

Metody měření teplot a tepla v technologii obrábění

Jiří Kachyňa

Bakalářská práce
2009

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří KACHYŇA

Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: **Metody měření teplot a tepla v technologii obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Provedte hodnocení vlivu technologických podmínek při obrábění na teplo a teplotu.
3. Zpracujte výsledky experimentů s použitím statistických metod.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martina Malachová
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

20. února 2009

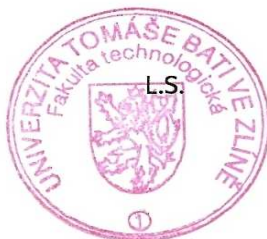
Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2009

Ve Zlíně dne 16. února 2009



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je popis vznik tepla a metody jeho měření včetně charakteristiky jednotlivých kontaktních a bezdotykových teploměrů a snímačů teploty. Teplota ve zvolených bodech na síti polotovaru byla měřena pomocí ruční termokamery. Výsledky měření umožnily sledování vlivu technologických podmínek na teplotu při frézování a broušení.

Klíčová slova: teplo, teplota, teploměr, metody měření, frézování, broušení.

ABSTRACT

The Bachelor thesis describes heat generation and methods of its measurement. Furthermore, the characteristics of the contact and non-contact thermometers and the temperature sensors are included. A network was created on the sample to measure the temperature in the given points by the manual thermocamera. Finally, the results made it possible to study the influence of technological conditions on the temperature during milling and grinding.

Keywords: Heat, Temperature, Thermometer, Measuring Methods, Milling, Grinding.

Děkuji Ing. Martině Malachové za pomoc a vedení bakalářské práce, doc. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za poskytnuté cenné rady a Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při praktickém provádění experimentu.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně dne 2. června 2009.

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 TEORIE OBRÁBĚNÍ	10
1.1 VZNIK TEPLA A TEPELNÁ BILANCE.....	10
1.1.1 Vznik tepla při řezání	10
1.1.2 Tepelná bilance řezného procesu	11
1.1.3 Teplo v třísece.....	12
1.1.4 Teplo v nástroji	13
1.1.5 Teplo v obrobku	13
1.2 TEPLA, TEPLOTA, TEPLONÍ POLE.....	13
1.2.1 Sdílení tepla vedením	14
1.2.2 Sdílení tepla prouděním	15
1.2.3 Sdílení tepla sáláním	15
1.2.4 Teplota.....	15
1.2.5 Teplotní pole	16
1.3 TEPLoměRY A SNÍMAČE TEPLoty	16
1.3.1 Tepelné detektory	16
1.3.2 Termoelektrické detektory	17
1.3.3 Bolometry	18
1.3.4 Pyroelektrické detektory.....	18
1.3.5 Termokamery	19
1.3.6 Kovové odporové senzory teploty.....	19
1.3.7 Dilatační teploměry	19
1.3.8 Pyrometry	20
1.4 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty.....	21
1.4.1 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teplot	21
1.4.2 Záření	22
1.4.3 Černé těleso	22
1.4.4 Zákony záření pro černé těleso.....	23
1.4.5 Emisivita	23
1.5 HODNOCENÍ METOD MĚŘENÍ TEPLA PŘI ŘEZÁNÍ	23
1.5.1 Kalorimetrická metoda.....	23
1.5.2 Měření teploty pomocí přímého termočlánku	24
1.5.3 Měření teploty pomocí dvou cizích kovů.....	25
1.5.4 Měření teploty pomocí jednoho cizího kovu.....	25
1.5.5 Optická metoda	26
1.5.6 Teplotní pole řezání.....	26
1.6 STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ.....	27
1.6.1 Nejčastěji používané statistiky	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
2 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A POMŮCKY	30

2.1	SEZNÁMENÍ SE S MĚŘÍCÍM PŘÍSTROJEM.....	30
2.1.1	Charakteristika	30
2.1.2	Emisivita	32
2.2	MĚŘENÝ VZOREK	32
3	MĚŘENÍ TEPLOTY PŘI FRÉZOVÁNÍ A BROUŠENÍ.....	34
3.1	EXPERIMENT	34
3.1.1	Vliv času na teplotu při frézování	34
3.1.2	Vliv různé hloubky řezu na teplotu obrábění při frézování stopkovou frézou.....	36
3.1.3	Vliv různé posuvové rychlosti na teplotu při frézování stopkovou frézou.....	39
3.1.4	Vliv různé hloubky řezu na teplotu při frézování válcovou frézou.....	42
3.1.5	Vliv různé posuvové rychlosti na teplotu při frézování válcovou frézou.....	45
3.1.6	Vliv různé posuvové rychlosti na teplotu při broušení.....	48
3.1.7	Vliv různé hloubky řezu na teplotu při broušení.....	51
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60

ÚVOD

Teplota je často využívanou technickou veličinou. Má velký vliv na stav výrobků i výrobních zařízení. Její sledování a měření je důležitým předpokladem pro kvalitní výrobu a tím i její optimalizaci.

Téměř veškerá energie řezného procesu je transformována v teplo, které je nepříznivým činitelem působícím na účastníky tohoto procesu, především nástroj a obrobek. Je tedy nezbytné měřit teploty vzniklé při obrábění a teploty odváděné.

K tomuto měření slouží široký sortiment jak bezdotykových tak i kontaktních teploměrů, snímačů teploty a senzorů, jejichž rozdělení a charakteristika je v práci nastíněna. Tyto měřiče teplot mají rozsáhlé uplatnění nejen v technice, ale i ve stavebnictví a energetice.

Na hodnoty měřených teplot mají vliv dané technologické podmínky obrábění. Touto problematikou se zabývá praktická část práce. Dále je zde popsán princip bezdotykového i kontaktního měření.

Vzhledem k tomu, že technologie nástrojů a metod používaných při obrábění se neustále vyvíjí, právě teplota je jedním z důležitých faktorů, kterou je nutné do optimalizace obráběcího procesu zahrnout. Významnou roli hraje především u tepelných dilatací obrobku i nástroje, kdy je kvůli vysokým teplotám v obráběcím procesu ovlivněna výsledná přesnost obrábění a samozřejmě také životnost nástroje, což má bezprostřední vliv i na ekonomickou stránku výroby.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE OBRÁBĚNÍ

Teorie obrábění vysvětluje fyzikální podstatu procesu obrábění, jímž rozumíme oddělování části materiálu břitem nástroje ve formě třísky, a určuje zákonitosti tohoto procesu ve vztahu k parametrům řezných podmínek. Obráběcí proces se realizuje v obráběcím systému, který lze obecně členit na subsystémy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních prostředků a obráběcího prostředí. Objektem obráběcího procesu je obrobek a základním výstupem obráběcího procesu jsou příslušné obrobené plochy. [6]

Při obrábění dochází k oddělování částic materiálu obrobku břitem nástroje. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku se specifikuje jako řezání, respektive řezný proces. V závislosti na způsobu oddělování materiálu se rozliší řezný proces kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání), diskontinuální (hoblování, obrážení) a cyklický (frézování, broušení). Reálný řezný proces probíhá za určitých řezných podmínek, které jsou součástí obráběcích podmínek. [6, 9]

1.1 Vznik tepla a tepelná bilance

1.1.1 Vznik tepla při řezání

Při odřezávání vrstvy materiálu břitem nástroje a její transformaci v třísku vyvine se určité množství tepla. Toto teplo vzniká přeměnou práce vynaložené na vznik třísky a její odvedení z místa řezu. Je proto celkové teplo, které vzniká při řezání, součtem dílčích množství tepla, a to tepla vzniklé třením třísky o čelo břitu, teplo vzniklé třením hřbetu o plochu řezu a teplo vzniklé prací spotřebovanou na zatáčení třísky. [9]

V teplo se přeměňuje prakticky všechna mechanická práce řezání. Při řezání dochází obecně k velmi vysokým stupňům plastické deformace. Podle výsledků experimentálních prací dochází k intenzivnímu pohlcování energie pouze v prvních stádiích deformace a od určitého okamžiku se toto množství již nemění a její podíl na celkově vynaložené práci

proto klesá. Zanedbáme-li nepatrný podíl celkové práce řezání, která se v teplo nepřemění, můžeme celkové množství tepla vyvinutého při obrábění určit z rovnice (1) [9]:

$$Q = L \cdot A \quad (1)$$

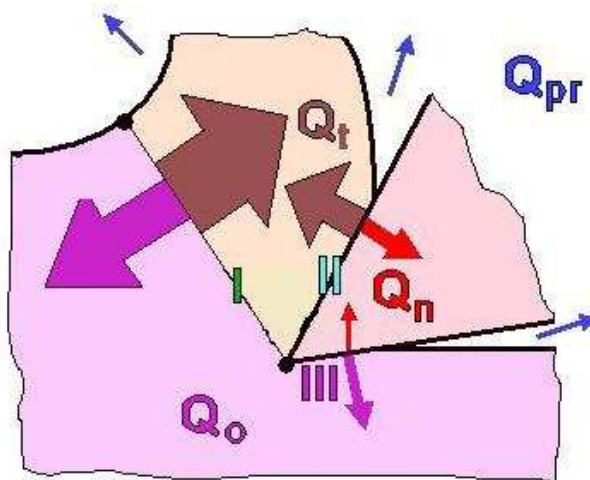
1.1.2 Tepelná bilance řezného procesu

Během obráběcího procesu se téměř veškerá energie řezání transformuje v teplo. Teplo řezného procesu Q_E vzniklé při odebrání určitého množství materiálu je přibližně rovné práci řezného procesu E_E . Hlavní zdroje tepla jsou v oblasti plastických deformací při tvoření třísky, v oblasti tření třísky po čele nástroje a v oblasti tření hřbetu po obrobené ploše. [1, 6]

Vzniklé teplo Q_E je odváděno do jednotlivých prvků [1, 6]:

- teplo odvedené třískou Q_T
- teplo odvedené obrobkem Q_O
- teplo odvedené nástrojem Q_N
- teplo odvedené řezným prostředím Q_{PR}

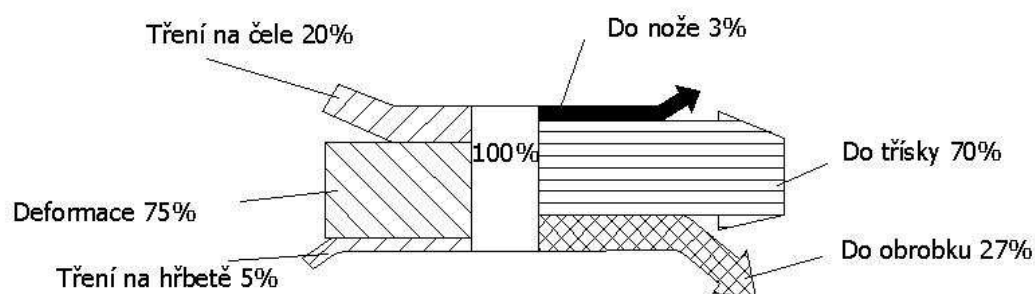
$$Q_E = Q_T + Q_O + Q_N + Q_{PR} \quad (2)$$



Obr.1 Vznik a odvod tepla [12]

Podíl jednotlivých odváděných složek tepla řezného procesu do třísky závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především řezná rychlost), řezném prostředí a geometrii břitu nástroje. [1, 6]

Největší část tepla vzniklého při obrábění je v ideálním případě odváděna třískou. Největší teplo vzniká v rovině stříhu. Teplo vznikající v oblasti hřbetu by mělo být udržováno na co možná nejnižších hodnotách. [6]



Obr. 2 Tepelná bilance při soustružení

1.1.3 Teplo v třísce

Množství tepla v třísce roste s růstem řezné rychlosti, ne však úměrně, protože při vysokých řezných rychlostech roste množství tepla v třísce velmi pomalu. Plastická deformace není rovnoměrně rozložena po celém průřezu odřezávané vrstvy, a proto i teploty v třísce jsou rozloženy nerovnoměrně. [1]

Střední teplota třísky se mění v úzkém rozhraní. Při pětinasobném zvětšení řezné rychlosti se zvýší střední teplota třísky jen asi o třetinu. Z toho plyne důležitý poznatek, a to že mezi střední teplotou třísky a trvanlivostí nástroje neexistuje žádná závislost. Vyplývá to z toho, že trvanlivost a opotřebení nástroje závisí na teplotě řezání. [1]

1.1.4 Teplo v nástroji

Teplo pohlcené nástrojem závisí na času práce nástroje. Pohlcené množství tepla s časem nejprve prudce roste, až dosáhne stav nasyceného stavu nástroje, kdy tepelný obsah prakticky nezávisí na času práce nástroje. [1]

Množství tepla pohlcené nástrojem závisí na tepelné vodivosti materiálu používaných na zhotovení nástroje a na podmínkách odvodu tepla z nástroje. [1]

1.1.5 Teplo v obrobku

Teplo pohlcené obrobkem závisí na času práce nástroje. V procesu řezání proniká ze zdrojů tepla do obrobku určitý tepelný tok. Část odvádí tříska, část odvádí do okolního prostředí. Po skončení řezání můžeme měřit jen množství tepla, které zůstalo v obrobku. [1]

1.2 Teplo, teplota, teplotní pole

Teplo je forma energie vyměněná mezi systémem a okolím jako důsledek teplotního rozdílu mezi nimi. [2]

Jedná se o energii vyměňovanou formě práce nebo tepla. Energie přijatá systémem ve formě práce vyvolá uspořádaný pohyb mnoha mikročástic stejným směrem, a systém je proto schopen překonávat vnější sílu. Teplo je energie, vyměněná jiným způsobem než prací. K výměně energie ve formě tepla dochází tehdy, když je mezi soustavou a okolím teplotní rozdíl. Energie přijatá systémem ve formě tepla zvýší intenzitu pohybu molekul a tím teplotu soustavy. Protože však pohyb molekul v tomto směru není uspořádaný jen v jednom směru, ale je chaotický, pak elementární práce, vykonaná jednotlivými molekulami se navzájem vykompenzují a systém jako celek práci nekoná. Vnitřní mechanický

pohyb molekul ustává při termodynamické teplotě neboli absolutní nuly ($0\text{K} = 273,15^\circ\text{C}$). [13]

Existují 3 základní typy sdílení tepla:

- vedení,
- proudění,
- sálání.

