



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tepelné jevy při obrábění

Thermal phenomena during machining

AUTOR: Václav Pícha

STUDIJNÍ PROGRAM: VES

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

PRAHA 2021

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou závěrečnou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Hradci Králové dne:

Podpis:

Václav Pícha

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za veškeré odborné rady, připomínky, trpělivost, cenné rady při měření praktické části i ochotu ke zdárnému dokončení závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Lubomíru Štajnochrovi za přípravu měřících pomůcek i programů.

V neposlední řadě patří obrovské poděkování rodině za poskytnutí skvělého zázemí a podmínek, které mi umožnilo se své bakalářské práci plně věnovat.

Abstrakt

Bakalářská práce se skládá ze dvou částí. První rešeršní část popisuje základní problémy teploty, která vzniká při obrábění, její zdroje, vliv na obrobek i nástroj. Součástí jsou i způsoby měření tepla a jednotlivé měření metody při obrábění. Druhá praktická část se věnuje experimentu pro zjištění teplotních závislostí na řezné rychlosti, posuvu a hloubce řezu, také se zabývá ověřením přesnosti měření sondy thermoMETER CTL M-3H2.

Klíčová slova

Teplota, tepelné jevy při obrábění, vliv teploty, zdroje tepla, měření teploty, soustružení, termočlánek, termometr, pyrometr, závislost

Abstract

The bachelor thesis consists of two parts. The first research part describes the basic problem of the temperature that arises during machining, its sources, the effect on the workpiece and the tool. Also included are methods of heat measurement and individual methods of measurement during machining. The second practical part is devoted to experiments to determine the temperature dependences on the cutting speed, feed and depth of cut, taking into account the control of the measurement accuracy of the thermoMETER CTL M-3H2 probe.

Keywords

Temperature, thermal phenomena during machining, heat sources, temperature measurement, turning, thermocouple, thermometer, pyrometer, dependence



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pícha** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **483341**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tepelné jevy při obrábění

Název bakalářské práce anglicky:

Thermal effects in machining

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Měření teplot při obrábění
3. Experimentální měření
4. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis díkane(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 8 |
| 2. Teplo a teplota při obrábění..... | 8 |
| 2.1. Zdroje tepla..... | 8 |
| 2.2 Teplota řezání..... | 10 |
| 2.3 Vliv řezných podmínek na teplotu řezání..... | 12 |
| 2.4 Tepelná bilance..... | 12 |
| 3. Teplotně ovlivněná zóna..... | 14 |
| 3.1. Tepelné zatížení při frézování..... | 15 |
| 3.2. Tepelné účinky při broušení..... | 15 |
| 3.3. Tepelné účinky při vrtání..... | 16 |
| 4. Opotřebení a trvanlivost nástroje..... | 16 |
| 4.1.Otěr břitu..... | 17 |
| 4.1.1 Adhezní otěr..... | 17 |
| 4.1.2. Difuzní otěr..... | 17 |
| 4.2. Nástrojové materiály..... | 18 |
| 4.3. Zbytková napětí..... | 18 |
| 4.3.1 Měření zbytkového napětí..... | 19 |
| 5. Měření teploty..... | 19 |
| 5.1. Měření teploty při frézování..... | 20 |
| 5.2. Měření teploty při broušení..... | 21 |
| 5.3. Měření teploty řezné hrany při vrtání..... | 21 |
| 5.4. Měření termočláanky..... | 21 |
| 5.4.1. Termočlánek..... | 22 |
| 5.4.2. Umělý termočlánek..... | 24 |
| 5.4.3. Poloumělý termočlánek..... | 25 |
| 5.4.4. Přirozený termočlánek..... | 26 |
| 5.4.5. Cejchování termočláanky..... | 27 |
| 5.5. Termoduo..... | 27 |
| 5.6. Pyrometry..... | 28 |
| 5.6.1. Úhrnné pyrometry..... | 30 |
| 5.6.2. Fotoelektrické pyrometry..... | 31 |
| 5.7. Měření pomocí termovize..... | 31 |
| 5.8. Měření pomocí teplotních indikátorů..... | 32 |
| 6. Praktická část – Experiment..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 6.1. Polotovar ocel ČSN 12 050..... | 33 |
| 6.2. Hrotový soustruh SUI 32..... | 34 |
| 6.3. Nástroj a geometrie nástroje | 34 |
| 6.4. Pyrometr AMiR 7811-20..... | 35 |
| 6.5. ThermoMETER CTL M-3H2..... | 35 |
| 6,6. Kalibrace měřidel..... | 36 |
| 6.7. Cejchování termočlánku | 38 |
| 6.8. Vliv teploty při soustružení..... | 43 |
| 6.8.1. Závislost teploty na řezné rychlosti..... | 43 |
| 6.8.2. Závislost teploty na posuvu..... | 47 |
| Zdroje..... | 61 |

1. Úvod

Téma této bakalářské práce jsem si vybral, jelikož mi přišlo měření teploty při obrábění velice zajímavé. Při použití nástroje z řezné keramiky může teplota dosahovat obrovských teplot, až 1500 °C. Teplota souvisí s kvalitou výrobků i trvanlivostí nože. [1]

Teplota při obrábění velmi ovlivňuje obráběcí proces, kde se veškerá energie přeměňuje v teplo. Na teplotě závisí řezné podmínky, kvalita povrchu a trvanlivost nástroje. Proto je důležité provádět měření teploty při obráběcích operacích. Teplota má také obrovský vliv na nástroj i obrobek. [2, 3]

Měření teploty se provádí pomocí kontaktních teploměrů, bezdotykových snímačů a senzorů. V bakalářské práci se věnuji měření teploty pomocí termočlánků, termoduem, pyrometry i pomocí termovize a teplotních indikátorů.

V praktické části mé bakalářské práce porovnám přesnosti měření přirozeného termočlánku nástroje SK P30 a obrobku C45. Pokusím se zjistit závislost teploty na řezné rychlosti, posuvu a hloubce řezu. Teploty této závislosti budou odečteny z cejchovní křivky SK P30-C45

2. Teplo a teplota při obrábění

Teplota je jednou z nejdůležitějších stavových veličin. Ovlivňuje téměř všechny stavy i procesy a je mírou kinetické energie. Teplota nepřímo, ale zásadně ovlivňuje produktivitu a ekonomičnost výroby. [1]

Většina energie spotřebované při obrábění se mění v teplo, zbytek energie se spotřebuje na deformaci krystalické struktury materiálu a na zvýšení povrchové energie. Podle profesora Kuzněcova se mění v teplo zhruba 80 % energie. Dle jiných údajů je toto číslo ještě vyšší. [2]

2.1. Zdroje tepla

Teplo při řezání vzniká hlavně v místech největší deformace před čelem nože a v místech největšího tření, to je mezi třískou a čelem nože. V teplo se přeměňuje téměř veškerá práce vynaložená na proces řezání s výjimkou práce pružných deformací a práce utajené. Ve většině případů (vysoká tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek) představují

práce pružných deformací a práce utajené maximálně 2 % celkové práce řezání. Zbytek, tj. minimálně 98 %, se transformuje v teplo. Celkové množství tepla vznikajícího za jednu sekundu lze vypočítat ze vztahu: [1, 2]

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t \text{ (J)},$$

Podle údajů pro běžné poměry při obrábění oceli nižšími rychlostmi a bez chlazení se udává následující rozložení. [2]

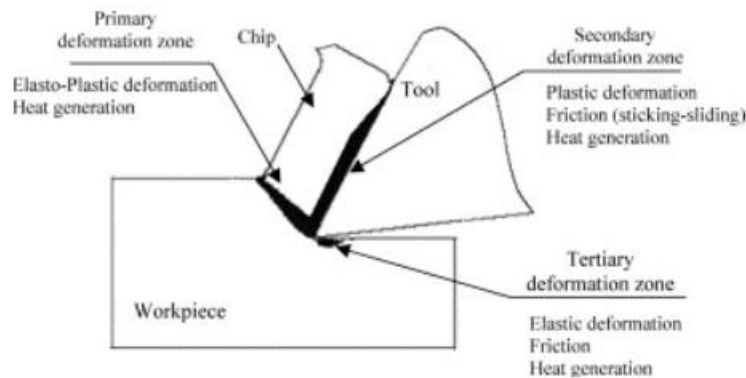
- Teplo odvedené třískou 75 %
- Teplo odvedené nástrojem 4 %
- Teplo odvedené materiálem 20 %
- Teplo odvedené a vysálané do okolí 1 %

Pro různé řezné podmínky se tento poměr mění. Při vyšších řezných rychlostech klesá teplo odvedené materiálem, jelikož není dostatek času k jeho přechodu z místa vzniku do předmětu. Při zvyšujících se řezných rychlostech je tedy více tepla odváděné třískou na úkor tepla přecházejícího do obrobku. Při rychlosti přibližně 800 metrů za minutu přechází veškeré teplo do třísky, do obrobku pouze teplo vzniklé třením na hřbetě. U křehkých materiálů je zase procento tepla odvedené třískou menší. Při intenzivnějším chlazení stoupá procento odvedené do okolí. [2, 3]

V procesu řezání kovů nástroj při řezání překonává smykovou pevnost materiálu obrobku. Toto generuje velké množství tepla v obrobku, což vede k vysoce lokalizované termomechanicky spojené deformaci ve smykové zóně. Teploty v zóně řezu významně ovlivňují vztah napětí – deformace, lom a tok materiálu obrobku. Zvýšení teploty sníží pevnost materiálu obrobku a tím se zvýší jeho tažnost. [4]

Hlavní oblasti, kde se během procesu ortogonálního řezání vytváří teplo, jsou znázorněny níže na obrázku. Na začátku se teplo vytváří v primárně deformační zóně v důsledku umělé práce prováděné ve smykové rovině. Místní ohřev v této zóně má za následek velmi vysoké teploty, které způsobí, že materiál změkne a vytvoří větší deformaci. Následně se teplo vytváří v sekundární deformační zóně v důsledku práce provedené při deformaci třísky a při překonávání kluzného tření v zóně rozhraní nástroj – tříska. Nakonec

teplo generované v zóně terciální deformace v rozhraní nástroj – obrobek je výsledkem práce provedené k překonání tření, ke kterému dojde při třecím kontaktu mezi bokem nástroje a obrobenou plochou obrobku. [4]



Obrázek 1 Zdroje tepla v procesu ortogonálního řezání [4]

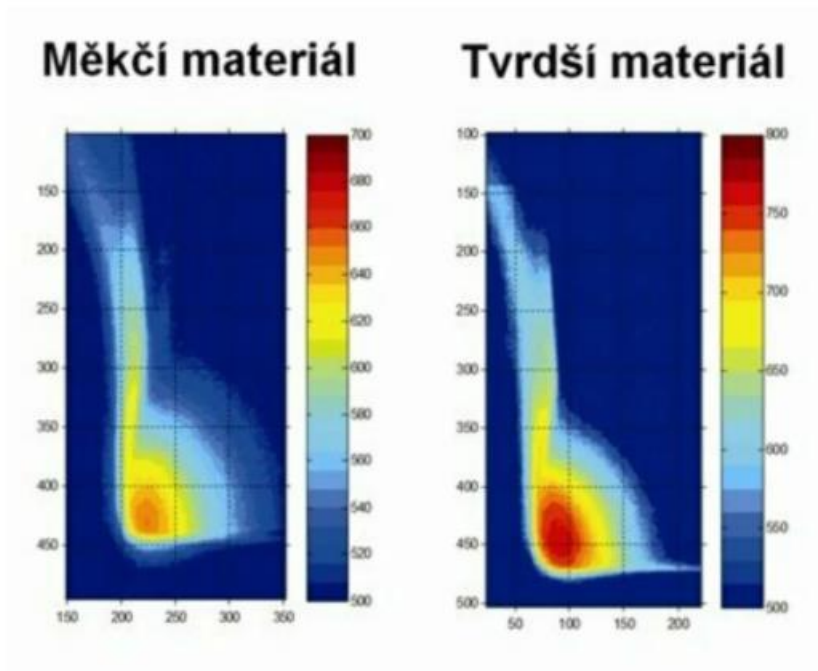
Stručně řečeno, spotřeba energie a tvorba tepla v procesech řezání kovů závisí na kombinaci fyzikálních a chemických vlastností materiálu obrobku a materiálu řezného nástroje, řezných podmínek a geometrii řezného nástroje. [4]

2.2 Teplota řezání

Obrábění kovů stále není zcela objasněno kvůli nelineární povaze procesu a složité vazbě mezi deformačními a teplotními poli. Řezání kovů může být spojeno s vysokou teplotou v zóně rozhraní nástroj – tříška. Vysoké teploty řezání silně ovlivňují opotřebení nástroje, živostnost nástroje, integritu povrchu obrobku, mechanismus tvorby třísky a přispívá k tepelné deformaci řezného nástroje, která je považována za největší zdroj chyb v procesu obrábění. [4]

Neustále rostoucí poptávka po snižování nákladů a zlepšování kvality finálních produktů vede výzkum řezání kovů do nových oblastí. U vysokorychlostního obrábění má řezná rychlost hlavní vliv na řeznou teplotu a mechanismus přenosu tepla. Jak se zvyšuje řezná rychlost stává se řezací proces adiabatičtější a teplo generované v zóně smykové deformace nemůže být odváděno pryč ve velmi krátké době kontaktu, ve kterém kov prochází touto zónou. [4]

Teplota řezání je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňující proces řezání. Závisí na ní možnosti a vhodnosti použití různých řezných rychlostí, posuvů, hloubky řezu a ovlivňuje také trvanlivost nástroje. Teplota v zóně řezání je závislá hlavně na kontaktu třísky a nástroje, na velikosti řezných sil a třecích procesech mezi materiálem obrobku a břitem nástroje. Teploty na styku čela a třísky mohou dosahovat až 1200 °C. [1, 5]



Obrázek 2 Teplota a teplota v technologii obrábění kovů [6]

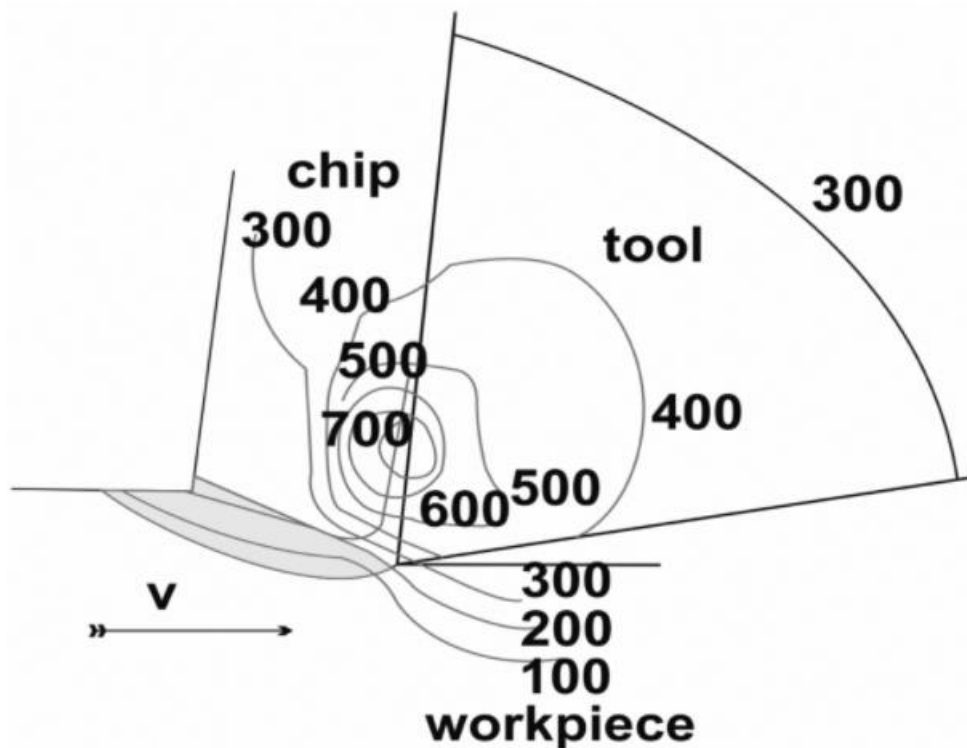
Při obrábění nízkými řeznými rychlostmi je maximální teplota na špičce nástroje. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi je maximální teplota v určité vzdálenosti od ostří nástroje. Identifikace teplotního pole představuje složitý metrologický problém a vyžaduje složité měřicí systémy. [5]

Teplota řezání závisí na materiálu obrobku, řezném materiálu, geometrii nástroje, řezných podmínkách a řezném prostředí. [3]

Vysoké teploty, při vysokorychlostním obrábění, jsou způsobené několika důvody.

