

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Ing. Jiří Lichtág, PhD

# **PILOVÝ KOTOUČ V PROCESU PODÉLNÉHO ROZŘEZÁVÁNÍ DŘEVA**

The Saw Blade in the Process of Ripping of Wood

obor

KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

Školitel : Doc. Ing. Vladimír Kabát, CSc. FSI VUT v Brně  
Oponenti : Prof. Ing. Jiří Hloušek, DrSc. Brno  
Doc. Ing. Ján Oswald, CSc. TU ve Zvoleně  
Doc. Ing. Jaroslav Pernica, CSc. MZLU v Brně

Datum obhajoby : 16. 11. 1999

ISBN 80-214-1554-1

© Jiří Lichtág, 1999

# **Obsah**

## **1. Úvod**

## **2. Cíl a obsah práce**

## **3. Současný stav řešené problematiky**

## **4. Zvolené metody zpracování**

4.1 Určení materiálových charakteristik

4.2 Určení zatěžujících účinků

## **5. Hlavní výsledky práce**

5.1 Rozbor teplotních charakteristik

5.2 Analýza napjatosti kotouče

## **6. Závěr**

## **Seznam použitých veličin**

## **Literatura**

## **Summary**

## **Autorovo curriculum vitae**

# 1. Ú v o d

V posledních letech tohoto století jsme svědky stále intenzivnější exploze techniky ve všech oborech její působnosti. V oblasti dřevoobráběcích strojů lze sledovat systematické a trvalé směřování k vysokým výkonům, jak obráběcích, tak pomocných procesů, zvyšování kvality, kumulaci technologických operací, výrazné elektronizaci, vysokým stupňům řízení apod.

Tyto trendy jsou podmíněny výrazným rozvojem a aplikační schopností vysoce efektivních řezných materiálů, výkonných nástrojů, nových konstrukčních prvků a materiálů, monitorovacích prvků a řídicích systémů. Pružné, počítačem řízené výrobní systémy s aplikací moderních modulů přinesly výrazné snížení vedlejších časů koputerizací pohybů a funkcí strojů. To byla první etapa zásadní koncepční přeměny v této oblasti. Druhá, jež by měla završit vyplnění vakantního prostoru v oblasti výkonových parametrů, je etapa intenzifikace vlastního řezného procesu. V této etapě bude zcela jistě plnit významnou úlohu tzv. vysokorychlostní obrábění (HSC), technologický proces sledující zvýšení úběru třísek a kvality obráběného povrchu podstatným zvýšením řezné rychlosti při sníženém průřezu třísky a snížené řezné síle.

Jak při konstrukci vlastního stroje, tak i nástroje v nových podmínkách hraje, více jak kdy dříve, významnou roli komplexní řešení systému stroj – nástroj. Dominantní postavení, na které navazují všechna ostatní však zaujímá srdce tohoto systému – nástroj, jemuž především je věnována tato disertační práce.

## 2. Cíl a obsah práce

Pilový kotouč je při podélném rozřezávání dřeva vystaven silovým a teplotním zatěžujícím účinkům vlastního řezného procesu, namáhání od odstředivých sil a teplotnímu namáhání od doprovodných pasivních odporů mezi tělem nástroje a řeznou plochou, případně mezi tělem a napěchovanými třískami. Každý z těchto zatěžujících účinků se podílí svou měrou na vyvolání napjatosti a deformace nástroje.

Z technologických a pevnostních důvodů je nástroj opatřen řadou řezných prvků ( řezné, vynášecí zuby – dlouhé tenké destičky připájené do rovinných částí otvorů v těle pilového kotouče ) ze slinutého karbidu či tvarových prvků ( tepelné dilatační drážky na obvodu či uvnitř těla nástroje, odlehčovací otvory ), které mají zajistit co nejúčinnější provoz vlastního nástroje.

Cílem práce je experimentální určení silových a teplotních zatěžujících účinků pro několik vybraných zatěžujících stavů, nástrojů, materiálů a parametrů řezného procesu, jejich formalizace a stanovení vzájemných vazeb a závislostí, zjištění

materiálových charakteristik a jejich teplotních závislostí, vytvoření základního výpočtového modelu pro analytické a numerické řešení metodou konečných prvků pro konkrétní rozsah měřených řezných podmínek, použité nástroje a obráběný materiál. Na základě těchto výpočtových modelů pak určit napjatost v pilovém kotouči, výsledky porovnat, určit míru odlišnosti a posoudit vhodnost použití jednotlivých modelů. Dále pak, na základě závislosti jednotlivých zatěžujících účinků na řezné rychlosti, stanovit napjatost v těle kotouče při různých otáčkách a posoudit mezní možnosti a podmínky zvýšení, v současnosti používané, hodnoty řezné rychlosti.

Na základě zjištěných skutečností určit základní zákonitosti a omezující podmínky zvyšování řezných rychlostí při podélném rozřezávání dřeva pilovými kotouči, které tak budou vedle technologických a konstrukčních základními omezujícími podmínkami vysokorychlostního obrábění řezáním.

Dalším cílem je posoudit vliv polohy a rozměrů otvorových prvků na napjatost pilového kotouče.

Získané výsledky včetně zjištěných případných doprovodných vlivů pak na stávající možné úrovni zobecnit.

### 3. Současný stav řešené problematiky

Problematika obrábění dřeva je velmi rozsáhlá a dosud neúplně zpracována, především díky rozsáhlé variabilitě parametrů řezného procesu (druh a stavba dřeva, směr řezu vůči dřevním vláknům, nehomogenita, vlhkost, měrná hmotnost, tvrdost, teplota), různému provedení a uspořádání strojů, nástrojů apod. Kromě výrazné specifčnosti materiálových parametrů má svůj osobitý ráz i vlastní technologie obrábění, vyznačující se především vysokými řeznými rychlostmi a suchým obráběním.

Z hlediska teorie spojující závislost technologie obrábění – nástroj se vyskytuje poměrně malé množství informací. Přehled o současném stavu a úrovni poznatků v dané oblasti je tvořen především analogickými a aplikačními informacemi získanými z příbuzných oblastí a základních vědních oborů.

