



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY ROTAČNÍ
SOUČÁSTI**

DRAFT OF ROTARY PART PRODUCTION TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kryštof Lánc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Kryštof Lánc**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Návrh technologie výroby rotační součásti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rotační součásti vyráběné na soustružnických centrech zpravidla obsahují i vrtané otvory a frézované plochy. Pro takto komplexní obrobky je nutno zvolit vhodné obráběcí stroje, aby výroba byla co nejefektivnější (nejlevnější). Řešení tohoto tématu diplomové práce bude dále zahrnovat i aplikace moderních řezných nástrojů, studii technologičnosti konstrukce a technicko ekonomické hodnocení vybraných variant řešení. Vytvořený NC program bude kontrolován grafickou simulací.

Cíle diplomové práce:

- Návrh rotační součásti určené k zušlechťování a zpracování základní technické dokumentace.
- Rozbor technologičnosti konstrukce navržené součásti.
- Volba soustružnického centra pro výrobu navržené součásti.
- Volba nástrojového vybavení pro navrženou součást.
- Vytvoření programu pro CNC stroj s řídicím systémem Sinumerik.

Seznam doporučené literatury:

GUPTA, Kapil, ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56-98-4.

GRZESIK, Wit. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-444-63711-6.

DAVIM, J. Paulo, ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978-- - 84882-873-5.

TSCHÄTSCH, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

DAVIM, J. Paulo, ed. Machining: fundamentals and recent advances. London: Springer, c2008, xiii, 361 s. ISBN 978-1-84800-212-8.

SREE HARSHA, K. Principles of physical vapor deposition of thin films. Amsterdam: Elsevier, 2006, 1160 s. ISBN 00-804-4699-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

LÁNC Kryštof: Návrh technologie výroby rotační součásti

Práce je primárně zaměřena na kompletní návrh technologie výroby rotačního dílce při sériové výrobě. Zpracování spočívá v návrhu technologie výroby součásti, výběru vhodného strojního zařízení, řezných nástrojů a vytvoření NC programu. Součástí práce je mimo jiné popis konfigurace obráběcích strojů v softwaru Sinumerik. Dokument zahrnuje také základní pravidla při vytváření NC programu pro dvou kanálový soustruh.

Klíčová slova: soustružení, CNC, Sinumerik 840D, řezné nástroje, produkční výroba.

ABSTRACT

LÁNC Kryštof: Draft of rotary part production technology

The thesis is focused on concept of manufacturing technology for rotary part in case of mass production. The main aim was established suitable manufacturing technology for rotary part, choosing lathe machine, cutting tools and creating of NC program. The part of diploma thesis contains configuration of lathe machine in software Sinumerik. Document includes also the basic rules for developing NC program for two channels lathe.

Key words: turning, CNC, Sinumerik 840D, cutting tools, mass production.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LÁNC, Kryštof. *Návrh technologie výroby rotační součástí*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123673>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh technologie výroby rotační součástí** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 06. 2020

Bc. Kryštof Lánc

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto mému vedoucímu Ing. Alešovi Polzerovi, Ph.D. za spolupráci, vedení, připomínky a rady během vypracování diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat firmě Festool s.r.o za spolupráci. Velké díky také patří mé rodině a partnerce za podporu, kterou mi poskytli během celého studia.

OBSAH**ZADÁNÍ****ABSTRAKT****BIBLIOGRAFICKÁ CITACE****ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ****PODĚKOVÁNÍ**

ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ	11
1.1 Materiálový rozbor	12
1.1.1 Metalografický výbrus a zkoušky tvrdosti	12
1.1.2 Mikrostrukturní analýza	14
1.2 Geometrie součásti	15
2 STROJNÍ ZAŘÍZENÍ	17
2.1 Analýza současného trhu a výběr vhodných variant	22
2.2 Zhodnocení vytipovaných strojů	26
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY	28
3.1 Volba řezných nástrojů	31
3.2 Způsob upínání a nástrojové držáky	37
4 KONFIGURACE OBRÁBĚCÍHO STROJE	39
4.1 Nastavení Y osy prvního kanálu	39
4.2 Konfigurace poháněného nástroje druhého kanálu	43
4.3 Nastavení proti-vřetena	45
4.4 Definice limitních parametrů strojního zařízení	46
5 ČASOVÁ STUDIE OBRÁBĚNÍ	49
5.1 Výpočtová studie	49
5.1.1 Strojní čas soustružení	49
5.1.2 Strojní čas frézování	51
5.1.3 Strojní čas vrtání a závitování	52
5.2 Dodatečné výpočty	53
5.3 Tvorba NC programu	55
5.4 Simulační studie	57
6 DODATEČNÉ NÁVRHY	58
6.1 Sesterský nástroj	58

6.2	Optimalizace řezného času	58
6.3	Využití nových materiálových generací.....	60
7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	64
8	ZÁVĚRY.....	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ		
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK		
SEZNAM PŘÍLOH		

ÚVOD

V dnešním světě, kdy je již trh značně přesycen výrobky ze všech oblastí průmyslu, je poměrně obtížné konkurovat ostatním výrobcům, jelikož se mnohdy prosadí lépe finanční dostupnost výrobku, než jeho kvalita. Ve firemní praxi se proto aplikují různé přístupy pro snížení nákladů a zachování kvality. Jsou to principy štlhlé výroby, určování priority zakázek, systém interní logistiky a mnoho dalších. Technolog se musí vypořádat s otázkou ohledně způsobu výroby, kde je kladen důraz na maximální efektivitu z pohledu výrobnosti v souvislosti s náklady při dodržení standardů.

Vhodnou volbou vstupních parametrů je možné již na počátku redukovat náklady. Vstupními parametry se rozumí design a materiál součásti, ale také kvalitativní požadavky, ať na polotovar nebo hotový výrobek. Všechny zmíněné aspekty se projeví na konečné ceně výrobku. Na technologovi poté leží úkol minimalizovat náklady spojené s výrobou při dodržení požadované kvality. Návrh výrobku by proto měl být provázán spoluprací napříč firemními odděleními za cílem vytvořit design vyhovující po všech stránkách.

Z důvodu nátlaku zákazníka získat výrobek za co možná nejnížší cenu je dnes kladen velký důraz na automatizaci. Tento nátlak je nejvíce viditelný v sériové produkci, kde je z důvodu objemu výroby a monotónní práce snaha minimalizovat lidský faktor a náklady s ním spojené. Přínos vhodně zvolené automatizace nespočívá jenom v omezení chyb od operátora, ale především zvýšení efektivity procesu. Vhodnou volbou výrobního zařízení, nástrojového vybavení, technologického postupu a případné automatizace je možné minimalizovat výrobní náklady na minimum, což je mimo jiné také cílem i předkládané diplomové práce.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Daný projekt je vypracován na základě spolupráce s firmou Festool s.r.o., která se zabývá výrobou profesionálního dílenského, ale také hobby náradí. Hlavním cílem je navrhnout způsob výroby pro 10. a 20. operaci obrábění rotačních součástí podle výkresu 1–3513–001 při roční výrobě 170 000 kusů. Návrh spočívá ve výběru vhodného strojního zařízení, jakožto náhrada za současné řešení, včetně prvků automatizace, dále v návrhu vhodného nástrojového vybavení včetně nástrojových držáků a v poslední řadě vytvoření NC programu. Zadavatelé projektu nespecifikovali žádné konkrétní požadavky na technologii nebo cenové limity, které by bylo nutné dodržet.

Současný stav výroby tohoto dílce je prováděn na dvou různých strojních zařízeních, a to na dlouhotočném automatu DMG Mori Sprint 42/10 a dvou-vřetenovém soustruhu od výrobce Emco ze série Maxxturn. Základní parametry těchto strojů jsou uvedeny v Tab. 1. Dokumentace současného stavu výroby je pro vypracování projektu nedostupná a je známa pouze výkresová dokumentace a zmíněné strojní zařízení. Tyto informace slouží jako odrazový bod pro další úvahy. Nicméně není znám technologický postup ani řezné parametry, proto nelze tvořit technologii případně optimalizovat na současném výrobním procesu. Vzhledem k téměř žádným vstupním informacím a volnému zadání je návrh svobodný a vlastní cíle jsou stanoveny pro co možná nejefektivnější výrobu s automatizací, kterou je snaha docílit omezení zásahů zvenčí (od operátora).

Tab. 1 Technická data soustruhů [8, 9].

Označení	Emco Maxxturn 65	DMG Mori SPRINT S42/10
Počet vřeten	2	2
Počet revolverů/kanálů	1	2
Otáčky hlavního vřetena [min^{-1}]	5 000	6 500
Výkon hlavního vřetena [kW]	29/37	7,5/5,5
Krouticí moment hlavního vřetena [N.m]	250/360	51,2/37,5
Otáčky proti-vřetena [min^{-1}]	5000	6500
Výkon proti-vřetena [kW]	29	5,5/3,7
Krouticí moment proti-vřetena [N.m]	250/280	19,6
Otáčky poháněného nástroj [min^{-1}]	5 000	max. 6 800
Výkon poháněného nástroje [kW]	6,7	3
Krouticí moment poháněného nástroje [N.m]	25	4
Počet pozic v revolveru	12	max. 38
Software	Sinumerik 840D	Fanuc 310i
Základní rozměry		
Max. obráběný průměr [mm]	500	42
Max. délka obrobku [mm]	1000	320

1.1 Materiálový rozbor

Materiál dílce je předepsán na výkrese včetně tepelného zpracování. Jedná se o cementační ocel s označením 16MnCr5 (ekvivalentní značení dle EN–ISO 1.7131), předepsané chemicko-tepelné zpracování je cementace a zušlechťení na 735 ± 50 HV10 [39]. Střední hodnoty chemického složení dle normy ČSN EN 10084 viz Tab. 2.

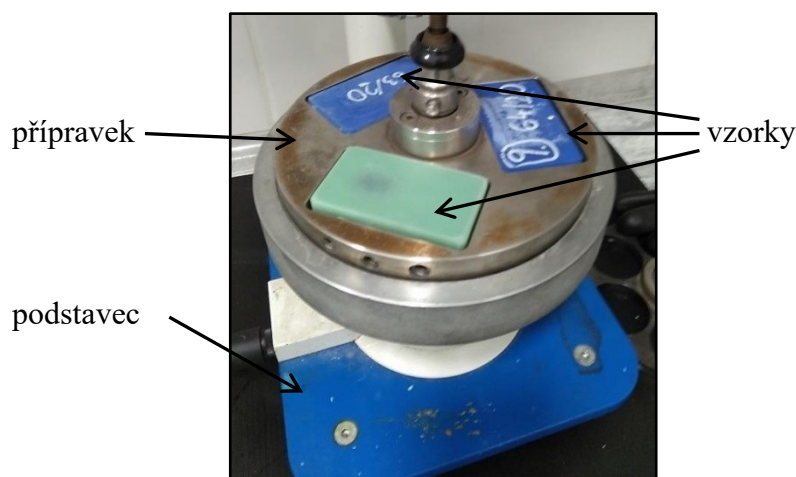
Tab. 2 Chemické složení oceli 16MnCr5 [39].

C [hm %]	Si [hm %]	Mn [hm %]	P [hm %]	S [hm %]	Cr [hm %]
0,14-0,19	max. 0,4	1-1,3	max. 0,035	max. 0,035	0,8-1,1

1.1.1 Metalografický výbrus a zkoušky tvrdosti

Díky získaným vzorkům hotových dílců vznikla možnost provést metalografický rozbor a tím získat informace o struktuře a tvrdosti polotovaru. Vstupní tvrdost polotovaru, respektive pevnost, je jedna z primárních informací nutná pro správnou volbu nástrojů, ale také výpočtů řezných odporů [55]. Hodnota uvedená v materiálových listech udává maximální tvrdost dle Brinela 207 pro žíhané polotovary, nicméně skutečně naměřené hodnoty jsou o několik desítek nižší [39]. Kompletní výsledky z provedené zkoušky jsou uvedeny v Tab. 3.

Vzorky byly připraveny metalografickým výbrusem. Prvotně byl proveden podélný řez na metalografické pile Brillant 265.2, který by měl v nejlepším případě směřovat do přesného středu, a to kvůli tomu aby vzdálenosti nastavené při následné zkoušce tvrdosti odpovídaly skutečnosti [64]. Jinými slovy, aby řez směřoval do osy vzorku. Po rozřezání dílce je vzorek vložen do gumové formičky odolné proti chemické reakci, která vzniká během vytvrzování pryskyřice [64]. Zalité vzorky se vloží do speciálního přípravku (Obr. 1), který je poté upevněn do přidavné brusné hlavy BUEHLER AUTOMET 250, metalografické brusky BUEHLER ECOMET 300 a postupně broušen v obou směrech. V každém směru byl čas nastaven na 3 minuty a otáčky 300 min^{-1} . Postupně byly využity brusné papíry o zrnitosti 120, 240, 400, 800 a 1 200 v tomto pořadí. V poslední fázi byl použit textilní kotouč s diamantovou monokrystalickou suspenzí o velikosti zrn $6 \mu\text{m}$ s označením MetaliFluid a smáčedlem pro diamantovou suspenzi s obchodním názvem MetaDi Dfluid. Tento kotouč již pouze dolešťuje vyrovnaný povrch [64]. Po tomto kroku je vzorek připraven na zkoušku



Obr. 1 Přípravek na metalografické vzorky.

tvrdosti dle Vickerse HV1/10 (zatížení 10 N po dobu 10 s), která se provede na tvrdoměru Zwick Roell ZHμ. Provedení zkoušky odpovídá normě ČSN EN ISO 6507-1 [65]. Jednotlivé indenty byly vtlačeny ve vzdálenosti 0,1 mm, 0,2 mm, poté po 0,2 mm až do 1,2 mm od povrchu a finálně ve 4 mm jakožto vtisk pro zjištění tvrdosti ve středu vzorku tzv. na jádro. Z naměřených hodnot (Tab. 3) je patrné, že průměrná hodnota tvrdosti je 154 ± 2 HV1/10 (orientačně 160 HB) [33]. Z naměřených hodnot lze také vyčíst, že tvrdost materiálu je téměř homogenní po celém průřezu.

Tab. 3 Tvrdosti vzorků (nezušlechtěný stav).

Vzdálenost od čela [mm]	Vzorek č. 1 [HV1/10]	Vzorek č. 2 [HV1/10]	Vzorek č. 3 [HV1/10]	Střední hodnota [HV1/10]
0,1	160	154	155	156
0,2	160	156	153	156
0,4	152	152	155	153
0,6	156	152	151	153
0,8	156	156	149	154
1,0	151	152	152	152
1,2	153	151	151	152
4,0 (jádro)	153	152	150	152

Další zkoušky tvrdosti byly provedeny na vzorcích po chemicko-tepelném zpracování. Tyto výsledky nejsou směrodatné pro vypracování projektu, protože se již týkají operací, jímž není určena tato práce. I přesto byl na takto zpracovaných obrobcích proveden výbrus a zkoušky tvrdosti pro získání přehledu stavu materiálu po tepelném zpracování a usnadnění analýzy celého procesu. Získané výsledky jsou zobrazeny v Tab. 4.

Tab. 4 Tvrdosti vzorků (po chemicko-tepelném zpracování).

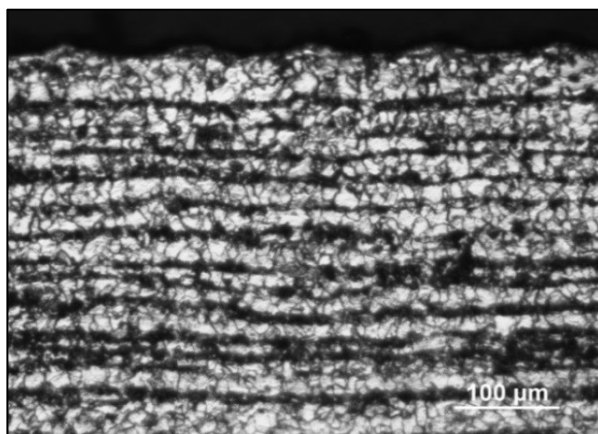
Vzdálenost od čela [mm]	Vzorek č. 1 [HV1/10]	Vzorek č. 2 [HV1/10]	Vzorek č. 3 [HV1/10]	Střední hodnota [HV1/10]
0,1	748	759	729	745
0,2	683	716	654	677
0,4	480	509	434	468
0,6	426	416	390	421
0,8	417	406	371	425
1,0	414	400	378	417
1,2	411	384	374	406
4,0 (jádro)	366	325	406	386
Tvrdost HV550	0,33	0,36	0,29	0,330

Hodnota tvrdost HV550 značí vzdálenost od válcové plochy vzorku, ve které je tvrdost rovna HV550 a lze ji považovat za zacementovanou vrstvu. Výsledek zkoušky poukazuje na jistou skutečnost – výrobky po CHTZ zpracování jsou na hranici tvrdosti, která je předepsána na výkrese (735 ± 50 HV v hloubce $0,2 + 0,15$ mm). Na základě těchto výsledků ovšem nelze vytvořit plnohodnotný závěr, protože zkouška byla vyhotovena pouze na třech vzorcích z jedné šarže. Takto vyrobené kusy již nepokračují dále v procesu a jsou

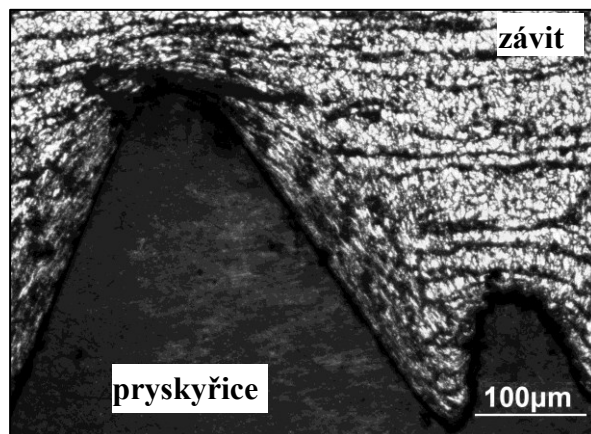
vyloučeny jako neshodné kusy, proto také byly poskytnuty pro materiálový rozbor. Do budoucna je třeba se na chemicko-tepelné zpracování více zaměřit a provést několik experimentů. Případně jednat s dodavateli pro tepelné zpracování o kvalitě dodávaných výrobků.

1.1.2 Mikrostrukturní analýza

Po provedení tvrdostní analýzy bylo možné přejít k strukturnímu rozboru. Nejprve byly vyleštěné vzorky leptány v nitalu (4% roztok kyseliny dusičné), aby došlo k odleptání povrchové vrstvy a zvýraznění struktury [64]. Pro zobrazení, zvětšení a vytvoření snímků byl použit mikroskop NIKON model EPIPHOT 200 s možným až pěti set násobným zvětšením [39]. Výsledná struktura vzhledem k předchozí tvrdostní analýze nepřinesla žádné překvapivé výsledky. Struktura je feriticko-perlitická, usměrněná ve směru válcování polotovaru, tak jak je zobrazeno na vyhotoveném snímku (Obr. 2) [64]. K pořízení snímku byl využit objektiv s dvou set násobným zvětšením. Na vzorcích bylo možné také nahlédnout do struktury okolo závitu a zjistit, jakým způsobem byl závit vyroben. Z pořízeného snímku (Obr. 3) je zřejmá usměrněná struktura ve tvaru závitu, která značí, že závit byl tvářen [17, 57]. Dále je možné si povšimnout tzv. tvarovaného jádra zubu, tento tvar je zcela typický pro tvářený závit a vzniká vždy při tváření závitů [13, 17]. Tvářený závit je požadován jednak pro lepší mechanické vlastnosti, ale také pro čistotu uvnitř otvoru, protože v průběhu výroby nevznikají třísky [17].



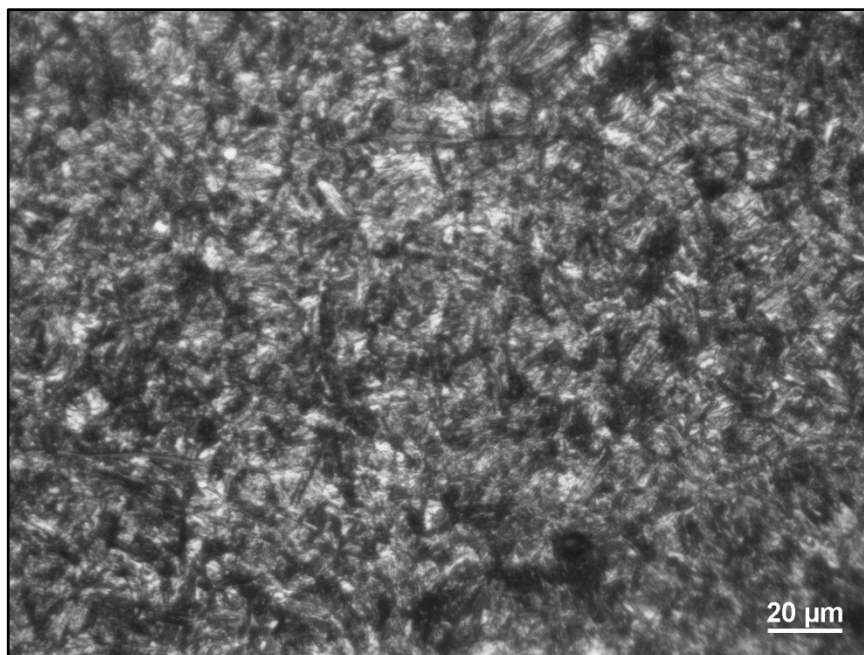
Obr. 2 Struktura vstupního polotovaru (200x).



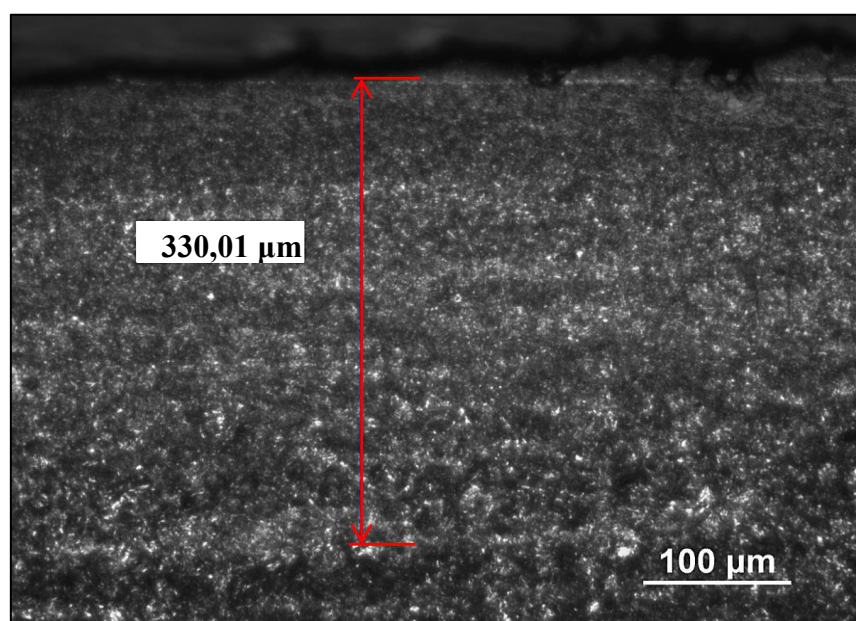
Obr. 3 Struktura v okolí závitu (200x).