1.2.1 Sdílení tepla vedením

Sdílení tepla vedením v pevných tělesech je transportem tepelné energie ve směru klesající teploty. Děje se mezi bezprostředně sousedícími částicemi tělesa. V plynech a kapalinách se připojuje k tomuto sdílení tepla vedením též sdílení tepla prouděním a u látek částečně propouštějících zářivou energii tepla sáláním (sklo). [4]

Při řešení problémů vedení tepla vyšetřujeme v tělese teplotní pole a tepelné toky v prostorové závislosti u stacionárních dějů, a u dějů nestacionárních pak také v časové závislosti. Závislost mezi oběma veličinami lze podle zkušenosti vyjádřit zákonem Fourierovým. [4]

Fourierův zákon

Jsou-li udržovány povrchy rozměrově velké rovinné desky o tloušťce s na konstantních teplotách t_1 a t_2 , pak protéká kolmo deskou tepelný tok Q ve směru klesající teploty. Uprostřed velké homogenní a izotropní desky proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám a lze proto vyjádřit velikost tepelného toku dQ_t procházejícího elementem plochy dS povrchu desky vztahem (2). [4]

$$dQ_t = \frac{\lambda}{s}(t_1 - t_2)dS \quad (3)$$

1.2.2 Sdílení tepla prouděním

V proudících tekutinách je nutno uvažovat zásadně dva způsoby sdílení tepla. Čisté vedení tepla a výměnu tepla přemísťovanými částicemi hmoty (konvekce). Podle fyzikálních vlastností tekutiny a podle druhu proudění může převažovat jeden nebo druhý mechanismus, takže sdílení tepla v proudících kapalinách lze oddělit od pohybu tekutiny. Jedná se o sdílení tepla mezi pevným a kapalným tělesem. V podstatě je to velmi složitý pochod, poněvadž sdílení tepla je přitom značně ovlivňováno hydrodynamickými ději. [4]

1.2.3 Sdílení tepla sáláním

Každé těleso vyzařuje do okolí určité množství energie. Tepelné sálání je druhem přenosu tepla pomocí elektromagnetických vln. Tyto vlny se šíří ve vakuu rychlostí světla. Energie tělesa se mění v záření, které po dopadu na jiné těleso se opět mění v teplo. Sálání těles závisí velmi na teplotě. Zvýšením teploty tělesa se zvýší jeho vnitřní energie a tím i energie vyzařována sáláním. Vliv teploty na sdílení tepla sáláním je mnohem podstatnější než u vedení a proudění. [3]

1.2.4 Teplota

Je stavová veličina udávající střední kinetickou energii chaotického pohybu částic ve stavu tepelné rovnováhy. V termodynamice je teplota definována vztahem (3). [5]

$$T = \frac{\partial Q}{\partial S} \quad (4)$$

Vztah platí pro stav tepelné rovnováhy, a teplota T je dána přírůstkem tepla Q ke změně entropie S , která udává míru neuspořádanosti systému. Protože termodynamická definice teploty je pro praxi nevhodná, je zavedena tzv. kalorimetrická definice teploty, která vychází ze vztahu pro účinnost vratného Carnotova cyklu a je dána vztahem (4). [5]

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{T_1}{T_0} \quad (5)$$

Měření teploty je převedeno na měření tepla, což je pro praxi výhodnější. Volbou $T_0 = 0\text{K}$ se získá Kelvinova stupnice, volbou T_0 rovné teplotě trojného bodu se získá Celsiova stupnice. [5]

1.2.5 Teplotní pole

Proces vedení tepla můžeme sledovat s použitím základní stavové veličiny – teploty. Teplota ve sledovaném prostředí může být obecně funkcí místa (souřadnic x, y, z) a času τ . [3]

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (6)$$

Tato rovnice je matematickým vyjádřením teplotního pole. Vidíme, že teplotní pole může být obecně proměnné s časem – nestacionární, nebo nezávislé na čase – stacionární. Podle závislosti na počtu souřadnic x, y, z může být teplotní pole jednorozměrné, dvojrozměrné nebo třírozměrné. [3]

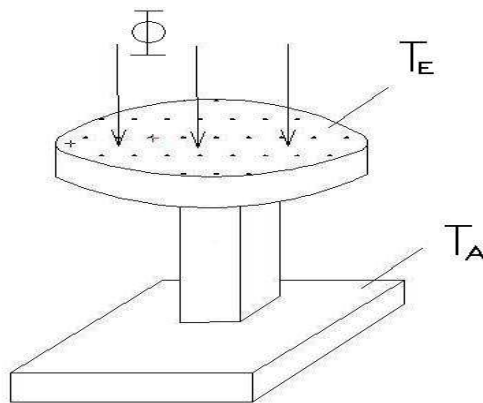
1.3 Teploměry a snímače teploty

1.3.1 Tepelné detektory

Tepelné detektory (Obr. 3) se vyznačují tím, že dopadající vstupní záření je pohlcováno jeho aktivní plochou. To vede na zvýšení jeho teploty. Spektrální rozdělení nemá téměř žádný vliv na teplotní změny. Vstupní signál tepelných detektorů je proto v principu téměř nezávislý na vlnové délce dopadajícího záření, je tedy neselektivní. Povrch detektoru má ale pro různé vlnové délky rozdílnou absorpci. U tepelných detektorů bývá relativně vysoká citlivost dána širokým absorpčním spektrem a velkým poměrem signál – šum, vyvolaným velkými teplotními změnami citlivého elementu dopadajícím zářivým tokem. [7]

Vzhledem k tomu že teplotu nelze měřit přímo, převádí se na jinou veličinu. Používané typy převodníků jsou následující [7]:

- termoelektrické detektory,
- bolometry,
- pyroelektrické detektory,
- termokamery.



Obr. 3 Tepelný detektor

T_E – teplota elementu,

T_A – teplota podložky,

Φ – tepelný tok

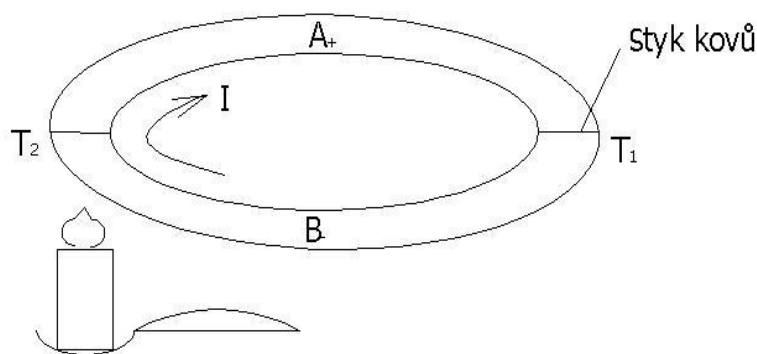
1.3.2 Termoelektrické detektory

Termoelektrické detektory využívají tepelných jevů, jako například Seebeckova. Fyzikální podstatou je existence kontaktního potenciálu na povrchu každého kovu. [7]

Pro vysvětlení Seebeckova jevu uvažujme dva kovy A a B, které jsou na koncích spojeny dle obrázku (Obr. 4). Nechť jsou zvoleny takové kovy, jejichž kontaktní potenciály splňují podmínku $\varphi_A = \varphi_B$. Za předpokladu, že se nepoužije ohřevu bude platit $T_2 = T_1$. Kov A se bude nabíjet kladně vůči kovu B. [7]

Bude-li se jeden konec ohřívát, bude kmitání krystalové mřížky na teplejší straně intenzivnější, než na straně chladnější. Vzájemnými srážky iontů s elektrony dojde k tepel-

nému pohybu. Elektronů budou difundovat směrem ke chladnějším konci, na chladnějším konci bude tedy elektronový plyn hustější než na teplejším konci. Rozdílná koncentrace elektrického náboje je příčinou vzniku kontaktního potenciálu. [7]



Obr. 4 Seebeckův jev

1.3.3 Bolometry

Činnost bolometru je založena na změně elektrického odporu vlivem ohřevu odporového elementu absorbovaným vstupním zářením. Záření dopadá na antireflexní vrstvu a difunduje do teplotně závislého elementu, který je ohmickými kontakty zapojen přes zatěžovací odpor k napěťovému zdroji. Odporové elementy mohou být kovové, dielektrické, polovodičové, supravodivé. [7]

1.3.4 Pyroelektrické detektory

Využívají pyroelektrického jevu spočívajícího ve změně spontánní polarizace ferroelektrických krystalických materiálů způsobené změnou teploty pyroelektrického detektoru. [7]

1.3.5 Termokamery

Jsou to zařízení, která měří teplotu bodově nebo plošně. Požadavek plošného měření zavedla armáda. Ke chlazení detektoru se používal tekutý dusík. Termovize pracuje na principu transformace tepelného zařízení na viditelný obraz. Zobrazení je ale v tzv. falešných barvách, neodpovídajících skutečnosti. Teprve použitím elektronicky chlazených detektorů bylo umožněno podstatné zlepšení citlivosti. Dosahované rozlišení $0,1^{\circ}\text{C}$ dává termokamerám široké možnosti. [7]

1.3.6 Kovové odporové senzory teploty

Principem odporových kovových čidel teploty je teplotní závislost odporu kovu. Kov si lze představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a tzv. elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících elektronů. Z materiálů vhodných pro realizaci odporových senzorů jsou nejrozšířenější platina, nikl, měď, molybden a pro extrémně nízké teploty slitiny platiny a kobaltu. [5]

1.3.7 Dilatační teploměry

Dilatační teploměry jsou založené na teplotní roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů. Dle konstrukce se dělí na [5]:

- tyčové,
- bimetalické,
- bimateriálové,
- skleněné,
- kapalinové tlakové,
- parní tlakové,

- plynové tlakové.

1.3.8 Pyrometry

Pyrometry jsou měřicí přístroje, které měří teplotu dle Stefan-Boltzmannova zákona, který vyhodnocuje tepelné záření v celém spektru vlnových délek. Zářivý tok se zaostřuje na detektor soustavou čoček z materiálů se širokým spektrem prostupnosti nebo zrcadlem se širokým spektrem odrazivosti. [5]

Druhy pyrometrů [5]:

- monochromatické
- pásmové
- poměrové
- s automatickou korekcí emisivity



Obr. 5 Pásmový pyrometr [5]

1.4 Bezdotykové měření teplot

Bezdotykové měření teploty je měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření vysílané tělesem a přijímané senzorem (detektorem) záření vlnové délky 0,4 μm do 25 μm . Tento rozsah pokrývá oblast viditelného spektra a oblasti infračerveného spektra. Elektromagnetické záření o vlnové délce od 2 μm do 25 μm se označuje jako tepelné záření. [5]

1.4.1 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teplot

Výhody [5]:

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt,
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech,
- měření teploty z bezpečné vzdálenosti,
- možnost měření velmi rychlých změn teploty,
- možnost měřit a dále číslicově zpracovat teploty celých povrchů těles (termografie, termovize).

Nevýhody [5]:

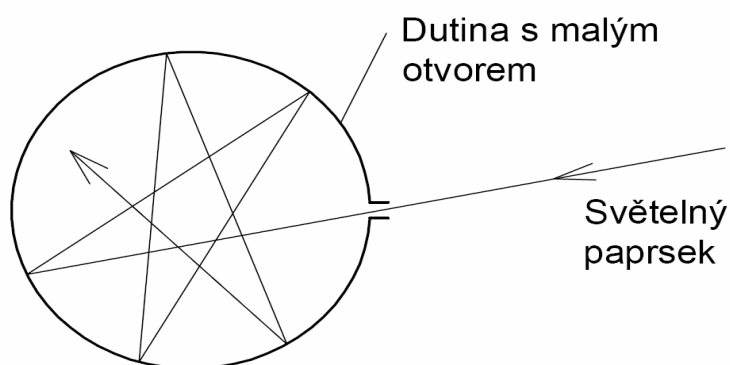
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa,
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a objektem,
- nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt .

