

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**

**VLIV GEOMETRIE DIAMANTOVÝCH
BŘITŮ NA KVALITU OBROBENÉ
PLOCHY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. MATĚJ PECHAN

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pechan** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **459978**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv geometrie diamantových břitů na kvalitu obrobené plochy

Název diplomové práce anglicky:

Influence of diamond cutting edge geometry on the quality of the machined surface

Pokyny pro vypracování:

- 1) Řezné materiály pro obrábění hliníkových slitin
- 2) Frézování - teorie, geometrie řezných nástrojů
- 3) Řezné prostředí ve vztahu ke kvalitě obrobeného povrchu
- 4) Technologické zkoušky vybraných řezných geometrií
- 5) Vyhodnocení experimentu - stav povrchu, geometrie dílu, trvanlivost nástrojů

Seznam doporučené literatury:

STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. Metal cutting theory and practice. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 1-4665-8753-9.
ANDERSON, Kevin, John WERITZ a J. G. KAUFMAN. Properties and selection of aluminum alloys. Materials Park, Ohio: ASM International, [2019]. ASM Handbook, v. 2B. ISBN 978-1-62708-208-2.
MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. Základy technologie II. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02610-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze 27.7.2021

Bc. Matěj Pechan

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Pitrmucovi za všechny poskytnuté materiály, informace a čas, který věnoval této práci. Dále bych rád poděkoval kolektivu společnosti Škoda Auto a.s., který se mnou spolupracoval v rámci této diplomové práce.

Anotace

Teoretická část diplomové práce se věnuje teorii frézování, vlastnostem slitin hliníku určených pro tlakové lití, vlastnostem, parametrům a způsobu použití řezných nástrojů a řezných kapalin. V závěru teoretické části jsou popsány technologie a dosažitelné kvalitativní parametry mechanických dokončovacích metod rovinných ploch.

Praktická část diplomové práce se věnuje popisu výroby skříní převodovek ve firmě Škoda Auto a.s. se zaměřením na proces obrábění. Následuje analýza chemického složení a mechanických vlastností obráběného materiálu v porovnání s hodnotami udávanými normou. Tato část dále pokračuje kapitolou zaměřenou na geometrie diamantových břitů společně s dosaženou kvalitou povrchu a jejich trvanlivostí. V závěru jsou zmíněna ekonomická hlediska experimentu a doporučení pro společnost Škoda Auto a.s.

Abstract

The theoretical part of the diploma thesis deals with the theory of milling, properties of aluminium alloys intended for die casting, properties, parameters and methods of using cutting tools and cutting fluids. At the end of the theoretical part, the technologies and achievable quality parameters of mechanical finishing methods of planar surfaces are described.

The practical part of the diploma thesis deals with the description of the production of gearboxes in the company Škoda Auto a.s. with a focus on the machining process. The following is an analysis of chemical composition and mechanical properties of machined material in comparison with the values given by standard. This part continues with a chapter focused on the geometry of diamond blades together with the achieved quality parameters and tool life. In the end, the economic aspects of the experiment and recommendations for the company Škoda Auto a.s. are described.

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Teorie frézování	12
2.1.	Metody frézování.....	12
2.1.1.	Frézování válcové	12
2.1.2.	Frézování čelní.....	13
2.1.3.	Frézování sousledné.....	13
2.1.4.	Nesousledné frézování.....	14
2.2.	Frézovací stroje.....	15
2.2.1.	CNC obráběcí centra.....	16
3.	Slitiny hliníku pro tlakové lití	19
3.1.	Slitiny Al-Si-Cu.....	19
3.1.1.	Obecné vlastnosti.....	19
3.1.2.	Výrobní vlastnosti.....	20
3.2.	Slitiny Al-Si-Mg	21
3.2.1.	Obecné vlastnosti.....	21
3.2.2.	Výrobní vlastnosti.....	22
3.3.	Slitiny Al-Si-Mg-Cu	22
3.3.1.	Obecné vlastnosti.....	23
3.3.2.	Výrobní vlastnosti.....	23
3.4.	Slitiny Al-Si.....	24
3.4.1.	Obecné vlastnosti.....	25
3.4.2.	Výrobní vlastnosti.....	25
3.5.	Slitiny Al-Mg.....	26
3.5.1.	Obecné vlastnosti.....	26
4.	Materiály řezných nástrojů.....	28
4.1.	Rychlořezná ocel (HSS)	28

4.2.	Slinuté karbidy (WC).....	29
4.3.	Cermety	31
4.4.	Řezná keramika	32
4.5.	Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB).....	34
4.6.	Polykrystalický diamant (PKD).....	35
4.7.	Shrnutí	36
5.	Druhy řezných kapalin	38
5.1.	Čisté oleje	38
5.2.	Kapaliny na vodní bázi	39
5.3.	Plynné kapaliny	40
5.4.	Aerosoly.....	41
5.5.	Kryogenní kapaliny	41
5.6.	Řezné kapaliny pro slitiny hliníku.....	41
6.	Mechanické dokončovací metody rovinných ploch.....	43
6.1.	Broušení.....	43
6.2.	Tryskání	43
6.3.	Lapování a honování	44
6.4.	Vysokorychlostní frézování.....	44
7.	Výroba skříní převodovek ve Škoda Auto a.s.....	46
7.1.	Hutě H3.....	46
7.2.	Obrábění M6.....	47
7.3.	Montáž M6	50
8.	Materiálová analýza	52
8.1.	Chemické složení.....	52
8.2.	Mechanické vlastnosti	54
9.	Geometrie diamantových břitů.....	57
9.1.	Dosažená kvalita povrchu.....	58

9.1.1. Obvodová rovinnost.....	58
9.1.2. Radiální rovinnost.....	60
9.1.3. Rovnoběžnost.....	62
9.1.4. Drsnost	64
9.2. Trvanlivost nástrojů.....	66
9.3. Ekonomické hledisko	68
10. Doporučení pro Škoda Auto a.s.	71
11. Závěr.....	72
12. Seznam použité literatury	74

Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotka
A_{50mm}	tažnost	[%]
a_e	radiální hloubka řezu	[mm]
a_p	axiální hloubka řezu	[mm]
F_c	řezná složka síly obrábění	[N]
f_n	posuv na otáčku	[mm · ot ⁻¹]
f_z	posuv na zub	[mm]
HBW	tvrdost dle Brinella	[1]
K_W	náklady nástroje na vyrobený kus	[Kč · ks ⁻¹]
n	počet otáček	[min ⁻¹]
n_s	počet řezných hran	[ks]
n_{TM}	počet vyrobených kusů za měsíc	[ks · měsíc ⁻¹]
n_{We}	počet vyrobených kusů na nástroj	[ks]
n_{WT}	počet vyrobených kusů	[ks]
R	poloměr ostří	[mm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	pevnost v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
Rz	drsnost	[μm]
r_ϵ	poloměr špičky	[mm]
T	trvanlivost	[min]
t_{As}	strojní čas	[min]
v_c	řezná rychlost	[m · min ⁻¹]

v_f	<i>posuvová rychlost</i>	$[m \cdot \text{min}^{-1}]$
W_a	<i>pořizovací cena nástroje</i>	$[Kč]$
W_k	<i>náklady na údržbu nástroje</i>	$[Kč]$
W_M	<i>náklady nástroje za měsíc</i>	$[Kč \cdot \text{měsíc}^{-1}]$
α_0	<i>úhel hřbetu</i>	$[^\circ]$
α_f	<i>vedlejší úhel hřbetu</i>	$[^\circ]$
γ_0	<i>úhel čela</i>	$[^\circ]$
γ_f	<i>vedlejší úhel čela</i>	$[^\circ]$
κ'_r	<i>vedlejší úhel nastavení</i>	$[^\circ]$
τ_{PS}	<i>pevnost ve smyku</i>	$[MPa]$

1. ÚVOD

Výroba převodek v mladoboleslavské automobilce Škoda Auto a.s. patří k nedílné součásti výroby komponentů automobilů. První převodová skříň byla v Mladé Boleslavi namontována do vozu Voiturette A tenkrát ještě značky Laurin & Klement. Převodovka byla umístěna uprostřed vozu, který byl vybaven řadící kulisou a pohonem zadních kol. Od tohoto okamžiku prošla nejenom konstrukce, ale také technologie výroby značným vývojem. K 21. srpnu 2020 bylo v mladoboleslavském závodě vyrobeno 13 milionů převodovek současné generace s označením MQ/SQ100 a MQ200. [14], [15]

Kromě ozubených kol, pastorků a hřídelí se zde vyrábějí i hliníkové skříňové díly převodovky. Výroba začíná v tamější slévárně, odkud dále putuje přes proces obrábění až k samotné montáži. Cílem každé výroby je vyrobit vysoce kvalitní výrobky s co možno nejmenšími ekonomickými náklady. V procesu obrábění lze tyto parametry ovlivnit několika způsoby. Jedním z nich je volba rezného nástroje z vhodného materiálu a s příznivou geometrií břitů.

Proto i cílem této práce je zjistit vliv geometrie diamantových břitů na kvalitu obráběného povrchu a na trvanlivost rezného nástroje při vysokorychlostním obrábění skříní převodovek.

2. TEORIE FRÉZOVÁNÍ

Frézování patří mezi nejrozšířenější způsoby obrábění hranolovitých (prizmatických) rovinných, tvarových i rotačních ploch. Dále lze frézováním obrábět drážky různých profilů, případně závity nebo ozubení. Hlavním pohybem při frézování je rotační pohyb nástroje, vedlejším pohybem je pak posuv. Posuv je většinou pohyb přímočarý a vykonává ho obrobek. U moderních strojů (víceosá obráběcí centra) je možné posuvy plynule měnit a zároveň působit ve více směrech. Dále lze u těchto strojů kombinovat více os otáčení (např. rotace nástroje a otočného stolu) nebo nástroj, resp. obrobek, naklápět v jednotlivých osách. Všechna tyto nastavení je možné souvisle řídit. Při frézování je tříska odebírána břity rotujícího nástroje – frézy. Oproti soustružení u frézování pracují břity vícebřitého nástroje v podmínkách přerušovaného řezu. V průběhu jedné otáčky nástroje každý břit vniká minimálně jednou do obrobku a jednou ze záběru vychází. [1], [2]

2.1. Metody frézování

Z technologického hlediska se podle polohy osy otáčení nástroje k obráběné ploše rozděluje frézování následovně:

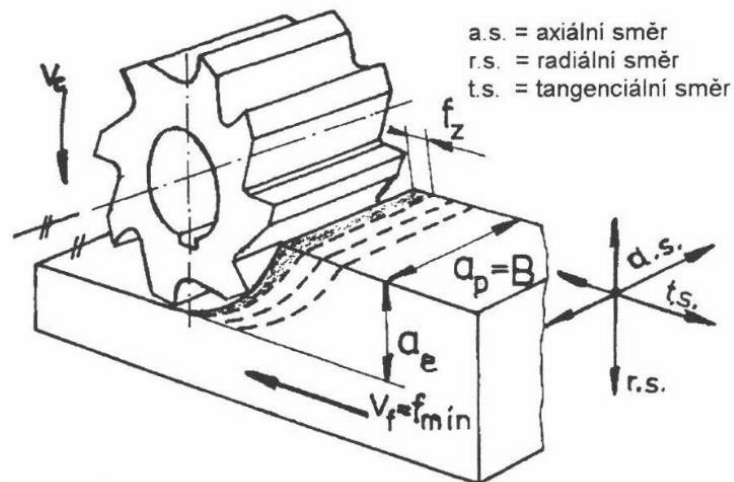
- Frézování válcové
- Frézování čelní

Z terminologického hlediska je podle norem ISO nutné rozlišit vztah směru posuvového pohybu k ose otáčení nástroje. V normě ISO je rozlišen směr axiální (ve směru osy nástroje), radiální směr a tangenciální směr posuvu. V závislosti na rozdělení směrů jsou také rozlišeny pojmy jako je axiální hloubka řezu a_p a radiální hloubka řezu a_e . Výsledný řezný pohyb je tedy dán složením rotačního pohybu nástroje a přímočarého posuvu obrobku. Dle orientace směru otáčení nástroje a směru posuvu obrobku lze frézování rozlišit na: [1], [2]

- Frézování sousledné (sousměrné)
- Frézování nesousledné (nesousměrné)

2.1.1. Frézování válcové

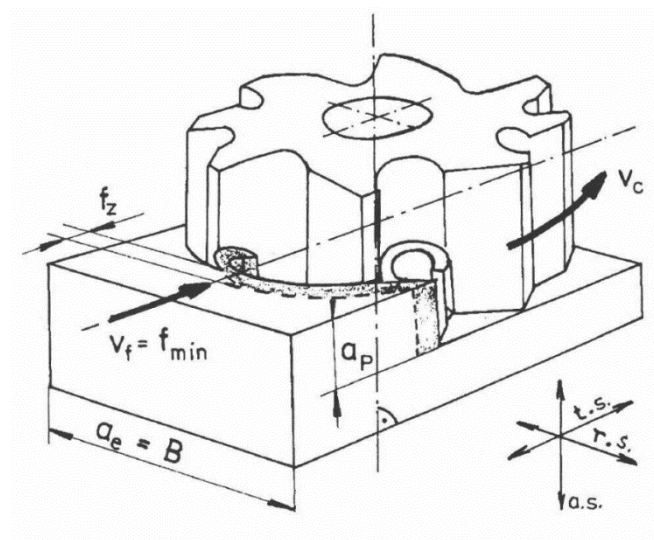
Frézování válcové neboli také frézování obvodem nástroje spočívá v odebírání materiálu válcovou nebo tvarovou frézou, kdy osa nástroje je rovnoběžná s obráběnou plochou (viz obr. 2.1). [1], [2]