Zušlechtené vzorky byly připraveny stejným způsobem jako v předchozím případě. Výsledná struktura je tvořena tak, jak bylo předpokládáno – převážně martenzitem, viz pořízený snímek s dvou set násobným (Obr. 5) a pěti set násobným zvětšením (Obr. 4), který byl pořízen 0,2 mm pod povrchem. Z Obr. 4 lze odhadnout, že struktura je tvořena převážně martenzitem [38, 64]. Množství zbytkového austenitu nelze ze snímku s jistotou určit. Pro přesné určení by bylo nutné využít jiných metod vhodných pro tuto analýzu. Označená délka 330,01 μm ukazuje vzdálenost, do níž byla interpolována hodnota tvrdosti 550 HV. Pro obráběcí proces lze materiál bezpochyby zařadit do skupiny P, tedy oceli. Dle označení výrobce Sandvik Coromant je materiál z pohledu obrobitelnosti zařazen podle tvrdosti a množství legur (méně než 5 % s obsahem uhlíku do 0,25 %) do třídy P2.1Z.AN [55]. Pro zušlechtený materiál byla naměřena povrchová tvrdost 744 ± 14 HV,

která přibližně odpovídá tvrdosti dle Rockwela cca 62 HRC [3]. Materiál s takto vysokou tvrdostí je zařazen do skupiny H a odpovídá třídě obrobitelnosti H1.3.Z.HA [55].



Obr. 4 CHTZ zpracovaná struktura (500x).

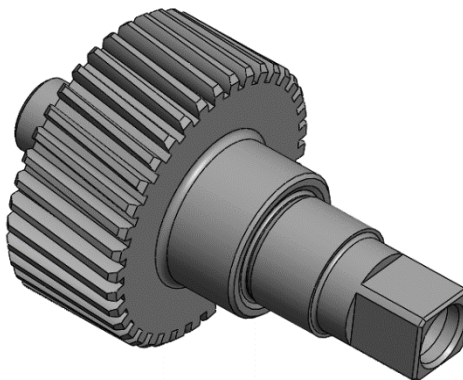


Obr. 5 CHTZ zpracovaná struktura (200x).

1.2 Geometrie součásti

Analyzovaná součást (Obr. 6 nebo Příloha č. 1) by se dala označit jako ozubený hřídel. Dílec disponuje poměrně malými průměry (největší průměr je 39 mm) a celkovou délkou 63 mm. Už samotné rozměry vytváří jisté limity, které bude nutno brát v úvahu především při výběru vhodného stroje.

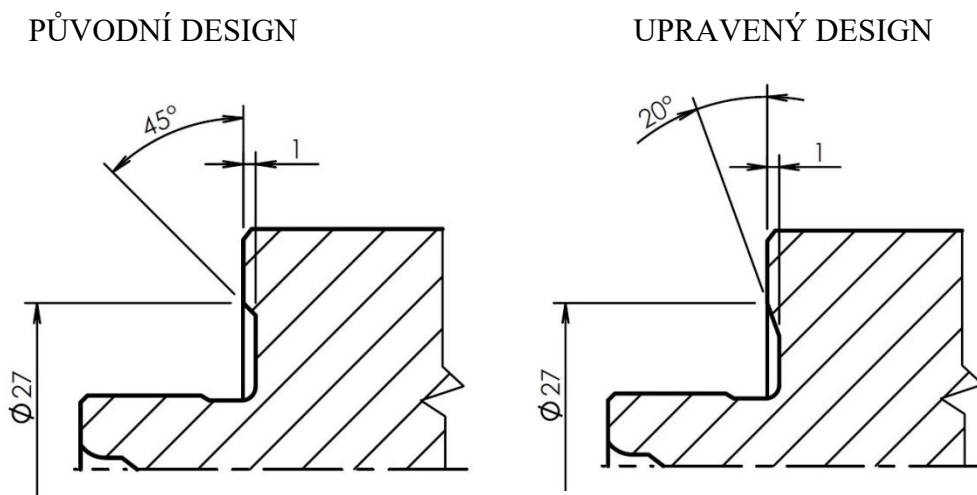
Ve výkrese je naznačen středící důlek typu R a středící otvor se závitem na opačné straně obrobku jako vodítko, že finální přesné plochy budou dokončovány broušením mezi hroty. V oblasti přesných průměrů se vždy nachází různě tvarovaný zápich, pro jehož výrobu bude



Obr. 6 3D model součásti.

vždy nutné volit soustružnický nůž s malým úhlem hlavního ostří nástroje κ_r a také malým úhlem špičky ε (geometrie V nebo D) [55]. Na součásti se nachází šikmé ozubení s modulem 1, které bude výhodné obrábět na jiném stroji určeném na výrobu ozubení, a to kvůli složitému nastavení nástroje v soustružnických centrech a prodloužení obráběcího cyklu na jednom stroji. Plošky a sražení na konci dílce budou vyžadovat poháněný nástroj. Poslední část, která stojí za povšimnutí, je středící otvor se závitem o několika průměrech. Tento prvek vybízí k použití speciálního stupňovitěho vrtáku a sjednocení několika operací v jednu. Samotná součást není nikterak složitá, bude ovšem vyžadovat soustružení na dvě upnutí.

Po diskuzi a vzájemné dohodě se zástupci firmy byla navržena změna tvaru obrobku, konkrétně změna úhlu výstupu čelního vybrání z 45° na 20° . Díky této změně a novým tvarovým koncepcím VBD je možné soustružit čelní plochu včetně válcové části pouze jedním nástrojem. Zakótovaný průměr 27 mm zůstává zachován a zkosení se prodlužuje o příslušnou změnu při zachování zbylých rozměrů, viz Obr. 7, kde je na levé straně zobrazena původní kontura čelního zápichu a na pravé již změněná geometrie.



Obr. 7 Navrhovaná změna geometrie.

2 STROJNÍ ZAŘÍZENÍ

Pro samotný návrh technologického postupu je nutné znát nově navržený koncept strojního zařízení. Nicméně při vytváření nového konceptu je nutné předem promyslet technologický postup a shrnout vlastnosti, které jsou požadovány vzhledem k povaze dílu. Při výrobě je snaha docílit co nejvyšší efektivity výroby a co nejnižších strojních časů a finálně využít stroj v následné kooperaci nebo snížit počet strojů primárně určených pro tento dílec. Kromě zmíněných bodů je samotný výběr mnohem komplexnější a na trhu se vyskytuje velké množství různých konfigurací, výrobců, softwarů, vnitřního vybavení atd. Výčet parametrů, které jsou považovány za stěžejní při volbě strojního zařízení, jsou vypsány níže.

- **Dvou-revolverový soustruh**

Využitím dvou revolverů je možné optimalizovat obráběcí proces, sdružit některé operace a tím snížit hlavní strojní čas. Primárně se jedná o operace frézování rovinných ploch, hrubování válcové plochy a vrtání. V průběhu dokončení kontury na hlavním vřetenu může být druhý revolver využit na proti-vřetenu pro kompletní obrobení druhé strany obrobku.

- **Dvou-vřetenový soustruh**

Pro získání hotového výrobku bez nutnosti asistence obsluhy pro přepnutí obrobku je volen dvou-vřetenový soustruh. Preferovaná poloha vřeten je vzhledem k velikosti a váze hotového výrobku volena horizontální.

- **Automatizace**

Pro stohování a vkládání polotovaru do sklíčidla je navržen podavač tyčí. Pro splnění tohoto požadavku je nutné, aby soustruh měl vrtání vřetene o průměru min. 40 mm, dále také rozhraní pro připojení podavače tyčí. Z doplňkových prvků byl ještě zvolen podavač hotových výrobků a také stohovací zásobník pro hotové výrobky. V případě podavače tyčí je považováno za výhodu možnost vytažení tyče bez použití proti-vřetena a také to, aby vložení nové tyče mohlo probíhat souběžně s obráběním a nemusel se tak zastavovat výrobní proces.

- **Parametrové požadavky**

Vzhledem k malým rozměrům dílce je kladen důraz na „vysoké“ otáčky obou vřeten. Tento parametr je nezbytný pro využití potenciálu řezných nástrojů, které jsou v praxi schopny dosáhnout vysokých řezných rychlostí. Přesto je požadavek také na minimální potřebný výkon na obou vřetenech, primárně však na vřetenu hlavním, kde budou prováděny všechny sdružené operace. Minimální hranice je stanovena podle výpočtu jedné ze sdružených operací a to vrtání a hrubování. Výpočet je proveden podle příručky obrábění od firmy Sandvik Coromant, ve které jsou stanoveny hodnoty jednotkové řezné síly a materiálové konstanty podle materiálového složení a tvrdosti (Tab. 6), následně je kompletní výpočet proveden na základě vzorců a údajů taktéž z této příručky [55]. Pro prvotní odhad potřebného výkonu jsou využity vzorové nástroje se strojními parametry doporučenými od daných výrobců, viz Tab. 5.

Tab. 5 Vzorové řezné podmínky [61, 62].

	VBD	Vrták
Výrobce	ISCAR	WALTER
Označení	CNMG 120408-M3P IC8150	DC170-03-07.400A- WJ30EJ
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	327	139
Otáčky n [min ⁻¹]	3717	5980
Šířka záběru hlavního ostří a_p [mm]	3	3,7
Posuv na otáčku f [mm]	0,3	0,264
Úhel nastavení hlavního ostří κ_r [°]	93	70
Ortogonální úhel čela γ_o [°]	-6	0

Tab. 6 Materiálové konstanty [55].

MC kód oceli	P2.1.Z.AN
Jednotková řezná síla K_{cl} [MPa]	1700
Opravný součinitel pro danou tloušťku třísky	0,25

Prvně jsou určeny parametry pro soustružnickou operaci konkrétně druhý hrubovací řez, a to proto, aby na vřetení již byly otáčky alespoň částečně vhodné pro vybraný vrták. Pro stanovení řezné rychlosti vrtáku je nutné stanovit otáčky vřetena při hrubování, přesněji druhého hrubovacího řezu dle vztahu 1 [56].

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

kde: n [min⁻¹] otáčky vřetene,
 D [mm] obráběný průměr,
 v_c [m.min⁻¹] řezná rychlost.

$$n = \frac{327 \cdot 1000}{\pi \cdot 28} \approx 3717 \text{ min}^{-1}$$

Prvním potřebným parametrem pro výpočet potřebného výkonu je tloušťka třísky (vztah 2) [55].

$$h_m = f \cdot \sin(\kappa_r) \text{ [mm]} \quad 2$$

kde: h_m [mm] tloušťka třísky,
 f [mm] posuv na otáčku,
 κ_r [°] úhel hlavního ostří nástroje.

$$h_m = 0,3 \cdot \sin(95^\circ) \approx 0,3 \text{ mm}$$

Po zjištění průřezu třísky je možné přistoupit k výpočtu specifické řezné síly (vztah 3) která v porovnání s jednotkovou řeznou silou již částečně zohledňuje geometrii nástroje a tloušťku třísky [55]. Jednotková řezná síla je v tomto případě definována pro tloušťku třísky 1 mm [55].

$$k_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) \text{ [MPa]} \quad 3$$

kde:	k_c [MPa]	specifická řezná síla,
	k_{c1} [MPa]	jednotková řezná síla pro $h_m = 1$ mm,
	h_m [mm]	tloušťka třísky,
	m_c [-]	opravný součinitel pro $h_m = 1$ mm,
	γ_o [°]	ortogonální úhel čela.

$$k_c = 1\,700 \cdot 0,3^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{-6}{100}\right) \approx 2\,435 \text{ MPa}$$

Po získání všech potřebných parametrů je možné přikročit k samotnému výpočtu užitečného výkonu dle vztahu 4 [55].

$$P_c = \frac{v_c \cdot a_p \cdot f \cdot k_c}{60\,000} \text{ [kW]} \quad 4$$

kde:	P_c [kW]	užitečný výkon,
	v_c [m.min ⁻¹]	řezná rychlost,
	a_p [mm]	šířka záběru hlavního ostří nástroje,
	f [mm]	posuv na otáčku,
	k_c [MPa]	specifická řezná síla.

$$P_c = \frac{327 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 2\,435}{60\,000} \approx 11,94 \text{ kW}$$

Protože vrtání probíhá ve stejný čas jako hrubování, je nutné dopočítat řeznou rychlost (vztah 5) během vrtání, která následně vstupuje do výpočtu užitečného výkonu [56].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_v \cdot n}{1\,000} \text{ [m.min}^{-1}] \quad 5$$

kde:	v_c [m.min ⁻¹]	řezná rychlost,
	D_v [mm]	průměr vrtáku,
	n [min ⁻¹]	otáčky nástroje.

$$v_c = \frac{\pi \cdot 7,45 \cdot 3\,717}{1\,000} \approx 87 \text{ m.min}^{-1}$$

Výpočet specifické řezné síly pro vrtání (vztah. 6) je obdobný jako pro soustružení [55].

$$k_c = k_{c1} \cdot \left(\frac{f}{2} \cdot \sin(\kappa_r) \right)^{-m_c} \text{ [MPa]} \quad 6$$

kde:	k_c [MPa]	specifická řezná síla,
	k_{c1} [MPa]	jednotková řezná síla pro $h_m=1$ mm,
	f [mm]	posuv nástroje na otáčku,
	m_c [-]	opravný součinitel pro $h_m=1$ mm,
	γ_O [°]	ortogonální úhel čela,
	κ_r [°]	úhel hlavního ostří nástroje.

$$k_c = 1700 \cdot \left(\frac{0,264}{2} \cdot \sin(70^\circ) \right)^{-0,25} \approx 2\,864 \text{ MPa}$$

Finální výpočet potřebného výkonu pro vrtání je dán vztahem 7, který je ve své podstatě stejný jako pro soustružení a liší se pouze v konstantách [55].

$$P_c = \frac{f \cdot v_c \cdot D_c \cdot k_c}{240\,000} \text{ [kW]} \quad 7$$

kde:	P_c [kW]	užitečný výkon,
	v_c [m.min ⁻¹]	řezná rychlost,
	D_c [mm]	průměr vrtáku,
	f [mm]	posuv nástroje na otáčku,
	k_c [MPa]	specifická řezná síla.

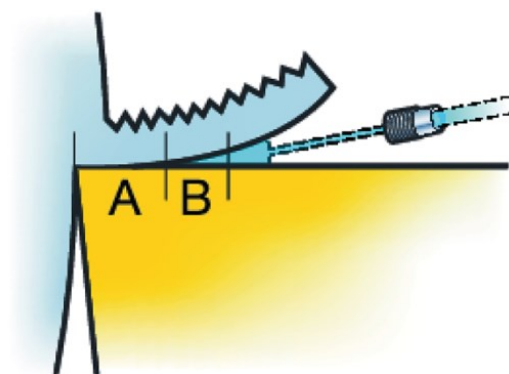
$$P_c = \frac{0,264 \cdot 87 \cdot 7,4 \cdot 2\,864}{240\,000} \approx 2,03 \text{ kW}$$

Z vypočtených hodnot je znám minimální potřebný výkon při výběru stroje. Hranice výkonu je stanovena na 11 kW, i přestože součet vypočtených výkonů nabývá hodnoty 13,97 kW. Hodnota minimálního výkonu je zvolena z důvodu možnosti krátkodobého přetížení stroje vůči nominální hodnotě. Jako druhá možnost se jeví úprava řezných podmínek a tím snížení potřebného výkonu.

• Vysokotlaké čerpadlo

Minimální požadovaný tlak externího čerpadla je stanoven na 15 barů. Díky využití vysokotlaku je docíleno lepšího lámání a odstranění třísek z místa řezu [4, 35, 55]. Během obrábění je kapalina přiváděna pod částečně vzniklou třísku do místa pod vyznačeným úsekem B na Obr. 8, kde vznikne tzv. hydraulický klín, který nadzvedá a následně láme třísku [55]. Lepší funkčnost obráběcího procesu lze pozorovat již od použití tlaku o hodnotě 10 bar [55]. Z širšího pohledu využitím vysokotlakého čerpadla dochází ke zlepšení obráběcího procesu, prodloužení životnosti nástrojů, lepší kontrole tvaru třísky, zamezení namotávání třísek na nástroj, odvodu tepla z místa řezu a omezení přerušování chodu stroje [55, 56]. Díky kontrole třísek je aplikace automatizace snadnější a finálně také

spolehlivější [35]. Jako největší problém se jeví vyšší spotřeba elektrické energie a velikost zastavěného plochy okolo strojního zařízení [35]. Vzniklé benefity ovšem převyšují tyto nevýhody [35].



Obr. 8 Vysokotlaký klín [49].

- **Rozměry stroje**

V porovnání se stávajícím je stroj menších rozměrů považován za výhodu. Tento parametr byl zvolen jednak k úspoře místa, ale také z důvodu konstrukce strojů v dané výrobní třídě, viz předchozí parametry (otáčky a výkon), neboť zařízení velkých rozměrů jsou vyráběny s vyššími výkony a nižšími otáčkami. Přesto je zde požadavek na průměr upnutí tyče, který musí být alespoň 40 mm.

- **Poháněný nástroj a Y osa**

Vzhledem ke geometrii obrobku je poháněná osa (současně s Y posuvem) revolveru naprosto klíčový parametr pro výrobu tohoto dílce. Bez možnosti frézovat rovinné plochy by bylo nutné přidat další operaci (navíc upnutí na jiném stroji) i přestože se jedná o jednoduchý tvar jako je čtyřstěn nebo sražení hran na rovinné ploše.

- **Software**

Pro zadavatele projektu není žádný z komerčně nabízených řídicích systému překážkou, přesto je volba SW z řady Sinumerik považována za výhodu. Především pro jeho jednoduchost, přehlednost a dlouholeté zkušenosti na jiných strojích ve firmě. V případě volby stroje s tímto SW by to také znamenalo prostor pro vytvoření NC programu právě v tomto řídicím systému s možností využití cyklů a simulace.

- **Dopravník třísek**

Dopravník třísek plní významnou úlohu při samotném obrábění. Špatně zvolený typ dopravníku může vést k zasekávání třísek při odvodu ze stroje a snížit tak plynulost chodu obráběcího stroje [35]. Mezi běžně nabízené dopravníky patří: článkové, hrablové, magnetické nebo lamelové [7]. Vhodný výběr dopravníku je podmíněn tvarem a velikostí vytvářené třísky [1]. Při obrábění nízkouhlíkových, nízkolegovaných ocelí je předpoklad tvoření plynulých krátkých až středně dlouhých třísek (Obr. 9 a Obr. 10) [13]. V případě použití vysokotlakého čerpadla je předpoklad spíše pro krátké šroubové nebo spirálové

lámavé třísky, proto článkový nebo lamelový dopravník lze považovat za vhodnou variantu [34, 56].



Obr. 9 Spirálové třísky [1].



Obr. 10 Šroubové třísky [1].

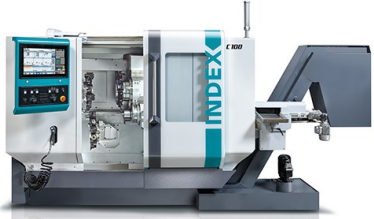
2.1 Analýza současného trhu a výběr vhodných variant

Podle uvedených parametrů v kap. 2. byla provedena analýza současného trhu s obráběcími stroji. Celkem bylo prozkoumáno 72 strojních zařízení od 24 různých výrobců. Jako představitelé klasických a produkčních soustružnických center lze uvést: DMG Mori, Okuma, Mazak, Doosan, Index Traub, Emco, Kovosvit MAS a mnoho dalších. Do rozhodování byly zapojeny také dlouhotočné automaty od několika firem (DMG Mori, Nakamaru Tome, Star nebo Tsugami). Tyto typy strojů byly z výběru vyřazeny, prvotně z důvodu nesplnění výkonových parametrů a nemožnosti sdružovat operace. Dlouhotočné automaty v porovnání s klasickými soustružnickými centry často disponují vysokými otáčkami, možnostmi sdružovat více operací a velkými zásobníky nástrojů [35]. Problém nastává v možnosti upnout tyč pouze do určitého průměru, který je ve většině případu nedostačující. Pro tento projekt jsou koncepce dlouhotočných automatů nevyhovující.

Do finálního výběru jsou vybrány 4 strojní zařízení od výrobců Emco, Index Traub, Mazak a DMG Mori. Zařízení od DMG Mori NLX 1500 nesplňuje podmínku dvou revolverů. Soustruh od DMG je do výběru zařazen jako náhrada za současné řešení s vyššími výkonovými parametry než dosavadní varianta Emco Maxxturn 65. Dále tento stroj poslouží také k porovnání časové úspory oproti výkonově podobným soustruhům s dvěma revolvery. Základní přehled parametrů vybraných strojů je zobrazen v Tab. 7 a Tab. 8.

Před samotným porovnáním a hodnocením byly osloveni dodavatelé jednotlivých soustružnických center pro získání cenových nabídek. Nabídky byly vyhotoveny na základě předešlých úvah, zbylé vybavení bylo navrženo/doporučeno od obchodních zástupců jednotlivých firem.

Tab. 7 Přehled parametrů strojních zařízení 1 [10, 19].

VÝROBCE/ TYP	EMCO HYPERTURN 45 SMY PLUS	INDEX TRAUB C100
		
Max. průměr tyče [mm]	45	42
Max. obráběný průměr [mm]	300	140
Vzdálenost mezi vřeteny [mm]	720	515
Rychloposuv x 1., 2. revolveru [m.min ⁻¹]	30, 30	30, 30
Rychloposuv y 1., 2. revolveru [m.min ⁻¹]	15, 15	15, 15
Rychloposuv z 1., 2. revolveru [m.min ⁻¹]	45, 45	60, 60
Ot. hl. vřetena [min ⁻¹]	7 000	7 000
M _k hl. vřetena [N.m]	100	46/65
Výkon hl. vřetena [kW]	15	25/29
Ot. vd. vřetena [min ⁻¹]	7 000	7 000
M _k vd. vřetena [N.m]	100	32/43
Výkon vd. vřetena [kW]	15	16,5/19
Počet nástrojů	2x12	2x14 ; 2x10 (nebo 3x10)
Upínací rozhraní	VDI 25	VDI 25
Ot. poháněného nástroje [min ⁻¹]	6 000	8 000
M _k poháněného nástroje [kW]	16	11
Výkon vd. vřetena [kW]	4	6,2
Hmotnost [kg]	4 200	5 500
Příkon [kVA]	30	57
Software	SINUMERIK 840D	SINUMERIK 840D

Tab. 8 Přehled parametrů strojních zařízení 2 [7, 29, 36].

VÝROBCE/ TYP	MAZAK HQR 100MSY	DMG MORI NLX 1500 (S1 T MC Y S2)
		
Max. průměr tyče [mm]	51	42
Max. obráběný průměr [mm]	300	386
Vzdálenost mezi vřeteny [mm]	620	515
Rychloposuv x 1., 2. revolveru [m.min ⁻¹]	30, 24	30
Rychloposuv y 1., 2. revolveru [m.min ⁻¹]	26, 20	10
Rychloposuv z 1., 2. revolveru [m.min ⁻¹]	40, 40	30
Ot. hl. vřetena [min ⁻¹]	6 000	6 000 (8 000)
M _k hl. vřetena [N.m]	162	256
Výkon hl. vřetena [kW]	7,5/11	11/11/7,5
Ot. vd. vřetena [min ⁻¹]	6 000	6 000 (8 000)
M _k vd. vřetena [N.m]	162	256
Výkon vd. vřetena [kW]	7,5/11	11/7,5
Počet nástrojů	2x12	1x12/16/20
Upínací rozhraní	VDI 25	BMT
Ot. poháněného nástroje [min ⁻¹]	6 000	10 000
M _k poháněného nástroje [kW]	35	29
Výkon vd. vřetena [kW]	5,5	5,5/5,5/3,7
Hmotnost [kg]	9 100	5 400
Příkon [kVA]	30	29
Software	MAZAKTROL	CELOS

- **Nabídka/poptávka Emco**

V nabídce od firmy Emco jsou zahrnuty automatizační prvky jako podavač tyčí s označením EMCO TOPLOAD multi-level s maximální možnou délkou tyče 3 200 mm a zásobník tyčí (až 7 tyčí), stohovací zásobník pro hotové díly a sonda měření nástrojů. K volitelnému vybavení je také naceněno čerpadlo s provozním tlakem 24 bar a čisticí pistole. K soustruhu od výrobce Emco byl volen článkový dopravník s kloubovým pásem a kleštinové sklíčidla Hainbuch BZI 52.

