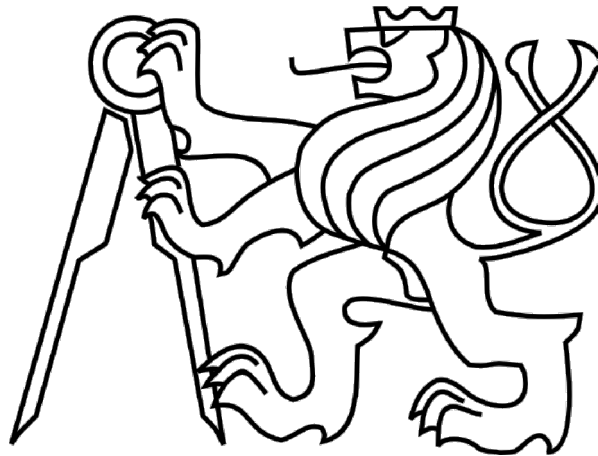


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Návrh úpravy stojanu brusky pro optimalizaci teplotně-mechanického
chování

2022

Eliška Müllerová

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Müllerová** Jméno: **Eliška** Osobní číslo: **465555**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh úprav stojanu brusky pro optimalizaci teplotně – mechanického chování

Název diplomové práce anglicky:

Thermo-mechanical optimization design changes of a grinding machine frame

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Provedte analýzu teplotně – mechanického chování rámu hrotové brusky pomocí výpočtového modelu MKP. Analyzujte charakter teplotních deformací stroje vlivem vnitřních zdrojů tepla. Na základě analýzy kritického chování navrhnete a výpočtově ověříte vhodné optimalizační opatření pro minimalizaci nežádoucích teplotních deformací. Osnova: 1. Rešerše teplotně-mechanického chování a modelování strojů; 2. Tvorba výpočtového modelu MKP a analýza teplotně mechanického chování vlivem definovaných zdrojů tepla; 3. Analýza kritických uzlů konstrukce a návrh optimalizačních opatření; 4. Porovnání optimalizačních opatření s výchozím provedením, zhodnocení navržených úprav. Rozsah grafické části: 0; Rozsah textové části: 60-80 stran.

Seznam doporučené literatury:

- [1] LAŠOVÁ, V. Základy stavby obráběcích strojů. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2012
- [2] MAREK, J. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. MM publishing, Praha, 2018
- [3] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 5th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2006
- [4] BATHE, K.-J.: Finite Element Procedures. PRENTICE HALL Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996
- [5] ŠPANIEL, M., HORÁK, Zd.: Úvod do metody konečných prvků. Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha, 2011

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Peter Kohút, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **22.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

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 24.7.2022

.....

podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Matěji Sulítkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultantovi Ing. Petru Kohútovi, Ph.D. za nekonečné množství času věnovaného zkušebním modelům, cenným radám a možnosti konzultací i v pozdních hodinách. Díky patří i mé rodině za podporu v průběhu celého studia a mému příteli za neutuchající důvěru v mé schopnosti.

Anotace

Autor:	Bc. Eliška Müllerová
Název DP:	Návrh úpravy stojanu brusky pro optimalizaci teplotně – mechanického chování
Rozsah práce:	102 stran, 89 obrázků, 19 tabulek
Akademický rok:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
Zadavatel:	ERWIN JUNKER GRINDING TECHNOLOGY a.s., Holice
Využití:	Výsledky této práce poslouží zadavateli k rozšíření znalostí o teplotně-mechanickém chování vyráběného stroje a k jeho možným budoucím úpravám za účelem zvýšení přesnosti a teplotní stability.
Klíčová slova:	Teplotní stabilita, MKP, teplotní deformace, minimalizace teplotních deformací, bruska
Anotace:	Tato práce se zabývá teplotními deformacemi obráběcích strojů. V rešeršní části jsou představeny zdroje a propady tepla, způsoby sdílení tepla a základy MKP. Dále se práce zaměřuje na analýzu teplotních deformací hrotové brusky, k čemuž jsou stanoveny potřebné OP a vazby. Dále jsou identifikovány kritická místa nosné struktury a navrženy opatření pro minimalizaci teplotních deformací. Tato opatření jsou podrobena další analýze a jsou vyhodnoceny jejich přínosy.

Anotation

Author:	Bc. Eliška Müllerová
Title of diploma thesis:	Thermo-mechanical optimization design changes of a grinding machine frame
Extent:	102 pages, 89 figures, 8 tables
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
Submitter:	ERWIN JUNKER GRINDING TECHNOLOGY a.s., Holic
Application:	Results of this thesis will serve to the submitter as a knowledge improvement of thermo-mechanical behaviour of the company's machine and as an example of future design changes to the machine.
Key words:	Thermal stability, FEA, thermal deformation, thermal deformation minimization, grinding machine
Annotation:	This thesis deals with thermal deformation of machine tools. First, sources and drains of heat, heat transfer and FEA basics are introduced. After that, an analysis of thermal deformations of a center grinding machine is carried out, for which the necessary boundary conditions and bonds are determined. Critical points in machine structure are identified and mitigative design changes are proposed. These design changes are subjected to further analysis and their benefits are evaluated.

Obsah

1	Úvod	12
2	Teplotní chování obráběcích strojů	13
2.1	Zdroje tepla	13
2.1.1	Vnitřní zdroje tepla.....	13
2.1.2	Vnější zdroje tepla.....	14
2.2	Sdílení tepla	15
2.2.1	Sdílení tepla vedením	15
2.2.2	Sdílení tepla prouděním.....	16
2.2.3	Sdílení tepla zářením.....	18
3	Teplotně-mechanické chování strojů.....	19
3.1	Měření teplotního chování a teplot.....	20
3.2	Minimalizace teplotních deformací.....	22
3.2.1	Konstrukce	22
3.2.2	Materiály	24
3.2.3	Chladicí systém.....	25
3.2.4	Teplotní kompenzace.....	26
3.3	Teplotní stabilita.....	27
4	MKP v obráběcích strojích	29
4.1	Základy MKP.....	29
4.2	Teplotně-mechanické úlohy	30
5	Popis stroje.....	31
6	Popis jednotlivých komponent stroje.....	34
6.1	Osa Z	34
6.2	Osa X.....	35
6.3	Osa B	36
6.4	Popis brousicích vřeten (Osa S).....	37

6.5	Osa C (stolová jednotka)	38
7	Model MKP	40
7.1	Zjednodušení CAD modelu.....	40
7.2	Materiálové charakteristiky	41
7.2.1	Polymerbeton.....	41
7.2.2	Ocel.....	42
7.3	Výpočtová síť	43
7.4	Modelování vazeb a spojů	44
7.4.1	Pohyblivé spoje lineární	44
7.4.2	Teplotní odpor vozíků lineárního vedení	45
7.5	Mechanické okrajové podmínky.....	47
7.5.1	Náhrady uložení.....	47
7.5.2	Výpočet vzájemných poloh brousicího a unášecího vřetene	47
7.6	Teplotní OP a varianty teplotního zatížení stroje.....	48
7.6.1	Určení ztrátového tepla osy Z pro stanovení OP.....	49
7.6.2	Výpočet ztrátového tepla osy X pro stanovení OP.....	49
7.6.3	Výpočet ztrátového tepla osy B pro stanovení OP.....	51
7.6.4	Stanovení ztrátového tepla brousicích vřeten pro stanovení OP	51
7.6.5	Výpočet ztrátového tepla osy C (stolové jednotky) pro stanovení OP.....	52
7.6.6	Stav 1.1.....	53
7.6.7	Stav 1.2.....	55
7.6.8	Stav 2.1.....	56
7.6.9	Stav 2.2.....	58
8	Výsledky základních úloh.....	60
8.1	Varianta bez oplachu.....	60
8.2	Varianta s oplachem	63

8.3	Zhodnocení výsledků variant bez a s oplachem.....	66
8.4	Vliv polohy broušícího vřeteníku v ose Z.....	68
9	Návrhy optimalizačních úprav modelu	70
9.1	Zavedení OP oplachu unášecích vřeten a jejich motorů	70
9.2	Vložení protékané trubky chladičí emulzí pod stolovou jednotkou.....	71
9.3	Vyztužení spodní části lože.....	72
9.4	Přemístění svodového potrubí ze středu lože.....	73
10	Výsledky návrhů optimalizačních řešení stroje.....	75
10.1	Zavedení OP oplachu unášecích vřeten a jejich motorů	75
10.2	Vložení protékané trubky chladičí emulzí pod stolovou jednotkou.....	77
10.2.1	Citlivostní analýza	78
10.3	Vyztužení spodní části lože.....	81
10.4	Přemístění svodového potrubí ze středu lože.....	82
10.5	Zhodnocení výsledků aplikace návrhů optimalizačních řešení	85
10.6	Vliv polohy broušícího vřetene v ose Z po zavedení veškerých variant úprav	86
11	Diskuse výsledků.....	88
12	Závěr	91
	Použitá literatura a zdroje	95
	Seznam obrázků.....	98
	Seznam tabulek.....	102
	Seznam použitého software	102
	Seznam příloh	102
	Elektronické přílohy	102

Seznam použitých zkratek

CNC	Computerized numerical control
MKP	Metoda konečných prvků
NC	Numerical control
OP	Okrajová podmínka
OS	Obráběcí stroje
RP	Remote point
SW	Software

Seznam použitých veličin a symbolů

a	[m ² /s]	Teplotní difuzivita
a_{ef}	[m/s ²]	Efektivní zrychlení
B	[-]	Matice tlumení
C	[-]	Matice tepelné kapacity
F	[-]	Vektor síly
F_{ef}	[N]	Efektivní síla
F_s	[N]	Ustálená síla
$F_{tř}$	[N]	Třecí síla jednoho pouzdra
Gr	[-]	Grasshoffovo číslo
I_s	[A]	Ustálený proud
K	[-]	Matice tuhosti
K_{qmech}	[-]	Součinitel přeměny mechanického výkonu na teplo
K_t	[-]	Globální matice tepelné vodivosti
L	[m]	Charakteristický rozměr
M	[-]	Matice hmotnosti
m_{osaX}	[kg]	Hmotnost komponent osy X
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
P_{el}	[W]	Elektrický výkon
P_{mech}	[W]	Mechanický výkon
P_{mechsk}	[W]	Skutečný mechanický výkon
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
q	[W/m ²]	Měrný tepelný tok
Q	[-]	Vektor vnějších teplotních vlivů

Q_p	[W]	Ztrátové teplo pouzdra
Q_{phmax}	[W]	Maximální odevzdané teplo
Q_{sk}	[W]	Skutečný ztrátový výkon
Q_z	[W]	Ztrátové teplo
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
t	[s]	Čas
T	[K]	Teplota
T_1	[K]	Teplota ozařovaného tělesa
T_2	[K]	Teplota zářiče
T_f	[K]	Teplota tekutiny
T_s	[K]	Teplota stěny
T_v	[-]	Vektor neznámých teplot
U	[-]	Vektor polohy
U_b	[V]	Napětí na sběrnici
v	[m/s]	Rychlost
v_{ef}	[m/s]	Efektivní rychlost
v_{max}	[m/s]	Maximální rychlost
v_s	[m/s]	Ustálená rychlost
ΔX	[m]	Přírůstek rozměru
X	[-]	Vektor polohy
X_0	[m]	Původní rozměr
α	[W/m ² K]	Součinitel přestupu tepla
γ	[1/K]	Součinitel teplotní délkové roztažnosti
ϵ	[-]	Emisivita
λ	[W/mK]	Součinitel tepelné vodivosti
ν	[PaS]	Kinematická viskozita
σ	[W/m ² K ⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta

1 Úvod

V dnešní době čelí výroba stále větším požadavkům. Ať už to jsou vyšší nároky na přesnost, výkonnost, jakost obrobeneho povrchu, spolehlivost, hospodárnost a malá spotřeba energie. Z těchto požadavků vychází nároky na vysokou statickou a dynamickou tuhost stroje, jeho co nejnižší hmotnost, dobré modální vlastnosti a co nejlepší teplotní vlastnosti. Jsou tedy kladeny stále větší požadavky na využití vhodných konstrukčních materiálů a správné navržení konstrukce stroje.

Dalším neméně důležitým a logickým cílem výrobních společností je vydělávání peněz. Proto by měla být na prvním místě snaha o naplnění výše zmíněných požadavků a vytvoření co nejvíce stabilní a spolehlivý stroj. Dalšími důležitými faktory pro celkovou produkci ve velkých výrobcích, která vychází z potřeby dodávky stále stejně přesných a identických výrobků, jsou spolehlivost a opakovatelnost procesu. Spolehlivost a opakovatelnost procesu jsou jedny z nejdůležitějších aspektů v automatizovaných pracovištích, kde není možné kontrolovat kvalitu každého výrobku zvlášť.

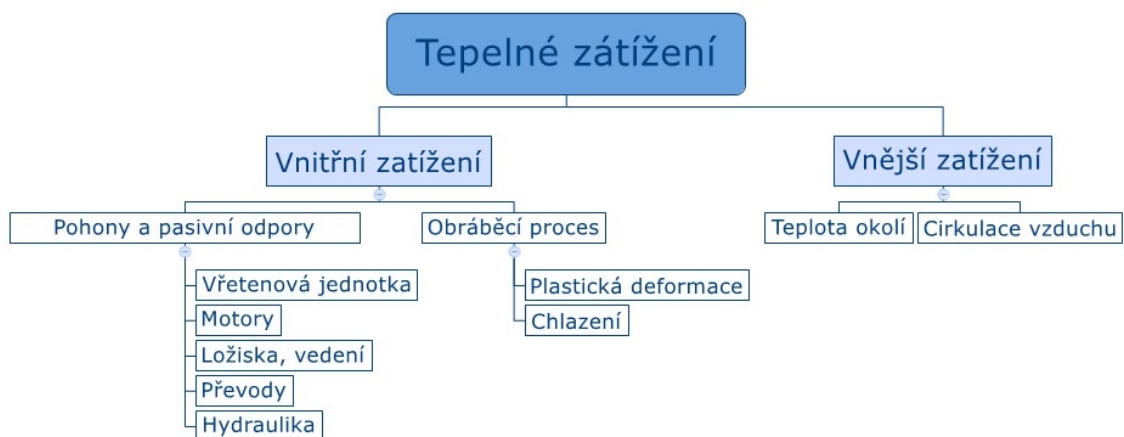
Dalším klíčovým aspektem k dosažení stability obráběcího procesu je výrobní výkon stroje, který je přímo ovlivněn různými zatíženími způsobující deformaci stroje. Tato zatížení lze rozdělit do dvou hlavních skupin, a to silová a tepelná. Do skupiny silových zatížení dále spadají účinky řezných sil, setrvačné účinky a vlastní hmotnost stroje. Ve skupině tepelných zatížení se nachází tři obsáhlé podskupiny, a to konkrétně vnitřní zdroje tepla, výrobní proces a vnější zdroj tepla.

Tato práce se bude věnovat zdrojům tepla v obráběcích strojích, teplotně-mechanickou deformací, její minimalizací a základy MKP. Ve vlastním řešení bude provedena analýza teplotních deformací výchozí varianty hrotové brusky se snahou identifikace kritických prostorových deformací. Na základě identifikace budou navrženy patřičné návrhy optimalizačních opatření a tato opatření budou následně podrobena analýze. Bude provedeno srovnání s výchozí variantou hrotové brusky a vyhodnoceno, která z uvažovaných návrhů byla neúčinnější.

2 Teplotní chování obráběcích strojů

2.1 Zdroje tepla

Obráběcí stroj jako takový je komplexní systém. Velká část komponent a konstrukčních uzlů, ze kterých je sestaven, je zdrojem tepla nebo naopak propadem tepla. Kromě těchto vnitřních zdrojů tepla na stroj působí i zdroje vnější. Rozdělení tepelného zatížení OS je na Obr. 1.

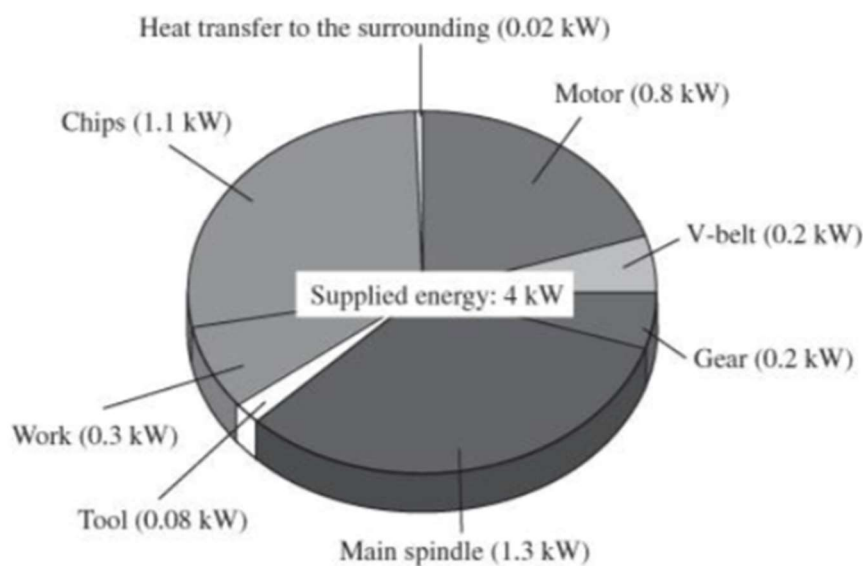


Obr. 1: Rozdělení teplotních vlivů

2.1.1 Vnitřní zdroje tepla

Vnitřních zdrojů tepla vzniká velká řada při vlastním provozu stroje. Zdroje a propady tepla mají extrémní vliv na rozložení teploty uvnitř obráběcího stroje. Ty mají za následek nežádoucí změny polohy nástroje, a tudíž nepříznivý vliv na přesnost obráběcích strojů.

Mezi hlavní zdroje ztrátového tepla patří vřetenová jednotka včetně motoru vřetene a ložisek, jelikož kromě generovaného tepla elektromotorem zde vzniká teplo díky tření ložisek při vysokých otáčkách vřetene. Podobně, jako vzniká teplo v ložiskách vřetene, vzniká i teplo v kuličkových šroubech a maticích, jelikož je ale oběžná rychlost v těchto ložiskách menší, vznikající teplo je taktéž mnohem menší. Dále se mezi vnitřní zdroje tepla řadí tepelné ztráty motorů. Ať už se jedná o lineární motory, prstencové motory, klasické servomotory pohybových os nebo asynchronní motory přidružených agregátů. [1]



Obr. 2: Rozložení ztrátového tepla [2]

Z Obr. 2 je zřejmé, že nezanedbatelnou část vnitřních zdrojů tepla tvoří teplo, které vzniká při vlastním obráběcím procesu stroje. Energie potřebná k odebrání třísky se mění v teplo, které na stykových plochách dosahuje hodnot až 1200 °C, v závislosti na řezné rychlosti. Toto teplo ve velké míře odchází společně s třískami, ale nepříznivě ovlivňuje přesnost obrábění a jakost obrobenej plochy. [3]

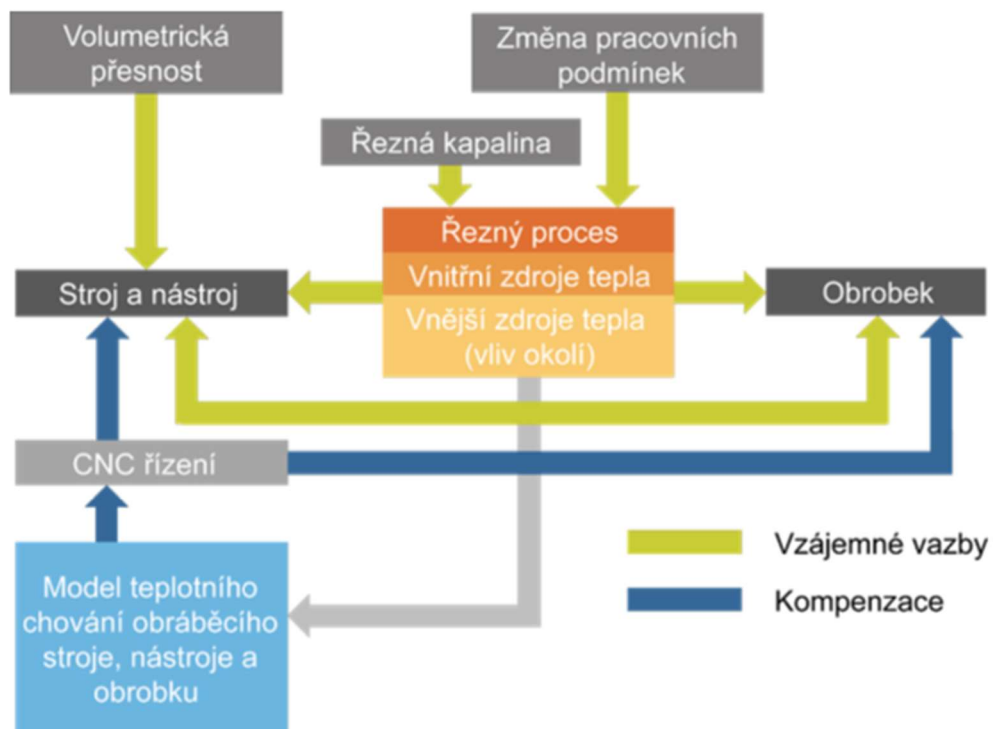
2.1.2 Vnější zdroje tepla

Na obráběcí stroj nepůsobí jen výše zmíněné vnitřní tepelné zdroje. Musíme brát v potaz i zdroje tepla působící z vně stroje. Jedná se o zdroje tepla z okolí, mezi které se řadí nevhodně umístěná chladicí jednotka, klimatizace, topení v hale, cirkulace vzduchu způsobená otevřením dveří, ale může se jednat i změnu teploty v hale změnou denní doby v závislosti na svitu slunce nebo změna ročního období. Dále je stroj výrazně ovlivňován chladicí kapalinou, mazacími prostředky, či špatně zaizolovanými základy obráběcího stroje. [3]

2.2 Sdílení tepla

Zdroje a propady tepla mají za následek tvorbu míst s rozdílnou teplotou. Díky sdílení tepla v konstrukci stroje a jeho okolí se vytváří nestacionární teplotní pole stroje a jeho okolí.

Teplu se může šířit z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Jsou to tepelné procesy ovlivňující výrobní přesnost obráběcího stroje a všechny tři, a to konkrétně vedení, proudění a záření jsou úzce spjaty s obráběcím procesem, viz. Obr. 3. [5][27]



Obr. 3: Diagram ukazující komplexnost problematiky [6]

2.2.1 Sdílení tepla vedením

Sdílení tepla vedením neboli kondukcí má v obráběcích strojích největší vliv. Jedná se o jev, kdy se tepelná energie postupně šíří v hmotě, převážně v pevných látkách (rám obráběcího stroje), ale i v tekutinách.

Schopnost látky přenášet teplo vedením se nazývá tepelnou vodivostí. Tepelná vodivost je dána součinitelem měrné tepelné vodivosti $\lambda [W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}]$ rozlišujícím špatné a dobré tepelné vodiče. Nejlepší vodivost ze všech materiálů mají kovy. Kovy, které mají lepší elektrickou vodivost mají

i lepší tepelnou vodivost. Oproti kovům má horší teplotní vodivost voda, viz Obr. 4.

Materiál	Měrná tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Materiál	Měrná tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
vakuum	0	žula	2,9 – 4,0
suchý vzduch	0,024	ocel	50
polystyren	0,040	železo	73
náplň spacáků (peří, vlákna)	0,05 – 0,07	mosaz	106
sníh	0,12 – 1,3	hliník	229
plexisklo	0,2	zlato	317
cihla	0,28 – 1,2	měď	395
voda	0,5	stříbro	418
led	2,2	diamant	895 - 2300

Obr. 4: Tabulka s měrnou tepelnou vodivostí [7]

Pro sdílení tepla v homogenním poli platí Fourierův zákon, podle něhož hustota tepelného toku ve směru proti gradientu teploty \vec{q} [$W \cdot m^{-2}$] je úměrná teplotnímu gradientu $grad T$ a směřuje proti němu podle vztahu (2.1).[5][6]

$$\vec{q} = -\lambda gradT \quad (2.1)$$

2.2.2 Sdílení tepla prouděním

Konvektivní přenos tepla převažuje v kapalinách a plynech. Je charakterizováno součinitelem přestupu tepla α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]. Součinitel přestupu tepla je funkcí mnoha proměnných a nabývá hodnot v rozmezí

$\alpha = (10^{-1} - 10^{-4}) W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Pro výpočet používáme empirický vztah v literatuře označovaný jako „Newtonův ochlazovací zákon“ (2.2).

$$q = \alpha(T_f - T_s) \quad (2.2)$$

kde q je hustota tepelného toku a T_f, T_s jsou teplota tekutiny a stěny.

Součinitel tepla α je pak počítán z definice Nusseltova čísla, které závisí na charakteru konvekce, geometrii povrchu, typu proudění a vlastnostech kapaliny. Podle těchto parametrů je sdílení tepla prouděním rozdělováno na přirozenou nebo také volnou konvekci a nucenou konvekci. Na Obr. 5 jsou uvedeny používané intervaly velikosti součinitele α pro nejčastěji používaná chladič média. [6]

Chladič médium	Volné proudění	Vynucené proudění
plyn	2 až 10	10 až 100
olej	200 až 300	300 až 1000
voda	200 až 600	1000 až 3000
voda při teplotě varu	500	4500

Obr. 5: Součinitel přestupu tepla α [8]

Nucená konvekce je takové proudění tekutiny, které je vyvoláno vnějším činitelem např. čerpadlem. V takovém případě jsou pro výpočet Nusseltova čísla použity následující vztahy (2.3), (2.4), (2.5)

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.3)$$

Re je Reynoldsovo číslo, které udává poměr setrvačných a vazkých sil

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (2.4)$$

a Pr je Prandtlovo číslo udávající poměr rychlostní a teplotní mezní vrstvy

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2.5)$$

kde v je rychlost proudění, ν je kinematičká viskozita a a je teplotní difuzivita. [17]

Volná konvence uvažuje působení vnějšího silového pole a změnu hustoty prostředí s teplotou. Zde jsou použity pro výpočet Nusseltova čísla vztahy (2.6).

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.6)$$

kde Gr je Grasshoffovo číslo a udává poměr vztlakových a vazkých sil. [28]

2.2.3 Sdílení tepla zářením

Pokud je objekt zahřátý na teplotu T , viz Obr. 6, přeměňuje část své energie na elektromagnetické záření, které se šíří rychlostí světla v prostoru. Moderní teorie přenosu tepla zářením stojí na základě teorie magnetických vln a kvantové teorie. K výpočtu celkové vyzářené energie $E [W \cdot m^{-2}]$ se používá Stefan-Boltzmannův zákon (2.7).

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (2.7)$$

kde $\varepsilon [-]$ je emisivita, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), T_2 [K] je teplota zářiče a T_1 [K] je teplota ozařovaného tělesa.



Obr. 6: Termosnímek motorů [9]

Od ostatních mechanismů sdílení tepla se přenos tepla zářením liší tak, že nepotřebuje látku, která přenos zprostředkovává. Základní formou přenosu energie radiací je sdílení energie ze Slunce. [28]

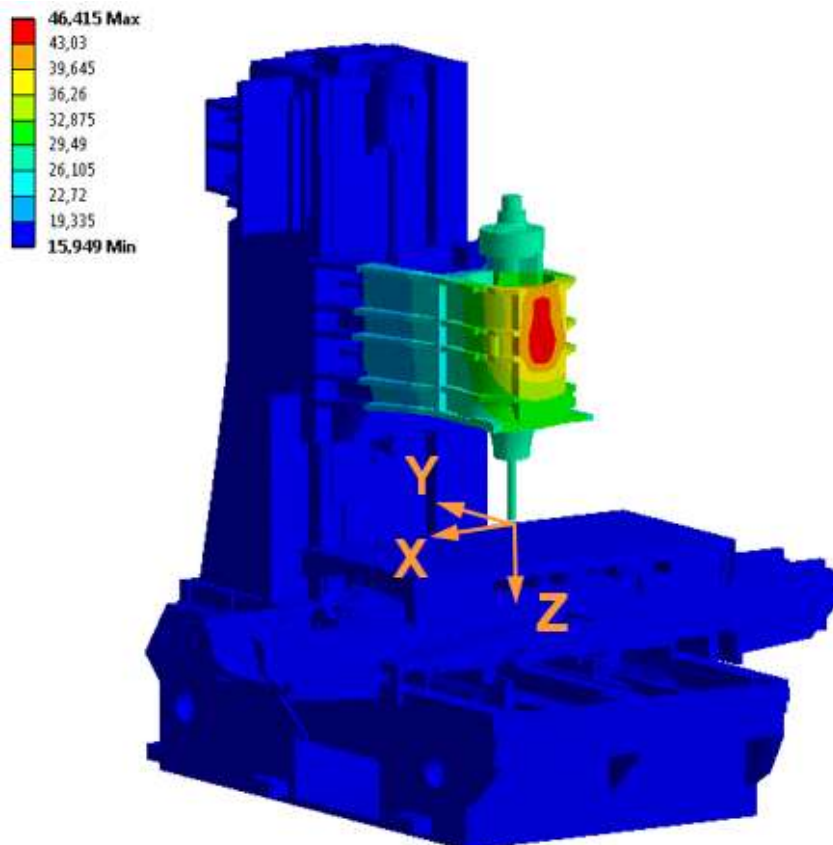
3 Teplotně-mechanické chování strojů

V době, kdy byly čteně používány konvenční obráběcí stroje, nehrála chyba způsobená teplotní deformací velkou roli. S nástupem NC a CNC obráběcích strojů se zvýšila rychlost otáček a posuvu. Tedy i větší produkce tepla a teplotní deformace s tím spjatá. Nyní jde na vrub teplotní deformaci 75 % chyb obrábění. [28]

Každý materiál při zahřátí zvětší svůj objem dle vztahu (3.1). V tomto vztahu vystupuje součinitel teplotní roztažnosti, který určuje, jak moc se daný materiál zvětší při zvýšení teploty o jeden stupeň.

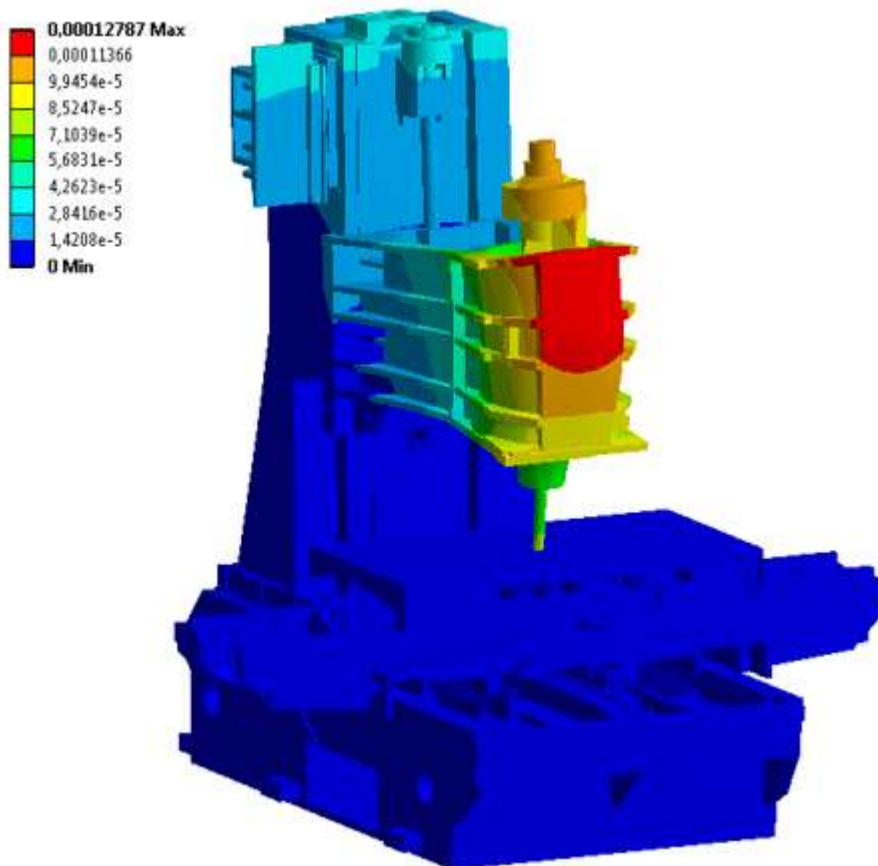
$$\Delta X = X_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Pokud se bude tomuto roztahování mechanicky bránit, začne vznikat v tělese pnutí a těleso se začne deformovat. Tento jev lze pozorovat například při vyklápní vřeteníku frézky z Obr. 8.



Obr. 7: Teplotní pole vertikální frézky [17]

Doposud se předpokládalo homogenní rozložení teploty v tělese, tedy že každý infitezimální objem má stejnou teplotu. Protože jsou ve strojích zdroje tepla, které nezahřívají všechna tělesa rovnoměrně, vzniká v tělesech tzv. teplotní pole (Obr. 7). Kvůli teplotnímu poli má těleso tendenci se rozpínat v každém bodě jinou měrou, čímž vzniká mechanické pnutí a následně deformace (Obr. 8). Ta může mít za následek různá zkroucení a průhyby těles, což je nežádoucí účinek snižující přesnost stroje.

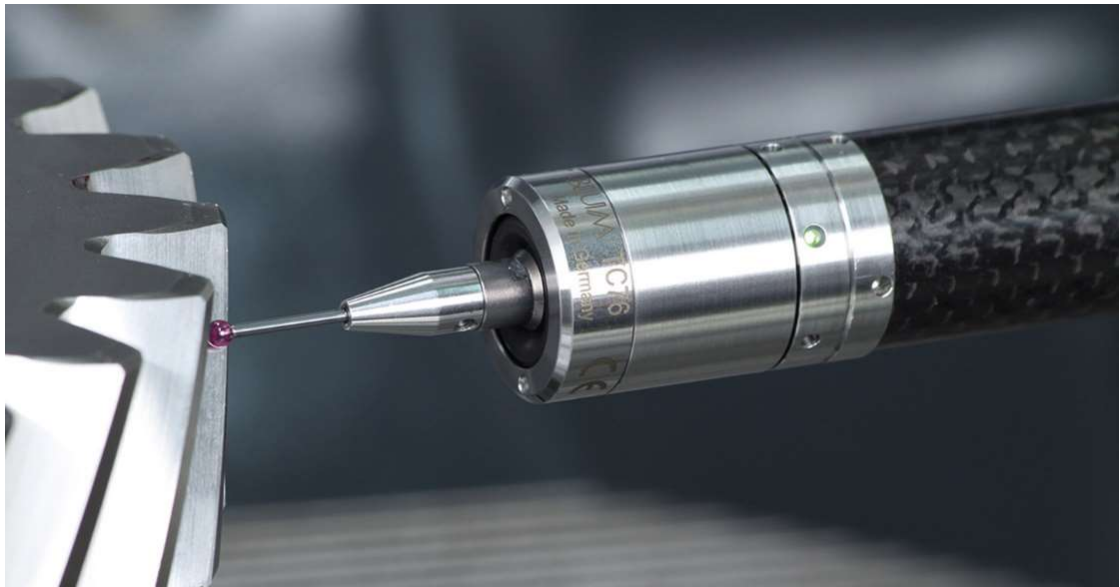


Obr. 8: Pole posuvů vertikální frézky [17]

3.1 Měření teplotního chování a teplot

Měření teplotního chování a teplot se řídí normou ČSN ISO 230–3: 2010. Normou je určeno, že stroj musí být plně funkční. Měření jako takové musí probíhat bez zátěže stroje a mělo by být zajištěno, že po dobu měření bude stroj v klidu, tzn. musí být zajištěna ochrana před vnějšími zdroji tepla.

