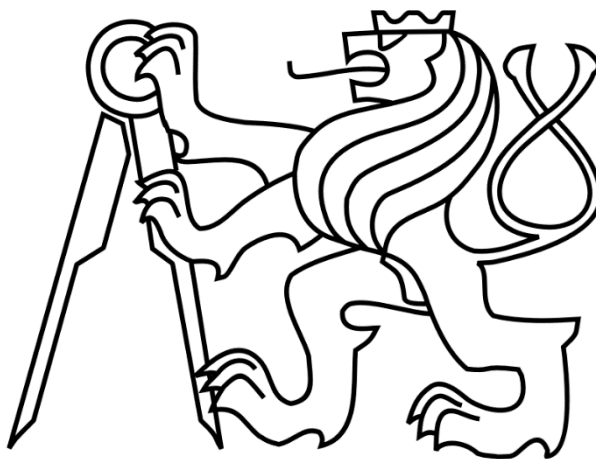


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Analýza a návrh optimalizace teplotního chování upínací desky svislého soustruhu

2022

Bc. Ladislav Malina

ZADÁNÍ PRÁCE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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 2.1.2022

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu Diplomové práce panu Ing. Josefu Kekulovi Ph.D. za vedení, cenné poznámky, podněty a pomoc s ovládním softwaru ANSYS Workbench. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Peteru Kohútovi za cenné poznámky a rady při tvorbě modelu. Rád bych poděkoval také své rodině a přátelům za podporu.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Ladislav Malina
Název DP:	Analýza a návrh optimalizace teplotního chování upínací desky svislého soustruhu
Rozsah práce:	79
Akademický rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Josef Kekula, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Peter Kohút, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Potlačení teplotních chyb desky stroje
Klíčová slova:	Svislý soustruh, Upínací deska, Metoda konečných prvků, Teplotní analýza, Teplotní optimalizace
Anotace:	<p>Práce se zabývá teplotní analýzou a výpočetní optimalizací upínací desky svislého soustruhu. Provedena je rešerše na téma teplotního chování obráběcích strojů a z oblasti stavby svislých soustruhů. Představeny jsou postupy výpočtových analýz metodou konečných prvků (MKP). Je vytvořena Analýza teplotního chování upínací desky svislého soustruhu a je sestaven výpočtový model MKP, který simuluje skutečné chování desky při zatížení. Pro tento model je následně navrženo několik variant s cílem pro potlačení teplotních deformací. Následně jsou sestaveny simulační teplotně-mechanické modely těchto variant. Následně jsou výsledky variant porovnány.</p>

Annotation

Author:	Bc. Ladislav Malina
Title of dissertation:	Analysis and design optimisation of thermal behaviour of vertical lathe rotary table
Extent:	79
Academic year:	2021/2022
University:	CTU In Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Josef Kekula, Ph.D.
Consultant:	Ing. Peter Kohút, Ph.D.
Submitter of the Theme:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Application:	Suppression of machine board temperature errors
Key words:	Vertical lathe, Clamping plate, Finite element method, Thermal analysis, Thermal optimization, FEM
Annotation:	<p>The work deals with temperature analysis and computational optimization of the vertical lathe clamping plate. Search of the temperature behavior of machine tools and in the field of construction of vertical lathes is performed, the procedures of computational analyzes by the finite element method (FEM) are presented. An analysis of the thermal behavior of the clamping plate of a vertical lathe is created and a FEM calculation model is built, which simulates the actual behavior of the plate under load. Several variants for suppression of thermal deformations are subsequently proposed for this model. The following is the compilation of simulation thermo-mechanical models of these variants. In the last step, the results of the variants are compared.</p>

Seznam zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A	[J]	Celková práce řezání
A ₁	[J]	Práce deformací
A ₂	[J]	Práce tření na čele
A ₃	[J]	Práce tření na hřbetě
A ₄	[J]	Práce pružných deformací
F _c	[N]	Hlavní složka řezné síly
F _N	[N]	Normálová síla
F _T	[N]	Třecí síla
g	[m·s ⁻²]	Konstanta tíhové zrychlení
G	[N]	Tíhová síla
h	[W/m ² ·°C]	Koeficient přenosu tepla
v _c	[m·min ⁻¹]	Řezná rychlost
l ₀	[mm]	Původní délka
t	[min]	Čas
T	[°C]	Teplota
v	[m·s ⁻¹]	rychlost pohybu
Q _c	[J]	Celkové množství tepla

Q_n		[J]	Teplo odvedené nástrojem
Q_o		[J]	Teplo odvedené obrobkem
Q_o		[J]	Teplo odvedené obrobkem
Q_p		[J]	Teplo odvedené prostředím
\dot{Q}		[W]	Tepelný tok
Z1		[μm]	Deformace v ose Z poloha 1
Z2		[μm]	Deformace v ose Z poloha 2
Z3		[μm]	Deformace v ose Z poloha 3
α		[$\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$]	Součinitel přestupu tepla
β		[-]	Část tepla představující poměr vstupujícího tepla mezi tělesy A a B
λ		[$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	Tepelná vodivost
Δl		[mm]	Změna délky
ΔT		[K]	Změna teploty
μ		[-]	Součinitel tření

Seznam zkratek

APDL	ANSYS Parametric Design Language
CAD	Computer aided design
FDEM	Finite differences element method
FDM	Finite differences element method
FEM	Finite element method
TPC	Tool center point
RPM	Revolutions per minute

Obsah

Obsah

2	Teplotně mechanické chování obráběcích strojů	- 13 -
2.1	Zdroje tepla	- 14 -
2.1.1	Obráběcí proces	- 16 -
2.1.2	Pohyblivá rotační vedení	- 20 -
2.1.3	Pohony	- 20 -
2.2	Opatření pro zvýšení teplotní stability	- 20 -
2.2.1	Aktivní kompenzace	- 21 -
2.2.2	Pasivní kompenzace	- 21 -
2.2.3	Měření a vyhodnocování tepelného chování na obráběcích strojích	- 25 -
3	Modelová pomoc MKP	- 27 -
3.1	Metoda konečných prvků (MKP)	- 27 -
3.1.1	Princip MKP	- 27 -
3.1.2	Teplotní modelování v MKP	- 28 -
3.2	Modelování tepelných ztrát	- 29 -
4	Svislé soustruhy	- 31 -
4.1	Desky svislých soustruhů	- 33 -
4.1.1	Uložení desky svislých soustruhů	- 34 -
5	Popis stroje	- 36 -
6	Analýza teplotního chování upínací desky svislého soustruhu	- 38 -
6.1	Měření teplotních deformací desky	- 38 -
6.2	Vyhodnocení naměřených dat	- 40 -
6.3	Simulační teplotně-mechanický model sestavy	- 42 -
6.3.1	Nastavení teplotní úlohy	- 42 -

6.3.2	Nastavení strukturální úlohy.....	- 51 -
6.4	Simulační teplotně-mechanický model upínací desky....	- 52 -
6.4.1	Nastavení teplotní úlohy.....	- 53 -
6.4.2	Nastavení strukturální úlohy.....	- 55 -
6.5	Vyhodnocení simulačních modelů	- 55 -
7	Návrh variant pro potlačení teplotních deformací desky	- 59 -
7.1	Úprava geometrie desky	- 59 -
7.2	Výroba s chybou	- 59 -
7.3	Teplotně necitlivá výztuha.....	- 60 -
7.4	Změna materiálu desky.....	- 60 -
7.5	Tepelná izolace.....	- 60 -
7.6	Přídavné chladicí zařízení	- 61 -
8	Simulační teplotně mechanické modely jednotlivých variant-	62 -
8.1	Úprava geometrie desky	- 62 -
8.1.1	Upravené varianty desky.....	- 62 -
8.2	Tepelná izolace.....	- 65 -
8.3	Chlazení.....	- 66 -
9	Vyhodnocení teplotního chování jednotlivých variant	- 69 -
9.1	Úprava žebrování	- 69 -
9.2	Úprava sestavy	- 71 -
10	Závěr.....	- 74 -

Úvod

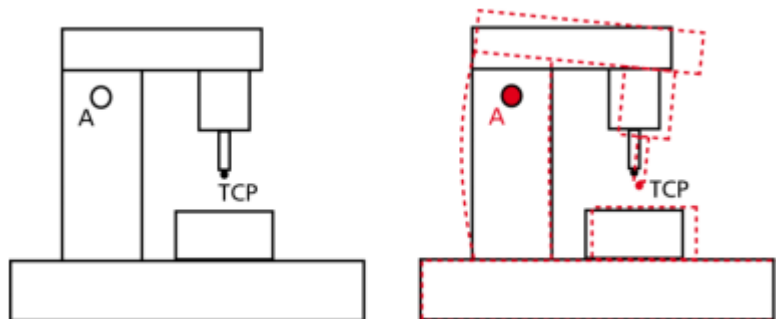
Díky výraznému posunu ve vývoji pohonů a řízení obráběcích strojů, došlo v posledních letech k výraznému zvýšení produktivity a přesnosti při obrábění. Kromě samotných nástrojů, které musí být připraveny pro vzniklé náročné podmínky zatěžování, musí být i samotné stroje připraveny odolávat těmto náročným podmínkám, při kterých generuje teplo nejenom samotný obráběcí proces, ale i vlastní pohony a další komponenty stroje. Samotná konstrukce stroje musí kromě zajištění funkčnosti obrábění také disponovat určitou tepelnou stabilitou pro nejmenší možné teplotní ovlivnění přesnosti obrábění tepelnými dilatacemi.

Diplomová práce si dává za cíl vytvoření MKP modelu v softwaru Ansys Workbench., který bude simulovat naměřené skutečné deformace upínací desky o průměru 1000mm, svislého soustruhu TOS HULIN z řady Powerturn, způsobené teplotním zatížením vlivem vlastní rotace.

Podle tohoto simulačního modelu, který se přiblíží chování skutečného stroje se následně vytvoří další varianty modelů se změnami, jež budou mít za úkol tyto deformace potlačit. Následně se vyhodnotí vliv úprav na výsledné chování desky při teplotním zatížení.

1 Teplotně mechanické chování obráběcích strojů

Tepelná roztažnost seřadí mezi nejhlavnější faktory ovlivňující rozměrovou a tvarovou změnu a je třeba s ní uvažovat již při samotné stavbě součástí. Klasickým představitelem součásti, u níž se počítá s tepelnou roztažností, je píst spalovacího motoru. Píst se usazuje do válce s patřičnou vůlí, aby se zaručila jeho správná funkce a předešlo se zadření při zvětšení jeho průměru vlivem zvýšení teploty při běžném provozu.



Obrázek 1.1.: Ukázka teplotní deformace stroje po působení zdroje a [7]

Ovšem obráběcí stroje jsou komplexní zařízení, které potřebují ke svým výrobním procesům velké množství energie. Tato energie se však nespotřebuje pouze v samotném technologickém procesu, ale mění se na teplo v různých uzlech stroje. Bohužel tyto zdroje tepla nejsou konstantní a mění se pro každý uzel v čase dle jeho zatížení. Zdroje tepla ovlivňují vlastní deformaci stroje, která ovlivňuje konečnou přesnost obrábění, respektive TCP (Tool Centre Point). Tento vliv je výraznější u velkých strojů, kde i malý teplotní rozdíl má za následek výrazně větší odchylku od ideálního tvaru výsledného obrobku. V horších případech může způsobovat změnu předpjetí součástí stroje a jejich nevratné zničení. V dnešní době jsou kladeny vyšší nároky na stroje. Zvyšují se nároky nejen na řezné podmínky, ale obrábí se i těžkoobrobitelné materiály s neustále menšími rozměrovými a geometrickými tolerancemi přesnosti, ale také výrazně zlepšilo statické a dynamické chování obráběcích strojů. Vzestup těchto požadavků a zlepšení má za následek, že i teplotně mechanické chování stroje má velký

podíl na celkovou výrobní přesnost stroje. V odborných literaturách se uvádí, že je to 40 % až 70 % z celkové výrobní odchylky. [5,6,7,8]

Teplotní změny ve strojích způsobují roztažnost, kterou si lze představit na tělese s několikanásobně větší délkou, než jsou jeho průřezové parametry. Těleso ohřejeme o několik stupňů a jeho prodloužení vypočítáme vynásobením původní délky se změnou teploty a součinitelem teplotní roztažnosti materiálu, z kterého je těleso vyrobeno.

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

Kde: Δl – změna délky [mm]

- α – součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]
- l_0 – původní délka [mm]
- ΔT – změna teploty [K]

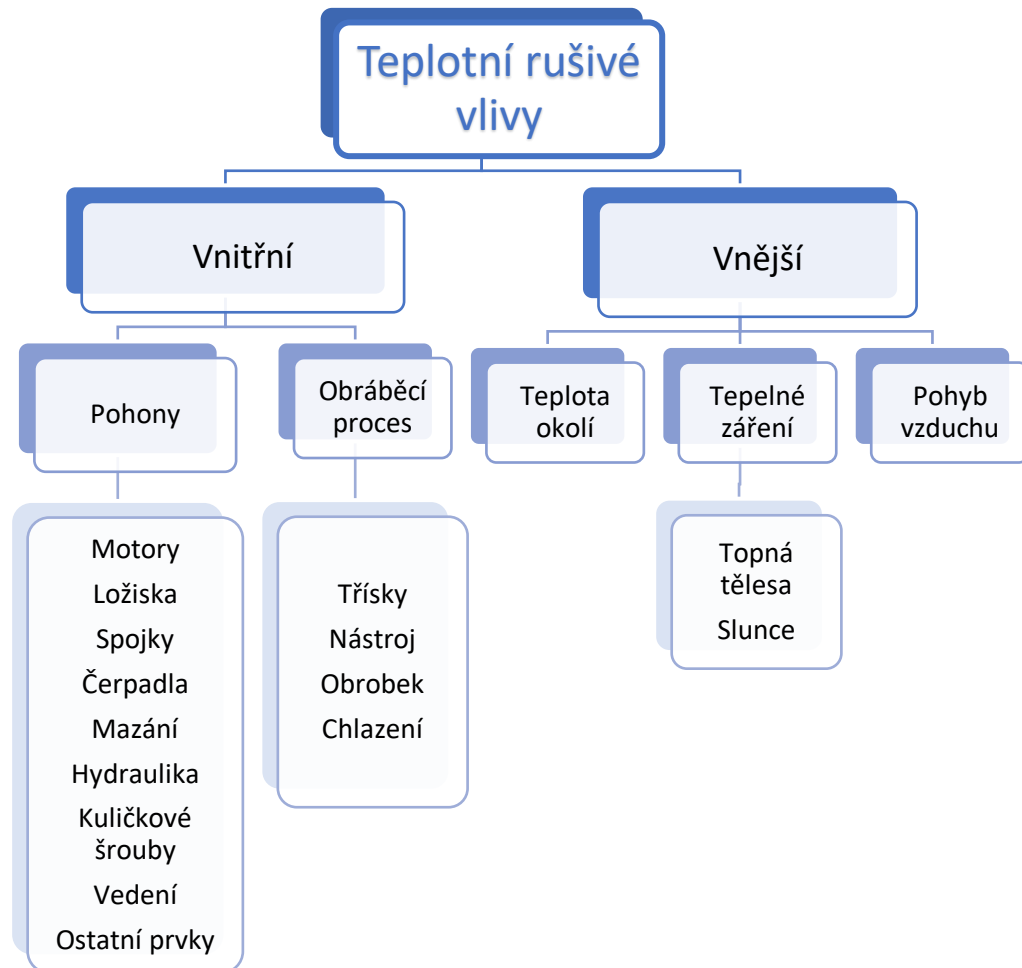
1.1 Zdroje tepla

Na obráběcí stroje během výrobního procesu působí různé zdroje tepla, ovlivňující tepelně mechanické chování stroje, které se v průběhu času mění dle zatížení a dalších faktorů. Tyto zdroje jsou důvodem deformací, které ovlivňují kvalitu výsledného obrábění a lze je rozdělit podle obrázku 2 na dvě hlavní skupiny, a to na vnitřní a vnější zdroje tepla.

Vnější zdroje tepla nevytváří stroj, ale hlavním zdrojem je prostředí, ve kterém je tento stroj umístěný. To by mělo být nejlépe klimatizováno pro udržení konstantní okolní teploty a bez zbytečných oken, kde by na stroj mohla působit proměnná radiace od slunce. Takto klimatizovaná hala je ovšem náročná na provoz a využívá se pouze u vysoce náročných průmyslových odvětví, kde je požadována vysoká přesnost, kterými jsou například součásti pro metrologii a vesmírný průmysl. Do těchto zdrojů se ovšem započítávají i okolní stroje a jiné zdroje tepla, které se mohou navzájem ovlivňovat.

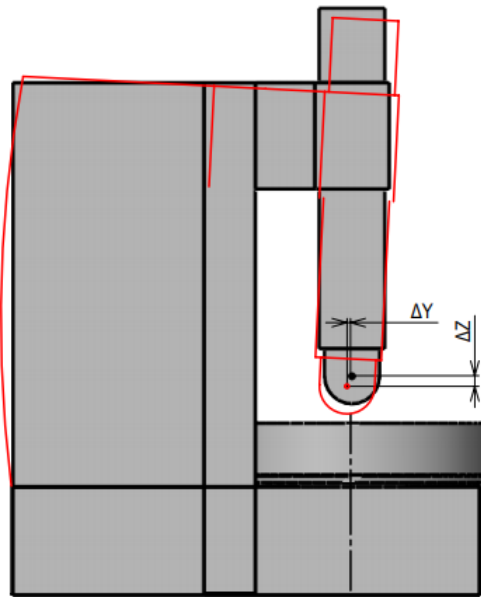
Vnitřní zdroje tepla vznikají při samotném řezném procesu nebo samotném provozu stroje, jako je například dodáváním mechanické energie

prostřednictvím pohonných jednotek, kde se dodaná energie disipuje na teplo při tření ve vedeních, v převodech nebo v ložiskách. Poté se šíří kondukcí v konstrukci stroje. [9]



Obrázek 1.2.: Tepelné vlivy na stroj (převzato a upraveno z [7])

Všechny tyto zdroje tepla z důsledku teplotní roztažnosti materiálu, které jsou použity ke stavbě strojů vedou k nežádoucím změnám polohy a geometrie stoje. Pro obráběcí proces je nejdůležitější poloha TCP (Tool Center Point). Tato poloha je zásadní pro výslednou přesnost obrobku. Na obrázku 2.3. je naznačena celková deformace jednostojanového svíslého soustruhu po teplotní deformaci samotného stojanu, kde je vidět, jak moc se ovlivní výsledná poloha TCP. Toto je však náznak působení jednoho zdroje tepla, ale v reálném stroji jich působí celá řada a navzájem se mohou ovlivňovat. [1,2,3]



Obrázek 1.3.: Schéma teplotní deformace od záření na stojan vertikálního soustruhu

1.1.1 Obráběcí proces

Obrábění je technologický proces, kdy z určitého polotovaru odebráním materiálu získáme obrobek určitých rozměrů, tvaru a integrity povrchu. Odebírání materiálu se může uskutečňovat vlivem mechanických, elektrických, chemických a dalších účinků nebo jejich kombinacemi.

Řezný proces je druh obrábění, kdy se odebírá materiál ve formě třísek z polotovaru, pomocí řezného nástroje, aby se dosáhlo výsledného tvaru a jakosti povrchu.

Při tomto procesu obráběcí nástroj působí silou na obrobek a vyvolává v materiálu napětí, proti kterému klade materiál odpor. Přitom dochází v oblasti styku nástroje s materiálem k pružným a následně k plastickým deformacím vlivem vnikání nástroje do materiálu obrobku. Tyto deformace umožňují výsledný vznik třísky a označují se jako celková práce řezání. [2,5]

„Celková práce řezání je součet dílčích prací potřebných k rozrušení materiálu a tvorbě třísky.“ [9]

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (2)$$

Kde:

- A – celková práce řezání
- A_1 – práce deformací (až 80 %)
- A_2 – práce tření na čele (~5 %)
- A_3 – práce tření na hřbetě (~5 %)
- A_4 – práce pružných deformací (~2 až 10 %) [7]

Tato mechanická práce se z 95-98 % přeměňuje na teplo z toho se v odborné literatuře uvádí, že se celková práce přibližně rovná celkovému tepleu vzniklého z řezného procesu, viz. rovnice 3. [8]

$$Q_c \cong A \quad (3)$$

Kde:

- Q_c – Celkové množství tepla [J]

„Celkové množství tepla Q_c vznikající za sekundu při obrábění vypočítat bez velkých chyb z rovnice“ (4). [9]

$$Q_c = F_c \cdot v_c \cdot t \quad (4)$$

Kde:

- F_c – Hlavní složka řezné síly [N]
- v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
- t – čas obrábění [min]

Z řezného procesu se teplo odvádí následujícími způsoby:

- třískou Q_t [J]
- obrobkem Q_o [J]
- nástrojem Q_n [J]
- prostředím Q_p [J]

[7]

Podíly odváděného tepla se odvíjejí podle různých technologických podmínek, ale i podle daného materiálu, který se obrábí viz tabulka 1.