- **Nabídka/poptávka MAZAK**

V případě strojního zařízení od společnosti Mazak je obsah cenové nabídky obdobný jako u ostatních. Stroj MAZAK HQR100 je na rozdíl od ostatních již dodáván včetně základní sady držáků nástrojů. Do nabídky je zahrnuto čerpadlo o tlaku 15 bar a podavač tyčí Spacesaver 2220 pro tyče o délce 1 m včetně zásobníku. Mimo jiné byl v nabídce zahrnut speciální systém pro ofukování obrobku během přenosu mezi hydraulickými sklíčidly a článkový dopravník třísek.

- **Nabídka/poptávka DMG Mori**

Cenová nabídka od DMG Mori je mírně poddimenzována a v případě zájmu je třeba dořešit některé volitelné prvky. Nabídka neobsahuje cenu podavače tyčí, ale pouze rozhraní potřebné pro jeho připojení. V ceně je zahrnuto čerpadlo o tlaku 15 barů a podavač hotových výrobků. Oproti nabídce od Emco nebo Index není navrhnut zásobník pro hotové výrobky, proto je zde stále možnost rozšířit poptávku (o již zmíněné automatizační prvky nebo zvýšení výkonu včetně). Pro vřeten bylo zvoleno běžné hydraulické tříčelistové sklíčidlo KITAGAWA BB206, dále speciální oplachovací pistole a pro dopravu třísek článkový dopravník.

- **Nabídka/poptávka Index Traub**

Nabídka strojního zařízení od výrobce Index Traub je řešena přes společnost Galika. V nabídce na zařízení Index Traub C100 je stejně jako u předchozích nabídek zařazeno základní vybavení a automatizační prvky, jakožto: podavač a zásobník tyčí MLB65 pro 3 200 mm dlouhé tyče (součástí zásobníku je již zakladač tyčí), vysokotlaké čerpadlo do 80 bar, podavač hotových výrobků ve formě gantry a stohovací zásobník pro hotové výrobky. Pro obě vřeten bylo navrženo sklíčidlo s označením Hainbuch Spanntop Modular size 42. Dále byl naceněn lamelový dopravník třísek a oplachovací pistole. Nabídka stroje Index Traub je do určité míry naddimenzována v porovnání se zbylými. Na rozdíl od některých nabídek je zde zásobník tyčí již součástí podavače, taktéž čerpadlo je pro vyšší tlak (80 bar) než konkurenční nabídky.

Z důvodu možného uveřejnění citlivých dat dodavatelů a zadavatelů projektu není v Tab. 9 uvedena cena. Jednotlivé nabídky jsou pouze seřazeny podle ceny a to od nejlevnějšího po nejdražší. Nejdražší variantou je řešení od firmy Index Traub, zatímco nejlevnější varianta je stroj DMG Mori NLX 1500. Cenové rozhraní bude mít velký význam ve finálním rozhodnutí, investiční žádosti a také při obhájení projektu.

Tab. 9 Porovnání cenových nabídek.

Strojní zařízení	Pořadí
DMG MORI NLX 1500	1.
EMCO HYPERTURN 45	2.
MAZAK HQR100	3.
INDEX TRAUB C100	4.

2.2 Zhodnocení vytipovaných strojů

Po získání cenových nabídek nastává prostor pro porovnání a zhodnocení jednotlivých variant dvou-revolverových dvou-vřetenových soustruhů. Poslední varianta od DMG Mori slouží pro porovnání ceny a také k časové studii jakožto nižší konfigurace oproti konkurenci. Strojní zařízení jsou si parametrově velmi podobná a všechny tři odpovídají zadaným požadavkům. Zařízení s nejnižšími výkonovými parametry je stroj od firmy Mazak, naopak nejlépe se prezentuje soustruh od firmy Index Traub, který výkonově vyčnívá nad konkurenčními zařízeními. Všechny konstrukce disponují vnitřním chlazením vřetena a revolverů [10, 19, 36]. Posledním výrazným parametrem je způsob vedení nástrojových revolverů, který je v případě stroje Emco vyřešen kuličkovým šroubem, zatímco Index a Mazak je vybaven lineárním vedením, což znamená vyšší dynamiku, zatímco vedení pomocí kuličkového šroubu bude disponovat vyšší tuhostí a tím také možností docílit vyšších sil během obrábění [10, 19, 35, 36].

Vyšší tuhosti je částečně možné docílit pomocí dvou lineárních motorů v případě lineárního vedení jako u provedení „SingleSlide“ od výrobce Index Traub [35]. K finálnímu porovnání také patří cenové nabídky od dodavatelů, zde je na první pohled zřetelné cenové pořadí jednotlivých strojů, sestupně od stroje Index Traub C100 k Emco HP45.

Emco HP45 představuje nízkorozpočtovou variantu pro nově zvolený koncept dvou revolverů a dvou vřeten. Jedná se o velmi rychlý a výkonný soustruh s velmi přijatelnou cenou. Jako další výhodu lze zmínit řídicí systém Sinumerik, který je již ve firmě zavedený a známý. Vzhledem k nižší ceně je zde prostor na zvážení využití vyššího tlaku čerpadla (80 bar), pro zvýšení efektivity obrábění, lámání třísky a prodloužení životnosti nástrojů. Svařovaná konstrukce s výplní je lehká a měla by mít velmi podobnou nebo vyšší tuhost než litinová konstrukce [35]. Absorpční materiál uvnitř profilů má za následek zvýšení odolnosti proti vibracím [35].

Koncepce Index Traub C100 vyčnívá nad ostatními svými výkonovými parametry, které jsou vyšší v porovnání se zbylými soustruhy. K dalším výhodám lze také přičíst software z řady Sinumerik. Soustruh od firmy Index je tvořen litinovou odlévanou konstrukcí, která poskytuje dostatečnou tuhost během obrábění. Posuv nástrojových hlav je zde řešen pomocí lineárního vedení, které disponuje vysokou dynamikou, nicméně nižší tuhostí [35]. Výrobce Index Traub naznačuje, že koncept vedení „SingleSlide“ přináší vyšší tuhost v porovnání s běžně dostupnými lineárními vedení a možnost docílení vysokých rezných sil s nízkým sklonem k vibracím [19]. Jedná se však o dražší řešení v porovnání s ostatními variantami.

Soustruh Mazak HQR100 je mírně pozadu z pohledu výkonu. Hodnota 11 kW navíc odpovídá výkonu při krátkodobém zatížení (30 minut) [36]. Nicméně tato koncepce je stále

dostačující pro konkrétní aplikaci a v daném případě by se pouze upravily řezné parametry. Z pohledu výkonových parametrů na obou vřetenech soustruh od firmy Mazak taktéž mírně zaostává oproti konkurenci. Za hlavní výhodu se dá zaručeně považovat tuhost stroje, která bude zaručena litinovou konstrukcí a samotnou váhou stroje 9 000 kg, která je téměř dvojnásobná oproti ostatním konstrukcím při podobných rozměrových parametrech [36]. Největším úskalím je pravděpodobně software, jenž je pevně svázán s firmou Mazak a mohl by být v počátcích problém pro operátory, kteří jsou již zvyklí na zavedený SW. Mezi výhody patří tuhá litinová konstrukce a střední cena.

Poslední zastupitel, tedy DMG Mori NLX 1500, je pouze jedno-revolverový soustruh, což nepodporuje myšlenku s optimalizací obráběcího procesu z pohledu sdružených operací a využití dvou vřeten současně. Tato koncepce je ovšem velmi podobná stroji Index Traub C100 ať už ve výkonových parametrech, tak v konstrukčním provedení (litinová konstrukce s lineárním vedením). Dále stojí za zmínku variabilita ve volbě výkonu vřeten ($8\,000\text{ min}^{-1}$) a poháněných nástrojů ($10\,000\text{ min}^{-1}$) [7]. Při volbě tohoto vybavení by se jednalo o nejvýkonnější strojní zařízení z vytipovaných favoritů. Liší se ovšem v řídicím SW, který nese název Celos [7]. Strojní zařízení od DMG je proto vhodnou náhradou za stávající soustruh s navýšením výkonových parametrů. Je zde ovšem jeden velký rozdíl v možnosti vybavení stroje oproti předchozím konceptům – možnost přidání nástrojů/programu pro výrobu ozubení, a to pouze implementací speciálního držáku do revolveru [7].

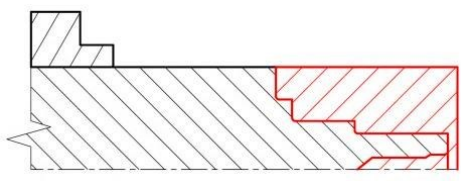
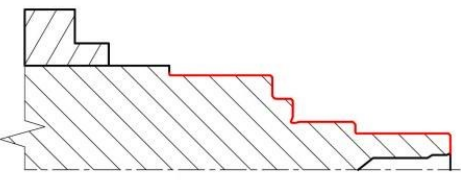
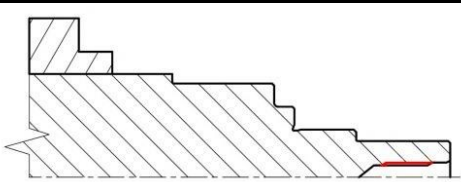
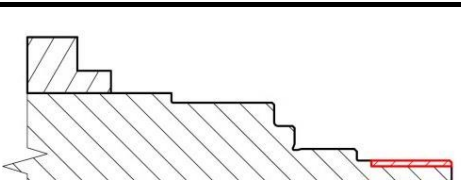
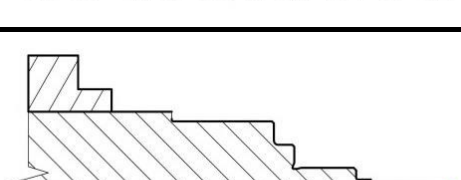
Tato koncepce by umožnila vyrábět téměř celý výrobek na dvě upnutí na jednom strojním zařízení. Bez následného přepravování a znovu upínání dojde ovšem k prodloužení strojních časů na jednom stroji. Problém nastává také v ustanovení nástroje, který je třeba správně seřadit manuálně do obráběcí pozice a při každé výměně otupeného nástroje je seřízení nutné podstupovat znovu [7]. Tento proces je časově náročný a vyžaduje zastavení stroje, což může způsobit ztráty oproti již zavedenému řešení obrábění ozubení na jiném stroji. Tento koncept již překračuje zadání, které je zaměřené na soustružení ozubeného hřídele. Tato změna by vyžadovala mnohem více změn v technologickém postupu, logistice, cenových propočtech, technologické přípravě a odladění než výměna strojního zařízení a optimalizace. Cenová nabídka na stroj NLX je více než vyhovující. Nicméně tato koncepce nepřináší žádné inovace v porovnání se stávajícím procesem a do výběrového řízení byl zařazen pro časovou studii a porovnání vstupní investice.

Po zhodnocení a zvážení jednotlivých variant by se daly doporučit hned dvě varianty, a to Index Traub C100 a Emco Hyperturn 45. Index jakožto představitel ideálního řešení z pohledu kvality, dynamiky a výkonosti. Nicméně z investiční stránky nákladnější variantě a Emco jako ekonomické řešení cena/výkon pro nově zvolený koncept. Z pohledu výroby je samozřejmě výhodné volit spolehlivý a výkonný stroj, pro udržení se v konkurenceschopnosti, proto byl vzat soustruh Index Traub C100 jako vhodná varianta. K rozhodnutí pro Index Traub přispělo také provedení doplňkového vybavení, především podavač tyčí MLB65, který již v základní koncepci disponuje zásobníkem tyčí, variabilitou v délce tyčí, dále vysokou tuhostí díky šesti podpěrným ložiskům a granitovému rámu [27]. Pro tento soustruh byly následně vytvořeny všechny další výpočty, návrhy a poptávky.

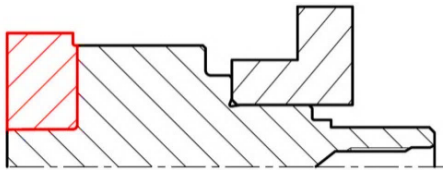
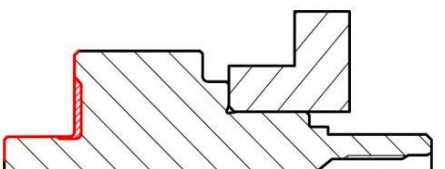
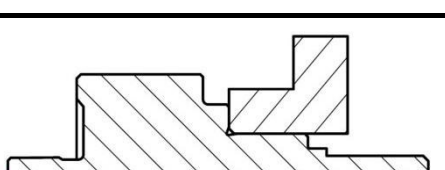
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, technologický postup (TP) je navržen pro co nejvyšší efektivitu obrábění a nejnižší nároky na obsluhu. Jako vstupní polotovar byla zvolena tyč loupáná za studena v délce 3 000 mm o průměru 40 mm s mezní úchylkou h9 dle normy ČSN EN 10278 [44]. Takto vyrobený polotovar již není potřeba upravovat a může být rovnou použit do podavače tyčí [19]. Materiál je dodáván v žíhaném stavu pro snadnější obrobiteľnost i předchozí úpravu při výrobě polotovaru [44]. V technologickém postupu jsou zohledněny pouze operace 10. a 20., tedy soustružení obou stran dílce v hlavní a vedlejším vřetenu.

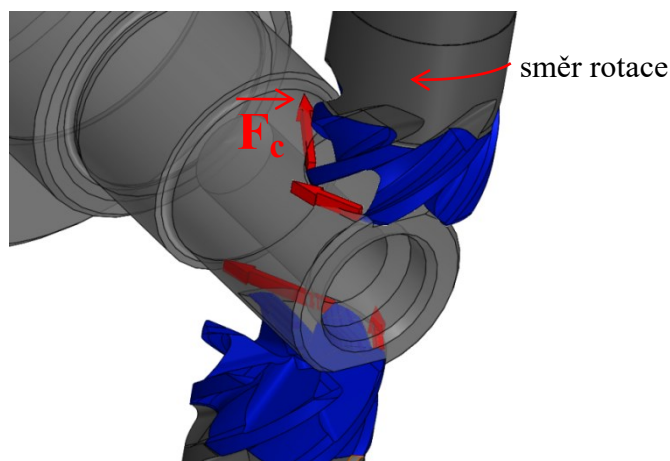
Tab. 10 Pořadí operací pro hlavní vřeteno.

Operace	Vřeteno/revolver	Zobrazení
10/10 hrubování/vrtání	hlavní/horní a dolní	
10/20 dokončování vnější	hlavní/dolní	
10/30 tváření závitu	hlavní/dolní	
10/40 frézování rovinných ploch	hlavní/horní a dolní	
10/50 frézování sražení	hlavní/horní a dolní	
10/60 upíchnutí a přepnutí do proti-vřetena	hlavní a vedlejší/dolní	

Tab. 11 Pořadí operací pro vedlejší vřeteno.

Operace	Vřeteno/revolver	Zobrazení
20/10 hrubování	vedlejší/horní	
20/20 dokončování	vedlejší/horní	
20/30 vrtání	vedlejší/horní	

Výše uvedené pořadí operací (Tab. 10 a Tab. 11) slouží především pro přehled a určení sledu operací. Kompletně provedený technologický postup pro operaci 10. a 20., viz Příloha 3. Všechny práce prováděné na vedlejším vřetenu (20/10, 20/20 a 20/30) probíhají při souběžném obrábění na vřetenu hlavním (10/10, 10/20 a 10/30). Při operacích 10/10, 10/40 a 10/50 jsou současně využity oba revolvery na vřetenu hlavním. Během frézování jsou nástroje proti sobě a pohybují se na opačnou stranu, kde se původně nacházel druhý nástroj. Pro obě frézy je nastaveno čelní obrábění, ve kterém je aplikováno jak sousledného tak nesousledného obrábění [56]. Výsledné síly směřují převážně ke sklíčidlu, a proto by neměla být tendence obrobek „vytahovat“ z upnutí [56]. Z důvodu stejných řezných podmínek je si velikost řezných sil na obou frézách ve stejných úhlech rovna [56]. Nicméně nelze počítat s tím, že by se nástroje potkaly ve stejném úhlovém nastavení a tím by se x-ové složky řezné síly navzájem vyrušily. Tudíž lze tvrdit, že během frézování rovinných ploch bude vždy na obrobek působit jak x-ová tak y-ová složka řezné síly.



Obr. 11 Rozložení řezných sil při frézování.

Vzhledem ke známé šířce řezu a_e je možné snadno dopočítat tzv. řezný úhel (vztah 8) a následně maximální počet zubů v záběru (vztah 9). S vyšším počtem zabírajících zubů se zvyšuje stabilita obráběcího procesu, ale také potřebný řezný výkon [5].

$$\alpha = 90^\circ + \arcsin \frac{2 \cdot (a_e - D_f \cdot 0,5)}{D_f} \quad 8$$

kde: α [°] řezný úhel,
 a_e [mm] šířka řezu,
 D_f [mm] průměr frézy.

$$\alpha = 90^\circ + \arcsin \frac{2 \cdot (10 - 12 \cdot 0,5)}{12} \approx 132^\circ$$

$$z_n = \frac{\alpha \cdot n_z}{360^\circ} \quad 9$$

kde: z_n [-] počet zubů v záběru,
 α [°] řezný úhel,
 n_z [-] počet zubů frézy.

$$z_n = \frac{132^\circ \cdot 6}{360^\circ} \approx 2,2$$

Vypočet jasně ukazuje, že během čelního obrábění, za předpokladu, že již bude celá fréza v řezu, jsou vždy v záběru dva zuby frézy a po dráhu rovnu opásání 12° také třetí ostří. Stejný výsledek je možné získat grafickým přístupem (Obr. 11), kde jsou také naznačeny směry řezné síly v průběhu obrábění.

V rámci zefektivnění procesu byl do výběru zařazen vyráběný stupňovitý vrták – návrh dostupný v Příloze č. 2, se kterým je možné otvor vyrobít na jedno provrtání bez dalšího obrábění. Po konzultaci s výrobcem monolitních nástrojů byl zvolen povlak TiAlN, jakožto první volba pro vrtání nízko-pevnostních ocelí [41, 54]. Jedná se o jeden z nejčastěji používaných povlaků s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení [5, 41, 54]. Výhodou zůstává, že firmy nabízející kusovou výrobu monolitních nástrojů poskytují také služby zahrnující přebroušení řezných hran. Je nutné vzít v úvahu změnu rozměru otvoru, ve kterém má být tvářen závit, a následně stanovit, kolikrát je možné vrták přestrojit a zda vůbec je tento proces možný při zachování kvality a rozměru tvářeného závitu. Průměr díry je stanovený podle vybraného tvářeného závitníku. Závitník s vyměnitelnou hlavici od výrobce LMT FETTE předepisuje velikost otvoru 7,45 mm [25]. Tato hodnota je zjištěna experimentálně a rozdílná v porovnání s teoreticky vypočtenou hodnotou podle objemové ekvivalence, viz výpočet dle vztahu 10, přesto je primárně volena hodnota podle dodavatele [40]. Pro další výrobu je doporučeno ověřit rozměr díry přímo ve výrobě.

$$d_{ptV} = [d^2 - 1,26903 \cdot d \cdot P + 0,59547 \cdot P^2]^{0,5} \quad 10$$

kde:	d_{ptV} [mm]	teoretický průměr vrtaného otvoru,
	d [mm]	nominální průměr závitu,
	P [mm]	stoupání.

$$d_{ptV} = [8^2 - 1,26903 \cdot 8 \cdot 1,25 + 0,59547 \cdot 1,25^2]^{0,5} \approx 7,23 \text{ mm}$$

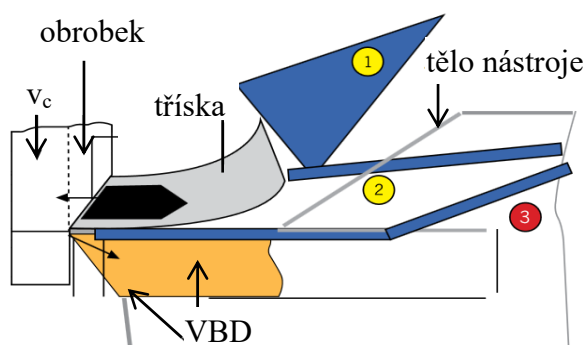
Při snaze automatizovat proces je důležité, aby soustružnické centrum bylo v provozu pokud možno co nejvíce bez zastavení. K takovým zastavením, lze zařadit výměna (otočení) opotřebovaných destiček a fréz nebo zaměření nástroje. Výměna břitových destiček je bezproblémová, kdy destička zapadne zpět do lůžka a ve většině případů není nutné zaměřovat znovu nástroj, dokud nebude tělo nástroje vymontováno z držáku. Zatímco v případě použití monolitních fréz nebo vrtáku je nutné nástroj vždy znovu nechat zaměřit, proto do návrhu nástrojů byly zařazeny frézy s výměnnými hlavicemi, speciální středící vrták s výměnitelnými vrtacími destičkami a závitník s výměnitelnou hlavicí.

3.1 Volba řezných nástrojů

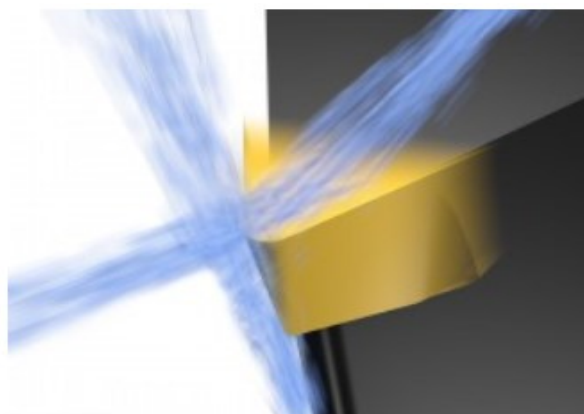
Výběr vhodného nástrojového vybavení byl podmíněn především obráběným materiálem, který určuje materiálovou třídu a poté také složením břitové destičky [5, 55]. Většina nástrojů byla navržena jakožto první volba doporučená od výrobce pro konkrétní materiálovou třídu. Materiál vyráběného dílce spadá do skupiny P, tedy oceli. Pro většinu výrobců jsou skupiny dále děleny do menších podskupin, které jsou podmíněny chemickým složením (množstvím uhlíku a legur) a mechanickými vlastnostmi nebo typu oceli (houževnaté, vysoko-pevnostní nebo třeba slitinové oceli) [5, 55, 56]. Doporučená třída VBD, ve většině případů zohledňuje jak typ břitové destičky (chemické složení), tak povlak podle primárně určeného obrábění. U soustružnických nástrojů je využit vícevrstvý CVD povlak, s výjimkou zapichovacího nože. Frézovací hlavice jsou povlakovány metodou PVD povlakem s obchodním označením TAX (bohužel neznámým složením) [32]. PVD povlak je využit také pro vrtací destičku Nine9, konkrétně tedy TiAlN. Výběr povlaků je v současné době více než široký, od nanopovlaků, vícevrstvých PVD povlaků, přes několikavrstvé, gradientní CVD povlaky, kde je materiálová variabilita přizpůsobena k danému obrábění [5, 41]. CVD povlaky disponují tloušťkou nanosené vrstvy v rozmezí 1-10 μm [41]. Několikavrstvé CVD povlaky tvoří tepelnou bariéru, proto jsou tyto typy ochranných vrstev vhodné pro hrubovací operace, při kterých vzniká velké množství tepla [5]. Vzhledem k vytváření technologie bez možnosti reálného odzkoušení, jsou nástroje voleny převážně podle katalogových doporučení (první volba) a po odladění technologie bude prostor pro nástrojovou optimalizaci.

Délky řezných hran a celkově velikost VBD jsou vybrány s ohledem na velikost vyráběného dílce a velikosti revolverové hlavy, do které je možné upnout držáky nástrojů s připojovacím rozhraním VDI25, kde ve většině případů vychází maximální možný rozměr čtvercového těla nástroje 25x25 mm [18]. Velikost břitových destiček se projevuje taktéž v jejich ceně. V tomto případě není nutné využívat zbytečně velké řezné hrany, když jejich potenciál stejně nebude využit.

