



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VOLBA A OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO PROGRESIVNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

DATA SELECTION AND OPTIMISATION OF CUTTING CONDITIONS FOR PROGRESSIVE PRODUCTION
TECHNOLOGIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Baklík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Lukáš Baklík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie, zvláště CNC stroje a obráběcí centra.

Cíle diplomové práce:

Úvod

Teoretický rozbor metod volby řezných podmínek

Optimalizace řezných podmínek pro vybrané progresivní výrobní technologie - CNC stroje a obráběcí centra

Experimentální verifikace

Závěry

Seznam literatury:

Sivakumar, K., Saravanan M. and R. Noorul, H. A. (2008): Cost-tolerance modelling and optimisation of machining tolerance design through intelligent techniques. International Journal of Machining and Machinability of Materials, vol. 3, no. 1-2, pp. 162 – 189.

William J., Zdeblick, R.E., De Vor and Kahles, J. F. (1981): A Comprehensive Machining Cost Model and Optimization Technique. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 30, Issue 1, pp. 405-408.

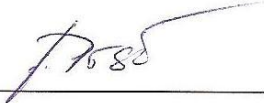
Tlusty, J. (1999): Manufacturing Process and Equipment. Prentice Hall.

Fiala, P. (2002): Modelování a analýza produkčních systémů. Praha: Professional Publishing.


Galloway, S., Rowbotham, F. a Azhashemi, M. (2007): Operační management v praxi. Praha: ASPI, a.s.

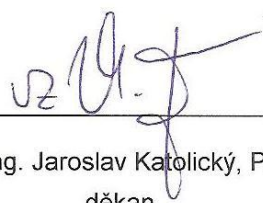
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 30. 11. 2015



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu


L. S.
DĚKANÁT



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

ABSTRAKT

Tato práce zahrnuje změnu stávající technologie rovinného broušení za efektivnější technologii čelní frézování pro dokončovací operaci čelisti (pro hydraulický strojní svěrák) v zušlechtném stavu s tvrdostí 53+4 HRC. Čelist je vyrobena z nástrojové oceli dle ČSN41 9312. Pro novou technologii jsou navrženy dvě varianty. Pro frézování jsou sepsány progresivní řezné materiály. Je zvolen vhodný nástroj, predikovány celkové výrobní náklady a strojní časy pro řezné podmínky pro zvolený nástroj. V experimentální části jsou tyto řezné podmínky prakticky ověřeny.

Klíčová slova

rovinné broušení, čelní frézování, progresivní řezné materiály, VBD, řezné podmínky

ABSTRACT

This thesis discusses a change of an existing surface grinding technology for a more effective technology of face milling for the finishing operation of the jaw (for a hydraulic machine vise) in a tempered state with hardness of 53+4 HRC. The jaw is made of tool steel according to the Czech standard CSN41 9312. Two new versions are proposed for the new technology. Progressive cutting materials are listed for milling. A suitable tool is selected. Total production costs and machine times for cutting conditions of the chosen tool are predicted. In the experimental part, the cutting conditions are verified in practice.

Key words

surface grinding, face milling, progressive cutting materials, cutting inserts, cutting conditions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAKLÍK, L. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 87 s. 6 příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Bc. Lukáš Baklík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Piškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 PŘEDSTAVENÍ ŘEŠENÉ SOUČÁSTI	10
1.1 Obráběná součást	10
1.2 Druh materiálu obráběné součásti.....	11
1.3 Tepelné zpracování obráběné součásti	12
1.3.1 Kalení.....	12
1.3.2 Popouštění.....	13
1.4 Výrobní postup	14
1.5 Návrh nové technologie	15
2 VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ ZUŠLECHTĚNÝCH (KALENÝCH) OCELÍ.....	16
2.1 Čelní frézování.....	16
2.1.1 Průřez třísky	17
2.1.2 Řezné síly.....	17
2.1.3 Jednotkový strojní čas.....	19
2.2 Obrobitelnost zušlechtěných ocelí	20
2.3 Řezné materiály vhodné pro obrábění zušlechtěných ocelí.....	20
2.2.1 Polykrystalický kubický nitrid bóru	21
2.2.2 Povlakované slinuté karbidy	22
2.2.1 Řezná keramika.....	24
2.4 Vhodná geometrie pro nástroj a VBD	26
2.5 Opotřebení VBD při frézování	27
2.3.1 Formy opotřebení VBD ze slinutých karbidů a jejich eliminace.....	27
2.3.2 Formy opotřebení VBD z PKNB a řezné keramiky	30
2.6 Metody frézování zušlechtěných (kalených) ocelí	32
3 METODY OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK.....	34
3.1 Konvenční optimalizace řezných podmínek.....	34
3.2 Optimalizace výrobních nákladů	34
3.3 Optimalizace výrobního času.....	37
4 STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE PRO DOKONČOVACÍ OPERACI V ZUŠLECHTĚNÉM STAVU	39

4.1 Použitý stroj	39
4.2 Použitý nástroj	39
4.3 Technicko-ekonomické hodnocení stávající technologie pro dokončení	40
4.2.1 Řezné podmínky	40
4.2.2 Výpočet jednotkového strojního času	41
4.2.3 Výrobní náklady pro broušení	43
5 VOLBA NÁSTROJE PRO NOVOU TECHNOLOGII DOKONČENÍ V ZUŠLECHTĚNÉM STAVU	45
5.1 Nástroj od firmy FETTE	45
5.2 Ekonomický propočet ostří na VBD	47
5.3 Jednotkový strojní čas pro teoreticky stanovené řezné podmínky	48
5.4 Stanovení výrobních nákladů pro různé řezné podmínky pro frézování	51
5.5 Teoretický výpočet řezné síly a řezného výkonu	59
5.6.1 Symetrické frézování pro variantu A	60
5.6.2 Symetrické frézování pro variantu B	62
6 EXPERIMENTÁLNÍ VERIFIKACE	65
6.1 Popis experimentu	65
6.2 Experimentální část pro variantu A	69
6.3 Experimentální část pro variantu B	72
6.4 Ekonomické hodnocení pro navržené varianty	76
6.4.1 Shrnutí strojních časů pro obě varianty	76
6.4.2 Shrnutí celkových výrobních nákladů pro obě varianty	77
7 DISKUZE	78
7.1 Návrh pro zlepšení varianty A	78
ZÁVĚR	79
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	80
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	83
SEZNAM PŘÍLOH	87

ÚVOD

Hlavním úkolem v dnešní době je snižování celkových výrobních nákladů a celkových výrobních časů s důrazem na vyšší produktivitu, ať se jedná o kusovou, sériovou nebo velkosériovou výrobu. Toho lze docílit zefektivněním stávající výroby, jako je např. optimalizace řezných podmínek nebo změna technologie či vyřazení a nahrazení nevykonného stroje za výkonnější.

Pro zušlechtěné nebo kalené součásti je pro dokončovací operace ve většině malých nebo velkých strojírenských firem používána technologie broušení, ať už se jedná o broušení na kulato, broušení otvorů nebo rovinné broušení. Broušení je konvenční technologie, která se používá jako dokončovací operace pro obrobení součástí u kterých je přesnost rozměrů a kvalita obrobeného povrchu nejvíce vyžadována. Nevýhodou technologie broušení je její neefektivnost, protože je omezující podmínkou malý úběr materiálu. Při stanovených relativně velikých přídavcích (v řádech desetin milimetru) na dokončení po tepelném zpracování to nemile ovlivňuje celkové výrobní náklady na celou vyrobenou součást, celkové výrobní časy a vytíženost na brousicím stroji.

Pro zefektivnění obrábění zušlechtěných materiálů lze docílit jinou technologií jako je např. soustružení a frézování. U těchto technologií je potřeba použití progresivních řezných materiálů pro obrábění, jako je například polykrystalický kubický nitrid bóru, povlakované slinuté karbidy a řezná keramika.

Tato práce je zaměřena na zefektivnění výroby součástí v zušlechtěném stavu, kde je stávající technologie rovinné broušení neefektivní a je nahrazena produktivnější technologií frézování s důrazem na kvalitu obrobeného povrchu.

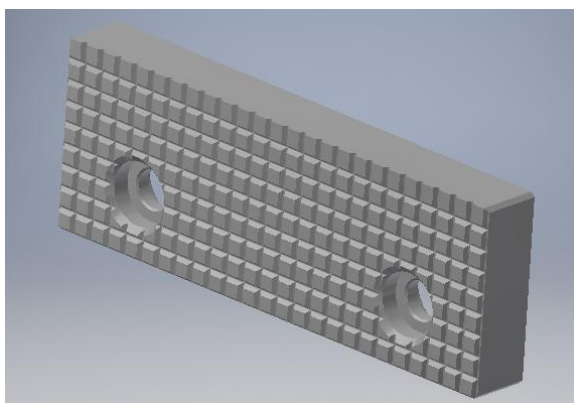
1 PŘEDSTAVENÍ ŘEŠENÉ SOUČÁSTI

Obrábění čelisti (výkres viz příloha 1), která je z jedné strany hladká a z druhé strany opatřena vroubkováním (dále jen vroubkovaná/hladká čelist) se provádí na strojích s počítačovým řízením, ale také na klasických strojích. Obráběná součást je z nástrojové oceli označené dle ČSN 41 9312.

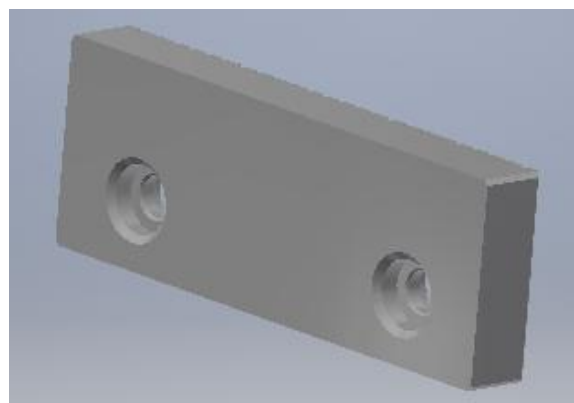
1.1 Obráběná součást

Vroubkovaná/hladká čelist je nepostradatelnou součástí v běžném strojírenském provozu. Pro obrábění mnoha různých výrobků se právě touto čelistí osazuje pevná a pohyblivá část strojního svěráku, ve kterém je kus upnut.

Čelisti musí vykazovat dobré mechanické vlastnosti. Jsou namáhané na tlak a otěr. Proto je velice důležité vhodné zvolení druhu materiálu a tepelného zpracování. Názorná ukázka vroubkované/hladké čelisti je na obr. 1.1 [1].



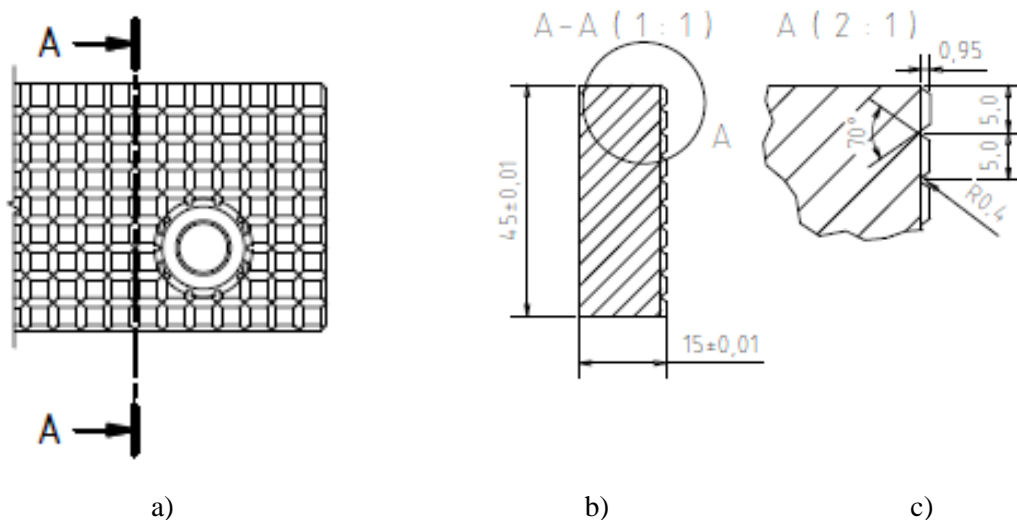
a)



b)

Obr. 1.1 Pohled na Vroubkovanou/hladkou čelist a)-vroubkovaná strana, b)- hladká strana, [1].

Výhodou této vroubkované/hladké čelisti je její univerzálnost použití. Při obrábění surových polotovarů se čelist upne do svěráku tak, aby byl polotovar upínán vroubkovanou stranou, zatímco při obrábění obrobku, který má upínací plochy obrobené se použije strana hladká. Detail na vroubkování je na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Pohled na vroubkovanou stranu čelisti a)-část čelisti, b)- řez čelisti, c)- detail na vroubkování [1].

Zdánlivě jednoduchá součást skrývá řadu úskalí, ať už se jedná o velmi přesné geometrické tolerance a střední aritmetickou úchylku profilu Ra. Také druh materiálu a tepelné zpracování je stěžejní část problému. Předepsaná geometrická tolerance a střední aritmetická úchylka profilu Ra jsou názorně ukázány v tabulce 1.1.

Tab. 1.1 Geometrická tolerance a parametr struktury povrchu na obráběné součásti [1].

geometrická tolerance			Parametr struktury povrchu	
tolerance	značka	hodnota [mm]	Střední aritmetická úchylka profilu Ra [μm]	
směru	rovnoběžnosti	//	Ra	0,8

1.2 Druh materiálu obráběné součásti

Nástrojová ocel dle ČSN 41 9312. Je to Mn-V ocel, která se vyznačuje svojí stálostí rozměrů při tepelném zpracování a dobrou prokalitelností v oleji. Po kalení a popouštění se vyznačuje dobrou tvrdostí na povrchu a houževnatostí. Dobrou obrobiteľnosť si zaručuje po žihání na měkko, kdy její tvrdost dosahuje max. 220 HB. Při kalení dosahuje tvrdosti až 63 HRC [2]. Její složení je znázorněno v tabulce 1.2.

Tab. 1.2 Chemické složení nástrojové oceli dle ČSN 41 9312 [2].

Chemický prvek	C	Si	Mn	P max.	S max	Cr	V
Množství [hm. %]	0,85-0,95	0,10-0,40	1,90-2,10	0,03	0,03	0,20-0,50	0,05-0,15

Označení nástrojové oceli se liší dle normy. Příklady označování nástrojové oceli je znázorněno v tab. 1.3.

Tab. 1.3 Druhy označování nástrojové oceli [2].

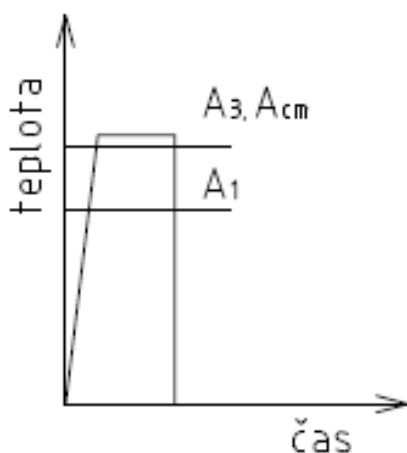
Značka oceli dle ČSN	Značka oceli dle DIN EN ISO 4957	Číslo materiálu W.Nr.
ČSN 41 9312	90MnCrV8	1.2842

1.3 Tepelné zpracování obráběné součásti

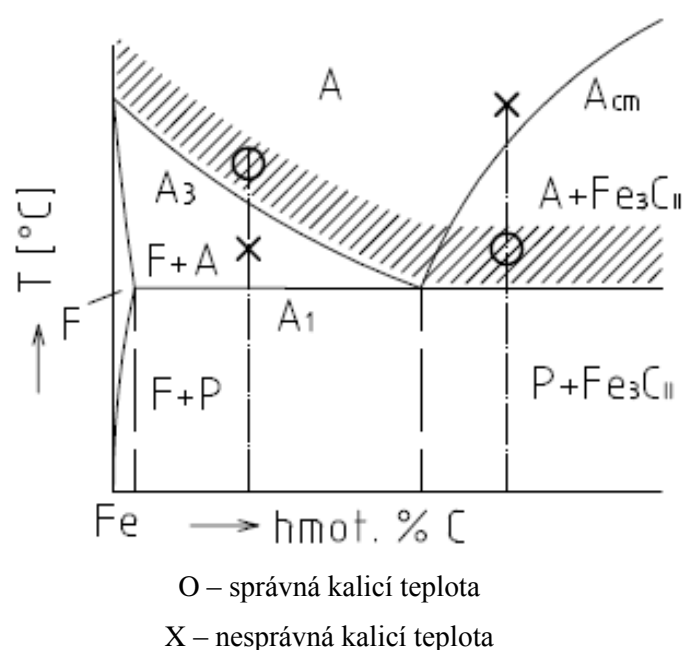
Obráběná součást se vakuově kalí a popouští na požadovanou tvrdost 53+4 HRC. Jako ochranná atmosféra se používá dusík. Jde o tepelné zpracování, kde se u kalení v kalící komoře vysaje vzduch až vznikne vakuum o hodnotě tlaku v jednotkách mbar. Popouštění součástí probíhá vháněním plynného dusíku do komory, kde vznikne tlak až 15 bar. Právě zvolení vakuového zušlechťování se předchází zoxidování součástí, tj. reakce kyslíku s povrchem součásti při vyšších teplotách. [3].

1.3.1 Kalení

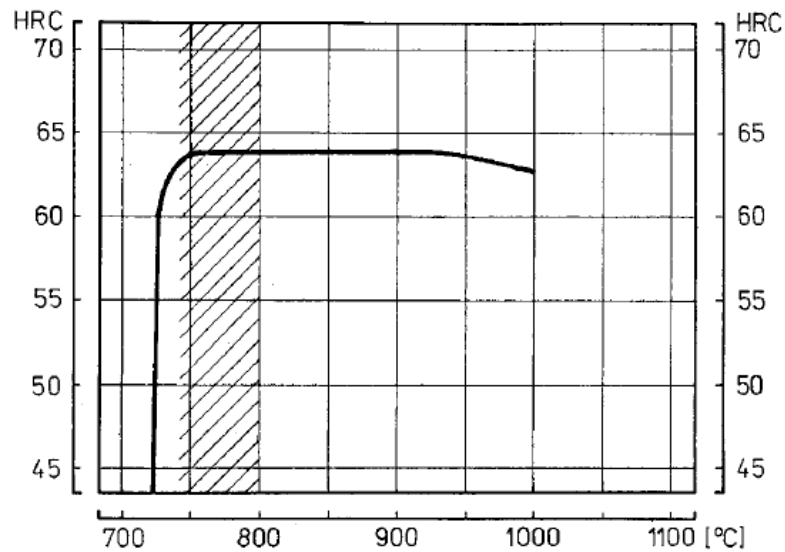
Kalení je druh tepelného zpracování, které sestává z ohřevu na kalící teplotu (austenitizační teplotu), tj. nad křivku A_3 a A_1 , výdrže na této teplotě a následného ochlazení, které je větší než rychlost kritická. Vznikne přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α , který se nazývá martenzit [4]. Náorné schéma martenzitického kalení oceli je na obr. 1.3 a 1.4.



Obr. 1.3 Časový průběh kalení v závislosti na teplotě.

Obr. 1.4 Pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C.

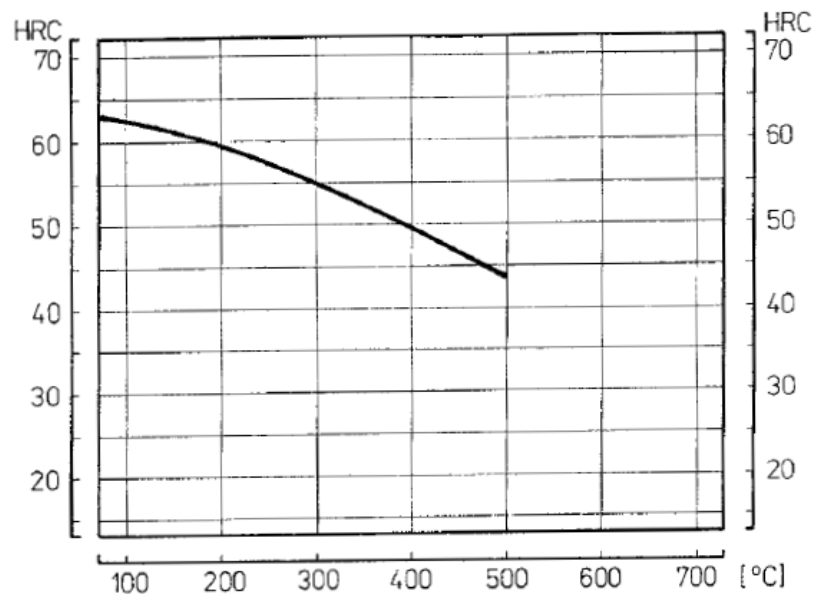
Kalící diagram pro nástrojovou ocel dle ČSN 41 9312 je na obrázku 1.5.



Obr. 1.5 Kalicí diagram [5].

1.3.2 Popouštění

Po kalení jsou nástrojové oceli velmi křehké a náchylné k praskání, proto je z tohoto důvodu nutné okamžité popouštění. Velikost popouštěcích teplot se liší dle požadované tvrdosti a pevnosti nástroje. Nástroje pro práci za studena se obvykle popouští v intervalu 150-300 °C. Dochází tak k rozpadu zbytkového austenitu a precipitaci karbidů a tím navýšení tvrdosti [4]. Popouštěcí diagram je na obr. 1.6.



Obr. 1.6 Popouštěcí diagram [5].

1.4 Výrobní postup

Po nařezání polotovaru na požadovanou délku se polotovar obrobí ve dvou operacích na vertikálním obráběcím centru MCFV 1060. Následně se obrobek upne na stůl horizontální frézky a dojde k obrobení vroubkování. Po obrobení se obrobek celkově odjehlí na pracovišti ruční úpravy. Následuje tepelné zpracování, tedy vakuové kalení a popouštění na předepsanou hodnotu HRC 53+4. Poté se součást v zakaleném stavu brousí na rovinné brusce. Pro obrábění vroubkované/hladké čelisti je zhotoven výrobní postup s broušením v zakaleném stavu (viz tab. 1.4) [6].

Tab. 1.4 Stávající výrobní postup [6].

Výrobní postup				
Polotovar: 20x50x130		Materiál: 19312 (19313)	Hmotnost polotovaru: 1,02 kg	
Datum:		Vyhotovil:	Název součásti: Vroubkovaná/hladká čelisti	Číslo listu: 1
			Číslo výkresu: 1.1001.1111 A	
Č. op.	Název stroje, dílna:	Popis práce v operaci:		Výrobní nástroje a kontrolní měřidla:
1	Pásová pila, Příprava materiálu	Řezat tyč v délce 130		Pilový pás
2	Kooperace TZ	Žíhat pro odstranění vnitřního pnutí		-
3	Frézovací centrum AKIRA SEIKI SV 1350, CNC obrobna	Upnout do hydraulického svěráku. Frézovat vrchní plochu ($a_p=2$), frézovat obvod na rozměry v šířce 45,3+0,1 a v délce 124,85+0,05 do hl. 16. Vrtat díry 2x Ø9 -2x v rozteči 79,9+0,05 a rozměr 14±0,1 na 14,15+0,05, zahloubit 2x Ø15/5,8+0,1 -2x v rozteči 79,9+0,05 a rozměr 14±0,1 na 14,15+0,05, srazit hrany 0,5x45° na dírách Ø9-2x, srazit hrany 1,5x45° na zahloubení Ø15-2x.		Frézovací hlava čelní Ø50 mm s VBD, Monolitní fréza Ø16 3z, Monolitní fréza Ø20 4z, Vrták Ø9, záhlubník Ø15 s VBD, fréza na srážení hran Ø10, fréza na srážení hran Ø20 s VBD.
4	OTK	Kontrolovat rozměry. Šířku 54,3+0,1 a délku 124,85+0,05, díry Ø9-2x v rozteči 79,9+0,05 a rozměr 14,15+0,05, zahloubení Ø14/5,85+0,1 -2x, rozteč 79,9+0,05 a rozměr 14,15+0,05.		Digitální výškoměr Posuvné měřítko digitální
5	Frézovací centrum AKIRA SEIKI SV 1350, CNC obrobna	Upnout do hladkých čelistí. Frézovat rozměr 15±0,01 na 15,28+0,02, zahloubit Ø15/5,85+0,1 -2x v rozteči 79,9+0,05 a rozměr 14±0,1 na 14,15+0,05, srazit hrany 0,5x45° na dírách Ø9-2x, srazit hrany 1,5x45° na zahloubení Ø15-2x.		Frézovací hlava čelní Ø50 mm s VBD záhlubník Ø15 s VBD fréza na srážení hran Ø10 fréza na srážení hran Ø20 s VBD

6	OTK	Kontrolovat rozměry. Rozměr 15,28+0,02, zahloubení Ø15/5,85+0,1 - 2x, rozteč 79,9+0,05 a rozměr 14,15+0,05.	Digitální výškoměr Posuvné měřítko digitální
7	Horizontální frézka FH, Klasické stroje	Frézovat vroubkování do hloubky 1,15+0,05.	Frézovací hlava válcová s VBD
8	Ruční úprava	Celkové odjehlení obrobku.	Ruční pilník, Stojanová bruska s gumovým kotoučem
9	Kooperace TZ	Vakuově kalit a popouštět na HRC 53+4.	-
10	OTK	Kontrolovat tvrdost HRC 53+4.	Tvrdoměr HBRV-187,5
11	Rovinná bruska BPH 2000, brusírna	Brousit na hrubo rozměr 15,28+0,04 na rozměr 15,04 oboustranně.	1-300x32x76- A98RA60K9V03-40
12	Rovinná bruska BPH 2000, brusírna	Brousit načisto rozměr 15,04 na rozměr 15±0,01 oboustranně.	1-300x32x76- A98RA60K9V03-40
13	OTK	Kontrolovat rozměr 15±0,01 a kontrolovat rovnoběžnost v toleranci 0,01.	3D měřicí přístroj TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454
14	Rovinná bruska BPH 2000, brusírna	Brousit rozměr 54,3+0,05 na rozměr 54±0,01 oboustranně.	1-300x32x76- A98RA60K9V03-40
15	OTK	Kontrolovat rozměr 54±0,01 a rovnoběžnost 0,01.	3D měřicí přístroj TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454
16	Laserové popisování	Popisovat dle výkresu	Laserový popisovač
17	expedice	Konzervovat a balit.	