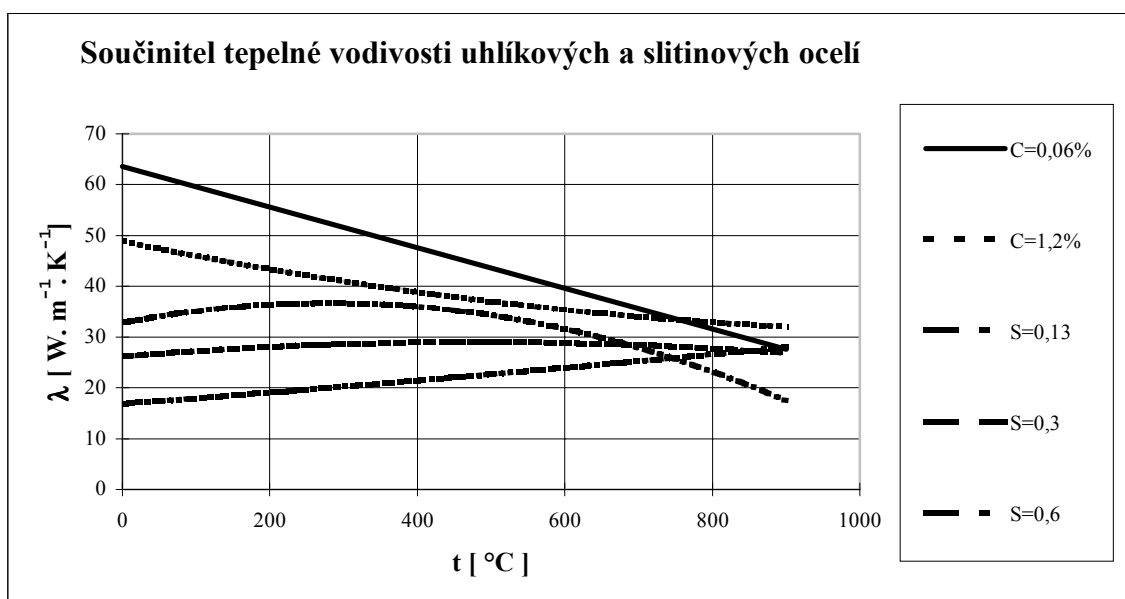
V následujícím přehledu jsou uvedeny poznatky vztahující se k zatěžujícím podmínkám nástroje.

Jednou ze základních zatěžujících veličin nástroje je teplotní zatížení. Analýza této oblasti nutně souvisí s problematikou přetváření jednotlivých forem tepelné energie a jejím šířením vlastním nástrojem.

Energetickou přeměnu doprovází tři druhy sdílení tepla. První druhem je tepelná kondukce charakterizovaná Fourierovým zákonem :

$$Q = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad } t \quad (3.1)$$

Její závislost na druhu materiálu a teplotě uvádí následující obrázek.



Obr. 3.1 Průběh součinitele tepelné vodivosti ocelí dle chemického složení

Kde S a C charakterizují chemické složení jednotlivých ocelí lit.[11].

Dalším druhem sdílení tepla je tepelná konvekce, charakterizovaná součinitelem přestupu tepla  $\alpha$ . Součinitel přestupu tepla závisí na vlastnostech proudící tekutiny (měrná hmotnost, tepelná vodivost, měrné teplo, viskozita), charakteru proudění, drsnosti stěny a druhu mezní vrstvy. Podstatný vliv má druh proudění.

Pro výpočet Nusseltova čísla či součinitele přestupu tepla jsou uváděny různými autory následující vztahy.

a) Pro plně turbulentní oblast při nucené konvekci rotujícího disku uvádí lit. [15].

$$Nu_x = \frac{Re \cdot Pr \cdot C_{fx} / 2}{1 + \left( C_{fx} / 2 \right)^{0,5} \{5 Pr + 5 \ln(5 Pr + 1) - 14\}} \quad (3.2)$$

$$C_{fx} = \frac{5 + 2n}{4\pi} C_M \quad (3.3)$$

$$\text{pro } Re \in \langle 10^6; 10^7 \rangle \quad C_{fx}/2 = 0,0267 \cdot Re^{-0,2}$$

$$C_M = 0,15 Re_r^{-0,2} \quad (3.4)$$

r je poloměr kotouče

n = 0 pro izotermický kotouč, n = 2 pro parabolicky rozloženou teplotu

K přechodu od laminárního k turbulentnímu proudění u rotujícího disku dochází při  $Re \approx 1,8 \cdot 10^5$ , plná turbulence nastává při  $Re \approx 2,8 \cdot 10^5$ . Zvyšování drsnosti povrchu disku vede ke snižování této kritické hodnoty Re. Theodorsen a Regier zjistili, že vlivem drsného povrchu může poklesnout Re z  $2,2 \cdot 10^5$  na  $1,2 \cdot 10^5$ . Experimentální výsledky ukázaly, že bude-li rychlost otáčení disku menší než rychlost proudícího okolního prostředí, bude konvekční přenos tepla pouze o něco málo větší než přenos tepla z neotáčejícího se disku. Salzberg a Kezios uvádějí hranici  $\omega L/u_\infty < 1,5$ .

b) Dle lit.[11] je součinitel přestupu tepla z povrchu rotujícího válce pro  $10^3 < Re \leq 2,2 \cdot 10^3$

$$\alpha \cong 1,26 \cdot 10^{-4} \frac{w^{0,76}}{d^{0,24}} \quad \left[ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \right] \quad (2.5)$$

kde w [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] značí rychlost proudícího vzduchu ( při obrábění je tato rychlost stejná jako obvodová rychlost nástroje ).

c) Lit. [20, 21] uvádí pro rotující disk:

$$Nu = 0,333 \cdot Re^{0,5} \quad (3.6)$$

pro  $Re \in (3,3 \cdot 10^4 - 2,7 \cdot 10^5)$ , kde  $Re = \omega \cdot R^2 / \nu$

d) Lit. [23] uvádí pro rotující disk :

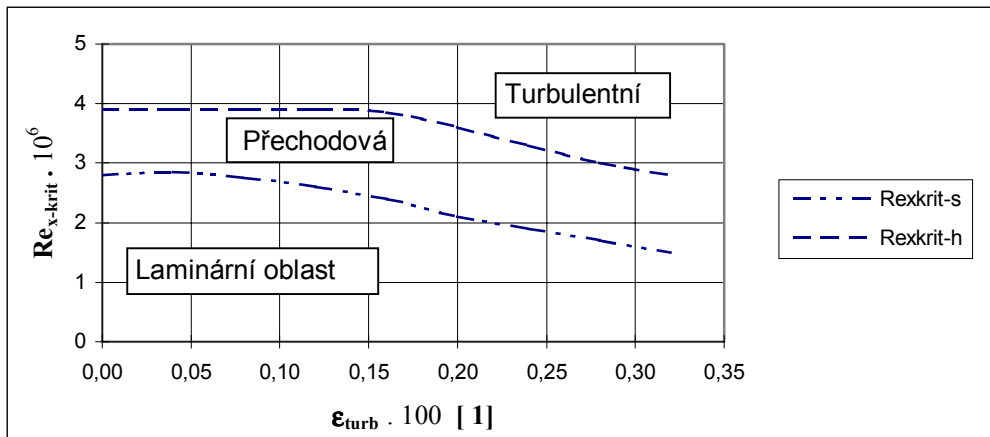
$$Nu = 0,0188 \cdot Re_r^{0,8} \quad \text{pro } Re_r \in (2,5 \cdot 10^5 - 6,7 \cdot 10^5) \quad (3.7)$$

e) Lit. [30] uvádí pro rotující kotouč :

$$Nu = 0,36 \cdot Re^{0,5} \quad (3.8)$$

Přechod laminárního proudění na turbulentní v mezní vrstvě závisí na intenzitě turbulence proudění lit. [9] :

$$\varepsilon_{turb} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} (w_x^2 + w_y^2 + w_z^2)}}{w_s} \quad (3.9)$$



Obr. 3.2 Vliv intenzity turbulence na kritické Reynoldsovo číslo

Utváření a rozmístění jednotlivých oblastí proudění podél těla rotujícího kotouče v závislosti na rychlosti otáčení uvádí lit.[24]. Z literatury je patrné, že při nízkých hodnotách intenzity turbulence  $\epsilon_{\text{turb}} = 0,02$  dosáhla kritická hodnota čísla  $Re_{x\text{-krit}}$  výše téměř  $3 \cdot 10^6$ , zatímco při vysokých hodnotách  $\epsilon_{\text{turb}} = 0,32$  klesla tato hodnota téměř na polovinu.