1.4.2 Záření

Zářením se rozumí elektromagnetické vlnění, kterým se přenáší energie. Zářením při kterém je přenášena tepelná energie se nazývá tepelné záření. Toto záření odpovídá rozsahu vlnové délky od 2 μm do 25 μm . Tepelné záření je emitováno povrchem tělesa, jejichž teplota je vyšší než 0K. Vyzařující těleso se skládá z molekul a atomů, to znamená, že konají tepelný pohyb. Energie kmitavého pohybu se přenáší mezi sousedními částicemi a také do okolního prostoru formou elektromagnetických vln. Vyzářená energie jde na účet energie tepelného pohybu částic, a proto se těleso ochlazuje. [5, 7]

1.4.3 Černé těleso

Černé těleso (Obr. 6) je těleso, které dokonale pohlcuje dopadající záření a to při každém úhlu dopadu při libovolné spektrální záři a které naopak při každé vlnové délce vyzařuje maximální energii nezávisle na použitém materiálu. Zář černého tělesa je ve všech směrech konstantní. Emisivita černého tělesa $\varepsilon=1$. [5]



Obr. 6 Černé těleso

1.4.4 Zákony záření pro černé těleso

Intenzitu vyzařování udává Stefan-Boltzmannův zákon. [5]

$$H_o = \sigma \cdot T^4 \quad (7)$$

Posun maxima vyzařované energie směrem k nižším vlnovým délkám vlivem vzrůstající teploty vyjadřuje Wienův zákon posuvu. [5]

$$T \cdot \lambda_{\max} = b \quad (8)$$

Lambertův zákon říká, že zář L ideálního plošného zdroje tepelného záření je stejná ve všech směrech. Přírodním důsledkem tohoto zákona je závislost zářivosti I na úhlu φ , který svírá směr pozorování s kolmicí k rovině zdroje. [5]

$$I_e = I_{eo} \cdot \cos\varphi \quad (9)$$

1.4.5 Emisivita

Emisivita je poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při téže teplotě. Platí následující vztah [5]:

$$\varepsilon = \frac{H}{H_o} \quad (10)$$

1.5 Hodnocení metod měření tepla při řezání

1.5.1 Kalorimetrická metoda

Množství vyvinutého tepla při obrábění lze zjistit metodou kalorimetrickou. Měření se provádí tím způsobem, že celý obrobek a pokud možno největší část nástroje jsou ponořeny do kapaliny kalorimetru. Po ustálení teploty se změří počáteční teplota. Po té obrábí-

me součástku přesně určenou dobu a necháme opět teplotu vody ustálit. Po ustálení ji s přesností na 0,05°C změříme. Celkové vyvinuté teplo určíme z rovnice (11):

$$Q = (\Theta - \Theta_o) \cdot (G_v + G_s + c_s + G_n + c_n) \quad (11)$$

Kalorimetricky lze určit také teplo v tříse. Jako v předchozím případě změříme ustálenou teplotu vody před řezáním a po určité době práce. [9]

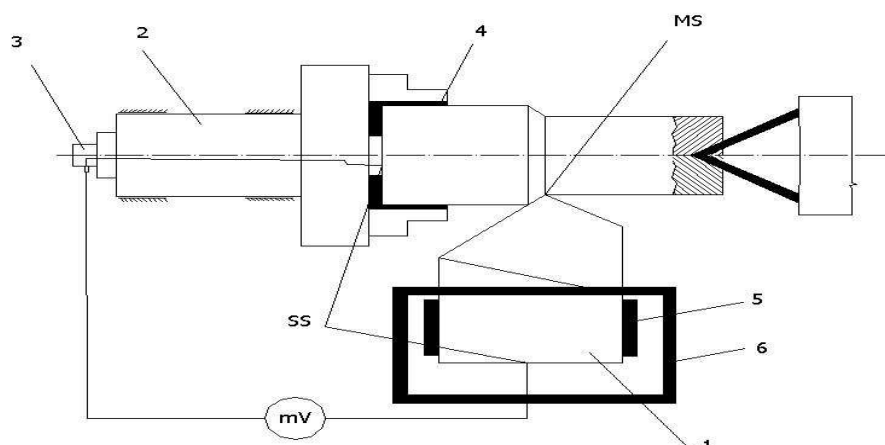
$$Q_{tr} = G_v (\Theta - \Theta_o) + G_t \cdot c_t \cdot \Theta \quad (12)$$

1.5.2 Měření teploty pomocí přímého termočlánu

Přirozený termočlánek se měří teplota všech stykových míst mezi nástrojem a obrobkem. Protože tento termočlánek umožňuje registrovat okamžitou změnu teploty řezání, používá se tato metoda nejen při experimentální práci, ale slouží i jako jeden z možných snímačů obráběcího procesu u obráběcích strojů s adaptivním řízením. [6]

Měřicí spoj přirozeného termočlánu je na stykových plochách mezi nástrojem a obrobkem. Nástroj a obrobek jsou vzájemně elektricky izolovány. Nevýhodou je, že pro každou kombinaci materiálu nástroje a materiálu obrobku musí být stanovena cejchovní křivka. [6]

Teplota řezání závisí na materiálu obrobku, řezném materiálu, geometrii nástroje, řezných podmínkách a řezném prostředí. [6]



Obr. 7 Měření teploty termočlánkem [6]

*MS – měřící spoj, SS – srovnávací spoj, 1 - nástroj, 2 – obrobek,
3 – zařízení pro přenos signálu z rotující části, 4 – izolace obrobku,
5 – izolace nástroje, 6 – ochranný kryt.*

1.5.3 Měření teploty pomocí dvou cizích kovů

Do nástroje se vyvrtá otvor. Na dno otvoru se přivaří konce dvou cizích kovů. Těmito kovy mohou být měď, chrom, platina. Při takovéto úpravě bude termoelektrická síla úměrná střední teplotě spojů obou cizích kovů s materiálem nástroje nebo obrobku. [1]

Při jiné úpravě se nejprve spojí konce použitých cizích kovů a takto vzniknutý spoj se přivaří k materiálu nástroje nebo obrobku. Termoelektrická síla je úměrná teplotě spoje obou cizích kovů. Hroty termočlánku musí být izolovány navzájem od materiálu nástroje nebo obrobku. [1]

1.5.4 Měření teploty pomocí jednoho cizího kovu

Podstatným rozdílem této metody je v tom, že jedním elementem termočlánku je materiál nástroje nebo obrobku a druhý je kov. Termoelektrická síla je potom úměrná střední teplotě dotykových bodů cizího kovu a řezného materiálu. Nástroj a obrobek je třeba na-

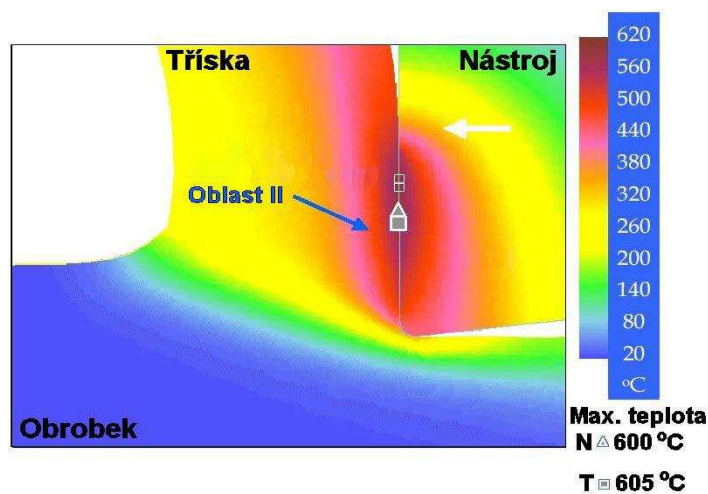
vzájem elektricky izolovat, aby mezi nimi nevznikal uzavřený obvod. Výhodně se tedy tato metoda používá když je materiál nevodivý. [1]

1.5.5 Optická metoda

Při této metodě se čočkami zachytávají tepelné paprsky, které vycházejí z určitého bodu teplotního pole obrobku nebo nástroje. Tepelné paprsky vycházející z jiných míst teplotního pole se zakrývají clonou. Svazek paprsků se orientuje do místa spoje termočlánku nebo na citlivý termistor. Hlavní výhodou je, že tato metoda umožní získat představu o teplotě různých míst obrobku, nože a třísky. Nedostatkem je vliv drsnosti a zbarvení materiálu. Při přesném měření nutno použít velmi citlivé, ale drahé přístroje. [1]

1.5.6 Teplotní pole řezání

Teplotním polem rozumíme rozložení teplot v tříске, nástroji a obrobku v průběhu řezání. Teplotní pole je v průběhu procesu řezání neracionelní. Ustálí se teprve za nějaký čas od začátku řezání (2 až 15 minut). Teoreticky je teplotní pole souhrnem teplot sledovaného prostoru v určitém okamžiku. [9]



Obr. 8 Teplotní pole řezání [12]

1.6 Statistické vyhodnocování

Z dat získaných pokusem nebo pozorováními tj. z náhodných výběrů, se vypočítávají hodnoty různých ukazatelů; do zpráv o výsledcích se uvádí průměrná hodnota výsledků (aritmetický průměr nepozorovaných hodnot), maximální a minimální napozorovaná hodnota apod. [11]

Výpočet těchto ukazatelů má široký význam. Přehledně lze změřené či napozorované hodnoty shrnout stručně a přehledně. Vhodně vybrané ukazatele umožňují určit závěry o rozdělení pravděpodobnosti náhodných veličin, které pozorujeme, umožňují úsudky o charakteristikách těchto rozdělení. A některé z těchto charakteristik rozdělení bývají často i konečným cílem pokusu. [11]

Takové ukazatele nazýváme statistikami. Ve skutečnosti to jsou vlastně funkce náhodných veličin. Slovo statistika je pouze pojmenováním s přihlédnutím k účelu a není třeba za ním hledat žádné jiné souvislosti. [11]

1.6.1 Nejčastěji používané statistiky

Nejčastěji se používají takové statistiky, které aproximují nejběžnější charakteristiky. Takové statistiky mají obvykle přívlástek výběrový. Tato terminologie vznikla z toho, že výběrová charakteristika je odhadem příslušné charakteristiky na základě náhodného výběru. [11]

Výběrový průměr

Součet pozorování, dělený rozsahem výběru. [11]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (13)$$

Výběrový rozptyl

Tato statistika vyjadřuje míru variability experimentálních výsledků a je protějškem rozptylu tvar $(X_i)=\sigma^2$. [11]

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (14)$$

Výběrová směrodatná odchylka

Statistika je analogií směrodatné odchylky náhodné veličiny X_i . [11]

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A POMŮCKY

K provedení experimentu byly použity tyto pomůcky. Jedná se o ruční bezkontaktní teploměr a vzorek ocele ve tvaru kvádrů.

2.1 Seznámení se s měřícím přístrojem

Jedná se o ruční bezkontaktní teploměr, který měří množství infračervené energie emitované zacíleným předmětem a zobrazuje teplotu povrchu tohoto předmětu. [10]



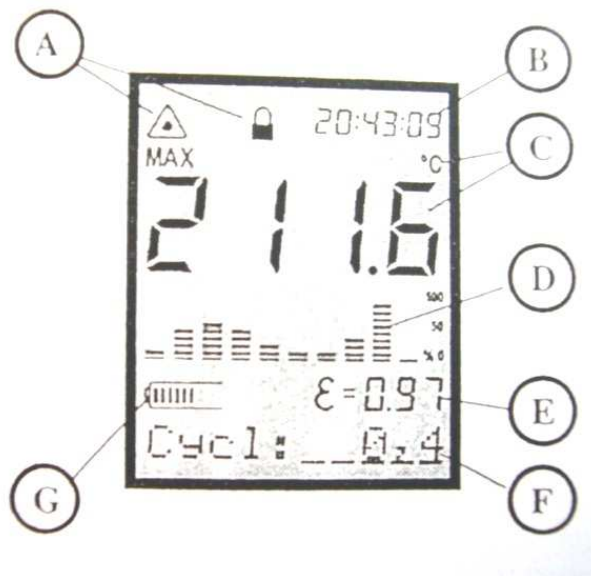
Obr. 9 Měřící přístroj [10]

2.1.1 Charakteristika

Součástí teploměru je [10]:

- laserové zaměření,
- nastavitelná emisivita,
- překročení horní a dolní hranice se signalizací,

- maximální a minimální hodnota,
- rozdíl a průměr měřené teploty,
- paměť dat (100 bodů),
- grafický displej.



Obr. 10 Displej přístroje [10]

Popis displeje [10]:

- stav laseru a zámku (A),
- čas nebo datum (B),
- naměřená teplota (C),
- grafické zobrazení (D),
- hodnota emisivity (E),
- stavový řádek (F),
- indikátor stavu baterie (G).

Technické údaje [10]:

Teplotní rozsah	-30°C do 900°C
Rozlišení zobrazení	0,1°C
Přesnost	±1°C
Doba odezvy	250ms
Spektrální rozsah	8-14μm
Optické rozlišení	60:1
Provozní rozsah okolní teploty	0°C až 45°C
Skladovací teplota	-30°C až 50°C
Zdroj	2x1,5V alkalický článek typu AA
Rozměry	200 x 170 x 50 mm
Rozsah emisivity	0,1 až 1 (krok 0,01)

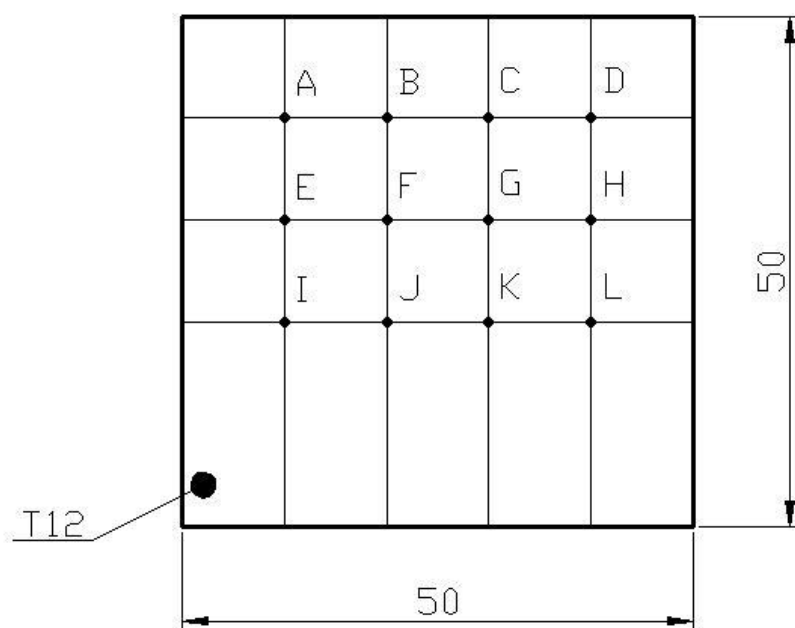
2.1.2 Emisivita

Množství infračervené energie vyzařované předmětem závisí na jeho emisivitě a teplotě. Emisivita závisí na materiálu a jeho povrchových vlastnostech. Pro dosažení větší přesnosti měření se nastaví hodnota emisivity pro určitý druh měřeného materiálu. [10]

Na displeji se zobrazí označení materiálu, hodnota emisivity a teplota. Jiný materiál se nastaví pomocí kurzorových šipek. [10]

2.2 Měřený vzorek

K experimentu byly použity 4 kvádry ocele třídy 12 050 o rozměrech 50x50x12 mm. Na povrchu vzorku byla vytvořena síť obsahující 12 bodů, ve kterých byla měřena teplota součásti po obrábění při různých technologických podmínkách.



Obr. 11 Schéma měřeného vzorku

3 MĚŘENÍ TEPLoty PŘI FRÉZOVÁNÍ A BROUŠENÍ

Cílem práce je zkoumání vlivů různých technologických podmínek obrábění na teplo a teplotu

3.1 Experiment

Měřený vzorek byl za různých technologických podmínek frézován a broušen. Ihned po obrábění a poté v určených časových intervalech byla ve zvolených bodech na síti vzorku měřena teplota pomocí ručního bezkontaktního teploměru. Dle tabulky byla zvolena emisivita $\varepsilon = 0,8$.