- Vzniká více tepla
- Výroba tepla je soustředěna na malé ploše
- Adiabatická povaha procesu, při kterém se v důsledku krátké kontaktní doby odvádí méně tepla [4]

Teplota řezu není v celém nástroji, tříске nebo obrobku konstantní, lze pozorovat, že maximální teplota se nevyvíjí na samém břitu, ale na čelo nástroje v určité vzdálenosti od břitu. [7]



Obrázek 3 Rozložení teploty při obrábění [7]

2.3 Vliv řezných podmínek na teplotu řezání

Řezné podmínky mají vliv na teplotu nástroje, a to přibližně tak, že ty, které zvyšují řezný odpor a snižují trvanlivost břitu, zvyšují zároveň teplotu břitu. Trvanlivost je veličina sekundární, teplota břitu je veličina primární. Ovšem snadněji se zjišťuje trvanlivost než teplota, jelikož je trvanlivost, a nikoliv teplota konečnou rozhodující veličinou při obrábění. [2]

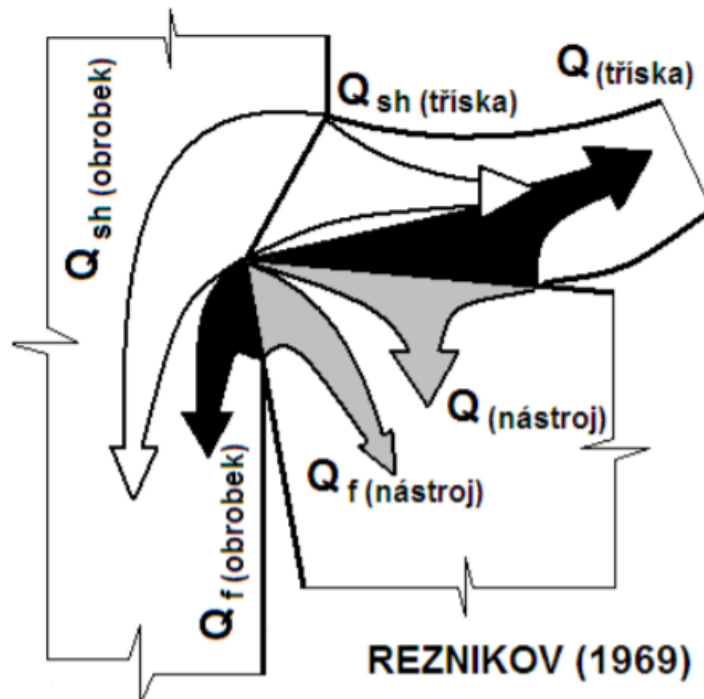
2.4 Tepelná bilance

Veškerá práce vynaložená na řezný proces se prakticky přeměňuje v teplo. Celkové množství tepla je nevratná veličina, které se neustále dokola obnovuje ve zdrojích tepla, ty jsou určovány zónou řezání. Zdroje tohoto tepla jsou v podstatě složky odpovídající složkám práce v rovnici práce řezání, která se vynakládá na řezný proces. Proto množství vzniklého tepla za sekundu lze stanovit z následujícího výrazu. [1, 3]

$$Q = F_z \cdot v$$

Teplo řezného procesu vzniklé při odebrání určitého množství materiálu je přibližně rovné práci řezného procesu. [5]

Hlavní zdroje tepla jsou v oblasti plastických deformací při tvoření třísky, v oblasti třísky po čele nástroje a v oblasti tření hřbetu po obrobek. Samotná zóna řezání tak umožňuje vymezit následující zdroje tepla, respektive tvorby tepla. [1, 5]



Obrázek 4 Vznik a šíření tepla v zóně řezání [1]

$$Q_e = Q_{sh} + Q_{tr} + Q_f$$

Vzniklé teplo řezného procesu je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího systému. [4]

- Teplo Q_{sh} -> Teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky
- Teplo Q_{tr} -> Teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje
- Teplo Q_f -> Teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše obrobku

Podíl jednotlivých odváděných složek tepla řezného procesu do třísky, obrobku a prostředí závisí na tepelné vodivosti obrobku i nástroje, na řezných podmínkách, řezném prostředí (způsobu mazání a chlazení) a geometrii břitu řezného nástroje. [5]

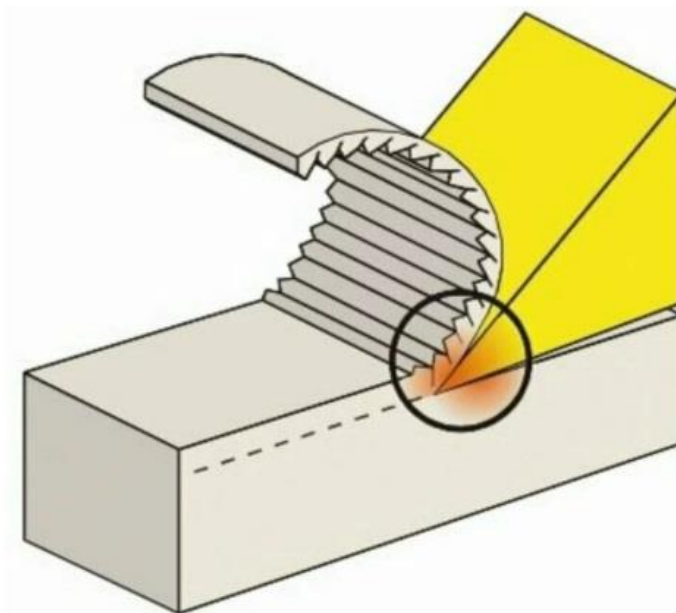
Největší část tepla, která vznikne při obrábění je v ideálním případě odváděna ze zóny řezání nástroje třískou. Tříška zatěžuje řezný nástroj tak dlouho, jak dlouho je s ním v kontaktu. [5]

Odlišná tepelná bilance je při vrtání a broušení. Při vrtání je nástroj i tříška obklopena materiálem obrobku, proto je podstatně vyšší podíl tepla obrobku na celkovém teple. U broušení tvoří největší složku vznikajícího tepla teplo vzniklé třením hřbetu o plochu řezu, právě proto nejvíce tepla odchází do obrobku. Důvodem je, že nástroj má malou tepelnou vodivost $Q_{ob} > Q_{tř} > Q_n$. [3]

Tepelná bilance představuje jednu z forem bilance energie, která vypovídá o tom, že v daném místě a časovém úseku je množství odvedeného tepla rovno teplu do místa přivedeného. [1]

3. Teplotně ovlivněná zóna

Při obrábění kovů vzniká teplo, které způsobuje vyšší teplotu na řezné hraně. Tím se snižuje životnost nástroje. Část řezné hrany, která je ovlivněná vyšší teplotou se nazývá Heat



Obrázek 5 Způsob utváření třísky [6]

Affected Zone, tedy tepelně ovlivněná zóna. V této zóně je pouze jeden geometrický bod, kde se nacházejí nejvyšší teploty. Tento bod se nazývá Peak Temperature Point, Bod nejvyšší teploty. [6]

Teplo se hromadí v místě řezu. Pokud koncentrované teplo příliš vzroste, může dojít k negativním účinkům. [6]

- Zhoršení řezné hrany
- Zkrácení životnosti nástroje
- Změna struktury obrobeného materiálu

3.1. Tepelné zatížení při frézování

Při obrábění kovů v místě, kde řezná hrana nástroje deformuje materiál a vytváří třísku, vznikají teploty 800 až 900 °C. Při plynulé operaci má ohřev vyrovnaný lineární průběh, zatímco pokud kontakt zubů frézky s materiálem obrobku je přerušovaný, teplota řezných hran střídavě klesá a roste. [8]

Teplo je absorbováno všemi prvky soustavy. Ideální stav je tedy, pokud tříška neodvádí z místa řezu většinu tepla. Vysoké teploty zkracují životnost nástroje a mohou také poškodit obráběný díl. [8]

- 80 % je odváděno z místa řezu třískou
- 10 % tepla do obrobku
- zbytek přechází do nástroje

3.2. Tepelné účinky při broušení

Broušení se široce používá k výrobě povrchů s dobrou rozměrovou přesností a povrchovou úpravou. Během broušení se v důsledku třecího ohřevu a lokalizované plastické deformace vytvářejí vysoké teploty na rozhraní mezi kotoučem a obrobkem i na pracovní ploše. Vysoké teploty jsou hlavním zdrojem poškození obráběného povrchu. [9]

K poškození obráběného povrchu dochází z několika důvodů. Za prvé, přechodné teploty generované broušením přispívají ke zbytkovým napětím a mikrotrhlinám. Za druhé, lokalizované teploty mohou způsobit zdeformování součásti, zejména pokud má součástka velký poloměr a malou velikost. Za třetí, mohou vyvolat fázové transformace na obráběném povrchu. [9]

3.3. Tepelné účinky při vrtání

Vrtání je běžný proces formování kovů při obrábění, který je široce používán v oblasti výroby. Ve srovnání s ostatními technologiemi je vrtání polouzavřenou technologií zpracování s vysokým třením a obtížným odvodem tepla. [10]

V procesu vrtání ovlivňuje teplotní rozložení obrobku nejen životnost vrtacího nástroje, ale také výkonnostní indexy jako je zbytkové napětí, rozměrová chyba a tvrdost obrobeného povrchu. Obecně se oblast s vysokou teplotou obrobku generuje v části, která je v kontaktu s vrtacím nástrojem. Vzhledem k pohybu vrtacího nástroje a existenci třísek může schéma založené na přímém měření získat pouze částečné informace o teplotě obrobku. [10]

4. Opotřebení a trvanlivost nástroje

V průběhu obrábění dochází postupně ke změně kvality a tvaru pracovních ploch břitu, opotřebení břitu. Teplota má velký význam na opotřebení a životnosti nástroje. [6, 3]

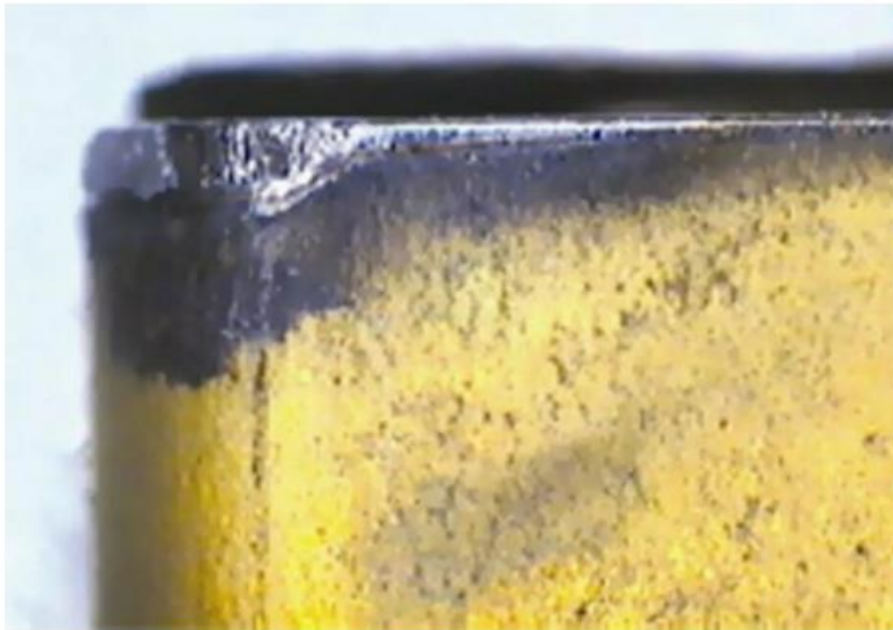
Opotřebení břitu může být způsobeno:

- Otěrem stykových míst materiálu břitu
- Plastickou deformací břitu
- Křehkým porušením materiálu břitu

Opotřebení břitu probíhá s mnohonásobně vyšší intenzitou v důsledku působení velkých tlaků a teplot než u běžných strojních součástí. [3]

Opotřebení břitu závisí na materiálu břitu, materiálu obrobku a řezných podmínkách. Především na řezné rychlosti, tloušťce třísky a úhlu čela. Na hřbetu se opotřebení projevuje většinou jako nepravidelná ploška. Větší opotřebení u špičky se vysvětluje ztíženými podmínkami práce a odvodu tepla. [3]

Z hlediska opotřebení jsou pro nás důležité maximální hodnoty jak na čele třísky a hřbetu, tak i rozložení na těchto plochách. [1]



Obrázek 6 Opotřebení nástroje: otěr na hřbetu [11]

4.1. Otěr břitu

Jedná se o výsledek fyzikálních jevů, do kterých řadíme brusné a adhezní účinky. Dále se jedná o chemické jevy, do kterých zahrnujeme difuzi a vytváření chemických sloučenin na stykových místech břitu s obrobkem a třískou. [3]

4.1.1 Adhezní otěr

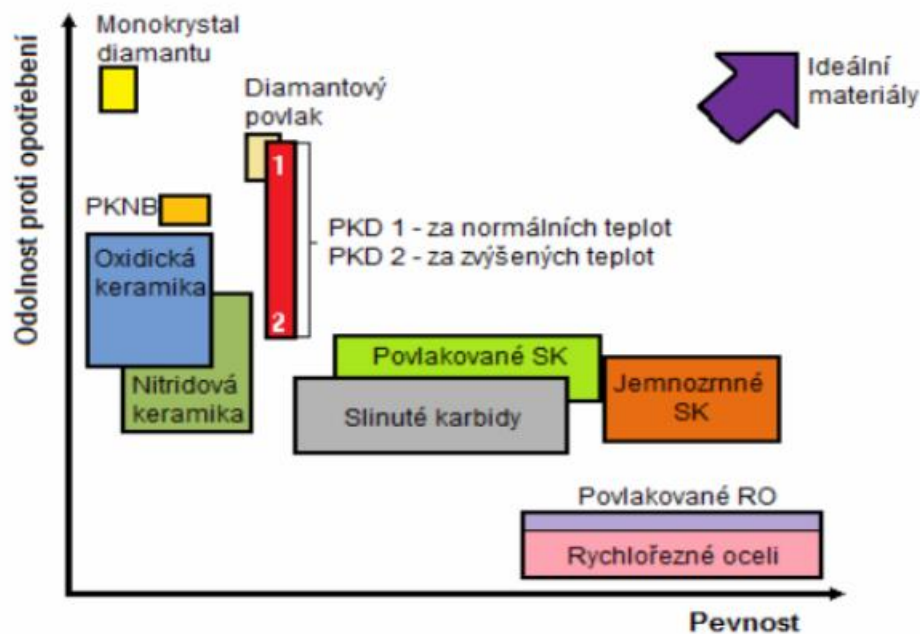
Adhezní otěr se uplatňuje u nástrojů z uhlíkových a rychlořezných ocelí. Dochází k němu při vysokém tlaku a teploty, v podstatě se jedná o neustálé spojování částic břitu, třísky a plochy řezu a opětovné jejich rozrušování. Velký sklon na intenzitu adhezivního otěru má mimo jiné hlavně chemická příbuznost obou materiálů a jejich sklon k vytvoření adhezivních spojů. [3]

4.1.2. Difuzní otěr

Difuzní otěr nastává při řezných podmínkách, kdy dochází k tzv. disociační teplotě, která je v rozmezí 680 °C až 1200 °C, proto se difuzní otěr týká pouze materiálu, které těchto teplot dosahují. Při této teplotě vzájemně difundují prvky z materiálu břitu do materiálu třísky, obrobku a naopak. Na břitu vzniká defektní vrstva o síle 5 až 20 μm, ta má menší odpor proti otěru. [3]

4.2. Nástrojové materiály

Řezné materiály velkým způsobem ovlivňují produktivitu, výrobní náklady i kvalitu výroby. Význam řezných nástrojů je charakterizován náročnými požadavky, ve kterých břit pracuje. Při obrábění je břit vystaven intenzivnímu mechanickému a tepelnému namáhání, což může vést k jeho otupení, nebo dokonce k jeho celkové destrukci. Řezný materiál musí mít větší tvrdost než materiál obráběný. [1]



Obrázek 7 Vlastnosti řezných materiálů [12]

4.3. Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou definována jako napětí, která se v materiálu vyskytují bez působení vnějšího zatížení. Jejich vznik je spojen s technologií výroby a úpravy materiálu. Velký význam mají povrchová zbytková napětí, přičemž jejich vliv může být prospěšný i škodlivý. Vysoké hodnoty zbytkového napětí a s nimi spojené relaxační procesy obecně ovlivňují pevnostní charakteristiky materiálu a mohou vést k nestabilitě tvaru a kvality povrchu součásti. [13]

Životnost je důležitá dynamická vlastnost, která je silně ovlivněna stavem povrchu vytvářeným během obrábění. Únavové trhliny se obecně objevují na povrchu součásti a poté se dále rozšiřují. V tomto důsledku má zásadní význam stav napětí na povrchu, kde praskliny vznikají. Tento stav je součtem napětí v důsledku aplikovaného zatížení a zbytkových napětí

generovaného během obrábění. Zbytkové napětí je výsledkem různých mechanických a teplených jevů, ke kterým dochází v oblasti povrchu během obrábění. [14]

Ukázalo se, že zbytková napětí mohou být na povrchu tlaková a tažná těsně pod povrchem nebo naopak. Zbytková tlaková napětí obecně zlepšují výkonnost a živostnost komponent, protože snižují provozní (pracovní) tahová napětí a zabraňuje tvorbu jader bez trhlin. Zbytková tahová napětí na druhou stranu výrazně zvyšují provozní (pracovní) napětí. To může vést k předčasnému selhání součásti. [14]

Sigwart a Fessenmeyer uvedli, že únavové zkoušky na soustružených vzorcích oceli 42CrMo4 s vysokým zbytkovými napětí v tahu o hodnotě až 800 MPa ukázaly snížení meze únavy o přibližně 30 %. Na druhou stranu Matsumoto a kol. uvedli, že únavová pevnost kalených vzorků oceli AISI 4340 byla po řezání sloupků o 2 až 5 % vyšší než po broušení. [14]

Je tedy jasné, že informace týkající se profilu zbytkových napětí (velikost i směr) obráběné povrchové oblasti jsou cenné při konstrukci a výrobě dílů. Je důležité, aby byl určen vliv parametrů procesu obrábění na profil zbytkového napětí a následně mohou být zvoleny takové parametry obrábění, které zvýší únavovou životnost vyvoláním příznivého zbytkového napětí. [14]

4.3.1 Měření zbytkového napětí

Výrobní procesy jako obrábění, svařování, tryskání, teplené svařování a broušení vytváří ve výrobku zbytková napětí. Tyto napětí, v závislosti na jejich orientaci a velikosti, mohou být prospěšná, nebo škodlivá a mají velmi vysoký vliv na živostnost dané součásti. Lze říci, že zbytková tahová napětí působí negativně na výrobek a napětí tlakové působí na výrobek pozitivně. [15]

V současné době je velká řada metod, jak lze měřit zbytková napětí. Tyto metody dělíme na nedestruktivní, semidestruktivní a destruktivní. Všechny metody jsou nepřímé, tedy hodnota zbytkového napětí je odvozena nebo vypočtena. [15]

5. Měření teploty

Teplotní pole nástroje nás zajímá, protože teplota povrchových vrstev čela a hřbetu má výrazný vliv na stav vrstev, na charakter jejich vzájemného působení s materiálem obrobku a v souvislosti s tím i na podstatu a intenzitu otupování nástroje. [1]

Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší teplotou na čele dosahuje v tomto případě až 450 °C. Na hřbetu 100 až 300 °C. [16]

Stanovení teplotních hodnot na plochách čela i hřbetu je experimentálně velmi náročné. Proto se spokojíme jen se stanovením středních teplot na těchto plochách, tedy stanovení střední teploty celé styčné plochy nástroje s třískou a obrobkem. Střední teplota bude nižší než maximální teplota na břitu. Ta má však výhodu, že ji lze stanovit podstatně snadněji. [1]

Metody experimentálního studia tepelných jevů jsou zaměřeny do dvou oblastí:

- stanovení celkového množství tepla a podíl odváděného tepla do jednotlivých oblastí
- stanovení teploty a teplotního pole obrobku, nástroje a třísky

K měření teploty lze využít celou řadu fyzikálních i chemických jevů. Z důvodu vysoké náročnosti a specifickým podmínkám procesu obrábění lze použít pouze některé z metod. [1]

Při praktických měření a experimentálním stanovení se používá především těchto jevů:

- termoelektrický jev (termočlánky)
- změna elektrického odporu (termistory)
- tepelné záření
- změna struktury

Techniky používané k měření teploty jsou obecně klasifikovány jako přímé nebo nepřímé. Přímé metody zahrnují použití prášků citlivých na teplotu, infračervená měření, uspořádání termočlánku nástroj / tříska nebo implementované termočlánky. Zatímco prášky našly omezené využití, termočlánek nástroj / tříska našel využití velmi časté. [4]

5.1. Měření teploty při frézování

Z informací o jednotlivých metodách měření teploty vyplývá, že u nároků na přesnost vyhovují metody založené na termoelektrickém efektu. Tyto metody vynikají svojí spolehlivostí, přesností a malou náročností na provedení. [17]

Pro měření teploty při frézování využíváme tyto metody:

- Umělý termočlánek se dvěma cizími kovy
- Přirozený termočlánek

5.2. Měření teploty při broušení

Obvykle se používá při broušení několik technik měření teploty. Typické přístupy zahrnují termální zobrazování a měření termočlánků. Mezi další techniky patří použití tepelně citlivých povlaků, povlaků s nízkou teplotou tání a vláknové optiky. [18]

5.3. Měření teploty řezné hrany při vrtání

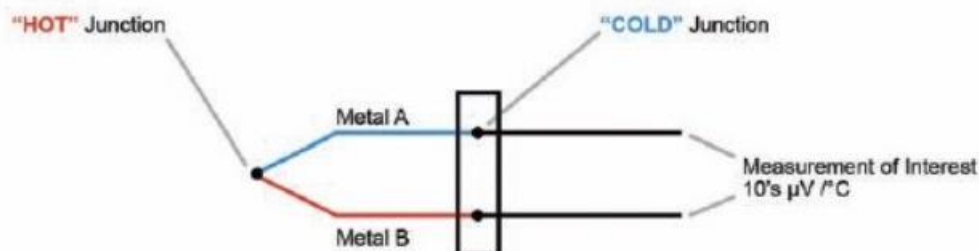
Teplota řezání je velmi důležitým faktorem pro zkoumání opotřebení nástroje, integrity povrchu a přesnosti rozměrů. [19]

