



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ SOUČÁSTI PRO HYDRAULIKU

MACHINING OF COMPONENTS FOR HYDRAULICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Viktor Piroš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Viktor Piroš
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Milan Kalivoda
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Obrábění součásti pro hydrauliku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma se zabývá možností zaměnitelnosti technologie broušení za technologii přesného soustružení u dílčí součásti z hydraulického zařízení.

Cíle diplomové práce:

- Rozbor výkresové dokumentace součásti a sestavy.
- Posouzení strojového parku v návaznosti na možnosti firmy.
- Stávající výrobní postup součásti.
- Zdůvodnění zachovaných operací výrobního postupu.
- Návrh upravovaných operací výrobního postupu.
- Zjištění podmínek stability upraveného výrobního procesu.
- Vyhodnocení zaměnitelnosti technologií.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MASLOV, Jurij Nikolajevič. Teorie broušení kovů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979. 248 s.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. P. 730. ISBN 0-07-146271-6.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavní motivací této závěrečné práce je návrh a prověření zaměnitelnosti technologie broušení za efektivnější obráběcí metodu, a to technologií přesného soustružení. Cílem je snížení výrobních nákladů jedné ze součástí hydraulické sestavy. Úvodní kapitola je věnována rozboru vyráběné součásti a její aplikaci, analýze stávajícího výrobního postupu a odůvodnění navrhované zaměnitelnosti. Následná teoretická část je koncipovaná tak, aby bylo možné shrnuté poznatky využít v praktické části. Jejím obsahem je návrh obráběcího stroje, řezných nástrojů, řezných a procesních podmínek, způsobu upínání polotovaru, obráběcího cyklu a normy času. Na konci praktické části je technické a ekonomické zhodnocení procesu přesného soustružení, se zaměřením na kvalitu obrobeneho povrchu, rozměrovou stabilitu, stabilitu kruhovitosti a zhodnocení časové a nákladové úspory. Závěrem práce je stručné shrnutí poznatků a výsledků z navrhovaného procesu a jeho následné realizace.

Klíčová slova

technologie přesného soustružení, obrábění kalených ocelí, ocel 16MnCr5, Hardinge, stabilita procesu přesného soustružení

ABSTRACT

The main motivation of this final thesis is the draft and verification of the interchangeability of grinding technology for a more efficient machining method, namely the technology of precise turning. The aim is to reduce the production costs of one of the components of the hydraulic assembly. The introductory chapter is devoted to the analysis of the manufactured component and its application, the analysis of the current manufacturing process and the justification of the proposed interchangeability. The subsequent theoretical part is designed so that the summarized knowledge can be used in the practical part. Its content is the design of the machine tool, cutting tools, cutting and process conditions, the method of clamping the semi-finished product, the machining cycle and the time standard. At the end of the practical part there is a technical and economic evaluation of the precision turning process, focusing on the quality of the machined surface, dimensional stability, roundness stability and evaluation of time and cost savings. The conclusion of the thesis is a brief summary of the findings and results of the proposed process and its subsequent implementation.

Keywords

precision turning technology, hardened steel machining, steel grade 16MnCr5, Hardinge, precision turning process stability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PIROŠ, Viktor. *Obrábění součásti pro hydrauliku* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149448>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Obrábění součásti pro hydrauliku vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Viktor Piroš

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanovi Kalivodovi za ochotu, trpělivost, cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval také paní Ing. Petře Sliwkové, Ph.D. a panu Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. za cenné připomínky v průběhu konzultací na semináři k diplomové práci.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO VÝROBNÍHO PROCESU	10
1.1 Návrh změny procesu	15
2 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ.....	17
2.1 Soustružnické nástroje, jejich geometrie a používané materiály.....	17
2.2 Proces tvorby třísky	21
2.3 Analýza silového zatížení nástroje a obrobku	23
2.4 Upínání obrobku na CNC soustruzích.....	25
3 PROBLEMATIKA SOUSTRUŽENÍ KALENÝCH OCELÍ.....	28
3.1 Analýza materiálu 16MnCr5	28
3.2 Cementování	29
3.3 Pocementační kalení	30
3.4 Popouštění	31
3.5 Praktické zásady pro soustružení kalených ocelí	32
4 NÁVRH A REALIZACE OPERACE PŘESNÉHO SOUSTRUŽENÍ.....	34
4.1 Volba stroje	34
4.2 Řezné nástroje	35
4.3 Procesní podmínky navrhované technologie obrábění.....	36
4.4 Upínání polotovaru	37
4.5 Cyklus pro soustružení vnitřní kontury	39
4.6 Norma času	42
5 TECHNICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO PROCESU.....	44
5.1 Stabilita kvality obrobku.....	44
5.2 Rozměrová stabilita	45
5.3 Stabilita kruhovitosti	47
6 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO PROCESU	50
ZÁVĚR.....	52

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

Strojírenská technologie sehrála důležitou roli v období průmyslové revoluce. Pokrok v zemědělském, dopravním či těžebním sektoru vytvořil nárůst poptávky v oblasti strojírenské výroby, která byla nucena zvýšit její objem a zefektivnit její procesy. Do ústupu se dostávaly ruční výrobní postupy, které byly do jisté míry nahrazovány strojními procesy. S rostoucími nároky na účinnost vyráběných zařízení nastal pokrok v jejich konstrukci, což kladlo vyšší požadavky na komplikovanost a přesnost výroby dílčích komponent.

Vysoký technologický pokrok koncem 20. století a kapitalismus, jakožto ekonomický systém, byli jedním z důvodů rozšíření sektoru strojírenské výroby, převážně o menší, rodinné podniky. Konkurenční prostředí je v tomto sektoru výrazné, a to jak z lokálního měřítka, tak i z globálního. Společnosti na českém, ale i evropském trhu, jen těžce konkurují firmám na tom asijském. Je tomu tak především z důvodu jejich podstatně nižších mzdových nákladů, sociální politiky, nižšímu důrazu na ekologii či velikosti lidských zdrojů. [1]

Tato práce se proto zabývá možností zaměnitelnosti technologie broušení za technologii přesného soustružení, za účelem snížení výrobních nákladů, při zachování požadované kvality, a to ve společnosti sídlící v Jihomoravském kraji, která se už více než 20 let zabývá obráběním vysoce přesných a tvarově komplikovaných rotačních i nerotačních součástí v malých a středně velkých sériích. Zejména se jedná o komponenty pro letecký či vesmírný průmysl, hydraulické sestavy, obráběcí stroje a formy pro výrobu plastových výstřiků. Výroba probíhá zejména na několika CNC revolverových soustruzích, soustružnicko-frézovacích centrech a CNC brousících strojích. Z důvodu ochrany svých vědomostí a zkušeností, ale i ochrany produktů svých zákazníků, nebude táto společnost v práci konkrétně jmenována. Vyráběnou součástí je komponenta hydraulického systému, jehož názorná aplikace je na obr. 1, v podobě simulační hydraulické stolice.

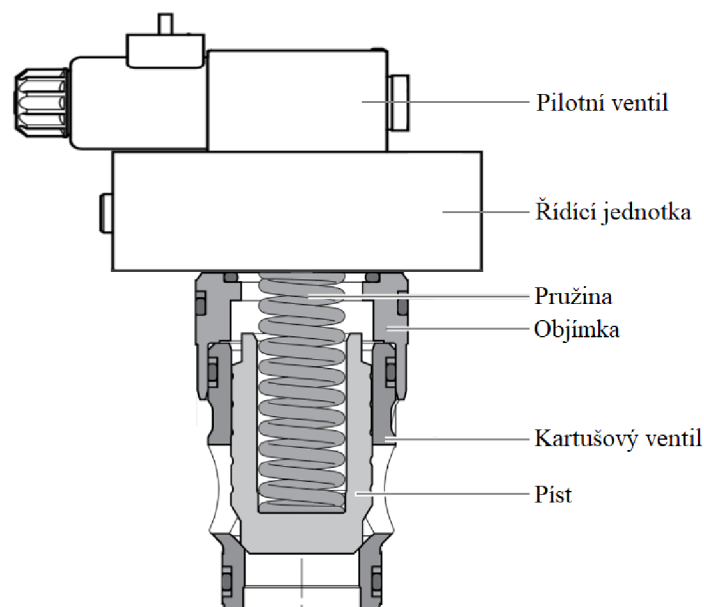


Obr. 1 Simulační hydraulická stolice [2].

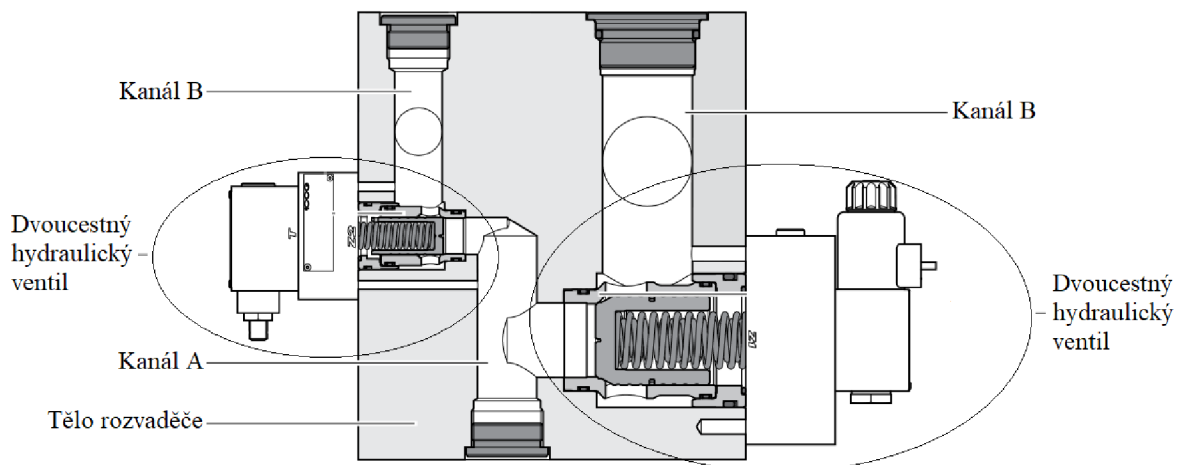
1 ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO VÝROBNÍHO PROCESU

Hydraulické mechanismy jsou nedílnou součástí téměř všech odvětví průmyslu. Vyznačují se vysokou výkonností z hlediska velikosti přenášeného silového zatížení, a to prostřednictvím média, kterým je ve většině aplikací hydraulický olej. Výkonnost takového zařízení je závislá zejména na jeho konstrukčním návrhu, který je potřeba do fyzické podoby zhotovit v požadované jakosti. Jednou z nevýhod jsou právě vysoké nároky na přesnost výroby hydraulických komponentů. Přesnost jejich vyhotovení pak přímo podmiňuje správnou funkci celé hydraulické soustavy. [3]

Vyráběnou součástí je hydraulický kartušový ventil. Ten je funkční součástí dvoucestného hydraulického ventilu, který je podstavou pro hydraulický rozvaděč. Výkresová dokumentace hydraulického rozvaděče ani dvoucestného hydraulického ventilu není pro společnost vyrábějící hydraulický kartušový ventil dostupná. Rozbor sestavy lze provést pouze na základě schématických znázornění dvoucestného hydraulického ventilu na obr. 2, schématického znázornění hydraulického rozvaděče na obr. 3 a také, na základě dostupných informací od koncového zákazníka.



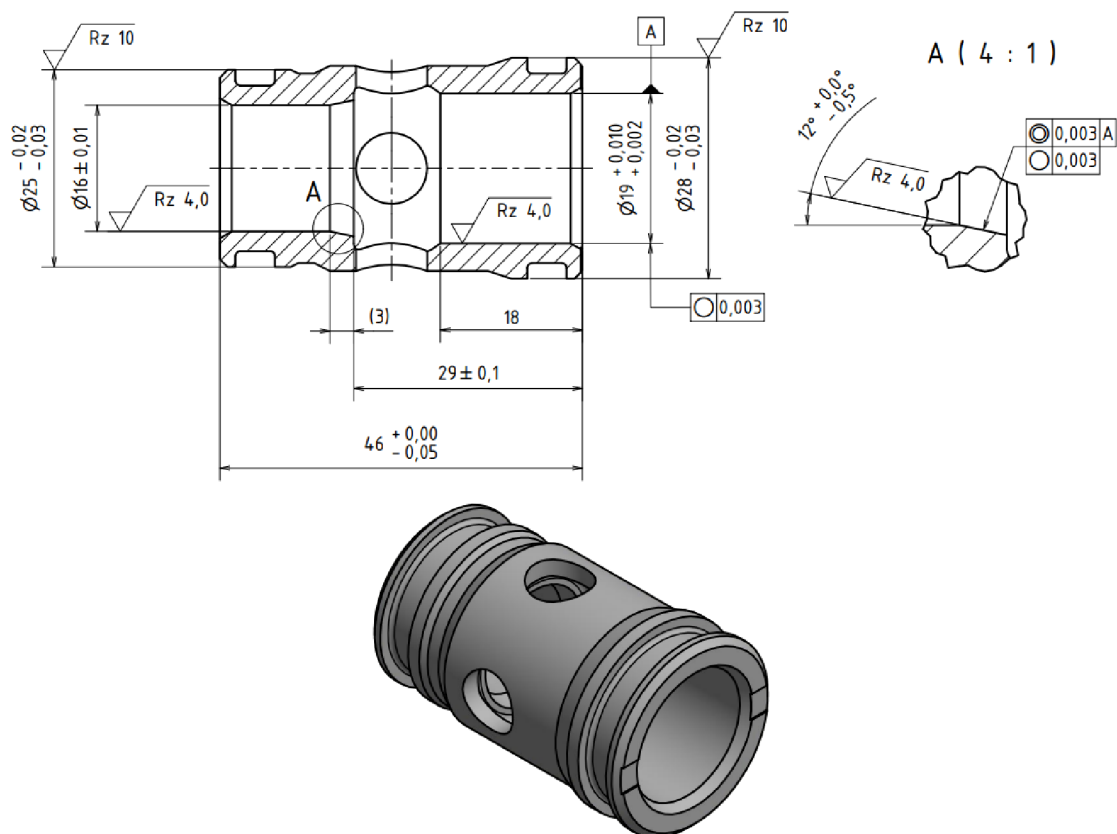
Obr. 2 Schéma dvoucestného hydraulického ventilu, podle [4].



Obr. 3 Schéma hydraulického rozvaděče, podle [4].

Jmenovitý provozní tlak dvoucestného hydraulického ventilu dosahuje až 420 bar. Princip funkce spočívá v dosažení silové rovnováhy, mezi kapalinou proudící v kanálu „A“ a pilotním ventilem. Těsnění zabezpečuje styk kuželových ploch pilotního a kartušového ventilu, u kterého jsou kladeny vysoké nároky na rozměrovou a geometrickou přesnost a kvalitu obroběného povrchu. Silová reakce pilotního ventilu vůči tlaku kapaliny může být vyvolána mechanicky, za pomoci pružného elementu s definovaným předpětím, hydraulicky, elektromagneticky nebo kombinací vícero energetických zdrojů. [4]

Vyráběný hydraulický kartušový ventil je zobrazen na obr. 4. Jeho kompletní výkresové dokumentace je z důvodu know-how zákazníka utajená, a proto jsou v celém rozsahu práce uváděné pouze pro tuto práci důležité rozměrové, geometrické a kvalitativní charakteristiky ploch.



Obr. 4 Vlevo nahoře řez vyráběného kartušového ventilu, vpravo detail funkční kuželové plochy a dole jeho model.

Jeho technologický rozbor lze definován jednotlivými charakteristikami, podstatnými pro proces obrábění, uvedenými níže.

- Výrobní dávka činí 400 kusů, s opakovatelností dvakrát za rok.
- Geometrie má rotační charakter, který je vhodný pro obrábění za měkka na CNC stroji typu revolverový soustruh. V případě volby stroje, který disponuje možností osazení revolverové hlavy držáky pro poháněné nástroje, je možné součást obrobít za měkka kompletně na tomto stroji. V případě volby stroje bez možnosti osazení revolverové hlavy držáky pro poháněné nástroje, je potřeba po provedení soustružnických operací frézovat čelní drážky na tříosém frézovacím centru a radiální díry na vrtacím, nebo frézovacím centru s rotační osou kolmou na osu vřetena.
- Z pohledu tvarové komplikovanosti jednotlivých elementárních ploch, není potřeba pro výrobu zhotovení speciálních obráběcích nástrojů.

- Jakost materiálu byla konstruktérem zvolená 16MnCr5, dle EN 10084. Jedná se o mangan-chromovou ocel, vhodnou k zušlechtní do průměru 35 mm a cementování. Součásti vyrobené z tohoto materiálu se vyznačují vysokou pevností v jádře, a proto se zejména volí pro výrobu hřídel, ozubených kol, pístních čepů atd. Z pohledu obrobitelnosti se jedná o dobře obrobitelnou ocel. [5]
- Součást je cementována do hloubky $0,6^{+0,4}$ mm, a následně kalená s dosaženou tvrdostí 500^{+70} HV30.
- Kritické parametry obráběných ploch součásti jsou:
 - velikost tolerančního pole $T = 0,008$ mm,
 - kvalita obroběného povrchu, definována parametrem $Rz = 4,0$ μm ,
 - kruhovitost $0,003$ mm.
- Výše uvedené parametry jsou vyrobitelné technologií broušení na CNC stroji.
- Vnitřní kuželovou plochu vázanou na základnu „A“, je potřeba z důvodu dosažení požadované sousosti, o velikosti $0,005$ mm, vyrábět při dokončovací operaci v jedné poloze.

Obrábění za měkka

Je realizováno ve dvou polohách, a to na CNC revolverovém soustruhu Quick Turn Nexus 250-II MY od výrobce Yamazaki Mazak Corporation. Jedná se o soustruh s osou Y a řízenou osou C. Rovněž s možností osazení revolverové hlavy držáky pro poháněné nástroje. Vysokou přesnost a stabilitu procesu zajišťuje tuhá konstrukce stroje spolu s lineárním odměřovacím systémem. Tento soustruh je vyobrazen na obr. 5. Jeho základní technické specifikace jsou uvedené v tab. 1.



Obr. 5 CNC revolverový soustruh Mazak Quick Turn Nexus 250-II MY [6].

Tab. 1 Specifikace stroje Mazak Quick Turn Nexus 250-II MY, podle [6].