3.1.1 Vliv času na teplotu při frézování

Ve 2 minutových intervalech byla opakovaně měřena teplota ve všech bodech.

Podmínky měření:

$$v_f = 100 \text{ mm/min}$$

$$d_n = 16 \text{ mm}$$

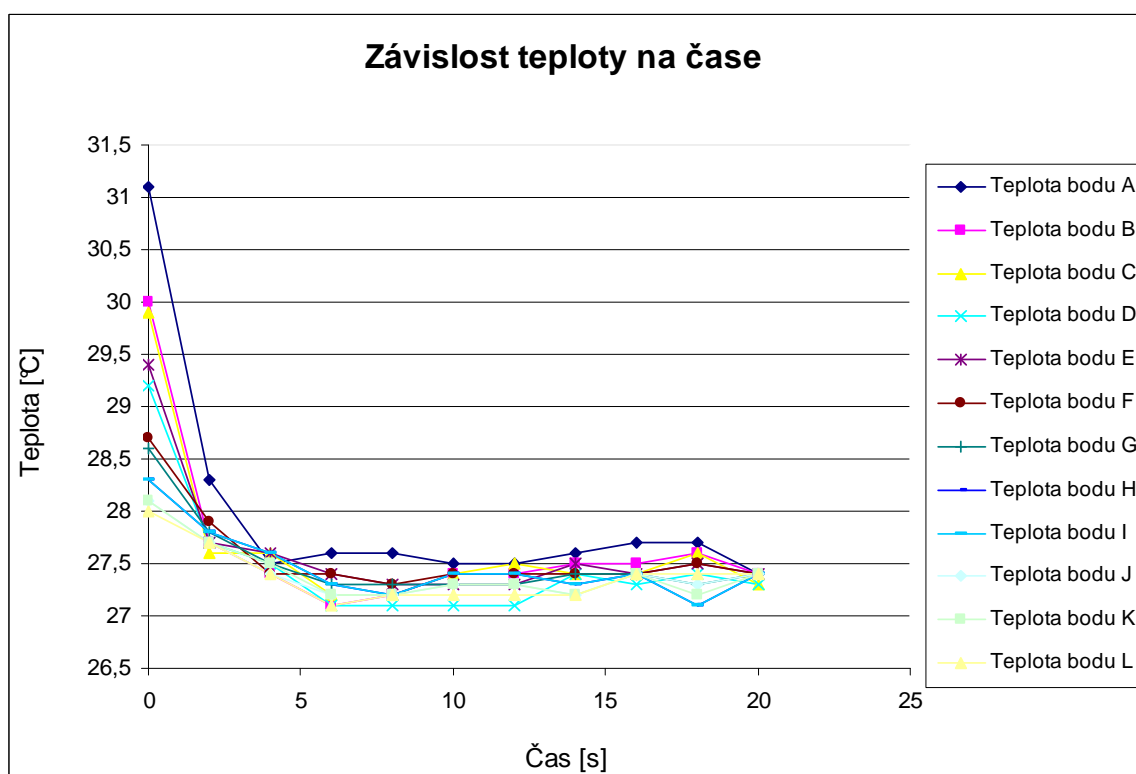
$$v_c = 22,52 \text{ m/min}$$

$$a_p = 1 \text{ mm}$$

Nástroj: Stopková fréza

Tab. 1 Naměřené hodnoty teplot při frézování vzorku ve 2-minutovém intervalu

čas [min]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
t_A [°C]	31,1	28,3	27,5	27,6	27,6	27,5	27,5	27,6	27,7	27,7	27,4
t_B [°C]	30,0	27,7	27,4	27,1	27,2	27,4	27,4	27,5	27,5	27,6	27,4
t_C [°C]	29,9	27,6	27,6	27,2	27,2	27,4	27,5	27,4	27,4	27,6	27,3
t_D [°C]	29,2	27,7	27,5	27,1	27,1	27,1	27,1	27,4	27,3	27,4	27,3
t_E [°C]	29,4	27,7	27,6	27,4	27,3	27,3	27,3	27,5	27,4	27,5	27,4
t_F [°C]	28,7	27,9	27,4	27,4	27,3	27,4	27,4	27,4	27,4	27,5	27,4
t_G [°C]	28,6	27,8	27,5	27,3	27,3	27,3	27,3	27,4	27,4	27,3	27,4
t_H [°C]	28,3	28,0	27,7	27,3	27,3	27,5	27,5	27,4	27,4	27,4	27,4
t_I [°C]	28,3	27,8	27,6	27,3	27,2	27,4	27,4	27,3	27,4	27,1	27,4
t_J [°C]	28,1	27,7	27,4	27,2	27,2	27,3	27,3	27,2	27,4	27,3	27,4
t_K [°C]	28,1	27,7	27,5	27,2	27,2	27,3	27,3	27,2	27,4	27,2	27,4
t_L [°C]	28,0	27,7	27,4	27,1	27,2	27,2	27,2	27,2	27,4	27,4	27,4



Obr. 12 Graf závislosti teploty na čase

Z grafu na obrázku (Obr. 12) je zřejmé, že největší chladnutí vzorku po frézování za daných podmínek probíhá do 4-té minuty po obrábění.

3.1.2 Vliv různé hloubky řezu na teplotu obrábění při frézování stopkovou frézou

Při měření byly použity 3 různé hloubky řezu. Ihned po obrobení vzorku a následně po 5-ti minutách po ochladnutí byla změřena teplota ve zvolených bodech na síti vzorku.

Podmínky měření:

$$v_f = 65 \text{ mm/min}$$

$$d_n = 16 \text{ mm}$$

$$v_c = 22,52 \text{ m/min}$$

$$a_p = 0,5; 1; 1,5 \text{ mm}$$

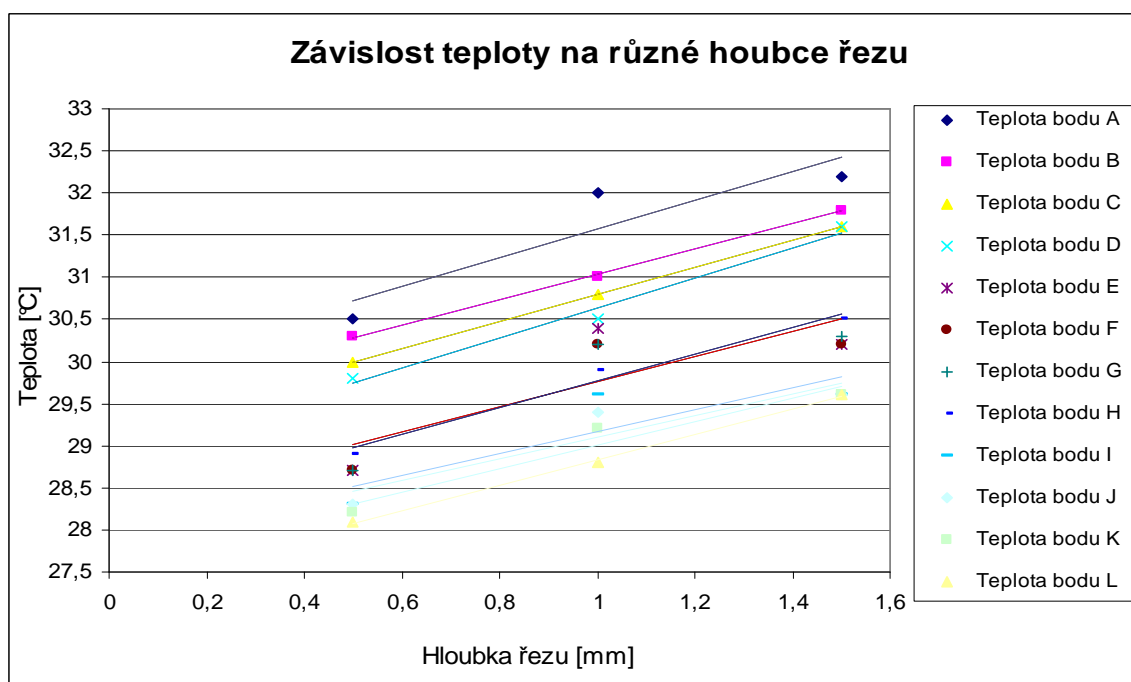
Nástroj: Stopková fréza

Tab. 2 Naměřené hodnoty při různé hloubce řezu

a_p [mm]	0,5	1,0	1,5
t_A [°C]	30,5	32,0	32,2
t_B [°C]	30,3	31,0	31,8
t_C [°C]	30,0	30,8	31,6
t_D [°C]	29,8	30,5	31,6
t_E [°C]	28,7	30,4	30,2
t_F [°C]	28,7	30,2	30,2
t_G [°C]	28,7	30,2	30,3
t_H [°C]	28,9	29,9	30,5
t_I [°C]	28,3	29,6	29,6
t_J [°C]	28,3	29,4	29,6
t_K [°C]	28,2	29,2	29,6
t_L [°C]	28,1	28,8	29,6

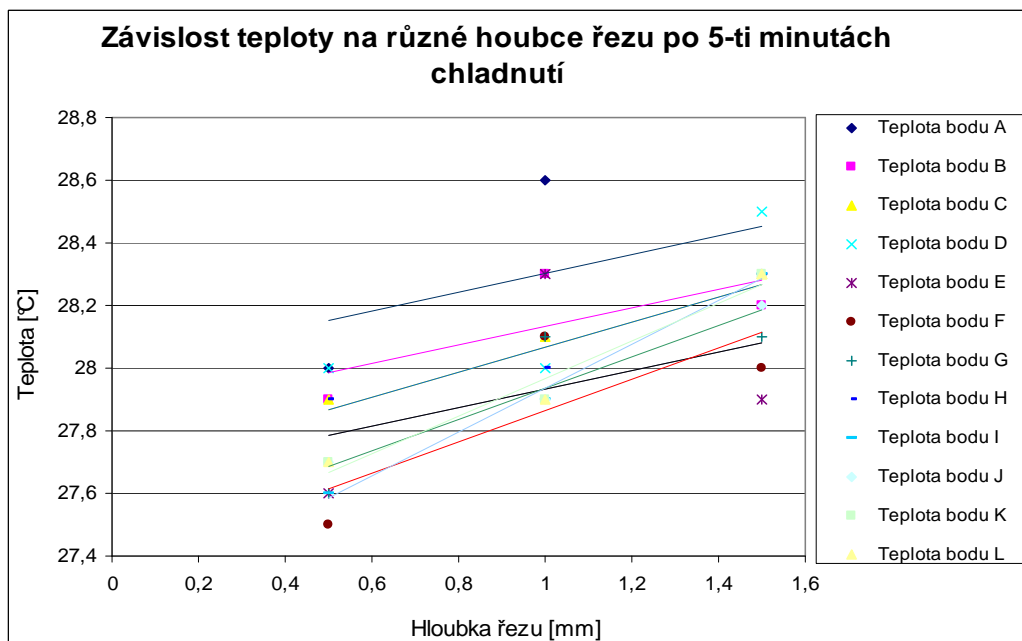
Tab. 3 Naměřené hodnoty při různé hloubce řezu po 5-ti minutách chlazení

a_p [mm]	0,5	1,0	1,5
t_A [°C]	28,0	28,6	28,3
t_B [°C]	27,9	28,3	28,2
t_C [°C]	27,9	28,1	28,3
t_D [°C]	28,0	28,0	28,5
t_E [°C]	27,6	28,3	27,9
t_F [°C]	27,5	28,1	28,0
t_G [°C]	27,6	28,1	28,1
t_H [°C]	27,9	28,0	28,3
t_I [°C]	27,6	27,9	28,3
t_J [°C]	27,7	27,9	28,2
t_K [°C]	27,7	27,9	28,3
t_L [°C]	27,7	27,9	28,3



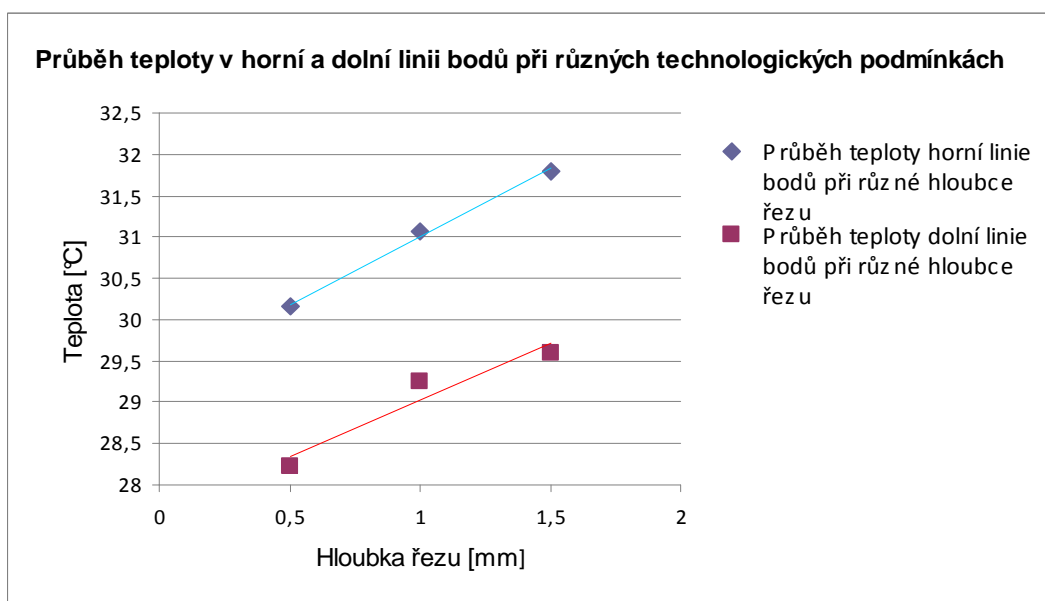
Obr. 13 Graf závislosti teploty na různé houbce řezu při frézování

Z grafu na obrázku (Obr. 13) lze vyčíst, že s vyšší hloubkou řezu se zvyšuje teplota ve všech bodech na síti vzorku.