Tab. 1.: Podíly odváděného tepla pro obrábění různých materiálů [8]

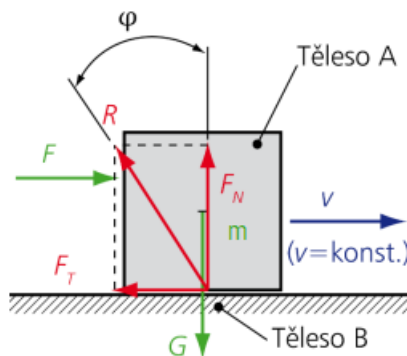
Odvod tepla	Ocel	Termoplast	Reaktplast	CFRP	GFRP
Třískou	75	50 – 57	2 – 3	5 – 8	8 – 10
Obrobkem	20 – 22	15 – 20	5 – 8	5 – 10	10 – 15
Nástrojem	3 – 5	20 – 25	80 – 90	70 – 80	
Prostředím	3 – 5 (suché obrábění)				

CFRP – kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny, GFRP – kompozity vyztužené skelnými vlákny

Z tabulky 1 je vidět, že pro snížení teplotních deformací pro standartní obrábění oceli je třeba zajistit co nejrychlejší odvod třísek z pracovního prostoru stroje. Pro odvádění třísek je třeba zajistit jejich ideální drobivost. Drobivost třísek můžeme zajistit nastavením ideálních řezných podmínek, vhodnými břitovými destičkami s utvařeči třísek nebo vhodným materiálem, jako je automatová ocel.

Pohyblivá lineární vedení

Tyto odpory jsou ve všech se sestavách spojené pohyblivým spojením, kde dochází ke tření. Typickým příkladem je těleso a o hmotnosti m [kg] tažené po vodorovné podložce silou F [N] o konstantní rychlosti v [$m \cdot s^{-1}$]. Těleso a působí na podložku tíhovou silou G [N].



Obrázek 1.4.: Těleso tažené po vodorovné podložce

$$G = m \cdot g \quad (5)$$

Kde:

g – konstanta tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Tíhová síla G [N] se rovná normálové síle od podložky F_N [N].

$$G = F_N \quad (6)$$

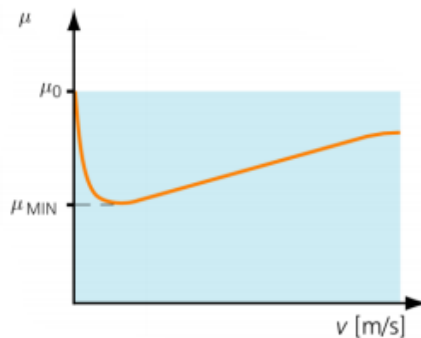
Proti tření působí třecí síla F_T

$$F_T = F_N \cdot \mu \quad (7)$$

Kde:

- μ – součinitel tření [-]

Součinitel tření je bezrozměrná veličina, která závisí na materiálech třecích ploch, jejich opracování, mazání a na rychlosti pohybu. V tabulkách jsou většinou uváděny hodnoty pro tření za klidu a tření za pohybu. Přesnější průběh při různých rychlostech vykresluje Stribeckův diagram. Z něho vyplývá, že součinitel tření závisí na rychlosti. Pro zjednodušení výpočtů se průběh třecího odporu považuje za konstantní.



Obrázek 1.5.: Stribeckův diagram pro kluzné vedení [8]

Při předpokladu, že se veškerá třecí energie přemění na teplo platí následující vztah:

$$\dot{Q} = v \cdot F_T = \mu \cdot v \cdot F_N \quad (8)$$

Kde:

- \dot{Q} – tepelný tok [W]
- v – rychlost pohybu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Pokud je kontaktní teplota stejná ve všech bodech styku těles a i B, rozdělí se výsledné vzniklé teplo podle následujícího vztahu:

$$\dot{Q}^{(A)} = (1 - \beta) \cdot \dot{Q} \quad (9)$$

$$\dot{Q}^{(B)} = \beta \cdot \dot{Q} \quad (10)$$

Kde:

- β – část tepla představující poměr vstupujícího tepla mezi tělesy A a B [-]

$$\dot{Q}^{(B)} = \beta \cdot \dot{Q} \quad (11)$$

β je vyjádřena vztahem:

$$\beta = \frac{\lambda^{(A)}}{\lambda^{(A)} + \lambda^{(B)}} \quad (12)$$

Kde:

λ – tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

1.1.2 Pohyblivá rotační vedení

Stůl ovšem nevykonává lineární pohyb, nýbrž rotační. Ten zde obstarává ložisko s křížovými válečky. Toto uložení jako u ostatních rotačních stolů nebo vřeten generuje teplo.

1.1.3 Pohony

Vznik tepla od pohonů se může rozdělit na dva základní zdroje. První zdroj jsou mechanické odpory. pro tento zdroj je typické kluzné vedení, které vykazuje kluzný odpor a tím i vznikající teplo. Druhým zdrojem jsou elektrická zařízení.

1.2 Opatření pro zvýšení teplotní stability

Pro zlepšení celkové odolnosti proti teplotním chybám stroje je nutné definovat dvě základní složky nepřesností, vniklé tímto mechanismem, a to lineární a úhlové.

„Lineární složky teplotní chyby jsou ty, které se vyskytují v lineárních pohybových osách stroje.“ [10]

K úhlovým chybám dochází vlivem nesymetrického teplotního působení na součást stroje a ta se tímto vlivem úhlově natočí. [10]

1.2.1 Aktivní kompenzace

Hlavní rozdíl mezi složkami chyb tkví v možnostech jejich softwarového kompenzování. Lineární složky se mohou relativně snadno kompenzovat určitým matematickým modelem, kterým jsou predikovány hodnoty korekcí v příslušných lineárních osách v reálném čase a ty jsou superponovány k požadovaným polohám daných lineárních os. [11] Tento způsob kompenzace je velmi levný, protože se stroj nemusí osazovat přídavnými čidly. Pro tuto kompenzaci musí být na stroji provedeny experimentální testy, které jsou provedeny dle normy ISO 230-3 pro určení tepelných vlivů na obráběcí stroj. Tento kompenzační model ovšem chybu úplně neeliminuje, ale může ji výrazně snížit. To je velká výhoda oproti úhlovým složkám, které se nedají tak lehce kompenzovat. Celkově se tento kompenzační model označuje jako aktivní kompenzace a používá se u již vyrobených strojů.

1.2.2 Pasivní kompenzace

Při návrhu nového stroje je ovšem snaha dosáhnouti teplotně stabilní konstrukce i bez použití kompenzačního modelu nebo výskytu pouze lineární teplotní chyby. Někteří zákazníci vyžadují při přebírání strojů zkoušky bez kompenzačních modelů. To je i případ desky, která se bude v této práci navrhovat. Této stability je třeba dosáhnout již samotným konstrukčním návrhem. Této eliminaci vzniku tepelných deformací se říká také pasivní kompenzace.

Základní možnosti omezení teplotních deformací:

- Vhodná volba materiálu
- Konstrukce
- Redukce produkovaného tepla
- Izolace zdrojů tepla
- Tepelná stabilizace

Volba materiálu

Kladené požadavky na konstrukční materiály obráběcích strojů jsou komplexní záležitostí. Jejich nejdůležitějšími mechanickými vlastnostmi

se vyznačuje například: statická a dynamická tuhost, tlumení, tepelná a dlouhodobá stabilita, hmotnost. Kvůli teplotní stálosti je stále větší pozornost věnována také tepelným vlastnostem materiálů, z nichž nejvýznamnější jsou například: součinitel délkové roztažnosti, tepelná kapacita materiálu a tepelná vodivost. [3,7]

Tabulka 1.1 Vlastnosti používaných materiálů v oboru obráběcích strojů [8]

Fyzikální vlastnosti	Tradiční			Nekonvenční				
	Svařence z ocelí třídy 11	Tvárná litina	Šedá litina	Al slitiny	Přírodní žula	Polymerní betony	Vláknové kompozity na bázi uhlíkových vláken	Keramika na bázi Al a Si
Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7850	7040-7060	7100-7300	2600-2800	2600-3150	1500-2600	1700-1980	3200-3500
Modul pružnosti [GPa]	190-210	160-180	88-140	70-79	30-70	40-50	100-580	270-300
Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6}/\text{K}$]	11-18	10	11	24	7-10	9-18	0	3-6
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	47	50		237	2,9-4	1-3	25	-
Měrná tepelná kapacita [$\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,49	0,46-0,54		0,9	0,75	0,7-1,3	-	0,15-0,2

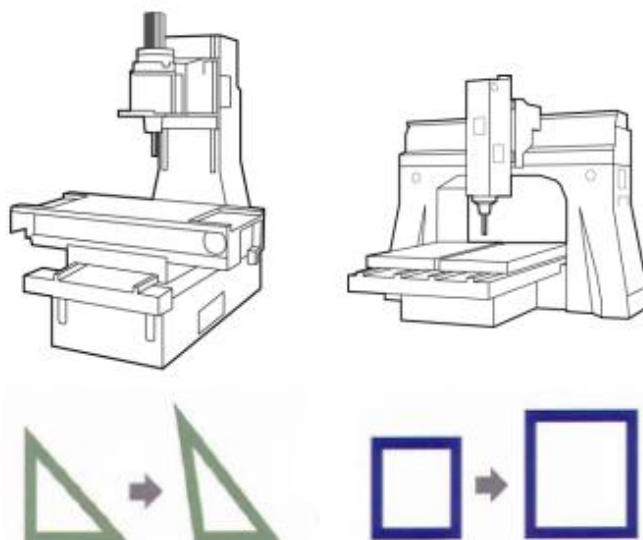
Klasické materiály použité pro stavbu strojů jsou nejčastěji ocel, šedá litina a ocelolitina. Tyto materiály se používají především pro výborný poměr tuhosti a hmotnosti, ovšem vysoká hodnota součinitele teplotní roztažnosti α a tepelné vodivosti λ , mohou negativně ovlivnit geometrickou přesnost stroje. Jejich velkou výhodou je ovšem snadná dostupnost a cena. Na stavbu strojů je možno použít různé materiály, jako například přírodní kámen, polymerbeton, porézní a vyztužené kompozitní materiály, nebo kombinace těchto materiálů. Při použití kombinace různých materiálů, například pokud je materiál lože betonový a materiál vedení litinový, se může nepříznivě projevit tzv. bimetalový efekt, kdy mají použité materiály rozdílné součinitele délkové roztažnosti. z tohoto důvodu se musí věnovat pozornost výběru správné kombinace materiálů. Hlavní materiály používané při stavbě strojů a jejich základní vlastnosti potřebné při návrhu stroje můžeme vidět v Tab. 2.1.

Konstrukce

Konstrukční úpravy pro snížení teplotních vlivů se provádí na jednotlivých uzlech stroje. Základním opatřením je izolace všech zdrojů nebo ideálnější variantou je umístění samotných zdrojů odděleně mimo stroj. Pokud této úpravy nelze dosáhnout, je snaha alespoň snížit tyto ztráty a tím zvýšit účinnost. Příkladem jsou ložiska, kde se může výrazně snížit tření optimálním mazáním.

Pokud se v uzlu vyskytují některé zdroje tepla, tak vzniká potřeba zvětšit odvod tepla ze zdroje. Tento odvod lze ovlivnit vhodným žebrováním a tloušťkou stěn i žeber, pro zlepšený odvod tepla do okolí. [13]

Z hlediska samotné stavby se nosné dílce rozdělují na teplotně geometricky symetrické, nesymetrické, otevřené a uzavřené. U otevřených asymetrických konstrukcí se výrazně tvoří složky úhlových chyb, které se špatně modelují při aktivní kompenzaci. Oproti tomu v geometricky symetrické uzavřené konstrukci se úhlové chyby téměř negenerují a při vhodném umístění teplotních zdrojů se lineární složky chyb mohou navzájem vyrušit. Tepelně symetricky mohou být navrženy pouze jen některé osy, a přesto musí být alespoň jedna osa aktivně kompenzována. Tepelně symetrické konstrukce se také nemohou aplikovat na všech strojích. Nevýhodou těchto uzavřených konstrukcí je snížený přístup do pracovního prostoru a také větší materiálová náročnost konstrukce. Typickým představitelem této symetrické uzavřené konstrukce je klasické portálové uspořádání. [7,9]



Obrázek 1.6.: Teplotně asymetrický rám (vlevo), Portálové uspořádání rámu stroje (vpravo) se schématickým vyznačením deformace [7]

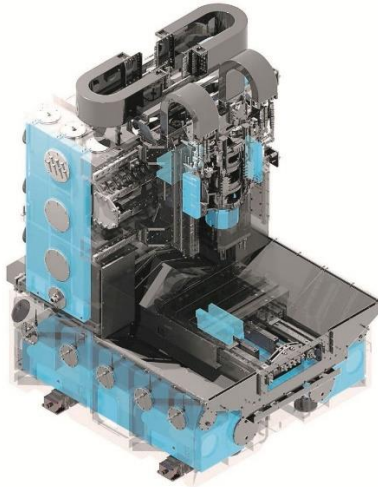
Tepelná stabilizace

Označuje souhrn prostředků pro zajištění tepelné rovnováhy ve stroji. S těmito opatřeními se počítá již při samotném návrhu stroje, ale existují prostředky, kterými je možno stroj dovybavit až později. Tepelná rovnováha se zde zajišťuje hlavně odvodem tepla z jednotlivých vnitřních zdrojů tepla a plynulým odvodem třísek z obráběcího procesu. To je zajištěno protékáním či profukováním jednotlivých komponent stroje.

Teplo se odvádí lokálně od největších zdrojů chladícím médiem do chladiče, který se umísťuje mimo stroj. Jedna chladící soustava může obsluhovat více uzlů zároveň, to ovšem může způsobovat jisté problémy při diferenčním zatížení jednotlivých uzlů stroje. Při určitých fázích provozu stroje se vysoce zatíží například vřeteno oproti ostatním chlazeným prvkům. Pokud by se mělo vřeteno schladit na ideální teplotu, musela by se výrazně snížit teplota chladícího media. Tato změna by působit nechtěné rozměrové a tvarové změny ostatních uzlů v chlazené soustavě.

Jako další způsob pro zajištění teplotní stability stroje se používá protékaný rám. Chlazení se zde integruje přímo v nosné struktuře stroje. Díky tomu se teplo vzniklé v určitém části rovnoměrně přenáší do téměř celé konstrukce stroje. Hlavní výhoda tohoto systému spočívá v zabránění rychlých změn teplot vlivem pracovního procesu. Velká konstrukční

náročnost a vysoká cena provozování tohoto systému brání v jeho větším rozšíření.



Obrázek 1.7.: Yasda YMC 650 s protékaným rámem [8]

Dalším způsobem je stabilizace okolního prostředí neboli použití klimatizované haly. Tato problematika byla zmíněna v kapitole vnějších zdrojů tepla. Pokud se stroj neprovozuje v takto vybavené hale, měly by být dodrženy alespoň základní opatření pro idealizaci prostředí. Mezi základní prvky těchto opatření se řadí:

- minimalizace proudění vzduchu
- snížení výkyvů teploty okolí v hale na minimum
- odclonění záření. [15]

1.2.3 Měření a vyhodnocování tepelného chování na obráběcích strojích

Skutečnost, že se měření teplotního chování strojů a jejich chyb staly součástí přijímacích testů svědčí o jejich vlivu na obráběcí proces. pro tyto měření je stanovena norma ISO 230-3:2010. Tato norma popisuje základní metodiku měření tepelného chování strojů a stanovuje 3 typy zkoušek: [7,15]

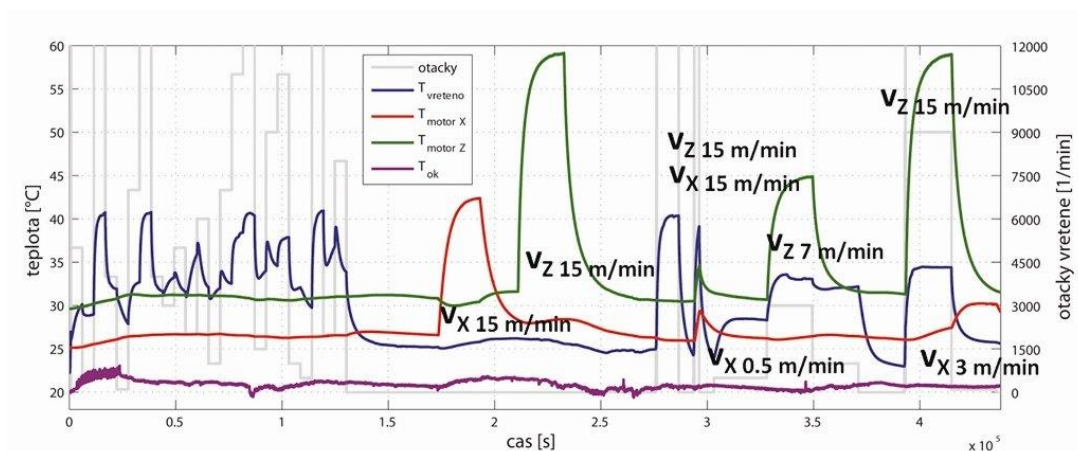
- Zkouška pro určení chyby vzniklé v důsledku teploty, tzv. ETVE
- Zkouška tepelných deformací způsobených rotací vřetena.
- Zkouška tepelných deformací způsobených pohybem v lineárních osách [8]

Stroj, který se bude měřit musí být kompletní a funkční a v daném prostředí je ponechán v klidu po dostatečnou dobu. Stroji se musí zajistit dostatečná ochrana před, topením a dalšími vnějšími vlivy a okolní teplota musí mít odpovídající teplotu. Při měření se odečítají teploty a deformace po pevných časových úsecích. Minimální čas těchto úseků je 5 minut. [15]



Obrázek 1.8.: Deska řady Powerturn připravená pro měření teplotních deformací způsobených její rotací

Výstupem z měření jsou grafy deformací a teplot různých částí stroje, které jsou závislé na čase. Například při měření deformací vřetena, jsou kromě deformací a teplot zaznamenávány také otáčky vřetena, které své hodnoty v čase mění. [8,10]



Obrázek 1.9.: Průběh otáček, posuvových rychlostí v ose X a z a klíčových teplot v průběhu pěti denního ověřovacího testu obráběcího centra MMC 1500 [16]

2 Modelová pomoc MKP

Klasické MKP úlohy řeší pouze jednu fyzikální oblast, jako jsou například mechanické, teplotní nebo elektromagnetické. V případech obráběcích strojů je žádané modelování provázanějších úloh.

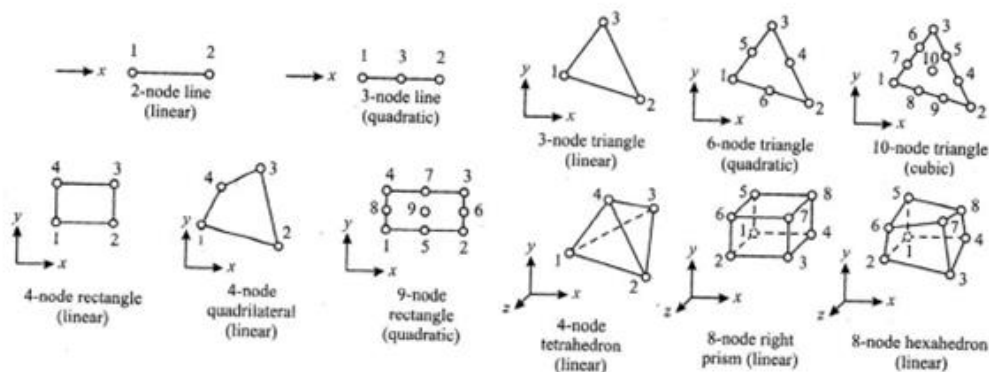
Jako ukázkový případ se může vzít právě úloha teplotních deformací, kde se nejdříve řeší teplotní MKP úloha. Zde se zadávají teplotní okrajové podmínky a výsledky teplotního pole z této úlohy se exportují do následné mechanické MKP úlohy, která již pracuje s mechanickými vlastnostmi. Tato druhá úloha nám poskytne výsledný deformovaný tvar a napjatost součásti, na kterou působí teplotní pole.

2.1 Metoda konečných prvků (MKP)

Tato metoda je numerickou metodou, pro řešení různých inženýrských úloh, které se zabývají například pružností, dynamikou, prouděním, vedením, elektromagnetismem a dalšími obory. Před zaváděním MKP již bylo používáno velké množství analytických postupů pro řešení těchto úloh. Tyto postupy však byly aplikovatelné jen na jednodušších geometriích, pro složitější geometrie se museli vyrábět prototypy navrhovaných součástí. Díky MKP a jeho schopnosti řešit složitější geometrie pomocí modelování, došlo nejen ve strojírenství k výraznému snížení nákladů a urychlení konstrukčního procesu. [18]

2.1.1 Princip MKP

Základním principem MKP úlohy je diskretizace neboli rozdělení vyšetřovaného objektu na určitý počet prvků zvaných elementy. Elementy mají svůj charakteristický tvar, velikost a vzájemnou polohu uzlů. Velikost elementů, a tím jejich hustota značně ovlivňuje přesnost výpočtu, ale také zvětšuje jeho náročnost.