Při vrtání se vytváří více kontaktních bodů mezi řezným nástrojem a obrobkem. Naměřená hodnota je průměrnou hodnotou těchto bodů. Termočlánek je vložen do olejového otvoru vrtáku. Nicméně olejový otvor je v oblasti boku vrtáku, existuje tedy určitá vzdálenost mezi jeho středem a břitem, tudíž naměřená hodnota není teplotou řezání. Rozložená teplota podél břitu je měřena pomocí konstruovaného termočlánku. [19]

5.4. Měření termočlánky

Při měření termočlánky se využívá tzv. termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku termoelektrického napětí v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči. [16]

Při obrábění se ho využije tak, že měřící spoj je umístěn do místa měření teploty a srovnávací spoje je udržují na známé teplotě, obvykle teplotě okolí. K těmto vodičům je pak připojen milivoltmetr. Velikost vznikajícího termoelektrického napětí závisí na rozdílu teplot i na druhu materiálu obou vodičů tvořících termočlánek. [1]



Obrázek 8 Typická struktura termočlánku [20]

Pro praktická měření teploty lze využít jen některé dvojice kovů nebo slitin. Dvojice kovů nebo slitin musí být sestaveny tak, aby vzniklé termoelektrické napětí bylo dostatečně velké v rozsahu předpokládaných teplot. [1, 16]

| | | | | | | | |
|----------------|-----|--------|------|---------|------|----------|------|
| Konstanta n | -39 | Uhlík | -3,5 | Cín | -0,5 | Molybden | 6,5 |
| Kobalt | -21 | Hliník | -1,5 | Rhodium | 1,0 | Železo | 12,5 |
| Nikl | -20 | Hořčík | -1,5 | Iridium | 1,0 | Křemík | 44,0 |
| Platina | -5 | Olovo | -0,5 | Zinek | 1,5 | | |
| Stříbro | 1,5 | Měď | 2,0 | Wolfram | 2,5 | | |

Obrázek 9 Střední hodnoty termoelektrických napětí [1]

Vodiče je vhodné kombinovat, aby tvořily lineární charakteristiku, časovou stabilitu, odolnost proti korozi a chemickým vlivům. Jako materiál vhodný pro výrobu vodičů pro termočláanky se nejčastěji používá především kobalt, nikl, platina a stříbro. [1]

5.4.1. Termočlánek

Termočlánek je nejběžnější snímač pro měření teploty. Snímač se skládá ze dvou rozdílných drátů, které jsou spojeny na jednom konci. Na druhém konci jsou připojené buď k termočláankovému měřiči teploty nebo obdobnému přístroji. [21]

Termočlánek je velice všestranným a víceúčelovým přístrojem. Tento snímač teploty se běžně používá v širokém spektru aplikací. [21]



Obrázek 10 Miniaturní termočláankový konektor [11]



Obrázek 11 Termočlánková soustava [21]

Termočlánky jsou v různých kombinacích z rozdílných kovů nebo kalibrací. Nejběžnější jsou termočlánky typu Base metal ze základních kovů. K dispozici máme kalibrace pro vysoké teploty, známé jako Noble Metal z ušlechtilých kovů. [21]

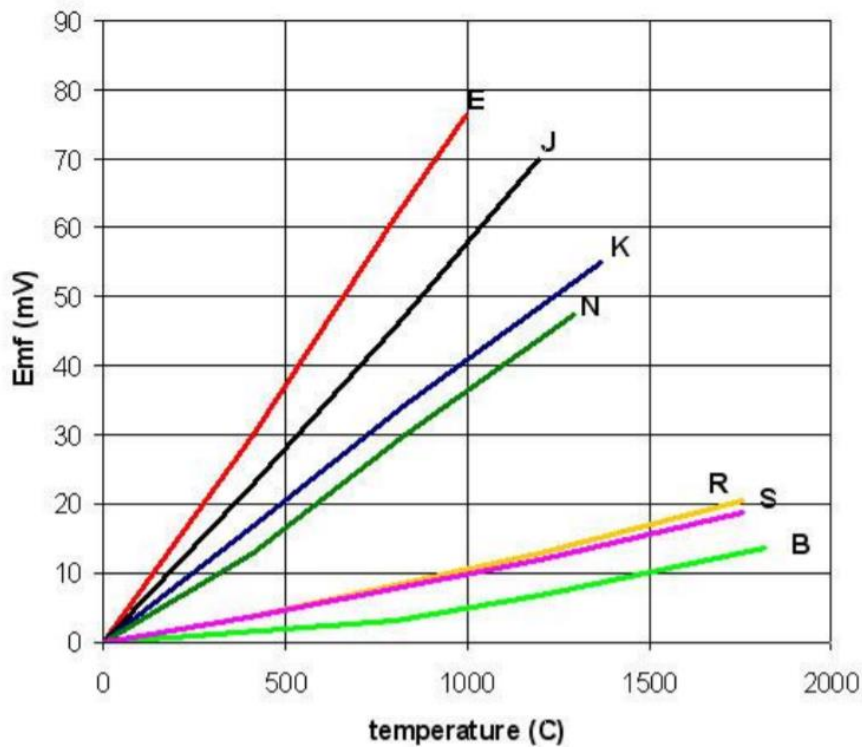
Dle způsobu konstrukce je možné termočlánky dělit na tři různé typy. Termočlánky přirozené, poloumělé a umělé. Jiným speciálním případem zapojení termočlánku je termoduo. [22]

Jak funguje termočlánek

Když jsou spojeny dva dráty složené z rozdílných kovů na obou koncích a jeden z konců je zahřátý, existuje kontinuální proud, který proudí v termoelektrickém kruhu. V případě, že je tento obvod uprostřed přerušen, je napětí v obvodu závislé na teplotě spoje a složení obou kovů. To znamená, že když je spojení obou kovů ohříváno nebo ochlazováno, vzniká napětí, které může být převedeno na údaj o teplotě. [21]

| Teplotní rozsahy termočlánků | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Typ termočlánku | Rozsah teploty | Standardní přesnost | Vyšší (SLE) přesnost |
| J | 0° až 750°C (32° až 1382°F) | lepší než 2.2°C nebo 0.75% | lepší než 1.1°C nebo 0.4% |
| K | -200° až 1250°C (-328° až 2282°F) | lepší než 2.2°C nebo 0.75% | lepší než 1.1°C nebo 0.4% |
| E | -200° až 900°C (-328° až 1652°F) | lepší než 1.7°C nebo 0.5% | lepší než 1.0°C nebo 0.4% |
| T | -250° až 350°C (-328° až 662°F) | lepší než 1.0°C nebo 0.75% | lepší než 0.5°C nebo 0.4% |

Obrázek 12 Teplotní rozsahy termočlánků [21]

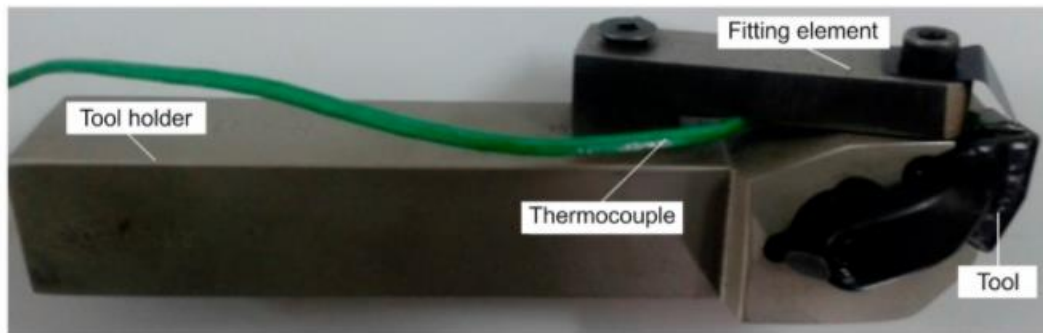


Graf 1 Závislosti termoelektrického napětí pro typy termočlánků [23]

5.4.2. Umělý termočlánek

Podstatou umělého termočlánku je vznik termoelektrického napětí, které vzniká na rozhraní dvou materiálů. Umístěním termočlánku do místa řezu a s pomocí dvou cizích vodičů lze měřit teplotu v různých místech nástroje i obrobku. [1, 22]

Termočlánek se vloží na dno otvoru v nástroji. Vlastní zabudování termočlánku do nástroje je poměrně komplikované a složité. Lze jen obtížně určit přesnou polohu umístění měřícího spoje termočlánku. Poloha také mění podmínky vedení tepla a znehodnocuje obráběcí nástroj. [1]



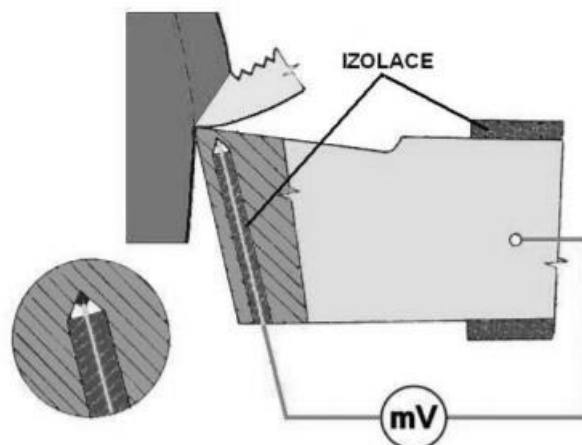
Obrázek 13 Montáž termočlánu na držák nástroje [7]

Izolace je velmi důležitým článkem, nejčastěji se pro ni používají skleněné nebo keramické kapiláry. Srovnávací spoj je umístěn na svorkách milivoltmetru a je udržován na teplotě okolí. [16]

Výhodou umělých termočlánu je známost charakteristiky závislosti termo napětí na teplotě. To nám umožňuje stanovit teplotu přímo ve stupních a není nutné termočlánek cejchovat. [1]

5.4.3. Poloumělý termočlánek

Poloumělý termočlánek je kompromis mezi umělým a přirozeným termočlánekem. Jeden vodič termočlánu tvoří materiál nástroje a druhý cizí vodič je vodivě spojený v místě řezu. Poloumělý termočlánek lze snáze umístit do místa měření, je tedy výhodnější díky malým rozměrům cizího vodiče. Využití závisí na možnosti umístění izolovaného vodiče do místa řezu a jeho vodivé spojení s materiálem obrobku nebo nástroje. [1, 6]



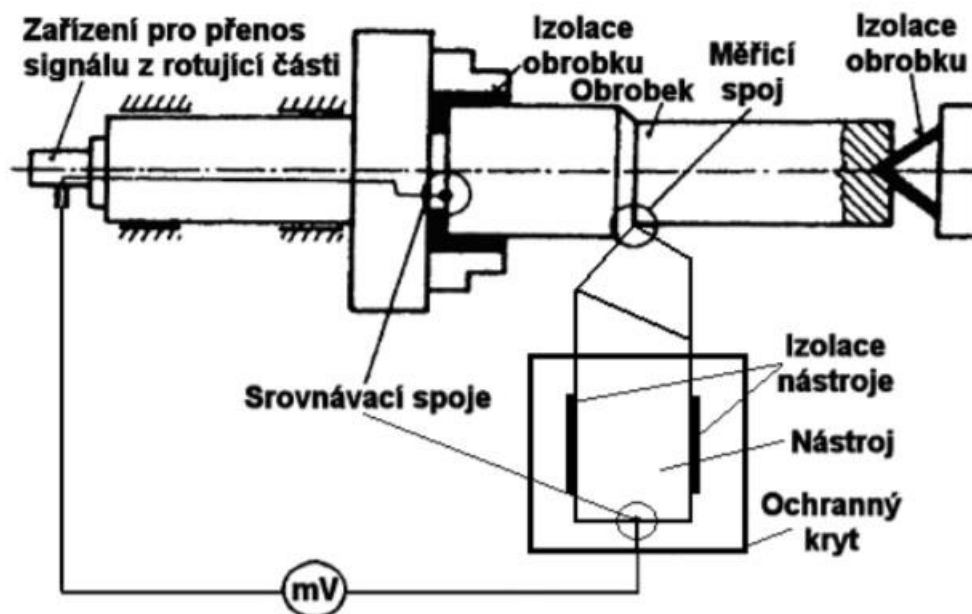
Obrázek 14 Schéma zapojení poloumělého termočlánu [24]

Při řezání se deformuje odcházející třísky v místě řezu a vytváří tak měřící spoj termočlánek spolu s břitem nástroje. Tohoto se dá využít při stanovení teploty v oblasti styku třísky s čelem nástroje. Při měření teplotních polí na čele nástroje se používá systematické rozmístění několika cizích vodičů po čele nástroje. [1]

5.4.4. Přirozený termočlánek

Přirozený termočlánek je bez přídavného cizího vodiče. Jedním z vodičů je materiál nástroje a druhým vodičem je materiál obrobku. Měřící spoj je přímo v místě styku břitu nástroje s obrobkem. Tedy na ploše styku třísky s čelem a hřbetu s plochou řezu. [1, 21]

Termoelektrické napětí je úměrné střední teplotě v oblasti styku, teplotě řezání. Na ploše styku vzniká soustava elementárních termočláneků s různou teplotou v jednotlivých bodech. Výsledné napětí je proto aritmetickým průměrem termoelektrických napětí těchto mikročláneků. [1, 25]



Obrázek 15 Schéma zapojení přirozeného termočláneku [24]

Důležité je vzájemné odizolování nástroje a obrobku. Při běžném měření stačí odizolovat nástroj od obráběcího stroje, ale pro zvýšení spolehlivosti a přesnosti měření je dobré odizolovat od stroje i obrobek. [1, 25]

Nevýhodou přirozených termočláneků je nutné a obtížné cejchování systémů pro každou dvojici materiálů nástroje a obrobku. [1, 25]

5.4.5. Cejchování termočláčku

Pro stanovení závislosti termoelektrického napětí na teplotě je nutné daný termočlánek ocejchovat. Cejchovní křivka nám umožní převést naměřené hodnoty termoelektrického napětí v mV na teplotu ve °C. [1, 16]

Cejchování lze provádět těmito způsoby:

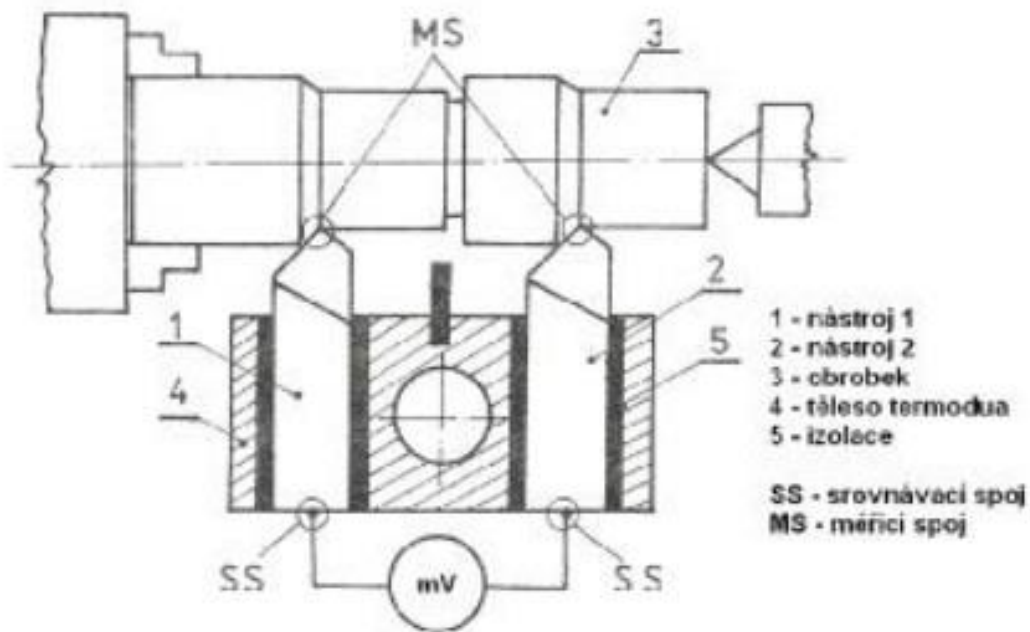
- v lázních čistých kovů a slitin
- v elektrických pecích s teplotní regulací
- cejchování plamenem

5.5. Termoduo

Tato metoda je poměrně jednoduchá a není náročná na přípravu. Dává spolehlivé výsledky pro celistvé nástroje. U nástrojů pájených nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami se postupně prohřívá i styková plocha mezi destičkou a držákem, dochází k tzv. parazitním termočláčkům. [1, 26]

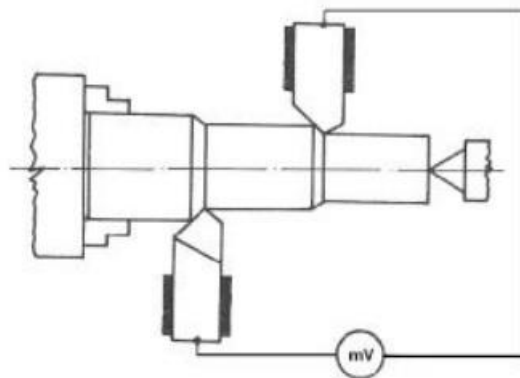
Princip termodua spočívá v současném záběru dvou nástrojů z různých materiálů, stejné geometrie, při stejných řezných parametrech. Nástroje spolu tvoří vlastní termočlánek a obráběný materiál tvoří s každým z nástrojů měřicí spoj. Slouží jako tepelný a elektrický vodič. U materiálů obou nástrojů se musí lišit chemické složení, aby výsledné termoelektrické napětí bylo dostatečně velké a spolehlivě měřitelné. [1, 16, 26]

Lze použít dvojici nástrojů z rychlořezné oceli a slinutého karbidu. Podmínkou pro správnou funkci je odizolování obou nástrojů od stroje a mezi sebou. Výhodou této metody je, že po ocejchování dvojice řezných materiálů lze stanovit teplotu řezání pro jakýkoliv elektricky vodivý materiál. [1, 26]



Obrázek 16 Schéma zapojení termodua [1]

Nevýhodou termodua v uspořádání je velká spotřeba obráběného materiálu, omezená délka obrábění a nutnost úpravy polotovaru na současný záběr obou nožů. Tyto nedostatky se do jisté míry dají eliminovat uspořádáním s noži proti sobě. I přes obrábění různými rychlostmi je chyba vzniklá při použití běžných hloubek řezu téměř zanedbatelná. [1, 18]



Obrázek 17 Uspořádání termodua s noži proti sobě [4]

5.6. Pyrometry

Pyrometry, též nazývané také infračervené teploměry nebo radiační teploměry, slouží pro bezkontaktní bodové měření teploty v rozsahu $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Určují teplotu pomocí měrného tělesa z teplotního záření. [27, 28]

Radiační technika (infračervený pyrometr) používá metody k měření povrchové teploty těla na základě jeho emitované tepelné energie. Tato technika je pravděpodobně nejvhodnější při soustružení, kde lze zachytit vysoké teploty, jelikož nedochází k přímému kontaktu se zdrojem světla. [7]

Při experimentálním studiu obrábění se jí využívá především k měření povrchové soustavy stroj – nástroj – obrobek. [1]

Používají se dva základní druhy:

