



Pracovní charakteristiky a geometrické přesnosti hrotového soustruhu Chevalier FCL 2140

Bakalářská práce

Studijní program: B0715A270008 – Strojírenství

Autor práce: **Daniel Nosek**

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Knápek





Zadání bakalářské práce

Pracovní charakteristiky a geometrické přesnosti hrotového soustruhu Chevalier FCL 2140

Jméno a příjmení: **Daniel Nosek**
Osobní číslo: S19000094
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávací katedra: Katedra obrábění a montáže
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor poznatků o kontrole přesnosti obráběcích strojů.
2. Parametry hrotového soustruhu Chevalier FCL 2140.
3. Kontrola geometrických přesností.
4. Návrh a realizace zkoušky pracovní přesnosti.
5. Měření tuhosti vřetene stroje, kontrola pracovních rozsahů posuvových ústrojí stroje.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků, vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
30 – 40 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. Karafiátová, S., Langer, I. Technologie soustružení. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. ISBN 80-7200-229-2.
2. Pasport soustruhu CHEVALIER FCL 2140.
3. ČSN ISO 1708. Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů. Zkoušky přesnosti. 1992. Praha: Český normalizační institut.
4. ČSN ISO 13041-1. Podmínky zkoušek pro číslicově řízené soustruhy a soustružnická centra – Část 1: Zkoušky geometrické přesnosti strojů s vodorovnou osou obrobkového vřetena. 2005. Praha: Český normalizační institut.

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

4. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

4. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková,
Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

18. 5. 2022

Daniel Nosek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Knápkovi za jeho vstřícný přístup, trpělivost, za vedení při zpracování bakalářské práce a za poskytnutí nových informací a cenných rad. Dále bych rád poděkoval Ing. Arturovi Knapovi za výpomoc při měření. Také bych chtěl poděkovat celé univerzitě a především katedře KOM za možnost, využít přístroje, které jsou zde k dispozici.

Pracovní charakteristiky a geometrické přesnosti hrotového soustruhu Chevalier FCL 2140

Anotace

Práce se zabývá vybráním zkoušek geometrických a pracovních přesností, a také měřením tuhosti vřetena hrotového soustruhu Chevalier FCL 2140, měřením otáček vřetena a kontrolou posuvových ústrojí. Dále provedením vybraných zkoušek, obrobením vzorků na měřeném stroji a vyhodnocením zkoušek, díky kterým lze zjistit obecný přehled o přesnostech tohoto stroje.

Klíčová slova: soustruh, přesnost, tuhost, měření

Working characteristics and geometric accuracy of the Chevalier FCL 2140

Annotation

The work deals with the selection of tests of geometric and working accuracy, as well as measuring the stiffness of the spindle of the Chevalier FCL 2140 center lathe, measuring the spindle speed and checking the feed devices. Furthermore, by performing selected tests, machining samples on the measured machine and evaluating the tests, thanks to which it is possible to find out a general overview of the accuracy of this machine.

Keywords: lathe, accuracy, reliability, measurement

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1318**

Jméno a příjmení: **Daniel Nosek**

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Knápek
Konzultant: Ing. Artur Knap

Počet stran: 67
Počet příloh: 2
Počet tabulek: 19
Počet obrázků: 45
Počet diagramů: 3

Obsah

Seznam zkratek	10
1 Úvod	11
2 Soustružení	12
2.1 Řezné podmínky při soustružení	13
2.2 Řezné materiály	13
2.3 Nástroje	15
2.4 Soustruhy	16
2.4.1 Hrotový soustruh	16
3 Kontrola přesnosti obráběcích strojů	18
3.1 Přímost a rovinnost	19
3.1.1 Přímost	19
3.1.2 Rovinnost	20
3.2 Rovnoběžnost	20
3.3 Kolmost	21
3.4 Souosost	21
3.5 Obvodové házení	22
3.6 Čelní házení	22
3.7 Osová vůle	23
3.8 Osový pohyb	23
4 Parametry hrotového soustruhu Chevalier FCL-2140	24
5 Návrh a metodika zkoušek	26
5.1 Zkoušky geometrické přesnosti	26
5.1.1 Vyrovnání vodících ploch do vodorovné polohy	26
5.1.2 Čelní házení opěrné plochy vřetena	27
5.1.3 Obvodové házení vnější středící plochy vřetena	27
5.1.4 Obvodové házení kuželové dutiny vřetena	28
5.1.5 Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože	28
5.1.6 Kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu	29
5.1.7 Kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou	29
5.1.8 Kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu	30

5.2	Zkoušky pracovní přesnosti	30
5.2.1	Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle	31
5.2.2	Obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle	31
5.3	Měření tuhosti vřetena	32
5.4	Kontrola otáček vřetena a kontrola posuvových ústrojí	32
5.5	Statistické vyhodnocení [16]	33
6	Realizace navržených zkoušek	35
6.1	Zkoušky geometrické přesnosti	35
6.1.1	Vyrovnání vodících ploch do vodorovné roviny	35
6.1.2	Čelní házení opěrné plochy vřetena	37
6.1.3	Obvodové házení vnější středící plochy vřetena	38
6.1.4	Obvodové házení kuželové dutiny vřetena	39
6.1.5	Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože	40
6.1.6	Kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu	41
6.1.7	Kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou	43
6.1.8	Kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu	44
6.2	Zkoušky pracovní přesnosti	45
6.2.1	3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss PRISMO 5	46
6.2.2	Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle	47
6.2.3	Obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle	49
6.3	Měření tuhosti vřetena	51
6.4	Měření otáček vřetena a měření posuvových ústrojí	53
7	Diskuze	56
8	Shrnutí a závěr	60
	Seznam obrázků	62
	Seznam grafů	63
	Seznam tabulek	64
	Literatura	65
	Seznam příloh	67

Seznam zkratek

Ra	aritmetická odchylka profilu
\bar{x}	aritmetický průměr
t	čas [s]
s	dráha [mm]
a_p	hloubka řezu [mm]
x_i	individuální hodnota
HP	koňská síla (z anglického horsepower)
CBN	kubický nitrid boru
σ_a	mez statistického intervalu maximální hodnoty
σ_b	mez statistického intervalu minimální hodnoty
σ_c	mez statistického intervalu rozdílu hodnot
n_m	počet naměřených hodnot
n	počet otáček za minutu [ot.min ⁻¹]
f	posuv [mm.min ⁻¹]
f_{ot}	posuv na otáčku [mm.ot ⁻¹]
D	průměr obrobku [mm]
Rz	průměrná hodnota z absolutních hodnot 5 maxim a minim profilu
A	průřez třísky [mm ²]
p	přísuv [mm.min ⁻¹]
RP	rychloposuv
RO	rychlořezná ocel
v_c	řezná rychlost [mm.min ⁻¹]
F	síla [N]
SK	slinuté karbidy
$\sigma_{\bar{x}}$	střední kvadratická chyba aritmetického průměru
t_s	studentova hodnota
k	tuhost vřetena [N.mm ⁻¹]
σ_{n_m-1}	výběrová směrodatná odchylka

1 Úvod

V současnosti je vysoký požadavek na produktivitu a přesnost v obrábění. Proto je třeba, aby obráběcí stroje byly přesné a výkonné. Pro každý typ obráběcího stroje jsou zhotoveny normy, stanovující zkoušky geometrických a pracovních přesností, kterým musí stroj vyhovovat. Zkoumaný stroj v bakalářské práci je hrotový soustruh Chevalier FCL 2140, který je umístěn v Technické univerzitě v Liberci v budově L - Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace v laboratoři třískových technologií a procesů katedry obrábění a montáže. Kontrole geometrických a pracovních přesností pro daný soustruh přísluší norma ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů - Zkoušky přesnosti [8] a ČSN 20 0306 Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů [9].

Hlavním cílem bakalářské práce je zkontrolovat hrotový soustruh Chevalier FCL 2140 z hlediska jeho přesnosti a spolehlivosti. Tedy vybrání, návrh, provedení a vyhodnocení zkoušek geometrických a pracovních přesností. Dále měření tuhosti vřetena, kontrola otáček vřetena a kontrola posuvových ústrojí. Následně porovnat naměřené hodnoty s hodnotami uvedenými v příslušné normě nebo s technickými daty uvedenými výrobcem stroje. Při výběru zkoušek geometrických a pracovních přesností musí být zohledněno, zda je možné danou zkoušku vykonat s ohledem na vybavenost laboratoře.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První část bakalářské práce je teoretická a obsahuje návrh a metodiku zkoušek geometrických a pracovních přesností, měření tuhosti vřetena, kontroly otáček a kontroly posuvových ústrojí. Druhá část bakalářské práce je praktická a obsahuje realizaci vybraných zkoušek a kontrol, vyhodnocení naměřených dat a porovnání s tolerancemi uvedených v příslušných normách nebo s technickými daty uvedenými výrobcem stroje. Výsledkem bakalářské práce je obecný přehled zjištěných přesností a vlastností zkoumaného soustruhu.

2 Soustružení

Soustružení se řadí mezi třískové obrábění jednobřítým nástrojem pohybujícím se rovnoběžně s osou rotace obrobku upnutého ve sklíčidle, mezi hroty, v kleštině nebo na lící desce. Obrobek zde koná hlavní rotační pohyb a nástroj vedlejší (posuv a přísuv). Při soustružení se převážně obrábí válcové rotační, kuželové nebo tvarové plochy. Vybráním vhodného nástroje lze obrábět vnější i vnitřní plochy. Na stroji, který nazýváme soustruh, dále lze řezat závity, obrábět čelní plochy, vrtat, vyvrtávat, kopírovat tvary podle šablony a v některých případech i frézovat a brousit. Při obrábění jednoho dílu lze použít i více jednobřítých nástrojů najednou, které lze upnout do nožové nebo revolverové hlavy. [3]

Řezná rychlost se při soustružení určuje

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}],$$

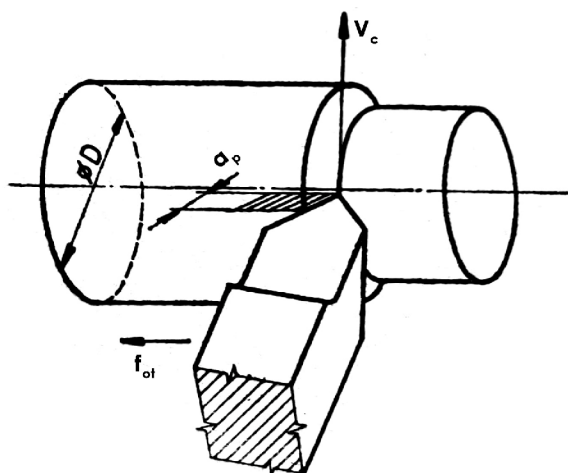
kde D je průměr obrobku [mm],

n - počet otáček obrobku za minutu,

v_c - řezná rychlost [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$].

Posuv na otáčku f_{ot} [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$] a hloubka řezu a_p [mm] určují průřez třísky (obr. 1)

$$A = f_{ot} \cdot a_p \quad (\text{mm}^2).$$



Obr. 1 Základní řezné parametry při soustružení [1]

2.1 Řezné podmínky při soustružení

Velikost řezné rychlosti používané při soustružení závisí převážně na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, na velikosti průřezu odřezávané třísky, na řezivosti materiálu nástroje a na trvanlivosti nástroje. Velikost posuvu závisí hlavně na požadované drsnosti obrobené plochy, na velikosti a tuhosti obrobku. S přihlédnutím na tato hlediska se posuv volí co největší, aby strojní čas byl co nejmenší. Hloubka řezu je zvolena hlavně podle způsobu obrábění, mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu a tuhostí obrobku. Rovněž se volí co největší, z důvodu zkrácení strojního času. [1]

2.2 Řezné materiály

Aby byl obráběcí nástroj schopen produktivně pracovat, musí mít řezný materiál následující vlastnosti:

- vysokou tvrdost,
- dostatečnou houževnatost,
- stálost tvaru a rozměrů.

Nástroj z řezného materiálu musí mít větší tvrdost, než má obráběný materiál. Důležité je, aby tvrdost nástroje byla stálá i během obrábění, kdy se mechanická energie přeměňuje na teplo. Vzniklé teplo se odvádí do třísky, obrobku, prostoru a nástroje. Chlazením místa řezu lze docílit stálosti teploty a mechanických vlastností nástroje. Dále aby nástroj nebyl poškozený rázovým zatížením, musí mít dostatečně velkou houževnatost. Ta však při větší tvrdosti klesá, takže je třeba hledat kompromis mezi tvrdostí a houževnatostí.

Řezný materiál lze rozdělit podle použití, vlastností a složení na:

- nástrojová ocel (uhlíková ocel, legovaná ocel, vysokolegovaná ocel),
- slinutý karbid,
- řezná keramika,
- cermety,
- velmi tvrdé materiály (diamant a kubický nitrid boru). [4]

Popis nejpoužívanějších řezných materiálů

Nástrojová ocel

Uhlíková ocel má obsah uhlíku od 0,5 do 1,5 %, která po zakalení získá martenzitickou strukturu. Používá se do teplot, kdy nedojde k rozpadu martenzitu, tj. přibližně

do 250 °C. Řezná rychlost u uhlíkových ocelí bývá okolo 6 - 12 m.min⁻¹.

Používá se u nástrojů, kde není potřeba velká řezná rychlost a nedochází k velkému ohřátí nástroje. Zpravidla pro ruční nástroje jako jsou pilníky, sekáče atd.

Legovaná ocel má lepší mechanické vlastnosti než uhlíková ocel, z důvodu přidání legur (Mo, Ni, W, V, Mn, Cr atd.), které tvoří karbidy. Lze použít do teplot 300 - 400 °C a řeznou rychlost od 6 - 18 m.min⁻¹. Využívá se opět pro ruční obrábění.

Vysokolegovanou ocel, označenou jako RO - rychlořeznou ocel, lze použít do teplot až 600 °C a řeznou rychlost od 18 do 90 m.min⁻¹. Tuto ocel už lze použít na vrtáky, soustružnické nože, frézy atd. Tyto vlastnosti lze zlepšit povlakováním karbidem titanu nebo nitridem titanu. [4]

Slinutý karbid

Slinuté karbidy, dále jen SK, jsou tvořeny technologií práškové metalurgie. SK jsou dvoufázové nebo vícefázové a jsou vytvořeny z velmi tvrdých karbidových částí. Základní složkou SK je karbid wolframu WC. Podle dalších přidaných karbidů (TiC, TaC a NbC) lze SK rozdělit do několika skupin. Tyto skupiny jsou dány podle normy ČSN ISO 513:

- skupina K: WC+ Co
- skupina P: WC + TiC + Co
- skupina M: WC + TiC + TaC/NbC+ Co

zde se kobalt (Co) používá jako pojivo.

SK jsou v porovnání s RO tvrdší, otěruvzdornější, mají větší pevnost v tlaku, ale jsou méně houževnaté. Dále mají velmi dobrou tepelnou a teplotní vodivost, která umožňuje velmi dobrý odvod tepla z místa řezu. Proto nástroje vyrobené z SK lze využívat až do teplot 900 °C. Velké využití mají jako vyměnitelné břitové destičky pro soustružnické nože, frézy, vrtáky atd. Dále se ze SK vyrábí monolitní nástroje jako stopkové frézy a vrtáky. [11]

Řezná keramika

Řezná keramika je na bázi anorganické sloučeniny nekovového charakteru, která se zpracovává metodou práškové metalurgie. Výhodou řezné keramiky je vysoká tvrdost i za vysokých teplot, odolnost proti otěru, chemická stálost a příznivá cena. Lze použít do teplot 1200 až 1800 °C při řezné rychlosti až do 1000 m.min⁻¹. Nevýhodou je jejich křehkost, takže obrábění s řeznou keramikou nejlépe provádět nepřerušovaně a bez chvění.