Obrázek 2.1.: Příklady používaných elementů (upraveno) [18]

Hledaná veličina se dopočítává interpolační tvarovou funkcí v uzlových bodech. „Celková potencionální energie tělesa se vyjadřuje jako součet celkových potencionálních energií těchto podoblastí.“ [19]

Toto řešení vede na soustavy algebraických lineárních rovnic s předepsanými okrajovými podmínkami. Okrajové podmínky se definují, jako geometrické například uložení s nulovým posuvem.

Objemnost výpočtu je dána počtem řešených rovnic. Tento počet formuluje časový krok, celkový počet prvků a okrajové podmínky. Pro zmenšení objemu výpočtu se hledají symetrie počítaných objektů nebo se používají větší elementy, ale musí se dát pozor na menší přesnost výsledků.

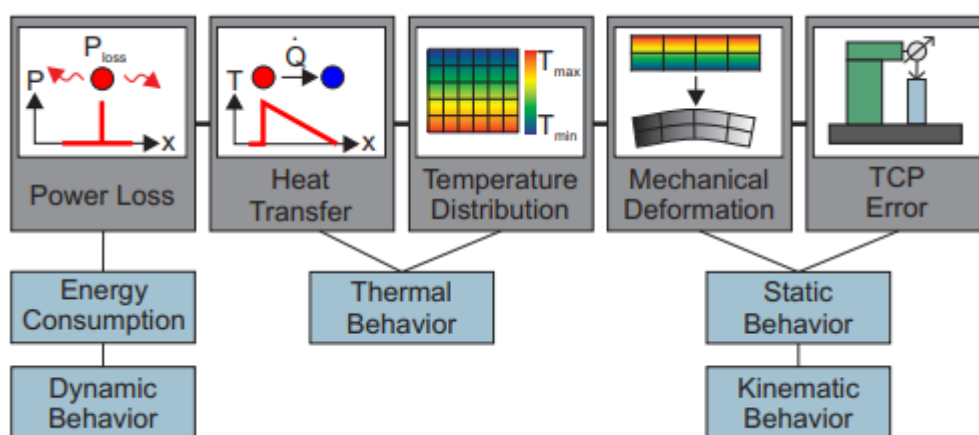
Pro správný MKP výpočet je třeba správně definovat okrajové podmínky, materiálové vlastnosti, elementy a jejich hustotu. Tato dovednost se odvíjí od znalosti fyzikálních jevů, a hlavně zkušenostmi s modelováním v MKP.

Klasickými představiteli softwaru jsou Ansys a Abaqus.

2.1.2 Teplotní modelování v MKP

Pokud se obráběcím strojům věnuje pohled z termodynamické stránky, působí v nich řada procesů sdílení tepla. Mezi základními mechanismy sdílení tepla patří kondukce neboli přenos tepla vedením, v konstrukcích stroje. Dále je to konvekce, představující přenos tepla prouděním a radiace. [13]

Důvodem vzniku tepelných zdrojů jsou v dané úloze energetické ztráty. Tyto ztráty jsou ovlivněny dynamickou konfigurací a samotným používáním stroje. To je důvod náročného hledání odpovídajícího ztrátového výkonu a jeho správného nastavení do podmínek modelu. Nadefinování zdrojů tepla, odpovídajícího sdílení a zbytku části výpočtu má zásadní vliv na následující mechanickou část výpočtu, která musí s odpovídající kvalitou simulovat teplotně mechanické chování konstrukce stroje a jeho statické vlastnosti. Tento postup odpovídá fyzikálnímu ovlivnění polohy TCP vlivem působení teplotních ztrát, který je na obrázku 3.2. [20]



Obrázek 2.2.: Fyzikální postup ovlivnění polohy TCP [20]

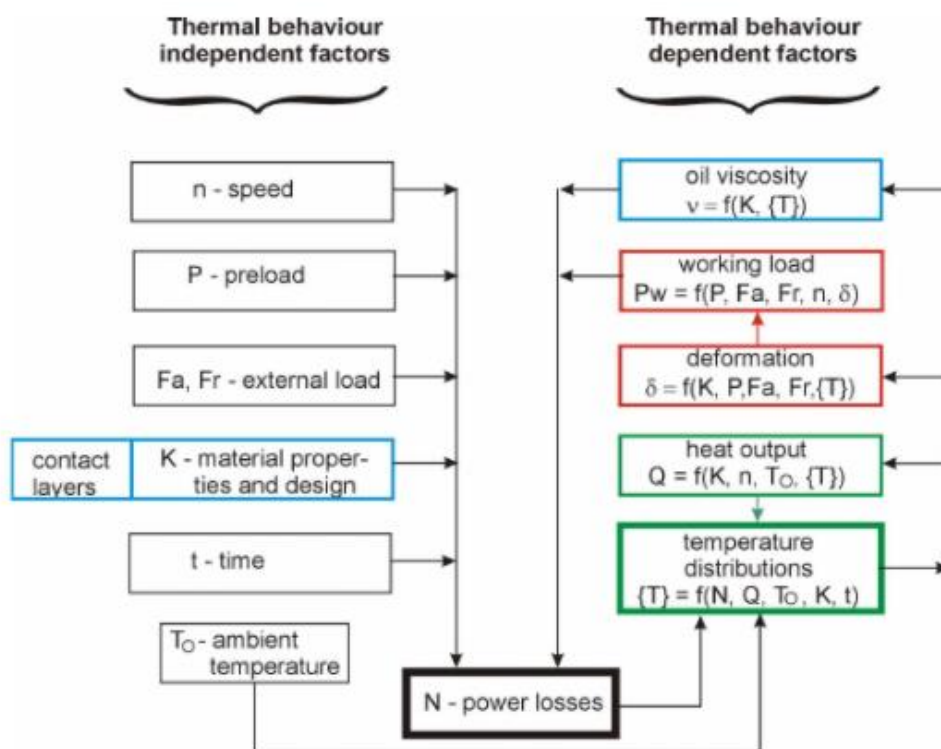
Zvyšování výpočetních výkonů moderních počítačů a vývoj pokročilých výpočetních programů přispívá k lepšímu pochopení generování a přenosu v obráběcích strojích.

2.2 Modelování tepelných ztrát

Mezi tyto jednotky patří vřeteníky a různé otočné stoly, ve kterých se generují chyby při rotačním pohybu. Obecně lze konstatovat, že čím rychleji tyto prvky rotují a přenáší vyšší točivé momenty, tím větší zatížení vytváří, a o to je větší působení tepelných jevů a zároveň velikost jimi generovaných chyb. Teplo zde generují ložiska a převody pro pohon os a v přímo poháněných jednotkách samotný motor. [20]

Samotná složitost výpočetního modelu je individuální. Záleží na dané sestavě rotační osy a posouzení inženýra, aby se co nejpřesněji přiblížil

skutečnosti pro zajištění vysoké přesnosti tepelného modelu chování rotační jednotky, považovaného za hlavní zdroj teplotních chyb v obráběcím centru. Takový model musí splňovat mnoho základních požadavků. Model reprodukuje přirozené tepelné zatížení. To vyžaduje znalost generování ztrátové energie v reálném čase, s přihlédnutím k různým rychlostem provozu motoru včetně, zatížení ložisek a uvažováním třecího momentu. Z tohoto důvodu je třeba vzít v úvahu celý komplex faktorů a jevů ovlivňujících ztráty výkonu v ložiskách, kromě toho musí model co nejpřesněji zohlednit podmínky přenosu tepla v oblasti vřetenové jednotky a jejího vnějšího prostředí, jako i v celé oblasti vřeteníku. Tyto vstupující faktory jsou zachyceny na obrázku 3.4[16]



Obrázek 2.3.: Faktory ovlivňujícími ztráty energie v ložiskových jednotkách včetně [16]

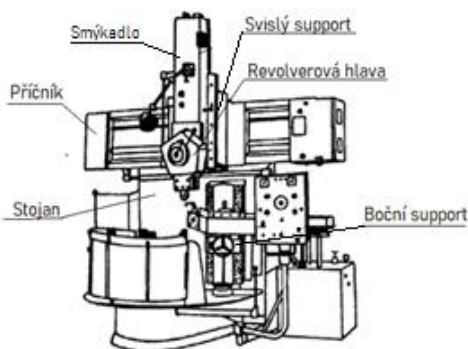
Pokud by se modeloval obráběcí stroj, který by realizoval obráběcí proces, musel by se vzít v úvahu také vliv tohoto procesu. Vliv procesu by se projevil, jak z hlediska zatížení řeznými silami, tak i tepla generovaného v řezné zóně společně s dopadem chladicího média a žhavými třískami. Tento model by ovšem neodpovídal naměřeným hodnotám z testů dle normy ISO 230-3:2010. [16]

3 Svislé soustruhy

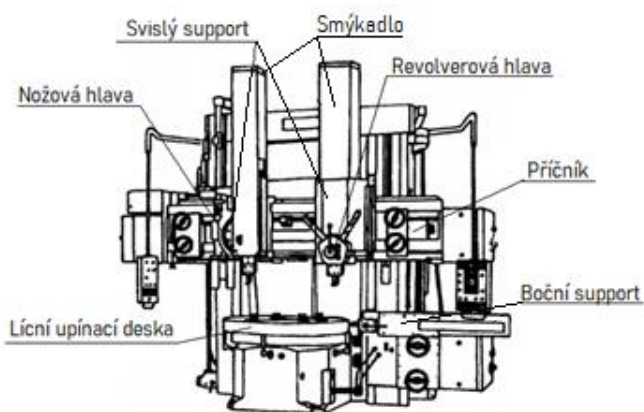
Stavba těchto strojů se vyznačuje rotací upínací desky kolem vertikální osy C, na které je upnut na obrobek. [22]

Tyto stroje byly vytvořeny pro potřebu obrábění rozměrných a zároveň těžkých rotačních součástí, kde v některých případech může výrazně převažovat průměr nad délkou obrobku. Velikost otočného stolu určuje maximální průměr obrobku a zároveň charakterizuje velikost soustruhu. Tyto průměry zpravidla určují velikostní řady jednotlivých výrobců. [18,19]

Svislé soustruhy se dle základní stavby dělí na jedno stojanové (obrázek 4.1) a dvou stojanové (obrázek 4.2.), které se používají pro obrobky s většími průměry. Na stojanu je uchycen příčník, který nese support se smykadlem s nožovou hlavou pro upínání nástrojů nebo revolverovou hlavou, pro urychlení výměny nástrojů. Support koná pohyb po příčníku v ose X a smykadlo v něm uložené pohybuje v ose Z. Naproti tomu u dvou stojanových soustruhů příčník vede na dvou stojanech, což umožňuje prodloužení příčníku a zvýšení průměru stolu. Příčníky mohou být pevné nebo přestavitelné v ose W. Přestavitelnost příčníku ovlivňuje vyložení smykadla v ose Y a tím i jeho tuhost. [19,20]



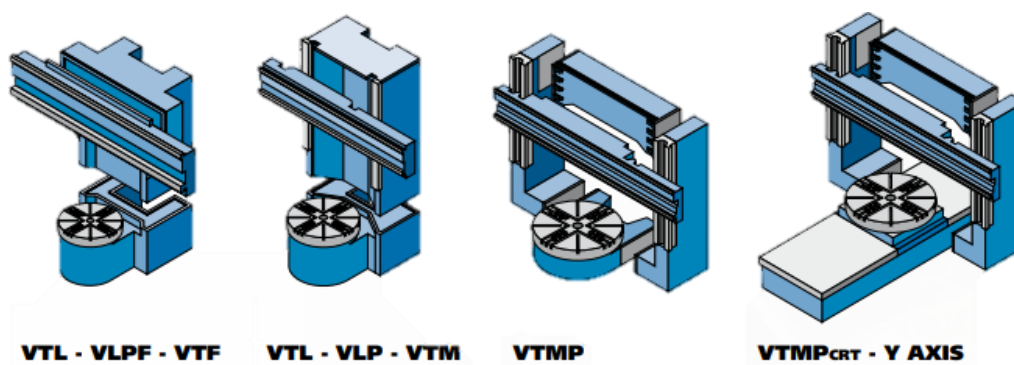
Obrázek 3.1.: Jedno stojanový svislý soustruh



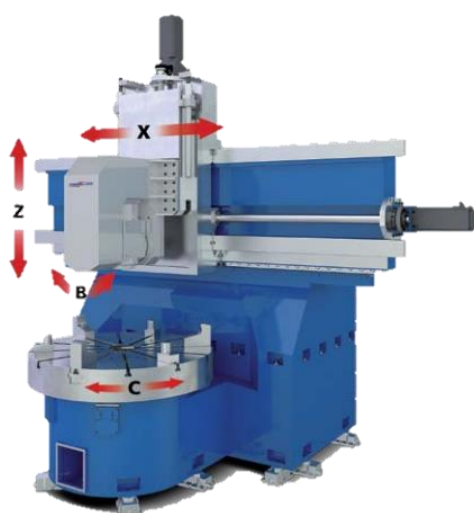
Obrázek 3.2.: Dvou stojanový svislý soustruh

Svislé soustruhy je možno přestavit na svislá obráběcí centra karuselového typu, která umožňují provádění vrtacích, frézovacích a brousících operací na jedno upnutí, což přispěje k urychlení celkového výrobního procesu. Centra se vyznačují doplněným pohybem v ose Y, jenž je

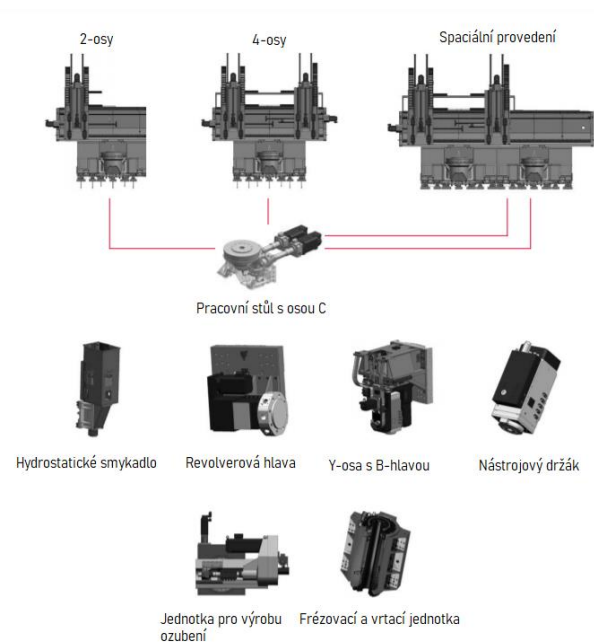
zajištěn například u dvoustojanových strojů pohyblivým portálem nebo posuvným soustružnickým stolem s přidanou osou C, anebo tyto úkoly může obstarávat přídatná Y-hlava. Velkou výhodou pro výrobce a uspokojení různých poptávek zákazníků je stavebnicové provedení stroje.



Obrázek 3.3.: Řada strojů Sirmu



Obrázek 3.4.: Sirmu VTE 150-FTD

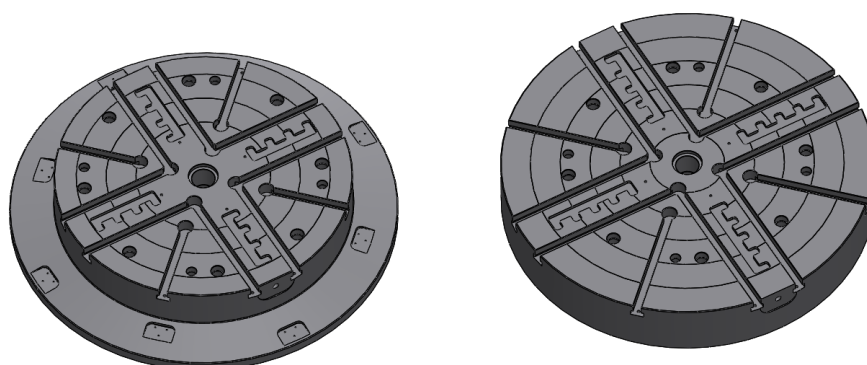


Obrázek 3.5.: Prvky stavebnicového provedení svislých soustruhů a soustružnických center firmy VDM firmy Hessap

3.1 Desky svislých soustruhů

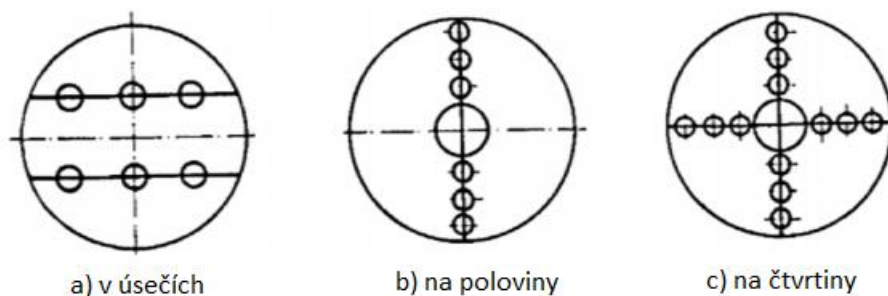
Upínací deska svislých soustruhů patří k nejzásadnějším konstrukčním uzlům vertikálních soustruhů. Jejími hlavními funkcemi je pevné upnutí obrobku o velké hmotnosti, kterému při soustružnických operacích poskytuje hlavní řezný pohyb. Doplňková osa C zajišťuje přesné polohování obrobku pro frézovací a vrtací operace. Tyto funkce musí být zaručeny při dostatečné celkové tuhosti desky i samotného vedení, tak aby byla zajištěna dostatečná rozměrová a geometrická přesnost obrobku. [23]

Desky zpravidla bývají odlité z oceli nebo šedé litiny, v krajních případech svařované z oceli a obsahují velké množství tangenciálních a radiálních žeber. U menších soustruhů se vyrábějí vcelku. Naopak desky větších rozměrů mají oddělenou vnější část zvanou duplex. Toto je jeden z rozdílů mezi deskami strojů Powerturn 1000 a 1250.



Obrázek 3.6.: Deska pro Powerturn 1000 (vlevo) a pro 1250 bez duplexu

Desky o průměrech větší, než 4000mm mohou být složené z více částí, kromě výrobních důvodů tato stavba hlavně usnadňuje následný transport stroje k zákazníkovi. Způsobu rozdělení desky je hned několik. Desky se dělí například v úsečích nebo na poloviny, případně na čtvrtiny. Dělení musí být symetrické, neboť by mohlo způsobit nevyváženost při rotaci a negativně měnit tuhost samotné desky. Spojení jednotlivých dílů musí být předepjaté, aby se celá sestava deformovala jako jednolitě těleso. [22]



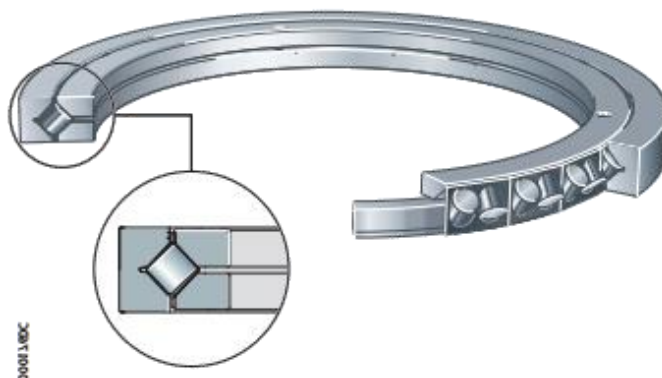
Obrázek 3.7.: Způsoby rozdělení velkých desek

Pro upnutí obrobku se zpravidla používají samostatně stavitelné čelisti. Stroje Powerturn 1000 a 1250 disponují čtyřmi čelistmi, není ovšem výjimkou, že desky větších rozměrů obsahují až osm čelistí. pro další upínání je také možno použít T drážky, kterými desky též disponují.

U malých soustruhů se kroutící moment pro pohánění rotace desky přenáší středovou hřídelí. Naopak u větších strojů, jejichž deska se vyskytuje v této práci, se kroutící moment přenáší ozubeným věncem umístěným na obvodu desky. I v tomto pohonu se dle naměřených dat generuje teplo a bude se s ním muset počítat. [22]

3.1.1 Uložení desky svislých soustruhů

Na desku a její uložení působí v radiálním směru převážně jen složky řezného odporu, které působí i v axiálním směru spolu s hmotností desky a obrobku. Tyto zatížení musí přenášet uložení, které může být hydrodynamické, valivé, hydrostatické, nebo jejich kombinace.