- úhrnné pyrometry
- fotoelektrické pyrometry

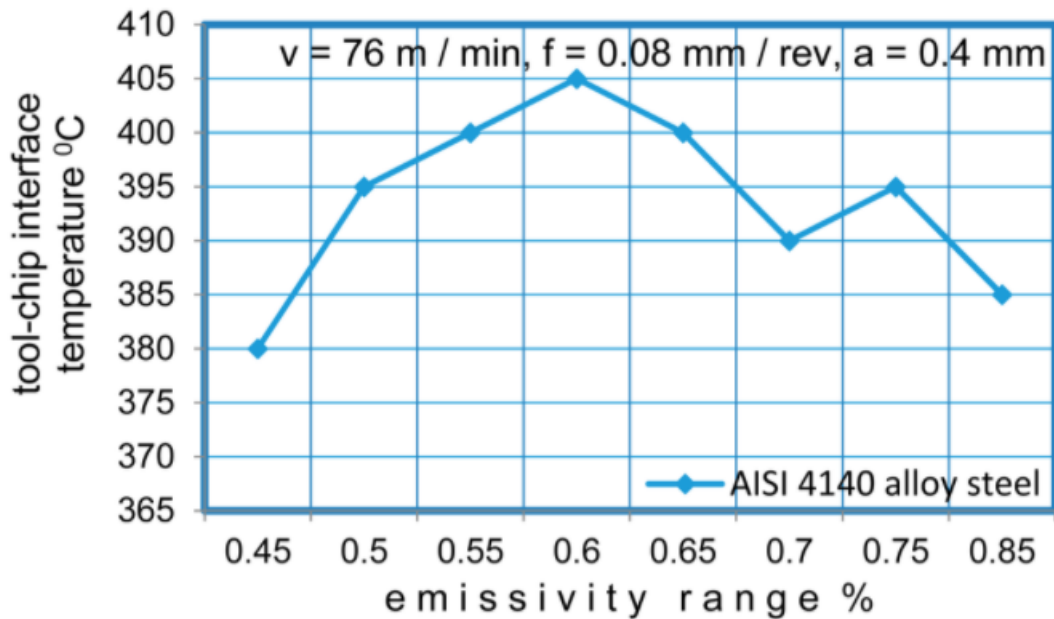


Obrázek 18 Pyrometr [28]

Metoda bezkontaktního měření teploty pyrometrem je poměrně slibná pro on-line monitorování a řízení při laserovém obrábění. Nevýhodou je, že vyžaduje správné aplikace řešení řady metodických obtíží. Mezi ně patří například široký teplotní rozsah, ostré teplotní přechody, vysoké rychlosti ohřevu a chlazení. Většina komerčních pyrometrů s malým infračerveným spektrálním pásmem nelze použít při laserovém obrábění kvůli nízké ochraně před odraženým laserovým zářením. [29]

Emisivita je míra schopnosti objektu absorbovat, přenášet a emitovat infračervenou energii. Vyzařovaná energie označuje teplotu objektu. Může nabývat hodnot od 0 (lesklé

zrcadlo) do 1 (černé těleso). Emisivita materiálu je rozhodujícím parametrem pro přenos tepelného sálavého tepla. [7]



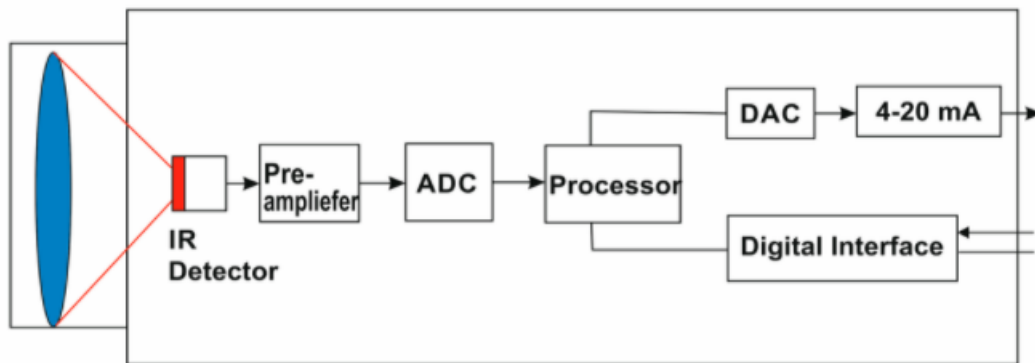
Graf 2 Rozsah emisivity IR pyrometru [7]

5.6.1. Úhrnné pyrometry

Úhrnné pyrometry se označují jako radiální nebo celkové. Tento druh pyrometru je levný a jednoduchý, avšak korekce údajů je obtížná. Proto se používají k měření povrchů s emisivitou blízkou jedné. Tuto podmínku splňují dobře uzavřené prostory nebo objekty bez lesku. Pro správné měření teploty musí být zaručeno, že na přijímač záření dopadají pouze tepelné paprsky zářiče. Časté chyby jsou způsobeny působením denního světla. [1, 30]

Úhrnné pyrometry měří v široké oblasti vyzařovaného teplotního záření, který je soustředěn optickou soustavou na teploměrné čidlo. Tím bývá nejčastěji odporový teploměr nebo termočlánek. [1, 30]

Ke zpracování signálu se používají moderní elektrické obvody řízené mikroprocesorem. [6]



Obrázek 19 Blokové schéma infračerveného pyrometru [17]

5.6.2. Fotoelektrické pyrometry

Fotoelektrický pyrometr neboli pyrometr pásmový. Měří na podobném principu jako radiační pyrometr, ale pouze v určitém rozmezí vlnových délek. Tedy pouze část spektra tepelného záření, které je vymezené optikou, filtry a spektrální citlivostí fotoelektrického čidla. [1, 30]

Fotoelektrické pyrometry se používají tam, kde mezi měřeným objektem a pyrometrem jsou plyny s absorpčními pásmy v oblasti infračerveného záření. [1]

5.7. Měření pomocí termovize

V současné době existuje řada dalších velice přesných metod měření teploty při řezání. Vyžadují však moderní měřicí zařízení. Značně jsou rozšířeny termografické systémy, které se využívají ke snímání, zobrazování a vyhodnocování teplotních polí v mnoha oborech činnosti. Významné je také jejich použití ke sledování výrobních procesů a technologických zařízení prostřednictvím pevně zabudovaných termovizních systémů. [1]

Termovize představuje velmi přesnou a progresivní metodu v experimentálním výzkumu teplot při řezání. Předností této metody je záznam i velmi rychlé změny teploty. To je důležité pro posouzení dynamických jevů. [1]

5.8. Měření pomocí teplotních indikátorů

Teplotní indikátory jsou termochemické teploměry, kterými se dají určovat místa se stejnou teplotou, tzv. izotermy. Po nanesení těchto látek na povrch zkoumané součásti nastává po dosažení její určité teploty ke změně barvy nebo skupenství. Teplotní pole lze získat velice rychle bez náročných příprav měření. Nedojde k poškození nástrojů ani obrobků. [1, 16]

Nevýhodou tohoto měření není možnost získat přehled o teplotě v místě styku obráběcího nástroje s třískou a výroba těchto látek je pouze pro malý rozsah teplot. [1]

Teploměřové barvy jsou chemické nátěry, které při dosažení teploty zvratu změny svoji původní barvu. Existují v práškové formě, kdy se před použitím rozmíchají v alkoholu, nebo v tekutém stavu, případně ve spreji. Teplotní rozsah bývá obvykle mezi 40 °C do 1400 °C. [31]

Teploměřové tužky se nanášejí na ohřátý povrch, na rozdíl od teploměrových barev, které se nanáší před ohřátím. Teplotní rozsah bývá až do 1400 °C. Obvykle se jedná o jednozvratné nebo dvojzvratné, dosahují tedy jedné nebo dvou barevných změn při jedné nebo dvou teplotách zvratu. [31]

Teploměřové křídly a vosky mění své skupenství z pevného na kapalné při určité teplotě, případně změny svoji původní barvu. Nanášejí se také na ohřátý povrch a jsou vyráběné pro určitý rozsah teplot. [31]

6. Praktická část – Experiment

Cílem praktické části mé bakalářské práce je ověřit přesnost měření sondy thermoMETER CTL M-3H2 od firmy Micro-Epsilon Czech Republic. Určit cejchovní křivku, kterou získáme pomocí zahříváním termočlánku plynovým plamenometem. Zahřívání termočlánek je složený z dvojice vodičů Fe – Ko a C45 – SKP 30. A v poslední fázi experimentu zjistit závislosti teploty na řezné rychlosti, posuvu a hloubce řezu při soustružení uhlíkové oceli ČSN 12 050 (DIN C45) na hrotovém soustruhu SUI 32 soustružnickým nožem ze slinutého karbidu SK P30.

Určení přesnosti měření sondy bylo provedeno mezi sondou thermoMETER CTL M-3H2 a přirozeným termočlánkem při zjišťování třech teplotních závislostí. Přirozený termočlánek je složen z nástroje SK P30 a obrobku C45. Závislost teploty na řezné rychlosti byla provedena s pěti různými rychlostmi 40; 60; 80; 100; 120 m/min při konstantním posuvu $f = 0,101$ a hloubky řezu $a_p = 1$ mm. Dále následuje měření teploty při pěti různých posuvech 0,04; 0,07; 0,101; 0,141; 0,202 mm/ot s konstantní řeznou rychlostí $v_c = 80$ m/min a hloubkou řezu $a_p = 1$ mm. Poslední zjišťovaná závislost teploty na hloubce řezu byla provedena také s pěti různými hloubkami 0,4; 0,7; 1; 1,4; 2 mm s konstantní řeznou rychlostí $v_c = 80$ m/min a posuvem $f = 0,101$ mm/ot.

Měření proběhlo v učebně na fakultě strojní ČVUT v Praze na ústavu technologie, projektování a metrologie.

6.1. Polotovar ocel ČSN 12 050

Při obrábění byla použita uhlíková ocel ČSN 12 050. Uhlíková ocel se používá k zušlechťování a povrchovému kalení, je vhodná na hřídele těžních strojů, turbokompresorů a karuselů. [32]

6.2. Hrotový soustruh SUI 32

Prováděný experiment byl uskutečněn na školním hrotovém soustruhu SUI 32 od firmy TOS Trenčín.

| | |
|-------------------------|--------------------------------|
| Popis | Oběžný průměr nad ložem 320 mm |
| Délka soustružení | 750 mm |
| Rozsah otáček vřetena | 20 až 3150 min ⁻¹ |
| Rozsah podélných posuvů | 0,01 až 3,24 mm/ot |
| Rozsah příčných posuvů | 0,005 až 1,62 mm/ot |
| Výkon hlavního motoru | 4 kW |
| Rozměry d x š x v | 1930x1030x1535 mm |
| Hmotnost | 1460 kg |

Tabulka 1 Základní parametry hrotového soustruhu SUI 32 [33]

6.3. Nástroj a geometrie nástroje

V experimentu jsem pro měření teplotní závislosti zvolil soustružnický nůž ze slinutého karbidu SK P30. S následující geometrií:



Obrázek 20 Soustružnický nůž SK P30

Základní rovina:

Úhel nastavení hlavního ostří: $\kappa_r = 70^\circ$

Úhel špičky: $\epsilon_r = 90^\circ$

Úhel nastavení vedlejšího ostří: $\kappa_r' = 20^\circ$

Ortogonální rovina:

Úhel hřbetu: $\alpha_0 = 3^\circ$

Úhel břitu: $\beta_0 = 75^\circ$

Úhel čela: $\gamma_0 = 12^\circ$

Rovina ostří:

Úhel sklonu ostří: $\lambda_s = 1^\circ$

6.4. Pyrometr AMiR 7811-20

Pyrometr AMiR 7811-20 je kompaktní odolný a snadno použitelný měřicí přístroj. K měření teploty stačí zamířit na měřený objekt, stisknou spoušť a odečíst teplotu z displeje pyrometru. [34]

Zvolený bezkontaktní teploměr založený na infračerveném záření měří povrchovou teplotu předmětu. Optika přístroje snímá vyzářenou odraženou a prostupující energii, která se shromažďuje a zaměřuje přes optiku na detektor. Elektronika přístroje převede informaci na hodnotu teploty, která se na přístroji zobrazí. Laser se používá pro zaměřování. [34]

6.5. ThermoMETER CTL M-3H2

Senzory thermoMETER CTL představují bezkontaktní infračervené snímače teploty. Tyto přístroje teplotu povrchu vypočítávají na základě vyzařované infračervené energie předmětů. Součástí je zaměřování pomocí dvojitého laseru, který na jakoukoliv vzdálenost dokáže na povrchu předmětu označit skutečnou pozici měřícího bodu a jeho velikost. Kryt senzoru CTL je vyrobený z nerezové oceli. Řídící jednotka je uložena do samostatného pouzdra z litého zinku. [35]

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| Model | M-3H2 |
| Teplotní rozsah | 200/1500 °C |
| Spektrální rozsah | 2,3 μm |
| Optické rozlišení | 300:1 |
| Přesnost systému | ± 0,3 % naměřené hodnoty + 2 °C |
| Doba expozice | 1 ms |
| Emisivita | 0,1 až 1,1 |
| Transmisivita | 0,1 až 1,1 |

Tabulka 2 Základní parametry přístroje thermoMETER CTL M-3H2



Obrázek 21 Zaměřený laser na čelo v blízkosti ostří

6,6. Kalibrace měřidel

Před ověřováním sondy a zjišťování závislosti teploty na řezné rychlosti, posuvu a hloubce řezu je zapotřebí zkalibrovat a ověřit správnost ThermoMETERU CTL M-3H2, kterou srovnáme pomocí pyrometru AMiR 7811–20 a Termometru THERM 2280-2 obojí od firma AHLBORN. Ke kalibraci jsme využili nerezovou destičku o tloušťce 7 mm, kterou zahříváme pomocí plynového plamenometu na teplotu přibližně 300 °C.



Obrázek 24 Zahřívání destičky plynovým plamenometem



Obrázek 23 Měření teploty pyrometrem AMiR 7811-20

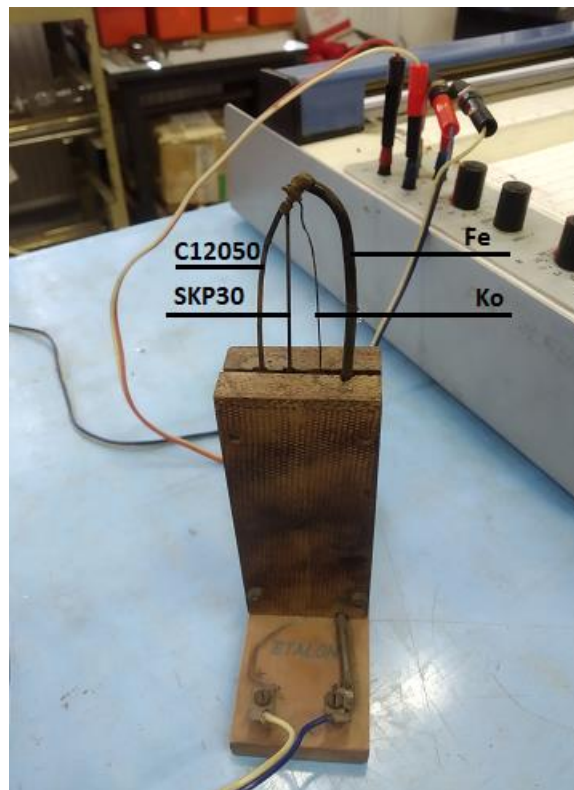


Obrázek 22 Porovnání teplot

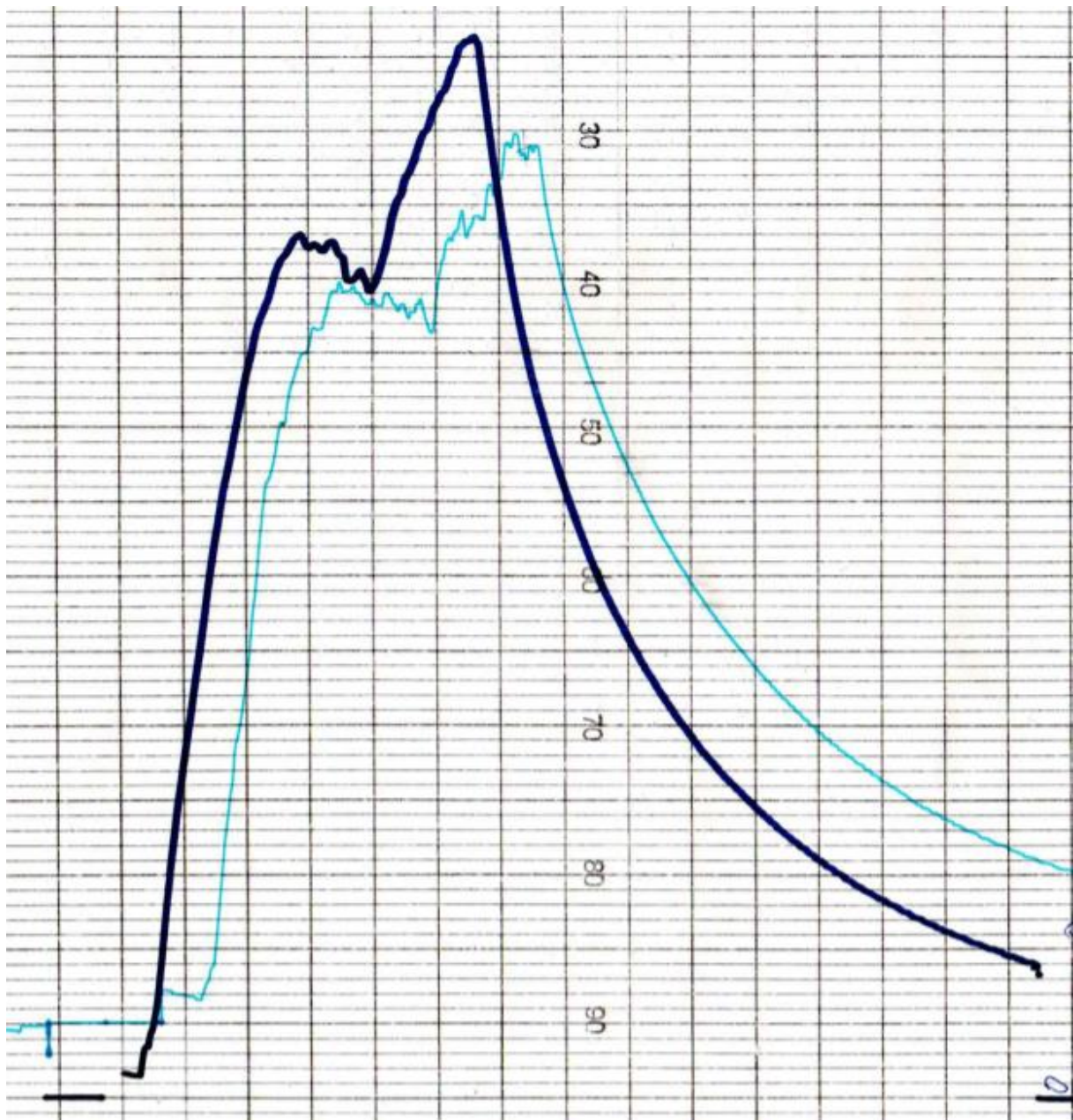
6.7. Cejchování termočlánku

Jak již bylo zmíněno v rešeršní části, při měření teploty pomocí termočlánku se využívá tzv. termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku termoelektrického napětí, v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny. [9]

K měření jsme využili termočlánek s dvěma vodivě spojenými páry. První vodivě spojený pár je složen Fe-Ko, druhý C45-SKP 30. Z dostupné literatury uvažujeme rozdíl termoelektrických potenciálů Fe-Ko 53,7 mV/1000 °C. [36]