Navržená těla nástrojů vždy disponují vnitřním přívodem řezné kapaliny, a to z důvodu maximálního využití potenciálu vysokotlakého čerpadla a přivedení kapaliny přímo do místa řezu [55]. U těl nástrojů má značný vliv i nastavení směru trysky viz Obr. 12, kde jsou naznačeny tři možné způsoby přívodu řezné kapaliny. Pro efektivní lámání třísky jsou vhodně nastavené trysky označené 3 a 2 [24]. Ve variantě s označením 3 je kapalina přiváděna pod třísku tím dochází i k částečné ochraně břitové destičky vůči tepelnému ovlivnění a tříska je v minimálním styku s nástrojem [55]. Na současném trhu se nacházejí i nástroje s extra přívodem řezné kapaliny do oblasti mezi hlavní hřbet nástroje a obrobek, viz Obr. 13 [49]. Tento systém napomáhá ještě více odvádět teplo z místa řezu, prodloužit životnost nástrojů a také zlepšit lámání třísky [55].

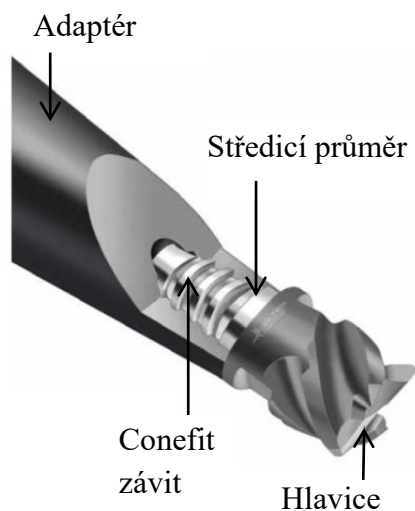


Obr. 12 Umístění trysek [24].



Obr. 13 Přívod procesní kapaliny [49].

Takto navržené nástroje jsou využity při operacích 10/10, 10/20, 20/10 a 20/20. Kompletní seznam nástrojů, viz Tab. 12, 13 a 14. Poptávky byly vytvořeny od co možná nejméně výrobců ve snaze obsáhnout známé a ověřené dodavatele pro zadavatele projektu. Toto rozhodnutí je zcela logické, protože operátoři a technologové jsou již zvyklí na určité výrobce, jejich způsob značení a výdejna je již vybavena nástrojovým sortimentem od známých výrobců. Mezi zvolené dodavatele patří Sandvik Coromant, Iscar, Walter tools, LMT FETTE a Nine9. Mezi posuzovanými nástroji byli i další výrobci, nicméně nebyli zařazeni do finálního výběru z důvodu nižších doporučených řezných parametrů, vyšší ceny nebo nižší propracovanosti poskytovaných informací. (pH Horn, Mitsubishi tools, Sumitomo, Seco, Pramet a další). Většina nástrojů je navržena tak, aby výměna opotřebované břitové destičky nebo hlavice doprovázela pouze jednoduché „přehození“ VBD bez nutnosti demontáže z nástrojového držáku a následného zaměření [55]. Hlavními příklady jsou vybrané frézy, závitník a středící vrták. Pro výměnu hlavice/VBD je nutné dokoupit potřebné vybavení. V případě vrtacích destiček a závitových hlavic se jedná o běžný momentový klíč s příslušným bitem (Obr. 15) stejný jako pro výměnu břitových destiček [55]. Pro frézovací hlavice od firmy Walter, které jsou s adaptérem spojeny pomocí speciálního závitu zvaného cone-fit (Obr. 14), se hlavice přišroubuje plochým klíčem příslušným momentem [32]. Jediným monolitním nástrojem zůstává stupňovitý vrták.

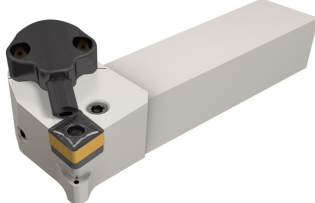
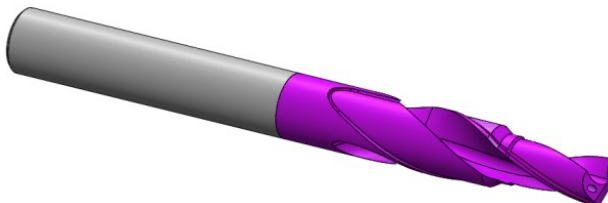


Obr. 14 Conefit [32].

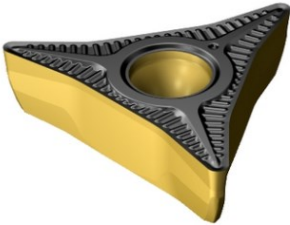
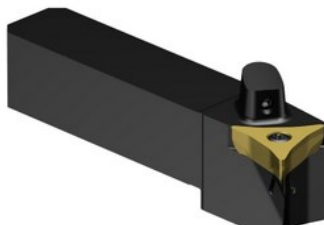


Obr. 15 Sada pro výměnu destičky [53].

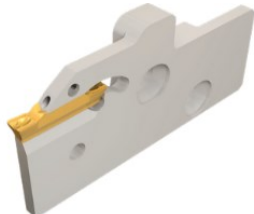
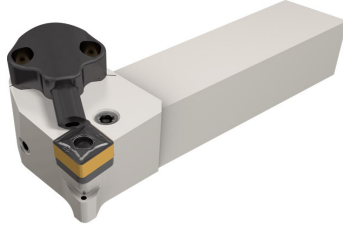
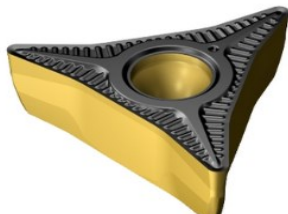
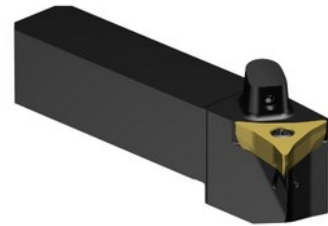
Tab. 12 Nástrojové vybavení 1 [22, 23].

Operace: 10/10			
VBD (ISACR) CNMG 120408-M3P IC8150	Tělo (ISCAR) PCLNR2020-X-JHP-MC	Doporučené řezné podmínky	
		a_p [mm]	3
		f [mm]	0,35
		v_c [m.min ⁻¹]	327
		T [min]	15
Výroba Carbide		Doporučené řezné podmínky	
		a_p [mm]	-
		f [mm]	0,17
		v_c [m.min ⁻¹]	90
		T [min]	45

Tab. 13 Nástrojové vybavení 2 [28, 45, 46, 58, 59, 60].

Operace: 10/20			
VBD (Sandvik) CP-A1104-L5 4325	Tělo (Sandvik) QS-CP-30AR-2020-11C	Doporučené řezné podmínky	
		a_p [mm]	0,7; 0,4
		f [mm]	0,15
		v_c [m.min ⁻¹]	362
		T [min]	15
Operace 10/30			
Hlavice (LMT FETTE) 7133360	Tělo (LMT FETTE) 7074833	Doporučené řezné podmínky	
		a_p [mm]	-
		f [mm]	1,25
		v_c [m.min ⁻¹]	50
		T [min]	45
Operace: 10/40			
VBD (Walter) H3E23138-E12-12-0.5	Tělo (Walter) AK610.Z12.E12.022	Doporučené řezné podmínky	
		a_p [mm]	0,35
		Počet zubů	6
		f_z [mm]	0,0763
		v_c [m.min ⁻¹]	225
		T [min]	45
Operace: 10/50			
VBD (Walter) H3E58318-E10-10	Tělo (Walter) AK610.UZ13.E10.006	Doporučené řezné podmínky	
		a_p [mm]	0,5
		Počet zubů	4
		f_z [mm]	0,0763
		v_c [m.min ⁻¹]	225
		T [min]	45

Tab. 14 Nástrojové vybavení 3 [20, 21, 22, 23, 30, 45, 46].

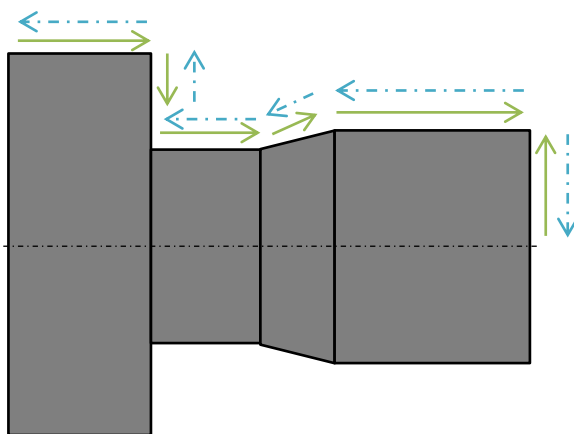
Operace: 10/60				
VBD (ISCAR) DGNM 3202C IC908	Adaptér HGAD 3RE-D42-JHP	Tělo (ISCAR) NMAHR 20- MG-JHP	Doporučené řezné podmínky	
			a_p [mm]	3,1
			f [mm]	0,17; 0,05
			v_c [m.min ⁻¹]	105
			T [min]	15
Operace: 20/10				
VBD (ISACR) CNMG 120408-M3P IC8150	Tělo (ISCAR) PCLNR2020-X-JHP-MC	Doporučené řezné podmínky		
		a_p [mm]	3	
		f [mm]	0,3	
		v_c [m.min ⁻¹]	327	
		T [min]	15	
Operace: 20/20				
VBD (Sandvik) CP-A1104-L5 4325	Tělo (Sandvik) QS-CP-30AR-2020-11C	Doporučené řezné podmínky		
		a_p [mm]	0,7/0,4	
		f [mm]	0,15	
		v_c [m.min ⁻¹]	362	
		T [min]	15	
Operace: 20/30				
VBD (NINE9) I9MT12T2R0200	Tělo (NINE9) BC12-IC12B	Doporučené řezné podmínky		
		a_p [mm]	-	
		f [mm]	0,03	
		v_c [m.min ⁻¹]	65	
		T [min]	45	

Pro časovou studii a tvorbu NC programu jsou využity doporučené nebo velmi podobné řezné podmínky. Výjimku tvoří hrubovací operace, pro niž je změněna hloubka záběru hlavního ostří a_p kvůli rovnoměrné tloušťce třísky pro všechny hrubovací řezy. Vytvořené studie (vypočtená a simulovaná) mají svůj význam pro prvotní představu časové náročnosti výroby dílce. Finální strojní čas bude možné získat až po přejímce stroje a odladění, kdy bude nutné upravovat některé řezné parametry např. z důvodu vibrací, nedostatečné kvality povrchu, vzájemného čekání revolverů nebo trvanlivosti nástrojů.

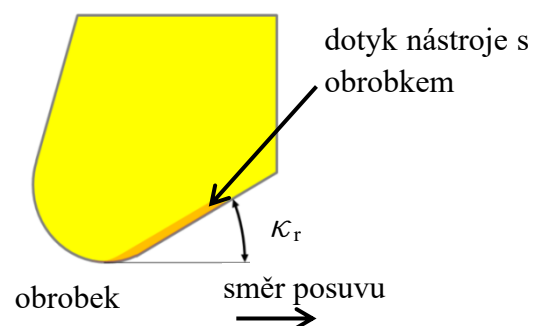
• CoroTurn prime

Pro efektivnější dokončování obou stran obrobku je zvolen „nový“ koncept geometrie břitových destiček CoroTurn prime. Konkrétně VBD vhodná pro dokončování, která disponuje speciální geometrií, jež umožňuje obrábět tzv. všemi směry, viz Obr. 16, kde modré šipky naznačují směr obrábění konvenčním způsobem a zelené směr podporující koncept CoroTurn prime [48]. Pro každou variantu obrábění jsou doporučeny jiné řezné podmínky. Tyto destičky jsou primárně určeny pro tzv. zpětné soustružení [48]. Nastavení úhlu hlavního ostří ovlivňuje opotřebení špičky břitové destičky, obzvláště však při dokončování, kdy hloubka záběru dosahuje menších hodnot než při hrubování [55]. V nejnepríznivějším případě je a_p rovno nebo menší než radius špičky, což způsobí nadměrné opotřebení a nevýhodné rozložení sil [5, 55]. V případě VBD CoroTurn prime, při využití doporučeného směru obrábění, se tvoří tenká tříska a špička nástroje je v minimálním kontaktu v porovnání s běžně dostupnými nástroji (Obr. 17) a finálně dochází k menšímu opotřebení [55]. Výrobce Sandvik Coromant zaručuje nejlepší řezné podmínky a trvanlivost nástroje při konstantní tloušťce třísky [47].

Aby toho bylo možné dosáhnout, vývojáři zmíněné firmy vytvořili speciálně určený software nazvaný CoroPlus ToolPath, který využívá danou konturu a přepočítává řezné podmínky, zejména posuv vůči šířce záběru ostří, a upraví posuv a celkovou strategii obrábění podle aktuální kondice, aby zachoval konstantní průřez třísky [47, 50]. K vytvoření NC programu je využito běžné rozhraní Sinumerik 840D a tvar destičky je nastaven při definování nástrojů. Pro případ dokončování ploch na ozubeném hřídeli je vždy výhodná strana destičky (zpětný směr) využita pro obrábění válcových ploch. V případě výroby ozubeného hřídele jsou vždy využity oba přístupy obrábění s tímto nástrojem pro dokončení jak válcových, tak čelních ploch. Při zpětném obrábění může být obrobek vytahován



Obr. 16 Obráběcí směry Coroturn Prime [42].



Obr. 17 Prime dotyk s obrobkem [48].

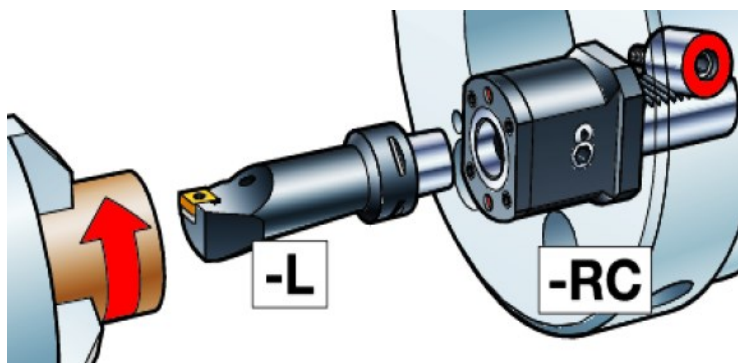
ven z vřetena, protože posuvná složka výsledné síly směřuje ve směru obrábění [5]. Protože se jedná o dokončování, síly vzniklé při soustružení dosahují menších hodnot v porovnání s hrubováním, proto se nepředpokládá, že by tento jev mohl nastat [5].

Výrobce doporučuje soustružit s konstantním průřezem třísky, aby byl potenciál vyvinuté destičky využit co nejvíce [47]. Při dodržení tohoto parametru bude zatížení stroje rovnoměrné po celou dobu řezu [50]. K rozvržení přídavek, posuvu a směru soustružení složí již zmíněný SW CoroPlus ToolPath. Pro docílení alespoň podobného výsledku by bylo nutné měnit hodnotu posuvu na otáčku s ohledem na čelní nebo válcovou plochu. Takový postup by byl zbytečně složitý pro běžné programování a vyžadoval by vytvoření několika kontur a z toho vyplývající přerušovaný řez. Jako druhá možnost se jeví vytvoření dokončovací kontury pomocí ISO kódu. Zde by se měnil posuv podle aktuálního směru (nastavení ostří). Ani jeden ze zmíněných způsobů nebyl aplikován na výrobu ozubeného hřídele.

3.2 Způsob upínání a nástrojové držáky

Způsob upnutí do strojního rozhraní má vliv na finální tuhost stroj – nástroj – obrobek. Na současném trhu je možné se setkat s mnoha typy rozhraní v nástrojových revolverech. Mezi známé a často využívané rozhraní patří VDI, BMT nebo CDI. Soustruh Index Traub C100 je vybaven dvěma revolvery s přípojovacím rozhraním VDI 25 (Obr. 19). Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů přípojovacího rozhraní do nástrojového revolveru s možností aplikovat poháněné nástroje [55]. Mezi hlavní výhody této konstrukce patří rychlá a jednoduchá výměna držáku a v porovnání s BMT držáky také nižší cena, ale nižší tuhost [13]. Způsob ustavení je stejný v případě vnitřních i vnějších nožů.

VDI držáky nástrojů jsou připojeny do revolverové hlavy pomocí válcového konce s vnějším ozubením a přichyceny pomocí zubů umístěných na uzavíracím šroubu [55]. Tvar ozubení a celý systém nástrojového rozhraní je definováno normou DIN 69880 [55]. Pojištění proti axiálnímu a radiálnímu pohybu je zajištěno uzavíracím šroubem na čele nebo obvodu revolveru a při jeho utažení je držák pevně sevřen [12, 55]. Zjednodušené schéma viz Obr. 18, kde je zobrazen levý vnitřní nůž s čelním upínacím rozhraním. Pro zamezení nežádoucího pohybu, obzvláště u poháněných nástrojů, může být na čele nebo obvodu přípojovacího rozhraní umístěn kolík [15].



Obr. 18 Detail VDI rozhraní [55].

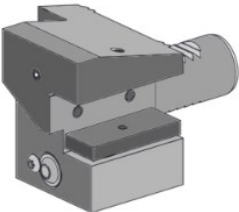
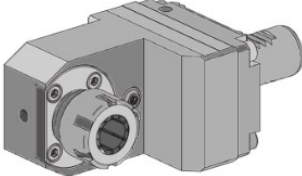
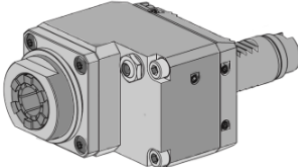
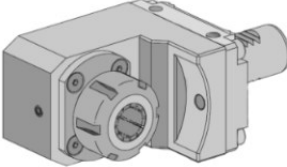


Obr. 19 VDI nástrojový držák [2].

Navržený technologický postup a seznam použitých nástrojů již předem určuje tvar nástrojových držáků (Tab. 15). Pro maximální využití vysokotlakého čerpadla jsou vždy voleny nástrojové držáky s vnitřním přívodem řezné kapaliny. U poháněných držáků

jsou vzaty v úvahu zmíněné aspekty, ale také maximálně dosažitelné otáčky. Tedy převodový mechanismus uvnitř je vždy zvolen 1:1. Pro správné upnutí válcových nástrojů jsou nutné kleštiny pro konkrétní upínací průměr [55]. Všechny položky byly poptány od výrobce Index Traub současně s požadavkem na cenovou nabídku samotného stroje a kleštiny od výrobce WTO. Kompletní výčet potřebných držáků, viz Tab. 15.

Tab. 15 Nástrojové držáky 1 [18, 63].

Operace	Nástrojová hlava	Katalogové označení držáku	Katalogové značení kleštiny	Grafické zobrazení
10/10 10/20 10/60	dolní	11095053-C3		
20/10 20/20	horní	11095053-C3		
10/30	dolní	10972928	191025080	
10/40	dolní, horní	10716400	191025120	
10/50	dolní, horní	10716400	191025100	
20/30	horní	10545041	191025120	

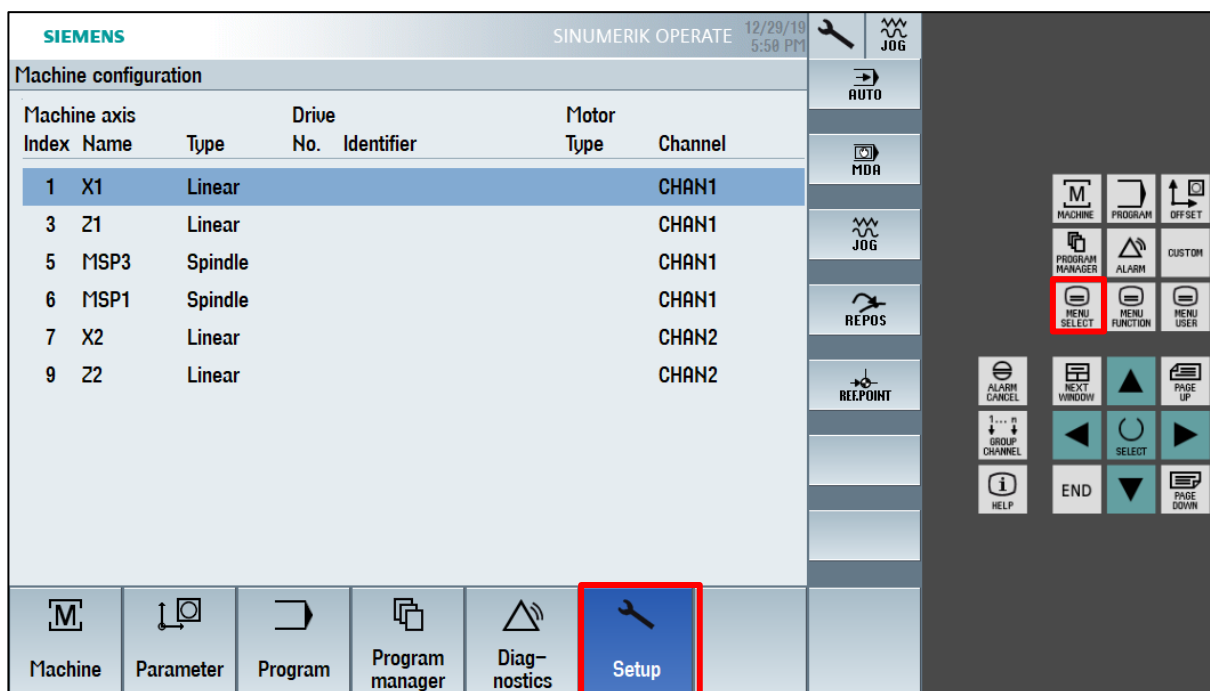
4 KONFIGURACE OBRÁBĚCÍHO STROJE

Pro vytvoření časové studie pomocí simulace je nezbytné změnit strojní konfiguraci. Pro zjednodušení byl jako výchozí konfigurace využit nejpodobnější možný vzor strojního zařízení, a to dvou-revolverový (dvou-kanálový) soustruh bez Y osy. Koncepce Index C100 disponuje taktéž dvěma revolvery, ale dvěma vřeteny, poháněnými nástroji a možností Y posunu pro oba revolvery [19]. Z tohoto výčtu je zřejmé, že je třeba několik os doplnit.

Pro reálné strojní zařízení je systém mnohem složitější a vyžaduje velké množství systémových nástrojů, propojení, vytvoření PLC sítě a mnoho dalších softwarových a hardwarových zásahů [51]. Modulární systém v interaktivním prostředí Sinumerik 840D sl 4.7 je v tomto případě určeno pouze pro simulaci.

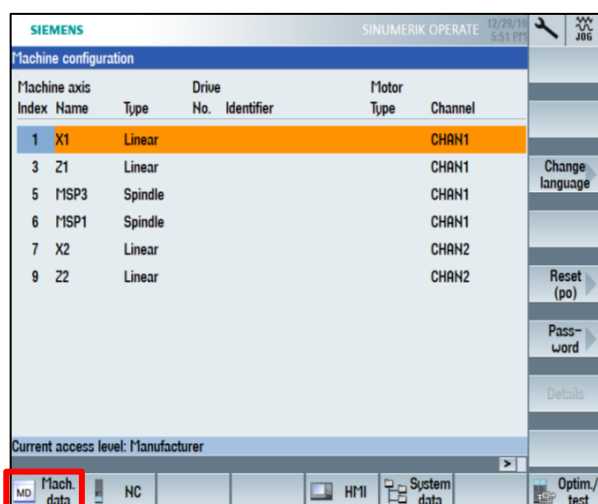
4.1 Nastavení Y osy prvního kanálu

Jako výchozí konfigurace byl využit vzor dvou kanálového soustruhu s poháněným nástrojem z již vytvořených konfigurací. Osy X1, Z1 a MSP3 jsou výhradně pro první kanál (horní revolver). Hlavní vřeteno označeno jako MSP1 je sdíleno s oběma kanály, ale je přednostně konfigurováno pro první kanál a osy X2 a Z2 jsou přiřazeny spodnímu revolveru. Strojní nastavení se nachází v „menu select“ pod dlaždicí „setup“ (Obr. 20).