K měření je používán normou daný přípravek, který umožňuje měřit deformace v ose Z a naklápění v rovinách XZ, YZ. Výsledkem tohoto měření jsou grafy teplotních deformací a teplot v závislosti na čase.



Obr. 9: Dotyková sonda [16]

Jednou z možností měření chyb v místě nástroje je měření pomocí nástrojových či dotykových sond z Obr. 9.

3.2 Minimalizace teplotních deformací

Jelikož má tepelné zatížení na výslednou přesnost obrábění výrazný vliv, je vyvíjena snaha se teplotním chybám působícím na obráběcí stroj vyhnout nebo je alespoň minimalizovat. K čemuž je používáno spoustu technik a teorií díky kterým lze teplotní chyby snížit podle některých zdrojů až o 90 % [9]. Všechna tato řešení lze zařadit do jedné ze tří následujících skupin.

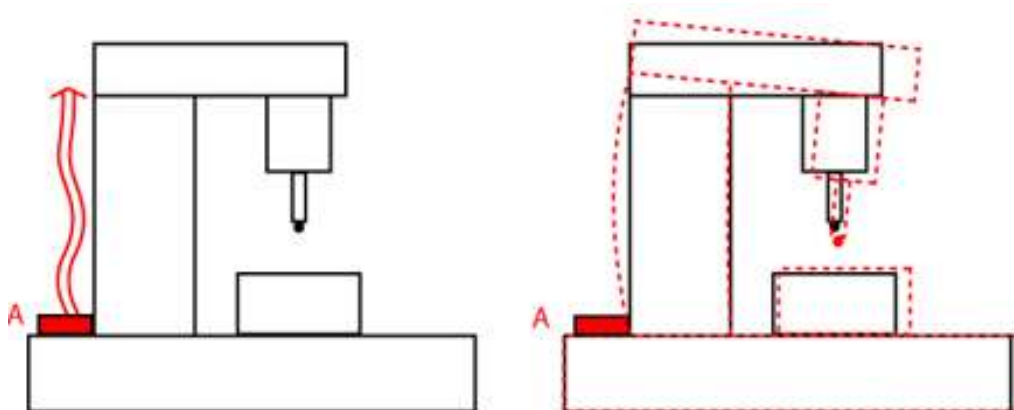
- | | |
|--------------------|----------------------------------|
| • Konstrukční fáze | Řešení pro zabránění deformací |
| • Chladicí systém | Tepelných toků a tím i deformací |
| • Kompenzace | Kompenzace teplotních chyb |

Tyto tři kategorie jsou hlavními kategoriemi, které se mohou dále dělit. Volbu vhodného způsobu minimalizace chyb se dále ovlivňuje stav životního cyklu obráběcího stroje. Například konstrukční fáze je k dispozici při vývoji obráběcího stroje. Velkou část tepelných zdrojů, které není možno eliminovat konstrukční fází, lze ovlivnit použitím chladicích systémů. V případě, kdy na eliminaci nestačí konstrukční řešení ani chladicí systémy, je přistupováno k využití kompenzačních metod.

3.2.1 Konstrukce

Při návrhu obráběcího stroje je možné provést mnoho opatření k minimalizaci tepelných chyb. Cílem každého konstruktéra je vytvořit takový stroj, který bude absolutně tuhý. Z hlediska teplotně stabilního stroje je kladen nárok na teplotně symetrickou konstrukci. Teplotně symetrická konstrukce je taková konstrukce, která se skládá ze symetrických a uzavřených strukturálních částí. Proto je nejvhodnější použití uspořádání typu gantry, případně portálové uspořádání. Sice toto konstrukční uspořádání nepomáhá k úplnému vyhnutí se teplotním chybám, ale lze chyby jednodušeji zmapovat [5][9].

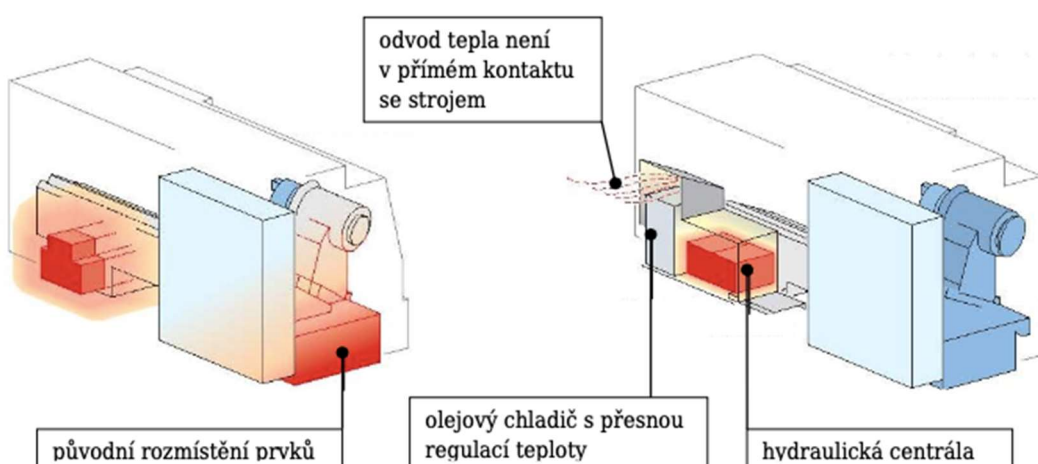
Pokud by nebyla konstrukce teplotně symetrická, mohlo by vlivem různých tepelných zdrojů docházet k naklápění stroje, jako je tomu na Obr. 10. Na levé části obrázku je znázorněno teplo sálající ze zdroje A. Na pravé části obrázku je čárkovane vyznačeno prohnutí stroje a posunutí polohy nástroje.



Obr. 10: Vliv tepelného zdroje na nesymetrické uspořádání stroje [4]

Dále do konstrukční fáze spadá redukce produkovaného tepla. A to zejména minimalizací tření v kuličkové matici. K minimalizaci tření v kuličkové matici lze využít oddělovačů kuliček (klecí). Díky klecím se kuličky nemohou dotýkat, vytvoří se v něm olejový film, který usnadní otáčení kuliček, a nevzniká tak mezi nimi bodový kontakt.

Jak bylo výše uvedeno, mají na ohřev stroje vliv i zdroje vnější. Proto je nutné na ně brát v konstrukci stroje ohled a přemýšlet nad umístěním komponent jako třeba elektroskříně a olejového chladiče do zadní části stroje. Vliv teploty olejové chladiče na vřeteník před a po jeho přemístění je vidět na Obr. 11. [13]



Obr. 11: Vliv umístění olejového chladiče [14]

Tyto a další zdroje je nutné odstínit. To je možné pomocí plechových krytů, které zabraňují sdílení tepla do stroje.

Většinou výše zmíněná konstrukční řešení nejsou dostatečná ke snížení teplotních chyb a je tedy potřeba uvažovat nad dalším zaváděním aplikací snižujících teplotní chyby, které lze považovat za řízení tepla v obráběcích stroji. Nucené chlazení dílů, nebo dokonce nucené zahřívání, případně nucený přestup tepla jsou některé z možných aplikací, které jsou používány proti deformaci. [27]

3.2.2 Materiály

Další součástí konstrukčního řešení je zabývání se konstrukčními materiály s menším součinitelem teplotní roztažnosti nebo lepšími izolačními účinky a jejich použití.

Nejčastěji používanými materiály při stavbě obráběcích strojů jsou ocel a litina. Četně se využívají díky jejich skvělému poměru tuhosti a hmotnosti. Podle teplotně – mechanického chování stroje ale nejsou ideální. Tyto materiály mají vysokou hodnotu součinitele teplotní roztažnosti α a tepelné vodivosti λ . Ty pak mají velmi negativní vliv na geometrickou přesnost stroje.

Z toho důvodu je snaha používat ve stavbě obráběcích strojů alternativní materiály s nízkou tepelnou vodivostí λ nebo materiály s lepší izolační schopností. Mezi tyto materiály se řadí například polymerní a cementové betony, viz Obr. 12, přírodní žula nebo kompozitní materiály. [5]



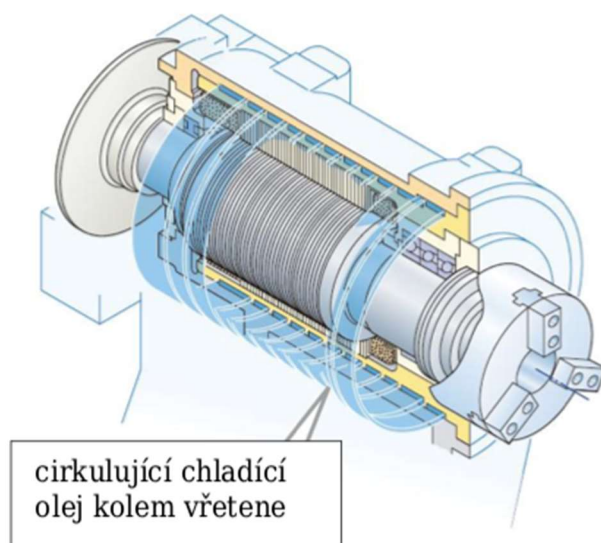
Obr. 12: Část stojanu z polymerního betonu s ocelovými inserty

V konstrukční fázi je možnost díky těmto materiálům s nízkou hodnotou λ a izolování významných zdrojů tepla snížit přenos tepla uvnitř stroje. Vznikající teplo, jehož vznik není možný zamezit v konstrukční fázi, je odváděno pomocí chlazení, o kterém bude psáno v dalších kapitolách.

3.2.3 Chladicí systém

Řízení tepelných toků zmíněné výše je další aplikací sloužící k minimalizaci tepelných chyb. Hlavní myšlenkou je vytvoření jednotného teplotního pole, které ovlivňuje různé části stroje stejným způsobem. K dosažení této myšlenky se používá chlazení nebo ohřev různých oblastí obráběcího stroje. Nevýhodou je, že jsou oba tyto procesy nákladné a měly by být použity v případě, kdy jsou všechny ostatní způsoby neúčinné. [11]

Chlazení zdrojů tepla je jedna z primárních metod vyrovnávání teplot. Je důležité, aby teplota chladicí kapaliny byla regulovaná, kvůli zajištění přesnosti obráběcího procesu. Pokud není teplota chladicí kapaliny regulovaná, může to spíše negativně ovlivnit teplotní rozložení. Mezi čteně využívaná chladicí média patří olej, voda s antikorozními přísadami a v neposlední řadě vzduch. [11]



Obr. 13: Chlazení vřetenové jednotky [14]

Jak bylo výše uvedeno, hlavním zdrojem tepla a teplotních chyb je vřetenová jednotka. Právě na chlazení vřetenové jednotky je kladen velký důraz. Pokud by zde byla teplota proměnlivá, vedla by teplotní roztažnost komponent k výrobním nepřesnostem obrobku. Konstrukčním řešením je vřetenový plášť s chladícím olejem, viz Obr. 13. [14]

Velký podíl v dodávání tepla do stroje patří motorům, které se dají chladit vzduchem nebo kapalinou. Nemusí být chlazen motor jako celek, ale může být chlazená pouze příruba motoru.

K chlazení jednotlivých komponent stroje se také může používat protékání jednotlivých těles. Toto chlazení se nachází u odlitků, kterými mohou být saně, stojan, vřeteník, a protékajícím médiem je voda a olej.

Na druhou stranu se pro zpřesnění obráběcích strojů používají rozsáhlé zahřívací procesy. Smyslem této aplikace je uvést stroj do teplotně ustáleného stavu tak, aby během obráběcího procesu docházelo k minimálním změnám teploty v čase. Pro řadu závodů je tato varianta nevýhodná, jelikož je proces energeticky náročný a stroj musí být během zahřívání nevyužitelný k jakýmkoli obráběcím procesům. Další nevýhodou je nedostatek znalostí o potřebném čase k dosažení stabilního stavu stroje. Čas, během kterého je stroj ohříván, se tedy liší podle zkušeností různých uživatelů. [26]

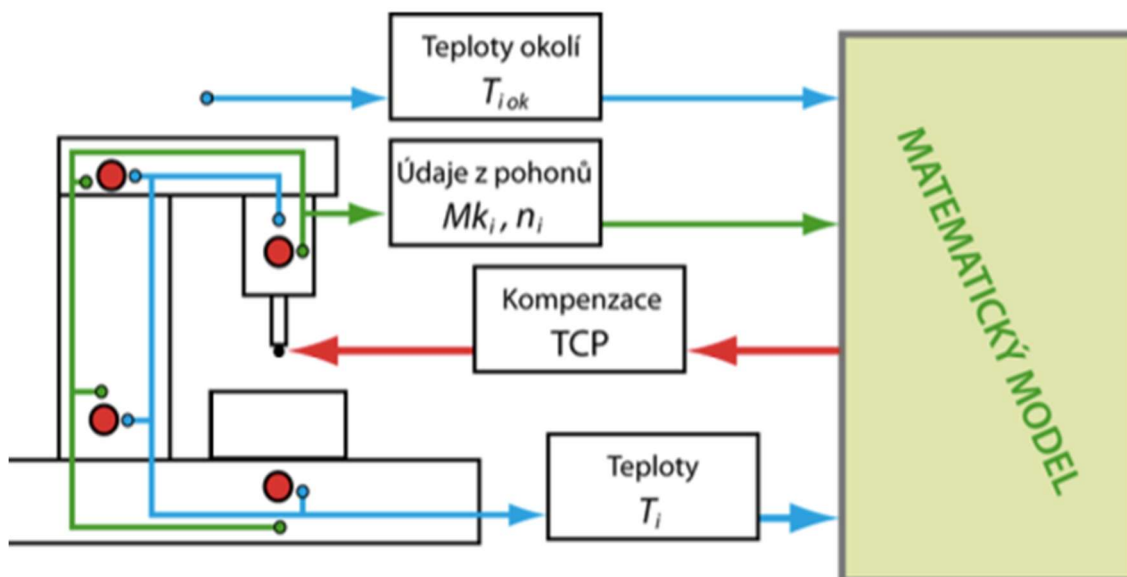
3.2.4 Teplotní kompenzace

Pokud konstrukční fáze a chladicí systémy nejsou postačující pro dosažení teplotně stabilního stroje, připojuje se pak kompenzace teplotních chyb. Výhodou teplotní kompenzace oproti metodám regulace chyb a zamezení teplotních chyb je to, že nepotřebuje žádné speciální druhy chlazení nebo alternativní materiály. Zároveň může být kompenzace prováděna v jakékoli fázi navrhování nebo stavby obráběcího stroje.

Existuje mnoho modelů zakládajících se na stejných principech, kterými jsou naměření tepelné chyby či její prognóze v reálném čase a následném zavedením korekcí do řídicího systému. U kompenzačních metod se pak rozděluje mezi kompenzací přímou a kompenzací nepřímou.

U přímé kompenzace dochází k měření chyb v místě nástroje pomocí nástrojových či obrobkových sond. Z tohoto měření je získávána reálná znalost odchylek a není nutné nijak kalibrovat matematický model. Toto měření má velkou nevýhodu v efektivnosti výrobního procesu. Aby mohlo být vykonáno měření posunutí v místě nástroje, je potřeba stroj zastavit.

Druhá metoda teplotní kompenzace je nepřímá. V tomto případě se nevyužívá sond, jako tomu bylo u kompenzace přímé, ale je vytvořen matematický model vycházející z různých interních dat stroje viz Obr. 14, díky kterému jsou vypočítány korekce v osách stroje.



Obr. 14: Princip nepřímé kompenzace [6]

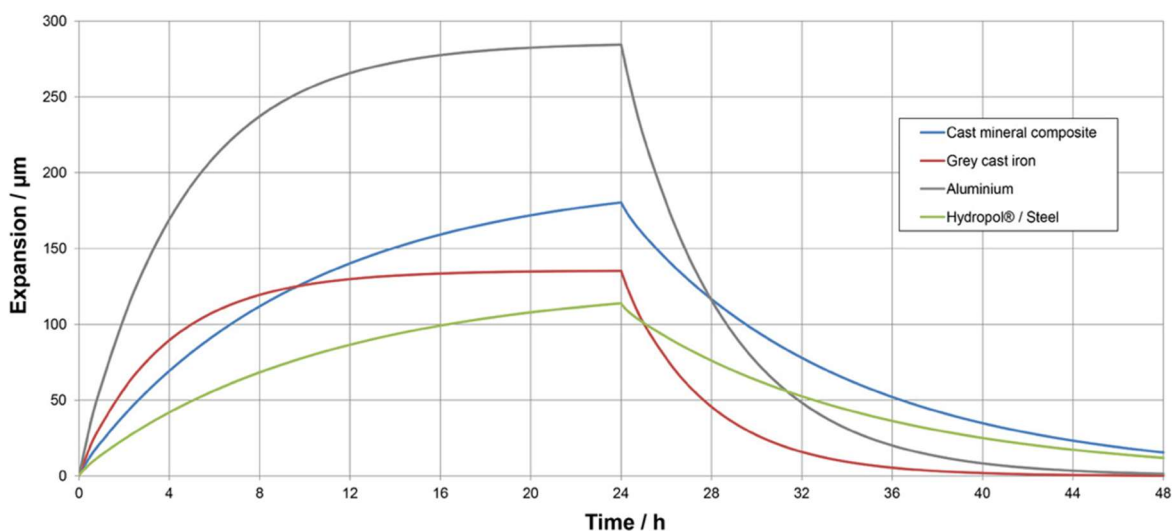
Lineární složky teplotních chyb lze kompenzovat softwarově, jako tzv. SW teplotní kompenzace. Tato kompenzace lze určovat různými metodami, mezi které patří například nejčastěji používaná regresní analýza, neurální sítě, metoda MKP, relativně nová metoda přenosových funkcí a další jiné metody. Úhlové složky teplotních chyb se pak kompenzují řízeným chlazením nebo ohřevem. [6]

3.3 Teplotní stabilita

Ideální stav v obráběcích strojích by byl takový, kdy konstrukce stroje nijak nereaguje na změny teplot a je tedy teplotně stabilní. V reálných pracovních podmínkách není možno stavu, ve kterém materiál použitý pro konstrukci stroje nijak nereaguje na vnitřní a vnější tepelné zdroje, dosáhnout. Dokonce je až 80 % odchylek přesnosti způsobeno teplotními deformacemi. [21]

Na teplotní stabilitě se podílí hlavně tři materiálové vlastnosti – měrná tepelná kapacita, součinitel teplotní roztažnosti a tepelná vodivost. Tepelná kapacita materiálu určuje jak „rychle“ bude materiál zvyšovat svou teplotu

při zahřívání. Materiál s vysokou tepelnou kapacitou potřebuje na zahřátí o jeden stupeň více energie, než materiál s nízkou teplotní kapacitou. To znamená, že při stejném tepelném toku se bude materiál s vyšší tepelnou kapacitou zahřívát pomaleji. S prohříváním materiálu souvisí i jeho tepelná vodivost, která určuje, jak rychle může teplo prostupovat materiálem.



Obr. 15: Teplotní stabilita různých materiálů [23]

V předchozích kapitolách byla popsána teplotní deformace, která vychází hlavně ze změny teploty a součinitele teplotní roztažnosti, viz vztah (8). Z těchto poznatků vyplývá, že ideálním materiálem pro stavbu obráběcích strojů je takový materiál, který má co nejvyšší tepelnou kapacitu, co nejmenší součinitel teplotní roztažnosti a co nejmenší tepelnou vodivost. Takový materiál je nejvíce teplotně stabilní. Srovnání stability různých materiálů je na Obr. 15. [23]

4 MKP v obráběcích strojích

4.1 Základy MKP

V předchozích kapitolách bylo pojednáváno o rovnicích pro vedení tepla. Analytické řešení těchto rovnic je možné získat pouze pro geometricky jednoduchá tělesa typu krychle, válec, koule atd. Pro složitější tělesa, kterými může být například vřeteník nebo stojan stroje, by bylo analytické řešení těchto rovnic nemožné. Z toho důvodu se volí přístup MKP, neboli metoda konečných prvků, kdy je problém nekonečného počtu neznámých na kontinuu redukován na konečný počet neznámých v uzlech sítě. Obecně se jedná o metodu diskretizace kontinua, která obstarává modelové rozložení hmotnosti a tuhosti v maticích hmotnosti a tuhosti jednotlivých dílů.

$$\underline{M}(\vec{X}, t)\vec{U}(t) + \underline{B}(\vec{X}, t)\vec{U}(t) + \underline{K}(\vec{X}, t)\vec{U} = \vec{F}(t) \quad (4.1)$$

V pohybové rovnici (4.1) jsou matice hmotnosti a tuhosti, kterými jsou popsány vlastnosti dílů nebo sestavy. Matice hmotnosti a tuhosti jsou sestaveny na základě sítě konečných prvků a definovaných vazeb mezi jednotlivými prvky. [29]

Geometricky složitě těleso (nebo sestava) je rozděleno na konečný počet konečně velkých podoblastí neboli konečné prvky. Tyto jednoduché prvky lze následně řešit pomocí variačních metod, jako je princip využívající energie vnitřních a vnějších sil, princip virtuálních posuvů nebo princip virtuálních sil. Uvnitř řešené oblasti musí být splněny obecné rovnice pružnosti a na hranici řešené oblasti musí být splněny předepsané OP. [29]

4.2 Teplotně-mechanické úlohy

Nehomogenní teplotní pole ve struktuře obráběcího stroje je i přes všechny snahy o minimalizaci teplotních deformací nevyhnutelný jev daný zdroji a propady tepla, které na strukturu stroje působí a díky nenulové teplotní roztažnosti materiálů způsobují změny tvaru struktury a ovlivňují polohu nástroje. Teplotně mechanické modely jsou stavěny, aby mohl být zkoumán vliv zdrojů tepla a teplotního pole na geometrii sktruktury OS a jsou také využívány pro predikci, návrh, optimalizaci a v neposlední řadě kontrolu teplotně mechanického chování OS. [4]

Teplotní úloha je v případě stacionární úlohy řešena v maticové formě (4.2),

$$\underline{K}_T \cdot \vec{T}_V = \vec{Q} \quad (4.2)$$

kde K je globální matice tepelné vodivosti, T je vektor neznámých (teplot v uzlech 1-3) a Q je vektor vnějších sil, u kterého se projeví definované OP a zatížení. V případě nestacionární úlohy je do soustavy přidán člen reprezentující tepelnou kapacitu soustavy C a časovou změnu tepla (4.3).

$$\underline{C} \cdot \vec{T}_V + \underline{K}_T \cdot \vec{T}_V = \vec{Q} \quad (4.3)$$

Vazbou modelu na okolní svět jsou tři typy okrajových podmínek. První je OP 1. druhu, kde na hranici je zadávána hodnota funkce (teplota T), 2. druhem je tepelný tok q , kdy je na hranici zadávána hodnota derivace funkce a 3. druhem je konvekce neboli zadávání součinitele přestupu tepla a tepla okolí.

Mechanická úloha následně navazuje na úlohu teplotní, ze které vychází (teplotní řešení je vstupem strukturální simulace). V této úloze jsou všechny proměnné nezávislé na čase. Lze tedy získat pouze ustálené řešení, kterým je teplotní pole a jemu odpovídající pole posunutí.

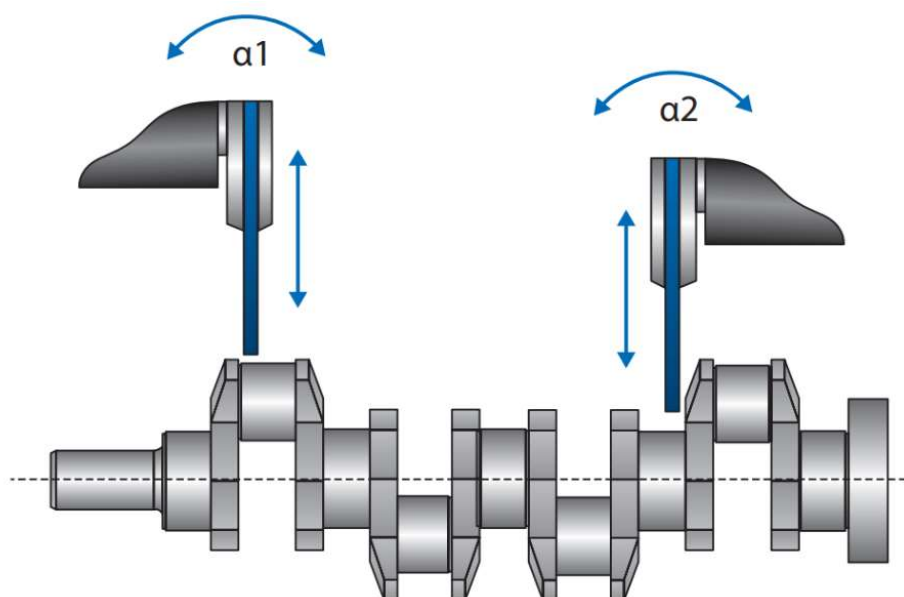
5 Popis stroje

Tato práce bude zkoumat teplotně mechanické chování brusky nekruhových profilů Junker JUCRANK 6S (Obr. 16). Řada strojů JUCRANK je navržena pro broušení nekruhových profilů, především klikových hřídelí.



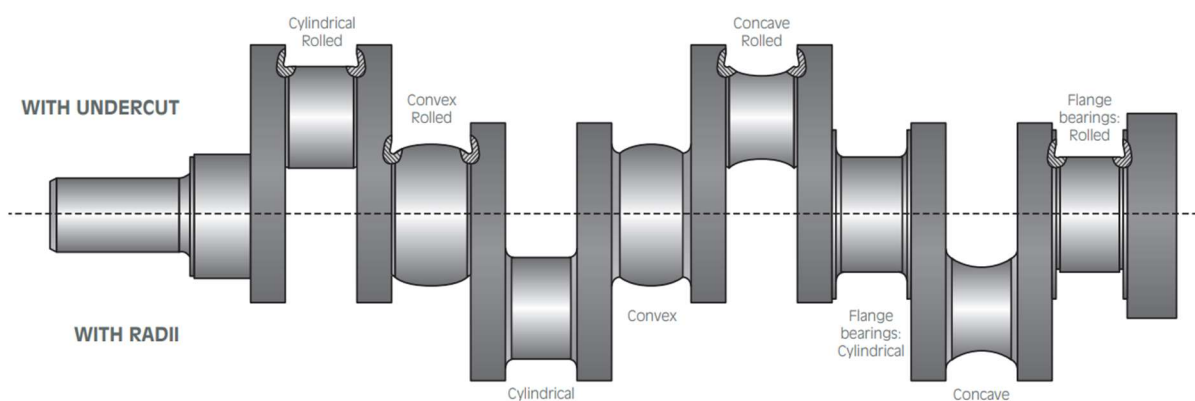
Obr. 16: Junker JUCRANK 6S [24]

Při brusném procesu je kliková hřídel upnuta do unášecích vřeteníků a rotuje kolem svého středu. Brusný kotouč na ose X pak koná kývavý pohyb interpolovaný s rotací unášecího vřetene (Obr. 17). Nástrojová strana může být volitelně vybavena otočnými osami WK, které umožňují naklápět brusný kotouč a tím brousit složitější geometrie bez tvarových kotoučů či přímo kompenzovat chyby válcovitosti.



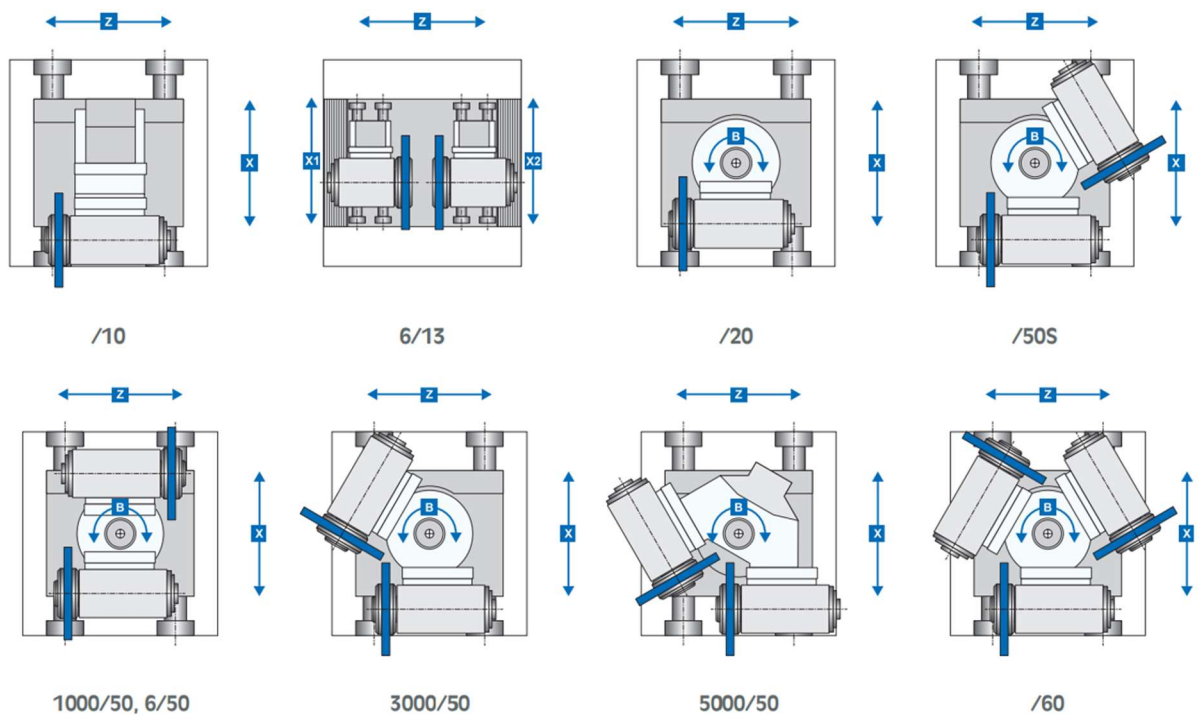
Obr. 17: Proces broušení [24]

Vyráběné klikové hřídele mohou mít velmi různorodé tvary čepů. Ty mohou mít v rohu buď zápich (undercut), nebo zaoblení (radius). Dále pak mohou mít buď válcový, konvexní či konkávní profil a zároveň mohou obsahovat plochu axiálního ložiska (flange bearing), vše viz Obr. 18.



Obr. 18: Různá provedení čepů klikových hřídelů [24]

Nástrojová hlava může být konfigurována v různých provedeních, podle aplikace (Obr. 19). Může např. obsahovat další brusná vřetena, která se během broušení mohou střídat.



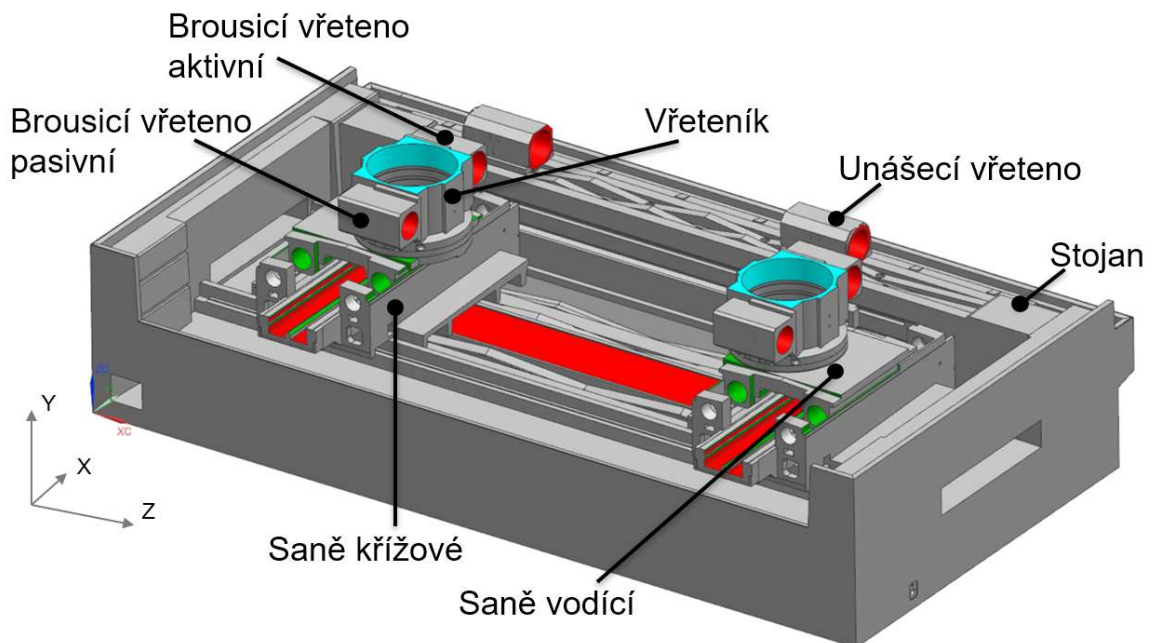
Obr. 19: Možné konfigurace nástrojové hlavy [24]

Modelová řada JUCRANK se vyrábí v 11 různých velikostních provedeních, od nejmenšího modelu 1S pro max. 5kg hřídele o délce 150 mm až po provedení 8XL, které zvládne brousit až tunové hřídele o délce 4,8 m. [24]

6 Popis jednotlivých komponent stroje

Řešeným strojem je hrotová bruska Junker JUCRANK 6S pro broušení nekruhových profilů, která je schopná provádět veškeré brousící práce na klikových hřídelích, popsaná v předchozí kapitole. Osa C představuje unášecí vřeteníky a osa X zajišťuje kývavý pohyb brousících vřeteníků.