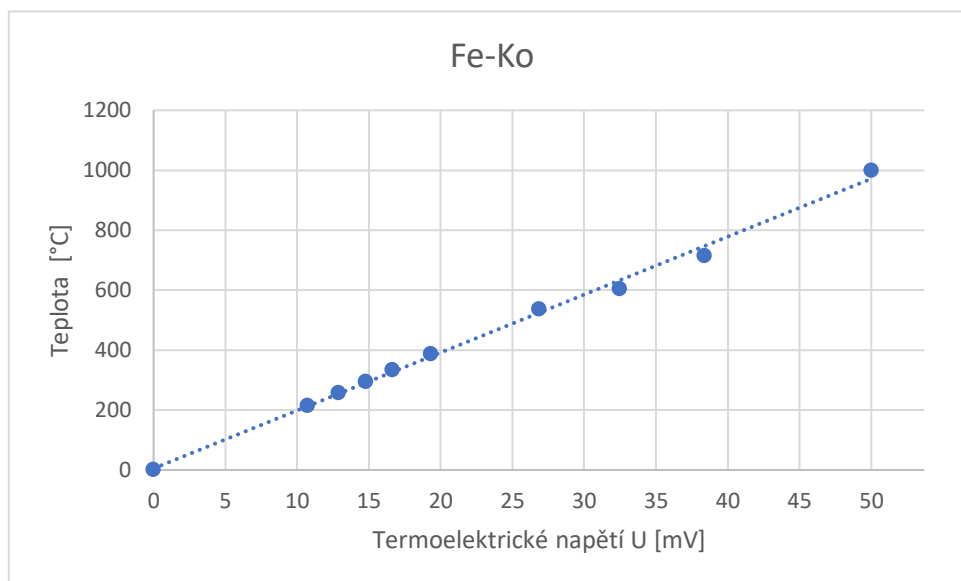
Obrázek 25 Termočlánek pro vytvoření cejchovní křivky



Obrázek 26 Průběhy termoelektrického napětí termočlánků Fe-Ko a C45-SK P30

| Č. měření | Počet dílků | U [mV] | Teplota [°C] |
|-----------|-------------|---------|--------------|
| 1. | 20 | 10,74 | 214,8 |
| 2. | 24 | 12,888 | 257,76 |
| 3. | 2705 | 14,7675 | 295,35 |
| 4. | 31 | 16,647 | 332,94 |
| 5. | 36 | 19,332 | 386,64 |
| 6. | 50 | 26,85 | 537 |
| 7. | 60,5 | 32,4885 | 605 |
| 8. | 71,5 | 38,3955 | 715 |

Tabulka 3 Zjištěné teploty při zahřívání termočlánu Fe-Ko

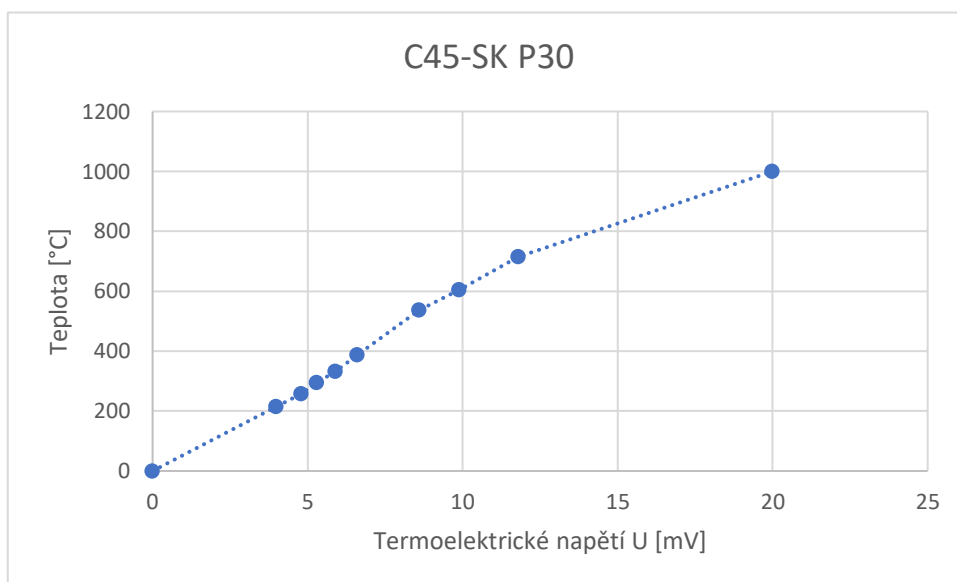


Graf 3 Cejchovní křivka Fe-Ko

Vytvořením cejchovní křivky Fe-Ko o termoelektrickém potenciálu 53,7 mV na 1000 °C jsem vynesemím v grafu zjistil jednotlivé teploty pro osm určených bodů při chladnutí. Termočlánek Fe-Ko byl zahřát na teplotu 715 °C. Při chladnutí popisuje logaritmický průběh, který jde vidět na obrázku 26.

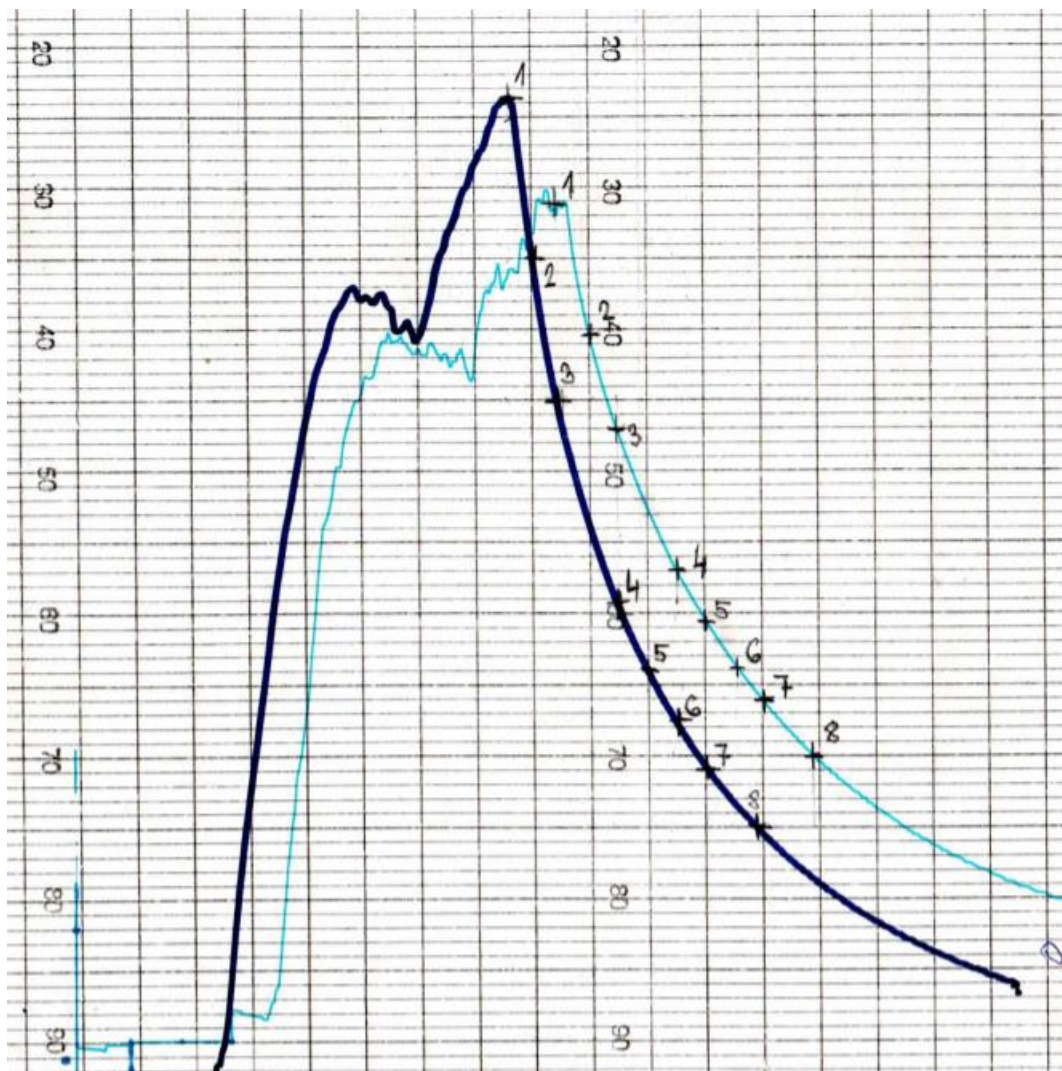
| Č. měření | Počet dílků | U mV | Teplota °C |
|-----------|-------------|------|------------|
| 1. | 20 | 4 | 214,8 |
| 2. | 24 | 4,8 | 257,76 |
| 3. | 26,5 | 5,3 | 295,35 |
| 4. | 29,5 | 5,9 | 332,94 |
| 5. | 33 | 6,6 | 386,64 |
| 6. | 43 | 8,6 | 537 |
| 7. | 49,5 | 9,9 | 605 |
| 8. | 59 | 11,8 | 715 |

Tabulka 4 Zjištěné teploty pro termočlánek C45-SK P30



Graf 4 Cejchovní křivka C45-SK P30

Pro osm bodů určených v průběhu Fe-Ko je vytvořeno ve stejném časovém okamžiku osm bodů pro C45-SK P30 v rozdílu termoelektrického potenciálu 20 mV. Spojením bodů v cejchovní křivce C45-SK P30 vytvoříme nelineární závislost, ze které se odečte teplota pro zjištění teplotních závislostí vůči rezní rychlosti, posuvu, hloubce řezu. Také zjistíme přesnost sondy thermoMETER CTL M-3H2.



Obrázek 27 Zvolení bodů v průběhu termoelektrického napětí

6.8. Vliv teploty při soustružení

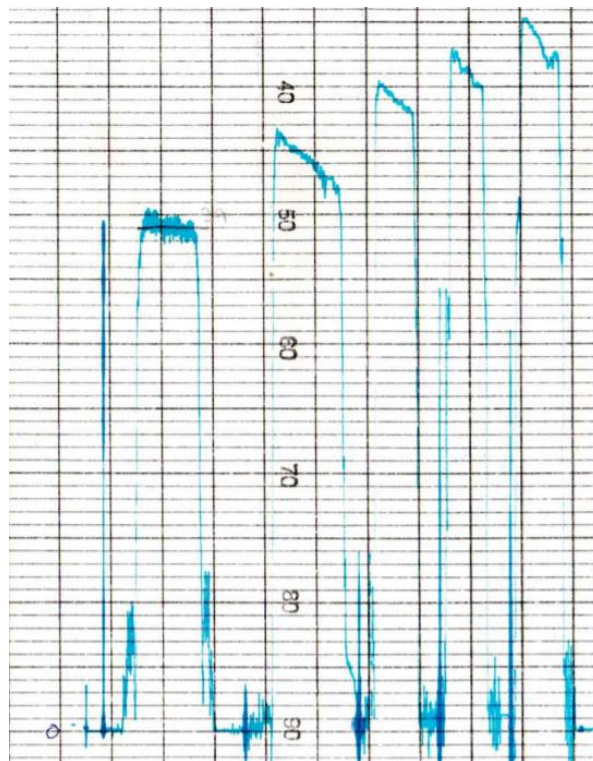
Dalším úkolem experimentu je zjistit přesnost měřící sondy thermoMETER CTL M-3H2 mezi termočlánkem C45-SK P30 a závislost teploty na řezné rychlosti, posuvu a hloubce řezu při soustružení. Hodnoty teplot získáváme pomocí Cejchovní křivky C45-SK P30.

Nahrazení závislosti se předpokládá ve tvaru:

$$\theta = C_{\theta} \cdot a_p^{x_{\theta}} \cdot f^{y_{\theta}} \cdot v_c^{z_{\theta}}$$

6.8.1. Závislost teploty na řezné rychlosti

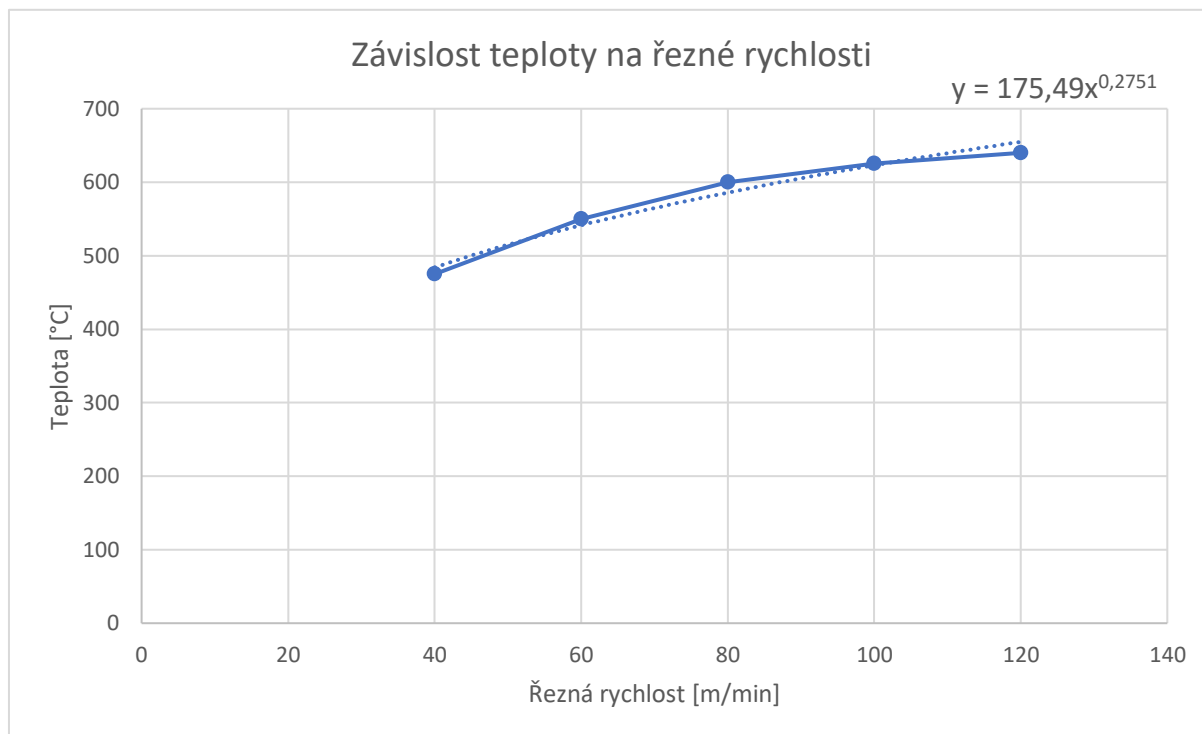
Pro určení závislosti teploty na řezné rychlosti jsem provedl pět měření při pěti různých rychlostech o konstantním posuvu $f = 0,101 \text{ mm/t}$ a hloubce třísky $a_p = 1 \text{ mm}$. Měření bylo provedeno na školním soustruhu SUI 32 od firmy TOS Trenčín. V experimentu byl použit soustružnický nůž ze slinutého karbidu SK P30. Teploty byly odečteny z cejchovní křivky C45-SK P30 a připraveného programu.



Obrázek 28 Průběhy termoelektrického napětí při řezných rychlostech

| | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----|------|------|
| v_c [m/min] | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| Napětí [mV] | 7,8 | 8,8 | 9,8 | 10,2 | 10,6 |
| Teplota [°C] | 475 | 550 | 600 | 625 | 640 |

Tabulka 5 Teploty měřené termočlánkem při různých řezných rychlostech



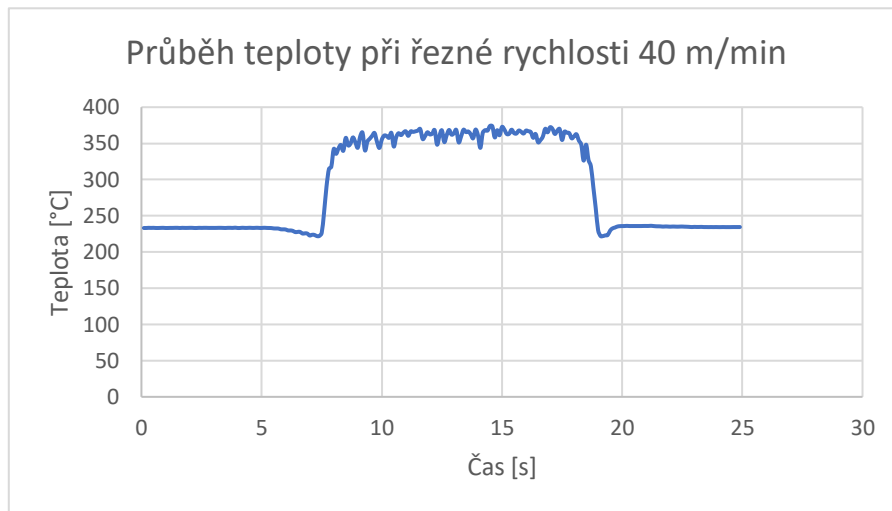
Graf 5 Závislost teploty na řezné rychlosti

$$C_{\theta v_c} = 175$$

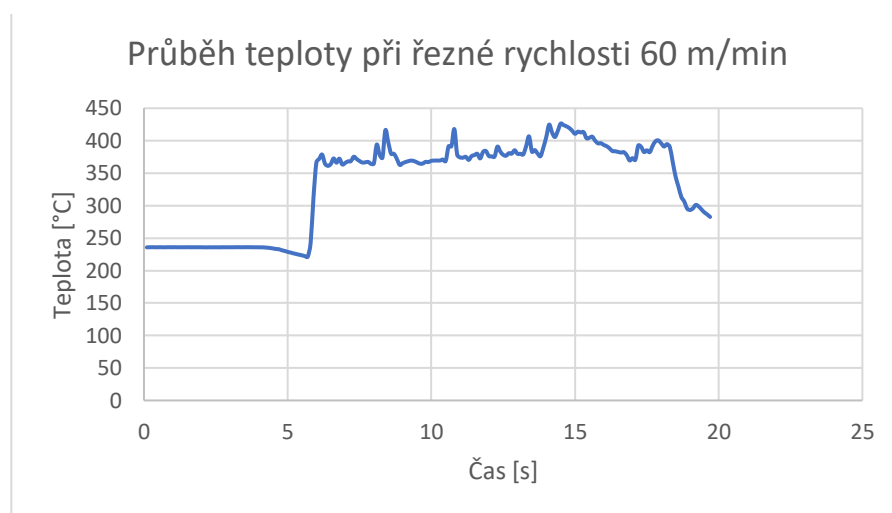
$$z_{\theta} = 0,28$$

$$C_{\theta I} = \frac{C_{\theta v_c}}{a_p^{x_{\theta}} \cdot f^{y_{\theta}}} = \frac{175}{1^{0,02} \cdot 0,101^{0,09}} = 215$$