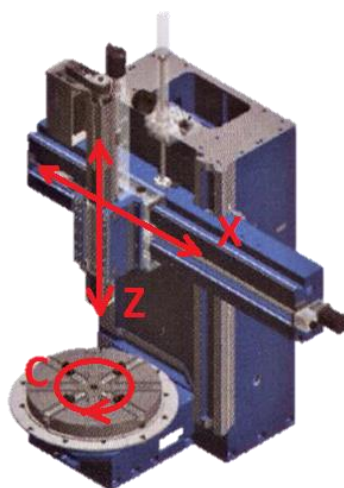
Obrázek 3.8.: Křížové válečkové ložisko

U strojů řady Powerturn 1000 a 1250 je použito valivé vedení ložiska s kříženými válečky oddělenými klecí. Díky tomu mohou být sousední valivé elementy vůči sobě pootočený o 90° . Elementy s klecí jsou uloženy v jednom vnějším a ve dvou vnitřních kroužcích, jejichž vlastní vzdáleností lze nastavit předpětí ložiska.

U vyšších řad strojů se již vyskytují desky uložené hydrostaticky.

4 Popis stroje

Svislé soustružnické obráběcí centrum, též označované jako karusel z řady Powerturn od firmy TOSHULIN, se vyznačuje upínací deskou se svislou osou otáčení, na níž je upnutý obrobek. Tato koncepce je vhodná pro rozměrné rotační dílce, které jsou charakteristické výrazným průměrem oproti jejich vlastní délce. Uspořádání tohoto stroje umožňuje snadnější zakládání velkých polotovarů, to je ovšem vykoupeno špatným odvodem třísek z okolí stolu vzniklých při obrábění.



Obrázek 4.1 Koncepce obráběcího centra Powerturn firmy TOSHULIN [9]

Polohovatelná upínací deska s obrobkem rotuje kolem osy C a nástroj upnutý na smykadle se pohybuje v ose X a Z. Průměr desky charakterizuje velikost stroje. Toshulín vyrábí stroje s průměrem desky od 800mm do 4000mm. Řada Powerturn je určena pro technologicky náročné operace s vysokou přesností. V této práci se bude pracovat s deskou o průměru 1000mm, které jsou uloženy na křížovém válečkovém ložisku.

Tabulka 4.1 Parametry strojů Powerturn 1000 a 1250 firmy TOSHULÍN

POWERTURN	1000	
Průměr upínací desky	1000	[mm]
Maximální průměr obrobku	1400	[mm]
Maximální výška obrobku	1800	[mm]
Maximální hmotnost obrobku	8000	[kg]
Maximální otáčky upínací desky	800	[min ⁻¹]

Upínací deska a ostatní její přilehlé části jsou odlity z uhlíkové feriticko-perlitické oceli. Ložisko je vyrobeno z chromové oceli pro valivá ložiska.

5 Analýza teplotního chování upínací desky svislého soustruhu

Kvůli požadavku na snížení teplotních chyb desky stroje byl vytvořen analytický model vystihující skutečné chování desky bez zatížení obráběcím procesem. Podmínky pro vytvoření tohoto funkčního modelu jsou odvozeny z již provedeného měření na sestaveném funkčním stroji. Vytvořený model se následně obohatí o možné konstrukční úpravy, jejichž vliv na teplotně-mechanické chování desky se bude porovnávat s původním modelem.

Bez znalosti měření můžeme předpokládat tyto hlavní tepelné vlivy působící upínací desku stroje a její přilehlé komponenty:

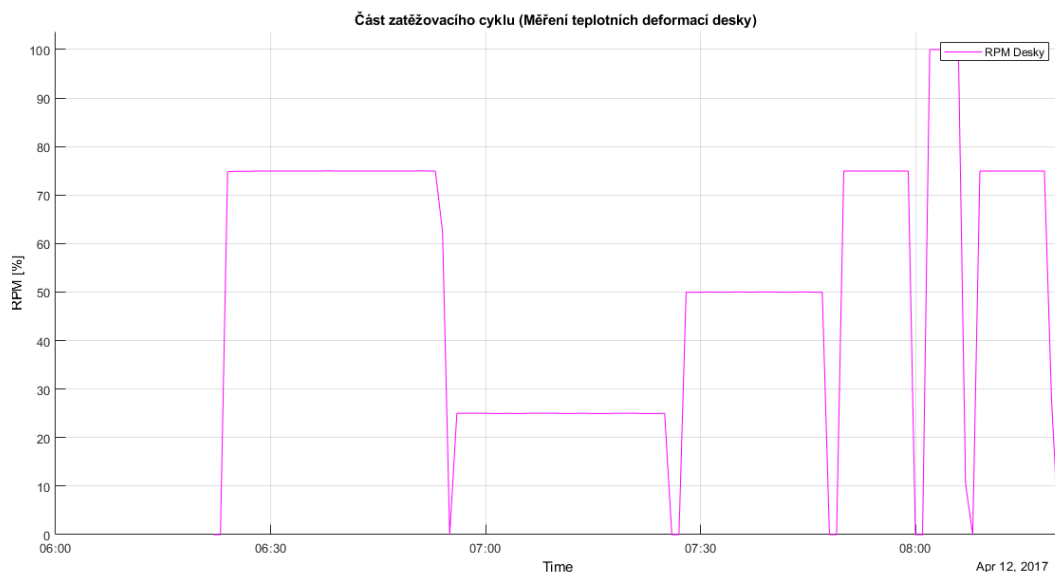
- A. Vnitřní vlivy
 - Rotace desky
 - Křížové ložisko
 - Ozubený pohon
 - Chlazení olejem
- B. Vnější vlivy
 - Okolní teplota
 - Proudění vzduchu
 - Sluneční záření
 - Okolní stroje
 - Obsluha

Skutečné působení těchto vlivů přiblížilo následující měření.

5.1 Měření teplotních deformací desky

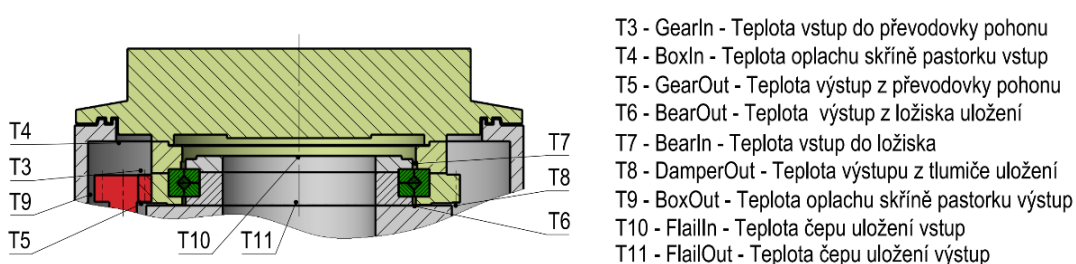
Pro sestavení analýzy teplotního chování desky se vychází z již provedeného měření provedené na stroji se stolem o průměru 1000mm. Při tomto experimentu se stroj zatěžoval předem stanovenými rychlostmi rotací upínací desky po daných časových úsecích. Tyto zátěžné cykly byly stanoveny podle požadavků odběratele těchto strojů, jenž vystihují vytížení

strojů při jejich skutečném nasazení ve výrobě. Zákazník klade důraz na zajištění vysoké tepelné stability stroje bez softwarového kompenzování.



Obrázek 5.1: Část zatěžovacího spektra rychlosti otáčení desky (počátek měření)

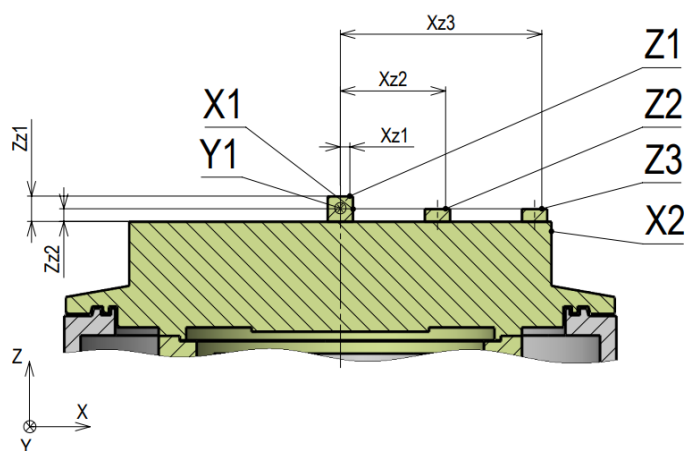
Po celou dobu měření se v minutových intervalech odečítala teplota okolí a oleje ve stanovených místech chladicího okruhu komponentů desky. Nutno podotknout, že jsou tyto teploty ovlivněny nejen samotným ohříváním komponentů stroje, ale zároveň měnícími se vstupními teplotami oleje do stroje, jejichž odchylky jsou způsobeny výstupem z regulovaného chladiče umístěného v chladicího okruhu.



Obrázek 5.2: Umístění čidel pro měření teplot v chladícím okruhu stroje

Uspořádání měření je na obrázku 2.8., kde stojan pro měření deformací na povrchu stolu tvořilo smykadlo, na kterém byla v místě uchycení nástroje vodorovně připevněna teplotně stabilní tyč s rozmístěnými úchylkoměry. Po každém zátěžném úseku s konstantními otáčkami se deska

vedla do klidového stavu a změřily se výchylky polohy ve stanovených bodech na povrchu desky.



Obrázek 5.3 Umístění měřených bodů na povrchu desky

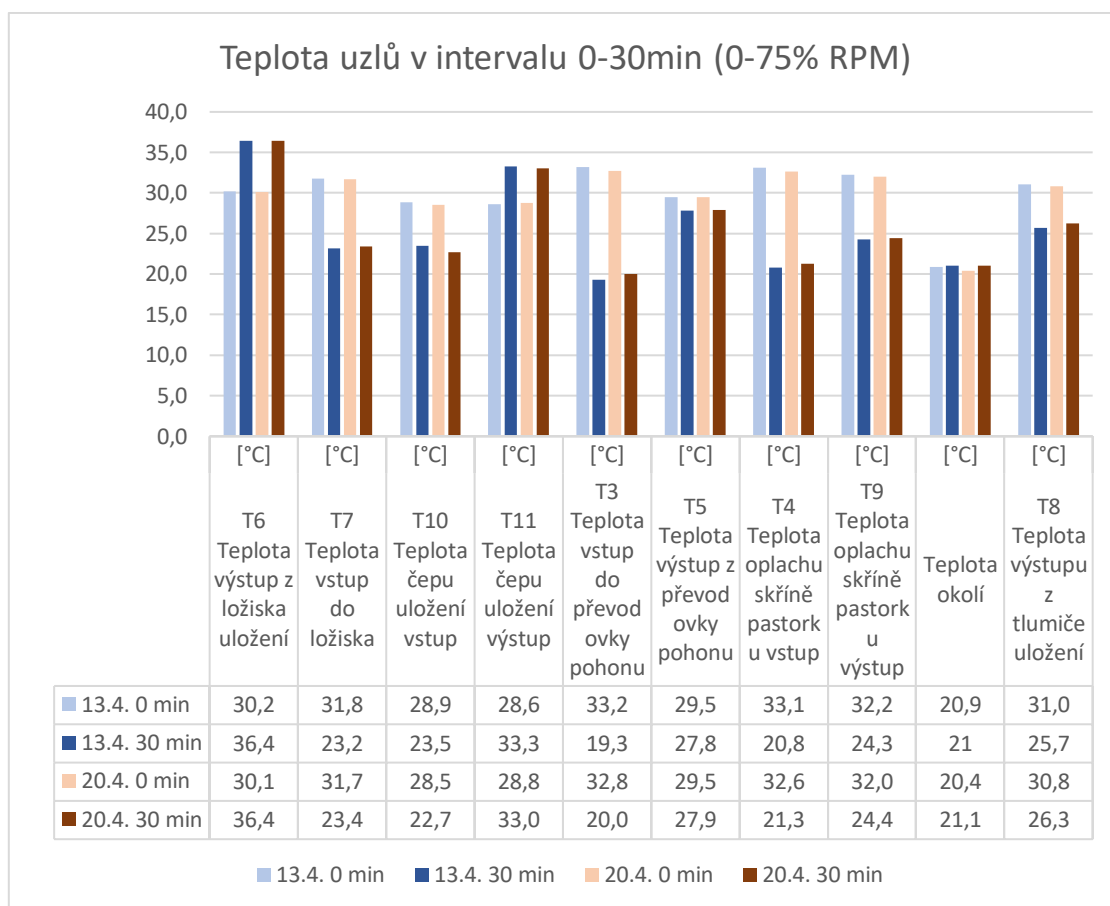
Toto komplexní a časově náročné měření bylo provedeno dvakrát, z důvodu odhalení možné anomálie při průběhu měření.

5.2 Vyhodnocení naměřených dat

Následný simulační model vychází z předchozího měření. Nebude však postihovat celé měření, které probíhalo několik hodin, a to z důvodu enormní rozsáhlosti výpočtového modelu. To byl hlavní důvod pro vytyčení pouze omezeného úseku měření, jenž bude model simulovat.

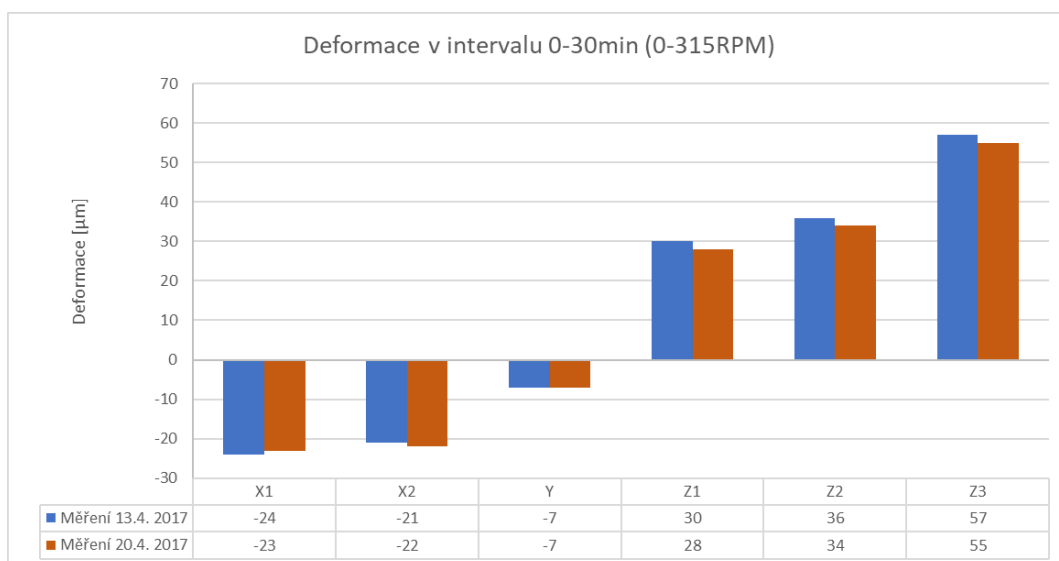
Pro simulaci se použije první zatěžovací úsek, ten je vhodný pro svou vlastní délku. Díky jeho délce se může pro zjednodušení jeho konečný teplotní stav stroje uvažovat jako ustálený. Totéž se může uplatnit i pro počátek měření. Posledním důvodem pro výběr tohoto intervalu se stala rychlost rotace desky, jenž rotuje na 75% ze svého maximálního rozsahu. Díky této diferencii zatížení lze předpokládat výrazné teplotní změny a deformace desky

Pro simulační analýzu se uvažuje počáteční teplota komponent stroje jako změřená počáteční teplota okolí. Ovšem pro konečnou teplotu na konci úseku se kvůli počátečnímu skoku a následným výkyvům způsobeným nekonstantním chlazením vychází z teplot zprůměrovaných z posledních 2/3 vybraného intervalu.



Obrázek 5.4: Graf teploty uzlů získané z měření v prvním časovém úseku(0-30min)

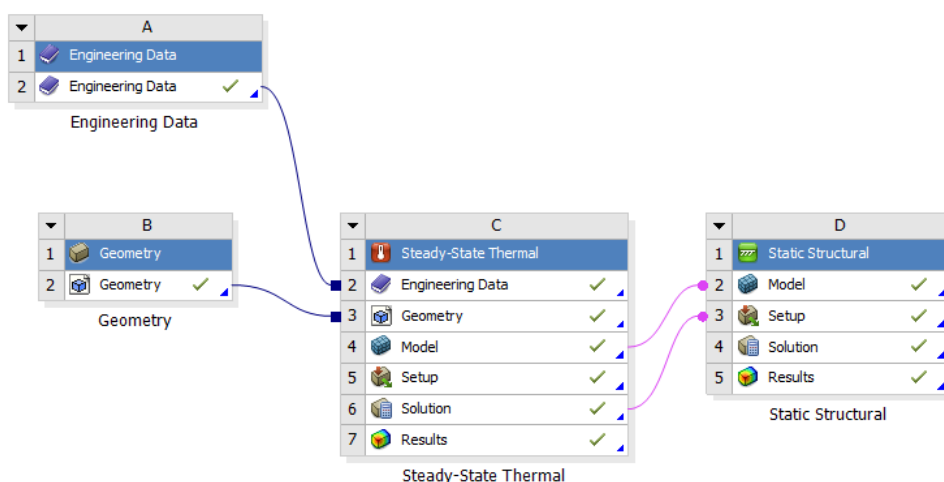
Pro kontrolu naladěného modelu se využijí odchylky polohy desky změřené na konci tohoto zatěžovacího úseku.



Obrázek 5.5 Deformace získané z měření na konci prvního časového úseku(0-30min)

5.3 Simulační teplotně-mechanický model sestavy

Dle přechodí rozvahy se vytvořil model, který má za úkol přiblížit skutečné chování desky. Jeho úspěšnost se posuzuje porovnáním jeho vlastních odchylek polohy na povrchu desky s těmi naměřenými na skutečném stroji v ose Z.



Obrázek 5.6 Schéma výpočetního modelu

Výpočtový model se tedy rozděluje na dvě části. První se nazývá Steady-State Thermal, jenž má za úkol simulovat změnu počáteční ustálené teploty desky v klidovém režimu do ustáleného stavu na konci daného zatěžování. Z této části se importuje teplotní zatížení vniklé změnou teplot do druhé části modelu nazvané Static-Structural, ve které se doplní mechanické okrajové podmínky a vygeneruje se následná deformace modelu.

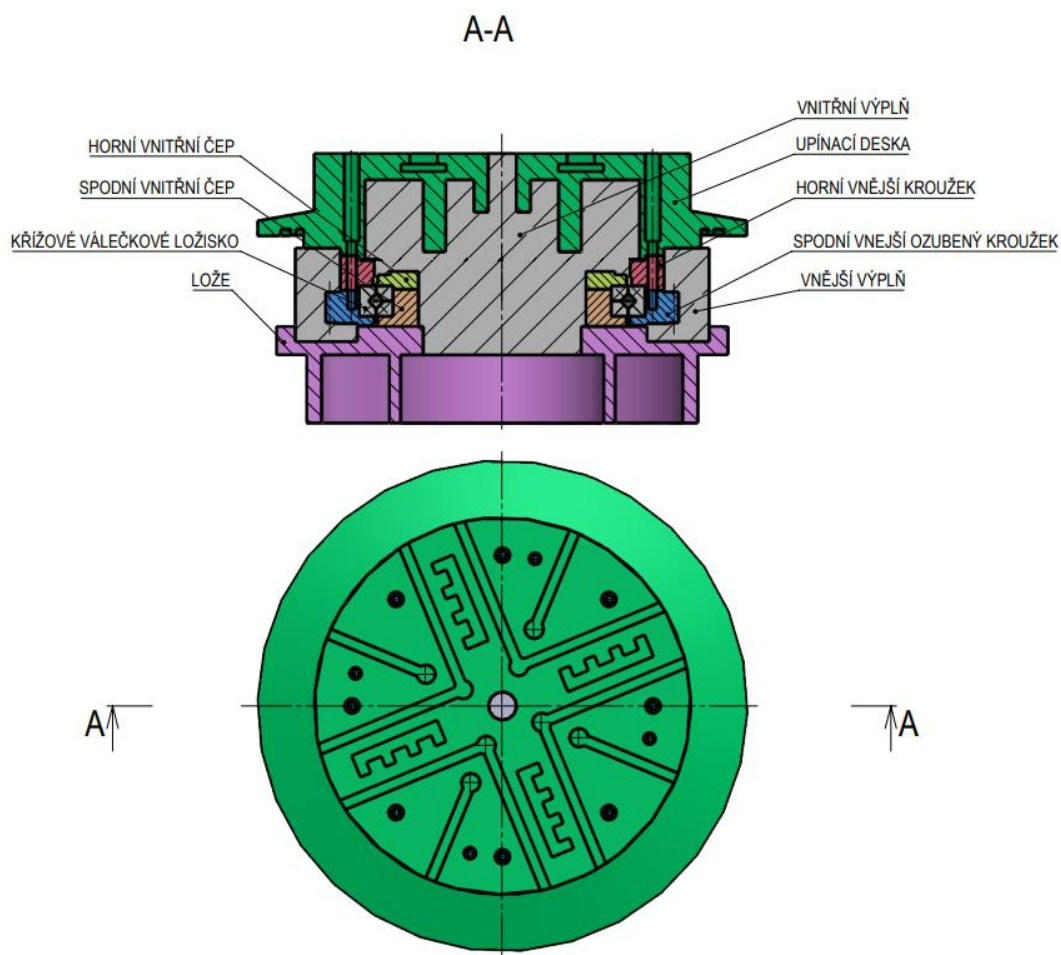
5.3.1 Nastavení teplotní úlohy

Jelikož úloha teplotní úloha se počítá od původního klidového teplotního stavu do koncového ustáleného stavu v nekonečném času, je nutno tomu přizpůsobit okrajové podmínky a samotný model, aby úloha vystihovala skutečné chování stroje.