Strojní osy C a X nejsou jediné pohybové osy, kterými stroj disponuje. Osa Z zajišťuje podélný pohyb vřeten a osa B jejich naklopení. Hrotová bruska je složena z lože, saní křížových, saní vodících, vřeteníků, vřeten brousících a vřeten unášecích, jejichž konfigurace je vidět na Obr. 20.



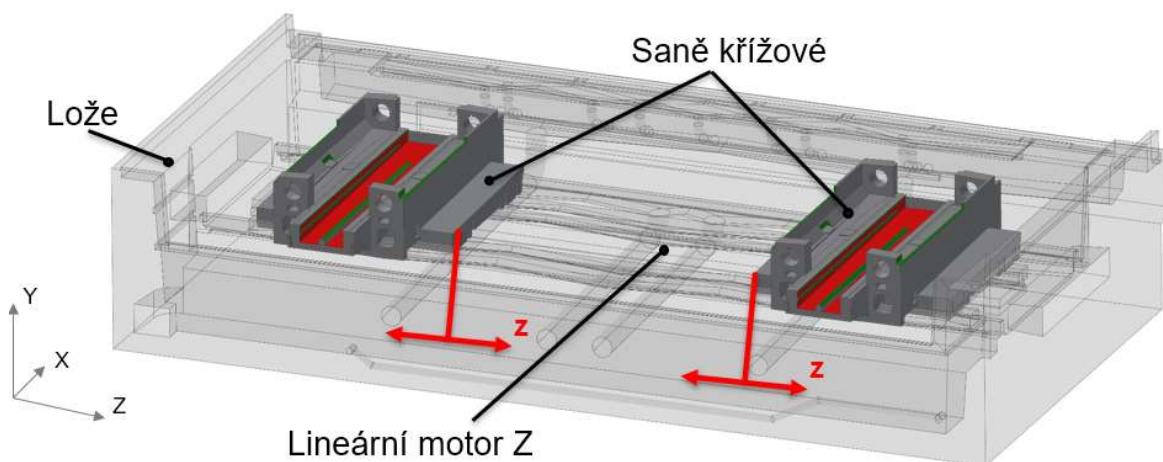
Obr. 20: Model hrotové brusky [30]

6.1 Osa Z

Osou Z je během obráběcího procesu vykonáván pohyb saní křížových. Ty jsou na loži v páru a jejich pohyb, ať už se jedná o pohyb k sobě (do středu lože), nebo od sebe, je vykonáván vždy synchronně. Pokud se tedy posunou levé saně křížové o 200 mm do středu, posunou se taktéž i pravé saně křížové o 200 mm do středu lože. Na rozdíl od osy X není osa Z stále v pohybu. Dojde

k přesunu saní křížových a následně je na požadované pozici jednotka udržována v polohové vazbě.

Komponenty, ze kterých se osa Z skládá, jsou výše zmíněný pár saní křížových (tmavě šedivé) a lože (světle šedivé) (Obr. 21). Jejich pohyb je zprostředkováván pomocí lineárního motoru LMFA64, jehož sekundární díl je po celé délce lože stroje a dva primární díly jsou umístěny na saních křížových, a valivému vedení velikosti 60 mm.

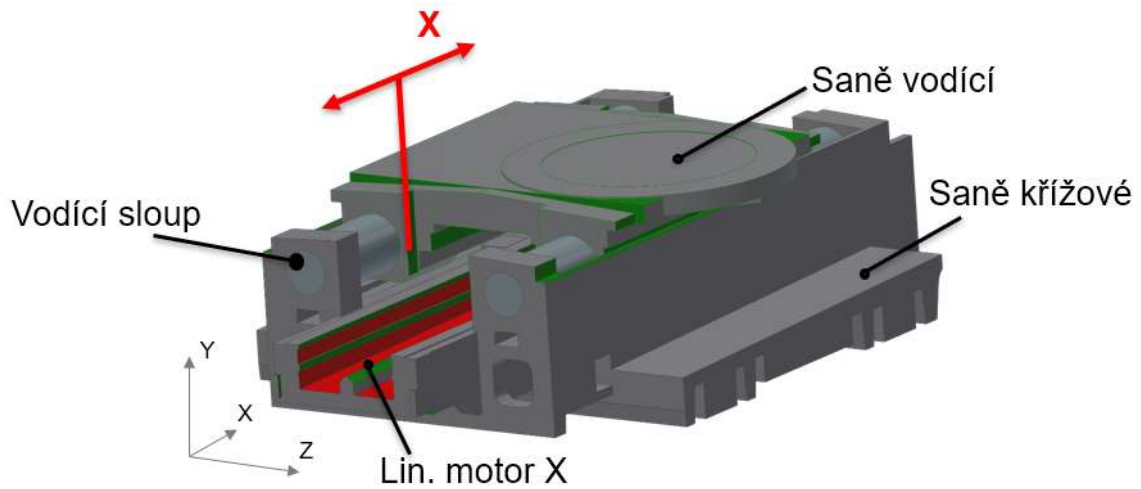


Obr. 21: Lože a saně křížové (osa Z)

6.2 Osa X

Osa X je nejčinnější osou stroje, jelikož slouží ke reciprokému pohybu brusného kotouče k obrobku a od obrobku.

Komponenty, ze kterých se pohybová osa X skládá, jsou již výše zmíněné saně křížové, saně vodící a vodící sloupy (Obr. 22). Saně křížové jsou po přemístění do požadované polohy na ose Z statické a jejich poloha se nemění. Do saní vodící jsou vsunuty vodící sloupy, které jsou následně v axiálním směru zajištěny přišroubováním víka na čelní stěnu saní křížových. Díky kluzným pouzdrům v saních vodících se saně mohou volně pohybovat po vodících sloupech.

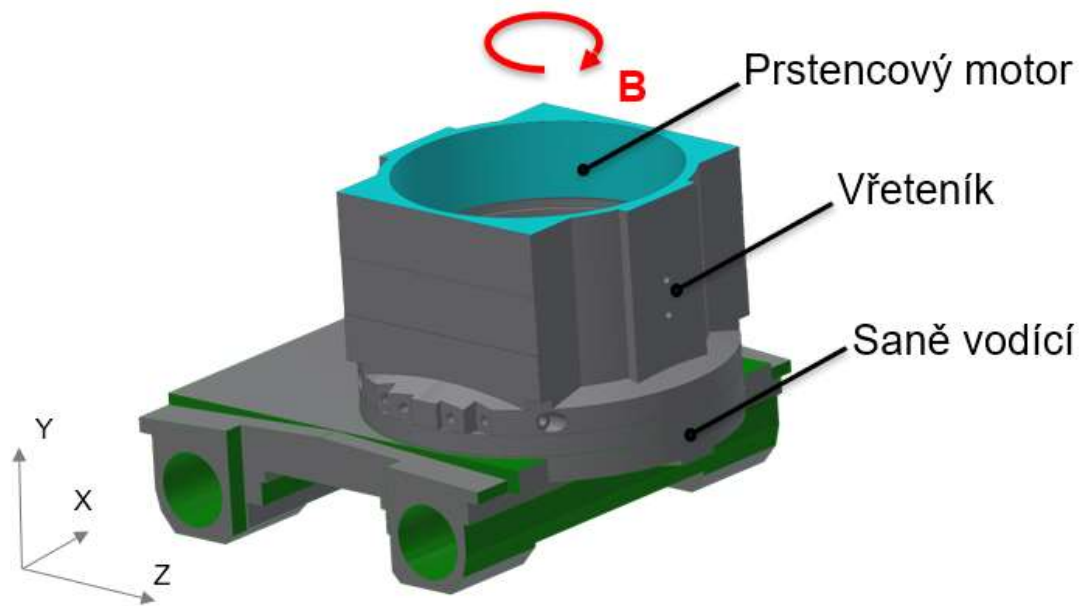


Obr. 22: Komponenty osy X

Podobně jako u osy Z zde slouží k pohybu lineární motor LMFA44, jehož sekundární díl je po celé délce červeně zbarvených ploch saní křížový a primární díl je připevněn na saních vodících.

6.3 Osa B

Osa brousicích vřeten je ve většině případů rovnoběžná s osou vřeten unášecích. Při některých aplikacích, například při broušení soudečků, může být požadovaný úhel jiný. Pro tento případ by byla použita osa B, kdy by došlo k natočení vřeteníku z Obr. 23. Vřeteník je po dosažení potřebného úhlu mechanicky zaaretován a není v polohové vazbě.

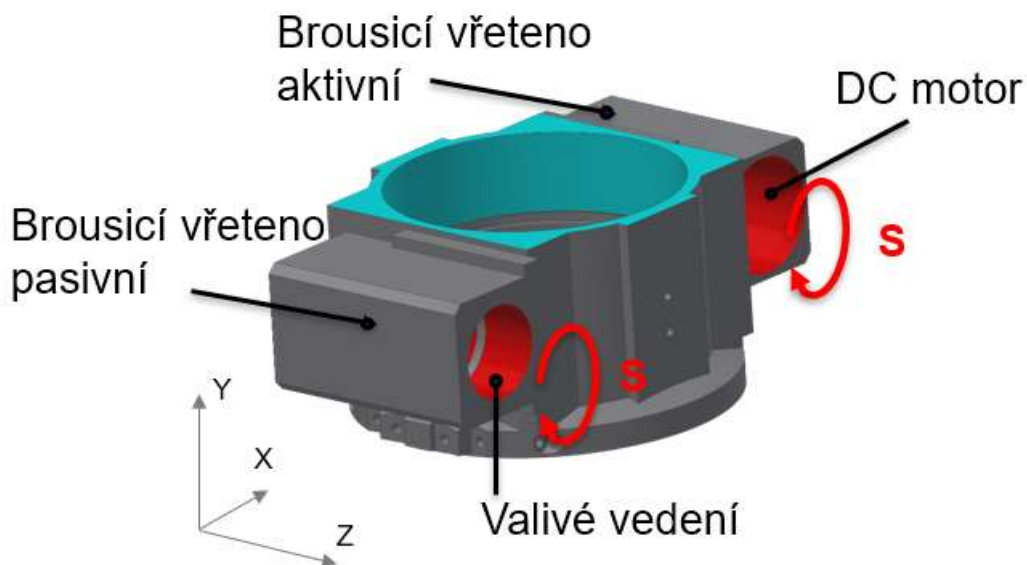


Obr. 23: Jednotky pohybové osy B

Pro pohyb osy B je použit prstencový motor TMB0450 – 70, který je vždy po dosažení polohy a mechanické aretaci vypnut. Plynulý rotační pohyb vřeteníku zajišťuje turcitová vrstva.

6.4 Popis brousicích vřeten (Osa S)

Na stroji jsou použity čtyři brousicí vřetena, která jsou u tohoto typu stroje rozmístěna vždy po páru na vřeteníku, viz Obr. 24 Vřeteno, které je blíže obrobku, je pracovním nazváno vřetenem aktivním, protože se aktivně podílí na broušení. Jeho otáčky se pohybují okolo $7500 \frac{ot}{min}$. Symetricky kolem osy B je vřeteno, které se na broušení nepodílí. Pokud by bylo toto vřeteno vypnuté, došlo by k nasáknutí brusného kotouče v jednom místě emulzí a v případě potřeby broušení tímto kotoučem by po jeho roztočení mohlo dojít k jeho roztržení. Z toho důvodu je během pracovního procesu vřeteno zapnuté, ale jeho rychlost se pohybuje pouze okolo $300 \frac{ot}{min}$.

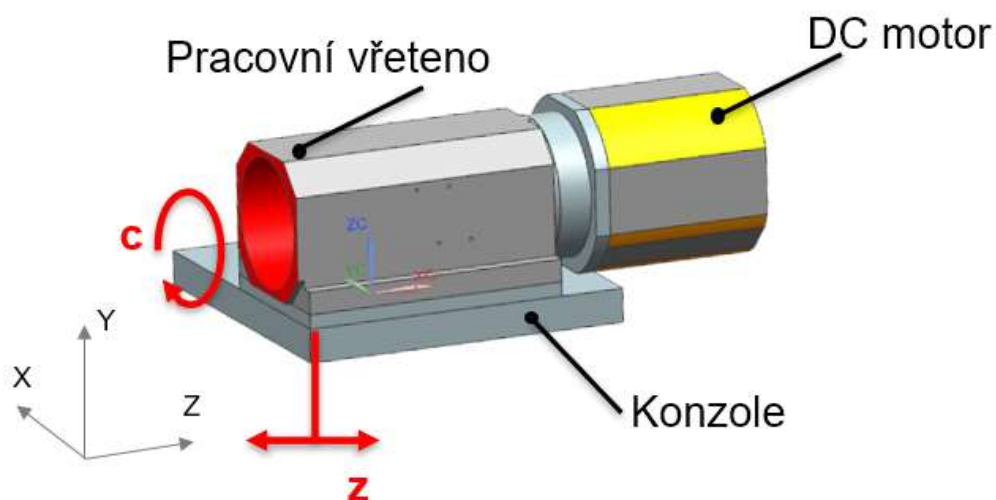


Obr. 24: Ukázka umístění brousicích vřeten

Konstrukce všech brousicích vřeten je stejná. Jako pohon je použit DC motor a k rotaci slouží dva páry kuličkových ložisek.

6.5 Osa C (stolová jednotka)

Stolová jednotka slouží k upínání obrobku. Upnutý obrobek v unášecích vřetenech se otáčí kolem své středové osy a vykonává tak společně s osou X řezný pohyb. Na Obr. 25 je zobrazena kompletní stolová jednotka, která se skládá z konzole, podložky mezi konzolí a unášecím vřetenem, unášecího vřetena a motoru.



Obr. 25: Stolová jednotka

Pro pohyb jsou na spodní stranu konzole připevněny čtyři domky valivého vedení. K pohybu stolové jednotky slouží pastorek s hřebenem. Hřeben je součástí stolové části lože. Jako pohon unášecího vřetene slouží DC motor, který není, jako je tomu například u brousicích vřeten, uvnitř vřeteníku. Pro rotaci hřídele slouží kuličková klec a axiální ložisko s kosoúhlým stykem. Otáčky unášecího vřeteníku se pohybují okolo $200 \frac{ot}{min}$.

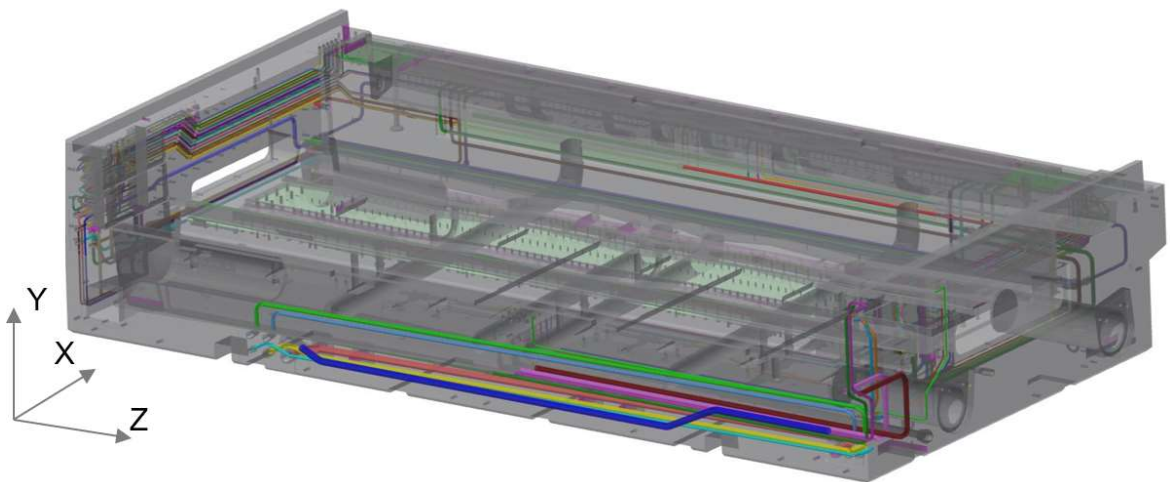
7 Model MKP

Řešen nebyl pouze jeden model, ale byly vytvořeny čtyři různé stavy okrajových podmínek. Tyto stavy pracovaly se stejnou geometrickou strukturou, měly stejné mechanické okrajové podmínky, ale lišily se v zadaných teplotních okrajových podmínkách.

Geometrie CAD modelu musela být nejprve podrobena sérii zjednodušovacích úprav. Následně mohla být importována do programu Ansys, kde proběhly veškeré další práce. Jednalo se o přiřazení materiálových charakteristik jednotlivým tělesům, vytvoření výpočtové sítě, namodelování jednotlivých vazeb a spojení komponent a konečně přiřazení jednotlivých okrajových podmínek pro teplotní a mechanickou úlohu.

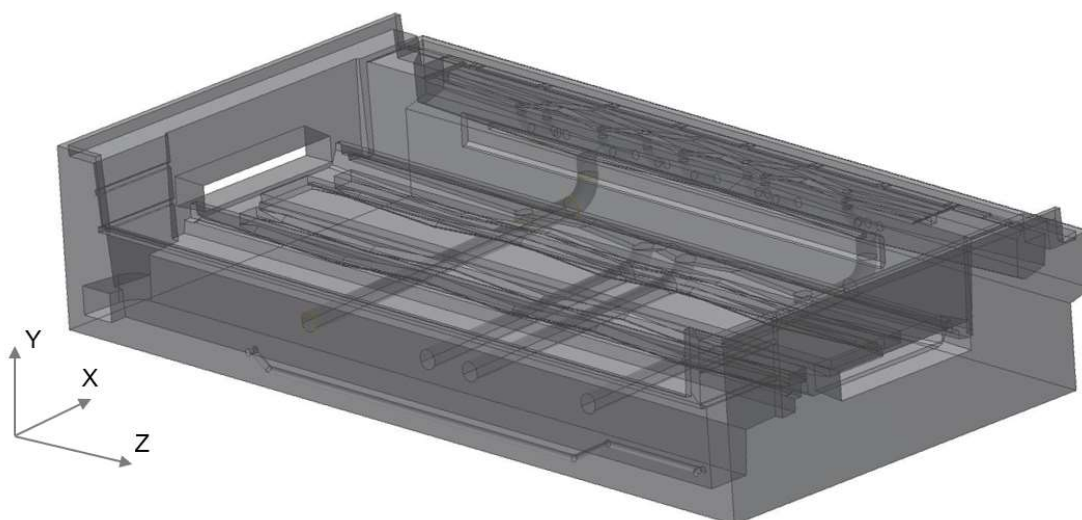
7.1 Zjednodušení CAD modelu

Jednou z prvních úloh bylo zjednodušení modelu poskytnutého firmou, viz Obr. 26. Jedná se o odstranění různých malých detailů, kterými jsou například, zaoblení, díry, a další prvky. Tato úloha byla prováděna v programu NX 12.0 od firmy Siemens.



Obr. 26: Model protékaného lože před zjednodušením [30]

Následně byl model upravován v prostředí SpaceClaim a DesignModeler programu ANSYS, kde došlo k přípravě jednotlivých ploch pro náhrady lineárních vozíků a nastavení teplotních i mechanických okrajových podmínek, čímž vznikl upravený model z Obr. 27.



Obr. 27: Model protékaného lože po zjednodušení

7.2 Materiálové charakteristiky

V modelu jsou použity pouze dva materiály. Lože stroje je vyrobenou z polymerbetonu a pro všechny ostatní části stroje jako jsou saně křížové, saně vodící, vřeteník a vřetena byla pro výpočet zvolena ocel 12 050 (ČSN 41 2050).

7.2.1 Polymerbeton

Prvním materiálem, ze kterého je vyrobeno lože stroje, je polymerbeton, jehož materiálová data byla poskytnuta firmou, která je přímým dodavatelem pro zadavatele. Hodnoty, které byly z materiálového listu pro výpočet použity jsou hustota, modul pružnosti, Poissonovo číslo, součinitel teplotní roztažnosti a součinitel teplotní vodivosti λ z Obr. 28.

Density	ca. 2,3 – 2,38 g/cm ³
Elastic Modul	30 – 40 KN / mm ²
Compressive strength	130 – 150 N / mm ²
Tensile strength	10 – 12 N / mm ²
Bending strength	33 – 39 N / mm ²
Number of cross-contraction μ	0,35
Thermal expansion coefficient	0,016 – 0,017 mm / m
Heat resistance	ca. 85 °C
Thermal conductivity λ_0	ca. 2,1 – 1,9 W / (m.K)
Resistance	PH 4 – PH 14
Damping rate	0,06
Colour	basalt gray

Obr. 28: Materiálový list polymerbetonu [30]

7.2.2 Ocel

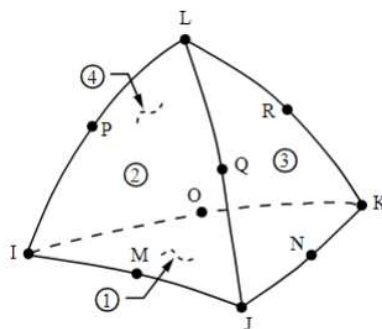
Druhým použitým materiálem je ocel 12 050, jejíž hodnoty byly vybírány z knihovny programu Ansys, jejíž hodnoty jsou vidět na Obr. 29, kterým je výstřížek knihovny v ANSYSu.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa
Isotropic Thermal Conductivity	60,5	W m ⁻¹ ...

Obr. 29: Materiálové hodnoty pro ocel z knihovny Ansys

7.3 Výpočtová síť

Pro výpočtovou síť byl volen pouze jeden druh prvků, kterým je SOLID187. Jedná se čtyřstěny, tedy o objemové prvky, s 10 uzly, které jsou vidět na Obr. 30. Každý uzel má tři stupně volnosti (posuv v ose x, y a z).



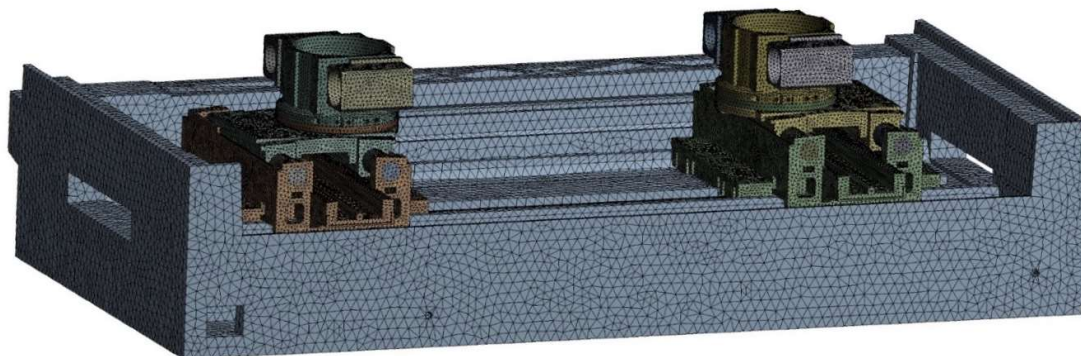
Obr. 30: Použitý prvek SOLID187 [4]

Velikost použitých prvků se na jednotlivých tělesech liší. Na tělesa s větší plochou, jako je například lože nebo saně křížové a saně vodící, je vytvořena síť hrubší. Na dalších tělesech je pak použita síť jemnější. Velikosti prvků použitých na jednotlivých tělesech jsou zaznamenány v Tabulka 7.1. Nejmenší rozměr a jemnost sítě byly voleny tak, aby byl výpočet směrodatný a zároveň nebyl počítač zahlcený příliš velkou sítí. Počet uzlů sítě je cca. 1,2 mil.

Tabulka 7.1: Velikosti hran prvků sítě jednotlivých těles

Těleso	Velikost hrany prvků [m]
Lože	0,05
Saně křížové	0,03
Saně vodící	0,03
Vodící tyče	0,03
Vřeteník	0,03
Vřetena	0,03
Konzole stolové jednotky	0,03
Kolejnice (saně křížové)	0,03
Kolejnice (Stolová jednotka)	0,02

Na Obr. 31 je zobrazena síť pro analýzu výpočtového modelu, kde je vidět rozdílná hustota sítě



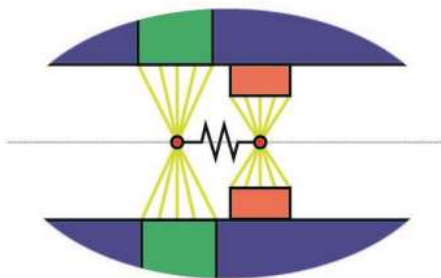
Obr. 31: Síť výpočtového modelu

7.4 Modelování vazeb a spojů

Dále je po importu modelu stroje na plochách, které se vzájemně dotýkají, defaultně definovaný pevný typ spoje BONDED. Spojení zajišťují vazbové rovnice. Pro úplnost modelu musela být provedena náhrada valivých vedení vazbou BUSHING.

7.4.1 Pohyblivé spoje lineární

Pro pohyblivé spoje lineární s používá typ kontaktu BUSHING. Jedná se o druh kontaktu používaný v Ansys Workbench, který je popsán maticí 12x12. Tento kontakt spojuje plochy lineárních vozíků a kolejnic pomocí vazbových rovnic (na Obr. 32 žlutou barvou). Ty svazují zmíněné plochy s řídicím bodem (červené bod).



Obr. 32: Vazba typu BUSHING [25]

Pro naznačení pohybu lineárních vozíků ve směru osy X, musí být hodnota ΔX rovna nule, viz Tabulka 7.2.

Tabulka 7.2: Matice tuhosti lineárního vozíku velikosti 30

Stiffness	Per Unit X [m]	Per Unit Y [m]	Per Unit Z [m]	Per Unit θ_x [°]	Per Unit θ_y [°]	Per Unit θ_z [°]
Δ Force X [N]	0					
Δ Force Y [N]	0	1,14e9				
Δ Force Z [N]	0	0	1,25e9			
Δ Moment X [N·m]	0	2,74e7	0	17802		
Δ Moment Y [N·m]	0	0	0	0	38572	
Δ Moment Z [N·m]	0	0	0	0	0	35256

7.4.2 Teplotní odpor vozíků lineárního vedení

Vodivost tepelného kontaktu je v teplotní úloze defaultně nastavený jako dokonalý, což neodpovídá realitě. Z toho důvodu je nutné zahrnutí tepelného odporu sestavy vozíku a kolejnice. Pro různé velikosti a typy vedení jsou uvažovány jiné hodnoty odporu, viz Obr. 33

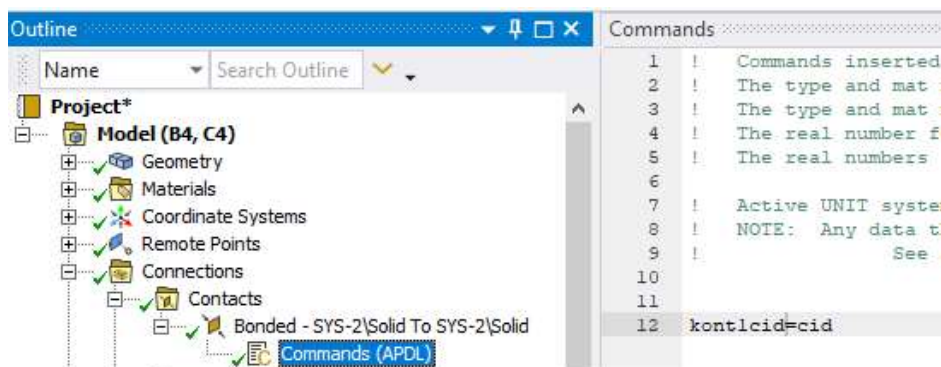
Guideway	Preload	R_T $\left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}\right]$	R_T^* $\left[\frac{^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}\right]$
BMW35	V1	0.89	$1.95 \cdot 10^{-3}$
	V3	0.79	$1.77 \cdot 10^{-3}$
MRW35	V1	0.6	$2.23 \cdot 10^{-3}$
	V3	0.59	$2.10 \cdot 10^{-3}$
MRW45	V3	0.62	$3.22 \cdot 10^{-3}$
MRW55	V3	0.57	$4.58 \cdot 10^{-3}$
MRW65	V3	0.52	$5.17 \cdot 10^{-3}$

Obr. 33: Hodnoty teplotních odporů v závislosti na typu lineárního vedení [31]

Pro definování tohoto typu kontaktu je nutné manuálně nastavit „Pinball radius“, jelikož se plochy přímo nedotýkají, ale nacházejí se v určité vzdálenosti.

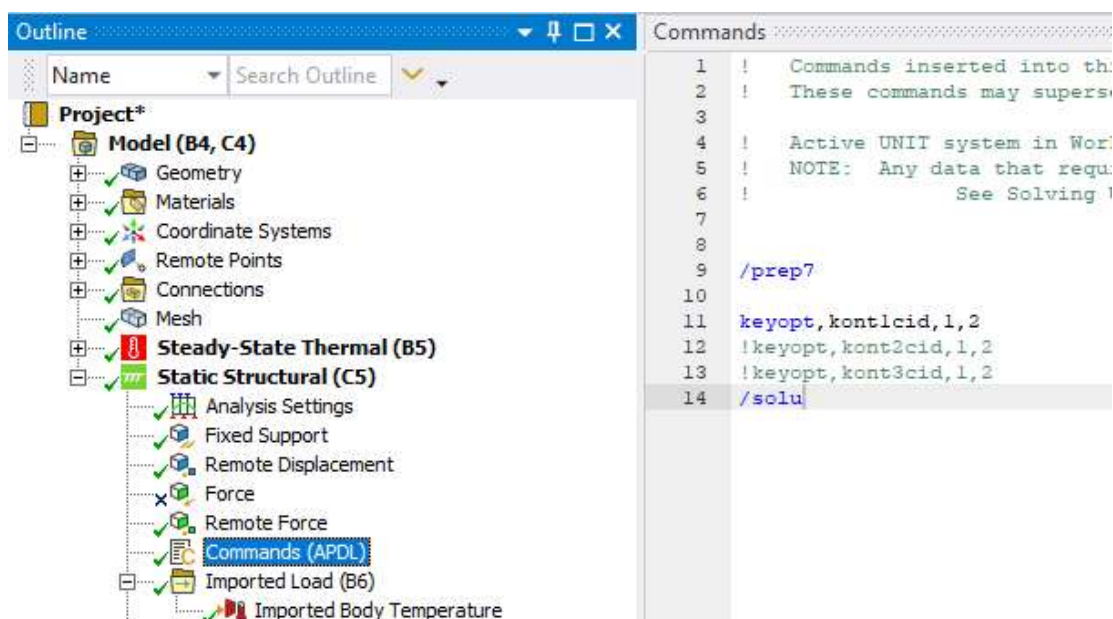
Dále je nutné zavedení commandu pro eliminaci kontaktu v mechanické úloze. To z toho důvodu, že takto definovaný teplotní kontakt definuje také vazbu mechanickou a odebírá všech šest stupňů volnosti. Toto by

neodpovídalo náhradě „bushing“, u který zůstává jeden stupeň volnosti ve směru posuvu lineárního vozíku. Command se zavádí na příslušném kontaktu, viz Obr. 34.



Obr. 34: Vytvořený command na daném kontaktu

Následně je potřeba vytvoření commandu ve Static Structural (Obr. 35), který definuje, že bude mít daný kontakt pouze teplotní stupeň volnosti a mechanická úloha ho nebude uvažovat.



Obr. 35: Vytvoření commandu ve Static Structural

7.5 Mechanické okrajové podmínky

Mechanickými okrajovými podmínkami jsou míněny náhrady komponent stroje. V modelu jsou použity náhrady uložení a použití remote pointů pro výpočet vzájemných poloh středu aktivního broušícího kotouče a unášecího vřetene.

7.5.1 Náhrady uložení

Model stroje je uložen na 19 patkách, které jsou v modelu nahrazeny vazbou typu BUSHING. V nastavení vazby byla zvolena varianta „body-ground“, čímž je docíleno spojení vybraných ploch pro patky s virtuální tuhou základnou, na které je model postaven. Na rozdíl od použití pro lineární vozíky je zde vynulovaný člen pro rotaci kolem osy Z, jak je vidět z Tabulka 7.3.

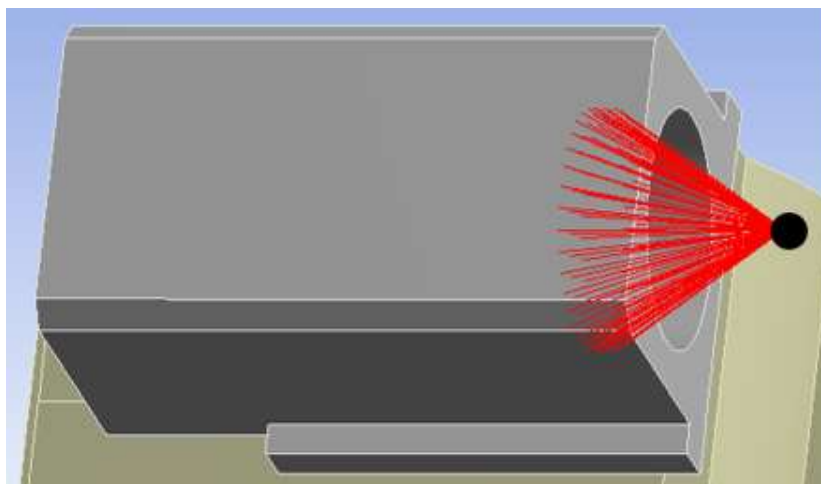
Tabulka 7.3: Matice tuhosti patky

Stiffness	Per Unit X [m]	Per Unit Y [m]	Per Unit Z [m]	Per Unit θ_x [°]	Per Unit θ_y [°]	Per Unit θ_z [°]
Δ Force X [N]	3e8					
Δ Force Y [N]	0	2,1e8				
Δ Force Z [N]	0	0	3,1e9			
Δ Moment X [N·m]	0	2,74e7	0	24435		
Δ Moment Y [N·m]	0	0	0	0	24435	
Δ Moment Z [N·m]	0	0	0	0	0	0

7.5.2 Výpočet vzájemných poloh broušícího a unášecího vřetene

Aby mohlo dojít k odečtení deformace středu broušícího i unášecího vřetene, musely být vytvořeny remote pointy, ze kterých se odečítalo vychýlení vůči jejich nulové poloze. Remote pointy vytváří bod v prostoru (ve středu rotace vřetene) vázaný k vybrané ploše.

Bylo vytvořeno šest remote pointů. Čtyři pro broušící vřetena, jejichž pozice byla určena středem broušícího kotouče. Remote point tedy leží v ose rotace vřetene, 120,5 mm od čela broušícího vřetene (na Obr. 36 znázorněn jako černé kolečko).