Řeznou keramiku lze rozdělit podle složení na:

- oxidovou keramiku - 99,5 % Al₂O₃,
- směsnou keramiku - směs Al₂O₃ + ZrO₂

- polosměsnou keramiku - směs Al_2O_3 a TiC nebo Al_2O_3 a $\text{ZrO}_2 + \text{TiC}$,
- neoxidovou keramiku - Si_3N_4 . [4]

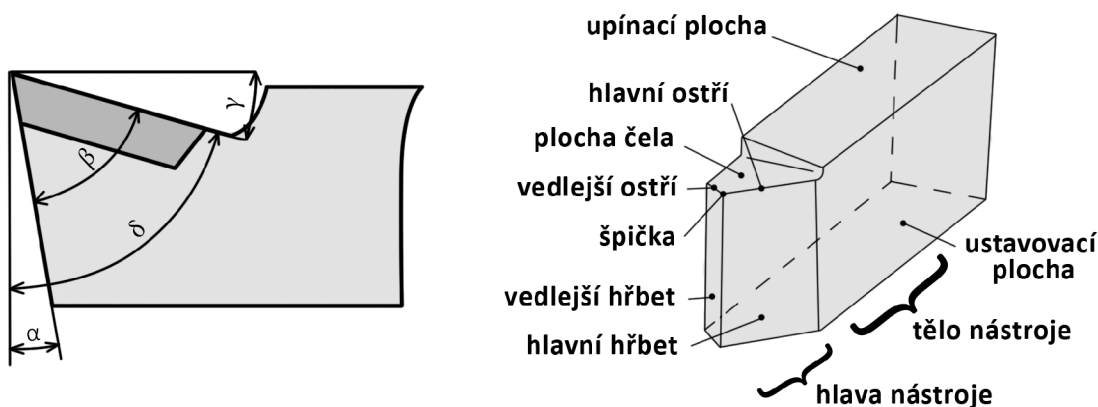
Diamant a syntetické velmi tvrdé materiály

Diamantové nástroje se vyrábějí spékáním diamantového prachu. Jeho hlavní výhodou je vysoká tvrdost. Jeho nevýhodou je slučování se železem a kobaltem při vysokých teplotách. Přírodní diamant se však pro řezné nástroje téměř nepoužívá, z důvodu vysoké ceny.

Mezi syntetické velmi tvrdé materiály se řadí syntetický diamant a kubický nitrid boru. Kubický nitrid boru, dále jen CBN, je materiál, který má velice dobrou tvrdost a otěruvzdornost. Používá se pro velkosériovou výrobu a pro speciální metody obrábění. CBN lze použít až do $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Další výhodou je, že se neslučuje se železem a proto je vhodný pro obrábění pevných a tvrdých ocelí. [4]

2.3 Nástroje

Nástrojem pro technologii soustružení je soustružnický nůž. Vyrábějí se ve velkém množství i v mnoha typech. Řezná část nástroje může být z rychlořezné oceli, sli nutého karbidu, řezné keramiky, diamantu nebo z CBN. Soustružnický nůž můžeme dělit podle použití na uběrací nůž čelní, rohový nůž, uběrací nůž přímý, uběrací nůž ohnutý, hladící nůž, zapichovací nůž, uběrací nůž stranový, naběrací nůž, závitový nůž, rádiusový nůž, vnitřní uběrací nůž, vnitřní nůž rohový, atd. [1]



Obr. 2 Popis soustružnického nože [2]

Soustružnický nůž se skládá z několika prvků (viz obr. 2.). Hlava nástroje musí mít předepsané řezné úhly. Hlavními řeznými úhly jsou úhel čela, úhel řezu, úhel hřbetu a úhel břitu.

Úhel hřbetu α je úhel mezi hlavním hřbetem nože a tečnou k řezné ploše obrobku. Změnou velikosti tohoto úhlu lze ovlivnit tření mezi hlavním hřbetem a řeznou plochou. Čím je větší, tím menší vzniká tření. Bývá v rozsahu od 6° do 10° .

Úhel břitu β je úhel mezi hlavním hřbetem a čelem nože. Velikost úhlu má vliv na odpor, který klade materiál obrobku noži při obrábění. Čím menší je úhel, tím lépe vniká do materiálu. Naopak čím je větší, tím je méně pevný. Bývá v rozsahu od 45° do 90° .

Úhel čela γ je úhel mezi čelem nože a rovinou, procházející hlavním ostřím, která je kolmá k řezné ploše obrobku. Velikost úhlu čela má vliv na směr odchodu třísky a na odpor materiálu proti vnikajícímu břitu nože. Čím je úhel čela větší, tím snadněji odchází tříška po čele nože. Pro měkké materiály se úhel čela volí až 40° , pro tvrdé materiály bývá jen několik jednotek stupňů, případně záporný (negativ).

Úhel řezu δ je úhel mezi čelem a tečnou k řezné ploše obrobku. Jeho velikost je dána součtem úhlu hřbetu a úhlem břitu ($\delta = \alpha + \beta$). Velikost úhlu řezu se volí podle stejné zásady jako pro úhel břitu. Obvykle je menší než 90° . [2]

2.4 Soustruhy

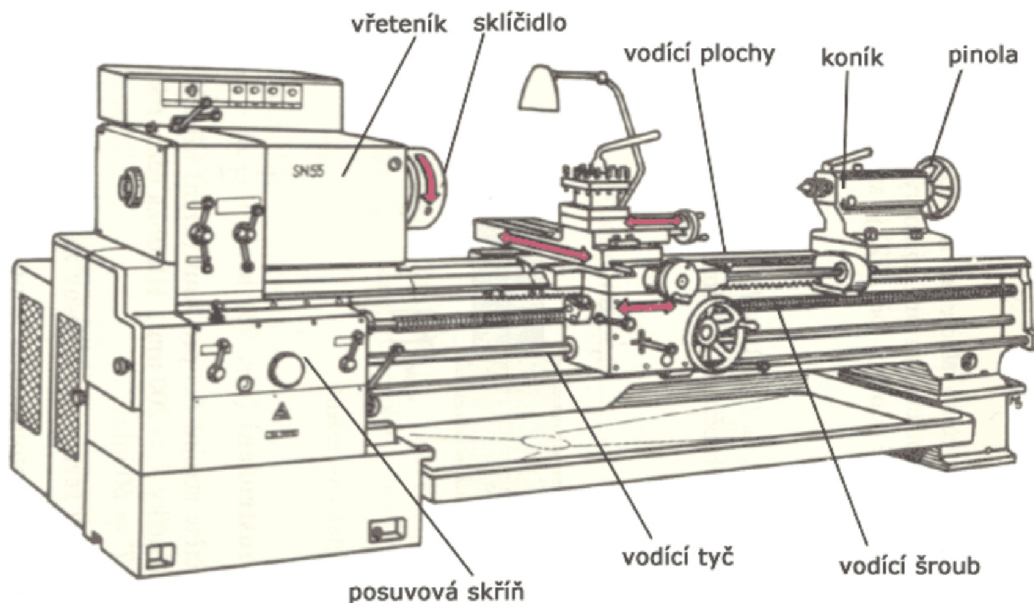
Rámcově lze soustruhy rozdělit na:

- hrotové soustruhy,
- revolverové soustruhy,
- čelní (lící) soustruhy,
- poloautomatické soustruhy,
- svislé soustruhy,
- programově řízené soustruhy,
- speciální soustruhy.

2.4.1 Hrotový soustruh

Hrotový soustruh je nejrozšířenějším soustruhem. Lze ho rozdělit na několik hlavních částí (viz obr. 3):

- vřeteník,
- posuvové ústrojí,
- koník,
- lože,
- suport.



Obr. 3 Hrotový soustruh [2]

Vřeteník je uložen na levém konci vedení lože. Umožňuje rotační pohyb obrobku v obou směrech. Vřeteník se skládá z mnoha součástí, hlavním je vřeteno, čímž je dutý hřídel uložený v ložiskách, které jsou konstruovány tak, aby se zamezilo prohýbání vřetena.

Posuvové ústrojí je umístěno v posuvové skříni ve spodní části soustruhu. Je poháněno hřídelem a výměnnými ozubenými koly. Pohyb hřídele je převáděn na ozubené soukolí v posuvové převodovce. Při změně převodu v posuvové převodovce se mění rychlost posuvu nože při soustružení.

Suport je zařízení, na kterém je umístěna nožová hlava s upnutým soustružnickým nožem. Dále se skládá z podélných saní, příčných saní, nožových saní a z otočné části. Suport umožňuje přiblížení soustružnického nože k obrobku a jeho pohyb při soustružení. Soustružnický nůž se tak může pohybovat rovnoběžně s osou obrobku, kolmo k ose obrobku nebo kombinovaně při obrábění kuželových nebo tvarových ploch.

Koník je uložen na pravém konci vedení lože. Slouží k podpírání dlouhých obrobků. Ve válcové dutině koníku je hrotová objímka, ve které je vsazen upínací hrot. Do hrotové objímky lze také vsadit vrtáky, výhrubníky, výstružníky, či jiné nástroje k vytvoření děr.

Lože je základní část soustruhu, na kterém je uložený koník a suport. Musí být dostatečně tuhé a pevné, aby uneslo ostatní části soustruhu. Je uloženo na dvou nohách. Mezi nohami, pod ložem, se zachytává řezná kapalina a třísky vznikající při obrábění. Na vrchní části lože je vedení pro koník a suport. Po vnitřních vodících plochách se posouvá koník a po vnějších suport. Tyto plochy musí být jemně obrobeny a broušeny a musí se udržovat v čistotě. [12]

3 Kontrola přesnosti obráběcích strojů

Každý obráběcí stroj je nutno po dokončené montáži podrobit zkouškám geometrické a pracovní přesnosti. Stejným způsobem se musí kontrolovat stroje, u nichž lze předpokládat změnu přesnosti buď převozem, nebo jinými vlivy ohrožujícími přesnost stroje.

Dříve, než se přikročí k vlastnímu měření, je třeba provést několik požadavků:

- Stroj se musí ustavit na vhodných základech a vyrovnat do vodorovné polohy v soulase s příslušnými směrnici uvedenými v normách ČSN nebo s pokyny výrobce.
- Stroj musí být úplně smontován (všechny měřicí operace musí být voleny tak, aby nebylo třeba demontovat žádnou součást,
- Tam, kde je předepsáno dodržení určitých úchylek na součástech, jež je nutno měřit odděleně od stroje, je nutno tyto hodnoty změřit a zanést do zápisu o zkoušce přesnosti před smontováním stroje.
- Jednotlivé části stroje mají mít při měření takovou teplotu, jakou mají při normálních pracovních podmínkách, tj. při zatížení a při normálním oběhu mazacího oleje. Zpravidla stačí, aby stroj před měřením běžel přiměřenou dobu naprázdno.
- Při měření má být stroj chráněn před přímým vlivem tepla a slunečních paprsků; rovněž teplota měřících přístrojů má být stabilizována. [10]

Přesnost obráběcího stroje je dána geometrickou přesností a vzájemnou polohou funkčních částí nebo ploch a pohybů na stroji nezatíženém obrobkem nebo odporem rezného nástroje při obrábění. Geometrická přesnost se měří na stroji za klidu nebo při volném chodu naprázdno. U některých druhů strojů se některé části stroje zatěžují, zejména tehdy, má-li se měřením ověřit tuhost stroje. Velikost zatěžujících sil a smysl jejich působení je předepsán pro každý druh stroje v příslušných předpisech.

Výsledky měření geometrické přesnosti se ověřují funkční zkouškou, která záleží v měření zkušebního obrobku obrobeného na zkoušeném stroji. Jsou-li výsledky některých měření geometrické přesnosti rozdílné od výsledků funkční zkoušky, jsou výsledky dosažené funkční zkouškou rozhodující.

Výsledky měření geometrické a funkční přesnosti se dají porovnávat jen tehdy, mají-li obě měření stejnou charakteristiku. V některých případech se měří jen geometrická přesnost, zejména tehdy, je-li funkční zkouška příliš nákladná (např. u strojů s velmi dlouhými vodícími drahami). [5]

Při měření geometrické přesnosti kontrolujeme:

1. přímot (vodících ploch, směru pohybu apod.),
2. rovinnost (stolů, upínacích ploch, vodících ploch),
3. kolmost (upínacích ploch k vodícím plochám nebo osám apod.),
4. rovnoběžnost (vodících ploch, os s vodícími plochami, os mezi sebou apod.),
5. souosost (pracovních vřeten s opěrnými ložisky nebo hrotovými objímkami),
6. čelní házení (čelních opěrných ploch vřeten, upínacích ploch stolů apod.),
7. obvodové házení (středících části vřeten, upínacích hrotů, kuželových dutin apod.),
8. osový pohyb (pracovních vřeten apod.),
9. osovou vůli (tažných a vodících šroubů, hřídelů apod.). [5]

3.1 Přímot a rovinnost

Pojem přímoti a rovinnosti se v technické praxi slučuje. Měření rovinnosti je obdobné jako měření přímoti, jen se neměření v 1D ale ve 2D rozměru. [5]

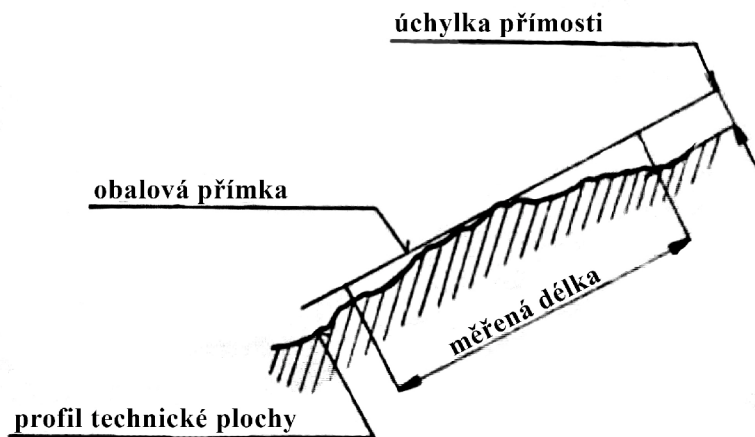
3.1.1 Přímot

Tolerance přímoti je vyhovující, když skutečná přímka leží mezi 2 rovnoběžnými přímkami. Vzdálenost rovnoběžných přímek od sebe je hodnota tolerance přímoti (viz obr. 4). [7]

Přímot lze porovnávat s něčím, co je z technického hlediska vyrobeno co nejdokonaleji. Například s hladinou vody, s břitem vlasového pravítka, napjatou ocelovou strunou, se světelným paprskem apod.

Měřit přímot pomocí vodní hladiny lze dvojm způsobem:

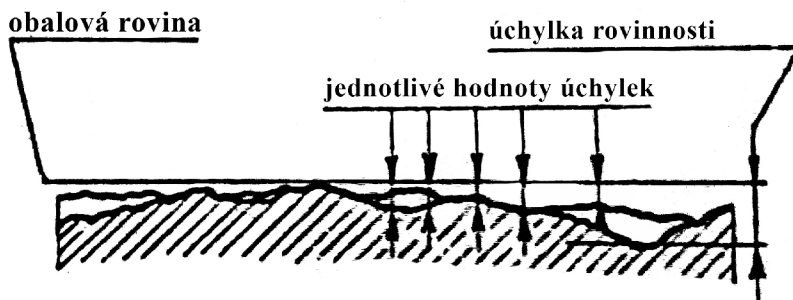
1. Při jednom způsobu pojíždí stojánek úchylkoměru po měřené ploše a dotyk úchylkoměru, opatřený mikrometrickým šroubem, se v pravidelných vzdálenostech spouští na vodní hladinu, takže je možno úchylky přímoti odečítat přímo na úchylkoměru. Úchylkoměr se nahrazuje mikrometrickým šroubem s bubínkem, jehož stupnice má dělení požadované přesnosti.
2. Druhý způsob je založen na porovnání s rovinností vodní hladiny, pomocí vodováhy. Vodováha se pokládá na měřenou rovinu (teoreticky přímku) ve směru zvolené přímky v daném rozsahu. [5]



Obr. 4 Přímost [5]

3.1.2 Rovinnost

Rovinnost lze nadefinovat analogicky. Tolerance rovinnosti je vyhovující, když skutečná plocha leží mezi 2 rovnoběžnými plochami. Vzdálenost rovnoběžných ploch od sebe je hodnota tolerance rovinnosti (viz obr. 5). [7]



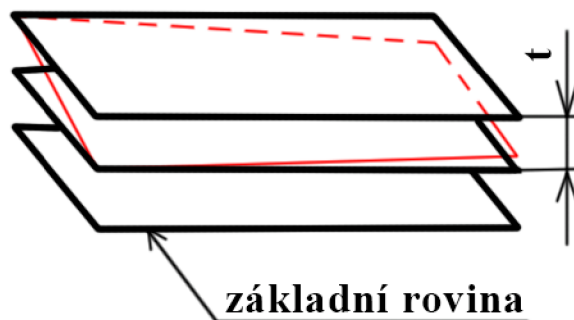
Obr. 5 Rovinnost [5]

3.2 Rovnoběžnost

Tolerance rovnoběžnosti je vyhovující, když měřená plocha leží mezi 2 rovnoběžnými rovinami. Vzdálenost rovin od sebe je hodnota tolerance (viz obr. 6). [7]

V technické praxi se může měřit:

- rovnoběžnost dvou přímek v rovině,
- rovnoběžnost dvou přímek v prostoru,
- rovnoběžnost přímky s rovinou,
- rovnoběžnost dvou rovin. [5]

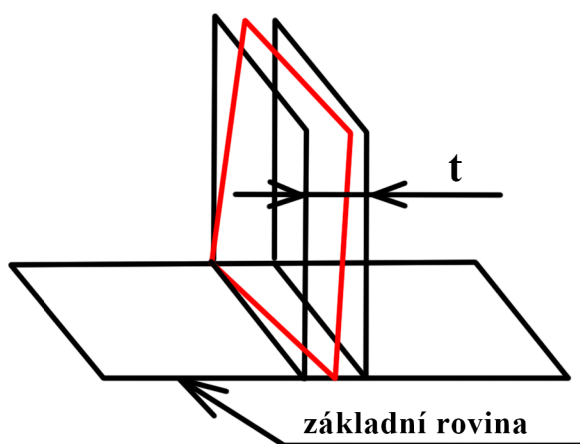


Obr. 6 Rovnoběžnost [7]

U obráběcích strojů se zkoušky rovnoběžnosti týkají především rovnoběžnosti pohybů, rovnoběžnosti funkčních ploch a přímek a os otáčení. Pro měření rovnoběžnosti existuje řada způsobů a přístrojů určených pro konkrétní případ. [13]

3.3 Kolmost

Tolerance kolmosti je vyhovující, když skutečná plocha leží mezi dvěma rovinami kolnými na základní rovinu. Vzdálenost rovnoběžných rovin kolných na základní rovinu je hodnota tolerance (viz obr. 7).

