

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

**Vliv řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla na povrchu stroje
v pracovním prostoru**

2015

Kamil Skála



Vysoká škola: ČVUT v Praze
Fakulta: strojní
Ústav: Výrobní stroje a zařízení
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Kamil Skála**
Program: Strojírenství
Obor: Konstruování podporované počítačem

Téma práce: **Vliv řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla v pracovním prostoru**

Stručná osnova zadání:

Tématem bakalářské práce je posouzení vlivu řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla v pracovním prostoru stroje na základě **experimentálního výzkumu proudění**.

1. V rámci práce student provede rešerši na témata, která jsou ve vazbě na jeho bakalářskou práci. Zejména se jedná o metody stanovení součinitele přestupu tepla, rešerši metod měření rychlosti proudění vzduchu (zejména nízkých rychlostí) a posouzení vlivu sdílení tepla konvekcí na teplotní deformace obráběcích strojů.
2. Vlastní řešení problému se bude skládat z výpočtu součinitelů přestupu tepla v pracovním prostoru stroje na základě kritériálních rovnic. Dále pak v návrhu experimentů pro posouzení vlivu řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla v pracovním prostoru stroje, včetně výběru vhodných experimentálních metod.
3. Provedení sady technologických zkoušek na frézovacím stroji se senzory pro měření rychlosti proudění, umístěných uvnitř pracovního prostoru. Využití vizualizačních metod proudění vzduchu uvnitř pracovního prostoru stroje. Cílem experimentů by mělo být posouzení významu řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla v pracovním prostoru stroje.
4. **Vyhodnocení experimentů** - zpracování experimentálních dat v průběhu sady technologických zkoušek a posouzení vlivu řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla v pracovním prostoru.

Rozsah grafické části práce: Grafy s naměřenými hodnotami teplot, rychlostí proudění a součinitelů přestupu tepla v čase.

Rozsah textové části práce: 40 – 60 stran

Doporučená literatura: NOŽIČKA, Jiří. *Sdílení tepla*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1997, 238 s. ISBN 80-01-01599-8.

INCROPERA, Frank P a David P DEWITT. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5th ed. New York: J. Wiley, c2002, xix, 981 p. ISBN 0471386502.

ComfortSense, Product Information, Dantec dynamic, Denmark, 2013.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Otakar Horejš, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Peter Kohút, Ph.D.

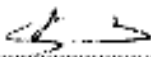
Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

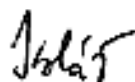
Neodevzdá-li student bakalářskou práci v určeném termínu, musí tuto skutečnost předem písemně zdůvodnit a omluva být děkanem uznána. Děkan studentovi stanoví náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, musí si student zapsat bakalářskou práci podruhé.

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.

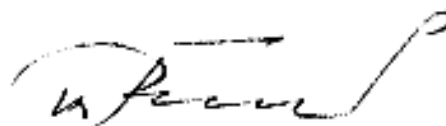
Zadání bakalářské práce převzal dne:


.....
student





Ing. Petr Kolář, Ph.D.
vedoucí ústavu



Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 9. 4. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 15. 6. 2015

.....

podpis

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Otakaru Horejšovi, Ph.D., a konzultantovi mé bakalářské práce, panu Ing. Peteru Kohútovi, Ph.D., za rady, trpělivost a hlavně za čas, který mi věnovali.

Anotace

Jméno autora:	Kamil Skála
Název bakalářské práce:	Vliv řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla na povrchu stroje v pracovním prostoru
Číslo bakalářské práce:	BP 0186
Rozsah bakalářské práce:	55 stránek
Školní rok vyhotovení:	2014/2015
Ústav:	Ú-12135 Ústav výrobních strojů a zařízení FS ČVUT v Praze
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Otakar Horejš Ph.D.
Konzultant:	Ing. Peter Kohút Ph.D.
Zadavatel tématu:	ČVUT Fakulta strojní
Klíčová slova:	Sdílení tepla, konvekce, součinitel přestupu tepla, anemometrie, vizualizační metody, obráběcí stroj.
Anotace:	Předložená bakalářská práce se zabývá vlivem řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla v pracovním prostoru obráběcího stroje.

Annotation

Author:	Kamil Skála
Title of Bachelor's dissertation:	Influence of cutting process on the change of the heat transfer coefficient on the surface of the machine tool in the working space
Number of title:	BP 0186
Extent:	55 pages
Academic year:	2014/2015
Department:	Ú-12135 Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Consultant	Ing. Peter Kohút, Ph.D.
Sibmitter of theme:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Keywords:	heat, convection, heat transfer coefficient, airflow, visualization methods, machine tool.
Annotation:	This bachelor thesis deals with the influence of the cutting process to change the heat transfer coefficient in the workspace.

Obsah

Anotace	6
Annotation	7
Použité veličiny	10
1. Úvod	12
2. Cíl práce	13
3. Rešerše problematiky	14
3.1. Sdílení tepla	14
3.1.1. Mechanismy sdílení tepla	14
3.2. Měření rychlosti a vizualizace proudění	17
3. 2. 1. Termoanemometry	18
3. 2. 2. Laserové anemometry	19
3. 2. 3. Vizualizační metody	20
3.3. Sdílení tepla v OS	20
3. 4. Součinitel přestupu tepla (SPT)	21
3. 4. 1. Kteriální rovnice	24
4. Měření citlivosti anemometru 54T35	25
5. Měření na obráběcím stroji	29
5.1 Popis obráběcího stroje	29
5.2 Výsledky technologické zkoušky v režimu 1,5kW	33
5.3 Vizualizace proudění při testech na stroji	37
6. Výpočet SPT	39
6.1. Vertikální stěna (stojan)	42
6.2. Horizontální stěna (vřeteník)	46
7. Závěr	50
Seznam obrázků	51
Seznam tabulek	52
Seznam příloh	53

Seznam použitého softwaru	53
Seznam použité literatury	54

Použité veličiny

řecké symboly

zn.	Jednotka	název (popis)
α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla konvekcí
β	[K ⁻¹]	součinitel teplotní roztažnost
γ	[K ⁻¹]	součinitel teplotní objemové roztažnosti
ε	[1]	emisivita
η	[Pa.s]	dynamická viskozita
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná vodivost
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota látky
T_{char}	[s]	čas od zahájení procesu sdílení tepla prouděním
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefanova-Boltzmannova konstanta

latinské symboly

zn.	Jednotka	Veličina
a	[m ² .s ⁻¹]	teplotní vodivost
A	[m ²]	plocha
A_p	[mm]	tloušťka třísky
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrný tepelná kapacita za konstantního tlaku
C_{char}	[m.s ⁻¹]	charakteristická rychlost
∇T	[K.m ⁻¹]	teplotní gradient
F_z	[mm]	posuv na zub
g	[m.s ⁻²]	gravitační zrychlení
L_{char}	[m]	charakteristický rozměr
m	[kg]	hmotnost
n	[1/min]	otáčky
$\emptyset n$	[mm]	průměr vřetene
P	[W]	výkon
q	[W.m ⁻²]	hustota tepelného toku
Q	[W]	tepelný tok
t	[s]	čas

T_w	[K]	teplota desky
T_o	[K]	teplota vzduchu
ΔT	[K]	rozdíl teplot
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
z	[-]	počet zubů

podobnostní kritéria

zn.	Jednotka	název (popis)
Bi	[1]	Biotovo podobnostní číslo
Fo	[1]	Fourierovo podobnostní číslo
Gr	[1]	Grashofovo podobnostní číslo
Nu	[1]	Nusseltovo podobnostní číslo
Pr	[1]	Prandtlovo podobnostní číslo
Re	[1]	Reynoldsovo podobnostní číslo
Ri	[1]	Richardsonovo podobnostní číslo
Pe	[1]	Peclétovo podobnostní číslo

1. Úvod

V dnešní době jsou kladeny čím dál tím vyšší nároky na obráběcí stroje (dále jen OS). Mezi hlavní požadavky patří vyšší řezné a posuvné rychlosti, vyšší otáčky vřeten, využití nových technologií pro zrychlení výroby. Avšak z pohledu uživatele se jedná především o přesnost OS, resp. přesnost obrobků na strojích vyráběných.

Výrobní přesnost stroje je ovlivňována faktory působícími mimo stroj nebo faktory souvisejícími se samotnou pracovní přesností OS. Vlivy mimo stroj míníme okolní prostředí, obsluhu stroje, výrobní postup a vlastnosti obrobku. Vlivy související s pracovní přesností jsou ovlivňovány statickým chováním, geometrickou přesností, dynamickým chováním, odměřováním a zejména teplotním chováním OS. Problematika teplotního chování patří mezi kritické vlastnosti a tvoří 40-70% z celkové výrobní odchylky způsobené všemi druhy nepřesností, proto je potřeba se problematikou teplotního chování dále zabývat [1].

Teplotní deformace vznikají ve složitém procesu činnosti OS díky působení změn tepla. Deformace jsou významně ovlivněny zdroji a propady tepla. Ty můžeme dělit na vnitřní a vnější (zdroje a propady tepla). Vnitřní zdroje (propady) jsou přímo spojené se samotným chodem stroje (např. vliv tepla od pohonných jednotek) a vnější zdroje (propady) tepla jsou závislé na vlivech okolního prostředí (např. sluneční záření, obsluha stroje).

Dopady vnějších a vnitřních zdrojů (resp. propadů) tepla na teplotní deformace stroje je nutné eliminovat, to je možné provést různými způsoby (např. konstrukčními úpravami, chlazením, izolací zdrojů tepla či softwarové teplotní kompenzace).

Tyto způsoby bývají většinou nedostačující, proto se volí přímá, nebo nepřímá kompenzace teplotních chyb, kde lze na základě měření a experimentů predikovat teplotní pole a chování OS.

2. Cíl práce

Cílem této práce je určit, jaký vliv má řezný proces na změnu součinitele přestupu tepla na povrchu obráběcího stroje v pracovním prostoru. Tento vliv bude posouzen na základě experimentálního výzkumu. K tomuto účelu bude připraveno experimentální zařízení v pracovním prostoru OS, které se skládá ze sondy pro měření rychlosti proudění vzduchu a z teplotních čidel. To vše je zapojeno do měřicí ústředny a vyhodnocováno v počítači.

V této bakalářské práci bude zapotřebí zpracovat nashromážděná data z teplotních čidel připevněných na povrchu obráběcího stroje v průběhu sady technologických zkoušek a následně dopočítat pomocí kritériálních rovnic součinitel přestupu tepla.

Všechny důležité procesy ovlivňující pracovní prostor OS a jednotlivé komponenty experimentu budou popsány v teoretické části.

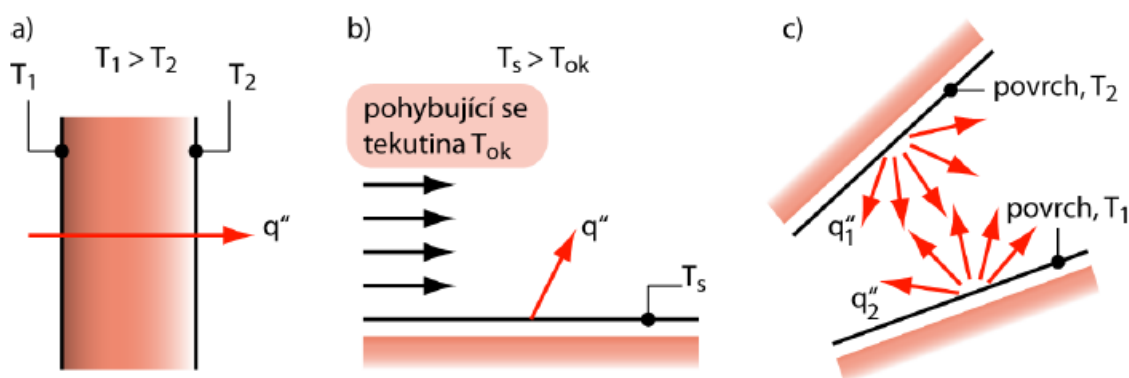
3. Rešerše problematiky

3.1. Sdílení tepla

Sdílení tepla nebo také přenos tepla je proces, při kterém dochází k transportu tepelné energie Q [J] v důsledku odlišných teplot soustavy T_s [K] a okolí T_{ok} [K] v nehomogenním teplotním poli. Prakticky se teplo šíří od místa s vyšší teplotou k místu s teplotou nižší.

3.1.1. Mechanismy sdílení tepla

Z fyzikální podstaty dějů rozlišujeme různé mechanismy přenosu tepla. V zásadě existují tři druhy známých mechanismů přenosu tepla, vedením v látkách neboli kondukcí, prouděním látek čili konvekcí a sáláním, též radiací [13].



Obr. 1: Přestup tepla a) kondukcí b) konvekcí c) radiací [1]

Sdílení tepla vedením (kondukcí)

Jde o nejvýraznější mechanismus sdílení tepla v OS. Vedení tepla je šíření mechanických forem energie mikroskopického pohybu částic hmoty (atomů, molekul) v prostředí s teplotním gradientem. Uplatňuje se zejména v pevných tělesech, kde se např. teplo šíří skrz konstrukci stroje, ale také probíhá v tekutinách (kapalinách a plynech). Kondukce je dána Fourierovým zákonem, který tvrdí: plošná hustota tepelného toku q je úměrná teplotnímu gradientu ∇T a směřuje proti němu,

$$q_k = -\lambda \cdot \nabla T = \frac{dq}{dt} \quad (3.1)$$

kde λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti (materiálová vlastnost tepelně vodivého prostředí), závisí především na teplotě [2], [3]

Sdílení tepla prouděním (konvekci)

Dalším mechanismem sdílení tepla v OS je konvekce. Tento jev byl z počátku u OS zanedbáván [4]. Tepelný tok se sdílí makroskopickým pohybem tekutiny - teplejší částice, které přijaly od tepelných zdrojů teplo, přecházejí do míst s nižší teplotou a naopak, přičemž nevratně stoupá vnitřní energie. Tento projev mechanismu sdílení tepla lze sledovat nejčastěji mezi pevnou stěnou (např. stroj) a okolním prostředím (např. vzduch). Ke sdílení tepla prouděním může docházet samovolně nebo uměle, záleží na charakteru vyvolaného prostředí v návaznosti na převládající silové poměry v daném prostředí. Lze Obr. 3konvekci nucenou, volnou (přirozenou) nebo smíšenou.