Obr. 20 Sinumerik vstup do „machine data“ menu.

Následně se vybere kolonka „machine data“ (MD) (Obr. 21), kde je již dostupný obsah vytvářené konfigurace. Poté jsou již na výběr jednotlivá nastavení. Tedy „general“ (obecné), „channel“ (kanálové) a „axis“ (osové) viz Obr. 22. Nastavení v „general MD“ je poměrně snadné a určuje se zde především indexové pojmenování os [51]. Pro urychlení práce se navolí označení os (10 000[...]) pro všechny úpravy již v tomto kroku viz Tab. 16.



Obr. 21 Sinumerik konfigurace přehled 1.

10000[0]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	X1
10000[1]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX2
10000[2]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	Z1
10000[3]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX4
10000[4]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	MSP3
10000[5]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	MSP1
10000[6]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	X2
10000[7]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX8
10000[8]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	Z2
10000[9]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX10
10000[10]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX11
10000[11]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX12
10000[12]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX13
10000[13]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX14
10000[14]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX15
10000[15]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX16
10000[16]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX17
10000[17]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX18
10000[18]	\$M1N_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB	AX19

Obr. 22. Sinumerik konfigurace přehled 2.

Tab. 16 Nastavení „general MD“.

„General MD“	Původně	Nově	Význam
10 000[1]	AX2	Y1	Přiřazení (pojmenování) osy
10 000[3]	AX4	MSP2	Přiřazení (pojmenování) osy
10 000[7]	AX6	Y2	Přiřazení (pojmenování) osy
10 000[9]	AX8	MSP4	Přiřazení (pojmenování) osy
10 000[10]	AX9	Z3	Přiřazení (pojmenování) osy

Pro další nastavení je již nutné přejít do „Channel MD“ nastavení (Obr. 23), kde je možné přepínat mezi kanály a vytvořit tak rozdílné nastavení pro jednotlivé nástrojové revolvery. V tomto menu se určují osy daného kanálu, ve kterém je následně možné tuto osu definovat. Nastavení Y osy je analogické jak pro první, tak druhý kanál.

Channel machine data				CH1:CHAN1
20000	\$MC_CHAN_NAME	CHAN1	po	
20050[0]	\$MC_AXCONF_GEOAX_ASSIGN_TAB	1	po	
20050[1]	\$MC_AXCONF_GEOAX_ASSIGN_TAB	0	po	
20050[2]	\$MC_AXCONF_GEOAX_ASSIGN_TAB	2	po	
20060[0]	\$MC_AXCONF_GEOAX_NAME_TAB	X	po	
20060[1]	\$MC_AXCONF_GEOAX_NAME_TAB	Y	po	
20060[2]	\$MC_AXCONF_GEOAX_NAME_TAB	Z	po	
20070[0]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	1	po	
20070[1]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	3	po	
20070[2]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	6	po	
20070[3]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	5	po	
20070[4]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	
20070[5]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	
20070[6]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	
20070[7]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	
20070[8]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	
20070[9]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	
20070[10]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	
20070[11]	\$MC_AXCONF_MACHAX_USED	0	po	

Obr. 23 Sinumerik konfigurace MD channel.

Kolonka 20 050 slouží pro aktivaci Y osy [51]. Hodnota přidělená pro 20 050 musí odpovídat pořadí, ve kterém je definována daná osa v řádcích 20 070 [51]. Pro aktuální nastavení Y osy je využit index 5 jakožto pátá kolonka v pořadí (20 070[4]). Pro některá nastavení je výchozí pořadí 20 070, ve kterém je udáván index, který bude následně zobrazen v nastavení stroje, v tomto případě 2. Pořadí, ve kterém jsou jednotlivé indexy, poté slouží pro navazující nastavení „TRANSMIT“ a „TRACYL“. Hodnota 20 080 slouží pro následné programování, pod tímto označením je volána daná osa během programování [51]. Pro snadnější orientaci v pořadovém indexu versus přiřazený jsou tyto vazby rozepsány v Tab. 18. Změnou 52 010 nevznikne žádný posun v konfiguraci, jedná se pouze o grafickou záležitost – v hlavním menu budou všechny tři osy zobrazeny velkým písmenem a pro konfiguraci to bude signál, že se jedná o tříosý soustruh [51]. Kompletní nastavení v „channel MD“, viz Tab. 17.

Tab. 17 Nastavení „Channel MD“ (Y osa).

„Channel MD“	Původně	Nově	Význam
20 050[1]	0	5	Indexace v kanálu
20 070[4]	0	2 (Y1)	Indexace v hlavní nabídce stroje
20 080[4]	A	Y	Označení osy pro vybraný kanál
52010	2	3	Zobrazení os v hlavním menu

Tab. 18 Indexy os pro 1. kanál.

„Channel MD“ 1 data	Označení podle 20 080[]	Přiřazený index podle 20 070[]	Pořadí 20 070[]
20 070[0]	X	1	1
20 070[1]	Z	3	2
20 070[2]	SP1	6	3
20 070[3]	SP3	5	4
20 070[4]	Y	2	5

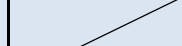
Mnohem významějším krokem je nastavení funkcí „TRANSMIT“ a „TRACYL“, které budou nastaveny pro hlavní vřeteno včetně Y osy. Tyto pojmy lze chápat jako nastavení funkcí aplikovaných na válcové ploše („TRACYL“) nebo čele („TRANSMIT“) obrobku [51]. Přenastavení je nutné, protože s přidáním Y osy přibývají možnosti obrábění tvarů válcových a čelních ploch s využitím poháněného nástroje, včetně využití této osy. Změnou kolonky 24 100 z 256 na 257 je zhlášeno systému, že na hlavním vřeteni se nachází Y osa. Nastavení 24 110[0 až 2] respektive 24 120[0 až 2] zůstává nezměněno a jedná se o označení os X1, MSP1 a Z1 v tomto pořadí [51]. Tyto řádky určují osy, které vstupují do programovatelných funkcí využívající „TRANSMIT“. Jak je možné si povšimnout, číselné označení (Tab. 19) neodpovídá indexu ve stroji, nýbrž v pořadí, ve kterém byly rozepsány pod řádky 20 070[0 až 3], v těchto dvou specifikacích se pořadí shoduje, viz Tab. 18. Tímto postupem je konfigurace „TRANSMIT“ dokončena. Nastavení „TRACYL“ je již nepatrně rozšířenější (Tab. 20).

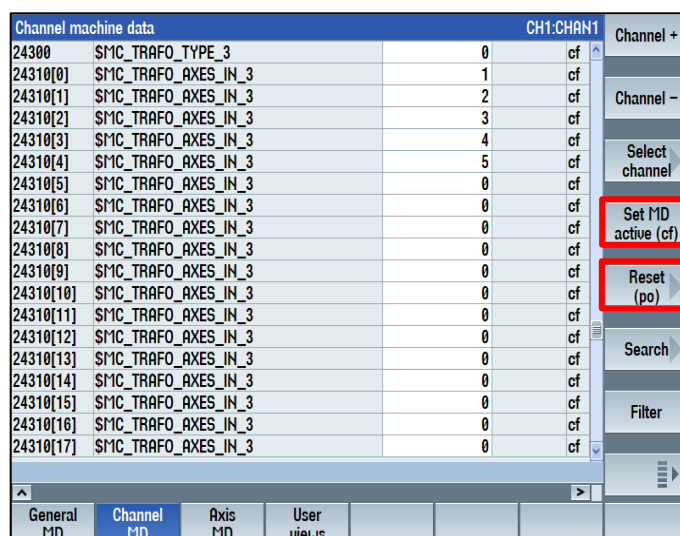
Tab. 19 Nastavení „TRANSMIT“ pro hlavní vřeteno s Y osou.

„Channel MD“	Původně	Nově	Význam
24 100	256	257	„TRANSMIT“ aktivace
24 110[0], 24 120 [0]	1		První osa pro využití „TRANSMIT“
24 110[1], 24 120[1]	3		Druhá osa pro využití „TRANSMIT“
24 110[2], 24 120[2]	2		Třetí osa pro využití „TRANSMIT“

Prvním krokem je označení, že se jedná o strojní zařízení s Y osou použitelnou na hlavním vřetení. Tato informace je uvedena pod řádkem s označením 24 300 [51]. Další úpravy se již týkají os vstupujících do nastavení „TRACYL“, které se nachází v označení 24 310 a 24 320[0 až 2], kde se označení [0, 1 a 2] vyplní podle vzoru 24 110[0 až 2], tedy v pořadí 1, 3, 2 (X, MSP1, Z). Zde je již prostor pro doplnění osy Y jakožto čtvrté indexované osy a možnosti programování cyklů na válcové ploše obrobku. Posledním krokem pro spuštění Y osy je aktivace osy „Set MD active(cf)“ a resetování celého nastavení „Reset (po)“. Poté je již osa dostupná pro operační software (Obr. 24) [51].

Tab. 20 Nastavení „TRACYL“ pro hlavní vřeteno s Y osou.

„Channel MD“	Původně	Nově	Význam
24 300	0	514	„TRACYL“ aktivace
24 310[0], 24 320[0]	1		První osa pro využití „TRACYL“
24 310[1], 24 320[1]	2	3 (C1)	Druhá osa pro využití „TRACYL“
24 310[2], 24 320[2]	3	2 (Z1)	Třetí osa pro využití „TRACYL“
24 310[3]	4	5 (Y1)	Čtvrtá osa pro využití „TRACYL“



Obr. 24 Sinumerik restart.

4.2 Konfigurace poháněného nástroje druhého kanálu

Správné nastavení druhé (dolní) nástrojové hlavy spočívá v přidání poháněného nástroje a Y osy. Tento postup již je vysvětlen v kapitole 4.1, a není zde znovu zmíněn, protože s výjimkou indexace os se nikterak neliší. V následujícím textu je přesto vysvětleno několik základních úprav, týkající se především v definování názvů os a jejich indexace. Začátek konfigurace je obdobný, a to určení indexu pro operační systém a pořadí.

V rozhraní „Channel MD“ je nastaven druhý kanál pomocí přepínání „Channel +“, viz Obr. 23, tím se menu přepne do rozhraní pro dolní revolver. Význam řádků 20 050, 20 070 a 20 080 je stejný jak pro první kanál, viz kapitola 4.1.

Tab. 21 Primární nastavení kanálových dat pro druhý kanál.

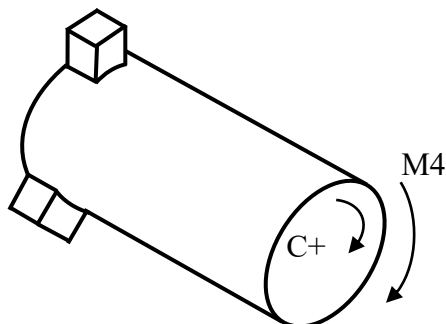
„Channel MD“	Původně	Nově	Význam
20 070[3]	0	8 (Y2)	Indexace v hlavní nabídce stroje
20 070[4]	0	10 (MSP4)	Indexace v hlavní nabídce stroje
20 080[3]	A	Y2	Označení osy pro vybraný kanál
20 080[4]	B	SP4	Označení osy pro vybraný kanál
52 201	1	2	Rozšíření technologie
52 206[4]	0	3	Význam osy
52 207[4]	0H	30H	Směr rotace osy

Nastavení a indexace v „MD Channel“ je téměř totožné jako v případě prvního kanálu (Tab. 21 a Tab. 22). Rozdíly se týkají v nastavení rozšíření technologie pod označením 52 201, kde změna na číslici 2 naznačuje, že se jedná o rozšířené obrábění v daném kanálu [51]. To znamená, že tento kanál je možno využívat jak pro soustružení tak frézování a vrtání v ose i mimo ni [51]. Poslední úprava spočívá v definování osy jakožto rotační pro poháněný nástroj pod označením 52 206 [51].

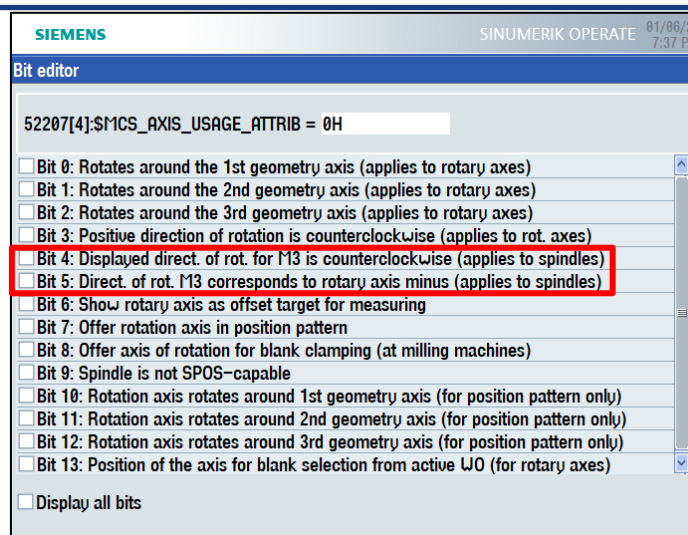
Tab. 22 Indexace 2 kanálu.

„Channel MD“ 2 data	Označení podle 20 080[]	Přiřazený index podle 20 070[]	Pořadí 20 070[]
20070[0]	X	7	1
20070[1]	Z	9	2
20070[2]	SP1	6	3
20070[3]	Y	8	4
20070[4]	SP4	10	5

Pro nově vytvořenou osu je nutné ještě upravit parametry určující kladný směr rotace. Toto nastavení je skryto pod označením 52 207, kde je možné provést nastavení podle vzoru prvního kanálu jednoduchým přepisem na určitou hodnotu H, nebo se dvojitým kliknutím na tento řádek otevře menu bitové konfigurace rotace (Obr. 26). Aktivací 4. a 5. bitu se zajistí směr pozitivní rotace jako M4 neboli ve směru hodinových ručiček (Obr. 25) [51].

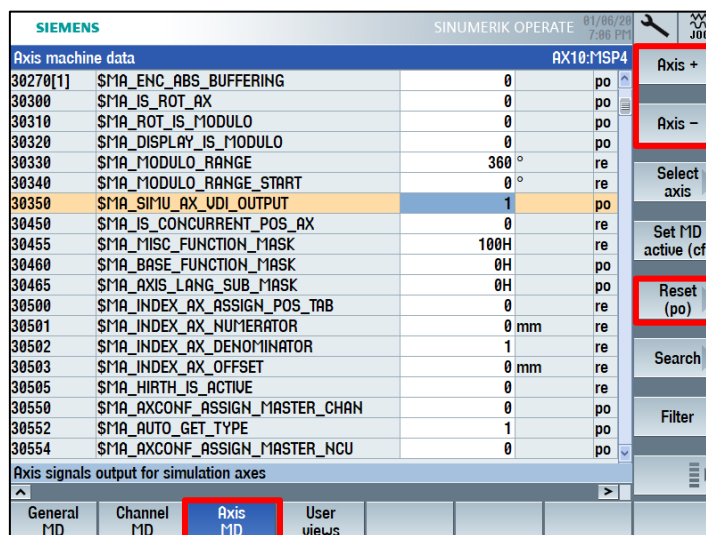


Obr. 25 Směr rotace vřetena [51].



Obr. 26 Bitový editor MS4.

Další parametry osy s indexem 10 je třeba provést v konfiguraci dané osy a označit ji za rotační i v nastavení „Axis MD“. V tomto menu, lze jednotlivé osy volit pomocí dlaždic „Axis“ + nebo -, viz Obr. 27. Aby názvy os byly zobrazeny podle dříve provedených změn rozeepsaných v Tab. 16, je třeba provést „Reset (po)“ [51].



Obr. 27 Sinumerik nastavení „Axis MD“.

V menu se vybere konkrétní osa (AX10=MSP4) a provedou se změny, viz Tab. 23. Řádky 30 300, 30 310 a 30 320 určují rotaci osy, zatímco pod číslem 35 000 se nachází finální definice osy [51]. Zda se jedná o vřeteno nebo rotační nástroj, kde číslice 3 určuje rotační nástroj principiálně stejně jako v případě nastavení v „Channel MD“ 52 206[4] [51]. Pod označením 35 040 se nachází definice pro restart vřetena. Nastavením na hodnotu 2 se definuje, že restart dané osy je možný pouze prostřednictvím PLC, to znamená, že funkce M30 neprovede restart dané osy. Po těchto krocích je poháněný nástroj z větší části nakonfigurován. Pro kompletní nastavení dolního nástrojového revolveru je nutné definovat Y osu včetně „TRANSMIT“ a „TRACYL“ funkce.

Tab. 23 Nastavení rotačního nástroje (osa MSP4).

„Axis MD“	Původně	Nově	Význam
30 300	0	1	Určení rotační osy
30 310	0	1	Modulární transformace rotační osy
31 320	0	1	Zobrazení osy jako rotační
35 000	0	3	Definice rotační osy a přiřazení indexu
35 040	0	2	Aktivace vřetena po restartu

4.3 Nastavení proti-vřetena

Poslední fází vytvoření koncepce stroje podle vzoru Index Traub C100 je konfigurace proti-vřetena. Stejně jako při definici ostatních os je i zde třeba začít přiřazením pořadím a označením v „General MD“, viz Tab. 16. Nastavení proti-vřetena bude pouze pro horní revolver („Channel 1“), protože pro časovou studii je potřeba pouze jeden kanál pro obrábění v proti-vřetenu, na rozdíl od vřetena hlavního, kde je žádoucí mít definované oba kanály. Začátek definice je podobný všem předchozím, a to specifikací názvu a indexu os (Tab. 24).

Tab. 24 Nastavení „Channel MD“ pro proti-vřeteno (první kanál).

„Channel MD“	Původně	Nově	Význam
20 070[5]	0	4 (MSP2)	Indexace v hlavní nabídce stroje
20 070[6]	0	11 (Z3)	Indexace v hlavní nabídce stroje
20 080[5]	Y	SP2	Označení osy pro vybraný kanál
20 080[6]	U	Z3	Označení osy pro vybraný kanál
52 206[5]	0	5	Význam osy
52 206[6]	0	7	Význam osy
52 207[6]	0H	30H	Směr rotace osy

Tab. 25 Doplnující indexace 1 kanálu.

„Channel MD“ 1 data	Označení podle 20 080[]	Přiřazený index podle 20 070[]	Pořadí 20 070[]
20 070[5]	MSP2	4	6
20 070[6]	Z3	11	7

Jak je zřejmé z Tab. 24 a Tab. 25 nastavení je velmi podobné jako při vytváření poháněného nástroje. Rozdíl je v definici významu osy MSP2, kde (52 206[5]) je přepsána na číslici 5, což označuje proti-vřeteno a v případě označení Z3 (52 206[6]) je provedena změna na číslici 7, jakožto Z osa proti-vřetena [51]. Směr kladné rotace je zvolen stejný jako pro poháněný nástroj nebo hlavní vřeteno, tedy ve směru hodinových ručiček kladný směr (M4).

Další nastavení se již odehrává v kartě „Axis MD“, kde jsou provedeny podobné úpravy jako pro rotační nástroj, viz Tab. 26. Jediný rozdíl spočívá v nastavení definice osy 35 000 jako vedlejší vřeteno, tedy na hodnotu 2 [51]. Dalším rozdílem je kolonka 34 000, která je primárně nastavena na 1 nově na 0. Její význam spočívá v restartu referenčního bodu, kde změnou na hodnotu 0 tato funkce se deaktivuje a při každém spuštění bude vřeteno ve stejné pozici jako po ukončení programu [51].

Tab. 26 Nastavení proti-vřetena (MSP2) v „Axis MD“.

„Axis MD“ MSP2	Původně	Nově	Význam
30 300	0	1	Určení rotační osy
30 310	0	1	Modulární transformace rotační osy
31 320	0	1	Určení osy jako rotační osy
34 000	1	0	Nastavení referenčního bodu
35 000	0	2	Definice rotační osy a přiřazení indexu
35 040	0	2	Aktivace vřetena po restartu

Finálně provedený restart již umožní využívat všechny přidané osy. V případě, že se po všech úpravách nezobrazí žádné chybové hlášení a v grafickém simulátoru budou v hlavní nabídce i v „machine configuration“ menu všechny osy zobrazeny stejně jako na Obr. 28, je nastavení provedeno správně [51].

Machine axis	Index	Name	Type	Drive No.	Identifier	Motor Type	Channel
1	X1	Linear					CHAN1
2	Y1	Linear					CHAN1
3	Z1	Linear					CHAN1
4	MSP2	Spindle					CHAN1
5	MSP3	Spindle					CHAN1
6	MSP1	Spindle					CHAN1
7	X2	Linear					CHAN2
8	Y2	Linear					CHAN2
9	Z2	Linear					CHAN2
10	MSP4	Spindle					CHAN2
11	Z3	Linear					CHAN1

Obr. 28 Sinumerik přehled nastavení.

4.4 Definice limitních parametrů strojního zařízení

Aby časová studie byla věrohodná, je nutné upravit strojní parametry vstupující do simulace, které mají přímý vliv na obráběcí proces. Tím jsou myšleny limitní otáčky rotačních os, maximálním rychloposuvu lineárních os a maximální zrychlení všech os. Jako referenční byly zvoleny MSP2 a Y2, jakožto nově vytvořené. Nicméně je nutné provést změny u všech os podle skutečných parametrů stroje. Proces začíná v kartě „Axis MD“, kde je zvolena vybraná osa a provedou se změny, které jsou vypsány v Tab. 27 a Tab. 28.

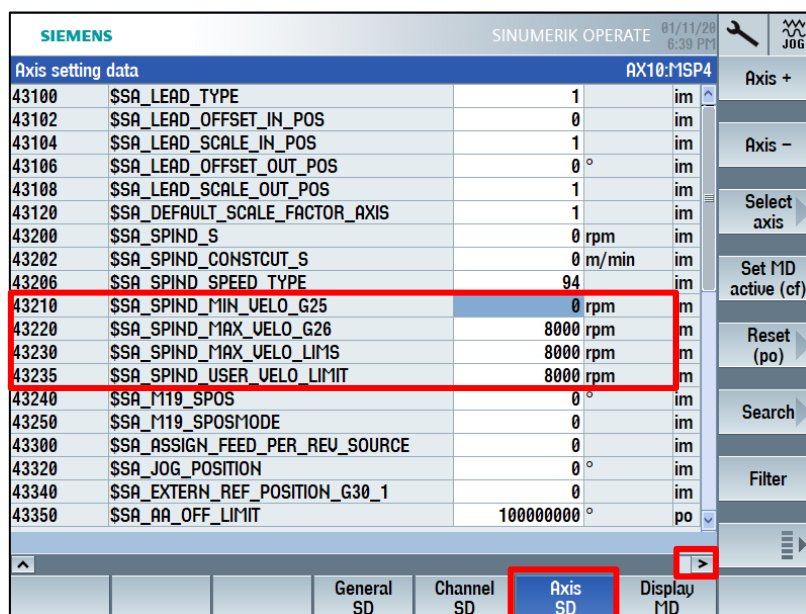
Tab. 27 Limitní parametry Y2.

„Axis MD“ Y2	Původně	Nově	Význam
32 000	10 000	15 000	Maximální rychlost osy [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
32 010 32 020	různě	15 000	Nastavení rychloposuvu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
32 040	2,5	60	Maximální rychloposuv na otáčku [mm]
32 050	0,5	5	Maximální posuv na otáčku [mm]
32 300[0-5]	různě	10	Maximální zrychlení osy [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Tab. 28 Limitní parametry MSP2.

