

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**PETR
VÁVRA**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



NEKONVENČNÍ METODY UPÍNÁNÍ OBROBKŮ

UNCONVENTIONAL METHODS OF WORKPIECE CLAMPING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR:

PETR VÁVRA

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. ZDENĚK PITRMUC, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM:

TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

PRAHA, 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Vávra	Jméno: Petr	Osobní číslo: 506571
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie		
Studijní program:	Teoretický základ strojniho inženýrství		
Studijní obor:	bez oboru		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nekonenční způsoby upínání obrobků

Název bakalářské práce anglicky:

Unconventional methods of workpiece clamping

Pokyny pro vypracování:

- 1) Obvyklé způsoby upínání obrobků při soustružnických operacích - zhodnocení
- 2) Nestandardní způsoby upínání, možnosti eliminace deformací od upnutí
- 3) Lepení/UV lepení obrobků
- 4) Základní technologické zkoušky lepených spojů

Seznam doporučené literatury:

S PACHBHAI, Shailesh a Raut LAUKIK. A Review on Design of Fixtures. International Journal of Engineering Research and General Science [online]. 2014, (2)
CHVÁLA, Břetislav a Josef VOTAVA. Přípravky. Praha: SNTL, 1988.
katalogy výrobců

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **08.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. podpis děkana(ky)
--	--	---

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady (literaturu, patenty, software a další) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování:

Rád bych zde chtěl poděkovat vedoucímu mojí bakalářské práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a také pomoc při realizaci praktických experimentů.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší konvenčně používaných upínacích přípravků pro soustružení. Obsahuje základní přehled jejich funkce, specifikací a praktická užití. V praktické části se zabývá koncepčním návrhem lepeného spoje pro obrábění zejména tenkostěnných obrobků, včetně realizace obrábění prstencového dílu a jeho následné kontroly.

Klíčová slova:

Upínání, upínání na soustruhu, soustružení, přípravek, upínání lepením, soustružení prstencových obrobků, upínání tenkostěnných obrobků

Abstract:

This bachelor thesis deals with the study of conventional turning fixtures. It contains an overview of their function, specifications and practical applications. The practical part deals with the conceptual design of a glued joint for the machining of mainly thin-walled workpieces, including the implementation of the machining of the ring part and its subsequent inspection.

Key words:

Clamping, lathe clamping, turning, workholding, fixture, glue clamping, ring-shaped parts turning, thin-walled parts clamping

Obsah

Obsah	7
1 Úvod.....	9
2 Specifika pro upínání na soustruhu	10
2.1 Soustružení.....	10
2.2 Síly působící při soustružení	10
2.3 Požadavky pro upínání dílů.....	11
3 Konvenční metody upínání na soustruzích	14
3.1 Sklíčidla	14
3.1.1 Ruční sklíčidla.....	15
3.1.2 Silová sklíčidla	16
3.1.3 Základní používané typy čelistí sklíčidel	19
3.2 Lícni desky.....	21
3.3 Kleštinové upínače	22
3.3.1 Dělení dle konstrukce	22
3.3.2 Typy kleštinových pouzder	24
3.4 Rozpínací trny	25
3.5 Pevné trny	26
3.6 Upínání mezi hroty.....	27
3.6.1 Upínací hroty.....	28
3.6.2 Lunety.....	28
3.6.3 Způsoby unášení.....	29
3.7 Speciální přípravky	30
4 Upínání lepeným spojem.....	32
4.1 Prvotní návrh a kontrola realizovatelnosti	33
4.2 Výběr lepidla.....	34

4.3 Použití vybavení	36
4.4 Zkoušky pevnosti lepeného spoje	38
4.4.1 Prvotní zkouška smykové pevnosti	38
4.4.2 Zkouška pevnosti při zatížení smykem a ohybem	41
4.5 Lepený spoj prstencového dílu – návrh 1	44
4.5.1 Dimenzování spoje	44
4.5.2 Výroba lepených dílů	45
4.5.3 Lepení	46
4.5.4 Obrábění	46
4.5.5 Kontrola tvaru po obrábění a vyhodnocení	47
4.6 Lepený spoj prstencového dílu – návrh 2	48
4.6.1 Příprava a lepení	48
4.6.2 Obrábění	49
4.6.3 Kontrola tvaru po obrábění a vyhodnocení	50
4.6.4 Povrch dílu po soustružení	52
5 Závěr	54
Reference	56
Seznam použitých symbolů a zkratk	59
Použitý software	60
Seznam obrázků	61
Seznam tabulek	63
Přílohy	64

1 Úvod

Soustružení je velmi častou operací při výrobě dílů v průmyslu, poskytuje pro velkou část dílů dostatečnou přesnost i kvalitu povrchu. Třískové obrábění je velmi produktivní, výrobní časy jsou oproti aditivním technologiím kratší a je ekonomicky méně náročné. Při procesech obrábění však na obrobek působí značné síly a je potřeba zajistit jeho stálou polohu, k tomu jsou používány upínací přípravky. Ty mohou být univerzální, s omezeným rozsahem použití nebo také navrhovány přímo pro konkrétní obráběný díl.

Konvenčně používané metody většinou fungují na principu silového upínání, kde s často nerovnoměrným rozložením sil působí deformace poddajných (zejména tenkostěnných) dílů, výrazně tak snižují přesnost výsledných dílů a výroba speciálních přípravků není vždy vhodným řešením.

Jedním z možných alternativních řešení pro dokončovací operace je upínání s využitím lepených spojů. Tato metoda není příliš rozšířena a není běžně komerčně dostupným řešením dodavatelů upínací techniky. Výhodou této metody je upnutí bez upínacích sil a díky tomu zamezení deformacím. Navíc při lepení jedné plochy umožňuje tato metoda obrábění zbylých ploch na jedno upnutí. Nevýhodami pak jsou zejména časová náročnost upínání i nutnost kontrol a speciálních návrhů pro každý nový obrobek.

První část bakalářské práce se zabývá shrnutím požadavků a specifik pro upínání dílů na soustruhu a běžně používaných upínacích metod pro soustružení, od univerzálních sklíčidel až po speciální přípravky. Uvedeny jsou základní využití těchto metod pro potřeby obrábění na konvenčním soustruhu i moderních CNC soustruzích a obráběcích centrech.

Cílem druhé části bakalářské práce bylo provést průzkum oblasti komerčních řešení a následně vytvořit vlastní koncepční návrh lepeného spoje, koncipovaného pro dokončovací operace pro soustružení tenkých prstencových dílů. Hlavním úkolem bylo zhodnotit proveditelnost tohoto nekonvenčního typu upnutí, s využitím běžně dostupných lepidel, provedením pevnostních zkoušek. Dílčím cílem bylo také zhodnotit, zdali je zvolené řešení vhodné, praktickou zkouškou soustružení typového dílu a provedením kontroly tvaru a povrchu.

2 Specifika pro upínání na soustruhu

2.1 Soustružení

Soustružení je technologie obrábění, při kterém hlavní pohyb koná obrobek – rotuje okolo osy vřetene (z). Obráběcím nástrojem při soustružení je nejčastěji soustružnický nůž, který se posouvá ve směru podélném, příčném nebo kombinací těchto pohybů. Typickými obrobky pro konvenční soustružení jsou díly sestávající se z rotačních ploch – válcových, kuželových i obecných tvarů. Soustružením lze také efektivně obrábět čelní plochy či řezat závity.[1]

2.2 Síly působící při soustružení

Při obrábění mezi obrobkem a řezným nástrojem působí řezné síly, jejichž velikosti zásadně ovlivňují výběr upnutí pro daný obrobek. Při užití rozkladu vektoru celkové řezné síly (R , Obrázek 2.1) do kartézského souřadného systému ho lze rozložit na následující složky:

- **síly řezné (tangenciální) F_c**

Řezná síla může dle [2] u soustružení válcové plochy tvořit až 90% celkové síly od řezného nástroje a je hlavním aspektem při volbě řezných podmínek i výkonu použitého stroje. Tato síla působí ve směru hlavního pohybu obrábění, tedy tečně k obráběnému válcovému povrchu, a vzhledem k vetknutému typu upnutí na kraji obrobku působí smykovou silou, ale také tvoří krouticí moment M_{kc} a ohybový moment M_{oc} .

$$M_{kc} = \frac{F_c \cdot d_{obr}}{2} \qquad M_{oc} = F_c \cdot l_{obr}$$

Kde d_{obr} je průměr obráběné plochy a l_{obr} je axiální vzdálenost místa obrábění od upnutí.

- **síly posuvové (axiální) F_f**

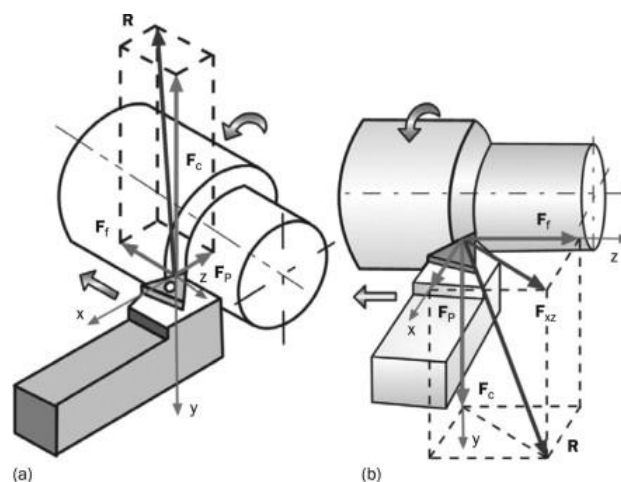
Posuvová síla působí ve směru posuvu – tj. pro podélné soustružení válcové plochy ve směru osy rotace obrobku. Velikost posuvové síly většinou odpovídá přibližně polovině řezné síly.[2] Vzhledem k upnutí působí tlakem (resp. tahem) a ohybovým momentem M_{of} (vzhledem ke středu profilu v místě upnutí).

$$M_{of} = \frac{F_f \cdot d_{obr}}{2}$$

- **síly pasivní (přítlačné nebo také radiální) F_p**

Pasivní síla působí ve směru normály obráběného povrchu, tvoří okolo čtvrtiny řezné síly (poměry jsou přibližné a záleží na řezných podmínkách, materiálu i geometrii řezného nástroje).[2] Více než na celkový výkon stroje má tato síla vliv na výslednou kvalitu povrchu, protože působí často ve směru nejmenší tuhosti soustavy obrobek – upnutí. Dále může při malé tuhosti způsobovat nechtěné chvění vedoucí kromě snížené kvality povrchu také rychlejšímu opotřebení nástroje.[1][3] Pasivní síla pak vůči středu průřezu v místě upnutí působí smykovým namáháním a ohybovým momentem M_{op} .

$$M_{op} = F_p \cdot L_{obr}$$



Obrázek 2.1: Rozložení řezné síly při soustružení: (a) vůči obrobku, (b) vůči nástroji [4]

Celkovou řeznou sílu R pak lze z těchto složek jednoduše spočítat:

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

Určení velikosti řezných sil

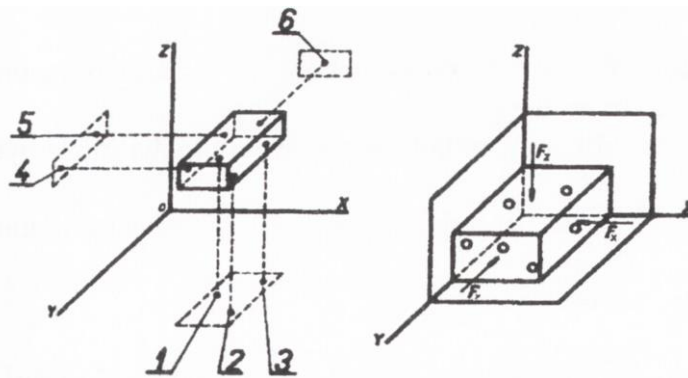
Řezné síly při soustružení (i jiných metodách obrábění) jsou určovány buďto přibližnými výpočty z empirických vztahů na základě geometrie nástroje, řezných podmínek a materiálových konstant nebo praktickým měřením užitím dynamometru.[3]

2.3 Požadavky pro upínání dílů

Ustavení obrobku

Pro upínání dílů za účelem obrábění je nutno definovat polohu obrobku, tento proces se nazývá ustavení. Každé těleso má v prostoru 6 stupňů volnosti – při použití kartézských souřadnic to jsou posuny v osách x , y , z a rotace kolem těchto os. Základním způsobem jednoznačného ustavení obrobku je definování roviny (resp. 3 body, odebere

jeden posuv a dvě rotace), přímky (resp. 2 body, odebere posuv ve dvou směrech) a bodu (zabrání rotaci), viz Obrázek 2.2. U příkladu ustavení do tříčelistového sklíčidla je nejprve definována rovina (položení čela válcového obrobku na plochu sklíčidla nebo stupňovitých čelistí (odpovídá 3 bodům), přímka je definována vystředěním obrobku (při těsném sevření obrobku se nemůže posouvat). Poslední stupeň volnosti zde není definován mechanicky – u rotační součásti nelze bez dalších přípravků zaručit správné natočení, je odebrán až dotažením čelistí požadovanou silou, kdy silový spoj zabrání osové rotaci, to může být problém při ustavování součástí, které nejsou zcela osově symetrické. Při konstrukci přípravků by toto ustavení mělo být jednoznačné, ideálně definované mechanickými prvky, jako jsou čepy (středicí, kuželové), lišty, či různé druhy opěrek (pevné, prizmatické, válcové).[2][5]



Obrázek 2.2: Ustavení kvádra v prostoru pomocí bodů rovin [6]

Obrobek by měl být vždy ustaven pomocí prvků, které jsou vztaženy k prvkům obráběným (rozměrově, geometrickými tolerancemi).[6]

Upnutí obrobku

Upnutí obrobku slouží k jeho udržení v pozici, do které byl ustaven, je tedy třeba zamezit posuvům tělesa do obou směrů os (pro jednoznačné ustavení stačí doraz v jednom směru osy).[5] Cílem je dosáhnout dostatečné pevnosti uchycení obrobku, při kterém nebude docházet ke změnám polohy vlivem obráběcích ani jiných působících sil (tíha obrobku, odstředivé síly a jiné). Upnutí se dosahuje silovým působením nebo také tvarovým spojem, někdy nejsou zvláštní upínací síly třeba (například těžký obrobek). Celá soustava upínacích přípravků a obráběného tělesa by měla mít dostatečnou pevnost, aby při obrábění nedocházelo k významným deformacím, které mohou mít nepříznivý vliv na přesnost obrobku.[3][2]

Specifika upínání na soustruhu

Při upínání na soustruhu jsou nejčastěji obráběny rotační součásti nebo čelní plochy, se kterými se kromě rozměrů také obvykle vážou požadavky na geometrické tolerance (dále GT) obrobku, u hřídelí zejména sousostí jednotlivých osazení nebo obvodová házení, pro součásti s vnitřní dírou pak také sousost vnitřní plochy k vnější. Nejlepších sousostí je dosahováno při obrábění na jedno upnutí, přeupínáním dochází obvykle k odchylkám, je tedy třeba brát při volbě přípravků důraz na minimální počet přeupínání a snažit se o obrábění ploch s vzájemnými GT při jednom upnutí, případně vhodně volit upínací základny (například použít základnu GT pro upnutí při obrábění tolerované plochy).[7]

3 Konvenční metody upínání na soustruzích

Konvenční metody upínání dílů při soustružení jsou nejčastějším způsobem upínání, využívaným při kusové i sériové výrobě. Hlavní výhodou je velká univerzálnost většiny zmíněných přípravků pro upínání různých obrobků, z čehož plyne i úspora nákladů. Výhodné jsou zejména pro kusovou výrobu, kdy je kladen důraz na univerzálnost přípravků, pro sériovou výrobu jsou pak často konstruovány speciální přípravky.[2]

3.1 Sklíčidla

Skličitla jsou upínací přípravky používané k upnutí středně velkých (hlavně rotačních) obrobků. Samostatně jsou vhodné k upínání spíše kratších dílů, v kombinaci s protějším upínacím hrotem a lunetami je lze využít i k upínání dlouhých a těžkých obrobků.[6]

Hlavní nevýhodou většiny skličitel je nižší přesnost upnutí, hodí se tedy hlavně pro obrábění na jedno upnutí nebo obrobky s malými nároky na sousost. Pro tenkostěnné obrobky nebo obrobky z měkkých materiálů je problémem také nerovnoměrné rozložení upínací síly způsobující deformace, opotřebením či přetěžováním také dochází k zhoršení přesnosti.[7]

Při obrábění s vysokými řeznými rychlostmi, a tudíž i vysokými otáčkami vřetene, je navíc také nutno zohlednit působení odstředivých sil na čelisti, v jejichž důsledku se snižuje skutečná síla na obrobek. Snížení upínací síly lze odečíst například z grafu poskytnutého výrobcem v katalogu. Některá moderní skličitla tuto sílu kompenzují. [8]

Skličitla lze rozdělit dle počtu čelistí, kdy nejčastější jsou skličitla tříčelist'ová, která zajišťují vystředěné ustavení typicky kruhových či šestihanných obrobků, například i při nedokonalém tvaru neobrobeného kruhového průřezu. Tato skličitla jsou většinou samo středící, dotahování probíhá u všech čelistí rovnoměrně – obrobek je tak nejprve posuvem čelistí vystředěn a následně silově upnut.[7]

Dalším často používaným typem skličitel jsou skličitla čtyřčelist'ová, která jsou vhodnou volbou pro upínání obrobků čtvercového průřezu, lze je použít i pro upínání osmihranů. Tato skličitla existují ve dvou základních provedeních – samostředící, u kterých jsou čelisti stejně jako u tříčelist'ových ovládány synchronně, a čtyřčelist'ová skličitla s nezávislým dotahováním protilehlých párů čelistí. Nevýhodou samostředících

čtyřčelistových sklíčidel je upínání nepřesných válcových (i jiných) obrobků, kdy dochází k silovému upnutí dvou čelistí, zbývající dvě pak působí silou menší nebo žádnou (v krajním případě je mezi nimi i vůle), což vede k nepřesnostem při obrábění, riziku špatného ustavení i možné nedostatečné pevnosti upnutí. Pro speciální účely se lze setkat se sklíčidly dvoučelistovými (upínání například obdélníkových či jinak nepravidelných dílů) či pro lepší rozložení tlaku i více čelistovými (upínání tenkostěnných obrobků, případně obrobků tvarově složitějších).[6][7]

3.1.1 Ruční sklíčidla

Ruční sklíčidla jsou nejčastěji používaným způsobem upínání na konvenčních soustruzích, jedná se o výchozí způsob, který je vhodný pro hrubování i dokončovací operace. V samostředícím provedení jsou ruční sklíčidla také nazývána jako sklíčidla univerzální.