Faktorem, podle něhož lze odlišit konvektivní sdílení tepla, bývá poměr Grashofova a Reynoldsova čísla:

$$\frac{Gr}{Re^2} \ll 1 \dots \text{nucená konvekce (převládá vliv setrvačných sil)} \quad (3.2)$$

$$\frac{Gr}{Re^2} \gg 1 \dots \text{volná konvekce (převládá vliv vztlačových sil)} \quad (3.3)$$

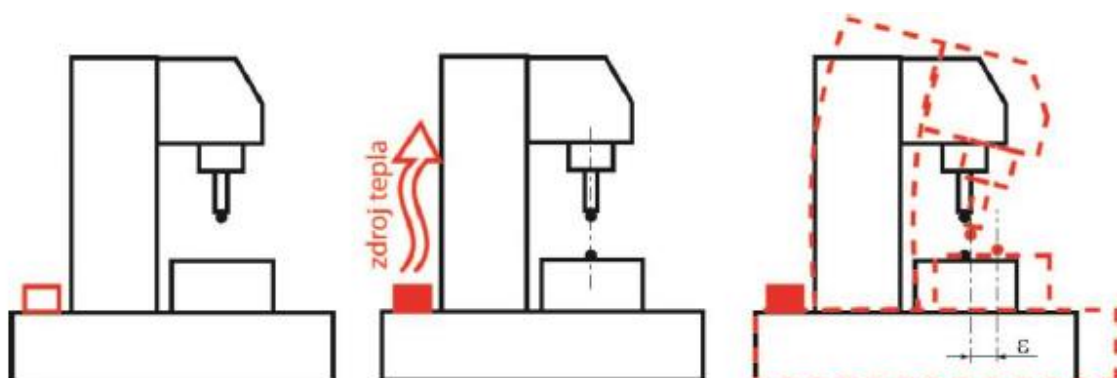
$$1 \ll \frac{Gr}{Re^2} \ll 1 \dots \text{smíšená k. (vztlak. a setr. síly nelze zanedbat)} \quad (3.4)$$

kde Gr Grashofovo a Re Reynoldsovo je podobnostní kritérium a uvedený poměr je znám jako Richardsovo kritérium, udávající poměr potenciální a kinetické energie [4].

Číselné hodnoty uvedené v nerovnostech (3.2) - (3.4) bývají uváděny různé, např. $(0,1 < Ri < 10)$ pro smíšenou konvekci [4].

Při nucené konvekci není pohyb tekutiny vyvolán samovolně, ale jedná se o proudění média vyvolané vnější silou (např. čerpadlem, ventilátorem) nebo o proudění vyvolané přírodními vnějšími vlivy (např. vítr). Tento druh konvekce lze charakterizovat jako přestup tepla o větší intenzitě. Obvykle je určován pomocí Reynoldsova kritéria [13].

Přirozená konvekce v okolí OS je způsobována pouze rozdíly v teplotě (díky měnící se hustotě – teplejší částice s nižší hustotou se pod vlivem Archimédova vztlaku dostávají do vyšších poloh nad tekutinu s vyšší hustotou) [2] [4]. Např. při běžném provozu se přirozená konvekce projeví působením teploty vedlejšího stroje, nebo samotné teplo ovlivňující stroj vychází od obsluhy zařízení apod. (viz Obr. 2). Pro charakteristiku přirozené konvekce musíme určit poměr vztlakových sil a vazkých sil, které charakterizují odpor tekutiny ke změně pohybového stavu. Tento poměr je definován v již zmíněném Grashofově podobnostním kritériu.



Obr. 2: Přenos tepla konvekcí strukturou OS [1]

Typickým příkladem konvekce je přestup tepla mezi pevnou deskou zahřátou na teplotu T_s a obtékající tekutinou o teplotě T_o . Předpokladem tohoto procesu je, že $T_s > T_o$ (viz Obr. 1). Plošná hustota tepelného toku q , které přestupuje ze stěny do tekutiny, je dána tzv. Newtonovým ochlazovacím zákonem:

$$q_c = \alpha_c (T_s - T_o) \quad (3.5)$$

kde α_c je součinitel přestupu tepla, který je charakterizující veličina při přestupu tepla konvekcí.

Pokud nelze zanedbat vztlakové ani setrvačné síly, jedná se o smíšenou konvekci. Interval určující tento případ je popsán v rovnici 3.6,

$$Nu^n = Nu_f^n \pm Nu_N^n \quad (3.6)$$

kde jednotlivé členy jsou určeny za předpokladu čisté nucené (Nu_f) a přirozené (Nu_n) konvekce, koeficient $n = 3$ (případně $n = 4$ nebo $n = 7/2$ pro kolmou orientaci složek konvekce na horizontální desce) [4]. V případě smíšené konvekce nastává mnoho jevů, které komplikují predikci sdílení tepla. Vliv vztlakových sil silně ovlivňuje laminární nucenou konvekci, zatímco v případě turbulentního nuceného proudění bývá obvykle nevýznamný [4].

Sdílení tepla zářením (radiací)

Tepelné záření se odlišuje od kondukce a konvekce možností přenosu v jakémkoliv prostoru, tedy i tam, kde je vakuum. Energie tepelného záření je přenášena elektromagnetickým zářením, které vyzařuje každé těleso. Část energie elektromagnetických vln, které dopadají na hmotné těleso, se přemění na vnitřní energii zasaženého objektu a část se odrazí. Plošná hustota tepelného toku se následně získá pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona [3],

$$q_R = \sigma \varepsilon (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.7)$$

kde T_1 [K] je teplota ozařovaného tělesa, T_2 [K] je teplota zářiče a σ je Stefanova–Boltzmannova konstanta, jejíž hodnota je $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ [W.m⁻².K⁻⁴]. Emisivita ε rozhoduje o tom, do jaké míry bude elektromagnetické záření pohlceno či odraženo, hodnota se pohybuje v intervalu 0 až 1 (pokud $\varepsilon = 0$, všechny elektromagnetické vlny jsou odraženy, pokud $\varepsilon = 1$, jedná se o tzv. dokonale černé těleso, které dokáže pohlcovat i vyzařovat celé spektrum vlnových délek [3]).

3.2. Měření rychlosti a vizualizace proudění

Jak již bylo výše zmíněno (kap. 3.1), na OS působí různé druhy mechanismy sdílení tepla. Téma této bakalářské práce je zaměřeno na konvektivní přenos tepla. K tomuto způsobu sdílení tepla, jak již bylo řečeno, dochází např. mezi

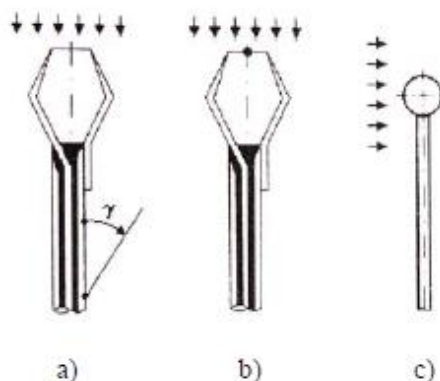
pevnou stěnou a okolím (vzduch). Jedním z klíčových parametrů tohoto typu sdílení tepla je proudění obtékající tekutiny v okolí OS. Lze jej měřit především různými druhy anemometrických metod.

Anemometrickými metodami se rozumí metody měření parametrů proudění tekutin (např. rychlosti, tlaku, směru) za použití rozličných měřicích přístrojů a zařízení využívající nejrůznější fyzikální principy. Můžeme sem zahrnout například mechanické anemometry, akustické anemometry, termoanemometrické sondy (termoanemometry), nebo laserovou anemometrii (Particle Image Velocimetry, Laser Doppler Anemometry).

Nevhodnými anemometrickými metodami pro měření v okolí OS jsou např. mechanické anemometry, známé např. z meteorologických stanic nebo akustické anemometry, které zaznamenávají vyšší hodnoty rychlosti proudění. Nevhodnými jsou, protože OS jsou ovlivňovány nízkými rychlostmi, které vznikají buď řezným procesem, nebo větráním v jeho okolí a dosahují maximálně hodnot v jednotkách metrů za sekundu.

3. 2. 1. Termoanemometry

Termoanemometry využívají pro měření rychlosti měření intenzity ochlazování různých obtékaných těles. V konstrukci obtékajících tělísek se využívá žhaveného drátku z platiny, niklu nebo wolframu o průměrech 0,01 až 0,1 mm i tenčích a délky 1-10 mm s časovou konstantou 0,1 s, dvou různoběžných drátků, těles z termistoru, žhavené fólie nebo žhavené kuličky. Základní typy těles jsou zobrazeny na obrázku (viz Obr. 3) [5].



Obr. 3: Typy těles termoanemometrů: a) žhavený drátek, b) termistorové tělísko, c) žhavená kulička [7]

3. 2. 2. Laserové anemometry

Laserový anemometr pracuje jako tzv. kontaktní snímač rychlosti proudění, kde vkládáme měřicí přístroj do toku proudění. Laserové anemometry fungují jako bezkontaktní snímače. K zjištění rychlosti proudění používáme různé druhy bezkontaktních metod (LDA, PIV), při nichž je omezena přítomnost cizích těles v cestě proudění a je potřeba zamezení co největší nepřesnosti při měření. Tyto metody jsou založeny na technologii laseru jako zdroji monochromatického světla, který slouží k pozorování dané oblasti. K pozorování používáme optické zařízení s vyhodnocovacím softwarem.

Základní metody laserové anemometrie jsou:

- metoda LDA (Laser Doppler Anemometry) funguje na principu Dopplerova jevu. Laserový svazek procházející tekutinou je na částicích v tekutině rozptylován a rozptýlené světlo, které nese informaci o rychlosti částic, se zaznamenává vhodným detektorem. Nezbytnou podmínkou pro aplikaci laserového anemometru je tedy přítomnost částic určité velikosti v proudu tekutiny a průhlednost této tekutiny. Navíc musí být místo měření opticky přístupné. Částice o velikosti podstatně větší než je vlnová délka použitého světla se mohou do tekutiny i uměle zavádět, ale je nutné, aby měly velmi malou pádovou rychlost a aby byly schopné kopírovat trajektorie proudu tekutiny [6].
- metoda PIV (Particle Image Velocimetry) využívá obdobně jako metoda LDA laser jako zdroj světla. V PIV je ovšem účelem laseru pouze osvětlit zkoumanou plochu (laserový paprsek je opticky roztažen na plochu). I v této metodě je proud tekutiny nadopován trasovacími částicemi, které nám ulehčují sledování jejího pohybu. Nakonec je osvětlený prostor minimálně dvakrát rychle za sebou nasnímán kamerou umístěnou kolmo na osvětlenou plochu. Jedná se většinou o rychlokamery s vysokou vzorkovací frekvencí. Protože je znám čas mezi snímky, je pak již jen záležitostí softwaru, aby porovnal posunutí vyfotografovaných částic na snímku a určil tak směr a rychlost jejich pohybu [7].

3. 2. 3. Vizualizační metody

Dalšími metodami, kterými se může měřit rychlost proudění kapaliny, jsou tzv. vizualizační metody. Tyto metody jsou transparentní a umožňují snadné pozorování směru proudící kapaliny. Mezi tyto metody řadíme také již zmíněné laserové anemometry, ale patří sem ještě např. vizualizace směru proudění pomocí barviva, vizualizace proudění povrchu nebo vizualizace pomocí generátoru heliových bublin (viz Obr. 4).

Vizualizace pomocí generátoru heliových bublin je vhodný nástroj pro měření směru proudění kapaliny v okolí OS. Do přístroje je přiveden vzduch, helium a tekutina (BFS – bubble film solution). Pomocí těchto tří složek se vytvářejí v nádobách bubliny, které následně vylétávají ven z nádob do okolí. Bubliny můžeme zachytit fotoaparátem, pomocí kterého pořídíme dva či více snímků, z kterých můžeme vypočítat rychlost proudění a určit jeho směr.



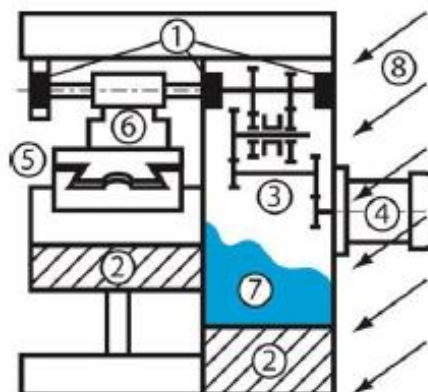
Obr. 4: Mobilní generátor heliových bublin [10]

3.3. Sdílení tepla v OS

Složitý proces sdílení tepla v OS je ovlivňován materiálovými vlastnostmi, geometrií stroje, vnitřními nebo vnějšími zdroji, resp. propady tepla. Generované teplo se dále šíří do struktur OS. Stroj se potom deformuje, čímž

negativně ovlivňuje přesnost obrábění. Zdroje tepla (obr. 4), lze rozdělit do dvou skupin [1].

- vnitřní zdroje – příkladem zdrojů tepla jsou ložiska, lineární vedení, kuličkové šrouby a převodovky. Zdrojem tepla může být také samotný řezný proces, nebo v opačném případě chladicí kapalina.
- vnější zdroje – těmi mohou být sousední stroje, topná tělesa nebo slunce. Jedním z faktorů ovlivňujících tento druh zdrojů tepla je okolní vzduch, který závisí na rozdílu teplot mezi strojem a okolím, tento teplotní rozdíl také ovlivňuje hodnotu součinitele přestupu tepla.