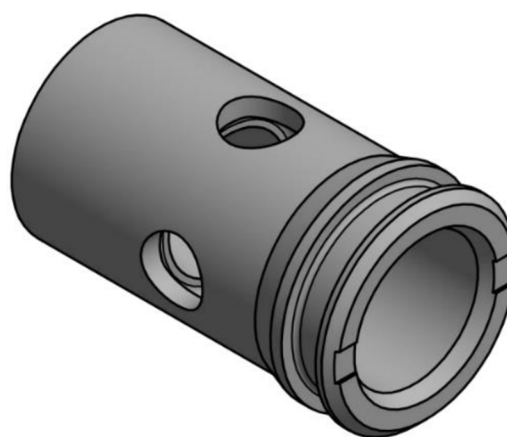
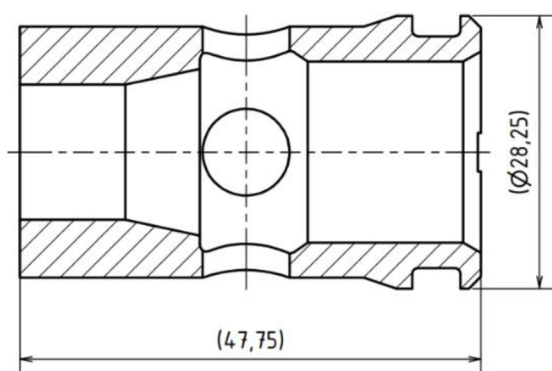
Specifikace stroje Mazak Quick Turn Nexus 250-II MY	Výkon vřetene	26,0 kW
	Maximální otáčky vřetene	4 000 min^{-1}
	Průměr sklíčidla	254 mm
	Maximální točný průměr	380 mm
	Maximální pojezd v ose X	230 mm
	Maximální pojezd v ose Y	100 mm
	Maximální pojezd v ose Z	575 mm
	Počet nástrojových pozic	12 (všechny možno pohánět)
	Řídicí systém	Mazatrol Matrix Nexus 2

První poloha obrábění za měkka

V této poloze je součást obrobena do tvaru znázorněného na obr. 6. Výchozím polotovarem je tyč s rozměrem $\Phi 35$ mm v přířezu s délkou 960 mm. Upnutí je realizováno ve tvrdých čelistech, s vyložení o délce 56 mm. Broušené plochy jsou obrobena za měkka s technologickým přírůstkem 0,125 mm na stěnu, v toleranci $\pm 0,03$ mm. Jednotlivé programové cykly jsou ve chronologickém pořadí uvedené v tab. 2.

Tab. 2 Seznam programových cyklů realizovaných v první poloze obrábění za měkka.

Pořadové číslo cyklu	Popis cyklu	Charakter obrábění pro danou operaci
1.	Zarovnání čela	Hrubování
2.	Soustružení vnější kontury	Hrubování
3.	Zarovnání čela	Dokončení
4.	Soustružení vnější kontury	Dokončení
5.	Vyvrtání pilotního otvoru	Předhrubování
6.	Soustružení vnitřní kontury	Hrubování
7.	Soustružení vnitřní kontury	Dokončení
8.	Frézování čelních drážek	Dokončení
9.	Podepření součásti hrotem koníka	-
10.	Vrtání radiálních děr	Dokončení
11.	Soustružení zápichu	Hrubování
12.	Soustružení zápichu	Dokončení
13.	Odjezd koníka	-
14.	Upíchnutí součásti	Dokončení



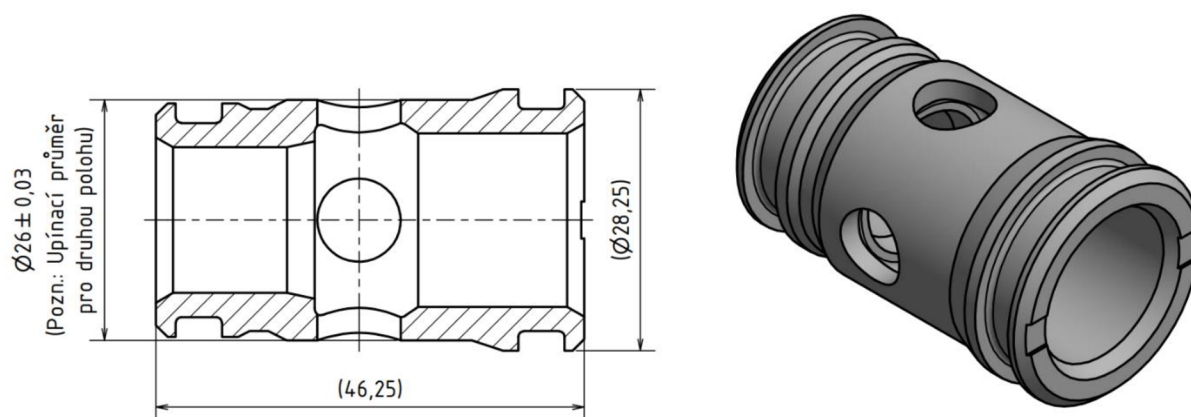
Obr. 6 Vlevo řez vyráběného kartušového ventilu a vpravo jeho model, po obrobení první polohy.

Druhá poloha obrábění za měkka

V této poloze je součást obrobena do tvaru znázorněného na obr. 7. Upnutí je realizováno za vnější technologický $\Phi 26$ mm, vyhotovený v předchozí operaci se zpřísněnými tolerancemi $\pm 0,03$ mm, do měkkých přesoustružených čelistí. Jednotlivé programové cykly jsou ve chronologickém pořadí uvedené v tab. 3.

Tab. 3 Seznam programových cyklů realizovaných ve druhé poloze obrábění za měkka.

Pořadové číslo cyklu	Popis cyklu	Charakter obrábění pro danou operaci
1.	Zarovnání čela	Hrubování
2.	Dosoustružení vnější kontury	Hrubování
3.	Zarovnání čela	Dokončení
4.	Dosoustružení vnější kontury	Dokončení
5.	Soustružení zápichu	Hrubování
6.	Soustružení zápichu	Dokončení
7.	Soustružení vnitřního průměru, včetně sražení	Hrubování
8.	Soustružení vnitřního průměru, včetně sražení	Dokončení



Obr. 7 Vlevo řez vyráběného kartušového ventilu a vpravo jeho model, po obrobení druhé polohy.

Odjehlení, tepelné zpracování a broušení

Po strojním obráběním za měkka je díl na zámečnickém pracovišti opracován ručně, za účelem odstranění otřepů. Dále jsou díly převezeny na tepelné zpracování, během kterého jsou cementovány do hloubky $0,755^{+0,245}$ mm a následně kalené s dosaženou tvrdostí 500^{+70} HV30. Po tomto procesu následuje první operace obrábění za tvrda, která se realizuje na stroji BPH Jung 50, za účelem odbroušení přídavků, o velikosti 0,125 mm, a to na obou čelech součásti. Celková délka je tak obrobená na rozměr $46^{-0,05}$ mm.

Následně je provedeno broušení vnějších $\Phi 25$ a $\Phi 28$. Upnutí je realizováno za pomoci přípravku ve tvaru trnu. Vnitřní válcové plochy jsou spolu s plochou kuželovou broušeny na závěr. Operace jsou realizovány na CNC hrotové brusce S33, od výrobce Studer, která je znázorněná na obr. 8. Stoj disponuje lineárním odměřovacím systémem, co mu umožňuje dosažení rozlišení polohování o velikosti 0,0001 mm. Její technické specifikace jsou uvedené v tab. 4.



Obr. 8 CNC hrotová bruska Studer S33 [7].

Tab. 4 Specifikace stroje Studer S33.

Specifikace stroje Studer S33	Maximální otáčky vnějšího brousícího vřetena	1 500 min ⁻¹
	Maximální otáčky otvorového brousícího vřetena	42 000 min ⁻¹
	Vzdálenost mezi hroty	1 000 mm
	Maximální pojezd v ose X	370 mm
	Maximální pojezd v ose Z	1 150 mm
	Rozsah natočení osy B	255°
	Rozlišení polohování	0,0001 mm
	Řídicí systém	Fanuc Series 21i-TB

Finální opracování dílů a jejich výstupní kontrola

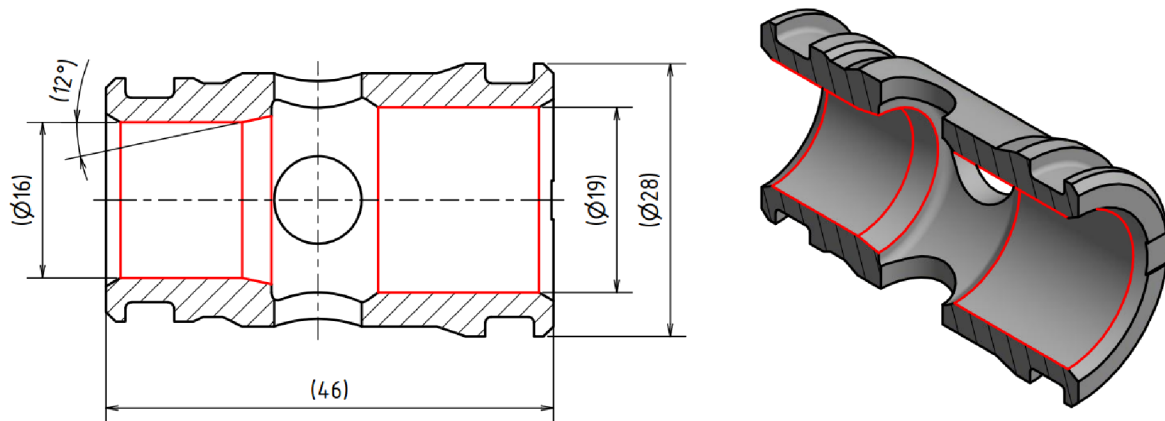
Po kompletním strojním obrobení jsou hrany broušených ploch zkontrolovány a ručně opracovány netkaným brousícím roumem, pro případ vyvalení materiálu při operacích broušení. Poté součást putuje na výstupní kontrolu všech výkresových parametrů. Po její provedení, s vyhovujícím výsledkem, jsou díly následně konzervovány a baleny dle zákaznického balícího předpisu.

1.1 Návrh změny procesu

Operace obrábění za měkka lze provádět také na CNC multifunkční centrum Mazak Integrex i200-ST, kterým společnost disponuje. Z pohledu tuhosti je tento stroj v porovnání s CNC revolverovým soustruhem Mazak Quick Turn Nexus 250-II MY tužší, a tudíž umožňuje větší zatížení nástroje – úběr většího průřezu třísky. Výchozí polotovár má průměr 35 mm a výsledná součást 28 mm. K velkému úběru materiálu v tomto případě nedochází. V porovnání s delší výměnou nástrojů, také v porovnání s CNC revolverovým soustruhem Mazak Quick Turn Nexus 250-II MY, o cca 170 % a vyšší minutovou sazbou stroje cca o 27 %, by nebyla záměna za těchto podmínek z ekonomického hlediska, rentabilní.

Po provedeném rozboru obrábění za tvrda, lze uvažovat o záměně technologie obvodového broušení, za technologii přesného soustružení. Společnost disponuje dvěma stroji pro přesné soustružení, typu Super-Precision T-51 od americké společnosti Hardinge, Inc. Operace vnějšího obvodového broušení zůstane zachována, a to z důvodu vyhovujícího stupně efektivity stávajícího procesu. Broušení vnitřních funkčních ploch je však z pohledu strojního času neefektivní, a to z důvodu obrábění malých vnitřních průměrů. Jednotkový strojní čas ve stávajícím procesu dosahuje trvání 6,5 min. Ve třetí kapitole je tak navržena náhrada operace broušení vnitřních funkčních ploch, vyznačených na obr. 9, touto technologií. Záměnou by mělo dojít k výrazné časové, a tedy i finanční redukci nákladů. Návrhu však musí předcházet

odsouhlasení technologie výroby koncovým zákazníkem. Důvodem je odlišnost profilu soustruženého a broušeného povrchu.



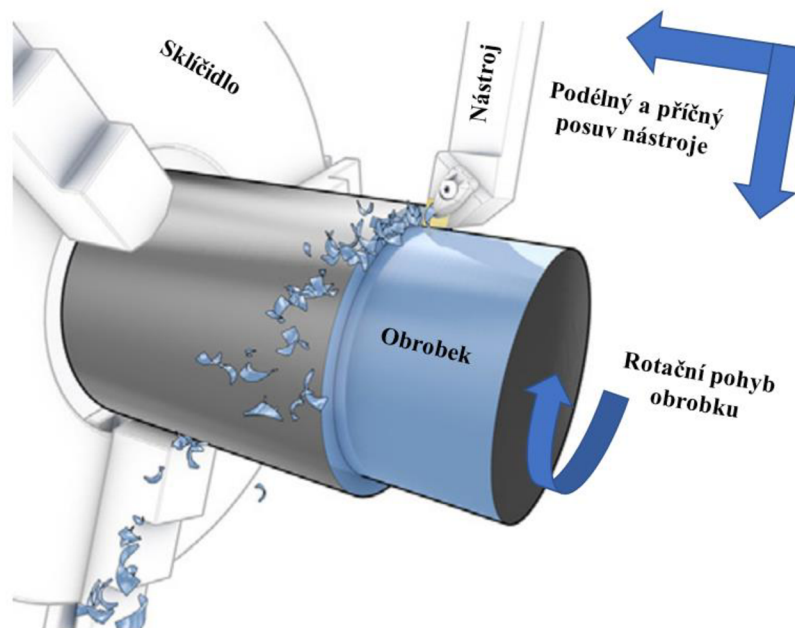
■ Červeně vyznačené obrysy obráběných ploch pro navrhovaný proces přesného soustružení

Obr. 9 Vyznačené obráběné plochy pro navrhovaný proces přesného soustružení.

2 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je jednou z třískových obráběcích technologií, které podstatou je úběr nadbytečného materiálu, zvaného třísek, ve formě třísek, za účelem zhotovení rotačních ploch. Proces je realizován reakcí mezi kinetickou energií rotujícího obrobku a stacionárního, ve většině případů jednobřitého, nástroje.

Kinematika procesu je charakterizována rozdělením jednotlivých řezných pohybů na hlavní a vedlejší. Hlavní řezný pohyb je relativní rotační pohyb obrobku vůči nástroji, a vedlejší řezný pohyb je přímočarý translační pohyb nástroje, relativně vůči obrobku, ve směru podélném, příčném, nebo také ve směru vzniklém jejich kombinací. Tyto pohyby jsou znázorněny na obr. 10.



Obr. 10 Řezné pohyby při procesu soustružení, podle [8].

Soustružnické operace lze rozdělit na několik elementárních úkonů, které vyžadují specifické nástroje, hodnoty řezných podmínek a způsob programování. Tyto úkony lze rozdělit na:

- soustružení válcových ploch,
- soustružení kuželových ploch,
- soustružení kulových a tvarových ploch,
- čelní soustružení,
- závitování,
- zapichování a upichování.

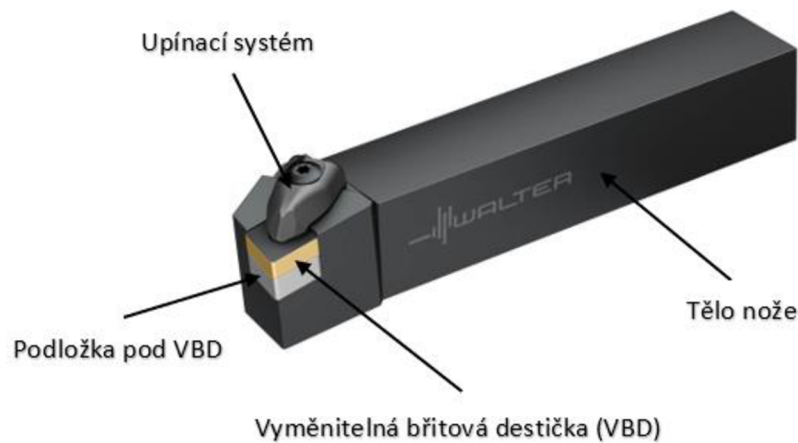
Na soustružích lze provádět za pomoci přídavných zařízení i zvláštní operace, třeba válečkování, vroubkování, broušení či frézování.

2.1 Soustružnické nástroje, jejich geometrie a používané materiály

Soustružnické nástroje jsou přímým účastníkem řezného procesu, a proto jsou na ně kladeny vysoké konstrukční požadavky. Mezi ty základní lze zařadit vysokou tuhost, spolehlivost upnutí, odolnost proti vibracím, tvarovou složitost, rozměrovou přesnost, nebo schopnost vysokoproduktivního úběru materiálu. Jejich rozdělení lze uvažovat podle: [9]

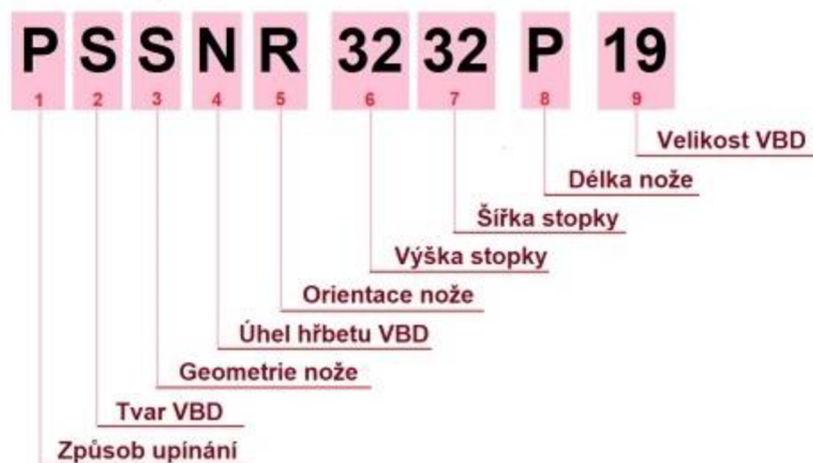
- druhu obráběné plochy – vnitřní a vnější,
- směru posuvu – pravé a levé,
- typu soustružnické operace – k podélnému soustružení, k čelnímu soustružení, zapichovací a upichovací soustružení, závitové, zaoblovací a drážkovací,
- tvaru tělesa – přímé, ohnuté, prohnuté, osazené,
- polohy ostří – pravé, levé, souměrné,
- průřezu nože – čtvercové a kruhové.

Základní části moderního soustružnického nástroje jsou znázorněné na obr. 11.