1.5 Návrh nové technologie

Pro zefektivnění výroby je navržena technologie frézování dvou rovinných ploch v rozměrech 15±0,01, ve které by se přídavek na dokončení odfrézoval najednou pro variantu A a tudíž by se snížily výrobní náklady a strojní časy nebo pro variantu B, kde by se přídavek odfrézoval částečně pro dokončení na rovinné brusce.

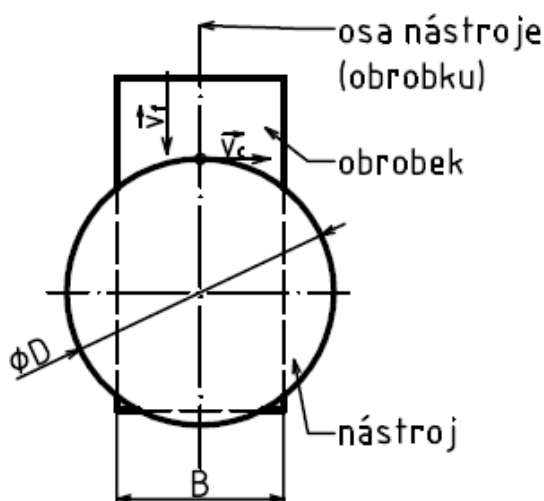
2 VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ ZUŠLECHTĚNÝCH (KALENÝCH) OCELÍ

Pro dobrou efektivitu, produktivitu výroby, pro správné dosažení předepsaných rozměrů a profilu povrchu, jako je např. střední aritmetická úchylnka profilu R_a je nejdůležitější správná volba řezných podmínek. Je mnoho aspektů, které volbu řezných podmínek ovlivňují. Je to druh obráběného materiálu, jeho tepelné zpracování, druh obráběcího stroje, nástroj a řezný materiál.

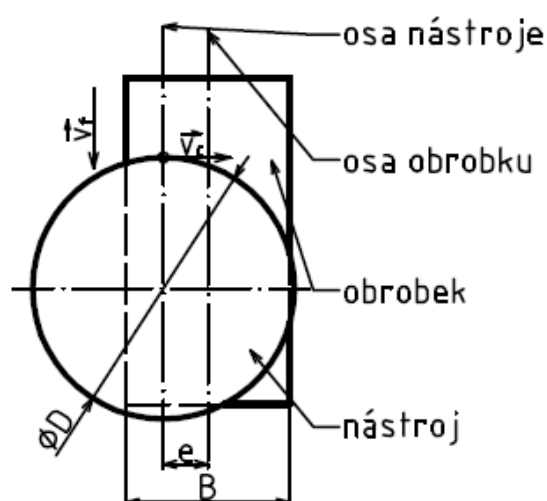
2.1 Čelní frézování

Pro obrábění rovinných ploch se uplatňují dva druhy čelního frézování [7]:

- symetrické (obr. 2.1),
- nesymetrické (obr. 2.2).



Obr. 2.1 Symetrické frézování [7].



Obr. 2.2 Nesymetrické frézování [7].

U symetrického frézování je osa nástroje ve stejné poloze jako osa obrobku. Při nesymetrickém frézování je osa nástroje mimo osu obrobku a osa nástroje může ležet v oblasti obráběné plochy nebo mimo obráběnou plochu [7].

Tyto dva druhy frézování v sobě zahrnují další typy frézování a to sousledné a nesousledné frézování. U symetrického frézování nástroj vždy frézuje v jedné polovině záběru sousledně a v druhé polovině nesousledně. U nesymetrického frézování je jedna část od osy obrobku větší, tedy převládá více sousledné (nesousledné) frézování a při poloze osy nástroje mimo obráběnou plochu dochází jen k frézování souslednému (nesouslednému).

Při nesousledném frézování se tloušťka třísky mění od nulové hodnoty do maximální hodnoty. K oddělování třísky dochází po určitém skluzu břitu po ploše, která je vytvořená předcházejícím zubem. Tím vznikají veliké silové účinky a deformace, které způsobují větší opotřebení břitu. Při sousledném frézování je maximální tloušťka třísky při vnikání břitu do řezu [8].

2.1.1 Průřez třísky

U čelního frézování je **tloušťka třísky** h_i dána vztahem (2.1). Je závislá na úhlu posuvového pohybu φ_i a na úhlu nastavení hlavního ostří κ_r [8,9]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (2.1)$$

kde: f_z [mm] - posuv na zub,
 φ_i [°] - úhel posuvového pohybu,
 κ_r [°] - úhel nastavení hlavního ostří.

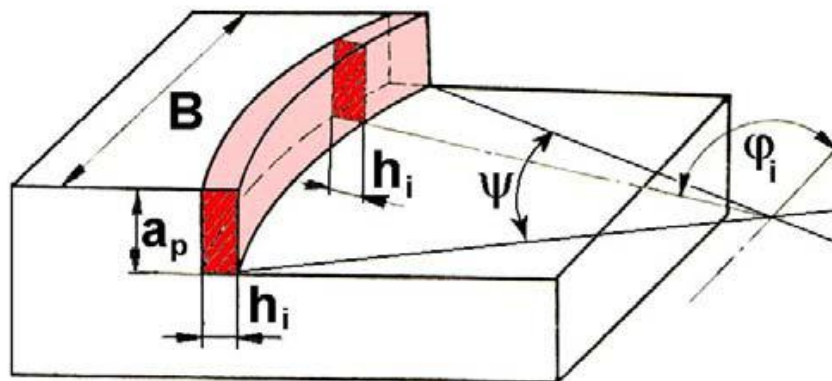
Šířka třísky je se stanoví vztahem (2.2)

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (2.2)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} pro čelní frézování s úhlem nastavení hlavního ostří $\kappa_r=90^\circ$ (viz obr. 2.3) je dán vztahem [8,9]:

$$A_{Di} = b \cdot h_i = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2] \quad (2.3)$$

kde: b [mm] - šířka třísky,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří.



Obr. 2.3 Průřez třísky pro i -tý zub při čelním frézování pro $\kappa_r=90^\circ$ [8].

2.1.2 Řezné síly

Pro vyjádření řezných sil F_{ci} při čelním frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu. Jeho polohu určuje úhel posuvového pohybu φ_i a její velikost určuje měrná

řezná síla k_{ci} se jmenovitým průřezem třísky A_{Di} . Řezná síla F_{ci} v poloze označené i pro úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r=90^\circ$ je dána vztahem (2.4) [8].

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [N]} \quad (2.4)$$

Měrná řezná síla k_{ci} je dána vztahem [9]:

$$k_{ci} = \frac{k_{c1}}{h_i^{mc}} \quad (2.5)$$

kde: k_{c1} [MPa] - měrný řezný odpor pro $A_D=1 \text{ mm}^2$,

h_i [mm] - jmenovitá tloušťka třísky,

mc [-] - exponent vlivu tloušťky třísky.

Poté vztah pro řeznou sílu je [8]:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (2.6)$$

Vztah (2.6) platí pro k_{ci} :

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}}$$

Pro výpočet celkové řezné síly F_c , která je určena součtem jednotlivých řezných sil F_{ci} na břitech frézy v okamžitých polohách jednotlivých břitů je dána vztahem [8]:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (2.7)$$

kde: n_z [-] - počet zubů v záběru.

Úhel záběru frézy pro čelní frézování (viz obr. 2.3) je dán vztahem [10]:

$$\psi = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{B}{D} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (2.8)$$

kde: B [mm] - šířka frézované plochy,

D [mm] - průměr nástroje.

Pro čelní frézování se počet zubů v záběru vyjádří dle vztahu [8]:

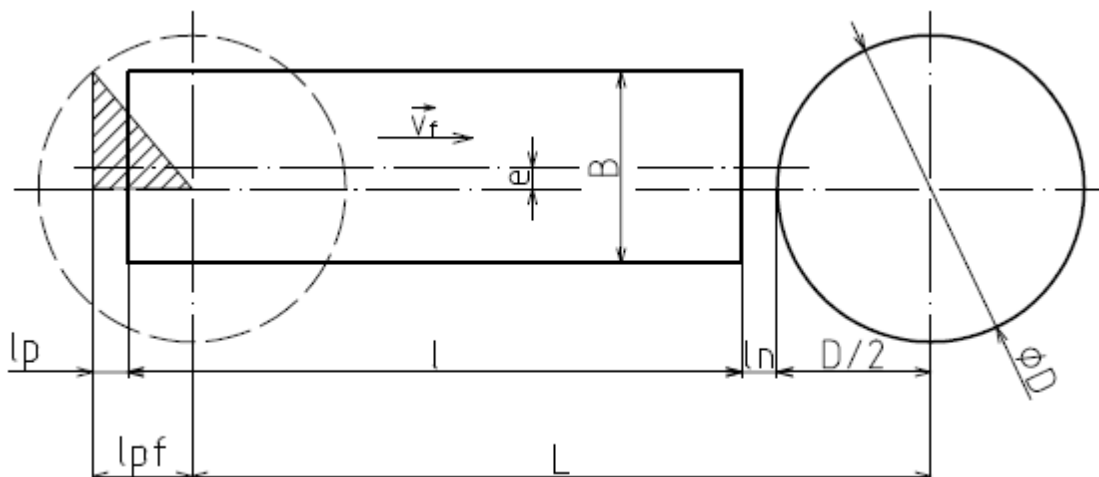
$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \text{ [-]} \quad (2.9)$$

kde: ψ [°] - úhel záběru frézy,

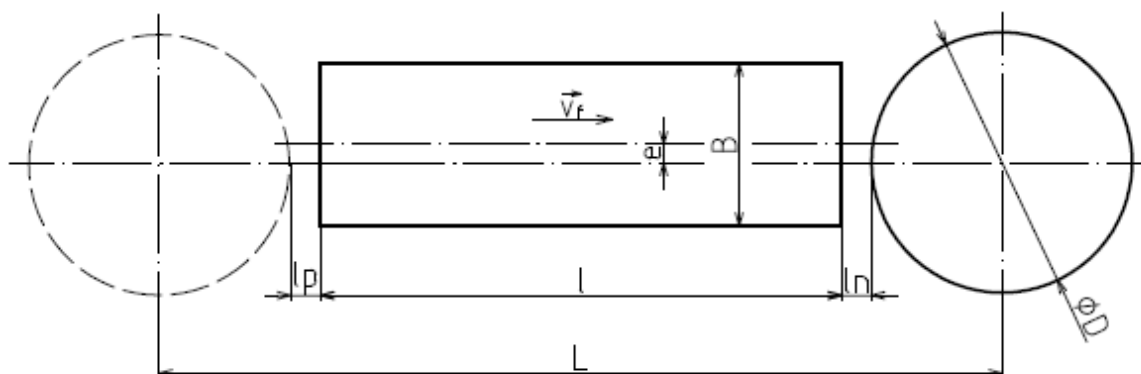
z [-] - počet zubů frézy.

2.1.3 Jednotkový strojní čas

Čas potřebný pro obrobení jedné rovinné plochy čelním frézováním je rozdělen podle typu frézování. Na obrázcích 2.4 a 2.5 je znázorněn rozdíl mezi stanovení jednotkového strojního času pro asymetrické frézování načisto a hrubováním [8].



Obr. 2.4 Dráha frézy pro hrubovací čelní frézování asymetrické [8].



Obr. 2.5 Dráha frézy pro čelní frézování načisto asymetrické [8].

Dle obrázků lze stanovit obecně jednotkový strojní čas [8]:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{n \cdot f} \text{ [min]} \quad (2.10)$$

kde: L [mm] - dráha nástroje ve směru posuvu,
 v_f [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost.

- hodnota L pro čelní hrubé frézování asymetrické [8]:

$$L = l + l_n + l_p + \frac{D}{2} - l_{pf} \quad [mm] \quad (2.11)$$

kde:

$$l_{pf} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2} + e\right)^2} \quad [mm] \quad (2.12)$$

- hodnota **L** pro čelní frézování načisto asymetrické [8]:

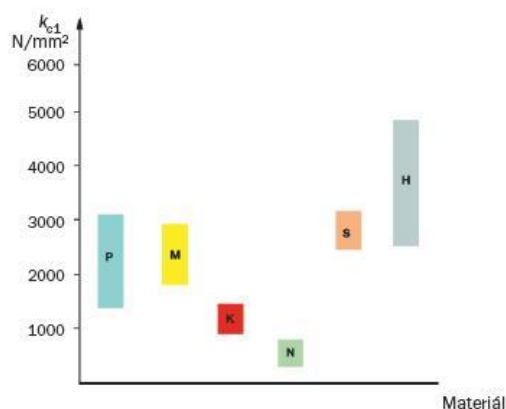
$$L = l + l_n + l_p + D \quad [mm] \quad (2.13)$$

Při stanovování jednotkového strojního času při hrubovacím čelním frézování symetrickém je ve vztahu (2.10) $e=0$ [8].

2.2 Obrobitelnost zušlechtěných ocelí

Zušlechtěné nástrojové oceli patří do skupiny, do které patří dále kalené a popuštěné oceli, které mají hodnotu tvrdosti větší jak 45 HRC až 68 HRC. Dále cementované oceli, oceli pro ložiska (60 HRC), nástrojové oceli dosahující tvrdosti až 68 HRC. Mimo ocelí jsou v této skupině zastoupeny také tvrzené litiny jako je bílá litina (50 HRC). Z důvodu tak vysokých hodnot tvrdostí jsou tyto materiály hůře obrobitelné, při obrábění vzniká velké množství tepla [11].

Nejčastější operací pro obrábění kalených ocelí je dokončování, tedy obrábění s malým úběrem materiálu. Měrná řezná síla (viz obr. 2.6) nabývá vysokých hodnot okolo 2550 až 4870 N/mm². Oproti obrábění nezakalených ocelí jsou tedy řezné síly větší. Proto jsou požadavky na výkon a tuhost obráběcí soustavy vyšší [11].



Obr. 2.6 Měrná řezná síla [11].

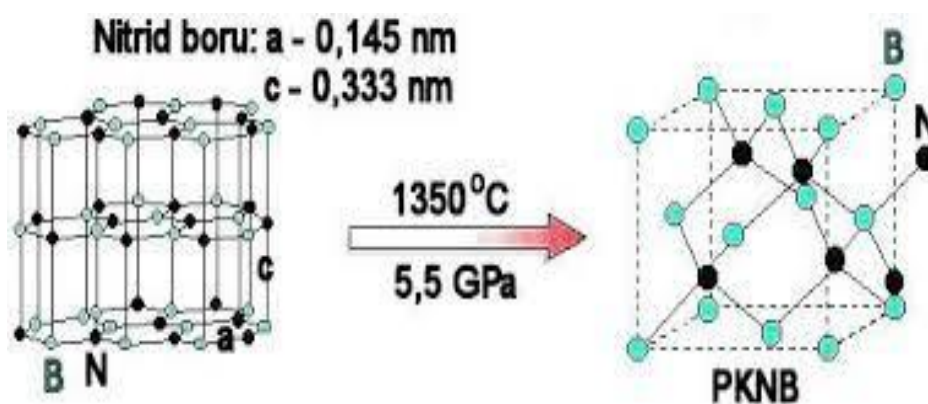
2.3 Řezné materiály vhodné pro obrábění zušlechtěných ocelí

Řezné materiály pro obrábění zušlechtěných ocelí a litin musí vykazovat vysokou odolnost proti plastické deformaci (tvrdost za tepla), chemickou stabilitu za vysokých teplot, mechanickou pevnost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení [11].

Nejvhodnějším materiálem je polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB), který splňuje všechny požadavky. Jako další řezný materiál vhodný pro obrábění je řezná keramika, ať už oxidická, smíšená nebo vyztužená tzn. whiskery. A v neposlední řadě jsou to povlakované slinuté karbidy [11].

2.2.1 Polykrystalický kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru se vyrábí z hexagonálního kubického nitridu bóru za vysoké teploty a tlaku. Schéma transformace hexagonální mřížky na kubickou je znázorněna na obr. 2.7 [9].



Obr. 2.7 Transformace krystalické mřížky [12].

PKNB má vynikající vlastnosti v oblasti obrábění kalených ocelí do tvrdosti až 68 HRC. Je to dáno jeho výbornou odolností proti abrazivnímu opotřebení a tvrdostí za vysokých teplot. Má taky extrémní stabilitu na vzduchu až do teplot okolo 1500 °C. Shrnutí vlastností PKNB je v tab. 2.1 [8,9,12,13].

Tab. 2.1 Vlastnosti PKNB [8,9].

Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	Pevnost v tlaku [GPa]	Mikrotvrdost [HV]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Modul pružnosti ve smyku [GPa]	Lomová houževnatost K _{IC} [MPa.m ^{1/2}]	Teplotní stálost [°C]
3,4 až 4,3	3,8	5000 až 8000	680	280	4,5	1500 až 1600

PKNB se nejčastěji nanáší na matrici ze slinutého karbidu a to buď jako tenká vrstva v řádech jednotek μm nebo jako „roubík“ na špičku VBD (viz obr. 2.8), jako kompaktní destička, která je nalisovaná na substrátu (spékaná vrstva), který tvoří VBD (viz obr. 2.9) nebo jako monolitní VBD [9,14].



Obr. 2.8 VBD s napájeným roubíkem z PKNB [14].



Obr. 2.9 VBD z PKNB se spékávanou vrstvou [14].

2.2.2 Povlakované slinuté karbidy

a) Slinuté karbidy

Jedná se o vysoce tvrdé karbidy, např. karbid titanu TiC, karbid wolframu WC, karbid tantalů TaC, které jsou slinované v kovové matici. Druh kovu pro matici je převážně kobalt Co. Tyto karbidy vykazují vysokou teplotu tavení a velkou tvrdost i za zvýšených teplot [8,9]. Teploty tavení a tvrdost jsou uvedeny v tab. 2.2.

Tab. 2.2 Teplota tavení a tvrdost vybraných karbidů [8,9].

Karbidy	Teplota tavení [°C]	Tvrdost [HV]
TiC	3200	3000
V ₄ C ₃	2800	2500
TbC	3500	2400
TaC	3900	1800
WC	2750	2100

Dodnes se používá dohromady 6 skupin slinutých karbidů, které jsou rozděleny dle normy ISO 513 do 6 skupin (skupiny P, M, K, N, S, H). Každá skupina je vhodná pro různé druhy obráběných materiálů. Pro obrábění tvrdých materiálů je aplikována skupina H (viz tab. 2.3) [8,9,11].

Tab. 2.3 Rozdělení slinutých karbidů a jejich použití [9,11].

skupina	použití
P	Slitiny na bázi Fe tvořící dlouhou třísku. Jsou to oceli automatové, uhlíkové. Dále nelegované, nízkolegované ocelolitiny.
M	Speciální slitiny kovů tvořící dlouhou a střední třísku jako feritické, martenzitické, austenitické a feriticko-austenitické korozivzdorné oceli.
K	Slitiny na bázi Fe tvořící drobnou třísku. Šedá litina nelegovaná, legovaná. Tvárná a temperovaná litina.
N	Neželezné kovy jako hliník, měď a jejich slitiny a nekovové materiály.
S	Speciální žáropevné slitiny na bázi niklu, kobaltu, železa a titanu, superslitiny jako je Inconel.
H	Kalené a tvrzené oceli, oceli zušlechtěné na HRC 45 až 60, tvrzené litiny

b) Povlaky slinutých karbidů

Povlakem se na slinutých karbidech vytvoří velice tvrdá vrstva s dobrou otěruvzdorností a tudíž vynikající odolností proti opotřebení. To je docíleno tím, že povlak

neobsahuje žádné měkké pojivo, má jemnější zrnitost a dochází k minimálním strukturálním defektům, jako jsou póry a dutiny. Základní metody povlakování jsou fyzikální napařování PVD (Physical Vapor Deposition) a chemické napařování CVD (Chemical Vapor Deposition) [8,9].

Povlaky 4. generace

Povlaky většinou vícevrstvé (multivrstvé, více jak deset vrstev a mezivrstev), složeny s různých sloučenin nitridů a karbidů, jako je karbid titanu TiC, nitrid titanu TiN, karbonitrid titanu Ti(C,N), titan aluminium nitrid TiAlN nebo oxid hliníku Al₂O₃. Dále gradientní povlaky a povlaky s nanokrystalických kompozitů na bázi (Al,Ti)N-Si₃N₄ [8,9,12].

- **Multivrstvé povlaky** (obr. 2.10)

Opakovaně střídající se vrstvy různých materiálů jako např. TiN-NbN (dosahující tvrdost až 50 GPa) zaručuje vysokou trvanlivost a zvyšuje odolnost proti šíření trhlin při obrábění [15].



Obr. 2.10 Multivrstvý povlak 4. Generace (Valentine, USA) [8].

- **Gradientní povlaky**

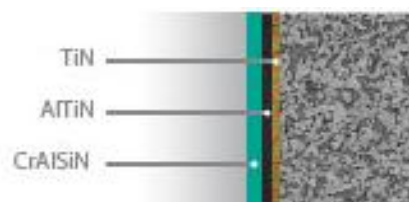
Povlaky tvořené plynulým složením vrstvy TiAlN tak, že Al se ve vzdálenosti od substrátu zvyšuje, aby tvořil oxidační vrstvu při zachování dostatečné tvrdosti [16].

- **Nanokompozitní povlaky**

Multivrstvý nanokompozitní povlak s vrstvou běžných nitridů (nanášený metodou PVD) pod obchodním názvem TripleCoatings od firmy SHM je složen z TiN + AlTiN + supertvrký nanokompozit. Běžný nitrid, v tomto případě TiN, je nanesen na podkladový materiál jako první z ochrany před velkým lokálním zatížením, dále je nanesena střední vrstva AlTiN a poté je nanesen supertvrký nanokompozit [17,18].

Triplecoating Si, SHM Šumperk (obr 2.11) – povlak TiN+AlTiN+vrstva s vysokým obsahem křemíku umožňující použití povlaku za intenzivních řezných podmínek při obrábění zušlechtěných ocelí (nad 60 HRC) [17].

Triplecoating Cr, SHM Šumperk (obr 2.12) – povlak tvořený adhezní vrstvou TiN, středovou vrstvou AlTiN a vrchní, velice tvrdou nanokompozitní vrstvou CrAlSiN [17].



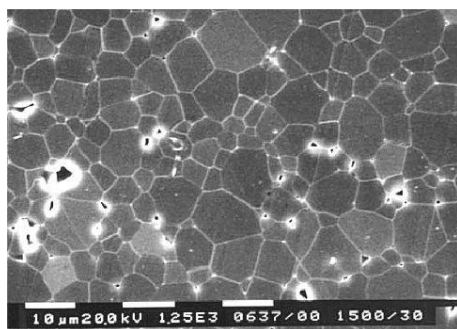
Obr. 2.11 Triplecoating Si, SHM Šumperk [17]. Obr. 2.12 Triplecoating Cr, SHM Šumperk [17].

2.2.1 Řezná keramika

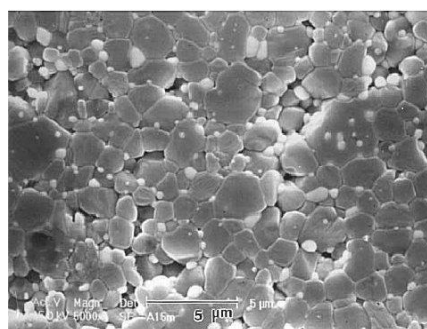
Řezná keramika je látka s kubickým a hexagonálním uspořádáním krystalické mřížky s podílem amorfni fáze. Vazby, mezi jednotlivými atomy jsou iontové a kovalentní. Velikost zrna bývá kolem 1 μm . Řezná keramika se vyznačuje vysokou tvrdostí, nízkou měrnou hmotností. Nevýhodou je nízká houževnatost (zvýšená křehkost) [8,9].

Řezná keramika se obvykle dělí do několika skupin [8,9] :

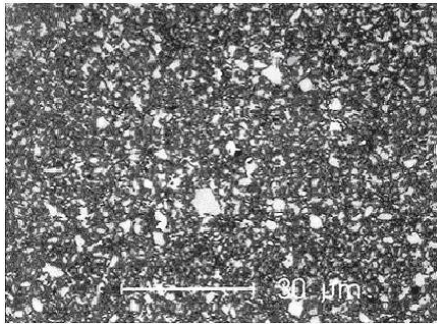
- **oxidická keramika** – čistá (Al_2O_3), obr. 2.13,
 - polosměsná ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{CoO}$), obr.2.14
 - směsná ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$), obr. 2.15,
- **neoxidická nitridová keramika** (Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{TiN}$, sialony), obr. 2.16, 2,17,
- **vystužená** (keramika oxidická nebo nitridová, vyztužená pomocí vláken, tzn. whiskerů SiC nebo Si_3N_4), viz obr. 2.18.



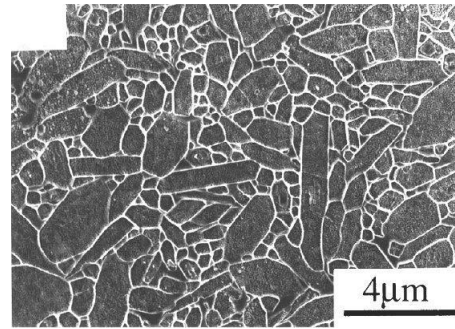
Obr. 2.13 Oxidická keramika čistá Al_2O_3 [8].



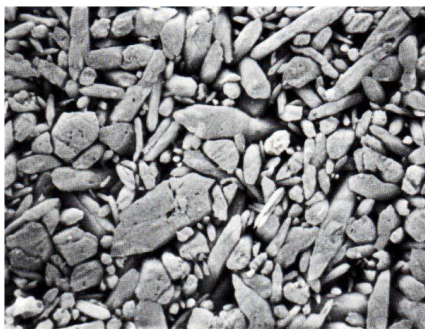
Obr. 2.14 Oxidická keramika polosměsná Al_2O_3 +15 % ZrO_2 [8].



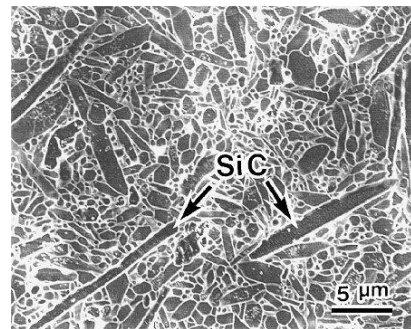
Obr. 2.15 Oxidická keramika směsná Al_2O_3 +TiC [8].