Hlavní zdroje tepla

- 1 Ložiska
- 2 Ozubení a řemenice
- 3 Pohony a spojky
- 4 Čerpadla a motory
- 5 Vedení
- 6 Řezný proces a třísky
- 7 Chladivo
- 8 Vnější zdroje tepla

Obr. 5: Zdroje tepla na OS [1]

Tato bakalářská práce je zaměřená především na konvektivní přenos tepla na OS, proto se bude následující kapitola zabývat stanovením součinitele přestupu tepla (dále jen SPT). Jak již bylo řešeno, SPT je klíčový pro určení konvektivního sdílení tepla dle Newtonova ochlazovacího zákona viz (3.5).

3. 4. Součinitel přestupu tepla (SPT)

Velkým problémem nejen v nauce o tepelné konvekci, ale např. také teplotní MKP modelování celých konstrukcí, je součinitel přestupu tepla, který je definován v Newtonově ochlazovacím zákoně (viz vzorec 3.5). Ten závisí na všech proměnných popisujících proudění tekutiny v okolí stěny. Některé z proměnných jsou uvedeny ve vzorci 3.8. Tyto proměnné jsou dále uvedeny v bezrozměrných číslech, kde jsou popsány.

$$\alpha = \alpha (L_{char}, \rho_{tek}, \eta, \lambda_{tek}, c_{char}, c_p, T_{tek}, dT, \dots) \quad (3.8)$$

Z množství neznámých je patrné, že součinitel přestupu tepla je složité určit. Pro teoretické řešení SPT je složité vytvořit nějakou všeobecnou rovnici na všechny typy případů, proto je potřeba se omezit jen na některé speciální případy, v nichž některé proměnné odpadnou, a na postupy přibližné, v nichž lze vliv méně významných proměnných zanedbat. Redukce soustavy proměnných dosáhneme pomocí teorie fyzikální podobnosti a převodu do bezrozměrných forem díky podobnostním kritériím. Tímto způsobem dokážeme získat mnoho tzv. kritériálních rovnic, které specifikují vždy konkrétní situaci. Vzniká tak menší počet bezrozměrných parametrů, tzv. podobnostních čísel.

Nusseltovo číslo:

$$Nu = \frac{\alpha l_{char}}{\lambda_{tek}} \quad (3.9)$$

kde L_{char} je charakteristický délkový rozměr (např. ekvivalentní průměr trubky) a λ_{tek} tepelná vodivost tekutiny. Tento parametr zajišťuje míru přenosu tepla na povrch pevného materiálu (nástroj obráběcího stroje), je to poměr mezi konvekcí a kondukcí.

Prandtlovo číslo:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3.10)$$

kde ν značí kinematickou viskozitu, a teplotní vodivost. Toto kritérium zahrnuje transportní vlastnosti tekutiny.

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{c_{char} l_{char}}{\nu} \quad (3.11)$$

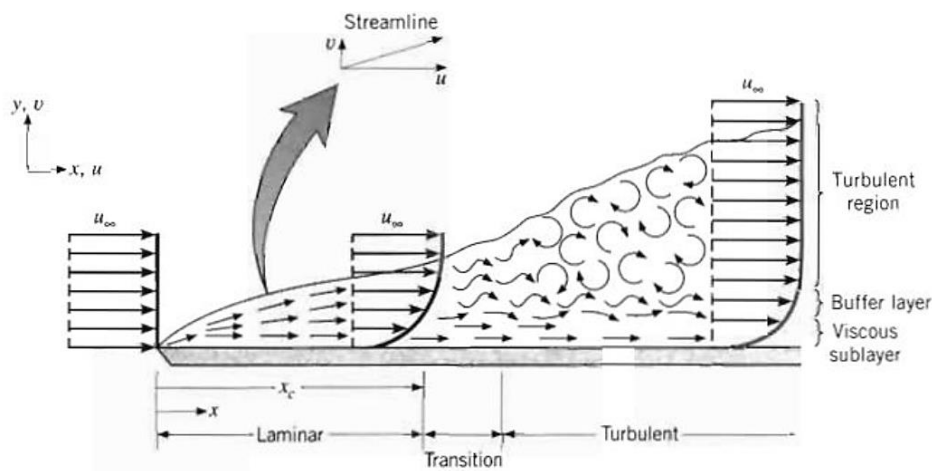
kde c_{char} znamená charakteristickou rychlost. Podle této hodnoty se zjišťuje, zda jde o proudění turbulentní, nebo laminární. Rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním je znázorněn na Obr. 6. Veličina ν vyjadřuje rychlost

proudění. Laminární proudění je spojitě a nedochází v něm k mísení tekutiny, charakteristické pro pomalejší proudění tekutiny. U turbulentního proudění je tomu naopak – dochází k mísení tekutiny, má náhodný charakter a vykazuje vyšší rychlosti. Přechod mezi turbulentním a laminárním prouděním se určuje pomocí kritické hodnoty Reynoldsova čísla Re_k : [8]

Laminární proudění: $Re < Re_k$

Turbulentní proudění: $Re > Re_k$

Reynoldsovo číslo se uplatňuje ve vynucené konvekci vazkých tekutin [9].



Obr. 6: Laminární a turbulentní proudění [15]

Grashofovo číslo:

$$Gr = \frac{g \beta T_{char} l_{char}^3}{\nu^2} \quad (3.12)$$

kde γ je součinitel teplotního objemu roztažnosti, g tíhové zrychlení a ΔT rozdíl teploty tekutiny a teploty pevné látky. Užívá se k vyjádření intenzity cirkulace vlivem rozdílu teplot při volné konvekci.

Fourierovo číslo:

$$Fo = \frac{a \tau_{char}}{l_{char}^2} \quad (3.13)$$

kde τ_{char} vyjadřuje čas od zahájení procesu sdílení tepla prouděním. Používá se při popisu neustálené konvekce.

Biotovo číslo:

$$Bi = \frac{\alpha l_{char}}{\lambda_s} \quad (3.14)$$

Toto alternativní podobnostní číslo se užívá v případě nestacionárního vedení tepla.

Pécletovo číslo:

$$Pe = Pr \cdot Re \quad (3.15)$$

Alternativně se používá v úlohách při vynucené konvekci.

3. 4. 1. Kriteriální rovnice

Teorie podobnosti umožňuje nahradit množství závislostí na jednodušší rovnici, zvanou kriteriální rovnice, kterou je nutno stanovit empiricky na základě experimentů. Kriteriální rovnice je obecně vyjádřena jako [12]:

$$Nu = Nu(Fo, Re, Gr, Pr, Ma, Po) \quad (3.16)$$

I tato zjednodušená kriteriální rovnice je příliš složitá, z tohoto důvodu redukuje kriteriální rovnici (3.16) pro konkrétní speciální případy, kdy můžeme zanedbat vliv dalších podobnostních čísel. Např. při stacionární tepelné konvekci odpadá vliv Fourierova čísla, u volné konvekce lze zanedbat vliv Reynoldsova čísla, u vynucené konvekce vliv Grashofova čísla atd. Tím dostaneme kriteriální rovnice dvou speciálních případů

Stacionární vynucená konvekce: $Nu=Nu(Pr,Re)$

Stacionární přirozená konvekce: $Nu=Nu(Pr,Gr)$

Informativní přehled hodnot SPT je uveden v Tab. 1. (převzato z [12]).

Tab. 1: Informativní hodnota součinitele přestupu tepla [13]

Případ tepelné konvekce	α (W. m ⁻² . K ⁻¹)
Ohřívání a ochlazování vzduchu	1,0 - 50
Ohřívání, ochlazování přehřáté vodní páry	25 - 120
Ohřívání a ochlazování olejů	50 - 2 000
Ohřívání a ochlazování vody	250 - 12 000
Voda při teplotě varu	600 - 50 000
Odpařování vody	1 400 - 2 000
Blánová kondenzace vodní páry	5 000 - 20 000
Kapková kondenzace vodní páry	35 000 - 140 000

4. Měření citlivosti anemometru 54T35

Pro posouzení vlivu řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla na povrchu obráběcího stroje v pracovním prostoru bylo nutné změřit rychlost proudění tekutiny okolního prostředí. V případě OS je okolní prostředí proudící tekutiny vzduch. Bylo potřeba experimentálně změřit rychlost proudění dané tekutiny a případně její směr. Při řezném procesu vznikají nízké rychlosti proudění. Tyto rychlosti dokážeme změřit např. pomocí termoanemometrických sond. Pro měření rychlosti proudění byla vybrána právě termoanemometrická sonda od firmy Dantec 54T35. U zvolené termoanemometrické sondy nebylo známo, zda směr proudící tekutiny má vliv na přesnost měření, a proto bylo nutné změřit citlivost této sondy.

Technické parametry sondy:

Tab. 2: Technické parametry sondy 54T33 - [6]

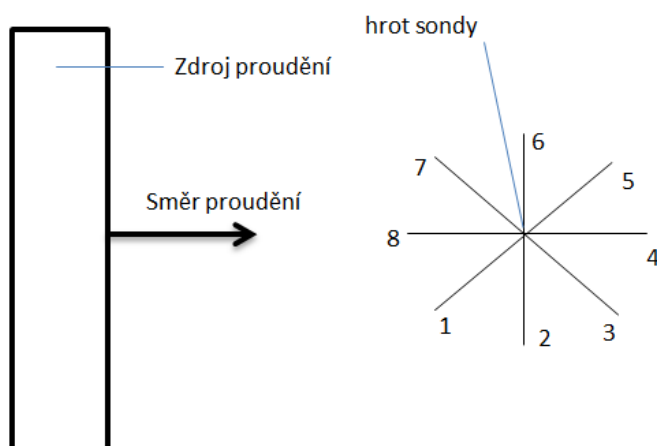
Rozsah rychlosti	0,1 – 30 m/s
Přesnost	0,2 – 20 m/s:± 2; 20-30 m/s ± 5
Časová konstanta rychlosti	Obvykle 2-3 s.
Časová konstanta teploty	Obvykle 4-5 s.
Teplotní kompenzace chyby na rychlosti, v teplotním rozsahu 0°C to 45°C	méně než 0.2% pro 1°C změny teploty vzduchu
Teplotní rozsah	-20°C to +80°C

Schéma a popis měření:

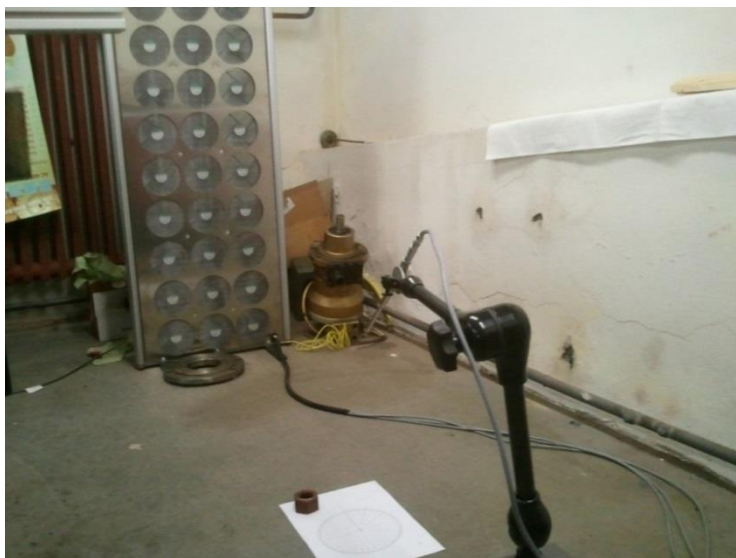
Sonda byla dle schématu (viz Obr. 7) mechanicky natáčena na směr proudící kapaliny, která vycházela ze zabudovaných větráků v kovovém panelu, která byla ovládaná pomocí zdroje proudu a napětí. Sondou bylo posouváno po 4 minutách dle zvolených úhlů (viz Tab. 3) vůči směru proudění. Získaná data byla vyhodnocována pomocí výpočetní techniky v programu LabVIEW.

Tab. 3: Tabulka polohy sondy

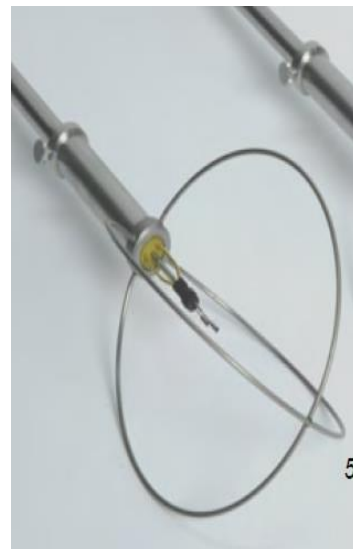
1	2	3	4	5	6	7	8
45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°