Výpočtový model

Výpočtový model se sestavil s využitím pouze objemových prvků. Objemová tělesa se využívají pro třírozměrné objekty, z nichž žádný rozměr není vůči zbývajícím zanedbatelný.

Základním prvkem výpočtového modelu je upínací deska, na které byla umístěna čidla pro měření deformací. Její původní CAD model se zjednodušil zanedbáním systému upínání obrobku čelistmi, dále odstraněním rádiusů, dalších malých výstupků a děr, které její model a následný výpočet výrazně usnadní.



Obrázek 5.7 Výpočetní model měřené desky

Deska je usazena na vnějších kroužkách, které vzájemně svírají vnější kroužek křížového válečkového ložiska. O uložení ložiska desky k loži stroje se stará oddělitelný horní a spodní vnitřní čep, který zároveň předepíná

ložisko. Tímto způsobem je umožněn rotační pohyb desky kolem osy C. O pohon rotace desky se stará pohon Master-Slave, jímž poháněný ozubený věnec je umístěn na vnějším průměru spodního vnějšího kroužku. Geometrie těchto kroužků byla oproti původním CAD modelům opět zjednodušena.

Křížové válečkové ložisko je namodelováno jako přibližná sestava vnějších kroužků pro vedení valivých elementů, protože se jeho výkresová dokumentace nebo CAD model se nepodařilo získat.

Na vnitřním otvoru tohoto čepu byl při měření umístěn olejový chladič, o kterém známy pouze jeho vstupní a výstupní teploty oleje.

Část namodelovaného lože zde slouží hlavně, jako teplotní okrajová podmínka pro odvod tepla dále do stroje.

Poslední částí modelu tvoří výplně, které představují vzduchové dutiny komponentů desky, do kterých vytéká chladící olej. Tyto výplně se snaží modelově napodobit vedení tepla, ke kterému zde dochází.

Všechny součásti modelu jsou na stykových plochách vzájemně spojeny ideálními kontakty.

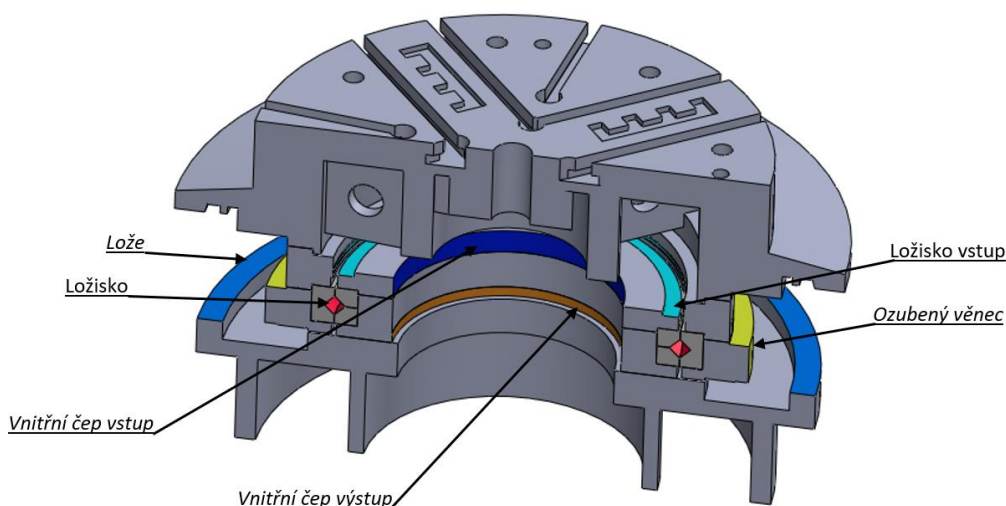
Okrajové podmínky

Do této části úlohy se zadávají počáteční a koncové teploty daných uzlů. Pro počáteční teploty se použije teplota okolí na začátku měření, poněvadž se vychází z předpokladu, že byl stroj před začátkem měření v klidovém stavu. Teploty, ze kterých vychází stanovení teplotních okrajových podmínek pro výchozí teplotní změnu modelu se určily z průměrných hodnot naměřených při zatěžování stanovenými otáčkami v posledních 2/3 intervalu. Tyto teploty se používají jako orientační, protože vyjadřují pouze teplotu protékajícího oleje, nikoliv teplotu skutečných součástí. Jejich skutečná teplota se odhadne na základě výstupní teploty chladícího oleje. Jedny z hlavních důvodů je neznámý průtok oleje a geometrie jeho toku. Proto pro nalezení optimální varianty vzniklo několik desítek modelů s různými okrajovými podmínkami, aby se dosáhlo plynulých přechodů teplotního pole a

zároveň byla správnost tohoto nastavení ověřena dle deformací desky. Dále se již popisuje pouze optimální varianta.

Ložisko

Hlavním zdrojem tepla v tomto modelu je ložisko, pro tuto komponentu je ovšem nemožné získat doplňující informace, z kterých by bylo možné dopočítat tepelný výkon, který generuje při zátěži. Z tohoto důvodu se při stanovení jeho teploty vycházelo pouze ze vstupní (T7) a výstupní teploty (T6) oleje, který ho ochlazoval. Nejlépe se osvědčilo nastavení teploty na valivé plochy kroužku s hodnotou o 2,2% vyšší než byla naměřená výstupní teplota oleje (T7). Dále se nastavila na horní část čepu a část horního vnějšího kroužku, kde je přepokládán začátek vtoku oleje, teplota o 18% vyšší než je vstupní teplota oleje vstupujícího do ložiska (T6),



Obrázek 5.8 Přehled základních okrajových podmínek teplotní úlohy

Ozubený věnec

Obdobným případem se stal i ozubený věnec, který je poháněn dvěma pastorky typu Master-slave. V tomto případě je opět nutné řídit se vstupní (T3) a výstupní (T5) teplotou oleje. Na povrchu ozubení je nastavena teplota o 5 % vyšší než je výstupní teplota oleje (T5).

Vnitřní čep

Přímo na vnitřním čepu byl umístěn olejový chladič, o něm ovšem není znám jeho průtok oleje, ani jeho uspořádání, ale pouze jeho vstupní (T10) a výstupní teplota oleje (T11). Chladič byl nahrazen vstupní teplotou na horní části plochy vnitřního průměru čepu a výstupní teplotou na spodní části plochy. Horní část plochy čepu obsahuje teplotu vstupu (T11) zvýšenou o 23% a spodní část teplotu výstupu (T10) jejíž hodnota je ponechána.

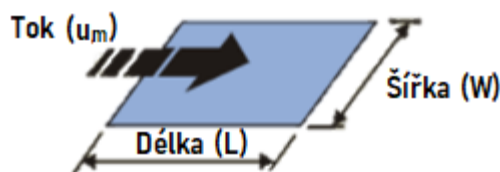
Lože

Vnější krajní povrch lože má na povrchu nastavenou teplotu, která představuje styk s chlazeným vnějším krytováním stroje. Tato teplota odpovídá výstupu z oplachu skříně a pastorku (T9) zvýšené o 7%.

Vnější prostředí

Samotná teplota okolí se po dobu měření nijak zvlášť neměnila, v modelu se tedy považuje za konstantní. Dalším faktorem je radiace povrchu desky, ta se stanovila tabulkově, dle materiálu desky a opracování jeho povrchu.

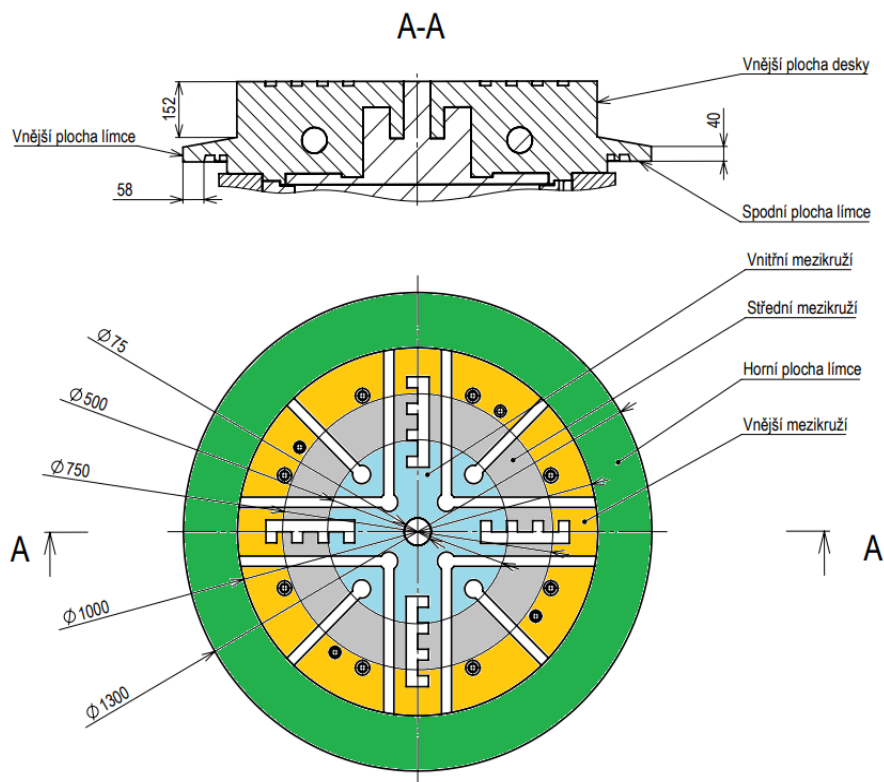
Na povrchu desky se stanovila také jeho nucená konvekce, která je ovlivněna rotací desky. Pro její stanovení se tedy použil výpočet izotermické ploché desky ofukované vzduchem.



Obrázek 5.9 Schéma výpočtu nucené konvekce

Povrch desky se rozdělil na několik mezikružích, kvůli jejímu velkému průměru, který způsobuje velký rozsah obvodových rychlostí od jejího středu až po vnější hranu. Pro zjednodušení výpočtu se plochy mezikružích se „narovnal“ na obdélníkové plochy a pro určení rychlosti ofukovaného

vzduchu se použila obvodová rychlost bodu desky uprostřed každého mezikruží a délka desky se vypočítala jako střední obvod mezikruží. Teplota povrchu desky se stanovila jako průměrná ze simulačního modelu, na kterém nebyly nastaveny konvekce povrchu.



Obrázek 5.10 Rozmístění konvekci na povrchu desky

Postup výpočtu jednotlivých konvekci je uveden v příloze.

Tabulka 5.1 Hodnoty nastavených součinitelů přestupu tepla povrchu upínací desky

Součinitel přestupu tepla		
Vnitřní mezikruží	9,0	[W/m ² .°C]
Střední mezikruží	24,0	[W/m ² .°C]
Vnější mezikruží	34,9	[W/m ² .°C]
Horní plocha límce	44,2	[W/m ² .°C]
Vnější plocha desky	39,3	[W/m ² .°C]
Vnější plocha límce	48,6	[W/m ² .°C]
Spodní plocha límce	46,9	[W/m ² .°C]

Materiály a materiálové vlastnosti

Tyto vlastnosti tvoří jedny ze základních vstupních dat pro výpočtový model vedení tepla a následných deformací. V tomto případě jsou komponenty stroje odlity z uhlíkové perliticko-feritické oceli, pouze ložisko je vyrobeno z materiálu 100Cr6. Model obsahuje i vzduchovou výplň, jenž nese materiálové vlastnosti vzduchu, pouze je upravena hodnota jeho vodivosti, za účelem postihnout proudů vzduchu vzniklé vlivem jeho rotace.

Spojení jednotlivých komponent

Kontakty mezi jednotlivými vzájemně spojenými součástmi jsou nastaveny jako ideální, tudíž zde bude docházet k dokonalé výměně energie mezi všemi součástmi. V modelu pro zjednodušení nejsou uvažovány šroubové spoje, to platí i pro mechanickou úlohu

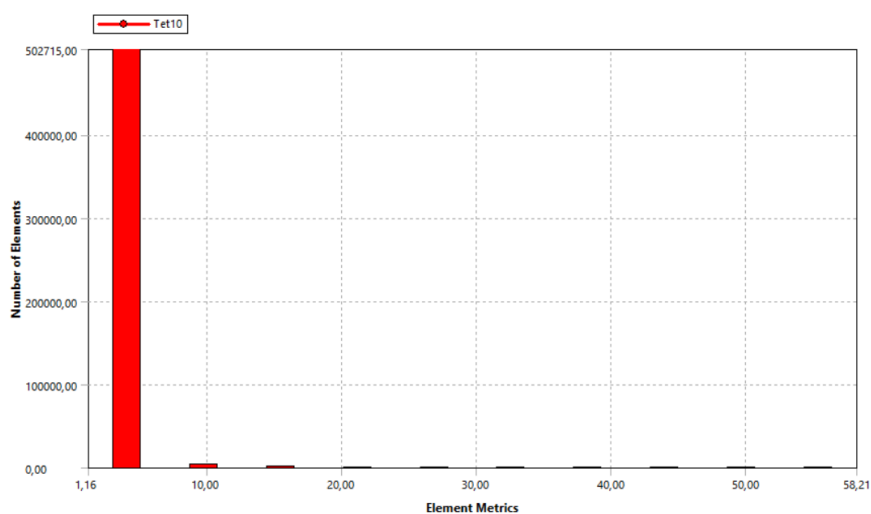
MKP síť výpočtového modelu

Model je tvořený pouze objemovými díly a jejich vysíťování bylo provedeno automaticky (typ sítě - volná) s definováním globální velikosti prvků. Velikost těchto prvků se odvíjí na základě studie síťování úlohy modelu samotné upínací desky, která je řešena v kapitole 6.4. Deska si velikosti jejích prvků ponechá i v této sestavě. Velikosti prvků ostatních komponent mají pro zkvalitnění výpočtu buď stejné velikosti nebo menší, jako například pro ložisko, kde vzniká velký teplotní gradient, a proto má nejjemnější síťování ze všech komponentů. Pro síťování teplotní úlohy byl využit prvek solid187 a pro teplotní solid 87.

Tabulka 5.2 Vlastnosti MKP sítě simulační sestavy

Vlastnosti MKP sítě sestava		Objemová
Dimenze prvků sítě		Objemová
Typ sítě		Volná
Globální velikost prvků		[mm]
	Upínací deska	40
	Výplň desky	40
	Lože	30
	Vnitřní výplň	30
	Horní vnitřní čep	25
	Spodní vnitřní čep	25
	Horní vnější kroužek	25
	Spodní vnější kroužek	25
	Ložisko	7,5
Počet uzlů		809106
Počet elementů		507988

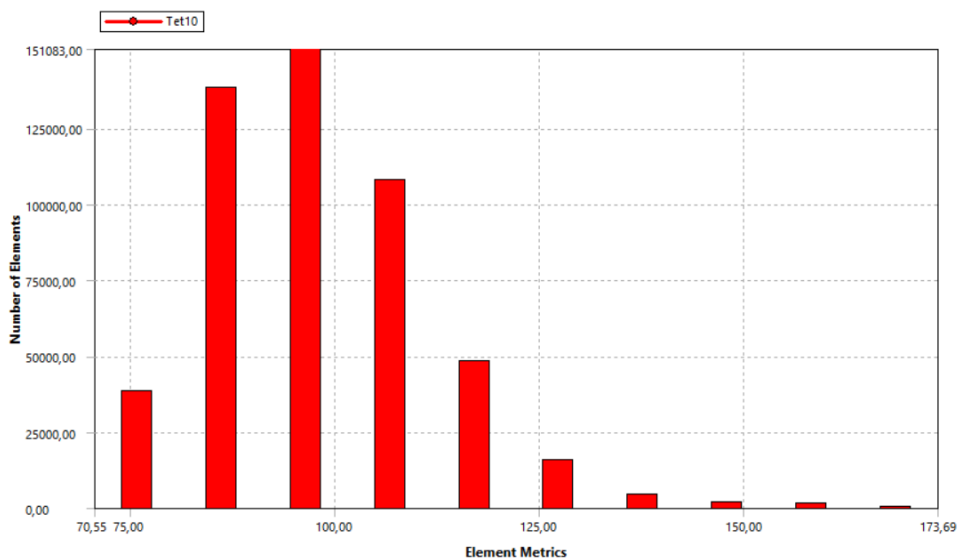
Důležitým prvkem pro kontrolu kvality sítě je tzv. aspect ratio. Jedná o poměr délek stran jednotlivých elementů. V podstatě se jedná o zachování určitého poměru stran, aby jedna strana nebyla vůči ostatním výrazně menší, resp. větší. Dle doporučení dodavatele softwaru by poměr délek stran neměl být větší než 1:20.



Obrázek 5.11 Rozložení a kvalita prvků modelu simulační sestavy

dle poměru stran – tzv. aspect ratio

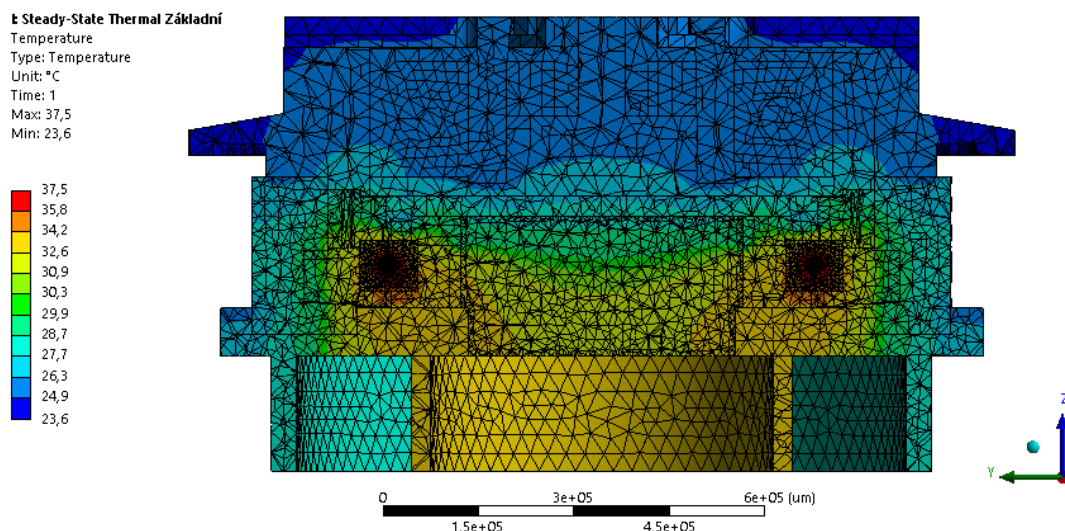
Související kontrolou MKP sítě pokračuje tzv. maximum corner angle. Představuje maximální dovolený úhel mezi přilehlými stranami elementu. U trojúhelníkových a čtvercových prvků by tento úhel neměl přesáhnout úhel 165°.



Obrázek 5.12 Rozložení a kvalita prvků simulační sestavy dle úhlu přilehlých stran – tzv. maximum corner angle

Výsledky ladícího výpočtu

Z teplotního pole ladícího modelu je vidět, jak už předchozí měření naznačilo, že největší teplotní zatížení je v okolí ložiska a v jeho okolních součástích. A teplotní změny na sebe plynule navazují, jak by se po tomto modelu očekávalo.



Obrázek 5.13 Teplotní pole ladícího modelu sestavy

5.3.2 Nastavení strukturální úlohy

V této úloze se analyzuje vliv teplotního zatížení na danou strukturu stroje.

Geometrie zůstává totožná, jako v části Steady-State Thermal, pouze došlo k potlačení výplní, které zde již nemají žádný význam. Kontakty mezi tělesy se zachovávají. Zadává se zde teplotní a gravitační zatížení.

Tuhost ložiska

Náhrada ložiska je definována v preprocesoru pomocí prvku Matrix27, jehož geometrie není definována, ale jeho kinematická odezva se specifikuje pomocí tuhosti ve formě matice. Ta je definována pro dva uzly, z nichž má každý šest stupňů volnosti. Tento prvek propojuje dva remote pointy, které jsou definovány na valivých drahách ložiska.

Samotná definice tohoto prvku je provedená pomocí APDL skriptu, ve kterém jsou uvedeny hodnoty tuhostí v lineárních směrech x, y a z a tuhosti klopných momentů kolem těchto os.