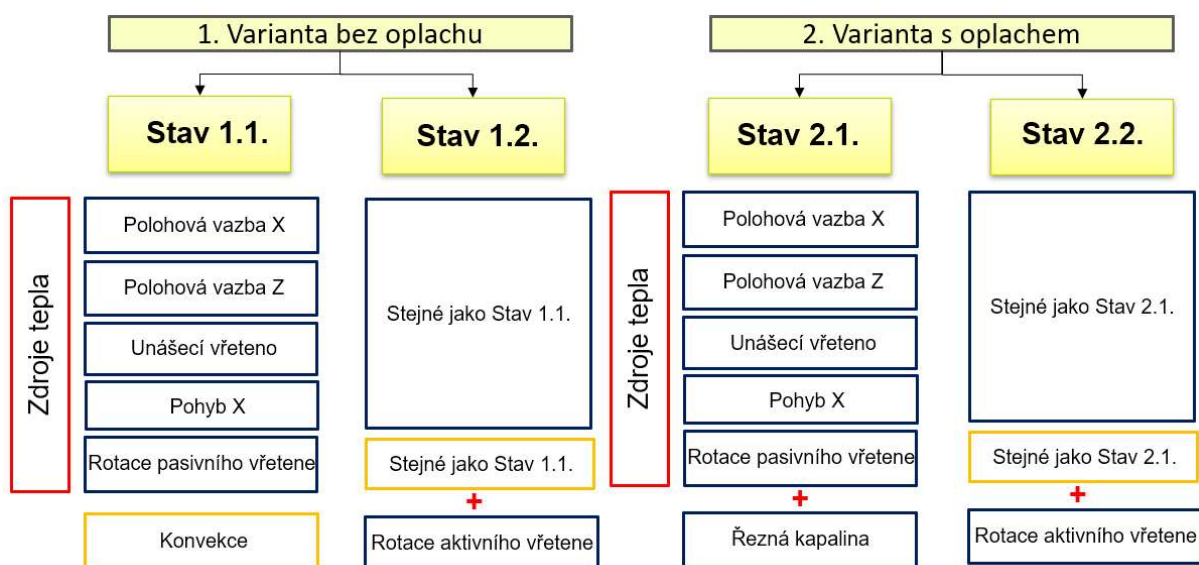
Obr. 36: Brousící vřeteno s vyznačeným remote pointem

Další dva remote pointy jsou vytvořeny na čelech unášecích vřeten ve středu rotace.

7.6 Teplotní OP a varianty teplotního zatížení stroje

V modelu byly použity tři druhy teplotních OP, a to konkrétně OP teploty, tepelného toku a volné konvekce. Na základě výpočtů z nadcházejících kapitol bylo určeno, jaké OP budou zadány na konkrétní plochy modelu.

Dále jsou v této kapitole OP rozděleny do čtyř stavů, viz Obr. 37, kde jsou základní dvě varianty rozděleny na variantu bez uvažování oplachu aktivních vřeten a působení řezné kapaliny a s uvažováním těchto OP.



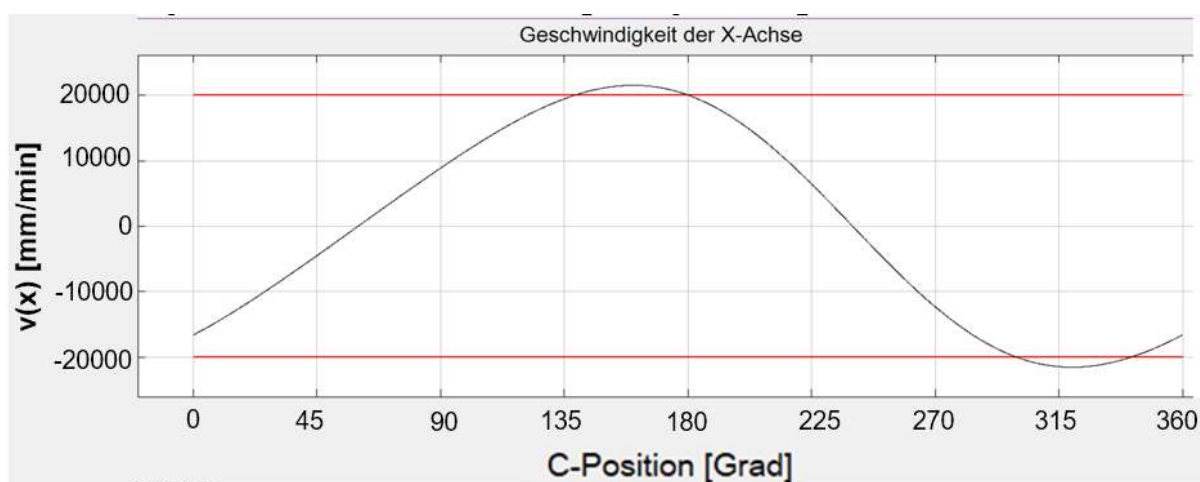
Obr. 37: Rozdělení teplotních okrajových podmínek

7.6.1 Určení ztrátového tepla osy Z pro stanovení OP

Během broušícího cyklu nevykonává žádný pohyb a je v polohové vazbě, která nevyžaduje velký elektrický příkon. Jak již bylo zmíněno, motor je chlazený a veškeré vznikající teplo je chlazením odvedeno. Z toho důvodu je na plochu primárního dílu lineárního motoru zadána pouze OP teploty 27 °C.

7.6.2 Výpočet ztrátového tepla osy X pro stanovení OP

Veškeré kontrolní výpočty ztrátového tepla komponent osy X vycházejí z grafu na obrázku. Na tomto grafu je zobrazena závislost rychlosti osy x v závislosti na natočení osy C při broušícím cyklu (Obr. 38).



Obr. 38: Závislost rychlosti osy X na natočení osy C [30]

Prvním provedeným výpočtem bylo stanovení tepelného toku v místech pouzdra vodících tyčí. Důležitou hodnotou pro výpočet je střední rychlost osy X při broušícím cyklu. Protože je závislost výše podobná funkci sinus, může se vypočítat efektivní rychlost přibližně podle vzorce 7.1.

$$v_{ef} = \sim 0,7 \cdot v_{max} \quad (7.1)$$

Z grafu na Obr. 38 byla odečtena hodnota pro v_{max} , která se použila pro výpočet efektivní rychlosti, viz. 7.2.

$$v_{ef} = 14 \frac{m}{min} = 0,233 \frac{m}{s} \quad (7.2)$$

Efektivní hodnota rychlosti byla následně použita do vzorce 7.3 pro výpočet tepelného toku, který byl pře násoben třecí silou vodícího pouzdra, která činí 100N pro jedno pouzdro.

$$\dot{Q}_{tyč} = F_{tř} \cdot v_{ef} = 200 \text{ N} \cdot 0,233 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 46,67 \text{ W} \quad (7.3)$$

Výsledná hodnota tepelného toku produkovaného jedním pouzdem je tedy 23,33 W.

Dalším výpočtem pro pohybovou osu X byl výpočet ztrátového tepla lineárního motoru LMFA 44. Hodnoty použité pro tento výpočet byly vyčteny z katalogu dodaného firmou a jsou uvedeny v Tabulka 7.4.

Tabulka 7.4: Hodnoty lineárního motoru LMFA 44

Ustálená síla	F_s	4000 N
Ustálený proud	I_s	23,1 A
Napětí sběrnice	U_b	560 V
Max. rychlost při ustáleném pohybu	v_s	$3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Max. odevzdané teplo	$Q_{p,h,max}$	1538 W

Z těchto hodnot byly jako první vypočítány elektrické a mechanické výkony (7.4 a 7.5) pro ustálený pohyb, jejichž rozdílem je ztrátové teplo (7.6) produkované při ustáleném pohybu. Poměrem k vykonávané mechanické práci se získá součinitel vzniku ztrátového tepla z mechanického výkonu (7.7).

$$P_{mech} = F_s \cdot v_s = 12000 \text{ W} \quad (7.4)$$

$$P_{el} = U_b \cdot I_s = 12936 \text{ W} \quad (7.5)$$

$$\dot{Q}_z = P_{el} - P_{mech} = 936 \text{ W} \quad (7.6)$$

$$K_{Q_{mech}} = \frac{\dot{Q}}{P_{mech}} = 0,078 \quad (7.7)$$

Následně byla použita charakteristika zrychlení dodaná firmou, ze které byla odečtena podobným způsobem efektivní hodnota zrychlení $a_{ef} \doteq 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Ta byla použita pro výpočet efektivní síly (7.8), ze které mohl být dopočten skutečný mechanický výkon (7.9) vykonávaný motorem během broušícího cyklu. Pro výpočet skutečné hodnoty tepelného toku (7.10) byl skutečný mechanický výkon pře násoben konstantou $K_{Q_{mech}}$.

$$F_{ef} = a_{ef} \cdot m_{osaX} = 1 \cdot 3440 \text{ kg} = 3440 \text{ N} \quad (7.8)$$

$$P_{mech_{sk}} = F_{ef} \cdot v_{ef} = 3440 \cdot 0,233 = 801,52 \text{ W} \quad (7.9)$$

$$\dot{Q}_{sk} = K_{Q_{mech}} \cdot P_{mech_{sk}} = 62,52 \text{ W} \quad (7.10)$$

Byla vypočtena skutečná hodnota tepelného toku, která je vyprodukována motorem. Jelikož je ale motor chlazený a v katalogu byla uvedena maximální hodnota odevzdaného tepla, kterou dokáže chlazení odvést, bylo provedeno porovnání (7.11), ze kterého je možné s jistotou říct, že vyprodukované ztrátové teplo motoru je odvedeno chlazením motoru. Okrajová podmínka v tomto případě bude představovat teplotu chladiva.

$$\dot{Q}_{phmax} \gg \dot{Q}_{sk} \quad (7.11)$$

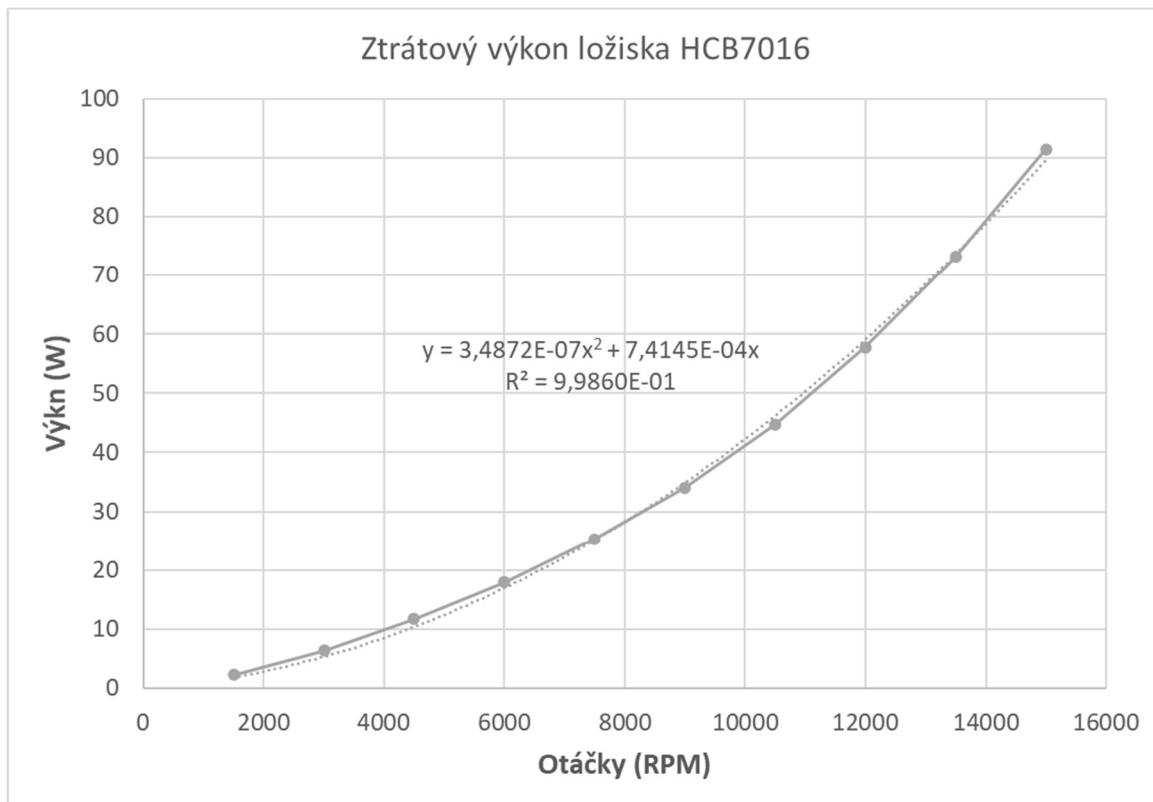
7.6.3 Výpočet ztrátového tepla osy B pro stanovení OP

Jelikož k natočení vřeteníku nedochází během uvažovaného broušícího cyklu a vřeteník je po natočení mechanicky zaaretován a není v polohové vazbě, není uvažováno, že by během cyklu motorem protýkal proud, a tudíž v této ose vznikalo ztrátové teplo. Pro osu B je z toho důvodu uvažována podmínka teplotní 25 °C, která simuluje konstantní teplotu chladicí kapaliny protékající vřeteníkem.

7.6.4 Stanovení ztrátového tepla broušících vřeten pro stanovení OP

Kontrolním výpočtem ztrátového tepla ložisek se tato práce nezabývala, jelikož by toto téma mohlo vydat na další diplomovou práci. Z toho důvodu bylo požádáno o poskytnutí hodnot RCMT. Hodnoty, které ve své práci používám, vychází z teplotně – mechanického modelu ložiska, který využívá model ztrát v ložisku podle Houperta. Pro výpočet modelu podle Houperta se využívá modelu kuličkového ložiska s kosoúhlým stykem, pracujícím

s předpětím, otáčkami a geometrií ložiska. Graf na Obr. 39 je výstupem po vypočtení modelem Houpert. [32]



Obr. 39: Graf závislosti ztrátového výkonu ložiska na otáčkách [33]

Dále je ve vřetení použit DC motor. Dle poskytnutých materiálů firmou je motor uchlazěn chladicí emulzí. Která má po výstupu z motoru hodnotu 27 °C. Z toho důvodu je na ploše DC motoru zavedena OP teploty 27 °C.

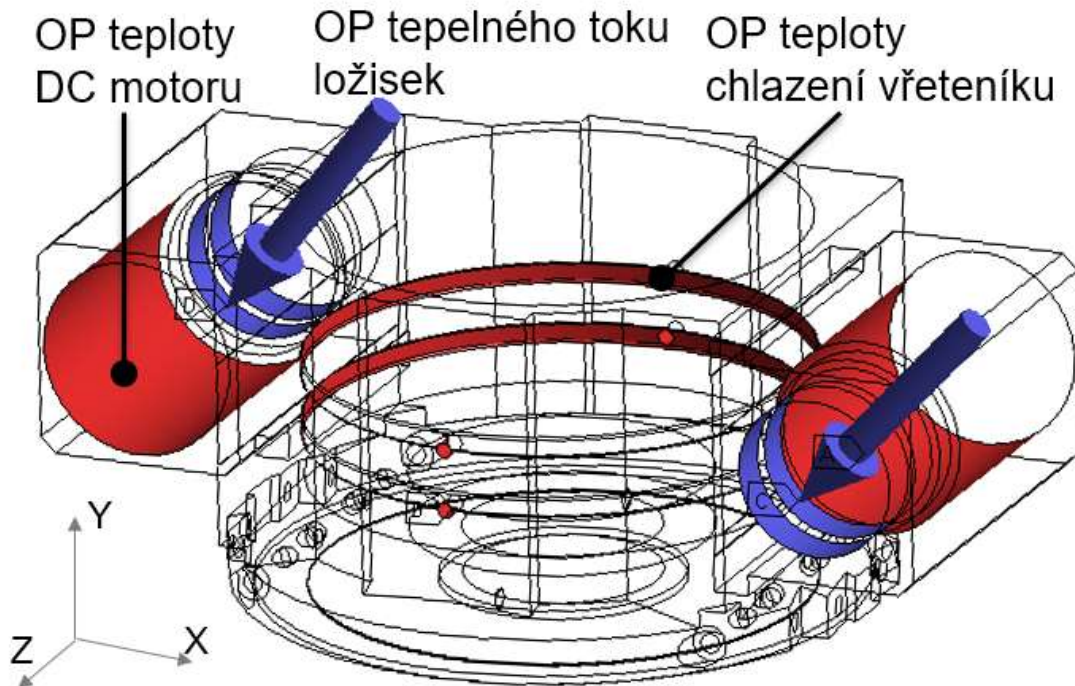
7.6.5 Výpočet ztrátového tepla osy C (stolové jednotky) pro stanovení OP

Z grafu uvedeného v předchozí kapitole je patrné, že s klesajícími otáčkami klesá i ztrátový výkon ložisek. Pro hodnotu otáček unášecího vřetene $200 \frac{ot}{min}$ je hodnota ztrátového výkonu ložisek minimální (pohybuje se v desetinách) a z toho důvodu je možné tento tepelný tok zanedbat.

Stejně jako u brousicích vřeten je u unášecího vřetene použit DC motor, který je uchlazěn, a tudíž je na jeho plochu dána OP teploty 27 °C.

7.6.6 Stav 1.1.

Základním stavem je stav 1.1., ze kterého následně vychází další stavy. Zadané okrajové podmínky se rozdělují do třech druhů.



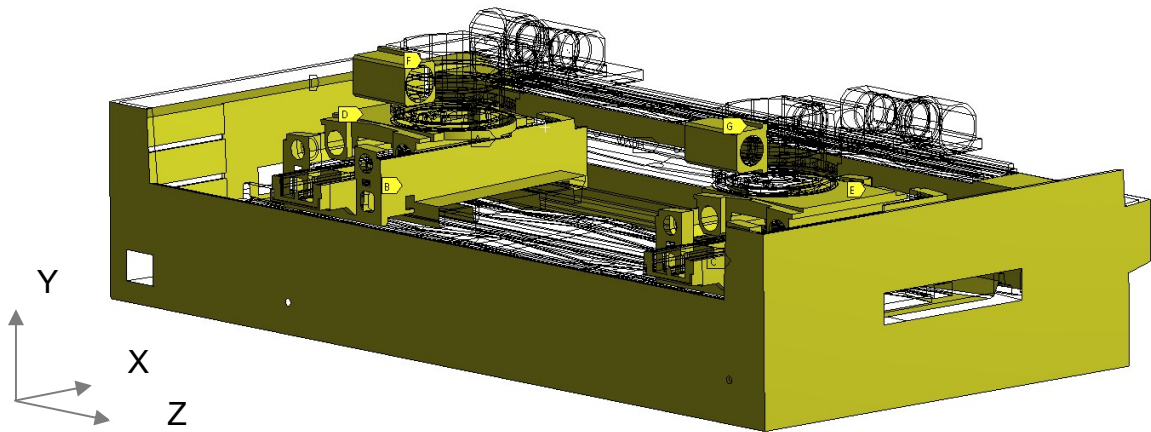
Obr. 40: Okrajové podmínky teploty

Prvním druhem je okrajová podmínka teploty, která je na Obr. 37 v červeném rámečku a na Obr. 40 jsou červeně zvýrazněné plochy, na které jsou podmínky použity. Řadí se sem okrajové podmínky pro lineární motory pohybových os X, Y a C. Všechny tyto motory jsou chlazeny emulzí, která se chlazením ohřeje a na výstupu má teplotu 27 °C, z čehož následně vychází i tato podmínka. Osa B se během řezného procesu nepohybuje a je bržděná mechanicky, není v polohové vazbě. Chladicí kapalina osou B protéká bez jakéhokoli ohřevu motorem a její hodnota na výstupu je 25 °C, proto je pro osu B zadávaná teplotní podmínka 25 °C.

Druhým druhem okrajové podmínky je tepelný tok, na Obr. 37 v zeleném rámečku. Tato podmínka je zadávána v místech, kde působí třecí síly, které produkují teplo a tyto místa nejsou nijak chlazená, takže zde nelze předepsat pouze okrajová podmínka teploty. Podmínka tepelného toku je zadána v místě pouzder vodících tyčí, která je 23,33 W pro každé pouzdro vodící tyče.

Dále je uvažován tepelný tok na plochách vnějších kroužků ložisek pasivních brousicích vřeten, jejichž otáčky jsou stálé (cca $300 \frac{ot}{min}$), tudíž je hodnota 11 W.

Třetím druhem okrajové podmínky je konvekce ohraničená na Obr. 37 oranžovým rámečkem. Okrajová podmínka volné konvekce je zadána na plochách většiny těles s hodnotou $5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$. Tato hodnota se liší pouze na bočnicích lože, kde jsou hodnoty $1,78 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ a $2,36 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, jelikož je jejich plocha větší, jak je vidět na Obr. 41.



Obr. 41: Okrajové podmínky konvekce

Pro rekapitulaci všech použitých OP pro stav 1.1, byla vytvořena Tabulka 7.5.

Tabulka 7.5: Hodnoty OP stavu 1.1.

Komponenty	OP Teploty [°C]	OP Tepleného toku [W]	OP Volné konvekce [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]
Lin. motor Z	27		
Lin. motor X	27		
DC motor br. vřetena	27		
DC motor un. vřetene	27		
Osa B	25		
Patky	20		
Pouzdro tyče vodící		23,33	
Ložiska pas. br. vřetene		11	
Lože			5; 1,78; 2,36
Saně křížové			5
Saně vodící			5
Brousicí vřetena			5
Kryt motoru un. vřetene			5
Unášecí vřetena			5

7.6.7 Stav 1.2.

Ve stavu 1.2. jsou zahrnuty kromě okrajových podmínek ze stavu 1.1. i podmínky uvažující pohyb ložisek aktivního brousicího kotouče. Z toho důvodu okrajové podmínky teploty se nijak neliší od stavu 1 a to stejné platí i pro okrajové podmínky konvekce.

Rozdíl oproti stavu 1.1. je pouze v okrajových podmínkách tepelného toku. Stále jsou uvažovány podmínky kluzných pouzder a pasivních brusných kotoučů. Je ale přidána proměnná okrajová podmínka pro aktivní brousicí vřetena. Poloha náhrady brusného kotouče je počítána pro hodnoty ložisek při $2\,500 \frac{ot}{min}$, $5\,000 \frac{ot}{min}$, $7\,500 \frac{ot}{min}$, $8\,000 \frac{ot}{min}$ a $10\,000 \frac{ot}{min}$.

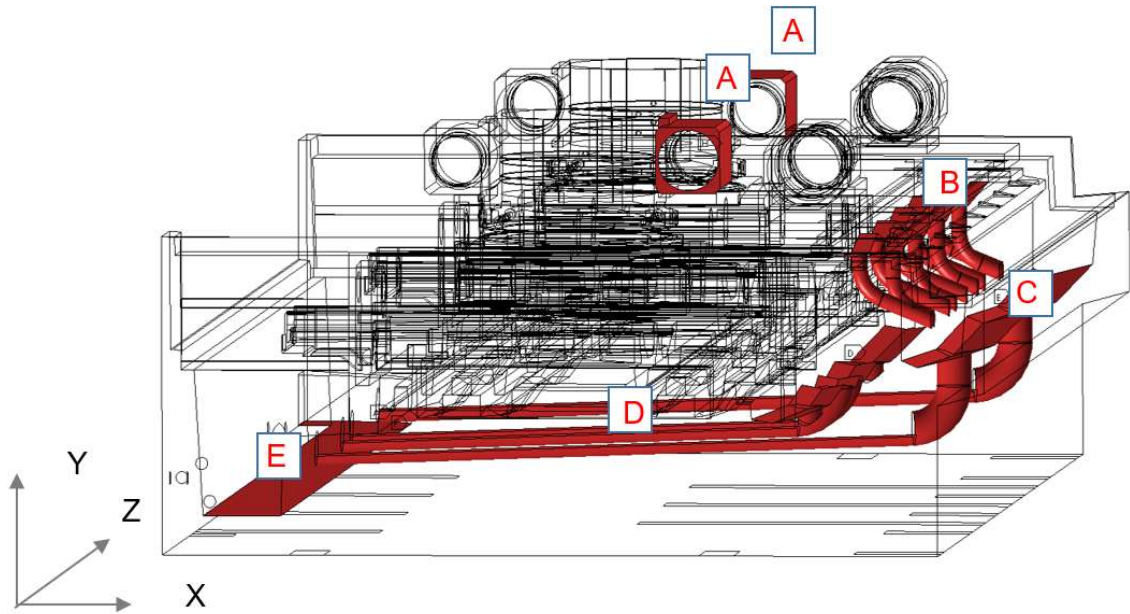
V Tabulka 7.6 je uveden přehled použitých OP pro stav 1.2.. Červenou barvou jsou označeny OP, které byly zavedeny až v tomto stavu.

Tabulka 7.6: Hodnoty OP stavu 1.2.

Komponenty	OP Teploty [°C]	OP Tepleného toku [W]	OP Volné konvekce [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]
Lin. motor Z	27		
Lin. motor X	27		
DC motor br. vřetena	27		
DC motor un. vřetene	27		
Osa B	25		
Patky	20		
Pouzdro tyče vodící		23,33	
Ložiska pas. br. vřetene		11	
Lože			5; 1,78; 2,36
Saně křížové			5
Saně vodící			5
Brousicí vřetena			5
Kryt motoru un. vřetene			5
Unášecí vřetena			5
Aktivní br. vř. 2500 $\frac{ot}{min}$		4	
Aktivní br. vř. 5000 $\frac{ot}{min}$		12,4	
Aktivní br. vř. 7500 $\frac{ot}{min}$		25,2	
Aktivní br. vř. 8000 $\frac{ot}{min}$		28,2	
Aktivní br. vř. 100 00 $\frac{ot}{min}$		42,3	

7.6.8 Stav 2.1.

Jak bylo výše zmíněno, stav 2.1. se od předchozích dvou stavů liší tím, že je pro stav 2.1. uvažováno působení rezné kapaliny, která protéká strojem, viz Obr. 42 a oplachu pláště aktivních vřeten.



Obr. 42 Místa působení řezné a chladící kapaliny

K okrajovým podmínkám teploty ze stavu 1.1. je na strukturu stroje doplněna teplota oplachu aktivních vřeten, která je na obrázku v místech písmena A a její hodnota je 25 °C. V místě bodu B je prvotní místo styku řezné kapaliny s ložem stroje. Proto je zde zaváděna okrajová podmínka s nejvyšší teplotou kapaliny (40 °C). Řezná kapalina je sváděna do vany s bodem C (38 °C), následně odváděna potrubím (bod D; 36,5 °C) do spodní vany (bod E), kde je teplota řezné kapaliny nejnižší (35 °C).

Hodnoty OP pro stav 2.1. jsou zapsány v Tabulka 7.7. Nově přidané OP jsou označeny červenou barvou.

Tabulka 7.7: Hodnoty OP stavu 2.1.

Komponenty	OP Teploty [°C]	OP Tepleného toku [W]	OP Volné konvekce [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]
Lin. motor Z	27		
Lin. motor X	27		
DC motor br. vřetena	27		
DC motor un. vřetene	27		
Osa B	25		
Patky	20		
Pouzdro tyče vodící		23,33	
Ložiska pas. br. vřetene		11	
Lože			5; 1,78; 2,36
Saně křížové			5
Saně vodící			5
Kryt motoru un. vřetene			5
Unášecí vřetena			5
Oplach akt. vřeten	25		
Stůl (vliv řezné kapaliny)	40		
Svodové potrubí ze stolu	38		
Svodové potrubí z vany	36,5		
Odpadní vana	35		

7.6.9 Stav 2.2.

Ve stavu 2.2. jsou uvažovány stejné okrajové podmínky teploty a konvekce jako ve stavu 2.1.. Zadané okrajové podmínky jsou rozdílné pouze pro tepelný tok.

Stejně jako ve stavu 1.2. jsou v tomto stavu zaváděny hodnoty tepelného toku pro různé otáčky aktivního brousícího vřetene v rozmezí od $2\,500 \frac{ot}{min}$ do $10\,000 \frac{ot}{min}$.

Kompletní výčet OP pro stav 2.2. je uveden v Tabulka 7.8, kde jsou jako u předchozích stavů nově přidané OP zapsány červenou barvou.

Tabulka 7.8: Hodnoty OP stavu 2.2.

Komponenty	OP Teploty [°C]	OP Tepleného toku [W]	OP Volné konvekce [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]
Lin. motor Z	27		
Lin. motor X	27		
DC motor br. vřetena	27		
DC motor un. vřetene	27		
Osa B	25		
Patky	20		
Pouzdro tyče vodící		23,33	
Ložiska pas. br. vřetene		11	
Lože			5; 1,78; 2,36
Saně křížové			5
Saně vodící			5
Kryt motoru un. vřetene			5
Unášecí vřetena			5
Oplach akt. vřeten	25		
Stůl (vliv řezné kapaliny)	40		
Svodové potrubí ze stolu	38		
Svodové potrubí z vany	36,5		
Odpadní vana	35		
Aktivní br. vř. 2500 $\frac{ot}{min}$		4	
Aktivní br. vř. 5000 $\frac{ot}{min}$		12,4	
Aktivní br. vř. 7500 $\frac{ot}{min}$		25,2	
Aktivní br. vř. 8000 $\frac{ot}{min}$		28,2	
Aktivní br. vř. 100 00 $\frac{ot}{min}$		42,3	

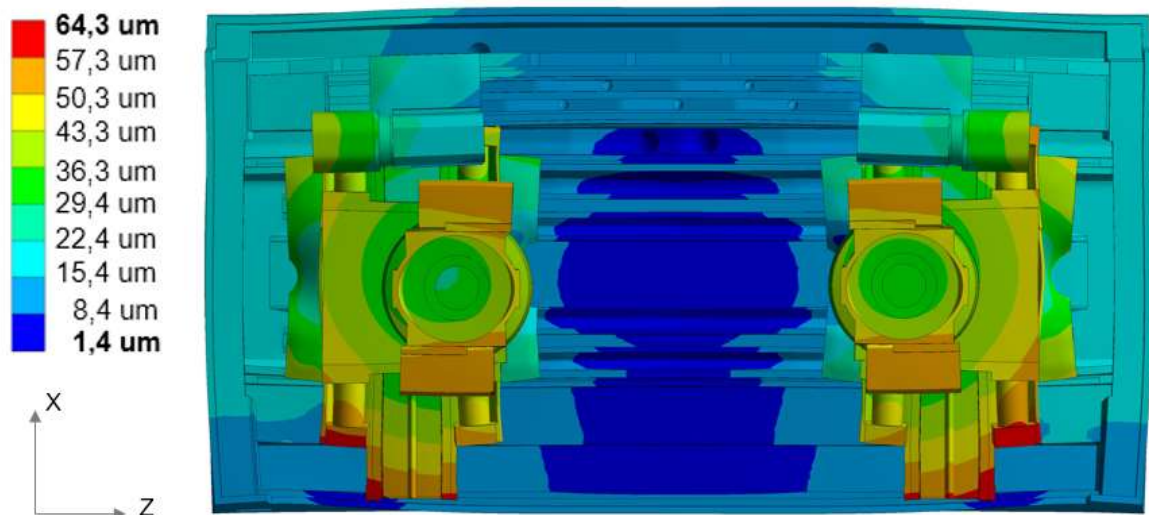
8 Výsledky základních úloh

V této kapitole budou interpretovány výsledky výpočtů, neboli vysvětlení významu výsledku a jejich dopad na stroj. Interpretace výsledků základních úloh je rozdělena do dvou dílčích podkapitol. První podkapitolou je varianta modelu uvažovaná bez oplachu. Sem se tedy řadí výpočtové modely s uvažováním OP ze stavu 1.1. a stavu 1.2.. Druhou podkapitolou je varianta modelu při uvažování oplachu, kde je pracováno s OP ze stavu 2.1. a stavu 2.2..

8.1 Varianta bez oplachu

Jak bylo výše uvedeno, v této podkapitole byly uvažovány OP ze stavu 1.1. a stavu 1.2..

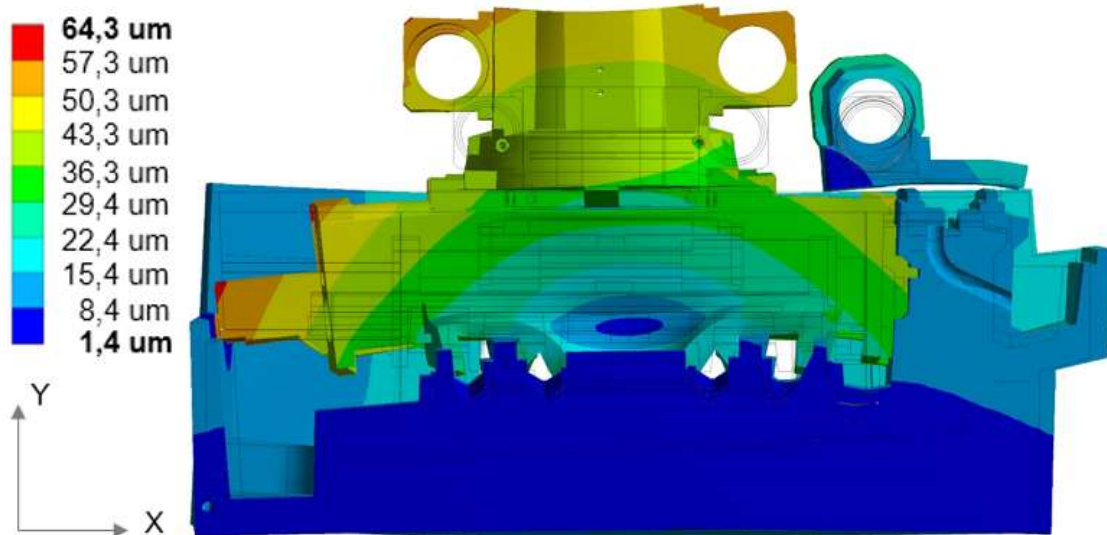
Při uvažování OP ze stavu 1.1. bylo zkoumáno chování stroje bez použití OP pro aktivní brousicí vřetena, aby bylo možné pozorovat, jaký mají OP ze stavu 1.1. (tedy při vypnutí aktivního brousicího vřetene) vliv na deformaci stroje.



Obr. 43: Pole posuvů stroje při OP ze stavu 1.1.