Dle R. J. Lingwood lit [25] přechodová oblast začíná v rozmezí Reynoldsových čísel (definovaných jako  $R = r \cdot (\omega / \nu)^{0,5} = \sqrt{Re}$ )  $R \approx 502 - 514$ , plně turbulentní proudění nastává od  $R \approx 615$ . Le Gal lit. [27] uvádí přechodové  $R \approx 520$ .

Touto problematikou se zabývali též Wilkinson a Malik lit. [26]. Ti zkoumali též vliv tvarových prvků a drsnosti povrchu rotujícího disku na vlastnosti jednotlivých druhů proudění.

Zmínění autoři došli k poznatku, že počet vírů narůstá s hodnotou Reynoldsova čísla  $R$ , v oblasti s  $R \leq 250$  se vyskytuje nepatrné množství nesourodých vírových klubek, v oblasti  $250 \leq R \leq 350$  dochází k intenzivnímu nárůstu vírů a při  $R > 350$  již ke stagnaci. Dále je vidět, že u zdrsněného kotouče je výrazně vyšší fluktuace rychlosti proudění během otáčky kotouče.

Autoři dospěli k závěru, že přechodová oblast proudění při rotaci zdrsněného kotouče je oproti oblasti hladkého kotouče posunuta z  $R \in (543; 556)$  na  $R \in (521; 530)$ . Výše uvedené poznatky lze aplikovat u rotujících kotoučů s cílem ovlivnění součinitele přestupu tepla a tím též průběhu teploty a napjatosti v pilovém kotouči.

Při vlastní napjatostní analýze pilového kotouče je nutno vycházet z hodnot radiálních a tečných napětí od vnějších sil, teplotního a odstředivého zatížení. Podrobnější rozbor napětí u pilových kotoučů s otvorovými prvky v těle není v literatuře dosud uveden.



## 4. Zvolené metody a zpracování

### 4.1 Určení materiálových charakteristik

a) Tepelná vodivost

$$\lambda = -2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,0073 \cdot t + 45,83 \quad [ \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} ] \quad (4.1)$$

b) Součinitel délkové teplotní roztažnosti

$$\alpha = (-9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0128 \cdot t + 10) \cdot 10^{-6} \quad [ 1 / ^\circ\text{C} ] \quad (4.2)$$

c) Modul pružnosti v tahu

$$E = (-9\text{E-}07 \cdot t^2 - 0,0003 \cdot t + 1,9775) \cdot 10^5 \quad [ \text{MPa} ] \quad (4.3)$$

d) Měrná hmotnost

$$\rho = (-10^{-7} \cdot t^2 - 0,0003 \cdot t + 7,922) \cdot 10^3 \quad [ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} ] \quad (4.5)$$

Z průběhů jednotlivých veličin pro daný materiál je patrné, že pro uvažované rozmezí teplot 0 – 200 °C se tepelná vodivost mění v rozsahu cca 4%, součinitel délkové teplotní roztažnosti v rozsahu 21%, Youngův modul pružnosti v tahu v rozsahu 5% a měrná hmotnost se mění v rozsahu menším jak 1%. Z výše uvedených skutečností vyplývá, že kromě součinitele teplotní roztažnosti není teplotní závislost ostatních veličin pro uvažovaný rozsah teplot podstatná. V případě teplot vyšších, se však i tyto podstatně mění a ve výpočtech je třeba s nimi uvažovat.

### 4.2 Určení zatěžujících účinků

Z důvodu nedostatku vstupních informací o řezném procesu a vlastním měření a s ohledem na velké množství silně proměnlivých vlivů na zatěžující účinky byla experimentální část rozdělena na dvě etapy.

Cílem první etapy - vstupního experimentu, prováděné v poloprovozních technologických podmínkách, bylo otestování zkušebních prostředků, zařízení, měřících přístrojů při vlastním řezném procesu, rozbor jednotlivých vlivů především z kvalitativního hlediska, posouzení získaných výsledků a příprava podmínek druhé etapy s cílem maximální objektivizace měření.

Druhá etapa - informační experiment byla prováděna již v laboratorních podmínkách nastavených dle poznatků získaných v předchozí etapě, s bezprostředním zaměřením na kvalitativní a kvantitativní určení potřebných parametrů.

Experimenty byly prováděny za následujících řezných podmínek, při použití následujících obráběných materiálů a nástrojů. Materiál – buk, vlhkost 25 a 40 %, výška řezu 48 a 65 mm, teplota okolí 5 a 18°C, řezná rychlost 50, 64, 70, 80 a 90 m.s<sup>-1</sup>, rychlost posuvu 6, 10, 15, 30 m.min<sup>-1</sup>, nástroje fy Freud – průměr 350 mm, šířka zubu 3,5 mm – jeden kotouč s plným tělem, dva s různým provedením

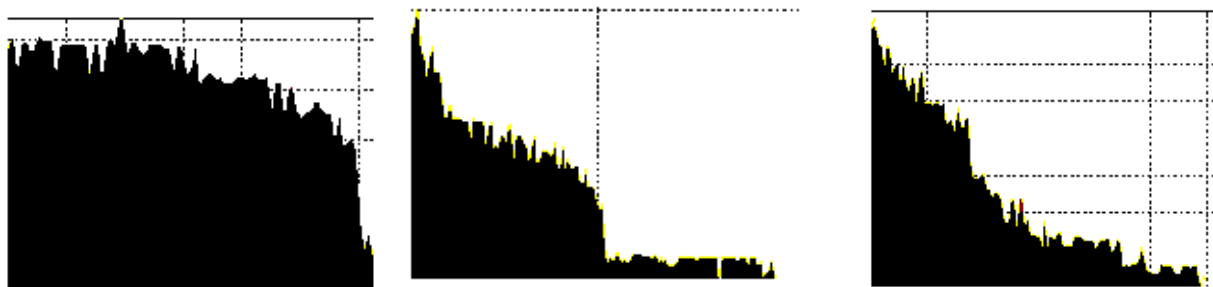
otvorových prvků a jeden se speciální povrchovou úpravou, emisivita 0,34 a 0,96, způsob obrábění – spodní a horní protisměrné řezání.