Obr. 2.16 Neoxidická keramika Si_3N_4 [8].



Obr. 2.17 Keramika typu sialon [8].



Obr. 2.18 Neoxidická keramika Si_3N_4 vyztužená whiskery SiC [8].

Dle ČSN ISO 513 se řezná keramika podle rozdělení značí symboly [13]:

- CA – oxidová keramika na bázi Al_2O_3 ,
- CM – směsná keramika na bázi Al_2O_3 s přísadou neoxidických komponentů,
- CN – neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 ,
- CC – povlakovaná keramika CA, CM, CN.

Hlavní důvody použití řezné keramiky pro obrábění zušlechtěných (kalených) ocelí jsou vysoké teploty tavení a relativně vysoká tvrdost použitých keramických materiálů (viz tab. 2.4).

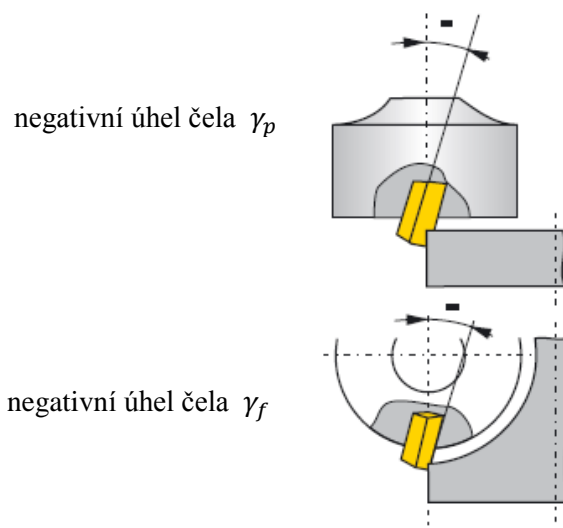
Tab. 2.4 Teplota tavení a tvrdost vybraných keramických materiálů [12].

Materiál	Teplota tavení [°C]	Tvrdost [HV]
Al_2O_3	2050	2000
ZrO_2	2700	
SiC	2200	2500

Z výše popsaných řezných keramik jsou pro obrábění zušlechtěných (kalených) ocelí vhodné řezné keramiky oxidické směsné (Al_2O_3 +TiC, Al_2O_3 + ZrO_2 +TiC, Al_2O_3 +TiC+TiN) a vyztužené whiskery. Nevhodná je neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 a to z důvodu vysoké afinity k železu Fe při vysokých teplotách v místě řezu [12,19].

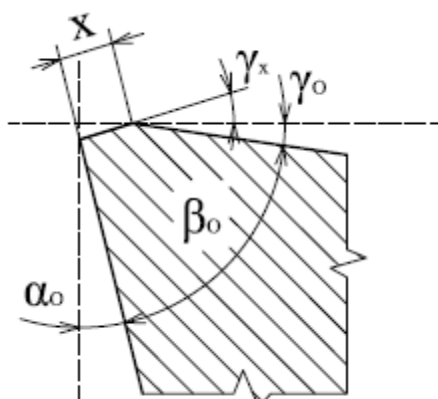
2.4 Vhodná geometrie pro nástroj a VBD

Zušlechtná ocel je velice tvrdá, a tak nástroje a použité VBD musí vykazovat vysokou tuhost, pevnost v ohybu a odolnost proti vylomení břitu. Pro tvrdé materiály je vhodná negativní geometrie nástroje, např. dvojitá negativní geometrie (viz obr. 2.19), kdy je úhel čela γ_p v nástrojové rovině zadní i úhel čela γ_f v nástrojové rovině boční negativní, kde se používá i negativní VBD. Nevýhodou jsou vznikající velké řezné síly a tudíž je kladen důraz na výkon a tuhost obráběcího stroje [20].

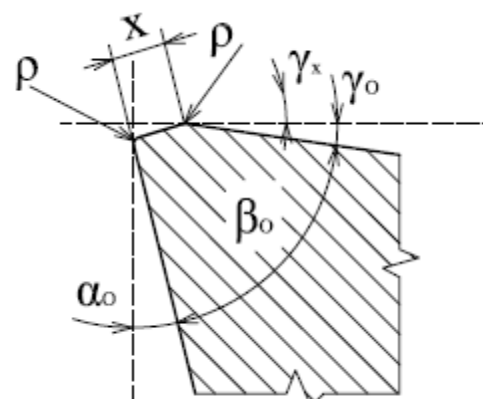


Obr. 2.19 Dvojitá negativní geometrie (v zadní rovině p a boční rovině f) [21].

Ostří na břitu VBD musí být tuhé a musí vykazovat odolnost proti porušení (vylamování břitu). Z toho důvodu se v zásadě používá břit s fazetkou (obr. 2.20) a rektifikované ostří s fazetkou (obr. 2.21) [21]. Zobrazeno v nástrojové rovině ortogonální.



Obr. 2.20 Břit s fazetkou [21].



Obr. 2.21 Břit s rektifikovaným ostřím a fazetkou [21].

- **Břit s fazetkou** – fazetka o šířce x a úhlu γ_x zvětšuje úhel čela γ_o . Zvětší se tím pevnost břitu [21].
- **Rektifikovaný břit s fazetkou** – ostří břitu s fazetkou je navíc zaobleno malým zaoblením ρ . Vykazuje větší odolnost proti mechanickému porušení [21].

2.5 Opotřebení VBD při frézování

Při frézování dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj-obrobek, nástroj-tříška, dále i ke kontaktu nástroje s obráběným materiálem na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce břitu a taky s odcházející třískou na čele nástroje. To vše má za následek opotřebení nástroje [9].

Opotřebení závisí na mnoha faktorech jako jsou [9,21]:

- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného a řezného materiálu,
- druh obráběcí operace (hrubování, dokončování s přerušovaným nebo plynulým řezem),
- geometrie nástroje,
- řezné podmínky,
- vnější podmínky obrábění (řezné prostředí).

Mezi hlavní mechanizmy opotřebení patří **mechanické typy**, jako jsou **adhezní** a **abrazivní opotřebení**, a **chemické typy opotřebení**, které jsou **oxidace** a **difuze** [8,21].

Abrazivní opotřebení je následek brusného otěru mikroskopických tvrdých částic uvolněných jak z obráběného materiálu, tak z materiálu řezného [9,21].

Adhezní opotřebení vzniká v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů při kterých vznikají a následně zanikají mikrosvary mezi čelem nástroje a odcházející třískou [9,21].

K **difuznímu opotřebení** dochází, když difundují atomy z obráběného materiálu do řezného materiálu. To se děje i naopak. Vytváří tuhé roztoky (uvolněný uhlík při obrábění oceli přechází do železa) nebo chemické sloučeniny, jako jsou karbidy (jsou velmi křehké a degradují řezný materiál) [9,21].

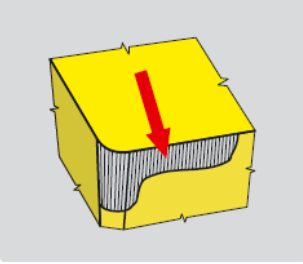
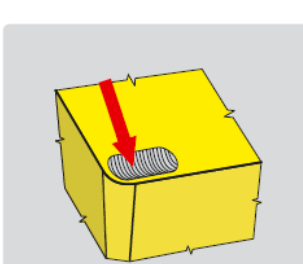
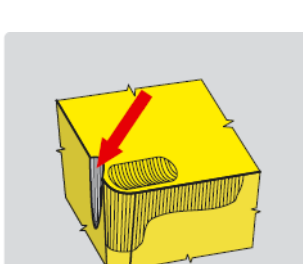
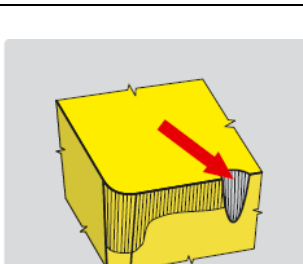
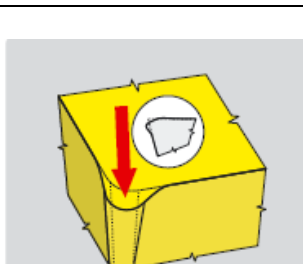
Oxidační opotřebení má počátek u vzniku chemických sloučenin na povrchu nástroje (přítomnost kyslíku a oxidace v okolním prostředí) [9].

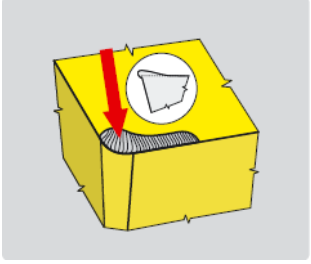
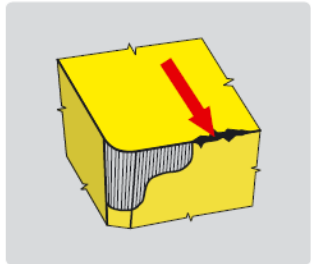
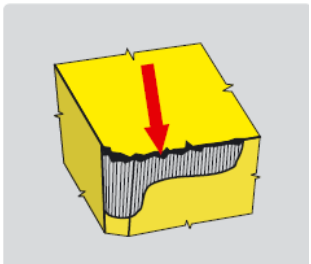
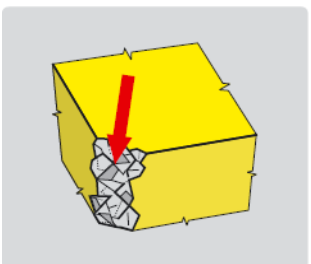
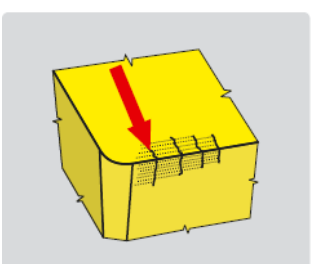
2.3.1 Formy opotřebení VBD ze slinutých karbidů a jejich eliminace

Všem opotřebení se nelze vyhnout, pouze je eliminovat z důvodu větší trvanlivosti nástroje. Rychlé opotřebení vzniká v důsledku nesprávných řezných podmínek, použití špatného typu slinutých karbidů, zvolenou geometrií. V tab. 2.5 jsou popsány formy opotřebení a typy řešení, jak tyto formy opotřebení eliminovat.

Tab. 2.5 Formy opotřebení a jejich eliminace [11,21].

zobrazení	popis
	Opotřebení hřbetu – hlavní kritérium určující trvanlivost břitu VBD. Vzniká v důsledku působení mechanismů

	<p>opotřebení. Je také způsobeno vysokou řeznou rychlostí, malou odolností proti otěru nebo velikým posuvem na zub f_z.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • použití otěruvzdornějšího typu slinutých karbidu, • snížení řezné rychlosti v_c, • lepší odvádění třísek (stlačeným vzduchem), • zvýšení posuvu f_z.
	<p>Výmol na čele – vznikající nejčastěji u VBD s rovným čelem a difuzním otěrem příčinou vysokých teplot.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • použití pozitivnější řezné geometrie, • lepší povlak na VBD, • snížení řezné rychlosti v_c, • zvýšení intenzity chlazení.
	<p>Oxidační rýha na vedlejším břitu – jedno z nejdůležitějších kritérií ovlivňujících životnost VBD. Projeví se obzvláště na jakosti povrchu.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • lepší povlak na VBD (Al_2O_3, pokud to dovolují podmínky), • snížení řezné rychlosti v_c, • zvýšení intenzity chlazení.
	<p>Vrubové opotřebení na hlavním břitu – vzniká v kontaktu mezi nástrojem a obrobkem v důsledku zpevnování povrchových vrstev obrobku, dále tvrdou kůrou nebo okujemi na obrobku.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • lepší povlak na VBD (Al_2O_3, pokud to dovolují podmínky), • použití nástroje s menším úhlem nastavení hlavního ostří κ_r.
	<p>Plastická deformace špičky – vzniká přetížením břitu vysokou teplotou a tlakem, což je příčina vysokých řezných rychlostí a posuvů.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • použití otěruvzdornějšího typu povlaku slinutých karbidu, • snížení řezné rychlosti v_c, • snížení posuvu f_z, • zvýšení intenzity chlazení, • použití VBD s větším poloměrem zaoblení a větším úhlem špičky.
	<p>Tvorba nárůstků – nalepování obráběného materiálu na břit</p>

	<p>nástroje. Je to mikronávar a při jeho odtrhávání dochází k porušení břítu.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • zvýšení řezné rychlosti v_c, • zvýšení posuvu f_z, • použití pozitivnější řezné geometrie, • použití olejové mlhy nebo procesní kapaliny.
	<p>Porušování ostří břítu (mimo záběr) – příčinou je nevhodné utváření třísky, která ostří při odchodu z místa řezu mechanicky poškozuje.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • upravení posuvu f_z, • použití nástroje s menším úhlem nastavení hlavního ostří κ_r, • použití lepšího utvářeče • použití houževnatějšího typu slinutých karbidů
	<p>Křehké porušování ostří břítu – mikrovystipování, většinou se vyskytuje s jiným typem opotřebení. Je obtížně identifikovatelné.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • použití houževnatějšího typu slinutých karbidů, • snížení intenzivních řezných podmínek, • použití jiné řezné geometrie, • při najíždění do záběru snížit posuv f_z.
	<p>Destrukce břítu (špičky) nástroje – je závislá na materiálu obrobku i nástroje, hlavně na tuhosti stroj-nástroj-obrobek.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • použití houževnatějšího typu slinutých karbidů, • snížení řezných podmínek (snížení posuvu f_z a šířky záběru ostří a_p), • použití VBD s větším poloměrem zaoblení a větším úhlem špičky, • použití lepšího utvářeče, • při najíždění do záběru snížit posuv f_z.
	<p>Teplotní (hřebenové) trhliny – způsobené dynamickým tepelným zatěžováním v přerušovaných řezech.</p> <p>Typ řešení:</p> <ul style="list-style-type: none"> • při chlazení nepoužívat procesní kapalinu (pouze stlačený vzduch z důvodu odstranění třísek z místa řezu, • snížení řezné rychlosti.

2.3.2 Formy opotřebení VBD z PKNB a řezné keramiky

Formy opotřebení VBD z PKNB a řezné keramiky jsou stejného typu jako opotřebení VBD ze slinutých karbidů (viz kap. 2.3.1). PKNB a řezná keramika je oproti slinutým karbidům relativně křehčí, a tím je u nich větší pravděpodobnost nepředvídatelné a samovolné poškození břitu. Nejčastější formy opotřebení těchto řezných materiálů je lom nebo odprýskávání břitu. Rychlé opotřebení břitu nastává špatnou volbou řezných podmínek a nevhodnou volbou řezného materiálu pro danou aplikaci [22].

• Opotřebení VBD z PKNB

Aplikace PKNB na zušlechtnuté (kalené) oceli vede k vysokým teplotám v místě styku čelní plochy VBD s odcházející třískou, což se projevuje žlábkovitým opotřebením na čele VBD. Dále je to abrazivní opotřebení, které je následkem obrábění materiálů obsahující tvrdé, abrazivní částice. Podrobný přehled forem opotřebení a následné doporučené opatření je uvedeno v tab. 2.6 [22].

Tab. 2.6 Formy opotřebení VBD z PKNB a doporučená opatření [22].

Forma opotřebení	příčina	řešení
opotřebení hřbetu	nevhodná teplota břitu	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšení řezné rychlosti v_c a posuvové rychlost v_f • zvětšení šířky záběru ostří a_p
výmol na čele	nevhodná teplota břitu	<ul style="list-style-type: none"> • snížení řezné rychlosti v_c a posuvové rychlost v_f • použití povlakované VBD • zvýšení intenzity chlazení • zmenšení úhlu sražení břitu • použití chlazení (pouze v nepřetržitém řezu)
vrubové opotřebení	nevhodná teplota břitu, příliš vysoké řezné síly	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšení řezné rychlosti v_c a snížení posuvové rychlost v_f • zvětšení úhlu nastavení hlavního ostří κ_r (nejlepší volba je kruhová destička)
vylamování částic břitu	příliš vysoké řezné síly	<ul style="list-style-type: none"> • použití VBD se sraženými břity • zvýšení tuhosti soustavy • odstranění vibrací • zvýšení intenzity chlazení • sražení hrany na obrobcích při najíždění a vyjíždění nástroje
odprýskávání břitu	příliš vysoké řezné síly	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšení řezné rychlosti v_c a snížení posuvové rychlosti v_f • obrábět bez chlazení • zmenšení úhlu nastavení

		hlavního ostří κ_r
lom břitu	příliš vysoké řezné síly	<ul style="list-style-type: none"> • snížení šířky záběru ostří a_p • snížení řezné rychlosti v_c • zvětšení poloměru zaoblení • použití sražených a zaoblených břitů

- **opotřebení VBD z řezné keramiky**

Řezná keramika vykazuje velikou křehkost a to se projevuje vysokou citlivostí ke všem druhům lomu, dále jsou citlivé na opotřebení ve tvaru vrubu. Nejčastější formy opotřebení a jejich snížení je v tab. 2.7 [22].

Tab. 2.7 Formy opotřebení VBD z řezné keramiky a doporučená opatření [22].

Forma opotřebení	příčina	řešení
opotřebení hřbetu	nadměrná posuvová rychlost a šířka záběru ostří	<ul style="list-style-type: none"> • snížení řezné rychlosti v_c • použití většího poloměru špičky
výmol na čele	nadměrná posuvová rychlost a šířka záběru ostří	<ul style="list-style-type: none"> • snížení řezné rychlosti v_c • zmenšení úhlu nastavení hlavního ostří κ_r
teplotní trhliny	Strmé cykly ohřevu a ochlazování během řezného procesu nadměrná posuvová rychlost a šířka záběru ostří	<ul style="list-style-type: none"> • obrábění bez chlazení • snížení řezné rychlosti v_c • snížení posuvové rychlosti v_f
vrubové opotřebení	nadměrná posuvová rychlost a šířka záběru ostří	<ul style="list-style-type: none"> • snížení šířky záběru ostří a_p • snížení posuvové rychlosti v_f • zvýšení průtoku procesní kapaliny
odprýskávání břitu	nadměrná posuvová rychlost, odtrhávání nárůstku, slabá břit	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšení stability soustavy • zvětšení úhlu nastavení hlavního ostří κ_r
plastická deformace	nadměrná posuvová rychlost a šířka záběru ostří	<ul style="list-style-type: none"> • snížení šířky záběru ostří a_p • snížení řezné rychlosti v_c • snížení posuvové rychlosti v_f
nárůstek	vysoká afinita materiálu nástroje s materiálem obrobku, nízká řezná rychlost	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšení řezné rychlosti v_c • zvýšení posuvové rychlosti v_f • použití většího úhlu čela
lom břitu	nadměrná posuvová rychlost a šířka záběru ostří	<ul style="list-style-type: none"> • snížení posuvové rychlosti v_f

- snížení šířky záběru ostří a_p
- zvýšení stability systému

2.6 Metody frézování zušlechtěných (kalených) ocelí

Pro obrábění zušlechtěných ocelí je nejvíce využívána metoda HSC (High Speed Cutting) s použitím chlazení vzduchem, v překladu vysokorychlostní obrábění [7,23,24].

HSC (High Speed Cutting) – vysokorychlostní obrábění

Hlavním rozdílem mezi konvenčním obráběním a obráběním HSC je mechanismus tvorby třísky. Oddělování třísky je velmi složitý proces závisející na mnoha faktorech. Jsou to fyzikální vlastnosti daného materiálu a jejich podmínky pro plastickou deformaci. Další nejvýraznější vliv má řezná rychlost v_c ovlivňující množství vyvinutého tepla. Rostoucí řeznou rychlostí se zvyšuje množství práce, potřebné pro řezání, která se skoro celá mění na teplo – asi 95 %. Zbytek práce se podílí na pružných deformacích, na deformaci mřížky kovu a na vytvoření nových povrchů. Největší část vzniklého tepla je odvedeno třiskou, což je výhodné z hlediska neovlivnění vlastností obráběného povrchu a řezného nástroje [7,23,24].

Při zvyšující se řezné rychlosti se oblast plastické deformace v zóně tvorby třísky zužuje a tříska vzniká plastickým skluzem v jedné rovině, tj. rovina stříhu. Mění se metalurgické, chemické a mechanické vlastnosti třísky. Tím tříska zmenší přitlačnou sílu (normálovou sílu F_N) na čelo nástroje. Zmenší se celková řezná síla i odpor, zvětší se úhel smykové roviny, dojde ke ztenčení průřezu třísky a zvýší se rychlost v_f jejího odchodu z kontaktní zóny. [7,23,24].

Hlavní výhody HSC technologie jsou [7,24] :

- dosažení vysoké kvality povrchu bez vzniku nežádoucích reziduálních tahových napětí,
- větší objem odebíraného materiálu za jednotku času oproti konvenčním technologiím a broušením,
- spotřeba výkonu u HSC na odebrání stejného množství materiálu je čtyřikrát menší, jako u broušení,
- snížení řezných sil vlivem menšího pěchování třísky,
- snížení tepelného namáhání obrobku a nástroje,
- snížení vzniku vibrací (vysoké otáčky vřetene jsou obvykle mimo oblast samobuzeného kmitání,
- obrábění bez použití procesních kapalin, což má ekonomické výhody a nižší ekologický dopad na životní prostředí.

Mezi nevýhody patří [7,24]:

- vyšší a investiční náklady,

- malé množství verifikovaných technických dat pro HSC obrábění různých druhů obráběných materiálů,
- větší důraz na bezpečnost obsluhy.

Pro obrábění zušlechtěných ocelí HSC technologií se používá PKNB (viz podkapitola 2.2.1). Je to dáno jeho odolností proti teplotním šokům, odolností proti mechanickému opotřebení. Např. při frézování vodících ploch obráběcích strojů se dosahuje rovinnosti 0,01/1000 mm a střední aritmetické úchyly profilu Ra 0,6 až 0,8 μm . Řezná rychlost se pohybuje v rozmezí 200 až 400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při posuvech 1000 až 2000 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Nároky na tuhost stroje a dynamickou přesnost frézovacích hlav jsou mnohem větší než u konvenčních způsobů frézování. Požadavek na axiální a radiální házení frézovacích hlav je v rozmezí 2 až 5 μm podle velikosti frézovací hlavy [7,24].

3 METODY OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK

Optimalizace řezných podmínek se provádí z důvodu nalezení co nejefektivnějšího způsobu, jak obrobit danou součást. Optimalizace je rozdělena do dvou směrů [25]:

- konvenční optimalizace (optimální řešení),
- nekonvenční optimalizace (blízké optimálnímu řešení).

3.1 Konvenční optimalizace řezných podmínek

Pro správnou volbu řezných podmínek je nutné dodržet následující zásady [7]:

- řezné podmínky musí zajistit splnění kvalitativních a kvantitativních požadavků na obráběnou součást,
- velikost průřezu třísky musí taková, aby vyhovovala tuhosti soustavy,
- složky řezného odporu nemůžou být větší, jako maximálně přípustné síly v jednotlivých směrech,
- výkon řezání musí být menší, než užitečný výkon elektromotoru stroje,
- nesmí být překročena řezivost nástroje,
- musí být splněna minimálně přípustná výrobnost stroje za časovou jednotku,
- řezné parametry musí být v mezích přípustných intervalů,
- při dokončovacím obrábění nesmí být překročena limitní hodnota posuvu, která je dána předepsaným parametrem povrchu (např. střední aritmetická úchylka profilu).

V praxi se používá mnoho druhů optimalizací, jako např. optimalizace výrobních nákladů nebo optimalizace výrobního času [9].

3.2 Optimalizace výrobních nákladů

Optimalizace výrobních nákladů je dále stanovena s řešením **optimální řezné rychlosti** nebo **optimální trvanlivosti nástroje**. Pro stanovení celkových operačních výrobních nákladů N_c pro jednu zvolenou obráběnou plochu jedním nástrojem se použije vztah [9]:

$$N_c = N_s + N_N + N_V \text{ [Kč]} \quad (3.1)$$

- kde: N_s [Kč] - náklady na strojní práci,
 N_N [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na 1 obráběný kus,
 N_V [Kč] - náklady na vedlejší práci.

Náklady na strojní práci N_s [9]:

$$N_s = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} \quad (3.2)$$

kde: t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas,
 N_{sn} [Kč] - hodinová sazba stroje,
 N_{sm} [Kč] - minutová sazba stroje, která je závislá na hodinové sazbě stroje.

Další člen celkových výrobních nákladů je N_N . Jsou to náklady na nástroj a jeho výměnu N_T , které jsou vztaženy na jednu trvanlivost břítu a počet obrobených kusů tímto břítem Q_T [9]:

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} \quad (3.3)$$

- Náklady na nástroj a jeho výměnu [9]:

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3 \quad (3.4)$$

kde: N_1 [Kč] - cena VBD,
 n_B [-] - počet břitů VBD,
 N_2 [Kč] - cena držáku (cena nástrčné frézovací hlavy), z -jeho životnost
 N_3 [Kč] - náklady na upnutí (seřízení VBD).

- Počet obrobených kusů jedním břítem při dané trvanlivosti [7,9]:

$$Q_T = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}} \quad (3.5)$$

kde: T [min] - trvanlivost břítu,
 λ [-] - podíl čistého času řezání $\lambda = \frac{l}{L}$, l je délka obráběné plochy [mm], L je celková délka, kdy je zapnut posuv.
 t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas.

Náklady na vedlejší práci N_V :

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} = t_{AS} \cdot N_{Vm} \quad (3.6)$$

kde: t_{AV} [min] - jednotkový vedlejší čas,
 D_V [Kč] - hodinová sazba na vedlejší práci,
 N_{Vm} [Kč] - minutová sazba na vedlejší práci, která je závislá na hodinové sazbě na vedlejší práci.

Zahrnutím dílčích vztahů do rovnice (3.1) se vyjádří vztah [9]:

$$N_c = \frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm} + \frac{L}{T \cdot n \cdot f} \cdot N_T \cdot \lambda + t_{AV} \cdot N_{vm} \quad (3.7)$$

a) **Řešení s hledáním optimální řezné rychlosti** $v_{c \text{ opt1}}$ [9].

Využívá se základní Taylorův vztah pro vyjádření řezivosti nástroje i vztahu mezi T a n:

$$T \cdot v_c^m = C_T \Rightarrow T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (3.8)$$

kde: C_T [-] - konstanta, $c_T = c_v^{1/m}$,
 m [-] - exponent.