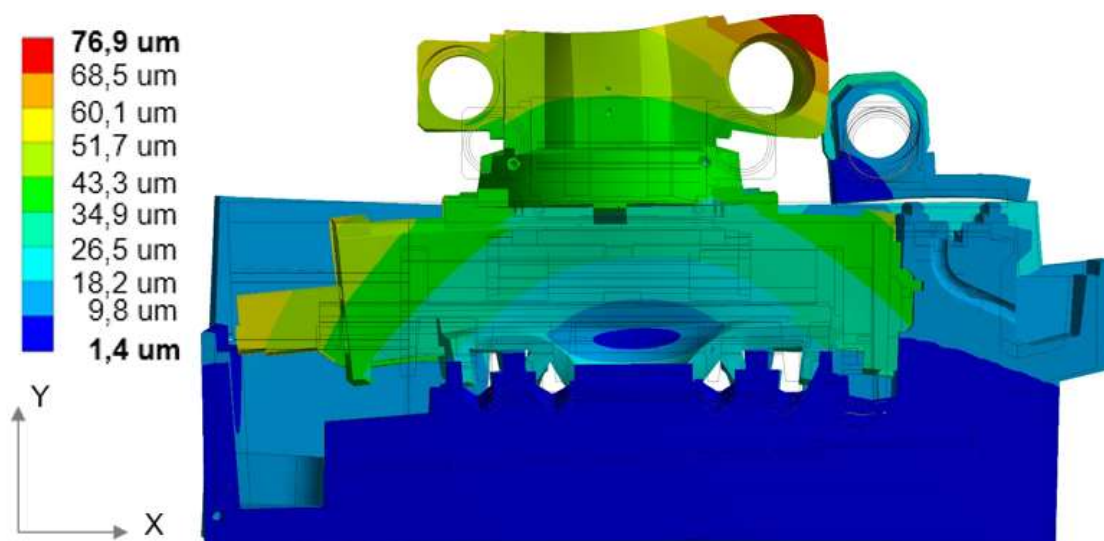
Na Obr. 43 je možné pozorovat symetrickou deformaci veškerých komponent stroje. Dále je vidět, že k největšímu celkovému posunutí dochází na koncích saní křížových. Díky symetrické deformaci komponent dochází k rozpínání vřeteníku a tím posunutí aktivního brousicího vřetene

blíže do řezu. Tento jev je lépe čitelný z řezu stroje z Obr. 44. Z řezu je dále patrné, že dochází k prohybání konzole nosoucí unášecí vřeteno a tím k jeho naklápění směrem do řezu. Toto posunutí není symetrické na obou unášecích vřetenech, čímž vzniká naklopení obrobku, jeho hodnota je $0,3 \frac{\mu m}{m}$.



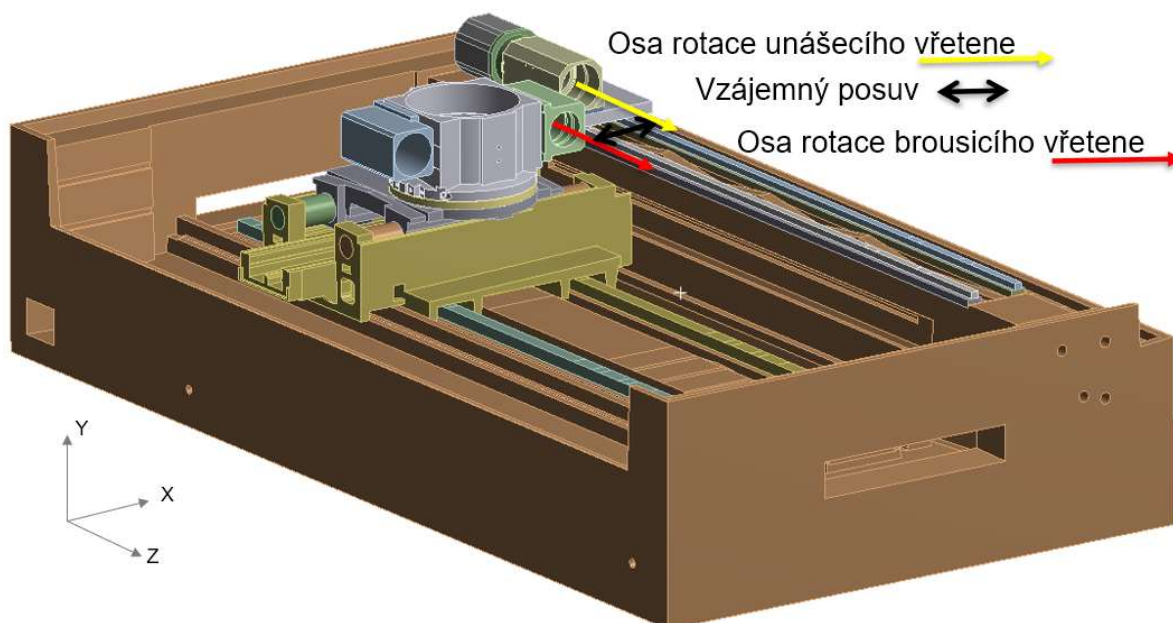
Obr. 44: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 1.1.

OP ze stavu 1.2. byly použity pro výpočet pěti různých ztrátových výkonů odpovídající konkrétním otáčkám aktivního brousicího vřetene. Na Obr. 45 je stejně jako na předešlém obrázku pole posuvů řezu stojanem. Na obrázku je ale zobrazeno pole posuvů pro $10\,000 \frac{ot}{min}$.



Obr. 45: Pole posuvů řezu stojanem při OP ze stavu 1.2. a $10000 \frac{ot}{min}$ aktivního broušícího vřetene

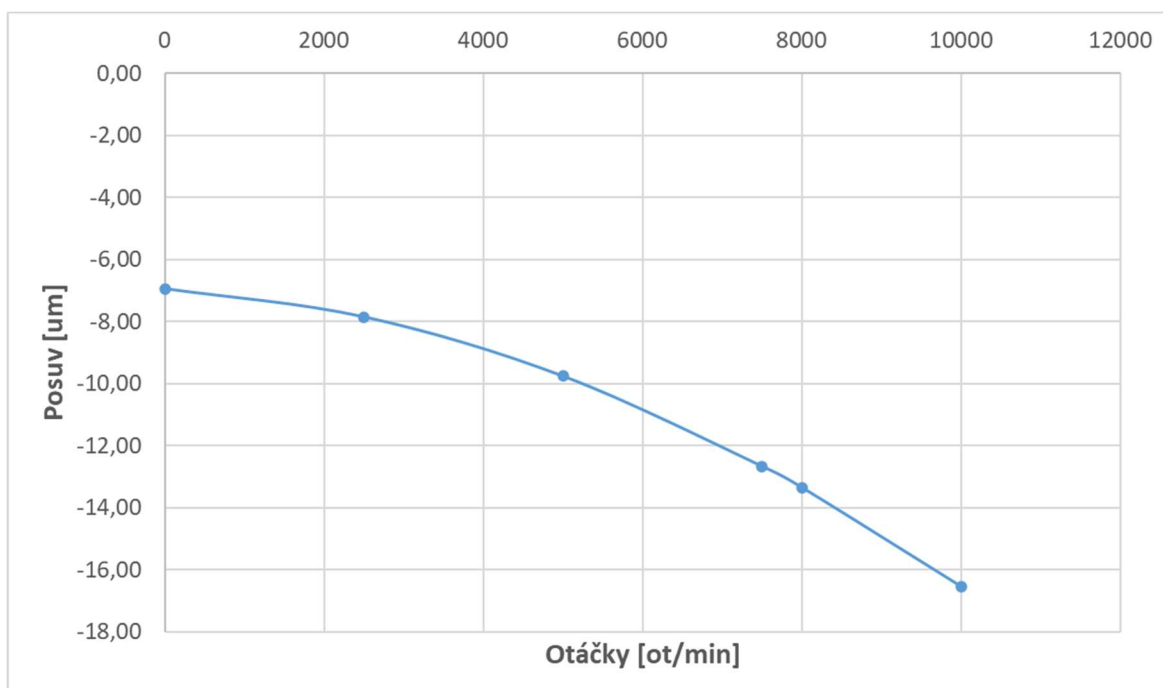
Při $10000 \frac{ot}{min}$ je z pole posuvů patrné, že na rozdíl od stavu 1.1. dochází k největšímu celkovému posunutí v horní části aktivního broušícího vřetene. Na obrázku je vidět, že dochází k posunutí středu broušícího kotouče po ose X směrem do řezu. Dále je patrný posuv v ose Y směrem od řezu.



Obr. 46: Měřené vzájemné posunutí os vřeten

Na Obr. 44 a Obr. 45 bylo zobrazeno pole posuvů pouze pro dvě krajní hodnoty otáček a to, když jsou otáčky nulové nebo maximální. Jak bylo výše

zmíněno, byla počítána i pole posuvů pro jiné otáčky, a to konkrétně pro $2\,500 \frac{ot}{min}$, $5\,000 \frac{ot}{min}$, $7\,500 \frac{ot}{min}$ a $8\,000 \frac{ot}{min}$. Pro tyto otáčky byly zapsány hodnoty deformací náhrad středů brusných kotoučů v aktivních brousicích vřetenech a náhrad středů uchycení obrobku v unášecích vřetenech. Tyto hodnoty od sebe byly pro jednotlivé osy odečteny, čímž byly získány vzájemné posuvy těchto bodů (Obr. 46). Vzájemné posuvy pro osu X byly vyneseny do grafu, který je na Obr. 47.



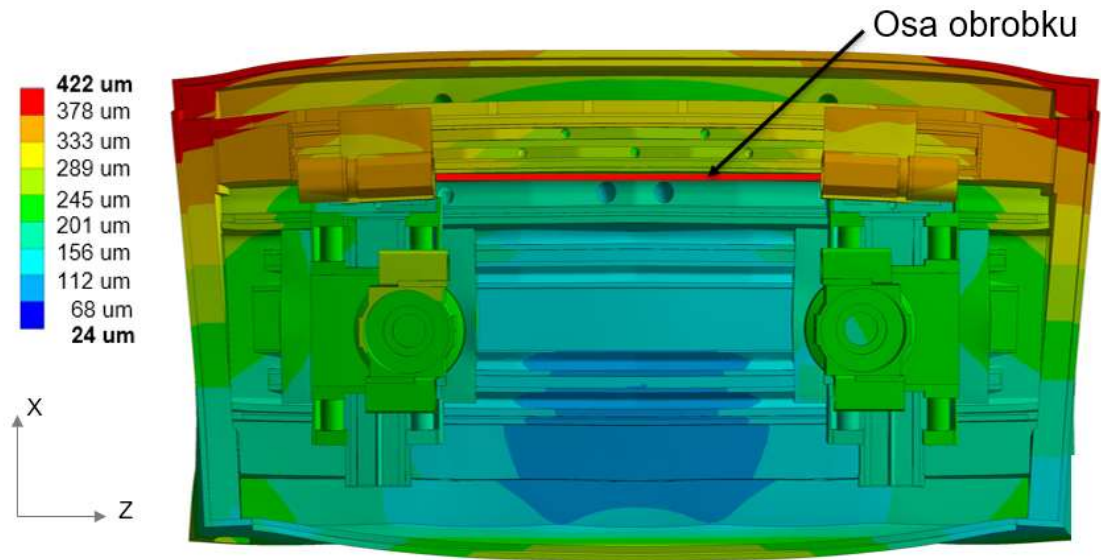
Obr. 47: Vzájemný posuv brousicího a unášecího vřetene v ose X (stav 1.2.)

Změna otáček probíhá pouze na aktivním brousicím vřetení. Z grafu je zřejmé, že při zvyšujících se otáčkách aktivního vřetene se zvyšuje i hodnota posuvu aktivního brousicího kotouče do řezu.

8.2 Varianta s oplachem

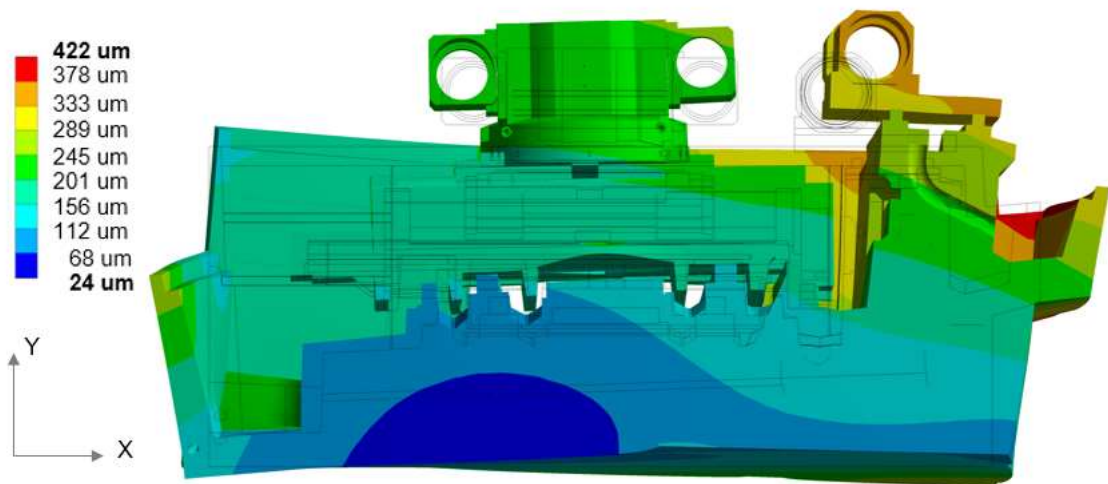
V praxi je stroj během řezného procesu zaplavený řeznou a chladící emulzí. Proto byly zavedeny OP ze stavu 2.1. a stavu 2.2., díky kterým se model přibližuje reálnému stroji a jeho řeznému cyklu.

Při OP ze stavu 2.1. je zkoumáno, jakým způsobem se projeví řezná kapalina a oplach aktivních brousicích vřeten. V tomto stavu není zkoumáno, jak se projeví změna otáček aktivního brousicího vřetene.



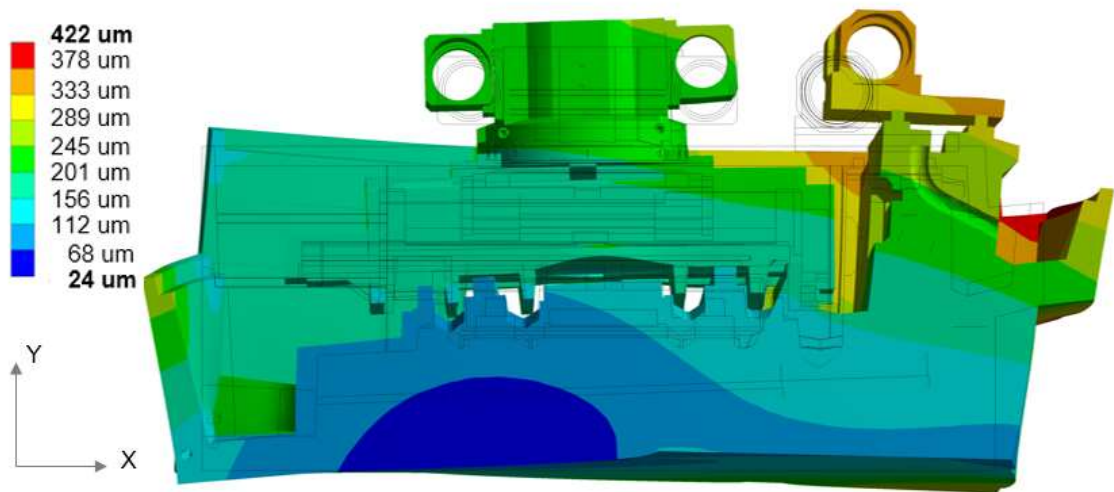
Obr. 48: Pole posuvů stroje při OP ze stavu 2.1. červeně osa obrobku

Vlivem vysoké teploty řezné teploty (40 °C), které přichází do kontaktu se stolovou částí lože dochází ke zvětšenému vybočení osy obrobku (vyznačenou červenou čarou na Obr. 48) v rovině osy XZ. Úhel vybočení je pro OP ze stavu 3 3,2 $\frac{\mu m}{m}$.



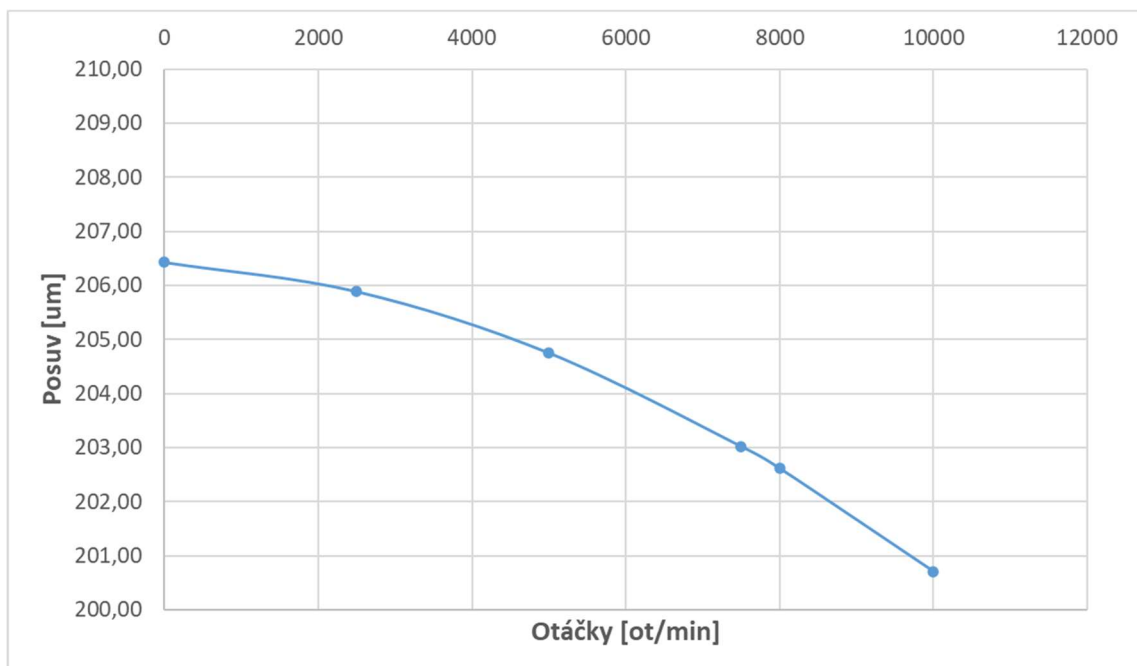
Obr. 49: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 2.1.

Z řezu strojem při zadání OP ze stavu 2.1., který je vidět na Obr. 49, je vidět znatelné vybočení celé stolové části stroje a tím i posuv unášecího vřetena směrem z řezu v ose X i ose Y. Dále je z řezu vidět, že vlivem teploty řezné kapaliny dochází ke kroucení lože.



Obr. 50: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 2.2.

Na Obr. 50 je zobrazeno pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 2.2. pro maximální otáčky vřetene. Mohlo by se zdát, že pole posuvů z tohoto obrázku je stejné jako z obrázku pro OP ze stavu 2.1., ale není tomu tak. Vlivem oplachu vnějšího pláště aktivního broušícího vřetena se posuv středu brusného kotouče neprojeví tak výrazně, jako tomu bylo u OP pro stav 1.2..

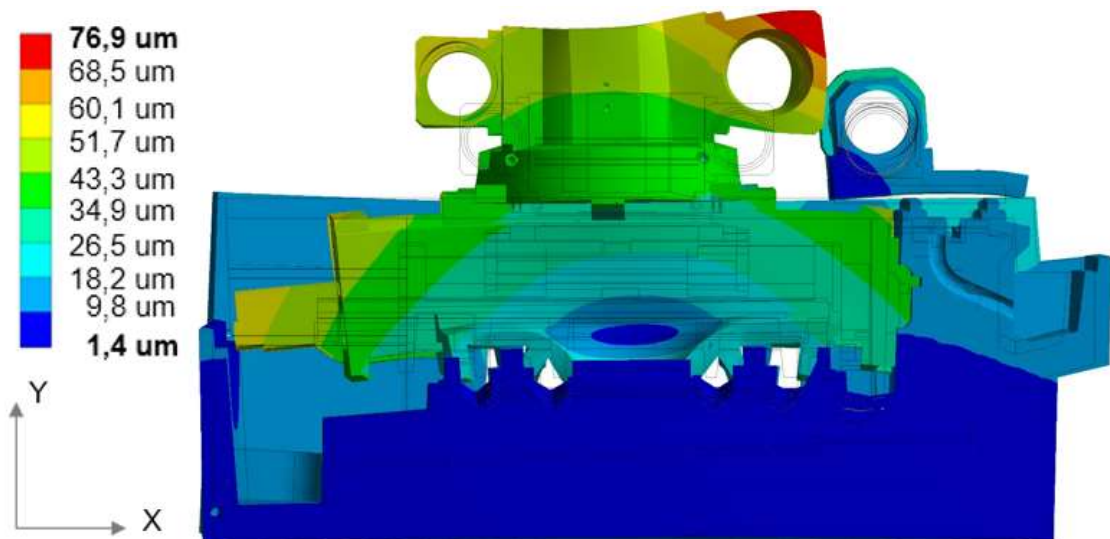


Obr. 51: Vzájemný posuv broušícího a unášecího vřetene v ose X (stav 2.2.)

Stejně jako pro různé hodnoty otáček při stavu 1.2., byl vytvořen graf (Obr. 51) vzájemných posuvů broušícího a unášecího vřetene v ose X pro stav 2.2., ze kterého je zřejmé, že se zvyšujícími se otáčkami dochází k posuvu směrem do řezu.

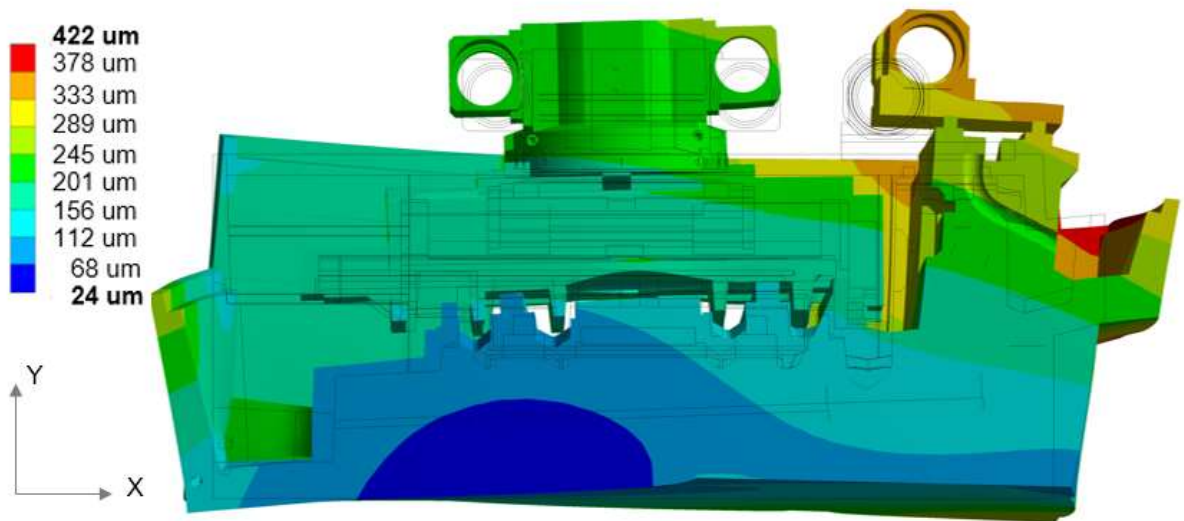
8.3 Zhodnocení výsledků variant bez a s oplachem

Při OP ze stavu 1.2. se jako největší problém jevila vzájemná poloha středu broušícího kotouče a obrobku a expanze aktivního broušícího kotouče, jak vidět na Obr. 52. Po přidání OP pro oplach (stav 2.1. a sta 2.2.) došlo k desetinásobnému zvětšení úhlu naklopení obrobku z původní hodnoty $0,3 \frac{\mu m}{m}$ na hodnotu $3,2 \frac{\mu m}{m}$. Vlivem vysoké teploty řezné kapaliny došlo oproti stavu 2 k expanzi stolové části lože a to v ose Y i X a k jeho vyvracení.



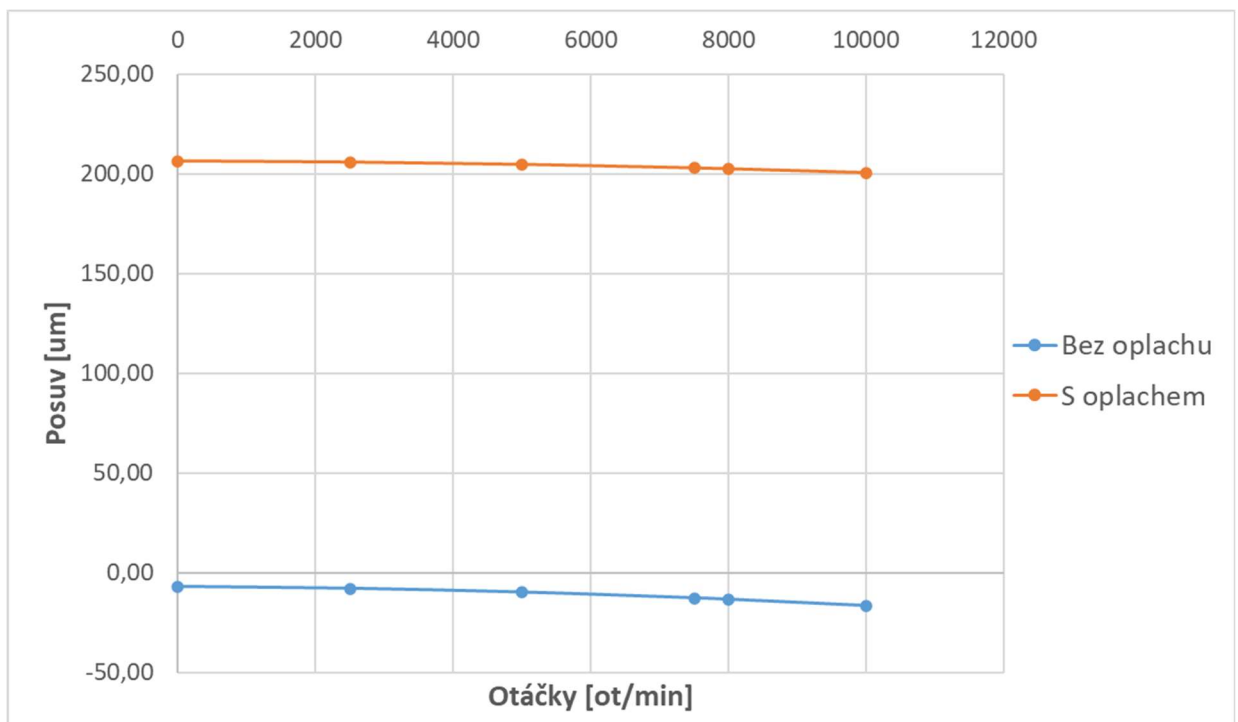
Obr. 52: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 1.2. (srovnání)

Při porovnání Obr. 52a Obr. 53 je vidět, že díky expanzi došlo k prohnutí konzole, na které je připevněn unášecí vřeteník, opačným směrem a tím k posunutí středu obrobku z řezu.



Obr. 53: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 2.2. (srovnání)

Dále byly porovnány grafy vzájemných posuvů broušícího a unášecího vřeteníku (Obr. 54), na kterých je vidět, že vlivem oplachu vnějšího pláště aktivního vřetene došlo k menšímu vzájemnému posunutí broušícího a unášecího vřetene v závislosti na otáčkách.

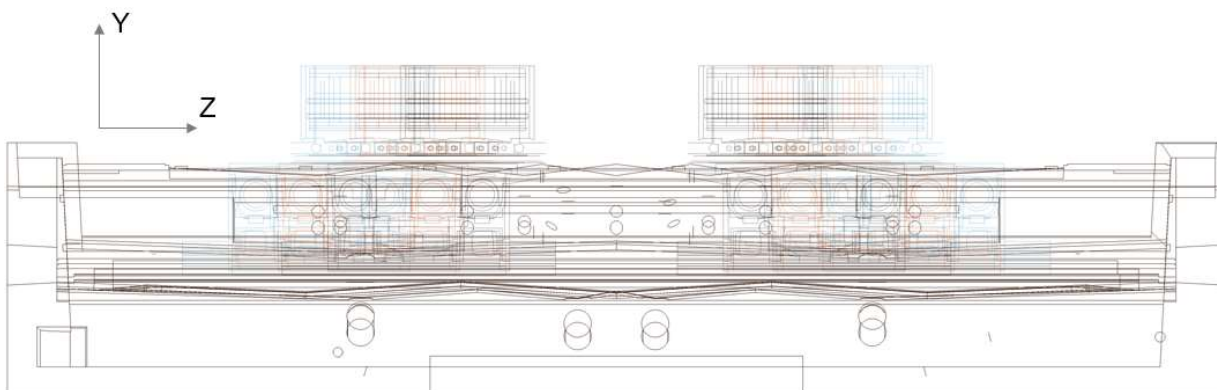


Obr. 54: Porovnání grafů vzájemných posuvů broušícího a unášecího vřetene

Ze srovnání stavu 1.2. a stavu 2.2. vyplývá, že přidáním OP oplachu pláště aktivního vřetene došlo k menšímu vzájemnému posunutí brousicího a unášecího vřetene v závislosti na otáčkách. Po přidání OP pro stav 2.2. se vlivem vysoké teploty řezné kapaliny stává problematickou částí stroje stolová část a svodová vana, u které stojí obsluha. Z toho důvodu se následná optimalizační řešení budou věnovat této části stroje.

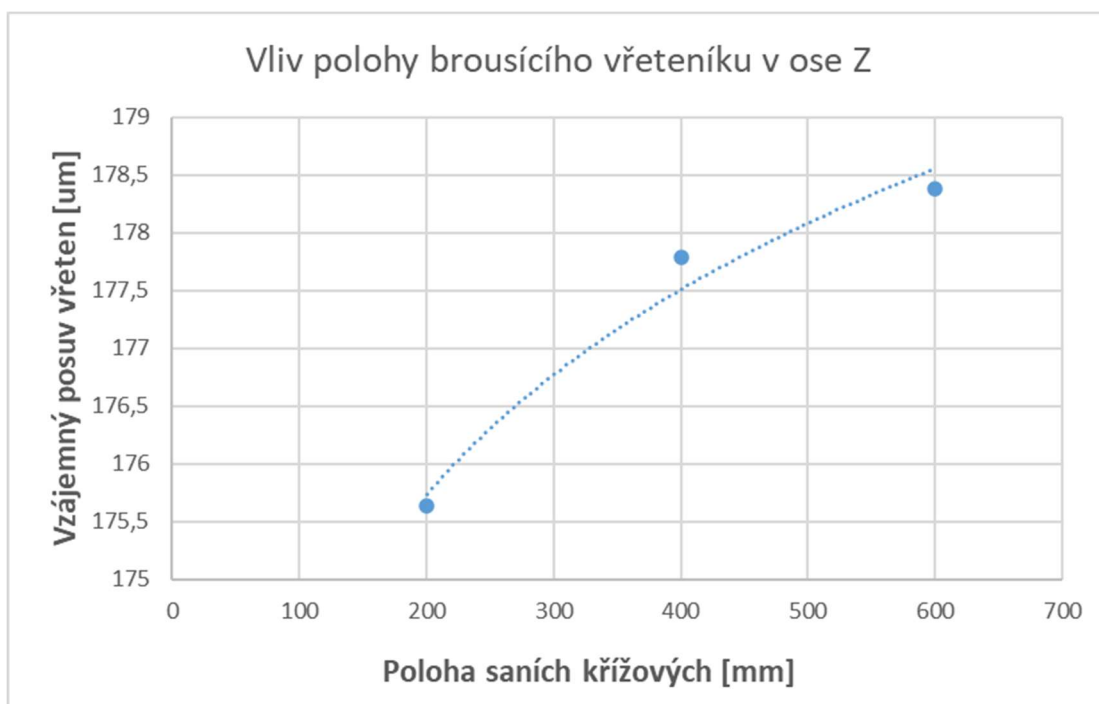
8.4 Vliv polohy brousicího vřeteníku v ose Z

Jak bylo uvedeno v kapitole s popisem komponent osy Z, pohybují se saně křížové po loži tak, aby mohla vřetena brousit různé průměry na klikové hřídeli. Z předchozí podkapitoly vyplynulo, že vlivem vysoké teploty řezné kapaliny protékající středem lože stroje, je teplotní pole nehomogenní a tím i pole posuvů.



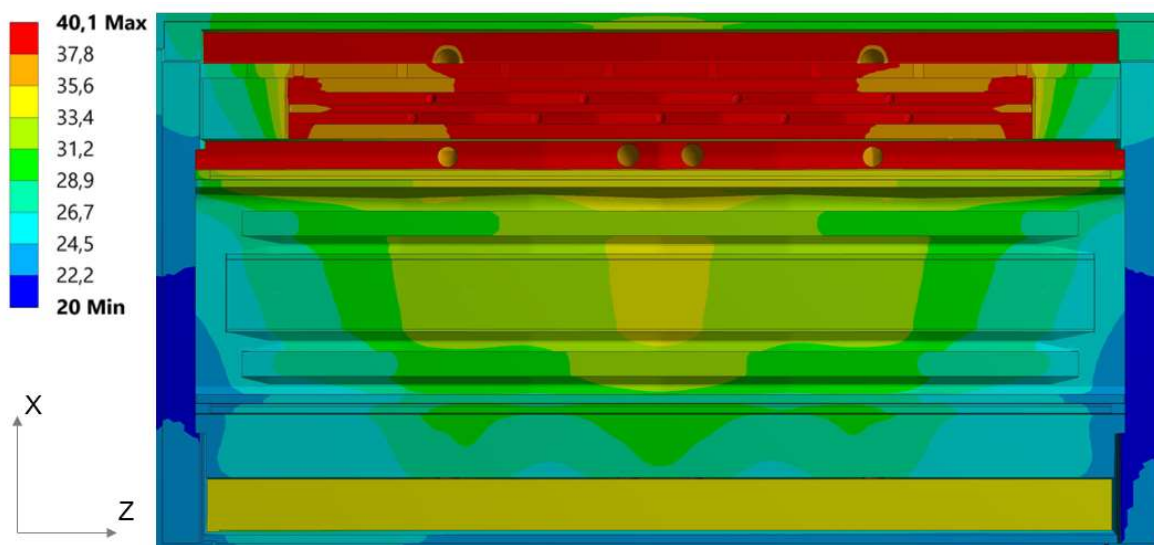
Obr. 55: Zobrazení poloh tří poloh po posunutí z výchozí varianty

Z toho důvodu vznikla potřeba zjistit, jak se změní velikost vzájemného posuvu aktivního brousicího vřetene a unášecího vřetene v ose X, pokud dojde k posuvu saní křížových ve směru osy Z. Výpočty byly provedeny pro tři další polohy, kdy první poloha je o 200 *mm* (modře) od základní polohy, druhá o 400 *mm* (červeně) a třetí o 600 *mm* (černě), viz Obr. 55. OP byly použity ze stavu 2.2. a pro graf, který je na Obr. 56, bylo pracováno s maximálními otáčkami aktivního brousicího vřetene (tedy s 10 000 $\frac{ot}{min}$).