Velkou výhodou ručních sklíčidel je široký rozsah jejich použití a relativně nízká pořizovací cena oproti silovým sklíčidlům – často poskytují velký rozsah velikostí upínaných obrobků, čelisti navíc mohou být oboustranné (případně otočné) a díky tomu lze upínat na stejném sklíčidle menší obrobky zvnějšku (utahováním čelistí k sobě) a větší za vnitřní tvary rozpínáním čelistí. Nevýhodou ručních sklíčidel je nutnost namáhavého a zdlouhavého dotahování klíčem a obtížnější kontrola upínací síly.[6][7]

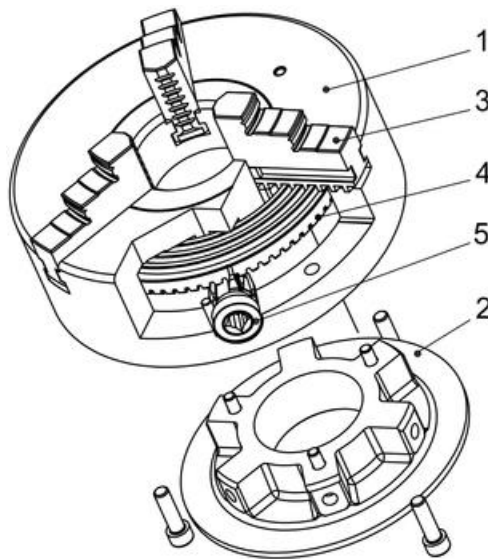


Obrázek 3.1: Ruční sklíčidlo, Schunk [8]

Princip funkce mechanismu ručního sklíčidla

V případě klasických univerzálních tříčelistových sklíčidel (princip funkce je pro čtyřčelistová samostředící sklíčidla podobný) viz. Obrázek 3.2 je dotahování čelistí prováděno pomocí klíčky (typicky se čtyřhranem), kdy otáčením pastorkem (5) dochází k rotaci hlavního kotouče (4) přes kuželové ozubení. Na vrchní straně kotouče se pak

nachází spirálová drážka (Archimedova spirála). Čelisti (3) nasunuté v T-drážkách tělesa sklíčidla (1) se pak díky jejich zubům pohybují rovnoměrně do středu (resp. od středu při opačném směru točení pastorkem. Číslem (2) je v obrázku označen kryt sklíčidla. Pro dosažení požadované síly může být výrobcem předepsána závislost momentu dotažení pastorku, při kterém je dosažena. Složitost systému je dána jednak požadavkem na převod, zároveň také potřebnou pevností a přesností upnutí. Sklíčidlo bývá na vřetení soustruhu našroubováno nebo upnuto zajišťovacím kroužkem a šroubem či normalizovaným šroubovým spojem.[7]



Obrázek 3.2: Schéma samostředícího ručního sklíčidla [9]

Moderní ruční sklíčidla často využívají podobného principu, jen místo spirály jsou u čelistí na kotouči připevněny mechanismy, které zajišťují možnost použití rovnoběžných drážek – ty mají větší kontaktní plochu se zuby čelistí, polohování je tak přesnější a nedochází k tak výraznému opotřebení.[8]

3.1.2 Silová sklíčidla

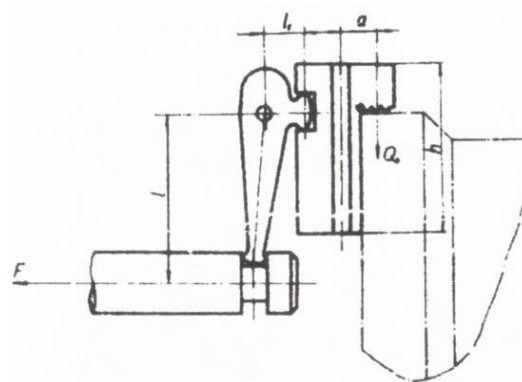
Jako silová sklíčidla jsou nazývána sklíčidla poháněná hydraulicky, pneumaticky nebo elektrickým servomotorem. Princip funkce je podobný, jako v případě ručních sklíčidel – obrobek je vystředěn a následně působením upínacích sil upnut. Silová sklíčidla mají obvykle menší rozsah, který je nutno seřídít pro upínání rozdílných dílů, potom je však upínání podstatně rychlejší a spolehlivější. Výhodou je také stále stejná upínací síla, kterou lze přesně regulovat pro upínání snadno deformovatelných obrobků. Nejčastěji se lze setkat se sklíčidly pneumatickými – vzduchové rozvody jsou většinou k dispozici a nehrozí nechtěné úniky hydraulických kapalin. Další výhodou těchto

silových sklíčidel je jednodušší konstrukce (vzhledem k absenci převodů) a možnost automatizace pro použití v CNC strojích.[2][10]

Pneumatická sklíčidla

Pneumatická sklíčidla poskytují snadnou automatizaci upínání a výrazně zvyšují také produktivitu. Upínací síla je snadno regulovatelná a působí stále. Používají se hlavně v sériové výrobě. Hlavní výhodou pneumatických sklíčidel je poměrně jednoduchá konstrukce, v kombinaci s dobrou dostupností rozvodů stlačeného vzduchu je pak také podstatně levnějším řešením než sklíčidla hydraulická. Konstrukce pneumatického sklíčidla také musí být z důvodu nižších tlaků větší než u hydrauliky. Pneumatické mechanismy také zpravidla musí být z důvodu bezpečnosti samosvorné, vzduch je působením rázů stlačitelný a mohlo by dojít k uvolnění obrobku.[6]

Pneumatická sklíčidla fungují většinou na principu jednoho centrálního pneumatického válce s pístem, k němu jsou připojena táhla na pevných čepech, která pak posouvají s čelistmi a vyvozuje upínací sílu, tato konstrukce je schematicky zobrazena na Obrázek 3.3.[6]



Obrázek 3.3: Schéma mechanismu pneumatického sklíčidla s táhly [6]

Další možnou konstrukcí používanou například u sklíčidel Schunk či SMW Autoblok je převod pohybu pístu na posuvný pohyb čelistí pomocí klínových mechanismů.[8][11]

Hydraulická sklíčidla

Hydraulická sklíčidla mají výhodu vyšších tlaků tlakových kapalin oproti vzduchu, to dovoluje použít menší upínací válce, navíc jsou kapaliny téměř nestlačitelné, tudíž je upnutí dostatečně bezpečné i bez samosvorného mechanismu. Při použití hydraulického oleje pak zároveň dochází i k mazání systému. Nevýhodou je u hydraulického sklíčidla vyšší cena oproti sklíčidlu pneumatickému, systém je složitější,

navíc na rozdíl od vzduchu není přípustný únik kapalin do prostor stroje, pohyb mechanismu je také pomalejší. Hydraulické systémy se používají zejména pro větší obrobky nebo při velkých výrobních dávkách.[6]

System, který používají například moderní sklíčidla výrobce Schunk, je zobrazen na Obrázek 3.4, kde se v prostřední části nachází píst, pohybující se ve směru osy díry. Černé bloky jsou spojeny šikmým vedením na pístu a uloženy tak, aby se pouze posouvaly v tečném směru k pístu, výškově nehybné. Pomocí drážkování je pak již stejně jako u sklíčidla ručního posouvána čelist.[8]



Obrázek 3.4: Vnitřní mechanismus hydraulického sklíčidla, Schunk [8]

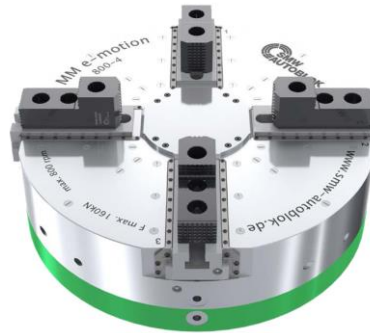
Sklíčidla elektromechanická

Sklíčidla poháněná elektromotory existovala již v minulém století, jednalo se hlavně o poměrně rozměrné systémy s elektromotorem, připojeným přes převody ozubených kol ke sklíčidlu, nepříliš odlišnému od sklíčidla ručního. Utahovací moment byl regulován použitím zubové spojky nebo regulací napětí motoru. V praxi tato sklíčidla nejsou příliš rozšířena a neposkytují dostatečné výhody opodstatňující výrazně složitější konstrukci oproti sklíčidlům pneumatickým či hydraulickým.[2]

Návrat k elektrickým sklíčidlům lze vidět například u výrobce SMW Autoblok, který představil moderní sklíčidlo **MM e-motion** (Obrázek 3.5) implementující do sklíčidla řadu moderních technologií. Sklíčidla této řady poskytují velký upínací rozsah se snadnou změnou upínaných rozměrů prostřednictvím předprogramovaných profilů upínání. Každá čelist je nezávisle stavitelná poháněna samostatným elektromotorem, čímž umožňuje upínat nejrůznější tvary. Také je monitorována poloha a upínací síla každé čelisti, tudíž je nastavena přesně požadovaná síla a obrobky jsou automaticky středěny.[11]

Nevýhodou této technologie bude pravděpodobně nesrovnatelně vyšší pořizovací cena, složitý systém požadující instalaci řídicích jednotek a kabeláže. Tento produkt tak

cílí zejména na moderní CNC obráběcí centra, kde může přivést úspory času i zvýšení kvality.

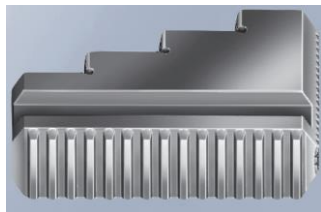


Obrázek 3.5: Sklíčidlo MM e-motion, SMW Autoblok [11]

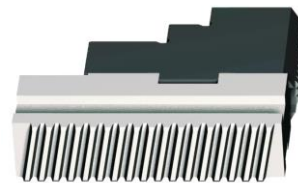
3.1.3 Základní používané typy čelistí sklíčidel

Sklíčidla mají ve většině případů vyměnitelné čelisti – ty se dělí zpravidla na měkké, tvrdé, hrubovací a segmentové, případně další speciální čelisti, jako jsou například čelisti výkyvné. Základní druhy čelistí jsou většinou dodávány buďto jako kombinace základní čelisti, ve které se mění pouze upínací část připevněná šrouby – to znamená nižší náklady na výměnu ovšem také rizika snížené přesnosti, nebo jako monolitní čelisti (viz Obrázek 3.8).[8]

Čelisti se také mohou lišit drážkováním na spodní straně, starší sklíčidla využívající spirálový systém mají drážky do obloukového tvaru spirály, ale i zuby čelistí moderních sklíčidel se mohou lišit, viz Obrázek 3.6 a Obrázek 3.7.



Obrázek 3.6: Čelisti, SMW Autoblok [11]



Obrázek 3.7: Čelisti, Schunk [8]

Čelisti tvrdé bývají osazeny na sklíčidlech jako výchozí, jsou velice univerzální, jelikož jsou navrhovány pro upínání širokého rozsahu průměrů, navíc mohou být i stupňovité a oboustranné. Upínací plochy bývají poměrně malé, tvarované pro univerzální upnutí různých obrobků. Povrch upínacích ploch je pak většinou pokryt rýhováním nebo diamantovým vzorem a je povrchově kalený či jinak vytvrzený. Tvrdé čelisti jsou schopny přenést poměrně velké obráběcí momenty, nejsou ale vhodné k upínání přesně obrobených ploch, jelikož zanechávají otisky, u měkčích materiálů i vrypy.[8]



Obrázek 3.8: Tvrdé stupňovité čelisti v jednodílném provedení, Schunk [8]

Měkké čelisti jsou pak určeny k upínání přesně obrobených ploch bez poškození nebo také kvůli větší styčné ploše. Jsou dodávány jako polotovary, které jsou určeny k upnutí do sklíčidla a následnému protočení (osoustružení) požadovaného průměru/tvaru. Jejich výhodou je tedy lepší rozložení upínací síly, přesné tvarování vyrobené pro konkrétní obrobek a z toho vyplývající lepší přesnost upnutí obráběného dílu. Nevýhody pak spočívají v nutnosti čelisti vyměnit pro upnutí jiného dílu – při opětovném použití pak dochází k vyššímu házení upnutého dílu vlivem nepatrné změny umístění čelistí, je tak vhodné je po výměně znovu obrobit (u některých moderních sklíčidel je výrobcem Schunk udáváno házení po výměně do 0,02 mm a obrobení by tedy nemělo být nutné). Oproti tvrdým čelistem také podléhají výraznějšímu opotřebení, z těchto důvodů je tedy třeba počítat s omezenou životností a tím i dalšími náklady.[8]

Čelisti s hroty (také nazývány hrubovací či zakusovací) čelisti jsou typické výraznějšími hroty na upínacích plochách, které bývají rovněž kalené. Jsou vhodné k upínání zejména neobrobených ploch, protože se při sepnutí zakousnou do upínané součásti. Tvarovým spojením se tak výrazně zvýší možné přenesené krouticí momenty potřebné pro velké úběry materiálu při procesech hrubování. Nelze je ovšem použít pro velmi tvrdé (například zakalené) materiály, kde hrozí nedostatečné zakousnutí čelistí a nižší pevnost spoje.[12][8]



Obrázek 3.9: Hrubovací čelisti pro vnější upnutí, Schunk [8]



Obrázek 3.10: Hliníkové segmentové čelisti, Schunk [8]

Segmentové čelisti pak poskytují podstatně větší upínací plochu než předchozí zmíněné, poskytují tak lepší rozložení síly. Jsou primárně určeny k upínání obrobků

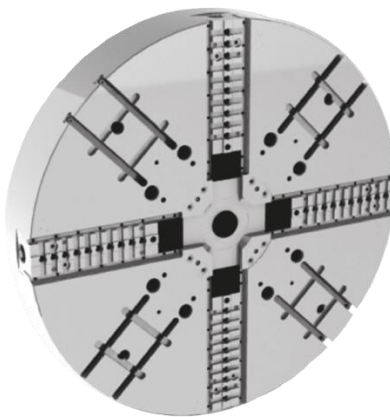
náchylných na deformace. Bývají vyrobeny z oceli nebo pro snížení hmotnosti a s ní spojených odstředivých sil také z hliníku.[8]

3.2 Lícni desky

Lícni desky jsou funkcí podobné sklíčidlům, jedná se o běžné příslušenství používané na konvenčních soustruzích, jejich čelisti jsou obvykle stavitelné nezávisle na sobě, což umožňuje upínání excentricky vůči ose upínaného profilu nebo upínání nejrůznějších tvarů. Nejčastější provedení je se čtyřmi čelistmi, lze se však setkat i s provedením pro tři, šest i více (zde není nutno použít všechny). Přesnost upínání je zde obvykle nižší než u sklíčidel, obrobky je nutno ručně vyrovnávat například podle hodinkových úchylkoměrů, upínání tedy není příliš produktivní a hodí se spíše pro kusovou až malosériovou výrobu.[7]

Lícni desky jsou využívány zejména pro upínání velkých či těžkých obrobků, pro které nelze využít sklíčidla, případně také pro vyvození vyšších upínacích sil. Často bývají vyrobeny z litiny, z důvodu velkých průměrů a v závislosti na nevyvážení je nutno regulovat pracovní otáčky vřetene, ty bývají většinou nižší než při užití sklíčidel. Často jsou využívány u velkých vertikálních soustruhů, lze se setkat s lícni deskami o rozměrech v řádu metrů.[7]

Stejně jako sklíčidla jsou lícni desky také dostupné v provedení ručním (polohování klíčem) či silovém (hydraulický či pneumatický pohon čelistí).