Obrázek 2.1 Schéma válcového frézování [1]

2.1.2. Frézování čelní

Frézování čelní spočívá v odebrání materiálu čelem i obvodem nástroje. Osa nástroje je kolmá k obráběné ploše (viz obr. 2.2). Jako nástroje se většinou používají čelní frézy nebo frézovací hlavy. V porovnání s válcovým (obvodovým) frézováním se jedná o produktivnější metodu obrábění, zejména při využití frézovacích hlav s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD). [1], [2]

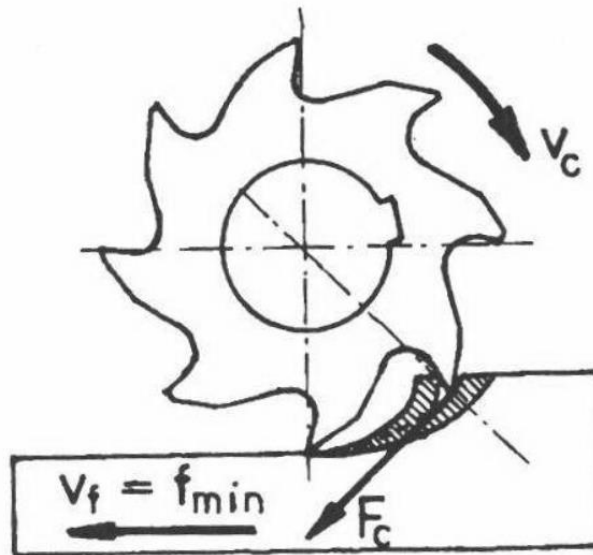


Obrázek 2.2 Schéma čelního frézování [1]

2.1.3. Frézování sousledné

Při sousledném (sousměrném) frézování je směr rotace nástroje stejný jako směr posuvu (viz obr. 2.3). Záběr začíná silným rázem, kdy břit frézy vniká do obrobku kousek pod povrchem a po chvíli dosahuje maximálního průřezu odřezávané třísky. Tloušťka třísky se pak mění z maximální hodnoty k téměř nulové hodnotě, která vzniká při výstupu břitu nástroje

z řezu. Vznikající rázy při vstupu do řezu lze omezit úpravou uspořádání zubů do šroubovice. Působení řezné síly směrem do obrobku má pozitivní vliv na upnutí obrobku, kdy dochází k přitlačení obrobku na upínací plochu. Při obrábění na konvenčních frézách je nutné vymezení vůle a předpětí mezi posunovým šroubem a maticí stolu. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, mohlo by dojít k poškození nástroje, případně celého stroje. [1], [2]



Obrázek 2.3 Schéma sousledného frézování [1]

Výhody sousledného frézování jsou:

- Vyšší trvanlivost nástrojů
- Použití vyšších řezných rychlostí a posuvů
- Menší sklon ke kmitání
- Dosažení vyšší jakosti obrobku
- Příznivé působení síly na upnutí obrobku

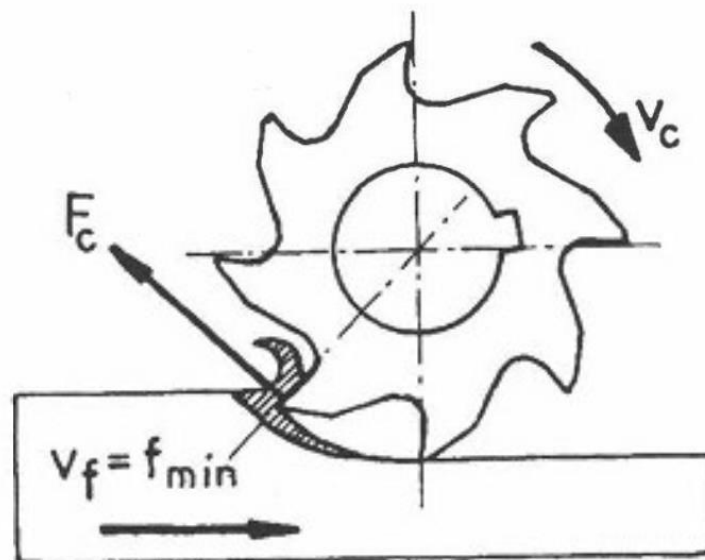
Nevýhody sousledného frézování jsou:

- Silová zátěž každého zubu při záběru
- Nevhodné pro obrábění polotovárů s tvrdým nebo znečištěným povrchem

2.1.4. Nesousledné frézování

Oproti souslednému frézování je směr rotace nástroje jiný než směr posuvu (viz obr. 2.4). Břit frézy vniká do obrobku v místě téměř nulové tloušťky odřezávané třísky a z řezu vystupuje v maximální tloušťce třísky, která je úměrná posuvu na zub f_z . Díky rozdílnému směru nástroje a směru posuvu jsou vznikající rázy výrazně menší než u sousledného frézování. Na druhou stranu se břit nástroje po určitou dobu, než dojde k plnému

zařiznutí, intenzivně tře plochou hřbetu. K oddělení třísky dochází v okamžiku, kdy tloušťka odřezávané vrstvy dosáhne určité hodnoty. Důvodem je skutečnost, že ostřím frézy nemůže být ostrá hrana, nýbrž ostří o poloměru cca $R = 8 \div 30 \mu\text{m}$. Vzhledem k působení výsledné řezné síly směrem od obrobku dochází k nepříznivému působení na upnutí obrobku. Silové účinky a deformace, které vznikají při nesousměrném obrábění, způsobují zvýšené opotřebení břitu a tím také i snížení trvanlivosti nástroje. [1], [2]



Obrázek 2.4 Schéma nesousledného frézování [1]

Výhody nesousledného frézování jsou:

- Menší opotřebení stroje
- Počáteční záběr nezávisí na hloubce řezu
- Vliv povrchu obrobku nemá příliš vliv na trvanlivost nástroje

Nevýhody nesousledného frézování jsou:

- Horší jakost obrobku
- Abrazivní opotřebení nástroje
- Nepříznivé působení řezné síly na upnutí obrobku

2.2. Frézovací stroje

Frézovací stroje, neboli také frézky, se vyrábějí v mnoha provedeních odlišujících se v konstrukci, velikosti, výkonu atp. Výběr parametrů frézovacích strojů závisí na účelu použití stroje – např. velikost obrobku, upnutí obrobku, orientace obráběných ploch při upnutí obrobku, požadovaných řezných parametrů (např. posuv nástroje, otáčky vřetena, řezná rychlost, výkon atd.). V současné době jsou konvenční stroje zastoupeny v technologii ve velmi malém

procentu a využívají se zejména pro kusovou výrobu. Pro sériovou výrobu se využívají především programově řízené CNC frézovací stroje (frézovací centra). [2]

Z hlediska konstrukce lze frézky rozdělit do 4 skupin:

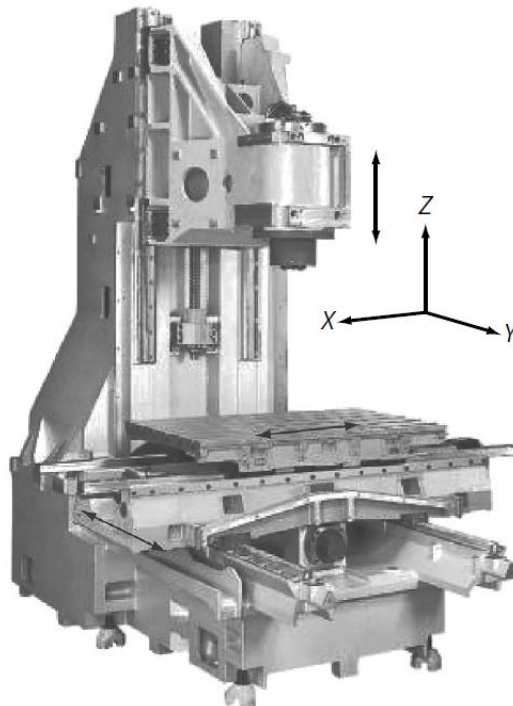
1. Konzolové
2. Stolové
3. Rovinné
4. Speciální

Z hlediska řízení stroje lze frézky rozdělit na:

1. Ručně ovládané (konvenční)
2. Programově řízené

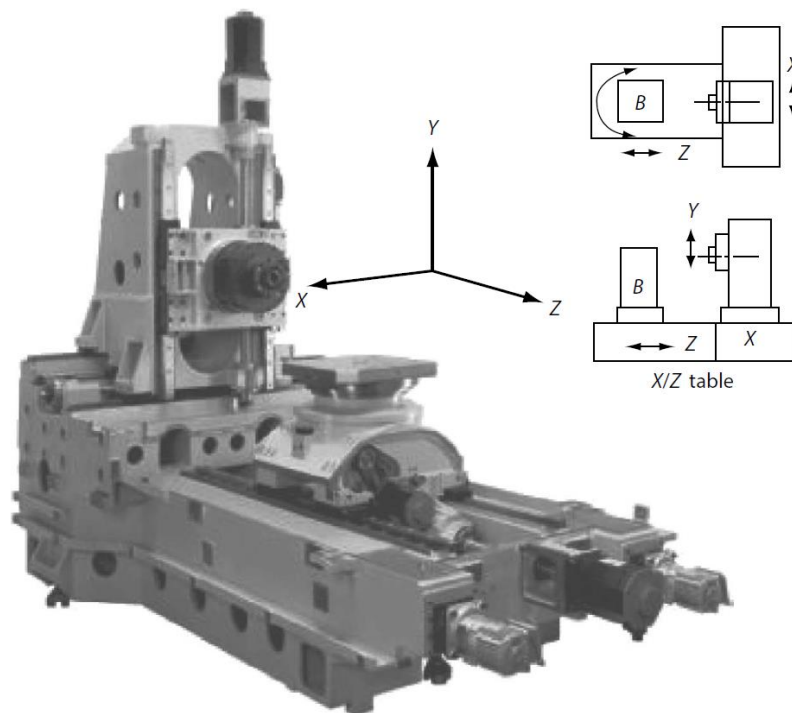
2.2.1. CNC obráběcí centra

CNC obráběcí stroje (obráběcí a soustružnická centra) jsou číslicově řízené stroje, které pohybují řeznými nástroji po komplikovaných trasách, často zahrnující pohyb ve více osách. Všechny tyto pohyby jsou řízeny NC programem. CNC obráběcí centra jsou flexibilní a jsou schopné vyrábět složité součásti ve velkém množství s konzistentní kvalitou a opakovatelností. Největší zastoupení programově řízených obráběcích center lze nalézt ve velkosériové výrobě – např. v automotive průmyslu.



Obrázek 2.5 Tříosé vertikální obráběcí centrum s pevným sloupem s pojezdem v ose Z (svislý pohyb vřetenové hlavy), upínacím stolem s pojezdem ose X a sedlem upínacího stolu s pojezdem v ose Y [3]

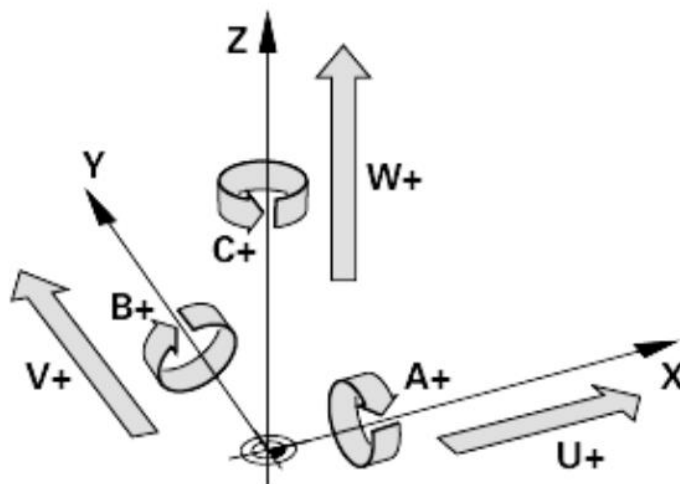
Obráběcí centra lze obecně rozdělit na soustružnická centra a na frézovací centra. Soustružnická centra se využívají pro soustružnické operace, vyvrtávání, profilování a řezání. Frézovací centra se využívají především pro frézovací operace, vrtání, vyvrtávání a řezání závitů. Obráběcí centra jsou klasifikována podle orientace vřeten (vertikální nebo horizontální) a počtu řízených os. Na centrech s vertikální orientací vřeten (viz obr. 2.5) je obrobek upnut na vodorovném stole. Vertikální stroje jsou preferovány pro obrábění velkých obrobků, plochých dílů a zejména tvarových matic, kdy přítlačná síla nástroje působí směrem do upínacího stolu. Centra s horizontálně orientovaným vřetenem (viz obr. 2.6) jsou více univerzální, především díky možnosti obrábět více stran obrobku bez nutnosti přeupínání. Tato skutečnost je podmíněna použitím rotačního pracovního stolu. Kombinací těchto dvou strojů jsou univerzální stroje, které mají hlavy otáčející se tak, aby se chovaly jak jako horizontální stroj, tak jako vertikální stroj. Kombinací natočení a naklonění nástroje je možné obrábět v různých složených úhlech. [3]



Obrázek 2.6 Čtyřosé horizontální obráběcí centrum s pohyblivou hlavou vřeten v ose X a Y, upínacím rotačním stolem s pojezdem v ose Z a vykonávající rotační pohyb B [3]

Z obrázku 2.7 je patrné názvosloví pro posuvy a rotace obráběcích center. Směry primárních os stroje jsou označeny osami X, Y, Z podle kartézského souřadnicového systému. Těmto osám přísluší rotace A, B a C. Sekundární osy (většinou pohyb obrobku) odpovídají směru primárních os a jsou označeny jako U, V, W, někdy také jako X', Y', Z'. Osa Z obvykle odpovídá orientaci vřeten, tzn. na vertikálních strojích je osa Z ve vertikálním směru a u

horizontálních strojů je osa Z orientována v horizontálním (vodorovném) směru – patrné z obr. 2.5 a 2.6.