Po dosazení do vztahu (3.7), následné úpravě a analytickém řešení průběhu funkce a nalezení jejího minima je získán vztah pro optimální řeznou rychlost $v_{c \text{ opt1}}$ [9]:

$$v_{c \text{ opt1}} = \left(\frac{C_T}{\lambda} \cdot \frac{N_{sm}}{N_T \cdot (m-1)} \right)^{1/m} \quad (3.9)$$

b) **Řešení s hledáním optimální trvanlivosti** T_{opt1} [9].

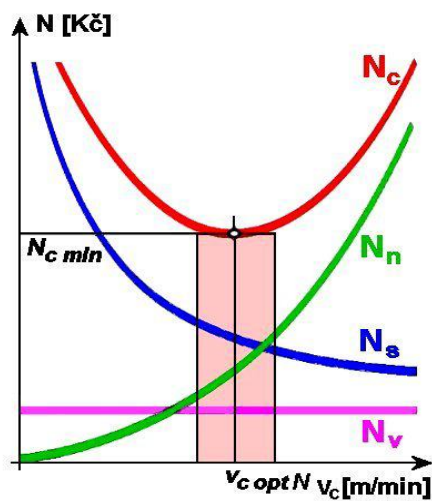
Pro kritérium minimálních výrobních nákladů s optimální trvanlivostí se postupuje analogicky jako pro optimální řeznou rychlost, avšak z Taylorova vztahu se vyjádří otáčky n [9]:

$$T \cdot v_c^m = C_T \Rightarrow v_c = \left(\frac{C_T}{T} \right)^{1/m} = v_c = \frac{c_v}{T^{1/m}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{c_v \cdot 1000D \cdot n}{T^{1/m} \cdot D \cdot n} \quad (3.10)$$

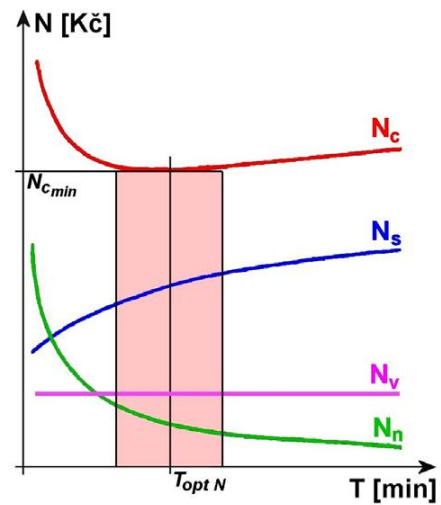
Po dosazení do vztahu (3.7), následné úpravě a analytickém řešení průběhu funkce a nalezení jejího minima je získán vztah pro optimální trvanlivost T_{opt1} [9]:

$$T_{\text{opt1}} = (m-1) \cdot \lambda \cdot \frac{N_T}{N_{sm}} \quad (3.11)$$

Grafické vyjádření závislosti **celkových výrobních nákladů** na **řezné rychlosti** (s vyznačením $v_{c \text{ opt}}$) je znázorněno na obr.3.1. Na obr. 3.2 jsou **celkové výrobní náklady** v závislosti na **trvanlivosti** (s vyznačením T_{opt}) [8].



Obr. 3.1 Závislost nákladů na řezné rychlosti [8].



Obr. 3.2 Závislost nákladů na trvanlivosti [8].

3.3 Optimalizace výrobního času

Při optimalizaci výrobního času je řešení optimální trvanlivost nástroje T_{opt} nebo optimální řezná rychlost $v_{c\ opt}$, pro minimální výrobní čas, resp. maximální výrobnost. Výpočet výrobního času je opět vztažen na obrobek jedné plochy jedním nástrojem a je dán vztahem [9]:

$$t_A = t_{AS} + t_N + t_{AV} \quad (3.12)$$

kde: t_A [min] - operační čas jednotkové práce,
 t_N [min] - čas na výměnu nástroje.

Jednotkový strojní čas je dán vztahem (2.8), t_N je dán vztahem [9]:

$$t_N = \frac{t_{Ax}}{Q_T} \quad (3.13)$$

kde: t_{Ax} [min] - čas výměny nástroje.

Q_T je dán vztahem (3.5). Po dosazení dílčích vztahů do rovnice (3.12) je vyjádřen výrobní čas [9]:

$$t_A = \frac{L}{n \cdot f} + \frac{t_{Ax} \cdot \lambda \cdot L}{T \cdot n \cdot f} + t_{AV} \quad (3.14)$$

Ze vztahu (3.14) lze dále úpravami, nalezením extrému dostat vztahy pro [9]:

- výpočet **optimální řezné rychlosti** $v_{c\ opt2}$ pro minimální výrobní čas,
- výpočet **optimální řezné trvanlivosti** T_{opt2} pro minimální výrobní čas.

Po vyjádření v_c z Taylorova vztahu (a následně úpravě na výpočet otáček n) a následném dosazení do vztahu (3.14) je dán vztah s ohledem na optimální trvanlivost T_{opt2} [9]:

$$t_A = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot T^{1/m}}{1000 \cdot C_v \cdot f} + \frac{t_{Ax} \cdot \lambda \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot T^{1/m}}{T \cdot 1000 \cdot C_v \cdot f} + t_{AV} \quad (3.15)$$

Následnou úpravou je dán vztah pro optimální trvanlivost T_{opt2} :

$$T_{opt2} = (m - 1) \cdot \lambda \cdot t_{Ax} \quad (3.16)$$

Pro optimalizaci celkového technologického procesu se objevuje celá řada omezujících podmínek, které v sobě zahrnují řadu fyzikálních, technologických a ekonomických omezení. Pro tyto omezující podmínky se přiřazují kritériální funkce a ty sledují předem stanovený cíl jako je [9]:

- dosažení nejnižšího výrobního času,
- dosažení nejvyšší produktivity práce,
- docílení nejnižší teploty obrábění,
- plné využití výkonu stroje (nebo dosažení nejnižšího potřebného výkonu k obrábění),
- dosažení specifických požadavků na kvalitu obrobeneé plochy.


Ne vždy lze docílit jednoho optimálního cíle a proto je nutné najít kompromis, který je závislý na výrobních podmínkách [9].

4 STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE PRO DOKONČOVACÍ OPERACI V ZUŠLECHTĚNÉM STAVU

Pro dokončovací operaci se používá již zmíněná konvenční technologie a to rovinné broušení. Veškeré broušení probíhá na horizontální rovinné brusce označené BPH 20 (TOS). Potřebné technické data jsou uvedeny v tabulce 4.1.

4.1 Použitý stroj

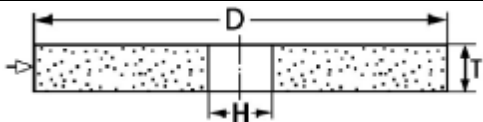
Tab. 4.1 Technické data [26].

Horizontální rovinná bruska BPH (TOS)			
			
Rozměry stolu	[mm]	200 x 630	
Podélný pohyb stolu	[mm]	690	
Příčný pohyb stolu	[mm]	225	
Svislý pohyb brusného vřetena	[mm]	350	
Rychlost podélného posuvu stolu	[m.min ⁻¹]	1 až 18	
Příčný posuv stolu v rozsahu	[mm]	0,5 až 6	
Svislý přísuv brusného kotouče do záběru	hydraulický přísuv	[mm]	0,01-0,05
	na otáčku ručního kola (1díl stupnice)	[mm]	0,01
Pohon brusného vřetena	otáčky	[min ⁻¹]	2350 až 3350
	jmenovitý příkon	[kW]	1,9
Standardní brusný kotouč	vnější průměr	[mm]	250
	šířka	[mm]	18
	otvor	[mm]	76

4.2 Použitý nástroj

Pro tuto výrobu je použit brousící kotouč typu 1 s označením T1 200x20x51 5SG46G12VXP. Tvar, rozměry a specifikace brousícího kotouče jsou v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Tvar, rozměry a specifikace brousicího kotouče [27,28].

Brousny kotouč		T1 200x20x51 5SG46G12VXP	
Tvar	T1		
rozměry	D x T x H [mm]	200x20x51	
specifikace	typ zrna	Al ₂ O ₃ (50%)	5SG
	zrnitost	střední	46
	tvrdost	měkká	G
	struktura	velmi otevřená	12
	pojivo	keramické	V
	symbol výrobce	-	-
	Max. obvodová rychlost [m.s ⁻¹]	35	

Je to brousicí kotouč, který je tvořen z krystalů umělého korundu Al₂O₃ a keramického pojiva. Tento typ materiálu je používán pro broušení oceli nebo korozivzdorných ocelí do 67 HRC. Jeho barva je modrá [27].

Náklady na nástroj:

- Brousicí kotouč T1 200x20x51 5SG46G12VXP 2202,90 Kč vč. DPH.

4.3 Technicko-ekonomické hodnocení stávající technologie pro dokončení

Broušení je druh obrábění, u kterého se dosahuje vysoké přesnosti geometrických tvarů a parametrů povrchu. Nevýhodou u této technologie je ovšem časově náročná výroba, která je způsobena malými odběry materiálu. Pro sériovou výrobu to poté představuje veliké vytížení pracovních sil. To vše se podepíše na celkových nákladech pro vyrobení určitého počtu kusů.

Broušení se skládá z hrubovací a dokončovací operace. Při hrubovacím broušení je obvykle pracovní (radiální) záběr $a_e=0,01$ až $0,04$ a při dokončení na požadovaný rozměr, který bývá obvykle řádově v setinových tolerancích se volí $a_e=0,005$ až $0,01$ [28].

4.2.1 Řezné podmínky

Pro výrobu vroubkované/hladké čelisti jsou operátory rovinných brusek zvoleny řezné podmínky, které vyplývají z:

- doporučených řezných rychlostí na nástroji (brousicí kotouč),
- omezené možnosti použité rovinné brusky,
- praktických zkušeností samotných pracovníků.

Maximální řezná rychlost pro použitý kotouč je 35 m/s. Z maximálních otáček na vřeteně stroje je skutečná řezná rychlost stanovena ze vztahu [28]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{max} \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad (4.1)$$

- kde: v_c [m.s⁻¹] - řezná rychlost,
 D_{max} [mm] - maximální průměr brousícího kotouče,
 n [min⁻¹] - otáčky (viz tab. 5.1).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{max} \cdot n}{60 \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 2500}{60 \cdot 1000} = 26,179 \doteq 27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.2.2 Výpočet jednotkového strojního času

Jednotkový strojní čas pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu, při axiálním pohybu stolu o hodnotu f_a na každý zdvih stolu (v každé úvrati), bez vyjiskřování se stanoví [28]:

$$t_{AS} = \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot \frac{p}{a_e} \quad (4.2)$$

- kde: $l_t = l_{nt} + l_w + l_{pt}$ [mm] - dráha pohybu stolu v tangenciálním směru,
 $l_{nt} = \sqrt{3 \cdot d_s + 9}$ [mm] - délka náběhu v tangenciálním směru,
 d_s [mm] - průměr brousícího kotouče,
 $l_{nt} = l_{pt}$ [mm] - délka náběhu (přeběhu) v tangenciálním směru,
 l_w [mm] - délka obrobku,
 v_{ft} [m.min⁻¹] - tangenciální rychlost posuvu stolu brusky,
 $l_a = l_{na} + b_w + l_{pa}$ [mm] - dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru,
 $l_{na} = b_s/2$ [mm] - délka náběhu v axiálním směru,
 b_w [mm] - šířka broušené plochy,
 $l_{pa} = l_{na}$ [mm] - délka přeběhu (náběhu) v axiálním směru,
 f_a [mm] - axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru,
 p [mm] - přídavek na broušení,
 a_e [mm] - pracovní (radiální) záběr.

Při **hrubovacím broušení** je upnuto na magnetické desce **10 kusů čelistí** (viz obr. 4.1), tedy délka obrobku l_w je osminásobek šířky čelisti. Jako šířka b_w je délka čelisti 125 mm. Pro **broušení načisto** je upnuto **6 ks** čelistí (3 řady po dvou kusech). Veškeré hodnoty pro výpočet hrubovacího broušení a broušení načisto jsou v tab. 4.3.



Obr. 4.1 Znárodnění upnutí čelistí na magnetické desce.

Tab. 4.3 Hodnoty pro výpočet strojního času pro hrubovací broušení a broušení načisto.

			hrubování	načisto
délka náběhu (přeběhu) v tangenciálním směru	$l_{pt} = l_{nt}$	[mm]	25	25
délka obrobku	l_w	[mm]	450	250
dráha pohybu stolu v tangenciálním směru	l_t	[mm]	500	300
délka přeběhu (náběhu) v axiálním směru	$l_{na} = l_{pa}$	[mm]	10	10
šířka broušené plochy	b_w	[mm]	125	135
dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru	l_a	[mm]	145	155
tangenciální rychlost posuvu stolu brusky	v_{ft}	[m.min ⁻¹]	15	15
přídavek na broušení	p	[mm]	0,28	0,04
pracovní (radiální) záběr	a_e	[mm]	0,04	0,02
axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru	f_a	[mm]	1,5	0,5

- *hrubování*

Jednotkový strojní čas pro **10 ks** čelisti je dán vztahem (4.2):

$$t_{AS} = \frac{500}{10^3 \cdot 15} \cdot \frac{145}{1,5} \cdot \frac{0,28}{0,04} \doteq 22,56 \text{ min}, \quad \text{tedy pro } \mathbf{1 \text{ ks}} \quad t_{AS} = \frac{22,56}{10} = 2,26 \text{ min}$$

Pro výrobu dávky **400 ks** je celkový strojní čas:

$$400 \cdot t_{AS} = 400 \cdot 2,26 = 904 \text{ min}$$

- *načisto*

Jednotkový strojní čas pro **6 ks** čelisti je:

$$t_{AS} = \frac{300}{10^3 \cdot 15} \cdot \frac{155}{0,5} \cdot \frac{0,04}{0,02} = 12,4 \text{ min}, \quad \text{tedy pro } \mathbf{1 \text{ ks}} \quad t_{AS} = \frac{12,4}{6} = 2,07 \text{ min}$$

Pro výrobu dávky **400 ks** je celkový strojní čas:

$$t_{AS} \cdot 400 = 2,07 \cdot 400 = 828 \text{ min}$$

Celkové shrnutí strojních časů pro broušení celé dávky **400 ks** jsou uvedeny v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Celkové strojní časy pro broušení.

Jednotkový strojní čas				Celkový strojní čas	
hrubování		na čisto		-	
1 ks	400 ks	1 ks	400 ks	400 ks	
[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[hod]
2,26	904	2,07	828	1732	29

4.2.3 Výrobní náklady pro broušení

Pro stanovení celkových operačních výrobních nákladů N_c spjatých s dokončovací operací na rovinné brusce pro jeden kus součásti, tj. broušení dvou rovinných ploch hrubovací operací jedním nástrojem je nutno vypočítat náklady na strojní práci, náklady na vedlejší práci a nástroj a jeho výměnu [9].

Při hodinové sazbě stroje $N_{sn}=600$ Kč jsou náklady na strojní práci dány vztahem (3.2):

$$N_s = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} = 2,26 \cdot 10 = 22,6 \text{ Kč}$$

Další člen celkových výrobních nákladů je N_N . Jsou to náklady na nástroj a jeho výměnu N_T , které jsou vztaženy na jednu trvanlivost břítu a počet obrobených kusů tímto břitem. Pro broušení se v této práci uvažuje, že břit je celkově brusný kotouč a počet kusů obrobených tímto kotoučem Q_T je 400 ks. Tím se ruší náklady na výměnu nástroje.

Při ceně brousícího kotouče $N_T=2202,90$ Kč jsou náklady na nástroj dány vztahem (3.3):

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} = \frac{2202,90}{400} = 5,507 \doteq 5,5 \text{ Kč}$$

Obrábění se provádí na konvenčním stroji a upínání součásti na magnet provádí pracovník ručně. Do vedlejších časů je zahrnut čas na upnutí nových obrobku a orovnaní brusného kotouče.

Hodinová sazba na vedlejší práci $D_V = 600$ Kč

Jednotkový čas na vedlejší práci $t_{AV} = 0,2$ min (při uvážení, že se na magnet upíná současně 10ks po dobu 2 minut)

Náklady na vedlejší práci jsou dány vztahem (3.6):

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} = 0,2 \cdot \frac{600}{60} = 2 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na výrobu jednoho kusu tedy jsou dle vztahu (3.1):

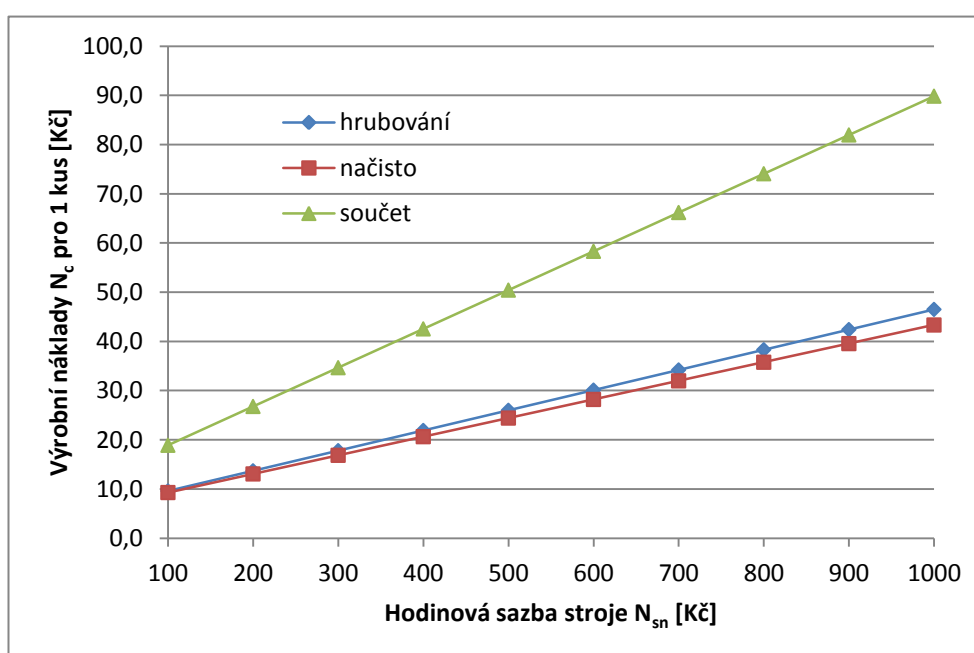
$$N_c = N_s + N_N + N_V = 22,6 + 5,5 + 2 = 30,1 \text{ Kč}$$

Pro broušení na čisto se použijí stejné vztahy, výpočet byl proveden v software MS Excel a výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.5.

Tab. 4.5 Celkové operační výrobní náklady pro broušení.

Broušení	Jednotkové strojní časy t_{AS} [min]	Jednotkové vedlejší časy t_{AV} [min]	Celkové náklady na výrobu jednoho kusu N_c [Kč]	Celkové náklady na výrobu 400 kusů N_c [Kč]
hrubovací	2,26	0,2	30,1	12 040
načisto	2,07	0,2	28,2	11 280
součet	4,33	0,4	58,3	23 320

Na obr. 4.2 jsou znázorněny celkové výrobní náklady N_c pro hrubovací broušení, broušení načisto a jejich součet v závislosti na různých hodnotách hodinové sazby stroje N_{sn} .



Obr. 4.2 Celkové výrobní náklady N_c pro hrubovací broušení, broušení načisto a jejich součet v závislosti na různých hodnotách hodinové sazby stroje N_{sn} .

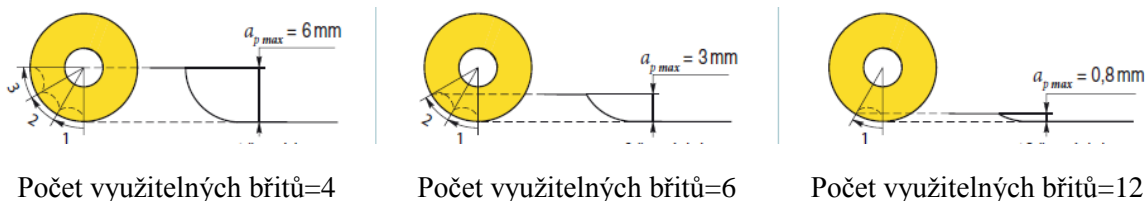
5 VOLBA NÁSTROJE PRO NOVOU TECHNOLOGII DOKONČENÍ V ZUŠLECHTĚNÉM STAVU

Pro novou technologii frézováním je zvolen nástroj od firmy FETTE. Frézovací nástrčná hlava s VBD se dvěma odlišnými řeznými materiály:

- povlakovaná VBD ze slinutých karbidů,
- VBD z polykrystalického kubického nitridu bóru.

Pro oba dva typy byly vybrány VBD kruhového tvaru (označení dle ISO R). Tento typ poskytuje větší počet použitelných břitů než jiné tvary VBD. Počet použitelných břitů na VBD je závislý na šířce záběru ostří a_p , jak je zřejmé na obr. 5.1.

Řezný materiál PKBN je vybrán z důvodu lepších mechanických vlastností, delší trvanlivosti a dosažení lepších výsledků ve výsledném obrobení povrchu oproti povlakovaným slinutým karbidům. S nástrojem z PKBN je dosažen taky větší objem odebraného materiálu s vyššími řeznými rychlostmi než u povlakovaných slinutých karbidů. I přesto VBD z PKBN je oproti povlakované VBD ze slinutých karbidů mnohokrát dražší, a tak je jako druhá varianta pro frézování použita povlakovaná VBD ze slinutých karbidů [29,30]. VBD z řezné keramiky není v této práci použita. V experimentální části se budou porovnávat právě tyto dva typy řezných materiálů.



Obr. 5.1 Počet ostří břítu v závislosti na šířce záběru ostří a_p [31].

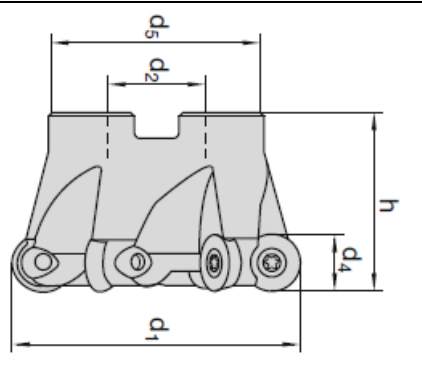
5.1 Nástroj od firmy FETTE

Firma FETTE spadá pod společnost LMT-TOOLS. Vyrábí celou škálu nástrojů jako jsou vrtáky, výstružníky, monolitní frézy ze slinutých karbidů, odvalovací frézy na výrobu ozubení a v neposlední řadě nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami [32].

Pro zušlechtěné oceli firma FETTE vyrábí požadovaný nástroj s VBD z polykrystalického kubického nitridu bóru a povlakovaných slinutých karbidů. Nástrčná frézovací hlava s kruhovými VBD (dle ISO tvar R) je uvedena v tab. 5.1 [32].

Tab. 5.1 Nástrčná frézovací hlava s VBD tvaru R (dle ISO) od firmy FETTE [32].

Nástrčná frézovací hlava	
označení	FCC R16.063AN 50-05-1-AFR
Rozměry v [mm]	
d_1	63
d_4	16
d_2	27
d_5	54
h	50
z	5



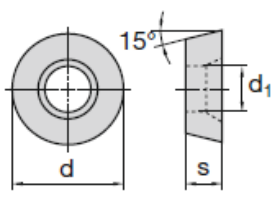
Požizovací náklady na nástroj:

- Frézovací hlava FCC R16.063AN 50-05-1-AFR 7 411 Kč vč. DPH.

Názorná ukázka VBD s rozměry a tvarem je uvedena v tab. 5.2.

Tab. 5.2 VBD od firmy FETTE [32].

Vyměnitelná břitová destička	
tvar dle ISO	R
Rozměry v [mm]	
d	16
s	4,76
d_1	5,2



VBD je v provedení s různých řezných materiálů jako je PKBN a povlakované slinité karbidy a VBD je označena:

- **RDKX 1604 MO S**

Jedná se o VBD z polykrystalického kubického nitridu bóru označeného LBHK85M. Tento materiál vykazuje vynikající odolnost proti opotřebení u zušlechtěných ocelí nad 54 HRC [32]. Řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 5.3.

Tab. 5.3 Řezné podmínky pro RDKX 1604 MO S (LBHK85M) [32].

Řezná rychlost v_c [$m \cdot min^{-1}$]	Posuv na zub f_z [mm]	Šířka záběru ostří a_p [mm]
180 až 280	0,08 až 0,2	0,2 až 0,5

Požizovací náklady na VBD:

- RDKX 1604 MO S 4 000 Kč vč. DPH.
- **RDHX 1604 MO S**

Povlakovaná VBD ze slinitých karbidů. Řezný materiál označen LC603Z, vhodný pro obrábění nástrojových ocelí, tvrdé frézování a je použitelný i pro obrábění litiny a neželezných kovů. Jako povlak je použita TiAlN vrstva nanosená metodou PVD. Řezný materiál s povlakem TiAlN je odolný proti opotřebení, vhodný pro dokončování [32]. Řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 5.4.

Tab. 5.4 Řezné podmínky pro RDHX 1604 MO S (LC603Z) [32].

Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na zub f_z [mm]	Šířka záběru ostří a_p [mm]
70 až 180	0,08 až 0,2	0,2 až 0,5

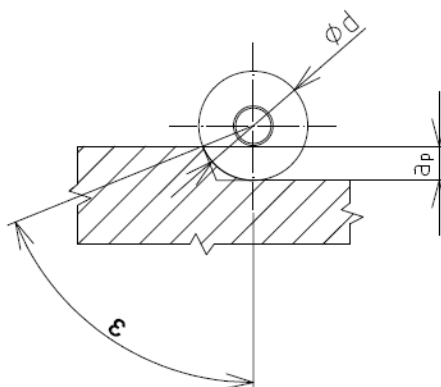
Pořizovací náklady na VBD:

- VBD RDHX 1604 MO S 484,5 Kč vč. DPH.

5.2 Ekonomický propočet ostří na VBD

V této kapitole jsou stanoveny náklady na jeden břit VBD s různých řezných materiálů. Lze určit počet břitů v závislosti na šířce záběru ostří a_p (pro $a_p=0,2$ mm) pro 80% využití VBD [33]. Počet využitelných VBD v závislosti na nákladech na 1 použitelný břit pro dva typy VBD je v tab. 5.5.

Výpočet použitelných břitů na VBD viz obr. 5.2.