Obrázek 3.11: Moderní lícni deska s možností čtyř čelistí a T-drážkami [11]

Lícni desky mohou mít více variant, obvykle však mívají čtyři individuálně stavitelné čelisti stavitelné pomocí závitových pohybových šroubů nebo jen dotažením šroubem k T-drážce. Většinou také umožňují upínání pomocí upínek, které lze libovolně připevnit do drážky a obrobek s jejich pomocí přitáhnout k desce, to se hodí především

pro ploché tenké obrobky, které by se jinak nedaly upnout nebo deformovaly. Dalšími možnostmi upínání je upnutí pomocí úhelníku, který je upnut na desku pomocí šroubů v T-drážkách (případně oválných uzavřených drážkách), na něj je následně připevněna součást. Tohoto upnutí se využívá k obrábění válcových ploch rovnoběžný se základnou.[7]

Jelikož lícní desky umožňují upínat i těžké obrobky excentricky, je nutno vzhledem k tomu regulovat otáčky a často také použít vývažky, které jsou dle výpočtu umístěny na desku. Tím je zamezeno chvění i nadměrnému zatěžování stroje odstředivými silami.[7]

3.3 Kleštinové upínače

Kleštiny se v praxi používají zejména pro upínání tyčových polotovarů za vnější průměr, jsou podstatně přesnější než sklíčidla, a navíc jejich použitím nedochází k poškození obrobeného povrchu (dle použitého kleštinového pouzdra), rozložení síly je rovnoměrné a ve větší ploše. Zásadní nevýhodou kleštinových upínání je velmi malý rozsah upínaných obrobků (dle [2] je vhodné nepřesahovat 5% odchylky od stanoveného průměru), pro jiný rozměr upnutí je tak většinou potřeba vyměnit vnitřní kleštinu za jinou. Z toho důvodu jsou kleštiny nejčastěji používány v sériových výrobcích, kde nedochází k časté změně upínaného obrobku. Existují také speciální kleštiny pro upínání různých tvarů, jako například čtvercových či šestihranných tyčí.[7]

Moderní kleštinové upínače jsou výhodnou kombinací přesnosti (nízké házení upnuté plochy vůči ploše obráběné), rychlosti a zároveň vysoké tuhosti i pevnosti upnutí rozložené rovnoměrně na velké ploše. Také umožňují využití vyšších otáček vřetene nebo například přeupínání za rotace (například do protivřetene). Navíc jsou kleštinové upínače vhodné od upínání velmi malých průměrů až po průměry okolo 100 mm. Mechanismy kleštin jsou většinou dodávány v několika rozměrech vhodných pro určitý rozsah vnitřních kleštin.[11]

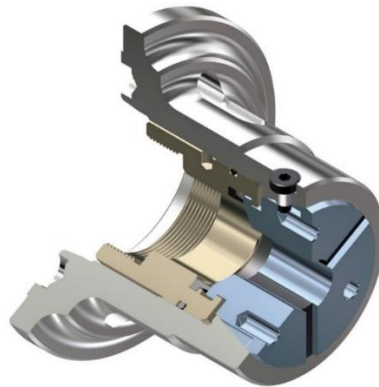
3.3.1 Dělení dle konstrukce

Kleštinové upínače lze rozdělit na dvě základní konstrukční provedení – kleštiny tažné a tlačné. Obě varianty fungují na principu poddajné kleštiny (pro snadnou deformaci jsou kleštiny po obvodu nařezány) dosedající vnější kuželovou plochou na vnitřní kuželovou plochu pouzdra. Působením axiální silou na jednu ze součástí dochází vlivem kuželové kontaktní plochy k působení radiální síly na obrobek, který je

vlivem tření upevněn vůči rotaci i axiálnímu posuvu. Středění probíhá rovnoměrnou deformací kleštiny.[2]

Tažné kleštiny

Kleštiny fungující na principu tažném jsou konstrukčně jednodušší, a tudíž také levnější. Fungují na principu vtahování samotné kleštiny do objímky tažnou tyčí, vlivem kuželové kontaktní plochy se pak kleština rovnoměrně sevře kolem obrobku. Jednoduchost řešení je vykoupena vtažením obrobku do upínače, dráha posuvu se navíc liší dle přesného rozměru upínaného obrobku a kuželovitosti ploch. Toto řešení tak není vhodné pro použití, kde je třeba zajistit přesnou polohu obrobku ve směru osy rotace z, jeho použití se tak omezuje zejména na první operace (například obrábění z tyčového materiálu), dochází tak ale k nutnosti zvýšení přídatku na obrábění čela. Nabízí se použití vnitřních dorazů, které se však také pohybují s kleštinovým pouzdem a pozice také není přesně definována. Vtahování kleštiny je poháněno hydraulickou či pneumatickou pohonnou jednotkou, v případě ručních kleštinových upínačů také dotahováním matice či klíčem jako u sklíčidel.[2][11]

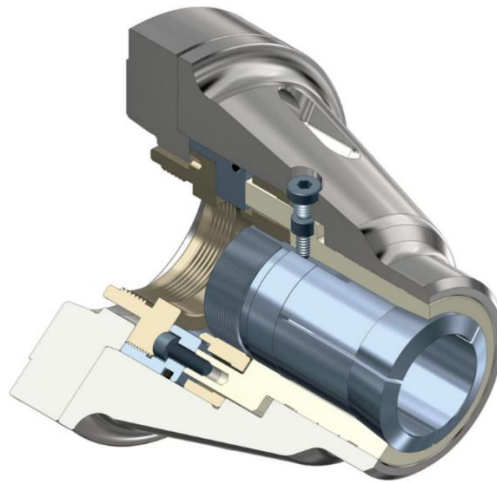


Obrázek 3.12: Příklad konstrukce tažné kleštiny, Royal Products [13]

Tlačné kleštiny

Druhým typem konstrukce jsou kleštinové upínáky tlačné, u kterých dochází k sevření kleštiny také na principu kuželové styčné plochy, zde je však samotná kleština i vnější objímka nehybná. K upnutí a silovému působení dochází tlačáním vnitřního pouzdra na kleštinu, která se tak sevře. Vzhledem k pevné poloze kleštiny tedy nedochází ani k posunutí obrobku, tudíž je možné využít protěžší doraz a pracovat s přesnou polohou obrobku. Tento typ je pro své výhody rozšířenější. Pohon, zde tlačení pouzdra, je stejně jako u kleštin tažných zajišťován hydraulickou či pneumatickou pohonnou jednotkou,

v případě ručních kleštinových upínačů také dotahováním matice či klíčem jako u sklíčidel.[2][11][13]



Obrázek 3.13: Řez tlačnou průchozí kleštinou, Royal Products [13]

3.3.2 Typy kleštinových pouzder

Vnitřní kleštiny, které svírají obrobek, jsou vyráběny v různých provedeních, liší se celkovým tvarem podle typu konstrukce i požadavků na upínání. Kromě toho jsou kleštiny vyráběny v řadě normalizovaných průřezů (kruhové, šestihranné, čtvercové), výrobci také poskytují výrobu speciálních kleštin dle požadavků zákazníka, které jsou schopny upínat obrobky celé řady průřezů a výrazně tak rozšiřují oblast jejich využití. Kleštiny mohou být také dodávány formou měkkého polotovaru na principu měkkých čelistí sklíčidel, které jsou určeny k obrobení dle přesných požadavků. Kleštiny jsou dále vyráběny s různou strukturou vnitřní kontaktní plochy s obrobkem. K dispozici jsou kleštiny hladké nebo s vložkou z měkkých materiálů nezanechávající otisky na obrobku. Pro pevnější upnutí jsou nabízeny kleštiny s povrchem pokrytým axiálními i radiálními drážkami či jiným vroubkováním.[14]

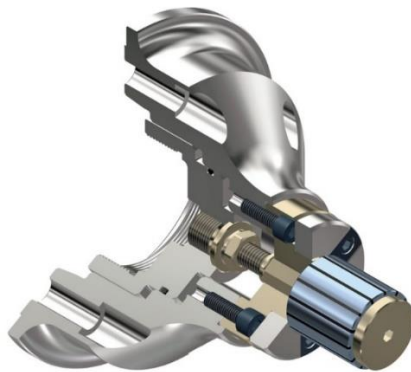
Pro zamezení vniku provozních kapalin i třísek jsou pak některé kleštiny v místech řezů vyplněny pryží, což může také vést ke zlepšení vlastností kleštiny.[13]



Obrázek 3.14: Ukázka obráběné kleštiny pro speciální užití, Royal Products [13]

3.4 Rozpínací trny

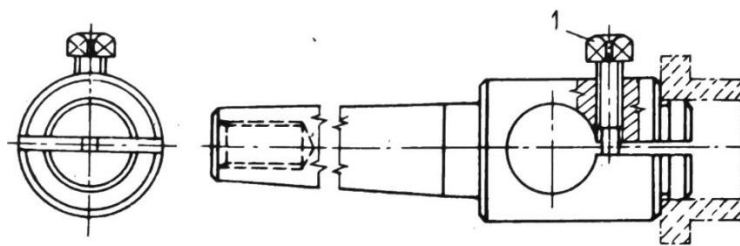
Rozpínací trny fungují na stejném principu jako kleštinové upínače, slouží ale k upínání obrobků za vnitřní průměr. Jejich funkce také spočívá v typicky oboustranně nařezané poddajné části, kterou je zde pouzdro. Rozpínací trny slouží k přesnému ustavení a upnutí součástí, zejména rotačních, za vnitřní průměr. Přesnost a obvodové házení upnutí je na úrovni kleštin a jsou mírně horší než při použití trnu pevného, zde je však výhodou snadná a rychlá výměna upínaných obrobků.[2]



Obrázek 3.15: Řez konstrukcí rozpínacího trnu, Royal Products [13]

Konstrukční provedení rozpínacích trnů

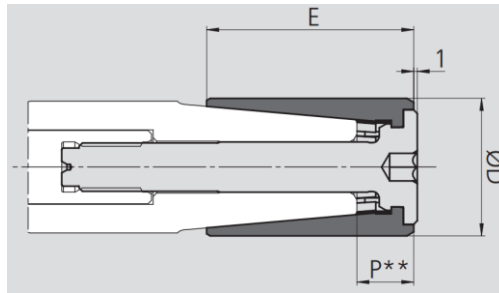
Existují zde různá provedení, například velmi jednoduchá (Obrázek 3.16), kdy dochází k rozpínání rozpůlené tyče šroubem (1), výhodou je jednoduchá konstrukce, v praxi se ale příliš nepoužívá – při i malých odchylkách rozměrů dochází ke kontaktu ve dvou bodech, navíc zatížení není rovnoměrné.[2]



Obrázek 3.16: Jednoduchý rozpínací trn [2]

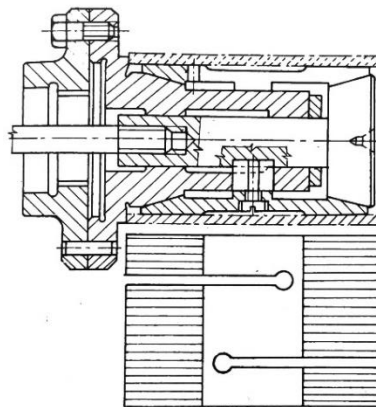
Častěji používaným konstrukčním provedením je oboustranně po obvodu nařezané poddajné pouzdro, které je z vnitřní strany kuželové po celé délce (Obrázek 3.17) kde za vnitřní posuvný čep je taháno tažnou trubkou. Nevýhodou řešení na obrázku je nedefinovaná poloha obrobku ve směru osy z, stejně jako u tažných kleštin. V případě trnů lze však snadno použít pevný doraz na upínacím přípravku, ke kterému

je obrobek upnutím přitažen. Toto řešení je možné využít také s dotahováním maticí na čele hřídele uvnitř pouzdra. [2]



Obrázek 3.17: Schéma mechanismu rozpínacího trnu, SMW Autoblok [11]

Další možnou konstrukcí pro zamezení axiálního posunu obrobku je použití tažného kuželového čepu s rozšiřujícím se kuzelem, kde je pouzdro pevně zapřeno o čelo osazení a pohyb koná pouze čep. Podobná konstrukce je zobrazena viz Obrázek 3.18, pouzdro však není zajištěno a rozpíná se oboustranně. Nevýhodou tohoto řešení může být obtížnější výměna pouzdra a komplikovanější konstrukce.[11]



Obrázek 3.18: Konstrukce rozpínacího trnu s oboustranně kuželovitým rozpínáním [2]

3.5 Pevné trny

Pevné trny jsou používány k upínání obrobků s přesnou dírou (obvykle s tolerancí H6, H7 nebo H8) v ose rotace. Nejčastěji používané jsou mírně kuželovité kalené a broušené trny (1:1300 až 1:2500), na které se obrobek nalisuje vypočtenou silou. Obrobek by šířkou neměl přesahovat 1,5 průměru trnu. Trn s nalisovaným obrobkem se pak upíná nejčastěji na konvenčním soustruhu s užitím upínání mezi trny s unášecím srdcem (viz část 3.6). Nevýhodou tohoto upínání je proměnná axiální poloha, potřeba speciálního trnu pro každý průměr díry a malé maximální úběry materiálu vzhledem k pevnosti spoje. Používá se zejména pro dokončovací operace při kusové výrobě. Výhodou je vysoká přesnost (vyšší než u rozpínacích) a přesné přeupínání díky středícím

důlkům. Výjimečně se používá také válcový trn s výpočtem přesahu nalisování dle teorie silnostěnných nádob.[2]

3.6 Upínání mezi hroty

Upínání mezi hroty je nejčastější pro obrobky s velkým poměrem délky vůči průměru, typicky hřídele. Způsob spočívá v navrtání středících důlků na čela a upnutím součásti mezi dva kuželové hroty. Výhodou tohoto typu upnutí je nejvyšší dosažitelná sousost obrobených ploch z uvedených metod, navíc s velmi vysokou přesností po přeupnutí (například broušení ploch po soustružení) a obrobením vnějších průměrů na jedno upnutí. Největší odchylky jsou způsobeny zejména nesousostí kuželových ploch hrotů či špatně navrtanými důlky. Tento způsob se používá jak u konvenčních (hrotových) soustruhů, tak i pro obrábění v moderních CNC obráběcích centrech. Počítat je také nutno s odstraněním důlků a případných vrypů na čelech obrobku, pokud to konstruktér požaduje.[7]



Obrázek 3.19: Upnutí mezi hroty s čelním unášením a otočným hrotem [15]

Středící důlky

Středící důlky bývají na polotovaru obrobeny v sériové výrobě nejčastěji spolu se zarovnáním čel obrobku použitím zarovnávacích a navrtávacích strojů, při menší výrobě také na soustruhu. Obráběcím nástrojem pro tvorbu důlků jsou speciální navrtávky pro středící důlky vyrobené z rychlořezné oceli či slinutých karbidů. Důlky jsou normalizovány základní provedení tvoří kuželové zahloubení o vrcholovém úhlu 60° v kombinaci s válcovou dírou zajišťující přesné dosednutí kuželových ploch. Další provedení je například s ochranným zahloubením (120°) pro ochranu před poškozením funkční plochy. Pro těžké obrobky lze použít kuželovou ploch s vrcholovým úhlem 90° . Přesné zhotovení důlků má zásadní vliv na přesnost obrobku.[7]

3.6.1 Upínací hroty

Při použití konvenčních hrotových soustruhů jsou nejčastěji hroty upínány v kuželové dutině vřetene, protější pak v objímce koníku. Hroty tvoří přesný kuželový protikus k vnitřní kuželové ploše středících důlků, tedy základním tvarem je kuželový hrot s vrcholovým úhlem 60° . Upínací hroty jsou normalizovány v různých velikostech, k upínání jsou používány Morse kužele, v označeních se tak setkáme se zkratkou MK doplněnou o velikost (např. MK4).[7] Hroty jsou také dodávány s upínákem typu VDI pro upnutí do nástrojové hlavy CNC. [16]

Lze se také setkat s hroty s kulovým zakončením, které lze použít při soustružení táhlých kuželových ploch, kdy je celý obrobek uchycen šikmo, to se týká zejména konvenčních soustruhů. Pro obrábění čela pak lze použít na straně pevného hrotu (u koníku, protivřeteno nebo nástrojová hlava) hrot na jedné straně zploštělý, ten tak z principu nemůže být otočný, takový hrot je zobrazen viz Obrázek 3.20. Pro upínání trubek nebo větších důlků existují hroty s větším průměrem.[7]



Obrázek 3.20: Pevný upínací hrot se zploštělou karbidovou špičkou a upnutím přes MK kužel, Neidlein [16]



Obrázek 3.21: Otočný upínací pro upnutí do nástrojové hlavy VDI, Neidlein [16]

Pro vyšší řezné rychlosti se používají kalené hroty se špičkou ze slinutého karbidu, pro soustružení obvykle také otočný upínací hrot na straně koníku (viz Obrázek 3.21), to umožňuje vyšší řezné rychlosti, ovšem na úkor vnesení vůlí ložisek, které mohou způsobovat chvění či snížení přesnosti.[7]

Jednou z dalších nevýhod upínání mezi hroty je ale také axiální poloha ovlivněná přesností středících důlků, proto jsou hroty vyráběny také v odpruženém provedení, kdy obrobek dosedá na přesně definovanou plochu, od které lze odměřovat další rozměry při automatizovaném provozu.[7]

3.6.2 Lunety

Během obrábění dlouhých štíhlých obrobků, typicky hřidelů v upnutí mezi hroty, dochází k jejím deformacím pod zatížením řeznými silami a tím způsobené chybě tvaru (u válcové plochy se průměr se vzdáleností od hrotů rozšiřuje). Lunety jsou používány

pro upínání štíhlých obrobků i v kombinaci se sklíčovými či kleštinami. Z toho důvodu je nutné v některých případech použít podpěrné přípravky zvané lunety. Ty jsou používány k zamezení deformací těchto obrobků a zároveň snižují riziko vibrací a tím zhoršené kvality povrchu. Lunety se dělí na dva základní druhy – pevné (Obrázek 3.23), které jsou umístěny pevně na loži soustruhu, a pohyblivé, které bývají u konvenčních soustruhů připevněny k suportu a pohybují se společně s nožem.[10]

U moderních CNC soustruhů jsou lunety obvykle řízeny programem a ovládány například hydraulicky, často disponují funkcí automatického středění, takovou lunetu lze vidět na Obrázek 3.22. Zatímco u konvenčních soustruhů je nutno styčné plochy lunet bez rolů ručně mazat, u moderních lunet je možnost automatického přívodu chladicí emulze. Rolny těchto lunet jsou navíc volitelné dle materiálu, od kalených ocelových, měkkých syntetických až po rolny ze slinutého karbidu.[11]



Obrázek 3.22: Moderní hydraulická luneta pro CNC centra, SMW Autoblok [11]



Obrázek 3.23: Pevná luneta konvenčního soustruhu [17]