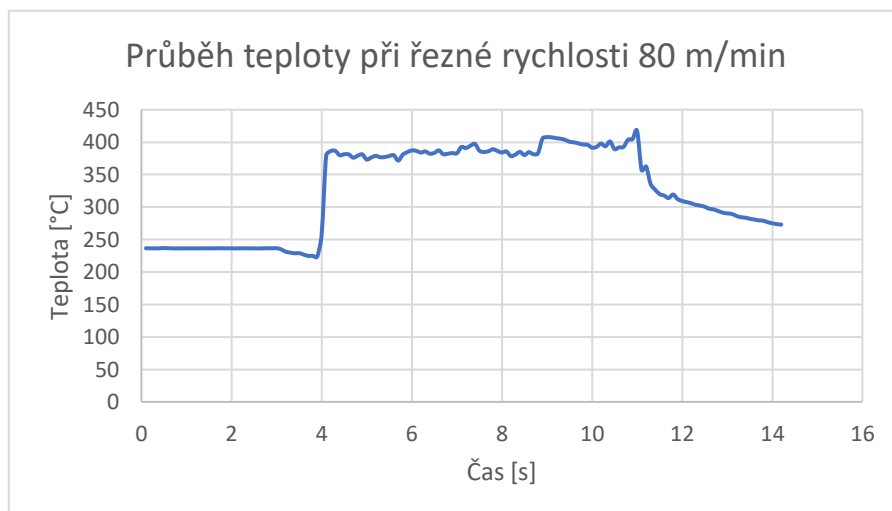
Průběh teploty podle sondy thermoMETER CTL M-3H2:



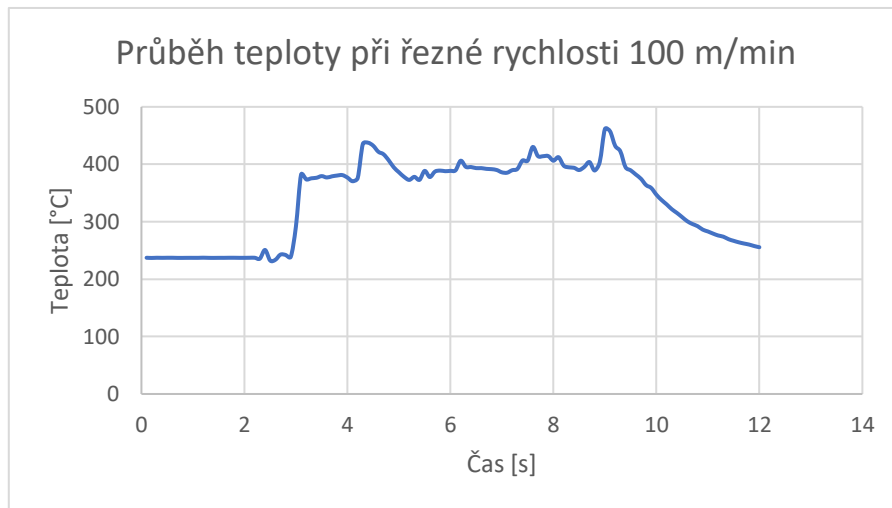
Graf 6 Průběh teploty při řezné rychlosti 40 m/min



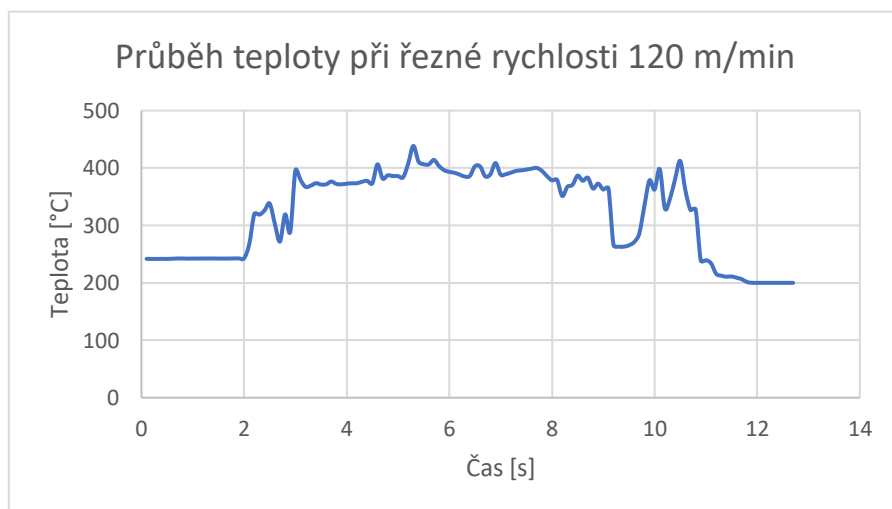
Graf 8 Průběh teploty při řezné rychlosti 60 m/min



Graf 7 Průběh teploty při řezné rychlosti 80 m/min



Graf 9 Průběh teploty při řezné rychlosti 100 m/min

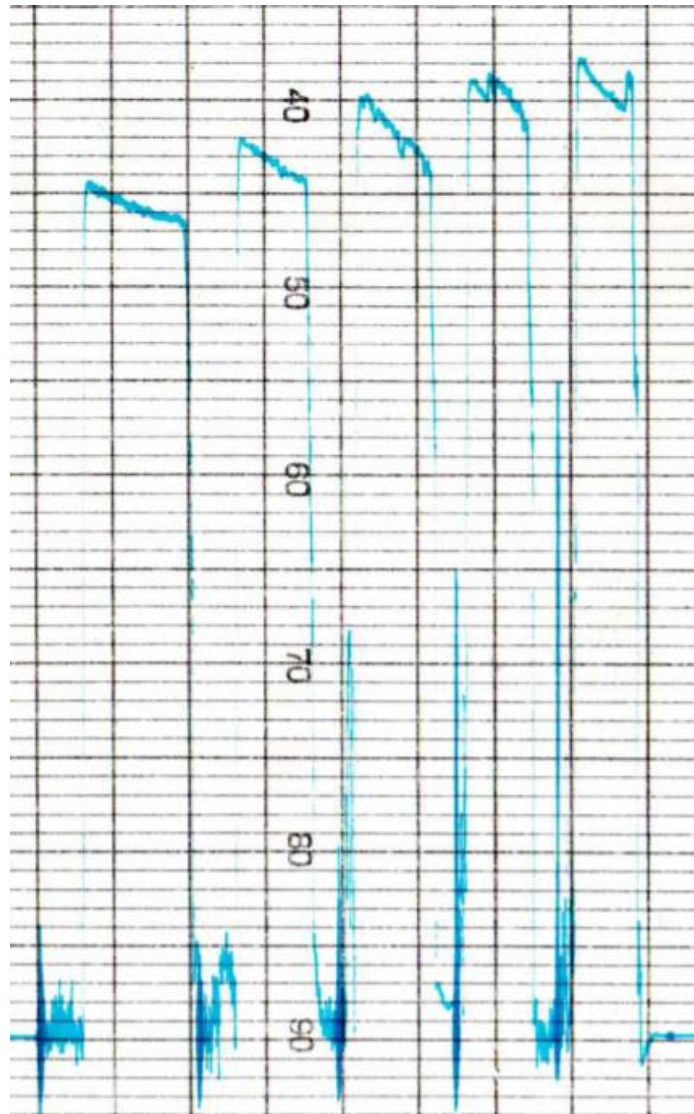


Graf 10 Průběh teploty při řezné rychlosti 120 m/min

V průběhů teplot, které byly naměřeny pomocí přístroje thermoMETER CTL M-3H2, lze vidět, že ve všech pěti zvolených rychlostech dochází k rozptylu. Ten se při vyšší řezné rychlosti zvyšoval. To je zapříčiněno dlouhou vinutou, stužkovou smotanou a plochou spirálovou třískou, která vznikala při obrábění. Tříška způsobovala rozptyl zaměřeného laseru na čelo nože. Měřila se tedy odcházející tříška z místa řezu.

6.8.2. Závislost teploty na posuvu

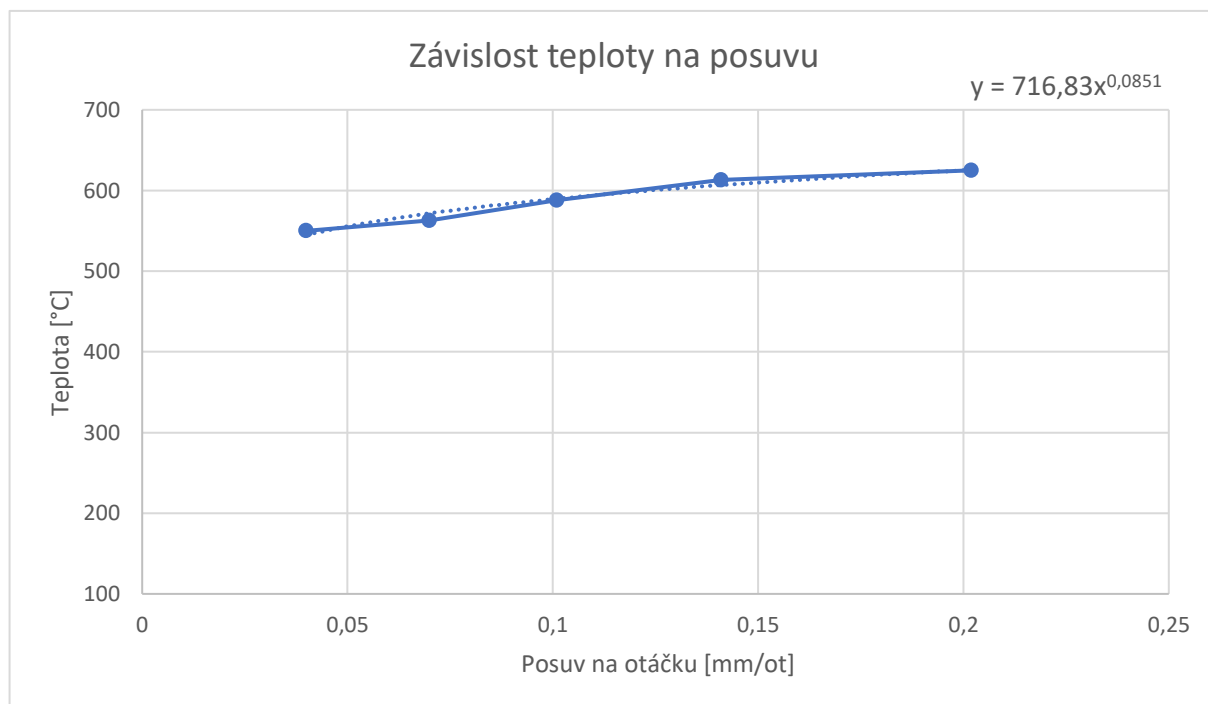
Pro zjištění teplotní závislosti na posuvu jsem provedl taktěž pět měření při pěti různých posuvech $f = 0,04; 0,07; 0,101; 0,141; 0,202$ mm/ot. Při konstantní řezné rychlosti $v_c = 80$ m/min i hloubce řezu $a_p = 1$ mm. Měření proběhlo na školním soustruhu SUI 32. Teploty byly odečteny z cejchovní křivky C45-SK P30 a připraveného programu.



Obrázek 29 Průběhy termoelektrického napětí při posuvu

| | | | | | |
|---------------|------|------|-------|-------|-------|
| posuv [mm/ot] | 0,04 | 0,07 | 0,101 | 0,141 | 0,202 |
| Napětí [mV] | 8,8 | 9,2 | 9,6 | 10 | 10,2 |
| Teplota [°C] | 550 | 563 | 588 | 613 | 625 |

Tabulka 6 Teploty měřené termočlánkem při různých posuvech



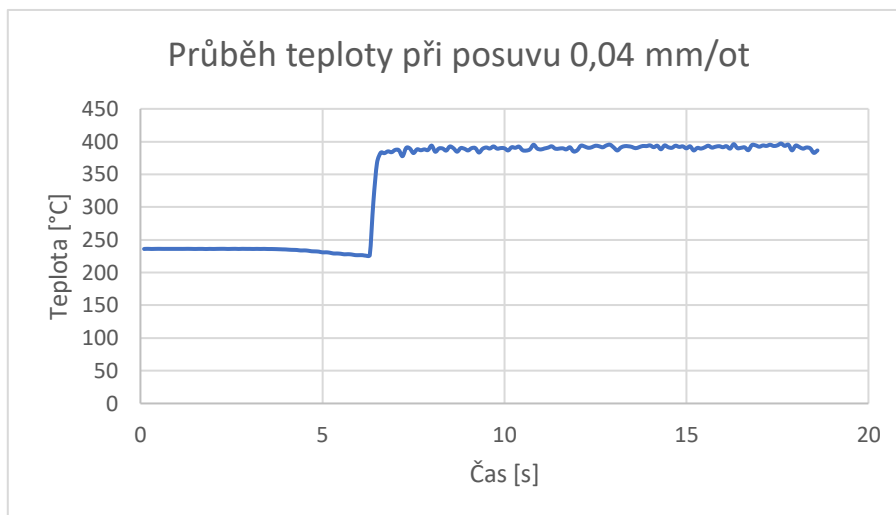
Graf 11 Závislost teploty na posuvu

$$C_{\theta f} = 717$$

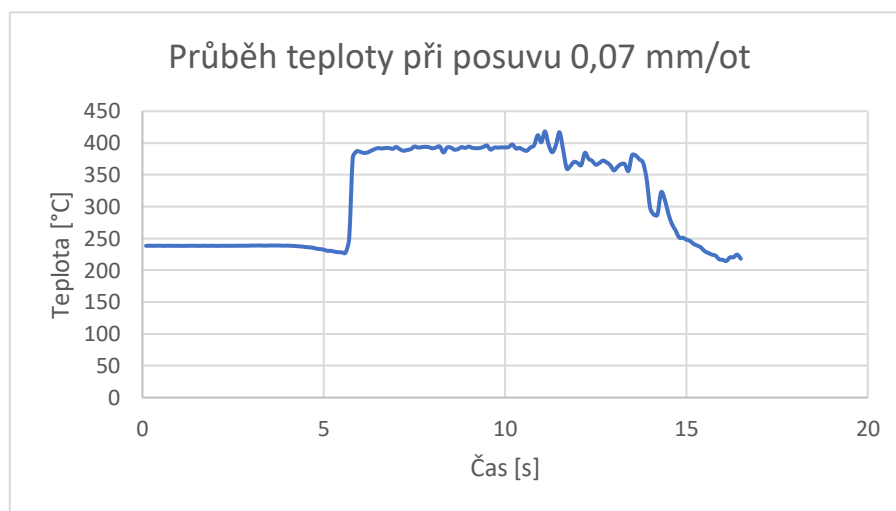
$$y_{\theta} = 0,09$$

$$C_{\theta II} = \frac{C_{\theta f}}{a_p^{x_{\theta}} \cdot a_p^{z_{\theta}}} = \frac{717}{10^{0,02} \cdot 80^{0,28}} = 210$$

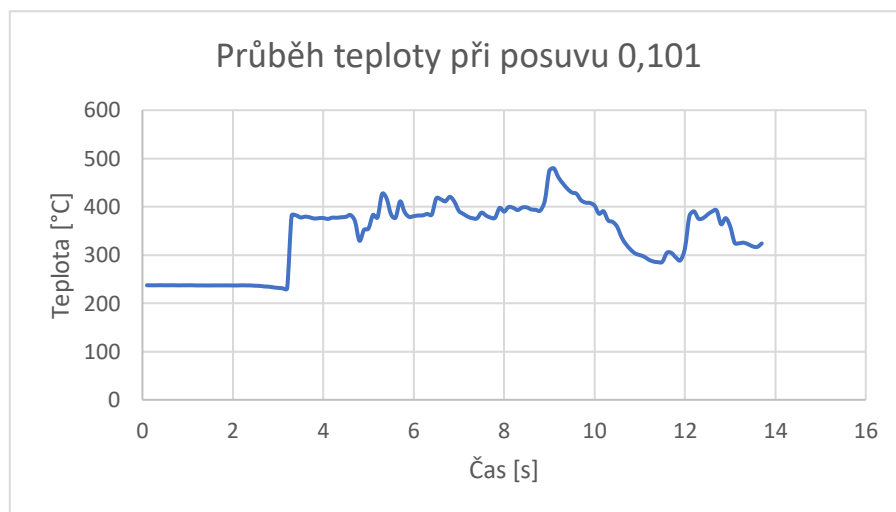
Průběh teploty podle sondy thermoMETER CTL M-3H2:



Graf 13 Průběh teploty při posuvu 0,04 mm/ot



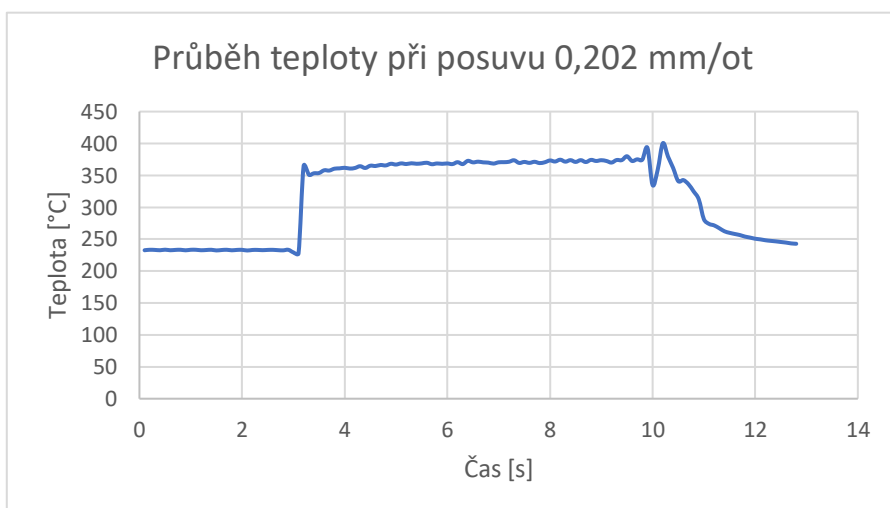
Graf 12 Průběh teploty při posuvu 0,07 mm/ot



Graf 14 Průběh teploty při posuvu 0,101 mm/ot



Graf 15 Průběh teploty při posuvu 0,141 mm/ot

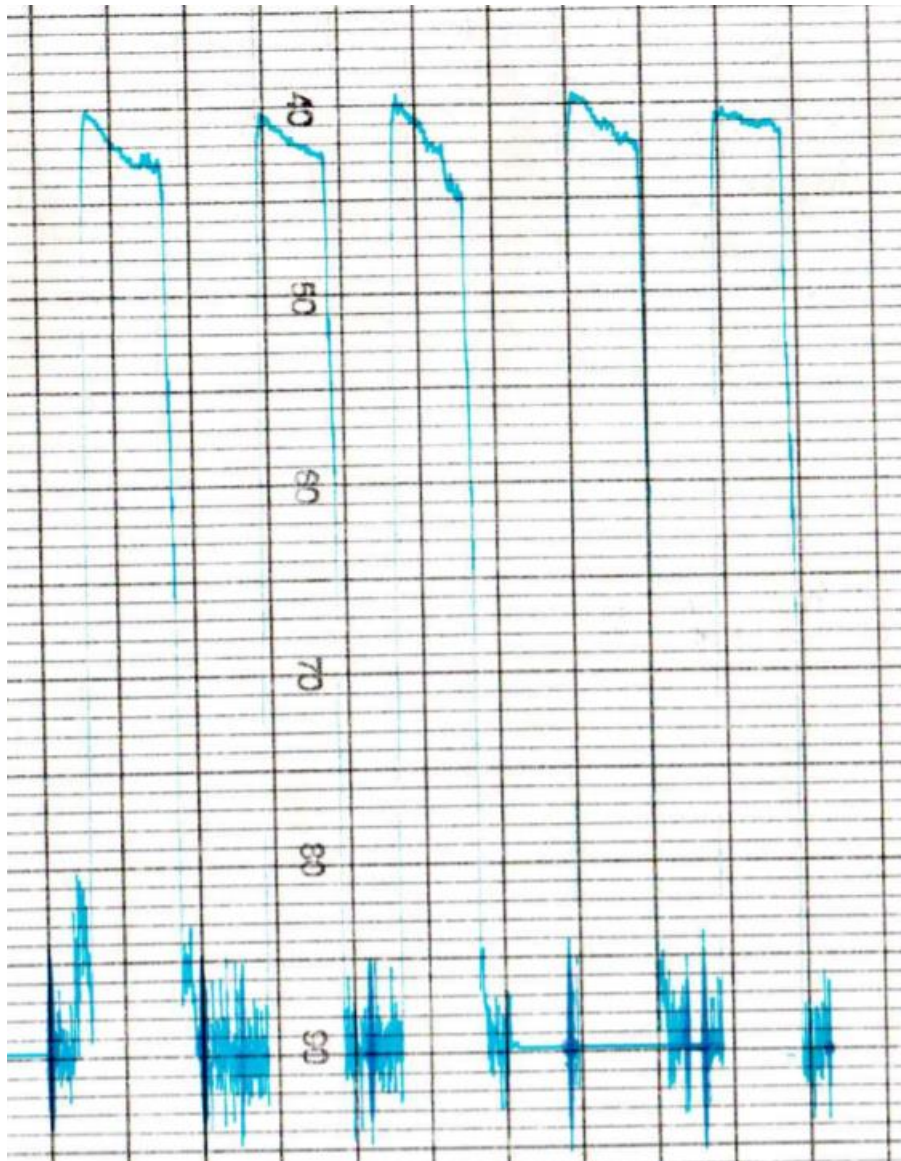


Graf 16 Průběh teploty při posuvu 0,202 mm/ot

V průběhu teplot, které byly naměřeny pomocí thermoMETER CTL M-3H2, lze vidět, že při posuvu $f = 0,04$ dochází k minimálnímu kolísání, jelikož se tvořila tenká drobná tříška a nedocházelo k rozptylování laseru. U dalších posuvů, zejména u posuvu $f = 0,101$, který popisuje graf 14, teplota kolísá mezi 280 až 480 °C. Rozptyl byl způsoben tříškou, která se namotávala na nástroj, docházelo tedy k rozladění laseru, což zapříčinilo nižší teplotu.