Obr. 7: Schéma zapojení měření citlivosti anemometru

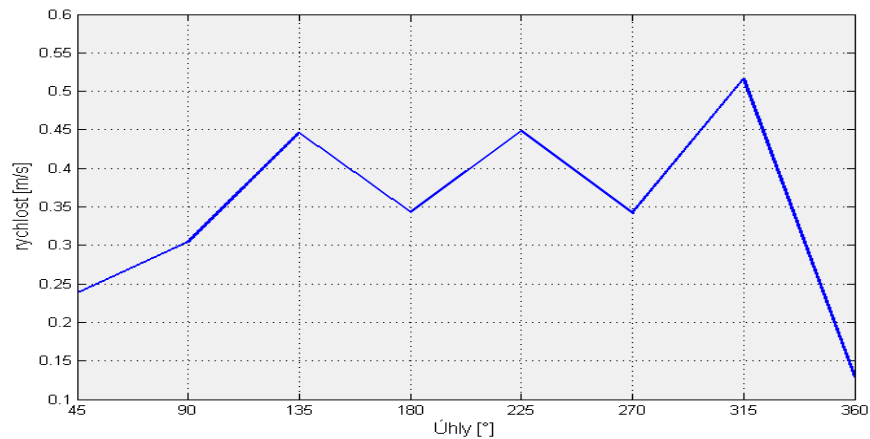


Obr. 9: Uspořádání experimentu

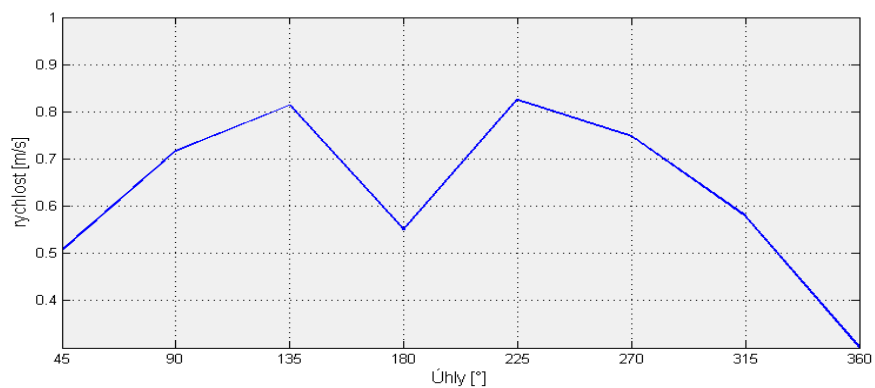


Obr. 8: Detail anemometru 54T33

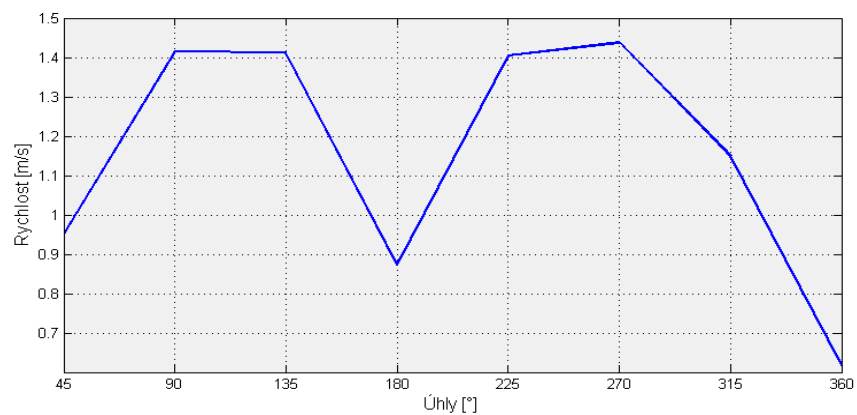
Na zdroji napětí byly měněny hodnoty přivedeného napětí a proudu do větráků, ovlivňující nucené proudění na sondu 54T33. Byly ověřovány především nízké hodnoty, které figurují v okolí OS viz výše. Při 2,84V a 1A byla naměřená charakteristika rychlosti na poloze sondy patrná z grafu Obr. 10, při 5,2V a 2,2A viz Obr. 11 a při 10,15V a 4A viz Obr. 12.



Obr. 10: Rychlost proudění při nastavení 2,84V a 1A



Obr. 11: Rychlost proudění při nastavení 5,2V a 2,2A



Obr. 12 Rychlost proudění při nastavení 10,15V a 4A

Závěr:

Anemometr reaguje s malou odchylkou (0,05 m/s) na většinu poloh, u kterých nezávisí na úhlu natočení. Sonda zaznamenává větší odchylky pouze v polohách 4 a 8, u nichž dochází k velké změně rychlosti proudění, které neodpovídá realitě, proto bude vhodné se tohoto nastavení při dalším měření vyvarovat.

5. Měření na obráběcím stroji

5.1 Popis obráběcího stroje

Pro účely měření byl vybrán stroj řady MCV 1000 (vertikální frézka s otevřeným rámem typu "C" (viz Obr. 13). Na stroji byly provedeny technologické zkoušky. Při těchto zkouškách proběhla měření teplot pracovního prostoru, jeho okolí a teplot při řezném procesu. Dalším měřeným parametrem pro zjištění SPT byla rychlost proudění vzduchu v pracovním prostoru stroje.



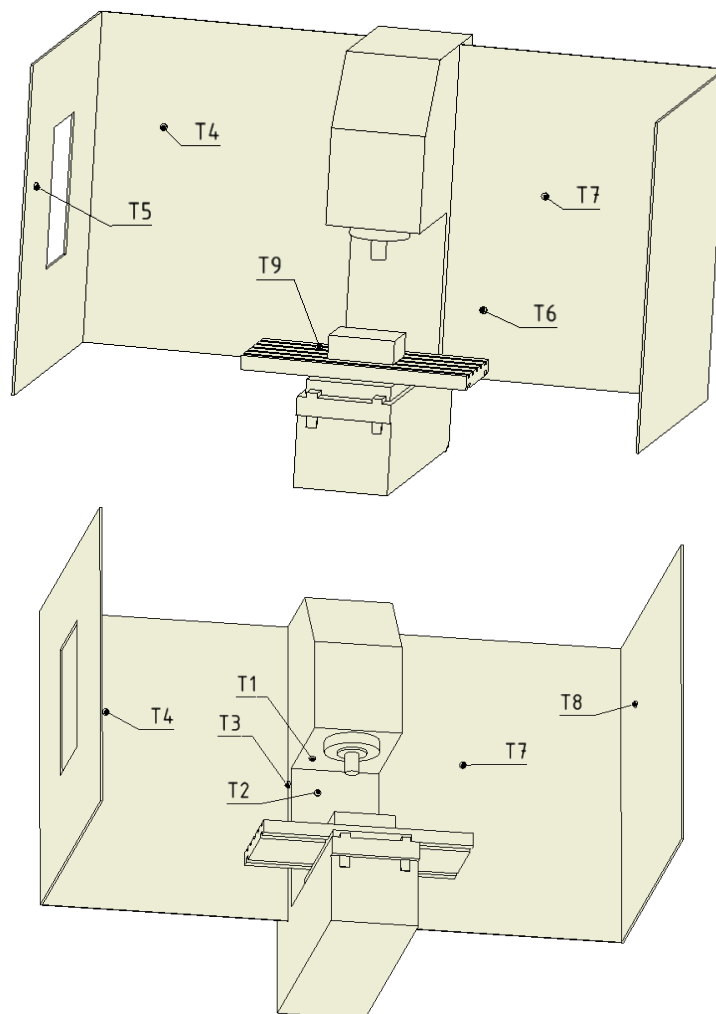
Obr. 13: MCV 1000 [11]

Teploty byly měřeny pomocí platinových odporových teplotních čidel (Pt100), které mění svůj odpor v závislosti na teplotě [17]. Teplotní čidla byla umístěna uvnitř konstrukce stroje a na krytování. Umístění teplotních čidel je zobrazeno na fotografiích z místa měření (viz Obr. 14, Obr. 16) z a dále na schematicém modelu sestrojeném podle fotografií (viz Obr. 15).

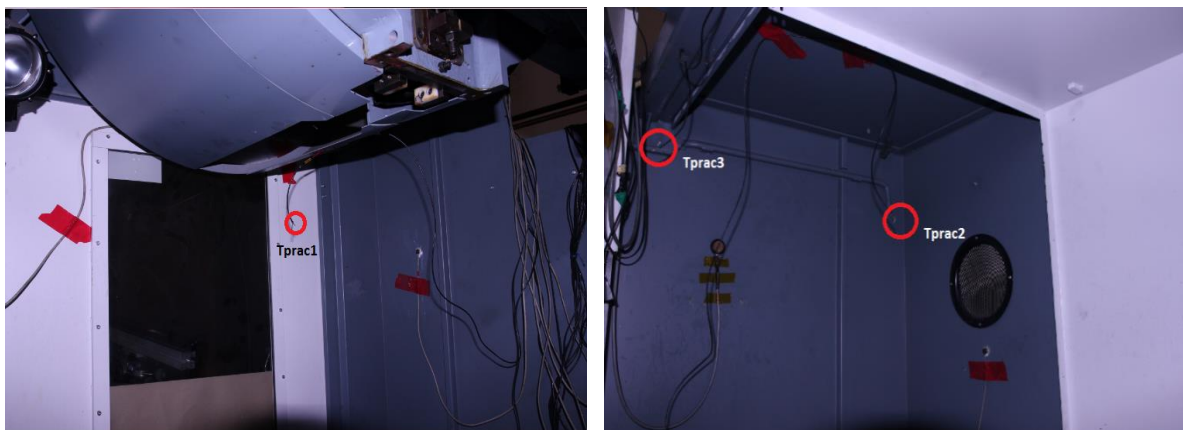


Obr. 14: Umístění teplotních senzorů na stojanu [9]

v grafech (obr. 23 a obr. 30) uvedena pozice 1 stojanu jako ST1 a v grafu (obr. 23 a obr. 30) uvedena pozice 3 vřeteníku jako VR1)



Obr. 15: Schéma umístění teplotních čidel na stole, stojanu, vřeteníku a krytování pracovního prostoru



Obr. 16: Umístění teplotních čidel v pracovním prostoru

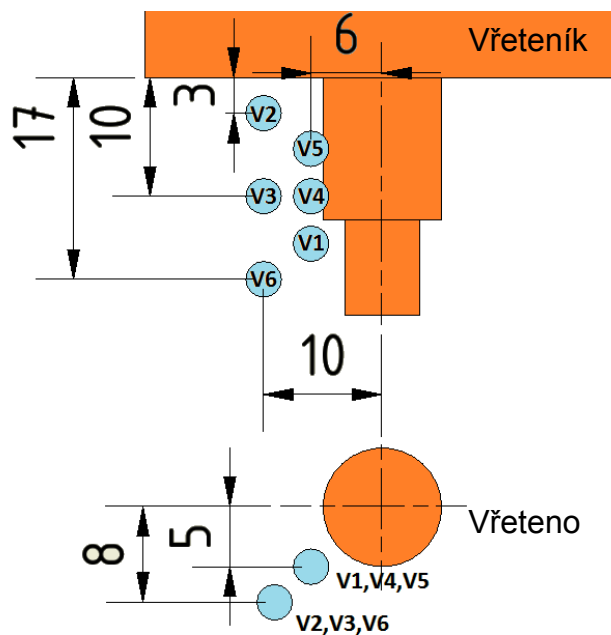
Čidla teploty okolí, která nebyla vyznačena na výše zmíněných obrázcích, byla umístěna v prostoru na přední straně stroje nad krytováním v blízkosti upevnění ovládacího panelu.

K měření rychlosti proudění vzduchu byla použita rychlostní sonda, anemometr. Její citlivost byla experimentálně zjištěna v kap. 4. Sonda byla upevněna (obr. 17) vedle vřetene a měřilo se několik míst v blízkém okolí v centimetrech (obr. 18). Proces probíhal jednak při odebrání třísky (v2, v3, v4), jednak při obrábění bez třísky (v1, v5, v6), tj. pouze při rotaci vřetene bez obrábění.

Teplotní čidla a rychlostní sonda byla připojena přes měřicí karty (NI9217 a NI9219) k měření ústřední (NI cDAQ-9188), přes kterou byla data přenášena do počítače s pomocí programu LabVIEW. Naměřená data byla následně vyhodnocena v programu MATLAB.



Obr. 17: Umístění anemometru



Obr. 18: Schématické umístění anemometru při měření

Stroj byl vybaven frézou SANDVIK o $\varnothing 63$ mm (obr. 19), řezné podmínky byly nastaveny v režimu 1,5kW. Pro režim 1,5kW byly zjišťovány teploty vřeteníku, stojanu, na stěnách krytu, teploty pracovního prostoru a okolí. Dále při stejném režimu byly zjišťovány rychlosti vzduchu v okolí rotace vřetene při odebírání třísky a bez odběru třísky.



Obr. 19: Fréza SANDVIK $\varnothing 63$ mm [9]

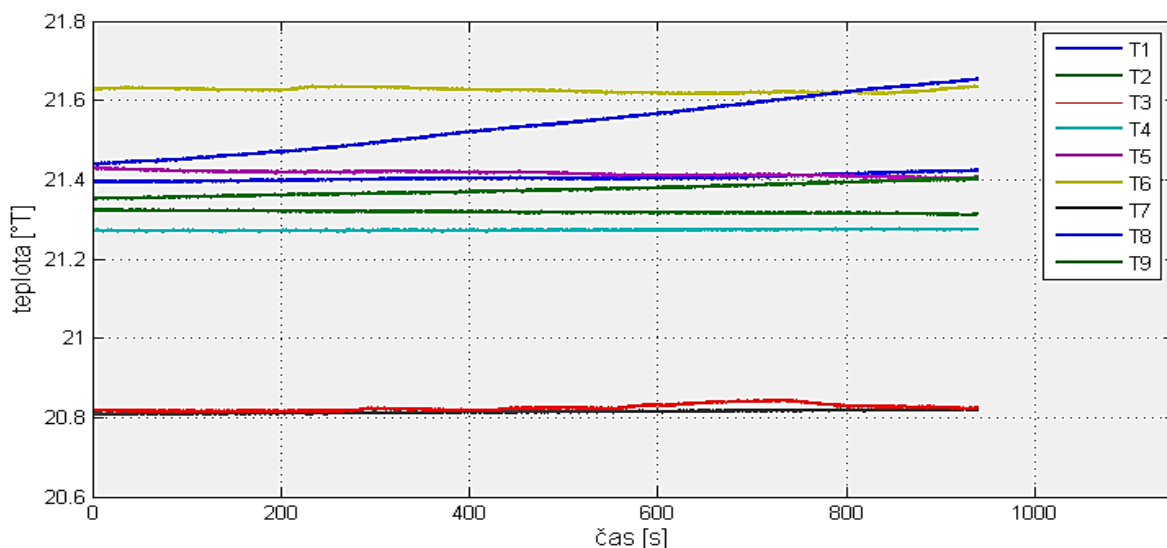
5.2 Výsledky technologické zkoušky v režimu 1,5kW

Následující odstavec je věnován výsledkům měření technologické zkoušky v režimu 1,5kW. Podrobnější nastavení pro tuto zkoušku jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Parametry technologické zkoušky o výkonu 1,5kW

P	z	n	A_p	F_z	$\varnothing n$
[kW]	[-]	[1/min]	[mm]	[mm]	[mm]
1,5	5	1011	0,5	0,25	63