3.6.3 Způsoby unášení

Jelikož samotným upnutím mezi hroty nedochází k přenosu dostatečného momentu pro obrábění, je nutno při upnutí mezi hroty používat speciální unášeče. Standardním způsobem unášení na konvenčních soustruzích je použití kombinace unášecího kotouče s unášecím čepem našroubovaného na vřetení v kombinaci s unášecím srdcem. To je na válcové ploše obrobku dotaženo šroubem a opěrem o čep kotouče dochází k přenosu otáček a krouticího momentu na obrobek. Nevýhodou tohoto způsobu unášení je nemožnost obrábět celou hřídel, navíc pro obrobení části pod srdcem je nutno obrobek otočit. Limitací jsou také maximální přenášené krouticí momenty (zejména pro hrubovací operace). Bez použití zakrytovaného kotouče také hrozí riziko zranění o rotující prvky.[7]

Druhým způsobem, často používaným na CNC zařízeních, je použití čelního unášení pomocí zubů nebo hrotů na hrotu umístěném ve vřetení, lze vidět

viz Obrázek 3.19. Ty se přitlačení koníku či jinak upevněného druhého hrotu zaryjí do obrobku a poskytují dostatečný přenos výkonu i pro náročné hrubovací operace. Obrobek pak lze obrábět po celé jeho délce, při vhodném použití hrotů i včetně krajních hran a protilehlého čela. Nevýhodou jsou vrypy po unášečích na čelní ploše obrobku, které je nutno následně osoustružit a riziko snížené přesnosti při opření o zuby, pro tuto metodu je také potřeba dostatečně velkého čela obrobku.[7][16]

Dalším obvyklým způsobem unášení je použití rýhovaných kuželových unášečů, které jsou vhodné pro upnutí zejména trubek, v případě vnějších pak i hřídelí, u kterých však dochází k zakrytí konce vnější plochy. Nevýhodou jsou opět vrypy po uchycení.[7][10]

Pro některé obrobky lze zejména na konvenčním soustruhu použít unášení pomocí čepu na hrotu vřetene a odpovídající díry v čele obrobku. V obrobku však zůstane poměrně hluboká díra.[7]

3.7 Speciální přípravky

Pokud konvenční metody z nějakého hlediska nejsou vyhovující – např. rychlost ustavení obrobku v sériové výrobě, přesnost ustavení pro dokončovací operace nebo s tím spojené deformace tenkých obrobků, je třeba použít speciální přípravky, které jsou však pro kusovou a malosériovou výrobu často nevhodné. Pro případy kusové či malosériové výroby je tak často nutno dbát na využívání velmi jednoduchých a nutných řešení, zatímco pro velké série je možné konstruovat komplexní přípravky s vyšší výrobní cenou.[2]

Speciální přípravky mohou být sestavené ze stavebnicových dílů, skupinové, použitelné pro více obrobků, nebo speciálně navržené pro konkrétní výrobek.[2]

Postup při návrhu přípravku by dle [5] měl probíhat v následujícím sledu:

1. Požadavky – co je cílem vývoje nebo vylepšení přípravku
2. Sběr informací – obrobek, dostupné stroje a nástroje
3. Návrh více variant – způsob upnutí, konstrukce přípravku, výrobní postupy
4. Výběr nejlepšího řešení – cena na kus, funkčnost
5. Realizace.

Při návrhu přípravku je vhodné používat dostupné standardizované komponenty a polotovary, které mohou výrazně snížit celkové náklady, vyhnout se také zbytečným dokončovacím operacím – je třeba dbát především na funkčnost. Při návrhu je také

vhodné nepoužívat zbytečně přesné tolerance – pro přípravky je doporučeno se držet 30-50% z tolerancí obrobku, jedná se o vhodný poměr přesnosti a ekonomických nákladů.[5]

Při návrhu přípravků je také potřeba uvažovat nad ergonomií pracovníka, zajistit dobrý přístup k ovládacím prvkům a řešení nevyžadující nadměrnou fyzickou námahu. Výměna obrobků ve stroji by pak měla být co nejméně časově náročná – minimalizace vedlejších časů.[2]

4 Upínání lepeným spojem

Důvody pro řešení

Při výrobě snadno deformovatelných dílů, jako jsou tenké prstencové díly, je ve výrobě často nutno pro dokončovací operace navrhnout speciální přípravek, který zajistí minimalizaci deformací a přesné obrobení. Návrh a výroba takovýchto přípravků jsou často velmi nákladné, proto je specifická zejména pro díly, které jsou vyráběny ve větších sériích nebo se speciálními požadavky na přesnost, v malých sériích tak dochází k velkému nárůstu nákladů na kus.[2]

Při požití silových způsobů upínání pro tenkostěnné obrobky vznikají deformace, které významným způsobem ovlivňují tvar – v případě prstencového dílu a univerzálního tříčelistového sklíčidla dochází k deformaci působením upínacích sil, soustružením pak vznikne díl se správným válcovým tvarem, po uvolnění sil se však elastické deformace vrátí do tvaru před upínáním – vznikne tak díl, který má rozdílnou tloušťku stěn, a navíc s nevyhovující kruhovitostí.

Pro účely kusové výroby jsou tyto přípravky často nevhodné, využití rozpínacích trnů vyžaduje nákup speciálního pouzdra. To bylo motivací k otestování konceptu lepení pro přesné dokončovací operace při soustružení, které by navíc při vhodné aplikaci a dostatečné pevnosti umožnilo obrábění ze třech stran obrobku (například vnitřní plochu, vnější plochu i čelo dílu). Obráběním na jedno upnutí pak lze dosáhnout dobré sousosty válcových ploch.[2]

Existující podobné systémy

Americká firma Blue Photon Technology & Workholding Systems LLC nabízí přípravky pro upínání obrobku UV vytvrzovaným lepidlem. Jejich patentované řešení poskytuje širokou škálu uplnění od upínání obrobků komplikovaných tvarů až po tenkostěnné obrobky s nízkými tolerancemi výroby. Princip spočívá v nanesení adheziva na speciální hlavy „gripperů“ se zdrojem UV záření, kterým je lepidlo vytvrzeno. Díky rozsahu vytvrzené mezery 0,5 až 3 mm (převáděno na metrické jednotky) lze navíc připevňovat i za tvarované plochy. Výrobce navíc také poskytuje automatizované řešení pro použití v CNC obráběcích centrech. Uvolnění obrobku probíhá ohřátím párou a pro následné čištění by mělo stačit použití horké vody. Evidentní nevýhodou řešení je nutnost nákupu mnoha drahých součástí a předpoklad používání

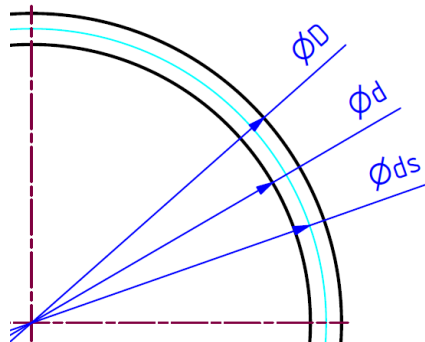
originálních lepidel, u všech komponent je navíc problematický nákup v ČR, prodejce zde nemá zastoupení.[18]



Obrázek 4.1: Ilustrační obrázek technologie Blue Photon [18]

4.1 Prvotní návrh a kontrola realizovatelnosti

Pro ověření teoretické požadované pevnosti byl proveden jednoduchý výpočet, kdy byly uvažovány síly: $F_c = 250$ N, $F_f = 125$ N a $F_p = 62,5$ N, parametry kroužku pak: $D = 100$ mm, $d = 90$ mm a výška $h = 10$ mm, viz Obrázek 4.2. Síla F_c zde působí tečně na vnější průměr, F_f axiálně ve stejném místě a F_p ve směru normály.



Obrázek 4.2: Rozměry kroužku

Dle části 2.2 pak lze dopočítat ohybové momenty:

$$M_{oc} = F_c h = 250 \cdot 10 \text{ Nmm} = 2500 \text{ Nmm}$$

$$M_{of} = F_f D/2 = 125 \cdot 50 \text{ Nmm} = 6250 \text{ Nmm}$$

$$M_{op} = F_p h = 62,5 \cdot 10 \text{ Nmm} = 625 \text{ Nmm}$$

$$M_{kc} = F_c D/2 = 250 \cdot 50 \text{ Nmm} = 12500 \text{ Nmm}$$

Charakteristiky průřezu pak:

$$S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (100^2 - 90^2)}{4} \text{ mm}^2 = 1492,26 \text{ mm}^2$$

$$W_o = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} = \frac{\pi(100^4 - 90^4)}{32 \cdot 100} \text{ mm}^3 = 33762 \text{ mm}^3$$

$$W_k = W_o/2 = 33762/2 \text{ mm}^3 = 16881 \text{ mm}^3$$

Normálová napětí:

$$\sigma_{o1} = \frac{M_{of} - M_{op}}{W_o} = \frac{6250 - 625}{33762} \text{ Nmm}^{-2} = 0,16 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\sigma_{o2} = \frac{M_{oc}}{W_o} = \frac{2500}{33762} \text{ Nmm}^{-2} = 0,074 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\sigma_{tlak} = \frac{F_f}{S} = \frac{-125}{1492,26} \text{ Nmm}^{-2} = -0,082 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{o1} = 0,16 \text{ Nmm}^{-2} = 0,16 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\sigma_{min} = -\sigma_{o1} + \sigma_{tlak} = (-0,16 - 0,082) \text{ Nmm}^{-2} = -0,242 \text{ Nmm}^{-2}$$

Smyková napětí:

$$\tau_{kc} = \frac{M_{kc}}{W_k} = \frac{12500}{16881} \text{ Nmm}^{-2} = 0,74 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\tau_s = \frac{F_c + F_p}{S} = \frac{250 + 62,5}{1492,26} \text{ Nmm}^{-2} = 0,21 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\tau_{max} = \tau_{kc} + \tau_s = (0,74 + 0,21) \text{ Nmm}^{-2} = 0,95 \text{ Nmm}^{-2}$$

Z tohoto výpočtu lze soudit, že vzhledem ke smykové pevnosti lepidel (desítky Nmm^{-2}) by mělo být upevnění pro dokončovací operace realizovatelné. Maximální smykové napětí je pak přibližně pětkrát vyšší než maximum napětí normálového.

4.2 Výběr lepidla

Požadavky

Lepený spoj pro účely obrábění by měl splňovat základní podmínky pro upnutí, v případě lepidla tedy chceme dosáhnout minimálních deformací během obrábění, vysokou pevnost ve smyku, zachování pevnosti při dosahovaných teplotách (při chlazeném procesu obrábění). Při procesu obrábění může také docházet k rázům, není tedy příliš vhodné použití křehkého lepidla s nízkou houževnatostí. Vzhledem k udržení přijatelné teploty dále bude nutné lepidlo chladit emulzí, proto je třeba také uvažovat vhodnost lepidla do těchto podmínek (případně volit takové, u něhož bude pokles pevnosti za dobu obrábění přijatelný a zohlednit to při návrhu).

Dalším požadavkem je při použití pro upevnění pro obrábění předpoklad co nejsnazšího rozebrání, kdy připadá v úvahu ohřátí obrobku (je třeba brát v potaz

lepené materiály), aby nadměrným ohřevem nedošlo k ovlivnění vlastností lepených materiálů, zde velmi záleží na materiálu obrobku – pro účely navrženého spoje bylo uvažována jako horní hranice teplota 200 °C, která by neměla způsobit změny vlastností většiny ocelí. Druhou možností rozebrání je užití chemických rozpouštědel – to je ovlivněno použitím lepidla, pro které je dostupné rozpouštědlo nezpůsobující poškození materiálu obrobku či jeho povrchové úpravy. Tato metoda může být posílena například užitím praček (např. na bázi ohřevu a ultrazvuku), pokud je k tomuto čištění užitý prostředek vhodný.

Faktorem pro výběr lepidla je i způsob a doba vytvrzení, základními možnostmi jsou lepidla kyanoakrylátová, dvousložková epoxidová a UV vytvrditelná. Pro jednoduchost aplikace a předpokladu snadnějšího odstranění bylo zvoleno lepidlo kyanoakrylátové.

Vlastnosti lepidla Loctite 480

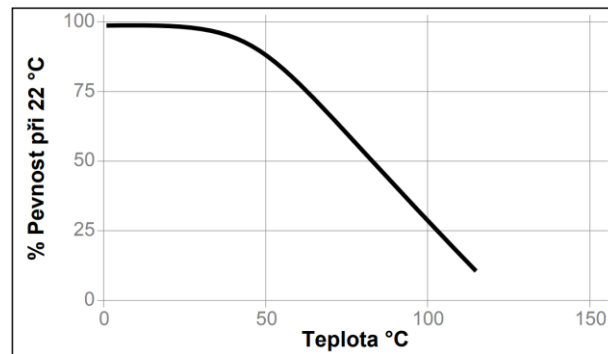
Lepidlo Loctite 480 je kyanoakrylátové jednosložkové lepidlo určené zejména pro spoje kovu, pryže a některých plastů. Toto lepidlo je plněné pryží a poskytuje zvýšenou houževnatost, odolnost proti rázům i loupání. V nevytvrzeném stavu se jedná o černou kapalinu s poměrně nízkou viskozitou (200 mPa·s). Vytvrzení probíhá reakcí se vzdušnou vlhkostí a jeho rychlost závisí na velikosti lepené plochy, tloušťky spoje a zejména vlhkosti okolního vzduchu.[19]

Tabulka 4.1: Základní technické specifikace Loctite 480 [19]

Název	LOCTITE 480
Oblast užití	Kovy, pryž, plasty, magnety
Technologie lepidla	Kyanoakrylátové
Specifika	Pryží plněné, houževnaté
Teplotní rozsah	-40–100°C
Maximální tloušťka lepené mezery	0,18 mm
Smyková pevnost (otryskaná ocel, 24h)	22–30 N·mm ⁻²
Pevnost v tahu	12–25 N·mm ⁻²
Viskozita	200 mPa·s

Zvolené lepidlo rovněž poměrně přesně vyhovuje požadavkům na možnost rozdělení spoje ohřátím, jak lze odečíst z křivky pevnosti při zvýšených teplotách (Obrázek 4.3), pro teploty do 50°C je pokles pevnosti přibližně 12,5%, což je jako krajní

hodnota přijatelné – pro použití v CNC zařízeních s dobrým chlazením pro dokončovací operace by to nemuselo znamenat výrazná omezení. Je však nutno při obrábění (i na konvenčním soustruhu) brát toto omezení v potaz a zajistit dostatečné chlazení (například použitím emulze nebo alespoň přizpůsobením řezných podmínek a kontrolou zahřívání).[19]



Obrázek 4.3: Závislost pevnosti lepeného spoje na teplotě, Technický list Loctite 480 [7]

Vytvrzené lepidlo by mělo rovněž být rozpustné například acetonem, jehož použití pro čištění i případné rozdělení (místo procesu ohřevu) je však nutno ověřit.[19]

4.3 Použité vybavení

Dynamometr Kistler 9265B

K měření sil při experimentálních zkouškách pevnosti lepených spojů i sil působících při obrábění byl použit dynamometr Kistler Type 9265B v kombinaci s nástavcem pro upnutí soustružnického nože do rozměru stopky 32x32 mm Kistler Type 9441B. Použitý dynamometr umožňuje přesné měření sil ve třech směrech kartézského souřadného systému (F_x, F_y, F_z), kde pro soustružení vnější plochy F_x odpovídá síle posuvové, F_y síle pasivní a F_z síle řezné.[20]

Jedná se o dynamometru fungující na piezoelektrickém principu, při měření tak téměř nedochází k deformacím. Díky velké pevnosti a vysoké frekvenci vzorkování má pak tento dynamometr velké rozlišení umožňující měření i malých dynamických změn u velkých zatížení.[20]



Obrázek 4.4: Dynamometr Kistler 9265B a držák 9441B [20]

Výstupem z dynamometru jsou signály nábojů z piezoelektrických snímačů přivedených do zesilovače a následně z něj do AC/DC převodníku. Digitální signál je pak již zpracován samotným počítačem se softwarem DynoWare.[20]

Hrotový soustruh TOS SU 50/1500

Dynamometr pro měření sil byl osazen na školním soustruhu SU 50/1500, výrobce TOS Lipník, v halových laboratořích FS ČVUT. Jedná se o hrotový soustruh o výkonu 2x 5,5 kW (tedy až 11 kW), tento soustruh je doplněn o frekvenční měnič pro přesné nastavení požadovaných otáček vřetene.[21][22]

Tabulka 4.2: Základní parametry soustruhu SU 50/1500 [22]

Výrobce	TOS Lipník
Rok výroby	1957
Výkon motorů	2x 5,5 kW
Pracovní otáčky vřetene	11,2 – 1400 ot./min
Příčný posuv	0,027 – 3,8 mm/ot.
Podélný posuv	0,013 – 1,9 mm/ot.



Obrázek 4.5: Soustruh SU 50/1500 osazený dynamometrem

Metalografická bruska Stuers Tegramin-25

Stuers Tegramin-25 je poloautomatická/ruční bruska (leštička) pro přípravu metalografických vzorků s automatickým dávkováním brusné nebo leštící kapaliny. Bruska disponuje přípravným kotoučem o průměru 250 mm, pro poloautomatický provoz ve verzi bez bezpečnostního krytu umožňující ruční zbroušení větších vzorků.[23]

Pásová pila Pilous ARG 300 plus S.A.F.

Jedná se o poloautomatickou pásovou pilu na kovové materiály.