6.8.3. Závislost teploty na hloubce řezu

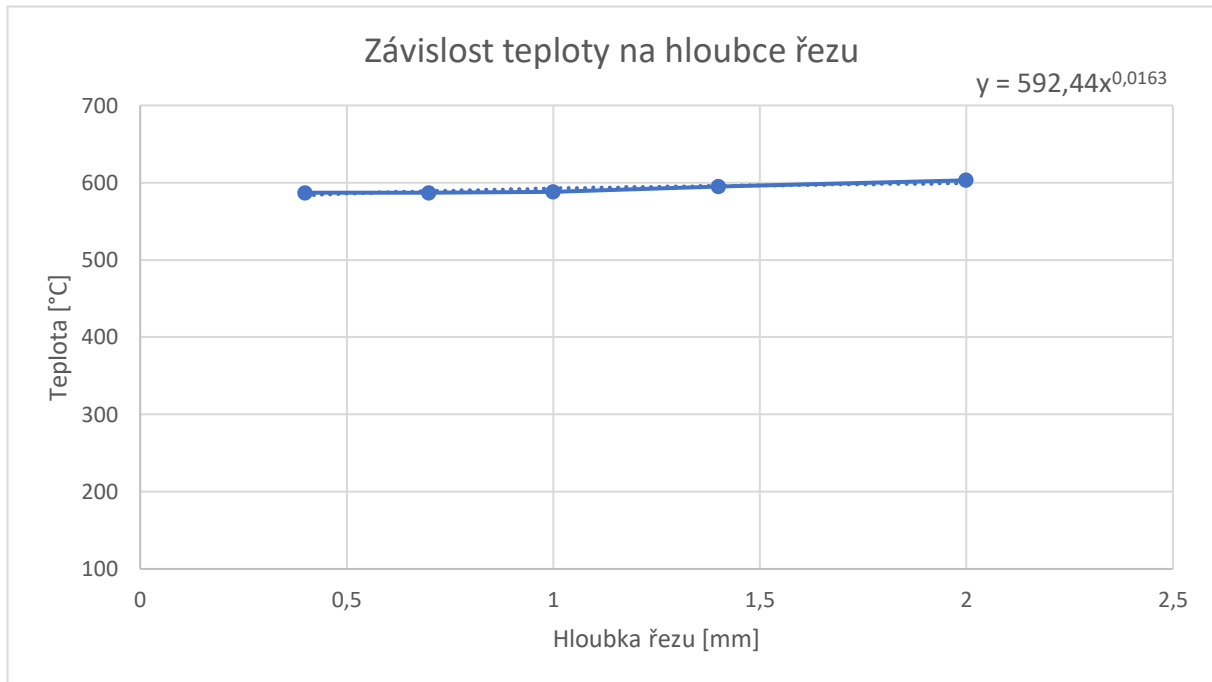
V poslední závislosti teploty se zaměřuji na hloubku řezu. Měření proběhlo pro pět rozdílných hloubek $a_p = 0,4; 0,7; 1; 1,4; 2$ mm při konstantní řezné rychlosti $v_c = 80$ m/min i posuvu $f = 0,101$ mm/ot. Měření proběhlo na školním soustruhu SUI 32 od firmy TOS Trenčín. Teploty byly odečítány z připraveného programu a termočlánku, kde se teploty převáděly pomocí cejchovní křivky C45-SK P30.



Obrázek 30 Průběhy termoelektrického napětí při hloukách řezu

| | | | | | |
|--------------|-----|------|-----|-----|------|
| a_p [mm] | 0,4 | 0,7 | 1 | 1,4 | 2 |
| Napětí [mV] | 9,6 | 9,65 | 9,6 | 9,8 | 9,85 |
| Teplota [°C] | 587 | 563 | 588 | 613 | 625 |

Tabulka 7 Teploty termočlánku při různé hloubce řezu



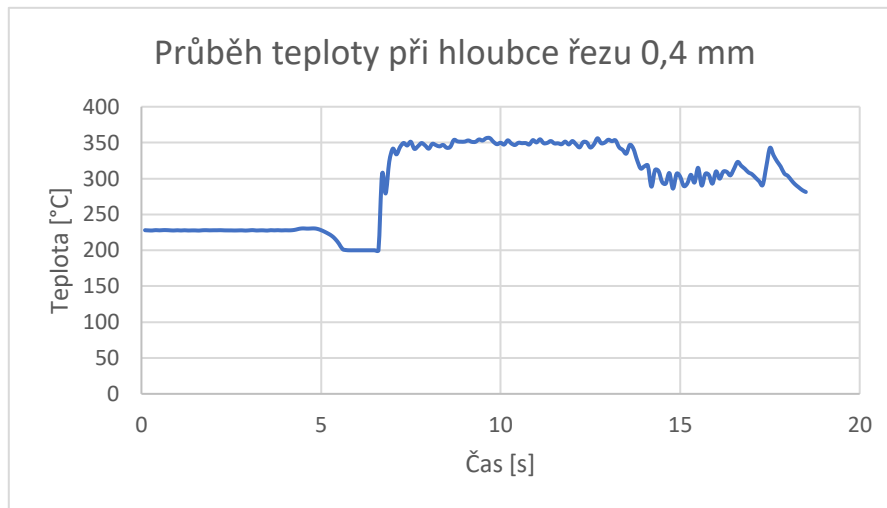
Graf 17 Závislost teploty na hloubce řezu

$$C_{\theta a_p} = 592$$

$$x_{\theta} = 0,02$$

$$C_{\theta III} = \frac{C_{\theta a_p}}{v_c^{z_{\theta}} \cdot f^{y_{\theta}}} = \frac{592}{80^{0,28} \cdot 0,101^{0,09}} = 213$$

Průběh teplot podle sondy thermoMETER CTL M-3H2:

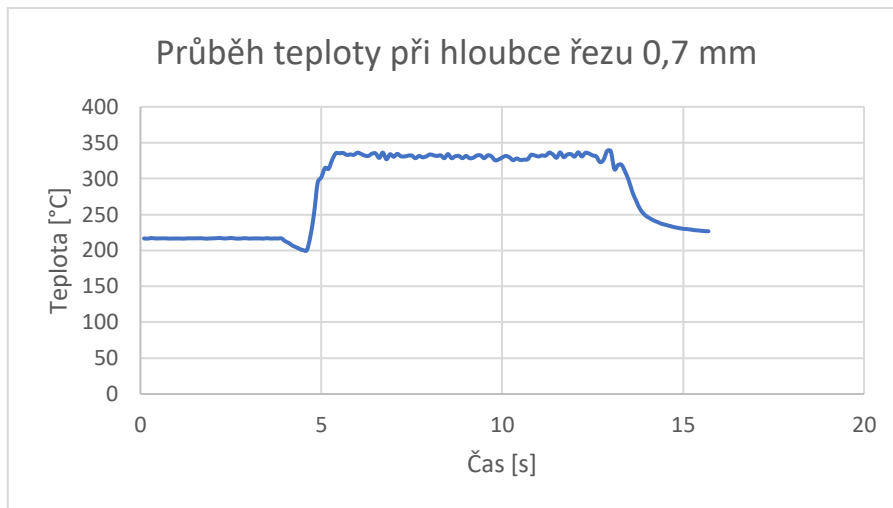


Graf 18 Průběh teploty při hloubce řezu 0,4 mm

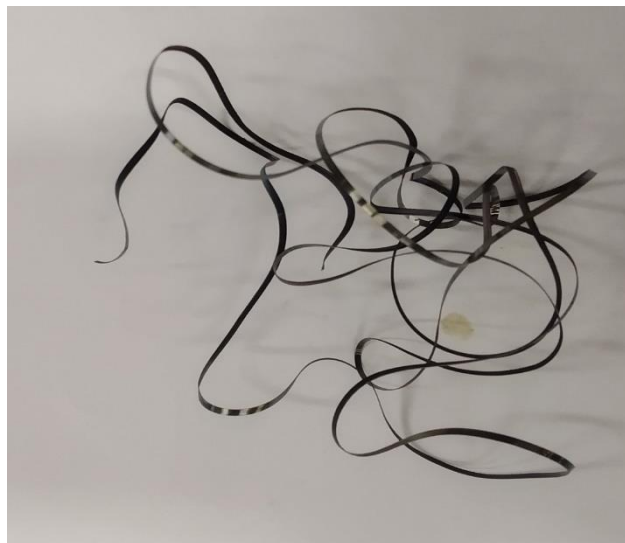


Obrázek 31 Vytvořená tříška při hloubce řezu 0,4 mm

V průběhu teploty při hloubce 0,4 mm můžeme ze začátku vidět mírné kolísání teploty okolo 350 °C, které je způsobené tvořením stužkové smotané třísky. Kolem 13. sekundy se tříška začala namotávat na nástroj, což způsobilo pokles a vyšší kolísání teploty. Došlo k rozptylu laseru.

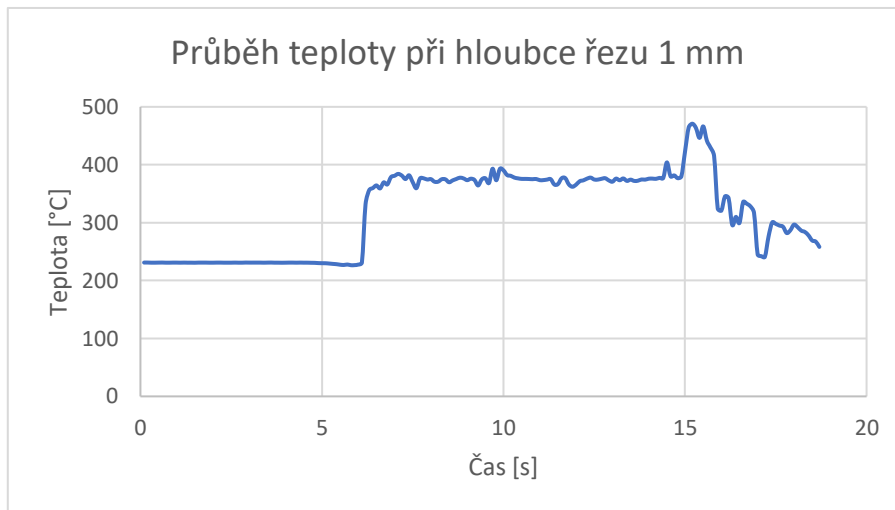


Graf 19 Průběh teploty při hloubce řezu 0,7 mm

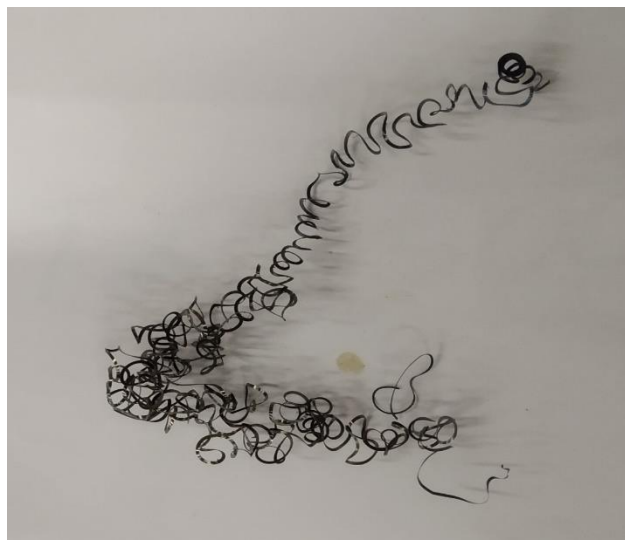


Obrázek 32 Vytvořená tříška při hloubce řezu 0,7 mm

V průběhu teploty při hloubce 0,7 mm můžeme vidět mírné kolísání teploty okolo 330 °C, které je způsobené tvořením stužkové smotané třísky. Tříška při obrábění rozptylovala zamířený laser, proto je dosažená teplota nižší, než při hloubce řezu 0,4 mm.

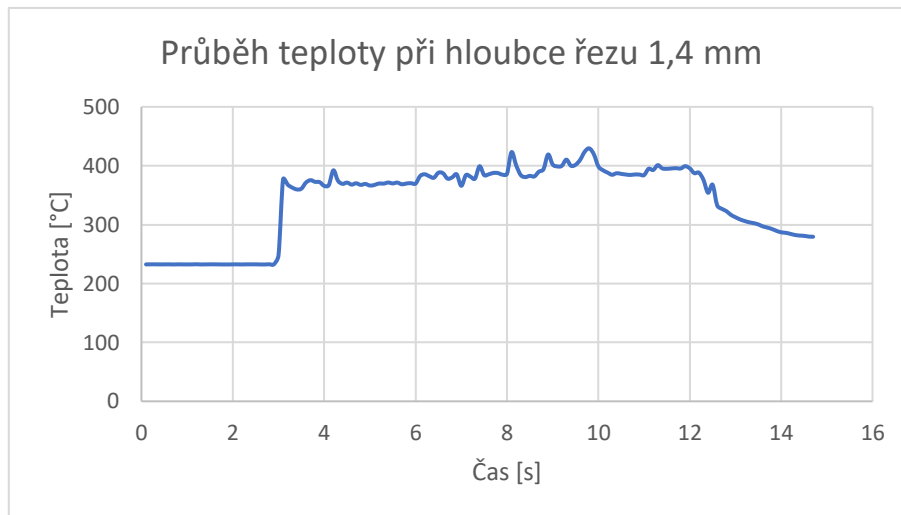


Graf 20 Průběh teploty při hloubce řezu 1 mm

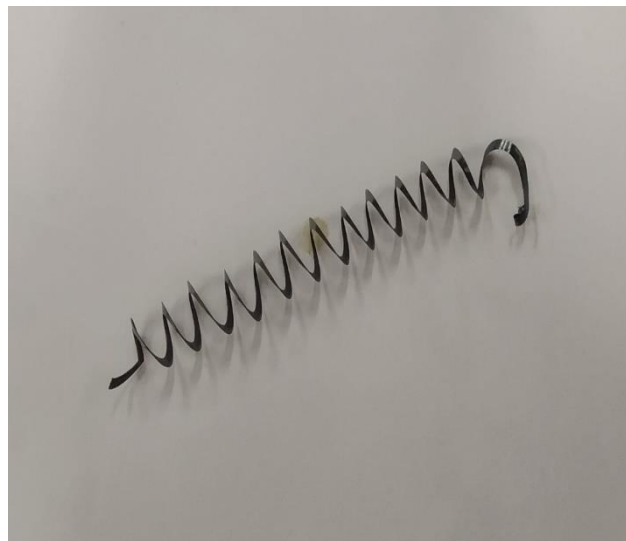


Obrázek 33 Vytvořená tříška při hloubce řezu 1 mm

V průběhu teploty při hloubce 1 mm můžeme vidět mírné kolísání teploty okolo 380 °C. Kolísání je způsobeno tvořením šroubovitě dlouhé třísky. V teplotním průběhu můžeme také spatřit, že mezi 15. a 16. sekundou se teplota zvýší přibližně o 90 °C na 470 °C. To je zapříčiněno náhlým odtržením třísky a zaměřením laseru na čelo nože blízko ostří. Po 16 sekundě dojde k zamotání třísky okolo nástroje.

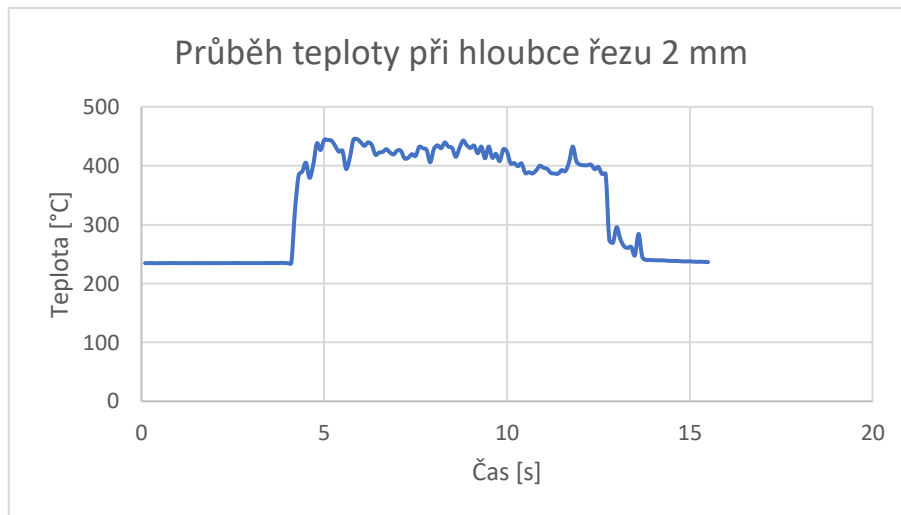


Graf 21 Průběh teploty při hloubce řezu 1,4 mm

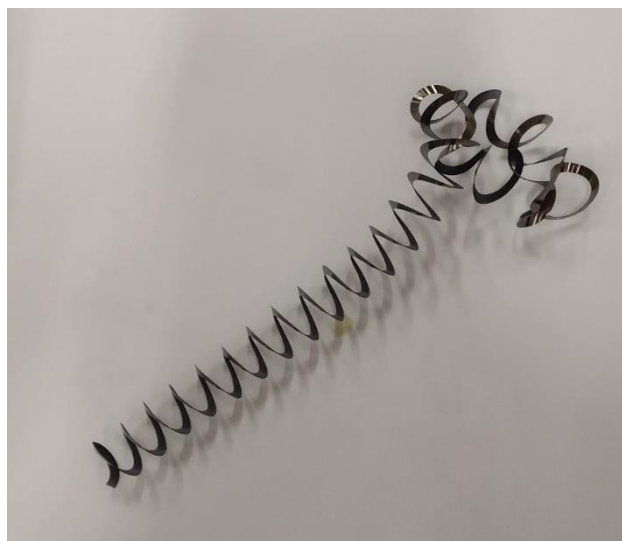


Obrázek 34 Vytvořená tříska při hloubce řezu 1,4 mm

V průběhu teploty při hloubce 1,4 mm můžeme vidět výrazné kolísání teploty mezi 370 °C až 420 °C. Kolísání je způsobené tvořením dlouhé vinuté tříska, která při obrábění rozptylovala laser, což zapříčinilo nižší teplotu, než byla maximální dosažená teplota při hloubce řezu 1 mm.