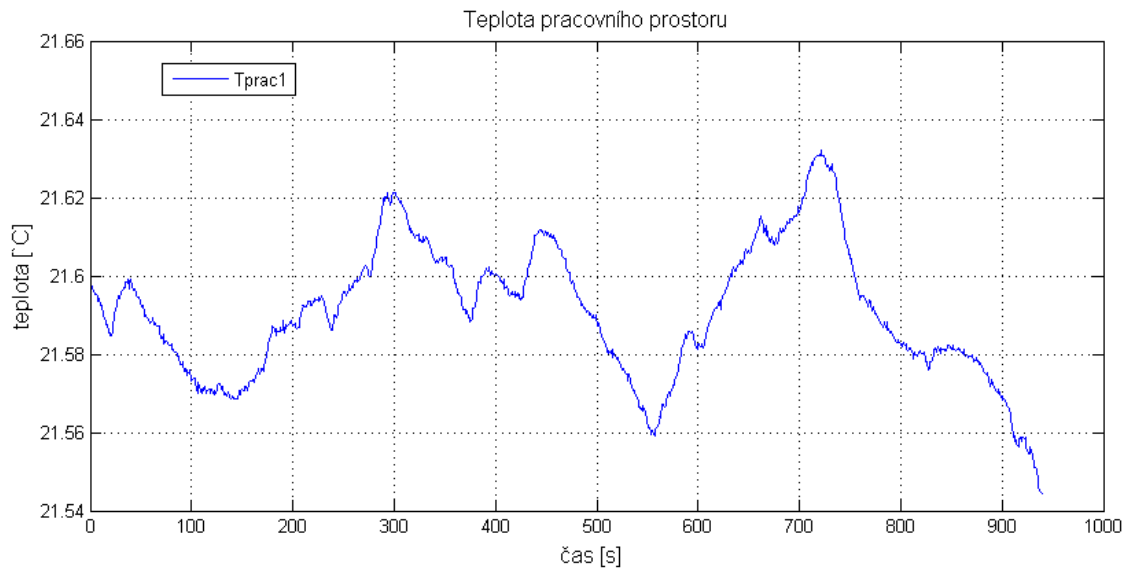
- Výsledky měření pro rotaci vřetene bez odběru třísky



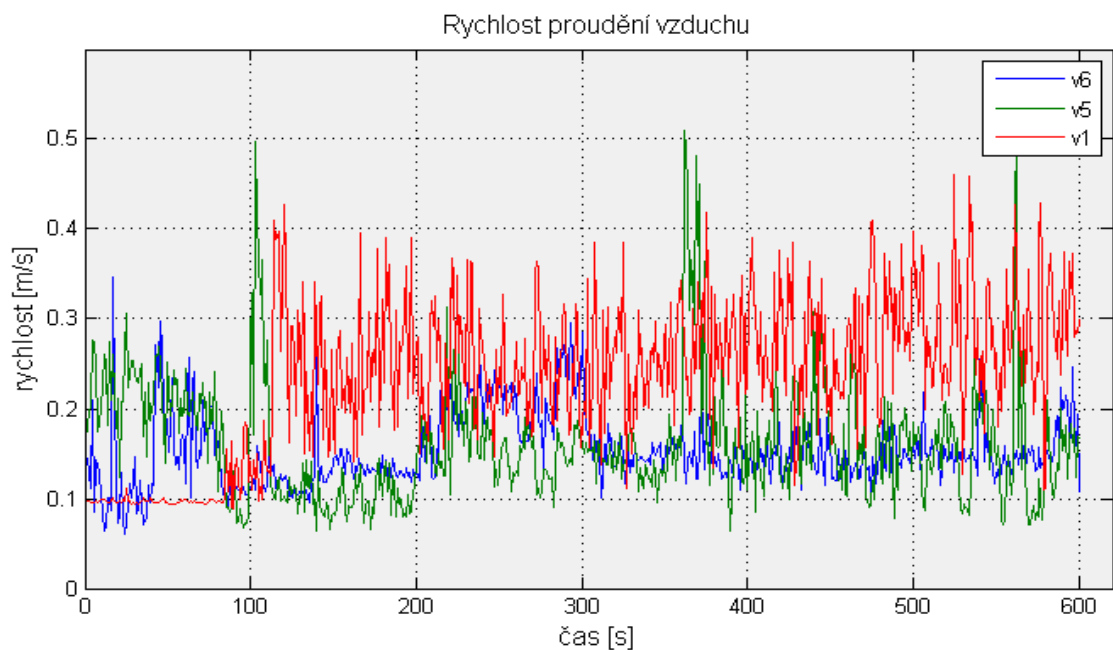
Obr. 20: Teploty na vybraných místech stroje při rotaci vřetene

Na Obr. 20 jsou zobrazeny různé teploty na stěnách pracovního prostoru, tyto teploty se při rotaci vřetene skoro nemění, jediná teplota, která dostala změny, byla teplota $T7$ a to o $\Delta T = 0,23^\circ\text{C}$, tento teplotní rozdíl nebyl nijak ovlivněn rotací vřetene, ale pouze vnějším působením rozvodné ústředny na stěnu.

Vzhledem k tomu, že teplotní čidla na stěnách nezaznamenala teplotní výkyvy působením rotace vřetena, dal se tento jev očekávat i u sondy teploty v pracovním prostoru (viz Obr. 21).



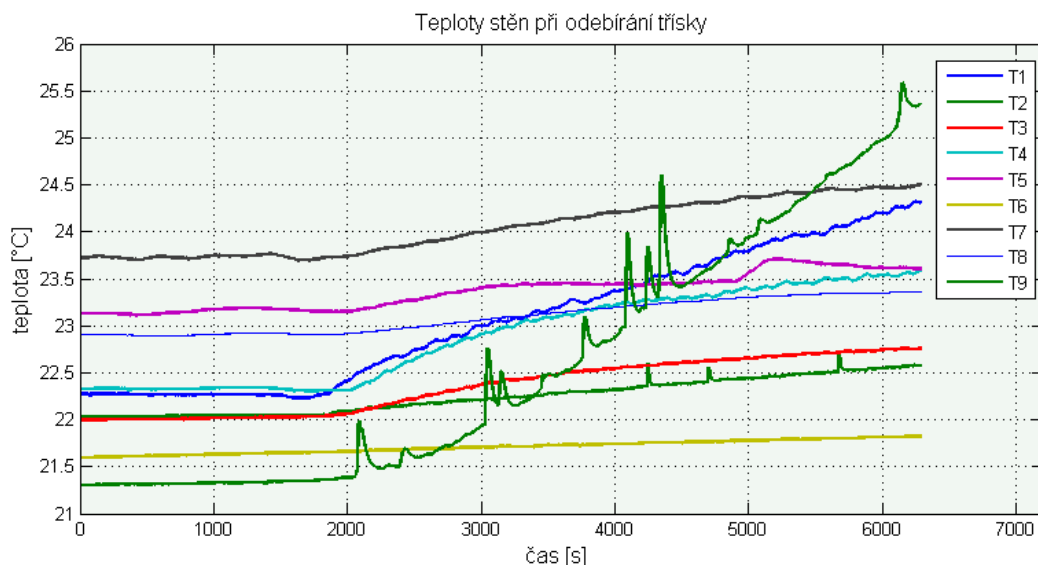
Obr. 21: Teplota pracovního prostoru při rotaci vřetene



Obr. 22: Rychlost proudění vzduchu

Při rotaci vřetene bez odběru třísky bylo dosahováno malých rychlostí proudění v rozmezí od 0,1 až 0,35 m/s. Nejvyšší průměrné hodnoty byly zaznamenány v poloze v1. (viz Obr. 22), která odpovídá bezprostřední vzdálenosti od vřetene. Nejvyšší hodnota byla však zaznamenána v poloze v5., která dosáhla až 0,5 m/s.

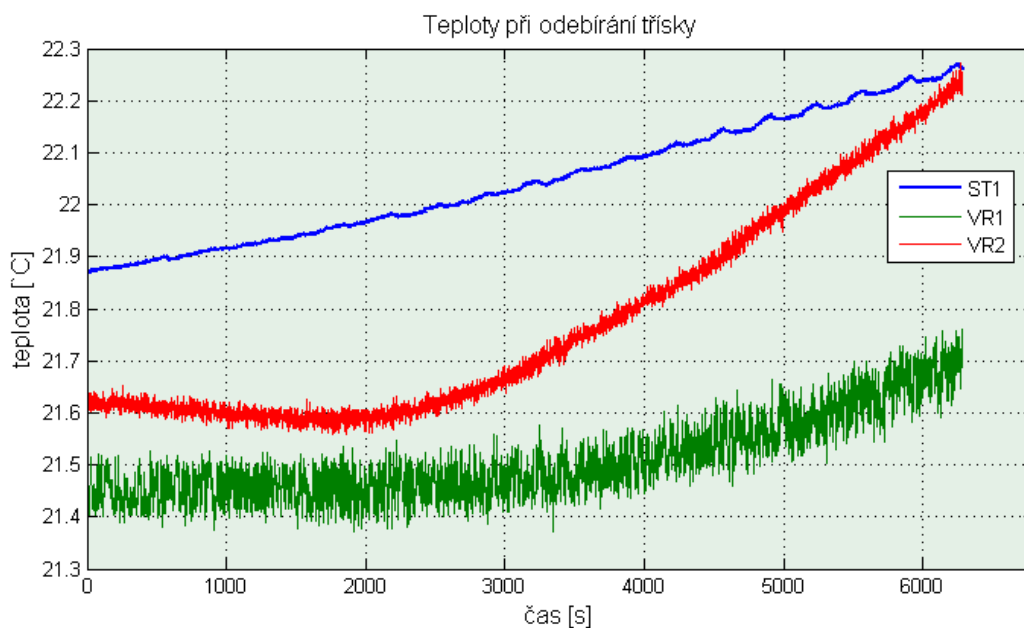
- Výsledky měření při rotaci vřetene s odběrem třísky



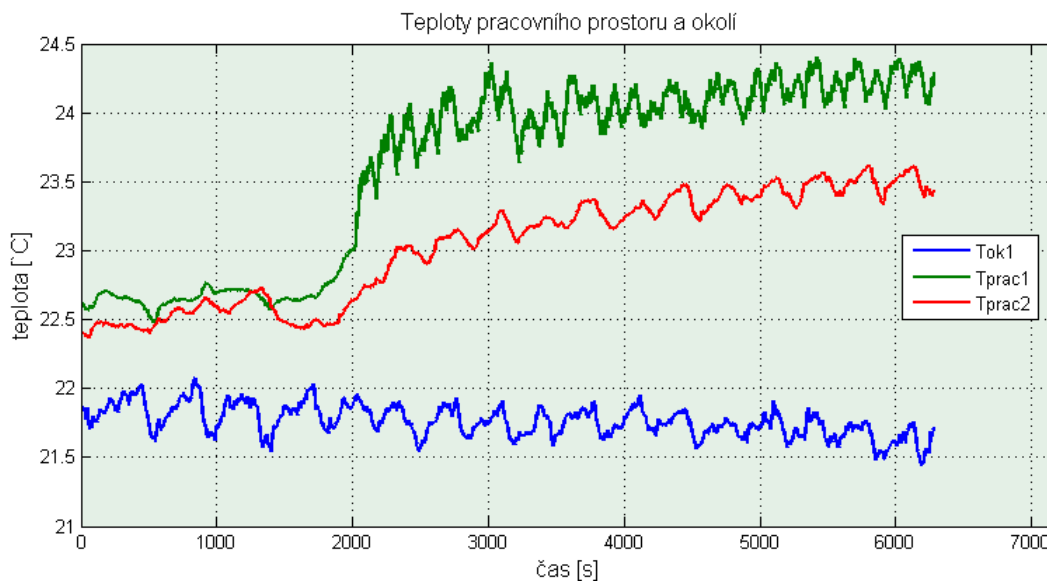
Obr. 23: Teploty na vybraných místech při odebrání třísky

Teploty $T1-T8$ mají podobně stoupající tendenci a podobný teplotní rozdíl mezi hodnotou na začátku měření a na jeho konci. Největší teplotní rozdíl zaznamenala teplota $T9$, z čidla umístěného na stole, který ovlivňovala především odpadající tříska.

Na grafu (viz Obr. 24) byl vyhodnocen podobný průběh jako u teplot $T1-T8$, kde teploty mají stoupající tendenci v řádech desetin.



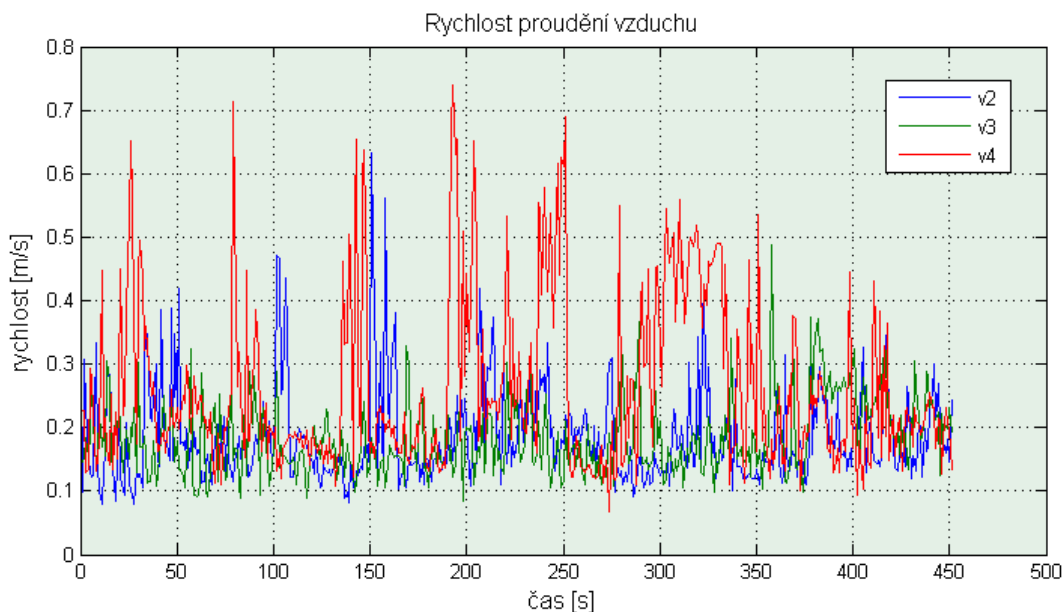
Obr. 24: Teploty v konstrukci stroje při odebrání třísky



Obr. 25: Teploty pracovního prostoru a okolí při odebírání třísky

Na Obr. 25 lze pozorovat narůstající teploty pracovního prostoru T_{prac1} a T_{prac2} , to je obecně způsobeno řezným procesem jako zdrojem tepla, kde většina tepla odchází do třísky (potom do nástroje a obrobku). Odpadající tříška následně ovlivňuje pracovní prostor. Teplota od senzoru okolí $Tok1$ umístěna vně stroje má mírně klesající tendenci, což je způsobeno aktuální teplotou okolí ve výrobní hale.