Ustavení stroje

Ustavení modelu stroje se uskutečnilo funkcí Remote displacement na spodních ploše vnitřního čepu spodní plochy, kterému se odebralo všech šest stupňů volnosti stroje a nastavila podmínka povrchu Deformable.

K této variantě uložení se dostalo po zkoušce několika způsobů uložení, kdy se ukázalo, že tyto způsoby ovlivňují pouze posuny ve směru Z. Tato varianta se vybrala kvůli nejbližší hodnotě deformace hodnoty Z.

Vzhledem k tomuto uložení je ve strukturální části potlačené také lože, které představuje teplotní okrajovou podmínku.

Tabulka 5.3 Ovlivnění způsobem uložení

Vliv usazení modelu na deformaci			
Měření	Z1	Z2	Z3
Poloha X	0	311	495
Jednotky	[μm]	[μm]	[μm]
Měření 13.4. 2017	30	36	57
Měření 20.4. 2017	28	34	55
Vnitřní žebro lože spodní plocha (RIGID))	81,3	87,3	97,9
Vnitřní a vnější žebro lože spodní plocha (RIGID))	82,7	88,6	99,2
Vnitřní a vnější žebro lože spodní plocha (Deformable))	58,5	64,4	75,0
Vnitřní žebro lože spodní plocha (Deformable))	77,5	83,4	94,0
Vnější žebro lože spodní plocha (Deformable))	68,9	74,8	85,4
Vnitřní čep spodní plocha (Deformable))	41,4	47,3	57,9

5.4 Simulační teplotně-mechanický model upínací desky

Pro porovnání teplotního vlivu na deformaci samotné desky se vytvořil nový model, který obsahuje pouze samotné těleso desky, pro zjednodušení náročnosti výpočtu a pro porovnání na jejího vlastního vlivu na deformaci sestavy. Tento neupravený model následně slouží pro porovnávání deformací s upravenými variantami desek.

5.4.1 Nastavení teplotní úlohy

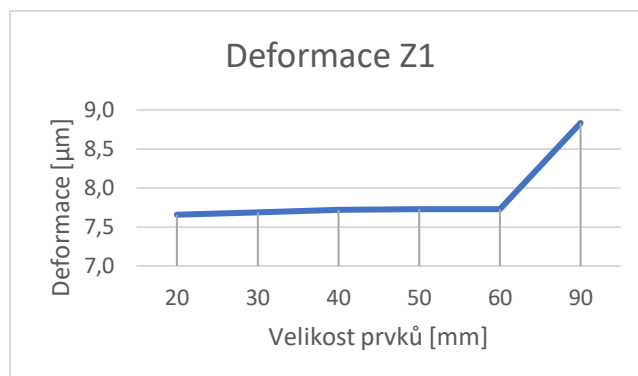
Okrajové podmínky

Na dosedací ploše s horním vnějším kroužkem je přidána podmínka Temperature, jejíž hodnotu se získala ze simulačního modelu sestavy.

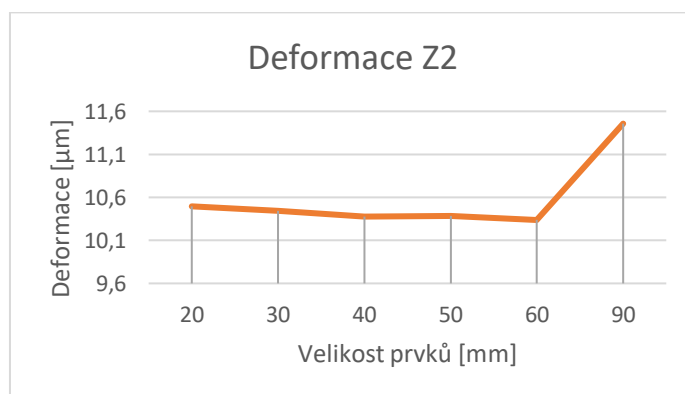
Povrchu desky je ponecháno nastavení konvekce z ladící úlohy.

MKP síť výpočtového modelu

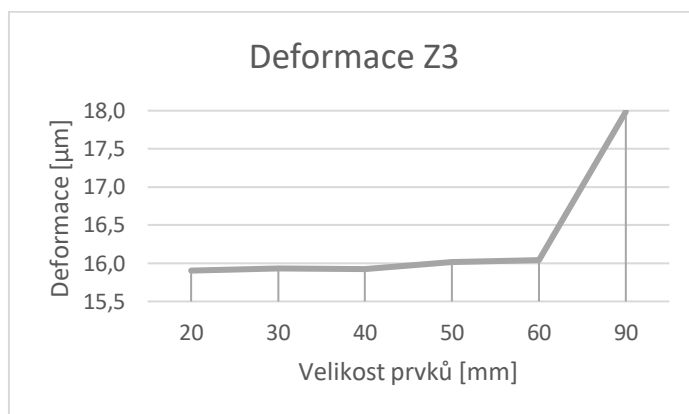
V této úloze se ověřil vliv globální velikosti elementu MKP sítě na výsledky teplotní, tak následně strukturální analýzy. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno několik stejných modelů, u kterých se měnil parametr hrubosti sítě. Tyto modely byly vyřešeny a následně vyhodnoceny závislosti požadovaných parametrů (teplotní analýza – maximální teplota v bodě Z1, strukturální analýza – posunutí Z1, Z2 a Z3) na velikosti prvku.



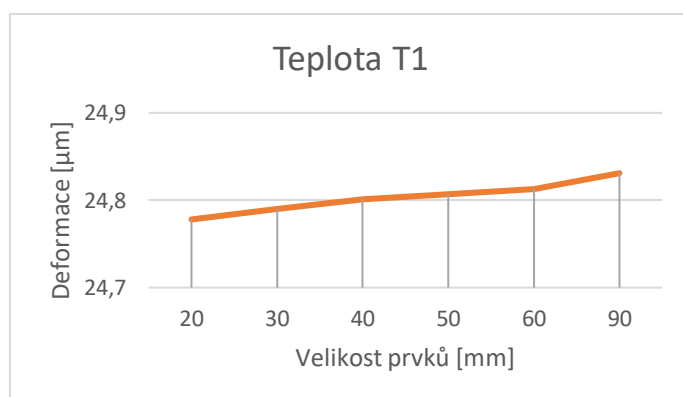
Obrázek 5.14 Závislost změny deformace Z1 na velikosti prvků MKP sítě



Obrázek 5.15 Závislost změny deformace Z2 na velikosti prvků MKP sítě



Obrázek 5.16 Závislost změny deformace Z3 na velikosti prvků MKP sítě



Obrázek 5.17 Závislost změny deformace teploty na velikosti prvků MKP sítě

Z těchto závislostí je vidět, že se hodnota deformace výrazně ustálí na hodnotě velikosti elementu 60mm, ale teplota má tendenci se stále snižovat, ale její pokles již není pro úlohu nijak zásadní. Z tohoto porovnání, lze konstatovat, že dosavadní síťování desky je naprosto dostačující a další zmenšování elementů má již zanedbatelný vliv na výsledek.

Shrnutí vlastností MKP sítě použité pro výpočtový model ukazuje následující tabulka.

Tabulka 5.4 Vlastnosti MKP sítě desky

Vlastnosti MKP sítě deska	
Dimenze prvků sítě	Objemová
Typ sítě	Volná
Globální velikost prvků	[mm]
Upínací deska	40
Počet uzlů	51463
Počet elementů	29097

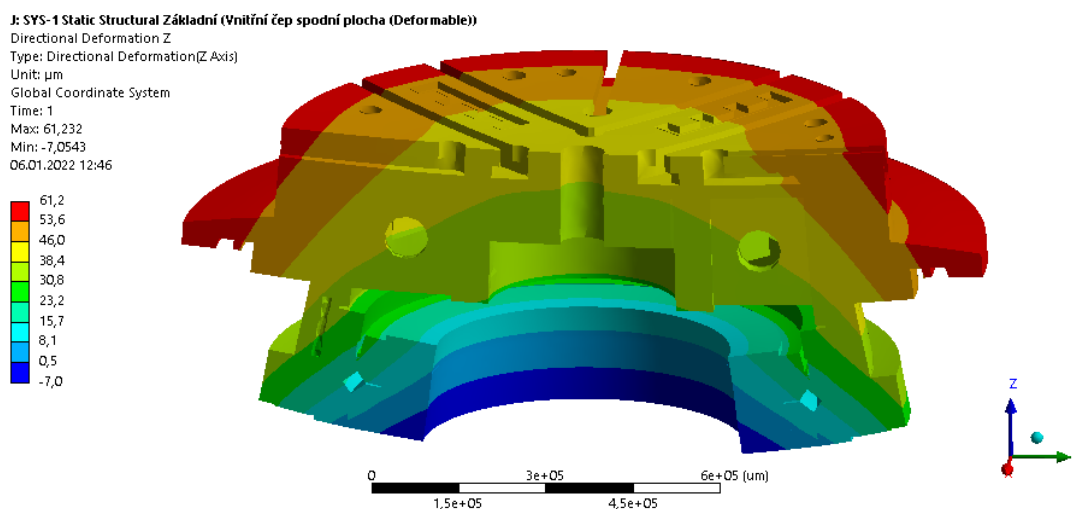
5.4.2 Nastavení strukturální úlohy

Okrajové podmínky

Desce jsou odebrány všechny stupně volnosti funkcí Remote displacement na vodorovné dosedací ploše s horním vnějším kroužkem s povoleným deformačním chováním povrchu.

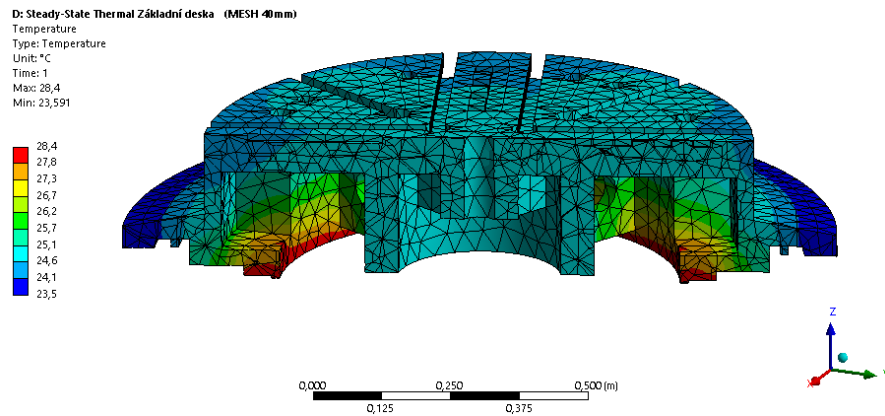
5.5 Vyhodnocení simulačních modelů

Deska samotná i deska v sestavě má deformační tvary které si navzájem odpovídají. Ovšem v sestavě se deska deformuje výrazněji.

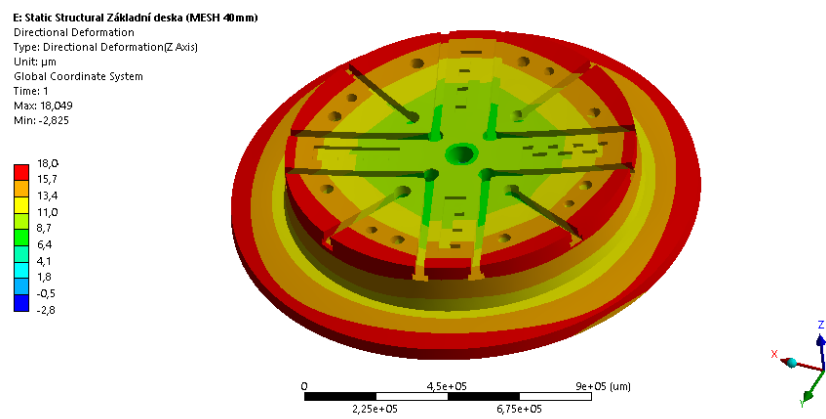


Obrázek 5.18 Deformace sestavy v ose Z

Přesné vyhodnocení proběhlo srovnáním měřených souřadnic v ose Z s identickými body nastavenými na modelu ve strukturální části pomocí Remote point. Pro zhodnocení simulačních modelů je rozhodující, zda se model přibližuje naměřenému tvaru deformace na povrchu desky. Tvar deformace je nejlépe vidět ve grafu 6.5, ve kterém je celkový posuv jednotlivých variant v bodu Z1 posunut na nulovou hodnotu.



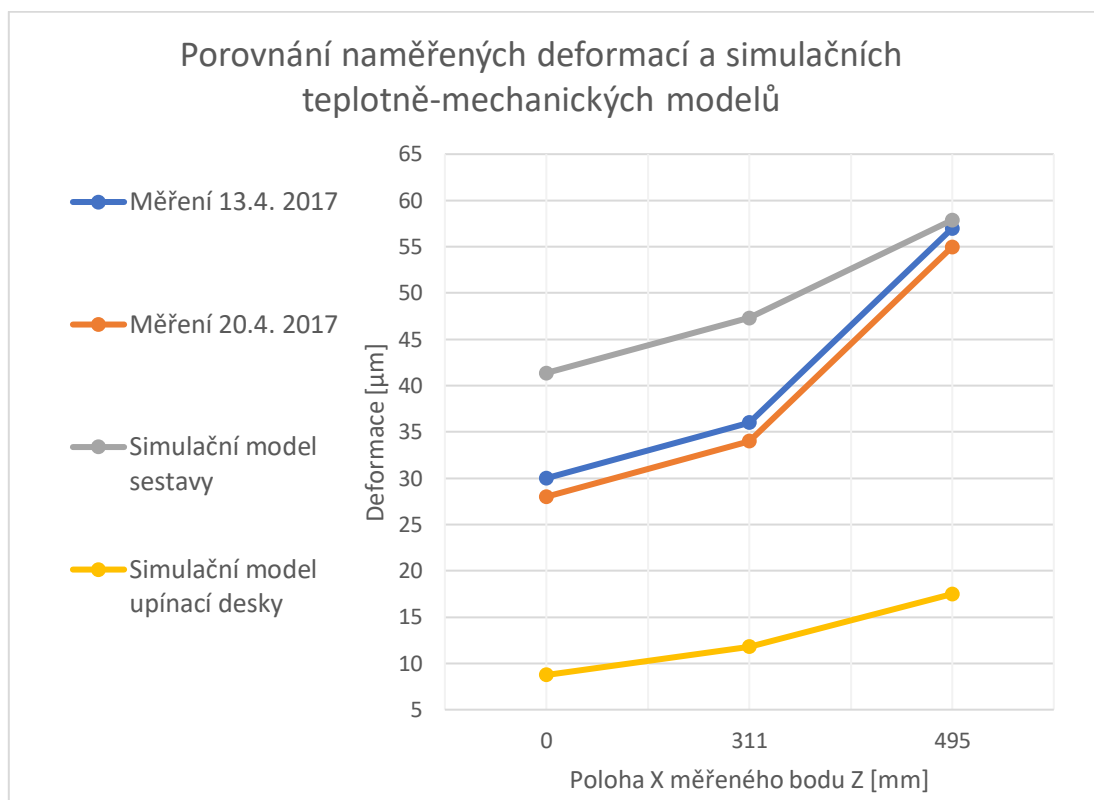
Obrázek 5.19 Teplotní pole desky



Obrázek 5.20 Deformace modelu desky v ose Z

Tabulka 5.5 Výsledky deformací z měření a simulačních teplotně-mechanických modelů

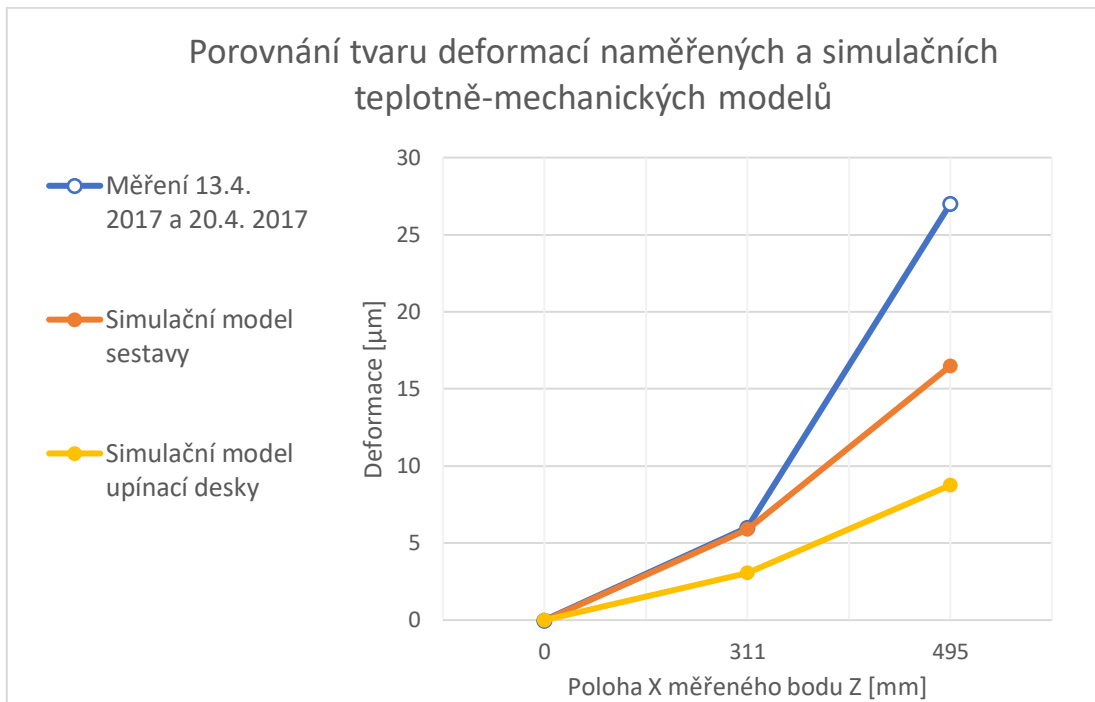
Měření	Z1	Z2	Z3
Poloha X	0	311	495
Jednotky	[μm]	[μm]	[μm]
Měření 13.4. 2017	30	36	57
Měření 20.4. 2017	28	34	55
Simulační model sestavy	41,4	47,3	57,9
Simulační model upínací desky	8,7	11,8	17,5



Obrázek 5.21 Graf porovnání modelu ladící sestavy a desky v ose Z

Graf 6.21 vykazuje, že prohnutí modelu sestavy vykazuje kromě celkového posunutí téměř identický tvar deformací, pouze v bodě Z3 by mohla být deformace ještě vyšší. Dle tohoto vyhodnocení se může model sestavy vyhodnotit, jako funkční pro ověřování dalších variant pro potlačení možných deformací stolu.

Model samotné desky ukazuje, že problém průhybu horní upínací plochy desky je téměř z poloviny způsoben nerovnoměrným rozložením tepelného zdroje vstupujícího do desky.



Obrázek 5.22 Graf deformací s potlačením posuvu v ose z

6 Návrh variant pro potlačení teplotních deformací desky

Pro potlačení tepelných deformací by se mohlo využít několik konstrukčních variant, které měly vliv na teplotní chyby. Mezi tyto předběžně navržené varianty patří:

1. Úprava geometrie desky
2. Výroba s chybou
3. Teplotně necitlivá výztuha
4. Změna materiálu desky
5. Tepelná izolace
6. Přídavné chladicí zařízení

6.1 Úprava geometrie desky

Kvůli stávajícím zákazníkům firmy, které již disponují upínacími přípravky na stávající desky je požadavek na zachování vnějších rozměrů a upínacích systémů desky. Z tohoto důvodu je možné upravovat pouze vnitřní žebrování odlitku desky pro zajištění co nejideálnějšího rozvodu tepla, které by následně mělo podpořit zachování ideálně rovného tvaru povrchu desky při teplotním zatížení.

6.2 Výroba s chybou

Tato varianta eliminace chyby by znamenala vyrobení roviny desky s opačným zakřivením skutečného naměřeného tvaru naměřeného na konci daného zatížení. Tato úprava by neeliminovat celkové posunutí v ose Z, ale při daném zatížení by se mohlo předpokládat, že se povrch desky vlivem tepelného zatížení srovná a nebude vykazovat geometrické chyby. Stroj ovšem není jednoúčelový a deska nerotuje vždy totožnou rychlostí po celou dobu výroby. Z tohoto důvodu tato úprava není vhodná.

6.3 Teplotně necitlivá výztuha

Necitlivá výztuha by měla zajistit zamezení deformací vlivem stažení daných bodů desky vůči sobě. Tyto body nemění vzájemně polohu během tepelného zatížení, ale okolní nevyztužený materiál desky už ano. Tudíž by touto úpravou mohla vzniknout deska, která by po zatížení v nevyztužených místech vykazovala vypuknutý povrch desky.

6.4 Změna materiálu desky

Lepší variantou by bylo použití teplotně necitlivého materiálu pro výrobu celé desky. Pro tuto variantu by se mohly použít kompozity ze skleněných vláken. Zde se ukazuje, jako největší problém samotný vývoj konstrukce desky, a hlavně následně složitá a nákladná výroba.