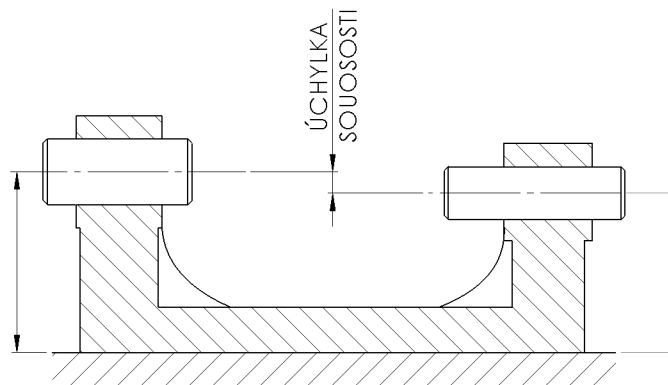


Obr. 7 Kolmost [7]

3.4 Souosost

Měření souososti se provádí pomocí číselníkového úchylkoměru a přesného měřicího trnu. Na jednu z os se upne přesný měřící trn a na druhou z os se upne přípravek s číselníkovým úchylkoměrem, tak, aby jejich osy otáčení byly totožné. Dotek číselníkového úchylkoměru se umístí na válcovou plochu trnu. Osou s číselníkovým

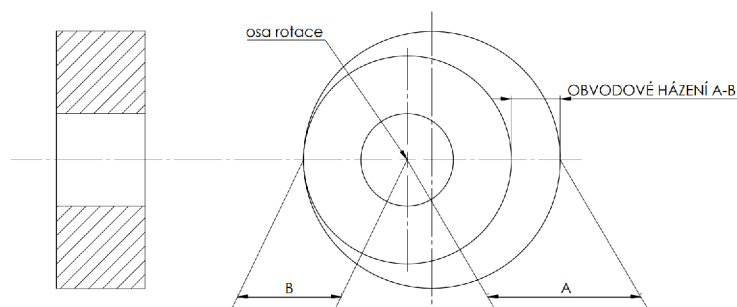
úchylkoměrem se pomalu otáčí. Zjištěné hodnoty jsou dvojnásobkem odchylky souososti (viz obr. 8). Měření je třeba provést ve dvou řezech, kolmých na osu trnu, aby se vyloučila možnost, že měření bylo provedeno v místě, kde se osy protínají. [13]



Obr. 8 Souosost [5]

3.5 Obvodové házení

Obvodové házení je dvojnásobná úchylka souososti za předpokladu, že jedna z obou os je osou rotace (základní osa) a druhá osa je geometrickou osou měřené součásti. Obvodové házení se tedy měří jen u rotačních ploch, a to obvykle číselníkovým úchylkoměrem při otáčení předmětu kolem osy rotace. Měří se v řezech kolmých k ose rotace (viz obr. 9). [5]

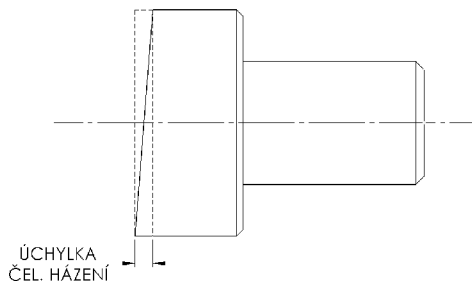


Obr. 9 Obvodové házení [5]

3.6 Čelní házení

Axiální házení čelní plochy otáčející se součásti je způsobeno nerovností plochy, nekolmostí plochy k ose otáčení a periodickým axiálním pohybem. Díky tomu se hodnoty čelního házení zvyšují úměrně s poloměrem, na kterém jsou měřeny. Pro měření se užívá takzvaných lícnicích desek a číselníkových úchylkoměrů. Deska se upne k měřené součásti a dotek číselníkového úchylkoměru se umístí do vhodně zvolené

vzdálenosti od středu otáčení. Vřetenem se pomalu otáčí, hodnoty čelního házení se zaznamenávají v několika bodech v rámci jedné otáčky. Odchylka čelního házení se vyhodnotí jako rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou (viz obr. 10). [13]



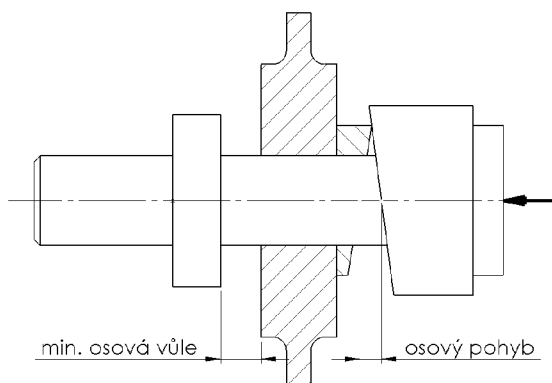
Obr. 10 Čelní házení [5]

3.7 Osová vůle

Osová vůle je nejmenší hodnota vůle, kterou musí mít rotující se součást v ložisku v axiálním směru, aby byl pohyb ještě možný (viz obr. 11). Pohybuje-li se měřená součást ve směru osy, mění se osová vůle v závislosti na poloze součásti vzhledem k opěrnému ložisku. Osová vůle se měří přímo v ose součásti nebo v místech blízkých této ose, a to číselníkovým úchylkoměrem, při čemž se součást střídavě zatěžuje ve směru osy v obou smyslech. Osová vůle se měří zřídka. [5]

3.8 Osový pohyb

Osový pohyb je hodnota, o kterou se rotující se součást posouvá v obou smyslech v axiálním směru během každé otáčky, při čemž vliv osově vůle se vylučuje osovým tlakem působícím v daném smyslu. Osový pohyb se měří číselníkovým úchylkoměrem obvykle v ose otáčející se součástí (viz obr. 11). [5]



Obr. 11 Osová vůle a osový pohyb [5]

4 Parametry hrotového soustruhu Chevalier FCL-2140

Popis stroje

Hrotový soustruh Chevalier FCL-2140 (obr. 12.) lze použít pro soustružení obrobku do průměru 540 mm a do maximální délky 1000 mm. Rozměry stroje jsou 2700 x 1950 x 2040 mm a přibližná hmotnost je 3200 kg. Motor vřetene o výkonu 15 HP může obrábět v rozmezí 27-2250 ot.min⁻¹. Maximální rychlost posuvu v ose X a Z je 5000 mm.min⁻¹ s přesností polohování ±0,005 mm.



Obr. 12 Chevalier FCL-2140

Základní technické data jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Rozměry	
D x Š x V	2700 x 1950 x 2040 mm
Kapacita soustružení	
Oběžný průměr nad ložem:	540 mm
Max. obrobitelný průměr:	540 mm
Oběžný průměr nad suportem:	310 mm
Výška hrotů:	270 mm
Vzdálenost mezi hroty:	1000 mm
Vřeteník	
Otáčky vřetene:	27 - 2250 ot.min ⁻¹
Čelo vřetene:	D1-8
Vrtání vřetene:	85 mm
Kužel ve vřetenu:	1/16
Suport	
Podélný zdvih (osa Z):	850 mm
Příčný zdvih (osa X):	350 mm
Velikost nástroje:	25 mm
Koník	
Průměr pinoly:	75 mm
Zdvih pinoly:	210 mm
Kužel pinoly:	MT#5
Motory	
Motor vřetene:	15 HP
Pohon vřetene:	AC a Inverter
Pohony os (X,Z):	AC Servo
Výkon čerpadla:	1/6 Hp
Posuvy	
Pracovní posuvy (X,Z):	5000 mm.min ⁻¹
Rychloposuvy (X,Z):	5000/8000 mm.min ⁻¹
Přesnost	
Přesnost polohování:	Pod ±0,005 mm
Přesnost opakovaného najetí:	Pod ±0,005 mm
Šířka lože:	350 mm
Nominální celkový výkon:	22 HP
Přibližná hmotnost:	3200 kg

Tab. 1 Technická data [15]

5 Návrh a metodika zkoušek

Zkouškami bude podroben hrotový soustruh Chevalier FCL 2140, který je umístěn v Technické univerzitě v Liberci, budova L, v laboratoři třískových technologií a procesů, katedry obrábění a montáže. Primárním cílem bakalářské práce je vybrání zkoušek geometrických a pracovních přesností dle normy ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů - Zkoušky přesnosti a ČSN ISO 20 0306 Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů. Následně návrh měření tuhosti vřetena stoje dle normy ČSN ISO 2433 Obráběcí stroje a návrh kontroly otáček vřetena. Výběr a provedení zkoušek z norem závisí na vybavenosti laboratoře a z tohoto důvodu mohou být některé zkoušky a jejich postupy upraveny.

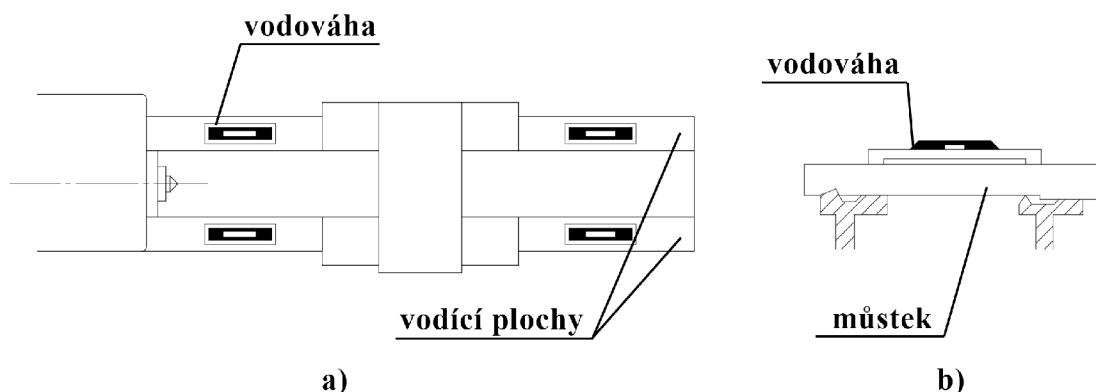
5.1 Zkoušky geometrické přesnosti

Mezi zkoušky geometrické přesnosti univerzálních hrotových soustruhů patří vyrovnání vodících ploch do vodorovné polohy, kontrola přímočarosti pohybu suportu ve vodorovné rovině, kontrola rovnoběžnosti pohybu koníku s pohybem suportu, měření osového pohybu, obvodového házení opěrné plochy vřetena, obvodového házení vnější středící plochy a obvodového házení kuželové dutiny vřetena, kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu a měření obvodového házení upínacího hrotu vřeteníku. Dále je možné měřit geometrickou přesnost hrotů, nožových saní, příčných saní, vodícího šroubu a koníka podle kontroly rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou a kontroly rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu. Z těchto geometrických zkoušek budou vybrány pouze ty, které lze realizovat na měřeném stroji.

5.1.1 Vyrovnání vodících ploch do vodorovné polohy

První zkouška geometrické přesnosti je vyrovnání vodících ploch do vodorovné roviny. Tato zkouška není nutným požadavkem pro obráběcí stroje, ale může usnadnit následná měření, jako je přímota určitých součástí. Vyrovnání vodících ploch do vodorovné roviny lze měřit ve dvou směrech. V podélném směru, kde měření probíhá na obou vodících plochách. Měření je třeba provést ve více polohách rovnoměrně rozložených po celé délce vodící plochy (obr. 13 a)). Měření v tomto směru se ověřuje přímota vodících ploch ve svislé rovině. A v příčném směru, kde je zapotřebí můstek, který leží na obou vodících plochách. Můstek s vodováhou se opět posouvá po celé délce vodících ploch a měří se ve více polohách (obr. 13 b)). Tímto způsobem se

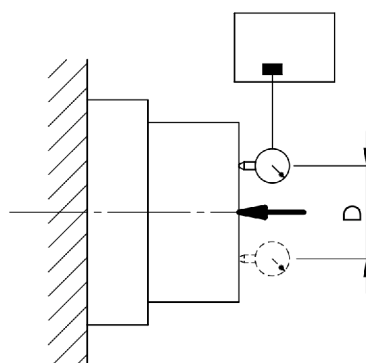
změří rovnoběžnost vodících ploch ve svislé rovině. [8]



Obr. 13 Přímost vodících ploch v a) podélném směru; b) příčném směru [8]

5.1.2 Čelní házení opěrné plochy vřetena

Dalšími zkouškami geometrické přesnosti bude podrobena vřeteno. Před samotným měřením čelních a obvodových házivostí je třeba vřeteno několikrát otočit, aby bylo zajištěno, že mazací film je rovnoměrně rozprostřen v ložiskách vřetena. Na vřetenu lze měřit čelní házení opěrné plochy. Měřidlo se nastaví tak, aby jeho kontaktní prvek byl kolmo k čelní opěrné ploše. Podle normy je třeba vřeteno osově zatížit, pokud vřeteno není vybaveno osově předepnutými ložisky. Tato síla je stanovena výrobcem stroje. Následně může začít měření házivosti. Vřetenem se pomalou rychlostí nejméně dvakrát otočí a z měřidla se odečte největší a nejmenší hodnota, ze kterých se následně udělá rozdíl. Měří se na stejném průměru D a kontakt měřidla s čelem by měl být přibližně 5 mm od kraje čela (viz obr. 14). [9]

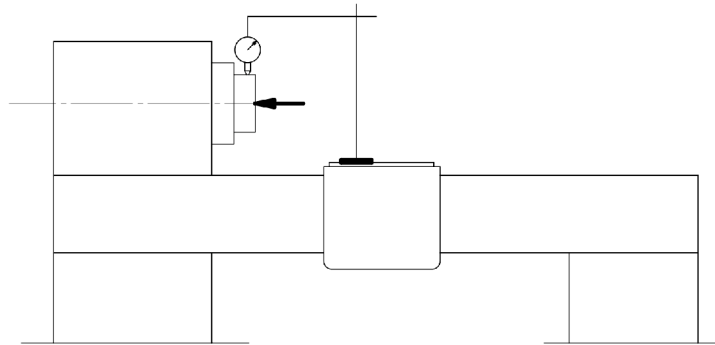


Obr. 14 Čelní házení opěrné plochy vřetena [9]

5.1.3 Obvodové házení vnější středící plochy vřetena

Měření obvodového házení vnější středící plochy vřetena probíhá obdobně jako měření čelního házení opěrné plochy vřetena. Úchylkoměr se nastaví tak, aby jeho hrot

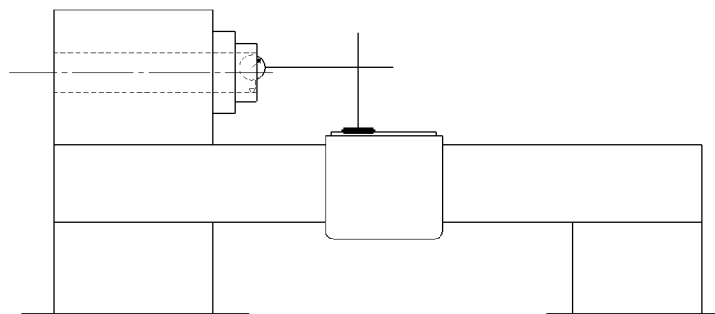
byl do pravého úhlu s povrchem otáčejícího se vřetena (viz obr. 15). Následně se s vřetenem pomalou rychlostí dvakrát otočí a z úchylkoměru se odečte největší a nejmenší hodnota. Z těchto naměřených hodnot se vypočte rozdíl. [8]