Vnější soustružnický nůž

Pro soustružení vnějších válcových a čelních ploch byl použit soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou od výrobce Pramet. Konkrétně vnější držák typu **DCLNR 2020 K 09** s negativní geometrií – úhel nastavení 95° v kombinaci s břitovou destičkou **PRAMET** s označením **CNMG 120404E-NM:T7335** určenou k hrubování a dokončování obrobků zejména z nerezové oceli.[24]



Obrázek 4.6: Detail vnějšího nože

Vnitřní soustružnický nůž

K soustružení vnitřních válcových ploch byl použit vnitřní soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou skládající se z vnitřního držáku s negativní geometrií s označením **S16Q SDUCR-07** – úhel nastavení 93° osazený destičkou **PRAMET DCGT 11T304E-NF1** určenou pro jemné dokončovací až střední operace a plynulý řez, vhodnou pro nerezovou ocel.[24]



Obrázek 4.7: Detail vnitřního nože

4.4 Zkoušky pevnosti lepeného spoje

4.4.1 Prvotní zkouška smykové pevnosti

Prvním úkolem testování vhodnosti lepidla bylo určit, zdali dosahuje vybrané lepidlo Loctite 480 pevnost ve smyku odpovídající hodnotám z technického listu výrobce. K těmto účelům byl zvolen zkušební lepený spoj tyče z nerezové oceli o průměru 30 mm. Výrobce [19] udává pevnost ve smyku pro tryskaný ocelový povrch 22-30 Nmm⁻².

Výroba zkušebního tělesa

Pro výrobu potřebných dvou částí byla jako polotovar použita kruhová tyč z nerezové oceli 15-5 PH (EN 1.4545) o průměru 32 mm a délce přibližně 200 mm. Na konvenčním soustruhu v univerzálním sklíčidle byl nejprve osoustružen vnější průměr na 30 mm, následně zarovnáno čelo pro dosažení lepší kvality povrchu a kolmosti. Na rozbrušovací brusce pak byl oddělen kus tyče o délce asi 18 mm, čelo zbylé tyče bylo opět zarovnáno na soustruhu. Stejným způsobem byly odděleny další dvě části stejné délky pro účely zkoušky rozebrání. Jeden menší díl byl následně mírně zbroušen užitím metalografické brusky (kotouč s brusným papírem o zrnitosti 800) pro dosažení potenciálně nejhorších přípustných podmínek pro lepidlo (pro následné odstranění a z hlediska přesnosti ustavení by bylo vhodné použít broušený povrch ploch, ke kterým je díl upevněn lepeným spojem).

Lepení dílů

Před samotným lepením zkušebních součástí byly nejprve všechny styčné plochy odmaštěny nejprve acetonem, následně po usušení izopropylalkoholem. Na takto odmaštěné a uschlé styčné plochy bylo nanášeno lepidlo, jehož spotřeba je vzhledem k těsnému dosednutí a nízké viskozitě velmi malá. Nízká viskozita v kombinaci s hladkou plochou také způsobila, že lepené části nebylo možno ustavit do požadované polohy bez nechtěných posuvů, bylo tedy nutno použít pro minimalizaci házení přilepení papírovou páskou po obvodu dílů. Dle technického listu výrobce pak lepidlo k dosažení plné pevnosti potřebuje alespoň 24 hodin, zkušební díl byl ponechán několik dní při teplotě asi 22°C. Oproti údajům z technického listu nedošlo k vytvrzení do stavu manipulační pevnosti tak rychle, pravděpodobně z důvodu velké lepené plochy bez přístupu vzduchu a relativně nízké vzdušné vlhkosti v prostorách halových laboratoří.

Testovací zařízení – uspořádání

Pro testování lepených spojů bylo třeba měřit co nejpřesněji sílu, při které dojde k přetržení lepeného spoje. K tomuto účelu byl využit zmíněný dynamometr osazený ocelovým hranolem se zarovnaným čelem umístěný na soustruhu SU 500/1500.

Zkoušky lepeného spoje

Po několikadenním vytvrzení lepidla se spoj zdál být pevný a bylo možno přistoupit k samotným zkouškám pevnosti. Při zatěžování se nepodařilo dle očekávání

podloženého výpočtem spoj silou vyvozenou ručním posuvem soustruhu přerušit, spoj vydržel zátěž minimálně 3kN (maximální vyvozená síla dle měření dynamometru).

Soustružení – váleček

Po statické zkoušce pevnosti byl díl soustružen s otáčkami vřetene $n = 650$ ot./min a posuvem $f = 0,2$ mm/ot. Povrch byl nejprve zarovnan s malou hloubkou řezu, následně bylo provedeno soustružení s hloubkami řezu $a_{p1} = 0,5$ mm, $a_{p2} = 1$ mm. Vzhledem k vysokým pevnostem obráběného materiálu lze očekávat i poměrně vysoké síly (toto soustružení nebylo měřeno dynamometrem), během soustružení navíc nebylo znatelné žádné chvění, povrch byl hladký. Proces byl navíc proveden na konvenčním soustruhu bez použití emulze, lepený spoj tedy byl vystaven zvýšené teplotě. Dále již hloubka řezu vzhledem k rozměrům obrobku zvyšována nebyla, průměr byl po menších vrstvách osoustružen na 20 mm. Při následném ulomení smykovým zatěžováním na soustruhu s dynamometrem byla naměřena potřebná síla 1600 N, to odpovídá smykovému napětí vypočtenému jako podíl síly k ploše spoje:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{4 \cdot 1600}{\pi \cdot 20^2} \text{ Nmm}^{-2} = 5,1 \text{ Nmm}^{-2}.$$

To je několikanásobně nižší než smyková pevnost udávaná výrobcem (min. 22 Nmm^{-2}) může to být způsobeno zahřátím komponentu v kombinaci s broušeným povrchem. Po ulomení byly pilníkem strženy přečnávající hrany od soustružení, zaschlé lepidlo bylo snadno setřeno utěrkou a acetonem – očištění dílů tedy není problematické. Následně byl spoj stejným postupem jako v prvním případě slepen a ponechán 24 hodin.

Byla provedena znovu zkouška smykové pevnosti, kdy byla již naměřena maximální síla $F = 5366$ N, tu bylo prostřednictvím ručně utahovaného posuvu obtížné dosáhnout a pokus se stejným průřezem tak již opakován nebyl. Naměřená síla odpovídá dle dříve použitého vzorečku pro smykové napětí $\tau_{20} = 17,1 \text{ Nmm}^{-2}$, je tedy zřejmý vliv přehřátí lepidla na pevnost spoje, dosažená síla (resp. napětí) je více než trojnásobná a odchylka od hodnoty výrobce (cca 5 Nmm^{-2}) je akceptovatelná (rozdílný povrch, nepřesnosti měření apod.).

Rozebrání dílů teplem

Pro účely zkoušky rozebrání zvýšenou teplotou byly dva připravené válečky slepeny, soustruženými čely k sobě a rovněž nechány vytvrdnout. Potom byl slepený vzorek umístěn do pece vyhřáté na 140°C , kde byl nechán 45 minut. Po vyndání nebyl

s použitím kleští ručně rozebratelný (vnitřek nemusel být prohřátý), byl tedy umístěn do pece na dalších 45 minut, tentokrát 160°C. Po vyndání se již spoj podařilo bez větších problémů rozebrat.

4.4.2 Zkouška pevnosti při zatížení smykem a ohybem

Návrh experimentu

Pro další měření byl navržen pokus kombinující opakované zatěžování při stejných podmínkách a postupné zvyšování ramene síly způsobující ohybové zatížení. Výstupem tohoto pokusu by měla být závislost smykové pevnosti na vzdálenosti od lepeného spoje. Pro experiment byly použity matice s límcem velikosti M10, které lze přilepit na malou plochu a pouze pro účely ulomení osazovat vratovým šroubem M10 o délce $l = 200$ mm sloužícím jako dostatečně dlouhé rameno. Jelikož byly dostupné matice pozinkované a aby bylo dosaženo stejného rovného povrchu, byly nejprve hladké plochy zbrušeny (metalografická bruska Stuers). Takto připravené matice poskytují pro účely pokusu prstencovou plochu o vnějším průměru $D = 20$ mm a vnitřní díře $d = 11$ mm a plochou S spočítanou jako:

$$S = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(20^2 - 11^2)}{4} \text{ mm}^2 = 219 \text{ mm}^2.$$

Pokud bychom zde uvažovali ideální smykové zatížení, lze vycházet z hodnoty smykového napětí τ_{20} z minulého pokusu a dopočítat předpokládanou sílu F , která by měla stačit k ulomení při čistě smykovém zatížení.

$$F = S \cdot \tau_{20} = 219 \cdot 17,1 \text{ N} = 3744,9 \text{ N}$$

Z výpočtu je evidentní, že při kombinaci ohybu se smykem, kdy se smyková pevnost sníží, by neměl být problém navržený spoj ulomit (limit je cca 5 kN).

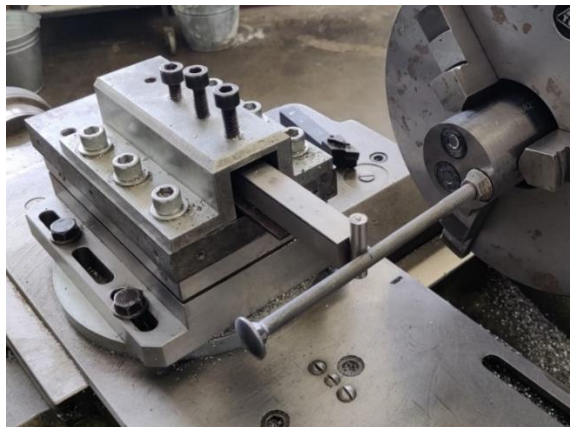
Příprava lepených spojů

Pro účely nalepení matic byly zvoleny přířezy ocelových tyčí o průměru $d \approx 60$ mm a délce dostatečné pro pevné upnutí ve sklíčidle ($l \approx 150$ mm), také z nerezové martenzitické oceli 15-5 PH (EN 1.4545) z důvodů dobrého dosažitelného povrchu po soustružení. Čela tyčí byla osoustružena pro dosažení rovného povrchu.

Soustružené tyče i 6 ks matic byly odmaštěny, následně bylo na matice nanášeno lepidlo – pro zamezení kontaktu dávkovače s povrchem dvě kapky rozetřené nerezovou planžetou, následně přitisknuty k čelu použitého tyčového podkladu. Spoj o menší ploše nabývá manipulační tuhosti poměrně rychle, po přiložení již není vhodné s dílem hýbat.

Měření a vyhodnocení

Pro měření byl použit zmíněný soustruh osazený dynamometrem a zatěžování posuvem ve směru F_y dynamometru, sestavu pro měření lze vidět viz Obrázek 4.8. Pro přesné určení místa doteku byl použit volně vložený ocelový váleček, který navíc minimalizuje přenos sil v ostatních směrech způsobených ohybem šroubu.



Obrázek 4.8: Sestava pro měření sil, vyložení 100 mm

Celkově tedy bylo k dispozici 6 lepených spojů (matic), při měření po jednotlivých bodech v každé vzdálenosti by výsledek byl příliš ovlivněn chybou konkrétního spoje, proto bylo měření provedeno ve třech vzdálenostech, pro každou dvakrát. Nejbližší vzdálenost od spoje byla vzhledem k tvaru matice zvolena až za ní, tj. $l_1 = 10$ mm, druhá $l_2 = 50$ mm a třetí $l_3 = 100$ mm. Vzdálenosti byly voleny tak, aby byly rozdíly evidentní a nedocházelo k přílišné deformaci šroubu. V poměru k velikosti lepené plochy jsou vzdálenosti 1 a 2 podstatně větší, než ke kterým by docházelo u obrábění. Z důvodu chyby při prvním měření s vyložení l_1 byl celý postup znovu opakován, pro každou vzdálenost jsou tedy čtyři naměřené síly, viz Tabulka 4.3, kde jsou F_{mi} síly při jednotlivých měřeních a F_{li} průměrné hodnoty pro každou vzdálenost.

Tabulka 4.3: Tabulka naměřených dat – ohyb

	F_{m1} [N]	F_{m2} [N]	F_{m3} [N]	F_{m4} [N]	F_{li} [N]
l_1	-	2200	2343	2302	2282
l_2	899,25	775	723	572	742
l_3	331	436	331	398	366

Vzhledem k rozdílným hodnotám pevnosti v tahu a ve smyku není možné využít výpočty podle pevnostních hypotéz, pro správné využití MKP by bylo potřeba znát další fyzikální charakteristiky vytvrzeného lepidla. Navíc lze očekávat změnu chování lepidla

před lomem, například plastické chování – nelze tedy snadno určit obecnou závislost pevnosti spoje. Proto zde byly jen dopočteny hodnoty smykových napětí τ_i na základě průměrných sil F_{li} , ohybové momenty M_{oi} a procento z původní smykové pevnosti vůči dříve dopočtenému τ_{20} z měření smykové pevnosti s použitím válečku.

Použité vztahy:

$$\tau_{kri} = \frac{F_{li}}{S}$$

$$M_{oi} = F_{li} \cdot l_i$$

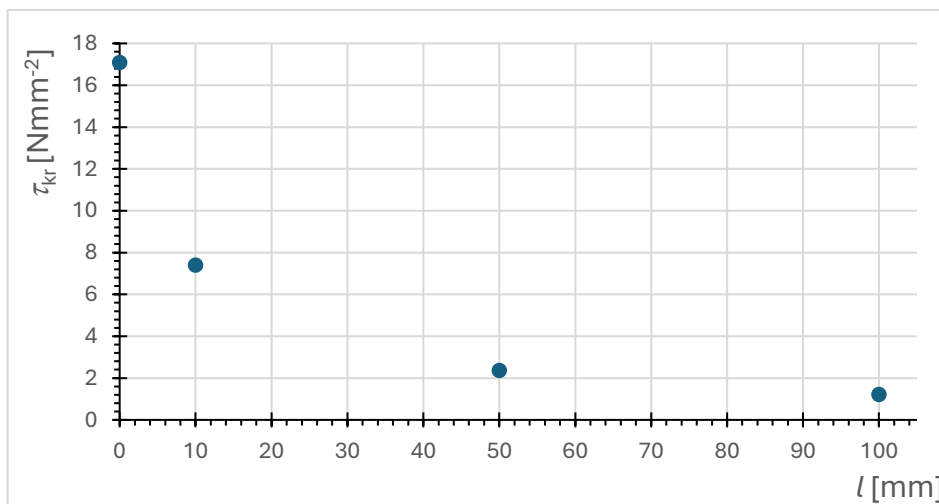
$$\% \tau_{20} = \frac{\tau_i}{\tau_{20}}$$

Kde i je index vzdálenosti odpovídající řádku v tabulce (l_1, l_2, l_3).

Tabulka 4.4: Dopočtené hodnoty k naměřeným silám

l_i [mm]	F_{li} [N]	τ_{kri} [Nmm ⁻²]	M_o [Nmm]	$\% \tau_{20}$ [Nmm ⁻²]
10	2282	10,41	22817	60,96%
50	742	3,39	37116	19,83%
100	366	1,67	36600	9,78%

Z naměřené závislosti v grafu (Obrázek 4.9) tedy lze vidět poměrně výrazný pokles pevnosti, který vychází pravděpodobně z menší odolnosti vůči tahovému namáhání. Tuto tendenci je nutno brát v potaz při návrhu lepeného spoje s větším vyložení od lepeného spoje. Pro účely obrábění prstenců s $D_{ext} \gg l_{obr}$, tak lze ohybové napětí zanedbat při náležité bezpečnosti spoje a provést návrh na základě smykových napětí. Pro obrábění obrobků s $D_{ext} \approx l_{obr}$ a větším je již nutno zvážit pokles pevnosti. D_{ext} je vnější průměr lepeného průřezu, l_{obr} pak kolmá vzdálenost obrábění od lepeného spoje.



Obrázek 4.9: Graf závislosti smykové pevnosti na vzdálenosti od spoje

4.5 Lepený spoj prstencového dílu – návrh 1

Pro ověření možností skutečného obrábění dílu náchylného na deformace od upnutí do sklíčidla byl zvolen prstencový díl vyrobený z nerezové trubky o vnějším průměru 102 mm a vnitřním průměru 86 mm. Cílem tohoto experimentu bylo určit, jestli bude možné díl obrábět při lepení pouze v několika bodech – z hlediska pevnosti spoje, přesnosti ustavení i následné kruhovitosti obrobeneho dílu.

4.5.1 Dimenzování spoje

Na základě předchozích znalostí pevnosti lepidla byl proveden návrh lepené plochy. Pro jednoduchost a z důvodu neznalosti přesných složek sil, které budou působit při obrábění, byl návrh proveden pro celkovou sílu $F_{návrh}$, při odhadu řezné síly na základě vzorců pro měrnou řeznou sílu k_c a řeznou sílu F_c dle [3]:

$$k_c = C_k R_m = 5 \cdot 700 \text{ Nmm}^{-2} = 3500 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$F_{cmax} = k_c a_p f = 3500 \cdot 0,6 \cdot 0,11 \text{ N} = 231 \text{ N}$$

Kde C_k je konstanta, pro soustružení $C_k = 3 \div 5$, vyšší hodnoty rozsahu pro obrábění na čisto – použito $C_k = 5$, $R_m = 700 \text{ Nmm}^{-2}$ je mez pevnosti v tahu použitého materiálu.[25]

Za předpokladu, že $F_p = 0,25F_c$ pak síla působící smykové napětí F_s :

$$F_s = \sqrt{F_c^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + (0,25 F_c)^2} \cong 1,08F_c$$

$$S_{lep} = \frac{F_{návrh}}{\tau_{min}} = \frac{1000}{10} \text{ mm}^2 \cong 196 \text{ mm}^2.$$

Pokud provedeme zjednodušení rozkladem krutu na 4 síly na středním průměru a smykovou sílu také, na jednom spoji vznikne maximální výslednice sil:

$$F_{1p} = \frac{D/2 \cdot F_{cmax}}{d_s/2 \cdot 4} + \frac{F_s}{4} = \frac{51 \cdot 231}{45,75 \cdot 4} + 1,08 \cdot \frac{231}{4} \text{ N} = 126,75 \text{ N}.$$

Zde by bylo korektní použít vektorový součet, vzhledem k malému úhlu F_s vůči tečnému směru je zde použit součet, kdy je výsledná síla nepatrně vyšší.