Obr. 14 Graf závislosti teploty na různé houbce řezu při frézování po 5-ti minutách chladnutí

Z grafu na obrázku (Obr. 14) je patrné, že i po chladnutí vykazují nejvyšší teploty body frézované při největší houbce řezu.



Obr. 15 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé houbce řezu při frézování

Z grafu na obrázku (Obr. 15) vyplývá, že body horní linie získají během frézování vyšší teplotu než body dolní linie. Je to způsobeno tím, že body horní linie jsou v bezprostředním kontaktu plochy s nástrojem při obrábění.

3.1.3 Vliv různé posuvové rychlosti na teplotu při frézování stopkovou frézou

Při měření byly použity 3 různé posuvové rychlosti. Ihned po obrobení vzorku a následně po 5-ti minutách po ochladnutí byla změřena teplota ve zvolených bodech na síti vzorku.

Podmínky měření:

$$v_f = 24; 65; 100 \text{ mm/min}$$

$$d_n = 16 \text{ mm}$$

$$v_c = 22,52 \text{ m/min}$$

$$a_p = 1 \text{ mm}$$

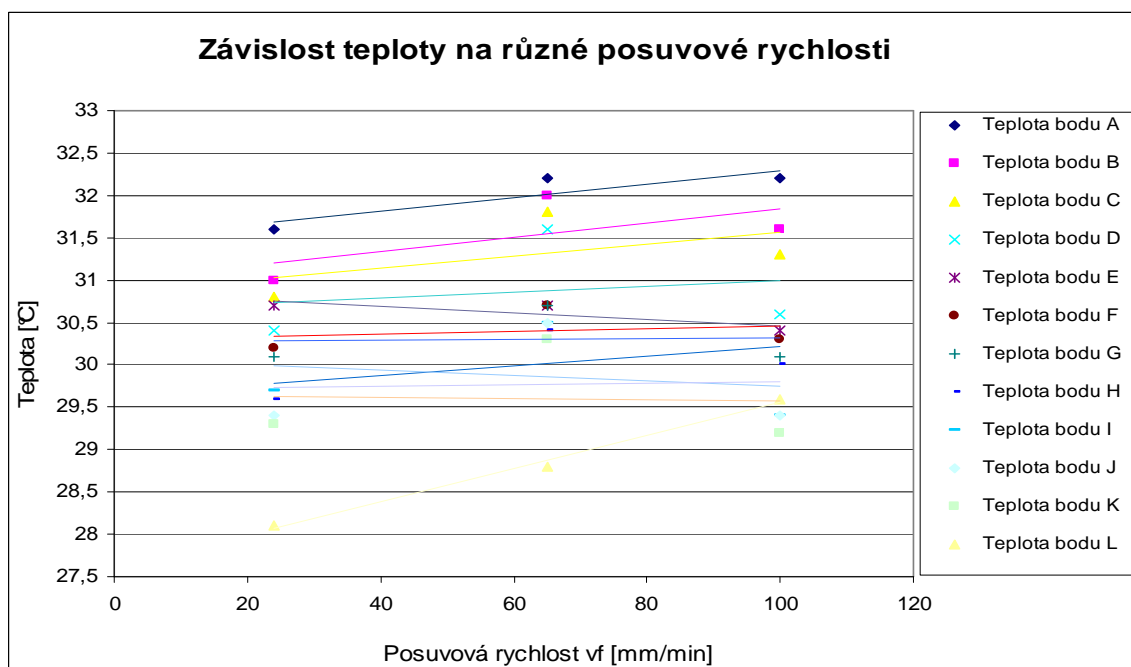
Nástroj: Stopková fréza

Tab. 4 Naměřené hodnoty při různé posuvové rychlosti

v_f [mm/min]	24	65	100
t_A [°C]	31,6	32,2	32,2
t_B [°C]	31,0	32,0	31,6
t_C [°C]	30,8	31,8	31,3
t_D [°C]	30,4	31,6	30,6
t_E [°C]	30,7	30,7	30,4
t_F [°C]	30,2	30,7	30,3
t_G [°C]	30,1	30,7	30,1
t_H [°C]	29,6	30,4	30,0
t_I [°C]	29,7	30,5	29,4
t_J [°C]	29,4	30,5	29,4
t_K [°C]	29,3	30,3	29,2
t_L [°C]	28,7	30,1	29,2

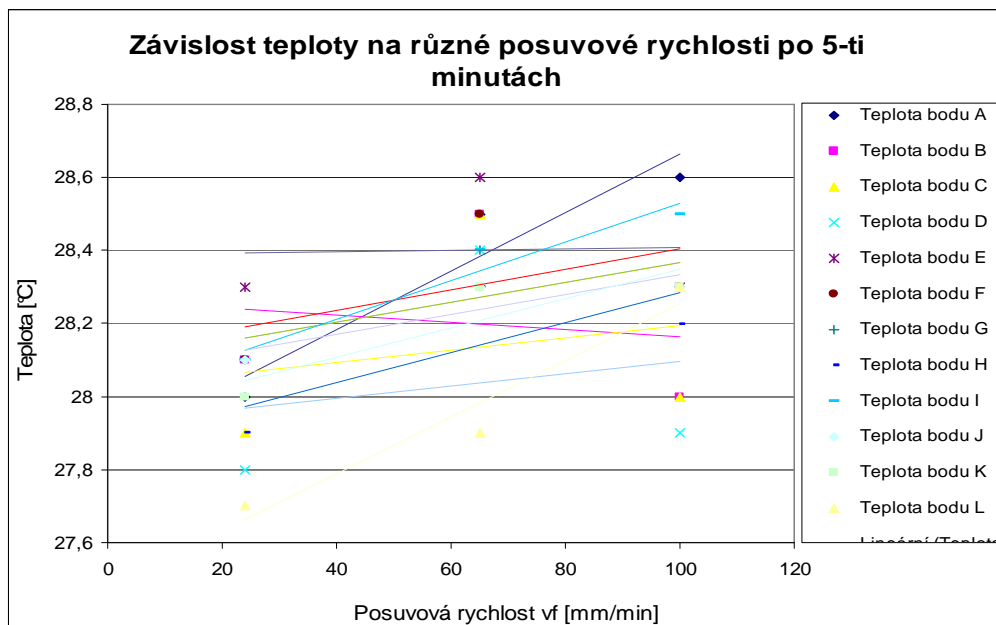
Tab. 5 Naměřené hodnoty při různé posuvové rychlosti po 5-ti minutách chladnutí

v_f [mm/min]	24	65	100
tA [°C]	28,0	28,5	28,6
tB [°C]	28,1	28,5	28,0
tC [°C]	27,9	28,5	28,0
tD [°C]	27,8	28,4	27,9
tE [°C]	28,3	28,6	28,3
tF [°C]	28,1	28,5	28,3
tG [°C]	28,1	28,4	28,3
tH [°C]	27,9	28,3	28,2
tI [°C]	28,1	28,4	28,5
tJ [°C]	28,1	28,3	28,3
tK [°C]	28,0	28,3	28,3
tL [°C]	27,9	28,3	28,1



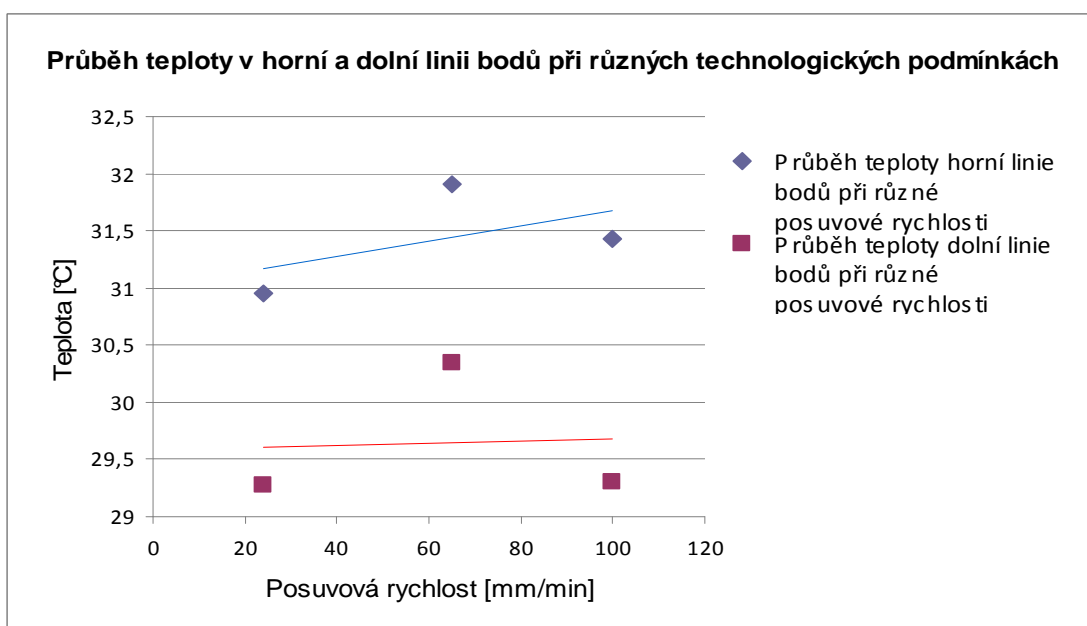
Obr. 16 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování

Z grafu na obrázku (Obr. 16) je patrné, že se zvyšující se posuvovou rychlostí roste teplota.



Obr. 17 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování po 5-ti minutách chladnutí

Z grafu na obrázku (Obr. 17) je zřejmé, že i po ochladnutí vzorku mají body frézované při největší posuvové rychlosti nejvyšší teplotu.



Obr. 18 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé posuvové rychlosti při frézování

Z grafu na obrázku (Obr. 18) lze odečíst, že body horní linie získají během frézování vyšší teplotu než body horní linie. Je to způsobeno bezprostředním kontaktem plochy s nástrojem při obrábění.

3.1.4 Vliv různé hloubky řezu na teplotu při frézování válcovou frézou

Při měření byly použity 3 různé hloubky řezu. Ihned po obrobení vzorku a následně po 5-ti minutách po ochladnutí byla změřena teplota ve zvolených bodech na síti vzorku.

Podmínky měření:

$$v_f = 65 \text{ mm/min}$$

$$d_n = 50 \text{ mm}$$

$$v_c = 31,42 \text{ m/min}$$

$$a_p = 0,1; 0,3; 0,5 \text{ mm}$$

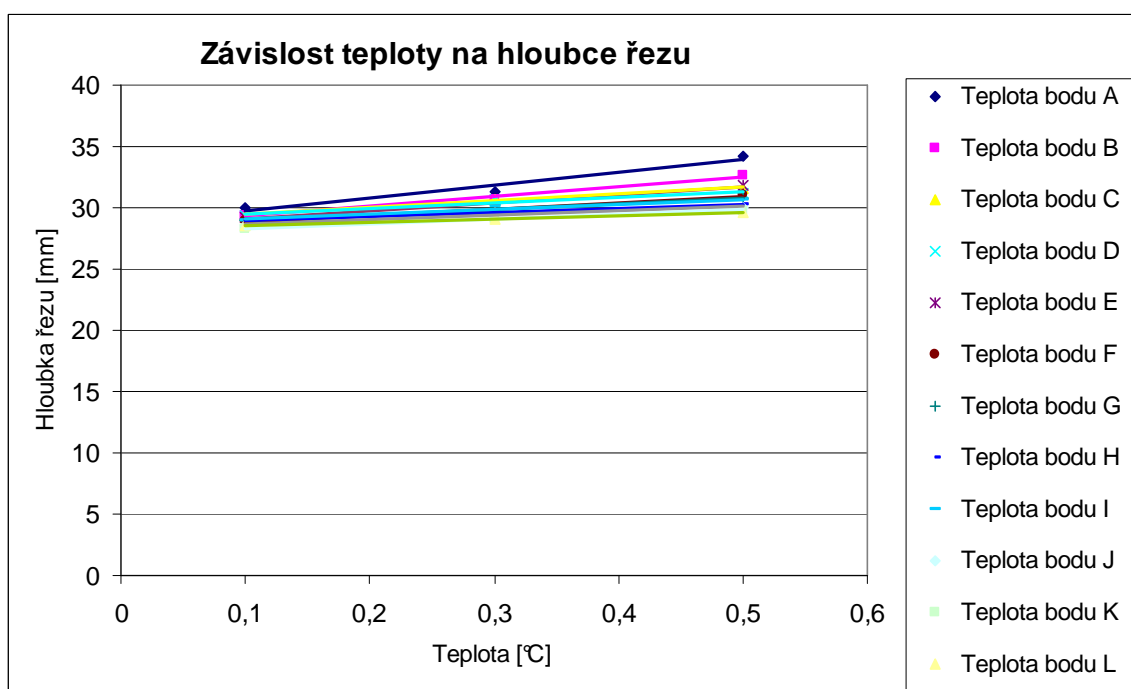
Nástroj: Válcová fréza

Tab. 6 Naměřené hodnoty při různé hloubce řezu

a_p [mm]	0,1	0,3	0,5
t_A [°C]	30,0	31,3	34,2
t_B [°C]	29,4	30,7	32,6
t_C [°C]	29,4	30,7	31,6
t_D [°C]	29,3	30,7	31,2
t_E [°C]	29,2	30,3	31,8
t_F [°C]	28,9	29,8	31,0
t_G [°C]	28,9	30,0	30,8
t_H [°C]	28,9	29,8	30,2
t_I [°C]	28,9	30,1	30,6
t_J [°C]	28,6	29,6	30,0
t_K [°C]	28,3	29,1	29,8
t_L [°C]	28,5	29,1	29,6