Obr. 15 Obvodové házení vnější středící plochy vřetena [8]

5.1.4 Obvodové házení kuželové dutiny vřetena

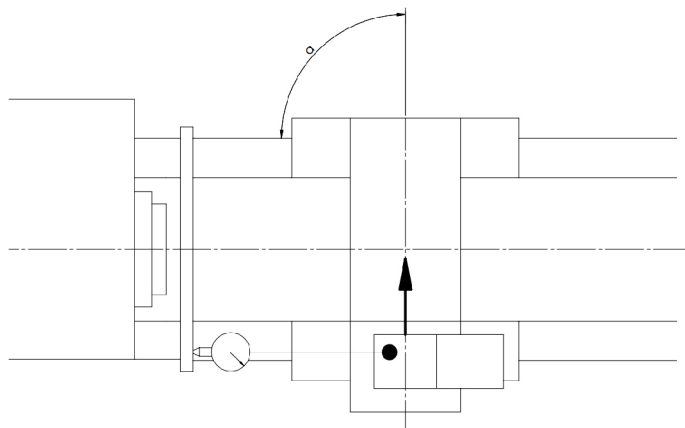
Poslední zkouškou geometrické přesnosti pro kontrolu vřetena je obvodové házení kuželové dutiny vřetena. Kuželová dutina vřetena je natolik velká, že snímač lineárního posunutí lze umístit přímo do ní. Takže není třeba použít měřicí trn. Princip měření je stejný. Úchylkoměr se umístí na suport a nastaví se tak, aby snímač lineárního posunutí byl v kontaktu s dutinou vřetena (obr. 16). Následně probíhá samotné měření. Vřetenem se pomalou rychlostí 2x otočí a odečte se z úchylkoměru nejmenší a největší hodnota. Nakonec se z těchto hodnot vypočte rozdíl. [8]



Obr. 16 Obvodové házení kuželové dutiny vřetena [8]

5.1.5 Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože

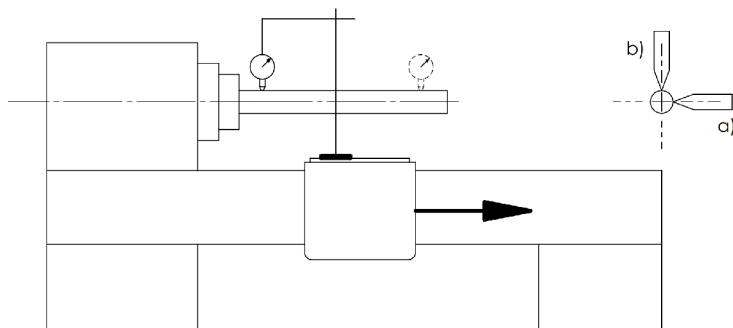
Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože je pouze orientační. Tato zkouška je modifikována podle měření kolmosti pohybu příčných saní k ose vřetena, z důvodu absence měřidla kolmosti, které bylo třeba umístit do vřetena. Místo toho se použilo měřidlo kolmosti, které se umístilo pomocí pravítka kolmo k vnější ploše lože. Úchylkoměr se umístí na podélný suport a nastaví se tak, aby snímač lineárního posunutí byl v kontaktu s měřidlem kolmosti (obr. 17).



Obr. 17 Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože [8]

5.1.6 Kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu

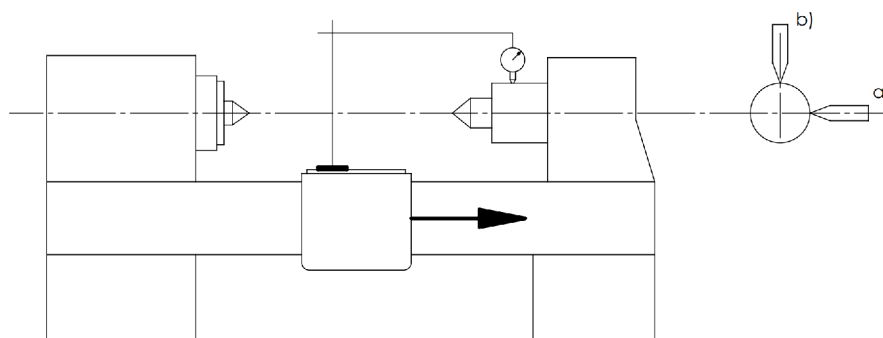
Rovnoběžnost osy vřetena s podélným pohybem suportu lze měřit ve svislé i vodorovné rovině (obr. 18). K této zkoušce je potřeba úchylkoměr a měřicí trn. Úchylkoměr se umístí na suport a měřicí trn do sklíčidla. Dále se úchylkoměr nastaví tak, aby snímač lineárního posunutí byl v kontaktu s měřícím trnem. Suportem se popojede tak, aby snímač byl co nejbližší ke sklíčidlu. Následně se přejeđe pomalou rychlostí na druhý konec trnu a z úchylkoměru se odečte největší rozdíl hodnot. Tento postup se několikrát opakuje. [8]



Obr. 18 Kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu [8]

5.1.7 Kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou

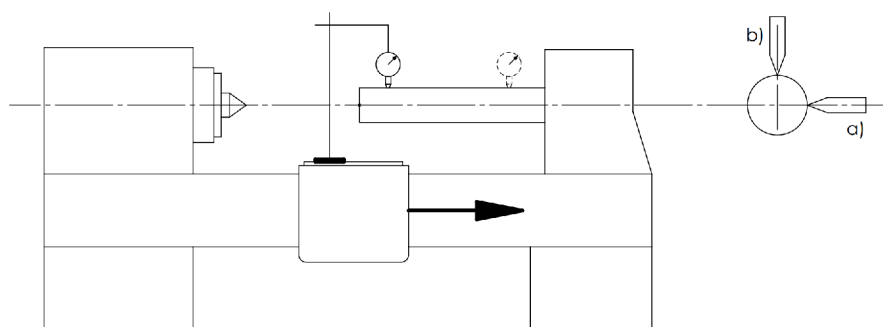
Rovnoběžnost pohybu suportu s hrotovou objímkou lze měřit opět ve svislé a vodorovné rovině. K měření je potřeba pouze úchylkoměr. Před měřením je třeba hrotovou objímku dostatečně vysunout a upevnit jako při běžných pracovních podmínkách. Úchylkoměr se umístí na suport a nastaví se tak, aby se kontaktní prvek dotýkal hrotové objímky rovnoběžně se zvolenou rovinou (obr. 19). [8]



Obr. 19 Kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou [8]

5.1.8 Kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu

Rovnoběžnost kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu lze měřit ve svislé a vodorovné rovině. K měření je potřeba měřicí trn a úchylkoměr. Měřicí trn se zarazí do dutiny hrotové objímky (viz obr. 20). Měření probíhá stejně jako v kapitole 5.1.6. [8]



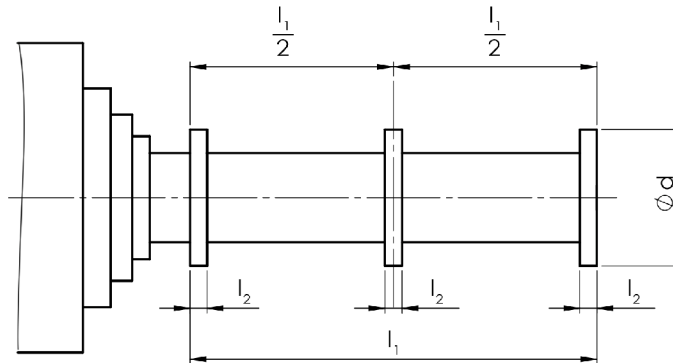
Obr. 20 Kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu [8]

5.2 Zkoušky pracovní přesnosti

Zkoušky pracovní přesnosti jsou vybrány z normy ČSN 20 0306 Přesnost jedno-vřetenových poloautomatických soustruhů a ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů - Zkoušky přesnosti. Zhotovení měřících vzorků by mělo být při dokončovacích operacích daného stroje, tzn. že soustružnický nůž by neměl být opotřeбенý a řezné podmínky by měly odpovídat jemnému obrábění. Kontrola pracovních přesností by měla být provedena na měřícím přístroji určeném pro vybraný druh měření. Přístroj by měl mít předepsanou nejistotu měření z kalibračního listu. Mezi zkoušky pracovní přesnosti patří obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle a obrábění čela obrobku ve sklíčidle.

5.2.1 Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle

Pro tuto zkoušku bude vybrán obrobek, který bude mít tvar podle (obr. 21). Pro měření se obrábí tři nákrůžky stejného průměru na vnější válcové ploše jednobřítým nástrojem. Když je $l_1 < 50$ mm, tak se obrábí dva nákrůžky stejného průměru. Rozměry obrobku se určí dle následujících vztahů. Délka $l_1 = 0,5D$, průměr $d \geq D/8$ a délka $l_{2max} = 20$ mm.

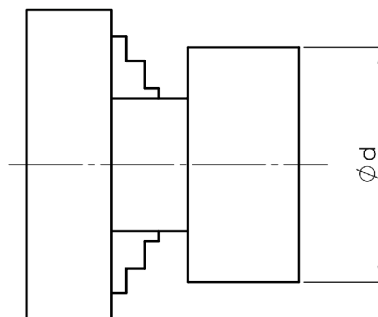


Obr. 21 Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle [8]

Pro obrábění válcového obrobku bude použit polotovar, který má 2 nákrůžky o průměru $d = 55,5$ mm a $l_2 = 20$ mm. Polotovar bude upnut ve sklíčidle a obrobí se nahrubo na $d = 55,1$ mm. Následně se jemným soustružením obrobí průměry na $d = 55$ mm. Na obrobku se bude měřit kruhovitost. K měření kruhovitosti se použije 3D souřadnicový měřicí stroj a měření bude provedeno na několika místech obrobených nákrůžků. Nakonec se bude měřit drsnost obrobených válcových ploch.

5.2.2 Obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle

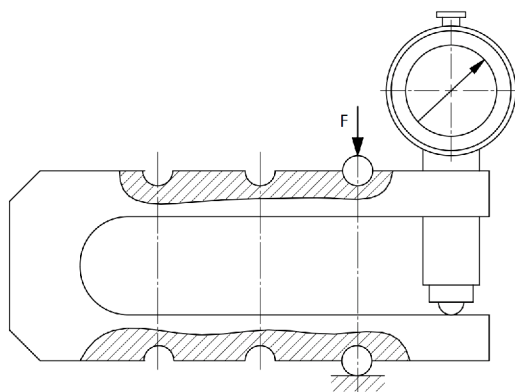
Pro tuto vybranou zkoušku je zapotřebí obrobít čelo válcového obrobku o průměru $d \geq 0,5.D$ (obr. 22). Materiál polotovaru musí mít dobrou obrobitelnost. Čelo se bude obrábět jednobřítým nástrojem. Následně se na obrobeném čele bude měřit rovinnost pomocí 3D souřadnicového měřicího stroje. Měření bude prováděno na několika průměrech. Poté se bude měřit drsnost čela.



Obr. 22 Obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle [8]

5.3 Měření tuhosti vřetena

Tato zkouška je převzatá z normy ČSN ISO 230-1 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek. Tuhost vřetena bude zkoumána pouze v radiálním směru. Vřeteno bude radiálně zatíženo silou, která se bude po daných krocích zvětšovat. Tato síla se vyvolá pomocí šroubu a ta se bude přenášet přes třmenový dynamometr (obr. 23). Velikost síly, působící na vřeteno, se bude odečítat z číselníkového úchylkoměru umístěného na dynamometru. Při vyvození síly 52 N se dynamometr deformuje o 0,01 mm. Následně pomocí jiného číselníkového úchylkoměru se bude měřit deformace vřetena. Vřeteno bude zatěžováno až do vyvození předem zvolené maximální síly. Následně vřeteno bude odlehčováno po daných krocích a při tom se bude odečítat jeho deformace. Tento postup se bude minimálně 5x opakovat. Poté se naměřené hodnoty statisticky vyhodnotí a zanesou do grafu.



Obr. 23 Třmenový dynamometr [14]

5.4 Kontrola otáček vřetena a kontrola posuvových ústrojí

Těmito zkouškami se ověří, zda soustruh spolehlivě vykonává navolené parametry. Měřením otáček vřetena se ověří spolehlivost stroje. Otáčky budou měřeny za pomoci digitálního laserového otáčkoměru DT 2234c.

Dále bude měřena rychlost posuvu podélného a příčného suportu. Měření bude provedeno tak, že se na panelu soustruhu nastaví rychlost posuvu suportu. Následně se zvolí délka měřeného úseku a bude se stopovat čas, za který přejede suport danou délkou. Nakonec se vypočte rychlost pomocí vzorce

$$v = \frac{s}{t},$$

kde s je zvolená dráha a t je naměřený čas. Měření bude provedeno pro rychloposuv a pro pět dalších rychlostí.

5.5 Statistické vyhodnocení [16]

Naměřené hodnoty je třeba statisticky vyhodnotit. Každé měření je třeba minimálně 5x opakovat, aby se ověřila správnost měření a mohl se určit interval spolehlivosti měření. Ke statistickému vyhodnocení je třeba aritmetický průměr všech naměřených hodnot

$$\bar{x} = \frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} x_i,$$

kde n_m je počet naměřených hodnot a \bar{x} je aritmetický průměr.

Dalším důležitým parametrem je výběrová směrodatná odchylka, která je dána součtem čtverců rozdílů všech naměřených hodnot od aritmetického průměru děleného počtem naměřených hodnot - 1

$$\sigma_{n_m-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_m} (x_i - \bar{x})^2}{(n_m - 1)}}.$$

Podílem výběrové směrodatné odchylky σ_{n_m-1} a $\sqrt{(n_m - 1)}$ dostaneme střední kvadratickou chybu aritmetického průměru

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_{n_m-1}}{\sqrt{n_m - 1}}.$$

K určení krajní chyby aritmetického průměru je potřeba Studentův koeficient, jehož hodnota závisí na spolehlivosti měření v % a počtem měření n_m . Pro určení jeho hodnoty slouží Studentova tabulka. Pro 95% spolehlivost do počtu měření $n_m = 10$ jsou Studentovy hodnoty zobrazeny v tabulce č. 2.

Počet měření (n_m)	Volnost ($k=n_m-1$)	koef. $t_{0,95,n_m}$
1	0	-
2	1	6,3138
3	2	2,9200
4	3	2,3534
5	4	2,1318
6	5	2,0150
7	6	1,9432
8	7	1,8946
9	8	1,8595
10	9	1,8331

Tab. 2 Studentovy hodnoty t pro 95% spolehlivost

Po vyčtení Studentova koeficientu z tabulky lze vypočítat krajní chybu aritmetického průměru součinem střední kvadratické chyby aritmetického průměru $\sigma_{\bar{x}}$

a Studentovým součinitelem $t_{0,95,n_m}$. Dolní a horní mez statistického intervalu spolehlivosti lze vypočítat následovně:

$$X = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \cdot t_{0,95,n_m}.$$

Chyby nepřímých měření

V některých vybraných zkouškách je výsledkem maximální rozdíl naměřených hodnot. Jelikož tyto naměřené hodnoty mají mez statistického intervalu spolehlivosti, je třeba určit mez i pro maximální rozdíl. Tato mez se určí pomocí parciálních derivací:

$$\sigma_c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial a} \cdot \sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial b} \cdot \sigma_b\right)^2} = \sqrt{(1 \cdot \sigma_a)^2 + (-1 \cdot \sigma_b)^2} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2},$$

kde σ_a je mez statistického intervalu spolehlivosti maximální hodnoty a σ_b je mez statistického intervalu spolehlivosti minimální hodnoty. σ_c je potom mez statistického intervalu spolehlivosti rozdílu $c = a - b$.

6 Realizace navržených zkoušek

Zkoušky geometrických a pracovních přesností byly vybrány z již zmíněných norem ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů - Zkoušky přesnosti a ČSN 20 0306 Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů. V těchto norách se nachází postupy měření, potřebná měřidla a také tolerance dané zkoušky. Pro měření tuhosti vřetena byla použita norma ČSN ISO 223-1 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek. Některé zkoušky mohou být pouze orientační z důvodu změny postupu měření převzatého z dané normy, kvůli absenci některých specifických měřidel v laboratoři.