Pokud uvažujeme bezpečnost lepeného spoje $k = 2$ (vzhledem k zanedbání ohybu a tahu i nerovnoměrnému zatížení) a $\tau_{kr} = 5,1 \text{ Nmm}^{-2}$ z pevnosti válečku po soustružení dostaneme dosazením následující vzorec síly pro dimenzování jedné plochy:

$$F_{dim} = k \cdot F_{1p} = 2 \cdot 126,75 \text{ N} = 253,5 \text{ N}$$

$$S_{lep} = 4 \cdot \frac{F_{dim}}{\tau_{kr}} = 4 \cdot \frac{253,5}{5,1} \text{ mm}^2 = 198,8 \text{ mm}^2.$$

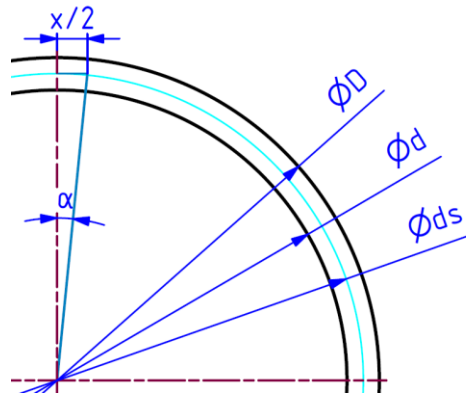
Tento návrh je vzhledem k neznámému chování při soustružení značně předdimenzován. Navíc úběrem materiálu dojde i ke zmenšení lepené plochy. Tu by bylo také vhodné zahrnout k výpočtu. Lepené plochy budou čtyři a je možno je považovat za výseče z mezikruží. Podíl lepené plochy vůči ploše celkové odpovídá podílu součtu úhlů vůči celkovému úhlu 360° .

$$\frac{S_{lep}}{S_{celk}} = \frac{\beta}{360^\circ} \rightarrow \beta = 360^\circ \frac{S_{lep}}{S_{celk}}$$

$$\beta = 360^\circ \cdot \frac{198,8}{1581} = 45,9^\circ$$

Zjednodušením na pravoúhlý trojúhelník (viz Obrázek 4.10), kde $\alpha = \beta/8 = 5,73^\circ$ je úhel poloviny výseče, $d_s = \frac{102+86}{2} \text{ mm} = 91,5 \text{ mm}$ je střední průměr, x délka jednoho lepeného spoje:

$$x = 2 \cdot \frac{d_s}{2} \cdot \sin(\alpha) = 91,5 \cdot \sin(5,73^\circ) \text{ mm} = 9,13 \text{ mm}.$$



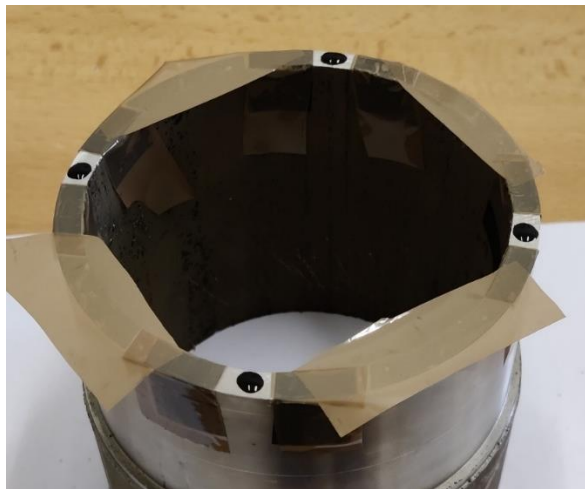
Obrázek 4.10: Část kroužku s rozměry pro výpočet

4.5.2 Výroba lepených dílů

Vybraný polotovár – nerezová kruhová trubka o vnějším průměru $D = 102 \text{ mm}$, tloušťce stěny $t = 8 \text{ mm}$ a délce $l \approx 100 \text{ mm}$, materiál austenitická nerezová ocel označení EN 1.4301 (odpovídá ČSN 17240). Trubka byla vyrovnána v upnutí do sklíčidla, následně byl vnější povrch a čelo zarovnan. Ze soustružené trubky byl na pásové pile uříznut kroužek o výšce asi 10 mm. Čelo zbylé trubky, která dále sloužila jako přípravek pro přilepení kroužku, bylo také osoustruženo. U obou dílů byly lehce opilovány hrany pro lepší dosednutí ploch při lepení.[25]

4.5.3 Lepení

Na odmaštěné základní trubce byly lepicí páskou vymezeny čtyři plochy o šířce přibližně $x = 9$ mm spočítaných dříve. Lepicí páska byla určena k zamezení slepení mimo vyhrazené plochy a zároveň vymezení mezery. Na vymezené plochy bylo nanášeno lepidlo (Obrázek 4.11) a mírně rozetřeno kovovou planžetou, následně byl přitisknut lepený kroužek. Již po přilepení bylo vidět, že lepidla bylo aplikováno nedostatečné množství vzhledem ke spáře tloušťky třech vrstev lepicí pásky. Spoj ale držel a tak byl ponechán 24 hodin vytvrdnout. Po vytvrzení byly při detailním pohledu vidět nedokonalosti spojů – některé nebyly vyplněné po celé délce.



Obrázek 4.11: Lepení ve čtyřech vymezených plochách

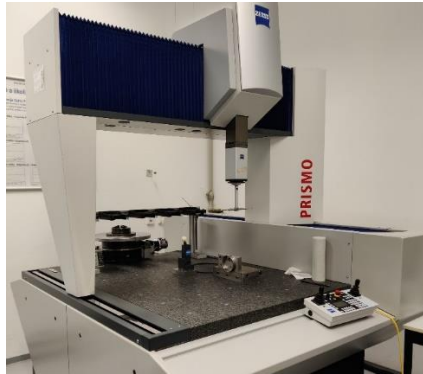
4.5.4 Obrábění

I přes evidentní sníženou plochu lepení bylo provedeno nejprve zkušební zatížení ve smyku silou 200 N dosaženou použitím soustruhu a dynamometru s hranolem, které spoj vydržel. Bylo tak provedeno soustružení vnějšího průměru prstence s přesahem přes lepený spoj. První úběr byl minimální pro zarovnání (nepřesnosti lepení, vyrovnání). Pro další soustružení byl nastaven posuv na otáčku $f_1 = 0,11$ mm/ot., hloubka řezu $a_{p1} = 0,2$ mm. Otáčky byly nastaveny dle frekvenčního měniče a snímače rychlosti $n \sim 200$ ot./min, $v = 60$ m/min před soustružením. Během soustružení bylo místo řezu chlazeno průběžně emulzí, aby nedošlo k nadměrnému ohřevu lepeného spoje. Se zvolenou hloubkou řezu se podařilo celou délku osoustružit, pro další krok byla nastavena na $a_{p2} = 0,3$ mm, při kterém spoj vydržel asi jednu otočku v záběru nože a obrobek upadl. Na ulomeném kroužku (Obrázek 4.13) lze vidět, že vymezení lepicí

páskou bylo nevhodné – příliš velká mezera mezi díly, lepidlo navíc vzlínalo do užší spáry mezi páskou a plochou kroužku, kde nedrželo.

4.5.5 Kontrola tvaru po obrábění a vyhodnocení

Pro kontrolu geometrických tolerancí po obrábění byl použit souřadnicový měřicí přístroj **Carl Zeiss Prismo** (dále jen CMM) osazený snímačem o průměru 2,5 mm umístěný v metrologickém středisku ústavu.



Obrázek 4.12: CMM Carl Zeiss PRISMO

Měření a naměřené hodnoty

Soustružený kroužek byl po ulomení ponechán při teplotě 20°C, při minimální upínací síle byl uchycen ve sklíčidle za vnitřní neobrobený povrch a přibližně v polovině výšky byla naměřena kružnice pro vyhodnocení kruhovitosti vnější soustružené plochy.

Výsledkem měření byla odchylka kruhovitosti 0,019 mm, kompletní protokol z měření je přiložen (Příloha 1) a v grafickém zobrazení lze vidět mírně elipsový tvar, který mohl být způsoben nesousosostí upínaného vnitřního průměru vůči vnějšímu. Kruhovitost nevykazuje znaky nepřesností, které by měly souviset s lepením ve čtyřech místech.



Obrázek 4.13: Ulomený kroužek s vyznačenými osami měření (viz protokol)

Zhodnocení

Lepení zde bylo evidentně vymezeno nevhodně použitím více vrstev pásky, lepidlo tak nezůstalo v místě vymezených spojů, dva z nich držely na velmi malé ploše. Po prasknutí jednoho poddimenzovaného spoje pak mohl obrobek upadnout. Při dostatečném množství lepidla a bez vymezování spáry by výsledky mohly být podstatně lepší (vyšší pevnost a nejspíše i lepší kruhovitost). Metoda lepení v bodech se však zdá být funkčním řešením.

4.6 Lepený spoj prstencového dílu – návrh 2

Cílem druhého experimentu lepení prstencového kroužku bylo otestovat obrábění s větší hloubkou řezu a následně komplexnější zkoušku dosažitelné přesnosti a možnosti dokončovacího soustružení s přístupem ze třech stran dílu. Vzhledem k výsledkům předchozího experimentu zde již nebylo cílem minimalizovat množství lepidla nýbrž vytvořit spoj, který téměř jistě vydrží, a bude možné provést i test odstranění obrobku použitím acetonu, případně ohřátí.

4.6.1 Příprava a lepení

K experimentu byl použit kroužek i základní trubka z předchozí části, před lepením byly na hranách obou lepených ploch sraženy otřepty po soustružení, aby díly dosedaly rovnoměrně plochami. Lepené plochy byly odmaštěny a nanášeno lepidlo, tentokrát v osmi bodech tak, aby byla po přitisknutí přilepena dostatečná plocha (viz Obrázek 4.14). Při lepení bylo lepidlo ještě mírně rozetřeno pootočením lepeného kroužku, který byl co nejlépe vystředěn a pro zajištění polohy přilepen proužky lepicí pásky.



Obrázek 4.14: Základní trubka s naneseným lepidlem

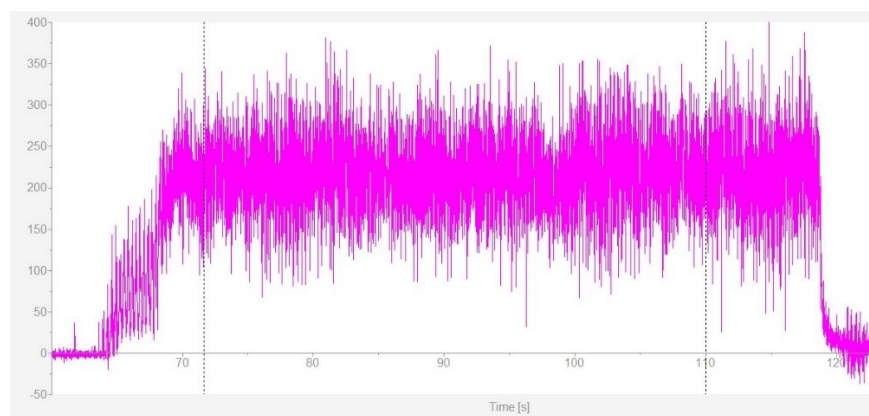
4.6.2 Obrábění

Po vytvrzení lepidla bylo provedeno soustružení. Slepený obrobek byl za základní trubku uchycen do univerzálního tříčelistového sklíčidla soustruhu a vyrovnán dle hodinek, aby bylo házení vnější plochy minimální. Následně bylo provedeno soustružení vnějšího průměru prstence s přesahem přes lepený spoj. Během soustružení bylo místo řezu chlazeno emulzí. Plocha byla stejně jako v prvním případě nejprve malým úběrem zarovnána. Pro další soustružení byl nastaven posuv na otáčku $f_1 = 0,11 \text{ mm/ot.}$, hloubka řezu $a_{p1} = 0,3 \text{ mm}$. Otáčky byly nastaveny opět dle frekvenčního měniče a snímače rychlosti $n \sim 200 \text{ ot./min}$, $v = 60 \text{ m/min}$ před soustružením. Nebylo patrné žádné chvění nebo deformace. Pro další soustružení byla zvolena dvojnásobná hloubka řezu $a_{p2} = 0,6 \text{ mm}$, posuv i otáčky zůstaly nezměněny. Soustružení také proběhlo bez problému. Obě vnější soustružení byly zaznamenány dynamometrem, velikosti naměřených sil jsou uvedeny v Tabulka 4.5, grafické zobrazení průběhů řezné síly z programu DynoWare lze vidět viz Obrázek 4.15.

Tabulka 4.5: Průměrné hodnoty naměřených a dopočtených složek sil z měření

a_p [mm]	F_c [N]	F_p [N]	F_f [N]	F_s [N]	R [N]
0,3	98,5	84,7	53,8	129,9	140,6
0,6	217,3	73,2	141,1	229,3	269,2

Z naměřených sil pro hloubku řezu $a_p = 0,6$ lze vidět, že použité poměry sil v prvním návrhu byly velmi blízké skutečnosti – $F_c \cong 2F_f \cong 4F_p$ i F_c téměř přesně odpovídá výpočtu s použitím měrné řezné síly.



Obrázek 4.15: Průběh zaznamenané řezné síly při $a_p = 0,6 \text{ mm}$, DynoWare

Po naměření sil byl za účelem použití vnitřního nože a snazší výměny nožů použit soustruh vybavený univerzální nožovou hlavou. Tento soustruh byl osazen čtyřčelistovým univerzálním sklíčidlem – to není pro upnutí kulatého polotovaru ideální,

ale vzhledem k malým silám během dokončování, přesnému seřízení sklíčidla a poddajné trubce bylo použito. Obrobek byl s užitím páčkového úchylkoměru nejprve vyrovnán na vnější průměr. Na soustruhu byl nastaven posuv $f = 0,1$ mm/ot. a otáčky opět přibližně $n = 200$ ot./min a následně frekvenčním měničem tak, aby rychlost vnějšího průměru byla $v_c = 60$ m/min. V prvním kroku byl po malých vrstvách ($a_p \sim 0,1$ mm) zarovnán vnitřní dosud neobrobený průměr, následně bylo provedeno soustružení na čisto s hloubkou řezu $a_p = 0,2$ mm, opět za ručního chlazení emulzí. Vnější nožem pak byl zarovnán vnější průměr i čelo a provedeno soustružení na čisto se stejnou hloubkou řezu jako v případě vnitřního průměru. Po dokončení byly ostré hrany mírně sraženy vnějším nožem.

Byla provedena kontrola páčkovým úchylkoměrem připevněným na magnetickém držáku k loži soustruhu. Házení vnějšího i vnitřního průměru bylo méně než 0,01 mm, házení čela pak do 0,015 mm.

Po soustružení bylo cílem vyzkoušet možnost nedestruktivního rozebrání, díl byl ponořen do skleněné kádinky s acetonem, k zamezení výparů pak přikryt a ponechán asi 2 hodiny. Po uplynutí doby bylo lepidlo zcela rozpuštěno v acetonu a díly stačilo otřít. Rozdělení acetonem je tedy možné použít i pro velmi tenké spoje, jen se s horším přístupem acetonu ke spoji také zvyšuje doba potřebného máčení. Urychlit by proces mohla například ultrazvuková pračka nebo zvýšená teplota procesu.



Obrázek 4.16: Obrobený a demontovaný kroužek

4.6.3 Kontrola tvaru po obrábění a vyhodnocení

Pro měření byl obrobek nejprve ponechán v laboratoři při teplotě 20°C, následně minimálním množstvím lepidla přilepen ve dvou bodech k přesné stavebnicové podložce obdélníkového tvaru (viz Obrázek 4.17), aby byla zajištěna jeho poloha během měření bez nežádoucích deformací vzniklých při použití sklíčidla. Při ustavení na obrázku je přilepena k desce plocha, která byla lepena i při obrábění.

S využitím CMM a programu Zeiss Calypso pak byly naměřeny potřebné body pro vyhodnocení rovinnosti čela (snímána kružnice na čele), kruhovitosti průřezu vnější i vnitřní plochy (snímány kružnice přibližně v polovině výšky kroužku). Pro vyhodnocení válcovitostí a sousostí vnitřní válcové plochy k vnější byly použity kružnice naměřené přibližně dva milimetry od spodního a milimetr od vrchního okraje.