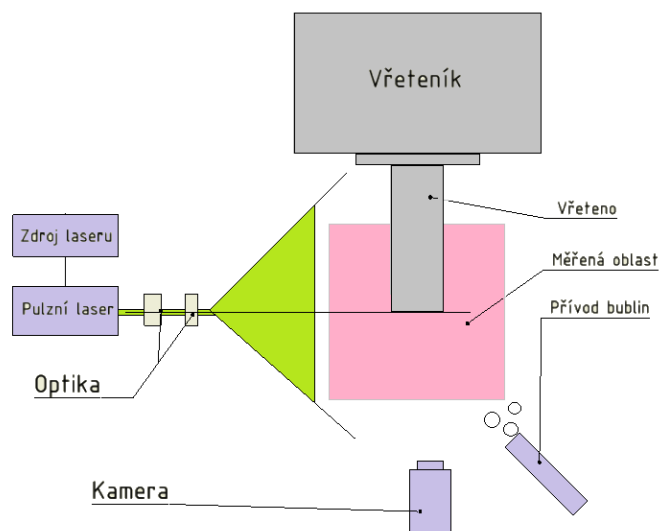
Rychlost proudění vzduchu během řezného procesu (obr. 26) má podobný charakter jako při rotaci vřetene (obr. 22). U umístění anemometru v poloze V4 lze sledovat dosažená maxima rychlosti proudění, která jsou v periodě cca 60s, což odpovídalo sejmutí jedné vrstvy obráběného materiálu. Lze tedy přiřadit největší nárůst rychlosti proudění na měnící se poloze obrobku vůči anemometru. Dalším faktorem ovlivňující rychlost proudění vzduchu bylo profukování vřetene během procesu.



Obr. 26: Rychlost proudění vzduchu během řezného procesu (odebírání třísky)

5.3 Vizualizace proudění při testech na stroji

K zjištění rychlosti proudění vzduchu a vizualizaci směru proudění pro rotaci vřetene s odebíráním (i bez odběru třísky) byl použit generátor héliových bublin od společnosti Sage action Inc., laser GL532T – 300 od firmy SLOC LASERS o výkonu 300 mV a vlnové délce 532 nm, zdroj laseru DPSSL DRIVER, fotoaparát (kamera), optika. Celé schéma je zobrazeno na Obr. 27.

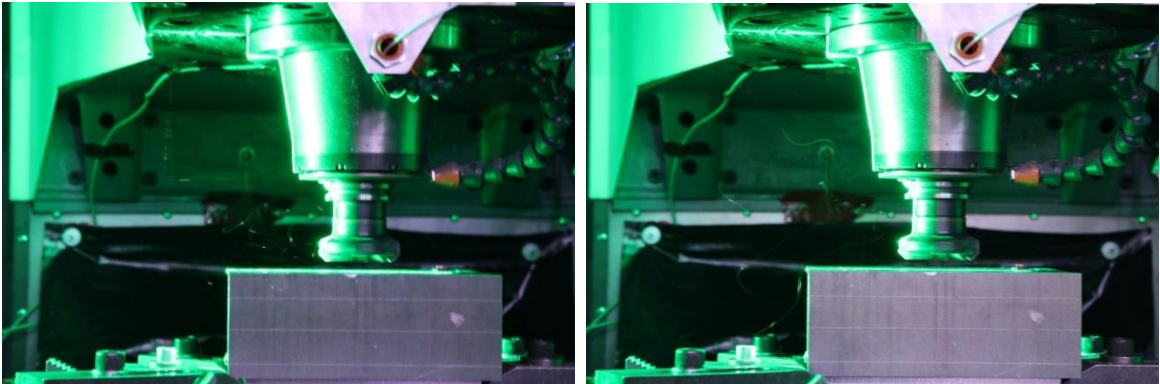


Obr. 27: Schéma experimentu pro vizualizaci proudění

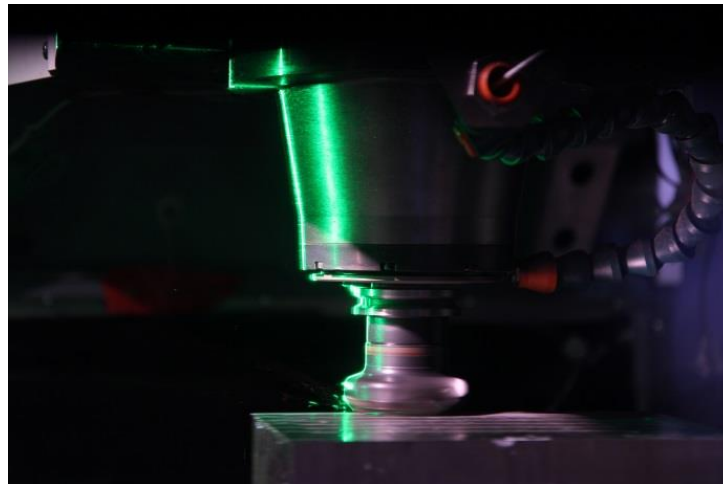
Experiment probíhal na stejném stroji jako měření teplot. Do měřené oblasti byly z generátoru přiváděny bubliny, které byly osvětlovány laserovým lusem. To vše bylo zaznamenáváno fotoaparátem s nastavením expoziční doby $\Delta t = 1/6$ a

v důsledku toho byla zaznamenána trajektorie částice odpovídající takovému časovému intervalu.

Výsledky experimentu:



Obr. 28: Vizualizace proudění bez odběru třísky



Obr. 29: Vizualizace proudění s odběrem třísky

Výsledky experimentu nedopadly podle očekávání, ani při jedné ze zkoušek. Při rotaci vřetene bez odběru třísky (viz Obr. 28) bylo dosaženo 10 bublin/s a při odběru třísky (viz obr. 29) klesl počet bublin na 4 bubliny/s. Odhad rychlosti proudění by mohl být zrealizován, ale pouze za dosažení vyššího množství generovaných bublin.

Vhodnější metodami pro měření rychlostního pole v dané aplikaci mohou být např. metody PIV nebo LDA.

6. Výpočet SPT

Výpočty pro stěny na OS byly provedeny z důvodu pochopení, jak závisí vstupní parametr, kterým je u volné konvekce změna teploty mezi stěnou a okolím a u nucené konvekce rychlost proudění vzduchu v okolí, výsledný součinitel přestupu tepla a následně tepelný tok q .

Pro volnou konvekci můžeme využít praktický výpočet Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla. Ve většině výpočtů se pro střední hodnotu Nusseltova čísla a příslušného SPT používá vzorec z korelací obecného tvaru

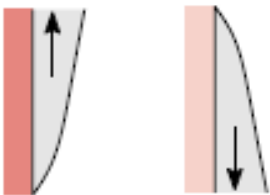
$$Nu = C \cdot Ra^n \quad (6.1)$$

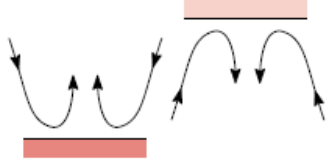
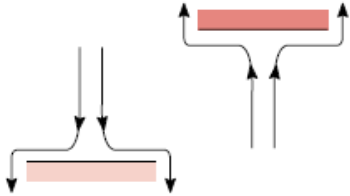
kde Rayleighovo číslo

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{g \beta l_{char}^3 (T_s - T_o)}{v^2} \cdot \frac{v}{a} = \frac{g \beta l_{char}^3 (T_s - T_o)}{a v} \quad (6.2)$$

Hodnota konstanty C závisí především na tvaru tělesa, jeho poloze v prostoru a na okrajových podmínkách. Hodnota exponentu n je obvykle $n = 1/4$ a $1/3$ pro laminární a turbulentní proudění a závisí především na řešení proudění v mezní vrstvě, indukovaného teplotním polem. [14] [15]. Typy základních geometrií jsou uvedeny v Tabulka 5.

Tabulka 5: Základní typy geometrií [14]

Geometrie	Vhodné rovnice	Omezení
<p><u>1. Vertikální deska</u></p> 	<p>6.3 6.4</p>	<p>žádné $Ra_L \leq 10^9$</p>

<p><u>2. Horizontální deska</u></p> <p>a) Horní povrch vyhříváných nebo spodní povrch chlazených desek</p> 	<p>6.6 6.7</p>	<p>$(10^4 \leq Ra_L \leq 10^7)$ $(10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11})$</p>
<p>b) Dolní povrch vyhříván nebo horní povrch chlazen</p> 	<p>6.8</p>	<p>$(10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10})$</p>

Rovnice pro vertikální desku v obecném tvaru (6.3) byla popsána v [15] Churchillem a Chu:

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (6.3)$$

Tato rovnice může být použita v celém rozsahu Ra pro většinu výpočtů. Výhodnější pro rozsah Ra v hodnotách laminárního proudění lze získat pomocí vztahu (6.4) [15]:

$$Nu_L = 0,68 + \frac{0,670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad \text{platí pro } Ra_L \leq 10^9 \quad (6.4)$$

Pro výpočet Nusseltova čísla pro nucenou konvekci platí následující vztah, kde Prandtlovo číslo musí být větší než 0,6:

$$Nu_L = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0,6 \quad (6.5)$$

Při výpočtu pro horizontální desku se vychází z jiných empirických vztahů, kde záleží především na způsobu ovlivnění počítané desky a na tom, zda-li se jedná o laminární, nebo turbulentní proudění.

Horní povrch teplé desky nebo spodní povrch chlazené desky popisují následující vztahy:

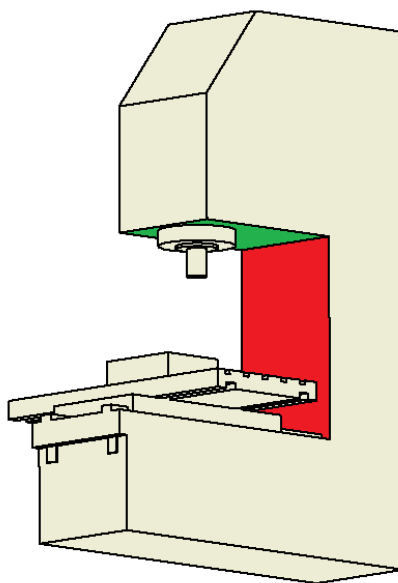
$$Nu_L = 0,54 Ra^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (6.6)$$

$$Nu_L = 0,15 Ra^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \quad (6.7)$$

Spodní povrch teplé desky nebo spodní povrch chlazené desky popisuje vztah (6.8)

$$Nu_L = 0,27 Ra^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (6.8)$$

Výpočet SPT byl proveden pro vertikální desku stojanu a horizontální desku vřeteníku dle schématu (viz obr. 30) pro technologickou zkoušku výkonu 4,5kW. Tento výpočet nebyl proveden pro již uvedené výsledky z měření pro 1,5kW – z důvodu malých teplotních rozdílů mezi teplotou uvažované stěny a teplotou pracovního prostoru. V Tab. 6 jsou uvedeny některé parametry z technologické zkoušky.