6.5 Tepelná izolace

Přidáním tepelné izolace by se mohlo zamezit šíření generovaného tepla od jeho hlavních zdrojů do dalších komponent a tím zamezit nežádoucímu ohřívání některých součástí. Při použití tepelné izolace je ovšem potřeba věnovat pozornost přehřívání dosavadních zdrojů tepla, kterým se následně zhorší odvod tepla a tím se může způsobit nadměrné přehřívání ložiska.

Tepelná izolace se v tomto případě použije na styčné ploše desky a horního vnějšího kroužku, kde nahradí části obou zmiňovaných součástí. Pro tuto izolaci se použije 15mm silný kroužek z materiálu C530 zvaný též porézní mullito-korundová keramika s obsahem 80% Al_2O_3 . Umístění této izolace má zároveň nevýhodu ve výskytu šroubů, středících kolíků a středících hran, které spojují vzájemně desku a s oběma vnějšími kroužky. Tyto prvky se podílí na snížení účinnosti izolace.

Poslední nevýhodou této izolace je nutnost rozdělení kroužku na několik částí, kvůli jeho možnosti prasknutí při výrobě v jednom velkém kusu.

6.6 Přídavné chladicí zařízení

Chlazením hlavních zdrojů tepla lze oproti předchozím návrhům zmírnit nejen deformace jejich vlastních součástí, ale i těch sousedních, které toto teplo dále rozvádí po stroji, a sami jsou touto změnou mechanicky ovlivňovány.

Měřená varianta obsahuje olejový chladič umístěný na vnitřním průměru čepu, který kromě svých vstupních a výstupních teplot chladicího media není blíže specifikován. Tato informace dává možnost vyměnit olejový chladič za vzduchový nebo vodní, protože vnitřní čep, je jedno z nejbližších míst hlavních zdrojů tepla, které nerotuje a mohlo by se nechat chladit.

7 Simulační teplotně mechanické modely jednotlivých variant

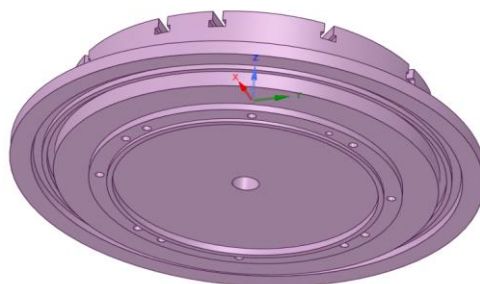
7.1 Úprava geometrie desky

Pro porovnání těchto úprav bude sloužit již stávající simulační teplotně-mechanický model upínací desky, z něhož se vždy vytvoří model s danou úpravou a mezi nimi se bude vyhodnocovat vliv úprav na deformace.

7.1.1 Upravené varianty desky

Vyplněné žebrování

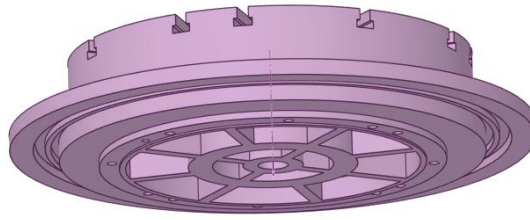
Vyplnění vzduchových kapes žebrování se využilo pro nastínění vhodnosti dalších možných variant úprav.



Obrázek 7.1 Desky s vyplněným žebrováním

Zvýšené žebrování

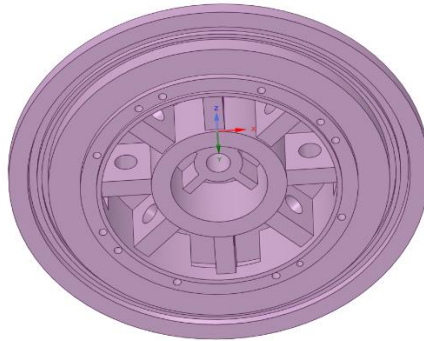
První variantou se naskytlo vysunutí všech žebér po nejvyšší možnou plochu, kterou je středící hrana spodního usazení desky.



Obrázek 7.2 Deska se zvýšeným žebrováním

Širší žebrování

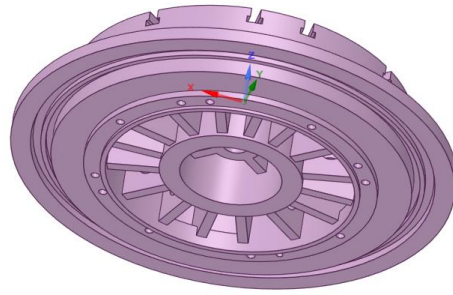
Vyplnění žebrování se ukázalo jako velmi efektivní, proto následovala simulace zesílení žebér vnější dutiny. Vliv změny šířky se ověřoval pro zesílení o 10, 20 a 30mm.



Obrázek 7.3 Deska se zesíleným žebrováním ve vnější dutině

Přidaná žebra

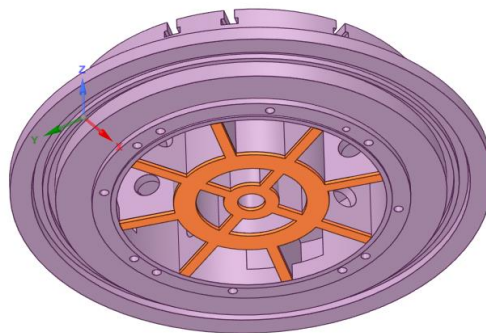
Zdvojnásobení počtu původních žebér ve vnější dutině bylo další variantou, kdy se mohlo porovnat účinnost rozložení stejného objemu hmoty s variantou širšího žebrování o 30mm.



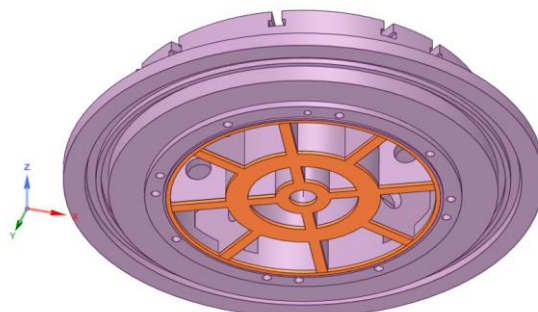
Obrázek 7.4 Deska s přidáním žebrováním ve vnější dutině

Zvýšené žebrování s CU plechem

Variantě s vysunutými žebry po nejvyšší možnou plochu, se odebralo posledních 10mm materiálu a nahradilo materiálem z mědi pro možnost lepšího odvodu tepla od jeho zdroje podobně, jako funguje chlazení procesorů některých počítačů.



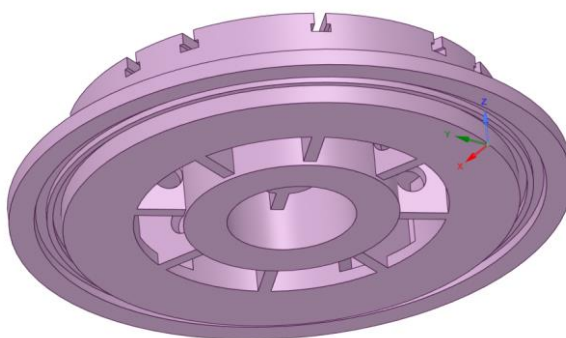
Obrázek 7.5 Deska se zvýšeným žebrováním a přidáním Cu plechem (10mm) na žebrování



Obrázek 7.6 Deska se zvýšeným žebrováním a přidáním Cu plechem (10mm) s vnějším kroužkem na žebrování

Uchycení desky za vnitřní čep

Specifickou úpravou byla varianta s uchycením za vnitřní čep. Při této variantě se simulovalo, jak by se deska deformovala, pokud by byla usazena na vnitřním čepu, který by si vyměnil svou funkci s vnějším kroužkem. Tato varianta by v praxi znamenala velké úpravy přidružených komponentů desky stroje. Ovšem pro posouzení vlivu polohy tepelného zdroje na teplotně-mechanické chování desky se tato varianta ukazuje jako zajímavé řešení.



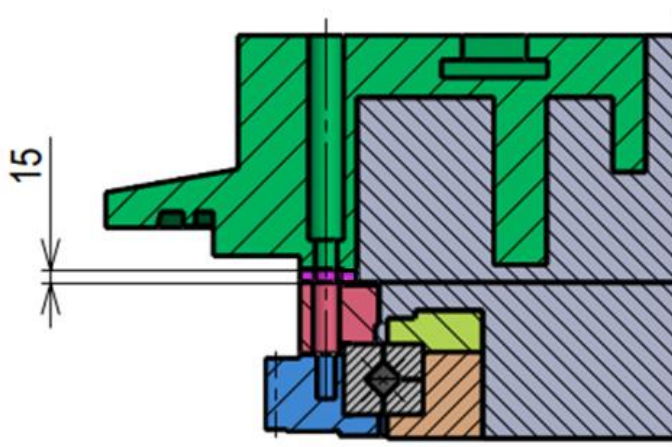
Obrázek 7.7 Deska s uchycením za vnitřní čep

V modelu se zaslepily původní díry pro šrouby a odebrala se původní dosedací plocha. V místě čepu se vytvořil objem z mezikružší, které odpovídá rozměrům vnitřního čepu. Na dosedací plochu byla nastavena podmínka teploty, která odpovídá předchozím variantám.

7.2 Tepelná izolace

Pro model tepelné izolace se z původního modelu zarovnal styková plocha desky a horního vnějšího kroužku a celkově se odebralo 15mm pro možnost vložení izolačního kroužku. Kroužek obsahuje díry na šrouby, které jsou ponechány i v upínací desce. Vazby mezi stykovými plochami a nově přidaným kroužkem izolace jsou ponechány jako ideální kontakty. Vnitřní plocha izolačního kroužku a její koradiální průměr na horním vnějším kroužku jsou navíc ve strukturální úloze taktéž zavazbeny, jako ideální kontakt pro nahrazení chybějící středící plochy. Obdobným stylem jsou ošetřeny vnější plochy izolačního kroužku a horní upínací desky.

Izolační kroužek má v materiálové parametry nastaveny jako C530.



Obrázek 7.8 Umístění izolačního kroužku

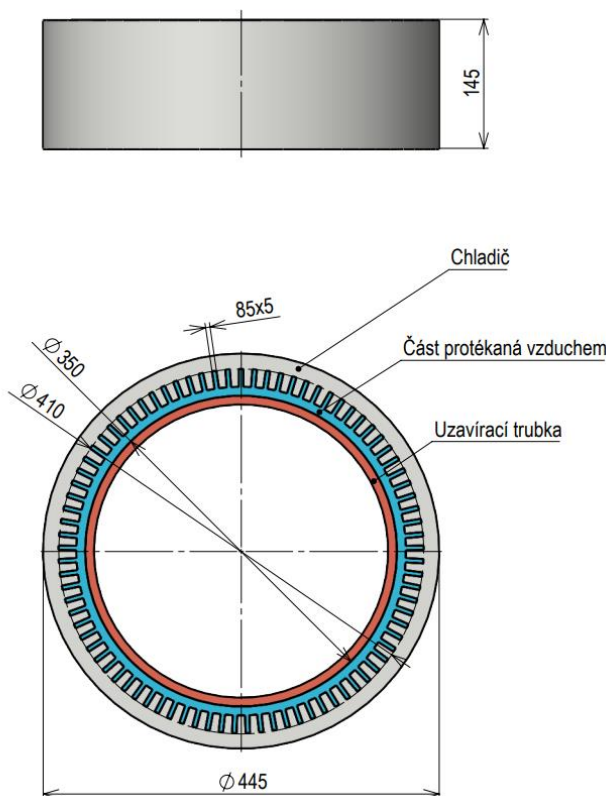
7.3 Chlazení

Původní modely jsou téměř zachovány, pouze v teplotní úloze jsou potlačeny původní okrajové podmínky na plochách čepu, které představovali původní chlazení a na tyto plochy je vložen chladič, který je ve strukturální úloze potlačen.

Vzduchový chladič

Pro model výpočtu vzduchového chladiče se vytvořil hliníkový válec, který je nalisován do čepu. Na vnitřním průměru chladiče je vytvořeno svislé žebrování, které zvětšuje chladicí plochu. Na povrchu žebrování, je nastavena konvekce.

Hodnota konvekce byla stanovena na základě rychlosti protékaného vzduchu. Tato hodnota byla vypočtena z objemového průtoku mezi chladičem a myšlenou trubkou, která je vložena do chladiče pro zajištění efektivity průtoku vzduchu. V této variantě je potlačena vzduchová výplň v oblasti čepu, poněvadž je vzduchový chladič z vnitřní strany uvažován, jako uzavřený.

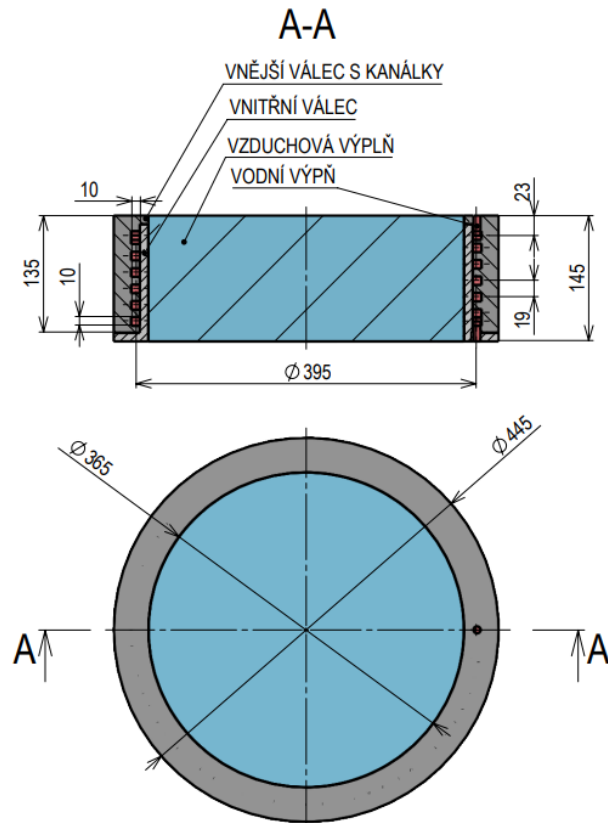


Obrázek 7.9 Model vzduchového chladiče

Vodní chladič

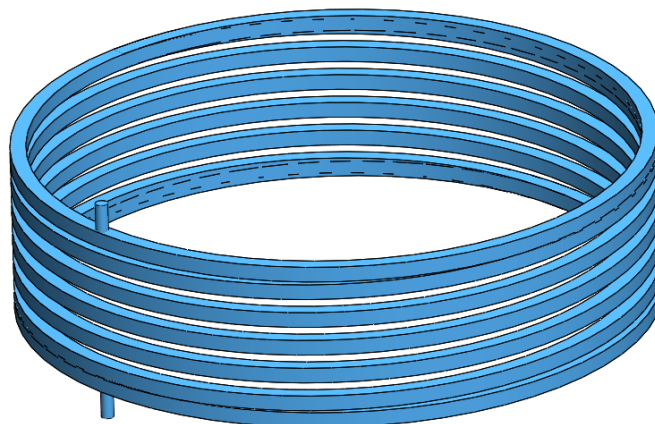
V této variantě chlazení je žebrovaný válec nahrazen dvěma hliníkovými válci, které jsou do sebe vzájemně nalisovány. Vnější válec obsahuje vysoustružené šroubovitě dráhy a na jejich koncích zápichy, pro spojení s nátokem a výtokem z chladiče. Nalisováním vnitřního válce se vytvoří uzavřená nádoba. V tomto případě je zachována vzduchová výplň čepu.

Vodní výplň tohoto chladiče je převedena na beam prvek, konkrétně Link34 na němž je nastavená vstupní teplota 21°C hmotnostní průtok a směr toku kapaliny, jehož síťování bylo zajištěné prvkem fluid116. Na površích chladiče, kterými proudí kapalina, je nastavena hodnota součinitele přestupu tepla, která je dopočítána dle vlastností chladiva a velikosti průtoku.



Obrázek 7.10 Vodní chladič

Sestava chladiče byla uskutečněna se třemi různými průtoky, jejichž hodnoty součinitelů přestupu tepla jsou vypočítané v příloze.



Obrázek 7.11 Výplň vodního chladiče

8 Vyhodnocení teplotního chování jednotlivých variant

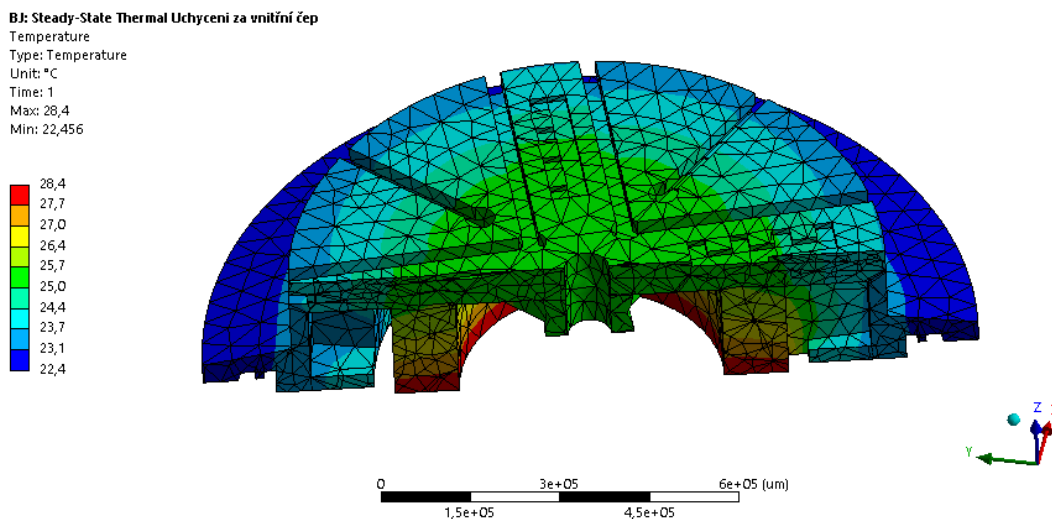
8.1 Úprava žebrování

Po vyhodnocení daných modelů se ukázalo, že úprava žebrování už jen minimalizuje chybu vzniklou vstupem tepla do desky.

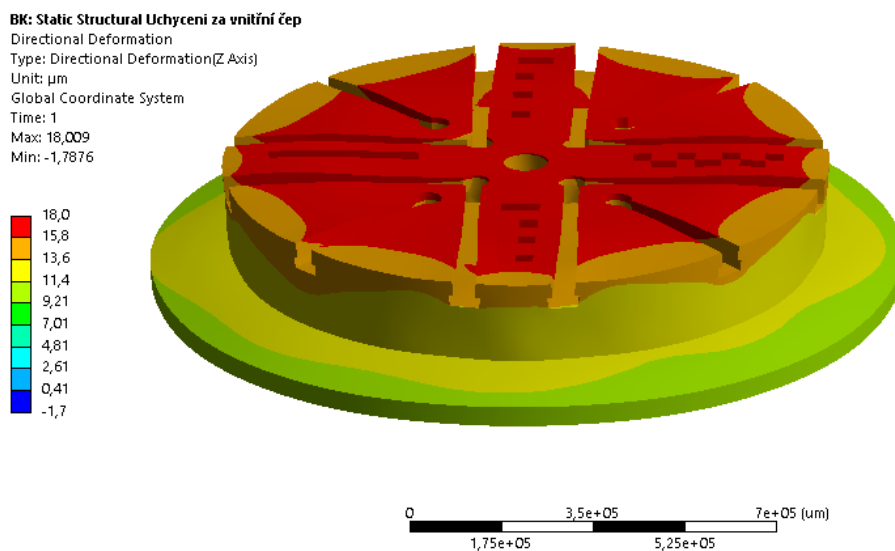
Tabulka 8.1 Výsledné deformace upravených variant desky

Měření	Z1	Z2	Z3
Jednotky	[μm]	[μm]	[μm]
Simulační model desky (neupravený)	8,7	11,8	17,5
Vyplněné žebrování	13,9	14,6	17,0
Zvýšené žebrování	9,4	11,9	17,6
Širší žebrování o 10mm	9,0	11,8	17,7
Širší žebrování o 20mm	9,5	12,0	17,5
Širší žebrování o 30mm	9,9	12,2	17,4
Přidaná žebra	9,7	12,3	17,4
Zvýšená žebra vnější dutiny + zakrytí deskou	8,5	11,1	17,3
Zvýšené žebrování + horní plocha žeber Cu 10mm	9,7	12,2	17,5
Zvýšené žebrování + horní plocha žeber Cu 10mm s vnějším kroužkem	10,0	12,3	17,5
Uchycení za vnitřní čep	15,9	16,5	14,7

Naopak varianta uchycení za vnitřní čep vykazuje dobrou symetričnost konstrukce, která se projevila na deformacích, které mají zcela jiný charakter než původní model desky, ale mezi jednotlivými místy měření deformace nejsou tak rozdílné deformace, jako u variant vycházející z původního způsobu uchycení desky.