Obr. 5.2 Zobrazení úhlu ε v závislosti na a_p .

$$\cos \varepsilon = \frac{\frac{d}{2} - a_p}{\frac{d}{2}} \Rightarrow \varepsilon = \cos^{-1} \frac{\frac{d}{2} - a_p}{\frac{d}{2}} = \cos^{-1} \frac{\frac{16}{2} - 0,2}{\frac{16}{2}} = 12,84^\circ$$

Po vypočítání úhlu ε (úhel pouze informativní pro tento výpočet) je stanoven počet břitů na VBD pro 80% využitelnost [33]:

$$n_B = \frac{360^\circ}{12,84^\circ} \cdot 0,8 = 22,43 \doteq 22$$

Tab. 5.5 Počet využitelných ostří VBD v závislosti na nákladech na 1 použitelný břit.

Výrobce VBD	Označení VBD	Řezný materiál	Počet využitelných stran VBD	Počet břitů VBD	Cena jednoho ostří VBD
FETTE	RDKX 1604 MO S	LBHK85M	1	22	181,82 Kč
	RDKX 1604 MO S	LC603Z	1	22	22 Kč

Je zřejmé, že jeden břit VBD z PKNB je výrazně dražší a také celkové náklady na pořízení VBD, než u VBD z povlakovaných slinutých karbidů.

5.3 Jednotkový strojní čas pro teoreticky stanovené řezné podmínky

Jsou navrženy dvě varianty pro frézování a to varianta A, ve které se frézuje načisto a varianta B, kde je odfrézován přírůstek z větší části a pro dokončení se použije konvenční technologie rovinného broušení. Jednotkové strojní časy jsou počítány pro oba typy řezných materiálů.

a) varianta A

Pro výpočet jednotkového strojního času pro VBD z řezného materiálu LBHK85M je navržena varianta, kdy je upnut 1 ks čelisti ve strojním svěráku a počítá se jedna obrobená plocha **načisto**. Je použit vztah (2.10) s dílčím vztahem (2.13). Pro výpočty jsou používány střední hodnota z intervalu doporučené řezné rychlosti. Hodnoty pro výpočet jsou:

délka obráběné plochy: $l=125$ mm

délka nájezdu: $l_n, l_p=5$ mm

průměr nástroje: $D=63$ mm, pro výpočet řezné rychlosti je použit průměr $D=47$ mm (jmenovitý průměr frézy $D=63$ mm, od kterého je odečten průměr VBD $d=16$ mm)

otáčky (při zvolené řezné rychlosti $v_c=230$ m.min⁻¹):

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{230 \cdot 1000}{\pi \cdot 47} \doteq 1557 \text{ min}^{-1}$$

posuv na otáčku (posuv na zub $f_z=0,08$ mm, počet zubů $z=5$):

$$f = 5 \cdot 0,08 \doteq 0,4 \text{ mm}$$

Pak tedy jednotkový strojní čas pro obrobení jedné plochy:

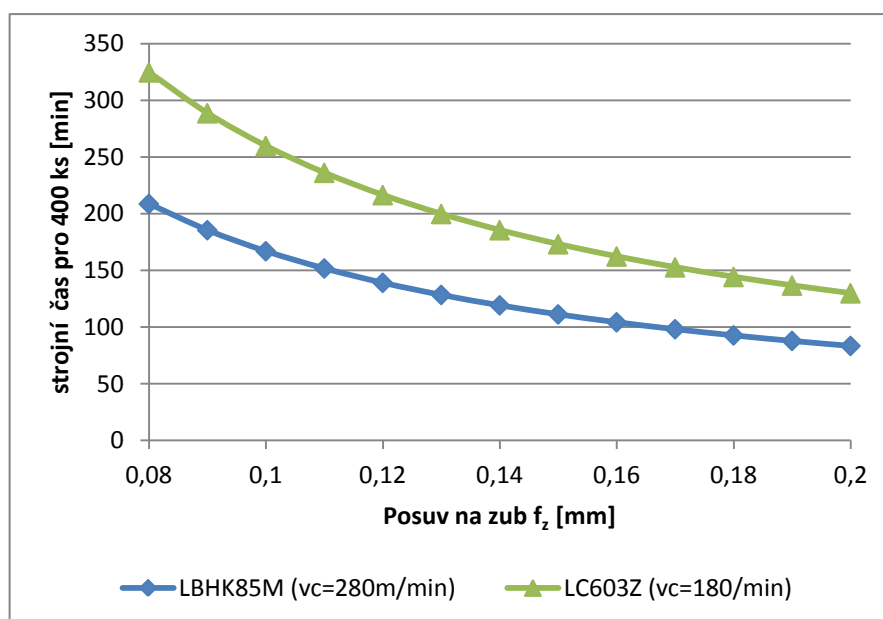
$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{l + l_n + l_p + D}{n \cdot f} = \frac{125 + 5 + 5 + 63}{1557 \cdot 0,4} = \frac{198}{622,8} = 0,32 \text{ min}$$

Pro další typ VBD z řezného materiálu byl výpočet proveden v MS Excel a shrnutí výsledných hodnot je uvedeno v tab. 5.6.

Tab. 5.6 Shrnutí strojních časů pro variantu A.

Jednotkový strojní čas pro variantu A					
VBD z řezného materiálu	Řezná rychlost v_c	Posuv f_z	pro jednu obrobenou plochu	Pro 1ks (dvě obrobené plochy)	Pro 400 ks
-	[m.min ⁻¹]	[mm]	[min]	[min]	[min]
LBHK85M	230	0,08	0,32	0,64	256
LC603Z	125	0,08	0,58	1,16	464

Pro názornou ukázkou je na obr. 5.3 graficky zobrazena závislost strojního času pro obrobení 400 ks na posuvu na zub f_z pro oba řezné materiály s konstantními řeznými rychlostmi. U VBD z řezného materiálu LBHK85M je stanovena maximální doporučená řezná rychlost $v_c=280$ m.min⁻¹, pro VBD z řezného materiálu LC603Z je $v_c=180$ m.min⁻¹. V tab. 5.7 a 5.8 jsou hodnoty vyčísleny (hodnoty z MS Excel).



Obr. 5.3 Grafické znázornění strojního času pro 400 ks v závislosti na posuvu na zub .

Tab. 5.7 Strojní čas v závislosti na posuvu na zub pro LBHK85M s $v_c=\text{konst.}$

VBD z řezného materiálu		LBHK85M											$v_c=280\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
f_z [m.min ⁻¹]													
0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
Jednotkový strojní čas pro 1ks [min]													
0,52	0,46	0,42	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	
Strojní čas pro 400 ks [min]													
209	186	167	152	139	128	119	111	104	98	93	88	83	

Tab. 5.8 Strojní čas v závislosti na posuvu na zub pro LC603Z s $v_c=\text{konst.}$

VBD z řezného materiálu		LC603Z											$v_c=180\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
f_z [m.min ⁻¹]													
0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
Jednotkový strojní čas pro 1ks [min]													
0,81	0,72	0,65	0,59	0,54	0,50	0,46	0,43	0,41	0,38	0,36	0,34	0,32	
Strojní čas pro 400 ks [min]													
325	289	260	236	216	200	186	173	162	153	144	137	130	

b) varianta B

Pro výpočet jednotkového strojního času pro VBD z řezného materiálu LBHK85M je navržena varianta, kdy je upnut 1 ks čelisti ve strojním svěráku a počítá se jedna obrobena plocha frézováním **nahrubo** s dokončením na rovinné brusce. Je použit vztah

(2.10) s dílčím vztahem pro hrubovací čelní frézování asymetrické (2.11) a (2.12). Hodnoty pro výpočet jsou:

délka obráběné plochy: $l=125 \text{ mm}$

délka nájezdu: $l_n, l_p=5 \text{ mm}$

průměr nástroje: $D=63 \text{ mm}$, pro výpočet řezné rychlosti je použit průměr $D=47 \text{ mm}$ (jmenovitý průměr frézy $d_1=63 \text{ mm}$, od kterého je odečten průměr VBD $d=16 \text{ mm}$)

délka l_{pf} viz (2.10):

$$l_{pf} = \sqrt{\left(\frac{63}{2}\right)^2 - \left(\frac{45}{2} + 2\right)^2} = 19,8 \text{ mm}$$

otáčky n (při zvolené řezné rychlosti $v_c=230 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$):

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{230 \cdot 1000}{\pi \cdot 47} \doteq 1557 \text{ min}^{-1}$$

posuv na otáčku (teoretický posuv na zub $f_z=0,2 \text{ mm}$ při uvážení, že se nemusí dodržet předepsaná hodnota profilu povrchu, počet zubů $z=5$):

$$f = 5 \cdot 0,2 \doteq 1 \text{ mm}$$

Pak tedy jednotkový strojní čas pro obrobění jedné plochy:

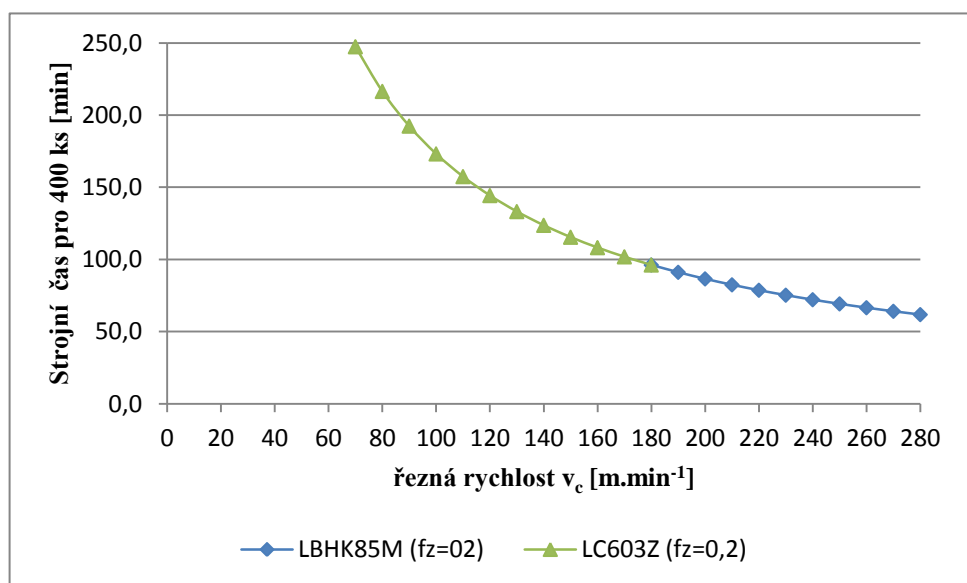
$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{l + l_n + l_p + \frac{D}{2} - l_{pf}}{n \cdot f} = \frac{125 + 5 + 5 + 31,5 - 19,8}{1557 \cdot 1} = \frac{146,7}{1557} \doteq 0,09 \text{ min}$$

Pro další typ VBD z řezného materiálu byl výpočet proveden v MS Excel a shrnutí výsledných hodnot jsou uvedeny v tab. 5.9.

Tab. 5.9 Shrnutí strojních časů pro variantu B.

Jednotkový strojní čas pro variantu B					
VBD z řezného materiálu	Řezná rychlost v_c	Posuv f_z	pro jednu obrobenou plochu	Pro 1ks (dvě obrobené plochy)	Pro 400 ks
-	[m.min ⁻¹]	[mm]	[min]	[min]	[min]
LBHK85M	230	0,2	0,09	0,18	72
LC603Z	125	0,2	0,17	0,34	136

Pro názornou ukázkou je na obr. 5.4 graficky zobrazena závislost strojního času (400 ks) na konstantním posuvu na zub f_z pro řezné materiály s řeznými rychlostmi pro dané řezné materiály. V tab. 5.10 jsou hodnoty pro řezný materiál LBHK85M a v tab. 5.11 jsou hodnoty pro řezný materiál LC603Z.



Obr. 5.4 Strojní čas pro 400 ks v závislosti na řezné rychlosti.

Tab. 5.10 Strojní čas v závislosti na řezné rychlosti pro řezný materiál LBHK85M.

VBD z řezného materiálu		LBHK85M						$f_z=0,2$ mm			
v_c [m.min ⁻¹]											
180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	
Jednotkový strojní čas pro 1ks [min]											
0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	
Strojní čas pro 400 ks [min]											
96	91	87	82	79	75	72	69	67	64	62	

Tab. 5.11 Strojní čas v závislosti na řezné rychlosti pro řezný materiál LC603Z.

VBD z řezného materiálu		LC603Z						$f_z=0,2$ mm			
v_c [m.min ⁻¹]											
70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Strojní čas pro 1 ks [min]											
0,62	0,54	0,48	0,43	0,39	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24
Strojní čas pro 400ks [min]											
247	216	192	173	157	144	133	124	115	108	102	96

5.4 Stanovení výrobních nákladů pro různé řezné podmínky pro frézování

a) varianta A

Pro stanovení celkových operačních výrobních nákladů N_c pro frézování pro jeden kus součásti (VBD z řezného materiálu LBHK85M), tj. obrobení dvou rovinných ploch jedním nástrojem je nutno vypočítat náklady na strojní práci, náklady na vedlejší práci a nástroj a jeho výměnu [9].

Při hodinové sazbě stroje $N_{sn}=600$ Kč jsou náklady na strojní práci dány vztahem (3.2):

$$N_s = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} = 0,64 \cdot 10 = 6,4 \text{ Kč}$$

Další člen celkových výrobních nákladů je N_N . Jsou to náklady na nástroj a jeho výměnu N_T , které jsou vztaženy na jednu trvanlivost břitu a počet obrobeneých kusů tímto břitem Q_T .

Při stanovené teoretické trvanlivosti břitu VBD $T=15$ min je počet obrobeneých dílů, v tomto případě je pro nástrčnou frézovací hlavu počítáno s 5 břity (5ks VBD), při podílu čistého času obrábění $\lambda = \frac{l}{L} = \frac{125}{198} = 0,63$, dán dílčím vztahem (3.5):

$$Q_T = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}} = \frac{15}{0,63 \cdot 0,64} = 37,2 \doteq 37$$

Dílčím vztahem (3.4) jsou stanoveny náklady na nástroj s VBD a jeho výměnu. Vstupní hodnoty pro stanovení nákladů na nástroj a jeho výměnu jsou:

cena VBD N_1 :	při ceně 1ks VBD 4 000 Kč, 5ks VBD $N_1=20\ 000$ Kč
počet břitů VBD n_B :	22
cena držáku (frézovací hlava) N_2 :	7 411 Kč, jeho teoretická životnost $z=10\ 000$ obrobeneých kusů
náklady na upnutí (seřízení VBD) N_3 :	100 Kč (při době upnutí 10 minut u hodinové sazby stroje na vedlejší práci 600 Kč)

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3 = \frac{20\ 000}{22} + \frac{7\ 411}{10\ 000} + 100 = 1009,83 \text{ Kč}$$

Pak náklady na nástroj a jeho výměnu N_N jsou dány vztahem (3.3):

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} = \frac{1009,83}{37} \doteq 27,3 \text{ Kč}$$

Náklady na vedlejší práci jsou dány vztahem (3.6), hodnoty pro výpočet jsou:

hodinová sazba na vedlejší práci: $D_V = 600$ Kč

jednotkový čas na vedlejší práci: $t_{AV} = 0,5$ min

Náklady na vedlejší práci jsou dány vztahem (3.6):

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} = 0,5 \cdot \frac{600}{60} = 5 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na výrobu jednoho kusu tedy jsou dle vztahu (3.1):

$$N_c = N_s + N_N + N_V = 6,4 + 27,3 + 5 = 38,7 \text{ Kč}$$

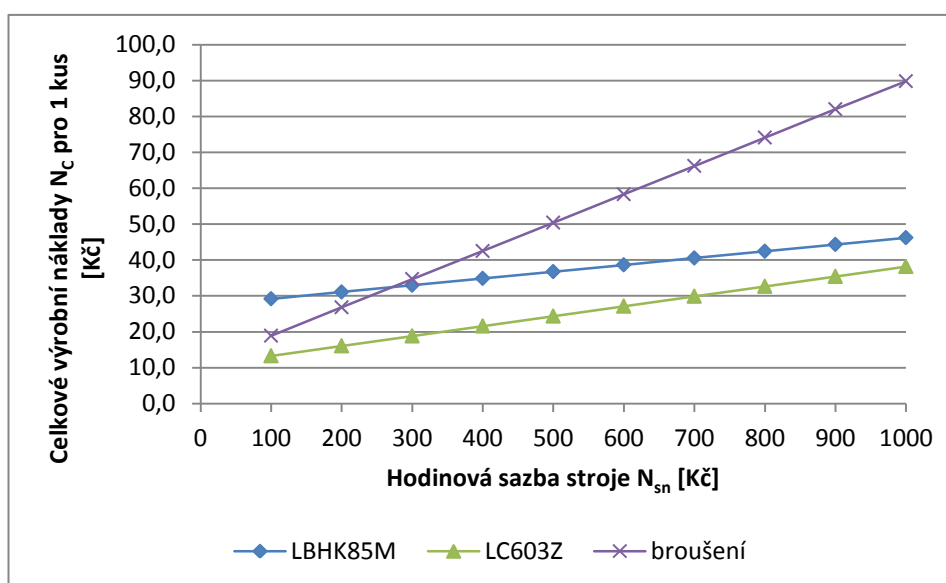
Pro frézování s dalším typem VBD byl výpočet proveden v software MS Excel a výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.12. V této tabulce jsou taky uvedeny náklady pro

broušení. Na obr. 5.5 jsou graficky znázorněny celkové výrobní náklady v závislosti na různých hodnotách hodinové sazby stroje pro oba typy řezných materiálů a pro broušení.

Tab. 5.12 Celkové operační výrobní náklady pro frézování s náklady na celkové broušení.

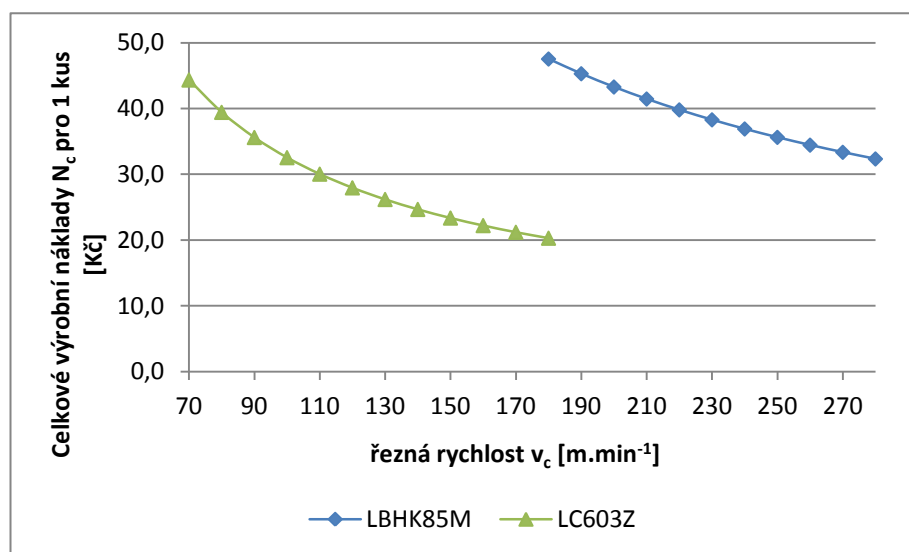
-	Řezné podmínky		Náklady							
	VBD z řezného materiálu	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	N_S	N_N	N_V	N_C	N_C		
				Pro 1 ks						Pro 400 ks
				[Kč]						
LBHK85M	230	0,08	6,4	27,3	5	38,7	15 480			
LC603Z	125	0,08	11,6	10,5	5	27,1	10 840			
-	-	-	-	-	-	-	-			
broušení			43,3	11	2	58,3	23 320			

Z tab. 5.12 je zřejmé, že celkové výrobní náklady pro broušení jsou větší, jak při frézování s oběma typy řezných materiálů.



Obr. 5.5 Celkové výrobní náklady N_c pro 1 ks v závislosti na různých hodnotách hodinové sazby stroje N_{sn} pro dva typy řezných materiálů a broušení.

U celkových výrobních nákladů hraje značnou roli řezná rychlost v_c , která ovlivňuje zejména jednotkový strojní čas a tím tedy i celkové výrobní náklady. Se zvyšováním řezné rychlosti klesá i trvanlivost břitu VBD. V tomto případě není známo jak řezná rychlost ovlivňuje trvanlivost břitu, tak se uvažuje trvanlivost $T=15$ min pro všechny řezné rychlosti. Na obr. 5.6 jsou znázorněny celkové výrobní náklady N_c v závislosti na řezných rychlostech s konstantním posuvem na zub $f_z=0,08$ mm (spodní hodnota doporučeného intervalu) pro dva typy řezných materiálů a v tab. 5.13 jsou tyto náklady vyčísleny (viz MS excel).



Obr. 5.6 Celkové výrobní náklady N_c pro 1 ks v závislosti na různých řezných rychlostech v_c pro dva typy řezných materiálů.

Tab. 5.13 Celkové výrobní náklady v závislosti na řezné rychlosti.

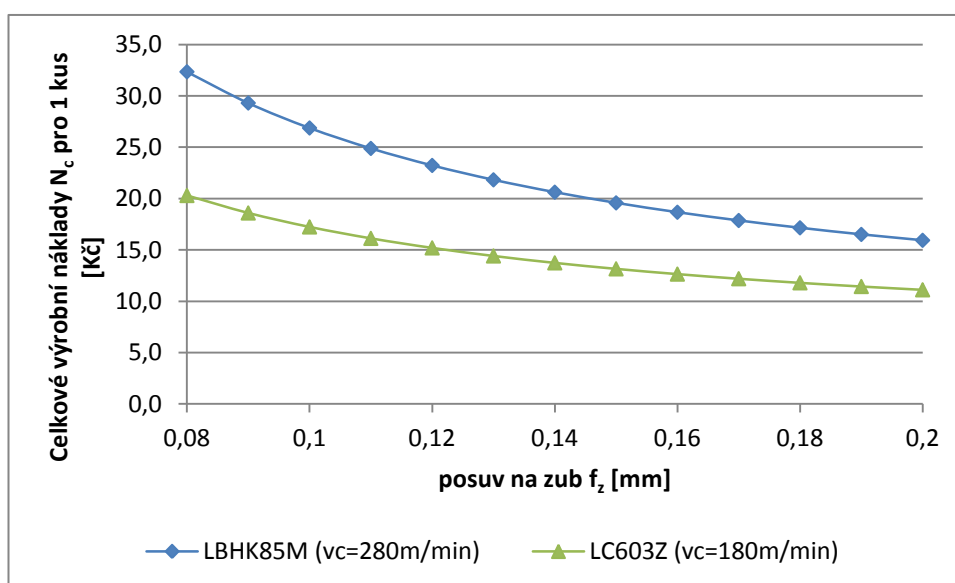
VBD z řezného materiálu		LBHK85M				
Řezné podmínky		Náklady				
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	N_s	N_N	N_v	N_c	N_c
		Pro 1 ks				Pro 400 ks
		[Kč]				
180	0,08	8,1	34,4	5,0	47,5	19017
190	0,08	7,7	32,6	5,0	45,3	18122
200	0,08	7,3	31,0	5,0	43,3	17316
210	0,08	7,0	29,5	5,0	41,5	16586
220	0,08	6,6	28,2	5,0	39,8	15923
230	0,08	6,4	26,9	5,0	38,3	15318
240	0,08	6,1	25,8	5,0	36,9	14763
250	0,08	5,8	24,8	5,0	35,6	14252
260	0,08	5,6	23,8	5,0	34,5	13781
270	0,08	5,4	23,0	5,0	33,4	13345
280	0,08	5,2	22,1	5,0	32,3	12940

VBD z řezného materiálu		LC603Z				
Řezné podmínky		Náklady				
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	N_s	N_N	N_v	N_c	N_c
		Pro 1 ks				Pro 400 ks
		[Kč]				
70	0,08	20,9	18,5	5,0	44,4	17742
80	0,08	18,3	16,2	5,0	39,4	15775

90	0,08	16,2	14,4	5,0	35,6	14244
100	0,08	14,6	12,9	5,0	32,5	13020
110	0,08	13,3	11,8	5,0	30,0	12018
120	0,08	12,2	10,8	5,0	28,0	11183
130	0,08	11,2	10,0	5,0	26,2	10477
140	0,08	10,4	9,2	5,0	24,7	9871
150	0,08	9,7	8,6	5,0	23,4	9346
160	0,08	9,1	8,1	5,0	22,2	8887
170	0,08	8,6	7,6	5,0	21,2	8482
180	0,08	8,1	7,2	5,0	20,3	8122

Z tab. 5.13 je zřejmé, že celkové výrobní náklady klesají v závislosti na vzrůstající řezné rychlosti až do minimálních výrobních nákladů pro maximální doporučenou řeznou rychlost stanovenou výrobcem.

Pro stanovení celkových výrobních nákladů s nejvyšší řeznou rychlostí stanovenou výrobcem je dále určena závislost na posuvu na zub f_z . U této závislosti je omezující podmínka kvalita obrobeneho povrchu. U frézování vroubkované/hladké čelisti je stanovena střední aritmetická úchylka profilu $Ra=0,8 \mu\text{m}$. Na obr. 5.7 jsou zobrazeny celkové výrobní náklady v závislosti na posuvu na zub a v tab. 5.14 jsou tyto hodnoty vyčísleny (viz MS excel).



Obr. 5.7 Celkové výrobní náklady N_c v závislosti na posuvu na zub f_z pro dva typy řezných materiálů pro maximální řeznou rychlost.

Tab. 5.14 Celkové výrobní náklady v závislosti na posuvu na zub.