Obr. 56: Závislost vzájemného posuvu vřeten ve směru X na poloze saních křížových v ose Z

V grafu na Obr. 56 je tedy zobrazena závislost vzájemného posuvu aktivního brousícího vřetene a unášecího vřetene ve směru osy X na poloze saních křížových ve směru osy Z. Je vidět, že tato závislost není lineární, což by odpovídalo nehomogennímu rozložení teplotního pole (Obr. 57) a tím větší deformaci ve středu lože, kde je četná koncentrace zdrojů s vysokou teplotou.



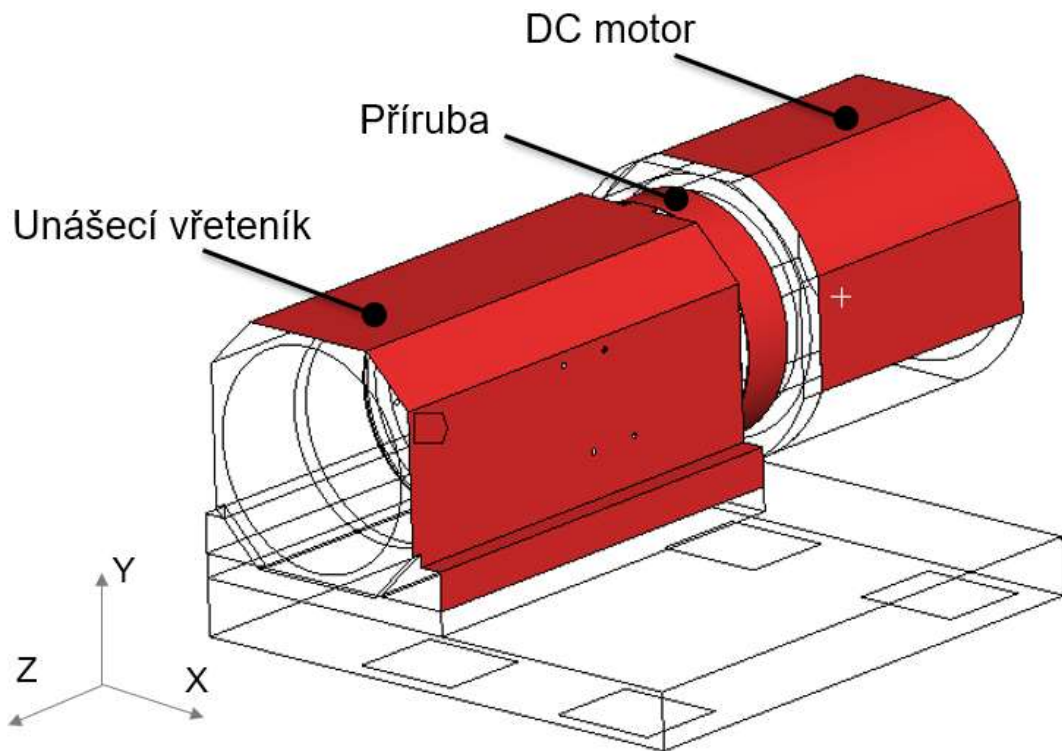
Obr. 57: Teplotní pole lože pro OP ze stavu 2.2.

9 Návrhy optimalizačních úprav modelu

Na základě diskuse ohledně výsledků byly navrženy možnosti návrhů optimalizačních řešení, které byly následně zpracovány. Ve většině případů úprav došlo ke změně geometrie stroje a byly přidány další okrajové podmínky.

9.1 Zavedení OP oplachu unášecích vřeten a jejich motorů

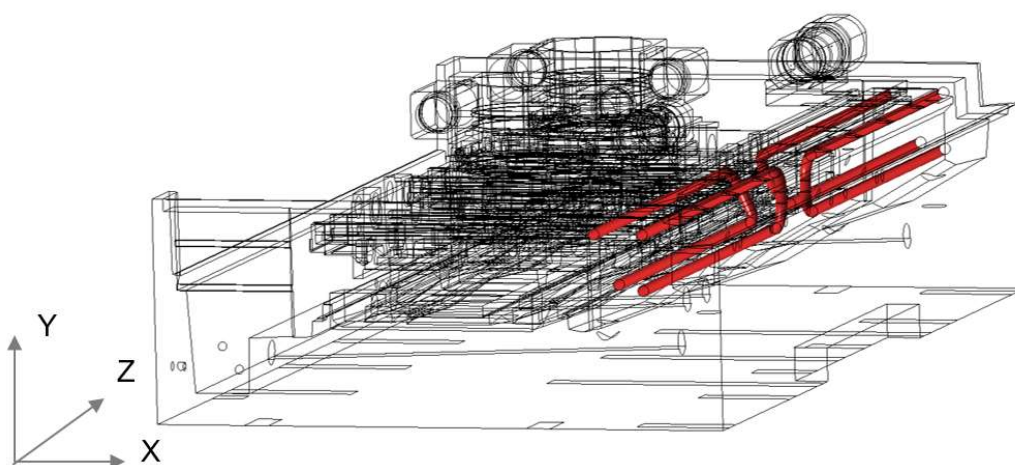
Pro tento návrh byla zavedena teplotní okrajová podmínka 25 °C na vnější plášť vřeteníků unášecích vřeten, jejich motorů a příruby mezi tělesem vřetene a motoru. Plochy, na které je OP aplikována jsou na Obr. 58 zvýrazněny červeně.



Obr. 58: Teplotní okrajová podmínka oplachu

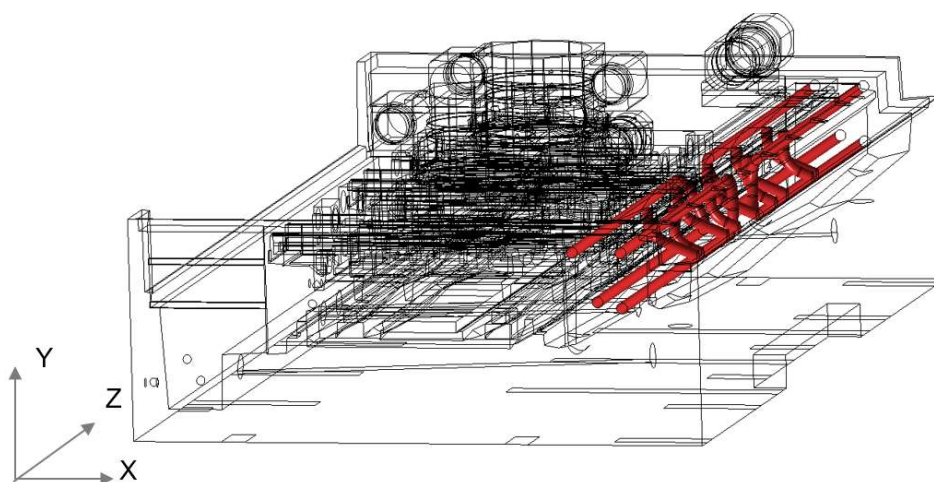
9.2 Vložení protékané trubky chladící emulzí pod stolovou jednotkou

Jelikož vlivem vysoké teploty řezné kapaliny dochází k deformaci stolové části lože (viz interpretace výsledků), bylo jednou z návrhů vložení potrubí do této části lože (Obr. 59). Teplota chladící kapaliny v tomto potrubí je stejná jako u všech ostatních částí, na něž působí chladící emulze. Okrajová podmínka zadávaná na plochy vytvořeného potrubí je 25 °C.



Obr. 59: Úprava vložení potrubí s chladící emulzí

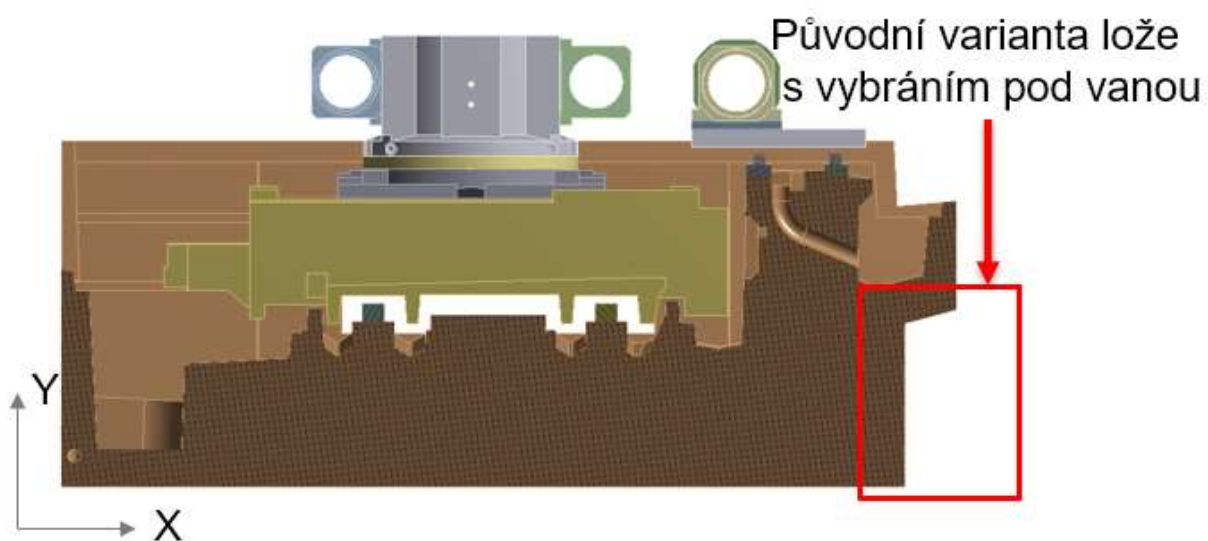
Tvar nového potrubí s chladící emulzí byl navrhnout tak, aby nebyl protnut svod řezné emulze, který je vidět na Obr. 60. Vzdálenost potrubí je daná umístěním vedení, pod kterým jsou trubku modelovány.



Obr. 60: Návrh potrubí s chladící emulzí včetně svodového potrubí

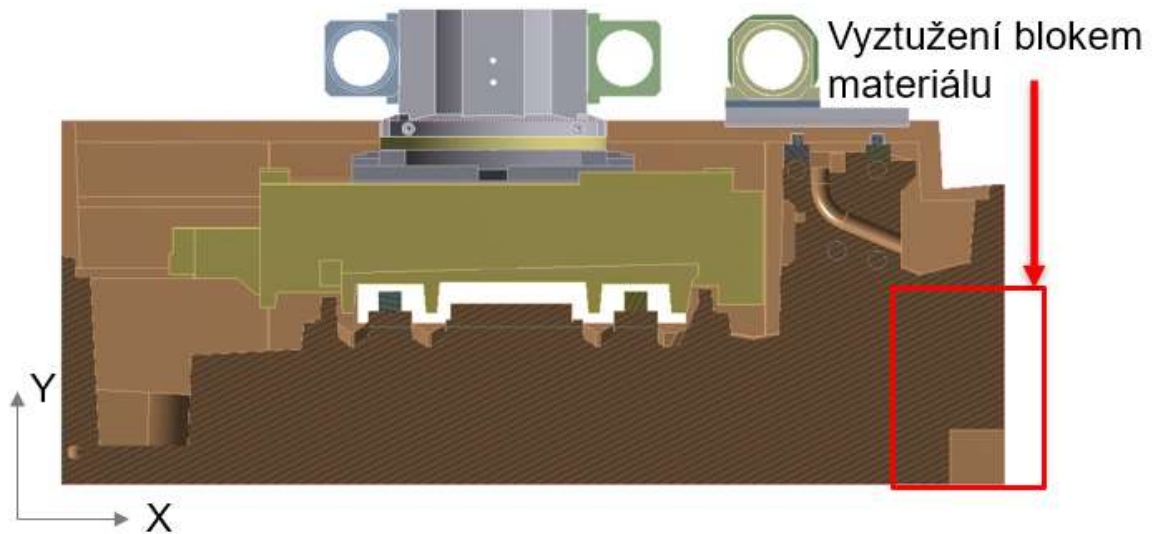
9.3 Vyztužení spodní části lože

Na Obr. 61 je původní varianta modelu lože stroje. V pravé části lože je vana, do které stéká emulze z řezného procesu, vysunutá směrem k obsluze. Z analýzy výsledků je patrné, že dochází k deformaci této vany směrem k obsluze.



Obr. 61: Řez původní variantou lože

Na Obr. 62 je již řez geometrií stroje, kde byl, kvůli snaze snížit vyklánění vany, přidán blok materiálu, aby došlo k vyztužení bočnice. Dále bylo vytvořeno vybrání, nohy obsluhy. Toto vybrání dimenzováno na klasickou pracovní obuv s kovovou špičkou.

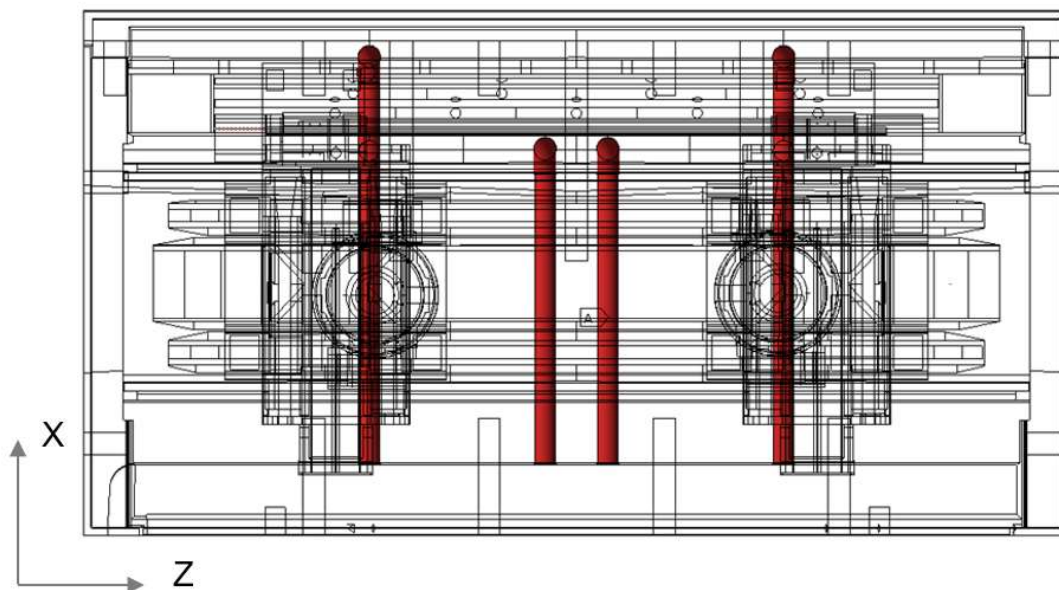


Obr. 62: Řez modelem po přidání bloku materiálu a vytvoření vybrání

9.4 Přemístění svodového potrubí ze středu lože

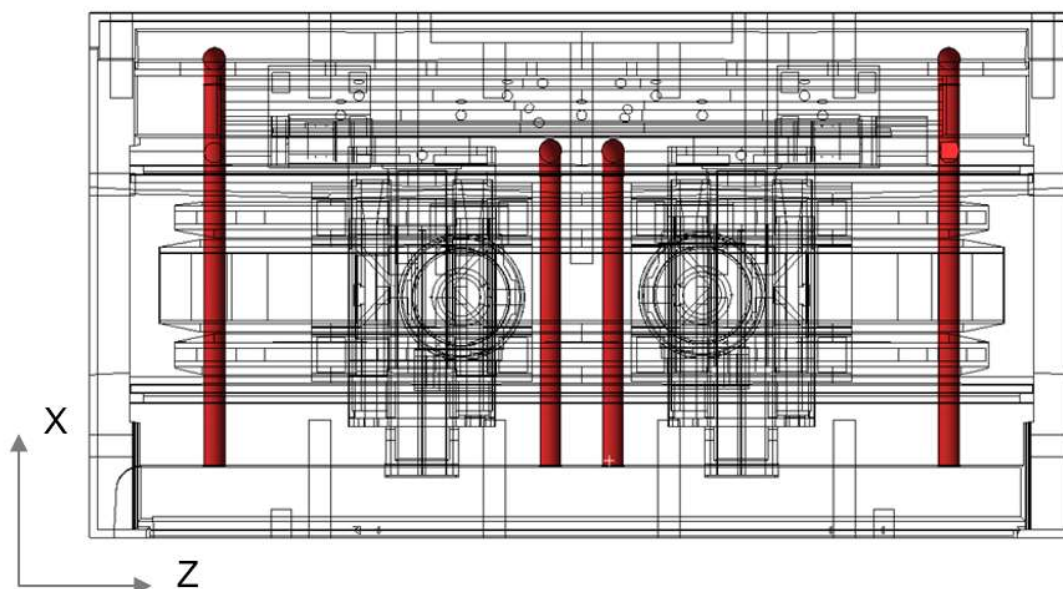
Při teplotních okrajových podmínkách ze stavu 2.2. jsou nejvyšší hodnoty teplotního pole na stolové části lože, dále jsou hodně ovlivněny ty části lože, kde jsou umístěna svodová potrubí z vrchních van a vzniká tak koncentrace vysokých teplot ve středu lože. Cílem tohoto návrhu bylo posunutím krajních svodových potrubí docílit posunutí alespoň některých tepelných zdrojů ze středu lože a vytvořit tím rovnoměrnější rozložení teplot v loži stroje a snížit tím vyvolanou deformaci.

Rozmístění svodových potrubí, které je použité v původní variantě lože stroje je patrné z Obr. 63. Potrubí je zvýrazněno červenou barvou.



Obr. 63: Výchozí varianta umístění potrubí

Posunutí potrubí bylo provedeno v prostředí Space Claim, kde byly vybrány veškeré plochy tvořící kanál a pomocí funkce Move byl proveden posuv o 800 *mm* do stran, jak je vidět na Obr. 64.



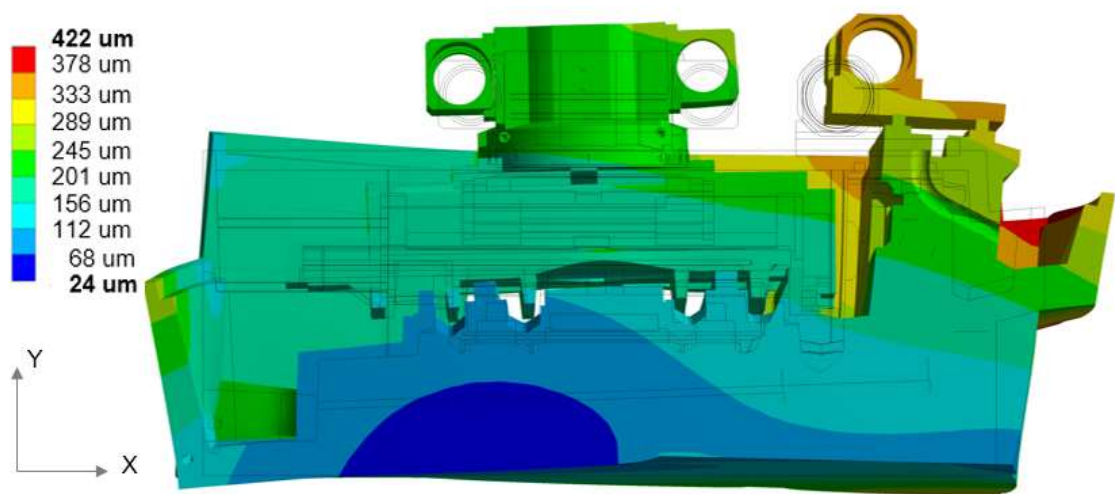
Obr. 64: Návrh úpravy posunutím potrubí

10 Výsledky návrhů optimalizačních řešení stroje

V následujících podkapitolách budou interpretovány výsledky výpočtů jednotlivých úprav zmíněných v předchozí kapitole. Všechny výsledky úprav budou porovnány s výsledky varianty s oplachem při OP ze stavu 2.2..

10.1 Zavedení OP oplachu unášecích vřeten a jejich motorů

Zavedením OP teploty 25 °C, která měla reprezentovat teplotu oplachové emulze na vnějším plášti unášecích vřeten a vnějším plášti jejich motorů, bylo předpokládáno, že dojde ke snížení hodnoty vzájemného posuvu aktivního broušícího vřetene a unášecího vřetene, a že se zmenší hodnota natočení unášecího vřetene.

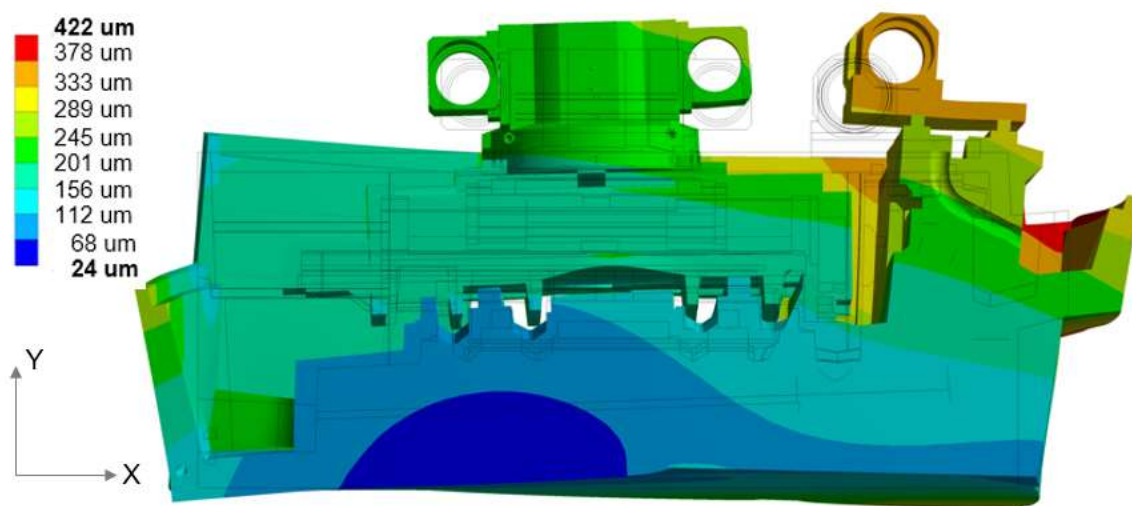


Obr. 65: Řez polem posuvů výchozí varianty stroje

Na Obr. 65 je řez polem posuvů výchozí varianty stroje, kdy došlo vlivem vysoké teploty řezné kapaliny k vybočení unášecího vřetene směrem z řezu ven v obou osách X i Y.

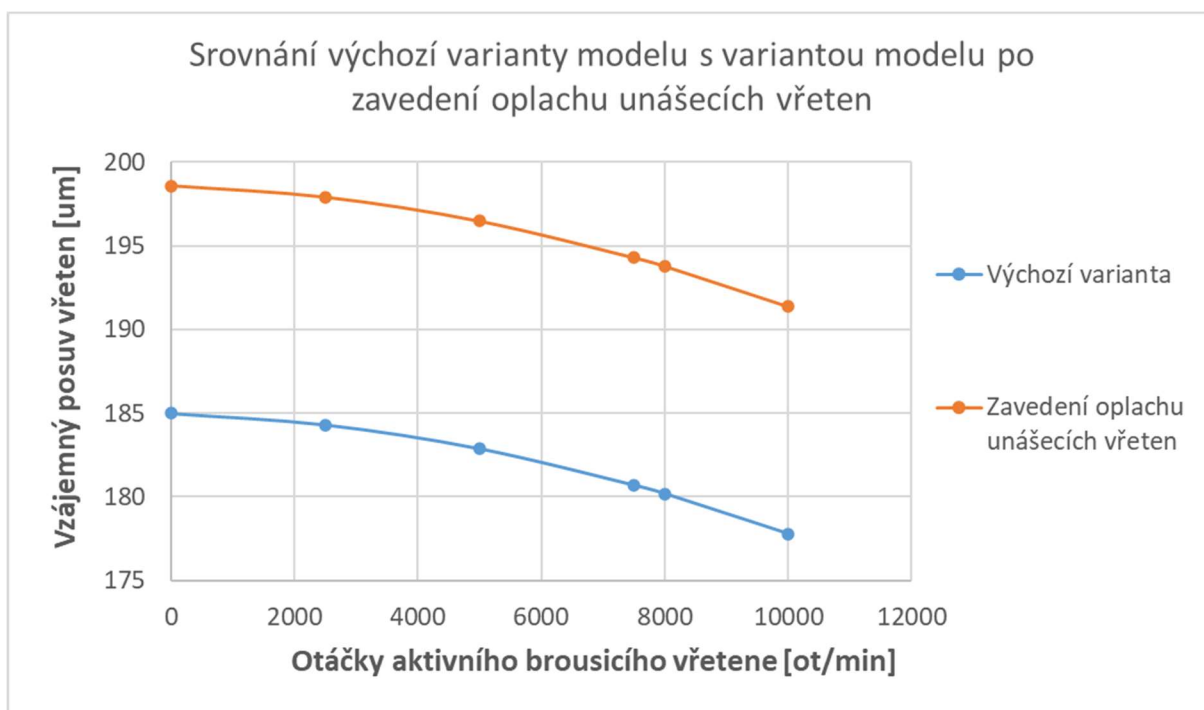
Na dalším Obr. 66 je pak vidět řez polem posuvů po zavedení návrhu optimalizační úpravy přidáním OP oplachu unášecích vřeten a jejich motorů. Při srovnání těchto dvou řezů je z pole posuvů vidět, že přidáním této OP

došlo k většímu odklonu unášecího vřeteníku od nedeformovaného stavu, který je na Obr. 66 promítnutý jako drátový model stroje.



Obr. 66: Řez polem posuvů po zavedení OP oplachu unášecích vřeten

Toto zhoršení je vidět i z grafu na Obr. 67, kde modrá křivka je závislost vzájemného posuvu vřeten na otáčkách výchozí varianty a oranžovou křivkou jsou vykresleny hodnoty pro závislost varianty se zavedením OP oplachu unášecích vřeten a jejich motorů.

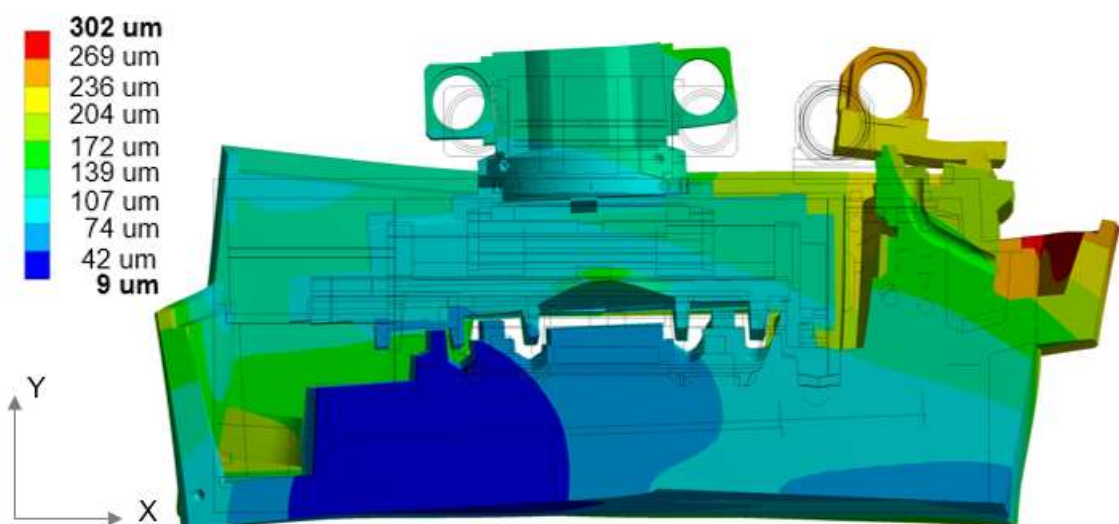


Obr. 67: Srovnání závislosti výchozí varianty a varianty zavedení oplachu unášecích vřeten

10.2 Vložení protékané trubky chladící emulzí pod stolovou jednotkou

Jedním z dalších návrhů úprav bylo vložení protékaného potrubí chladící emulzí do stolové části lože, kdy v základní variantě byla na stěny tohoto potrubí zadána OP teploty 25 °C. Následně byla provedena citlivostní analýza, která byla počítána pro hodnoty 20 °C a 15 °C.

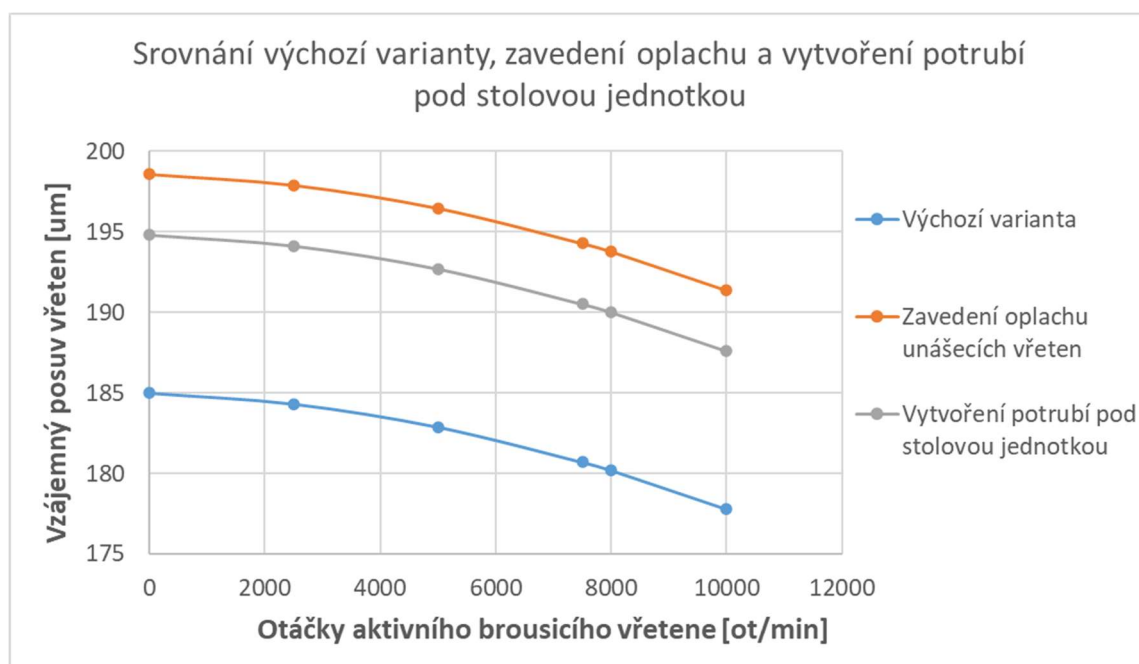
Na Obr. 68 je vidět řez polem posuvů po vložení protékaného potrubí chladící emulzí. Je vidět, že vlivem deformace stolové části lože došlo k prohnutí konzole, na které je upnuto unášecí vřeteno, a tím došlo k dalšímu vyklopení unášecího vřetene směrem z řezu ve směru osy X.



Obr. 68: Řez polem posuvů po úpravě vložení potrubí protékaného emulzí

K tomuto prohnutí pravděpodobně dochází kvůli vyšší koncentraci potrubí, která se nachází pod pravou částí vedení. Jelikož levé potrubí, které je vedeno pod levým vedením, musí být sklopené o úhel 24°, kvůli vybrání ve stolové části lože, je po ohnutí ve středu lože vedeno zpět v blízkosti pravého potrubí. Kvůli tomuto konstrukčnímu řešení je pravá strana stolu chlazena víc, což je také vidět na teplotním poli z obrázku. Následně dochází k menší deformaci vlivem vysoké teploty pouze pod pravým vedením, kterým je následně ohýbána konzole unášecího vřetene.

Jelikož na sebe návrhy optimalizačních řešení navazují, je v grafu na Obr. 69 zobrazena i křivka odpovídající návrhu zavedení oplachu unášecích vřeten a jejich motorů. Z grafu je patrné, že po zavedení prvního návrhu došlo ke zlepšení, dále je ale vidět, že oproti výchozímu stavu došlo ke zhoršení.

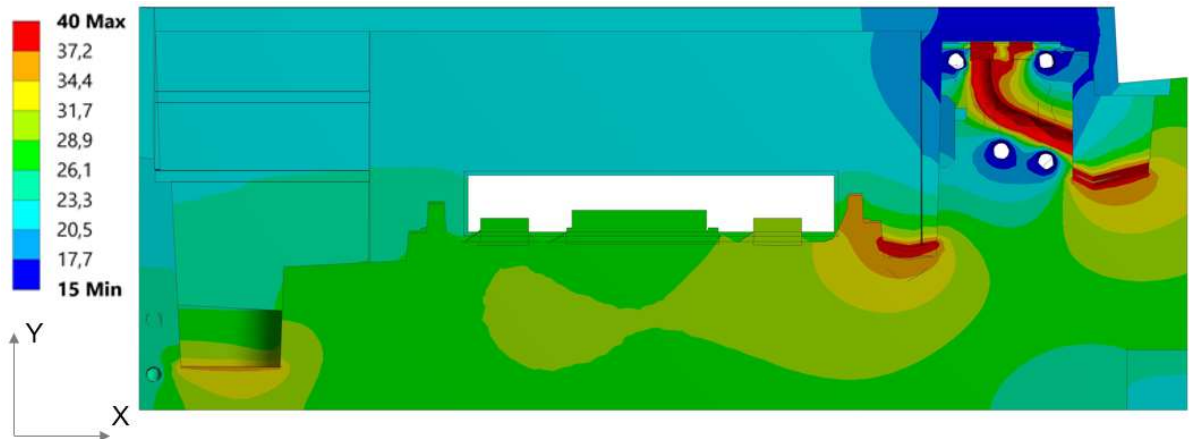


Obr. 69: Srovnání výchozí varianty, zavedení oplachu a varianty modelu po vytvoření potrubí pod stolovou jednotkou

10.2.1 Citlivostní analýza

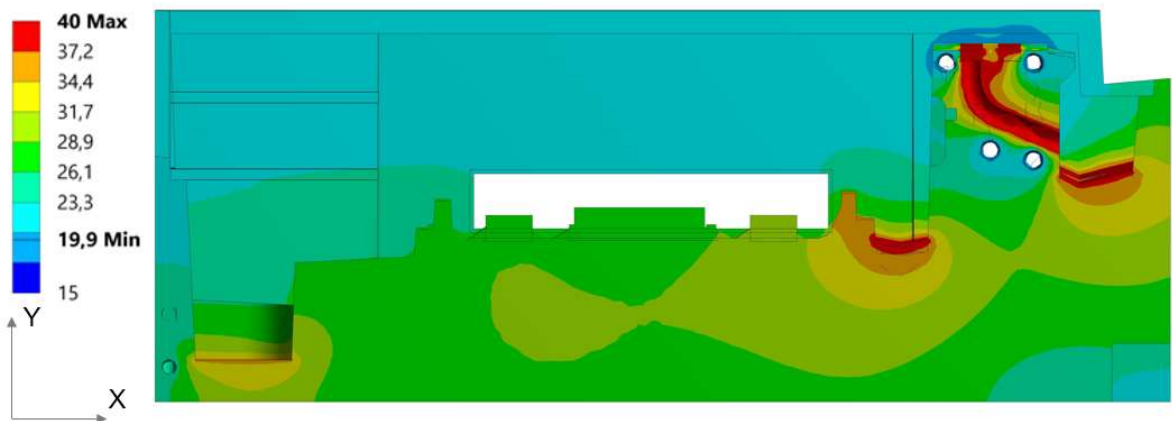
Jak bylo psáno v úvodu této podkapitoly, pro tento návrh optimalizačního řešení byla provedena citlivostní analýza. Ta spočívala ve snižování hodnot pro OP teploty a byla zkoumána teplotní pole při jednotlivých teplotách a následně změny ve vzájemném posuvu brousícího a unášecího vřetene ve třech polohách saních křížových.

