech/strojirenstvi/clanek/chlazen-nastroju--stale-aktualni-problem/>>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

| Zkratka/Symbol | Jednotka   | Popis  |
|----------------|--|--|
| HSC            | [-]  | High Speed Cutting                                     |
| IČ / IR        | [-]  | infračervený / infrared (angl.)                        |
| VUT            | [-]  | Vysoké učení technické                                 |
| FSI            | [-]  | Fakulta strojního inženýrství                          |
| T              | [K]  | teplota  |
| $\varepsilon$  | [-]  | emitované záření, nebo-li emisivita                    |
| $\lambda$      | [ $\mu\text{m}$ ]                                  | vlnová délka   |
| D              | [mm]   | průměr obrobku   |
| $v_c$          | [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]                 | řezná rychlost   |
| n              | [ $\text{mm}^{-1}$ ]                               | otáčky   |
| $a_p$          | [mm]   | hloubka řezu   |
| $f_{ot}$       | [mm]   | posuv  |
| s              | [mm]   | tloušťka stěny   |
| $M_o$          | [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$ ] | Intenzita vyzařování obecného tělesa                   |
| $M_{o\lambda}$ | [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$ ] | spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa |
| $\sigma$       | [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ] | Stefan-Boltzmannova konstanta                          |

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 – Průběh vývoje teploty u vnitřního soustružení (měření 12)

Příloha 2 – Průběh vývoje teploty u podélného soustružení (měření 5)