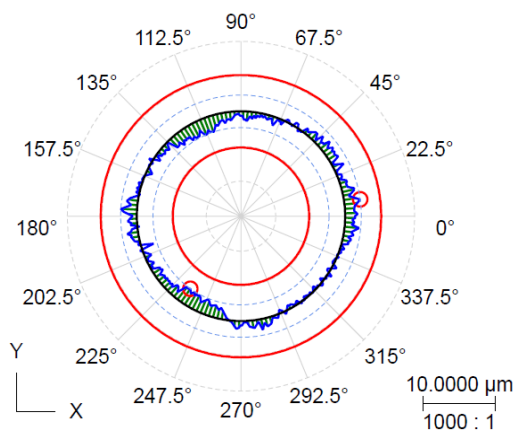
Obrázek 4.17: Kroužek přilepený k podložce pro měření

Vyhodnocení měření

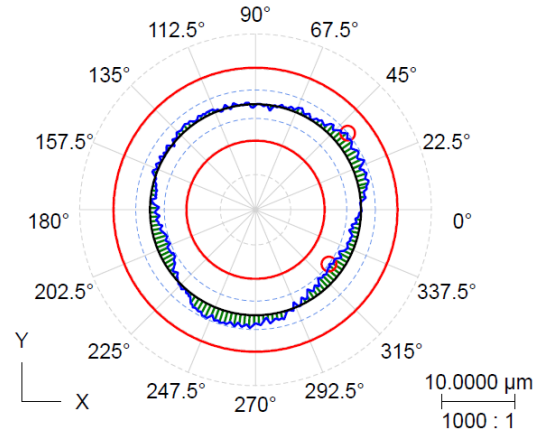
Naměřená data byla exportována do protokolu měření (Příloha 2), v Tabulka 4.6 jsou shrnuty hodnoty jednotlivých geometrických tolerancí. Kruhovitosti (Obrázek 4.18 a Obrázek 4.19) zde nevykazují jednoznačnou odchylku v určitém směru, spíše odpovídají běžným nepřesnostem při obrábění, stejně jako válcovitosti a sousost. V případě rovinnosti čela se z grafického zobrazení zdá být pravděpodobný vliv použití čtyřčelistového sklíčidla – pevnější uchycení dvou čelistí, přičemž v jednom směru jsou dvě protilehlá maxima a ve směru druhém (téměř kolmém) naopak minima. To by každopádně nemělo mít spojitost s lepením. Oproti hodnotám měřeným úchylkoměrem v upnutí po soustružení jsou zde odchylky srovnatelné, uvolněním lepidla tedy také pravděpodobně nedochází k deformacím.

Tabulka 4.6: Shrnutí naměřených odchylek geometrických tolerancí

Název	Odchylka CMM [mm]	Úchylkoměr [mm]
Kruhovitost D87,1	0,004	0,01
Kruhovitost D93,4	0,004	0,01
Válcovitost D87,1	0,009	nebylo měřeno
Válcovitost D93,4	0,014	nebylo měřeno
Sousost D87,1 k D93,4	0,014	nebylo měřeno
Rovinnost čela	0,01	0,015 (házení)



Obrázek 4.18: Grafika kruhovitosti, D87,1
(protokol měření, upraveno)



Obrázek 4.19: Grafika kruhovitosti, D93,4
(protokol měření, upraveno)

4.6.4 Povrch dílu po soustružení

Na dílu byla po soustružení provedena také kontrola drsnosti povrchu. Důvodem tohoto měření bylo jednak určit parametry drsnosti vzhledem k provedenému měření na CMM – do jaké míry může být měření v řádu mikrometrů ovlivněno kvalitou výsledného povrchu. Další informací, kterou by mělo být možno z naměřeného profilu drsnosti odečíst, je případná nepravidelnost profilu, poukazující na chvění obrobku.

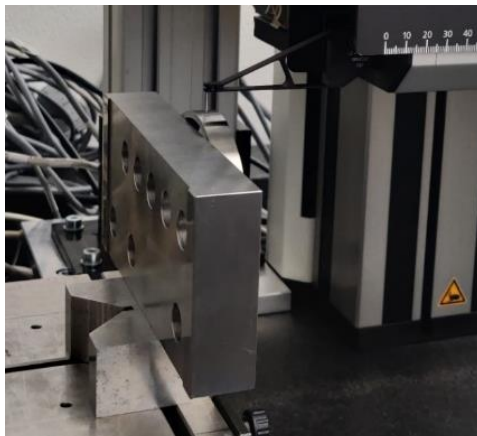
Použité vybavení

Pro měření drsnosti povrchu byl použit kombinovaný profiloměr s měřením drsnosti **Mahr MARSURF LD 120** osazený snímačem **Mahr LD A 14-10-2 1197**. Ten je připojen k počítači k programu MarWin a je z něj tak možné získat výstupy, v případě našeho použití pro měření drsnosti grafické znázornění profilu drsnosti a vybrané charakteristiky drsnosti.[26]

Měření drsnosti

Pro měření drsnosti byl díl upevněn k desce použité již pro předchozí měření na CMM, vzhledem k měření pouze drsnosti profilu nebylo nutné provádět kontrolu kolmého ustavení po položení desky na svěrák přístroje (deska má dostatečnou hmotnost, aby nedocházelo během měření k jakýmkoli pohybům obrobku). Měření bylo provedeno s nastavením základní délky dle tabulky pro volbu mezní vlnové délky [27], které je pro periodický profil (například soustružený povrch) vybíráno dle R_{sm} (průměrná šířka prvků profilu drsnosti), které by mělo odpovídat nastavenému posuvu $f = 0,01$ mm/ot. Při soustružení. Dle odhadu R_{sm} tedy byla zvolena mezní vlnová délka $\lambda_c = 0,25$ mm

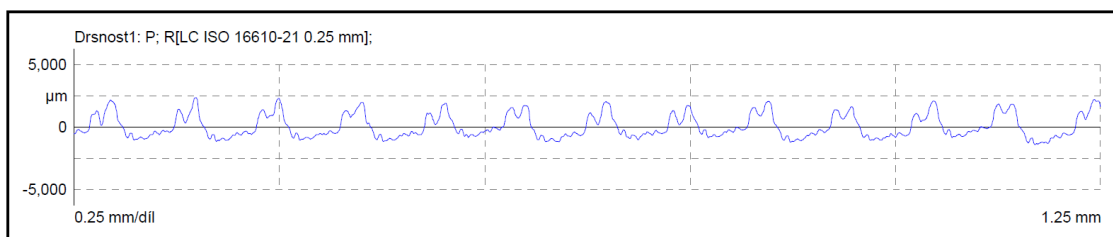
a provedeno měření na přenastavených (normalizovaných) pěti základních délkách + $\frac{1}{4}$ základní délky na nájezd a výjezd, tedy snímaná dráha $L_t = 1,5 \text{ mm}$. [3][27]



Obrázek 4.20: Ustavení obrobku pro měření drsnosti

Výsledky měření

Výsledky měření byly exportovány do protokolu (Příloha 3). Měřením byla vyhodnocena střední hodnota drsnosti $R_a = 0,798 \text{ } \mu\text{m}$, která je vzhledem k soustružení na čisto bez použití speciálních nožů velmi dobrá. Maximální výška profilu drsnosti R_{max} a průměrná výška profilu drsnosti se liší poměrně málo, což také ukazuje na dobře periodický profil. Z dalších parametrů povrchu (Obrázek 4.22) lze vidět, že dle předpokladu $R_{\text{sm}} = f$ a základní délka byla zvolena správně. Z grafického zobrazení profilu (Obrázek 4.21) pak lze vyhodnotit, že povrch je periodický s minimálními odchylkami – nedocházelo k nadměrnému chvění při obrábění. [3][27]



Obrázek 4.21: Zobrazení profilu drsnosti z protokolu měření

Parametry drsnosti - Drsnost1: P; R[LC ISO 16610-21 0.25 mm];			
Ra	0,795 μm	0,000	
Rz	3,389 μm	0,000	
Rmax	3,601 μm	0,000	
Rp	2,165 μm	0,000	
Rv	1,225 μm	0,000	
R Sm	99,875 μm	0,000	
R Mr (-1.00, 5.0)	24,48 %	0,00	
R Mr (-2.00, 5.0)	42,46 %	0,00	
R Mr (-3.00, 5.0)	97,92 %	0,00	

Obrázek 4.22: Naměřené hodnoty z protokolu měření

5 Závěr

V první části bakalářské práce byla provedena rešerše běžně dostupných metod upínání, z nichž by pro potřeby upínání tenkostěnných obrobků byla vhodná zejména sklíčidla se segmentovými čelistmi, rozpínací trny nebo výroba speciálního přípravku, které jsou však vhodné spíše pro vícekusovou výrobu vzhledem k výrobním nákladům.

Dále byl proveden výběr lepidla – z důvodů snadné aplikace, pevnosti i možnosti pro rozebrání jak tepelně (cca 150°C) nebo rozpuštěním acetonem bylo použito lepidlo Loctite 480 s kyanoakrylátovou technologií vytvrzení. To bylo následnými speciálními zkouškami pevnosti otestováno a vyhodnoceno jako vhodné pro zvolenou metodu.

Vybrané lepidlo bylo aplikováno při dokončovacím obrábění kroužku o největším průměru 94 mm a výsledné tloušťce stěny přibližně 3 mm. Při prvním pokusu obrábění bylo použito lepení spáry vymezené pomocí krycí pásky, kdy však došlo ke vzlínání lepidla o nízké viskozitě mezi pásku a díl a vyhrazené lepené plochy byly přilepeny nekvalitně. Při obrábění pak tento spoj vykazoval nižší pevnost a maximální dosažený úběr materiálu byl s posuvem $f = 0,11$ mm a hloubkou řezu $a_p = 0,2$ mm odpovídající řezné síle přibližně 100 N.

V dalším návrhu pro obrábění byl díl lepen s těsným kontaktem ploch a větší lepenou plochou. Lepený spoj pak bez problému vydržel hloubku řezu $a_p = 0,6$ mm při stejném posuvu, kdy byla naměřena řezná síla $F_c = 217$ N. Tento způsob pak umožnil obrobení vnitřního i vnějšího průměru zároveň s čelem při jednom upnutí. Na základě následného měření byly vyhodnoceny odchylky kruhovitosti vnějšího i vnitřního průměru 4 μm , souosost a válcovitosti ploch potom s odchylkami nepřesahujícími 15 μm . Profil drsnosti vnějšího povrchu obrobku pak nevykazoval známky chvění a s dosaženými hodnotami $R_a = 0,8$ μm a $R_z = 3,4$ μm ho lze vyhodnotit jako kvalitní vzhledem k soustružení.

Při testování však také byla objevena určitá úskalí pro použití tohoto typu lepidla. Hlavním nedostatkem je proměnná doba vytvrzení závisující na ploše lepeného spoje i okolní vlhkosti, dále také omezení z hlediska lepení spár, kdy se lepidlo ukázalo jako nevhodné pro lepení spojů s větší lepenou mezerou, kde byla kvalita i pevnost spoje horší než při lepení s těsným dotykem ploch.

Koncept lepení obrobků lze na základě provedených zkoušek a experimentů považovat za vhodný k aplikaci, je však potřeba zvážit vhodnost pro konkrétní obrobek,

kdy jsou limitujícími faktory pevnost spoje, tloušťka spáry i doba vytvrzení. Pro každou aplikaci je také potřeba zkontrolovat vliv ohybu, který by mohl způsobit odlupování a výrazné snížení smykové pevnosti.

Cíle bakalářské práce byly splněny a výsledkem jsou data, která mohou sloužit pro následné návrhy upínání touto metodou, jelikož nejsou k dispozici odborné práce zabývající se řešenou problematikou. Jedná se však pouze o základní zkoušky proveditelnosti, které by mohly být východiskem pro výzkum s využitím lepidel epoxidových nebo UV vytvrzovaných a aplikace na další obrobky typu tenkostěnných trubek nebo 3D tištěných dílů.

Reference

- [1] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [2] CHVÁLA, Břetislav a Josef VOTAVA. *Přípravky*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988, 276 s.
- [3] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 1. díl. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [4] BLACK, Stewart C., Vic CHILES, A.J. LISSAMAN a S.J. MARTIN. Mechanics of Cutting. In: *Principles of Engineering Manufacture*. 3rd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996, s. 246-266. ISBN 978-0-340-63195-9. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-340-63195-9.X5000-7>
- [5] S.PACHBHAI, Shailesh a Laukik P.RAUT. A Review on Design of Fixtures. *International Journal of Engineering Research and General Science* [online]. 2014, **2014**(2), 126-146 [cit. 2024-04-20]. ISSN 2091-2730. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/260790860_A_Review_on_Design_of_Fixtures
- [6] ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2336-6.
- [7] JANYŠ, Bohumil. *Upínání obrobků na soustruhu*. Praha: SNTL, 1961. Knižnice strojírenské výroby.
- [8] SCHUNK SE & CO. KG. *Technika upínání obrobků* [online]. c2024 [cit. 2024-04-30]. Dostupné z: https://schunk.com/cz/cs/technika-upinani-obrobku/c/PUB_8291
- [9] CHLADIL, Josef. *Přípravky a nástroje*. 3. vydání. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0408-6.
- [10] THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 19719:2010(en): Machine tools — Work holding chucks — Vocabulary*. 2010. Dostupné také z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19719:ed-1:v1:en>
- [11] ŠTULPA, Miloslav. *Technologie obrábění: CNC soustružení, frézování, vrtání : pro praxi*. Praha: Grada Publishing, 2022. ISBN 978-80-271-2883-9.

- [12] *SMW AUTOBLOK - Catalog - Turning* [online]. c2021 [cit. 2024-05-01].
Dostupné z: <https://www.smwautoblok.com/us/en/catalogs/turning>
- [13] ECatalogue Hoffmann Group. *Hoffman Group* [online]. [cit. 2024-03-28].
Dostupné z: https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_980
- [14] *Machine tool performance accessories*. New York: Royal Products, 2022.
Dostupné také z: <https://cataleap.com/blackhawk-flip/books/Royal-Products/Royal-Products-Machine-Tool-Performance-Accessories-2022-GA/170/index.html>
- [15] PM-TECH S.R.O. KLEŠTINY PRO VŘETENA A PROTIVŘETENA. *PM-TECH* [online]. c2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.pm-tech.cz/klestiny-pro-vretena-protivrtena/>
- [16] NEIDLEIN - UNÁŠENÍ - OBRÁBĚNÍ NA JEDNO UPNUTÍ. *ALBA precision* [online]. 2017, 08.06.2017 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/novinky/neidlein-unaseni-obrabeni-na-jedno-upnuti-1847.htm>
- [17] NEIDLEIN-SPANNZEUGE GMBH. *Tools for Clamping between Centers*. 2022. Dostupné také z: https://www.neidlein.de/media/downloads/Nei_Katalog-2022_01_ENG_ohne_Preise_low.pdf
- [18] Pevná luneta pro soustruh TU 2304 / TU 2304 V 3440361 Optimum. *Elespo.cz* [online]. c2010-2024 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.elespo.cz/pevna-luneta-pro-soustruh-tu-2304-tu-2304-v-3440361-optimum>
- [19] *Blue Photon: Workholding systems* [online]. c2024 [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://www.bluephotongrip.com/>
- [20] Technický list LOCTITE® 480. *Henkel Adhesives* [online]. leden 2017 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/instant-adhesives/loctite_4800.html

- [21] KISTLER INSTRUMENTE AG WINTERTHUR. Data sheet, Type 9265B, 9441B, 9443B. *Helmar J.A. Dobrowiecki* [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/9265b_nn3842.pdf
- [22] *Stroje Svoboda* [online]. [cit. 2024-04-16].
- [23] Soustruh SU 50/1500. *Stroje Svoboda* [online]. [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.strojesvoboda.cz/katalog.php?page=DETAIL&katalog=Stroje/Soustruh&key=&id=12746&ids=12769&o=1>
- [24] STURERS. *Tegramin–25/–30: Návod k použití*. 2021. Dostupné také z: https://www.struers.com/-/media/Library/Instruction-Manuals/Czech/16037025-01_A-CZ-Tegramin-25-30_IM.pdf?dmc=1&ts=20230430T0748019022&lm=20220622T115918Z
- [25] DORMER PRAMET. *SOUSTRUŽENÍ*. 2021. DP-CAT-TURNING-2021-CZ.
- [26] 1.4301 nerezová ocel. *HEINRICH KIPP WERK GmbH & Co. KG* [online]. c2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Slu%C5%BEby/P%C5%99ehled-materi%C3%A1l%C5%AF/nerezov%C3%A1-ocel/1-4301-nerezov%C3%A1-ocel.html>
- [27] MAHR GMBH GÖTTINGEN. *Marsurf UD 120 / Marsurf LD 120* [online]. [cit. 2024-05-12]. 3759781-29.01.2010. Dostupné z: https://swissinstruments.com/my_products/ud-120-ld-120-marwin/
- [28] MAHR, SPOL. S R.O. *MarSurf. Parametry drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>

Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratka	Význam	Jednotka
a_p	hloubka řezu	mm
CMM	souřadnicový měřicí přístroj (coordinate measuring machine)	-
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj (computer numerical control)	-
d	průměr (zejména vnitřní)	mm
D	průměr (zejména vnější)	mm
f	posuv na otáčku	mm/ot.
F_c	řezná složka řezné síly	N
F_f	posuvová složka řezné síly	N
F_p	pasivní složka řezné síly	N
GT	geometrická tolerance	-
l	délka	mm
M_k	krouticí moment	Nmm
M_o	ohybový moment	Nmm
MK	Morse kužel	-
MKP	metoda konečných prvků	-
n	otáčky vřetene	ot./min
R	celková řezná síla	N
S	plocha	mm ²
σ	normálové napětí	Nmm ⁻²
τ	smykové napětí	Nmm ⁻²
UV	světelné záření v ultrafialovém spektru (ultra-violet)	-
v_c	řezná rychlost	m/min
VDI	system upínání nástrojů	-
W_k	modul průřezu v krutu	mm ³
W_o	modul průřezu v ohybu	mm ³

Použitý software

1. Autodesk Inventor 2021, 2024
2. Microsoft Office 365
3. CitacePRO (www.citacepro.com)
4. Microsoft Malování
5. Google Chrome
6. DynoWare
7. Carl Zeiss Calypso
8. Mahr MarWin