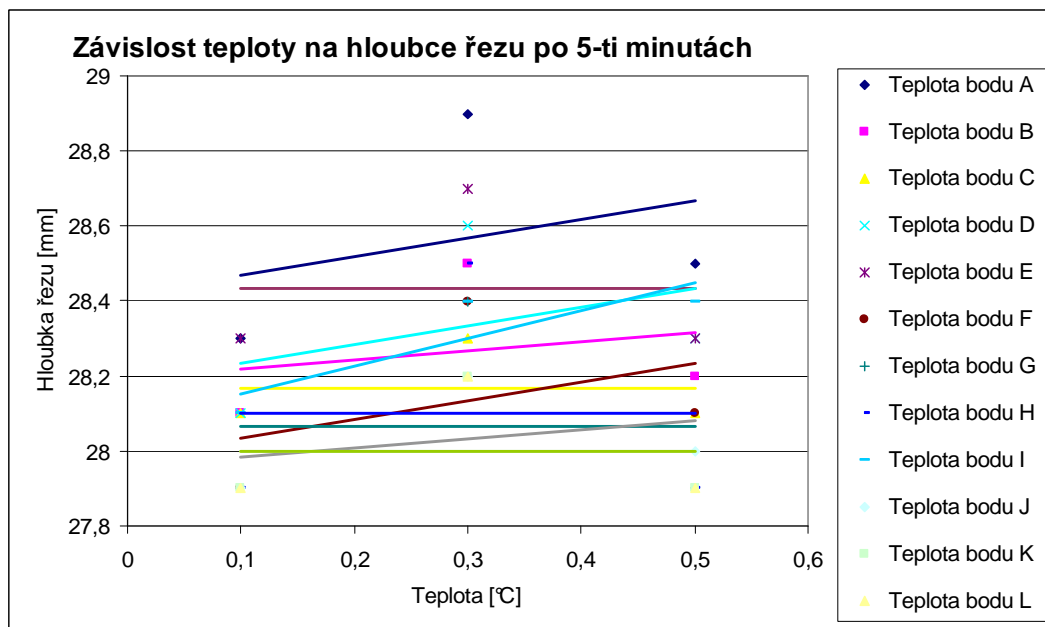
Tab. 7 Naměřené hodnoty při různé hloubce řezu po 5-ti minutách chlazení

a_p [mm]	0,1	0,3	0,5
t_A [°C]	28,3	28,9	28,5
t_B [°C]	28,1	28,5	28,2
t_C [°C]	28,1	28,3	28,1
t_D [°C]	28,1	28,6	28,3
t_E [°C]	28,3	28,7	28,3
t_F [°C]	27,9	28,4	28,1
t_G [°C]	27,9	28,4	27,9
t_H [°C]	27,9	28,5	27,9
t_I [°C]	28,1	28,4	28,4
t_J [°C]	27,9	28,2	28,0
t_K [°C]	27,9	28,2	27,9
t_L [°C]	27,9	28,2	27,9



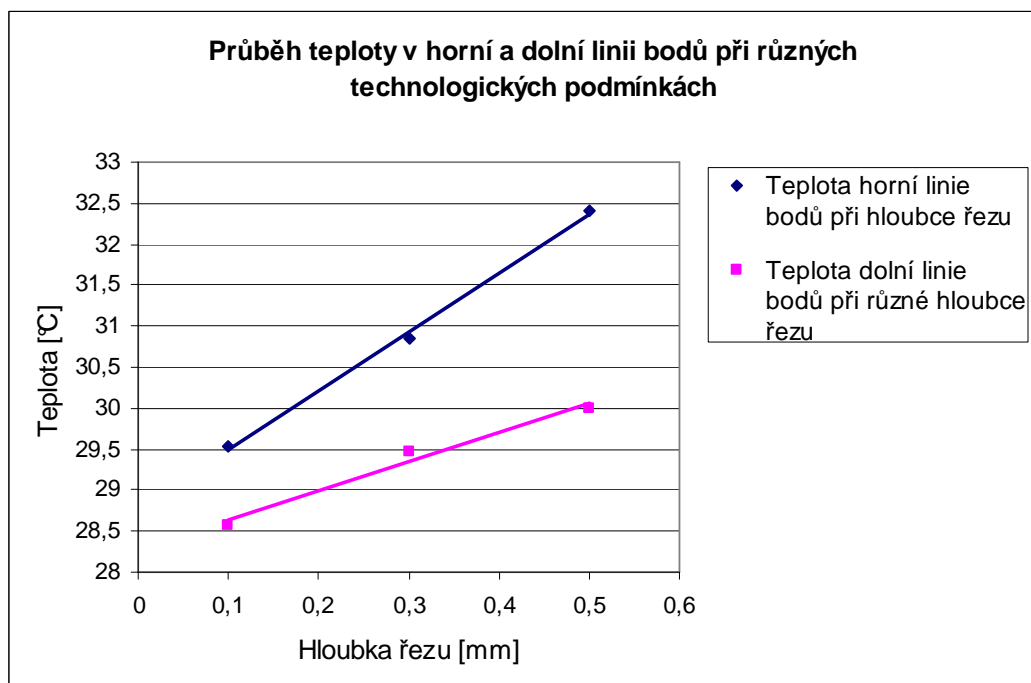
Obr. 19 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při frézování

Z grafu na obrázku (Obr. 19) je patrné, že se zvyšující hloubkou řezu se zvyšuje i teplota ve všech bodech na síti vzorku.



Obr. 20 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při frézování po 5-tichladnutí

Z grafu na obrázku (Obr. 20) je zřejmé, že i po ochladnutí vykazují nejvyšší teplotu body zahřáté při frézování s nejvyšší hloubkou řezu.



Obr. 21 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé hloubce řezu při frézování

Z grafu na obrázku (Obr. 21) lze odečíst, že body horní linie vykazují mnohem vyšší teploty než body dolní linie. Je to způsobeno bezprostředním kontaktem plochy s nástrojem při frézování.

3.1.5 Vliv různé posuvové rychlosti na teplotu při frézování válcovou frézou

Při měření byly použity 3 různé posuvové rychlosti. Ihned po obrobení vzorku a následně po 5-ti minutách po ochladnutí byla změřena teplota ve zvolených bodech na síti vzorku.

Podmínky měření:

$$v_f = 24; 65; 100 \text{ mm/min}$$

$$d_n = 50 \text{ mm}$$

$$v_c = 31,42 \text{ m/min}$$

$$a_p = 0,5 \text{ mm}$$

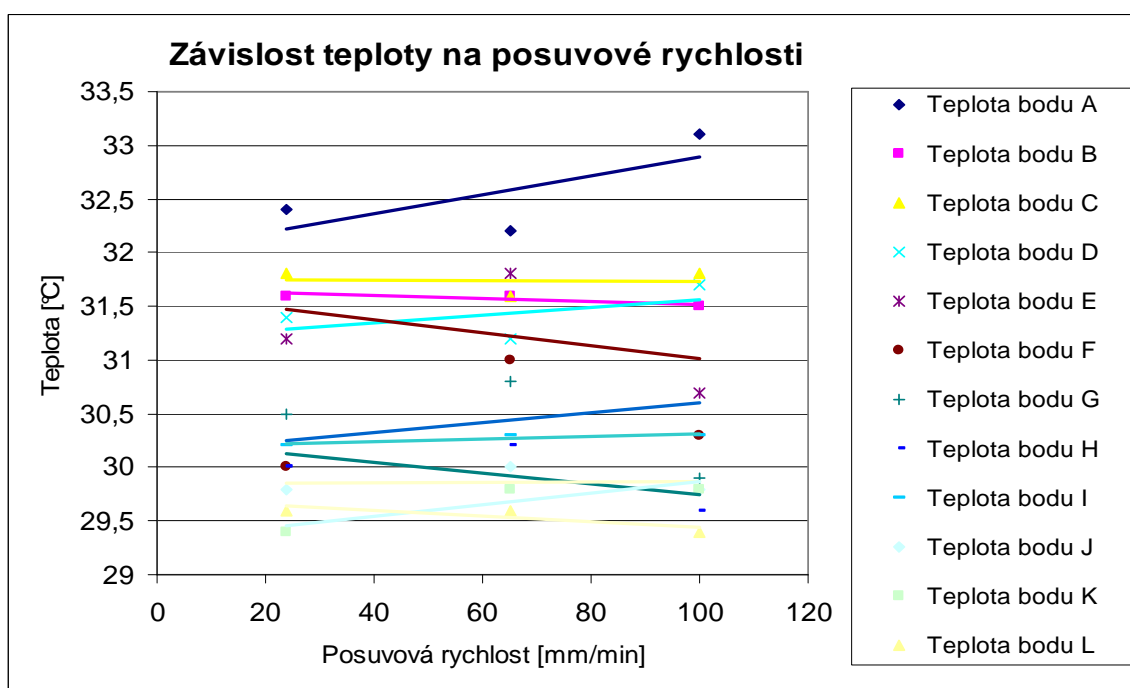
Nástroj: Válcová fréza

Tab. 8 Naměřené hodnoty při různé posuvové rychlosti

v_f [mm/min]	24	65	100
t_A [°C]	32,4	32,2	33,1
t_B [°C]	31,6	31,6	31,5
t_C [°C]	31,8	31,6	31,8
t_D [°C]	31,4	31,2	31,7
t_E [°C]	31,2	31,8	30,7
t_F [°C]	30,0	31,0	30,3
t_G [°C]	30,5	30,8	29,9
t_H [°C]	30,0	30,2	29,6
t_I [°C]	30,2	30,3	30,3
t_J [°C]	29,8	30,0	29,8
t_K [°C]	29,4	29,8	29,8
t_L [°C]	29,6	29,6	29,4

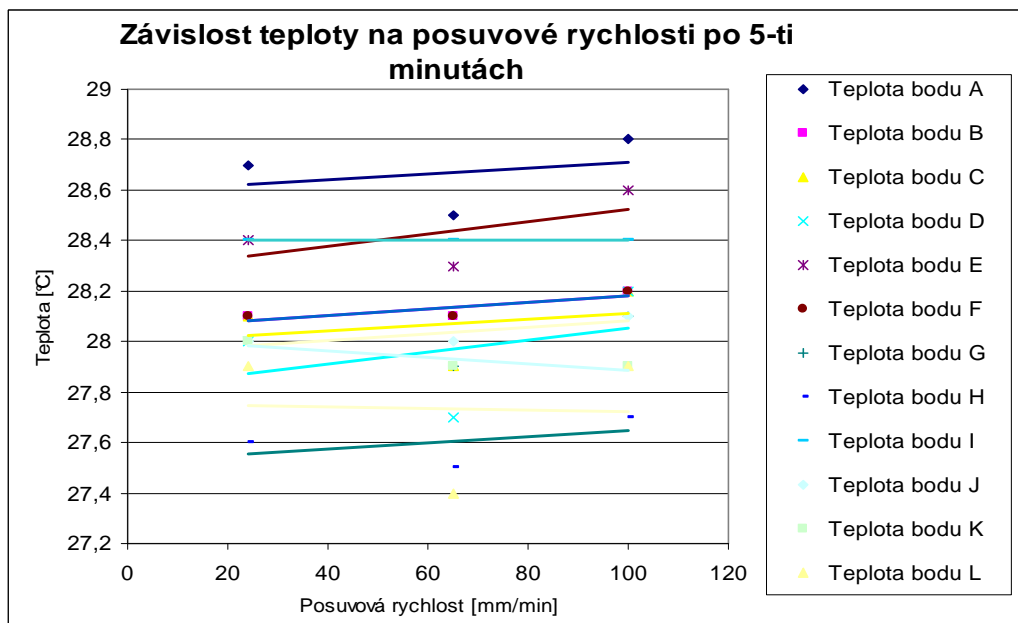
Tab. 9 Naměřené hodnoty při různé posuvové rychlosti po 5-ti minutách chladnutí

v_f [mm/min]	24	65	100
t_A [°C]	28,7	28,5	28,8
t_B [°C]	28,1	28,1	28,2
t_C [°C]	28,1	27,9	28,2
t_D [°C]	28,0	27,7	28,2
t_E [°C]	28,4	28,3	28,6
t_F [°C]	28,1	28,1	28,2
t_G [°C]	28,0	27,9	28,1
t_H [°C]	27,6	27,5	27,7
t_I [°C]	28,4	28,4	28,4
t_J [°C]	28,0	28,0	28,1
t_K [°C]	28,0	27,9	27,9
t_L [°C]	27,9	27,4	27,9



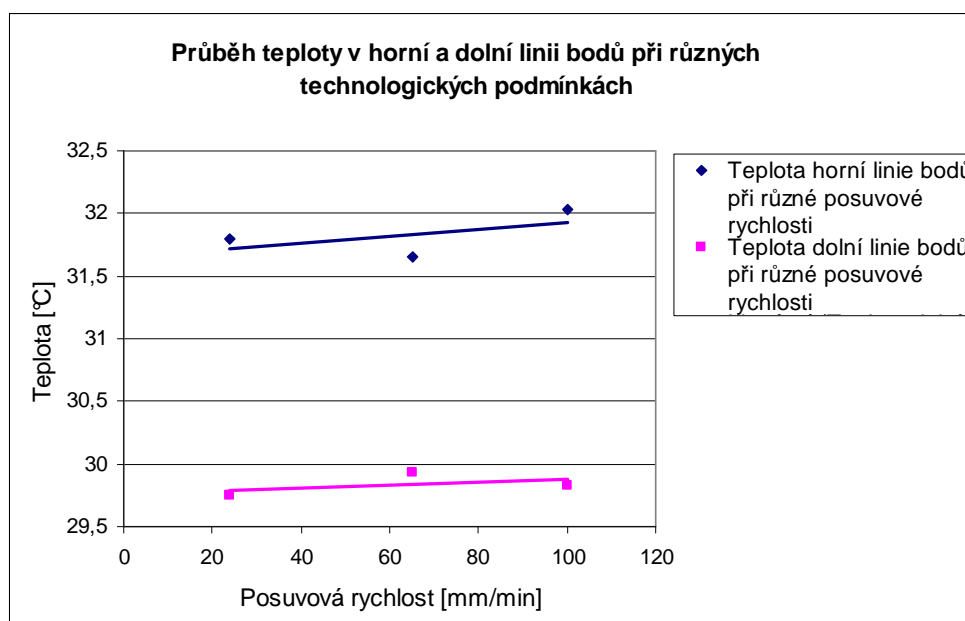
Obr. 22 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování

Z grafu na obrázku (Obr.22) je patrné, že se stoupající posuvovou rychlostí se zvyšuje teplota bodů na síti vzorku.