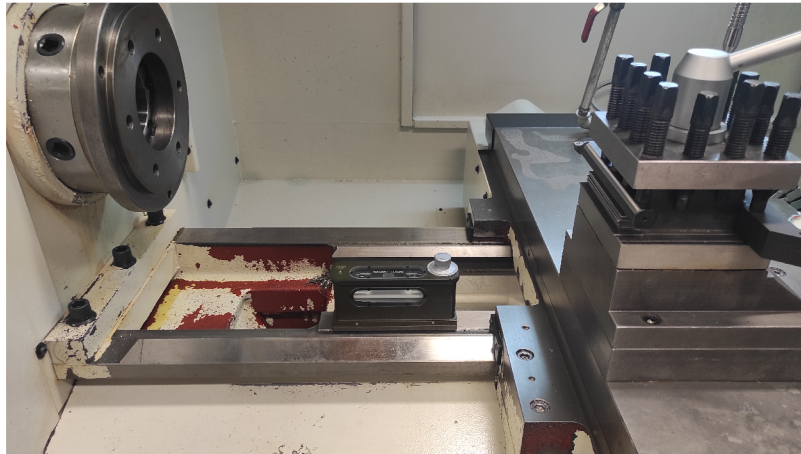
6.1 Zkoušky geometrické přesnosti

Zkoušky geometrické přesnosti byly prováděny na stroji v klidu za referenčních podmínek, tj. za teploty 20 °C. U většiny zkoušek byl dodržen postup měření dle příslušné normy. Naměřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny (viz kapitola 5.5) a porovnány s tolerancemi danými příslušnou normou. Zkouška kolmosti pohybu příčných saní k ose vřetena byla modifikována a je brána jako orientační.

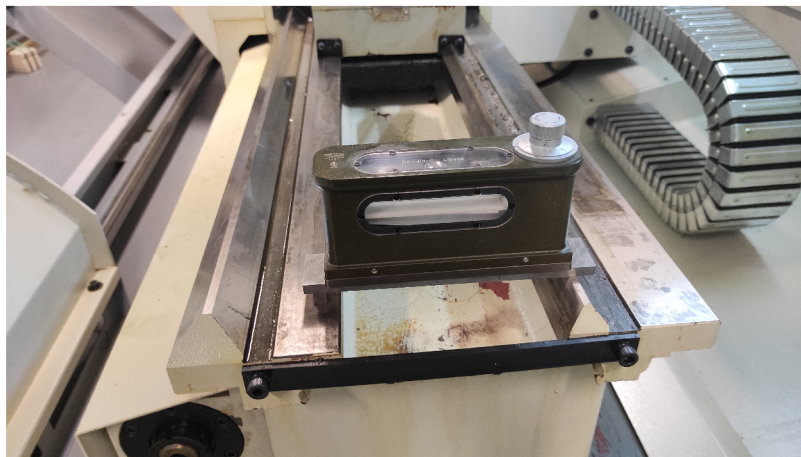
6.1.1 Vyrovnání vodících ploch do vodorovné roviny

První vybranou zkouškou je ověření, zda jsou vodící plochy vyrovnány do vodorovné roviny. Pro tuto zkoušku byla použita strojní koincidenční vodováha. Měření lze provést v podélném a příčném směru. V podélném směru se vodováha pokládala rovnoměrně po celé délce vodící plochy s přibližným rozpětím 160 mm (viz obr. 24). Tento postup se provedl i pro druhou vodící plochu. Následně probíhalo měření v příčném směru, kde se strojní koincidenční vodováha umístila na můstek. Můstek byl uložen napříč loží (viz obr. 25). Měření opět probíhalo na několika místech rovnoměrně rozložených po celé délce vodících ploch. Měření se pětikrát opakovalo a následně se naměřené hodnoty statisticky vyhodnotily (viz tab. 3 a tab. 4).

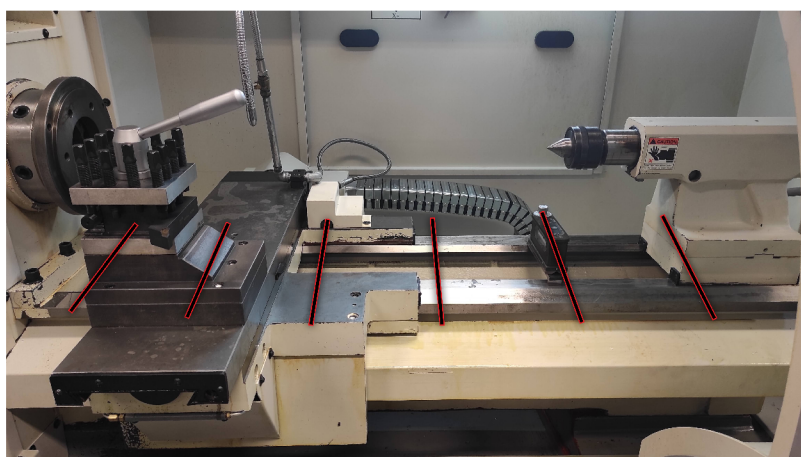
Na obr. 26 lze vidět, na jakých místech byla koincidenční vodováha položena. Polohy jsou vyznačeny červenými čarami.



Obr. 24 Měření přímosti vodící plochy v podélném směru



Obr. 25 Měření rovnoběžnosti vodících ploch v příčném směru



Obr. 26 Vyznačení poloh ustavení vodováhy

Pro určení úchytky přímosti byl použit maximální rozdíl naměřených hodnot. Výsledky vyšly v toleranci (viz tab. 3).

<i>1. vodící plocha</i>		<i>2. vodící plocha</i>	
Poloha:	Naměřená hodnota [mm.m ⁻¹]	Poloha:	Naměřená hodnota [mm.m ⁻¹]
a	0,226 ± 0,006	a	0,232 ± 0,005
b	0,218 ± 0,005	b	0,232 ± 0,005
c	0,220 ± 0,008	c	0,230 ± 0,010
d	0,220 ± 0,010	d	0,224 ± 0,006
e	0,226 ± 0,006	e	0,224 ± 0,006
f	0,226 ± 0,006	f	0,234 ± 0,006
Maximální hodnota:	0,226 ± 0,006	Maximální hodnota:	0,234 ± 0,006
Minimální hodnota:	0,218 ± 0,005	Minimální hodnota:	0,224 ± 0,006
Rozdíl:	0,008 ± 0,008	Rozdíl:	0,010 ± 0,008
Tolerance dle ČSN:	0,02	Tolerance dle ČSN:	0,02

Tab. 3 Výsledky měření přímosti vodících ploch v podélném směru

Pro určení úchytky rovinnosti byl opět použit maximální rozdíl naměřených hodnot. Výsledky vyšly v toleranci (viz tab. 4).

Poloha:	Naměřená hodnota [mm.m ⁻¹]
a	0,046 ± 0,006
b	0,026 ± 0,006
c	0,028 ± 0,005
d	0,022 ± 0,005
e	0,036 ± 0,006
f	0,030 ± 0,000
Maximální hodnota:	0,046 ± 0,006
Minimální hodnota:	0,022 ± 0,005
Rozdíl:	0,024 ± 0,008
Tolerance dle ČSN ISO 1708:	0,04

Tab. 4 Výsledky měření rovinnosti vodících ploch v příčném směru

6.1.2 Čelní házení opěrné plochy vřetena

Další měření se týkalo čelního házení opěrné plochy vřetena. K měření byl použit císelníkový úchytkoměr s přesností 0,001 mm. Úchytkoměr se umístil na plochu suportu a nastavil se tak, aby se kontaktní prvek dotkl opěrné plochy vřetena (viz obr. 27). Následně se vřetenem 2x otočilo a z úchytkoměru se odečetla největší odchylka.

Tento postup se opět 5x opakoval. Naměřené hodnoty se statisticky vyhodnotily (tab. 5). Podle normy by mělo být vřeteno axiálně zatíženo, aby se zamezilo jeho pohybu. Tuto hodnotu udává výrobce stroje, avšak tato hodnota nebyla známá, takže zatěžující axiální síla byla rovna nule.



Obr. 27 Měření čelního házení opěrné plochy vřetena

Střední hodnota čelního házení opěrné plochy vřetena vyšla v toleranci (viz tab. 5).

Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1.	0,0010
2.	0,0010
3.	0,0005
4.	0,0005
5.	0,0010
Střední hodnota:	$0,0008 \pm 0,0003$
Tolerance dle ČSN 20 0306:	0,01

Tab. 5 Výsledky měření čelního házení opěrné plochy vřetena

6.1.3 Obvodové házení vnější středící plochy vřetena

K měření obvodového házení vnější středící plochy vřetena byl použit číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Ten se umístil na plochu suportu, který byl co nejbliž k vřetenu. Následně se úchylkoměr nastavil tak, aby se snímač lineárního posunutí dotkl vnější středící plochy vřetena (viz obr. 28). Poté se vřetenem několikrát otočilo a z úchylkoměru se odečetla největší odchylka. Tento postup se 5x opakoval a naměřené hodnoty se statisticky vyhodnotily (viz tab. 6). Při měření byla zatěžující axiální síla rovna nule.

Střední hodnota obvodového házení vnější středící plochy vřetena vyšla v toleranci (viz tab. 6).

Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1.	0,001
2.	0,002
3.	0,002
4.	0,003
5.	0,004
Střední hodnota:	$0,002 \pm 0,001$
Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,01

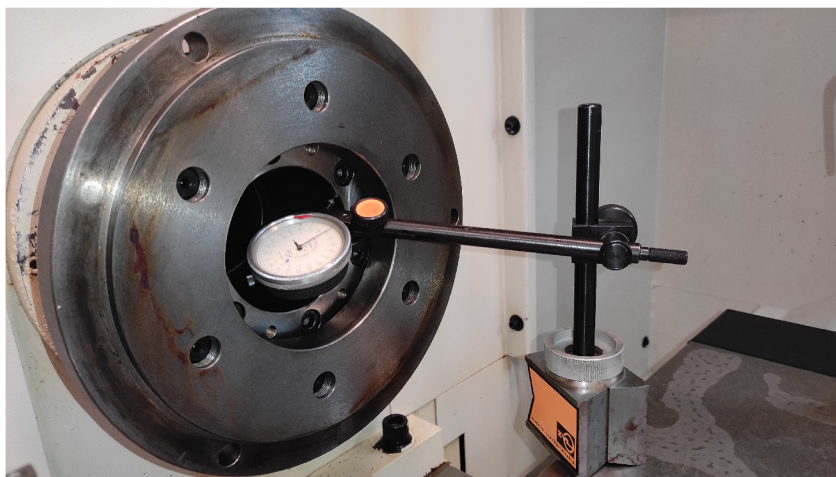
Tab. 6 Výsledky měření obvodového házení vnější středící plochy vřetena



Obr. 28 Měření obvodového házení vnější středící plochy vřetena

6.1.4 Obvodové házení kuželové dutiny vřetena

Měření obvodového házení kuželové dutiny vřetena probíhalo obdobně, jako předchozí měření házivosti. K měření byl opět použit číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Ten se umístil na plochu suportu a nastavil tak, aby kontaktní prvek byl ve styku s kuželovou dutinou vřetena (viz obr. 29). Vřetenem se následně několikrát otočilo a z úchylkoměru se odečetla největší odchylka. Měření se opět 5x opakovalo. Naměřené hodnoty byly vyneseny do tabulky a statisticky vyhodnoceny (viz tab. 7).



Obr. 29 Měření obvodového házení kuželové dutiny vřetena

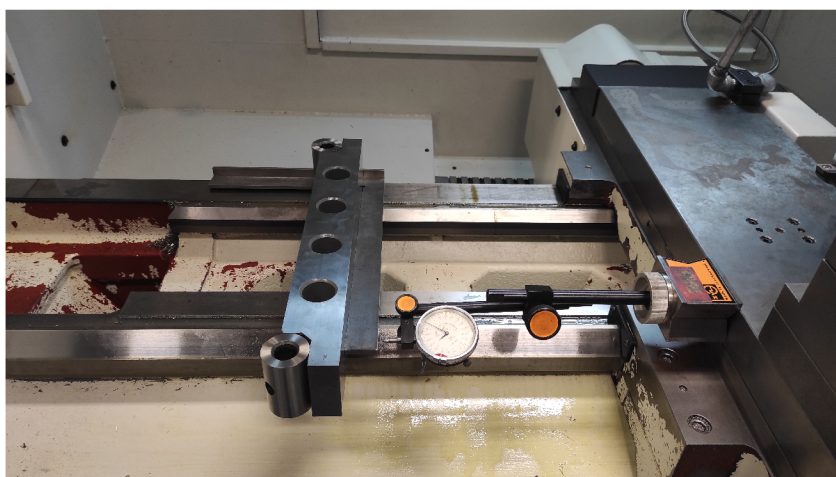
Střední hodnota obvodového házení vnitřní středící plochy vřetena vyšla v toleranci (viz tab. 7).

Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1.	0,0005
2.	0,0005
3.	0,0005
4.	0,0010
5.	0,0010
Střední hodnota:	0,0007 ± 0,0003
Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,01

Tab. 7 Měření obvodového házení kuželové dutiny vřetena

6.1.5 Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože

K této zkoušce bylo použito pravítko, příložný úhelník a číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Pravítko se pomocí příložného úhelníku položilo kolmo k vnější ploše lože a číselníkový úchylkoměr se umístil na příčný suport. Následně se stojan úchylkoměru nastavil tak, aby snímač lineárního posunutí byl v kontaktu s pravítkem (viz obr. 30). Na úchylkoměru se nastavila nulová hodnota a příčným suportem se přešlo na druhý konec pravítka. Poté se z úchylkoměru odečetla hodnota a tento postup se 5x opakoval. Naměřené hodnoty byly vyneseny do tabulky a statisticky vyhodnoceny (viz tab. 8).



Obr. 30 Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože

Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1.	0,100
2.	0,140
3.	0,131
4.	0,097
5.	0,165
Střední hodnota:	$0,127 \pm 0,031$
Tolerance žádná (orientační měření)	

Tab. 8 Výsledky měření kolmosti příčných saní k vnější ploše lože

6.1.6 Kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu

Pro tuto zkoušku byl použit číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm a měřící trn o délce 250 mm. Číselníkový úchylkoměr se umístil na suport a měřící trn se uchytil ve sklíčidle. Následně se stojan úchylkoměru nastavil tak, aby byl snímač lineárního posunutí kolmo k ploše měřícího trnu. Měření se nejdříve provedlo ve vodorovné rovině (viz obr. 31), kdy byl úchylkoměr co nejbliže ke vřetenu. Na číselníkovém úchylkoměru se nastavila nulová hodnota. Následně se suportem přejelo na druhý konec měřícího trnu a odečetla se naměřená hodnota. Tento postup byl opět proveden 5x. Poté bylo měření provedeno i ve svislé rovině (viz obr. 32). Z naměřených hodnot byla vypočtena střední hodnota a krajní chyba aritmetického průměru.

Střední hodnota rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu vyšla v toleranci (viz tab. 9).



Obr. 31 Měření rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu v rovině vodorovné



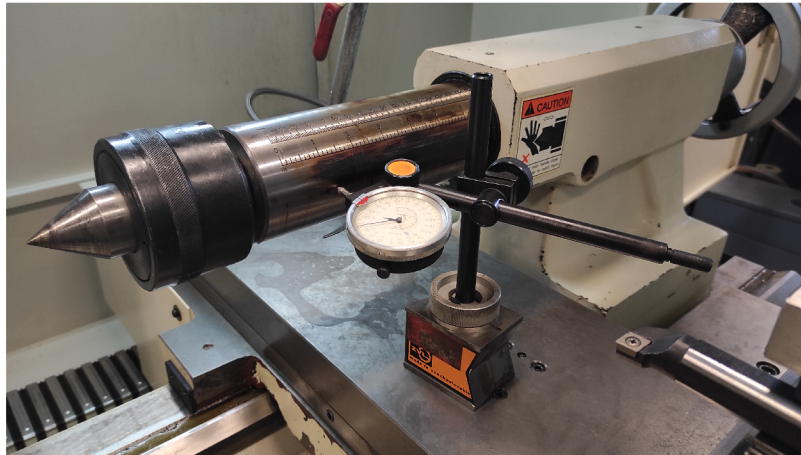
Obr. 32 Měření rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu v rovině svislé

Vodorovná rovina		Svislá rovina	
Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]	Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1.	0,012	1.	0,013
2.	0,011	2.	0,015
3.	0,010	3.	0,016
4.	0,012	4.	0,015
5.	0,011	5.	0,014
6.	0,010	6.	0,014
7.	0,013	7.	0,013
8.	0,012	8.	0,013
Střední hodnota:	0,011 ± 0,001	Střední hodnota:	0,014 ± 0,001
Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,015/300 (0,013/250)	Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,020/300 (0,017/250)

Tab. 9 Výsledky měření rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu ve vodorovné a svislé rovině

6.1.7 Kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou

K této zkoušce byl použit číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Před samotným měřením byl koník zajištěn a hrotová objímka byla vysunuta a zpevněna, jako při běžných pracovních podmínkách. Následně se číselníkový úchylkoměr umístil na suport a stojan nastavil tak, aby byl snímač kolmo k měřené ploše. Rovnoběžnost se měřila ve vodorovné rovině (viz obr. 33) a ve svislé rovině (viz obr. 34). Rovnoběžnost byla měřena na úseku 170 mm.