Graf 22 Průběh teploty při hloubce řezu 2 mm



Obrázek 35 Vytvořená tříška při hloubce řezu 2 mm

V průběhu teploty při hloubce 2 mm můžeme vidět velké kolísání teploty mezi 390 °C až 450 °C. Kolísání je způsobené tvořením dlouhé vinuté třísky, která při obrábění rozptylovala laser, což zapříčinilo nižší teplotu, než byla maximální dosažená teplota při hloubce řezu 1 mm.

6.9. Výsledky měření

Z výsledků měření teplotní závislosti můžeme vidět, že největší vliv teploty při soustružení má řezná rychlost, kde teplota rychle stoupala z počáteční rychlosti 40 m/min až do 100 m/min. Následný růst teploty při rychlosti 120 m/min nebyl tak výrazný. Druhá závislost teploty na posuvu není tak významná jako řezná rychlost. Teplota při rostoucím posuvu nerostla takovým tempem, jako při řezné rychlosti. V posledním případě nejmenší vliv na teplotu má hloubka řezu, kde výsledná teplota s rostoucí hloubkou byla téměř konstantní. Koeficienty experimentu vyšly $x_{\theta} = 0,02$, $y_{\theta} = 0,09$, $z_{\theta} = 0,28$, což bylo měřeno při použití nástrojů jiných specifikací. Teoretické hodnoty koeficientů jsou v literatuře uváděny vyšší: $x_{\theta} = 0,1$, $y_{\theta} = 0,2$, $z_{\theta} = 0,4$.

Průměr hodnot $C_{\theta I}$, $C_{\theta II}$ a $C_{\theta III}$:

$$C = \frac{C_{\theta I} + C_{\theta II} + C_{\theta III}}{3} = \frac{210 + 215 + 213}{3} = 213$$

Výsledný vztah z experimentu je tedy:

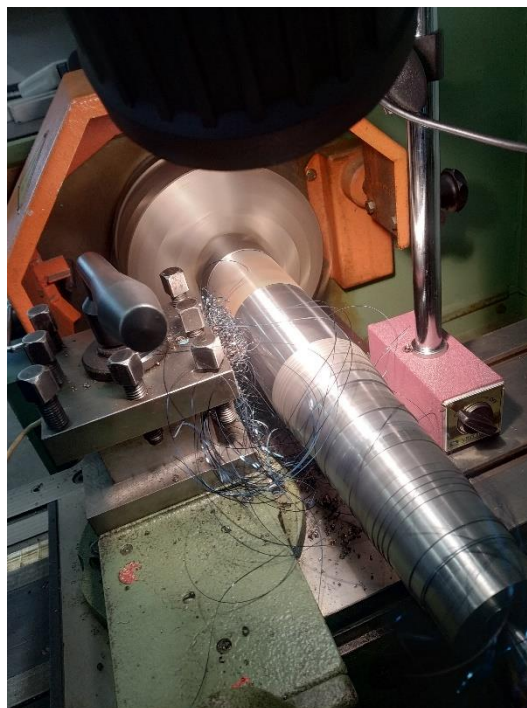
$$\theta = 213 \cdot a_p^{0,02} \cdot f^{0,09} \cdot v_c^{0,28}$$

V porovnání teplot mezi přirozeným termočlánkem a sondou thermoMETER CTL M-3H2 se teploty výrazně liší. V některých případech, například u řezné rychlosti 120 m/min, je teplota měřená sondou menší než u předchozího měření. Nepřesnost měření sondou thermoMETER CTL M-3H2 je způsobena dlouhou vinutou a stužkovou smotanou třískou. Tříška způsobila rozptýlení zaměřeného laseru na čelo nože v blízkosti ostří.

To znamená, že pokud je tříška během obrábění drobná, měření je přesnější. Pokud je tříška stuhovitá, měření je nepřesné a dochází ke kolísání v teplotním průběhu.

| | | | | | |
|------------------|------|------|-------|-------|-------|
| V_c [m/min] | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| Termočlánek [°C] | 475 | 550 | 600 | 625 | 640 |
| CTL M-3H2 [°C] | 362 | 426 | 401 | 461 | 409 |
| Rozdíl [°C] | 113 | 124 | 199 | 164 | 231 |
| f [mm/ot] | 0,04 | 0,07 | 0,101 | 0,141 | 0,202 |
| Termočlánek [°C] | 550 | 563 | 588 | 613 | 625 |
| CTL M-3H2 [°C] | 393 | 398 | 460 | 380 | 371 |
| Rozdíl [°C] | 157 | 165 | 128 | 233 | 254 |
| a_p [mm] | 0,4 | 0,7 | 1 | 1,4 | 2 |
| Termočlánek [°C] | 587 | 588 | 588 | 595 | 603 |
| CTL M-3H2 [°C] | 355 | 332 | 371 | 382 | 433 |
| Rozdíl [°C] | 232 | 256 | 217 | 213 | 170 |

Tabulka 8 Porovnané teploty přirozeného termočláneku a sondy thermoMETER CTL M-3H2



Obrázek 36 Nahromaděná tříska na čele nože při obrábění

7. Závěr

V této práci jsem se věnoval základním informacím o teplotě při obrábění. Nejprve jsem se zabýval teplem při obrábění jako takovém, shrnul jsem zdroje i odvod tepla z místa řezu a tepelnou bilanci. Popsal jsem vliv opotřebení nástroje při opotřebení i nastínil tepelné účinky a zatížení u jednotlivých druhů obrábění. Dále jsem se věnoval způsobům a metodám měření teploty při frézování, broušení i vrtání. Nakonec jsem v teoretické části shrnul základní měřicí přístroje a techniky.

Cílem praktické části bylo provést experiment pro zjištění přesnosti měření pomocí sondy thermoMETER CTL M-3H2, které jsem porovnal s hodnotami naměřenými přirozeným termočlánkem. Určil jsem také závislosti teploty při soustružení materiálu C45 na hrotovém soustruhu SUI 32.

Z experimentu vyplývá, že přesnost měření teploty ovlivňuje celá řada vnějších vlivů. V našem případě velkou odchylku od skutečné teploty způsobovala vytvářená tříska, která rozptylovala zaměrování laseru z čela nože. Obecně se zjistilo, že při drobné třísce je měření přesnější, zatímco při stuhovité třísce je měření nepřesné, z důvodu nepřesného zaměření signálu na čelo v blízkosti ostří.

Odchylky mezi přirozeným termočlánkem a sondou thermoMETER CTL M-3H2 se v případě zvyšování řezné rychlosti a posuvu zvyšovaly, naopak při zvyšování hloubky řezu byly odchylky teploty menší. Pro řeznou rychlost byla nejvyšší odchylka naměřených teplot 231 °C u 120 m/min u posuvu 0,202 mm 254 °C, což jsou nejvyšší zvolené hodnoty při měření. Nejvyšší odchylka při hloubce řezu 0,4 mm byla 232 °C, zatímco u nejvyšší zvolené hloubky řezu odchylka byla nižší o 62 °C, tedy 170 °C.

Vzhledem k omezujícím možnostem z důvodu covid-19 karantény nebylo možné provést rozsáhlejší experimenty. Proto doporučuji provést rozsáhlejší měření přesnosti teploty sondy thermoMETER CTL M-3H2 z hlediska odrazové emisivity.

Zdroje

- [1] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02-091-6.
- [2] SKŘIVAN Karel, *Technologie obrábění*. Praha: ČVUT, 1957. ISBN: Neuvedeno
- [3] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění a montáží*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00143-9.
- [4] ABUKHSHIM NA, MATIVENGA P. T., SHEIKH M. A., International Journal of Machine Tools and Manufacture, [online]. Elsevier 2006, str. 782 – 800 [cit. 15-04-2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550500180X#fig9>
- [5] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [6] MM Průmyslové spektrum: *Nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah, MM Průmyslové spektrum* [online] 2012. [cit. 16-02-2021] dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-neni-teplota-prilis-vysoka-nebo-nizka.html>
- [7] Kus A., Isik Y., Cakir M. C., Coşkun S., Özdemir K. Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting, *Sensors*. [online]. Bursa,
- [8] SECO: *Tepelné zatížení při frézování* [online]. [cit. 02-03-2021]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/21483?language=cs>
- [9] MOULIK P. N., YANG H. T. Y., CHANDRASEKAR S., Simulation of thermal stresses due to grinding, *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. Elsevier, 2001, s. 831 - 851 [cit. 15-03-2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740300000278>
- [10] LV, Cai., WANG, Guangjun., CHEN, Chen. Inverse determination of thermal boundary condition and temperature distribution of workpiece during drilling process, *Measurement* [online]. Elsevier, 2021, [cit. 09-03-2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120313166>

- [11] MM Průmyslové spektrum: *Příručka pro technology – Opatření se nevyhneme*, MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 15-04-2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme>
- [12] LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G.E., Refractory, Hard and Intermetallic Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2002. 267 p. ISBN 3-540-42961-1.
- [13] MM Průmyslové spektrum: *Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování* [online]. [cit. 15-04-2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani>
- [14] MH El-Axir. Internation Journal of machine Tools and Manufacture [online]. Elsevier 2002, str. 1055 - 1063 [cit. 15-04-2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695502000317>
- [15] PCS Divize Analytika: *Měření zbytkového napětí* [online]. [cit. 15-04-2021]. Dostupné z: <https://pcsanalytika.cz/aplikace/mereni-zbytkoveho-napeti/>
- [16] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění – 1. část: Studijní obory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno, 2003 [cit. 23-02-2021]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [17] BARTUŠEK, Vladimír. *Měření teplot při frézování* [online]. Liberec, 1973, [cit. 18-03-2021]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/68626>
- [18] BATAKO A. D., ROWE W. B., MORGAN M. N., Temperature measurement in high efficiency deep grinding. *Internationa Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. Elsevier, s. 1231 – 1245. [cit. 03-15-2021]. Dostupné : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505000179>
- [19] UEDA, T., NOZAKI, R., HOSOKAWA, A. Temperature Measurement of Cutting Edge in Drilling – Effect of Oil Mist. *CIRP Annals* [online]. Elsevier, 2007, s. 93 – 96. [cit. 03-03-2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060700025X>
- [20] Robin Yang, *Microchip Technology Inc* [online]. [cit. 15-04-2021]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyvoj/id:59072/sledujeme-teplotu-v-sirokem-rozsahu-s-termoclanky-a-jejich-podpurnymi-obvody>

- [21] OMEGA Engineering, *Termočláňkový snímač teploty – termočláňek* [online]. [cit. 01-03-2021]. Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/prodinfo_cz/termoclanek.html
- [22] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-.
- [23] THERMOCOUPLES: *THE OPERATING PRINCIPLE*. <https://www.msm.cam.ac.uk> [online]. [cit. 18. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/images/LETTER-DESIGNATED-TC.jpg>
- [24] HUMÁR, A.: *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB spol. s r. o. Brno ISBN 80-85825-10-4
- [25] ČEP, Robert a PETRŮ Jana,. *Experimentální metody obrábění – učební text* [online]. [cit. 18-03-2021]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf
- [26] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [27] Pyrometry PYROSPOT, *pro průmysl i výzkum* [online]. [cit. 18-03-2021]. Dostupné z: <https://pyrometr.cz/pyrometry/>
- [28] PROMERTECH: *pyrometry* [online]. [cit. 18-03-2021]. Dostupné z: <https://promertech.cz/pyrometry>
- [29] DOUBENSKAIA M., BERTRAND Ph., SMUROV I., *Surface and Coatings Technology* [online]. Elsevier 2006, str. 1955 – 1961 [cit. 15-04-2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206003768#aep-section-id20>
- [30] NOVÁ, I.: *Metody bezdotykového měření teploty*, Průmyslové spektrum, 2004, č.12, s.78. ISSN 1212-2572.

- [31] ČEP, Robert a PETRŮ, Jana. *Úvod do teorie obrábění* [online]. Ostrava 2013, str. 33 [cit. 15-04-2021]. Dostupné z:
http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A9avod%20do%20teorie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%A9avod%20do%20teorie%20obrabeni%2003%20Tvorb%20a%20tvarov%C3%A1n%C3%AD%20t%C5%99%C3%ADsky.pdf
- [32] JKZ Bučkovice. *ČSN 12 050 / 1.1191 / C45* [online]. [cit. 20-07-2021]. Dostupné z:
<https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-12-050-11191-c45/>
- [33] Požiadavka.sk., *Soustruh hrotový univerzální SUI 32/750 – 1000* [online]. [cit. 20-07-2021]. Dostupné z: <https://www.poziadavka.sk/ponuky/ponuka-236997/Soustruh-hrotovy-univerzalni-SUI-32-750---10009>.
- [34] Ahlborn měřící a regulační technika spol. s. r. o., *Pyrometry – návod k obsluze*. Praha: 1995. 25 s.
- [35] Micro-Epsilon. *Snímače thermoMETER CTLaser* [online]. [cit. 20-07-2021]. Dostupné z:
https://www.micro-epsilon.cz/temperature-sensors/thermoMETER_CT_laser/?sr=15&sc=43&st=Thermometer%20CTL#thermoMETER_CT_laser_M1_M2
- [36] Technotrend., *Topná tělesa, termočlánky, datumovky, zpětné uzávěry, konektory* [online]. [cit. 20-07-2021]. Dostupné z:
<http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie2.htm>

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 Zdroje tepla v procesu ortogonálního řezání [4] | 10 |
| Obrázek 2 Teplo a teplota v technologii obrábění kovů [6] | 11 |
| Obrázek 3 Rozložení teploty při obrábění [7] | 12 |
| Obrázek 4 Vznik a šíření tepla v zóně řezání [1] | 13 |
| Obrázek 5 Způsob utváření třísky [6] | 14 |
| Obrázek 6 Opatření nástroje: otěr na hřbetu [11] | 17 |
| Obrázek 7 Vlastnosti řezných materiálů [12] | 18 |
| Obrázek 8 Typická struktura termočlánku [20] | 21 |
| Obrázek 9 Střední hodnoty termoelektrických napětí [1] | 22 |
| Obrázek 10 Miniaturní termočlánekový konektor [11] | 22 |
| Obrázek 11 Termočláneková soustava [21] | 23 |
| Obrázek 12 Teplotní rozsahy termočláneků [21] | 23 |
| Obrázek 13 Montáž termočlánku na držák nástroje [7] | 25 |
| Obrázek 14 Schéma zapojení poloumělého termočlánku [24] | 25 |
| Obrázek 15 Schéma zapojení přirozeného termočlánku [24] | 26 |
| Obrázek 16 Schéma zapojení termodua [1] | 28 |
| Obrázek 17 Uspořádání termodua s noži proti sobě [4] | 28 |
| Obrázek 18 Pyrometr [28] | 29 |
| Obrázek 19 Blokové schéma infračerveného pyrometru [17] | 31 |
| Obrázek 20 Soustružnický nůž SK P30 | 34 |
| Obrázek 21 Zaměřený laser na čelo v blízkosti ostří | 36 |
| Obrázek 22 Porovnání teplot | 37 |
| Obrázek 23 Měření teploty pyrometrem AMiR 7811-20 | 37 |
| Obrázek 24 Zahřívání destičky plynovým plamenometem | 37 |
| Obrázek 25 Termočlánek pro vytvoření cejchovní křivky | 38 |
| Obrázek 26 Průběhy termoelektrického napětí termočláneků Fe-Ko a C45-SK P30 | 39 |
| Obrázek 27 Zvolení bodů v průběhu termoelektrického napětí | 42 |
| Obrázek 28 Průběhy termoelektrického napětí při řezných rychlostech | 43 |
| Obrázek 29 Průběhy termoelektrického napětí při posuvu | 47 |
| Obrázek 30 Průběhy termoelektrického napětí při hloukách řezu | 51 |
| Obrázek 31 Vytvořená tříška při hloubce řezu 0,4 mm | 53 |
| Obrázek 32 Vytvořená tříška při hloubce řezu 0,7 mm | 54 |
| Obrázek 33 Vytvořená tříška při hloubce řezu 1 mm | 55 |
| Obrázek 34 Vytvořená tříška při hloubce řezu 1,4 mm | 56 |
| Obrázek 35 Vytvořená tříška při hloubce řezu 2 mm | 57 |
| Obrázek 36 Nahromaděná tříška na čele nože při obrábění | 59 |

Seznam grafů a tabulek

| | |
|---|----|
| Graf 1 Závislosti termoelektrického napětí pro typy termočlánků [23] | 24 |
| Graf 2 Rozsah emisivity IR pyrometru [7] | 30 |
| Graf 3 Cejchovní křivka Fe-Ko | 40 |
| Graf 4 Cejchovní křivka C45-SK P30 | 41 |
| Graf 5 Závislost teploty na řezné rychlosti | 44 |
| Graf 6 Průběh teploty při řezné rychlosti 40 m/min | 45 |
| Graf 7 Průběh teploty při řezné rychlosti 80 m/min | 45 |
| Graf 8 Průběh teploty při řezné rychlosti 60 m/min | 45 |
| Graf 9 Průběh teploty při řezné rychlosti 100 m/min | 46 |
| Graf 10 Průběh teploty při řezné rychlosti 120 m/min | 46 |
| Graf 11 Závislost teploty na posuvu | 48 |
| Graf 12 Průběh teploty při posuvu 0,07 mm/ot | 49 |
| Graf 13 Průběh teploty při posuvu 0,04 mm/ot | 49 |
| Graf 14 Průběh teploty při posuvu 0,101 mm/ot | 49 |
| Graf 15 Průběh teploty při posuvu 0,141 mm/ot | 50 |
| Graf 16 Průběh teploty při posuvu 0,202 mm/ot | 50 |
| Graf 17 Závislost teploty na hloubce řezu | 52 |
| Graf 18 Průběh teploty při hloubce řezu 0,4 mm | 53 |
| Graf 19 Průběh teploty při hloubce řezu 0,7 mm | 54 |
| Graf 20 Průběh teploty při hloubce řezu 1 mm | 55 |
| Graf 21 Průběh teploty při hloubce řezu 1,4 mm | 56 |
| Graf 22 Průběh teploty při hloubce řezu 2 mm | 57 |
| | |
| Tabulka 1 Základní parametry hrotového soustruhu SUI 32 [33] | 34 |
| Tabulka 2 Základní parametry přístroje thermoMETER CTL M-3H2 | 35 |
| Tabulka 3 Zjištěné teploty při zahřívání termočlánku Fe-Ko | 40 |
| Tabulka 4 Zjištěné teploty pro termočlánek C45-SK P30 | 41 |
| Tabulka 5 Teploty měřené termočlánekem při různých řezných rychlostech | 44 |
| Tabulka 6 Teploty měřené termočlánekem při různých posuvech | 48 |
| Tabulka 7 Teploty termočlánku při různé hloubce řezu | 52 |
| Tabulka 8 Porovnané teploty přirozeného termočlánku a sondy thermoMETER CTL M-3H2 | 59 |