Obrázek 2.7 Názvosloví pro pohyby a rotace CNC strojů [13]

3. SLITINY HLINÍKU PRO TLAKOVÉ LITÍ

Vysokotlaké lití je hlavní způsob výroby hliníku a představuje přibližně 70 % roční tonáže všech hliníkových odlitků ve Spojených státech. Odlitky vzniklé procesem vysokotlakého lití dokážou velice dobře odpovídat tvaru formy. V porovnání s gravitačním litím to znamená možnost návrhu odlitku bez velkých přídavek na opracování a tím i snížení ceny odlitku. Nižší náklady jsou dále způsobeny kratším časem lití, použitím forem s velkou životností a použitím tlaku k dokončení odlitku. Rychlý proces tuhnutí přispívá ke strukturnímu zdokonalení odlitku. Slitiny hliníku používané pro vysokotlaké lití obsahují přibližně 1 % Fe poskytující odpor proti pájení. [4]

Za dobu používání technologie vysokotlakého lití bylo vyvinuto přibližně 23 registrovaných slitin, které lze rozdělit do 5 základních skupin:

- Slitiny Al-Si-Cu
- Slitiny Al-Si-Mg
- Slitiny Al-Si-Mg-Cu
- Slitiny Al-Si
- Slitiny Al-Mg

3.1. Slitiny Al-Si-Cu

Skupina slitin Al-Si-Cu, zastoupená slitinou s označením A380.0 nebo také Al-Si₈Cu₃Fe, má velmi dobrou odlévatelnost, dobré mechanické vlastnosti a příznivý vliv na obsah nečistot. Slitina 380.0 a její další varianty se používají přibližně v 85 % produkce odlitků vyráběných technologií tlakového lití. Odolnost proti korozi je omezená. Mezi základní aplikace těchto odlitků patří pouzdra pro sekačky a rádiové vysílače, odlitky vzduchových brzd nebo skříně převodovky. Slitiny A380.0 má menší obsah železa a slitina B380.0 menší obsah zinku. Podrobné chemické složení lze nalézt v tabulce 3.1. [4]

3.1.1. Obecné vlastnosti

Tekutost, tlaková těsnost a odolnost proti praskání za tepla je velmi dobrá. Slitiny Al-Si-Cu jsou schopné odolat napětí vznikající při chladnutí odlitku. Teplota tání těchto slitin je 650 – 760 °C. Konvenční tlakové odlitky obvykle nejsou tepelně zpracovávány, nicméně je lze žíhat k odstranění pnutí (ohřev na 175 – 260 °C, výdrž 4 – 6 h a poté chladnutí při pokojové teplotě) nebo žíhat ke zvýšení tažnosti (ohřev na 260 – 370 °C, výdrž 4 – 6 h a poté chladnutí při pokojové teplotě). Obecné mechanické vlastnosti jsou popsány v tabulce 3.2 a 3.3. [4]

Tabulka 3.1 Chemické složení slitin Al-Si-Cu [4]

	Slitiny		
	380.0	A380.0	B380.0
Si	7,5 – 9,5	7,5 – 9,5	7,5 – 9,5
Fe	2,0 max	1,3 max	2,0 max
Cu	3,0 – 4,0	3,0 – 4,0	3,0 – 4,0
Mn	0,50 max	0,50 max	0,50 max
Mg	0,10 max	0,10 max	0,10 max
Ni	0,50 max	0,50 max	0,50 max
Sn	0,35 max	0,35 max	0,35 max
Zn	3,0 max	3,0 max	1,0 max
Další	0,50 max	0,50 max	0,50 max

Tabulka 3.2 Obecné mechanické vlastnosti slitin 380.0 a A380.0 u zkušební tyče o průměru 6,5 mm odlévané ve studené komoře [4]

	380.0	A380.0
Pevnost v tahu R_m [MPa]	295	290
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	180	145
Tažnost A_{50mm} [%]	2,0	3,0
Pevnost ve smyku τ_{pS} [MPa]	195	185

Tabulka 3.3 Obecné mechanické vlastnosti slitiny B380.0 u zkušební tyče o průměru 6,5 mm při pokojové teplotě [4]

	B380.0
Pevnost v tahu R_m [MPa]	324
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	165
Tažnost A_{50mm} [%]	3,5
Pevnost ve smyku τ_{pS} [MPa]	200

3.1.2. Výrobní vlastnosti

Obrobitelnost slitin Al-Si-Cu je považována za dobrou. Doporučuje se však použití nástroje s ostrým karbidovým břitem s velkým úhlem čela a hřbetu, vzhledem k abrazivním vlastnostem slitiny. Použití těchto nástrojů se doporučuje při středních až vysokých rezných

rychlostech s vysokou rychlostí posuvu. Vzhledem k obsahu mědi a křemíku je obrobiteľnosť těchto slitin lepší než obrobiteľnosť slitin Al-Si.

Svařitelnost těchto slitin je možná pro všechny běžné typy svařovacích procesů. Je však částečně omezená z důvodu odplyňování z porozity. Pájení těchto slitin nebývá využíváno.

Jako povrchová úprava slitin Al-Si-Cu lze využít galvanické pokovování, které poskytuje dobrou povrchovou ochranu odlitku. Dále lze slitiny eloxovat v elektrolytu s kyselinou sírovou. Eloxovaný povlak má poměrně dobré mechanické vlastnosti. [4]

3.2. Slitiny Al-Si-Mg

Slitiny Al-Si-Mg, zastoupené slitinou s označením 360.0, nebo také AlSi10Mg, jsou stejně jako slitiny Al-Si-Cu hojně využívány. Mají velmi dobré slévárenské vlastnosti, dobrou korozivzdornost a odolnost proti praskání za tepla. Oproti slitinám Al-Si-Cu mají mírně menší pevnost v tahu, prodloužení a menší toleranci obsahu nečistot. Slitina 360.0 je oproti slitině 380.0 čistší s předepsaným spodním limitem obsahu železa. Obsah železa ve slitinách zabraňuje lepení slitiny k formě, ale zhoršuje tažnost. Podrobnější chemické složení slitin Al-Si-Mg lze nalézt v tabulce 3.4. [4]

Tabulka 3.4 Chemické složení slitin Al-Si-Mg [4]

	Slitiny	
	360.0	A360.0
Si	9,0 – 10,0	9,0 – 10,0
Fe	2,0 max	1,3 max
Cu	0,6 max	0,6 max
Mn	0,35 max	0,35 max
Mg	0,40 – 0,60	0,40 – 0,60
Ni	0,50 max	0,50 max
Sn	0,15 max	0,15 max
Zn	0,50 max	0,50 max
Další	0,25 max	0,25 max

3.2.1. Obecné vlastnosti

Slitiny 360.0 a A360.0 mají vynikající odlévatelnost a používají se pro vysoce pevné tenkostěnné odlitky. Mají velmi dobrou tekutost, tlakovou těsnost a odolnost proti praskání za

tepla. Tyto slitiny však mají tendenci se lepit k matrici. Teplota tání těchto slitin je 650 – 750 °C. Odlitky lze žíhat pro odstranění vnitřního pnutí (177 – 260 °C, výdrž 4 – 6 h a poté chladnutí na pokojovou teplotu) nebo je lze žíhat pro zvýšení tažnosti (260 – 371 °C, výdrž 4 – 6 h a poté chladnutí na pokojovou teplotu). Obecné mechanické vlastnosti jsou popsány v tabulce 3.5. [4]

Tabulka 3.5 Obecné mechanické vlastnosti slitiny 360.0 a A360.0 [4]

	360.0	A360.0
Pevnost v tahu R_m [MPa]	305	320
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	170	165
Tažnost A_{50mm} [%]	2,5	3,5
Pevnost ve smyku τ_{PS} [MPa]	195	180

3.2.2. Výrobní vlastnosti

Obrobitelnost je dobrá, nicméně se doporučují nástroje třídy N s velkým úhlem čela a hřbetu. Použití těchto nástrojů se doporučuje při středních až vysokých řezných rychlostech s vysokou rychlostí posuvu za použití velkého množství chladicí kapaliny.

Svařitelnost je stejně jako u jiných slitin určených pro tlakové lití omezena odplyňováním z porozity.

Odlitky ze slitiny Al-Si-Mg jsou velmi vhodné pro galvanické úpravy a tyto povlaky vykazují velmi dobrou ochranu a vzhled. [4]

3.3. Slitiny Al-Si-Mg-Cu

Slitiny Al-Si-Mg-Cu, zastoupené slitinou s označením 390.0 nebo také Al-Si17Cu4Mg, jsou nadeutektické slitiny hliníku a křemíku. Mají vynikající odolnost proti opotřebení společně s dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou tvrdostí, dobrou teplotní odolností a velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi. Využívají se zejména jako náhrada šedé litiny pro části motoru a dílů vyžadujících odolnost proti opotřebení. Obsah křemíku ve slitině, který se pohybuje okolo 17 %, zajišťuje dostatečné množství vazeb primární křemíkové fáze, která způsobuje vysokou odolnost proti opotřebení. Z hlediska obrobitelnosti a optimální pevnosti by tavenina slitiny Al-Si-Mg-Cu měla být očkovaná příměsí fosforu k rafinaci primární křemíkové fáze. Tato příměs bývá ve formě fosfor-měď, nikl-fosfor nebo jinými solemi obsahující fosfor. Podrobné chemické složení slitin Al-Si-Mg-Cu lze nalézt v tabulce 3.6. [4]

Tabulka 3.6 Chemické složení slitin Al-Si-Mg-Cu [4]

	Slitiny		
	390.0	A390.0	B390.0
Si	16 - 18	16 - 18	16 - 18
Fe	1,3 max	0,5 max	1,3 max
Cu	4,0 – 5,0	4,0 – 5,0	4,0 – 5,0
Mn	0,10	0,10 max	0,50 max
Mg	0,45 – 0,65	0,45 – 0,65	0,45 – 0,65
Ni	-	-	0,10 max
Ti	0,20 max	0,20 max	0,20 max
Zn	0,10 max	0,10 max	1,5 max
Další	0,20 max	0,20 max	0,20 max

3.3.1. Obecné vlastnosti

Slitiny typu 390 jsou snadno odlévatelné a nevykazují žádnou tendenci k praskání za tepla. Slitiny 390.0 a B390.0 jsou využívány k tlakovému lití, zatímco slitina A390.0 je určena pro lití do formy. Maximální tekutosti dosahuje při obsahu křemíku 17 %, což je střední hodnota předepsaného rozmezí. Tlakové lití slitin 390.0 a B390.0 je velmi dobré s dobrým odporem proti pájení. Aplikace rychlého vstříku taveniny do formy a vytlačení vzduchu ve formě je velice důležitá pro omezení porozity v odlitku. Obecné mechanické vlastnosti slitiny 390.0 jsou uvedeny v tabulce 3.7. [4]

Tabulka 3.7 Mechanické vlastnosti slitiny 390.0 [4]

	390.0
Pevnost v tahu R_m [MPa]	280
Mez kluzu R_e [MPa]	240
Tvrdość dle Brinella HBW 10/500	150

3.3.2. Výrobní vlastnosti

K obrábění slitin hliníku s vysokým obsahem křemíku, stejně jako u skupiny slitin Al-Si-Mg-Cu, dosahují nejlepších výsledků nástroje z polykrystalického diamantu při rychlostech do $900 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Obrábění nástrojem ze slinutého karbidu je uspokojivé při rychlostech do $150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Předpokladem pro dosažení lepší životnosti je použití chladící

kapaliny. Nástroje z rychlořezné oceli se nedoporučují z hlediska trvale špatných výsledků. Opotřebením nástroje je rychlé a hromadění třísek na nástroji způsobuje špatnou kvalitu obrobeneho povrchu. Použití keramických nástrojů se také nedoporučuje z důvodu hromadění materiálu na břitech nástroje při vysokých rychlostech a následné ztrátě povrchové úpravy. Současně ji nelze kombinovat s pozitivní geometrií nástroje. Použití při nižších rychlostech přináší lepší výsledky, nicméně vzniklé nadměrné teplo způsobuje předčasnou destrukci břitové destičky.