Obr. 33 Měření rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou v rovině vodorovné



Obr. 34 Měření rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou v rovině svislé

Jelikož bylo měření provedeno na delším úseku, než je uvedeno v normě, tolerance byla přepočtena. Střední hodnota rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou vyšla v přepočtené toleranci (viz tab. 10).

Vodorovná rovina		Svislá rovina	
Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]	Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1.	0,018	1.	0,002
2.	0,019	2.	0,001
3.	0,020	3.	0,001
4.	0,020	4.	0,002
5.	0,018	5.	0,001
Střední hodnota:	0,019 ± 0,002	Střední hodnota:	0,002 ± 0,001
Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,015/100 (0,026/170)	Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,02/100 (0,034/170)

Tab. 10 Výsledky měření rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou ve vodorovné a svislé rovině

6.1.8 Kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu

V poslední geometrické zkoušce byla měřena rovnoběžnost kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu. K této zkoušce byl použit číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm a měřící trn. Měření probíhalo jako u předchozích zkoušek. Číselníkový úchylkoměr byl umístěn na plochu suportu a stojan byl nastaven tak, aby snímač lineárního posunutí byl v kolmém kontaktu k měřené ploše. Rovnoběžnost se měřila ve vodorovné (viz obr. 35) a svislé rovině (viz obr. 36). Trn byl dostatečně dlouhý na to, aby se měřilo na úseku 300 mm, podle kterého je v normě uvedena tolerance. Takže nebylo třeba toleranci přepočítávat.



Obr. 35 Měření rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu v rovině vodorovné

Střední hodnota rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou vyšla v toleranci (tab. 11).



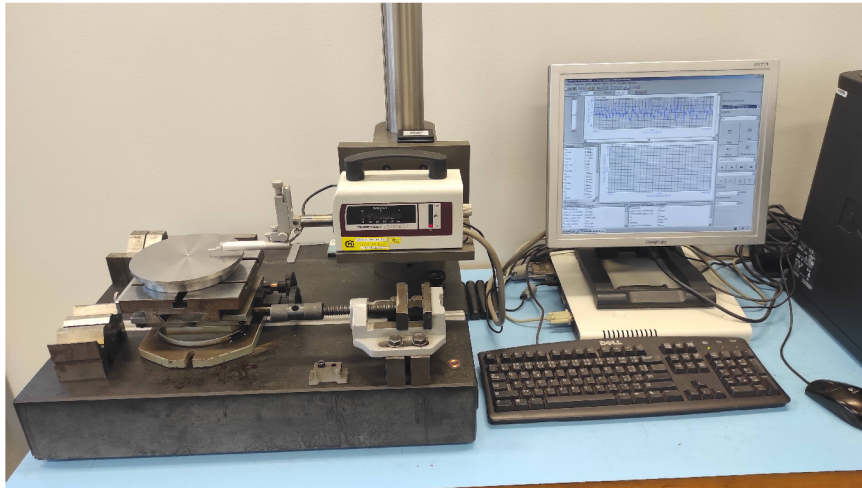
Obr. 36 Měření rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu v rovině svislé

Vodorovná rovina		Svislá rovina	
Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]	Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1.	0,028	1.	0,027
2.	0,026	2.	0,025
3.	0,030	3.	0,026
4.	0,026	4.	0,027
5.	0,028	5.	0,025
Střední hodnota:	$0,028 \pm 0,002$	Střední hodnota:	$0,026 \pm 0,002$
Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,03/300	Tolerance dle ČSN ISO 1708	0,03/300

Tab. 11 Výsledky měření rovnoběžnosti kuželové dutina hrotové objímky s pohybem suportu ve vodorovné a svislé rovině

6.2 Zkoušky pracovní přesnosti

Zkoušky byly provedeny podle normy ČSN 20 0306 Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů a ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů. Byly vybrány dvě pracovní zkoušky. Měření kruhovitosti na zkušebním obrobku a měření rovinnosti čela zkušebního obrobku. Tyto obrobky byly zhotoveny a následně měřeny na 3D měřícím souřadnicovém stroji Carl Zeiss PRISMO 5 (obr. 38). Nakonec se měřila drsnost obrobek na kontaktním drsnoměru Mitutoyo SurfTest SV-2000 (obr. 37).



Obr. 37 Kontaktní drsnoměr Mitutoyo SurfTest SV-2000

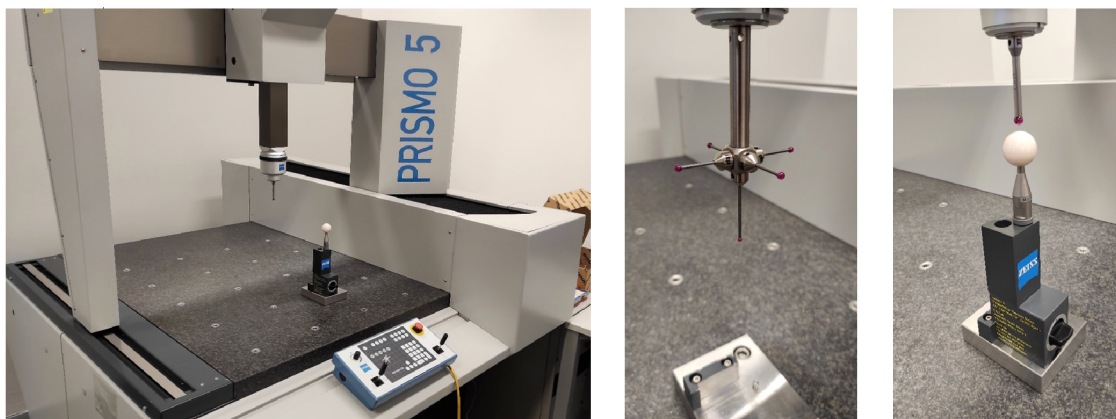
6.2.1 3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss PRISMO 5

Měřicí stroj je umístěn v Technické univerzitě v Liberci, budova L, v laboratoři třískových technologií a procesů, katedry obrábění a montáže. Tento měřicí stroj umožňuje kontaktní měření pomocí měřících snímačů. Stroj lze ovládat manuálně přes panel umístěný na přední části. Většina měření však probíhá přes program vytvořený v softwaru ZEISS CALYPSO.

Před samotným měřením je třeba provést kalibraci pomocí kalibrační koule. Kalibrační koule se umístí do pracovního prostoru stroje a do měřicí hlavy stroje se vloží měřicí sonda. Následně se v ZEISS CALYPSO spustí předem nadefinovaný program pro provedení kalibrace. Po kalibraci se může kalibrační koule odstranit z pracovního prostoru stroje a měřicí sondu zaměnit za systém s pěti snímači orientovány podle os stroje (+X,-X,+Y,-Y,Z) (obr. 38). Snímače mají rubínovou kuličku o průměru 3 mm v ose Z a 4 mm v ose +X, -X, +Y a -Y.

Nyní je stroj připraven k měření. Měřicí objekt je třeba v pracovním prostoru zachytit pomocí šroubů, aby při měření nedošlo k jeho posunutí. Po ustavení objektu je třeba provést několik doteků s měřenou plochou, aby mohla vzniknout referenční rovina či plocha, od které lze nadefinovat měřicí program. V programu je třeba nadefinovat trajektorie, body doteku, maximální geometrickou toleranci atd. Také je třeba nadefinovat bezpečnostní oblast, ve které se snímač bude pohybovat pomaleji. Po spustění programu probíhá samotné měření. Následně lze vygenerovat výsledky ve formátu PDF.

Výsledky měření jsou daný s nejistotou měření, která je z kalibračního listu $1,2+3,9L \mu\text{m}$, kde L je měřená délka v metrech.



Obr. 38 Carl Zeiss PRISMO 5; měřicí sondy; kalibrační koule

6.2.2 Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle

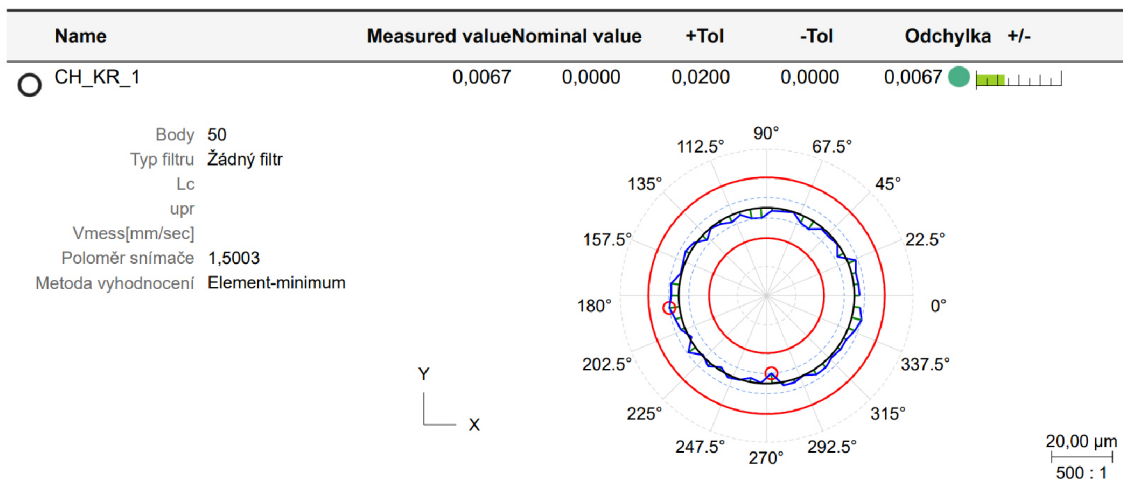
Pro zkoušku dle normy byl vybrán materiál z oceli 11 600. Polotovár byl umístěn do sklíčidla a byla vyrovnána jeho házivost k minimální hodnotě. Tento polotovár byl následně obroben do tvaru podle obr. 21. Z důvodu kratšího polotováru byly obrobny pouze 2 nákrůžky o průměru 55 mm a délky 20 mm (obr. 39). Řezná rychlost byla zvolena $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Otáčky pro daný průměr polotováru a pro danou řeznou rychlost odpovídají $860 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Posuv byl zvolen $86 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 39 Obrobené nákrůžky pro měření kruhovitosti

Měření kruhovitosti nákrůžků

Následně byl zkušební obrobek přemístěn do pracovního prostoru 3D souřadnicového měřicího stroje Carl Zeiss PRISMO 5, ve kterém se měřila kruhovitosť nákrůžků. Kruhovitosť byla změřena na pěti kružnicích pro oba nákrůžky. Na každé kružnici bylo provedeno měření v 50 bodech. Software ZEISS CALYPSO následně vygeneroval výsledky měření v grafické podobě s naměřenou hodnotou kruhovitosti (graf. 1). Naměřená data byly statisticky vyhodnoceny a zaneseny do tabulky (tab. 12). Z tabulky lze vidět, že naměřená hodnota kruhovitosti vyšla v toleranci.



Graf. 1 Grafický výsledek kruhovitosti jednoho měření

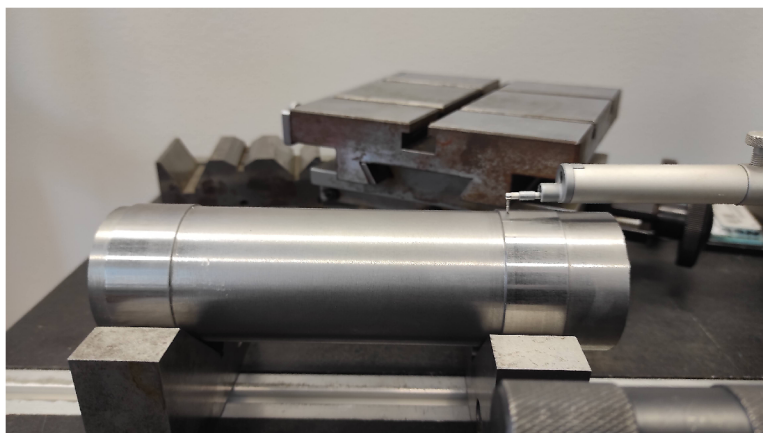
1. nákrůžek		2. nákrůžek	
Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]	Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1. kružnice	0,0067	1. kružnice	0,0074
2. kružnice	0,0065	2. kružnice	0,0060
3. kružnice	0,0068	3. kružnice	0,0081
4. kružnice	0,0086	4. kružnice	0,0081
5. kružnice	0,0115	5. kružnice	0,0069
Výsledek:	0,0080 ± 0,0023	Výsledek:	0,0073 ± 0,001
Tolerance dle ČSN:	0,02	Tolerance dle ČSN:	0,02

Tab. 12 Výsledky kruhovitosti nákrůžků

Měření drsnosti nákrůžků

K vykonání kompletní pracovní zkoušky je třeba změřit drsnost obrobeneho povrchu a naměřenou hodnotu porovnat s tolerancí uvedenou v normě. Vzorek byl tedy přenesen na kontaktní drsnoměr Mitutoyo Surf-test SV-2000 (obr. 40). Drsnost byla měřena na úseku 4 mm s rychlostí $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Měření bylo provedeno na 10 náhodných místech. Následně se naměřené hodnoty statisticky vyhodnotily (tab. 13).

Z tabulky lze vidět, že naměřená hodnota průměrné aritmetické odchylky profilu drsnosti R_a je v toleranci. V tabulce byl také uveden parametr R_z .



Obr. 40 Měření drsnosti obrobených nákrůžků

1. nákrůžek		
Výsledná Ra:	$0,929 \pm 0,018$	[μm]
Výsledná Rz:	$5,051 \pm 0,207$	[μm]
2. nákrůžek		
Výsledná Ra:	$1,097 \pm 0,028$	[μm]
Výsledná Rz:	$5,870 \pm 0,182$	[μm]
Tolerance dle ČSN:	$Ra = 1,6$	[μm]

Tab. 13 Výsledky z měření drsnosti nákrůžků

6.2.3 Obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle

Pro zkoušku dle normy byl vybrán materiál z oceli 11 600. Polotovar měl průměr 155 mm. Na polotovaru, uchyceného ve sklíčidle, bylo obrobeno čelo o 1 mm (obr. 41).

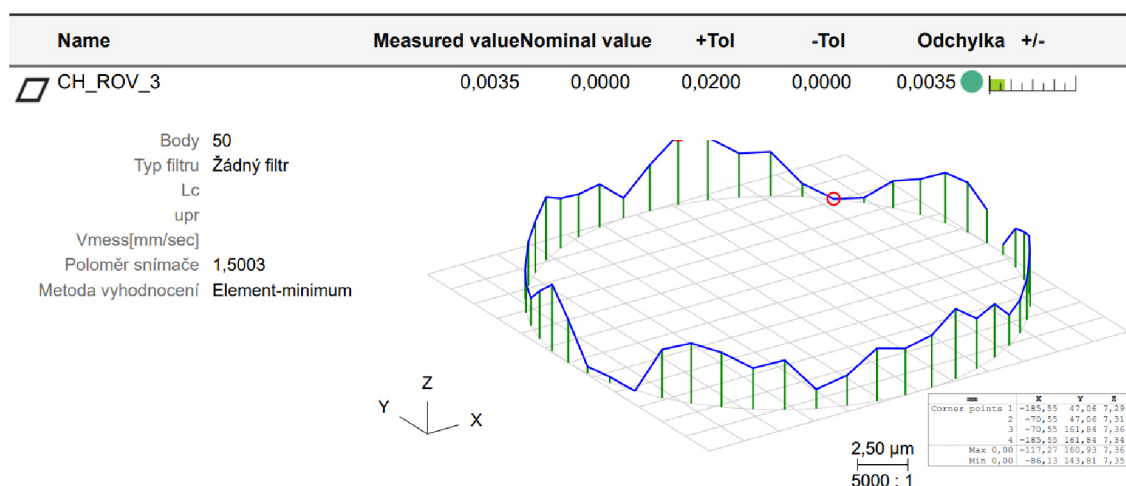


Obr. 41 Obrobené čelo pro měření rovinnosti

Při obrábění byla řezná rychlost konstantní, tzn. že se otáčky zvětšovaly z hodnoty 100 ot.min⁻¹ na 1000 ot.min⁻¹, kde se dosáhlo maximální navolené hodnoty otáček, od tohoto bodu se otáčky udržovaly konstantní a tím pádem se snižovala řezná rychlost.