VBD z řezného materiálu		LBHK85M					
Řezné podmínky		Náklady					
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	Q _T	N _S	N _N	N _V	N _C	N _C
		Pro 1 ks					Pro 400 ks
		[Kč]					
280	0,08	46	5,2	22,1	5,0	32,3	12940
280	0,09	51	4,6	19,7	5,0	29,3	11724
280	0,1	57	4,2	17,7	5,0	26,9	10752
280	0,11	63	3,8	16,1	5,0	24,9	9956
280	0,12	68	3,5	14,8	5,0	23,2	9293
280	0,13	74	3,2	13,6	5,0	21,8	8732
280	0,14	80	3,0	12,6	5,0	20,6	8251
280	0,15	86	2,8	11,8	5,0	19,6	7834
280	0,16	91	2,6	11,1	5,0	18,7	7470
280	0,17	97	2,5	10,4	5,0	17,9	7148
280	0,18	103	2,3	9,8	5,0	17,2	6862
280	0,19	108	2,2	9,3	5,0	16,5	6606
280	0,2	114	2,1	8,9	5,0	15,9	6376
VBD z řezného materiálu		LC603Z					
Řezné podmínky		Náklady					
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	Q _T	N _S	N _N	N _V	N _C	N _C
		Pro 1 ks					Pro 400 ks
		[Kč]					
180	0,08	29	8,1	7,2	5,0	20,3	8122
180	0,09	33	7,2	6,4	5,0	18,6	7442
180	0,1	37	6,5	5,8	5,0	17,2	6898
180	0,11	40	5,9	5,2	5,0	16,1	6452
180	0,12	44	5,4	4,8	5,0	15,2	6081
180	0,13	48	5,0	4,4	5,0	14,4	5767
180	0,14	51	4,6	4,1	5,0	13,7	5498
180	0,15	55	4,3	3,8	5,0	13,2	5265
180	0,16	59	4,1	3,6	5,0	12,7	5061
180	0,17	62	3,8	3,4	5,0	12,2	4881
180	0,18	66	3,6	3,2	5,0	11,8	4721
180	0,19	70	3,4	3,0	5,0	11,4	4578
180	0,2	73	3,2	2,9	5,0	11,1	4449

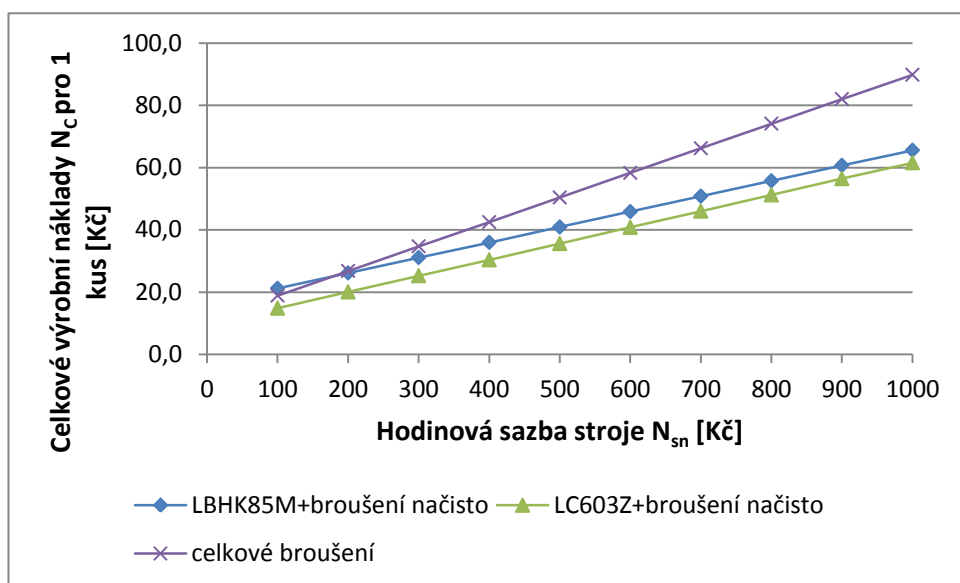
b) varianta B

Pro variantu B , kde je dokončovací operace rozdělena na hrubovací frézování a broušením načisto. Byly použity vztahy jako u varianty A a výpočty byly provedeny

v MS Excel. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.15 a na obr. 5.8 je grafické znázornění těchto nákladů v závislosti na různých hodnotách hodinové sazby stroje. Výpočty jsou stanoveny na střední hodnotě řezné rychlosti z doporučených intervalů.

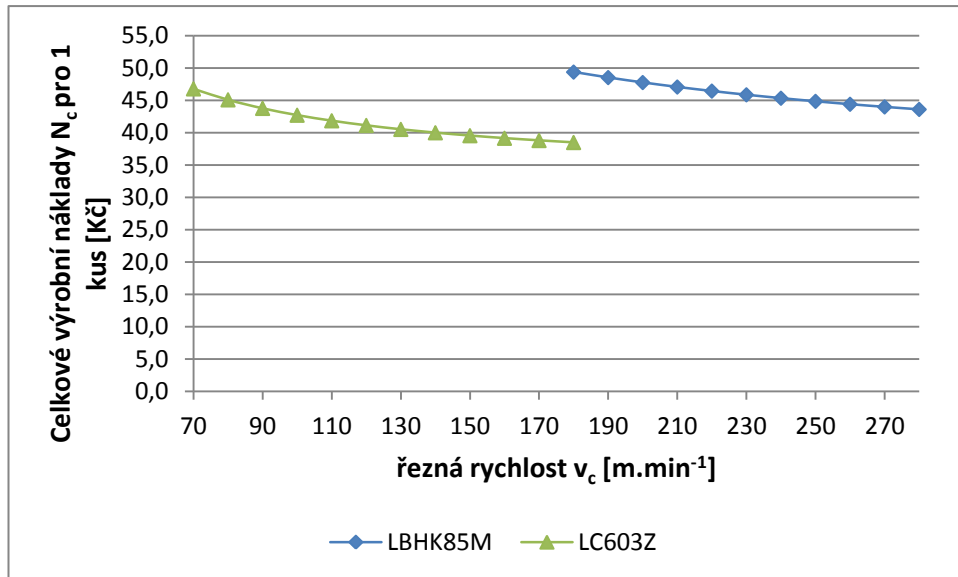
Tab. 5.15 Celkové výrobní náklady pro hrubovací frézování s náklady na broušení načisto.

-	Řezné podmínky		Náklady						
	VBD z řezného materiálu	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	N_s	N_N	N_V	N_C	N_C	N_c frézování +broušení načisto
				Pro 1 ks			Pro 400 ks		
				[Kč]					
LBHK85M	230	0,2	1,9	10,8	5,0	17,7	7062	18342	
LC603Z	125	0,2	3,5	4,1	5	12,6	5041	16 321	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	
broušení načisto	-	-	20,7	5,5	2	28,2	11 280	-	



Obr. 5.8 Celkové výrobní náklady N_c v závislosti na různých hodnotách hodinové sazby stroje N_{sn} pro oba typy řezných materiálů se součtem nákladů pro broušení načisto a pro celkové broušení.

Jako u varianty A, tak i u varianty B je rozhodující řezná rychlost. Jejím zvyšováním se celkové náklady snižují. Závislost celkových výrobních nákladů na řezné rychlosti s uvažovaným maximálním doporučeným posuvem na zub $f_z=0,2$ mm je graficky zobrazena na obr. 5.9 a v tab. 5.16 jsou tyto hodnoty vyčísleny (výpočty viz MS excel).



Obr. 5.9 Celkové výrobní náklady N_c v závislosti na různých řezných rychlostech v_c pro dva typy řezných materiálů s broušením načisto pro konstantní posuv na zub $f_z=0,2$ mm.

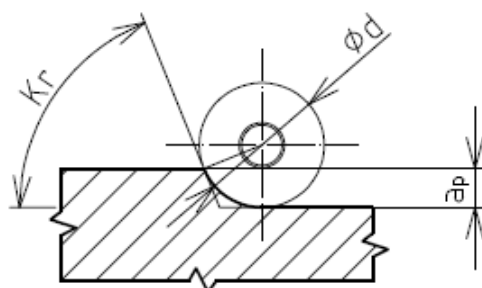
Tab. 5.16 Celkové výrobní náklady v závislosti na řezné rychlosti s broušením načisto pro konstantní posuv na zub $f_z=0,2$ mm.

VBD z řezného materiálu		LBHK85M						
Řezné podmínky		Náklady						
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	Q_T	N_S	N_N	N_V	N_C	N_C	N_c frézování +broušení načisto
		Pro 1 ks					Pro 400 ks	
		[Kč]						
180	0,2	73	2,4	13,8	5,0	21,2	8468	19748
190	0,2	77	2,3	13,0	5,0	20,3	8128	19408
200	0,2	82	2,2	12,4	5,0	19,6	7822	19102
210	0,2	86	2,1	11,8	5,0	18,9	7544	18824
220	0,2	90	2,0	11,3	5,0	18,2	7292	18572
230	0,2	94	1,9	10,8	5,0	17,7	7062	18342
240	0,2	98	1,8	10,3	5,0	17,1	6851	18131
250	0,2	102	1,7	9,9	5,0	16,6	6657	17937
260	0,2	106	1,7	9,5	5,0	16,2	6478	17758
270	0,2	110	1,6	9,2	5,0	15,8	6312	17592
280	0,2	114	1,5	8,8	5,0	15,4	6158	17438
VBD z řezného materiálu		LC603Z						
Řezné podmínky		Náklady						

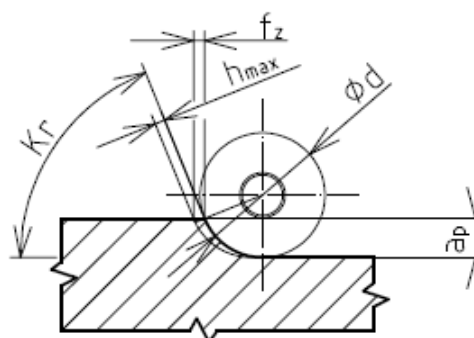
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f_z [mm]	Q_T	N_S	N_N	N_V	N_C	N_C	N_c frézování +broušení načisto	
		Pro 1 ks					Pro 400 ks		
		[Kč]							
70	0,2	29	6,2	7,4	5,0	18,6	7431	18711	
80	0,2	33	5,4	6,5	5,0	16,9	6752	18032	
90	0,2	37	4,8	5,7	5,0	15,6	6224	17504	
100	0,2	41	4,3	5,2	5,0	14,5	5801	17081	
110	0,2	45	3,9	4,7	5,0	13,6	5456	16736	
120	0,2	49	3,6	4,3	5,0	12,9	5168	16448	
130	0,2	53	3,3	4,0	5,0	12,3	4924	16204	
140	0,2	57	3,1	3,7	5,0	11,8	4715	15995	
150	0,2	61	2,9	3,4	5,0	11,3	4534	15814	
160	0,2	65	2,7	3,2	5,0	10,9	4376	15656	
170	0,2	69	2,5	3,0	5,0	10,6	4236	15516	
180	0,2	73	2,4	2,9	5,0	10,3	4112	15392	

5.5 Teoretický výpočet řezné síly a řezného výkonu

Při použití VBD kruhového tvaru je zásadní změna úhlu nastavení hlavního ostří κ_r na šířce záběru ostří a_p . Úhel nastavení hlavního ostří roste od 0° do 90° , tedy do maximální šířky záběru ostří $a_p=d/2$, kde d je průměr VBD. Na obr. 5.10 je znázorněna kruhová VBD a úhel nastavení hlavního ostří κ_r a na obr. 5.11 je znázorněna max. tloušťka třísky [34].



Obr. 5.10 Úhel nastavení hlavního ostří κ_r u kruhové VBD [34].



Obr. 5.11 Maximální tloušťka třísky h_{max} [34].

Vztah pro výpočet úhlu nastavení hlavního ostří κ_r [34]:

$$\cos \kappa_r = \frac{0,5 \cdot d - a_p}{0,5 \cdot d} \quad (5.2)$$

Při frézování zvoleným nástrojem je šířka záběru ostří $a_p=0,2$ mm, tedy spodní hodnota rozsahu doporučené šířky záběru ostří (viz tab. 5.3 a tab. 5.4), průměr použité VBD je $d=16$ mm.

Úhel nastavení hlavního ostří je dle vztahu (6.1):

$$\cos \kappa_r = \frac{0,5 \cdot d - a_p}{0,5 \cdot d} = \frac{0,5 \cdot 16 - 0,2}{0,5 \cdot 16} = \frac{0,5 \cdot 16 - 0,2}{0,5 \cdot 16} = 0,975$$

$$\Rightarrow \kappa_r = \cos^{-1} 0,975 = 12,84^\circ$$

5.6.1 Symetrické frézování pro variantu A

Úhel záběru frézy se stanoví dle vztahu (2.8), pro frézovanou šířku 45 mm a pro průměr frézy $D=47$ mm (jmenovitý průměr frézy $d_1=63$ mm od kterého je odečten průměr VBD $d=16$ mm):

$$\psi = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{45}{47} = 146,45^\circ$$

Počet zubů v záběru je dán vztahem (2.9). Celkový počet zubů je $z=5$.

$$n_z = \frac{146,45}{360} \cdot 5 = 2,03$$

Po zaokrouhlení je celkový počet záběrů $z=3$ [8].

Jmenovitá šířka třísky je dle vztahu (2.2), pro názornou ukázkou výpočet proveden pro variantu A s $f_z=0,14$ mm a pro variantu B s $f_z=0,2$ mm:

- varianta A

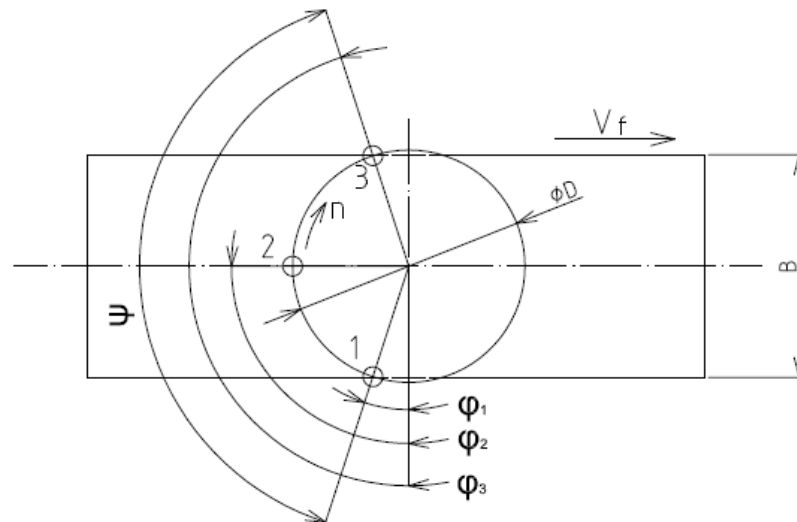
$$b = \frac{0,14}{\sin 12,84} \doteq 0,62 \text{ mm}$$

- varianta B

$$b = \frac{0,2}{\sin 12,84} = 0,89 \text{ mm}$$

- **řezná síla F_c**

Pro výpočet dílčích řezných sil F_{ci} , které působí v bodech 1,2 a 3 (viz obr. 5.12) je dán vztah (2.6). Jednotlivé řezné síly jsou počítány pro úhly posuvových pohybů $\varphi_1=18^\circ$, $\varphi_1=90^\circ$, $\varphi_1=162^\circ$,



Obr. 5.12 Počet zubů v záběru.

Pro bod 1, kde:

- $\varphi_1 = 90^\circ - 72^\circ = 18^\circ$,
- $\kappa_r = 12,84^\circ$,
- $f_z = 0,14$ mm,
- $k_{c1} = 4700$ MPa – platí pro kalenou ocel 60 HRC a $m_c = 0,25$ [9].

$$h_1 = f_z \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \kappa_r = 0,14 \cdot \sin 18 \cdot \sin 12,84 = 0,00961 \doteq 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$A_{D1} = b \cdot h_1 = 0,62 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} \doteq 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_1^{m_c}} = \frac{4700}{0,0096^{0,25}} \doteq 15015,16 \text{ MPa}$$

$$F_{C1} = k_c \cdot A_{D1} = 15015,16 \cdot 5,95 \cdot 10^{-3} \doteq 89,34 \text{ N}$$

Pro bod 2, kde:

- $\varphi_2 = 90^\circ$
- $\kappa_r = 12,84^\circ$,
- $f_z = 0,14$ mm,
- $k_{c1} = 4700$ MPa – platí pro kalenou ocel 60 HRC a $m_c = 0,25$ [9].

$$h_2 = f_z \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \kappa_r = 0,14 \cdot \sin 90 \cdot \sin 12,84 \doteq 0,03 \text{ mm}$$

$$A_{D2} = b \cdot h_2 = 0,62 \cdot 0,03 = 18,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_2^{m_c}} = \frac{4700}{0,0186^{0,25}} \doteq 12726,81 \text{ MPa}$$

$$F_{C2} = k_c \cdot A_{D2} = 12726,81 \cdot 18,6 \cdot 10^{-3} \doteq 236,72 \text{ N}$$

Pro bod 3, kde:

- $\varphi_3 = 90^\circ + 72^\circ = 162^\circ$,
- $\kappa_r = 12,84^\circ$,
- $f_z = 0,14 \text{ mm}$,
- $k_{c1} = 4700 \text{ MPa}$ – platí pro kalenou ocel 60 HRC a $mc = 0,25$ [9].

$$h_3 = f_z \cdot \sin \varphi_3 \cdot \sin \kappa_r = 0,14 \cdot \sin 162 \cdot \sin 12,84 = 0,00961 \doteq 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$A_{D3} = b \cdot h_3 = 0,62 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} \doteq 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_3^{mc}} = \frac{4700}{0,0096^{0,25}} \doteq 15015,16 \text{ MPa}$$

$$F_{C3} = k_c \cdot A_{D3} = 15015,16 \cdot 5,95 \cdot 10^{-3} \doteq 89,34 \text{ N}$$

Celková řezná síla F_c , která působí při obrábění:

$$F_c = \sum_i F_{Ci} = F_{C1} + F_{C2} + F_{C3} = \mathbf{89,34} + 236,72 + \mathbf{89,34} = \mathbf{415,4 \text{ N}}$$

- **řezný výkon pro variantu A**

Řezný výkon, který vzniká při frézování se stanoví ze vztahu (6.2):

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} \text{ [kW]} \quad (6.2)$$

Pro řeznou sílu, která je stanovena pro symetrické frézování s řeznou rychlostí $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je řezný výkon:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{415,4 \cdot 180}{6 \cdot 10^4} \doteq \mathbf{1,24 \text{ kW}}$$

5.6.2 Symetrické frézování pro variantu B

- **řezná síla**

U této varianty jsou počáteční hodnoty stejné, jako u varianty A až na změnu posuvu na zub, protože se u této varianty ještě nechává pro dobroušení načisto na požadovaný rozměr. Dílčí řezné síly se stanovují pro zuby záběru viz obr. 5.10.

Pro bod 1, kde:

- $\varphi_1 = 90^\circ - 72^\circ = 18^\circ$,
- $\kappa_r = 12,84^\circ$,

- $f_z=0,2$ mm,
- $k_{c1}=4700$ MPa-platí pro kalenou ocel 60 HRC a $mc=0,25$ [9].

$$h_1 = f_z \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \kappa_r = 0,2 \cdot \sin 18 \cdot \sin 12,84 \doteq 0,0137 \text{ mm}$$

$$A_{D1} = b \cdot h_1 = 0,9 \cdot 0,0137 \doteq 0,0123 \text{ mm}^2$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_1^{mc}} = \frac{4700}{0,0137^{0,25}} \doteq 13737,82 \text{ MPa}$$

$$F_{C1} = k_c \cdot A_{D1} = 13737,82 \cdot 0,0123 \doteq 168,96 \text{ N}$$

Pro bod 2, kde:

- $\varphi_2=90^\circ$
- $\kappa_r=12,84^\circ$,
- $f_z=0,2$ mm,
- $k_{c1}=4700$ MPa-platí pro kalenou ocel 60 HRC a $mc=0,25$ [9].

$$h_2 = f_z \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \kappa_r = 0,2 \cdot \sin 90 \cdot \sin 12,84 \doteq 0,0444 \text{ mm}$$

$$A_{D2} = b \cdot h_2 = 0,9 \cdot 0,0444 = 0,04 \text{ mm}^2$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_2^{mc}} = \frac{4700}{0,0444^{0,25}} \doteq 10238,87 \text{ MPa}$$

$$F_{C2} = k_c \cdot A_{D2} = 10238,87 \cdot 0,04 \doteq 409,55 \text{ N}$$

Pro bod 3, kde:

- $\varphi_1=90^\circ+72^\circ=162^\circ$,
- $\kappa_r=12,84^\circ$,
- $f_z=0,2$ mm,
- $k_{c1}=4700$ MPa-platí pro kalenou ocel 60 HRC a $mc=0,25$ [9].

$$h_3 = f_z \cdot \sin \varphi_3 \cdot \sin \kappa_r = 0,2 \cdot \sin 162 \cdot \sin 12,84 \doteq 0,0137 \text{ mm}$$

$$A_{D3} = b \cdot h_3 = 0,9 \cdot 0,0137 \doteq 0,0123 \text{ mm}^2$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_3^{mc}} = \frac{4700}{0,0137^{0,25}} \doteq 13737,82 \text{ MPa}$$

$$F_{C3} = k_c \cdot A_{D3} = 13737,82 \cdot 0,0123 \doteq 168,96 \text{ N}$$

Celková řezná síla, která působí při obrábění:

$$F_C = \sum_i F_{Ci} = F_{C1} + F_{C2} + F_{C3} = 168,96 + 409,55 + 168,96 = \mathbf{747,47 \text{ N}}$$

- **řezný výkon**

Pro řeznou sílu, která je stanovena pro symetrické frézování s řeznou rychlostí $v_c=180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je řezný výkon:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{747,47 \cdot 180}{6 \cdot 10^4} \doteq \mathbf{2,24 \text{ kW}}$$

Celková řezná síla F_c a řezný výkon P_c pro obě varianty jsou relativně malé z důvodu malé šířky záběru ostří a_p , posuvu na zub f_z a malého úhlu nastavení hlavního ostří κ_r . V tab. 5.17 je graficky znázorněn průběh řezné síly F_c pro zvyšující se posuv na zub s nominálními hodnotami.

Tab. 5.17 Řezná síla v závislosti na posuvu.

Grafické znázornění	f_z	Řezná síla F_c
-	[mm]	[N]
	0,08	150,7
	0,09	185,1
	0,1	222,6
	0,11	263,0
	0,12	306,3
	0,13	352,4
	0,14	401,2
	0,15	452,6
	0,16	506,8
	0,17	563,5
	0,18	622,8
	0,19	684,6
	0,2	748,9

6 EXPERIMENTÁLNÍ VERIFIKACE

Pro experimentální ověření frézovacího nástroje s VBD jsou použity VBD z řezného materiálu LC603Z-značení **RDHX 1604 MO S** s nástrčnou frézovací hlavou **FCC R16.063AN 50-05-I-AFR** viz obr. 6.1. VBD z řezného materiálu LBHK85M nejsou v experimentu použity z důvodu vysokých pořizovacích nákladů.



Obr. 6.1 Nástrčná frézovací hlava **R16.063AN 50-05-I-AFR** osazená VBD **RDHX 1604 MO S** z řezného materiálu LC603Z.

6.1 Popis experimentu

Při návrhu předešlých celkových výrobních nákladů je uvažováno s danými řeznými podmínkami. Pro **variantu A** je vybrána nejvyšší řezná rychlost s daným rozsahem posuvů na zub, u které se provádí zkouška dodržení předepsaných geometrických tolerancí a předepsané střední aritmetické úchylky profilu Ra. U **varianty B** jsou rovněž vybrány řezné podmínky pro minimální celkové výrobní náklady. Je použita konstantní řezná rychlost $v_c=180 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ s posuvem na zub $f_z=0,2 \text{ mm}$. Vzorčky na obrábění jsou měřeny na tvrdoměru pro zjištění skutečné hodnoty tvrdosti HRC a poté upnuty ve svěráku v CNC stroji, kde experiment proběhne.

- **Použitý stroj**

K experimentu byl použit CNC stroj-vertikální obráběcí centrum Akira Seiky SV 1350. Je vybaven řídicím systémem Heidenhain iTNC530. Disponuje vložením až 36 nástrojů v zásobníku [35]. Technické údaje jsou v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Technické údaje pro CNC vertikální obráběcí centrum Akira-Seiky SV 1350 [35].

Vertikální obráběcí centrum Akira-Seiky SV 1350



rozměry stolu		[mm]	1500x600
maximální pojezdy stolu/rychloposuv	Osa X	[mm]/[m.min ⁻¹]	1350/36
	Osa Y		640/36
	Osa Z		660/30
maximální hmotnost obrobku		[kg]	2300
maximální otáčky		[min ⁻¹]	10000
výkon stroje		[kW]	15
počet nástrojů v zásobníku		[ks]	36

- **Měření tvrdosti**

Ke zjištění tvrdosti, která je předepsaná na výkrese byl použit analogový tvrdoměr HBRV-187,5. Příklad je určen k měření tvrdosti dle Brinnela, Rockwela a Vickerse [36]. Technické údaje jsou v tab. 6.2.

Tab. 6.2 Technické údaje pro tvrdoměr HBRV-187,5 [36].

Tvrdoměr HBRV-187,5



Rozměry	[mm]	200x465x760
Hmotnost přístroje	[kg]	105
Maximální výška testovaného předmětu	[mm]	200
Maximální průměr testovaného předmětu	[mm]	160

- **Měření střední aritmetické úchylky profilu Ra**

Použitý přístroj pro měření celé škály parametrů povrchu. V přístroji je obsažena tiskárna pro tisknutí protokolů o měření. Technické údaje viz tab. 6.3.

Tab. 6.3 Technické údaje pro drsnoměr SURFCOM 130A [37].

Drsnoměr SURFCOM 130A



Rozměry	[mm]	700x30x150	
Hmotnost přístroje	[kg]	8	
Měřený rozsah	Osa Z	[μm]	800
	Osa X	[mm]	50
Měřicí hrot	Zaoblení hrotu	[μm]	2
	Material hrotu	-	diamant
Měřicí síla	[mN]	0,75	
Měřené parametry	Ra, Rq, Ry, Rp, Rv, Rc, Rz, Rmax, Rt		

- **Měření rozměrů a geometrických tolerancí**

Na výkrese obráběné čelisti jsou předepsané geometrické tolerance a taky přesný rozměr v setinových tolerancích. Pro tyto měření byl použit 3D-přístroj TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454, jehož technické údaje jsou sepsány v tab. 6.4.

Tab. 6.4 Technické údaje pro 3D měřicí přístroj TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454 [38].

3D měřicí přístroj TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454



rozměry V x Š x H		[mm]	1700x930x952
Měřicí rozsah	Osa X	[mm]	460
	Osa Y		510
	Osa Z		227
maximální hmotnost obrobku		[kg]	2300
maximální otáčky		[min ⁻¹]	10000
Operační teplota		[°C]	20±0,5

- **Měření délkové a poloměrové korekce nástroje**

Pro měření délkové a poloměrové korekce, která se zapisuje do tabulky nástrojů je nezbytná pro obrábění. Pro tyto měření je použit seřizovací přístroj BMD 310 v HSC. Přístroj je vybaven projektorem o průměru matnice 100 mm. Technické údaje viz tab. 6.5 [39].