3.4. Slitiny Al-Si

Slitiny Al-Si zastoupené slitinou s označením 413.0, nebo také AlSi12, jsou eutektické binární slitiny hliníku a křemíku, které mají vynikající odlévatelnost a velmi dobrou odolnost proti korozi. Slitina A413.0 je velmi podobná slitině 413.0, liší se pouze nižším obsahem železa. Podrobné chemické složení slitin skupiny Al-Si jsou uvedeny v tabulce 3.8. Slitina AlSi12 je využívána pro velké odlitky, tvarově složité odlitky a tenkostěnné odlitky. [4]

Dalším zástupcem skupiny slitin Al-Si je slitina s označením C443.0, nebo také AlSi5Fe, která má oproti slitině AlSi12 vysokou tažnost, velmi dobrou odolnost proti korozi a dobrou obrobiteľnosť. Na druhou stranu má omezenou odlévatelnost a malou pevnost. Tato slitina je určena pro odlitky, jejichž využití vyžaduje vysokou tažnost spojenou s vynikající odolností proti korozi. [4]

Tabulka 3.8 Chemické složení slitin Al-Si [4]

	Slitiny		
	413.0	A413.0	C443.0
Si	11,0 – 13,0	11,0 – 13,0	4,5 – 6,0
Fe	2,0 max	1,3 max	2,0 max
Cu	1,0 max	1,0 max	0,6 max
Mn	0,35 max	0,35 max	0,35 max
Mg	0,10 max	0,10 max	0,05 max
Ni	0,50 max	0,50 max	0,50 max
Ti	-	-	-
Zn	0,50 max	0,50 max	0,50 max
Další	0,25	0,25	0,25

3.4.1. Obecné vlastnosti

Slitiny 413.0 a A413.0 se obecně klasifikují jako slitiny pro tlakové litiny, lze je však využít i pro lití do písku nebo formy. Vysoký obsah křemíku ve slitinách zhoršuje obrobiteľnosť, snižuje teplotu tání a zvyšuje tekutost, která zlepšuje slévateľnosť. Slitina A413.0 má oproti slitině 413.0 větší tekutost, vynikající odolnost proti praskání za tepla a velmi dobrou tlakovou těsnost. Slitina 413.0 má vynikající slévářenské vlastnosti. Rozsah tání je 575 – 580 °C a teplota lití pod tlakem je 635 – 705 °C. Stejně jako slitina 413.0, má i slitina A413.0 skvělé slévářenské vlastnosti. Rozsah teplot tání je 575 – 585 °C a má vysokou tekutost v roztaveném stavu. Odlitky lze žíhat ke snížení pnutí (177 – 260 °C, výdrž 4 – 6 h a následné chladnutí na vzduchu). Toto tepelné zpracování se používá pro odlitky, kde je při následném obrábění vyžadováno dodržení úzkých tolerancí. Dále lze odlitky žíhat pro zvýšení tažnosti (260 – 370 °C, výdrž 4 – 6 h a následné chladnutí v peci nebo na vzduchu). [4]

Slitina C443.0 má velmi vysokou tažnost, velmi dobrou odolnost proti korozi, dobrou obrobiteľnosť, ale omezenou slévateľnosť a nízkou pevnost. Díky nižšímu obsahu křemíku mají slitiny poměrně široký rozsah tuhnutí 630 – 750 °C a mají menší tekutost a zvýšenou tendenci k praskání na tepla. Teplota tavení slitiny C443.0 je v rozsahu 650 – 760 °C a lící teplota se pohybuje v rozmezí 635 – 705 °C. Stejně jako u slitin 413.0 a A413.0, lze odlitky ze slitiny C443.0 žíhat na snížení vnitřního pnutí (177 – 260 °C, výdrž 4 – 6 h a následné chladnutí na vzduchu) a žíhat pro zvýšení tažnosti (260 – 371 °C, výdrž 4 – 6 h a následné chladnutí v peci nebo na vzduchu). Další obecné vlastnosti slitin Al-Si jsou uvedeny v tabulce 3.9. [4]

Tabulka 3.9 Obecné vlastnosti slitin Al-Si [4]

	413.0	A413.0	C443.0
Pevnost v tahu R_m [MPa]	282 – 295	295	230
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	130 – 150	130	110
Tažnost A_{50mm} [%]	2,0 – 3,0	2,5	9,0
Pevnost ve smyku τ_{PS} [MPa]	170	170	-

3.4.2. Výrobní vlastnosti

Odlitky ze slitin 413.0 a A413.0 jsou obrobiteľné nástroji ze slinutého karbidu nebo z rezných materiálů odolných proti opotřebení. Slitina A413.0 je vhodná pro odporové svařování, ale slitina 413.0 má omezenou svařitelnost. [4]

Tlakové odlitky ze slitiny C443.0 mají omezenou svažitelnost. Mechanické povrchové úpravy jsou obtížné, zejména po leštění. Vhodnou povrchovou úpravou pro tuto slitinu je elektrolytické pokovování. Obrobitelnost slitiny C443.0 je poměrně dobrá. Doporučuje se však použití nástrojů ze slinutého karbidu nebo více odolných materiálů. Pro zlepšení obrobitelnosti se slitiny často upravují tak, aby se zmenšila velikost částic křemíku. [4]

3.5. Slitiny Al-Mg

Slitiny Al-Mg zastoupené slitinou s označením 518.0, jsou slitiny s vynikající kombinací vysoké pevnosti, odolnosti proti korozi a dobrými únavovými vlastnosti. Dále mají vysokou tažnost a jsou dobře obrobitelné. Slitiny Al-Mg jsou však hůře odlévatelné. Jsou vhodné pro jednoduché tvarové odlitky, u kterých je vyžadována vysoká odolnost proti korozi. [4]

3.5.1. Obecné vlastnosti

Slitinu s označením 518.0 lze odlévat technologií tlakového lití ve studené komoře. Slévárenské vlastnosti této slitiny jsou však horší než u slitin 413.0 (skupina Al-Si) nebo u slitin 380.0 (skupina Al-Si-Cu). Odlitky ze slitiny 518.0 se pro obrábění s malým tolerančním polem žíhají pro snížení vnitřního pnutí (175 – 260 °C, výdrž 4 – 6 h a poté chladnutí na vzduchu). Speciálními technologiemi lze odlitky ze slitiny 518.0 i povrchově upravovat, nicméně například u eloxování je těžké dosáhnout jednotného vzhledu. Další obecné vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.11. [4]

Tabulka 3.10 Chemické složení slitiny 518.0 [4]

	Slitina
	518.0
Si	0,35 max
Fe	1,8 max
Cu	0,25 max
Mn	0,35 max
Mg	7,5 – 8,5
Ni	0,15 max
Sn	0,15 max
Ti	-
Zn	0,15 max
Další	0,25 max

Tabulka 3.11 Obecné vlastnosti slitiny 518.0 [4]

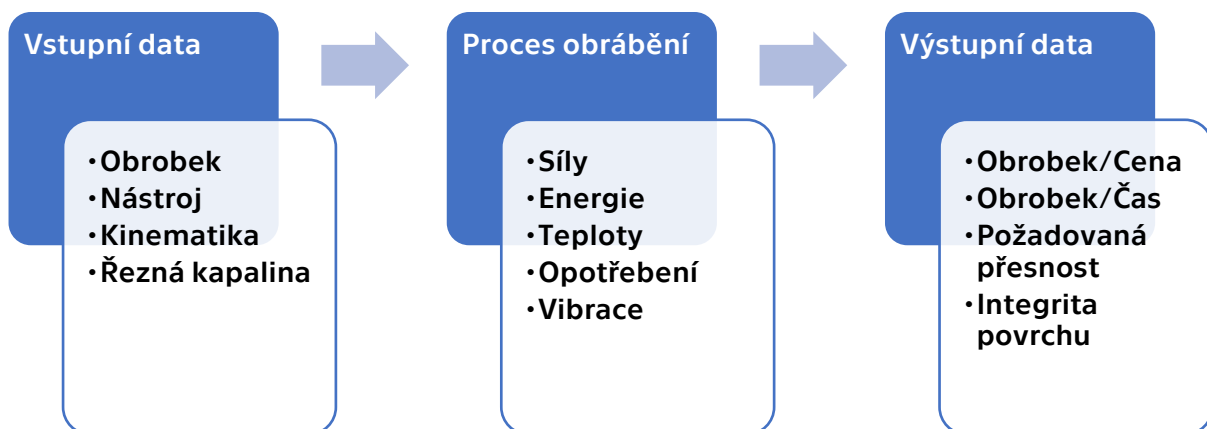
	518.0
Pevnost v tahu R_m [MPa]	310
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	190
Tažnost A_{50mm} [%]	5 – 8
Pevnost ve smyku τ_{pS} [MPa]	200

4. MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Při obrábění je třeba počítat s několika vstupními a výstupními daty a také s vlastnostmi samotného obráběcího procesu (schematicky znázorněno na obr. 4.1). Jedním z důležitých vstupních dat je materiál řezného nástroje. Materiál a geometrie nástroje musí být pečlivě zvolena ve vztahu k materiálu obrobku, stejně jako kinematika a stabilita obráběcího stroje, množství odřezávaného materiálu, požadovaná přesnost a povrchová úprava. Nejspokojivějším nástrojem bude obvykle nástroj odpovídající minimálním celkovým nákladům na provedení požadované operace se stanovenou přesností. Tato celková cena zahrnuje:

- Počáteční náklady na nástroj
- Náklady na broušení (renovaci) nástroje
- Životnost nástroje
- Mzdové náklady ovlivněné dobou cyklu, strojem, operátorem
- Podíl nákladů na výměnu nástroje přiřazenému k jedné součásti

Nejlépeším materiálem nástroje tedy nemusí být nutně ten, který poskytuje nejdelší životnost, ale při volbě materiálu nástroje je třeba dbát i na další vlivy, jako je brousitelnost (možnost renovace), náklady na materiál nástroje, řezná rychlost a posuv atp. [5]



Obrázek 4.1 Schematické znázornění vstupních a výstupních parametrů a vlastností obráběcího procesu [5]

4.1. Rychlořezná ocel (HSS)

Rychlořezné oceli jsou samo tuhnutí ocele legované wolframem, molybdenem, kobaltem, vanadem a chromem. Oproti ostatním nástrojovým materiálům se jedná o levnou variantu. Je snadno tvarovatelná, má vynikající únavové vlastnosti, lomovou houževnatost a odolnost proti nárazům. Tvrdost rychlořezné oceli však rychle klesá při teplotách nad

540 – 600 °C a mají nižší odolnost proti opotřebení, chemickou stabilitu a větší tendenci k hromadění materiálu. Jejich omezená odolnost proti opotřebení a chemická stabilita činí nástroje HSS vhodné pro použití při omezených řezných rychlostech ($< 35 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), i když speciální slitiny, jako je HSS-Co, lze použít pro rychlosti do $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (platí pro ocel 12 050). Rychlořezné oceli lze přesně brousit pomocí běžných brusných kotoučů. HSS se používá pro geometricky složité rotační nástroje jako jsou vrtáky, výstružníky, závitníky a stopkové frézy. Obyčejné rychlořezné oceli jsou obecně klasifikovány jako oceli typu T, které mají jako hlavní legující prvek wolfram a oceli typu M, které mají jako hlavní legující prvek molybden. Oceli typu T jsou méně houževnaté než oceli typu M, ale jsou snadněji tepelně zpracovávány. Ze standardních rychlořezných ocelí je nejčastěji používaný typ M2 (1.3344 nebo také 19 830) pro vrtáky a závitníky. Typ T42 (1.3207 nebo také 19 861) vykazuje nejlepší odolnost proti otěru a typ M42 (1.3247) má největší pevnost za tepla. Chemické složení těchto materiálů je uvedeno v tabulce 4.1. Pro některé aplikace je rychlořezná ocel legována kobaltem (HSS-Co) nebo vanadem za účelem zvýšení houževnatosti, tvrdosti za tepla a odolnosti proti opotřebení. Tyto materiály se používají pro vrtáky a závitníky a jsou vhodné pro použití při vyšších rychlostech, posuvu a hloubce řezu než u běžných rychlořezných ocelí. Oproti slinutému karbidu mají lepší lomovou houževnatost. [3]

Tabulka 4.1 Chemické složení rychlořezných ocelí typu M2, M42 a T42 [5]

	C	W	Cr	V	Mo	Co
M2	0,85 %	6,25 %	4,00 %	2,00 %	5,00 %	-
M42	1,08 %	1,60 %	3,75 %	1,15 %	9,60 %	8,25 %
T42	1,28 %	9,5 %	4,15 %	3,25 %	3,55 %	10 %