Experimentální řetězec tvořil nástroj s pohonnou jednotkou s plynule nastavitelnou rychlostí otáčení, posuvový systém s plynule nastavitelnou rychlostí posuvu, snímač otočného momentu na vřetenu, snímač posuvové síly a termovize. Jednotlivé měřicí jednotky byly napojeny na počítačové vybavení kde byly zaznamenávány výsledky měření.

Výsledky měření vstupních parametrů:

Naměřené hodnoty točivého momentu na vřetenu nástroje se pohybovaly v rozmezí 7 – 19 Nm a posuvová síla v rozmezí 38 – 55 N, dle druhu použitého kotouče a nastavených řezných podmínek.

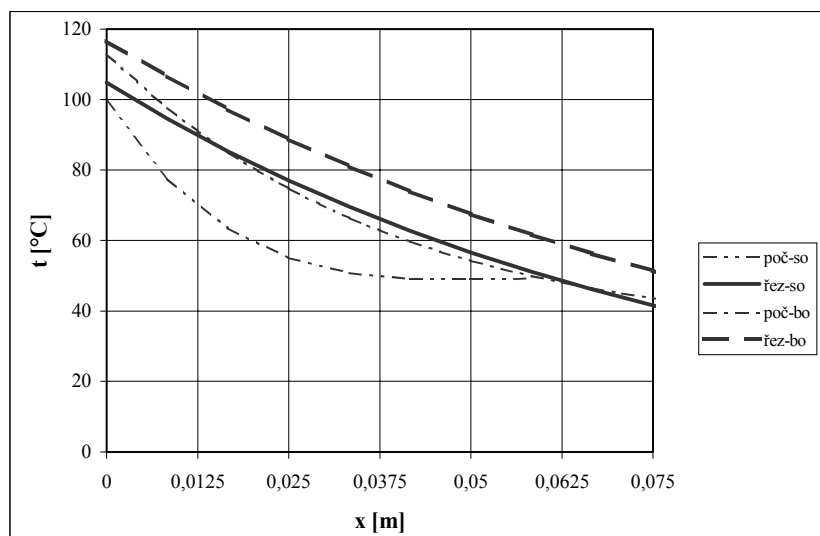
Vývoj průběhu teploty po poloměru pilového kotouče v závislosti na čase uvádí následující obrázek.



Obr. 4.1 Časový vývoj průběhu teploty podél  $x$  – vzdálenosti od vnějšího  $\rightarrow$  obvodu nástroje ke středu

Z obr.4.1 patrné utváření tvaru teplotní křivky od téměř konstantního ( nástroj není v řezu) přes silně proměnný ( přechodová oblast) po rovnoměrný (ustálený) stav. K teplotnímu ustálení dojde cca za 20s.

Následující obrázek uvádí průběhy konkrétních teplot zjištěných při experimentu.



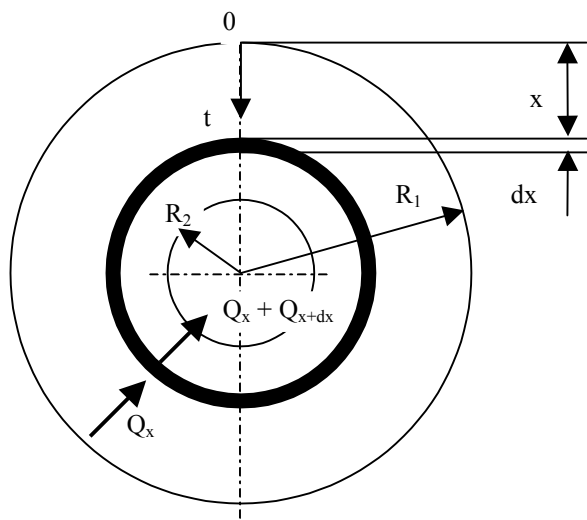
Obr. 4.2 Výsledky měření teplot termovizí

## 5. Hlavní výsledky práce

### 5.1 Rozbor teplotních charakteristik

#### Analytické řešení průběhu součinitele přestupu tepla

Při řešení byla použita nepřímá metoda zjišťování součinitele přestupu tepla vycházející z tepelné bilance pilového kotouče. Řešení bylo prováděno analyticky a numericky.



Obr. 5.1 Model tepelné rovnováhy

Rozdílové teplo ve vzdálenosti  $x$  od špičky nástroje:

$$dQ_x = \frac{d}{dx}(Q_x) dx = \left[ 2\pi \cdot h \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dx} - 2\pi \cdot h \cdot (R_2 - x) \cdot \lambda \cdot \frac{d^2t}{dx^2} - 2\pi \cdot h \cdot (R_2 - x) \cdot \frac{d\lambda}{dx} \cdot \frac{dt}{dx} \right] dx \quad (5.1)$$

Celkový součinitel přestupu tepla :

$$\alpha_{celk} = \frac{-h \cdot \left[ \lambda \frac{dt}{dx} - (R_2 - x) \cdot \left( \lambda \frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d\lambda}{dx} \cdot \frac{dt}{dx} \right) \right]}{2(R_2 - x) \cdot (t - t_{ok})} \quad (5.2)$$

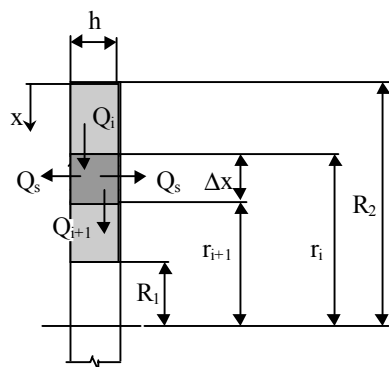
Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_{sál} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T^4 - T_{ok}^4)}{t - t_{ok}} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T^2 + T_{ok}^2) \cdot (T + T_{ok}) \quad (5.3)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí:

$$\alpha_{kv} = \alpha_{celk} - \alpha_{sál} \quad (5.4)$$

## Numerické řešení průběhu součinitele přestupu tepla



Obr. 5.2 Tepelná rovnováha elementu

$$\alpha_j = \left[ \lambda_i r_i \left( \frac{dT}{dx} \right)_i - \lambda_{i+1} r_{i+1} \left( \frac{dT}{dx} \right)_{i+1} \right] \frac{h}{(r_i + r_{i+1}) \cdot \Delta x \cdot \left( \frac{t_i + t_{i+1}}{2} - t_\infty \right)} \quad (5.5)$$

$$i = 0, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n$$

$$\Delta x = (R_2 - R_1) / n \quad (5.6)$$

$$r_i = R_2 - i \cdot \Delta x \quad (5.7)$$

$$r_{i+1} = r_i - \Delta x = R_2 - i \cdot \Delta x - \Delta x = R_2 - \Delta x \cdot (i + 1) \quad (5.8)$$

$$\left( \frac{dT}{dx} \right)_i \dots \text{hodnota derivace teploty podle } x \text{ v místě } i$$

Na základě porovnání přesností jednotlivých řešení lze konstatovat, že numerické řešení je z hlediska přesnosti srovnatelné analytickým řešením pro konstantní teplotní vodivost.