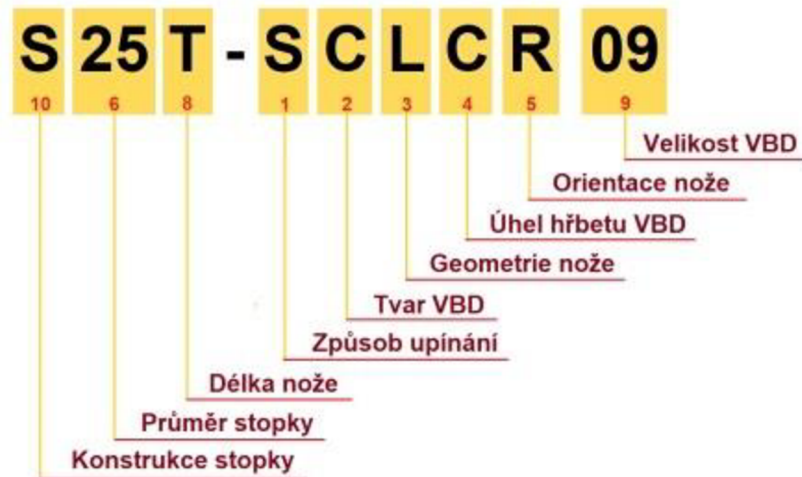


Obr. 11 Základní části moderního soustružnického nástroje, podle [10].

Jelikož se jedná o nástroj tvořený vícero komponenty, je jeho označení definováno kódem, který zajišťuje jejich vzájemnou kompatibilitu. Definice kódového označení vnějšího soustružnického nože je na obr. 12. Definice kódového označení vnitřního soustružnického nože je na obr. 13.



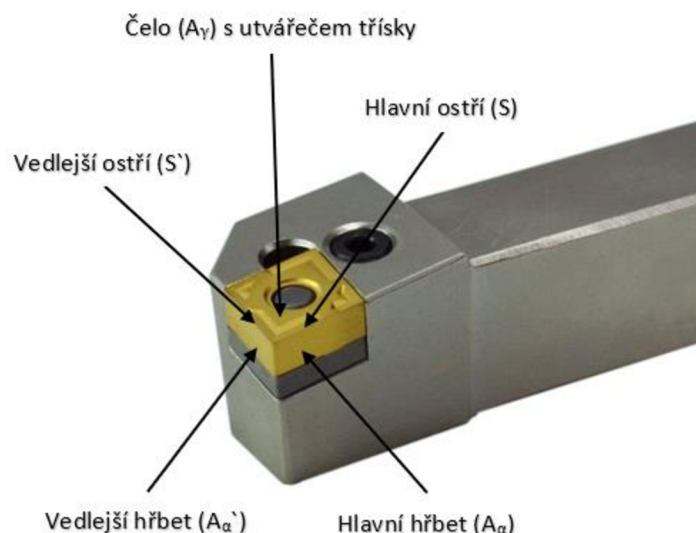
Obr. 12 Definice kódového označení vnějšího soustružnického nože [11].



Obr. 13 Definice kódového označení vnitřního soustružnického nože [11].

Geometrie soustružnického nástroje

Je komplexní charakteristika, závislá na číselných vstupujících do řezného procesu, kterými jsou zejména obráběný a řezný materiál, prováděný druh operace, hodnoty řezných parametrů, teplota procesu atd. Základní geometrické nástroje vyměnitelné břitové destičky jsou znázorněné na obr. 14. Její geometrie může být zkoumána ve dvou souřadnicových soustavách, a to statické, nebo kinematické. Je-li poloha činných ploch řezného klínu vztažena k upínací části nástroje, hovoříme o nástrojové (statické) souřadnicové soustavě. V případě, že orientujeme činné plochy řezného klínu k výslednici vektoru hlavního řezného pohybu a posuvu, hovoříme o pracovní (kinematické) souřadnicové soustavě. Kompletní nástrojová geometrie řezné části soustružnického nože je znázorněná v příloze 1. [12]



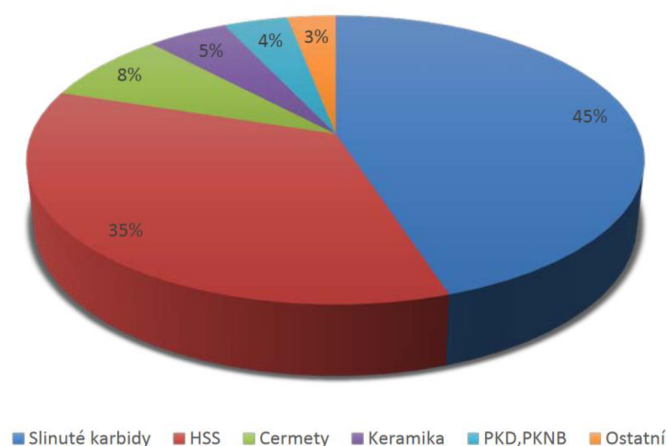
Obr. 14 Základní útvary vyměnitelné břitové destičky, podle [10].

Nástrojové materiály

Inovace v metalurgickém odvětví zapříčinili vznik řady materiálů používaných pro výrobu řezných nástrojů. Mezi jejich klíčové vlastnosti lze zařadit tvrdost, přiměřenou houževnatost a vysokou otěruvzdornost, a to relativně vůči obráběnému materiálu. Základní řezné materiály jsou uvedeny níže.

- Uhlíková ocel – používá se jenom zřídka. V aplikacích s nízkými řeznými rychlostmi, z důvodu teplotní odolnosti do 200 °C. Nad tuto teplotu dochází ke ztrátě řezivosti důsledkem popouštění. [13]
- Rychlořezná ocel – její vlastnosti jsou získány dodatečným tepelným zpracováním, a to kalením a popouštěním. Z důvodu vysokého podílu karbidotvorných prvků je jejich nejvyšší tvrdost dosažená až po následném popouštění s teplotou 500 až 600 °C, kdy dochází k rozpadu zbytkového austenitu a precipitaci jemných karbidů. Jsou vhodné převážně pro soustružení měkkých a středně tvrdých materiálů, a pro aplikace při nižších řezných rychlostech, do 35 m.min⁻¹. [13]
- Slinutý karbid – řadí se mezi kompozitní materiál s nejrozšířenější aplikací využití. Výborné funkční vlastnosti jsou docílené kombinací velmi tvrdých karbidických (případně karbonitridických) částic (např. WC, TiC, TaC, NbC) a houževnaté, ve většině případů kobaltové, matrice. Z důvodu nemožnosti realizovat produkci konvenčními metalurgickými postupy, jsou tyto materiály vyráběny technologií práškové metalurgie. V praxi se využívají jak pro obrábění neželezných kovů, tak i zušlechťených ocelí, nebo superslitin. [13]
- Keramika – jedná se o materiál, zejména na bázi Al₂O₃ a Si₃N₄, se stabilní tvrdostí za vysokých teplot a dobrou chemickou stabilitou, co umožňuje aplikaci při vysokých řezných rychlostech. Vlastnosti keramických materiálů poskytují, za správných aplikačních podmínek, dlouhou trvanlivost a jsou zejména používány při obrábění šedé litiny, tvrdých ocelí a žáruvzdorných slitin. [13]
- Cermet – je typ slinutého karbidu s pojivem na bázi niklu a tvrdých částí na bázi TiC a TiN. Vyznačuje se vysokou tvrdostí, ale i houževnatostí, s vysokou odolností proti opotřebenému hřbetu a chemickou stabilitou. Jsou vhodné spíše pro hrubovací aplikace. [13]
- Kubický nitrid boru (CBN) – jedná se o extrémně tvrdý materiál (až 5 500 HV) s vysokou chemickou a abrazivní odolností. Není vhodný pro obrábění poměrně měkkých materiálů, a to z důvodu vysokého opotřebením bříty. Aplikován je zásadně pro obrábění velmi tvrdých materiálů, kterými jsou například ocelové výkovky, kalené oceli, slinuté materiály nebo žáruvzdorné slitiny. [13]

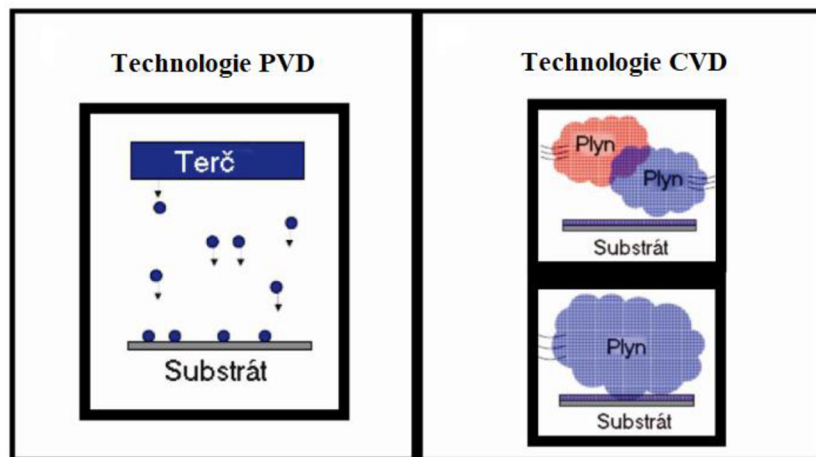
Rozdělení podílu světové produkce řezných materiálů je zobrazeno na obr. 15.



Obr. 15 Rozdělení světové produkce řezných materiálů [14].

Povlakování nástrojů

Za účelem zvýšit životnost řezných nástrojů, jejich povrchovou tvrdost, odolnost proti vysokým teplotám, možnost dosažení vyšších řezných parametrů, s cílem zvýšit jejich produktivitu, jsou řezné nástroje povrchově zušlechťeny jednou z technologií povlakování. Mezi základní patří PVD a CVD metoda. PVD, tedy technologie fyzikálního napařování je založená na principu odpařování nebo odprašování pevné látky – katody (tzv. terče) v řízené atmosféře pracovního plynu (např. argonu nebo dusíku) při tlaku 0,1 až 10 Pa a teplotě 150 až 500 °C. CVD, tedy technologie chemického napařování je založená na principu reakce chemických sloučenin, které jsou v plynném stavu přiváděny k substrátu. Atmosféra tohoto procesu je udržována při teplotě 900 až 1050 °C a pracovním tlaku 50 až 500 mbar. Schematické vyobrazení tvorby povlaku metodou PVD a CVD je znázorněno na obr. 16. [15]



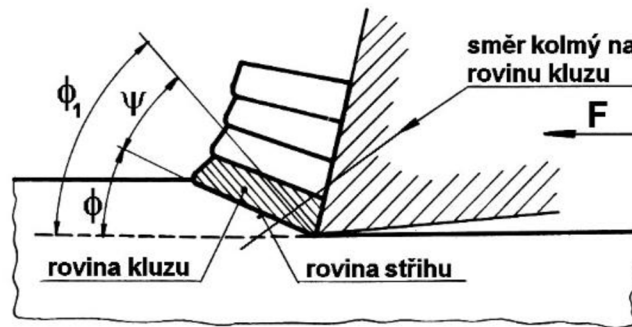
Obr. 16 Schéma tvorby povlaku technologií PVD a CVD, podle [15].

Nepovlakované řezné nástroje ze slinitých karbidů jsou používány při obrábění žárovzdorných nebo titanových slitin a u tvrzených materiálů. CVD povlaky jsou především aplikovány při soustružnických hrubovacích operacích, s potřebnou vysokou odolností proti vytváření žlábků na čele nástroje, zejména při obrábění běžných a korozivzdorných ocelích. Při vrtání s použitím držáků osazených VBD, jsou CVD povlaky doporučeny pro obvodové břitové destičky. PVD povlaky jsou využívány převážně pro dokončovací a zapichovací operace, řezání závitů a frézování. [15]

Povlaky na bázi TiN jsou nejběžnějším typem povlaku s univerzálními vlastnostmi. Povlaky na bázi TiCN se vyznačují vyšší tvrdostí oproti povlaku TiN, což je činí odolnějšími vůči opotřebení otěrem. Tato vlastnost pozitivně vplývá na menší opotřebení hřbetu. Povlaky na bázi Al_2O_3 se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a chemickou inertností, což je činí odolnými proti opotřebení ve tvaru žlábků. Taktéž se vyznačují vysokou odolností proti plastické deformaci. [15]

2.2 Proces tvorby třísky

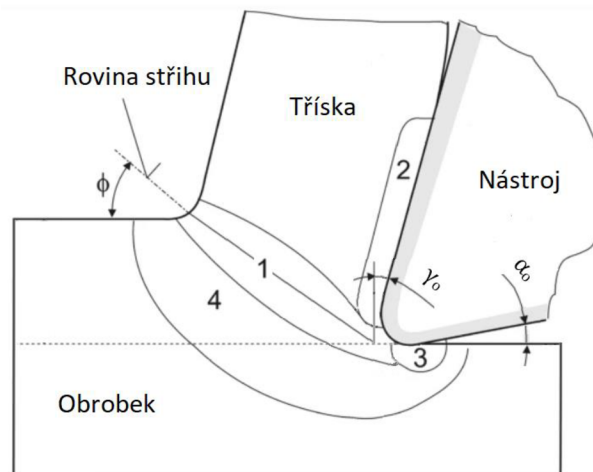
Důsledkem pronikání řezného nástroje do materiálu obrobku je koncentrace napětí před a pod břitem nástroje, co vede ke vzniku elastických a plastických deformací v materiálu obrobku. Deformace vznikají také v materiálu nástroje, avšak teoreticky lze uvažovat nástroj jako dokonale tuhý. Oblast vzniku plastických deformací v obrobku lze teoreticky uvažovat jako rovinu maximálních smykových napětí, která je skloněná pod úhlem střížné roviny Φ . K pěchování materiálu a následnému posunu dochází ve směru kolmém vůči kluzným rovinám, skloněným pod úhlem kluzu Φ_1 . Schematické znázornění těchto rovin je na obr. 17. [13]



Obr. 17 Schéma rovin v procesu tvorby třísky [16].

K tvorbě třísky dochází v oblasti materiálu, která nese název kořen třísky. Deformační oblasti v této zóně lze rozdělit na čtyři oblasti, které jsou znázorněné na obr. 18. Ve všech jednotlivých oblastech dochází ke zvýšení teploty, které je poměrově totožné s velikostí dané zóny a množstvím energie v ní proměněné.

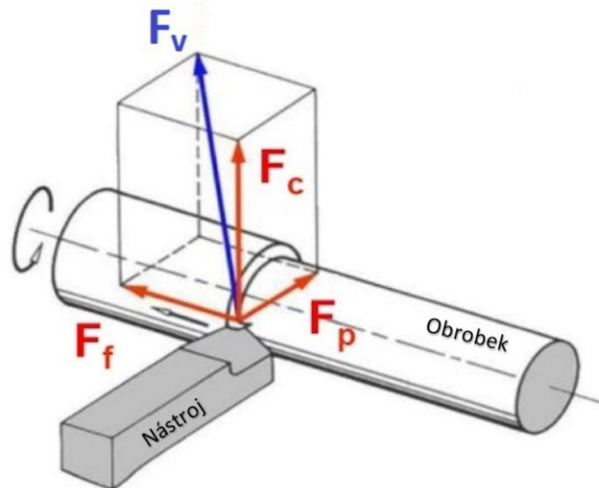
- Oblast 1 – oblast primární plastická deformace. Vzniká důsledkem smykových napětí řezného procesu v průběhu, kterého dochází k oddělování materiálu z obrobku.
- Oblast 2 – oblast sekundární plastické deformace. Vzniká třením v důsledku relativního pohybu odděluující se třísky vůči čelu nástroje.
- Oblast 3 – oblast terciální plastické deformace. Vzniká třením v důsledku relativního pohybu nástroje vůči nově vytvořenému povrchu obrobku.
- Oblast 4 – oblast elasticko-plastické deformace. [13]



Obr. 18 Deformační oblasti v kořenu třísky [10].

2.3 Analýza silového zatížení nástroje a obrobku

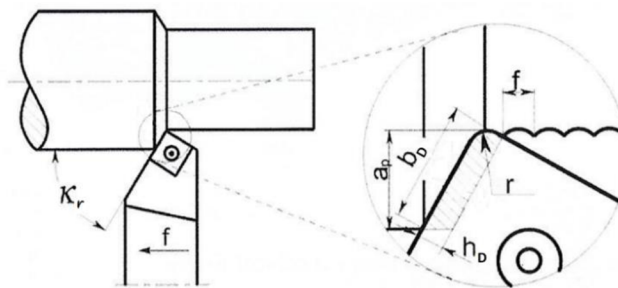
Interakcí mezi relativním pohybem obrobku vůči nástroji vzniká silové zatížení, jehož výsledná síla (F_v) je složena z řezné složky síly (F_c), posuvové složky síly (F_f) a pasivní složky síly (F_p). Toto silové zatížení, působící v průběhu soustružení, je znázorněné na obr. 19.



Obr. 19 Silové zatížení v průběhu procesu soustružení, podle [10].

Velikost silového zatížení působícího v obecném řezném procesu je primárně funkcí průřezu třísky, vlastností materiálu a geometrie řezného nástroje. Průřez třísky vznikající při soustružení je definována řeznými parametry posuvu (f), šířky záběru ostří (a_p), a úhlu nastavení hlavního ostří (κ_r). Její velikost lze definovat vztahem 2.1. Schématické znázornění jejich rozměrových parametrů je na obr. 20.

$$A_D = b_D \cdot h_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \cdot f \cdot \sin \kappa_r = a_p \cdot f \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.1)$$



Obr. 20 Schéma definice rozměrových parametrů průřezu třísky, podle [17].

Pro poměrně přesné stanovení velikosti jednotlivých složek sil lze na základě vztahu 2.2 stanovit velikost řezné složky síly, vztahu 2.3 velikost posuvové složky síly a na základě vztahu 2.4 velikost pasivní složky síly. Výslednou sílu pak možno definovat vztahem 2.5. Pro jejich výpočet je nutná znalost materiálových konstant (C_{F_c} , C_{F_f} a C_{F_p}), exponentů vlivu hloubky řezu (x_{F_c} , x_{F_f} a x_{F_p}) a exponentů vlivu posuvu (y_{F_c} , y_{F_f} a y_{F_p}).