Měření rovinnosti čela

Zkušební obrobek byl přemístěn do pracovního prostoru 3D souřadnicového měřicího stroje Carl Zeiss PRISMO 5, na kterém se měřila rovinnost obrobku. Měření rovinnosti probíhalo na pěti kružnicích o průměrech 145 mm, 130 mm, 115 mm, 100 mm a 85 mm. Na každé kružnici bylo 50 měřicích bodů. Tento postup se 5x opakoval s tím, že se kružnice po každém měření otočily o 5°. Software ZEISS CALYPSO následně vygeneroval výsledky měření v grafické podobě s naměřenou hodnotou rovinnosti (graf. 2). Tyto výsledky byly statisticky vyhodnoceny a zaneseny do tabulky (tab. 14). Z tabulky lze vidět, že naměřená hodnota rovinnosti vyšla v toleranci.



Graf. 2 Grafický výsledek rovinnosti jednoho měření

Číslo měření	Naměřená hodnota [mm]
1. kružnice	0,0055
2. kružnice	0,0046
3. kružnice	0,0035
4. kružnice	0,0032
5. kružnice	0,0026
Výsledek:	0,0039 ± 0,0012
Tolerance dle ČSN:	0,02

Tab. 14 Výsledky rovinnosti čela

Měření drsnosti čela

Zkušební obrobek byl opět přesunut na kontaktní drsnoměr Mitutoyo Surftest SV-2000 (obr. 42), kde se měřila drsnost obrobeného čela. Pro měření byl opět zvolen měřicí úsek 4 mm a rychlost měření $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Drsnost byla měřena na 10 náhodných místech. Naměřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny a výsledky zapsány do tabulky (tab. 15). Z tabulky lze vidět, že naměřená hodnota průměrné aritmetické odchylky profilu drsnosti Ra je v toleranci. V tabulce byla také uvedena hodnota drsnosti Rz.

Výsledná Ra:	$0,408 \pm 0,093$	[μm]
Výsledná Rz:	$3,031 \pm 0,643$	[μm]
Tolerance dle ČSN:	Ra = 1,6	[μm]

Tab. 15 Výsledky z měření drsnosti čela



Obr. 42 Měření drsnosti obrobeného čela

6.3 Měření tuhosti vřetena

K měření tuhosti vřetena byl použit stojánek se šroubem, číselníkový úchylkoměr s přesností $0,001 \text{ mm}$ a třmenový dynamometr, jehož vlastnosti jsou napsány v kapitole 5.3. Použité pomůcky a měřidla byly umístěny tak, jak je zobrazeno na obr. 43. Utahováním šroubu na stojanu byla vyvolána síla, která se přenášela přes třmenový dynamometr na vřeteno. Velikost vyvolané síly byla odečítána z číselníkového úchylkoměru umístěného na dynamometru. Tuhost vřetena byla nejprve měřena při silovém účinku od 0 N do 520 N s krokem 52 N . Při tomto silovém účinku byly změřeny nepatrné deformace vřetena, takže tuhost vřetena byla měřena až do silového účinku 1040 N s krokem 104 N . Při každém kroku se odečítala deformace vřetena, pomocí číselníkového úchylkoměru. Při dosažení maximálního silového účinku se šroub povoloval po stejných krocích a opět se z číselníkového úchylkoměru odečítaly

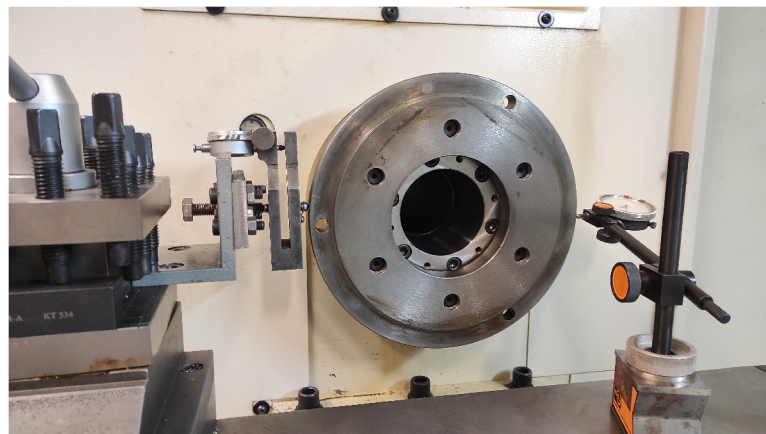
hodnoty. Tento postup se 5x opakoval. Naměřené hodnoty byly následně statisticky vyhodnoceny.

Výsledky měření byly následně zaznamenány do tabulky (tab. 16), ve které lze vidět deformaci vřetena při konkrétním silovém zatížení. Z těchto hodnot byl následně vykreslen graf v závislosti deformace vřetena na zatížení (obr. 3). Modrá křivka znázorňuje zatěžování vřetena a oranžová křivka znázorňuje odlehčování vřetena. Křivka zatěžování má tvar paraboly a deformace do silového účinku 200 N je velmi malá až nulová. Křivka odlehčování má zpočátku lineární průběh, který se při 400 N mění spíše na parabolický. Lze vidět, že při úplném odlehčení vřetena zůstala zbytková deformace 0,0154 mm.

Pomocí polynomické regrese byla zjištěna funkce deformace (y) v závislosti na zatížení (x) $y = 2 \cdot 10^{-8}x^2 + 10^{-6}x - 0,0003$. Tuhost se následně může vypočítat pomocí vztahu

$$k = \frac{F}{2 \cdot 10^{-8}x^2 + 10^{-6}x - 0,0003}$$

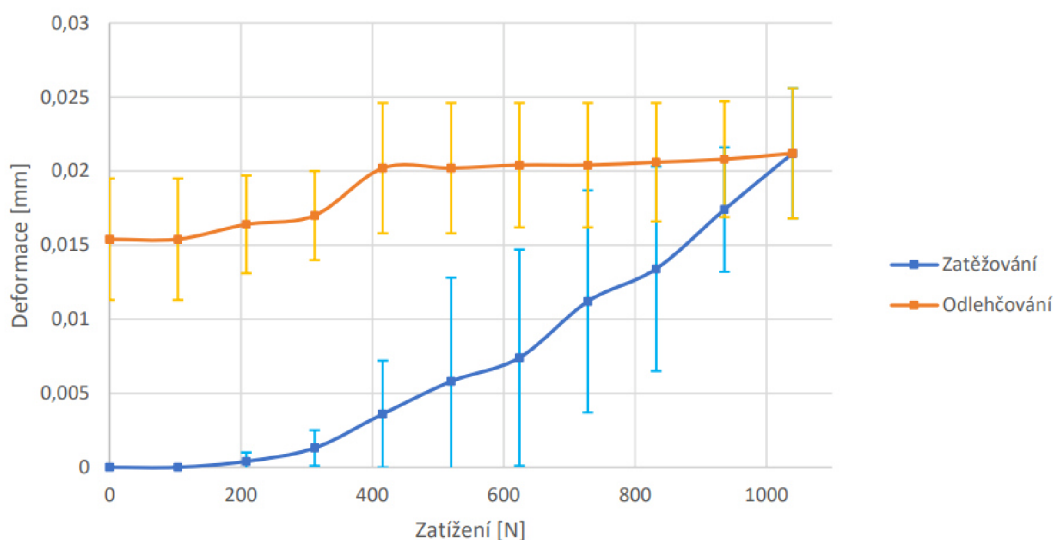
Z důvodu nelinearity se tuhost vřetena mění se zatížením. Při větším zatížení má křivka spíše lineární charakteristiku a v té oblasti se tuhost vřetena příliš nemění.



Obr. 43 Měření tuhosti vřetena

Číslo měření	deformace třmenu [mm]	zatížení [N]	deformace při zatěžování [mm]	deformace při odlehčování [mm]
1.	0	0	0	0,0154 ± 0,0041
2.	0,02	104	0	0,0154 ± 0,0041
3.	0,04	208	0,0004 ± 0,0005	0,0164 ± 0,0033
4.	0,06	312	0,0013 ± 0,0012	0,0170 ± 0,0030
5.	0,08	416	0,0036 ± 0,0036	0,0202 ± 0,0044
6.	0,10	520	0,0060 ± 0,0070	0,0202 ± 0,0044
7.	0,12	624	0,0074 ± 0,0073	0,0204 ± 0,0042
8.	0,14	728	0,0112 ± 0,0075	0,0204 ± 0,0042
9.	0,16	832	0,0134 ± 0,0069	0,0210 ± 0,0040
10.	0,18	936	0,0174 ± 0,0042	0,0208 ± 0,0039
11.	0,20	1040	0,0212 ± 0,0044	0,0212 ± 0,0044

Tab. 16 Výsledky měření tuhosti vřetena



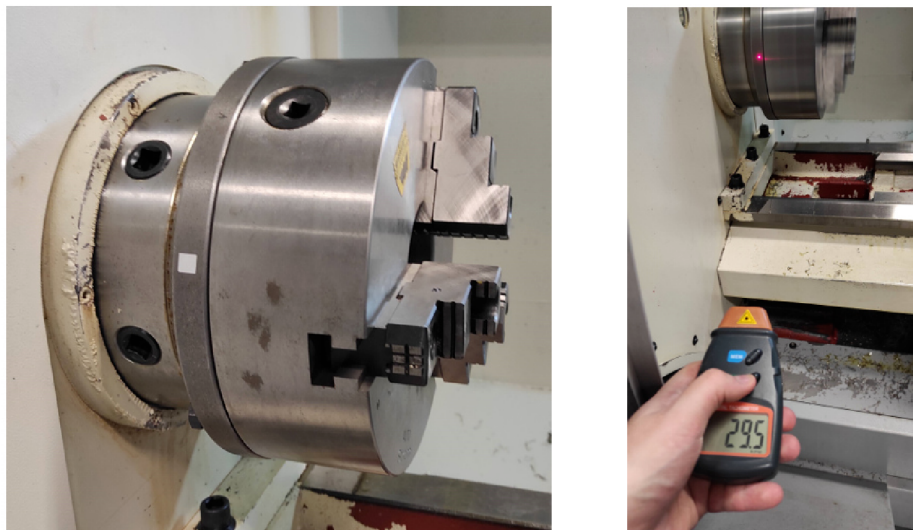
Graf. 3 Charakteristika tuhosti vřetena

6.4 Měření otáček vřetena a měření posuvových ústrojí

Otáčky vřetena byly měřeny digitálním laserovým otáčkoměrem DT 2234c (obr. 44). Nejprve se na vnější plochu vřetena přilepil reflexní proužek s rozměry 12 x 12 mm, na který při měření dopadá laser z otáčkoměru a odráží ho zpět (obr. 45). Následně se na stroji nastavila rychlost vřetena na hodnotu 50 ot.min⁻¹. Digitálním laserovým otáčkoměrem se zaměřilo na místo, kde byl nalepen reflexní proužek a odečetlo se 5 hodnot, které otáčkoměr naměřil. Tento postup se opakoval pro pět dalších rychlostí vřetena. Hodnoty se následně statisticky vyhodnotily a zanesly do tabulky (tab. 17).



Obr. 44 Digitální laserový otáčkoměr DT 2234c



Obr. 45 Měření otáček vřetena

Z tabulky (tab. 17) lze vidět, že naměřené hodnoty se zpočátku příliš neliší od nastavených hodnot. Při vyšších otáčkách, blíží se k maximální hodnotě, se naměřené hodnoty začínají lišit od nastavených hodnot v řádech nižších jednotkách.

Nastavená hodnota [ot.min ⁻¹]	Naměřená hodnota [ot.min ⁻¹]
50	50,06 ± 0,12
100	100,08 ± 0,16
500	501,94 ± 0,38
800	803,94 ± 0,22
1500	1503,20 ± 0,89
2000	2003,80 ± 0,89

Tab. 17 Hodnoty otáček vřetena

Kontrola posuvových ústrojí probíhala tak, že se měřil čas, za který přejede podélný a příčný suportu danou vzdálenost. Nejprve se kontroloval podélný suport. Posuv podélného suportu byl nastaven na danou hodnotu f [mm.min⁻¹]. Dále se zvolil úsek měření s [mm], který se suportem projel. Měření času přejezdu se 6x opakovalo. Tento postup se opakoval pro rychloposuv a pro 5 dalších posuvů od 100 mm.min⁻¹ do 500 mm.min⁻¹ po 100 mm.min⁻¹. Následně změřené časy byly statisticky vyhodnoceny a pomocí vzorečku

$$f = \frac{s}{t}$$

se určila rychlost posuvu.

Z výsledků (tab. 18) lze vidět, že naměřený rychloposuv je $7042 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, což je o $958 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ méně, než udává výrobce. Ostatní naměřené rychlosti přibližně odpovídají nastaveným hodnotám.

Měřená délka s [mm]:	500	50	80	100	150	200
Nas. posuv f [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]:	RP	100	200	300	400	500
Číslo měření:	Změřený čas [s]:					
1.	4,25	30,44	24,08	20,29	22,85	24,45
2.	3,93	30,3	24,12	20,32	22,81	24,43
3.	4,91	30,33	24,44	20,23	22,96	24,44
4.	4,21	30,38	24,38	20,27	22,89	24,51
5.	4,16	30,22	24,32	20,34	22,92	24,55
6.	4,12	30,48	24,37	20,23	22,87	24,45
Průměr [s]:	$4,26 \pm 0,30$	$30,36 \pm 0,09$	$24,29 \pm 0,13$	$20,28 \pm 0,04$	$22,88 \pm 0,05$	$24,47 \pm 0,04$
Posuv f [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]:	7042	99	198	296	393	490

Tab. 18 Měření rychlosti posuvu

Následně byl kontrolován příčný suport. Postup byl totožný jako při kontrole podélného suportu. Přísuv p [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$] se nastavil na danou hodnotu, zvolil se úsek měření s [mm] a stopkami se měřil čas, za který příčný suport přešel zvolený úsek. Měření času přejezdu se 6x opakovalo.. Poté se tento postup opakoval pro 5 dalších přísuvů od $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ do $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ po $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Naměřené časy byly statisticky vyhodnoceny a pomocí vzorečku

$$p = \frac{s}{t}$$

se určila rychlost přísuvu.

Z výsledků (tab. 19) lze vidět, že naměřený rychloposuv příčného suportu je $3404 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, což je o $1596 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ méně, než udává výrobce. Ostatní naměřené rychlosti přibližně odpovídají nastaveným hodnotám. Drobné rozdíly naměřených hodnot od nastavených můžou být způsobeny špatnou reakční dobou při stopování času.

Měřená délka s [mm]:	250	15	30	40	60	90
Nas. přísuv p [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]:	RP	100	200	300	400	500
Číslo měření:	Změřený čas [s]:					
1.	3,62	9,24	9,19	8,31	9,26	11,02
2.	3,49	9,14	9,3	8,43	9,36	11,05
3.	3,29	9,33	9,37	8,48	9,33	10,99
4.	3,43	9,21	9,19	8,36	9,28	11,14
5.	3,35	9,25	9,28	8,35	9,36	11,08
6.	3,26	9,32	9,3	8,48	9,32	11,12
Průměr [s]:	$3,41 \pm 0,12$	$9,25 \pm 0,06$	$9,25 \pm 0,07$	$8,40 \pm 0,06$	$9,32 \pm 0,04$	$11,07 \pm 0,05$
Přísuv p [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]:	3404	97	195	286	386	488

Tab. 19 Měření rychlosti přísuvu

7 Diskuze

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vybrání zkoušek geometrických a pracovních přesností pro hrotový soustruh Chevalier FCL 2140. Dále návrh, provedení a vyhodnocení vybraných zkoušek, měření a vyhodnocení tuhosti vřetena, otáček vřetena a rychlosti podélného a příčného suportu. Nejprve bylo vybráno 8 zkoušek geometrických přesností a 2 zkoušky pracovních přesností z normy ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů - Zkoušky přesnosti [8] a ČSN 20 0306 Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů [9].

Zkoušky geometrické přesnosti:

1. vyrovnaní vodících ploch do vodorovné polohy,
2. čelní házení opěrné plochy vřetena,
3. obvodové házení vnější středící plochy vřetena,
4. obvodové házení kuželové dutiny vřetena,
5. měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože,
6. kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu,
7. kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou,
8. kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu.

Zkoušky pracovní přesnosti:

1. obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle,
2. obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle.

Metodiky těchto zkoušek byly převzaty z již zmíněných norem a poupraveny s ohledem na možné provedení v laboratoři.

Vyrovnaní vodících ploch do vodorovné polohy

V této zkoušce se také ověřovala přímost a rovinnost vodících ploch. K měření se použila koincidenční vodováha s přesností $0,01 \text{ mm.m}^{-1}$. Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.1 a realizace v kapitole 6.1.1.