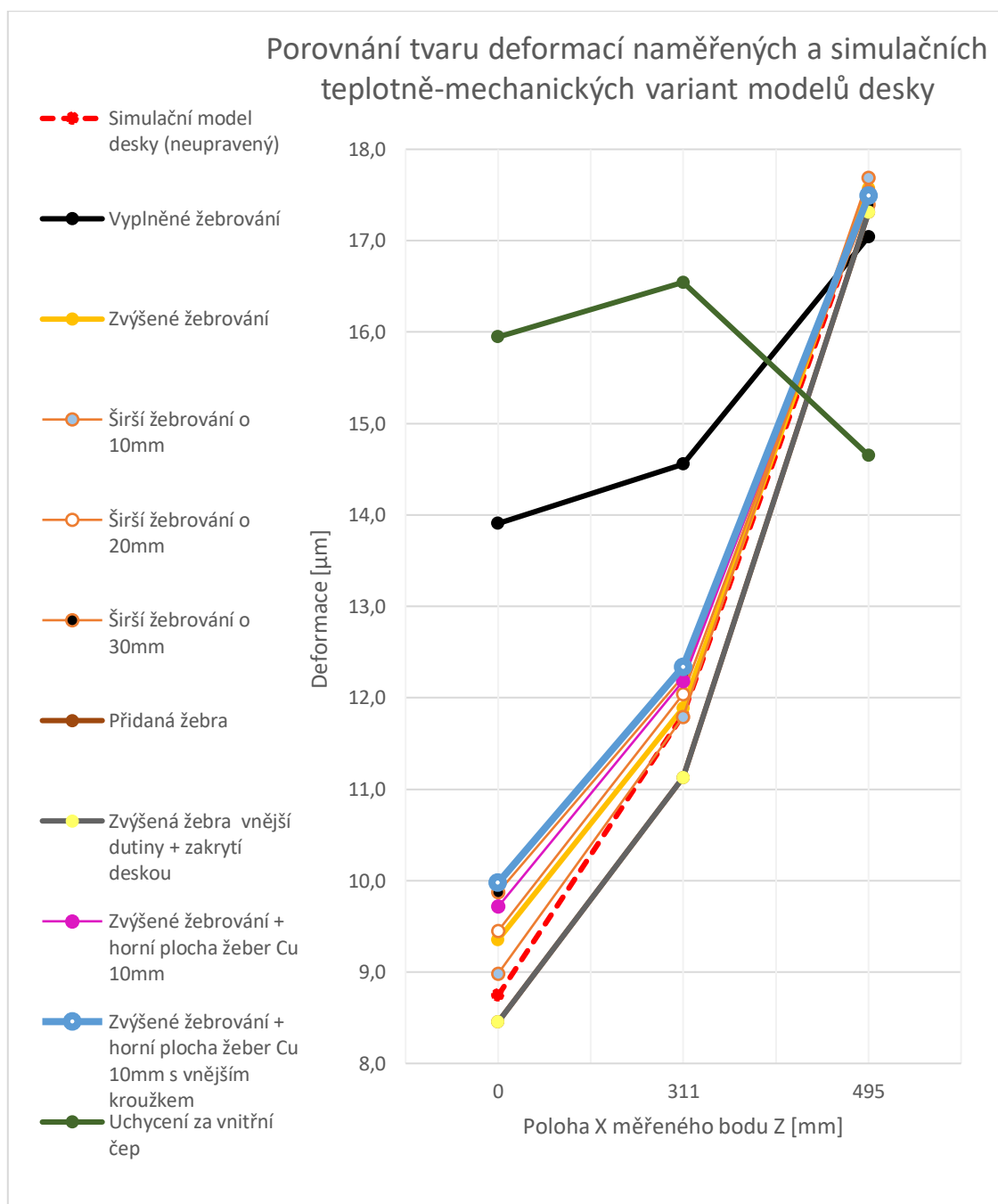
Obrázek 8.1 Teplotní pole desky uchycené za vnitřní čep



Obrázek 8.2 Deformace desky uchycené za vnitřní čep

Nejllepší redukci průhybu deformace původní desky prokázaly úpravy varianty, u kterých bylo vyplněno žebrování desky. Tyto varianty sice zvyšují deformaci Z1 oproti původní variantě až o 59%, ale zároveň se touto úpravou snižují geometrické chyby povrchu desky až o 64%. Ovšem výrazné navýšení hmotnosti desky způsobí vyšší nároky na pohon desky.

Od tohoto chování se odvíjí další upravené varianty desek, jejichž výsledky už nejsou tak výrazné.



Obrázek 8.3 Porovnání deformací upravených variant desky

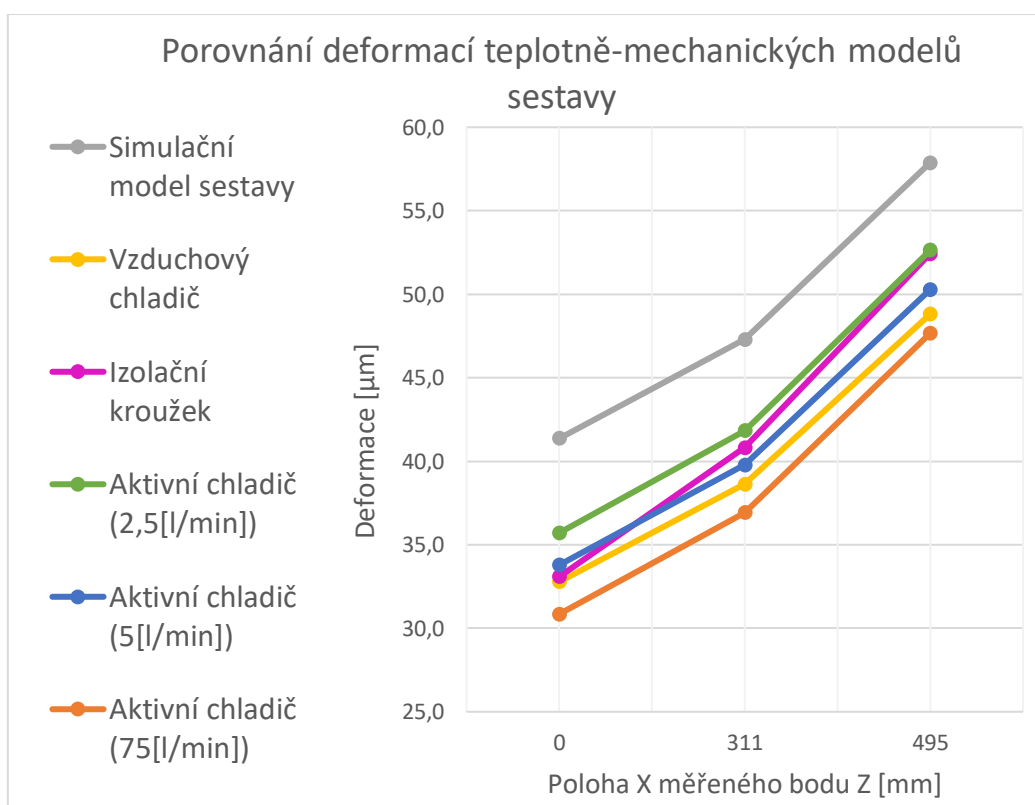
8.2 Úprava sestavy

V modelu sestavy nejlépe vychází varianta s vodním chlazením. Její schopnost potlačovat deformace je ovlivněna průtokem. Lze tedy konstatovat,

že díky svému vlivu na potlačení celkových deformací je nejvhodnější. Mezi její hlavní nevýhody se řadí náklady na pořízení, a následná náročnost provozu.

Tabulka 8.2 Výsledné deformace upravených variant sestavy

Měření	Z1	Z2	Z3
Jednotky	[μm]	[μm]	[μm]
Simulační model sestavy	41,4	47,3	57,9
Vzduchový chladič	32,8	38,6	48,8
Izolační kroužek	33,1	40,8	52,4
Aktivní chladič (2,5[l/min])	35,7	41,8	52,6
Aktivní chladič (5[l/min])	33,8	39,8	50,3
Aktivní chladič (75[l/min])	30,9	36,9	47,7



Obrázek 8.4 Porovnání deformací upravených variant sestavy

Úspěšně se dá také posoudit izolační kroužek, od kterého se ovšem očekávalo větší utlumení tvorby miskovitého tvaru desky. Dle modelu je tomu naopak, přesto se také jeví, jako možné řešení, které by nevykazovalo žádné provozní náklady. U této varianty ovšem bylo počítáno s dokonalou izolací,

díky neuvažování šroubových spojů a proto je nutné počítat s tím, že ve skutečnosti bude efektivita této varianty nižší.

Vzduchový chladič se v tomto nastavení taktéž ukázal jako vhodná varianta, ovšem pro jeho správnou funkci, je třeba zajistit rovnoměrné proudění vzduchu po celé jeho ploše, která byla ve výpočetním modelu uvažovaná.

9 Závěr

Byla vytvořena rešerše na teplotně-mechanického chování obráběcích strojů, a jejich modelování, která se nakonec zaměřila na stavbu svislých soustruhů.

V následném kroku se představila stavba a teplotně-mechanické chování strojů svislého stroje Powerturn od firmy TOSHULIN. Dle dat z měření teplotně-mechanického chování desky tohoto stroje, které bylo zatížené pouze vlastní rotací, se vyhodnotila data a určil úsek zatížení, který se bude dále simulovat.

Vznikly dva simulační modely. První je model sestavy desky a jeho přilehlých součástí a druhý je pouze model samostatné desky. Tyto modely se porovnaly dle vzniklých deformací v ose Z s naměřenými daty ze skutečného stroje.

Poté se stanovily možné úpravy pro zlepšení teplotně-mechanického chování tohoto uzlu a následně vznikly nové upravené modely, které vycházely ze simulačních modelů, s kterými se vzájemně porovnaly.

Seznam použité literatury

- [1] STEPHAN,P., VDI Heat Atlas. Springer-Verlag Berlin Heidelberg,2010. ISBN 978-3-540-77877-6;
- [2] SAZIMA,M., Sdílení tepla. Praha: SNTL,1993. ISBN 80-03-00675-9;
- [3] Mayr,J., et al., Thermal issues in machine tools. 2012. CIRP Annals - Manufacturing Technology,61(2):771-791, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.008>
- [4] Bryan,J., International status of thermal error research. 1990. CIRP Annals,39(2):645-656, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63001-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63001-7)
- [5] SVOBODA, Ondřej. Řešení tepelných deformací obráběcích strojů. MM Průmyslové spektrum [online]. 2013, 2013(7), 1 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: doi:130734
- [6] BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.
- [7] HOŘEJŠ, Otakar., Teplotně-mechanické chování strojů z pohledu konstrukce, modelování a měření. In: Praha, 2020, 10. 2. 2020, s. 94 [cit. 2020-10-25].
- [8] MAREK, Jiří., Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [9] Skripta Technologie II: 1. díl [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [10] HOREJŠ, O.; MAREŠ, M., Kompenzace teplotních úhlových chyb strojů [online]. 2018 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kompenzace-teplotnich-uhlovych-chybstroju.html>.
- [11] MÖHRING, Hans Christian, Christian BRECHER, Eberhard ABELE, Jürgen FLEISCHER a Friedrich BLEICHER., Materials in machine tool structures. CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. 2015, 64(2), 725–748. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2015.05.005
- [12] KOZAČOK, Alexandr., Analýza teplotních deformací nosné struktury stroje a návrh optimalizačních opatření. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT Praha, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
- [13] HOREJŠ, O.; MAREŠ, M.; HORNYCH, J. a general approach to thermal error modelling of machine tools. In: Machines et usinage à grande vitesse (MUGV). Clermont Ferrand, Francie: 2014, s. 10.
- [14] PÍCHA, Petr. Zahnutí vlivu různých vřetenových jednotek do teplotně-mechanického modelu frézovacího centra. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT Praha, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Martin Mareš, Ph.D.
- [15] Pokročilé teplotní kompenzace portálového obráběcího centra. MM Průmyslové spektrum. 2013, 2013(10), 1.
- [16] Komplexní modelování obráběcích strojů. MM Průmyslové spektrum. 2005, 2005(12), 1.
- [17] ZEMANOVÁ, Lucie. Teplotní analýza plastového dílu metodou konečných prvků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aneta Zatočilová.
- [18] Španiel M, Horák Z: Úvod do metody konečných prvků., Skripta, ČVUT v Praze, 2010
- [19] Ess, M.: Simulation and compensation of thermal errors of machine tools (Diss. ETH No. 20300). Disse rtation, ETH Zuerich, 2012
- [20] HERNANDEZ BECERRO, Pablo. Efficient Thermal Error Models of Machine Tools. Zurich, 2020. Doctoral Thesis. ETH Zurich.
- [21] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.

- [22] HNILICA, Jaroslav, Dobroslav NĚMEC a Jan ODEHNAL. Strojírenská technologie: učebnice pro 3. ročník středních průmyslových škol strojnických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. Řada strojírenské literatury.
- [23] SKLENÁŘ, Jaroslav. Náhrada velkého průměrového ložiska uložení desky do stolu svislého soustruhu. Brno, 2011. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. JIŘÍ MAREK, Dr.
- [24] BORSKÝ, Václav. Obráběcí stroje. 1. vyd. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-214-0470- 1.
- [25] Weber, J, Shabi, L, & Weber, J. "Thermal Impact of Different Cooling Sleeve's Flow Geometries in Motorized High-Speed Spindles of Machine Tools." Proceedings of the 9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power. 9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power. Florianópolis, SC, Brazil. October 26–28, 2016. V001T01A012. ASME. <https://doi.org/10.1115/FPNI2016-1517>

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Vlastnosti používaných materiálů v oboru obráběcích strojů [8] ..	22 -
Tabulka 5.1 Parametry strojů Powerturn 1000 a 1250 firmy TOSHULÍN .	37 -
Tabulka 6.1 Hodnoty nastavených součinitelů přestupu tepla povrchu upínací desky.....	47 -
Tabulka 6.2 Vlastnosti MKP sítě simulační sestavy	49 -
Tabulka 6.3 Ovlivnění způsobem uložení	52 -
Tabulka 6.4 Vlastnosti MKP sítě desky	54 -
Tabulka 6.5 Výsledky deformací z měření a simulačních teplotně-mechanických modelů.....	56 -
Tabulka 9.1 Výsledné deformace upravených variant desky	69 -
Tabulka 9.2 Výsledné deformace upravených variant sestavy.....	72 -

Seznam obrázků

Obrázek 2.1.: Ukázka teplotní deformace stroje po působení zdroje a [7]-	13 -
Obrázek 2.2.: Tepelné vlivy na stroj (převzato a upraveno z [7])	- 15 -
Obrázek 2.3.: Schéma teplotní deformace od záření na stojan vertikálního soustruhu	- 16 -
Obrázek 2.4.: Těleso tažené po vodorovné podložce	- 18 -
Obrázek 2.5.: Stribeckův diagram pro kluzné vedení [8].....	- 19 -
Obrázek 2.6.: Teplotně asymetrický rám (vlevo), Portálové uspořádání rámu stroje (vpravo) se schématickým vyznačením deformace [7].....	- 24 -
Obrázek 2.7.: Yasda YMC 650 s protékaným rámem [8]	- 25 -
Obrázek 2.8.: <i>Deska řady Powerturn připravená pro měření teplotních deformací způsobených její rotací</i>	- 26 -
Obrázek 2.9.: <i>Průběh otáček, posuvových rychlostí v ose X a z a klíčových teplot v průběhu pěti denního ověřovacího testu obráběcího centra MMC 1500 [16] ..</i>	- 26 -
Obrázek 3.1.: <i>Příklady používaných elementů (upraveno) [18]</i>	- 28 -
Obrázek 3.2.: Fyzikální postup ovlivnění polohy TCP [20]	- 29 -
Obrázek 3.3.: Faktory ovlivňujícími ztráty energie v ložiskových jednotkách vřetena [16]	- 30 -
Obrázek 4.1.: Jednostojanový svislý soustruh	31
Obrázek 4.2.: Dvoustojanový svislý soustruh.....	31
Obrázek 4.3.: Řada strojů Sirmu	32
Obrázek 4.4.: Sirmu VTE 150-FTD	32
Obrázek 4.5.: Prvky stavebnicového provedení svislých soustruhů a soustružnických center firmy VDM firmy Hessap	32
Obrázek 4.6.: Deska pro Powerturn 1000 (vlevo) a pro 1250 bez duplexu-	33
-	
Obrázek 4.7.: Způsoby rozdělení velkých desek.....	- 34 -
Obrázek 4.8.: Křížové válečkové ložisko.....	- 34 -
Obrázek 5.1 Koncepce obráběcího centra Powerturn firmy TOSHULIN [9]-	36
-	

Obrázek 6.1: Část zatěžovacího spektra rychlosti otáčení desky (počátek měření).....	- 39 -
Obrázek 6.2: Umístění čidel pro měření teplot v chladícím okruhu stroje	- 39 -
Obrázek 6.3 Umístění měřených bodů na povrchu desky.....	- 40 -
Obrázek 6.4: Graf teploty uzlů získané z měření v prvním časovém úseku(0-30min).....	- 41 -
Obrázek 6.5 Deformace získané z měření na konci prvního časového úseku(0-30min).....	- 41 -
Obrázek 6.6 Schéma výpočetního modelu	- 42 -
Obrázek 6.7 Výpočetní model měřené desky.....	- 43 -
Obrázek 6.8 Přehled základních okrajových podmínek teplotní úlohy	- 45 -
Obrázek 6.9 Schéma výpočtu nucené konvekce	- 46 -
Obrázek 6.10 Rozmístění konvekci na povrchu desky	- 47 -
Obrázek 6.11 Rozložení a kvalita prvků modelu simulační sestavy	- 49 -
Obrázek 6.12 Rozložení a kvalita prvků simulační sestavy dle úhlu přilehlých stran – tzv. maximum corner angle	- 50 -
Obrázek 6.13 Teplotní pole ladícího modelu sestavy.....	- 51 -
Obrázek 6.14 Závislost změny deformace Z1 na velikosti prvků MKP sítě-	53
-	
Obrázek 6.15 Závislost změny deformace Z2 na velikosti prvků MKP sítě-	53
-	
Obrázek 6.16 Závislost změny deformace Z3 na velikosti prvků MKP sítě-	54
-	
Obrázek 6.17 Závislost změny deformace teploty na velikosti prvků MKP sítě	- 54 -
Obrázek 6.18 Deformace sestavy v ose Z	- 55 -
Obrázek 6.19 Teplotní pole desky.....	- 56 -
Obrázek 6.20 Deformace modelu desky v ose Z	- 56 -
Obrázek 6.21 Graf porovnání modelu ladící sestavy a desky v ose Z	- 57 -
Obrázek 6.22 Graf deformací s potlačením posuvu v ose z.....	- 58 -
Obrázek 8.1 Desky s vyplněným žebrováním	- 62 -
Obrázek 8.2 Deska se zvýšeným žebrováním	- 63 -

Obrázek 8.3 Deska se zesíleným žebrováním ve vnější dutině	- 63 -
Obrázek 8.4 Deska s přidaným žebrováním ve vnější dutině.....	- 64 -
Obrázek 8.5 Deska se zvýšeným žebrováním a přidaným Cu plechem (10mm) na žebrování	- 64 -
Obrázek 8.6 Deska se zvýšeným žebrováním a přidaným Cu plechem (10mm) s vnějším kroužkem na žebrování.....	- 64 -
Obrázek 8.7 Deska s uchycením za vnitřní čep	- 65 -
Obrázek 8.8 Umístění izolačního kroužku.....	- 66 -
Obrázek 8.9 Model vzduchového chladiče.....	- 67 -
Obrázek 8.10 Vodní chladič	- 68 -
Obrázek 8.11 Výplň vodního chladiče	- 68 -
Obrázek 9.1 Teplotní pole desky uchycené za vnitřní čep	- 70 -
Obrázek 9.2 Deformace desky uchycené za vnitřní čep	- 70 -
Obrázek 9.3 Porovnání deformací upravených variant desky	- 71 -
Obrázek 9.4 Porovnání deformací upravených variant sestavy	- 72 -

Seznam použitého softwaru

1. ANSYS Workbench 2020 R2
2. Matlab R2020b
3. Microsoft Office 365
4. SOLIDWORKS 2017

Seznam příloh Elektronické (na CD)

Zadani_1805_DP_Ladislav_Malina.pdf (zadání DP)

DP_Ladislav_Malina_Analyza_a_navrh_optimalizace_teplotniho_chovani_up
inaci_desky_svisleho_soustruhu.pdf (text DP)

Vypocty_konvekci_povrchu_desky.pdf

Stanoveni_soucinitelu_prestupu_tepla_vodniho_chladice.pdf

Navrhovy_vykres_vodni_chladic.pdf

Kusovník_Navrhovy_vykres_vodni_chladic.pdf

Sestava_modely.wbpz (Projekt v Ansys WB)

Desky.wbpz (Projekt v Ansys WB)