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \text{ [N]} \quad (2.2)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \text{ [N]} \quad (2.3)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} [N] \quad (2.4)$$

$$F_v = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} [N] \quad (2.5)$$

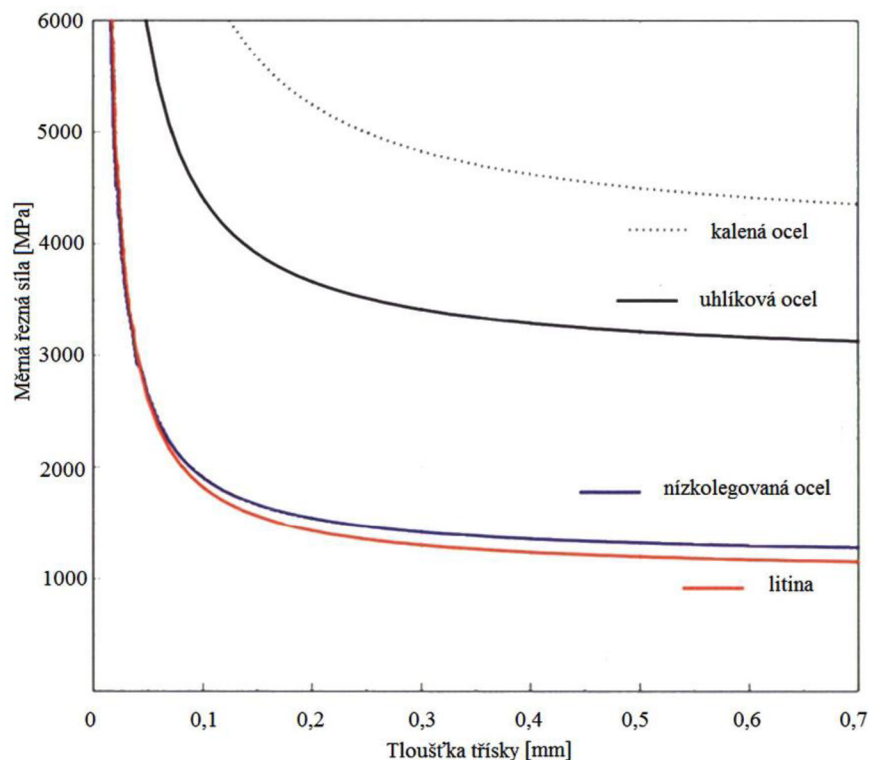
Z důvodu rozsáhlého spektra materiálů a řezných nástrojů, jsou konstanty, uvedené v předchozím odstavci, stanoveny na základě experimentálních metod. Jedná se zejména o metody zkoumání silového zatížení pomocí piezoelektrických dynamometrů, za známých podmínek, a následného dopočtu. Jelikož je tato aplikace v běžné, výrobní praxi téměř nevyužitelná, v případě potřeby znalosti silového zatížení se poměrně často uplatňuje vztah pro výpočet řezné složky síly, jakožto primární složky výsledné síly, definovaný průřezem třísky a měrnou řeznou silou (dříve nazýváno: měrný řezný odpor). Výpočet je definován vztahem 2.6.

$$F_c = A_D \cdot k_c [N] \quad (2.6)$$

Měrnou řeznou sílu lze popsat jako veličinu řezného procesu, kterou je potřeba vyvodit za účelem porušení soudržnosti materiálu. Směr jejího působení je totožný se směrem hlavního řezného pohybu a její velikost je vztažena na průřez třísky s plochou 1 mm^2 . Velikost měrné řezné síly je závislá zejména na fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku a průřezu třísky. Jednotlivé změny šířky třísky a její tloušťky mají na velikost měrné řezné síly různý vliv. Mezi další činitele ovlivňující její velikost patří:

- geometrie řezného nástroje a jeho opotřebení,
- řezné prostředí apod.

Funkce měrné řezné síly v závislosti na tloušťce třísky, pro různé obráběné materiály (litinu, nízkolegované oceli, uhlíkové oceli a kalené oceli) je znázorněna na obr. 21.



Obr. 21 Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky pro různé druhy materiálů, [18].

2.4 Upínání obrobku na CNC soustruzích

Upínací zařízení je jedním z nejdůležitějších prvků v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Jeho účelem je ustavení obrobku do předem definované polohy s ohledem na bezpečnost, ekonomičnost a produktivitu procesu.

Hlavní požadavky na upínací zařízení, které jsou používané při soustružnických operacích, jsou: [19]

- ustavení do předem stanovené polohy v požadované přesnosti,
- soustřednost, v opačném případě, kdy konstrukce dílu vyžaduje soustružení mimoosového prvku (např. ojnicní čep klikového hřídele) je potřeba řešit vyvážení rotující soustavy upínacího zařízení a obrobku,
- tuhost a odolnost proti vibracím,
- schopnost vyvození dostatečné upínací síly, pro přenos kroutícího momentu,
- zamezení deformacím a poškozením obrobku
- bezpečnost upnutí,
- jednoduchost provedení upnutí,
- rychlost / náklady na provedení upnutí
- přístup nástrojů a měřidel k obráběním plochám,
- volný odvod třísek a procesních kapalín,
- životnost

Upínání obrobků na CNC soustruzích je realizováno zejména pomocí sklíčidel, kleštinových upínacích systémů a metodou upínání mezi hroty.

Sklíčidlový upínací systém

Základními a nejrozšířenějšími upínacími zařízeními, využívanými při soustružení jsou sklíčidla. Slouží k upínání válcových a kuželových ploch, profilů se čtyřhranným a šestihranným průřezem, ale i složitějších tvarových ploch, u kterých je nutné užití tvarových čelistí. Sklíčidla lze rozdělit dle počtu čelistí na dvoučelist'ová, tříčelist'ová, čtyřčelist'ová a šestičelist'ová. Dle typu vyvození upínací síly je možné je rozdělit na mechanická, pneumatická a hydraulická. Názorné vyobrazení tříčelist'ového hydraulického sklíčidla je na obr. 22.



Obr. 22 Tříčelist'ové hydraulické sklíčidlo [20].

Kleštinový upínací systém

Pro přesnější upínání obrobků je poměrně často využíván kleštinový systém upínání, při kterém lze součásti upínat za vnější, ale i vnitřní plochy. Výhodou tohoto systému je působení upínací síly na velké ploše, což je výhodou zejména u tenkostěnných dílů, a dosažení vysokého stupně přesnosti polohování upnutí. Nevýhodou je malá flexibilita z důvodu nutnosti použití různých velikostí a typů kleštin pro různé tvarové a rozměrové charakteristiky upínací plochy součástí. Znárodnění kleštinového upínače je na obr. 22. Podle konstrukčního uspořádání jej lze rozdělit na: [21]

- tažný – kužel pouzdra je do tělesa vtahován,
- tlačný – kužel pouzdra je do tělesa vlačován,
- oboustranný – pouzdro má kužele na obou koncích,
- rozpínací – kuželový trn je vlačován do rozříznutého pouzdra.



Obr. 23 Mechanický kleštinový upínač [22].

Upínání mezi hroty

Další rozšířenou upínací možností je upnutí mezi hroty, které umožňuje dosažení vysoké přesnosti souososti obráběného povrchu vůči ose, definované středícími důlky. Ty jsou vyhotoveny na čelech součástí v jedné z předchozích operací. Nevýhodou je nízký přenos kroutícího momentu, a tedy velikost možného úběru třísky, která je závislá na způsobu unášení součástí. U CNC soustruhů je to zejména čelní unášec (mechanický nebo hydraulický), který však na čele součástí zanechává otlaky od unášecích elementů, a to z pohledu konstrukce a funkce součástí může být v určitých aplikacích nepřijatelné. Tento typ upínání je znázorněn na obr. 24.



Obr. 24. Upnutí obrobku pomocí čelního unášeče ze strany od vřetene a otočného hrotu ze strany od koniku, podle [23].

Obrobek je v procesu obrábění ustaven vlivem třecího, nebo tvarového styku. Velikost třecí síly je závislá na velikosti normálové, upínací síly a koeficientu tření, který ovlivňují faktory, jako například: [19]

- materiál obrobku a kontaktního prvku upínacího zařízení,
- použití procesní kapaliny,
- kvalita obrobení kontaktních ploch,
- tvarové zpracování kontaktního prvku upínacího zařízení (např. rýhování).

Z pohledu tuhosti soustavy by měla být upínací síla co možno nejvyšší, avšak je potřeba zohlednit možnou elastickou a plastickou deformaci obrobku, která může mít za následek obrobení součásti s nevyhovujícími rozměrovými a geometrickými požadavky, nebo s vadami na upínací ploše součásti.

3 PROBLEMATIKA SOUSTRUŽENÍ KALENÝCH OCELÍ

Soustružení kalených ocelí je poměrně efektivnější alternativou k jejich broušení. Kapitola bude proto zaměřená na teorii tepelného zpracování materiálu 16MnCr5, a to cementování, kalení a popouštění, a praktické rady pro jeho následné třískové obrobení technologií soustružení.

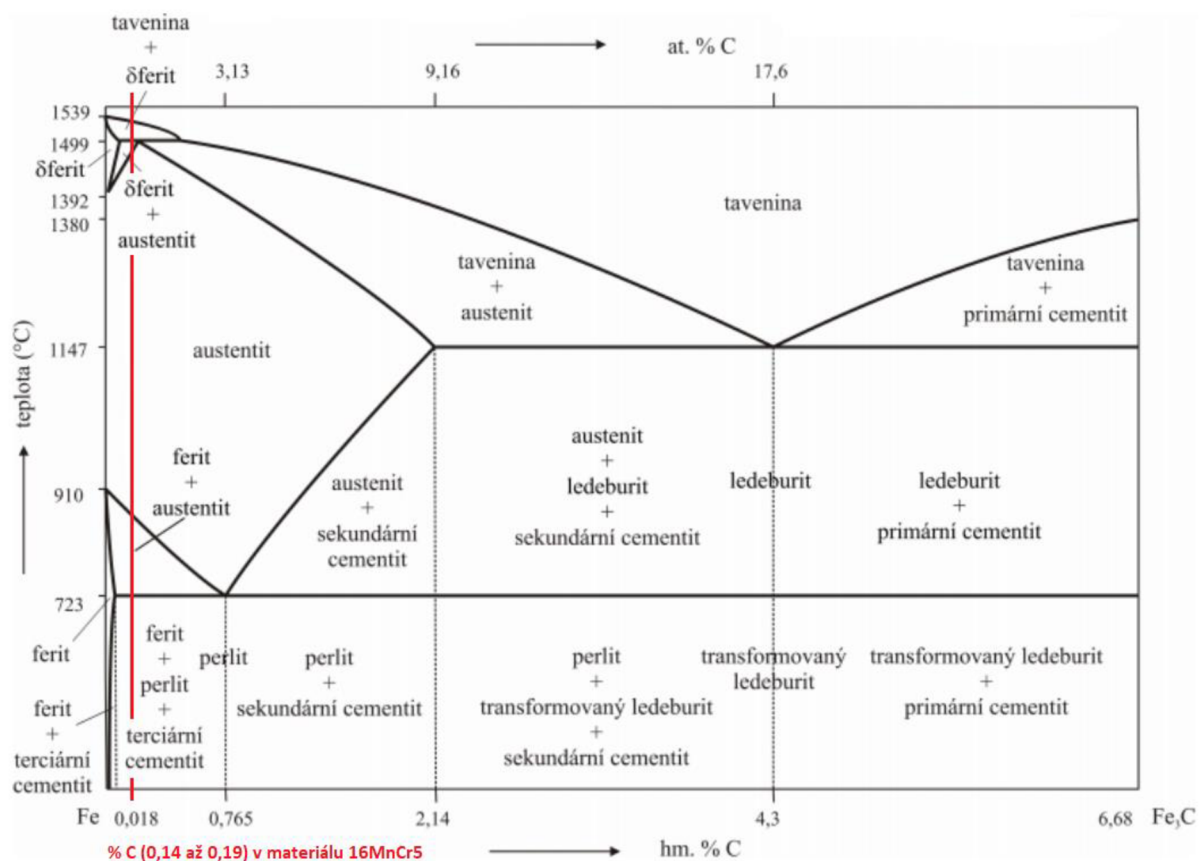
3.1 Analýza materiálu 16MnCr5

Táto mangan-chromová ocel je vhodná k zušlechtnění do průměru 35 mm a cementování. Konstrukter je volená při návrhu součástí s požadavky na vysokou houževnatost v jádře a vysokou tvrdost na jejích povrchu. Jedná se zejména o hřídele, ozubená kola, pístní čepy atd. Z pohledu obrobitelnosti se jedná o dobře obrobitelnou ocel. Chemické složení tohoto materiálu je uvedeno v tab. 5. [5]

Tab. 5 Chemické složení materiálu 16MnCr5, dle EN 10084, podle [5].

C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0,14 – 0,19	1,00 – 1,30	0,80 – 1,10	max. 0,40	max. 0,025	max. 0,035

Na obr. 25 je v rovnovážném binárním diagramu soustavy Fe-Fe₃C zakresleno množství uhlíku odpovídající podílu v chemickém složení materiálu 16MnCr5. Výchozí struktura je feriticko-perlitická, s malým podílem terciálního cementitu. Způsoby jejího tepelného zpracování jsou uvedeny v tab. 6.



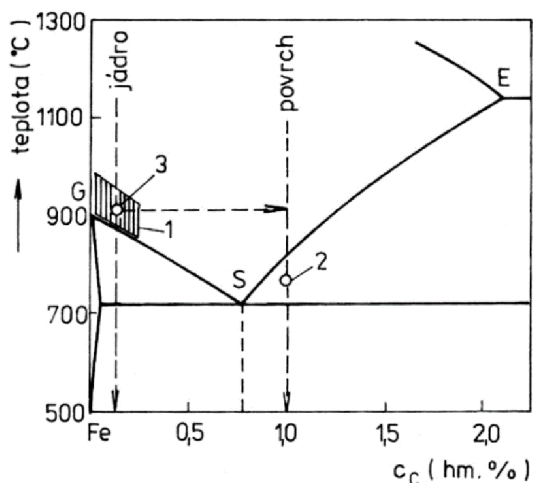
Obr. 25 Grafická interpretace množství uhlíku v materiálu 16MnCr5 zakresleno v metastabilním fázovém diagramu soustavy Fe-Fe₃C, podle [24].

Tab. 6 Způsoby tepelného zpracování materiálu 16MnCr5, podle [5].

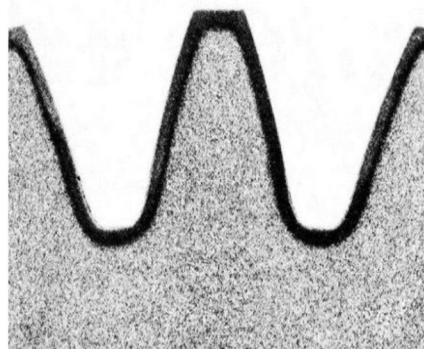
Způsob zpracování	Teplota [°C]	Způsob ochlazování
Normalizační žíhání	880 až 920	Na vzduchu
Cementování	v plynu	Na vzduchu / v ochlazovací jednotce
	v prášku	Na vzduchu / v cementační krabici
	v solné lázni	Na vzduchu
Žíhání na měkko	680 až 720	V peci
Kalení	810 až 840	V oleji / lázni
Popouštění	150 až 200	Na vzduchu

3.2 Cementování

Je metalurgický proces povrchového zušlechťení, který se běžně používá už od dob starých Římanů. Její důležitost poukazuje i podíl na trhu, na kterém je cementace součástí až 1/3 všech kalících procesů. Principem je termochemická difuze uhlíku do povrchové vrstvy součásti z nízkouhlíkových ocelí, za účelem umožnit její povrchové kalení. Proces je realizován nad teplotou A_{c3} , tedy při teplotách 910 až 930 °C, viz. grafické znázornění na výřezu z rovnovážného binárního diagramu Fe-Fe₃C, na obr. 26. [25]


 Obr. 26 Interpretace cementace na výřezu z rovnovážného binárního diagramu Fe-Fe₃C [26].

Tloušťka nauhličené vrstvy je obvykle kolem 0,5 až 1,5 mm a dosahuje tvrdost až 800 HV. Obsah uhlíku ve vrstvě je v závislosti na hloubce proměnlivý a dosahuje koncentrace 0,75 až 1,1 %. Grafická interpretace cementační vrstvy je znázorněná na obr. 27. [25]

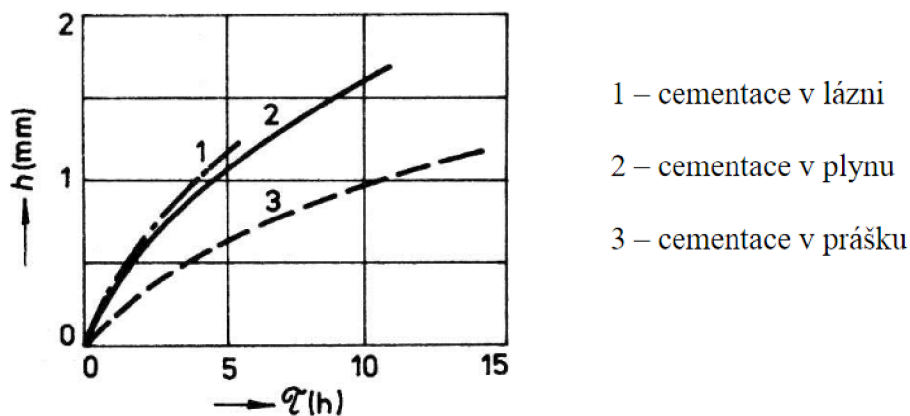


Obr. 27 Částečný řez cementovaného ozubeného kola [26].

Cementační prostředí lze rozdělit na několik typů, a cementování tak provádět v: [25]

- cementačním práškem, složeného z dřevěného uhlí a uhličitanu barnatého (BaCO_3), s teplotou kolem 930°C ,
- plynném prostředí, nejčastěji se jedná o smíšenou atmosféru neutrálního plynu s propanem, butanem nebo acetylenem, v současnosti se jedná o nejužívanější cementační prostředí,
- solné lázni, s obsahem chloridu sodného (NaCl), chloridu draselného (KCl), chloridu barnatého (BaCl_2) a kyanidu sodného (NaCN).

Průměrná rychlost růstu cementační vrstvy, v závislosti na čase a typu prostředí, je graficky znázorněna na obr. 28.



Obr. 28 Průměrná rychlost růstu cementační vrstvy dle typu cementačního prostředí [26].