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Rozložení řezné síly při soustružení: (a) vůči obrobku, (b) vůči nástroji [4]	11
Obrázek 2.2: Ustavení kvádrů v prostoru pomocí bodů rovin [6]	12
Obrázek 3.1: Ruční sklíčidlo, Schunk [8]	15
Obrázek 3.2: Schéma samostředícího ručního sklíčidla [9]	16
Obrázek 3.3: Schéma mechanismu pneumatického sklíčidla s táhly [6]	17
Obrázek 3.4: Vnitřní mechanismus hydraulického sklíčidla, Schunk [8]	18
Obrázek 3.5: Sklíčidlo MM e-motion, SMW Autoblok [11]	19
Obrázek 3.6: Čelisti, SMW Autoblok [11]	19
Obrázek 3.7: Čelisti, Schunk [8]	19
Obrázek 3.8: Tvrdé stupňovité čelisti v jednodílném provedení, Schunk [8]	20
Obrázek 3.9: Hrubovací čelisti pro vnější upnutí, Schunk [8]	20
Obrázek 3.10: Hliníkové segmentové čelisti, Schunk [8]	20
Obrázek 3.11: Moderní lící deska s možností čtyř čelistí a T-drážkami [11]	21
Obrázek 3.12: Příklad konstrukce tažné kleštiny, Royal Products [13]	23
Obrázek 3.13: Řez tlačnou průchozí kleštinou, Royal Products [13]	24
Obrázek 3.14: Ukázka obráběné kleštiny pro speciální užití, Royal Products [13]	24
Obrázek 3.15: Řez konstrukcí rozpínacího trnu, Royal Products [13]	25
Obrázek 3.16: Jednoduchý rozpínací trn [2]	25
Obrázek 3.17: Schéma mechanismu rozpínacího trnu, SMW Autoblok [11]	26
Obrázek 3.18: Konstrukce rozpínacího trnu s oboustranně kuželovitým rozpínáním [2]	26
Obrázek 3.19: Upnutí mezi hroty s čelním unášením a otočným hrotem [15]	27
Obrázek 3.20: Pevný upínací hrot se zploštělou karbidovou špičkou a upnutím přes MK kužel, Neidlein [16]	28
Obrázek 3.21: Otočný upínací pro upnutí do nástrojové hlavy VDI, Neidlein [16]	28
Obrázek 3.22: Moderní hydraulická luneta pro CNC centra, SMW Autoblok [11]	29
Obrázek 3.23: Pevná luneta konvenčního soustruhu [17]	29
Obrázek 4.1: Ilustrační obrázek technologie Blue Photon [18]	33
Obrázek 4.2: Rozměry kroužku	33

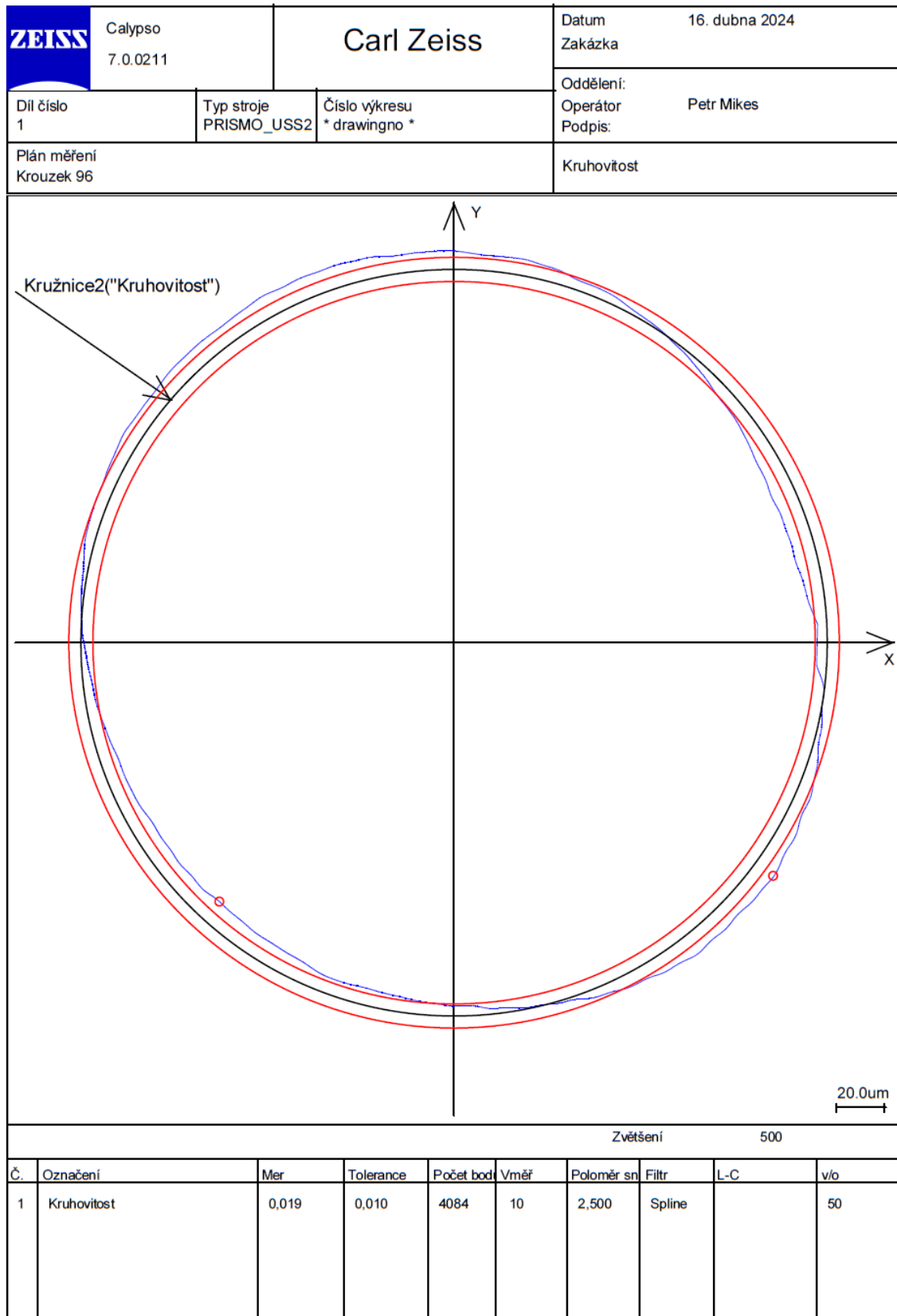
Obrázek 4.3: Závislost pevnosti lepeného spoje na teplotě, Technický list Loctite 480 [7]	36
.....	36
Obrázek 4.4: Dynamometr Kistler 9265B a držák 9441B [20]	37
Obrázek 4.5: Soustruh SU 50/1500 osazený dynamometrem	37
Obrázek 4.6: Detail vnějšího nože	38
Obrázek 4.7: Detail vnitřního nože	38
Obrázek 4.8: Sestava pro měření sil, vyložení 100 mm	42
Obrázek 4.9: Graf závislosti smykové pevnosti na vzdálenosti od spoje	43
Obrázek 4.10: Část kroužku s rozměry pro výpočet	45
Obrázek 4.11: Lepení ve čtyřech vymezených plochách	46
Obrázek 4.12: CMM Carl Zeiss PRISMO	47
Obrázek 4.13: Ulomený kroužek s vyznačenými osami měření (viz protokol)	47
Obrázek 4.14: Základní trubka s naneseným lepidlem	48
Obrázek 4.15: Průběh zaznamenané řezné síly při $ap = 0,6$ mm, DynoWare	49
Obrázek 4.16: Obrobený a demontovaný kroužek	50
Obrázek 4.17: Kroužek přilepený k podložce pro měření	51
Obrázek 4.18: Grafika kruhovitosti, D87,1 (protokol měření, upraveno)	52
Obrázek 4.19: Grafika kruhovitosti, D93,4 (protokol měření, upraveno)	52
Obrázek 4.20: Ustavení obrobku pro měření drsnosti	53
Obrázek 4.21: Zobrazení profilu drsnosti z protokolu měření	53
Obrázek 4.22: Naměřené hodnoty z protokolu měření	53

Seznam tabulek

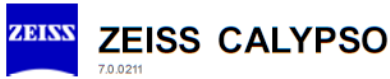
Tabulka 4.1: Základní technické specifikace Loctite 480 [19]	35
Tabulka 4.2: Základní parametry soustruhu SU 50/1500 [22].....	37
Tabulka 4.3: Tabulka naměřených dat – ohyb	42
Tabulka 4.4: Dopočtené hodnoty k naměřeným silám.....	43
Tabulka 4.5: Průměrné hodnoty naměřených a dopočtených složek sil z měření	49
Tabulka 4.6: Shrnutí naměřených odchylek geometrických tolerancí.....	51

Přílohy

Příloha 1



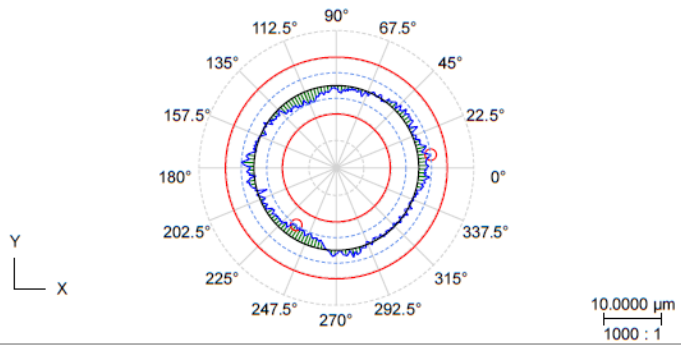
Příloha 2



Part name	Krouzek 93	Last 1 measurements	
Drawing number		► Approval ≠ Blocked	
Order number		Part ident	1
Variant		Time/Date	23.04.2024 16:45
Company		Run	Aktuální výběr
Department		No. measured values	8
Typ stroje	PRISMO_USS2	No. values: red	● 3
Č.stroje	000000	Measurement Duration	00:00:00,0
Operator	Petr Mikes		
Text			

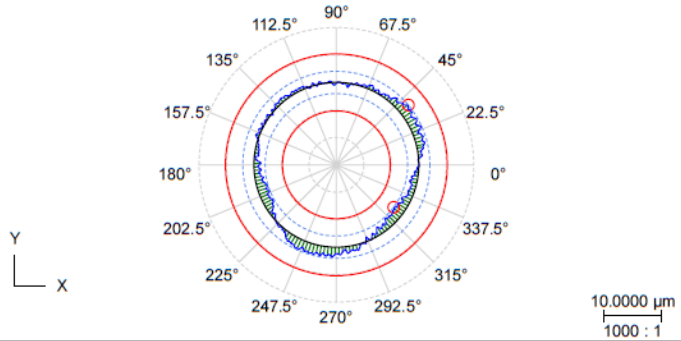
Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Odchylka +/-
∅ Prumer_D87,1	87.140	87.100			0.040
○ Kruhovitost_D87,1	0.004	0.000	0.010	0.000	0.004

Body 2956
 Typ filtru Nizkopásm. Spline
 Lc
 upr 150
 Vmess[mm/sec] 10.00
 Poloměr snímače 2.500
 Metoda vyhodnocení Element-minimum



∅ Prumer_D93,4	93.391	93.400			-0.009
○ Kruhovitost_D93,4	0.004	0.000	0.010	0.000	0.004

Body 2954
 Typ filtru Nizkopásm. Spline
 Lc
 upr 150
 Vmess[mm/sec] 10.00
 Poloměr snímače 2.500
 Metoda vyhodnocení Element-minimum



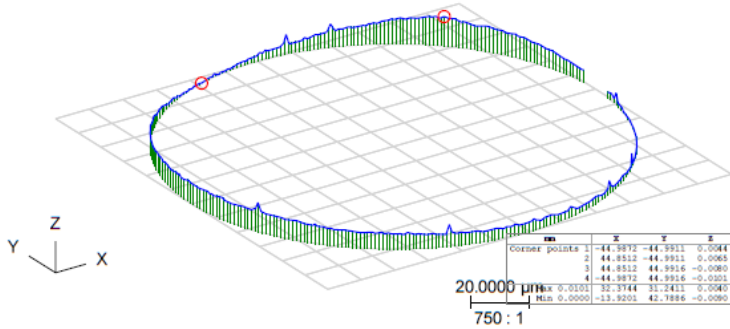


ZEISS CALYPSO
7.0.0211

Part name **Krouzek 93**
Order number
Part ident **1**
Operator **Petr Mikes**
Time/Date **23.04.2024 16:45**

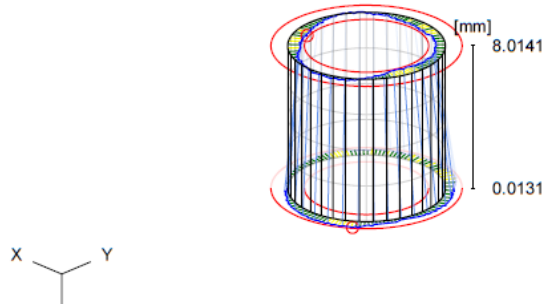
Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Odchylka +/-
Rovinnost Celo	0.010	0.000	0.010	0.000	0.010

Body 2746
Typ filtru Nízkopásm. Spline
Lc 0.8
upr
Vmess[mm/sec] 15.00
Poloměr snimače 2.500
Metoda vyhodnocení Element-minimum



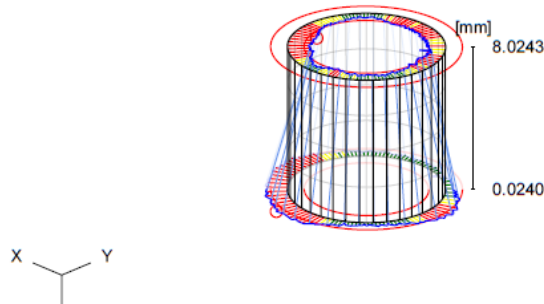
Válcovitost 93,4	0.009	0.000	0.010	0.000	0.009
------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Body 3938
Typ filtru Nízkopásm. Spline
Lc
upr 150
Vmess[mm/sec] 10.00
Poloměr snimače 2.500
Metoda vyhodnocení Element-minimum



Válcovitost 87,1	0.015	0.000	0.010	0.000	0.015
------------------	-------	-------	-------	-------	-------


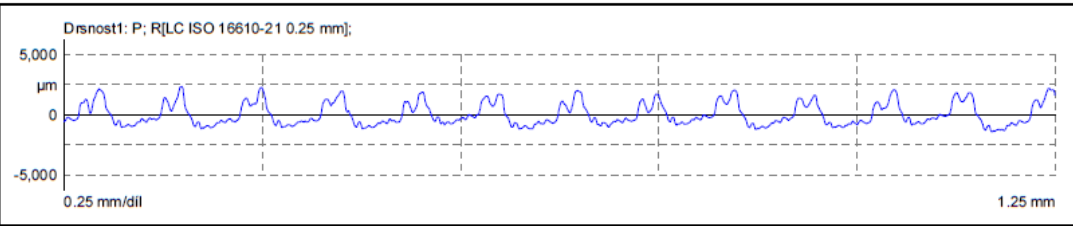
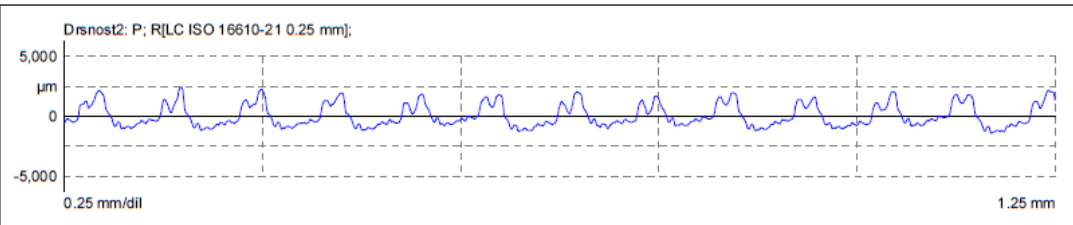
Body 3941
Typ filtru Nízkopásm. Spline
Lc
upr 150
Vmess[mm/sec] 10.00
Poloměr snimače 2.500
Metoda vyhodnocení Element-minimum



Souosost D87,1 k D93,4	0.014	0.000	0.010	0.000	0.014
------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Text	Událost
	-
	n.def.

Příloha 3

		MarWin 10.00-21 SP 3	Xone_1 Úloha: "Drsnost"	23.4.2024 1 15:21:25 Kontrolor: Vavra Podpis:
Díl: Kroužek		Císlo výkresu:	Krok obrábění: 270	
MarSurf LD 120		FS ČVUT v Praze		
Komentář:				
Měřicí přístroj: MarTalk Posuvová jednotka: DriveUnit.LD 120 Snímač: LD A 14-10-2 1197		Lt: 1.50 mm Ls: 2.50 μm VB: +/-6224.2 μm Vt: 0.10 mm/s Body: 2994		
<p>Drsnost1: P; R[LC ISO 16610-21 0.25 mm];</p> 				
<p>Drsnost2: P; R[LC ISO 16610-21 0.25 mm];</p> 				
Parametry drsnosti - Drsnost1: P; R[LC ISO 16610-21 0.25 mm];				
Ra	0,795 μm	0,000		0,000
Rz	3,389 μm	0,000		0,000
Rmax	3,601 μm	0,000		0,000
Rp	2,165 μm	0,000		0,000
Rv	1,225 μm	0,000		0,000
R Sm	99,875 μm	0,000		0,000
R Mr (-1.00, 5.0)	24,48 %	0,00		0,00
R Mr (-2.00, 5.0)	42,46 %	0,00		0,00
R Mr (-3.00, 5.0)	97,92 %	0,00		0,00
Parametry drsnosti - Drsnost2: P; R[LC ISO 16610-21 0.25 mm];				
Ra	0,799 μm	0,000		0,000
Rz	3,398 μm	0,000		0,000
Rmax	3,565 μm	0,000		0,000
Rp	2,145 μm	0,000		0,000
Rv	1,253 μm	0,000		0,000
R Sm	99,833 μm	0,000		0,000
R Mr (-1.00, 5.0)	25,81 %	0,00		0,00
R Mr (-2.00, 5.0)	43,49 %	0,00		0,00
R Mr (-3.00, 5.0)	97,78 %	0,00		0,00