Určení průběhu konkrétního součinitele přestupu tepla je problém velmi specifický, závislý na celé řadě skutečností a vlivů, z nichž některé velmi podstatnou měrou ovlivňují celý jeho průběh. Velmi podstatnou veličinou působící na průběh a velikost součinitele přestupu tepla je teplota pilového kotouče. Přesnost jeho určení je výrazně ovlivněna přesností určení teploty zubu se zohledněním vzduchových mezer, čehož lze dosáhnout použitím termovizní kamery s rychlostí snímání odpovídající rychlosti otáčení kotouče.

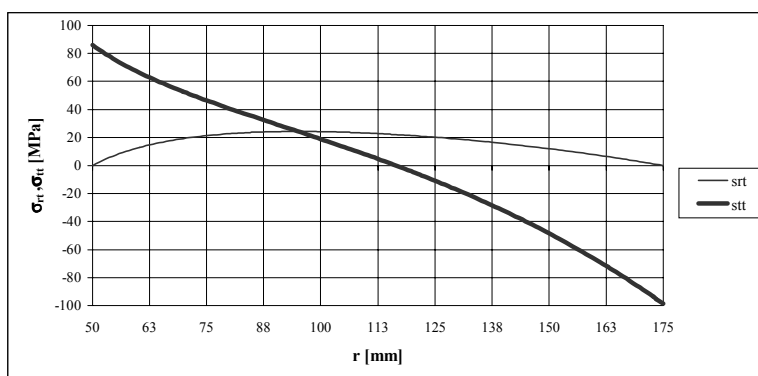
Z hlediska zvýšení přesnosti je třeba opatřit kotouč povrchovou úpravou s vysokým koeficientem emisivity. V našem případě se velmi dobře osvědčila vypalovací látka firmy Molykote.

## 5.2 Analýza napjatosti pilového kotouče

Následující analýza napětí pilového kotouče vychází ze vstupních parametrů (teplota, kroutící moment) zjištěných experimentem. Některé poznatky jsou na stávající možné úrovni zobecněny.

### Analytické řešení napjatosti kotouče

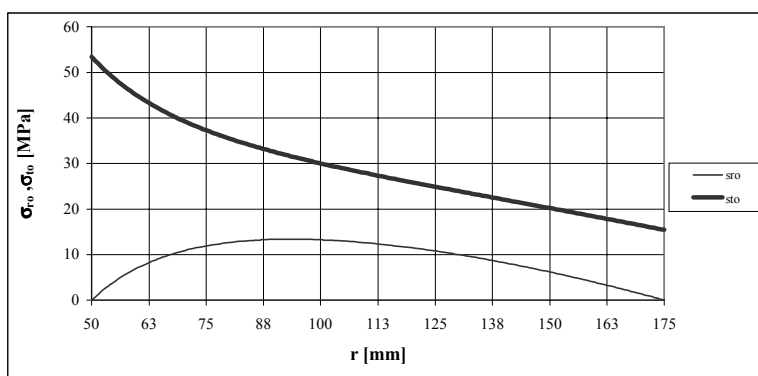
#### *Napětí od teplotního zatížení*



Obr. 5.3 Radiální a tečné napětí od teplotního zatížení

Z grafu je patrný nepříznivý průběh tečného napětí především v oblasti poloměrů větších jak 116 mm, kde napětí přechází do záporných hodnot (bod zvratu), což negativně ovlivňuje tvarovou stabilitu kotouče v této oblasti a způsobuje vyboulení kotouče.

#### *Napětí od odstředivých sil*



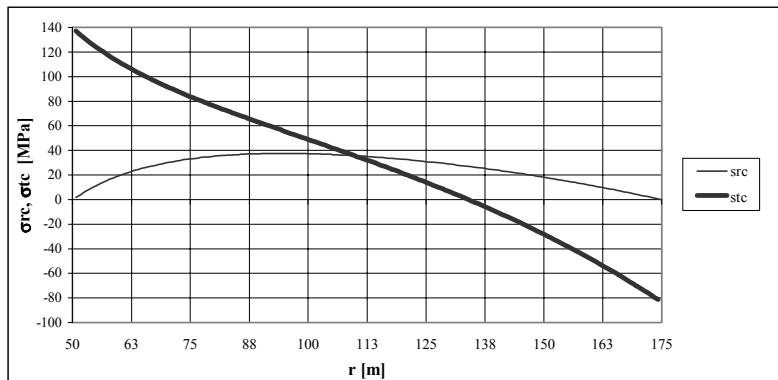
Obr. 5.4 Radiální a tečné napětí od setrvačných sil

Jak je vidět, napětí od odstředivých sil jsou podstatně nižší než od teploty. Navíc v oblasti větších poloměrů má tečné napětí kladnou hodnotu, což pomáhá v této oblasti částečně eliminovat negativní vliv tečného napětí od teplotního zatížení.

### Napětí od kroutícího momentu

Napětí od kroutícího momentu dosahují velmi nízkých hodnot, což ukazuje na nepodstatnost vlivu kroutícího momentu na napjatost kotouče a v následující analýze tedy již nebylo uvažováno.

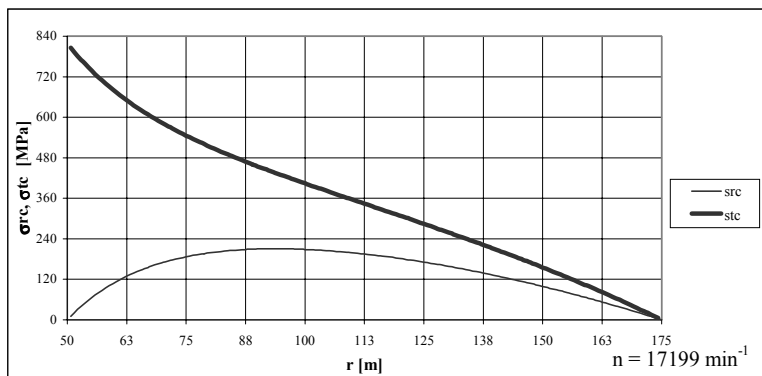
### Celková napětí



Obr. 5.5 Radiální a tečné napětí od celkového zatížení při  $n=4914\text{min}^{-1}$

Průběh celkového napětí tvarově kopíruje průběh napětí od teplotního zatížení. Vliv odstředivých silových účinků se projevuje, vedle určitého zvýšení napětí v oblasti malých poloměrů, posunutím nepříznivé oblasti tlakových tečných napětí o cca 16mm na poloměr 134mm. Současně snižuje hodnotu tlakového napětí ve vnější části kotouče.