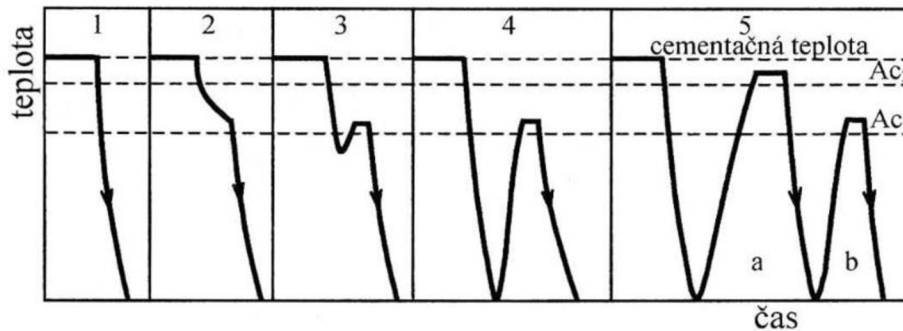
Cementace s následným kalením vytváří tvrdé a pevné povrchy, s vysokou odolností vůči opotřebení. Jádru součásti však zůstává houževnaté, a zaručuje tak vysokou odolnost vůči únavovému lomu. Typicky se tento proces využívá při výrobě ozubených kol, hřídelů nebo turbín.

3.3 Pocementační kalení

Aby bylo docíleno konečných vlastností, v podobě vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení, cementované povrchové vrstvy, je nutné po cementaci součást tepelně zpracovat – zakalit. Navržené pocementační tepelné zpracování je závislé zejména na materiálu součásti, metodě cementace a funkci (namáhání) součásti. Existuje několik variant tohoto zpracování, a to: [25]

- kalení z cementační teploty,
- kalení s přichlazením,
- kalení s podchlazením,
- kalení po ochlazení z cementační teploty,
- dvojité kalení.

Jednotlivé varianty kalení jsou teplotně-časovou závislostí graficky znázorněny na obr. 29.



Obr. 29 Způsoby kalení po cementaci: 1 – kalení z cementační teploty, 2 – kalení s přichlazením, 3 – kalení s podchlazením, 4 – kalení po ochlazení z cementační teploty, 5 – dvojité kalení [26].

Kalení z cementační teploty (cca 1050 °C) je nejjednodušším způsobem pocementačního kalení, u kterého však dochází k zhrubnutí austenitického zrna. Následkem je vznik vnitřních pnutí a deformací v cementované vrstvě i jádře součásti. Výsledná struktura se skládá z martenzitu a sekundárního cementitu. [25]

Omezit vznik deformací lze u cementačních ocelí při použití procesu kalení s přichlazením. Při němž se součást ochladí na teplotu 750 až 780 °C a následně zakalí. U tohoto procesu však i přesto nedochází ke zjemnění austenitického zrna. [25]

U běžných cementačních ocelí je proto užíván proces kalení s podchlazením, kdy se součást ochladí na teplotu A_{c1} (cca 600 °C) a poté se provede ohřev na kalící teplotu mezi A_{c1} a A_{c3} (cca 840 °C). Tento cyklus vede k překrystalizaci a zjemnění austenitického zrna. [25]

Po dvojitém kalení má struktura podobu jemnozrnného martenzitu. Při prvním kalícím cyklu z teploty nad A_{c3} dochází ke zjemnění austenitické struktury a rozpouštění sekundárního cementitu. Ve druhém kalícím cyklu z teploty nad A_{c1} dojde k vytvoření martenzitické jemnozrnné struktury. [25]

3.4 Popouštění

Je finálním tepelným zpracováním všech pocementačních kalících procesů, jehož účelem je snížit vnitřní pnutí a stabilizovat výslednou strukturu. Princip spočívá v ohřátí součásti pod teplotu A_{c1} , následné výdrži a ochlazení na vzduchu (popřípadě ve vodě). Proces lze na základě teploty rozdělit na dva typy, a to popouštění za nízkých teplot a popouštění za vysokých teplot. [27]

Popouštění za nízkých teplot je realizováno při teplotách od 100 do 350 °C, kdy dochází k uvolňování karbidů z jehlicovité martenzitické struktury a rozpadu zbytkového austenitu. Využíváno je zejména v aplikacích s cílem snížit hladinu vnitřního pnutí, stabilizovat rozměry kalené součásti a zároveň zachovat její vysokou tvrdost. [27]

Popouštění za vysokých teplot je realizováno při teplotách od 350 do 650 °C, kdy dochází k zániku jehlicovité martenzitické struktury a tvorbě jemné feriticko-cementické směsi. Využíváno je zejména v aplikacích s cílem získat příznivější mechanické vlastnosti součásti, s vysokou houževnatostí, mezi kluzu a vysokou mezi únavy. [27]

3.5 Praktické zásady pro soustružení kalených ocelí

Základním nástrojovým materiálem pro obrábění ocelí měkčích než 55 HRC jsou keramika nebo karbid. Pro obrábění součástí, které jsou cementované nebo indukčně kalené, s tvrdostí 55-65 HRC, jsou aplikovány zejména nástrojové materiály třídy kubického nitridu boru (CBN). [28, 29]

S tímto procesem mohou být spojené různé problémy, které lze za použití praktických doporučení eliminovat, nebo alespoň snížit riziko jejich negativního dopadu. Obecně je při soustružení kalených ocelí potřeba zabezpečit vysokou tuhost obráběcí soustavy, spolu s její nízkou náchylností ke vzniku, nebo přenosu vibrací. Při přesném dokončovacím soustružení je také z pohledu stroje a pracovního prostředí, nutné zvolit: [28, 29]

- stroj s vysokou přesností,
- řízení řezných (pracovních) pohybů s vysokou rozlišitelností,
- řízení zpětné vazby,
- stroj a prostředí s vysokou teplotní stabilitou.

Při měkkém obrábění, tedy hrubování součástí, je vhodné: [28]

- zamezit tvorbě otřepů / jejich odstranění před tepelným zpracováním,
- vyrábět plochy, s přídávky na soustružení za tvrda, s malými rozměrovými tolerancemi,
- provádět finální zkosení a zaoblení hran.

Při návrhu upínání obrobku a nástrojů, a seřizování stroje je potřebné uvažovat dosažení maximální stability, a to zejména: [28]

- dostatečným vyrovnaním obrobku, s maximálním vyložení, definovaným poměrem délky vůči průměru 2 : 1, bez podepření hrotem,
- tuhým upnutím nástrojů a obrobku,
- použitím tlumených nástrojů, nebo nástrojů s karbidovou stopkou.

Aplikace vhodného nástroje je základním pilířem pro dosažení stabilního obráběcího procesu, a proto je doporučeno: [28, 29]

- použití hladicí geometrie, za účelem dosažení nejvyšší kvality obrobeného povrchu,
- v případě vysokých požadavků na produktivitu, použití nástrojů s malým úhlem nastavení,
- jejich výměna nejčastěji na základě kritéria hodnoty dosažené drsnosti povrchu, které by mělo být o 10 až 20% nižší, než je limitní požadována drsnost povrchu.

Řezné podmínky

Volba řezných podmínek je závislá zejména na vhodně zvolené řezné rychlosti, která ovlivňuje teplotu v místě řezu, a tím velikost silového zatížení. Při nižší řezné rychlosti může dojít k porušení VBD lomem, a to z důvodu nižší teploty v místě řezu a vyššího silového zatížení nástroje. Naopak se zvyšující se řeznou rychlostí roste opotřebení nástroje v podobě vzniku výmolu na jeho čele. Z tohoto důvodu je při odladování řezných parametrů potřebné najít průsečík těchto závislostí, za účelem dosažení akceptovatelné životnosti nástroje. [28]

Strategie obrábění

Volbu strategie obrábění lze rozdělit na základní dvě varianty, a to strategie jednoho řezu a dvou řezů. Strategie jednoho řezu je vhodná jak pro vnější, tak i pro vnitřní soustružení.

Doporučeno je použít střední řezné rychlosti a rychlosti posuvu. Největší výhodou této strategie je krátká doba obrábění, naopak mezi její největší nevýhody lze zařadit malou rozměrovou stabilitu z důvodu rychlého opotřebení nástroje a jeho krátkou životnost. [28]

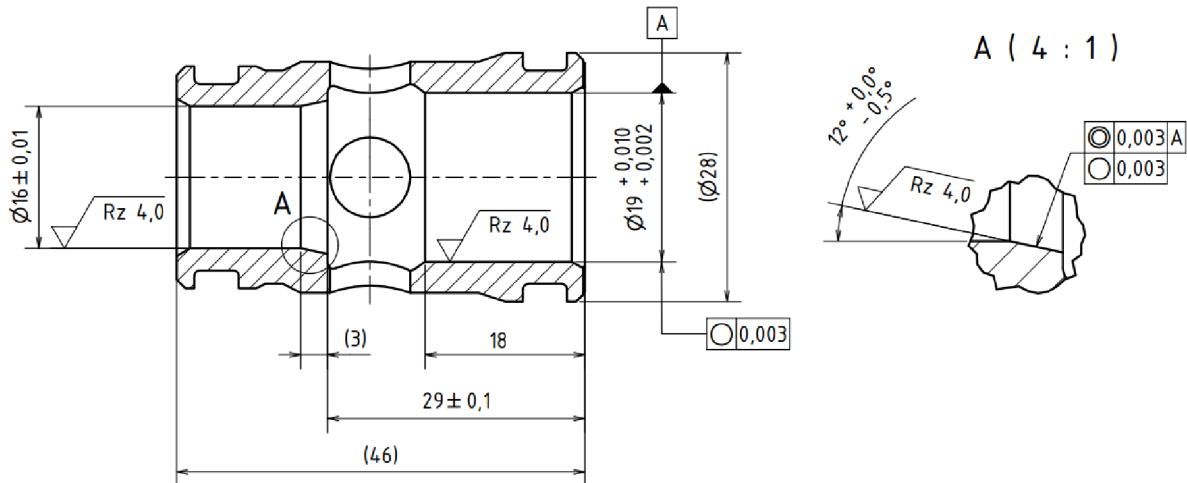
Strategie dvou řezů je výhodná pro obrábění ploch s vysokými požadavky na rozměrovou stabilitu a kvalitu jejich obrobení. Nástroje vyznačují vyšší životnost a bezpečnost. Mezi její nevýhody lze zařadit jejich vyšší potřebný počet (využití dvou nástrojových pozic). [28]

Použití procesní kapaliny

Obrábění bez přívodu procesní kapaliny při aplikaci nástrojových materiálů třídy CBN a keramických materiálů je ideální, a to z důvodu možného porušení nástroje při teplotní nestabilitě. V některých aplikacích, které však vyžadují použití procesní kapaliny, např. z důvodu tepelné stability obrobku, je nutné zajistit nepřerušovaný přívod tohoto média, po dobu celého obráběcího cyklu. [28, 29]

4 NÁVRH A REALIZACE OPERACE PŘESNÉHO SOUSTRUŽENÍ

V kapitole je navržena a popsána realizace procesu přesného soustružení vnitřní kontury dílu, znázorněné na obr. 30. Provedená bude volba stroje, řezných nástrojů, řezných podmínek, upínání polotovaru, obráběcího cyklu a normy času.



Obr. 30 Vnitřní kontura pro navržený proces operace přesného soustružení definovaná v řezu vyráběné součásti.

4.1 Volba stroje

Pro operaci přesného soustružení vnitřních funkčních ploch byl zvolen stroj Hardinge Super-Precision T-51, kterým společnost disponuje. Ten je znázorněn na obr. 31.



Obr. 31 CNC soustruh Hardinge Super-Precision T-51 [30].

Z konstrukčního hlediska se jedná o revolverový soustruh s osou Y, řízenou osou C a možností osazení revolverové hlavy držáky pro poháněné nástroje. Klíčové vlastnosti tohoto stroje jsou: [30]

- vysoká přesnost a kvalita opracování funkčních ploch,
- vysoká tuhost konstrukce,
- dynamické vyvážení vřetena a jeho pohonu,
- vysoká přesnosti digitálního odměřování,

- teplotní kompenzace,
- použitá technologie řízení (řídící systém Fanuc Series 31i – Model A).

Tyto vlastnosti stroje umožňují dosažení odchylky průměru 0,003 mm po krátkém zahřívacím cyklu a opakovatelnosti 0,0008 mm po dlouhém zahřívacím cyklu. Pro dosažení výrobcem předepsaných přesností stroje, jsou obráběcí procesy realizovaný nástroji z materiálu CBN a v místnosti s výkonnou klimatizační jednotkou, za účelem dosažení vysoké teplotní stability prostředí. [30]

Tab. 7 Specifikace stroje Hardinge Super-Precision T-51, podle [30].

Specifikace stroje Hardinge Super-Precision T-51	Vrtání vřetene	60,452 mm
	Maximální otáčky vřetene	5 000 min ⁻¹
	Průměr sklíčidla	200 mm
	Maximální točný průměr	313,7 mm
	Maximální točný průměr nad lůžemi	570,7 mm
	Maximální točná délka	599,4 mm
	Maximální pojezd v ose X	197 mm
	Maximální pojezd v ose Y	88,9 mm
	Maximální pojezd v ose Z	635 mm
	Opakovatelnost polohování (po krátkém zahřívacím cyklu)	0,0015 mm
	Opakovatelnost polohování (po dlouhém zahřívacím cyklu)	0,0008 mm
	Počet nástrojových pozic	12
	Řídící systém	Fanuc Series 31i-Model A
	Váha stroje	7 800 kg
	Půdorys	3 257 x 2 312,4 mm

4.2 Řezné nástroje

Pro obrábění součásti je z důvodu jejího tepelného zpracování zvolená VBD z kubického nitridu bóru. Volba jejího typu je závislá na dostupném nástrojovém držáku, schopném svými rozměrovými parametry obrobit vnitřní plochy součásti, a kombinací poloměru zaoblení špičky VBD a nejnižšího posuvu za účelem docílit požadovanou kvalitu obrobeného povrchu, definovanou parametrem Rz 4,0 μm. Teoretickou hodnotu parametru Rz lze stanovit na základě vztahu 4.1. Vztah platí pouze za předpokladu, že je povrch generován pouze poloměrem zaoblení špičky nástroje.

$$Rz \approx \frac{f^2}{8 \cdot r} \cdot 10^3 [\mu m] \quad (4.1)$$

Dostupným nástrojovým držákem je antivibrační držák s označením E10M SDUCR-07, od výrobce ISCAR, jehož názorná ukázka je uvedena na obr. 32



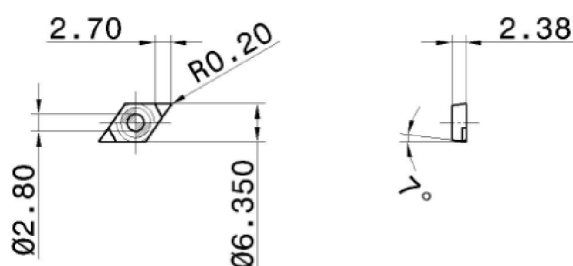
Obr. 32 Nástrojový držák E10M SDUCR-07 [31].

V tab. 8 jsou uvedené nabízené VBD vhodné pro tento typ nástrojového držáku, a to spolu s parametrem poloměru zaoblění špičky a nejnižším možným posuvem, doporučeným výrobcem. Na základě těchto dvou parametrů, jsou dopočítány teoretické dosažitelné parametry kvality obrobeneho povrchu Rz.

Tab. 8 Charakteristika vybraných variant VBD.

Dodavatel	Označení	r [mm]	f_{\min} [mm.ot ⁻¹]	Rz [μm]
Sumitomo Electric	DCGW070202NC2	0,2	0,05	1,56
Tungaloy	DCGW070202	0,2	0,03	0,56
Kovonástroje	DCGW070204	0,4	0,12	4,50

Ze tří porovnávaných variant byla zvolena VBD typu DCGW070202, od dodavatele Tungaloy. Teoretická dosažitelná kvalita obrobeneho povrchu, definovaná parametrem Rz je nejnižší, a to 0,56 μm . Na obr. 33 je znázorněná její rozměrová charakteristika.



Obr. 33 Rozměrová charakteristika VBD typu DCGW070202, z materiálu CBN, od dodavatele Tungaloy [32].

V tab. 9 jsou uvedené všechny její řezné parametry, dle doporučení výrobcem. Pro obrábění budou použity dva totožné nástroje, jeden pro hrubování a jeden pro dokončování, a to z důvodu vysokých požadavků na kvalitu obrobeneho povrchu a zvýšení životnosti nástroje.

Tab. 9 Řezné parametry VBD typu DCGW070202, z materiálu CBN, od dodavatele Tungaloy.

v_c [m.min ⁻¹]		f [mm.ot ⁻¹]		a_p		Obráběné materiály	Charakter obrábění
Doporučení	130	Doporučení	0,10	Doporučení	0,20	H	F (Finish)
Minimum	50	Minimum	0,03	Minimum	0,05		
Maximum	230	Maximum	0,2	Maximum	0,5		

4.3 Procesní podmínky navrhované technologie obrábění

Hlavním zdrojem využitým při návrhu procesních podmínek operace přesného soustružení byli zkušenosti a zvyklosti výrobní společnosti, doporučení od výrobce řezných nástrojů a analytické výpočetní vztahy.

Návrh řezné rychlosti byl stanoven na základě doporučení výrobcem a její hodnota činí 130 m.min⁻¹. Při volbě posuvu byl výchozím bodem výpočet z předchozí kapitoly, který definuje závislost posuvu a poloměru zaoblění špičky VBD na výsledném teoretickém dosažitelném parametru, kvality obrobeneho povrchu, Rz. Z důvodu jeho přísného požadavku ($Rz = 4,0 \mu\text{m}$), byl zvolen posuv o velikosti 0,05 mm.ot⁻¹. Příklad na obrábění byl zvolen na základě zkušeností společnosti a jeho velikost činila 0,125 mm. Rozměry navazující na tento přírůstek pak byly v předchozí operaci vyráběny v toleranci $\pm 0,03$ mm. Hloubka řezu byla zvolena pro hrubování o velikosti 0,075 mm a pro dokončení 0,05 mm.