4.2. Slinuté karbidy (WC)

Tvrdozkovy na bázi slinutého karbidu jsou nejběžnější materiály pro soustružení, frézování, řezání závitů a vyvrtávání pomocí vyměnitelných břitových destiček. Slinuté karbidové břitové destičky se vyrábějí mícháním, lisováním a slinováním prášků z karbidu wolframu a kobaltu. Kobalt působí jako pojivo pro tvrdá zrna karbidu wolframu. Velikost zrna a obsah pojiva do značné míry určuje fyzikální vlastnosti. Slinuté karbidy poskytují vysokou pevnost v příčném lomu, únavové vlastnosti, pevnost v tlaku a dobrou tvrdost za tepla. Slinuté karbidy mají dvakrát větší modul pružnosti než rychlořezné oceli. Karbidy dobře odvádějí teplo a lze je přizpůsobit pro plnění specifických požadavků. Jejich hlavní nevýhodou je však, že při vysokých teplotách mají pouze průměrnou chemickou a tepelnou stabilitu, což je nevhodné pro

obrábění ocelí při vysoké řezné rychlosti. V porovnání s rychlořeznou ocelí mají slinuté karbidy při obrábění neželezných materiálů (hliník, měď, olovo atp.), mají slinuté karbidy 2krát – 3krát vyšší produktivitu a 10krát delší životnost. Při obrábění ocelí je produktivita 2krát vyšší a životnost 5krát delší [3]

Slinuté karbidy jsou rozděleny podle normy ISO 513 do šesti kategorií: *P* (silně legované multikarbidy), *M* (nizkolegované multikarbidy), *K*, *N*, *S* a *H*. Účel použití těchto kategorií je uveden v tabulce 4.2. [3]

Tabulka 4.2 Kategorie slinutých karbidů, jejich použití a označení [5]

Kategorie	Účel použití	Barevné označení	Označení
P	Oceli při vyšších řezných rychlostech s dlouhou plynulou třískou	Modrá	P01 – P50
M	Oceli při nižších řezných rychlostech se střední až dlouhou třískou	Žlutá	M10 – M50
K	Litiny a oceli při vyšší řezné rychlosti s krátkými třískami	Červená	K01 – K40
N	Neželezné kovy a jejich slitiny (hliník, měď) a nekovové materiály	Zelená	N01 – N30
S	Tepelně odolné slitiny na bázi železa, niklu, kobaltu, titanu a jeho slitin	Hnědá	S01 – S30
H	Kalené a vysoce tvrdé oceli, tvrzené a kalené litiny	Šedá	H01 – H30

Pro řezné nástroje se nejčastěji používají dvě základní třídy tvrdokovových materiálů: dvoufázový WC-Co (přímo slinutý karbid wolframu – třídy K01 až K40) a třídy WC-Co, ve kterých je část WC nahrazena pevným roztokem kubických karbidů, jako je karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC), karbid niobu (NbC) nebo kombinace těchto materiálů (třídy P01 – P50, M01 – M50). Ve srovnání s přímými karbidy mají karbidy s pevným roztokem kubických karbidů zvýšenou tepelnou odolnost, pevnost v tlaku a chemickou stabilitu. Karbidy obsahující TaC mají vyšší tvrdost za tepla a lepší odolnost proti tepelným rázům než karbidy

obsahující TiC. Tvrdost, lomová houževnatost a tepelná odolnost typů karbidů závisí na obsahu Co, TiC, TaC a velikosti zrna karbidu. Zvýšený obsah kobaltu snižuje tvrdost za tepla, odolnost proti tepelné deformaci a zvyšuje opotřebení nástroje. Naopak zvyšuje lomovou houževnatost. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení slinutých karbidů se zvyšuje s přibývajícím obsahem TiC a klesá s přibývajícím obsahem TaC. [3]

Dalším parametrem, který ovlivňuje vlastnosti slinutých karbidů, je velikost zrna WC. Ovlivňuje tvrdost, houževnatost a pevnost břitu nástroje. Jemná zrna karbidu wolframu vytváří tenké části kobaltového pojiva, což má za následek větší tvrdost na úkor nižší lomové pevnosti. Typické druhy WC mají zrnitost mezi 1,5 a 5 μm s tvrdostí v rozmezí 89 – 93 dle Rockwella. Jemnozrnné karbidy wolframu se používají pro plné vrtáky, výstružníky a další rotační nástroje. Hrubozrnné karbidy wolframu mají vyšší lomovou houževnatost, ale menší odolnost proti opotřebení a používají se zejména pro hrubovací operace. Vysoce jemný karbid wolframu se používá ve zvláštních případech, jako jsou rotační nástroje pro vysokou rychlost nebo vysokorychlostní průchozí obráběcí aplikace. Zlepšuje pevnost a stabilitu břitu a předchází předčasnému otěru nástroje a hromadění materiálu. [3]

4.3. Cermety

Cermety jsou tvrdé kovy na bázi TiC, TiN nebo TiCN, často popisované jako keramické nebo karbidové kompozity. Fyzikální vlastnosti a rozsah použití cermetů obecně spadá mezi slinuté karbidy a řeznou keramiku. Cermety jsou méně náchylné k difúznímu opotřebení než WC a jsou příznivější z hlediska třecích vlastností. Mají však nižší odolnost proti lomu (z důvodu nižší pevnost a houževnatosti) a vyšší koeficient tepelné roztažnosti. Cermety mají vyšší pevnost v ohybu, lomovou houževnatost a odolnost proti tepelným rázům než řezná keramika na bázi oxidů. Oproti řezné keramice mají však nižší tvrdost. Obecně cermety mají vynikající odolnost proti deformaci a vysokou chemickou stabilitu. Mohou být společně s ostrými břity použity pro dokončovací aplikace za účelem dosažení hladkých povrchů. Dříve se cermety skládaly z částic karbidu titanu v niklovém pojivu. Současné cermety se skládají z částic karbidu titanu (TiC) a nitridu titanu (TiN) slinutých pomocí žáruvzdorného kovového pojiva, obvykle složeného z niklu (Ni), kobaltu (Co), wolframu (W), tantalu (Ta) nebo molybdenu (Mo). Ni a Ni-Mo jsou nejčastěji používaná pojiva a jejich objem se pohybuje obvykle v rozmezí 5 – 15 %. TiC poskytuje tvrdost za tepla, odolnost proti opotřebení a oxidaci, chemickou stabilitu a snižuje tendenci hromadění materiálu. TiN poskytuje dobrou lomovou houževnatost a odolnost proti tepelným rázům. Cermety lze rozdělit do tří základních skupin: tvrdé, houževnaté a relativně houževnaté, ale především tvrdé. Tvrdé cermety se používají pro

aplikace vyžadující vysokou odolnost proti opotřebení a plastické deformaci, jako jsou polodokončovací a dokončovací operace obrábění ocelí, nerezových ocelí, volné obrábění hliníkových slitin a jiných neželezných slitin (mosaz, zinek a měď). Hlavní výhodou cermetů oproti slinitým karbidům je jejich schopnost pracovat při mnohem vyšších řezných rychlostech při současně delší životnosti nástroje. Cermety se obecně používají pro polodokončovací a dokončovací operace a zejména pro vysokorychlostní dokončovací operace. Přípustná řezná rychlost je obvykle nižší než pro řeznou keramiku. Použití základních druhů cermetů a doporučené řezné rychlosti jsou uvedeny v tabulce 4.3. Cermety mají tendenci být odolnější proti nárazům než řezná keramika a často se pro ně doporučuje použití chladicí kapaliny určené pro dokončovací soustružení, závitování a zapichování. Mikrozrnité cermety mají mnohem lepší odolnost proti tepelným šokům, což umožňuje použití chladicí kapaliny ve všech operacích. [3]

Tabulka 4.3 Doporučené použití základních druhů cermetů, doporučené řezné rychlosti a posuv [3]

Obráběný materiál	Typ cermetu	Doporučená řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Posuv [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]
Soustružení a vyvrtávání			
Ocel	Houževnatý	60 – 300	0,15 – 0,35
Ocel	Tvrký	60 – 340	0,10 – 0,35
Nerezová ocel	Houževnatý a tvrdý	45 – 270	0,10 – 0,30
Litina a tvárná litina	Houževnatý	60 – 250	0,15 – 0,45
Litina a tvárná litina	Tvrký	60 – 360	0,15 – 0,45
Nikl	Tvrký	60 – 200	0,10 – 0,25
Frézování			
Ocel	Houževnatý	60 – 250	0,05 – 0,15
Ocel	Tvrký	60 – 340	0,05 – 0,15
Nerezová ocel	Houževnatý a tvrdý	60 – 230	0,05 – 0,15
Litina	Tvrký	100 – 360	0,05 – 0,15
Tvárná litina	Tvrký	45 – 170	0,05 – 0,15

4.4. Řezná keramika

Nástroje z řezné keramiky jsou tvrdé a chemicky stabilní a nahradily nástroje ze slinitých karbidů v mnoha operacích vysokorychlostního obrábění. Řezná keramika je odolná

vůči vyšším teplotám než slinuté karbidy, což umožňuje trojnásobné až desetinásobné zvýšení řezné rychlosti. Mechanické vlastnosti řezné keramiky jsou lepší než u karbidů pouze při vyšších teplotách (např. nad 800 °C), karbidy totiž měknou při teplotách nad 850 °C. Nástroje z řezné keramiky si zachovávají vynikající tvrdost a tuhost při teplotách od 1 000 °C do 1 500 °C a s většinou obráběných materiálů při těchto teplotách chemicky nereagují. Řezná keramika má však několik nedostatků: relativně nízkou pevnost, špatnou odolnost vůči tepelným a mechanickým nárazům a tendenci k praskání nástroje. Nástroje z řezné keramiky nemají předvídatelnou dobu selhání a mohou v jakékoliv chvíli selhat a poškodit tím obrobky. K částečnému řešení této problematiky došlo vývojem keramických kompozitních materiálů. Řezná keramika se většinou používá bez chladicí kapaliny, aby nedocházelo k tepelným rázům. Mechanické rázy by měly být minimalizovány použitím tužšího obráběcího stroje a nízkofrekvenčních přerušovaných řezů. Keramické řezné nástroje, většinou vyrobené z materiálů na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) a nitridu křemičitého (Si_3N_4), lze rozdělit do čtyř základních kategorií: [3]

1. Oxid hlinitý (Al_2O_3), někdy smíchaný s oxidem zirkoničitým (ZrO_2). Tyto nástroje jsou žluté až šedo-bílé barvy. Nástroje vyrobené z Al_2O_3 nebo z tvrzeného $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ vykazují vysokou chemickou stabilitu a odolnost proti opotřebení a tepelné deformaci. Používají se pro plynulé mělké řezy (polodokončovací a dokončovací operace) při relativně nízkých rychlostech posuvu. Typickými aplikacemi je soustružení a tvrdé soustružení uhlíkových, legovaných a nástrojových ocelí a šedé a tvárné litiny při rychlostech do $1\,000\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. [3]
2. Kompozity z oxidu hlinitého a karbidu titanu $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$, obsahující 30 – 40 % TiC. Tento materiál černé barvy má vyšší pevnost v lomu, odolnost proti tepelným rázům a vyšší tvrdost než nástroje z klasického Al_2O_3 , ale stále má tendence k praskání. Nástroje z tohoto materiálu se používají pro kontinuální řezy legovaných ocelí, tvárné litiny a tvrzených železných materiálů. Nástroje povlakované $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ se používají pro soustružení na čisto kalených ocelí. Všechny materiály na bázi oxidu hlinitého mají tendenci praskat a nejsou vhodné pro obrábění hliníkových slitin a slitin titanu kvůli jejich pevnosti a chemické afinitě k těmto materiálům. Tyto materiály nahrazují nástroje ze slinutých karbidů z kategorie P01 – P05. [3]

3. Materiály na bázi nitridu křemíku, jako je reakčně vázaný nitrid křemičitý (Si_3N_4 , RB), nitrid křemičitý lisovaný za vysokých teplot (Si_3N_4 , HIP), slinutý reakčně vázaný nitrid křemičitý a slinutý nitrid křemičitý a sialon ($\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$). Všechny tyto materiály jsou šedé barvy. Oproti předchozím dvěma kategoriím je tento typ řezné keramiky houževnatý, má vynikající odolnost proti opotřebení a tepelným rázům. Materiály na bázi nitridu křemíku se běžně používají pro obrábění litiny s řeznou rychlostí až $1\,200\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Pro srovnání řezná rychlost obrábění litiny s běžným typem slinutého karbidu se pohybuje okolo $100\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Rovněž jsou chemicky stabilnější a zejména typy slinutých nitridů křemíku se používají k obrábění niklových slitin pro letecké součásti, stejně jako ocelí pro různé použití. Nahrazují tak nástroje ze slinutého karbidu z kategorie K01 až K05. Tento materiál se obvykle nepoužívá pro obrábění hliníkových slitin z důvodu vysoké rozpustnosti křemíku v hliníku. [3]
4. Karbid hliníku vyztužený oxidem hlinitým $\text{SiC}_w - \text{Al}_2\text{O}_3$. Tento materiál byl navržen tak, aby kombinoval spolehlivost a vynikající odolnost proti praskání, tepelným rázům a opotřebení. Životnost těchto nástrojů nemusí být nutně delší než u ostatních typů řezné keramiky. Nejúčinnější je při použití k obrábění vysokoteplotních slitin při vyšších řezných rychlostech, zejména slitin na bázi niklu. Na rozdíl od ostatních typů řezné keramiky, je možné tento typ použití společně s chladicí kapalinou. [3]