Tab. 6.5 Technické údaje pro seřizovací přístroj BMD 310 v HSC [39].

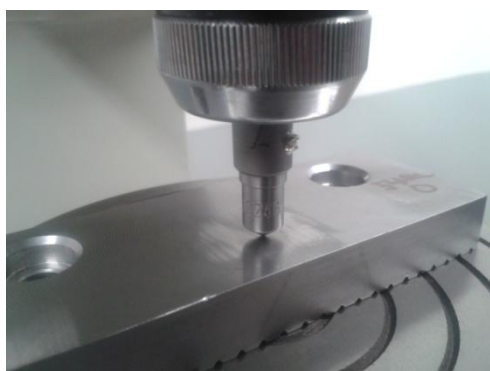
seřizovací přístroj BMD 310 v HSC



Rozměry přístroje Š x H x V	[mm]	600x500x750
Hmotnost	[kg]	75
Maximální průměr nástroje	[mm]	300
Maximální délka nástroje	[mm]	300
Vřeteno	-	ISO 50
Upínání nástrojů	-	gravitační
Házení vřetena ve vzdálenosti 200 mm	[mm]	0,006

6.2 Experimentální část pro variantu A

V této variantě bylo zkoušeno frézování načisto. Před samotným frézováním byly čelisti podrobeny zkouškám tvrdosti dle HRC v předepsané hodnotě 53+4 HRC. Názorná ukázka z měření je na obr. 6.2. Testy ukázaly, že součást vyhovuje předepsané hodnotě. Byly měřeny 3 body na součásti a naměřené hodnoty činily 55 HRC, které byly zapsány ze stupnice na obrazovce (viz obr. 6.3).



Obr. 6.2 Ukázka při měření tvrdosti HRC.



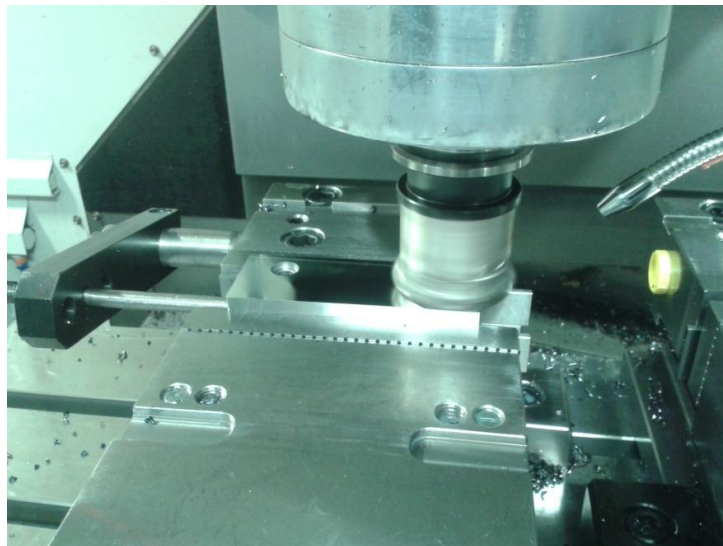
Obr. 6.3 Odečtení hodnota 55HRC ze stupnice na obrazovce.

U nástrčné frézovací hlavy osazené pěti VBD byla změřena délková (viz obr. 6.4) a poloměrová korekce (viz obr.6.5). Tyto hodnoty byly zapsány do tabulky nástrojů.



Obr. 6.4 Zaměřená fréza pro délkovou korekci. Obr. 6.5 Zaměřená fréza pro délkovou korekci.

Pro samotné frézování byl napsán krátký program (příloha 2, pro variantu B příloha 3) v řídicím systému Heidenhain iTNC530. Po upnutí čelisti do svěráku byly najety nulové body obrobku a byla zahájena zkouška frézování. Názorná ukázka frézy v záběru je na obr. 6.6.



Obr. 6.6 Fréza v záběru.

Pro symetrické frézování byly stanoveny následující řezné podmínky:

$$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$$

$$f_z=0,08; 0,09; 0,10; 0,11; 0,12; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20 \text{ mm}$$

$$a_p=0,2 \text{ mm}$$

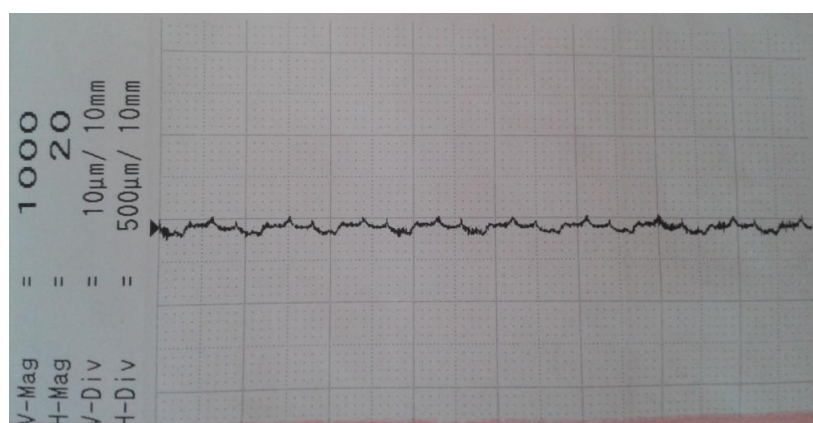
chlazení: frézování zasucha s přívodem stlačeného vzduchu (vnitřní chlazení vřetenem a vnější chlazení)

Pro měření střední aritmetické úchlky profilu $R_a=0,8 \mu\text{m}$ byly měřeny čelisti pro stanovené posuvy na zub f_z . V tab. 6.6 jsou zobrazeny naměřené hodnoty R_a (pro informaci i R_z) na hladké straně čelisti a v tab. 6.7 hodnoty na straně vroubkované, které jsou vytaženy s protokolu o měření (viz příloha 4). Měřené hodnoty byly prováděny na pomyslné ose frézovaných ploch.

Tab. 6.6 Parametry struktury povrchu v závislosti na posuvu na zub (hladká strana čelisti).

Posuv na zub f_z												
[mm]												
0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
Střední aritmetická úchylka profilu Ra												
[μm]												
0,314	0,365	0,393	0,871	1,073	1,110	1,193	1,341	1,248	1,303	1,221	1,438	1,487
Největší výška profilu Rz												
[μm]												
2,585	2,513	2,560	4,424	5,368	5,310	5,752	6,112	5,938	7,433	6,410	6,880	7,263

Z tab. 6.6 je zřejmé, že u posuvu na zub $f_z=0,09$ mm a $f_z=0,10$ mm jsou hodnoty Ra dodrženy, zatímco u posuvu $f_z=0,11$ mm je viditelný přesah o tolerovanou hodnotu $Ra=0,8 \mu\text{m}$. Názorný záznam z měření střední aritmetické úchylky profilu Ra pro posuv na zub $f_z=0,09$ mm je na obr. 6.7.

Obr. 6.7 Záznam z měření plochy pro posuv na zub $f_z=0,09$ mm.

Tab. 6.7 Parametry struktury povrchu v závislosti na posuvu na zub (vroubkovaná strana čelisti).

Posuv na zub f_z												
[mm]												
0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
Střední aritmetická úchylka profilu Ra												
[μm]												
0,293	0,653	0,860	0,346	0,503	0,856	1,206	0,761	1,253	0,792	0,854	1,002	1,56
Největší výška profilu Rz												
[μm]												
1,875	3,388	4,112	1,988	3,150	4,638	6,288	5,013	5,975	4,438	5,713	4,438	7,913

Z naměřených hodnot v tabulce 6.8 jsou vidět značné chyby. Při zvyšujícím se posuvu na zub by teoreticky měla stoupat i střední aritmetická úchylka profilu Ra. Pro měření vroubkované plochy taky nebyl dodržen rozsah měřené délky $5 \times 0,8 \text{ mm} = 4 \text{ mm}$, ale délka měření byla stanovena na $0,8 \text{ mm}$ z důvodu bezpečnosti, aby nebyl poškozen hrot snímače při náhodném přejetí do vyfrézovaného vroubkování.

Z tab. 6.6 a 6.7 byly stanoveny maximální posuv na zub pro dodržení střední aritmetické úchylky profilu $Ra=0,8 \mu\text{m}$. Posuv na zub je $f_z=0,09$ mm.

Po stanovení maximálního posuvu na zub $f_z=0,09$ mm proběhlo celkové frézování obou stran čelisti a součást byla změřena na 3D přístroji TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454 ke zjištění požadovaného rozměru ($15\pm 0,01$ mm) a tolerance rovnoběžnosti v předepsané toleranci 0,01 mm pro řezné podmínky ($v_c=180$ m.min⁻¹, $f_z=0,09$ mm, $a_p=0,2$ mm). Pro měření těchto hodnot bylo vybráno 5 obroběných součástí. Pro předepsaný rozměr $15\pm 0,01$ mm byly stanoveny 3 body měření. Hodnoty z protokolu o měření (viz příloha 5 a 6) jsou zaznamenány v tab. 6.8.

Tab. 6.8 Záznam o měření požadovaného rozměru a rovnoběžnosti.

obroběná čelist	Předepsané hodnoty na výkrese			
	Rovnoběžnost 0,01	Rozměr $15\pm 0,01$		
-	Skutečná hodnota			
č. 1	0,012	15,006	15,015	15,016
č. 2	0,009	14,995	15,006	15,009
č. 3	0,007	14,997	15,005	15,008
č. 4	0,011	15,002	15,015	15,013
č. 5	0,008	14,998	15,007	15,008

Z tab. 6.8 vyplívá, že frézování čelisti načisto u 3 součástí vyhovuje a u dvou nevyhovuje z hlediska rovnoběžnosti 0,01 mm, která přesáhla toleranční pole. U rozměru $15\pm 0,01$ mm byla po změření 1. kusu tolerance nevyhovující. Po úpravách délkové korekce nástroje byl u součástí č.2 a č.3 rozměr $15\pm 0,01$ mm v toleranci.

Názorná ukázka opotřebení na hřbetě VBD po 15 minutách čistého času frézování ($v_c=180$ m.min⁻¹, $f_z=0,09$ mm, $a_p=0,2$ mm) je na obr 6.8.



Obr. 6.8 Názorná ukázka opotřebení VBD z řezného materiálu LC603Z pro variantu A.

6.3 Experimentální část pro variantu B

Pro variantu B, kde se frézuje čelist nahrubo s přidavkem na broušení načisto byly zvoleny tyto řezné podmínky:

$$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$$

$$f_z=0,2 \text{ mm}$$

$$a_p=0,2 \text{ mm}$$

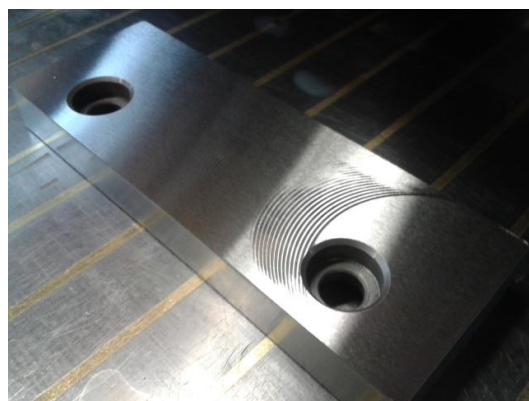
chlazení: frézování zasucha s přívodem stlačeného vzduchu (vnitřní chlazení vřetenem a vnější chlazení)

Po frézování ploch na zkušebních vzorcích pro broušení načisto byly provedeny zkušební testy na rovinné brusce pro stanovení skutečných přidavků pro broušení na čisto. Na rovinné brusce byl pracovní radiální záběr $a_e=0,01$ mm a bylo zahájeno první broušení.

Upnutá čelist na magnetické desce je znázorněna na obr. 6.9 a na obr. 6.10 je vidět čelist po prvním přebroušení.

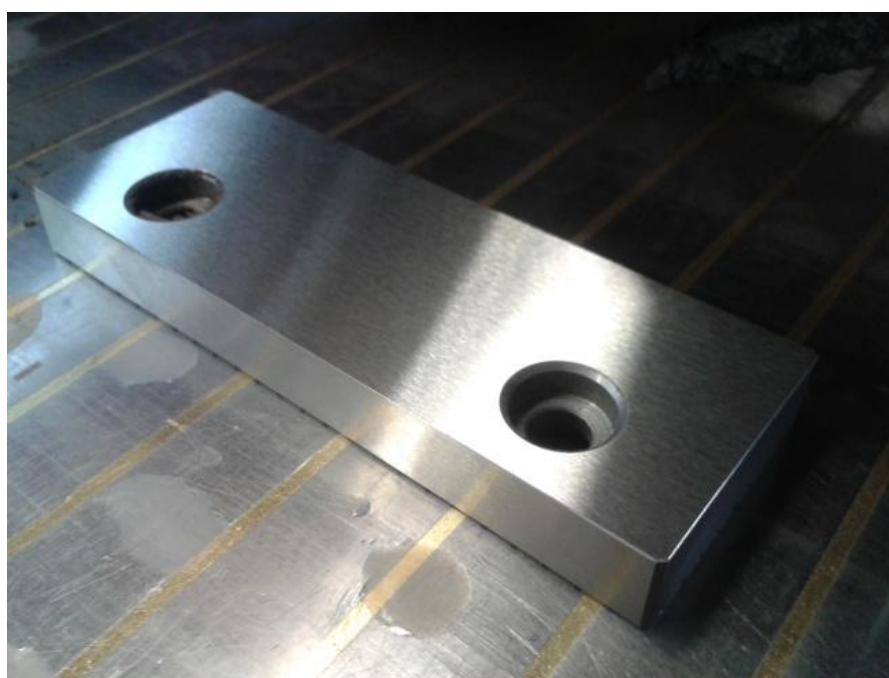


Obr. 6.9 Upnutá čelist před zahájením prvního broušení s $a_e=0,01$ mm.



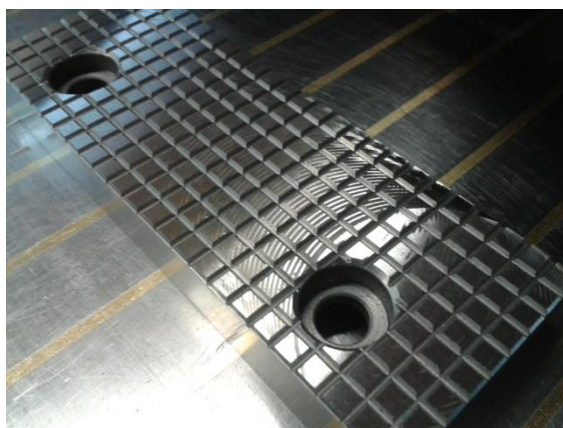
Obr. 6.10 Upnutá čelist po broušení s $a_e=0,01$ mm.

Po dalším nastavení pracovního radiálního záběru $a_e=0,01$ mm byly stopy po frézování přebroušeny, jak jde vidět na obr. 6.11.

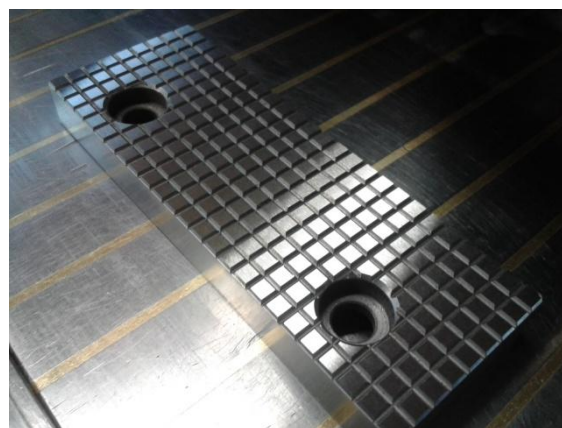


Obr. 6.11 Broušení s celkovým pracovním radiálním záběrem $a_e=0,02$ mm.

Na vroubkované straně čelisti bylo prováděno broušení stejně, jak na straně hladké. Při prvním přebroušení s $a_e=0,01$ mm byly na ploše stopy po frézování (viz obr. 6.12) a po následném přísuvu $a_e=0,01$ mm bylo broušení dokončeno (viz obr. 6.13).



Obr. 6.12 Upnutá čelist po broušení
s $a_c=0,01$ mm.



Obr. 6.13 Upnutá čelist po broušení s dalším
přisuvem $a_c=0,01$ mm.

Názorná ukázka opotřebení na hřbetě VBD po 15 minutách čistého času frézování ($v_c=180$ m.min⁻¹, $f_z=0,09$ mm, $a_p=0,2$ mm) je na obr 6.14.



Obr. 6.14 Názorná ukázka opotřebení VBD z řezného materiálu LC603Z pro variantu B.

Po proběhnutí experimentu byl následně spolu po domluvě zkušené obsluhy rovinné brusky stanoven přídavek na broušení $p=0,03^{+0,02}$ mm. Byl upraven technologický postup, kde byl přídavek pro hrubovací frézování součástí v zušlechtném stavu zvolen na $0,44^{+0,04}$ mm, tedy v rozměru $15,44^{+0,04}$ mm. Nový technologický postup je v tab. 6.9.

Tab. 6.9 Nový výrobní postup [6].

Výrobní postup				
Polotovár: 20x50x130		Materiál: 19312 (19313)	Hmotnost polotovaru: 1,02 kg	Hmotnost součásti: 0,62 kg
Datum:		Vyhotovil:	Název součásti: Vroubkovaná/hladká čelisti	Číslo listu: 1
Č. op.	Název stroje, dílna:	Popis práce v operaci:		Výrobní nástroje a kontrolní měřidla:
1	Pásová pila, Příprava materiálu	Řezat tyč v délce 130		Pilový pás

2	Kooperace TZ	Žíhat pro odstranění vnitřního pnutí	-
3	Frézovací centrum AKIRA SEIKI SV 1350, CNC obrobna	Upnout do hydraulického svěráku. Frézovat vrchní plochu ($a_p=2$), frézovat obvod na rozměry v šířce $45,3+0,1$ a v délce $124,85+0,05$ do hl. 16. Vrtat díry 2x $\varnothing 9$ -2x v rozteči $79,9+0,05$ a rozměr $14\pm 0,1$ na $14,15+0,05$, zahloubit 2x $\varnothing 15/5,8+0,1$ -2x v rozteči $79,9+0,05$ a rozměr $14\pm 0,1$ na $14,15+0,05$, srazit hrany $0,5 \times 45^\circ$ na dírách $\varnothing 9$ -2x, srazit hrany $1,5 \times 45^\circ$ na zahloubení $\varnothing 15$ -2x.	Frézovací hlava čelní $\varnothing 50$ mm s VBD, Monolitní fréza $\varnothing 16$ 3z , Monolitní fréza $\varnothing 20$ 4z , Vrták $\varnothing 9$, záhlubník $\varnothing 15$ s VBD, fréza na srážení hran $\varnothing 10$, fréza na srážení hran $\varnothing 20$ s VBD.
4	OTK	Kontrolovat rozměry. Šířku $54,3+0,1$ a délku $124,85+0,05$, díry $\varnothing 9$ -2x v rozteči $79,9+0,05$ a rozměr $14,15+0,05$, zahloubení $\varnothing 14/5,85+0,1$ -2x, rozteč $79,9+0,05$ a rozměr $14,15+0,05$.	Digitální výškoměr Posuvné měřítko digitální
5	Frézovací centrum AKIRA SEIKI SV 1350, CNC obrobna	Upnout do hladkých čelistí. Frézovat rozměr $15\pm 0,01$ na $15,44^{+0,04}$, zahloubit $\varnothing 15/5,85+0,1$ -2x v rozteči $79,9+0,05$ a rozměr $14\pm 0,1$ na $14,15+0,05$, srazit hrany $0,5 \times 45^\circ$ na dírách $\varnothing 9$ -2x, srazit hrany $1,5 \times 45^\circ$ na zahloubení $\varnothing 15$ -2x.	Frézovací hlava čelní $\varnothing 50$ mm s VBD záhlubník $\varnothing 15$ s VBD fréza na srážení hran $\varnothing 10$ fréza na srážení hran $\varnothing 20$ s VBD
6	OTK	Kontrolovat rozměry. Rozměr $15,44^{+0,04}$, zahloubení $\varnothing 15/5,85+0,1$ -2x, rozteč $79,9+0,05$ a rozměr $14,15+0,05$.	Digitální výškoměr Posuvné měřítko digitální
7	Horizontální frézka FH, Klasické stroje	Frézovat vroubkování do hloubky $1,2+0,05$.	Frézovací hlava válcová s VBD
8	Ruční úprava	Celkové odjehlení obrobku.	Ruční pilník, Stojanová bruska s gumovým kotoučem
9	Kooperace TZ	Vakuově kalit a popouštět na HRC 53+4.	-
10	OTK	Kontrolovat tvrdost HRC 53+4.	Tvrdoměr HBRV-187,5
11	Frézovací centrum AKIRA SEIKI SV 1350, CNC obrobna	Hrubovací frézování rozměru $15,44^{+0,04}$ na rozměr $15,03^{+0,02}$ oboustranně.	nástrčná frézovací hlava FCC R16.063AN 50-05-I-AFR VBD- RDHX 1604 MO S
12	Rovinná bruska BPH 2000, brusárna	Broušení načisto rozměru $15,03^{+0,02}$ na rozměr $15\pm 0,01$ oboustranně.	1-300x32x76- A98RA60K9V03-40
13	OTK	Kontrolovat rozměr $15\pm 0,01$ a kontrolovat rovnoběžnost v toleranci 0,01.	3D měřicí přístroj TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454

14	Rovinná bruska BPH 2000, brusírna	Brousit rozměr 54,3+0,05 na rozměr 54±0,01 oboustranně.	1-300x32x76-A98RA60K9V03-40
15	OTK	Kontrolovat rozměr 54±0,01 a rovnoběžnost 0,01.	3D měřicí přístroj TESA MICRO-HITE 30, MODEL 454
16	Laserové popisování	Popisovat dle výkresu	Laserový popisovač
17	expedice	Konzervovat a balit.	

6.4 Ekonomické hodnocení pro navržené varianty

6.4.1 Shrnutí strojních časů pro obě varianty

V kapitole 5.3 byly stanoveny strojní časy t_{as} pro výrobu 400 ks součástí pro různé řezné podmínky, jak u varianty A (tab. 5.8), tak u varianty B (tab. 5.11), u které se uvažovala maximální výrobnost. V následující tabulce 6.10 jsou číselně zobrazeny rozdíly ve strojních časech pro frézování načisto a celkové broušení (hrubovací+načisto) po experimentálních zkouškách, kde se ověřovaly zvolené řezné podmínky.

- Varianta A:

Tab. 6.10 Jednotkové strojní časy pro celkové broušení a frézování načisto.

Stávající technologie						Varianta A		
Broušení						Frézování načisto		
Jednotkový strojní čas				Celkový strojní čas		Strojní čas		
hrubování		na čisto		-		-		
1 ks	400 ks	1 ks	400 ks	400 ks		1 ks	400 ks	
[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[hod]	[min]	[min]	[hod]
2,26	904	2,07	828	1732	29	0,72	289	4,82

- Varianta B:

U této varianty se nahradilo hrubovací broušení hrubovacím frézováním. Touto změnou se celkově snížily strojní časy pro celkové obrábění součástí v zušlechťeném stavu, protože se hrubovací broušení vynechalo a nahradilo se efektivnější technologií frézováním. Shrnutí strojních časů je v tab. 6.11.

Tab. 6.11 Jednotkové strojní časy pro celkové broušení a hrubovací frézování.

Stávající technologie				Varianta B			
Broušení				Hrubovací frézování+broušení načisto			
Jednotkový strojní čas				Jednotkový strojní čas			
hrubování		na čisto		Hrubovací frézování		Broušení načisto	
1 ks	400 ks	1 ks	400 ks	1 ks	400 ks	1 ks	400 ks
[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
2,26	904	2,07	828	0,24	96	2,07	828

6.4.2 Shrnutí celkových výrobních nákladů pro obě varianty

V kapitole 5.4 byly predikovány teoretické celkové výrobní náklady pro různé řezné podmínky, jak u varianty A (viz tab. 5.14), tak u varianty B (viz tab. 5.16), u které se uvažovala maximální výrobnost. V následující tabulce 6.12 jsou číselně zobrazeny náklady pro stávající technologii broušení, pro variantu A a pro variantu B pro zvolené řezné podmínky.

Tab. 6.12 Shrnutí celkových výrobních nákladů.

		Stávající technologie	Varianta A	Varianta B
Celkové výrobní náklady na 1 ks	[Kč]	58,3	18,6	38,5
Celkové výrobní náklady na 400 ks	[Kč]	23 320	7442	15392

7 DISKUZE

V práci byly navrženy dvě varianty (A,B) pro zefektivnění stávající technologie, a to rovinného broušení vroubkované/hladké čelisti. První varianta A byla navržena jako frézování zušlechtěné součásti frézováním načisto. V druhé variantě B byla navržena technologie hrubovacího frézování s následným broušením načisto.

Ve variantě A byly použité teoretické řezné podmínky stanovené výrobcem, u nichž bylo cílem dosáhnout předepsaných geometrických tolerancí a předepsané struktury povrchu. Po experimentu bylo zjištěno, že pro dané podmínky obrábění byly nedostatky v dodržení geometrické tolerance a to rovnoběžnosti 0,01 mm. U vybraných 5 součástí byly 3 kusy v toleranci, kdežto u dvou byla tolerance nevyhovující. Z hlediska střední aritmetické úchylnosti profilu R_a 0,8 μm byly součásti v toleranci pro zvolené posuvy na zub $f_z=0,08$ mm a $f_z=0,09$ mm. U této varianty by vznikala značná nejistota při obrábění více kůsu, tedy značná zmetkovitost z hlediska nedodržení předepsané rovnoběžnosti 0,01 mm.

Ve variantě B bylo cílem efektivně obrobít přídavek pro broušení načisto po zušlechtění, protože u stávající technologie broušení bylo obrábění přídavků velice neefektivní, jak z hlediska celkových strojních časů, tak celkových výrobních nákladů. Byly experimentálně stanoveny přídavky na broušení načisto. Pro tuto technologii nebyla omezující podmínka žádná předepsaná struktura povrchu, tudíž se zvolil posuv na zub $f_z=0,2$ mm, tedy maximum z doporučeného intervalu od výrobce. Tato varianta byla v porovnání celkových nákladů horší, jako varianta A, ale v porovnání se stávající technologií byly celkové výrobní náklady menší. Varianta B i odlehčila celkovou vytiženost na rovinné brusce, protože hrubovací broušení bylo zrušeno.