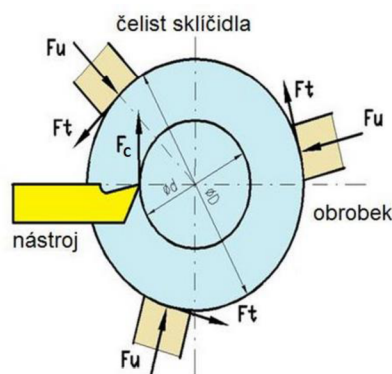
Při výrobě byla v místnosti udržována teplota 20 °C a řezný proces byl na základě obecných doporučení v kapitole 3.5 chlazen tlakem vzduchu. Souhrn použitých řezných a procesních parametrů je uveden v tab. 10.

Tab. 10 Navržené parametry řezného procesu pro VBD typu DCGW070202, z materiálu CBN, od dodavatele Tungaloy.

Parametr	Zkratka	Jednotka	Zvolená hodnota	
			Hrubování	Dokončení
Řezná rychlost	v_c	$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	130	130
Posuv	f	$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$	0,07	0,05
Šířka záběru ostří	a_p	mm	0,075	0,05
Procesní chlazení	-	-	vzduchem	
Teplota ve výrobě	t	°C	20	

4.4 Upínání polotovaru

Navrhovaná upínací plocha součásti (technologický $\Phi 26 \pm 0,03$ mm) zůstane zachována a totožná s upínací plochou z druhé polohy obrábění za měkka. Upínání bude realizováno ve sklíčidle. Jeden ze strojů Hardinge Super-Precision T-51 je osazen hydraulickým sklíčidlem Buck BPC208 a druhý mechanickým sklíčidlem Forkardt F200. Z důvodu přísné geometrické tolerance kruhovitosti o velikosti 0,003 mm a poměrně tenkostěnného charakteru součásti, je potřebné stanovit minimální upínací sílu a zjistit, který typ sklíčidla je možné pro realizaci obrábění použít. V průběhu procesu je potřeba také sledovat stabilitu kruhovitosti obrobku, zda nedochází k jeho nadměrné deformaci. Silový rozbor upnutí ve sklíčidle je graficky znázorněn na obr. 34.



Obr. 34 Silový rozbor upnutí obrobku při soustružení, podle [33].

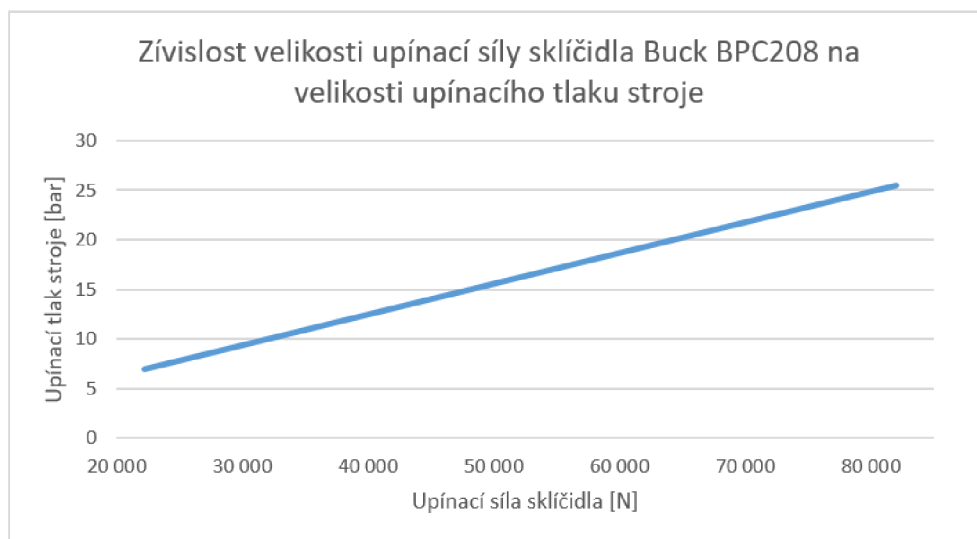
Na jeho základě byl stanoven výpočet, dle vztahu 4.2. Velikost řezné síly je vyjádřena dle výpočtu, na základě měrné řezné síly. Ta byla zvolena dle grafu na obr. 21, v kapitole 2.3, avšak pro tloušťku třísky 0,07 mm, je její odpovídající hodnota mimo rozsah grafu, proto byla stanovena odhadem (včetně zahrnutí mírné rezervy), a to o velikosti 12 000 MPa. Rozměrové parametry jsou dosazovány jako jmenovité hodnoty, bez ohledu na velikost nebo polohu tolerančního pole. Obráběný průměr (d) je volen jako největší průměr obráběné kontury. Koeficient statického tření (f) mezi materiály ocel – ocel, byl zvolen 0,15. Minimální doporučená velikost koeficientu bezpečnosti upnutí (k) je 1,5. Zvolena byla velikost $k = 3,0$.

$$F_{u \min} = \frac{F_c \cdot \frac{d}{2}}{f \cdot \frac{D}{2}} \cdot k \quad [N] \quad (4.2)$$

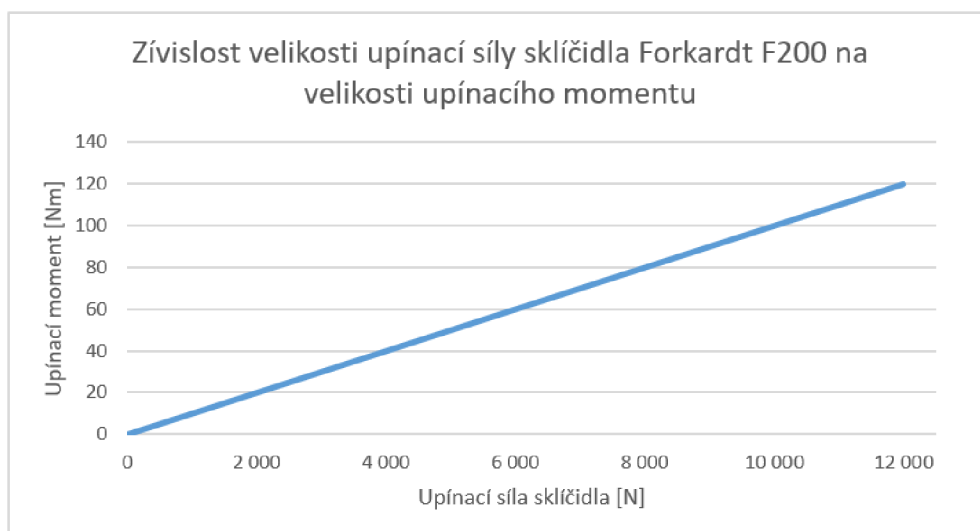
$$F_{u \min} = \frac{A_D \cdot k_c \cdot \frac{d}{2}}{f \cdot \frac{D}{2}} \cdot 2 = \frac{0,105 \cdot 0,07 \cdot 12\,000 \cdot \frac{19}{2}}{0,15 \cdot \frac{26}{2}} \cdot 3,0 \text{ [N]}$$

$$F_{u \min} = 1289,08 \text{ N}$$

Minimální velikost upínacího tlaku na stroji Hardinge Super-Precision T-51 je 6,9 bar, naopak její maximální velikost je 64,5 bar. Závislost velikosti upínací síly na upínacím tlaku při použití hydraulického sklíčidla Buck BPC208 je zobrazená na obr. 35. Pro mechanické sklíčidlo Forkardt F200, je závislost velikosti upínací síly na velikosti upínacího momentu zobrazená na obr. 36. Limitní hodnoty pro porovnání obou sklíčidel jsou uvedeny v tab. 11.



Obr. 35 Velikost upínací síly pro sklíčidlo Buck BPC208, v závislosti na velikosti upínacího tlaku, podle [34].



Obr. 36 Velikost upínací síly pro sklíčidlo Forkardt F200, v závislosti na velikosti upínacího momentu, podle [35].

Tab. 11 Limitní hodnoty porovnání dostupných sklíčidel, podle [34, 35].

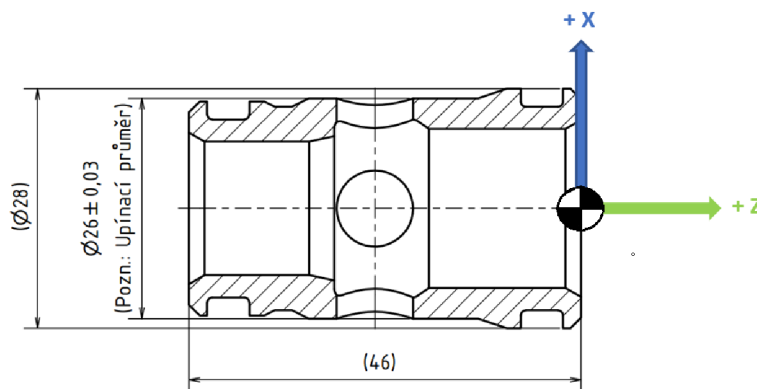
Limita	Velikost upínací síly [N]	
	Buck BPC208	Forkardt F200
Minimum	22 182	0
Maximum	81 980	12 000

Vypočtenou upínací sílu 1289,08 N nelze vyvinout použitím hydraulického sklíčidla Buck BPC208, a to z důvodu její příliš nízké velikosti, která je mimo rozsah jeho aplikace. Upínání je proto nutné realizovat za pomoci mechanického sklíčidla Forkardt F200, u kterého rozsah upínací síly umožňuje vyvinout danou upínací sílu. Z lineární, přímo úměrné charakteristiky sklíčidla Forkardt F200, vyjadřující závislosti velikosti upínacího momentu na velikosti upínací síly lze jednoduchou, přímo úměrnou rovností stanovit potřebný moment pro dosažení upínací síly o velikosti 1289,08 N. Výpočet je dán vztahem 4.3. Dosažení navrženého upínacího momentu pak bude realizováno pomocí momentového klíče.

$$M_{k(\text{potřebný upínací})} = \frac{120}{12\,000} \cdot 1289,08 = 12,8908 \cong 13 \text{ Nm} \quad (4.3)$$

4.5 Cyklus pro soustružení vnitřní kontury

Návrh obráběcího cyklu pro soustružení vnitřní kontury byl rozdělen na tři sekce. První sekce (hlavička programu) definuje základní nastavení stroje, tedy volbu vřetene, polotovaru pro grafickou simulaci drah nástrojů, polohu nulového bodu obrobku a aktivaci jeho posunutí. Umístění nulového bodu na obrobku a orientace souřadného systému je znázorněná na obr. 37. Chronologický seřazené příkazy hlavičky programu jsou uvedené v tab. 12, a to včetně případných poznámek.



Obr. 37 Pozice nulového bodu obrobku a orientace souřadného systému.

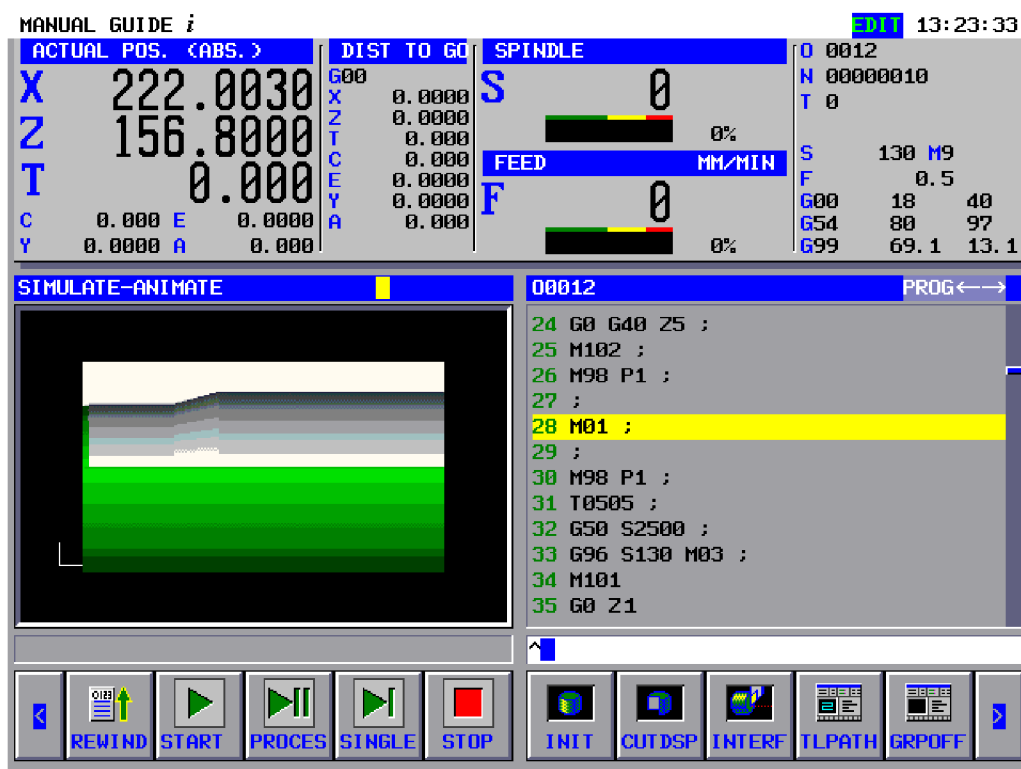
Tab. 12 Hlavička programu – základní nastavení stroje.

Blok	Příkaz	Poznámka
N10	G1998 S1;	definice vřetena
N20	G1901 D27 E15.4 L46 K0 W0;	definice polotovaru pro simulaci
N30	G10 L2 P1 Z160.2;	definice polohy nulového bodu obrobku
N40	G54;	aktivace posunutí nulového bodu obrobku

Druhá sekce programu je určena k definici hrubovacího cyklu vnitřní kontury. Její chronologický seřazené příkazy jsou uvedené v tab. 13. Grafická simulace je znázorněná na obr. 38. Pro účely grafické simulace byl do programu zanesen příkaz M01 pro zastavení cyklu, který však při obrábění nebyl použit.

Tab. 13 Hrubovací cyklus vnitřní kontury.

Blok	Příkaz	Poznámka
N50	M98 P1;	P1 – odjezd do polohy pro výměnu nástroje
N60	T0202;	
N70	G50 S2500;	
N80	G96 S130 M03;	
N90	M101;	zapnutí chlazení tlakem vzduchem
N100	G0 Z1;	
N110	X18.906;	
N120	G1 G99 F0.7;	
N130	G1 Z-19;	
N140	Z-28 F1;	
N150	G41 X17.18 F0.7;	
N160	,A0;	plovoucí příjezd
N170	,A-11.75 X17.18 Z-28.95;	
N180	,A-11.75 X15.9;	
N190	Z-46;	
N200	U-0.5;	
N210	G0 G40 Z5;	
N220	M102;	vypnutí chlazení tlakem vzduchu
N230	M98 P1;	P1 – odjezd do polohy pro výměnu nástroje

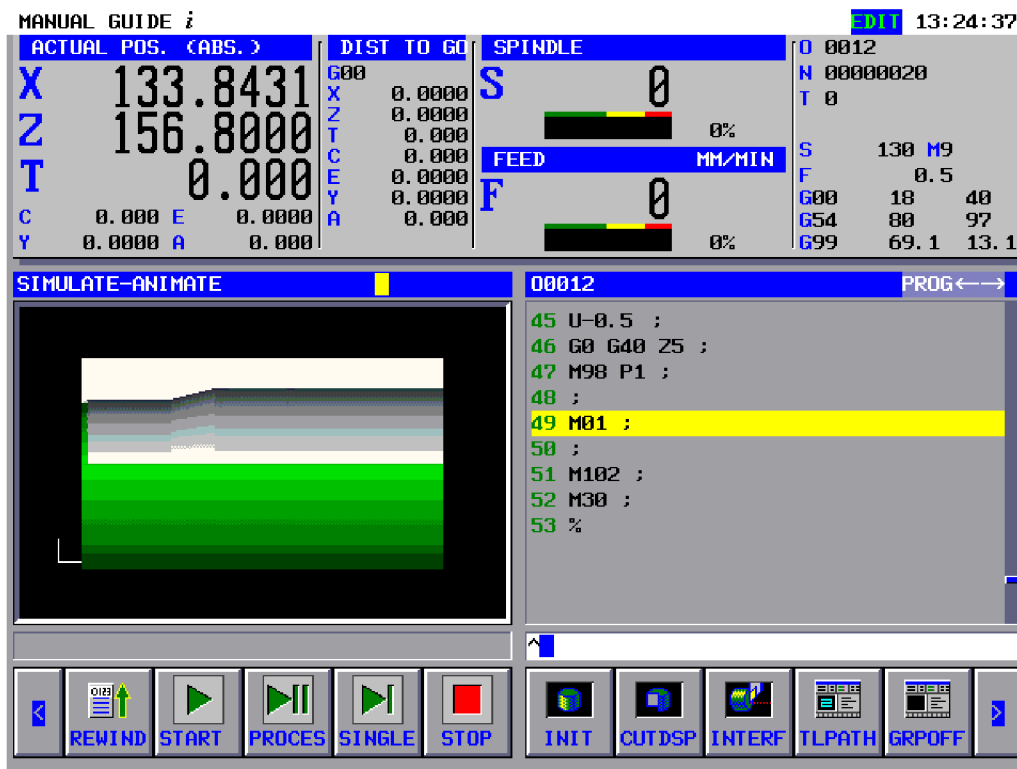


Obr. 38 Grafické znázornění hrubovacího cyklu.

Třetí, a tedy poslední sekce programu je určena k definici dokončovacího cyklu vnitřní kontury. Její chronologický seřazené příkazy jsou uvedené v tab. 14. Grafická simulace je znázorněná na obr. 39. Stejně, jako u grafické simulace hrubovacího cyklu, byl za dokončovací cyklus programu zanesen příkaz M01 pro jeho zastavení, který však při obrábění nebyl použit.

Tab. 14 Dokončovací cyklus vnitřní kontury.

Blok	Příkaz	Poznámka
N240	M98 P1;	P1 – odjezd do polohy pro výměnu nástroje
N250	T0505;	
N260	G50 S2500;	
N270	G96 S130 M03;	
N280	M101;	zapnutí chlazení tlakem vzduchem
N290	G0 Z1;	
N300	X19.006;	
N310	G1 G99 F0.5;	
N320	Z-19;	
N330	Z-28 F1;	
N340	G1 G41 X17.28 F0.05;	
N350	,A0;	plovoucí příjezd
N360	,A-11.75 X17.28 Z-29.0;	
N370	,A-11.75 X16.0;	
N380	Z-46;	
N390	U-0.5;	
N400	G0 G40 Z5;	
N410	M98 P1;	P1 – odjezd do polohy pro výměnu nástroje
N420	M102;	vypnutí chlazení tlakem vzduchu
N430	M30;	konec programu a vrácení se na začátek



Obr. 39 Grafické znázornění dokončovacího cyklu.