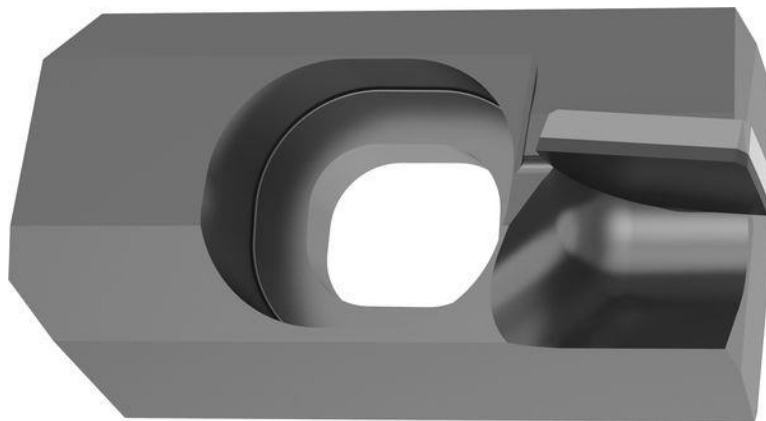
4.5. Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB)

Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) je jedním z neznámějších nejtvrdších řezných materiálů používaný při vyšších řezných rychlostech. Zachovává si vysokou tvrdost a lomovou houževnatost. I přesto spadá použitím mezi slinutý karbid a řeznou keramiku. PKNB má vysokou tepelnou vodivost a nízký koeficient teplotní roztažnosti, díky kterým je odolnější vůči tepelným rázům než keramika a je teplotně stabilní při teplotách do $1\,400\text{ }^\circ\text{C}$. Nástroje z PKNB se mohou při obrábění při vysokých rychlostech opotřebovávat difúzí, nicméně v tomto ohledu překonávají slinutý karbid. Lomová houževnatost a tepelná vodivost se zvyšuje s přibývajícím obsahem kubického nitridu bóru, ale zároveň klesá pevnost v tlaku. PKNB je materiál vhodný pro vysokorychlostní obrábění železných a jiných tvrdých materiálů s tvrdostí v rozmezí 45 až 65 podle Rockwella. Takovými materiály mohou být slinutý karbid kategorie P nebo M, měkké a tvrdé perlitické litiny, kalené oceli, rychlořezné oceli, nerezové oceli a slitiny na bázi niklu. Vysoká lomová houževnatost nástrojů z PKNB z nich dělá nástroje vhodné

pro přerušované obrábění (např. frézování), ve které řezná keramika selhává při středních až vysokých rychlostech. Rozsah řezných rychlostí pro obrábění šedé litiny je $600 - 1400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, pro tvrdou litinu $80 - 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, pro kalené oceli $70 - 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Materiály, které není vhodné obrábět pomocí nástrojů z PKNB jsou měkké oceli, feritické šedá litina a tvárná litina. V porovnání s polykrystalickým diamantem je jeho tvrdost srovnatelná. Zároveň nástroji z PKNB lze obrábět oceli, což PKD téměř neumožňuje z důvodu jeho vysoké afinitě k uhlíku. [3]

4.6. Polykrystalický diamant (PKD)

Polykrystalický diamant (PKD), nejtvrdší ze všech nástrojových materiálů, vykazuje vynikající odolnost proti opotřebení, zachovává si ostré ostří, vytváří malé tření v řezu, poskytuje vysokou lomovou pevnost a má dobrou tepelnou vodivost. Tyto vlastnosti přispívají k dlouhé životnosti nástrojů v konvenčních a vysokorychlostních aplikacích. Používají se zejména pro obrábění měkkých neželezných materiálů (slitiny hliníku, hořčíku, mědi a mosazi), pokročilých kompozitů, kompozitů s kovovou maticí, vysoce legovaných slitin a nekovových materiálů. PKD se nedoporučuje pro obrábění železných materiálů, kvůli vysoké rozpustnosti diamantu (uhlíku) v železe.



Obrázek 4.2 Vyměnitelná frézovací destička s diamantovým břitem od firmy Gühring [12]

Pro různé aplikace byly vyvinuty různé druhy polykrystalického diamantu. Hlavním rozdílem mezi třídami je velikost jednotlivých diamantových zrn, která se pohybuje mezi 1 až $100 \mu\text{m}$. PKD jsou rozděleny do tří základních skupin podle průměrné velikosti diamantových zrn a to: $1 - 4 \mu\text{m}$, $5 - 10 \mu\text{m}$ a $20 - 50 \mu\text{m}$. Se zvyšující se velikostí zrna roste odolnost proti abrazivnímu opotřebení, teplotní vodivost a odolnost vůči nárazu. Naopak jemnější diamantová zrna vytvářejí hladší povrch obrobku. Z důvodu odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jsou nástroje z PKD preferovány pro frézování a obrábění hliníkových slitin s vysokým obsahem křemíku a kompozitů s kovovou maticí. Břítové destičky

z polykrystalického diamantu jsou řezány do různých velikostí a tvarů drátovým elektroerozivním obráběním a pájeny do ocelových vložek. Pájení musí být provedeno při teplotách do 700 °C, aby nedošlo k poškození vrstvy diamantu. Břitová destička se skládá z vrstvy diamantu (tloušťka cca 0,5 mm) a karbidového substrátu (tloušťka cca 2,5 – 4,3 mm). Nástroje z polykrystalického diamantu je vhodné použít společně s chladicí kapalinou. [3], [4]

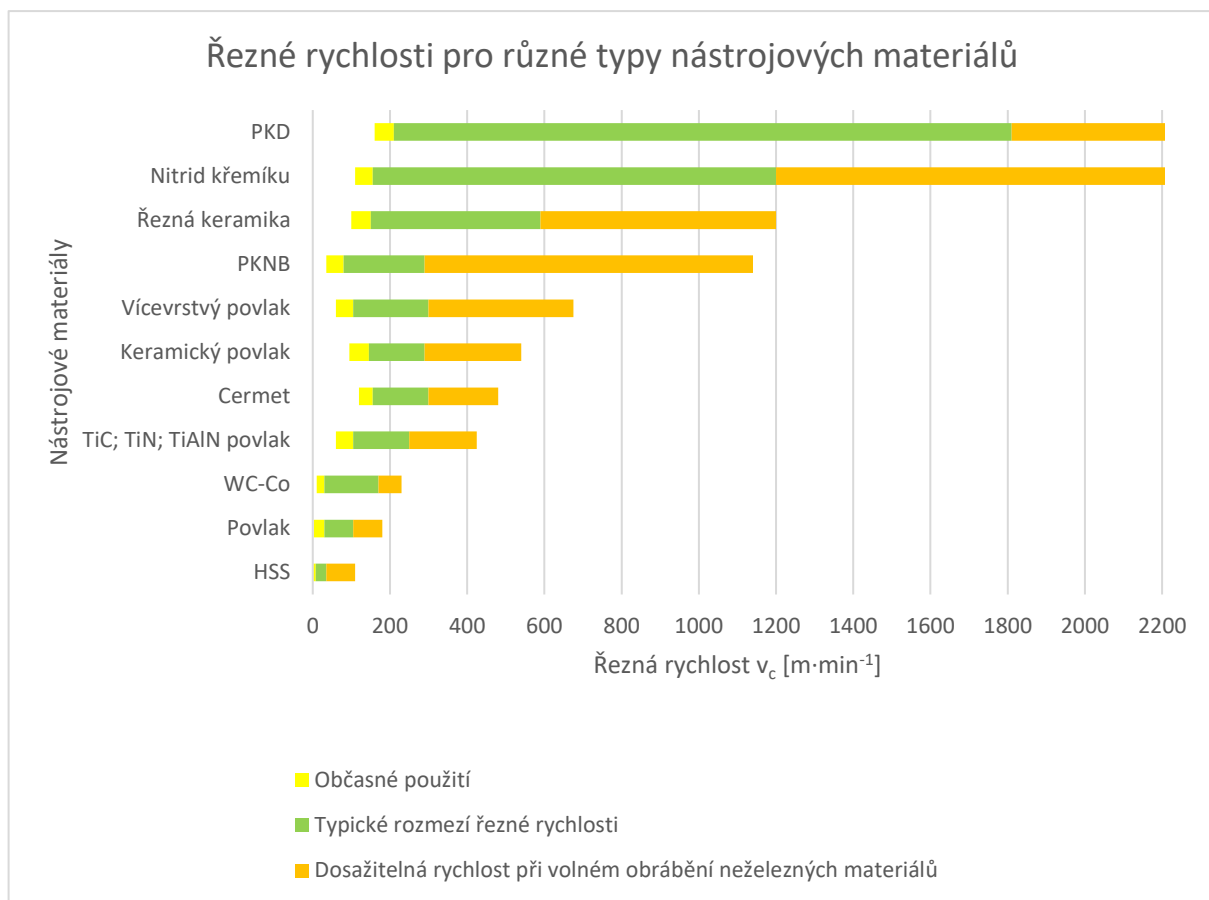
4.7. Shrnutí

Řezné nástroje musí být vyrobeny z materiálů, které jsou schopné odolat vysokým napětím a teplotám vytvářených při procesu obrábění. V ideálním případě by materiály řezných nástrojů měly splňovat následující vlastnosti:

1. Vysoká tvrdost při zvýšených teplotách odolávající abrazivnímu opotřebení
2. Vysoká odolnost proti deformaci zabraňující deformaci břitu z důvodu napětí vyvolaného tvorbou třísky
3. Vysoká lomová houževnatost, která zabraňuje deformaci břitu zejména při přerušení řezu
4. Nízká chemická afinita vůči obráběnému materiálu a chemická odolnost
5. Vysoká tepelná vodivost ke snížení teplot blízko hrany nástroje
6. Vysoká odolnost proti únavě
7. Vysoká odolnost proti teplotním rázům zabraňující poškození nástroje při přerušovaném řezu
8. Vysoká tuhost pro zachování přesnosti
9. Nízký koeficient tření vůči obráběnému materiálu zabraňující hromadění třísek na nástroji (zejména u měkkých tvárných materiálů)

Pro vysokorychlostní obrábění hliníkových slitin ve velkosériových podmínkách je nejvhodnějším řezným materiálem polykrystalický diamant, který vykazuje vynikající odolnost proti opotřebení, zachovává si ostré ostří, vytváří malé tření v řezu, poskytuje vysokou lomovou pevnost a má dobrou tepelnou vodivost. Rozmezí řezných rychlostí se pohybuje přibližně mezi 210 – 1 800 m·min⁻¹. Případnou alternativou pro vysokorychlostní obrábění hliníkových slitin je polykrystalický kubický nitrid bóru, jehož vlastnosti jsou srovnatelné s polykrystalickým diamantem. Ty se však využívají především pro obrábění železných a jiných tvrdých materiálů. Další alternativní použití jiného řezného materiálu, kde řezná rychlost přesahuje rychlost 300 m·min⁻¹ není možné. Dle grafu 4.1., kde jsou znázorněna přibližná rozmezí řezných rychlostí pro různé řezné materiály, kritériu řezné rychlosti převyšující rychlost 300 m·min⁻¹

splňují pouze další dva materiály. Jedním z nich je řezná keramika na bázi nitridu křemíku a druhým takovým je klasická řezná keramika na bázi oxidu hlinitého. Tyto materiály jsou však pro obrábění hliníkových slitin nevhodné vzhledem k jejich vysoké afinitě vůči obráběnému materiálu. Dalšími nevýhodami těchto řezných materiálů je relativně nízká pevnost, špatná odolnost vůči tepelným a mechanickým nárazům a tendence k praskání nástroje. Nástroje z řezné keramiky nemají předvídatelnou dobu selhání a mohou v jakékoliv chvíli selhat a poškodit tím obrobky. Dále na rozdíl od polykrystalického diamantu je není vhodné používat za působení chladicí kapaliny. [3]



Graf 4.1 Rozmezí řezných rychlostí pro různé druhy řezných materiálů [3]

5. DRUHY ŘEZNÝCH KAPALIN

Řezná kapalina je nedílnou součástí obráběcího procesu v mnoha aplikacích. Přispívají ke zlepšení životnosti nástroje, povrchové úpravě, rozměrové stabilitě a pomáhají odstraňovat třísky z řezné zóny. U některých obráběných materiálů je dokonce použití řezné kapaliny nezbytné pro dosažení požadovaných kvalitativních výsledků a k zachování přijatelných nákladů na nástroje. Dále zajišťují snížení třecích účinků mezi nástrojem a obrobkem (zejména při nižších řezných rychlostech), chlazení obrobku a nástroje (zejména při vyšších řezných rychlostech) a přispívají také k omezení hromadění materiálu na nástroji. Při správném použití umožňují použití vyšších řezných rychlostí a rychlostí posuvu a zlepšují tvorbu třísek. [3]