### Rozbor vlivu otáček na napjatost kotouče



Obr. 5.6 Radiální a tečné napětí od celkového zatížení při  $n=17799\text{min}^{-1}$

Z grafů je vidět podstatný nárůst vlivu napětí od odstředivých sil s nárůstem otáček, který se projevuje posuvem bodu zvratu k větším poloměrům a snižováním tlakového napětí ve vnější oblasti kotouče, vedoucí při otáčkách  $17799\text{min}^{-1}$  až k jeho úplné eliminaci.

## Numerické řešení napjatosti kotouče

K řešení byl použit modul Pro/MECHANICA softwarového systému Pro/ENGINEER. Jako výpočetní metoda byla použita metoda geometrických prvků GEM.

Vlastní analýza byla provedena pro tři tvarově odlišné typy pilových kotoučů o stejném průměru, tloušťce a materiálu. Při výpočtu byly použity okrajové podmínky a vstupní parametry určené z dříve popsáního experimentálního měření.

### *Rozbor výsledků řešení*

#### a) Vliv řezných sil na celkové napětí kotouče

Vliv řezných sil byl posuzován u plného pilového kotouče, upnutého přírubou, zatíženého řezným momentem 10,46 Nm. Výsledná napětí se pohybovala v jednotkách MPa, což jsou, oproti napětí od odstředivých či teplotních zatěžujících účinků, hodnoty nepodstatné.

#### b) Vliv otáček na napětí kotouče

Při analýze byla u plného kotouče posuzována napětí při otáčkách 4914 min<sup>-1</sup> a teplotě zubu 104°C a při otáčkách 9828 min<sup>-1</sup> a teplotě 159°C. U obou případů byla sledována napětí od odstředivých sil, od teplotního zatížení a napětí celkové.

Z porovnání napětí při různých otáčkách vyplývá mnohem výraznější nárůst napětí od odstředivých sil přibližně s druhou mocninou než od teplotního zatížení (přibližně o 70% při dvojnásobném zvýšení otáček). Ze složek odstředivého napětí narůstá výrazněji tečné napětí.

Pozitivní vliv tahových napětí je znát na poklesu tlakové složky celkového tečného napětí, což odpovídá poznatkům při analytickém řešení.

## 6. Závěr

Práce se zabývala analýzou zatížení pilového kotouče při daném řezném procesu. Z jednotlivých rozborů získaných výsledků vplynuly následující závěry.

Průběh teplot pilových kotoučů je ovlivněn rozsáhlým spektrem vstupních podmínek, na řadě z nich podstatnou měrou závisí.

Doba ustálení teploty kotouče se pohybuje řádově v desítkách sekund, což je doba po které lze uvažovat rozložení teplot jako stacionární.

Při měření se projevil též vliv odsávání, které způsobilo snížení teploty cca o 10°C a to již při poměrně nízké rychlosti odsávání (do 1,8 m.s<sup>-1</sup>) v okolí kotouče.

Určení průběhu konkrétního součinitele přestupu tepla je problém velmi specifický, závislý na celé řadě skutečností a vlivů, z nichž některé velmi podstatnou měrou ovlivňují celý jeho průběh. Velmi podstatnou veličinou působící na průběh a velikost součinitele přestupu tepla je teplota pilového kotouče. Přesnost jeho určení

je výrazně ovlivněna přesností určení teploty zubu, čehož lze dosáhnout použitím termovizní kamery s rychlostí snímání odpovídající rychlosti otáčení kotouče.

Z hlediska zvýšení přesnosti je třeba opatřit kotouč povrchovou úpravou s vysokým koeficientem emisivity. V našem případě se velmi dobře osvědčila vypalovací látka firmy Molykote.

Z analytického řešení napjatosti kotouče vyplynul nepříznivý průběh tečného napětí od teplotního zatížení především v oblasti poloměrů kotoučů větších jak hodnota bodu zvratu, kde přechází do záporných hodnot, což negativně ovlivňuje tvarovou stabilitu kotouče v této oblasti. V oblasti větších poloměrů má tečné napětí od odstředivých sil kladnou hodnotu, což pomáhá v této oblasti částečně eliminovat negativní vliv tečného napětí od teplotního zatížení. Tečná napětí mají dominantní vliv.

S nárůstem otáček kotouče narůstá napětí od teplotního zatížení úměrně nárůstu teploty, avšak pomaleji než napětí od odstředivých sil. Poloha bodu zvratu se vlivem změny teploty u těchto napětí nemění.

Napětí od odstředivých sil narůstá přibližně s druhou mocninou otáček a jeho vliv s nárůstem otáček získává dominantní postavení. Ve vnitřní oblasti kotouče zvyšuje zatížení odstředivými silami celkové tahové napětí, zatímco ve vnější oblasti působí proti negativnímu působení tlakového napětí od teplotního zatížení. Vliv působení odstředivých sil se projevuje posuvem bodu zvratu k vyšším hodnotám poloměru. Díky popsánému vývoji tečných napětí existují otáčky, při nichž dochází k úplné eliminaci tlakového tečného napětí od teplotního zatížení, což je námět pro posun základních parametrů nástroje a dané technologie.

Z výsledků numerického řešení jsou vidět podstatné rozdíly napětí jednotlivých tvarů kotoučů. Tyto rozdíly jsou představovány různými hodnotami lokálních napětí v místech jejich koncentrací, daných různými tvary otvorových prvků.

Největší nárůst napětí se vyskytuje v oblastech jejich koncentrace tj. v okolí dilatačních drážek a otvorových prvků. Podstatný vliv na nárůst napětí od odstředivých sil mají otvorové prvky zasahující do oblasti malých poloměrů kotouče, kde je toto napětí největší.

Napětí od řezných sil se pohybovala v desetinách procent celkového napětí, což jsou, oproti napětí od odstředivých či teplotních zatěžujících účinků, hodnoty nepodstatné.

Kvalitativní závěry analytického a numerického řešení napjatosti se shodují a lze konstatovat, že analytické řešení napjatosti pilového kotouče je vhodné pouze z hlediska kvalitativního rozboru napjatosti, numerické řešení pak pro konkrétní kvantitativní určení napětí a deformací.

Daný problém nebyl dosud ještě řešen, takže zahájení výzkumu v této oblasti bylo nutně provázeno řadou hledání a nepředpokládaných problémů. Při řešení byl stanoven rámcový postup určování teplotního zatížení pilového kotouče. Je však třeba ještě zpřesnit snímání a vyhodnocování průběhu teploty a výsledky otestovat jinou metodou za pohybu.



Uvedené závěry platí pro daný rozsah použitých rezných a zatěžujících podmínek a jejich zobecnění má pouze omezenou platnost (trendy vývoje zatěžujících podmínek, vlivů rezných podmínek, napětí, tvarových prvků apod.). Pro dosažení vyššího stupně zobecnění by bylo třeba provést mnohem větší počet měření a analýz, což však vzhledem k omezeným časovým a materiálně finančním podmínkám nebylo možno zajistit. Vzhledem k absenci jakékoli zásadnější práce na dané téma mohou posloužit použité metody, modely a poznatky k dalšímu rozvoji výzkumu v této oblasti.