4.6 Norma času

Výroba 400 kusové série zahrnuje navýšení dávky o čtyři potenciální NOK kusy (včetně kusů pro seřízení stroje). Při návrhu normy času byla tedy uvažována velikost výrobní série 404 kusů. Hlavními zdroji informací návrhu byly interní normy společnosti a data ze simulace obráběcího cyklu.

Návrh normy času na seřízení obráběcího stroje byl stanoven na základě dílčích úkonů tohoto procesu, a to:

- výměny nástrojů – ta je stanovená na základě násobku počtu nástrojů a interní normy času, pro jejich osazení a zkorigování, která činí 10 min pro jeden nástroj,
- realizace upnutí obrobku – ta je stanovená odhadem, a zahrnuje výměnu čelistí ve sklíčidle a jejich přesoustružení dle definice technologických upínacích ploch na obráběné součásti,
- oživení programu – které je stanoveno taktéž na základě interní normy.

Jednotlivé časy dílčích úkonů, pro seřízení stroje jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15 Navržené časy dílčích úkonů, pro stanovení času seřízení stroje.

Dávkový čas seřízení stroje	Výměna nástrojů [min/dávka]	20,00
	Realizace upnutí obrobku [min/dávka]	30,00
	Oživení programu [min/dávka]	5,00
	Celkem [min/dávka]	55,00

Návrhu normy výrobního času byl stanoven na základě dílčích úkonů tohoto procesu, a to:

- upnutí obrobku – to je stanoveno na základě interní normy, dle komplikovanosti upnutí (zohledňuje se možné vyrovnávání součásti a náročnost na manipulaci, v souvislosti s hmotností obrobku),
- strojního času – ten je stanoven na základě simulace ve stroji a násoben konstantou 1,15,
- času průběžného měření – ten je stanoveno interní normou podle počtu měřených parametrů a požadavku na přesnost měření.

Jednotlivé časy dílčích úkonů, potřebných pro výrobu, jsou uvedeny v tab. 16. Při výpočtu dávkového času byla uvažována velikost výrobní dávky 403 kusů, přičemž jeden kus je započten v návrhu času pro schválení prvního vyrobeného kusu.

Tab. 16 Navržené časy dílčích úkonů, pro stanovení výrobního času.

Výrobní čas	Upnutí obrobku [min/ks]	0,75
	Strojní čas [min/ks]	1,50
	Průběžné měření [min/ks]	0,75
	Celkem [min/ks]	3,00
	Celkem [min/dávka]	1 209,00

Norma pro schválení prvního vyrobeného kusu oddělením kontroly byla stanovena na základě dílčích úkonů, a to:

- výrobního času (uvolnění) – ten je stanoveno jako dvounásobek jednotkového strojního času
- měření – to je stanoveno na základě interní normy dle komplikovanosti měřené součásti a požadavku na přesnost měření.

Jednotlivé časy dílčích úkonů, potřebných pro schválení prvního vyrobeného kusu oddělením kontroly jsou uvedeny v tab. 17.

Tab. 17 Navržené časy dílčích úkonů, pro stanovení času schválení prvního kusu.

Dávkový čas schválení prvního kusu	Výrobní čas (uvolnění) [min/dávka]	6,00
	Měření [min/dávka]	30,00
	Celkem [min/dávka]	36,00

Na základě výše uvedených časů dílčích úkonů je v tab. 18 uvedena navržená norma času vyjádřená v dávkovém, ale i jednotkovém času.

Tab. 18 Navržená norma času.

Norma času	Seřízení stroje [min/dávka]	55,00
	Výrobní čas [min/dávka]	1 209,00
	Schválení prvního kusu [min/dávka]	36,00
	Celkem [min/dávka]	1 300,00
	Celkem [min/ks]	cca 3,22

5 TECHNICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO PROCESU

Je nutné uvědomit si, že při měření charakteristik vyrobené součásti není možné určit výslednou hodnotu absolutně přesně. Do procesu měření vstupuje mnoho činitelů, které zapříčiňují chybovost měření a vzniká tak nejistota měření. Může se jednat třeba o opakovatelnou přesnost měřidla, teplotní nestabilitu prostředí, ve kterém probíhá měření, vyhodnocení metody měření atd. Základním předpokladem pro měření vysoce přesných komponent, s rozměry v tolerancích řádově v jednotkách mikrometrů, je proto znalost těchto činitelů a jejich, pokud možná, eliminace, kompenzace, anebo sesouladění měření s požadavky zákazníka. Faktory ovlivňující přesnost a stabilitu vysoce přesného obrábění jsou znázorněné na obr. 40.



Obr. 40 Faktory ovlivňující přesnost a stabilitu vysoce přesných obráběcích procesů, podle [36].

5.1 Stabilita kvality obrobeného povrchu

Studium stability kvality obrobeného povrchu bylo hodnoceno na základě měření za pomoci digitálního drsnoměru Mitutoyo Surftest SJ-401. Zařízením lze vyhodnocovat parametry Ra, Rq, Rz, Ry, Rc a Rp, v ose Z v rozsahu od 0,008 až do 0,800 mm a v ose X s maximální délkou 25 mm. Sestava tohoto drsnoměru spolu se žulovým stojanem, je znázorněn na obr. 41.



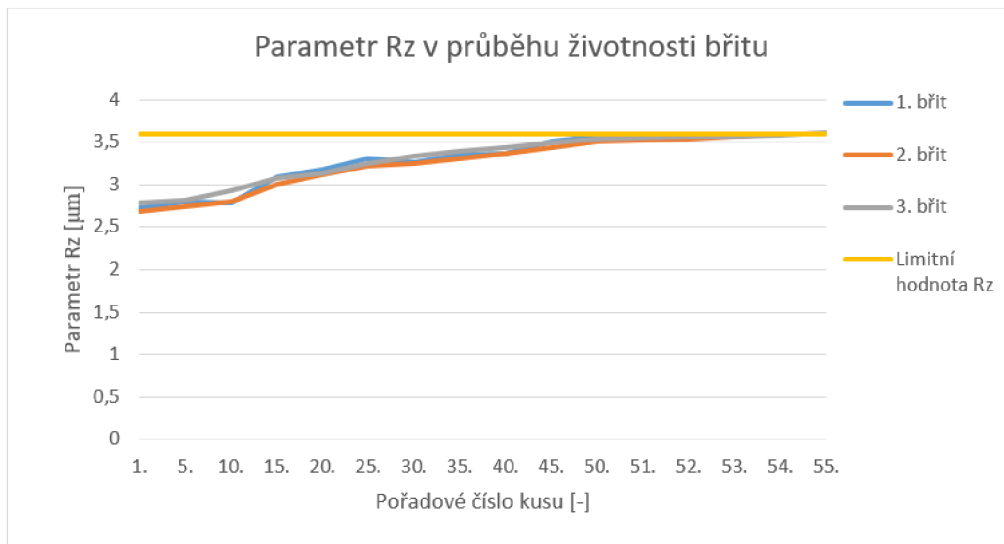
Obr. 41 Mitutoyo Surftest SJ-401 v sestavě se žulovým stojanem [37].

Pro vyhodnocení kvality obrobeného povrchu byl v průběhu výroby sledován parametr Rz, jehož maximální hodnota dle výkresové dokumentace mohla dosáhnout hodnoty 4,0 μm . Pro výrobu byla stanovena limitní hodnota na základě praktických zásad při soustružení kalených ocelí v kapitole 3.5. Její velikost je 3,60 μm , tedy o 10 % nižší, než je maximální hodnota dle

výkresové dokumentace. Měření bylo provedeno na $\Phi 19$, při obrábění třemi břitů, a to na prvním kusu, následně každém patem, a každém kusu při přibližování se k limitní hodnotě Rz. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 19. Jejich grafické znázornění je na obr. 42.

Tab. 19 Naměřené hodnoty parametru Rz.

1. břit	Poradové číslo kusu	1.	5.	10.	15.	20.	25.	30.	35.
	Rz [μm]	2,73	2,80	2,78	3,09	3,17	3,30	3,27	3,35
	Poradové číslo kusu	40.	45.	50.	51.	52.	53.	54.	55.
	Rz [μm]	3,37	3,51	3,56	3,56	3,58	3,60	-	-
2. břit	Poradové číslo kusu	1.	5.	10.	15.	20.	25.	30.	35.
	Rz [μm]	2,69	2,75	2,80	3,01	3,12	3,22	3,25	3,30
	Poradové číslo kusu	40.	45.	50.	51.	52.	53.	54.	55.
	Rz [μm]	3,37	3,44	3,51	3,53	3,54	3,57	3,59	-
3. břit	Poradové číslo kusu	1.	5.	10.	15.	20.	25.	30.	35.
	Rz [μm]	2,78	2,82	2,93	3,07	3,14	3,25	3,33	3,40
	Poradové číslo kusu	40.	45.	50.	51.	52.	53.	54.	55.
	Rz [μm]	3,44	3,50	3,54	3,55	3,57	3,56	3,58	3,61



Obr. 42 Naměřené hodnoty parametru Rz.

Nejnižší životnost břitu, při podmínce limitní hodnoty parametru Rz o velikosti $3,60 \mu\text{m}$, byla dosažená při obrábění 53 kusů. Trvanlivost tohoto břitu činila 38,16 min. Ta byla stanovená na základě násobku počtu obrobeneých kusů a čase nástroje v řezu při obrábění jednoho kusu (dle simulace 0,72 min).

5.2 Rozměrová stabilita

Studium rozměrové stability bylo hodnoceno na základě měření za pomoci tříosého souřadnicového měřicího stroje Zeiss Micura se sondou Vast XT. Jeho znázornění je na obr. 43. První měření za účelem vyhodnocení bylo provedeno po výměně nástroje a jeho seřízení. Následovalo měření prvních pěti kusů a následně byl proměřen každý pátý kus po dobu životnosti břitu. Naměřené hodnoty a případné korekce jsou uvedené v tab. 20. Pro tento účel byly použity pouze záznamy z měření rozměru $\Phi 19$.

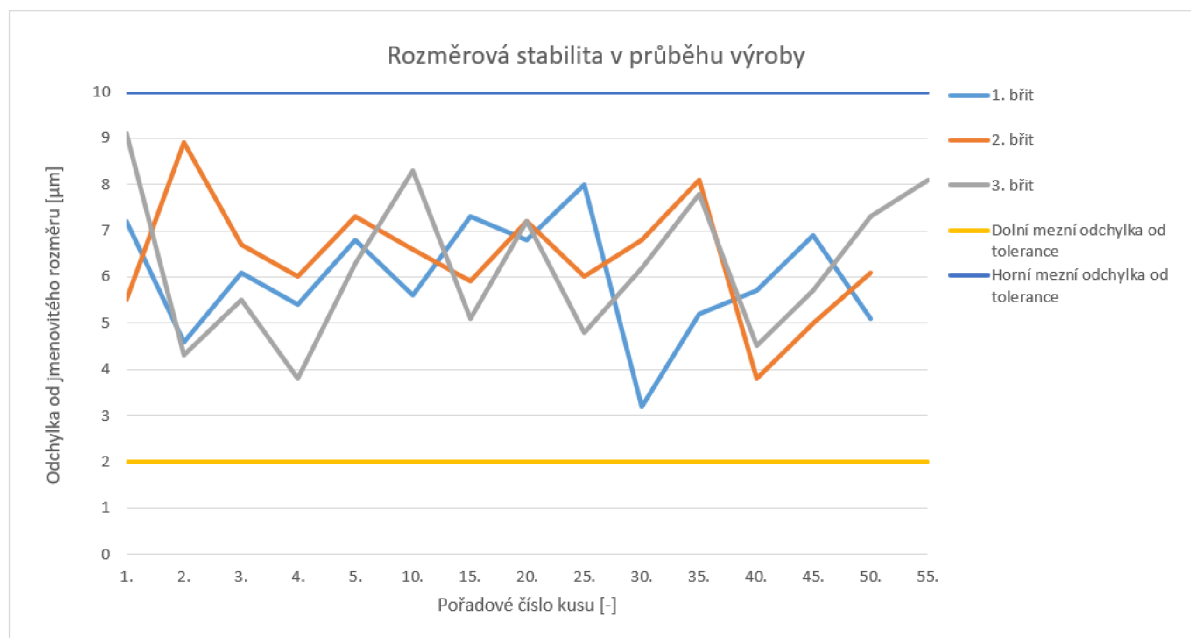


Obr. 43 Zeiss Micura [38].

 Tab. 20 Naměřené hodnoty rozměru $\Phi 19$.

1. břit	Poradové číslo kusu	1.	2.	3.	4.	5.	10.	15.	20.
	Korekce [μm]	0	-4,0	0	-2,0	0	-3,0	-1,0	-2,0
	Odchylka od jmenovitého rozměru [μm]	7,2	4,6	6,1	5,4	6,8	5,6	7,3	6,8
	Poradové číslo kusu	25.	30.	35.	40.	45.	50.	55.	60.
	Korekce [μm]	0	-5,0	0	-1,0	0	-2,0	-	-
	Odchylka od jmenovitého rozměru [μm]	8,0	3,2	5,2	5,7	6,9	5,1	-	-
2. břit	Poradové číslo kusu	1.	2.	3.	4.	5.	10.	15.	20.
	Korekce [μm]	0	0	-3,0	-2,0	0	-2,0	-1,0	0
	Odchylka od jmenovitého rozměru [μm]	5,5	8,9	6,7	6,0	7,3	6,6	5,9	7,2
	Poradové číslo kusu	25.	30.	35.	40.	45.	50.	55.	60.
	Korekce [μm]	-2,0	0	0	-5,0	0	0	-	-
	Odchylka od jmenovitého rozměru [μm]	6,0	6,8	8,1	3,8	5,0	6,1	-	-
3. břit	Poradové číslo kusu	1.	2.	3.	4.	5.	10.	15.	20.
	Korekce [μm]	0	-6,0	-1,0	-2,0	0	0	-4,0	0
	Odchylka od jmenovitého rozměru [μm]	9,1	4,3	5,5	3,8	6,3	8,3	5,1	7,2
	Poradové číslo kusu	25.	30.	35.	40.	45.	50.	55.	60.
	Korekce [μm]	-3,0	0	0	-4,0	0	0	0	-
	Odchylka od jmenovitého rozměru [μm]	4,8	6,2	7,8	4,5	5,7	7,3	8,1	-

Je předpokládáno, že nutnost korigování nástroje v průběhu výroby byla zapříčiněná pouze jeho postupným otupováním. Důvodem tohoto předpokladu je výrobcem udávána přesnost polohování stabilně zahřátého stroje o velikosti 0,0008 mm. Grafická interpretace vývoje odchylek od jmenovitého rozměru v intervalu tolerančního pole je znázorněná na obr. 44. Statistické vyhodnocení měření je uvedeno v tab. 21. Z pohledu hodnocení rozměrové stability procesu, bylo při výrobě dosaženo využití tolerančního pole o velikosti 73,6 %.



Obr. 44 Grafická interpretace vývoje odchylek od jmenovitého rozměru.

Tab. 21 Statistické vyhodnocení měření $\Phi 19$.

Velikost tolerance	8,0 μm
Minimální odchylka od jmenovitého rozměru	3,2 μm
Maximální odchylka od jmenovitého rozměru	9,1 μm
Využitá velikost tolerance	5,9 μm
Využití tolerančního pole	73,6 %

5.3 Stabilita kruhovitosti

Studium stability kruhovitosti bylo hodnoceno na základě měření za pomoci stroje Formtester Mahr MMQ44. Ten je zobrazen na obr. 45. Jedná se o stroj s vysoce přesným měřením v ose X a Z, využíván pro stanovení odchylek od tvarů.

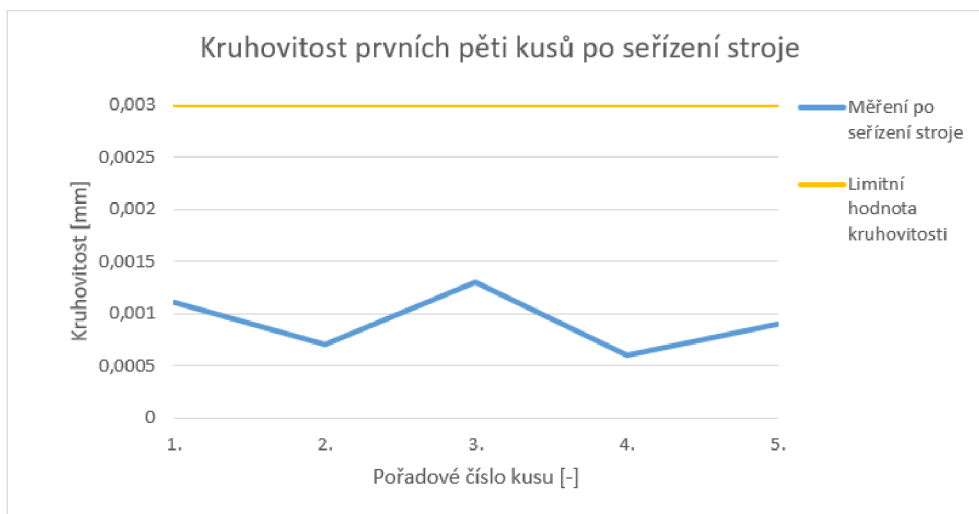


Obr. 45 Kruhoměr – Formtester Mahr MMQ44 [39].

Hlavní motivací pro zjištění, zda navržený proces přesného soustružení je z hlediska dosažení požadované kruhovitosti o velikosti 0,003mm stabilní je ověření, zda velikost utahovacího momentu byla stanovena správně. Při výrobě kompletní série nedošlo ani při jednom z upnutí k protočení součástí v čelistech. Lze tedy usoudit, že navržená upínací síla byla dostatečně velká. Použitý jsou záznamy z měření kruhovitosti $\Phi 19$. Po seřízení stroje bylo proměřeno prvních pět vyrobených kusů. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tab. 22. Jejich grafická interpretace je uvedena v grafu, na obr. 46.

Tab. 22 Naměřené hodnoty kruhovitosti prvních pěti kusů po seřízení stroje.