„Axis MD“ MSP2	Původně	Nově	Význam
35 100	500	7 000	Maximální otáčky vřetena [min^{-1}]
35 110[0-5] 35 130[0-5]	různě	7 000	Maximální otáčky převodovky [min^{-1}]
35 120[0-5]	různě	1	Minimální otáčky převodovky [min^{-1}]
35 550[0-5]	různě	7 000	Max. otáčky pro vrtání a závitování [min^{-1}]
35 200[0-5] 35 210[0-5]	100	1500	Maximální zrychlení vřetene [s^{-2}]

Poslední změna se týká osy s označením Z3 (lineární osa proti-vřetena), pro niž je nutné určit počáteční polohu. V případě ignorace tohoto nastavení budou vřetena při spuštění simulace na stejném místě (budou se překrývat). Tento parametr se nachází pod číslem 52 230, kde se zvolí počáteční hodnota Z osy vůči nulovému bodu G54 [51].



Obr. 29 Sinumerik konfigurace „setting data“.

Mohlo by se zdát, že je nastavení již kompletní, je ovšem vhodné přednastavit programové omezující limity všech os. Tato konfigurace se již nenachází v „machine data“, nýbrž v „setting data“. Přepínání mezi nastaveními se nachází pod malou šipkou v pravé dolní části grafického rozhraní, viz Obr. 29, kde je následně možné upravit hodnoty minimálních a maximálních rychlostí rotačních os (43 210; 43 220, 43 230 a 42 240) [51].

Tímto způsobem je vhodné upravit všechny rotační (dle vzoru Tab. 28) a lineární osy (dle vzoru Tab. 27) včetně již přednastavených os. Vyplněná data musí souhlasit s katalogovými daty, aby následná časová studie odpovídala realitě. Správné nastavení limitu je možné ověřit v kartě „menu select“ → „parameters“ → „setting data“ → „spindle data“, kde jsou shrnuty limity rotačních os (Obr. 30). Čísla rotačních os musí souhlasit s nastavením v „axis MD“ 35 000.

The screenshot displays the CNC control interface. At the top, a yellow header bar shows 'CHAN1 Spindles'. Below it is a table with the following data:

Spindle	Minimum	Maximum	Limit. G96, G961, G97	Resulting max. limit	Resulting min. limit	
S1	0	7000	7000	7000	0 rpm	
S2	0	7000	7000	7000	5 rpm	
S3	0	8000	8000	8000	0 rpm	

Below the table is a large empty light blue area. To the right of the table, there are several vertical panels:

- A panel labeled 'Working area limit.' with a red box around the 'Spindle data' button.
- A panel labeled 'Spindle chuck data'.
- A panel labeled 'Data lists'.
- A panel labeled 'SD Setting data' with a red box around it.

On the far right, there is a grid of function buttons including: MACHINE, PROGRAM, OFF SET, PROGRAM MANAGER, ALARM, CUSTOM, MENU SELECT, MENU FUNCTION, MENU USER, ALARM CANCEL, NEXT WINDOW, PAGE UP, GROUP CHANNEL, SELECT, END, PAGE DOWN, and HELP.

Obr. 30 Sinumerik nastavené limity.

5 ČASOVÁ STUDIE OBRÁBĚNÍ

K zjištění časové náročnosti výroby ozubeného hřídele byly využity dva přístupy. Výpočtová verze je čistě teoretická a zahrnuje pouze jednotkový strojní čas včetně nájezdu a přejezdu. Zbylé parametry musí být odhadnuty určením koeficientu, kterým finální hodnoty jsou vynásobeny, aby byly zahrnuty i pohyby mimo záběr nástroje jako např.: rychloposuvy do počátečního bodu, výjezd z řezu, zpomalený nájezd do řezu a další pohyby nekonajících řezný proces. Druhý již přesnější přístup spočívá ve vytvoření konkrétního NC programu s přesnými parametry definovanými dle vybraného strojního zařízení. Taková studie již zahrnuje celkový strojní čas a je mnohem věrohodnější. Ze zkušenosti lze tvrdit, že takto získaný čas se od reality bude lišit v cca 10 %.

5.1 Výpočtová studie

Provedené výpočty vycházejí z obecně známých vztahů. Vždy budou naznačeny pouze vzorové výpočty například druhého řezu hrubování, frézování jedné plošky nebo tváření závitu. Ostatní výpočty jsou analogické a kompletní řezné podmínky jsou vypsány v technologickém postupu (Příloha č. 3). Ve všech soustružnických operacích byla využita konstantní řezná rychlost, zatímco pro frézování a závitování konstantní otáčky nástroje.

5.1.1 Strojní čas soustružení

Výpočet podélného hrubování je omezen na druhý hrubovací řez. Prvně se vypočtou otáčky pro konkrétní průměr (vztah 11) [56].

$$n = \frac{v_c \cdot 1\,000}{\pi \cdot D_c} \quad 11$$

kde: n $[\text{min}^{-1}]$ otáčky nástroje,
 D_c $[\text{mm}]$ obráběný průměr,
 v_c $[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$ řezná rychlost.

$$n = \frac{327 \cdot 1\,000}{\pi \cdot 28} \approx 3\,717 \text{ min}^{-1}$$

Další část spočívá ve výpočtu dráhy včetně nájezdu a přejezdu nástroje (vztah 12) [56].

$$L = l_a + l + l_u \quad 12$$

kde: L $[\text{mm}]$ celková obráběná délka,
 l_n $[\text{mm}]$ náběh,
 l $[\text{mm}]$ řezná část,
 l_p $[\text{mm}]$ přeběh.

$$L = 2 + 36 + 0 = 38 \text{ mm}$$

Takto získaná hodnota je vložena do vzorce pro výpočet jednotkového strojního času (vztah 13) [56].

$$t_{AS} = \frac{L}{f \cdot n} \quad 13$$

kde: t_{AS} [min] jednotkový strojní čas,
 L [mm] celková obráběná délka,
 n [min⁻¹] otáčky nástroje,
 f [mm] posuv na otáčku.

$$t_{AS} = \frac{38}{0,35 \cdot 3 \cdot 1717} \approx 0,029 \text{ min} \approx 1,75 \text{ s}$$

Obdobným způsobem se provedou výpočty strojního času všech hrubovacích řezů. Součet je celkový hrubovací čas. Jednotlivé řezy se liší jak hodnotou otáček, tak řeznou délkou. Soustružení čela již disponuje jiným postupem, protože během řezu se mění průměr, a tím také otáčky [56]. Výpočet je zahájen stejně jako pro podélné hrubování zjištěním hodnoty – otáček na počátečním průměru [56].

$$n = \frac{v_c \cdot 1\,000}{\pi \cdot D_c} \quad 14$$

kde: n [min⁻¹] otáčky nástroje,
 D_c [mm] obráběný průměr,
 v_c [m.min⁻¹] řezná rychlost.

$$n = \frac{327 \cdot 1\,000}{\pi \cdot 42} \approx 2\,478 \text{ min}^{-1}$$

Ze stejného vzorce je vyjádřen průměr, v němž jsou otáčky maximální (vztah 15) [56].

$$d_{\max} = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot n} \quad 15$$

kde: $D_{\max}$ [mm] obráběný průměr s maximálními otáčkami,
 n [min⁻¹] otáčky nástroje,
 v_c [m.min⁻¹] řezná rychlost.

$$d_{\max} = \frac{327 \cdot 1\,000}{\pi \cdot 7\,000} \approx 14,86 \text{ mm}$$

Výsledný čas je roven součtu času na dráze se zvyšujícími se otáčkami a dráze od průměru s již konstantními otáčkami [56].

$$t_{AS} = \frac{L}{f \cdot n} \quad 16$$

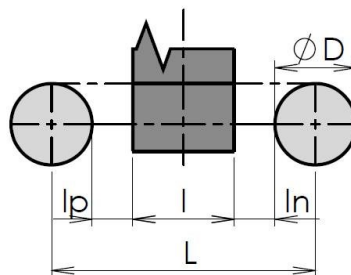
kde:	t_{AS} [min]	jednotkový strojní čas,
	L [mm]	celková obráběná délka,
	n [min^{-1}]	otáčky nástroje,
	f [mm]	posuv na otáčku.

$$t_{ASC1} = \frac{\frac{(40+2) \cdot 14,86}{2}}{0,3 \cdot \frac{7\,000 + 2\,478}{2}} \approx 0,01 \text{ min} \approx 0,60 \text{ s}$$

$$t_{ASC2} = \frac{\frac{14,86}{2}}{0,3 \cdot 7\,000} \approx 0,004 \text{ min} \approx 0,24 \text{ s}$$

5.1.2 Strojní čas frézování

Postup pro výpočet strojního času frézování je podobný jako pro soustružení. Hlavními rozdíly jsou konstantní otáčky a zadaný posuv na zub, nikoliv na otáčku. Výpočet je stejný jak pro srážecí, tak stopkovou frézu. Řezný průměr srážecí je volen v rozmezí doporučeném od výrobce a otáčky nástroje jsou vypočteny pro průměr 10 mm. Rovinné plochy budou vyrobeny na jeden řez, protože na obráběný povrch není požadována zvýšená přesnost ani není požadavek na lepší drsnost povrchu. Proto je šířka záběru a_p volena 10 mm a max. hloubka řezu a_e 1,25 mm. Nájezd i přejezd je volen jako pro dokončovací řez, tedy celý průměr frézy, přeběh (l_p) a náběh (l_n), který byl zvolen 1 mm (Obr. 31 a vztah 17) [16, 56].



Obr. 31 Čelní frézování [16].

$$L = D + l + l_n + l_p \quad 17$$

kde:	L [mm]	celková obráběná délka,
	D [mm]	průměr frézy,
	l_n [mm]	náběh,
	l [mm]	obráběná část,
	l_p [mm]	přeběh.

$$L = 12 + 7,66 + 1 + 1 = 20,66 \text{ mm}$$

Výpočet otáček je doprovázen již známým vztahem s rozdílem, že je zde dosazen průměr frézy [56].

$$n = \frac{v_c \cdot 1\,000}{\pi \cdot D_f} \quad 18$$

kde: n $[\text{min}^{-1}]$ otáčky nástroje,
 D_f $[\text{mm}]$ průměr frézy,
 v_c $[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$ řezná rychlost.

$$n = \frac{225 \cdot 1\,000}{\pi \cdot 12} \approx 5\,968 \text{ min}^{-1}$$

Jak již bylo zmíněno, výrobci udávají posuv na zub, nikoliv na otáčku. Pro výpočet strojního času je třeba tuto hodnotu dopočítat [56].

$$f = f_z \cdot z \quad 19$$

kde: f $[\text{mm}]$ posuv na otáčku,
 z $[-]$ počet zubů frézy,
 f_z $[\text{mm}]$ posuv na zub.

$$f = 0,0763 \cdot 6 \approx 0,46 \text{ mm}$$

Vztah pro strojní čas je stejný jako v předchozích případech (vztah 20) [56].

$$t_{AS} = \frac{L}{f \cdot n} \quad 20$$

kde: t_{AS} $[\text{min}]$ jednotkový strojní čas,
 L $[\text{mm}]$ celková obráběná délka,
 n $[\text{min}^{-1}]$ otáčky nástroje,
 f $[\text{mm}]$ posuv na otáčku.

$$t_{AS} = \frac{20,66}{0,46 \cdot 5\,968} \approx 0,008 \text{ min} \approx 0,48 \text{ s}$$

Takto vypočtený čas platí pro obrobení dvou protilehlých stran současně, tedy dvojnásobek je roven kompletnímu obrobení čtyřhranu.

5.1.3 Strojní čas vrtání a závitování

Při výpočtu jednotkového strojního času pro vrtání je třeba určit průměr, pro nějž budou vypočteny ideální otáčky, protože vrták má různé průměry v řezu, a potom je šířka záběru ostří různá [56]. Obvykle by se zvolil průměr, který je nejdéle v řezu tedy 7,45 mm, nicméně zde jsou otáčky již dány z důvodu sdružené operace a výroba otvoru je podmíněná hrubovací operací, konkrétně druhým řezem. Proto otáčky jsou již dány na hodnotu $3\,717 \text{ min}^{-1}$, řezné podmínky jsou následně upraveny, aby čas v řezu soustružnického nože a vrtáku byl přibližně stejný.

$$t_{AS} = \frac{L}{f \cdot n} \quad 21$$

kde:	t_{AS} [min]	jednotkový strojní čas,
	L [mm]	celková obráběná délka,
	n [min^{-1}]	otáčky nástroje,
	f [mm]	posuv na otáčku.

$$t_{AS} = \frac{18}{0,17 \cdot 3 \cdot 717} \approx 0,028 \text{ min} \approx 1,7 \text{ s}$$

Výpočet strojního času pro tvářený závit je analogický s vrtáním s rozdílem v posuvu, který je roven stoupání závitu.

5.2 Dodatečné výpočty

Vzhledem ke sdruženým operacím a zvýšenému zatížení stroje během tohoto obrábění je nutné zopakovat výpočet potřebného výkonu stroje stejně jako v kap. 2 podle vztahů 1 až 7. Materiálové charakteristiky zůstávají stejné. Je zde pouze změna v řezných parametrech vrtací operace, jinak se jedná o analogický výpočet. Vypočtený potřebný výkon pro soustružení a vrtání (jako v kap. 2) je téměř totožný s předchozím výpočtem. Potřebný výkon pro sdruženou operaci je roven 14,12 kW. To znamená, že výkonové parametry strojního zařízení jsou dostačující.

Po kompletním obrobení jsou na obrobku prováděny další operace jako obrábění ozubení, broušení a chemicko-tepelné zpracování. Vzhledem k CHTZ je nutné provést dokončování s přídatky nutnými pro finální obrobení tolerovaných ploch. Proto je i drsnost povrchu při dokončení vedlejší, protože povrch mírně nabude a celá součást může být trochu deformovaná [11]. Přesto je vhodné, aby povrch byl alespoň v „běžné“ kvalitě z důvodu následné manipulace s obrobkem a upínání za obrobený průměr. Za mnohem podstatnější je považována soustřednost průměrů d20 a d39h11 vzhledem k ose obrobku kvůli upnutí za průměr d20 při obrábění ozubení. Soustřednost je možné ovlivnit kvalitou upnutí a vedením nástrojů. Vzhledem k tomu, že se jedná o nový stroj, který by neměl mít problémy s upnutím nebo vedením revolverů, lze předpokládat, že soustřednost těchto dvou průměrů bude vyhovující pro následující operace. Tento předpoklad bude nutné ověřit opakovaným měřením během odladění a výroby. Do výpočtu teoretické drsnosti R_a a R_z vstupují dva hlavní parametry a to: velikostí posuvu a rádius špičky nástroje, viz vztahy 22 a 23 [6, 56].

$$R_a = 0,0321 \cdot \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad 22$$

kde:	R_a [μm]	střední aritmetická odchylka profilu,
	f [mm]	posuv na otáčku,
	r_ϵ [mm]	poloměr špičky nástroje.

$$R_a = 0,0321 \cdot \frac{0,15^2}{0,4} \approx 0,0018 \text{ mm} \approx 1,8 \mu\text{m}$$

$$R_z = 0,125 \cdot \frac{f^2}{r_\varepsilon} \quad 23$$

kde: R_z [μm] výška nerovnosti povrchu,
 f [mm] posuv na otáčku,
 r_ε [mm] poloměr špičky nástroje.

$$R_z = 0,125 \cdot \frac{0,15^2}{0,4} \approx 0,007 \text{ mm} \approx 7 \mu\text{m}$$

Z vypočtených hodnot teoretických drsností válcových a čelních ploch lze potvrdit, že výsledná drsnost je zcela akceptovatelná, přestože reálně budou mít plochy rozdílnou kvalitu povrchu oproti výpočtu, takto dokončené obrobky mohou být dále zpracovány bez jakýchkoliv problémů. Neboť tolerované rozměry budou následně dokončeny broušením a netolerované rozměry mají předepsanou drsnost R_a 3,2 případně 6,3 μm .

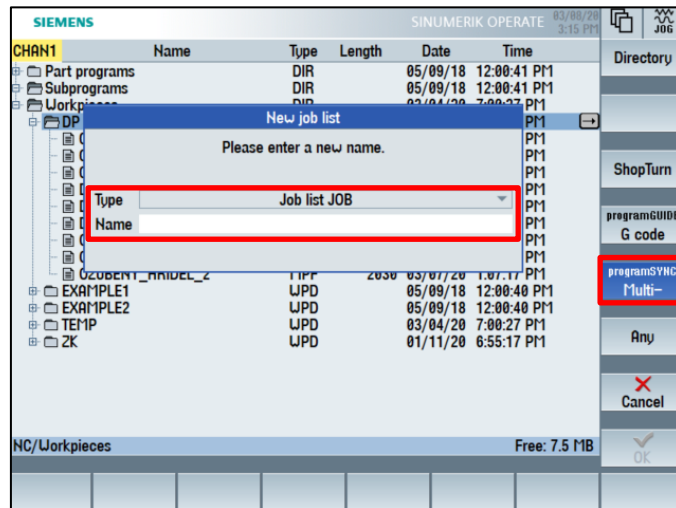
Finální čas každé operace byl vynásoben koeficientem 1,5 jakožto zohlednění nájezdů, přejezdů do počáteční polohy, všechny rychloposuvy a další pohyby, které jsou generované obráběcími cykly. K součtu strojních časů byly následně ještě připočteny výměny nástrojů 2 s na každou výměnu a 1,5 s na každé roztočení vřetene. Kompletní přehled parametrů a strojních časů 10. a 20. operace, viz TP (Příloha č. 3), zkráceně Tab. 29. V tabulce jsou k dané operaci přiřazeny pouze relevantní parametry, to znamená, že u dokončování není předpokládán nadměrný potřebný výkon v porovnání s hrubováním [5].

Tab. 29 Obráběcí časy jednotlivých operací.

Operace	Typ obrábění	Strojní čas [s]	Strojní čas x 1,5 [s]	Potřebný výkon [kW]	Výměna nástroje	Roztočení vřetena
10/10	Hrubování	7,1	10,7	12,66	1	1
10/10	Vrtání	1,7	2,6	1,47	0	0
10/20	Dokončování vnější	6,0	9,0		1	0
10/30	Závitování	0,7	1,1		1	1
10/40	Frézování (kompletní)	0,9	1,3		1	1
10/50	Srážení hrany (kompletní)	1,4	2,1		1	1
10/60	Upichování	6	9		1	1
20/10	Hrubování	1,6	2,4	12	1	1
20/20	Dokončování	2,2	3,3		1	0
20/30	Navrtání	1,4	2,1		1	0
Počet změn					9x2 s	6x1,5 s
Celkový strojní čas [s]		29	43,5		+18	+9
Celkový strojní čas potřebný pro obrobek [s]		22,1	33,2		+12	+7,5

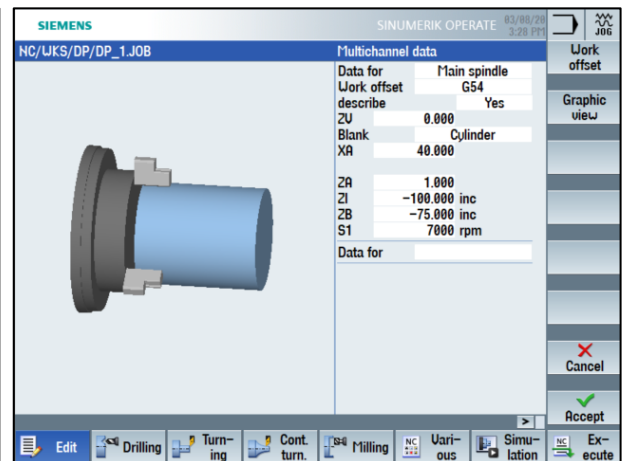
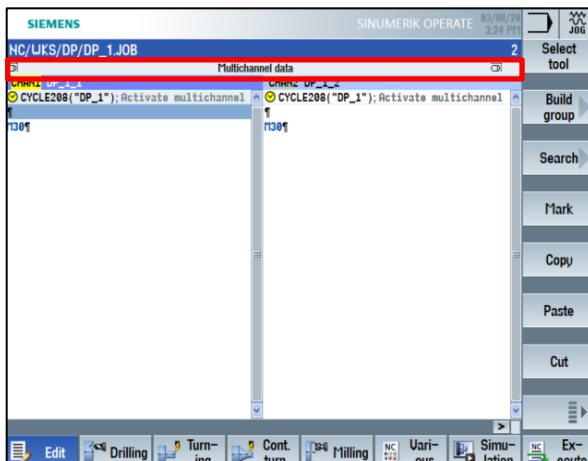
5.3 Tvorba NC programu

Tvorba samotného NC programu se ve své podstatě neliší od programování jednokanálových soustruhů, přesto jsou zde drobné rozdíly, které je nutné znát. Pro dvoukanálový soustruh jsou vytvořeny dva hlavní programy (MPF), které jsou spojeny přes příkaz 208 a hlavní programový soubor (JOB). To znamená, že jeden program je tvořen třemi soubory. Během samotného zakládání je nutné vybrat kolonku „program SYNCMULTI-“ (Obr. 32). Po vyplnění názvu programu budou vygenerovány tři soubory s hlavičkou (s cyklem 208).



Obr. 32 Tvorba NC programu (založení).

Při tvorbě NC programu je nutné si dát pozor na následující situace. Vstupní rozhraní je stejné jako při tvorbě programu jednokanálového soustruhu, ale je rozděleno pro každý kanál zvlášť. První krok je definice polotovaru pro hlavní vřeteno, protože je společné pro oba kanály. Polotovár není určen běžně známou funkcí přes kartu „various“, ale dvojitým kliknutím na panel „multichannel data“ (Obr. 33). Po vstupu do multi-kanálových dat je již postup pro definici polotovaru stejný jako při známé funkci „workpiece“ (Obr. 34).



Obr. 33 Tvorba NC programu (polotovár 1). Obr. 34 Tvorba NC programu (polotovár 2).

Takto bude ovšem nastaven pouze polotovár pro hlavní vřeteno, které je sdílené oběma kanály. Pro obrábění v proti-vřeteno je již polotovár definovaný běžným způsobem (Obr. 34) pouze v kanálu, pro nějž je proti-vřeteno definováno (1. kanál). Z Obr. 35 si lze všimnout více

funkcí typických pro vícekanálové obráběcí stroje s více rotačními osami. Konkrétně „setms“ funkce, jež nastavuje danou osu jako hlavní pro následující řádky [52]. Číslo uváděné ve funkci „setms“ koresponduje s pořadím určeným během konfigurace stroje, konkrétně pod 35 000 v nastavení „MD axis“. Další typický příkaz je „WAITM“, pomocí nějž je daný kanál zastaven a čeká na druhý kanál [52]. Program bude dále pokračovat, jakmile se oba kanály budou nacházet na tomto příkazu [52]. Tímto způsobem lze vzájemně zkoordinovat oba revolvery pro sdružené operace. Po první simulaci se u funkce „WAITM“ zobrazí čas čekání na druhý kanál. Pomocí získaných časů lze dále optimalizovat dráhy a sled operací, aby čekání bylo co nejkratší a oba revolvery byly maximálně využity. Další ze zvláštností, na niž je třeba upozornit, je nutnost aktivace (roztočení) vřetena na obou kanálech během sdružených operací. To znamená, že funkce M3, včetně řezných parametrů, se bude nacházet v obou programech [52]. Kompletně vygenerovaný program včetně kontur viz Příloha č. 4 a 5.

```

CHAN1 OZUBENY_HRIDEL_1
CYCLE208("OZUBENY_HRIDEL"); Activate mul
g90 g71 g54 g18 g94 diamond
msg("option")
G0 X300 Z100 Y0
SETMS(1); MAIN SPINDLE
MSG("CHANGE TOOL DRILLING")
M6 T="DRILL_D7,45" D1 ; RIGHT DRILL
MSG("DRILLING") - DRILLING WITH 2CHANNEL
WAITM(1,1,2)
G0 X0
G0 Z5
M3 G96 S327 M8
F0.17 ; FEEDRATE FOR DRILLING
CYCLE81(5,1,1,-17,,0.1,0,1,12)
G0 X300 Z100
WORKPIECE(... "CYLINDER", 4096, 0.1, -40, -20
SETMS(2) ; COUNTER SPINDLE

```

Obr. 35 NC program 1. kanál.