Závislost mezi teplotou, ostatními zatěžujícími účinky a napjatostí lze využít při inprocesním monitorování namáhání daného pilového kotouče.

Zjištěné poznatky výraznou měrou napomohou též řešení problematiky tzv. vysokorychlostního obrábění (HSC), moderní a vysoce efektivní metody obrábění.

## Seznam použitých veličin

a	součinitel teplotní vodivosti	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$a_t$	koeficient teplotní funkce	$[^{\circ}C]$
$b_t$	koeficient teplotní funkce	$[m^{-1}]$
c	měrné teplo	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_p$	měrné teplo za konstantního tlaku	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{\lambda}$	koeficient funkce teplotní vodivosti	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-3}]$
d	průměr rotujícího válce	$[m]$
$d_{\lambda}$	koeficient funkce teplotní vodivosti	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}]$
$d_{\lambda}$	koeficient funkce teplotní vodivosti	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}]$
$e_{\lambda}$	koeficient funkce teplotní vodivosti	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
E	modul pružnosti v tahu	$[MPa]$
h	tloušťka kotouče	$[mm]$
$L_d$	délka obtékané desky	$[m]$
l	Charakteristický rozměr	$[m]$
M	Machovo číslo	$[1]$
n	otáčky kotouče	$[min^{-1}]$
n	počet dělení při numerickém výpočtu součinitele přestupu tepla	$[1]$
Nu	Nusseltovo číslo	$[1]$
$Nu_x$	místní Nuseltovo číslo	$[1]$
Pr, $Pr_s$	Prandtlovo číslo	$[1]$
$p_{1,2}$	měrné tlakové zatížení na vnějším, vnitřním poloměru kotouče	$[MPa]$
Q	celkový tepelný tok	$[W]$
$Q_i$	tepelný tok vstupující do elementu	$[W]$
$Q_{i+1}$	tepelný tok vystupující z elementu	$[W]$
$Q_s$	tepelný tok vystupující stěnou kotouče	$[W]$

$q$	měrný tepelný tok	[ W.m <sup>-1</sup> ]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[ 1 ]
$R$	rotační Reynoldsovo číslo	[ 1 ]
$Re_x$	místní Reynoldsovo číslo	[ 1 ]
$Re_{x-krit}$	kritická hodnota místního Reynoldsova čísla	[ 1 ]
$Re_{xkrit-h}$	horní kritická hodnota místního Reynoldsova čísla	[ 1 ]
$Re_{xkrit-s}$	spodní kritická hodnota místního Reynoldsova čísla	[ 1 ]
$R_{1,2}$	vnitřní a vnější poloměr kotouče	[ m, mm ]
$r$	poloměr kotouče	[ m, mm ]
$r_D$	vnější poloměr kotouče	[ m ]
$r_i$	vnější poloměr elementu	[ m ]
$r_{i+1}$	vnitřní poloměr elementu	[ m ]
$r_0$	poloměr kotouče při $x = 0$	[ m ]
$S$	obsah plochy procházené teplem, teplosměnné plochy	[ m <sup>2</sup> ]
$srt$	radiální napětí od teplotního zatížení	[ MPa ]
$stt$	tečné napětí od teplotního zatížení	[ MPa ]
$sro$	radiální napětí od odstředivého zatížení	[ MPa ]
$sto$	tečné napětí od odstředivého zatížení	[ MPa ]
$src$	celkové radiální napětí	[ MPa ]
$stc$	celkové tečné napětí	[ MPa ]
$To$	teplota zubu pilového kotouče	[ °C ]
$T_s$	teplota stěny	[ K ]
$T_{*s}$	teplota stěny zvýšená účinkem třecího tepla	[ K ]
$T_\infty$	teplota proudící tekutiny	[ K ]
$t$	teplota	[ °C ]
$t_{ok}$	teplota okolí	[ °C ]
$t_s$	teplota stěny	[ °C ]
$w$	rychlost proudění tekutiny	[ m.s <sup>-1</sup> ]
$w_s$	střední rychlost proudícího prostředí, vztažená na charakt. Plochu	[ m.s <sup>-1</sup> ]
$w_{x,y,z}$	rychlost proudění tekutiny ve směru x, y,z	[ m.s <sup>-1</sup> ]
$w_\infty$	ustálená rychlost proudění	[ m.s <sup>-1</sup> ]
$x$	vzdálenost od špičky zubu do středu kotouče	[ m, mm ]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	součinitel délkové teplotní roztažnosti	[ K <sup>-1</sup> , °C <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{a1}$	celkový souč. přestupu tepla analytické řešení uvažující proměnlivou tepelnou vodivost	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{a2}$	celkový souč. přestupu tepla analytické řešení uvažující konstantní tepelnou vodivost	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{celk}$	celkový součinitel přestupu tepla	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{kv}$	součinitel přestupu tepla konvekci	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{sál}$	součinitel přestupu tepla sáláním	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_x$	místní součinitel přestupu tepla	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]

$\varepsilon$	poměrná sálavost, emisivita	[1]
$\varepsilon_{\text{turb}}$	intenzita turbulence	[1]
$\eta$	dynamická viskozita	[N.s.m <sup>-2</sup> ]
$\lambda$	tepelná vodivost	[ W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\bar{\lambda}$	střední hodnota tepelné vodivosti	[ W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\mu$	Poissonovo číslo	[1]
$\Theta$	rozdíl teplot	[K]
$\rho$	měrná hmotnost	[ kg.m <sup>-3</sup> ]
$\sigma_r$	radiální napětí	[MPa]
$\sigma_t$	tečné napětí	[MPa]

## Literatura

- [1] Enenkl, V., Hloušek, J., Janotková, E. : Termomechanika, skriptum VUT Brno, 1983
- [2] Sazima, M., Kmoníček, V., Schneller, J. a kol.: Technický průvodce 2 - TEPLO. Praha, SNTL, 1989
- [3] VDI Wärmeatlas - Berechnungslätter für den Wärmeübergang , Düsseldorf, VDI - Verlag GmbH, 1977
- [4] Michejev, M. A.- Michejeva, I. M.: Osnovy teploperedaci. Moskva, Izd. Energija, 1973
- [5] Vampola, J. : Přestup tepla a tlakové ztráty při proudění plynu svazkem žebrovaných trubek. Strojírnoství 16, 1966, 7, s. 501 - 507
- [6] Enenkl, V., Ramík, Z. : Sdílení tepla IA, skriptum VUT Brno, 1974
- [7] Sazima, M. : Sdílení tepla, skriptum ČVUT Praha, 1973
- [8] Černocho, S. : Strojně technická příručka, SNTL Praha, 1959
- [9] Šorin, S.N. : Sdílení tepla, SNTL Praha, 1968
- [10] Michejev, M. A. : Osnovy teploperedaci , Gosudarstvennoje energetičeskoje izdatělstvo Moskva, 1956
- [11] Hloušek, J., Patočka, Z. : Aplikovaná termomechanika skriptum VUT Brno, SNTL Praha, 1973
- [12] Kays, W.M., Crawford, M.E. : Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993
- [13] Gebhart, B. : Heat Transfer, McGraw Hill Book Company, New York , 1971
- [14] Cornwell, K. : The Flow of Heat, Van Nostrand Reinhold Company, Wokingham, 1977
- [15] Kreith, F. : Convection Heat Transfer in Rotating Systems, Advances in Heat Transfer, New York, London, 1968
- [16] Dorfman, L. A. : Hydrodynamics Resistance and the Heat Loss of Rotating Solids, Oliver&Boyd, Edinburgh and London, 1963