Přímost první vodící plochy - $0,008 \pm 0,008 \text{ mm.m}^{-1}$ a přímost druhé vodící plochy - $0,010 \pm 0,008 \text{ mm.m}^{-1}$. Přímost obou vodících ploch je v toleranci - $0,02 \text{ mm.m}^{-1}$.

Rovinnost vodících ploch - $0,024 \pm 0,008 \text{ mm.m}^{-1}$. Rovinnost vodících ploch je v toleranci - $0,04 \text{ mm.m}^{-1}$.

Čelní házení opěrné plochy vřetena

Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.2 a realizace v kapitole 6.1.2. K měření se použil číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Čelní házení opěrné plochy - $0,0008 \pm 0,0003 \text{ mm}$ je v toleranci - $0,01 \text{ mm}$.

Obvodové házení vnější středící plochy vřetena

Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.3 a realizace v kapitole 6.1.3. K měření se použil číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Obvodové házení vnější středící plochy - $0,002 \pm 0,001 \text{ mm}$ je v toleranci - $0,01 \text{ mm}$.

Obvodové házení kuželové dutiny vřetena

Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.4 a realizace v kapitole 6.1.4. K měření se použil číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Obvodové házení kuželové dutiny - $0,0007 \pm 0,0003 \text{ mm}$ je v toleranci - $0,01 \text{ mm}$.

Všechny tři naměřené házivosti vřetena jsou s porovnáním s tolerancí velmi malé.

Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože

Tato zkouška byla modifikována ze zkoušky měření kolmosti pohybu příčných saní k ose vřetena, z důvodu absence pravítka, které by bylo možné umístit do vřetena. Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.5 a realizace v kapitole 6.1.5. K měření se použil číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm, příložný úhelník a pravítko, které se umístilo na lože. Naměřená hodnota kolmosti - $0,127 \pm 0,031 \text{ mm}$.

Kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu

Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.6 a realizace v kapitole 6.1.6. K měření se použil číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm a měřící trn o délce 250 mm. Rovnoběžnost ve vodorovné rovině - $0,011 \pm 0,001 \text{ mm}$ a ve svislé rovině - $0,014 \pm 0,001 \text{ mm}$. Rovinnost v obou rovinách vyšla v toleranci. Tolerance ve vodorovné rovině - $0,013/250 \text{ mm}$ a ve svislé - $0,017/250 \text{ mm}$.

Kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou

Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.7 a realizace v kapitole 6.1.7. K měření se použil číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Rovnoběžnost pohybu suportu

s hrotovou objímkou ve vodorovné rovině - $0,019 \pm 0,002$ mm a ve svislé rovině - $0,002 \pm 0,001$ mm. Obě rovnoběžnosti vyšly v toleranci. Tolerance ve vodorovné rovině - $0,025/170$ mm a ve svislé rovině - $0,034/170$ mm.

Kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu

Metodika měření je napsána v kapitole 5.1.8 a realizace v kapitole 6.1.8. K měření se použil číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm a měřicí trn o délce 300 mm. Rovnoběžnost kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu ve vodorovné rovině - $0,028 \pm 0,002$ mm a ve svislé rovině - $0,026 \pm 0,002$ mm. Obě rovnoběžnosti vyšly v toleranci. Tolerance ve vodorovné rovině - $0,03/300$ mm a ve svislé rovině - $0,03/300$ mm.

Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle

V této zkoušce se měřila kruhovitost a drsnost 2 obrobených nákrůžků. Metodika obrábění a metodika měření je popsána v kapitole 5.2.1 a realizace v kapitole 6.2.2. Pro zkoušku byl použit polotovar z oceli 11 600. K měření kruhovitosti byl použit 3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss PRISMO 5 a k měření drsnosti byl použit kontaktní drsnoměr Mitutoyo Surftest SV-2000.

Kruhovitost nákrůžku, který byl blíže ke sklíčidlu - $0,0073 \pm 0,001$ mm a kruhovitost druhého nákrůžku - $0,0080 \pm 0,0023$ mm. Obě hodnoty kruhovitosti vyšly v toleranci - $0,02$ mm

Drsnost R_a nákrůžku, který byl blíže ke sklíčidlu - $0,929 \pm 0,018$ μm a drsnost R_a druhého nákrůžku - $1,097 \pm 0,028$ μm . Obě hodnoty drsnosti R_a vyšly v toleranci - $1,6$ μm .

Obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle

V této zkoušce se měřila rovinnost a drsnost obrobeného čela. Metodika obrábění a metodika měření je popsána v kapitole 5.2.2 a realizace v kapitole 6.2.3. Pro zkoušku byl použit polotovar z oceli 11 600. K měření rovinnosti byl použit 3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss PRISMO 5 a k měření drsnosti byl použit kontaktní drsnoměr Mitutoyo Surftest SV-2000.

Rovinnost čela - $0,0039 \pm 0,0012$ mm vyšla v toleranci - $0,02$ mm.

Drsnost čela - $0,408 \pm 0,093$ μm vyšla v toleranci - $1,6$ μm .

Měření tuhosti vřetena

Metodika měření je popsána v kapitole 5.3 a realizace v 6.3. K měření tuhosti byl použit stojan se šroubem, třmenový dynamometr s tuhostí 5200 N.mm⁻¹ a číselníkový úchylkoměr s přesností 0,001 mm. Vřeteno bylo zatěžováno od 0 N do 1040 N s krokem 104 N. Zatěžovací charakteristika (viz graf. 3) má tvar polynomu druhého

řádu, tuhost se tedy se zatížením mění podle rovnice

$$k = \frac{F}{2 \cdot 10^{-8} x^2 + 10^{-6} x - 0,0003}$$

Měření otáček vřetena a měření posuvových ústrojí

Metodika měření je popsána v kapitole 5.4 a realizace v 6.4. K měření otáček vřetena se použil digitální laserový otáčkoměr DT 2234c a k němu reflexní proužek s rozměry 12 x 12 mm, který se nalepil na vnější plochu vřetena. Všechny naměřené hodnoty odpovídají nastaveným hodnotám (viz. tab. 17). Z tohoto hlediska je stroj spolehlivý.

K měření posuvových ústrojí se použily stopky, na kterých se stopoval čas přejezdu příčného a podélného suportu na daném úseku. Z naměřeného času a zvoleného úseku se vypočetla rychlost přejezdu a porovnála se s nastavenou hodnotou. Měřená rychlost podélného i příčného suportu byla od 100 mm.min⁻¹ do 500 mm.min⁻¹ po 100 mm.min⁻¹ a také byla měřena rychlost RP.

Vypočtené rychlosti z naměřených časů a daných úseků odpovídají konkrétním nastaveným hodnotám. Avšak při měření RP se rychlost suportů značně lišila od hodnot, které udává výrobce. U podélného suportu byla naměřena rychlost - **7042 mm.min⁻¹**, což je o **958 mm.min⁻¹** méně a u příčného suportu byla naměřena rychlost - **3404 mm.min⁻¹**, což je o **1596 mm.min⁻¹** méně.

8 Shrnutí a závěr

V bakalářské práci byl zkontrolován hrotový soustruh Chevalier FCL 2140, který je umístěn v Technické univerzitě v Liberci v budově L - Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace v laboratoři třískových technologií a procesů katedry obrábění a montáže. Byla kontrolována geometrická a pracovní přesnost stroje a tuhost vřetena. Byly také kontrolovány otáčky vřetena a rychlosti posuvových ústrojí.

Geometrická přesnost stroje byla kontrolována pomocí vybraných zkoušek uvedených v normách ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů - Zkoušky přesnosti [8] a ČSN 20 0306 Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů. [9]. Z norem byla měřena přímota a rovinnost vodících ploch, házení čelní opěrné plochy vřetena, házení vnější středící plochy vřetena, házení vnitřní středící plochy vřetena, rovnoběžnost osy vřetena s podélným pohybem suportu, rovnoběžnost pohybu suportu s hrotovou objímkou a rovnoběžnost kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu. Z vyhodnocení vyšlo, že všechny provedené zkoušky geometrických měření vyšly v toleranci s příslušnou normou. Byla provedena ještě jedna zkouška geometrické přesnosti, a to měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože. Tato zkouška byla modifikována z normy, tudíž je brána jako orientační.

Pracovní přesnost stroje byla kontrolována pomocí vybraných zkoušek uvedených v normě ČSN ISO 1708 Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů - Zkoušky přesnosti [8] a ČSN 20 0306 Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů. [9]. Z norem byly vybrány a realizovány dvě zkoušky pracovní přesnosti. Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle, na kterém se měřila kruhovitost a drsnost obrobených válcových ploch a obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle, na kterém se měřila rovinnost a drsnost obrobeného čela. Kruhovitost a rovinnost se měřila na 3D měřicím souřadnicovém stroji Carl Zeiss PRISMO 5 a drsnost na kontaktním drsnoměru Mitutoyo SurfTest SV-2000. Naměřené hodnoty vyšly v tolerancích daných příslušnou normou.

Vřeteno bylo podrobena měřením radiální tuhosti. Zkouška vychází z normy ČSN ISO 230-1 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek [10]. Toto měření je pouze informativní, protože v normě není žádná hodnota k porovnání. Maximální zatěžující síla byla 1040 N, která by neměla stroj poškodit. Při zatěžování do silového účinku 104 N nevznikala žádná deformace. Do 208 N se vřeteno deformovalo o zanedbatelnou hodnotu. Následně deformace parabolicky rostla se zatížením. Při následném odlehčení vřetena na 0 N zůstala zbytková deformace 0,0154 mm.

Při měření otáček vřetena se použil digitální laserový otáčkoměr DT 2234c. Z měření bylo zjištěno, že nastavené hodnoty odpovídají všem nastaveným hodnotám. Měření bylo provedeno až do 2000 ot.min⁻¹ pro 6 různých hodnot.

Při kontrole posuvových ústrojí se zjistilo, že rychloposuv podélného suportu je menší o 958 mm.min⁻¹, než udává výrobce. Při měření ostatních rychlostí se nastavená hodnota shodovala s naměřenou. V příčném směru byla rychlost RP o 1596 mm.min⁻¹ menší, než udává výrobce. Při měření ostatních rychlostí se nastavená hodnota opět shodovala s naměřenou.

Dle provedených zkoušek stroj splňuje tolerance dané normami geometrických a pracovních přesností a je vhodný pro výrobu přesných rotačních součástí.

Seznam obrázků

1	Základní řezné parametry při soustružení [1]	12
2	Popis soustružnického nože [2]	15
3	Hrotový soustruh [2]	17
4	Přímost [5]	20
5	Rovinnost [5]	20
6	Rovnoběžnost [7]	21
7	Kolmost [7]	21
8	Souosost [5]	22
9	Obvodové házení [5]	22
10	Čelní házení [5]	23
11	Osová vůle a osový pohyb [5]	23
12	Chevalier FCL-2140	24
13	Přímost vodících ploch v a) podélném směru; b) příčném směru [8] .	27
14	Čelní házení opěrné plochy vřetena [9]	27
15	Obvodové házení vnější středící plochy vřetena [8]	28
16	Obvodové házení kuželové dutiny vřetena [8]	28
17	Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože [8]	29
18	Kontrola rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu [8]	29
19	Kontrola rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou [8] . .	30
20	Kontrola rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu [8]	30
21	Obrábění válcového zkušebního obrobku ve sklíčidle [8]	31
22	Obrábění čela zkušebního obrobku ve sklíčidle [8]	31
23	Třmenový dynamometr [14]	32
24	Měření přímosti vodící plochy v podélném směru	36
25	Měření rovnoběžnosti vodících ploch v příčném směru	36
26	Vyznačení poloh ustavení vodováhy	36
27	Měření čelního házení opěrné plochy vřetena	38
28	Měření obvodového házení vnější středící plochy vřetena	39
29	Měření obvodového házení kuželové dutiny vřetena	40
30	Měření kolmosti pohybu příčných saní k vnější ploše lože	41

31	Měření rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu v rovině vodorovné	42
32	Měření rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu v rovině svislé	42
33	Měření rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou v rovině vodorovné	43
34	Měření rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objímkou v rovině svislé	43
35	Měření rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu v rovině vodorovné	44
36	Měření rovnoběžnosti kuželové dutiny hrotové objímky s pohybem suportu v rovině svislé	45
37	Kontaktní drsnoměr Mitutoyo Surf-test SV-2000	46
38	Carl Zeiss PRISMO 5; měřicí sondy; kalibrační koule	47
39	Obrobené nákržky pro měření kruhovitosti	47
40	Měření drsnosti obrobených nákržků	49
41	Obrobené čelo pro měření rovinnosti	49
42	Měření drsnosti obrobeného čela	51
43	Měření tuhosti vřetena	52
44	Digitální laserový otáčkoměr DT 2234c	53
45	Měření otáček vřetena	54

Seznam grafů

1	Grafický výsledek kruhovitosti jednoho měření	48
2	Grafický výsledek rovinnosti jednoho měření	50
3	Charakteristika tuhosti vřetena	53

Seznam tabulek

1	Technická data [15]	25
2	Studentovy hodnoty t pro 95% spolehlivost	33
3	Výsledky měření přímosti vodících ploch v podélném směru	37
4	Výsledky měření rovinnosti vodících ploch v příčném směru	37
5	Výsledky měření čelního házení opěrné plochy vřetena	38
6	Výsledky měření obvodového házení vnější středící plochy vřetena	39
7	Měření obvodového házení kuželové dutiny vřetena	40
8	Výsledky měření kolmosti příčných saní k vnější ploše lože	41
9	Výsledky měření rovnoběžnosti osy vřetena s podélným pohybem suportu ve vodorovné a svislé rovině	42
10	Výsledky měření rovnoběžnosti pohybu suportu s hrotovou objím-kou ve vodorovné a svislé rovině	44
11	Výsledky měření rovnoběžnosti kuželové dutina hrotové objímky s pohybem suportu ve vodorovné a svislé rovině	45
12	Výsledky kruhovitosti nákrůžků	48
13	Výsledky z měření drsnosti nákrůžků	49
14	Výsledky rovinnosti čela	50
15	Výsledky z měření drsnosti čela	51
16	Výsledky měření tuhosti vřetena	52
17	Hodnoty otáček vřetena	54
18	Měření rychlosti posuvu	55
19	Měření rychlosti přísuvu	55

Literatura

- [1] Vlach, Bohumil: *Technologie obrábění a montáže*. Praha: SNTL, 1990
- [2] *PRAXE - Základy soustružení a CNC soustružení*. [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/zaklady_soustruzeni.pdf
- [3] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 1. díl, Metody, stroje a nástroje pro obrábění. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1
- [4] HOSZOWSKI, Radek a Julie KOLAŘÍKOVÁ. *Nástrojové materiály*. [online]. Oloumoc, 2015 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1206>
- [5] Erazim, Karel: *Kontrola přesnosti obráběcích strojů*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1961
- [6] Leinveber, Jiří, a Pavel Vávral: *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. 5. vyd. Praha: Albra, 2011
- [7] *Geometrické tolerance*. [online]. 2014 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>
- [8] ČSN ISO 1708 *Přejímací podmínky univerzálních hrotových soustruhů. Zkoušky přesnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [9] ČSN 20 0306 *Přesnost jednovřetenových poloautomatických soustruhů*. Praha: Český normalizační institut, 1973.
- [10] ČSN ISO 223-1 *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Části 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [11] *Slinuté karbidy*. Ostravská univerzita [online]. Ostrava [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03007.html>

- [12] *Hlavní části soustruhu*. Ostravská univerzita [online]. Ostrava [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce2.htm>
- [13] *Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů*. [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní, 30. 8. 2013. [cit. 2020-04-04]. Dostupné na: <https://1url.cz/JKyR1>
- [14] *Přímé měření sil a momentů*. [online]. In: . [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [15] Chevalier FCL-2140 *Technická data soustruhu*
- [16] *ČSN ISO 8688-1*. Testovanie trvanlivosti pri frézovani. Část 1: Rovinné frezovanie. 1993. Nové Zámky: Výzkumný ústav náradia Vunar

Seznam příloh

Příloha č. 1

- hodnoty z měření přímosti vodících ploch v podélném směru,
- hodnoty z měření rovinnosti vodících ploch v příčném směru,
- hodnoty z měření rovinnosti zkušebního obrobku,
- hodnoty z měření drsnosti nákrůžků,
- hodnoty z měření drsnosti čela,
- hodnoty z měření tuhosti vřetena,
- hodnoty z měření otáček vřetena.

Příloha č. 2

- grafické výsledky z měření kruhovitosti,
- grafické výsledky z měření rovinnosti.