Na Obr. 70 je zobrazen řez teplotním polem pro OP teplotní podmínku 25 °C chladící emulze v potrubí, která je výchozí teplotou zadávanou pro výpočtový model. Z teplotního pole je patrné, že ovlivnění teplotou chladící emulze nastává pouze v bezprostřední blízkosti vloženého potrubí.



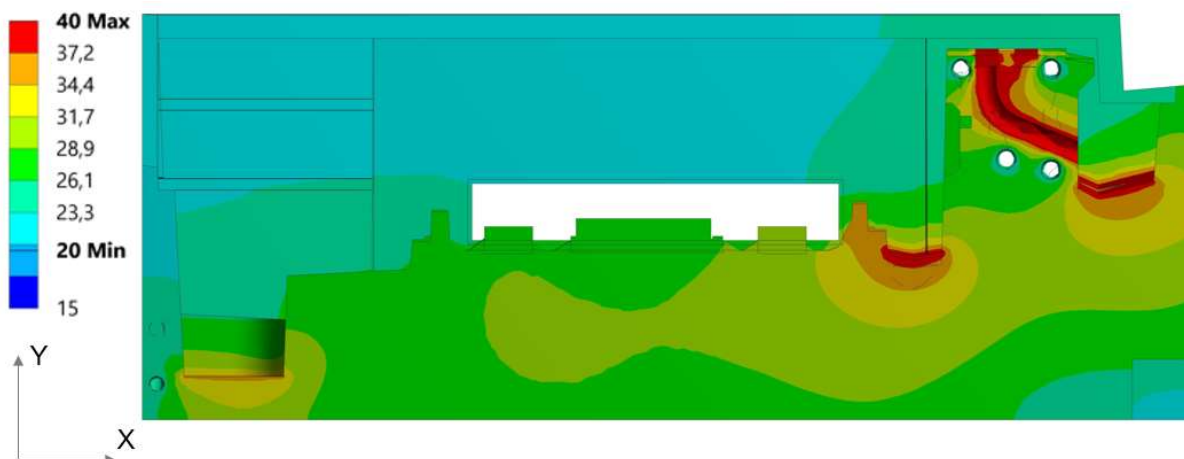
Obr. 70: Řez teplotním polem s OP teploty 25 °C

Na následujícím Obr. 71 je již OP teploty snížena o 5 °C (tedy na 20 °C), kdy je na řezu teplotním polem vidět pokles teplot okolo vloženého potrubí.



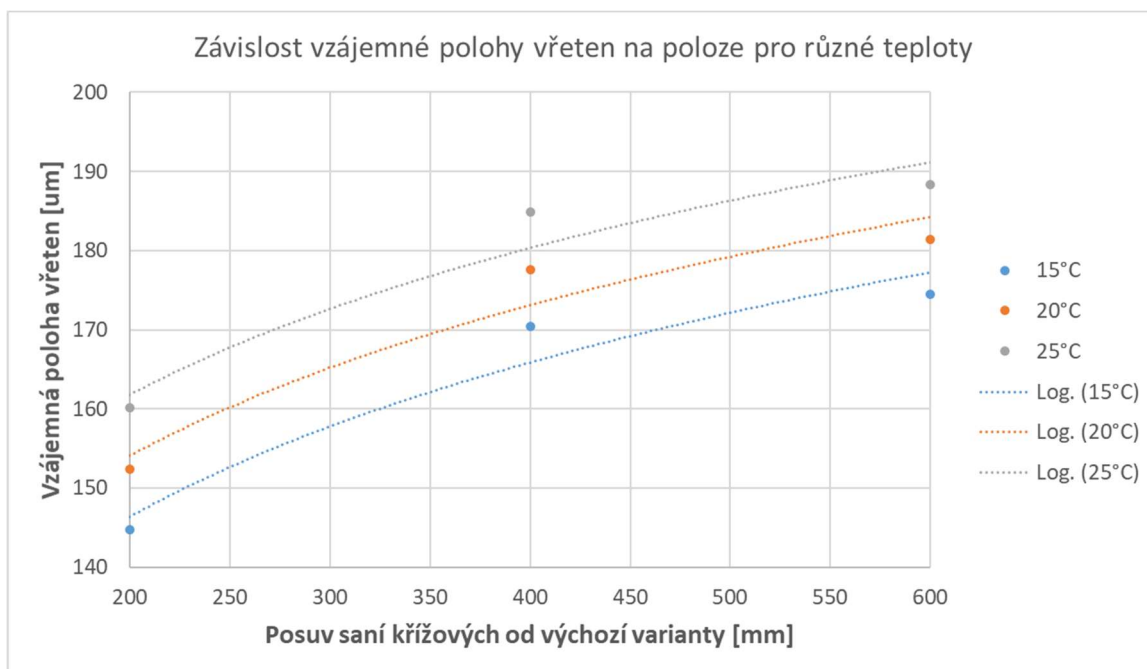
Obr. 71: Řez teplotním polem s OP teploty 20 °C

Na řezu teplotním polem (Obr. 72) se zadanou OP teploty 15 °C pro chladící emulzi protékající potrubím je znatelně větší ovlivněná oblast oproti řezu teplotním polem, kde byla hodnota OP teploty 25 °C.



Obr. 72: Řez teplotním polem s OP teploty 15 °C

Byla zkoumána nejen změna teplotního pole vlivem změny OP teploty chladící emulze potrubí, ale, jak bylo v úvodu podkapitoly uvedeno, byl zkoumán i vzájemný posuv vřeten v závislosti na posuvu saních křížových od výchozí polohy při změně teploty v potrubí. Výsledky tohoto zkoumání byly zaneseny do grafu na Obr. 73, ze kterého je vidět, že se snižující se teplotou dochází ke snižování hodnoty vzájemné polohy vřeten. Jelikož jsou průběhy křivek totožné, je možné říct, že zadání odlišné OP teploty v potrubí nijak neovlivňuje zbytek lože tak, aby došlo k jeho deformaci a tím změně této křivky.

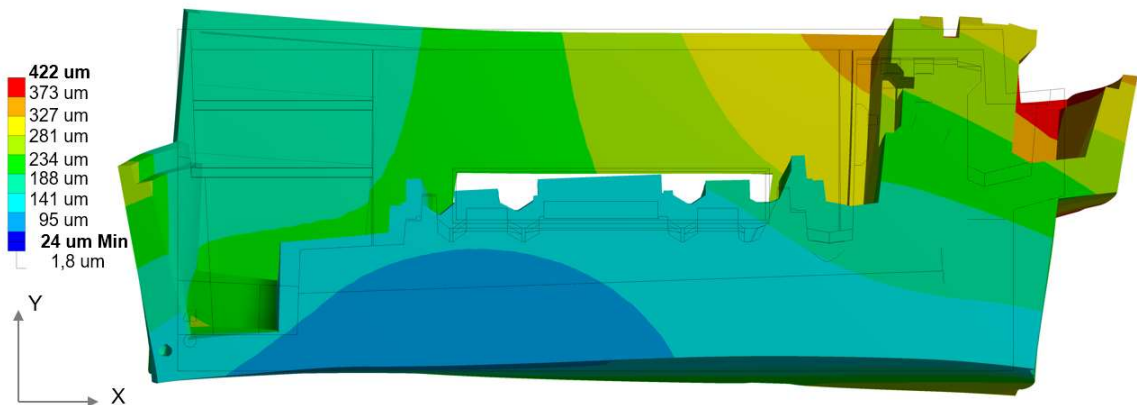


Obr. 73: Závislost vzájemné polohy brousicího a unášecího vřetene na poloze saních křížových

10.3 Vyztužení spodní části lože

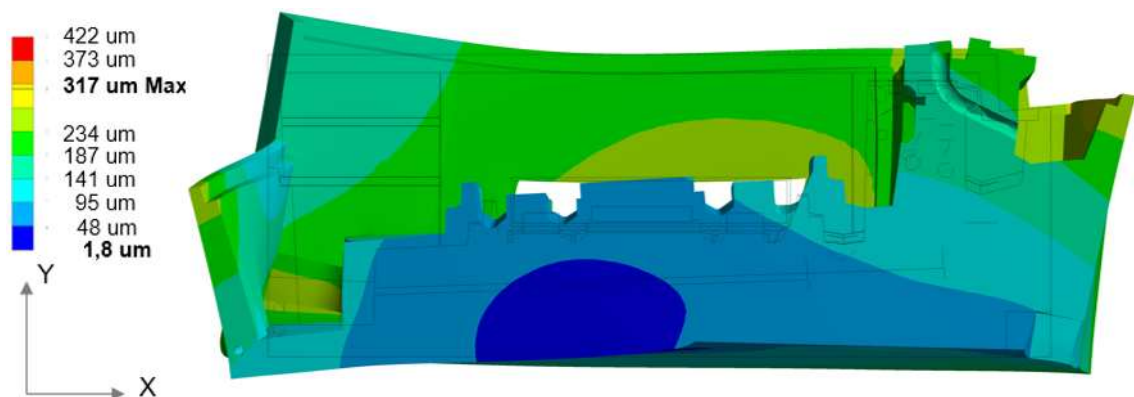
Předposledním návrhem optimalizačních úprav bylo vyztužení spodní části lože blokem materiálu, s předpokladem minimalizace vyvracení vany směrem k obsluze.

Na Obr. 74 je zobrazen řez polem posuvů výchozí varianty lože stroje, na kterém je vidět výše zmíněná deformace vany směrem k obsluze.



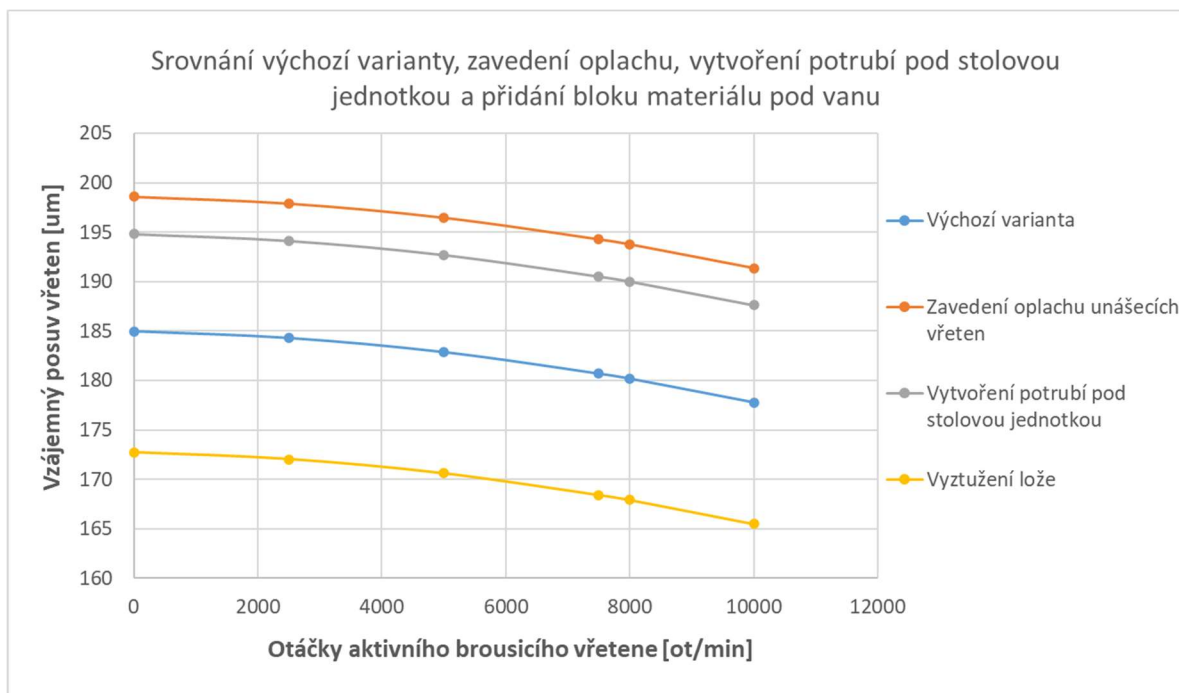
Obr. 74: Řez polem posuvů výchozí varianty lože

Na dalším Obr. 75 je zobrazen také řez polem posuvů tentokrát ale pro varianty lože, která prošla již úpravou přidání potrubí do stolové části lože s OP teploty 25 °C a přidáním bloku materiálu pod vanu s vybráním pro nohy obsluhy. Na stupnici v levé části obrázku je vidět maximální hodnota posuvu, která se pro upravenou variantu modelu snížila z 422 μm na hodnotu 317 μm .



Obr. 75: Řez polem posuvů upravené varianty lože přidáním bloku materiálu

Toto zlepšení je vidět i ze srovnání křivek vzájemných posuvů vřeten v závislosti na otáčkách aktivního vřetene jednotlivých navržených úprav. Ty jsou vyneseny do grafu na Obr. 76.

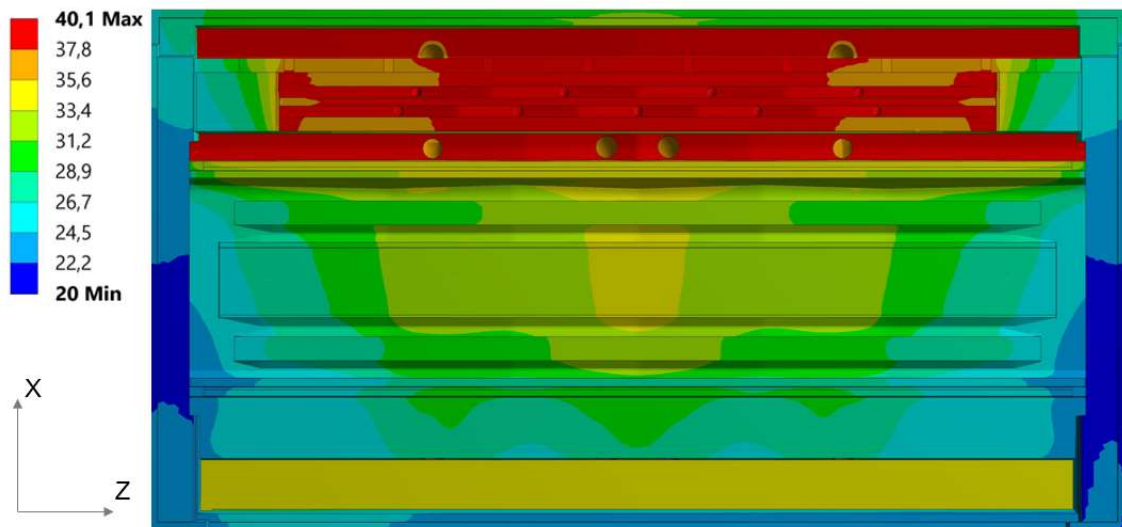


Obr. 76: Srovnání výchozí varianty, zavedení oplachu, varianty modelu po vytvoření potrubí pod stolovou jednotkou a varianty po přidání bloku materiálu pod vanu

10.4 Přemístění svodového potrubí ze středu lože

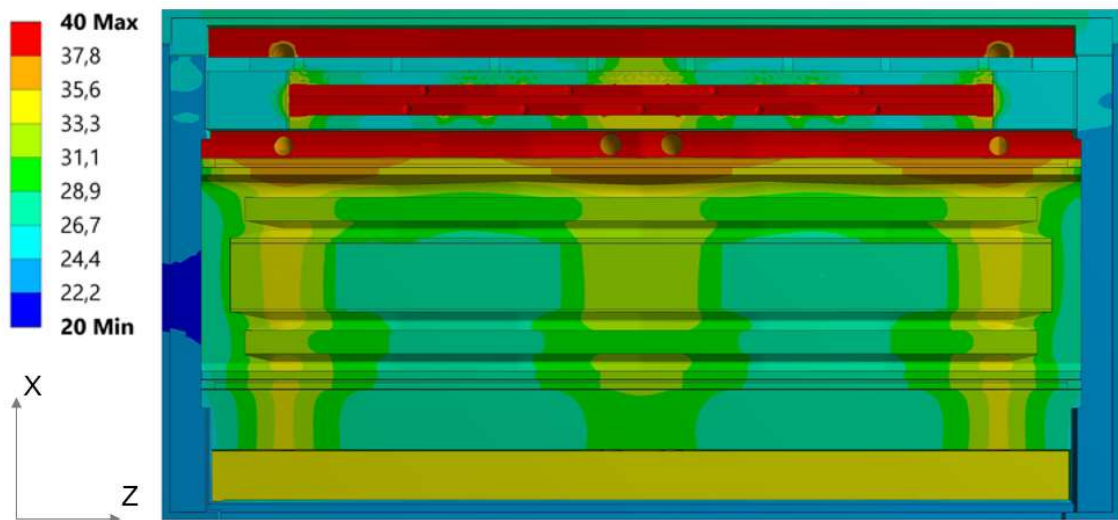
Poslední úpravou modelu bylo posunutí krajního svodového potrubí ze středu lože. Tímto krokem mělo být docíleno přesunutí tepla koncentrovaného ve středu lože.

Na prvním Obr. 77 je zobrazeno teplotní pole výchozí varianty lože, kde je vidět výše uvedená koncentrace tepla ve středu lože.



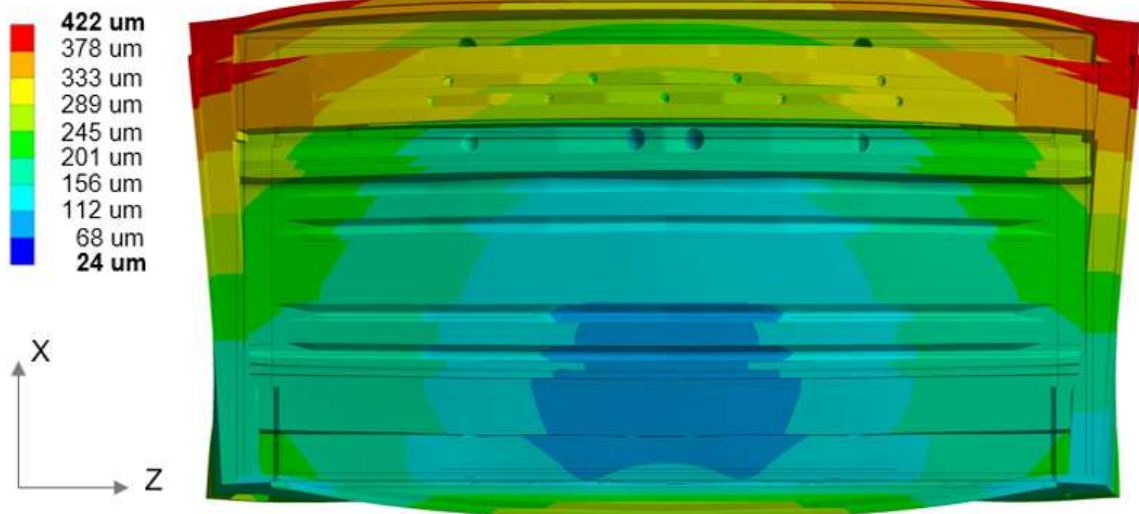
Obr. 77: Teplotní pole výchozí varianty lože

Na druhém Obr. 78 je zobrazeno teplotní pole lože po veškerých provedených konstrukčních úpravách. Ze kterého je vidět, že posunutím potrubí došlo k přesunu vysokých teplot do stran lože, a to i v částech pod stolovou jednotkou.



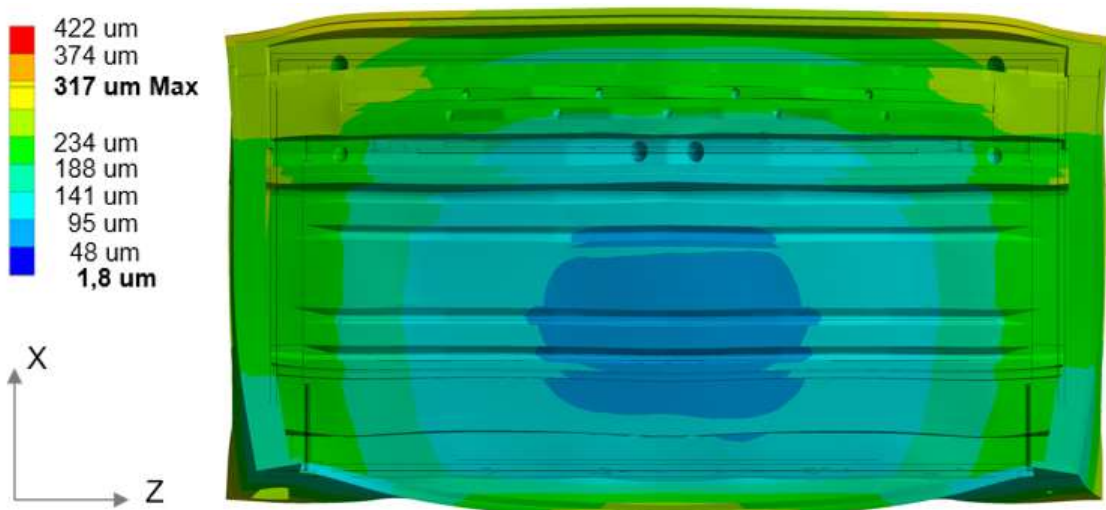
Obr. 78: Teplotní pole lože po veškerých úpravách

Následně bylo provedeno srovnání polí posuvů, kde na Obr. 79 je zobrazeno pole posuvů výchozí varianty lože.



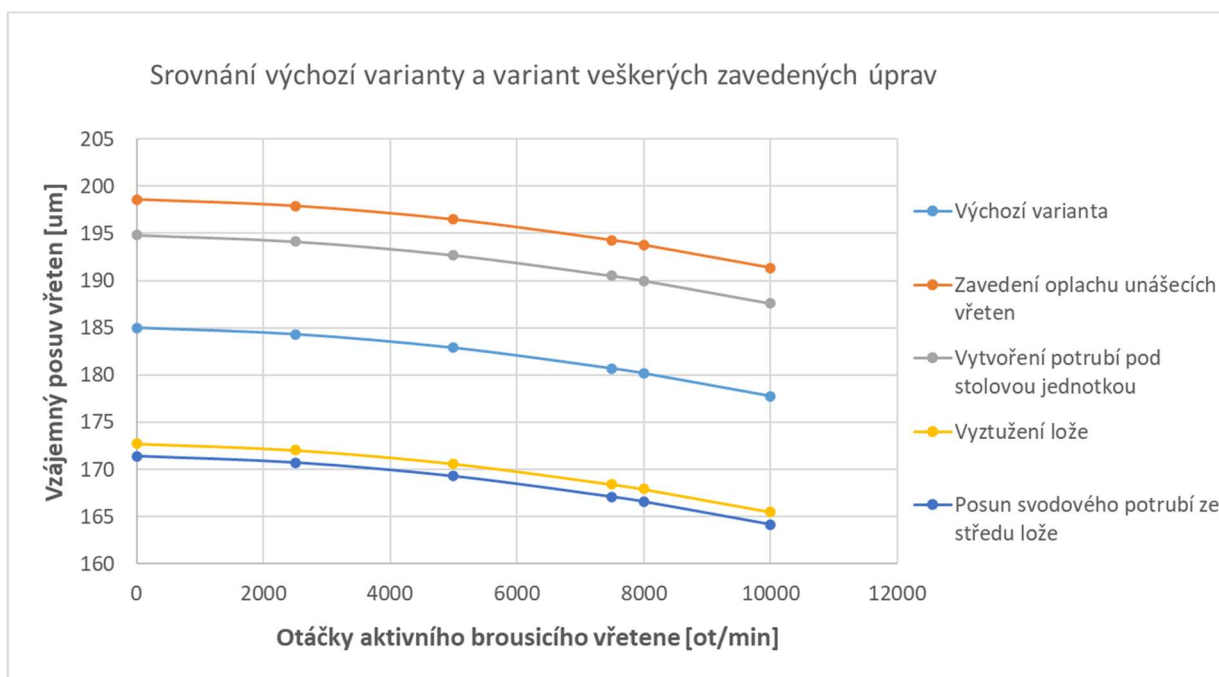
Obr. 79: Pole posuvů výchozí varianty lože

Na následujícím Obr. 80 je zobrazeno pole posuvů lože po veškerých úpravách. Maximální hodnota posuvu se z $422 \mu\text{m}$ zmenšila na $317 \mu\text{m}$, což je stejná maximální hodnota posunutí, jako byla hodnota v předchozí podkapitole. Dále je z obrázku patrné, že vlivem posunutí krajních potrubí došlo k rovnoměrnějšímu rozložení pole posuvů.



Obr. 80: Pole posuvů lože po veškerých úpravách

Ze srovnání jednotlivých závislostí vzájemného posuvu vřetene na otáčkách aktivního broušícího vřetene (Obr. 81) je vidět, že zavedením této poslední úpravy dochází ke zmenšení hodnoty vzájemného posuvu.



Obr. 81: Srovnání výchozí varianty a variant veškerých zavedených úprav

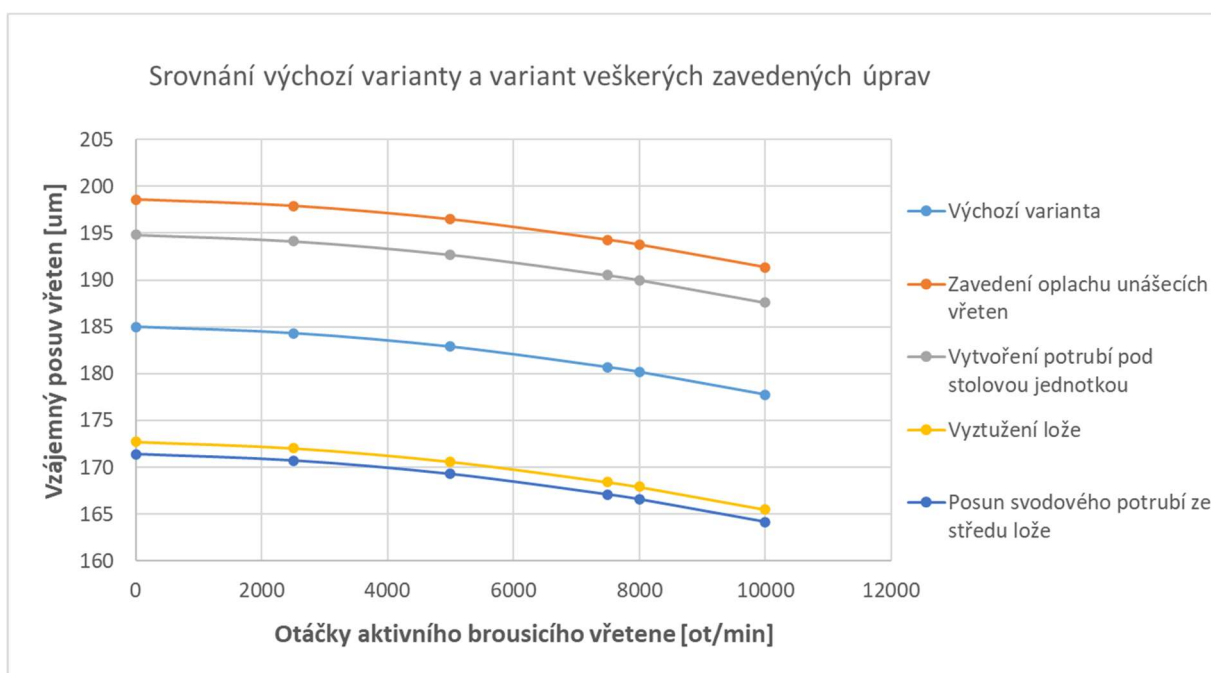
10.5 Zhodnocení výsledků aplikace návrhů optimalizačních řešení

Byly vypracovány čtyři návrhy optimalizačního řešení, které byly postupně v pořadí: zavedení oplachu unášecích vřeten, vložení potrubí do stolové části lože, přidání bloku materiálu pod vanu v přední části lože, a nakonec posunutí krajního svodového potrubí o 800 mm do krajů lože. Po vynesení závislosti vzájemného posuvu vřeten na otáčkách aktivního broušícího vřetene jednotlivých variant úprav do společného grafu na Obr. 82 je zřejmé, který návrh vedl ke zlepšení, a který naopak ke zhoršení.

Z grafu na Obr. 82 je možné vyčíst, že hned první úpravou, kterou bylo zavedení OP oplachu unášecích vřeten, došlo ke zvětší vzájemného posuvu vřeten. Pro tuto úpravu byla při nulových otáčkách aktivního broušícího vřetene naměřena hodnota vzájemného posuvu 199 μm , což je hodnota horší než hodnota výchozí varianty, která pro nulové otáčky činí 185 μm . Došlo tedy ke zhoršení zhruba o 7,5 %.

Po úpravě vložení protékaného potrubí chladicí emulzí s uvažovanou teplotou 25 °C hodnota vzájemného posuvu vřetene klesla na 195 μm , což je stále zhoršení hodnoty posuvu oproti výchozí variantě o 5,5 %.

Následující úpravou přidáním bloku materiálu pod vanu stolové jednotky došlo k posunutí křivky pro tuto úpravu v grafu na Obr. 82 pod křivku výchozí varianty. A hodnota vzájemného posuvu vřeten klesla na hodnotu 173 μm , čímž se od úpravy vytvořením potrubí zlepšila o 14 %.



Obr. 82: Zhodnocení srovnání výchozí varianty a variant veškerých zavedených úprav

Poslední úpravou bylo posunutí vnějšího svodového potrubí ze středu lože, čímž došlo oproti předešlé úpravě ke zlepšení pouze o 1 %. Hodnota vzájemného posuvu klesla na 171,5 μm .

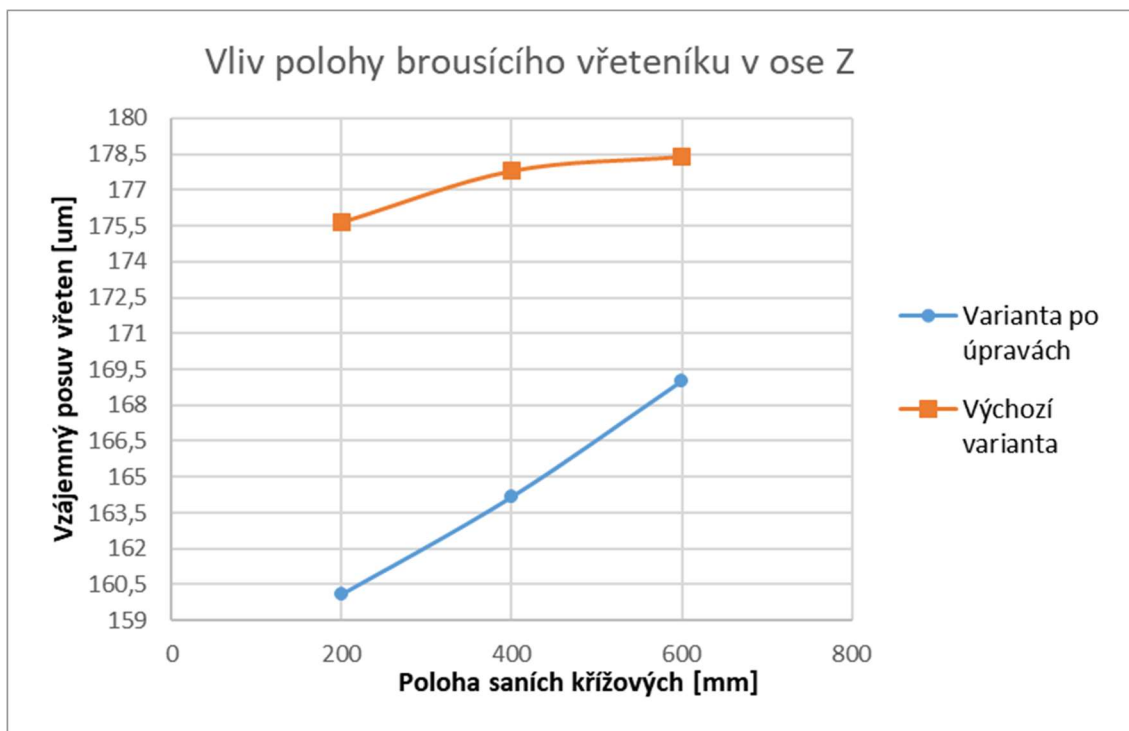
Všemi zavedenými úpravami byl vzájemný posuv vřeten zlepšen cca o 8 %.

10.6 Vliv polohy brousícího vřetene v ose Z po zavedení veškerých variant úprav

Stejně jako bylo v kapitole 12.4 vypracováno vyhodnocení vlivu polohy brousícího vřetene v ose Z, byly tento vliv vyhodnocen i po zavedení veškerých variant úprav.