- [17] Tykva, J. : Přehled hlavních fyzikálních vlastností několika konstrukčních ocelí, používaných ve stavbě tepelných energetických zařízení, Strojírenství, sv.13, SNTL Praha, 1963
- [18] ČSN 415231, ÚNM Praha, 1977
- [19] Kříž, R., Vávra, P. : Strojírenská příručka, 3.sv., Scientia, Praha 1993
- [20] Janotková, E., Pavelek, M. : Určování přestupu tepla z rotujícího povrchu naftalenovou sublimační metodou, Strojnícky časopis, 37, 1986, č.3
- [21] Janotková, E., Pavelek, M. : Okrajové podmínky pro tepelné výpočty elektrických točivých strojů, Conference Engineering Mechanics '95, Svratka
- [22] Mašovský, O. : Nauka o teple, 2.vyd., STNL, Praha, 1953
- [23] Popiel, Cz. O., Boguslawski, L.: Local heat transfer coefficients on the rotating disk in stillair, Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1975, s. 167-170
- [24] Kohama, Y.: Study on Boundary Layer Transition of a Rotating Disk, Acta Mechanica, 50, 1984, s. 193-199
- [25] Lingwood, R., J.: An experimental study of absolute instability of the rotating-disk boundary-layer flow, J. Fluid Mech., 314, 1996, s. 373-405
- [26] Wilkinson, S. P., Malik, M. R.: Stability Experiments in the Flow over a Rotating Disk, AIAA JOURNAL, 23, 1985, s. 558-595
- [27] Le Gal, P.: Complex demodulation applied to the transition to turbulence of the flow over a rotating disk, Phys. Fluids A4, 11, 1992, s. 2523-2528
- [28] Levitin, I., B.: Infračervená technika, ALFA, Bratislava, 1979
- [29] Myers, G., E.: Analytical Methods in Conduction Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, New York, 1971
- [30] Cobb, E. C., Saunders, O. A.: Heat transfer from a rotating disk, Proc. Roy. Soc., A236, 1956, s. 343-351
- [31] Lisičan, J.: Nástroje, náradie a prípravky, TU Zvolen, 1992
- [32] Prokeš, S.: Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva, STNL/ALFA, Praha, 1978
- [33] Kolektiv autorů: Pružnost a pevnost II, skriptum VUT Brno, 1980
- [34] Janíček, P.: Technický experiment, skriptum VUT Brno, 1989
- [35] Kureková, E., Halaj, M.: Bezdotykové meranie povrchovej teploty infračervenými snímačmi, JMO 7 – 8, 1998
- [36] Lysenko, V.: Citlivost bezdotykového měření teploty, JMO 9, 1998

## **Publikace autora**

- [1] Lichtág, J.: Aktuální směry vývoje dřevoobráběcích strojů , LIGNUM, IX / 1997
- [2] Lichtág, J.: TOS Svitavy na mezinárodním veletrhu WOOD-TEC 97, DREVO, 12 / 97
- [3] Lichtág, J.: Trendy vývoje dřevoobráběcích strojů , TECHNIK 1 / 1998

- [4] Lichtág, J.: Vícekotoučové rozřezávací pily na dřevo , LIGNUM, I / 1998, II / 1998, III / 1998
- [5] Lichtág, J.: Od trendů k realizaci, referát pro mezinárodní konferenci „SAWING AND MACHINING OF WOOD MATERIAL, Brno 1998
- [6] Lichtág, J.: Rozřezávací technologie z vývojové dílny TOS Svitavy, a. s., DREVO, 4/99
- [7] Lichtág, J.: Namáhání pilového kotouče při podélném rozřezávání dřeva, DREVO, 9/99

## Summary

In this way also as in the other area of technology and in areas of research and development of the woodworking technology, intensive development is happening. One from progressive and highly effective method is the high speed cutting technology (HSC). Dominant position in this area seats heart of technological system – the tool, to its presentation at this work.

The general views on the field of high speed cutting and its development trends are summarised in the first part. The second part contains the complex of available theory of the existing area, fundamental definitions, physical characteristics and legalities, theoretical eductions , actual experiments results, analytical solutions of basic models etc. The basic aims of these specifications in field of the loading influences determination and the following analyses of their influences on the saw blade state of stress brings the third part. The fourth part occupies oneself by concrete input material parameters determination, forces and thermal loading influences, including experiments description, evaluation and interpretation of experimental part results. The fifth part is focused on the experiment results analyse, including heat transfer coefficient analyse as boundary condition of saw blade stress. This part contains analytical and numerical solution of saw blade state of stress, including analysis of particular influences on it and comparison of individual methods including its usage. In the sixth part are concrete and general results as experimental as analytical part of solution, including description of used solution and introduction of the theme of their accuracy enhancement, resumed.

In this work, complex analyse of stress saw blade in cutting process inclusive determination loading conditions, was effected, based on this analyse determined next reasons were.

The temperature of the disc standstill approximately after tens seconds. Initial phase of cut shows intensive drop of temperature. This sheer fall verge step by step to steady state. The influence of exhaustion intensity is too significant.

The stress from cutting forces is dismissible. The stress from thermal loading is dominant at lower turn, stress from centrifugal forces at higher turn.

The ascertained results will facilitate to solving of problematic high sped cutting technology, the modern and high efficient technology.

## **Autorovo curriculum vitae**

Narozen 8. 3. 1964 v Poličce. V letech 1979-83 absolvoval Střední průmyslovou školu strojnickou v Chrudimi. V letech 1983-89 studium na VUT – FS v Brně, obor konstrukce výrobních strojů a zařízení (stříbrný odznak FS). Studium ukončil s vyznamenáním. Od roku 1989 pracuje v TOS Svitavy, a.s. postupně jako konstruktér nástrojů, vývojový konstruktér dřevoobráběcích strojů a zařízení, vývojový projektant ( skupinář) dřevoobráběcích strojů.

Vedle klasických metod obrábění a obráběcí techniky se zabývá nekonvenčními obráběcími metodami ( obrábění dřeva vodním paprskem a laserem) a konvenčními progresivními metodami obrábění dřeva.

Je autorem úspěšných grantů a několika vynálezů.

V roce 1999 obhájil v rámci doktorandského studia na VUT FSI v Brně svoji disertační práci na téma Pilový kotouč v procesu podélného rozřezávání dřeva.