7.1 Návrh pro zlepšení varianty A

U varianty A nebyly dosaženy dostatečné předpoklady pro obrábění v požadované rovnoběžnosti 0,01 mm. Bylo to zapříčiněné málo tuhou soustavou stroj-nástroj-obrobek a v upnutí součásti ve strojním svěráku. Proto by bylo vhodné pro variantu A zvolit CNC-stroj s předpokládanými požadavky a pořízením magnetické upínací desky pro vyloučení nesprávného upnutí ve strojním svěráku.

ZÁVĚR

Pro stávající technologii broušení součásti v zušlechtném stavu byly stanoveny celkové strojní časy a celkové výrobní náklady. Byly navrženy dvě varianty pro zefektivnění, pro které byl zvolen vhodný nástroj pro obrábění materiálů v zušlechtném stavu. U varianty A byla navržena technologie frézování načisto a u varianty B bylo obrábění rozděleno na hrubovací frézování a broušení načisto. Po teoretických propočtech celkových strojních časů a celkových výrobních nákladů pro teoretickou trvanlivost $T=15$ min bylo zjištěno, že obě navržené varianty byly efektivnější, než stávající technologie.

Experimentálním ověřením navržených variant bylo dosaženo následujících poznatků:

- Pro variantu A byl zjištěn maximální posuv na zub $f_z=0,09$ mm pro řeznou rychlost $v_c=180$ m.min⁻¹ a pro šířku záběru ostří $a_p=0,2$ mm pro dosažení předepsané střední aritmetické úchytky profilu $Ra=0,8$ μm,
- byla ověřena trvanlivost břitu, u kterého po 15 minutách v řezu bylo opotřebením vyhovující v závislosti na dodržení předepsané střední aritmetické úchytky profilu,
- těmito zvolenými řeznými podmínkami bylo dosaženo snížení celkového strojního času pro 400 ks na $t_{AS}=289$ min na rozdíl od stávající technologie $t_{AS}=1732$ min,
- celkové výrobní náklady pro 400 ks se snížily na $N_C=7\ 442$ Kč oproti stávajícím nákladům $N_C=23\ 320$ Kč,
- byly ovšem shledány nedostatky v dodržení předepsané rovnoběžnosti 0,01 mm,
- pro variantu B byly ověřeny zvolené řezné podmínky pro optimální celkové strojní časy a celkové výrobní náklady,
- při řezných podmínkách: $f_z=0,2$ mm, $v_c=180$ m.min⁻¹, $a_p=0,2$ mm byla experimentálně ověřena trvanlivost břitu pro stanovenou $T=15$ min, kde i u 15 minut čistého času řezání byl břit vyhovující pro obrábění,
- celkové strojní časy pro obrobení přídavku hrubovacím frézováním po zušlechtnění byly strojní časy pro 400 ks $t_{AS}=96$ min na rozdíl od stávající technologie hrubovacího broušení $t_{AS}=904$ min,
- celkové výrobní náklady pro obrobení 400 ks se snížily na $N_C=15\ 392$ Kč z celkových výrobních nákladů pro stávající technologii $N_C=23\ 320$ Kč.

U těchto navržených variant byly celkové výrobní náklady pro zvolené řezné podmínky vždy menší, než u stávající technologie rovinného broušení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Römheld GmbH. Werstück-Spannsysteme [online]. [cit. 2016-1-8]. Dostupné z: https://www.roemheld-gruppe.de/fileadmin/user_upload/produkte/Werkstueck-Spannsysteme/PDFs/WS13020_de_0216.pdf.
2. Preciz s.r.o., *Převodník materiálů* [online]. [cit. 2016-1-8]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2842>.
3. Galvamet spol. s r.o., *Vakuové kalicí pece* [online]. [cit. 2016-1-8]. Dostupné z: <http://www.galvamet.cz/>.
4. PTÁČEK, L. a kolektiv. *Nauka o materiálu.II.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
5. KNIFE. Kalicí a popouštěcí diagram. Nástrojová ocel ČSN41 9312 [online]. [cit. 2016-2-8]. Dostupné z: <http://www.knife.cz/DesktopModules/YetAnotherForumDotNet/resource.ashx?a=100195>.
6. SV slavičín s.r.o. *Technologické podklady*. Slavičín, 15.2. 2016.
7. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2011. 332 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
8. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf.
9. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
10. CHLADIL, J a HUMAR, A. *Teorie obrábění: Příklady a cvičení*. Brno: VUT v Brně. 1991. 64 s. ISBN 80-214-0370-5.
11. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Technická příručka*. [online]. [cit. 2016-2-15]. Dostupné z: <http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/Technical%20Guide.zip>.
12. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf.
13. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
14. MM průmyslové spektrum. *Nové řezné nástroje do výroby* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-rezne-nastroje-do-vyroby.html>.
15. MM průmyslové spektrum. *Trendy v povlakování slinutých karbidů* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>.

16. MM průmyslové spektrum. *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni.html>.
17. SHM, s.r.o, Šumperk. *PVD povlaky a služby.PVD povlaky* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/>.
18. MM průmyslové spektrum. *Nanokompozitní supertvrdé povlaky* [online]. [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nanokompozitni-supertvrde-povlaky.html>.
19. MM průmyslové spektrum. *Výkonné vrtací nástroje-vysoká produktivita obrábění* [online]. [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/vykonne-vrtaci-nastroje-vysoka-produktivita-obrabeni-2-2.html>.
20. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o. 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
21. PRAMET Tools, s.r.o. Příručka obrábění. [online]. [cit. 2016-2-28]. Dostupné z: http://www.isstechn.cz/objekty/prirucka_obrabeni.pdf.
22. Patric De Vos. *Opotřebenění řezných nástrojů-praktické zkušenosti*. 2015. SECO TOOLS AB. Překlad: DUFKOVÁ K., PÍŠKA M.
23. BRYCHTA J., SADÍLEK M., ČEP R., PETRŮ J. *Progresivní metody v obrábění* [online]. Studijní opora. Ostrava. 2011 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf.
24. PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
25. MUKHERJEE, I., RAY, P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering*. 50. 2006. 15-34 s. DOI: 10.1016/j.cie.2005.10.001.
26. TOS. Manuál rovinné brusky BPH 20 [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/download/>.
27. TECH centrum s.r.o. *Brusivo. Kotouče ploché NORTON*. [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.prodejbrusiva.cz/kotouc-t1-200x20x51-5sg46g12vxp-69936680288-norton>.
28. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 3. část* [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z:http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf.
29. ALSAN, E. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). *Materials and Design*. 26. 2005. 21–2s. DOI:10.1016/j.matdes.2004.04.004.

30. OKADA, M., HOSOKAWA A., TANAKA R., UEDA T. Cutting performance of PVD-coated carbide and CBN tools in hardmilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 51.2011. 127–132s. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2010.10.007.
31. Pramet tools, s.r.o. Šumperk. Česká republika. *Frézování 2014* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/>.
32. LMT Czech Republic s.r.o.. Katalog frézovacích nástrojů [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.lmt-fette.cz/Files/katalogy/fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD/LMT_Fraesen_V1_01.pdf.
33. SECO TOOLS CZ. Katalog obrábění [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: https://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews1_2013/mn/CZ_Catalog_Update_2013-1_Inlay_LR.pdf.
34. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Znalosti a zkušenosti*. [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/max_chip_thickness/pages/default.aspx.
35. AKIRA SEIKY CO. *Akira super verval, SV series* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.akiraseiki.com/productsDia.php?d=9>.
36. KOVONÁSTROJE. *Měřidla. Tvrdoměry* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.kovonastroje.cz/Meridla/Tvrdomery/Digitalni-tvrdomer-HRBV-187-5-Brinell-Rockwell-Vickers.html>.
37. TOKYO SEKIMITSU CO. *Measuring. Surface* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.accretech.jp/english/product/measuring/surface/files/surfcom130a_e.pdf.
38. TESA technology. *TESA micro-hite 3D* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.tesatechnology.com/Documents/pdf/Info_Products_pdf/39_Machine%20de%20mesure%20d/3910.265.1304_IP_MH3D/IP_MH3D_EN.pdf.
39. BMD a.s. *Seřizování nástrojů. Seřizovací přístroje BMD 300v* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.bmd.cz/serizovani-nastroju/serizovaci-pristroje/bmd-300v/>.
40. ZEVETA Bojkovice a.s. *Oddělení technické kontroly*. Bojkovice, 12.5. 2016.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CNC	[-]	Computer Numeric Nontrol
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
ČSN	[-]	Česká technická norma
DIN	[-]	Deutsche Industrie-Norm
EN	[-]	Evropská norma
HB	[-]	tvrdost dle Brinella
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
HSC	[-]	High speed cutting
HV	[-]	Tvrdost dle Vickerse
ISO	[-]	International Organization of Standartization
iTNC	[-]	Číslicové řízení firmy heidenhain (s procesorem intel)
OTK	[-]	Oddělení technické kontroly
PKNB	[-]	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	[-]	Physical Vapor Deposition
TZ	[-]	Tepelné zpracování
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
B	[mm]	šířka frézované plochy,
C_{Fc}	[-]	konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu
C_T	[-]	konstanta v závislosti $T=f(C_v)$
C_v	[-]	konstanta v závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti $v_c=f(T)$
D	[mm]	průměr nástroje.
D_{max}	[mm]	maximální průměr brousícího kotouče
D_v	[Kč]	hodinová sazba na vedlejší práci
F_{Ci}	[N]	jmenovitá řezná síla
K_{IC}	[MPa.m ^{1/2}]	lomová houževnatost

L	[mm]	dráha nástroje ve směru posuvu
N₁	[Kč]	cena VBD
N₂	[Kč]	cena držáku (cena nástrčné frézovací hlavy), z-jeho životnost
N₃	[Kč]	náklady na upnutí (seřízení VBD).
N_N	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na 1 obráběný kus
N_S	[Kč]	náklady na strojní práci,
N_{sm}	[Kč]	minutová sazba stroje, která je závislá na hodinové sazby stroje
N_{sn}	[Kč]	hodinová sazba stroje
N_T	[Kč]	náklady nástroj a jeho výměnu
N_V	[Kč]	náklady na vedlejší práci
N_{vm}	[Kč]	minutová sazba na vedlejší práce
P_c	[kW]	řezný výkon
Q_T	[-]	počet obrobených kusů jedním břitem při dané trvanlivosti
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota úchylna profilu
R_z	[μm]	největší výška profilu
T	[min]	trvanlivost břitu
T_{opt1}	[min]	optimální trvanlivost pro minimální výrobní náklady
T_{opt2}	[min]	optimální trvanlivost pro minimální výrobní čas
a_e	[mm]	pracovní (radiální) záběr
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
b	[mm]	šířka třísky
b_s	[mm]	šířka brousícího kotouče
b_w	[mm]	šířka broušené plochy
d	[mm]	průměr VBD
d₁	[mm]	jmenovitý průměr frézovacího nástroje
d₁	[mm]	průměr díry pro upnutí VBD
d₂	[mm]	průměr díry pro upnutí
d₄	[mm]	průměr VBD
d₅	[mm]	průměr těla frézy

d_s	[mm]	průměr broušícího kotouče
e	[mm]	vzdálenost osy nástroje od osy obrobku
f_a	[mm]	axiální posuv stolu brusky na jeden zdvih v tangenciálním směru
f_z	[mm]	posuv na zub
h	[mm]	výška frézy
h_t	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
k_{c1}	[MPa]	měrný řezný odpor
k_{ci}	[N.mm ⁻²]	měrná řezná síla
l	[mm]	délka obrobku
l_a	[mm]	dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru,
l_n	[mm]	délka náběhu
l_{na}	[mm]	délka náběhu v axiálním směru,
l_{na}	[mm]	délka náběhu v axiálním směru
l_{nt}	[mm]	délka náběhu v tangenciálním směru
l_{nt}	[mm]	délka náběhu v tangenciálním směru
l_p	[mm]	délka přeběhu
l_{pa}	[mm]	délka přeběhu v axiálním směru
l_{pt}	[mm]	délka přeběhu v tangenciálním směru
l_t	[mm]	dráha pohybu stolu v tangenciálním směru
l_w	[mm]	délka obrobku (broušení)
m	[-]	exponent
mc	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
n	[min ⁻¹]	otáčky nástroje
n_B	[-]	počet břitů VBD
p	[mm]	přídavek na broušení,
s	[mm]	tloušťka VBD
t_A	[min]	operační čas jednotkové práce
t_{AS}	[min]	jednotkový strojí čas
t_{AV}	[min]	jednotkový vedlejší čas

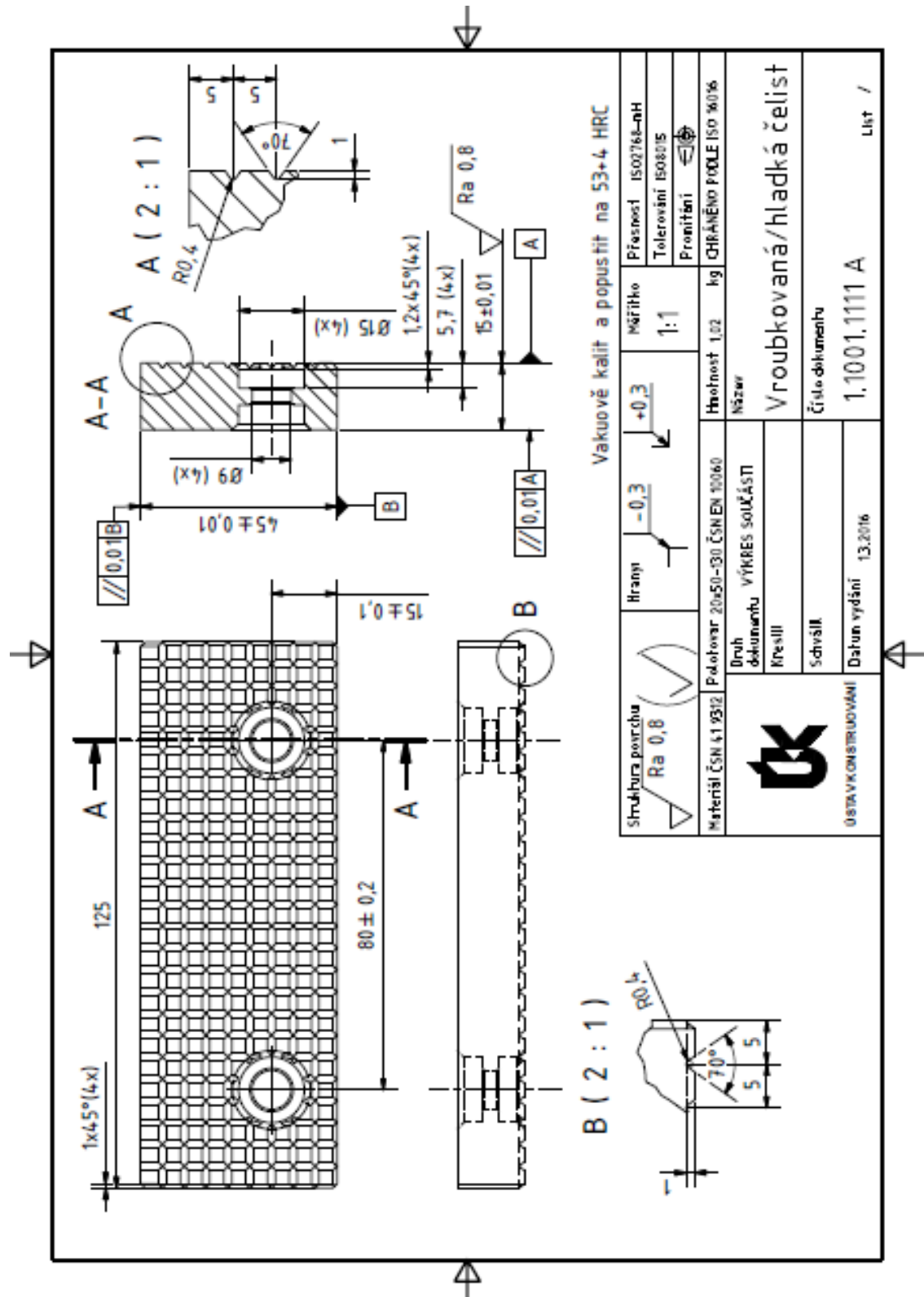
t_{Ax}	[min]	čas výměny nástroje.
t_N	[min]	čas na výměnu nástroje
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
$v_{c\ opt1}$	[m.min ⁻¹]	optimální řezná rychlost pro minimální výrobní náklady
$v_{c\ opt2}$	[m.min ⁻¹]	optimální řezná rychlost pro minimální výrobní čas
v_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost
v_{ft}	[m.min ⁻¹]	tangenciální rychlost posuvu stolu brusky
x	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
x	[μ m]	šířka fazetky
z	[-]	počet zubů frézy
z	[-]	počet zubů
α_o	[°]	ortogonální úhel hřbetu
β_o	[°]	ortogonální úhel břitu
γ_f	[°]	boční úhel čela
γ_o	[°]	ortogonální úhel čela
γ_p	[°]	zadní úhel čela
γ_x	[°]	úhel fazetky v nástrojové rovině ortogonální
ε	[°]	úhel pro výpočet počtu břitů na VBD tvaru ISO R
λ	[-]	podíl čistého času řezání
ρ	[μ m]	zaoblení ostří
φ_i	[°]	úhel posuvového pohybu
ψ	[°]	úhel záběru frézy
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres součásti.
Příloha 2	Program pro variantu A.
Příloha 3	Program pro variantu B.
Příloha 4	Protokol o měření struktury povrchu.
Příloha 5	Protokol o měření rovnoběžnosti 0,01 mm.
Příloha 6	Protokol o měření jmenovitého rozměru $15 \pm 0,01$ mm.

PŘÍLOHA 1

Výkres součásti [1].



PŘÍLOHA 2

Program pro variantu A.

```
0 BEGIN PGM vroubkovana/hladka celist_125
1 BLK FORM 0.1 Z X+0 Y-22.5 Z-15.48
2 BLK FORM 0.1 X+125 Y+22.5 Z0
3 ;zkouska hodnoty Ra pro dany posuv
4 ;SVERAK 160, PODLOZKY 43x4
5 ;-----NULOVÉ BODY OBROBKU-----
6 ;X-VLEVO
7 ;Y-STRED
8 ;Z-PODLOZKY
9 ;pouzita rezna rychlost=180m/min
10 ;zkousene posuvy na zub=> rychlost posuvu
11 ;fz=0,08=>487; fz=0,09=>548; fz=0,10=>609; fz=0,11=>670; fz=0,12=>731
12 ;fz=0,13=>792; fz=0,14=>853; fz=0,15=>914; fz=0,16=>975; fz=0,17=>1036
13 ;fz=0,18=>1097; fz=0,19=>1158; fz=0,20=>1219
14 ;-----
15 ;frezovaci hlava fette D63 (VBD LC603Z)
16 ;aktualni fz=0,08=>487
17 TOOL CALL 32 Z S1219 F487
18 L Z+200 R0 FMAX M3
19 M936 ;vnitрни chlazenі
20 M941 ;vnejsi chlazenі
21 CYCL DEF 14.0 OBRYС
22 CYCL DEF 14.1 LBL OBRYСU1
23 CYCL DEF 25 LINIE OBRYСU
    Q1=-0,2 ;HLOUBKA FREZOVANI
    Q3=+0 ;PRIDAVEK PRO STRANU
    Q5=+0 ;SOURADNICE POVRCHU
    Q7=+50 ;BEZPECNA VYSKA
    Q10=-0,2 ;HLOUBKA PRISUVU
    Q11=+500 ;POSUV NA HLOUBKU
    Q12= AUTO ;POSUV PRO FREZOVANI
    Q15=+1 ;ZPUSOB FREZOVANI
24 CYCL CALL
25 M9 ; vypnuti vnitрniho chlazenі
26 M942 ; vypnuti vnejsiho chlazenі
27 L Z+300 R0 FMAX
28 L Y+0 R0 FMAX M91
29 STOP M30
30 ;--PODPROGRAM
31 LBL 1
32 L X+161.5 Y+0 R0
33 L X+161.5 Y+0 R0
34 L X-36.5
35 LBL 0
36 END PGM vroubkovana/hladka celist_125 M
```


PŘÍLOHA 3

Program pro variantu B.

```
0 BEGIN PGM vroubkovana/hladka celist_125
1 BLK FORM 0.1 Z X+0 Y-22.5 Z-15.48
2 BLK FORM 0.1 X+125 Y+22.5 Z0
3 ;HRUBOVACI FREZOVANI
4 ;SVERAK 160, PODLOZKY 43x4
5 ;-----NULOVÉ BODY OBROBKU-----
6 ;X-VLEVO
7 ;Y-STRED
8 ;Z-PODLOZKY
9 ;pouzita rezna rychlost=180m/min
10 ;pouzity posuv na zub=0,20
11 ;-----
12 ;frezovaci hlava fette D63 (VBD LC603Z)
13 TOOL CALL 32 Z S1219 F1219
14 L Z+200 R0 FMAX M3
15 M936 ;vnitri chlazení
16 M941 ;vnejsi chlazení
17 CYCL DEF 14.0 OBRYŠ
18 CYCL DEF 14.1 LBL OBRYŠU1
19 CYCL DEF 25 LINIE OBRYŠU
    Q1=-0,2 ;HLOUBKA FREZOVANI
    Q3=+0 ;PRIDAVEK PRO STRANU
    Q5=+0 ;SOURADNICE POVRCHU
    Q7=+50 ;BEZPECNA VYSKA
    Q10=-0,21 ;HLOUBKA PRISUVU
    Q11=+500 ;POSUV NA HLOUBKU
    Q12= AUTO ;POSUV PRO FREZOVANI
    Q15=+1 ;ZPUSOB FREZOVANI
20 CYCL CALL
21 M9 ; vypnutí vnitřního chlazení
22 M942 ; vypnutí vnějšího chlazení
23 L Z+300 R0 FMAX
24 L Y+0 R0 FMAX M91
25 STOP M30
26 ;--PODPROGRAM
27 LBL 1
28 L X+161.5 Y+0 R0
29 L X+161.5 Y+0 R0
30 L X-36.5
31 LBL 0
32 END PGM vroubkovana/hladka celist_125 M
```

PŘÍLOHA 4

Protokol o měření struktury povrchu [40].

DIMENSIONAL RESULTS VÝSLEDKY ROZMĚROVÉ KOTROLY 							
SUPPLIER: DODAVATEL:				ZEVETA MACHINERY a.s.		PART NUMBER: ČÍSLO DÍLU: 1.1001.1111 A	
INSPECTION FACILITY:				FINAL INSPECTION		PART NAME: NÁZEV DÍLU: vroubkovaná/hladká čelist	
ITEM (Posuv na zub f.)	DIMENSION / SPECIFICATION	MEASUREMENT RESULT	OK	NOT OK	MEASUREMENT RESULT	OK	NOT OK
		Hladká strana součásti			vroubkovaná strana součásti		
0,08	Ra	0,344			0,293		
	Rz	2,585			1,875		
0,09	Ra	0,365			0,653		
	Rz	2,513			3,388		
0,10	Ra	0,393			0,86		
	Rz	2,56			4,112		
0,11	Ra	0,871			0,346		
	Rz	4,423			1,988		
0,12	Ra	1,073			0,503		
	Rz	5,368			3,15		
0,13	Ra	1,11			0,856		
	Rz	5,31			4,638		
0,14	Ra	1,193			1,206		
	Rz	5,752			6,288		
0,15	Ra	1,341			0,761		
	Rz	6,112			5,013		
0,16	Ra	1,248			1,253		
	Rz	5,938			5,975		
0,17	Ra	1,303			0,792		
	Rz	7,433			4,438		
0,18	Ra	1,221			0,854		
	Rz	6,41			5,713		
0,19	Ra	1,438			1,002		
	Rz	6,88			4,438		
0,20	Ra	1,487			1,56		
	Rz	7,263			7,913		

PŘÍLOHA 5

Protokol o měření rovnoběžnosti 0,01 mm [6].

SV Slavičín s.r.o., Nádražní 171, 763 21 Slavičín

PROTOKOL O MĚŘENÍ / MEASURING PROTOKOL

Kontrolní zpráva č. / Measuring report No. :	Kontrola rovnoběžnosti
--	------------------------

Číslo výkresu / Drawing No. :	1.1001.1111 A
-------------------------------	---------------

Název součásti / Name of Product :	Vroubkovaná/hladká čelisti
------------------------------------	----------------------------

Číslo součásti.	Měřená hodnota	Předepsaná tolerance	Naměřená hodnota	OK
1.	Rovnoběžnost	0,01	0,012	X
2.	Rovnoběžnost	0,01	0,009	OK
3.	Rovnoběžnost	0,01	0,007	OK
4.	Rovnoběžnost	0,01	0,011	X
5.	Rovnoběžnost	0,01	0,008	OK

Poznámka / Note :

Kontroloval
Inspected by : _____

Datum
Date: _____

PŘÍLOHA 6

Protokol o měření jmenovitého rozměru 15±0,01 mm [6].

SV Slavičín s.r.o., Nádražní 171, 763 21 Slavičín

PROTOKOL O MĚŘENÍ / MEASURING PROTOKOL

Kontrolní zpráva č. / Measuring report No. :	Kontrola jmenovitého rozměru 15±0,01
--	--------------------------------------

Číslo výkresu / Drawing No. :	1.1001.1111 A
-------------------------------	---------------

Název součásti / Name of Product :	Vroubkovaná/hladká čelisti
------------------------------------	----------------------------

Číslo součásti.	Měřená hodnota Jmenovitý rozměr	Předepsaná tolerance	Naměřená hodnota			Ok		
1.	15	±0,01	15,006	15,015	15,016	Ok	X	X
2.	15	±0,01	14,995	15,006	15,009	Ok	Ok	Ok
3.	15	±0,01	14,997	15,005	15,008	Ok	Ok	Ok
4.	15	±0,01	15,002	15,015	15,013	Ok	X	X
5.	15	±0,01	14,998	15,007	15,008	Ok	Ok	Ok

Poznámka / Note :

Kontroloval
Inspected by : _____

Datum
Date: _____