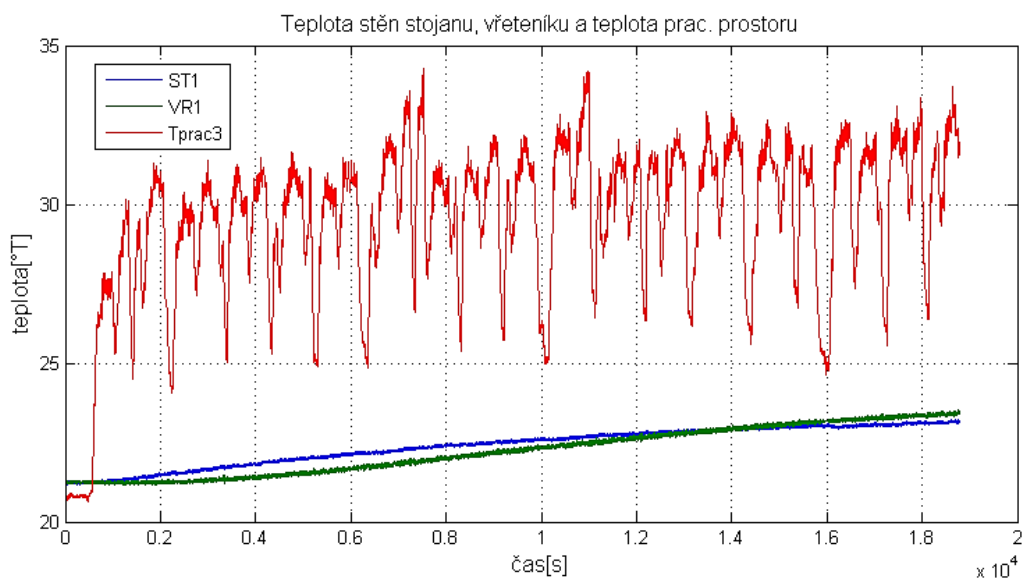


Obr. 30: Schéma příkladu

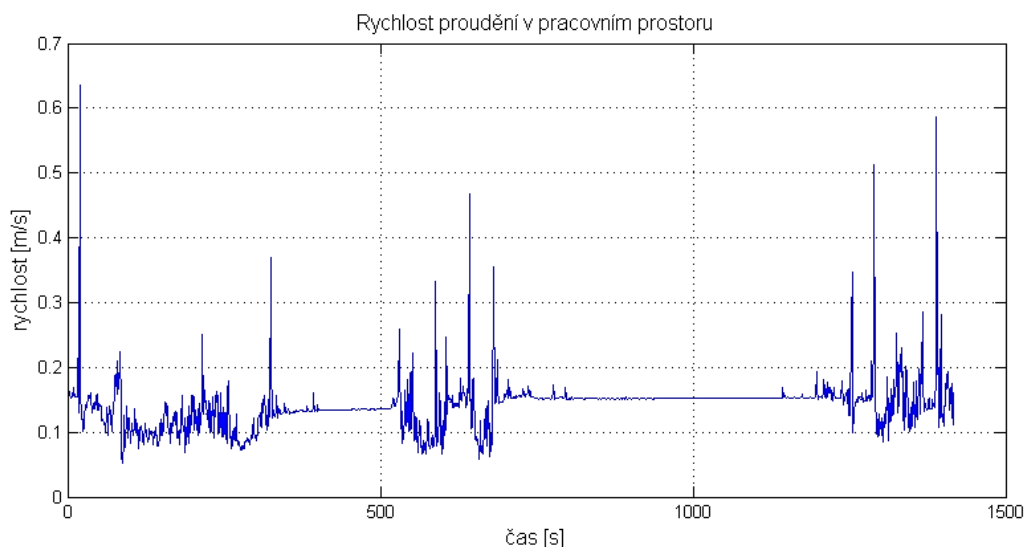
Tab. 6. Parametry technologické zkoušky o výkonu 4,5kW [9]

P	z	n	A_p	F_z	$\varnothing n$
[kW]	[-]	[1/min]	[mm]	[mm]	[mm]
4,5	5	1076	1,7	0,25	63

Výsledky měření při rotaci vřetene s odběrem třísky při výkonu 4,5kW:



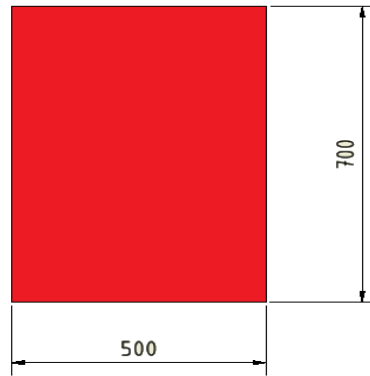
Obr. 31: Teplota stěny stojanu, vřeteníku a teplota pracovního prostoru



Obr. 32: Rychlost proudění v pracovním prostoru 4,5kW

6.1. Vertikální stěna (stojan)

Výpočet byl realizován na vertikální stěnu stojanu stroje. Charakteristické rozměry desky jsou zobrazeny na obr. 33.



Obr. 33: Charakteristické rozměry vertikální desky stojanu

Vlastnosti okolního vzduchu byly uvažovány podle fyzikální tabulky vzduchu pro suchý vzduch při 100kPa. Tabulka je zobrazena v příloze číslo 1. Následující hodnoty byly vybrány pro vysvětlení postupu výpočtu.

Výpočet SPT v čase 1000s od začátku řezného procesu

$$T_s = 21,37 \text{ °C} = 294,37 \text{ K}$$

$$T_{ok} (T_{prac3}) = 27,03 \text{ °C} = 300,3 \text{ K}$$

$$v = 0,15 \text{ m/s}$$

Volná konvekce:

Pomocí teploty pracovního prostoru a stěny se vypočte teplota vzduchu a podle fyzikální tabulky vzduchu se naleznou konkrétní parametry

$$T_f = \frac{(T_f + T_{ok})}{2} = \frac{(294,37 + 300,3)}{2} = 297,34 \text{ K}$$

Nejdříve je nutné vypočítat Rayleighovo číslo

$$Ra = \frac{g \beta l_{char}^3 (\Delta T)}{a v} = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{297,34}\right) \cdot 0,7^3 (5,65)}{(15,86 \cdot 10^{-6}) \cdot (21,67 \cdot 10^{-6})} = 186100514,2$$

dále hledané Nusseltovo číslo Nu dostaneme z rovnice ve tvaru 6.3

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 =$$

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (186100514,2)^{1/6}}{[1 + (0,492/0,72)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 =$$

$$Nu_L = 78,9$$

Pokud známe Nusseltovo číslo, lze snadno dopočítat z rovnice 3.9 součinitel přestupu tepla

$$Nu = \frac{\alpha l_{char}}{\lambda}; \quad \alpha = \frac{Nu \lambda}{l} = \frac{78,9 \cdot 0,025}{0,7} = 2,84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Pro výpočet tepelného toku Q použijeme Newtonův ochlazovací zákon

$$Q = qA = \alpha \Delta T A = 2,84 \cdot (5,65) \cdot (0,7 \times 0,5) = 5,63 \text{ W}$$

Nucená konvekce:

Pro výpočet Nusseltova čísla nucené konvekce bylo potřeba vypočítat Reynoldsovo číslo podle vztahu 3.11

$$Re = \frac{v l}{\nu} = \frac{0,152 \cdot 0,7}{15,86} = 6726,12$$

pomocí Reynoldsova čísla bylo vypočítáno Nusseltovo číslo z rovnice 6.5

$$Nu_L = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} = 0,664 \cdot (6726,12)^{1/2} (0,72)^{1/3} = 48,8$$

součinitel přestupu tepla

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l} = \frac{48,8 \cdot 0,02524}{0,7} = 1,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

tepelný tok q

$$Q = qA = \alpha \Delta T A = 1,76 \cdot (5,65) \cdot (0,7 \times 0,5) = 3,48 \text{ W}$$

Určení výsledné konvekce na vertikální desce

Kritérium pro určení konvekce bylo popsáno v rovnicích 3.2-3.4, podle těchto kritérií se určí, jestli se jedná o volnou, nucenou nebo smíšenou konvekci.

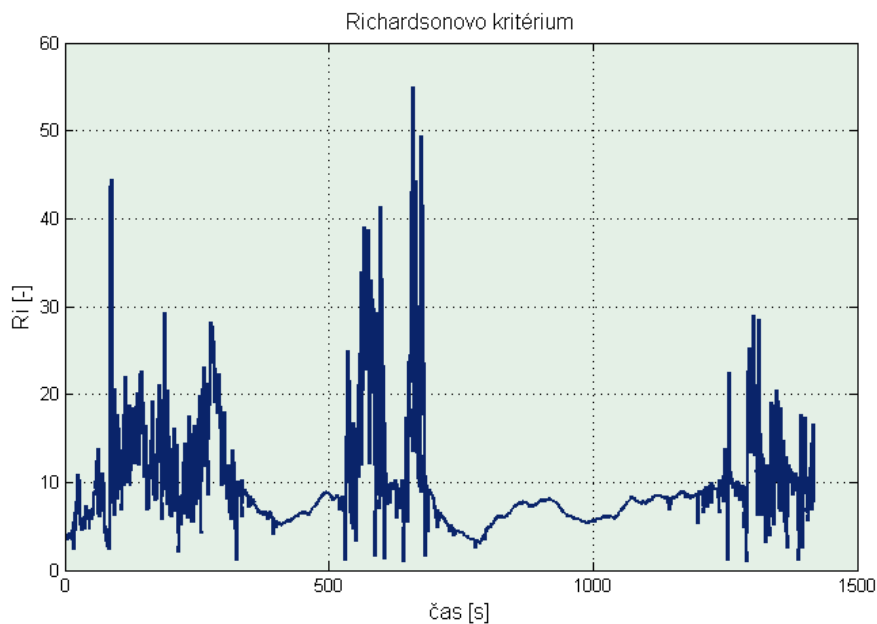
Z rovnice 3.12 bylo vypočítáno potřebné Grashofovo číslo Gr

$$Gr = \frac{g \beta T_{char} l_{char}^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{297,34}\right) \cdot 0,7^3 \cdot (5,65)}{(15,86 \cdot 10^{-6})^2} = 254269330$$

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{254269330}{(6726,12)^2} = 5,62 > 1 \Rightarrow \text{volná konvekce}$$

Výsledky

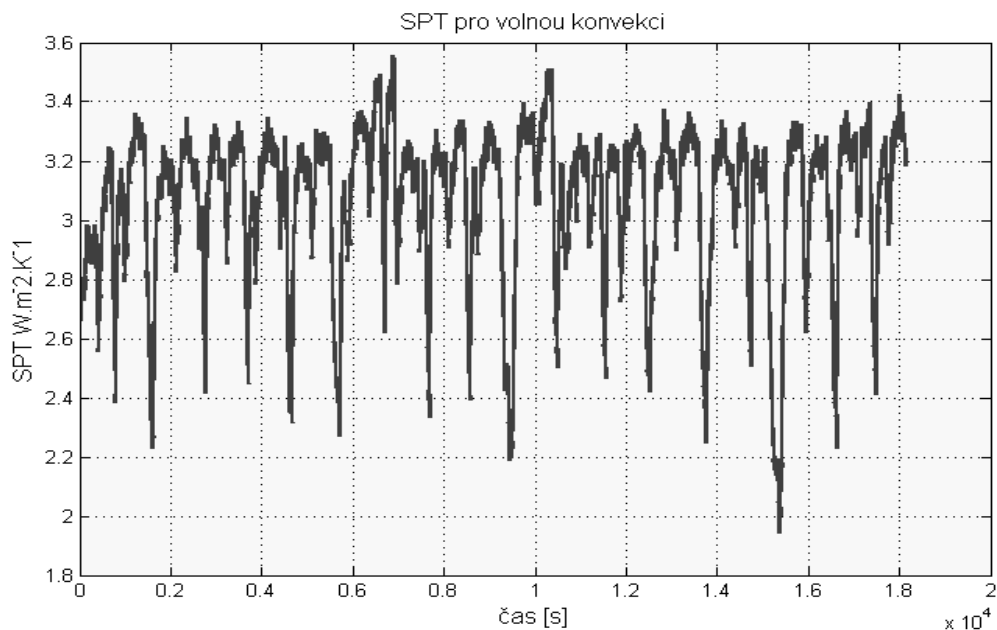
Kritérium



Obr. 34: Richardsonovo kritérium stojanu

Všechny hodnoty z Richardsonova kritéria na obr. 34 jsou vyšší než 1, tudíž se bude jednat pouze o SPT z volné konvekce na počítané vertikální stěně.

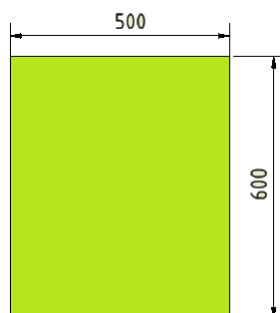
Volná konvekce



Obr. 35: SPT volné konvekce stojanu

6.2. Horizontální stěna (vřeteník)

Pro horizontální desku byla zvolena stěna vřeteníku. V příkladu bylo postupováno obdobně jako u stojanu. Charakteristické rozměry jsou znázorněny na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**



Obr. 36: Char. rozměry vertikální desky vřeteníku

Výpočet SPT v čase 1000s od začátku řezného procesu

$$T_f = 21,24 \text{ °C} = 294,24 \text{ K}$$

$$T_{ok} (T_{prac3}) = 27,03 \text{ °C} = 300,3$$

$$v = 0,15 \text{ m/s}$$

$$T_f = \frac{(T_f + T_{ok})}{2} = \frac{(294,24 + 300,3)}{2} = 297,2 \text{ K}$$

Rayleigho číslo:

$$Ra = \frac{g \beta l_{char}^3 (\Delta T)}{\alpha \nu} = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{297,2}\right) \cdot 0,6^3 (5,79)}{15,86 \cdot 21,67} = 1,48E09$$

Nusseltovo číslo z rovnice 6.7:

$$Nu_L = 0,15 Ra^{1/3} = 0,15 \cdot 1,48E09^{1/3} = 170,8$$

SPT:

$$Nu_L = \frac{\alpha l_{char}}{\lambda}; \alpha = \frac{Nu \lambda}{l} = \frac{170,8 \cdot 0,025}{0,6} = 7,2 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

Tepelný tok:

$$Q = qA = \alpha \Delta T A = 7,2 \cdot (5,79) \cdot (0,6 \times 0,5) = 12,48 \text{ W}$$

Nucená konvekce:

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{v l}{\nu} = \frac{0,152 \cdot 0,6}{15,86} = 5765,242$$

Nusseltovo číslo:

$$Nu_L = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} = 0,664 \cdot 5765,2^{1/2} \cdot 0,72^{1/3} = 45,2$$

Součinitel přestupu tepla:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l} = \frac{45,2 \cdot 0,02524}{0,6} = 1,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tepelný tok:

$$Q = qA = \alpha \Delta T A = 1,76 \cdot (5,79) \cdot (0,6 \times 0,5) = 3,3 \text{ W}$$

Určení výsledné konvekce na horizontální desce

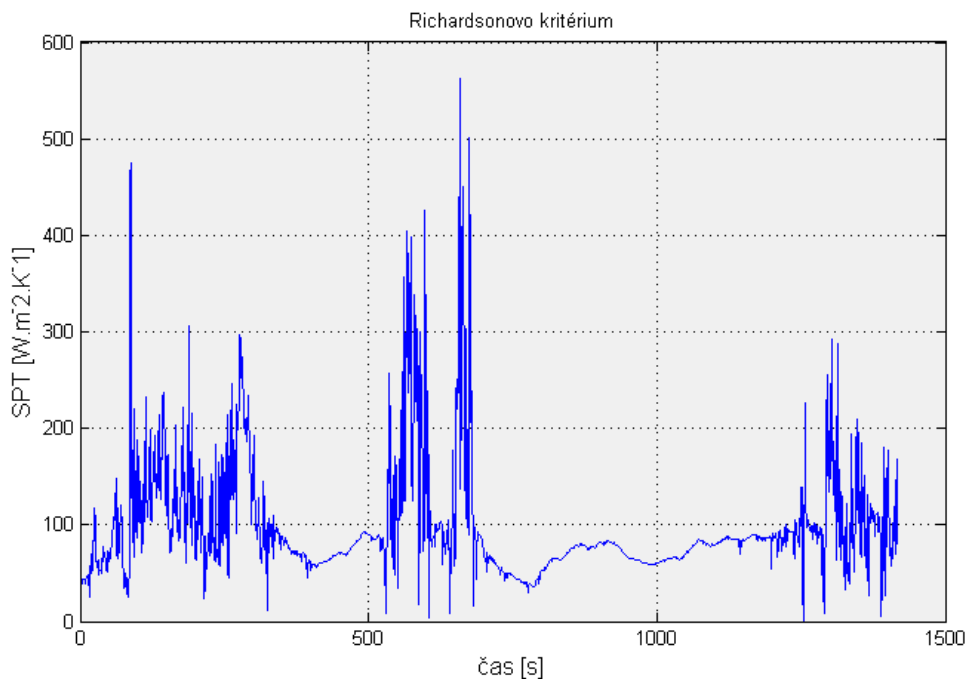
Kritérium pro určení konvekce bylo popsáno v rovnicích 3.2-3.4, podle těchto kritérií je určováno, zda se jedná o volnou, nucenou, nebo smíšenou konvekci.