Obr. 23 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování po 5-ti minutách chladnutí

Z grafu na obrázku (Obr. 23) vyplývá, že i po ochladnutí vzorku mají nejvyšší teplotu body, které byly frézovány s nejvyšší posuvovou rychlostí.



Obr. 24 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé posuvové rychlosti při frézování

Z grafu na obrázku (Obr. 24) je patrné, že body horní linie nabývají vyšších teplot než body dolní linie, opět je to způsobeno bezprostředním kontaktem obráběné plochy s nástrojem.

3.1.6 Vliv různé posuvové rychlosti na teplotu při broušení

Při měření byly použity 3 různé posuvové rychlosti. Ihned po obrobení vzorku a následně po 5-ti minutách po ochladnutí byla změřena teplota ve zvolených bodech na síti vzorku.

Podmínky měření:

$$v_f = 7; 14; 23 \text{ m/s}$$

$$d_n = 250 \text{ mm}$$

$$v_c = 2002 \text{ m/min}$$

$$a_p = 0,02 \text{ mm}$$

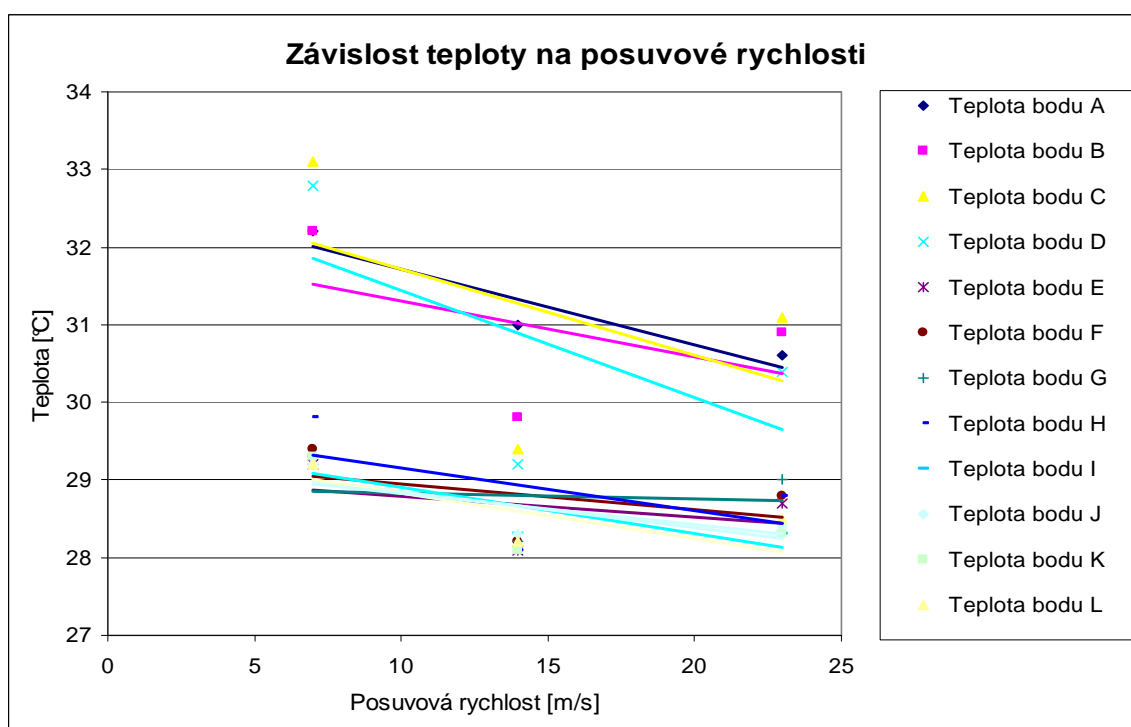
Nástroj: Brousící kotouč

Tab. 10 Naměřené hodnoty při různé posuvové rychlosti

v_f [m/s]	7	14	23
t_A [°C]	32,2	31,0	30,6
t_B [°C]	32,2	29,8	30,9
t_C [°C]	33,1	29,4	31,1
t_D [°C]	32,8	29,2	30,4
t_E [°C]	29,2	28,1	28,7
t_F [°C]	29,4	28,2	28,8
t_G [°C]	29,2	28,2	29,0
t_H [°C]	29,8	28,1	28,8
t_I [°C]	29,3	28,3	28,3
t_J [°C]	29,2	28,3	28,4
t_K [°C]	29,3	28,1	28,3
t_L [°C]	29,2	28,2	28,5

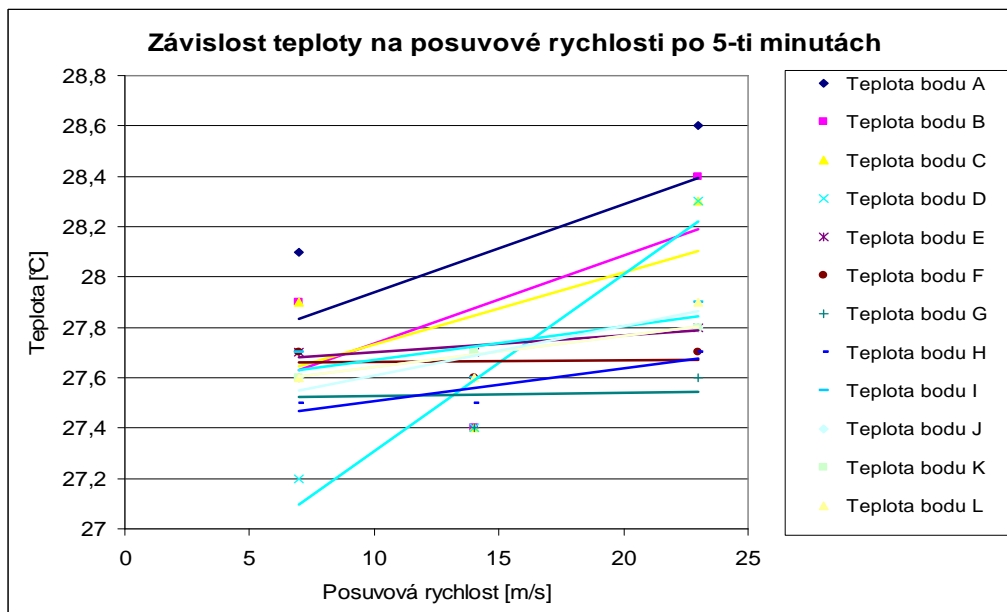
Tab. 11 Naměřené hodnoty při různé posuvové rychlosti po 5-ti minutách chladnutí

v_f [m/s]	7	14	23
t_A [°C]	28,1	27,6	28,6
t_B [°C]	27,9	27,4	28,4
t_C [°C]	27,9	27,4	28,3
t_D [°C]	27,2	27,4	28,3
t_E [°C]	27,7	27,7	27,8
t_F [°C]	27,7	27,6	27,7
t_G [°C]	27,6	27,4	27,6
t_H [°C]	27,5	27,5	27,7
t_I [°C]	27,7	27,6	27,9
t_J [°C]	27,6	27,7	27,8
t_K [°C]	27,6	27,7	27,8
t_L [°C]	27,6	27,6	27,9



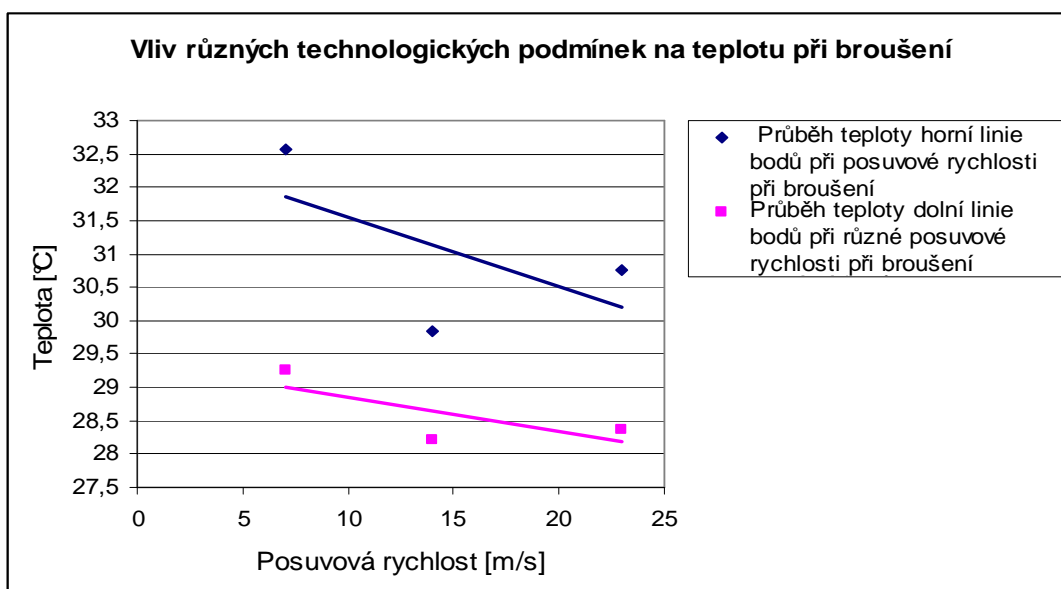
Obr. 25 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při broušení

Z grafu na obrázku (Obr. 25) je zřejmé, že se stoupající posuvovou rychlostí klesá teplota v měřených bodech, toto měření je však nepřesné, protože předpokladem je stoupání teploty se stoupající posuvovou rychlostí. Toho by bylo při měření dosaženo kdyby byla delší doba kontaktu mezi nástrojem a obrobkem.



Obr. 26 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při broušení po 5-ti minutách chladnutí

Z grafu na obrázku (Obr. 26) je patrné, že i po ochladnutí mají nejvyšší teplotu body, které byly broušeny s největší posuvovou rychlostí.



Obr. 27 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé posuvové rychlosti při broušení

Z grafu na obrázku (Obr. 27) lze odečíst, že body horní linie mají vyšší teplotu než body dolní linie. Měření lze opět považovat za nepřesné tak jak u grafu na obrázku (Obr. 25), protože předpokladem je zvětšování hodnot teploty ve všech bodech se stoupající posuvovou rychlostí.

3.1.7 Vliv různé hloubky řezu na teplotu při broušení

Při měření byly použity 3 různé hloubky řezu. Ihned po obrobení vzorku a následně po 5-ti minutách po ochladnutí byla změřena teplota ve zvolených bodech na síti vzorku.

Podmínky měření:

$$v_f = 14 \text{ m/s}$$

$$d_n = 250 \text{ mm}$$

$$v_c = 2002 \text{ m/min}$$

$$a_p = 0,01; 0,02; 0,04 \text{ mm}$$

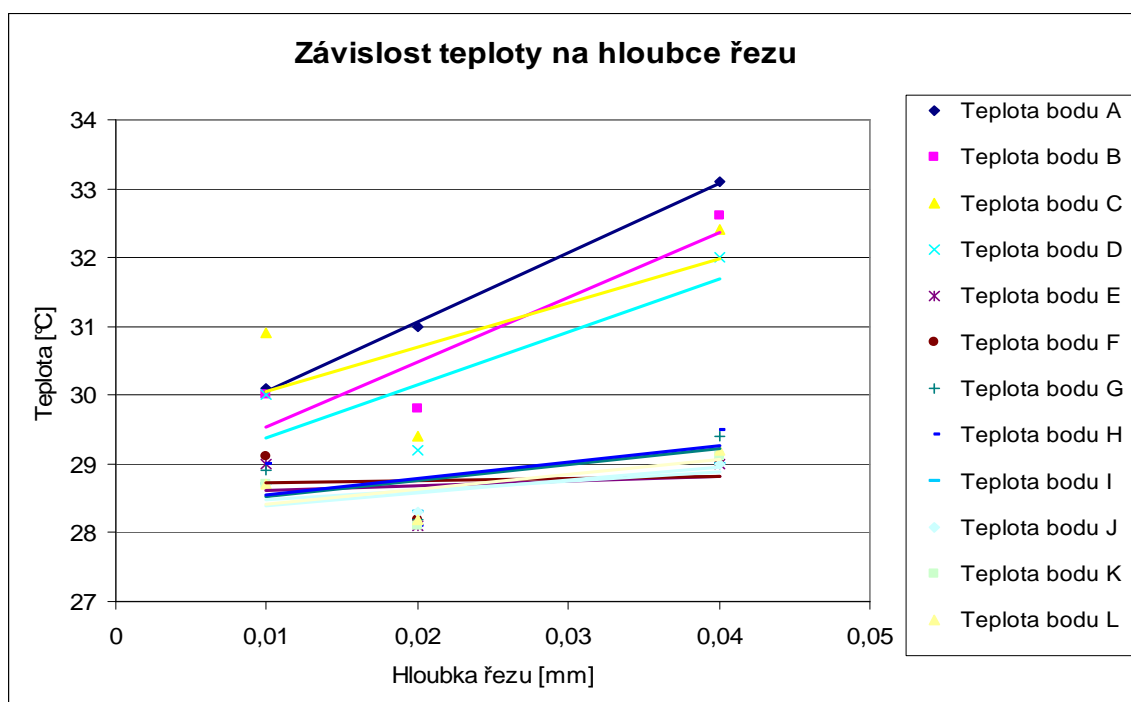
Nástroj: Brousící kotouč

Tab. 12 Naměřené hodnoty při různé hloubce řezu

a_p [mm]	0,01	0,02	0,04
t_A [°C]	30,1	31,0	33,1
t_B [°C]	30,0	29,8	32,6
t_C [°C]	30,9	29,4	32,4
t_D [°C]	30,0	29,2	32,0
t_E [°C]	29,0	28,1	29,0
t_F [°C]	29,1	28,2	29,0
t_G [°C]	28,9	28,2	29,4
t_H [°C]	29,0	28,1	29,5
t_I [°C]	28,7	28,3	29,0
t_J [°C]	28,7	28,3	29,0
t_K [°C]	28,7	28,1	29,1
t_L [°C]	28,7	28,2	29,2