Obecně by řezné kapaliny neměly představovat žádné bezpečnostní riziko pro obsluhu stroje, měly by mít dlouhou dobu životnosti, být zpracovatelné na odpad a být chemicky inertní vůči obráběnému materiálu. Kromě těchto podmínek by řezná kapalina měla přispět ke zlepšení výkonnosti obrábění, aby se její použití vyplatilo i z finančního hlediska. [3]

Řezné kapaliny se obecně rozlišují na čisté nebo řezné oleje, kapaliny na vodní bázi, plynné kapaliny, aerosoly a kryogenní kapaliny. Mezi kapaliny na bázi vody patří emulgovatelné oleje, polysyntetické a syntetické kapaliny. [3]

5.1. Čisté oleje

Jako čisté oleje se považují minerální, živočišné, rostlinné nebo syntetické oleje neředěné vodou. Minerální oleje jsou oleje na bázi ropy, včetně lehkých rozpouštědel, neutrálních olejů a těžkých lesklých a rafinovaných olejů. Tyto oleje jsou nejběžnější, a to zejména z hlediska cenových nákladů. Živočišné oleje se používají především jako příměsi. Do rostlinných olejů lze zařadit palmový, řepkový a kokosový olej. Tyto oleje jsou dražší než minerální oleje, ale zejména pro aplikace citlivé na životní prostředí je nutné jejich využití. Jako náhražky čistých olejů se používají syntetické estery nebo mastné alkoholy vyrobené z obnovitelných zdrojů minerálních olejů. Tyto alkoholy se používají zejména v aplikacích s minimálním přísunem řezné kapaliny (MQL – Minimum Quantity Lubrication). [3]

Minerální oleje lze klasifikovat jako přímé a směsné, přičemž směsné oleje jsou více běžné a používané. Přímé oleje jsou základní oleje bez aktivních přísad. Směsné oleje se skládají ze základních olejů s polárními nebo chemicky aktivními přísadami. Mezi běžné polární přísady patří mastné živočišné oleje (sádlo nebo lůj) a rostlinné oleje (palmový olej nebo deriváty ricinového oleje). Koncentrace těchto přísad se pohybuje v rozmezí 10 – 40 % a zvyšují smáčivost řezného oleje a penetrační vlastnosti, a tím zlepšují i mazivost. Mezi běžné

aktivní přísady patří sloučeniny chloru, síry a fosforu. Tyto přísady reagují s povrchem a tvoří kovový film na povrchu nástroje, který působí jako tuhé mazivo. Aditiva musí být zvolena tak, aby chemicky nereagovala s materiálem obrobku. Nesprávně zvolená aditiva mohou způsobit znečištění nebo korozi. [3]

Čisté oleje jsou účinnější jako maziva než chladiva. Jsou používány především pro broušící a honovací operace, kde umožňují použití vyšší rychlosti úběru materiálu s lepší kvalitou obrobeného povrchu. Díky omezené schopnosti chlazení se čisté oleje téměř nepoužívají pro vysokorychlostní obrábění a omezují se na operace s relativně nízkou rychlostí, jako je například protahování, řezání závitů, odvalování ozubených kol a obrábění slitin niklu a jiných tvrdých kovů. Čisté oleje jsou stabilní a poskytují vynikající ochranu proti korozi, Jsou však relativně nákladné a mají omezenou použitelnost pro vysokorychlostní operace, kde hrozí riziko požáru. Dále představují také zdravotní rizika pro operátory stroje. Vzhledem k jejich vyšším nákladům a představujícím rizikům nejsou vhodné pro použití ve velkosériových systémech. [3]

5.2. Kapaliny na vodní bázi

Kapaliny na vodní bázi jsou zředěné emulze nebo roztoky olejů ve vodě, které oproti čistým olejům poskytují menší mazání, ale lepší chlazení a čištění třísek. V porovnání s minerálními oleji se voda ochladí dvakrát až třikrát rychleji a dokáže odolat více než dvojnásobné teplotě. Kapaliny na vodní bázi jsou používány pro operace s vyššími řeznými rychlostmi a také pro velké recirkulační systémy. Tyto kapaliny lze obecně rozdělit do tří skupin: rozpustné oleje, polosyntetické a syntetické oleje. [3]

Rozpustné oleje jsou speciální druhy minerálních nebo jiných základních olejů emulgovaných ve vodě v koncentraci mezi 5 – 20 %. Emulgátory se přidávají za vzniku stabilních disperzí oleje a vody. Částice emulgátoru jsou umístěny kolem kapiček oleje, aby jim poskytly negativní náboj, který je nadále spojí s molekulami vody. Jako emulgátory se používají aniontové emulgátory (karboxyláty, sulfonáty, fosfáty a fosfonáty) a kationtové emulgátory (aminové soli nebo fosfonium s kladným chemických nábojem) nebo neiontové emulgátory (polymerní ethery, estery a amidy). Dalšími přísadami jsou stabilizátory, které brání rozpadu emulze, ke které dochází při spojování kovových částic tekutiny s emulgátory. Zvýšený důraz se klade na vývoj a používání kapalin šetrných k životnímu prostředí, jako jsou chladicí kapaliny na bázi rostlinných olejů, které lze čerpat z obnovitelných zdrojů. Používá se také termín „zelené“ kapaliny pro rostlinné rozpustné oleje, ale také jiné kapaliny neobsahující

žádný chlor, síru nebo fosfor. Tyto látky mohou představovat problém při likvidaci. Nejzelenějšími reznými kapalinami jsou čisté rostlinné oleje používané v aplikacích MQL, protože po sobě zanechávají velmi malé zbytky a téměř suché třísky. Rozpustné oleje poskytují vynikající chlazení a přiměřené mazání při nízkých koncentracích, mají vlastní preventivní vlastnosti proti korozi a mohou obsahovat další výkonnostní přísady. Mezi jejich nevýhody patří citlivost na tvrdou vodu, náchylnost k mikrobiálnímu napadení, sklon k pění, potenciál způsobit kožní problémy a potíže s obtížnou likvidací. [3]

Polosyntetické rezné kapaliny jsou jemné emulze, ve kterých je základním koncentrátem směs minerálního oleje a dalších chemikálií, kterými mohou být emulgátory, spojovače, inhibitory koroze atd. Kombinují vlastnosti rozpustných a syntetických olejů. Základní koncentrát obsahuje mezi 5 – 30 % minerálního oleje a 30 – 50 % vody. Samotná kapalina pak obsahuje 50 – 70 % vody. Polosyntetika vyžaduje vyšší koncentraci emulgátorů než rozpustné oleje. Mezi výhody polosyntetických rezných kapalin patří rychlý odvod tepla, vynikající smáčivost, čistota a odolnost proti žluknutí a bakteriím. V porovnání se syntetickými reznými kapalinami poskytují lepší prevenci proti korozi, lepší flexibilitu při přidávání přísad a menší obtížnost s likvidací. Mezi nevýhody patří tvorba pěny a zbytků a náchylnost ke kontaminaci trampového oleje. [3]

Syntetické rezné kapaliny jsou kapaliny na vodní bázi, které se skládají z chemických lubrikantů a smáčedel a dezinfekčních prostředků. Syntetické rezné kapaliny neobsahují téměř žádný olej. Syntetické kapaliny obvykle obsahují inhibitory rzi, maziva a fungicidy. Inhibitory rzi jsou nezbytné z důvodu nepřítomnosti oleje. Mezi běžné inhibitory patří estery boritanu a karboxylátové deriváty. Fungicidy jsou nezbytné zejména z důvodu náchylnosti syntetických kapalin na růst plísní a kvasinek. Syntetické rezné kapaliny zajišťují vynikající chlazení a vytváří jemné povrchové úpravy. Ve srovnání s emulgovatelnými oleji poskytují lepší odolnost proti degradaci a větší stabilitu. Jejich nevýhodou je snížená schopnost mazání z důvodu nepřítomnosti ropných olejů, tendence zanechávání tvrdých krystalických zbytků, vysoká alkalita, sklon k tvorbě pěny a problémy s likvidací. [3]

5.3. Plynné kapaliny

V některých operacích se jako rezné kapaliny používají spíše plyny než kapaliny. To platí zejména v aplikacích, kde nelze tolerovat žádné zbytky kapalin na obrobku, jako tomu je v některých případech lékařských a leteckých aplikací. Používané plynné kapaliny zahrnují vzduch, helium, oxid uhličitý, argon a dusík, přičemž vzduch je nejběžnější, především kvůli

jeho nízké ceně. Vzduch může být stlačen nebo chlazen pro poskytnutí většího chladicího účinku. Významným problémem je generování hluku, a to zejména v případech vysokorychlostních operací při použití stlačeného vzduchu. [3]

5.4. Aerosoly

Aerosoly sestávající z malých kapiček oleje na bázi vody smíchaného se vzduchem byly úspěšně aplikovány jako řezné kapaliny v mnoha aplikacích. Historicky se používaly při aplikacích s vysokými rychlostmi a malými plochami řezu, například při čelním frézování. S vývojem průchozích vřetenových chladicích systému se stále více omezují na obrábění při nízkých otáčkách jako je vrtání, obrábění ozubených kol a řezání. Existují dvě metody výroby aerosolů: aspirační metoda a metoda přímého tlaku. V aspiračních systémech je proud vzduchu směřován kolem otevřené trubice obsahující olej, čímž se vytváří částečné vakuum, které vtáhne kapičky oleje do proudu vzduchu. V systémech s přímým tlakem je stlačený vzduch směřován přes olej, kde dojde k vytvoření mlhy. Olejové mlhy jsou nejvhodnější pro aplikace, ve kterých je zaplavování chladivem nepraktické, například v aplikacích, ve kterých je řezná zóna relativně nepřístupná a ve velkých strojích. Jejich hlavními nevýhodami jsou tendence k ucpávání trysek a nepříznivé zdravotní účinky. [3]

5.5. Kryogenní kapaliny

Kryogenní kapaliny se používají pro obrábění a broušení těžko obrobitelných materiálů. Nejběžnějším kryogenním materiálem je tekutý dusík. Dále lze použít kapalný argon nebo kapalný oxid uhličitý. Použití kryogenních kapalin je obzvláště efektivní při obrábění materiálů, u nichž je hlavním problémem teplota řezání (např.: slitiny titanu, zhutněné grafitové železo a tvrdé oceli). Používají se také pro obrábění pro nerezové oceli a slitiny niklu, ale v těchto aplikacích je nutné zajistit další potrubí pro přívod maziva. Při správném použití lze kryogenní kapaliny použít za účelem zvýšení životnosti nástroje i rychlosti úběru materiálu. Používají se pro obrábění nástroji z tvrdokovu a v závislosti na způsobu aplikace mohou být nástroje předchlazeny, aby se předešlo tepelnému šoku. Náklady na použití jsou vyšší než při použití aerosolů a může to vést k prodražení ceny obrobku. Během použití se odpařují a nezanechávají zbytky, které by mohly způsobit zdravotní potíže nebo důsledky pro životní prostředí. [3]

5.6. Řezné kapaliny pro slitiny hliníku

Řeznou kapalinou pro obrábění hliníkových slitin může být emulze rozpustného oleje, minerální olej nebo vodný chemický roztok. Řezné oleje, které obsahují sloučeniny síry, chloru nebo obě zmíněné se používají zřídka a nejsou obvykle vyžadovány pro obrábění slitin hliníku.

Nejčastější řeznou kapalinou pro obrábění hliníkových slitin je rozpustný olej smíchaný s vodou v poměru 1 díl oleje ku 20 – 30 dílům vody. Emulze rozpustného oleje jsou levné, vysoce účinné pro chlazení a odstraňování třísek a napomáhá k minimalizaci hromadění materiálu na hraně nástroje. Minerální olej může obsahovat mastné přísady živočišného původu (sádlo, kyselina olejová nebo butylstearát). Nejčastěji se však používají kapaliny na bázi minerálního oleje bez přísad s viskozitou 40 – 300 SUS (Saybolt Universal Seconds) při 40 °C. Se zvyšující řeznou rychlostí by se měla viskozita snižovat, aby byl zajištěn snadnější průtok a tím tedy větší chlazení. Chemické roztoky jsou účinné a jejich průhlednost je žádoucí v aplikacích, kdy je potřeba sledovat obrobek v průběhu obrábění. Tyto chemické roztoky se liší ve složení, ale většina z nich obsahuje aminy, nitridy, fosfáty atp. Kontinuální filtrace řezné kapaliny pro odstraňování třísek a jiných nečistot je obzvláště žádoucí, protože slitiny hliníku jsou relativně měkké a mohou se snadno poškodit znečištěnou řeznou kapalinou. Další možnou variantou je použití mlhových řezných kapalin, a to zejména u malých vertikálních frézek a vysokorychlostních frézek. Stlačený vzduch při tlacích v rozmezí od 70 do 550 kPa se používá pro rozprášení řezné kapaliny. Tuto metodu lze použít s přímými oleji s nižší viskozitou, emulzemi nebo chemickými roztoky bez pevných přísad. Někteří výrobci pro rozprašování mlhy však doporučují a upřednostňují kapaliny na vodní bázi před oleji, protože olej může mít tendence k ucpávání trysek. Ačkoliv použití stlačeného vzduchu zvyšuje náklady, tak objem použité kapaliny se zmenšuje, a tím se zmenšují i náklady. Chladicí účinek mlhy je menší než při zaplavování chladicí kapalinou, nicméně i přesto je tento účinek značný, protože rychlé odpařování jemně rozptýlených kapiček přidává latentní teplo přispívající k chladicí schopnosti kapaliny. [6]

6. MECHANICKÉ DOKONČOVACÍ METODY ROVINNÝCH PLOCH

Dokončovací metody po obrábění odstraňují nerovnosti povrchu a dávají povrchu obrobku finální podobu. Tyto metody lze obecně rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou abrazivní metody jako je broušení, leštění nebo tryskání. V těchto případech je materiál odstraňován z povrchu obrobku. Druhá skupina zahrnuje metody, které na povrch obrobku nanášejí texturu, jako je ražení, vyklepávání nebo kuličkování.