Grashofovo číslo:

$$Gr = \frac{g \beta T_{char} l_{char}^3}{\nu^2} = \frac{9,8 \cdot \frac{1}{297} \cdot 0,6^3 \cdot (5,79)}{15,86^2} = 20185088420$$

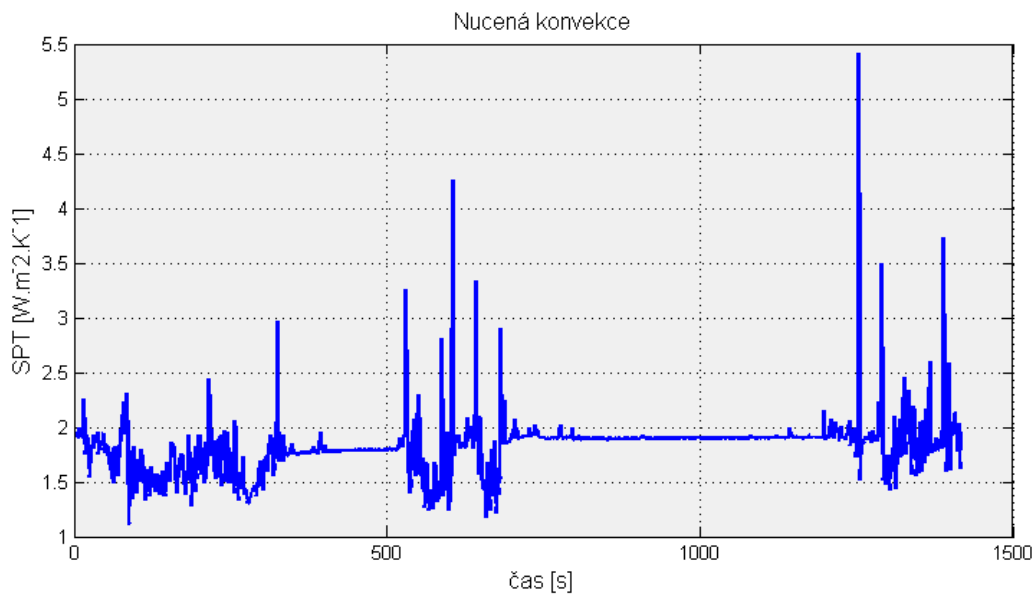
$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{20185088420}{5765,2^2} = 60,7 > 1 \Rightarrow \text{volná konvekce}$$

Výsledky horizontální desky vřeteníku:



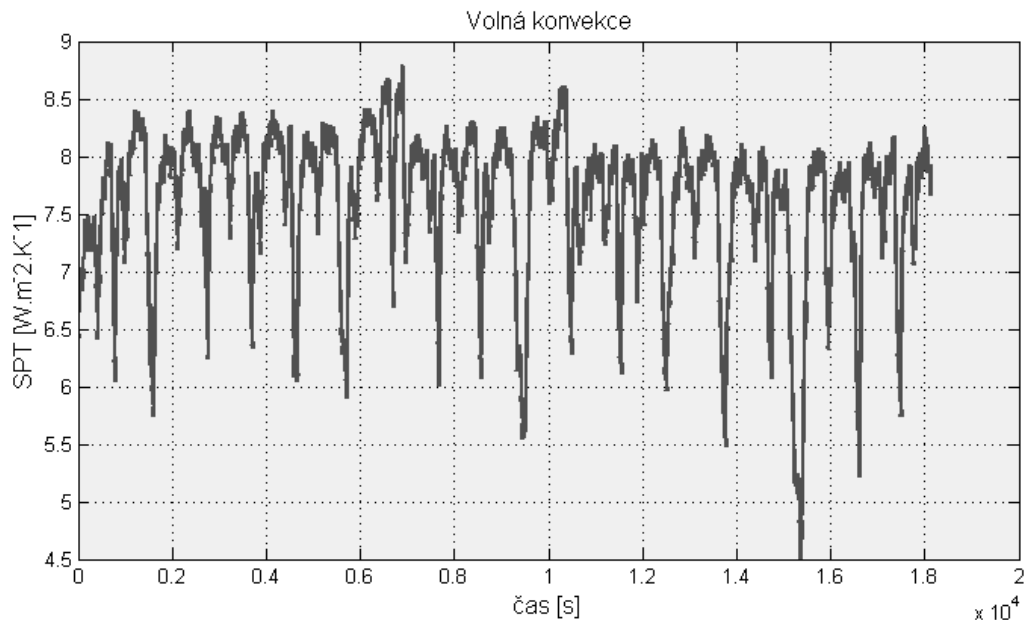
Obr. 37: Richardsonovo kritérium vřeteníku

Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** byl zveřejněn výsledek nucené konvekce, ačkoliv dle Richardsonova kritéria (viz obr. 37) vychází SPT pouze pro případ volné konvekce (viz obr. 40).



Obr. 38: SPT nucené konvekce vřeteníku

Změna SPT u nucené konvekce v zásadě kopíruje graf (obr. 32) a je závislá především na rychlosti proudění. V pracovním prostoru tyto rychlosti jsou malého působením řezného procesu a nedosahují takových rychlostí, aby se Richardsovo kritérium pohybovalo v podmínkách nucené konvekce.



Obr. 39: SPT volné konvekce vřeteníku

Na obr. 39 výsledná změna SPT na vřeteníku od začátku procesu dosahovalo hodnoty $4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

7. Závěr

V první části této bakalářské práce bylo nutné se seznámit s vlivy ovlivňujícími přesnost obráběcích strojů při obrábění, kde nejvyšší procento těchto nepřesností způsobují teplotní deformace. Tato bakalářská práce je zaměřena na konvektivní sdílení tepla (posouzení vlivu řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla na povrchu obráběcího stroje v pracovním prostoru).

V druhé části práce bylo nejprve provedeno měření citlivosti anemometru 54T35, který byl následně použit při experimentech na obráběcím stroji MCV 1000. Během testů na stroji byly měřeny teploty a rychlosti proudění vzduchu během sady technologických zkoušek v pracovním prostoru stroje i během rotace včetně na prázdno (bez obrábění). K výpočtu součinitele přestupu tepla byly použity teploty stojanu, včetně a pracovního prostoru a dále hodnoty rychlosti proudění vzduchu z rychlostní sondy umístěné v pracovním prostoru.

Pro výpočet SPT byl vybrán řezný proces s odběrem třísky, protože ten výrazněji ovlivňuje pracovní prostor stroje. Výsledný součinitel přestupu tepla byl ovlivňován pouze volnou konvekcí. To si vysvětlují především nízkými rychlostmi (do 0,15 m/s) v pracovním prostoru a velkým teplotním rozdílem mezi deskou a okolím. Výsledná změna SPT od začátku řezného procesu o výkonu 4,5kW pro stojan vyšla $1,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a pro včetně 4 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tyto hodnoty např. v porovnání s vnějším prouděním okolo stroje na jeho konstrukci (stojan, lože, včetně atd.) jsou malé, protože ve výrobní hale během technologických zkoušek bylo naměřeno proudění od 0,6 m/s až 1,2 m/s, což bylo způsobeno pouhým otevřením vrat v hale. Z těchto rychlosti proudění by byla získána větší změna SPT než při řezném procesu v pracovním prostoru.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Přestup tepla a) kondukcí b) konvekcí c) radiací [1].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2: Přenos tepla konvekcí strukturou OS [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3: Typy těles termoanemometrů: a) žhavený drátek, b) termistorové tělísko, c) žhavená kulička [7]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4: Mobilní generátor heliových bublin [10].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5: Zdroje tepla na OS [1].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 6: Laminární a turbulentní proudění [15].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7: Schéma zapojení měření citlivosti anemometru.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 8: Detail anemometru 54T33.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 9: Uspořádání experimentu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10: Rychlost proudění při nastavení 2,84V a 1A.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11: Rychlost proudění při nastavení 5,2V a 2,2A.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12: Rychlost proudění při nastavení 10,15V a 4A.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13: MCV 1000 [11].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14: Umístění teplotních senzorů na stojanu [9].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 15: Schéma umístění teplotních čidel na stole, stojanu, vřeteníku a krytování pracovního prostoru</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 16: Umístění teplotních čidel v pracovním prostoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 17: Umístění anemometru.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 18: Schématické umístění anemometru při měření.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 19: Fréza SANDVIK $\varnothing 63\text{mm}$ [9].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 20: Teploty na vybraných místech stroje při rotaci vřetene.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 21: Teplota pracovního prostoru při rotaci vřetene.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 22: Rychlost proudění vzduchu.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 23: Teploty na vybraných místech při odebírání třísky.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 24: Teploty v konstrukci stroje při odebírání třísky.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 25: Teploty pracovního prostoru a okolí při odebírání třísky.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 26: Rychlost proudění vzduchu během řezného procesu (odebírání třísky).....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 27: Schéma experimentu pro vizualizaci proudění.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 28: Vizualizace proudění bez odběru třísky.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 29: Vizualizace proudění s odběrem třísky.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 30: Schéma příkladu.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 31: Teplota stěny stojanu, vřeteníku a teplota pracovního prostoru.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 32: Rychlost proudění v pracovním prostoru 4,5kW.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 33: Charakteristické rozměry vertikální desky stojanu.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 34: Richardsonovo kritérium stojanu.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 35: SPT volné konvekce stojanu.....</i>	<i>46</i>

<i>Obr. 36: Char. rozměry vertikální desky vřeteníku</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 37: Richardsonovo kritérium vřeteníku</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 38: SPT nucené konvekce vřeteníku</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 39: SPT volné konvekce vřeteníku</i>	<i>49</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Informativní hodnota součinitele přestupu tepla [13]</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 2: Technické parametry sondy 54T33 - [6]</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3: Tabulka polohy sondy</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 4: Parametry technologické zkoušky o výkonu 1,5kW</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5: Základní typy geometrií [14]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6. Parametry technologické zkoušky o výkonu 4,5kW [9]</i>	<i>42</i>

Seznam příloh

Příloha 1 Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100kPa

Příloha 2 Kompletní výsledky měření (CD)

Seznam použitého softwaru

Autodesk Inventor Professional 2013

MATLAB R2011b

Microsoft PowerPoint 2010

Microsoft Word 2010

Microsoft Excel 2010

National Instruments LabVIEW 2013

Seznam použité literatury

[1] **Mareš M.:** Kompenzace teplotních úhlových deformací pinoly pomocí řízených vnitřních zdrojů tepla. [Disertační práce] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Jiří Nožička CSc.

[2] **Ježek, J., a další:** Mechanika tekutin. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000

[3] **Horejš, O., a další:** Závěrečná zpráva projektu 1.4.2 za rok 2011. [Výzkumná zpráva] Praha: VCSVTT 2011 V-11-027

[4] **KOHÚT, P.:** Konvekce při sdílení tepla v obráběcích strojích: disertační práce. [Disertační práce] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2012, 112 l. Vedoucí disertační práce Jiří Nožička.

[5] **Řezníček O.:** Zařízení pro kalibraci snímačů malých rychlostí proudění. [Bakalářská práce] Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí BP doc. Ing. Josef Štětina Ph. D.

[6] Princip LDA: [online]

<http://otp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0601.htm>

[7] Anemometrické metody: [online]

www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=566

[8] Laminární a turbulentní proudění: [online]

http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_5

[9] **Horejš, O., a další:** Závěrečná zpráva projektu FR-TI4/654 za rok 2013. [Výzkumná zpráva] Praha: VCSVTT 2013 V-13-031

[10] Generátor Heliových bublin:

<http://www.sageaction.com/>

[11] Stroj MCV 1000:

<http://www.formprojekt.cz/cz/?path=stroje/vybaveni>

[12] **Drahorádová L.:** Experimentální výzkum vlivu proudění: *bakalářská práce*.

Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Vedoucí BP Ing. Otakar Horejš Ph.D.

[13] **NOŽIČKA, Jiří.:** ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Sdílení tepla*. 1998. vyd. Praha 6: Vydavatelství ČVUT.

[14] **ŠESTÁK, Jiří. RIEGER, F.:** ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. 1993. vyd. Praha 6: Vydavatelství ČVUT.

[15] **Incopera, Frank P. a Dewitt D. P.:** Fundamentals of heat and mass transfer. New York: J. Wiley and Sons, 2001

[16] Tabulky vzduchu: [online]

<https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12112/TM/CZ/Tabulky/>

[17] Odporová teplotní čidla: [online]

http://www.telemeter.info/documents/odporov%C3%A1_teplotn%C3%AD_cidla.pdf