Vzhledem k použití geometrie Coroturn Prime bylo nutné upravit také systém vytvoření kontur pro dokončování. V závěru se jedná pouze o určení startovacího bodu a posloupnost tvořené kontury. Jinými slovy kontura byla vytvořena pro zpětné obrábění, tedy s počátkem od vřetena směrem k čelu obrobku. K takto vytvořené kontuře je zapotřebí také správně definovat nástroje, směr hlavní řezné hrany a konečně také směr obrábění v programovatelných cyklech [52].

Samotný program je vytvořen jako kombinace cyklů a ISO kódu, který je využit pro usnadnění programování a lepší kontrolu pohybů. Například během frézování rovinných ploch, kde se po dokončení frézování vřeteno otočí o 90° a nástroj je transferován do původní startovací polohy. Díky ISO kódu je jednodušší kontrolovat pohyb vůči kolizi, protože při využití cyklu pro frézování by nástroj byl naveden do počáteční polohy nejkratší cestou (po přímce) [52]. Nejedná se o jednodušší způsob, neboť oba způsoby jsou možné a v závěru rovnocenné, nicméně přímé programování je v tomto případě (a několika dalších pohybech) přehlednější.

5.4 Simulační studie

Jak již bylo zmíněno výše pomocí simulace, lze získat strojní čas velmi blízký skutečnému. Takto vytvořenou simulaci je třeba brát s rezervou a uvažovat možnou změnu řezných podmínek při finálním odladění nebo úmyslné omezení maximálních otáček vřeten, pro prodloužení jejich životnosti.

Celkově byly vytvořeny dva NC programy, jeden pro nově zvolený koncept dvou revolverů se dvěma vřeteny (Index C100), druhý pro dvou-vřetenový, jedno-revolverový soustruh (DMG Mori NLX 1500). Konfigurace pro DMG v grafickém rozhraní SinuTrain byla vytvořena pro variantu s nižšími parametry, aby bylo možné částečně odhadnout strojní čas také pro současné řešení (Emco Maxxturn 65). Oba NC programy byly vytvořeny pro upravenou konfiguraci z dostupných vzorů se stejnými nástroji a řeznými podmínkami, tak aby odpovídaly co nejvíce skutečnosti. Výsledek není nikterak překvapivý a je blízký vypočteným hodnotám. Je třeba zdůraznit, že konfigurace byly nastaveny na limitní parametry a v obou případech je stroj na těchto limitech využíván. Výpočet strojního času pro NLX je analogický s výpočtem provedeným v kap. 5.1 jen s rozdílem, že jsou zde započítány všechny časy do celkového strojního času. To znamená, že do finálního strojního času je započtena vícekrát výměna nástrojů, vrtání, frézování každé plochy zvlášť a práce na proti-vřetenu.

Tab. 30 Strojní časy porovnání.

	Index Traub C100	DMG Mori NLX 1500
Strojní čas ze simulace [s]	58	96
Vypočtený strojní čas [s]	53	87

Z Tab. 30 je zřetelné, že sdružení několika operací a souběžného využití proti-vřetena činí úsporu v čistém strojním času 38 s, což v případě sériové výroby znamená značnou úsporu na výrobních nákladech. Rozdíl mezi vypočteným a simulovaným časem je v případě stroje DMG výraznější, protože do výpočtu není započítána výměna obrobku mezi vřeteny a pohyby spojené s tímto úkonem.

V simulaci pro C100 je promítnut také čas vzájemného čekání. Tento údaj dává jasnou představu, kde může být prostor pro optimalizaci pohybů, řezných podmínek nebo změně pořadí operací. Po simulaci je zjevné, že sled operací je proveden správně, přesto vznikly situace, kdy kanály na sebe čekají. Příkladem takové situace je sdružená operace vrtání/hrubování, kdy horní revolver je připraven a čeká na druhý hrubovací řez. Druhým prostojem horního revolveru je prvotního najetí frézy do počáteční pozice, kdy první kanál čeká na druhý. Pro způsob výroby to znamená, že veškerá práce na vedlejším vřetenu je již hotová a první kanál čeká celkem 3,45 s na druhý. Následující operace jsou již znovu synchronizovány. Po dokončení sdružených frézovacích operací je první kanál hotov a čeká na druhý. Zde je poslední časový úsek, u kterého je prostor pro optimalizaci, a to upichovací cyklus, který trvá 16 s včetně výměny nástrojů a roztočení vřetena a jedná se tak o nejdelší operaci. Během upichování dochází k předání mezi vřeteny a s ním k pochopitelnému omezení maximálních otáček, snížení posuvu a otáček na průměru blízkému nule.

6 DODATEČNÉ NÁVRHY

Při porovnání výsledků z časové studie je zřetelná časová úspora, přesto se zde nachází mezery pro další optimalizaci, jež se týkají organizace nástrojů a obráběcího procesu. Finální čas pro vyrobení kusu již nebude značně odlišný od získaného času ze simulace v případě, že budou použity stejné řezné podmínky. Navrhované změny se týkají nástrojových držáků, úprav v programu, případně systému spravování nástrojů.

6.1 Sesterský nástroj

Oba revolvery disponují 14 pozicemi pro upnutí nástroje [18]. Tento potenciál není ani zdaleka využit, v obou případech je využito pouze 6 nástrojů. Proto zde vystává možnost vytvoření tzv. sesterského nástroje a prodloužení doby nepřerušovaného provozu stroje. Teoreticky se tedy nabízí vytvořit duplikát všech nástrojů. Nicméně je dosti zbytečné tvořit duplikovaný nástroj pro např.: frézu, která je v řezu necelou sekundu a interval výměny hlavice bude dozajisté delší než pro hrubovací nebo dokončovací VBD. Proto je zde doporučeno vytvořit i dva takové nástroje pro nejvytíženější operace.

Postup pro založení sesterského nástroje je obdobný jako pro běžný nástroj se změnou ve sloupci ST, kde je nástroji přiřazeno tzv. duplo pořadí (Obr. 36) [52]. Sesterský nástroj musí mít stejný název jako primární, poté se nastaví, aby po určeném času v řezu byl nástroj „vyměněn“ a při dalším zastavení se vymění obě destičky současně [52].

TOA 1 Tool list								MAGAZIN		
Loc.	Type	Tool name	ST	D	Length X	Length Z	Radius		PI.	leng
1		ROUGHING_T80 A	1	1	55.000	39.000	0.800	←	95.0 80	12.0
2		FINISHING_T35 A	1	1	124.000	57.000	0.400	←	93.0 35	12.0
3		CUTTER_10	1	1	0.000	74.000	10.000	5		
4		CUTTER_3	1	1	0.000	74.000	3.000	3		
5		DRILL_10	1	1	0.000	50.000	10.000		118.0	
6		DRILL_3	1	1	0.000	50.000	3.000		118.0	
7		PLUNGE CUTTER_4	1	1	85.000	30.000	0.100		4.000	12.0
8		PLUNGE CUTTER_4A	1	1	60.000	30.000	0.100		4.000	8.0
9		CUTTER_1	1	1	0.000	50.000	1.000		90.0	
10		DRILL D7.45	1	1	0.000	40.000	7.450		140.0	
11		CNMG_120408	1	1	0.000	0.000	0.800	↓	95.0 80	11.0
12		CP-A1104-L5	1	1	0.000	0.000	0.400	↓	117.5 35	11.0
13		I9MT12T2R0200	1	1	0.000	0.000	2.250		90.0	
14		H3E58318-E10-10	1	1	0.000	0.000	10.000		90.0	
15		H3R23138-E12-12-02	1	1	0.000	0.000	12.000	0		
16		CNMG_120408	2	1	0.000	0.000	0.800	↓	95.0 80	11.0
17										

Obr. 36 Sinumerik sesterský nástroj.

6.2 Optimalizace řezného času

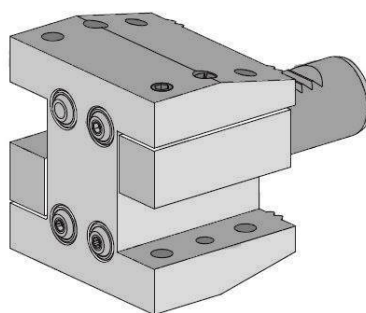
Jak již bylo zmíněno, sled operací a zvolené řezné podmínky vzhledem k vzájemným pohybům jsou téměř synchronizovány a revolvery na sebe vzájemně čekají minimálně. Výjimkou je prostoj horního revolveru 3,45 s při čekání na dokončení operace dolního revolveru před započítáním sdružené frézovací operace. Asi nejvýraznější prostoj se nachází hned u první sdružené operace, kdy horní revolver čeká na druhý hrubovací řez (od počátku upichování).

Čas prostoje před společným frézováním je vhodný kompenzovat snížením řezných parametrů při hrubovací operaci na vedlejším vřetenu. Především však rozložit ji na více řezů a tím snížit také potřebný výkon na vřetenu. Se snížením řezné rychlosti dojde k prodloužení obráběcího času, ale zvýšení životnosti nástroje. Tato změna nebude mít vliv na výsledný výrobní čas. Po této úpravě již dochází k menším prostojům a oba revolvery jsou více využity. Podobný postup je proveden na zbytkovém obráběcím řezu na vedlejším vřetenu, kde je snížena řezná rychlost a posuv. Obě změny, včetně přepočítaného strojního času, jsou zaznamenány v Tab. 31.

Tab. 31 Změny v řezných parametrech.

Operace: 20/10	Původní	Nově
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	327	300
Šířka záběru hlavního ostří a_p [mm]	3,2	2,4
Posuv na otáčku [mm]	0,35	0,3
Hlavní strojní čas [s] (x1,5)	1,6 (2,4)	2,5 (3,8)
Operace: 20/20		
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	362	300
Šířka záběru hlavního ostří a_p [mm]	0,8	0,8
Posuv na otáčku [mm]	0,4	0,2
Hlavní strojní čas [s] (x1,5)	0,15 (0,22)	0,33 (0,5)

Pro prvotní nevyužití horního revolveru se nabízí prostor pro společné hrubování pomocí obou kanálů. Tento návrh se potýká s určitými úskalími, jako např. že vrtání by muselo být provedeno hned s prvním hrubovacím řezem, aby byl prostor pro výměnu nástroje a vznikl tak prostor provést alespoň jeden společný řez. Toto řešení je více nepříznivé pro vrtání, u kterého se otáčky více oddalují od doporučených. S touto posloupností operací se zkracuje čas určený pro práci na vedlejším vřetenu, proto by bylo nutné využít dvojité nástrojový držák (Obr. 37), aby celý proces nebyl zdržován výměnou nástrojů. Bohužel takto vyráběné držáky disponují pouze externím přívodem řezné kapaliny, což nepodporuje celkový koncept automatizace a vysokotlaké čerpadlo by nevyužilo svůj potenciál. Také zde hrozí tvoření dlouhých třísek, protože trysky nesměřují přímo do místa řezu a hrozí tak ucpávání dopravníku, namotávání třísek na nástroj a snížení plynulosti chodu stroje [35]. Aby zůstal zachován primárně zvolený koncept, musel by se poptat dvojitý držák vyrobený na zakázku s vnitřním přívodem řezné kapaliny.



Obr. 37 Dvojitý nástrojový držák Index. [18].

6.3 Využití nových materiálových generací

V současnosti je snaha docílit co nejnižších výrobních nákladů a tomuto trendu se snaží podřídit také výrobci polotovarů, kteří vyvíjí nové materiály podobné těm současným za účelem snížit náklady spojené s obráběcím procesem. K použitému materiálu je nejvíce podobný, ve složení téměř ekvivalentní materiál s označením ESP65 od dodavatele Steeltec-group [31, 43]. Rozdíly spočívá v přidaném olovu, viz Tab. 32, kde jsou vypsáno chemické složení dodaných polotovarů [31]. Je známo, že olovo díky své nízké teplotě tání omezuje tření mezi třískou a nástrojem [55]. Zvýšená schopnost obrobitelnosti má za následek prodloužení životnosti nástrojů, snížením strojních časů a finálně snížení celkových nákladů na výrobu [31]. Nevýhodou nové generace této cementační oceli je její vyšší cena, která by měla být kompenzována snížením nákladů na výrobu a řezné nástroje [31].

Tab. 32 Porovnání chemického složení dodaných polotovarů ESP65 a 16MnCr5.

Materiál	C [hm %]	Si [hm %]	Mn [hm %]	P [hm %]	S [hm %]	Cr [hm %]	Pb [hm %]
16MnCr5	0,17	0,2	1,13	0,012	0,025	1,07	
ESP65	0,17	0,26	1,16	0,010	0,028	1,08	0,22

Před samotným doporučením oceli ESP65 bylo ověřeno, že struktura a tvrdost bude po cementaci a následném zušlechtnění shodná s 16MnCr5. Proto byly objednány polotovary od obou materiálů, aby byly provedeny metalografické výbrusy na zacementovaných vzorcích. Vzorky byly vloženy společně do vakuové cementační pece, následně zakaleny dusíkem a popuštěny. Parametry chemicko-tepelného zpracování jsou vypsány v Tab. 33. Proces byl třikrát zopakován za stejných podmínek pro vyloučení chyby cementace. Následně byly vzorky připraveny pro zkoušky tvrdosti a zjištění mikrostruktury stejným způsobem jako je popsáno v kapitole 1.1.

Tab. 33 Parametry chemicko-tepelného zpracování.

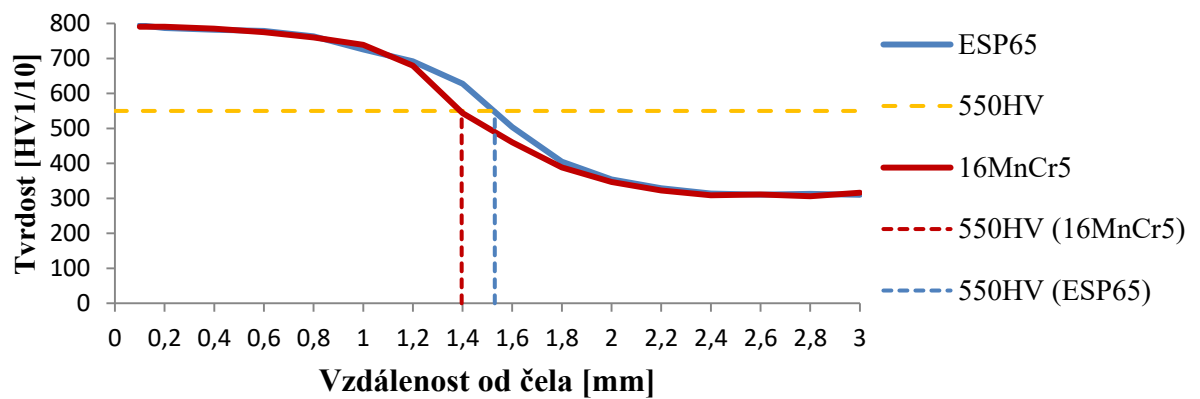
Cementační tlak [Pa]	1 000
Rychlost ohřevu na cementační teplotu [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$]	12
Cementační teplota [$^{\circ}\text{C}$]	980
Čas cementace [min]	297
Doba kalení [min]	10
Tlak plynného dusíku [MPa]	1,5
Teplota plynného dusíku [$^{\circ}\text{C}$]	25
Rychlost ohřevu na popouštěcí teplotu [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$]	17
Popouštěcí teplota [$^{\circ}\text{C}$]	170
Popouštěcí čas [min]	120
Doba chladnutí z popouštěcí teploty [min]	60

Vzhledem k neznámému procesu cementace a následnému zušlechťení, byly využity co možná nejbližší parametry, které jsou doporučeny v materiálových listech pro materiál 16MnCr5 s rozdílem v kalení [39]. Jako kalicí médium byl využit kapalný dusík na rozdíl od doporučeného způsobu kalení do přehřátého oleje, nebo na vzduchu [39]. Z tohoto důvodu je prokalená vrstva znatelně větší než u vstupní analýzy (kapitola 1.1.1). Na každém vzorku byla provedena řada indentů do vzdálenosti 3 mm s mezerou mezi jednotlivými vtisky 0,2 mm. Výčet středních hodnot tvrdosti a jejich rozdíl je zobrazen v Tab. 34. Střední hodnoty z obou vzorků byly vyneseny do grafů, kde je také vyznačena hodnota zacementované vrstvy HV550.

Z provedené tvrdostní analýzy lze vyčíst, že oba materiály dosahují podobných tvrdostí napříč zakalenému průřezu. Rozdíl ve středních hodnotách tvrdosti je do ± 5 %. Tuto hodnotu je možné považovat za přípustnou odchylku v měření [65]. Drobný rozdíl je možné pozorovat v hloubce prokalení tedy hodnoty HV550, kde materiál ESP65 dosahuje o cca 0,14 mm vyšší hodnoty než 16MnCr5 (Tab. 34 a Obr. 38). V Tab. 34 jsou vypsány pouze střední hodnoty, kompletní výsledky z měření jsou uvedeny v Příloze č. 6. Z toho vyplývá, že za těchto vstupních podmínek je nasycená vrstva ESP65 oceli větší. Z výsledků zkoušek tvrdosti je evidentní, že tyto dva materiály jsou z pohledu tvrdosti zcela zaměnitelné. V případě materiálu ESP65 jsou docíleny příznivější výsledky z hlediska hloubky zacementované vrstvy.

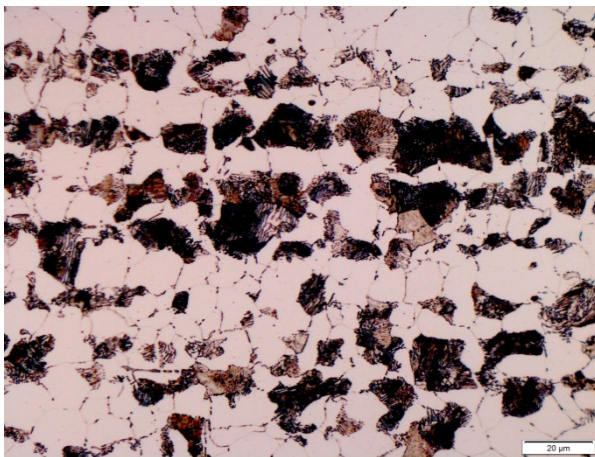
Tab. 34 Střední hodnoty tvrdosti 16MnCr5 a ESP65.

	16MnCr5	ESP65	
Vzdálenost od čela [mm]	Střední hodnota [HV1/10]	Střední hodnota [HV1/10]	Rozdíl tvrdosti [HV1/10]
0,1	791	795	4
0,2	791	787	4
0,4	785	782	3
0,6	775	779	4
0,8	760	763	3
1,0	739	726	13
1,2	680	692	12
1,4	544	628	84
1,6	460	504	43
1,8	389	405	16
2,0	347	354	8
2,2	323	329	6
2,4	309	314	5
2,6	311	311	1
2,8	306	313	7
3,0	316	310	6
4 (jádro)	301	308	7
HV550 [mm]	1,39	1,53	0,14

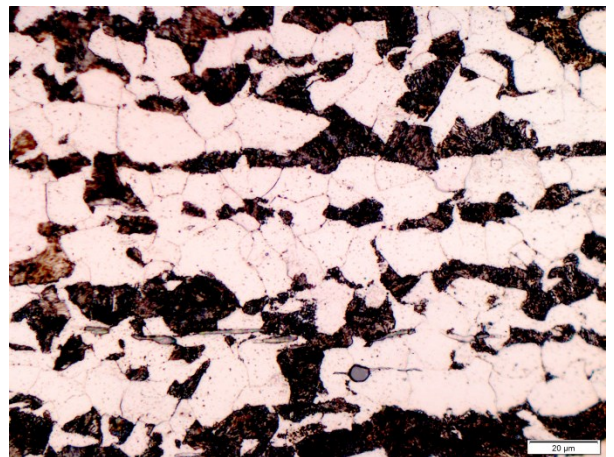


Obr. 38 Průběh tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od čela.

Další analýzy byly provedeny na vybroušených vzorcích. Pozornost je směřována na naleptanou strukturu před a po cementaci. Snímky vstupní struktury jsou zobrazeny s tisíc násobným zvětšením, zatímco fotografie zušlechťených vzorků s pěti set násobným. Fotografie CHTZ vzorků byly zaměřeny v hloubce 0,2 mm pod povrchem.



Obr. 39 Vstupní materiál 16MnCr5 (1 000x).



Obr. 40 Vstupní materiál ESP 65 (1 000x).



Obr. 41 CHTZ struktura 16MnCr5 (500x).



Obr. 42 CHTZ struktura ESP65 (500x).

Z pořízených snímků lze vizuálně porovnat mikrostruktury. Vstupní materiály vypadají téměř shodně. V obou případech se jedná o feriticko-perlitickou strukturu (Obr. 39 a Obr. 40.) Rozdíl spočívá v přítomnosti olova ve struktuře ESP65. Zakalené struktury vypadají také téměř totožně (Obr. 41 a Obr. 42), čemuž nasvědčuje také předcházející zkouška tvrdosti. Bohužel pouze z vizuální stránky nelze přesně určit jednotlivé prvky nebo zbytkový austenit. Pro tento účel by bylo nutné provést hlubší rozbor například pomocí rentgenové difrakce nebo elektronového mikroskopu (např. SEM metodou) pro zjištění přítomnosti daného prvku v konkrétním místě. K určení zbytkového austenitu by bylo nutné využít feritoskop nebo rozsáhlejší tvrdostní analýza za využití mirkotvrdosti [37].

Před prohlášením materiálu ESP65 za plnohodnotnou náhradu je třeba celý proces zopakovat na parametry cementace, kterými se řídí dodavatel. Následně provést stejný nebo podobný experiment, jehož součástí by měla být rozsáhlejší strukturní analýza pro přesné určení prvků po cementaci. Poté by se provedlo několik testů na životnost nástrojů na vybrané kritérium a zhodnotilo by se, zda úspora na nástrojích převyšuje vstupní investici. Na konci procesu by se díly využili v konečném produktu a byly by podrobeny funkčnímu testu. V případě získání kladných hodnot všech zkoušek, lze tento materiál prezentovat jako ekvivalentní. Námi provedený experiment pouze uvedl některé materiálové vlastnosti a umožnil primární vhled do mikrostruktury. Ze získaných výsledků vyplývá, že se jedná o materiál, kterým má smysl se zabývat a v závěru profitovat z možných snížených nákladů.