Poradové číslo kusu	1.	2.	3.	4.	5.
Kruhovitost [mm]	0,0011	0,0007	0,0013	0,0006	0,0009

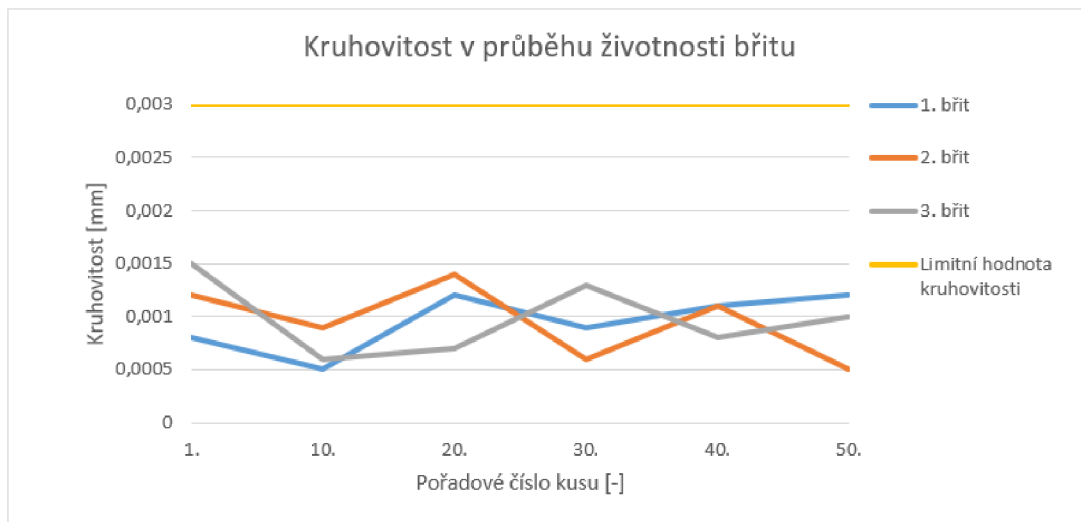


Obr. 46 Grafická interpretace naměřených hodnot kruhovitosti prvních vyrobených kusů po seřízení stroje.

V průběhu výroby bylo měření opakováno, a to na dávkách vyráběných třemi různými břity. Měření proběhlo vždy na prvním kusu po jejich výměně a následně na každém desátém v průběhu jejich životnosti. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tab. 23. Jejich grafická interpretace je uvedena na obr. 47.

Tab. 23 Naměřené hodnoty kruhovitosti v průběhu životnosti nástroje.

1. břit	Poradové číslo kusu	1.	10.	20.	30.	40.	50.
	Kruhovitost [mm]	0,0008	0,0005	0,0012	0,0009	0,0011	0,0012
2. břit	Poradové číslo kusu	1.	10.	20.	30.	40.	50.
	Kruhovitost [mm]	0,0012	0,0009	0,0014	0,0006	0,0011	0,0005
3. břit	Poradové číslo kusu	1.	10.	20.	30.	40.	50.
	Kruhovitost [mm]	0,0015	0,0006	0,0007	0,0013	0,0008	0,0010



Obr. 47 Grafická interpretace naměřených hodnot kruhovitosti v průběhu životnosti bříty.

V průběhu výroby byla dosažena maximální naměřená hodnota kruhovitosti 0,0015 mm. Statistická interpretace výsledků měření kruhovitosti je uvedena v tab. 24. V porovnání s limitní hodnotou dle výkresové dokumentace, o velikosti 0,003 mm, bylo využito 50% velikosti tolerančního pole.

Tab. 24. Statistická interpretace výsledků měření kruhovitosti.

Limitní hodnota	0,003 mm
Minimální naměřená hodnota	0,0005 mm
Maximální naměřená hodnota	0,0015 mm
Využití tolerančního pole	50,0 %
Aritmetický průměr naměřených hodnot	0,00095 mm
Směrodatná odchylka	0,00030 mm
Variační koeficient	31,7 %

6 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO PROCESU

Pro stanovení nákladové úspory, při záměně operace broušení za operaci přesného soustružení, je potřebné znát minutové sazby jednotlivých strojů. Avšak společnost, ve které výroba probíhá má na dokončovacích strojích Studer S33 a Hardinge Super-Precision T-51 stanovené totožné minutové sazby. Z důvodu ochrany ekonomických ukazatelů firmy bude nákladová úspora vyjádřena procentuální časovou úsporou, která je při jednotných minutových sazbách na obou strojích totožná s procentuální nákladovou úsporou. Jelikož ani u jedné z variant nebyl použit speciální nástroj, nevznikly tak vícenáklady způsobené změnou technologie z důvodu obsazení standardních nástrojů v rámci režijních nákladů, jakožto nákladové položky obsažené v minutové sazbě stroje.

Na základě analýzy poslední výroby, u které dokončovací operace obrábění vnitřní kontury byla realizována pouze technologií broušení, byl stanoven čas na seřízení stroje, který je uveden v tab. 25. Výrobní čas je uveden v tab. 26. a čas na schválení prvního kusu v tab. 27. Výsledná norma času pro technologií broušení je uvedena v tab. 28. Norma času pro nahrazující proces, a to obrábění technologií přesného soustružení, je uvedena v tab. 29. Její jednotlivé dílčí analýzy jsou uvedeny v kapitole 4.6.

Tab. 25 Časy dílčích úkonů, pro stanovení času seřízení stroje – broušení.

Dávkový čas seřízení stroje (broušení)	Výměna nástrojů [min/dávka]	35,00
	Realizace upnutí obrobku [min/dávka]	30,00
	Oživení programu [min/dávka]	5,00
	Celkem [min/dávka]	70,00

Tab. 26 Časy dílčích úkonů, pro stanovení výrobního času – broušení.

Výrobní čas (broušení)	Upnutí obrobku [min/ks]	0,75
	Strojní čas [min/ks]	6,50
	Průběžné měření [min/ks]	0,75
	Celkem [min/ks]	8,00
	Celkem [min/dávka]	3 224,00

Tab. 27 Časy dílčích úkonů, pro stanovení času schválení prvního kusu – broušení.

Dávkový čas schválení prvního kusu (broušení)	Výrobní čas (uvolnění) [min/dávka]	16,00
	Měření [min/dávka]	30,00
	Celkem [min/dávka]	46,00

Tab. 28 Norma času – broušení.

Norma času (broušení)	Seřízení stroje [min/dávka]	70,00
	Výrobní čas [min/dávka]	3 224,00
	Schválení prvního kusu [min/dávka]	46,00
	Celkem [min/dávka]	3 340,00
	Celkem [min/ks]	cca 8,27

Tab. 29 Norma času – přesné soustružení.

Norma času (přesné soustružení)	Seřízení stroje [min/dávka]	55,00
	Výrobní čas [min/dávka]	1 209,00
	Schválení prvního kusu [min/dávka]	36,00
	Celkem [min/dávka]	1 300,00
	Celkem [min/ks]	cca 3,22

Na základě porovnání norem času došlo u nahrazujícího procesu – procesu přesného soustružení, k její redukci o cca 61 %, v porovnání s procesem broušení. Nahrazením došlo také ke snížení nákladů o cca 61 %. Toto porovnání je uvedeno v tab. 30.

Tab. 30 Porovnání norem času technologie broušení a přesného soustružení.

Technologie	Broušení	Přesné soustružení
Norma času [min/dávka]	3 340,00	1 300,00
Norma času [min/ks]	cca 8,27	cca 3,22
Časová úspora [%]	-	61,06
Nákladová úspora [%]	-	61,06

ZÁVĚR

Cílem této závěrečné práce bylo prověření možnosti nahrazení technologie broušení za technologií přesného soustružení. Po rozboru stávajícího procesu výroby dílu do hydraulické sestavy byla stručně navržena možnost realizace dokončovacího procesu obrábění vnitřní kontury na přesném CNC soustruhu Hardinge Super-Precision T-51. Realizaci tohoto procesu musela předcházet komunikace a schválení tohoto procesu zákazníkem, a to z důvodu odlišnosti profilu soustruženého a broušeného povrchu.

Návrh procesu přesného soustružení byl omezen technologickými možnostmi společnosti, ve které je tato výroba realizována. Naopak však bylo těženo z její mnohaletých zkušeností v oblasti obrábění těžkoobrobitelných materiálů a precizního obrábění. Návrhová část práce se zabývá volbou stroje a nástrojů, návrhem režných a procesních podmínek, obráběcího cyklu a normy času. Kritickou částí bylo stanovení velikosti upínací síly, a to z důvodu vysokých požadavků na kruhovitost obráběných ploch a obavy z deformace obrobku. Upínací síla byla stanovena na základě silového rozboru upínání ve sklíčidle a její velikost činí 1 289,08 N. Tato hodnota odpovídá upínacímu momentu cca 12,89 Nm, a to pro upínání ve sklíčidle Forkardt F200. Stanovená hodnota upínacího momentu pro výrobu byla 13 Nm.

V navazující kapitole byla zkoumána stabilita navrženého procesu. Z pohledu kvality obrobeného povrchu byl hodnocen parametr Rz, který dle výkresové dokumentace mohl dosáhnout maximální hodnoty 4,0 μm . Avšak pro výrobu byl tento parametr zpřísněn na maximální hodnotu 3,6 μm . Z pohledu hodnocení rozměrové stability procesu, bylo při výrobě dosaženo využití tolerančního pole o velikosti 73,6 %, co odpovídá velikosti 5,9 μm . Požadovaná kruhovitost o maximální velikosti 0,003 mm byla při obrábění dodržena a její maximální hodnota naměřená v průběhu výroby dosáhla 0,0015 mm.

Ekonomické vyhodnocení nahrazujícího procesu bylo stanoveno v procentuální úspoře, z důvodu ochrany ekonomických dat výrobní společnosti. Minutové sazby má společnost pro dokončovací stroje Studer S33 a Hardinge Super-Precision T-51 totožné. Při změně technologie nevznikli žádné vícenáklady, a i používané nástroje z materiálu CBM, na stroji Hardinge Super-Precision T-51, jsou obsaženy v jeho minutové sazbě. Časová i nákladová úspora změnou technologie broušení za proces přesného soustružení dosahuje výše 61,06 %.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Zlevněte cenu svých produktů zakázkovou výrobou v Číně. In: *4B2B* [online]. Ostrava: 4BIZ B2B [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.4b2b.biz/zlevnete-cenu-svych-produktu-zakazkovou-vyrobou-v-cine.html>
 2. *Hydraulic Simulation Tables For High Performance And Reliability* [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.moog.com/products/simulationtables/hydraulic-simulation-table/>
 3. MIČKAL, Karel. *Strojnictví: části strojů: pro učební a studijní obory SOU a SOŠ*. Praha: Sobotáles, 1995. ISBN 80-859-2001-8.
 4. *2wege-einbauventile wege und druckfunktion* [online]. 2013, 56 s. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: https://www.moog.de/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-CartridgeValves-2way_Stard-Catalog-de.pdf
 5. *ČSN 14 220 / 1.7131 / 16MnCr5* [online]. In: . [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-14-220-17131-16mncr5/>
 6. Quick Turn Nexus 250-II MY. In: *Mazak* [online]. Worcester [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/cs/quick-turn-nexus-250-ii-my/>
 7. *Grinding, Gauging Technology on Display* [online]. 01.05.2013 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://mfgnewsweb.com/archives/4/38237/EASTECC-Product-Preview-may13/Grinding-Gauging-Technology-on-Display.aspx>
 8. Katalog a technický průvodce 2023.1. *Seco Tools* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/84585>
 9. HUMÁR, Anton. *Výrobní technologie II: Sylaby předmětu* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/VyrobníTechnologie_II.pdf
 10. PIROŠ, Viktor. Studium řezných sil při soustružení a jejich měření [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131972>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.
 11. *Soustružnický muž* [online]. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soustru%C5%BEnick%C3%BD_n%C5%AF%C5%BE
 12. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie výroby II: Řešené příklady* [online]. Brno, 2002 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TechnVyroby_II.pdf4
 13. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 14. BUKOVSKÝ, Petr. *OBRÁBĚNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ Z KALENÝCH OCELÍ SE ZAMĚŘENÍM NA STAV POVRCHU* [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/39654/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Josef Chladil.
 15. BITTNER, JAN. *Metody povlakování řezných nástrojů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29100.
Bakalářská Práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce ANTON HUMÁR.
 16. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. Brno, 2003 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
-

-
17. DE VOS, Patrick a Jan-Eric STÅHL. *Obrábění kovů: teorie v praxi*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2014.
 18. FIALA, Zdeněk. *ANALÝZA MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PRO NOVÉOBRÁBĚNÉ MATERIÁLY A CNC TECHNOLOGIE* [online]. Brno, 2014 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=72730.
Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.
 19. KAMENICKÁ, Pavlína. *Způsoby upínání nástrojů a obrobků* [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=64657.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
 20. *Hydraulické sklíčidlo 3B-8A6 vč. tvrdých čelistí* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.norted.cz/hydraulicke-sklicidlo-3b-8a6-vc--tvrdych-celisti/>
 21. *Kleština* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kle%C5%A1tina>
 22. Kleštinový upínač 5C Bison 3960-125. *BOUKAL* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/klestinovy-upinac-5c-bison-3960-125/10854/produkt>
 23. *UNÁŠENÍ - OBRÁBĚNÍ NA JEDNO UPNUTÍ* [online]. 08.06.2017 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <http://albabprecision.cz/cz/portal/novinky/neidlein-unaseni-obrabeni-na-jedno-upnuti-1847.htm>
 24. ASM handbook. Volume 4, Heat treating. Materials Park: ASM International, 1991. ISBN 0-87170-379-3.
 25. PIŠEK, DAVID. *CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ* [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102172.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce KAREL NĚMEC.
 26. Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT [online]. 2014 [cit. 2023-18-4]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/04%20-%20Druhy%20a%20zpusoby%20TZ.ppt
 27. ZÁBAVNÍK, Viktor. *Chemicko - tepelné spracovanie kovov*. Košice: Technická univerzita, 141 s.
 28. *Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality obrobekých součástí* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning>
 29. *Jak postupovat při soustružení různých typů materiálů* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-do-turning-in-different-materials>
 30. *T Series SUPER-PRECISION: The undisputed market leader in SUPER-PRECISION for the most demanding jobs* [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.hardinge.com/product/turning/t-series/?1685104525118>
 31. EDGETECH E10M SDUCR 07 Screw Lock Carbide Boring Bar. *LLOYD & Jones* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://shop.lloyd-jones.com/shop/edgetech-e10m-sducr-07-screw-lock-carbide-boring-bar/>
-

32. *E-CATALOG: Internal Turning* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://catalog.tungaloy.com/Applications.aspx?mapp=BO&Lang=&GFSTYP=>
 33. *Výpočet upínací síly pro soustružení* [online]. In: . [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/15275612/>
 34. *BUCK Product Catalogue* [online]. Longford [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://hyfore.com/app/uploads///2019/05/BUCK-Product-Catalogue-HYFORE.pdf>
 35. *Forkardt - Product catalog: F+ Manual Chucks* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: https://www.forkardt.com/wp-content/uploads/F_Product_Catalog.pdf
 36. BUMBÁLEK, Bohumil. *VYSOCE PŘESNÉ METODY OBRÁBĚNÍ A JEJICH FYZIKÁLNÍ PODSTATA* [online]. Brno, 2004 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/fyz_pods_rez/Opory04.pdf
 37. Ostatní měřidla. *SOHAG* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <http://sohag.cz/cs/kvalita/ostatni-meridla/>
 38. *Maximum Precision for Small Parts: ZEISS MICURA* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/micura.html#recommendations>
 39. *MARFORM: FORM MEASURING INSTRUMENTS* [online]. Göttingen [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/smetrologia/prospekty/formtester3.pdf>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A_D	nedeformovaný průřez třísky	[mm ²]
C_{Fc}	materiálová konstanta	[MPa]
C_{Ff}	materiálová konstanta	[MPa]
C_{Fp}	materiálová konstanta	[MPa]
F_c	řezná složka síly	[N]
F_f	posuvová složka síly	[N]
F_p	pasivní složka síly	[N]
F_t	třecí síla	[N]
F_u	upínací síla	[N]
F_v	výsledná zatěžující síla	[N]
M_k	kroučící moment	[Nm]
R_a	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R_c	průměrná výška prvků profilu	[μm]
R_p	největší výška výstupku profilu	[μm]
R_q	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R_z	největší výška profilu	[μm]
T	velikost tolerančního pole	[mm]
a_p	šířka záběru ostří	[mm]
b_D	šířka třísky	[mm]
f	posuv	[mm.ot ⁻¹]
h_D	tloušťka třísky	[mm]
k_c	měrná řezná síla	[MPa]
r	poloměr zaoblení špičky VBD	[mm]
x_{Fc}	exponent vlivu šířky záběru ostří	[-]
x_{Ff}	exponent vlivu šířky záběru ostří	[-]
x_{Fp}	exponent vlivu šířky záběru ostří	[-]
y_{Fc}	exponent vlivu posuvu	[-]
y_{Ff}	exponent vlivu posuvu	[-]
y_{Fp}	exponent vlivu posuvu	[-]
ϕ	úhel sklonu střižné roviny	[°]
ϕ_1	úhel skluzu	[°]
α_f	nástrojový boční úhel hřbetu	[°]
α_n	nástrojový normální úhel hřbetu	[°]
α_o	nástrojový ortogonální úhel hřbetu	[°]
α_p	nástrojový zadní úhel hřbetu	[°]
β_f	nástrojový boční úhel břitu	[°]
β_n	nástrojový normální úhel břitu	[°]
β_o	nástrojový ortogonální úhel břitu	[°]
β_p	nástrojový zadní úhel břitu	[°]
γ_f	nástrojový boční úhel čela	[°]
γ_n	nástrojový normální úhel čela	[°]
γ_o	nástrojový ortogonální úhel čela	[°]
γ_p	nástrojový zadní úhel čela	[°]

Označení	Legenda	Jednotka
γ_p	nástrojový zadní úhel čela	[°]
ε_r	nástrojový úhel špičky	[°]
κ_r	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří	[°]
κ_r'	nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří	[°]
λ_s	nástrojový úhel sklonu hlavního ostří	[°]

Zkratky

Označení	Legenda
CBN	Cubic Bore Nitride
CNC	Computer Numeric Control
CVD	Chemical Vapor Deposition
HV	Tvrdost dle Vickerse
PVD	Physical Vapour Deposition
VBD	vyměnitelná břitová destička

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Nástrojová geometrie soustružnického nože [12]