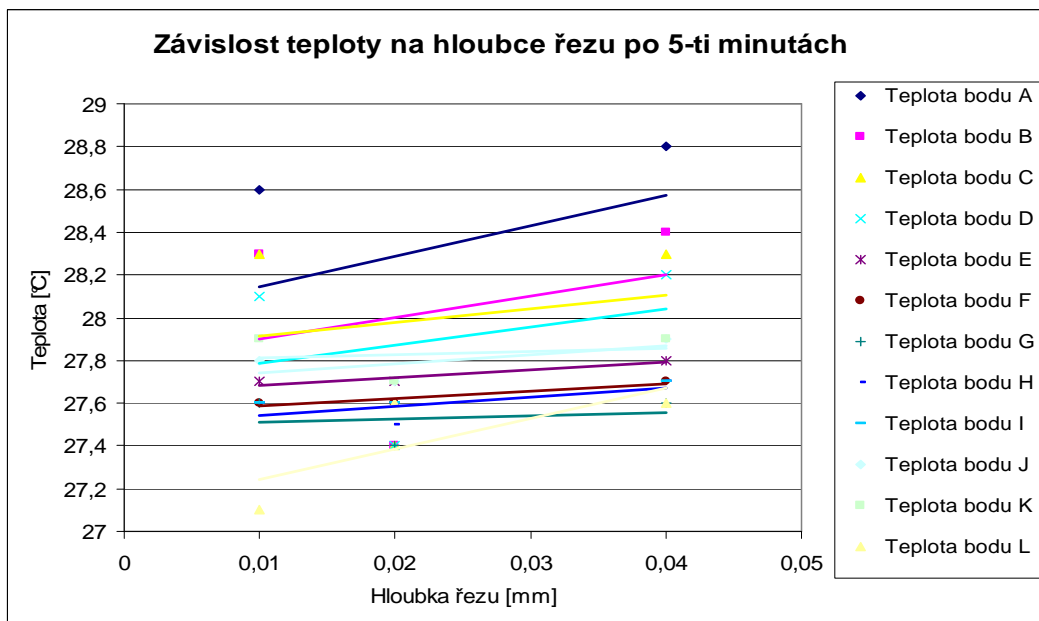
Tab. 13 Naměřené hodnoty při různé hloubce řezu po 5-ti minutách chlazení

a_p [mm]	0,01	0,02	0,04
t_A [°C]	28,6	27,6	28,8
t_B [°C]	28,3	27,4	28,4
t_C [°C]	28,3	27,4	28,3
t_D [°C]	28,1	27,4	28,2
t_E [°C]	27,7	27,7	27,8
t_F [°C]	27,6	27,6	27,7
t_G [°C]	27,6	27,4	27,6
t_H [°C]	27,6	27,5	27,7
t_I [°C]	27,6	27,6	27,7
t_J [°C]	27,8	27,7	27,9
t_K [°C]	27,9	27,7	27,9
t_L [°C]	27,1	27,6	27,6



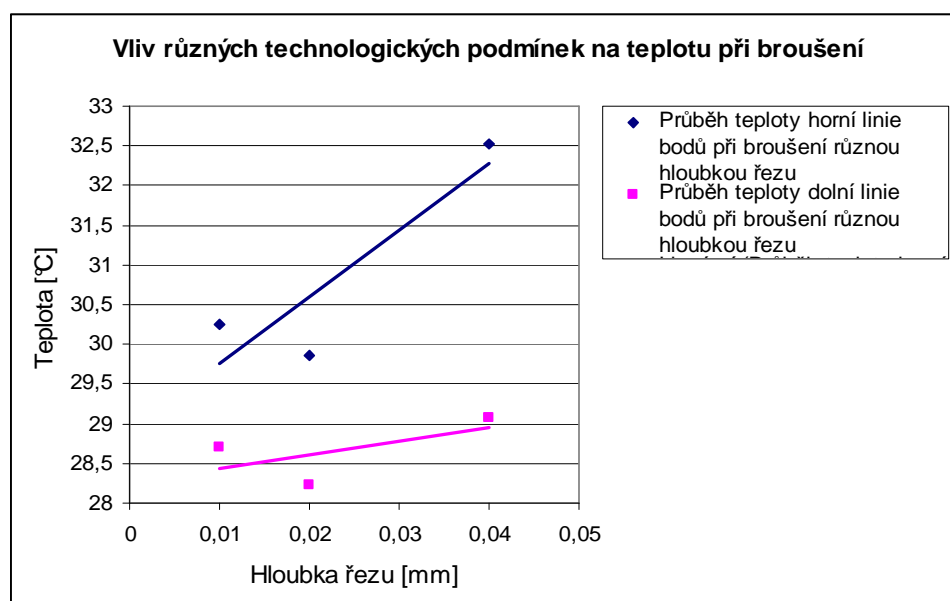
Obr. 28 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při broušení

Z grafu na obrázku (Obr. 28) vyplývá, že s vyšší odebíranou vrstvou roste teplota ve všech bodech na síti měřeného vzorku.



Obr. 29 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při broušení po 5-ti minutách ochladnutí

Z grafu na obrázku (Obr. 29) je zřejmé, že i po ochladnutí mají body, které byly broušeny při největší hloubce řezu stále nejvyšší teploty.



Obr. 30 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé hloubce řezu při broušení

Z grafu na obrázku (Obr. 30) vyplývá, že body horní linie dosahují vyšších teplot než body dolní linie. Je to způsobeno tím, že body horní linie jsou v bezprostřední kontaktu obráběné plochy s nástrojem.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zkoumání vlivu různých technologických podmínek při obrábění na teplo a teplotu, což bylo provedeno v experimentu. Teoretická část práce se zaměřuje na vznik tepla v obráběcím procesu a vysvětlení uvedených pojmů charakterizujících dané téma. Dále uvádí a popisuje různé způsoby pro měření tepla a příslušné přístroje.

V rámci praktické části byl vzorek z ocele třídy 12 050 nejprve frézován stopkovou frézou třemi různými posuvovými rychlostmi za konstantní hloubky řezu při použití tří různých hloubek řezu a konstantní posuvové rychlosti. Poté bylo provedeno měření teploty v předem zvolených bodech sítě vytvořené na obrobku. Měření bylo opakováno pro frézování válcovou frézou a broušení.

Získané výsledky byly vyneseny do grafů závislostí teploty na čase, různé hloubce řezu a různé posuvové rychlosti.

Z grafu závislosti teploty na čase vyplývá, že největší pokles teploty po skončení obráběcího procesu probíhá do čtyř minut. Dále už je pokles jen velmi nepatrný.

V grafech závislosti teploty na různých technologických podmínkách byl prokázán nárůst teploty jak s vyšší posuvovou rychlostí, tak i s větší hloubkou řezu. Objevila se zde i nepřesnost při broušení, kdy experiment vykazoval pokles teploty v závislosti na stoupající posuvové rychlosti, což mohlo být způsobeno krátkou dobou působení nástroje na obrobek.

Další odchylky měření mohly být způsobeny vlivem lidského faktoru, termokamery a také nepřesností bezdotykového měření. Z výše uvedených faktů lze konstatovat, že kontaktní měření se prokázalo být přesnější pro měření tepla vznikajícího při frézování a broušení obrobku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BUDA, Ján, BÉKÉS, Ján. *Teoretické základy obrábania kovov*. Bratislava: ALFA, 1977. 696 s. ISBN 302-05-59.
- [2] HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J. *Fyzika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM a PROMETHEUS, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 1999. 186 s. Ediční středisko ČVUT; sv. 9380. ISBN 80-01-0982-9.
- [4] KALČÍK, Josef, SÝKORA, Karel. *Technická termomechanika*. 1. vyd. Praha: Československé akademie věd, 1973. 536 s. ISBN 104-21-825.
- [5] KREIDL, Marcel. *Měření teploty : Senzory a měřící obvody*. Libor Kubica. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 260 s. Dostupný z: < <http://shop.ben.cz/cz/121194-mereni-teploty-senzory-a-merici-obvody.aspx>>. ISBN 80-7300-145-4.
- [6] KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: Cerm, 2005. 270 s. ISBN 80-241-3068-0.
- [7] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Jan Paroulek. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 160 s. Dostupný z: <<http://shop.ben.cz/121253>>. ISBN 80-7300-180-2.
- [8] MERENDA, Petr. *Bezdotykové měření povrchových teplot ve strojírenství: Bakalářská práce*. Brno: VUT Brno, FSI, 2008. 37 s.
- [9] PŘÍKRYL, Zdeněk, MUSÍLKOVÁ, Rosa. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1970. 227 s.
- [10] Raytek Corporation. *Ruční bezkontaktní teploměr : Návod k obsluze*. TSI System. [s.l.]: Paráda, 2002. 44 s.
- [11] ROGALEWICZ, Vladimír. *Pravděpodobnost a statistika pro inženýry*. Praha: ČVUT, 2000. 178 s. ISBN 80-01-01740-0.

- [12] ŠTÁVA, Radek. *Bezdotykové měření povrchových teplot při obrábění*. Brno: VUT Brno, FSI, 2008. 65 s.
- [13] VACÍK, J. *Fyzikální chemie*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1986. 297 s. ISBN 04-611-86.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[kJ]	mechanický ekvivalent tepla
a_p	[mm]	hloubka řezu
b	[m·K]	Wienova konstanta
c_N	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrné teplo materiálu nástroje
c_S	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrné teplo obráběného materiálu
c_T	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrné teplo materiálu třísek
d_n	[mm]	průměr nástroje
G_N	[kg]	váha nástroje
G_S	[kg]	váha obrobku před obrobením
G_T	[kg]	váha třísek
G_V	[kg]	váha vody v kalorimetru
H	[W·m ⁻³]	intenzita vyzařování černého tělesa
H_O	[W·m ⁻³]	spektrální hustota intenzity vyz. černého tělesa
I_e	[m ² ·kg·s ⁻³]	zářivost plošného zářiče
L	[J·min ⁻¹]	celková práce řezání
n	[-]	počet měření
Q	[W]	tepelný tok
Q_E	[J]	teplo řezného procesu
Q_N	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_O	[J]	teplo odvedené obrobkem
Q_{PR}	[J]	teplo odvedené řezným prostředím
Q_T	[J]	teplo odvedené třískou

$Q_{Tř}$	[J]	teplo v třísce
s	[m]	tloušťka stěny
S	[J·K ⁻¹]	entropie
t	[°C]	teplota
T	[K]	termodynamická teplota
T_O	[K]	teplota trojného bodu
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
X_i	[-]	měřená hodnota
x	[-]	souřadnice
y	[-]	souřadnice
z	[-]	souřadnice
ε	[-]	emisivita
θ	[°C]	konečná teplota
θ_O	[°C]	počáteční teplota
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
λ_{max}	[μm]	maximální vlnová délka
σ	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta
τ	[s]	čas
φ	[rad]	úhel
φ_A	[V]	potenciál
φ_B	[V]	potenciál

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vznik a odvod tepla	11
Obr. 2 Tepelná bilance při soustružení	12
Obr. 3 Tepelný detektor	17
Obr. 4 Seebeckův jev	18
Obr. 5 Pásmový pyrometr	20
Obr. 6 Černé těleso.	22
Obr. 7 Měření teploty termočlánkem.....	25
Obr. 8 Teplotní pole řezání	26
Obr. 9 Měřicí přístroj.	30
Obr. 10 Displej přístroje.	31
Obr. 11 Schéma měřeného vzorku.....	33
Obr. 12 Graf závislosti teploty na čase.	35
Obr. 13 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při frézování.	37
Obr. 14 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při frézování po 5-ti minutách chladnutí.	38
Obr. 15 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé hloubce řezu při frézování.	38
Obr. 16 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování.	40
Obr. 17 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování po 5-ti minutách chladnutí.	41
Obr. 18 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé posuvové rychlosti při frézování.	41
Obr. 19 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při frézování.	43
Obr. 20 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při frézování po 5-ti minutách chladnutí.	44
Obr. 21 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé hloubce řezu při frézování.	44
Obr. 22 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování.	46
Obr. 23 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při frézování po 5-ti minutách chladnutí.	47

Obr. 24 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé posuvové rychlosti při frézování.	47
Obr. 25 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při broušení.....	49
Obr. 26 Graf závislosti teploty na různé posuvové rychlosti při broušení po 5-ti minutách chladnutí.	50
Obr. 27 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé posuvové rychlosti při broušení.....	50
Obr. 28 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při broušení.	52
Obr. 29 Graf závislosti teploty na různé hloubce řezu při broušení po 5-ti minutách chladnutí.	53
Obr. 30 Graf závislosti teploty horní a dolní linie bodů na různé hloubce řezu při broušení.	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Naměřené hodnoty teplot při frézování vzorku ve 2-minutovém intervalu.....	35
Tab. 2 Naměřené hodnoty teplot při různé hloubce řezu.....	36
Tab. 3 Naměřené hodnoty teplot při různé hloubce řezu po 5-ti minutách chladnutí.....	37
Tab. 4 Naměřené hodnoty teplot při různé posuvové rychlosti.	39
Tab. 5 Naměřené hodnoty teplot při různé posuvové rychlosti po 5-ti minutách chladnutí.	40
Tab. 6 Naměřené hodnoty teplot při různé hloubce řezu.....	42
Tab. 7 Naměřené hodnoty teplot při různé hloubce řezu po 5-ti minutách chladnutí.....	43
Tab. 8 Naměřené hodnoty teplot při různé posuvové rychlosti.	45
Tab. 9 Naměřené hodnoty teplot při různé posuvové rychlosti po 5-ti minutách chladnutí.	46
Tab. 10 Naměřené hodnoty teplot při různé posuvové rychlosti.	48
Tab. 11 Naměřené hodnoty teplot při různé posuvové rychlosti po 5-ti minutách chladnutí.	49
Tab. 12 Naměřené hodnoty teplot při různé hloubce řezu.....	51
Tab. 13 Naměřené hodnoty teplot při různé hloubce řezu po 5-ti minutách chladnutí.....	52