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Vzhledem k nemožnosti zveřejnění důvěrných dat firmy Festool s.r.o a dodavatelů, je kapitola ekonomické zhodnocení zaměřena na využití strojního zařízení, vztaženému k ročnímu výrobnímu plánu a na předběžný odhad spotřeby nástrojů. Výrobní čas se skládá z aktivního, neproduktivního času a čekání, nebo známější definice na jednotkový, dávkový a směnový čas [37, 56]. Jednotkový čas v sobě zahrnuje úkony spojené s výrobním procesem, jako upínání obrobku, měření během chodu stroje, výměna opotřebovaného nástroje, zaměření nástroje a další [66]. Dávkový čas se vztahuje na jednu výrobní dávku a započítávají se v něm činnosti spojené s přestávkami stroje, čtení výkresové dokumentace, seřízení stroje atd. [66]. Směnový čas zahrnuje úkony spojené s přípravou pracoviště před zahájením směny [66]. Vzhledem k neznámým dávkovým a směnovým časům a předpokladu sériové výroby, kde polotovár je možné vkládat simultánně za chodu stroje, stejně tak hotový výrobek je odebírán automaticky, jsou tyto časy zanedbány a výsledky jsou o tyto hodnoty zkresleny. Aktivní čas byl určen pomocí simulace tedy 58 s. Čekání během výroby spočívá ve vytažení tyče po upíchnutí. Tento čas lze určit za pomoci známé rychlosti posuvu tyče a délce povytažení, viz vztah 23 [27].

$$t_w = \frac{l_v}{v_v} \quad 23$$

kde: t_w [min] čas čekání,
 l_v [m] délka vyložení tyče,
 v_v [m.min⁻¹] rychlost posuvu tyče.

$$t_w = \frac{0,08}{30} \approx 0,003 \text{ min}$$

Ze součtu aktivního času a času čekání se pomocí vynásobení příslušným koeficientem, který zohledňuje neefektivní čas jako procentuální část z efektivní části (vztah 24). Koeficient je zvolen o hodnotě 0,08 (8 %) [37].

$$t_u = (t_w + t_{ac}) \cdot k \quad 24$$

kde: t_u [min] neefektivní čas,
 t_w [min] čas čekání,
 t_{ac} [min] aktivní čas,
 k [-] koeficient.

$$t_u = (0,003 + 0,97) \cdot 0,08 \approx 0,08 \text{ min}$$

Součet těchto tří časů vstupuje do výpočtu o teoretickém počtu potřebných strojů, jako čas potřebný pro provedení dané operace, vzhledem k počtu vyrobených kusů (vztah 25) [14]. Efektivní strojní fond byl zvolen stejný jako pro rok 2020 při 7,5 h směnách.

$$P_{th1} = \frac{(t_w + t_{ac} + t_u) \cdot N}{60 \cdot E_s \cdot S_s \cdot k_{pns}} \quad 25$$

kde:	P_{th1} [-]	teoretický počet strojů,
	t_u [min]	neefektivní čas,
	t_w [min]	čas čekání,
	t_{ac} [min]	aktivní čas,
	N [-]	počet vyráběných kusů za rok,
	E_s [h]	efektivní strojní fond,
	S_s [-]	počet směn,
	k_{pns} [-]	koefficient překračování norem ($k_{pns}=1$).

$$P_{th1} = \frac{(0,003 + 0,97 + 0,08) \cdot 170\,000}{60 \cdot 1\,882 \cdot 2 \cdot 1} \approx 0,79$$

Pro porovnání byl stejný výpočet proveden pro jedno-revolverový soustruh (NLX1500). Výpočty týkající se vytažení tyče a neefektivního času zůstali zachovány z předchozího výpočtu.

$$P_{th2} = \frac{(0,003 + 1,6 + 0,13) \cdot 170\,000}{60 \cdot 1\,832 \cdot 2 \cdot 1} \approx 1,27$$

Získaný výsledek naznačuje, že navržený stroj při výrobě 170 000 kusů za rok a dvojsměnném provozu bude využit ze 79 %, zatímco jedno-revolverová koncepce ze 127 %. Z této hodnoty vyplývá, že při zvolení navrhované varianty je možnost pokrýt kompletní výrobu jedním zařízením a stále zůstává čas pro plánovanou údržbu, případně jiné neočekávané prostoje. V případě nepřetržitého provozu se nabízí využití v kooperaci pro jiné výrobky. Také je nutné vzít v úvahu, že výpočet teoretického počtu strojů je zatížen chybou ze zanedbání dávkových a směnových časů.

Vypracovaný návrh umožňuje snížit strojový park primárně určený na výrobu ozubeného hřídele. Tím se redukuje zastavěná plocha, užitá energie a počet potřebných operátorů. Vytvořený koncept je navržen tak, že celý výrobní proces vyžaduje minimální zásahy zvenčí, a proto se více strojová obsluha jeví jako vhodná varianta. K nevýhodě automatického chodu a celkového konceptu, lze zmínit použitá délka tyčí 3 m, které jsou stohovány v zásobníku a manipulace s takto dlouhými tyčemi bude vyžadovat zdvihací zařízení, nebo spolupráci dvou operátorů. Také je nutné vzít v úvahu prostor okolo stroje potřebný pro manipulaci s takto dlouhými tyčemi. Mezi další nevýhodu patří vyšší cena strojního zařízení v porovnání s nižší koncepcí.

Díky vypočteným strojním časům je znám přesný čas nástroje v řezu a lze předběžně odhadnout spotřebu řezných nástrojů s ohledem na primární trvanlivost řezné hrany pro břitové destičky 15 min a pro frézovací, vrtací a tvářecí nástroje 45 min [56]. Kompletní přehled je uveden v Tab. 35, kde je jednoduchým výpočtem odhadnuta spotřeba řezných nástrojů při roční výrobě 170 000 kusů.

Tab. 35 Odhadovaná roční spotřeba nástrojů.

Operace	Strojní čas [min]	Trvanlivost [min]	Počet řezných hran	Vyrobené kusy [ks/hrana]	Počet nástrojů [ks/rok]
10/10 hrub.	0,118	15	4	127	335
10/10 vrtání	0,028	45	1	1 607	105
10/20	0,100	15	3	150	376
10/30	0,012	45	1	3 750	45
10/40	0,015	45	1	3 000	57 (2x)
10/50	0,023	45	1	1 956	87 (2x)
10/60	0,100	15	1	150	1 133
20/10	0,042	15	4	357	119
20/20	0,039	15	3	385	147
20/30	0,023	45	2	1 956	44

Z vypočtených hodnot je zřejmé, že největší spotřeba nástrojů je při operaci 10/60, tedy upichování. Navržená destička má pouze jednu řeznou hranu, a proto je spotřeba tak vysoká. Pro další optimalizaci je doporučeno ověřit trvanlivost a případně vyměnit za jinou vhodnou upichovací planžetu. Hodnoty uvedené v Tab. 35 jsou pouze orientační a slouží pro předběžný odhad nákladů.

Další odhady spojené s náklady nejsou uvedeny z důvodu možnosti zveřejnění důvěrných dat firmy Festool s.r.o nebo dodavatelských firem. Výpočty, jež by byly pouze odhadovány na základě podobných projektů, by byly zatíženy chybou a neměli by žádnou vypovídající hodnotu.

8 ZÁVĚRY

Předkládaná diplomová práce popisuje postup pro návrh nového strojního zařízení včetně automatizace, dalšího volitelného vybavení a vhodných nástrojů primárně určených pro výrobu 170 000 kusů výrobku ročně. Součástí je také vytvořený NC program pro potvrzení výpočtové studie. Vytvořený projekt tvoří kompletní řešení pro výrobu ozubeného hřídele. V závěru jsou uvedeny návrhy na změny v postupu výroby, materiálu a uspořádání nástrojů.

Úvodní část se věnuje analýze strojní součásti z pohledu materiálu a geometrie. Byly provedeny metalografické výbrusy a zkoušky tvrdosti vstupního i chemicko-tepelně zpracovaného vzorku. Pomocí získaných výsledků byl materiál zařazen do třídy obrobitelnosti. Rozměrová analýza součásti sloužila k určení několika vstupních údajů při definování strojních parametrů. Byl zde předložen návrh na úpravu designu pro snadnější obrábění čelního vybrání. Tato změna byla akceptována zadavatelem projektu.

V druhé části jsou podrobněji rozebrány strojní parametry, které byly považovány za stěžejní. Podle těchto parametrů byly vytipovány čtyři strojní zařízení, na něž byly vystaveny cenové nabídky. Po porovnání jednotlivých cen, parametrů a příslušenství byl navržen stroj Index Traub C100 jako vhodná varianta pro výrobu daného dílce. Tato strojní konfigurace disponuje nejvyššími výkonovými parametry a dynamikou z vytipovaných favoritů, ale také nejvyšší cenou.

Společně se strojním zařízením byl již rozmyšlen sled operací, ke kterému byly přiřazeny vhodné nástroje. Kompletní nástrojové vybavení bylo voleno tak, aby výměna otupených nástrojů byla provázena jednoduchou výměnou opotřebované řezné hrany. Tento systém byl zvolen pro omezení vymontování nástrojových držáků a tak snížení prostojů při výměně a zaměření. Posledně byly navrženy nástrojové držáky, jejichž tvar a velikost byl již předurčen podle zvoleného nástrojového vybavení a typu revolveru. Ve snaze využít potenciál vysokotlakého čerpadla byly navrženy nástroje s vnitřními kanálky tak, aby procesní kapalina směřovala přímo do místa řezu a docházelo tak ke snadnému lámání třísky.

Před samotnou časovou studií bylo nutné nakonfigurovat soustruh dle reálných parametrů tak, aby simulace byla přesná. Nastavení pro simulaci bylo provedeno v programu Sinutrain 840d 4.7 z přednastavené konfigurace pro dvoukanálový soustruh. Změna spočívala v přidání Y osy pro oba kanály, poháněného nástroje pro druhý kanál a definice proti-vřetená pro první kanál. Dále byly upřesněny limitní parametry jednotlivých os podle skutečnosti.

Časová studie byla provedena jak výpočtovou metodou, tak pomocí simulace, kde se získané hodnoty téměř neliší a výrobní čas je roven 58 s. Pro porovnání byl stejný výpočet proveden pro jedno-revolverový dvou-vřetenový soustruh a celková časová úspora při obrábění při použití nově navržené koncepce činí 38 s.

V závěru byly navrženy úpravy v technologickém postupu, NC programu a použitím vstupním materiálu ve snaze zdokonalit vytvořený koncept, jak z pohledu časové tak finanční náročnosti. Prvotní analýza materiálu ESP65 naznačila, že z pohledu tvrdosti se jedná o ekvivalent k současně používanému materiálu 16MnCr5. Finálně byly provedeny výpočty využití nově navrženého konceptu stroje a přibližný odhad spotřeby nástrojového vybavení.

Z výsledků je zřejmé, že při použití strojního zařízení od společnosti Index je možné zredukovat strojový park primárně využívaných na výrobu ozubeného hřídele na jeden stroj.

Předáním projektu není proces ani zdaleka ukončen. Po provedení skutečných objednávek nastává realizace. Bude se jednat o finální ceně strojního zařízení a jeho instalace, určení termínu dodání a uzavření smlouvy se všemi náležitostmi. Z pohledu technologie se provede následná před přejímka na externím pracovišti a přejímka již po instalaci ve firmě. V případě správného průběhu nastane čas aplikování samotného procesu a odladění výroby, určení intervalu kontrol, skutečného strojního času, vytvoření normativních časů a úpravy technologického postupu. Po provedení všech těchto úkonů vyvstane prostor pro samotnou optimalizaci nástrojového vybavení, případně NC programu, až k docílení ideálního stavu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Broxtec chip conveyor. *Broxtec.en* [online]. 2010 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <http://www.broxtec.cz/en/page/67984.type-chips-swarf-scrap-correct-conveyor-design/>,%20https://lms-northamerica.com/choosing-the-right-chip-conveyor/
2. COPE, Mike. Hurco tools. In: *Hurco* [online]. 2013 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://blog.hurco.com/blog/bid/332410/mill-turn-turret-shootout-vdi-vs-bmt>
3. *Česká technická norma ČSN EN ISO 18265 tabulka B.4.: Kovové materiály Převod hodnot tvrdosti*. 2. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2004.
4. DA SILVA, Rosemar B., Álisson R. MACHADO, Emmanuel O. EZUGWU, John BONNEY a Wisley F. SALES. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, **213**(8), 1459-1464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.008>. ISSN 0924-0136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613000988>
5. DAVIM, J. Paulo. *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. 13. London: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-1-84800-212-8.
6. DAVIM, J. Paulo. *Surface integrity in machining*. 2. London: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-874-2.
7. DMG MORI NLX 1500. *DMG MORI* [online]. Japonsko, 2020 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/resource/blob/45150/f347702cc81c171674c46ce74942abe7/pt0uk14-nlx1500-2000-pdf-data.pdf>
8. DMG MORI sprint 42. *Dmgmori.com* [online]. Dübendorf: DMG MORI, 2019 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://en.dmgmori.com/products/machines/turning/horizontal-production-turning/sprint/sprint-42-10-linear>
9. EMCO group Maxxturn 65. *Emco-world.com* [online]. Salzburger: EMCO, 2018 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: https://www.emco-world.com/fileadmin/user_upload/_Group/Brochures_PDFs/PDFs_Drehen/MAXXTURN/M T65/CNC_lathe_Maxxturn_65_1000.pdf
10. EMCO. *Emco-world* [online]. Salzburg: Emco, 2019 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.emco-world.com/en/products/turning/cat/477/d/1/p/1000170/pr/hyperturn-45-g3.html>

-
22. Iscar PCLNL 2020-XJHP-MC. *Iscar* [online]. Iscar, 2020 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=3605961&fnum=3814&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&isoD=1>
23. Iscar CNMG 120408-M3P. *Iscar* [online]. 2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=5566680&fnum=3544&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1>
24. Katalog Arno. *SPT suncoast precision tools* [online]. 1101 W Diggins St, Harvard: ARNO Werkzeuge, 2014 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://www.suncoasttools.com/PDFFILES/ARNO/ARNOGROOVING.pdf>
25. Katalog Fette. *Lmt-fette* [online]. Oberkochen: LMT Tool Systems, 2015 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: http://www.lmt-fette.cz/Files/katalogy/z%C3%A1vitov%C3%A1n%C3%AD/LMT_Katalog_Gewinden_Bohren_01.pdf
26. Katalog Hainbuch: Spannstop. *Hainbuch* [online]. Marbach Německo: Hainbuch, 2018 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.hainbuch.com/fileadmin/Mediendatenbank/English/Service/Downloads/Installation-manuals/Chucks/SPANNTOP/HAINBUCH-SPANNTOP-nova-Installation-manual.pdf>
27. Katalog Index MLB. *Index Traub* [online]. Esslingen (Německo): Index Traub, 2019 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.index-traub.com/fileadmin/user_upload/INDEX/MBL65/INDEX_TRAUB_MBL65_EN.pdf
28. Katalog LMT Fette: Závitníky. *LMT Fette* [online]. Německo: LMT Fette [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.hagro.nl/index.php/downloads/dl/file/id/329/hpf.pdf>
29. *Katalog Mazak: HQR series*. Japonsko, 2018.
30. Katalog Nine9. In: *Nine9* [online]. Nine9 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: https://nine9.jic-tools.com.tw/upload_files/download/catalog/i-center/Nine9_indexable_center_drill.pdf#page=3
31. Katalog Steeltec ESP 65. *Steeltec* [online]. Steeltec-group, 2018 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z https://www.steeltec-group.ch/fileadmin/files/steeltec.ch/Daten/Broschueren/stg_produktprospekt_ESP65_EN_1-seitig_web.pdf
32. Katalog Walter Tools: cone fit. *Walter Tools* [online]. Německo: Walter Tools, 2014 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/en-gb/flyer-cone-fit-en.pdf>
33. *Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti: Česká technická norma ČSN EN ISO 18265 tabulka B.3. 2*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2004
-

-
34. LNS. *Lns-northamerica* [online]. LNS group, 2020 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://lns-northamerica.com/choosing-the-right-chip-conveyor/>
35. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. 1. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-809-0631-083.
36. Mazak HQR 100. *Mazak* [online]. Japonsko: Mazak, 2020 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.mazakusa.com/machines/hqr-100msy/>
37. *Mechanical and Metal Trades Handbook*. 2. Německo Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2010. ISBN 978-3-8085-1913-4.
38. MOHAN, Nandu a Sanjivi ARUL. Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Alloy Steel 16MnCr5. *Materials Today: Proceedings*. 2018, **5**(11, Part 3), 25265-25275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.329>. ISSN 2214-7853. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318326336>
39. *Oceli k cementování: Česká technická norma ČSN EN 10084*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2000.
40. OSIČKA, Karel a Aleš JAROŠ. *Vybrané statě z obrábění (HTR)* [přednáška k cvičení]. Brno: Vysoké Učení Technické fakulta strojního inženýrství, 2019.
41. PIERSON, Hugh O. *Hanbook of chemical vapor deposition: Principles, Technology, and Applications*. Second. USA New York: Noyes Publications, 1999. ISBN 0-8155-1432-8.
42. Product Visualization - Coro Turn Prime. *SHOWHOW* [online]. Sweden, 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <http://www.showhow.se/showcase-se/sandvik-coromant-coroturnprime.html>
43. Ing. Polzer Aleš Ph.D., osobní sdělení při konzultaci diplomové práce (Vysoké učení Technické v Brně) dne 17. 2. 2020
44. *Rozměry, jejich mezní úchylky a tolerance tvaru a polohy lesklých ocelových výrobků: Česká technická norma ČSN EN 10278*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2003.
45. Sandvik Coromant CP-A1104-L5 4325. In: *Sandvik Coromant* [online]. Švédsko: Sandvik Coromant [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=CP-A1104-L5%20%20%20%20%20%20%20%20%20%204325>
46. Sandvik Coromant QS-CP-30AL-2020-11C. In: *Sandvik Coromant* [online]. Švédsko: Sandvik [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=QS-CP-30AL-2020-11C>
-

-
47. Sandvik Coromant Toolpath. *Sandvik Coromant* [online]. Švédsko: Sandvik Coromant [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroplus-toolpath/pages/primeturning.aspx>
48. Sandvik Coroturn Prime. *Sandvik Coromant* [online]. Švédsko: Sandvik Coromant [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_prime/pages/default.aspx
49. Sandvik Coromant: How to apply coolant. *Sandvik Coromant* [online]. Švédsko: Sandvik Coromant [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>
50. Sandvik Coroturn Re-inventing turning. *Sandvik Coromant* [online]. Švédsko 2018: Sandvik Coromant [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadhandler.ashx?url=https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-1040-218.pdf&filename=C-1040-218.pdf&view=true
51. *SINUMERIK 840 D sl Commissioning Documentation: Training manual*. 2013.
52. *SINUMERIK 840D sl/828D Soustružení: Příručka pro obsluhu*. 1. Německo NÜRNBERG: Siemens, 2018. ISBN 6FC5398-8CP41-0UA0.
53. Sloky příslušenství. *Sloky Jic tools* [online]. 2020 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://sloky.jic-tools.com.tw/torque-screwdriver-set.htm>
54. SREEHARSHA, K. S. *Principles of physical vapor deposition of thin films*. 1. Boston: Elsevier, 2006. ISBN 00-804-4699-X.
55. *Technická příručka Sandvik: soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. 2. Praha: Sandvik Coromant: Elanders, 2010.
56. TSCHÄTSCH, Heinz. *Applied machining technology*. Berlin: Springer, 2009. ISBN 978-3-642-01007-1.
57. Walter katalog zavítování. *Walter tools* [online]. Německo: Walter, 2012 [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/cs-cz/handbook-prototyping-threading-2012-cz.pdf>
58. Walter tools AK610.Z12.E12.022. In: *Walter tools* [online]. Walter tools [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/en-gb/search/pages/default.aspx#/product/AK610.Z12.E12.022>
-

59. Walter tools H3E23138-E12-12-0.5. In: *Walter tools* [online]. Walter tools [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/en-gb/search/pages/default.aspx#/product/H3E23138-E12-12-0.5>
60. Walter tools H3E58318-E10-10. In: *Walter tools* [online]. Walter tools [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/en-gb/search/pages/default.aspx#/product/H3E58318-E10-10>
61. Walter tools: DC170-03-07.400A1-WJ30EJ. In: *Walter tools* [online]. Walter-tools, 2020 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/en-gb/search/pages/default.aspx#/product/DC170-03-07.400A1-WJ30EJ>
62. Iscar parametry IC8150. *Iscar* [online]. Iscar, 2020 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Grade.aspx?grade=IC8150&item=5566680&fnum=3544&mapp=IS&app=30>
63. WTO katalog. *WTO* [online]. WTO, 2018 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: https://www.wto-tools.com/fileadmin/user_upload/Katalog_Download/Maschinenspezifisch/Okuma/Okuma_Toolholder_Program_us_Letter.pdf
64. ZIPPERIAN, Donald. Metallographic Handbook. *Pace Technologies* [online]. Tucson: Pace technologies, 2011 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <http://www.metallographic.com/Brochures/Met-Manual-2b.pdf>
65. *Zkoušky podle Vickerse: Česká technická norma ČSN EN ISO 6507-1*. 2. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2018.
66. ZEMČÍK, Oskar. *Technologická příprava výroby*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-214-2219-X.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
a_e	šířka řezu	[mm]
a_p	šířka záběru hlavního ostří nástroje	[mm]
D	obráběný průměr	[mm]
D_c	obráběný průměr	[mm]
D_f	průměr frézy	[mm]
D_{max}	průměr s maximálními otáčkami	[mm]
D_v	průměr vrtáku	[mm]
D_z	nominální průměr závitu	[mm]
E_s	efektivní roční fond	[h]
f	posuv na otáčku	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
h_m	tloušťka třísky	[mm]
k	koeficient	[-]
k_c	specifická řezná síla	[MPa]
K_{cl}	měrná řezná síla	[MPa]
κ_r	úhel hlavního ostří nástroje	[°]
k_{pns}	koeficient překračování norem	[-]
L	celková obráběná délka	[mm]
l	délka obráběné plochy	[mm]
l_n	délka náběhu	[mm]
l_p	délka přeběhu	[mm]
l_v	délka vyložení tyče	[mm]
m_c	opravný koeficient průřezu třísky	[-]
M_k	krouticí moment	[N.m]
n	počet zubů frézy	[-]
N	počet vyráběných kusů za rok	[ks/rok]
n_{str}	střední otáčky	[min ⁻¹]
n_z	počet zubů frézy	[-]
$ot.$	otáčky	[-]
P_c	užitečný výkon	[kW]
P_{thl}	teoretický počet strojů	[-]
r_ε	poloměr špičky nástroje	[mm]
R_a	střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
R_z	výška nerovností profilu	[μm]
S_s	počet směn	[-]
T	trvanlivost nástroje	[min]
TAS	jednotkový strojní čas	[min]
t_u	neefektivní čas	[min]
t_w	čas čekání	[min]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_v	rychlost posuvu tyče	[m.min ⁻¹]

z	počet zubů	[-]
z_n	počet zubů v záběru	[-]
α	řezný úhel	[°]
γ_o	ortogonální úhel čela	[°]
κ_ρ	úhel hlavního ostří nástroje	[°]
ε	úhel špičky	[°]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Označení	Legenda
AlTiN	nitrid hlinitotitaničitý
atd.	a tak dále
BMT	angl.: base mounted turret
cca	Cirka
CDI	angl.: Coromant Capto disc
CVD	angl.: chemical vapor deposition
CHTZ	chemicko-tepelné zpracování
č.	číslo
ČSN	česká národní norma
DIN	něm.: Deutsches Institut für Normung
EN	Evropská norma
HB	tvrdost dle Brinella
hl.	hlavní/ho
HP 45	Hyperturn 45
HRC	tvrdost dle Rockwella
hrub.	hrubování
HV	tvrdost dle Vickerse
ISO	angl.: International Organization for Standardization
JOB	job list
kap.	kapitola
MD	angl.: machine data
MPF	angl.: main program file
např.	například
NC	angl.: numeric control
obr.	obrázek
PLC	programovatelný logický automat
PVD	angl.: physical vapor deposition
SEM	angl.: scanning electron microscope
s.r.o	společnost s ručením omezeným
SD	angl.: setting data
SW	software
tab.	tabulka
TP	technologický postup
tzn.	to znamená
TZ	tepelné zpracování
tzv.	tak zvaně
VBD	výměnná břitová destička
vd.	vedlejší/ho
VDI	něm.: Verein Deutscher Ingenieure
viz	vizte
vs.	versus

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 výkres ozubeného hřídele 1-3513-001

Příloha č. 2 návrh stupňovitého vrtáku 103-233-105-001

Příloha č. 3 technologický postup pro 10. a 20. operaci

Příloha č. 4 NC program a kontury pro Index Traub C100

Příloha č. 5 NC program a kontury pro DMG Mori NLX1500

Příloha č. 6 výsledky zkoušky tvrdosti