V grafu na Obr. 83 je zobrazena závislost vzájemného posuvu aktivního brousícího vřetene a unášecího vřetene ve směru osy X na poloze saní křížových ve směru osy Z výchozí varianty (oranžová křivka) a varianty po

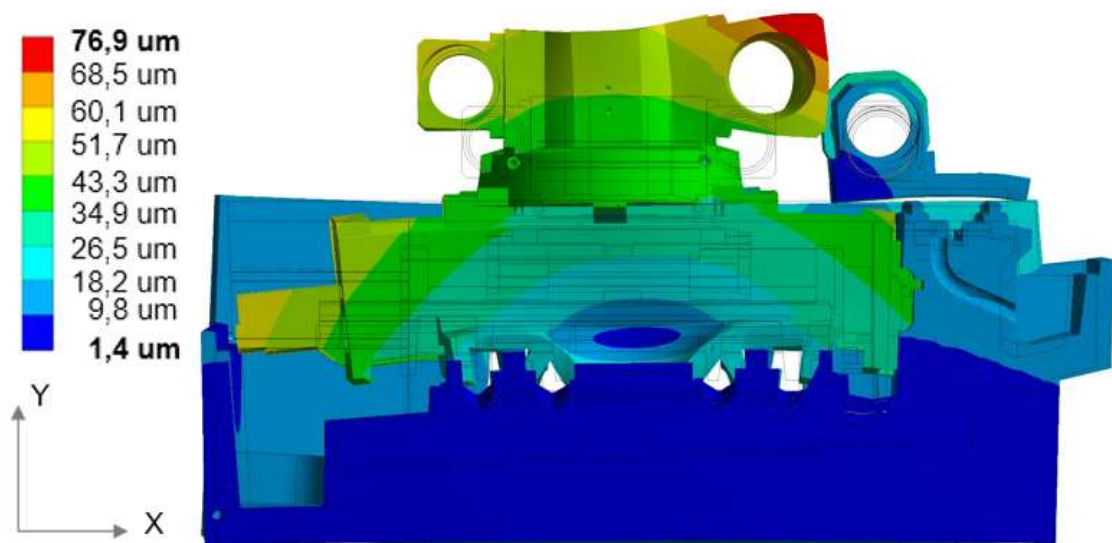
úpravách (modrá křivka). Z grafu je patrné, že po provedených úpravách je model citlivější na posuv v poloze osy Z. V ideálním případě by byla křivka konstantní přímkou.



Obr. 83: Vliv polohy brousícího vřeteníku v ose Z výchozí varianty a varianty po úpravách modelu

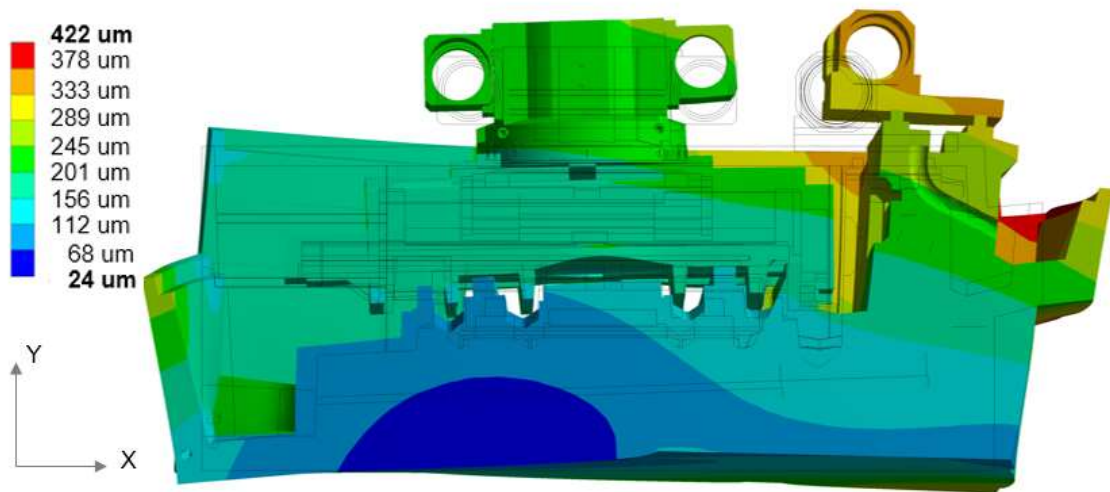
11 Diskuse výsledků

V první řadě byl vytvořen takový model, ve kterém OP ze stavu 1.1. a stavu 1.2. simulovaly tzn. variantu bez oplachu. Cílem vytvoření varianty bez oplachu bylo zkoumání vlivu vnitřních tepelných zdrojů, jako jsou motory pohybových os atd., na konstrukci stroje. Při OP ze stavu 1.2. dochází k symetrické expanzi vřeteníku, aktivního brousícího vřetene a prohýbání konzole stolové jednotky, viz Obr. 84.



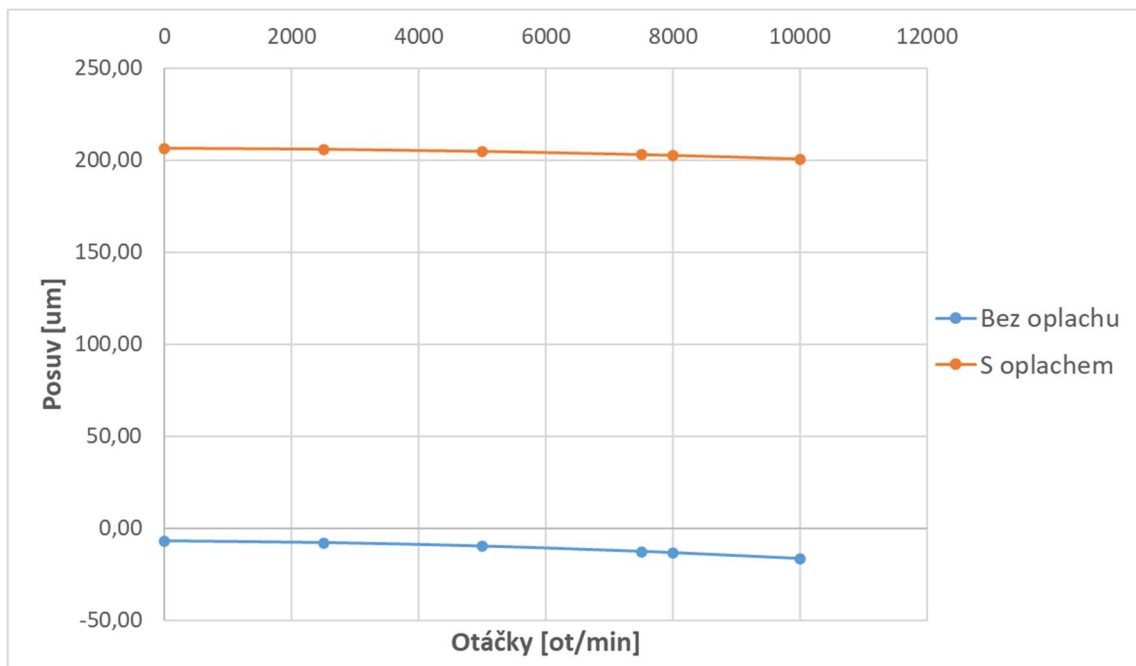
Obr. 84: Ukázka expanze vřeteníku, aktivního brousícího vřetene a prohýbání konzole

Následně byly k OP ze stavu 1.2. a stavu 2.2. přidány OP simulující oplach aktivních brousících vřeten, čímž byl zmírněn jev expandujícího aktivního brousícího vřetene směrem do místa obrábění. Na druhou stranu byly zadány i podmínky simulující působení řezné kapaliny na lože stroje. Vlivem vysoké teploty řezné kapaliny došlo k vyvrácení stolové části lože včetně vany směrem k obsluze (Obr. 85), čímž došlo k desetinásobnému zvětšení úhlu naklonění obrobku z hodnoty $0,3 \frac{\mu m}{m}$ na hodnotu $3,2 \frac{\mu m}{m}$.



Obr. 85: Ukázka vyvracení stolové jednotky a vany lože

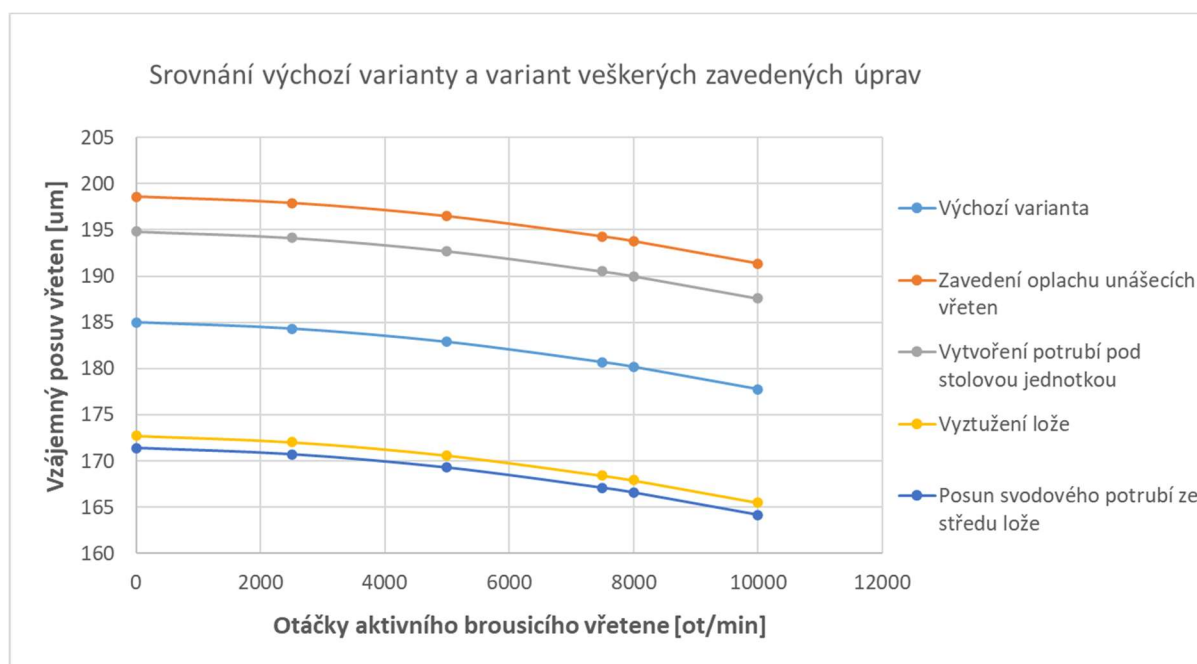
Na grafu v Obr. 86 je porovnání těchto dvou variant s oplachem a bez oplachu. Modrá křivka leží pod nulou, přičemž záporné hodnoty znamenají relativní posuv brousícího kotouče směrem do řezu. Oproti variantě s oplachem (oranžová křivka) jsou hodnoty vzájemného posuvu malé. Jelikož je křivka varianty s oplachem v kladných číslech, znamená to, že dochází k relativnímu posuvu vřeten směrem od sebe.



Obr. 86: Porovnání grafů vzájemných posuvů brousícího a unášecího vřetene

Z grafu je patrné, že se vlivem vysoké teploty řezné kapaliny stala problematickou stolová část lože. Z toho důvodu byly návrhy optimalizačních řešení zaměřeny na tuto část stoje.

První úpravou bylo zavedení OP oplachu unášecích vřeten. Při nulových otáčkách aktivního vřetene je hodnota vzájemného posuvu 199 μm (Obr. 88). Oproti výchozí variantě (oranžová křivka z Obr. 87) došlo ke zhoršení o 7,5 %. Druhou úpravou bylo vložení potrubí protékající chladicí emulzí do stolu lože. Hodnota vzájemného posuvu klesla na 195 μm , což je stále zhoršení oproti hodnotě výchozí o 5,5 %. Předposlední úpravou bylo vyztužení lože pod vanou, kdy díky této úpravě klesla hodnota vzájemného posuvu vřeten na 173 μm , čímž došlo ke zlepšení o 8,5 %. Poslední úpravou bylo posunutí vnějšího svodového potrubí ze středu stojanu do krajů lože. Hodnota vzájemného posuvu vřeten klesla na 171,5 μm , což je oproti předchozí variantě zlepšení jen o 1 %.



Obr. 87: Srovnání výchozí varianty a zavedených úprav

12 Závěr

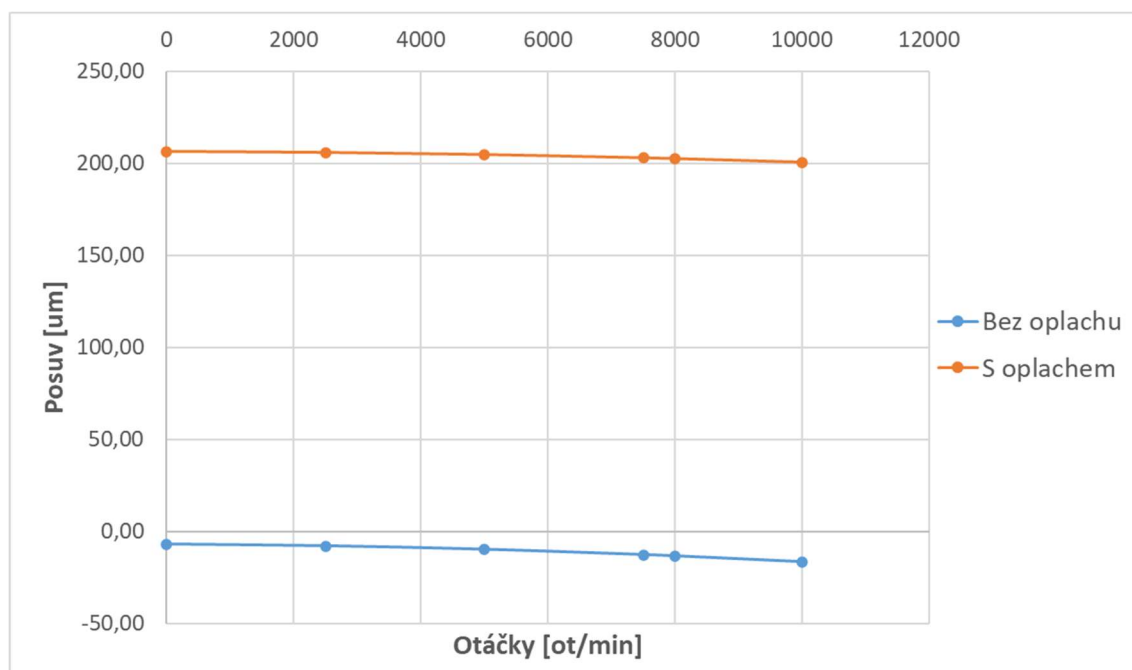
Tato práce se zabývala teplotně-mechanickým chováním obráběcích strojů a využití MKP v obráběcích strojích. V teoretické části byly popsány zdroje tepla a v návaznosti na ně byly popsány způsoby sdílení tepla. Dále se rešerše věnuje teplotně-mechanickému chování OS včetně možností minimalizace teplotních deformací. A v neposlední řadě je část rešerše věnována základům MKP a teoretickému základu teplotně-mechanických úloh.

Vědomosti nabyté vytvářením rešerše byly použity při sestavování teplotně-mechanického modelu stroje.

V první řadě bylo nutné udělat rozbor fyzického stroje a získat veškeré podklady týkající se tepelných zdrojů nebo propadů stroje, aby mohly být vypočteny OP k použití pro teplotní úlohu. Současně s podklady byl získán CAD model stroje, jehož tělesa musela projít řadou úprav, aby mohl být model nahrán do prostředí ANSYS Workbench. V tomto prostředí byl jako první jednotlivým tělesům přiřazen patřičný materiál, velikost nejdelší hrany prvku pro vytvoření sítě a modelování spojů mezi jednotlivými tělesy. Dále byly vytvořeny čtyři stavy OP, které byly přiřazeny připraveným plochám a byly spouštěny podle počítané varianty a stavu.

Důležitým krokem bylo přidání remote pointů do os rotace všech vřeten. U vřeten brousících RP představoval místo středu brousícího kotouče a u vřeten unášecích představoval místo upnutí obrobku. Díky RP bylo možno získávat informace o deformaci těchto bodů (posuvu v osách i rotaci kolem os). Tyto hodnoty byly vpisovány do připravených tabulek v excelu. Zde byl vytvořen výpočet pro zjištění vzájemného posuvu aktivního brousícího vřetene a vřetene unášecího. Pokud by byla hodnota vzájemného posuvu nulová, byla obě vřetena ve své nedoformované poloze. V okamžiku, kdy se hodnoty dostaly pod nulu, znamenalo to, že se obě vřetena naklápí k sobě a dochází tak k nechtěnému většímu úběru materiálu. V případě, kdy byly hodnoty kladné, znamenalo to odklon vřeten od sebe.

Všechny kroky popsány výše vedly k naplnění prvního vytyčeného cíle, kterým byla „analýza teplotních deformací výchozí varianty stojanu stroje hrotové brusky“. Z analýzy teplotních deformací výchozí varianty stroje byla „identifikována místa kritických prostorových deformací“, což bylo druhý cílem. Očekávání byla taková, že nejkritičtějším místem bude aktivní brousicí vřeteno, kdy vlivem zvyšujících se otáček bude docházet k expanzi směrem do místa řezu. Tato domněnka se opravdu potvrdila a při zvyšujících se otáčkách se vřeteno opravdu posouvá směrem do řezu, což je vidět i na grafu uvedeném v Obr. 88. Problematictější místem se, po zadání OP pro variantu s oplachem, stala stolová část lože, která se vlivem působení vysoké teploty řezné kapaliny, deformuje a vyklání se společně s vanou směrem k obsluze stroje. Jak je vidět z grafu na oranžové křivce, expanze aktivního brousicího vřetene je najednou zanedbatelné oproti hodnotě odklopení vřeten od sebe vlivem vyvrácení stolu lože.

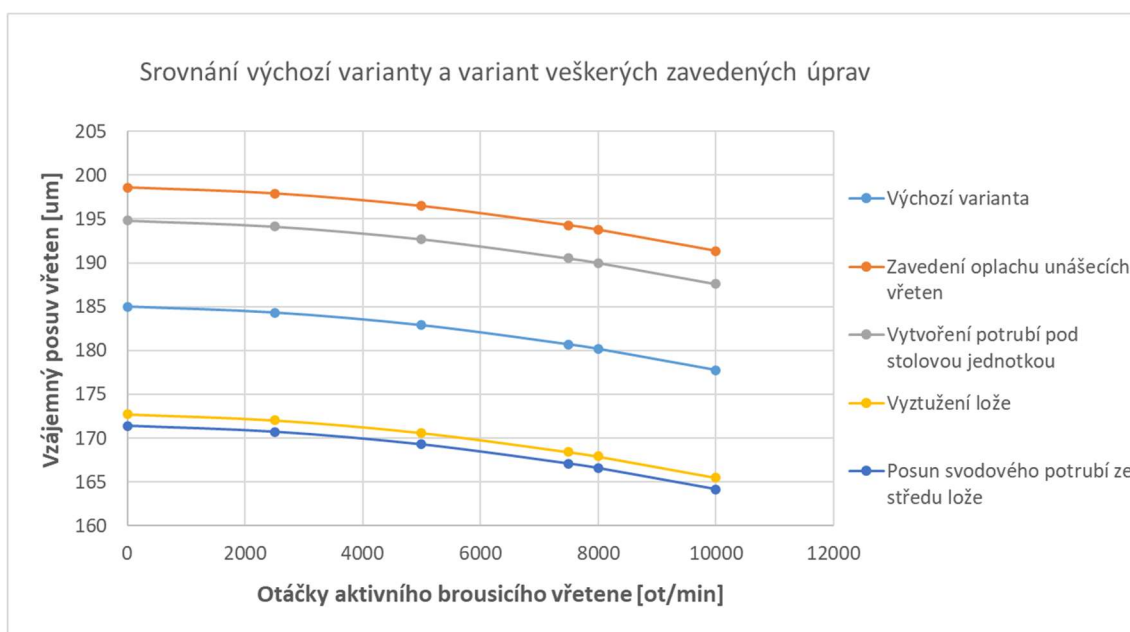


Obr. 88: Srovnání křivek vzájemných posuvů vřeten variant s a bez oplachu

Logicky dalším cílem diplomové práce byl „návrh optimalizačních opatření“. Byly vytvořeny čtyři návrhy úprav optimalizačních opatření. Prvním bylo přidání OP teploty oplachu unášecích vřeten, druhým vložení potrubí do stolu lože s přiřazením OP teploty chladící emulze na stěnách potrubí, třetím návrhem bylo vyztužení lože stroje pod vanou vyvracející se směrem

k obsluze a posledním návrhem bylo přesunutí vnějšího svodového potrubí ze středu lože na jeho okraj. Všechny tyto návrhy byly vypracovány, byly odečteny hodnoty posuvů RP pro jednotlivá vřetena a stejným způsobem jako u variant s oplachem a bez oplachu byl proveden výpočet vzájemného posuvu vřeten pro jednotlivé návrhy.

Posledním cílem této diplomové práce byla „analýza návrhů optimalizačních opatření“. Jelikož z identifikace kritických míst vyplynulo, že kritický stav nastává při přidání OP pro variantu s oplachem, byly všechny návrhy optimalizačních řešení srovnávány pouze s výchozí variantou modelu, která tyto OP zahrnovala. Srovnání křivek vzájemného posuvu vřeten jednotlivých úprav s variantou výchozí je vidět v grafu na Obr. 89.



Obr. 89: Srovnání křivek vzájemného posuvu vřeten jednotlivých úprav s variantou výchozí

Ze srovnání jednotlivých křivek vyplývá, že zavedením prvního návrhu došlo ke zvětšení vzdálenosti, kterou mezi sebou vřetena vzájemně mají. Tento jev nastává kvůli prohnutí konzole a tím vyklopením unášecího vřetene směrem od místa řezu. Druhý návrhem bylo vytvoření protékaného potrubí ve stole lože. Tato úprava vedla k tomu, že se deformace stolu zmenšila v ose Y na deformaci v ose X však tato úprava až tak velký vliv neměla. Největší pozitivní změnu přinesla úprava předposlední, kdy bylo provedeno vyztužení lože pod vanou. Poslední úpravou bylo přesunutí vnějšího svodového

potrubí ze středu lože, aby nedocházelo k soustředění tepelných zdrojů ve středu lože. To vedlo k rovnoměrnějšímu rozložení deformačního pole a ke snížení vzdálenosti vzájemného posuvu vřeten. Největší dílčí zlepšení přineslo vyztužení lože pod vanou.

Použitá literatura a zdroje

- [1] Mayr J., Jdrzejewski J., Uhlmann E., et al, *Thermal issues in machine tools*, CIRP Annals – Manufacturing Technology 61, 2012, p. 771-791
- [2] ITŌ, Y. *Thermal deformation in machine tools*. New York: McGraw-Hill, c2010. ISBN 9780071635172.
- [3] LI, Yang, Wanhua ZHAO, Shuhuai LAN, Jun NI, Wenwu WU a Bingheng LU. *A review on spindle thermal error compensation in machine tools*. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 2015, 95(99), 20–38. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2015.04.008
- [4] SULITKA, Matěj. *Teplotně-mechanické úlohy. Lineární vazby*. Praha: RCMT, 2021.
- [5] HANZAL, Jiří. *Metody kompenzace teplotní chyby obráběcího stroje*. Brno: VUT v Brně, 2017.
- [6] HOREJŠ, Otakar a Martin MAREŠ. *Teplotně-mechanické chování strojů z pohledu konstrukce, modelování a měření*. Praha: RCMT, 2019.
- [7] Vedení – kondukce tepla. Techmania eduportal [online]. 2007 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/strukturalatek/vnitri-energie/vedeni-kondukce-tepla>
- [8] MORAVEC, J. *Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v programu SYSWELD*. Liberec, 2008. Disertační práce. TUL.
- [9] Speciální technika pro zajištění efektivitu výroby. Engineering [online]. [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/automatizacia-robotizacia/2917-specialni-technika-pro-zajisteni-efektivitu-vyroby>
- [10] Weck M., McKeown P., Bonse R., Herbst U., *Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools, Annals of the CIRP*, Vol. 44, 1995, p. 589-598
- [11] Mekid S., Jdrzejewski J., *Thermal problems in Machine Tools Design and Operation, Introduction to Precision Machine Design and Error Assessment*, CRC Press, Boca Raton, 2009
- [12] Přesné a účinné chlazení pro obráběcí stroje. MM průmyslové spektrum [online]. 2017 [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/presne-a-ucinne-chlazenipro-obrabeci-stroje>
- [13] Caged technology. Tokyo: THK CO. Dostupné z: https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/268-5CZ.pdf
- [14] 8 důvodů proč zvolit soustruh Mori Seiki série NL [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7091278-NI-serie-cnc-soustruh-8-duvodu-proc-zvolit-soustruh-mori-seiki-serie-nl.html>

- [15] Energeticky úsporné chlazení obráběcích strojů [online]. 2013 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/energeticky-uspodne-chlazení-obrabečích-stroju>
- [16] TC76 Kompaktní dotyková sonda pro broušící a soustružnická centra [online]. 2013 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.blumnovotest.com/cz/vyrobyky/merici-komponenty/sondy/tc76/>
- [17] SULITKA, Matěj. *Úvod do využití MKP v modelování OS*. Praha: RCMT, 2021.
- [18] SULITKA, Matěj. *Rotační vazby. Procesing, postprocesing*. Praha: RCMT, 2021.
- [19] Why extreme heat turns train tracks into spaghetti [online]. 2019 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com/why-train-tracks-buckle-in-extreme-heat-2013-7>
- [20] ČSN ISO 230–3: *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 3: Určení tepelných vlivů*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [21] Řešení tepelných deformací obráběcích strojů [online]. 2013 [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/reseni-tepelných-deformací-obrabečích-stroju>
- [22] BRYAN, J. *International Status of Thermal Error Research (1990)*. CIRP Annals [online]. 1990, 39(2), 645-656 [cit. 2022-01-08]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)63001-7
- [23] Machine tools with high thermal stability [online]. [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.framag.com/zh/products/test-rigs/thermo-stability-4784.html?fbclid=IwAR08MEo8NN4GUhaiHGb6XMIgRh6larHmXu24oFDe1YpoRUlqb35j1UZ21qg>
- [24] JUNKER: partner for precision [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://www.junker-group.com/cs/broušící-stroje/products/jucrank/>
- [25] Návrhy optimalizace strukturálně mechanických vlastností vybraných skupin stavby soustruhů. Praha, 2020. Diplomová práce.
- [26] LAŠOVÁ, V. *Základy stavby obráběcích strojů*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2012
- [27] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV*. MM publishing, Praha, 2018
- [28] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2006
- [29] ŠPANIEL, M., HORÁK, Zd.: *Úvod do metody konečných prvků*. Česká technika-nakladatelství ČVUT, Praha, 2011
- [30] ERWIN JUNKER GRINDING TECHNOLOGY a.s., Holice
- [31] MORÁVEK, Petr. *Experimental Determination of Thermal Resistance Across Linear Guideways*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT.
- [32] Houpert, L. *Ball bearing and tapered roller bearing torque: Analytical, numerical and experimental results*. 2002. 57th STLE annual meeting. Houston.
- [33] RCMT ČVUT Praha

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení teplotních vlivů.....	13
Obr. 2: Rozložení ztrátového tepla [2]	14
Obr. 3: Diagram ukazující komplexnost problematiky [6]	15
Obr. 4: Tabulka s měrnou tepelnou vodivostí [7]	16
Obr. 5: Součinitel přestupu tepla α [8]	17
Obr. 6: Termosnímek motorů [9].....	18
Obr. 7: Teplotní pole vertikální frézky [17]	19
Obr. 8: Pole posuvů vertikální frézky [17]	20
Obr. 9: Dotyková sonda [16]	21
Obr. 10: Vliv tepelného zdroje na nesymetrické uspořádání stroje [4]	23
Obr. 11: Vliv umístění olejového chladiče [14].....	23
Obr. 12: Část stojanu z polymerního betonu s ocelovými inserty	24
Obr. 13: Chlazení vřetenové jednotky [14].....	25
Obr. 14: Princip nepřímé kompenzace [6].....	27
Obr. 15: Teplotní stabilita různých materiálů [23].....	28
Obr. 16: Junker JUCRANK 6S [24].....	31
Obr. 17: Proces broušení [24].....	32
Obr. 18: Různá provedení čepů klikových hřídelů [24].....	32
Obr. 19: Možné konfigurace nástrojové hlavy [24].....	33
Obr. 20: Model hrotové brusky [30].....	34
Obr. 21: Lože a saně křížové (osa Z)	35
Obr. 22: Komponenty osy X.....	36
Obr. 23: Jednotky pohybové osy B	37
Obr. 24: Ukázka umístění brousicích vřeten	38
Obr. 25: Stolová jednotka.....	38
Obr. 26: Model protékaného lože před zjednodušením [30].....	40
Obr. 27: Model protékaného lože po zjednodušení.....	41
Obr. 28: Materiálový list polymerbetonu [30]	42
Obr. 29: Materiálové hodnoty pro ocel z knihovny Ansys	42
Obr. 30: Použitý prvek SOLID187 [4]	43
Obr. 31: Síť výpočtového modelu.....	44
Obr. 32: Vazba typu BUSHING [25].....	44

Obr. 33: Hodnoty teplotních odporů v závislosti na typu lineárního vedení [31].....	45
Obr. 34: Vytvořený command na daném kontaktu	46
Obr. 35: Vytvoření commandu ve Static Structural.....	46
Obr. 36: Brousící vřeteno s vyznačeným remote pointem.....	48
Obr. 37: Rozdělení teplotních okrajových podmínek.....	48
Obr. 38: Závislost rychlosti osy X na natočení osy C [30].....	49
Obr. 39: Graf závislosti ztrátového výkonu ložiska na otáčkách [33].....	52
Obr. 40: Okrajové podmínky teploty.....	53
Obr. 41: Okrajové podmínky konvekce	54
Obr. 42: Místa působení řezné a chladící kapaliny	57
Obr. 43: Pole posuvů stroje při OP ze stavu 1.1.	60
Obr. 44: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 1.1.	61
Obr. 45: Pole posuvů řezu stojanem při OP ze stavu 1.2. a 10000 <i>otmin</i> aktivního brousícího vřetene.....	62
Obr. 46: Měřené vzájemné posunutí os vřeten.....	62
Obr. 47: Vzájemný posuv brousícího a unášecího vřetene v ose X (stav 1.2.)	63
Obr. 48: Pole posuvů stroje při OP ze stavu 2.1. červeně osa obrobku.....	64
Obr. 49: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 2.1.	64
Obr. 50: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 2.2.	65
Obr. 51: Vzájemný posuv brousícího a unášecího vřetene v ose X (stav 2.2.)	65
Obr. 52: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 1.2. (srovnání).....	66
Obr. 53: Pole posuvů řezu strojem při OP ze stavu 2.2. (srovnání).....	67
Obr. 54: Porovnání grafů vzájemných posuvů brousícího a unášecího vřetene	67
Obr. 55: Zobrazení poloh tří poloh po posunutí z výchozí varianty	68
Obr. 56: Závislost vzájemného posuvu vřeten ve směru X na poloze saních křížových v ose Z	69
Obr. 57: Teplotní pole lože pro OP ze stavu 2.2.	69
Obr. 58: Teplotní okrajová podmínka oplachu.....	70
Obr. 59: Úprava vložení potrubí s chladící emulzí.....	71
Obr. 60: Návrh potrubí s chladící emulzí včetně svodového potrubí.....	71

Obr. 61: Řez původní variantou lože	72
Obr. 62: Řez modelem po přidání bloku materiálu a vytvoření vybrání	73
Obr. 63: Výchozí varianta umístění potrubí.....	74
Obr. 64: Návrh úpravy posunutím potrubí.....	74
Obr. 65: Řez polem posuvů výchozí varianty stroje	75
Obr. 66: Řez polem posuvů po zavedení OP oplachu unášecích vřeten.....	76
Obr. 67: Srovnání závislosti výchozí varianty a varianty zavedení oplachu unášecích vřeten	76
Obr. 68: Řez polem posuvů po úpravě vložením potrubí protékaného emulzí	77
Obr. 69: Srovnání výchozí varianty, zavedení oplachu a varianty modelu po vytvoření potrubí pod stolovou jednotkou	78
Obr. 70: Řez teplotním polem s OP teploty 25 °C	79
Obr. 71: Řez teplotním polem s OP teploty 20 °C	79
Obr. 72: Řez teplotním polem s OP teploty 15 °C	80
Obr. 73: Závislost vzájemné polohy brousicího a unášecího vřetene na poloze saních křížových	80
Obr. 74: Řez polem posuvů výchozí varianty lože	81
Obr. 75: Řez polem posuvů upravené varianty lože přidáním bloku materiálu	81
Obr. 76: Srovnání výchozí varianty, zavedení oplachu, varianty modelu po vytvoření potrubí pod stolovou jednotkou a varianty po přidání bloku materiálu pod vanu.....	82
Obr. 77: Teplotní pole výchozí varianty lože	83
Obr. 78: Teplotní pole lože po veškerých úpravách	83
Obr. 79: Pole posuvů výchozí varianty lože	84
Obr. 80: Pole posuvů lože po veškerých úpravách.....	84
Obr. 81: Srovnání výchozí varianty a variant veškerých zavedených úprav .	85
Obr. 82: Zhodnocení srovnání výchozí varianty a variant veškerých zavedených úprav	86
Obr. 83: Vliv polohy brousicího vřeteníku v ose Z výchozí varianty a varianty po úpravách modelu	87
Obr. 84: Ukázka expanze vřeteníku, aktivního brousicího vřetene a prohýbání konzole.....	88

Obr. 85: Ukázka vyvracení stolové jednotky a vany lože.....	89
Obr. 86: Porovnání grafů vzájemných posuvů brousícího a unášecího vřetene	89
Obr. 87: Srovnání výchozí varianty a zavedených úprav.....	90
Obr. 88: Srovnání křivek vzájemných posuvů vřeten variant s a bez oplachu	92
Obr. 89: Srovnání křivek vzájemného posuvu vřeten jednotlivých úprav s variantou výchozí.....	93

Seznam tabulek

Tabulka 7.1: Velikosti hran prvků sítě jednotlivých těles	43
Tabulka 7.2: Matice tuhosti lineárního vozíku velikosti 30	45
Tabulka 7.3: Matice tuhosti patky.....	47
Tabulka 7.4: Hodnoty lineárního motoru LMFA 44	50
Tabulka 7.5: Hodnoty OP stavu 1.1.	55
Tabulka 7.6: Hodnoty OP stavu 1.2.	56
Tabulka 7.7: Hodnoty OP stavu 2.1.	58
Tabulka 7.8: Hodnoty OP stavu 2.2.	59

Seznam použitého software

ANSYS 2020 R1
GIMP 2. 10.6
Microsoft Excel
SIEMENS NX12

Seznam příloh

Elektronické přílohy

DP_1817_Mullerova.pdf Elektronická verze diplomové práce