6.1. Broušení

Broušení zahrnuje řadu procesů, které lze obecně klasifikovat jako hrubé broušení, přesné broušení a vysoce přesné brusné dokončovací operace (např. leštění a honování). Přesné metody jsou určeny pro dosažení vysoké kvality povrchu spojené s úzkým tolerančním polem při malém úběru materiálu. Naopak hrubé broušení se vyznačuje vyšším úběrem materiálu s menším důrazem na tolerance a drsnost povrchu. Srovnání těchto 3 kategorií je uvedeno v tabulce 6.1. [6]

Tabulka 6.1 Porovnání brusných dokončovacích operací [6]

Proces	Velikost úběru [mm ³ ·s ⁻¹]	Tolerance	Drsnost [μm]
Hrubé broušení (brusný kotouč)	300 – 1 000	± 6 – 25 mm	2,5 – 25
Přesné broušení (brusný kotouč)	0,1 – 50	± 2,5 – 125 μm	0,75 – 1,25
Vysoce přesné brusné dokončovací operace (honování)	0,075	0,5 – 1,25 μm	0,25 – 0,5

Velikost zrna na brusivech se liší v závislosti na přesnosti procesu broušení. Existuje také mnoho různých druhů brusiv lišících se tvrdostí. Nejčastěji používaným brusivem pro hliníkové slitiny je keramika na bázi karbidu. [6]

6.2. Tryskání

Jedna z nejjednodušších a nejúčinnějších metod pro čištění hliníkových povrchů je tryskání suchými nekovovými nebo kovovými abrasivy. Ačkoliv je tato metoda spojena s čištěním hliníkových odlitků, lze ji použít i na přípravu povrchu pro povrchové úpravy.

Abrazivní tryskání je efektivní metoda pro odstranění nečistot, ostrých hran po procesu odlévání. Tryskání se obecně nedoporučuje pro úpravu tenkostěnných odlitků, jelikož tyto součásti mohou být vlivem tlaku deformovány. Nejčastějším abrasivem pro tryskání je křemičitý písek, oxid hlinitý a v některých případech také ocelová drť. Dalšími možnými materiály jsou plastové pelety, ořechové skořápky nebo ocelové broky. [6]

6.3. Lapování a honování

Technologie lapování a honování se používají v případech, kdy je potřeba dosáhnout vysoké kvality povrchu v úzkém tolerančním poli. Dosahované hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.2. Při lapování je povrch součásti otírán o lapovací kotouč, kdy mezi tyto dvě plochy je přivedeno brusivo s mazivem. Jako brusivo se používá oxid hlinitý, karbid křemíku nebo diamant s hrubostí 320 až 600 nebo vyšší. Honování je podobné lapování, ale místo lapovacího kotouče se používá honovací kámen. Pro drsné honování se používají kameny s hrubostí cca 150 a pro jemné finální honování kameny s hrubostí cca 500 nebo vyšší. Honování se používá zejména pro dokončení otvorů, např. pro válce v bloku motoru. [6]

Tabulka 6.2 Dosahované parametry při lapování a honování [6]

Proces	Tolerance [μm]	Drsnost [μm]
Lapování	< 0,5	0,025 – 0,1
Honování	0,5 – 1,25	0,25 – 0,5

6.4. Vysokorychlostní frézování

Vysokorychlostní frézování je definováno jako frézování při zvýšené řezné rychlosti. Oproti běžné řezné rychlosti, která se pohybuje od 120 do 185 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, se vysokorychlostní frézování pohybuje v řezných rychlostech až 200krát vyšších. Hlavní výhodou je zvýšení produktivity. S vyšší řeznou rychlostí míra zvýšení teploty klesá, což přispívá k zamezení hromadění zbytkového tepla po obrábění a tím i k omezení vnitřního pnutí v obrobeném materiálu. Na kvalitu obrobeného povrchu nemá vliv zvýšená řezná rychlost, posuv a hloubka řezu. Naopak je možné docílit hladších povrchů. Nicméně pro vysokorychlostní frézování je nutné použití stroje s adekvátním výkonem, vysokou rychlostí otáček včetně a posuvu. Další nutností je tuhé, pevné upnutí nástroje společně s pevným a stabilním upnutím obrobku. Použití technologie vysokorychlostního obrábění je stále častější. Přispěl k tomu především vývoj a použití tvrdších a odolnějších nástrojových materiálů. I přes vysokou řeznou rychlost, rychlost posuvu a hloubku řezu se vysokorychlostní frézování dokáže kvalitou povrchu vyrovnat

běžnému broušení. Například při řezné rychlosti od 500 do 600 m·min⁻¹ je možné dosáhnout při obrábění slitiny hliníku AlZn5,5MgCu drsnosti povrchu přibližně 0,75 μm. [7], [8]

7. VÝROBA SKŘÍŇÍ PŘEVODOVEK VE ŠKODA AUTO A.S.

Výroba skříní převodovek je nedílnou součástí při výrobě kompletu převodovky. Proces výroby začíná ve slévárně na hale H3, odkud dále putuje k procesu obrábění a její montáži do kompletu převodovky na hale M6.

7.1. Hutě H3

Slévárna hliníku na hale H3 ve Škoda Auto a.s. obsahuje 18 licích strojů. Odlévají se zde skříňové díly převodovky (skříň spojky a skříň převodovky) a bloky motoru (3válcové a 4válcové). Odlévání probíhá v několika cyklech. Nejprve je při teplotě 680 °C natavena slitina hliníku $AlSi9Cu3(Fe)$ v šachtových pecích Striko Westofen WHS-T 5000/2500 G-eg s tavicím výkonem $2\,500\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a udržovacím prostorem 5 000 kg. Vsázka se skládá ze 60 % z housek a ze 40 % vratného materiálu s výjimkou přetavování bloků, kdy vsázka je ze 100 % vratného materiálu. Jako rafinační sole jsou použity soli s označením Aarsal 2125 a Ecosal Al 113S. Udržovací teplota taveniny je 690 – 710 °C. Rozvazovací teplota kovu je pro skříňové díly převodovky a 3válcové bloky motoru 670 – 685 °C a pro 4válcové bloky motoru 680 – 695 °C. K licím strojům je tavenina dopravována pomocí vysokozdvizných vozíků v 400 l kádích. Jedná se o technologii tlakového lití do forem, které probíhá ve 3 fázích, při kterých se zvětšuje tlakové zatížení. Ve finální 3. fázi je vyvinut vysoký tlak pro vytlačení veškerého vzduchu z taveniny a tím se tak zabráňuje vzniku pórů v odlitku. Tlak pro lití skříňových dílů převodovky je přibližně 16 t a pro bloky motoru přibližně 20 t. U bloků motoru je přidáno ještě jedno tlakové zatížení na sedlo pro klikový hřídel pro zajištění větší pevnosti materiálu. Před každým litím jsou formy vymazávány pro zajištění oddělitelnosti odlitku od formy. Pro bloky motoru se k tomu využívá tzv. mikromazání, kdy je forma namazána „mlhovinou“. Forma pro bloky motoru váží přibližně 19 t a její životnost je přibližně 80 000 licích cyklů. Tato forma obsahuje odsávací kanály pro zajištění vakua při odlévání. Forma pro skříňové díly převodovky váží přibližně 13 t a její životnost je přibližně 60 000 licích cyklů. Tato forma obsahuje odfukovací ventily, které zajišťují odvod vzduchu při odlévání. Bloky motoru jsou po odlití zchlazeny ve vodě, přebytečné nálitky jsou olámany a odlitek projde základní vizuální kontrolou, odkud dále putuje do žíhací pece, která pracuje přibližně při 290 °C po dobu 2 – 3 h. Průběh po odlití u skříňových dílů převodovky je totožný, ale odlitek po zchlazení, olámaní a základní kontrole nejde do žíhací pece. Ze základní vizuální kontroly putuje odlitek k automatickému otryskání povrchu ocelovými broky, které zbaví povrch zbytkových nečistot a připraví povrch pro následné obrábění. Po otryskání skříňových dílů převodovky jsou díly založeny do přepravních palet, ve kterých dojde k převozu na halu M6 k následnému obrobení

a montáži sestavy převodovky. U bloků motoru dochází ještě k obrobení základních ploch. Kontrola porezity a vnitřních vad odlitku se provádí na RTG. Četnost kontroly vnitřních vad pro bloky motoru je každé 4 h a pro skříňové díly převodovky každé 2 h. Dále probíhá kontrola základních rozměrů na souřadnicovém měřícím stroji. Četnost kontroly pro skříňové díly převodovky je 3krát za den a pro bloky motoru každé 4 h. Denně se na hale H3 vyrobí 160 bloků motoru, resp. 180 skříňových dílů převodovky na jednom licím stroji.

Slitina hliníku $AlSi9Cu3(Fe)$ je jednou z nejpoužívanějších slitin hliníku, která se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, a především si uchovává pevnost i za zvýšené teploty (do 200 °C). Nejčastěji je využívána v automobilovém průmyslu. Chemické složení slitiny je uvedeno v tabulce 7.1 a její další mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 7.2. Je velmi dobře slévateľná a obzvláště vhodná pro technologii tlakového lití. Má malou tendenci k vytváření povrchových defektů a ke vzniku vnitřních staženin při tuhnutí. Obrobitelnost této slitiny je dobrá a pro vysokorychlostní obrábění se doporučuje použití nástrojů z polykrystalického diamantu. Svařitelnost, stejně jako odolnost proti korozi, je špatná. [9], [10]

Tabulka 7.1 Chemické složení slitiny $AlSi9Cu3(Fe)$ [10]

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Další
Obsah	8	0,6	2,0	max.	0,15	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
[%]	–	–	–	0,55	–	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,20	0,25
	11	1,1	4,0		0,55							

Tabulka 7.2 Mechanické vlastnosti slitiny $AlSi9Cu3(Fe)$ [10]

	$AlSi9Cu3(Fe)$
Pevnost v tahu R_m [MPa]	295
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	180
Tažnost A_{50mm} [%]	<1
Tvrdość dle Brinella HBW	80

7.2. Obrábění M6

Výroba skříně převodovky na hale M6 ve Škoda Auto a.s. sestává ze dvou obráběcích operací (5J, 10J), praní obrobku (20J), měření drsnosti (22J), tlakové zkoušky (30J), kontroly hutních vad (35J), impregnace (40J), tlakové zkoušky po impregnaci (45N), konečné kontroly

(50J) a kontroly na měrovém středisku (55J). Denně lze takto vyrobit až 2 650 ks skříní převodovek.

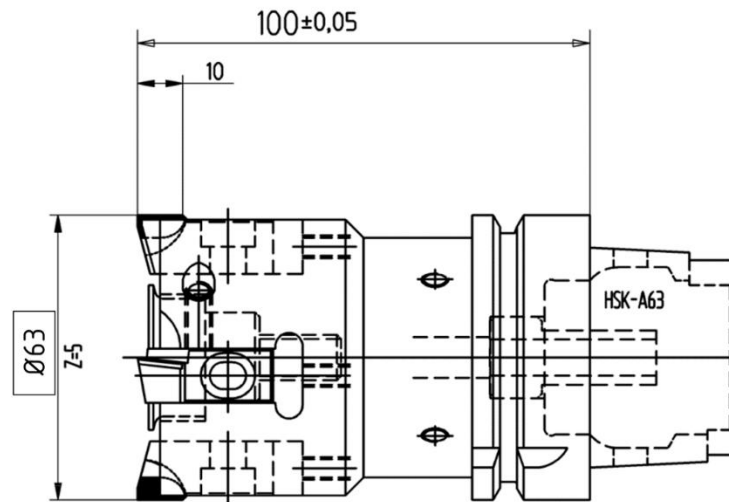
V operaci 5J dojde k tří bodovému středění v otvoru pro upevnění ložisek a k dvou bodovému středění v otvoru pro ložisko diferenciálu. Poté dojde k obrobení ploch a otvorů po obvodu skříně převodovky současně se třemi plochami používaných pro upnutí v následující operaci. Obrábění probíhá ve 4osém 2vřetenném vodorovném obráběcím centru Alfing.

V operaci 10J dojde k upnutí za tři plochy, které byly obrobeny v operaci 5J. Poté dojde k obrobení ploch a otvorů, které jsou vodorovné s přírubovými plochami skříně převodovky. Obrábění probíhá stejně jako v předchozí operaci ve 4osém 2vřetenném vodorovném obráběcím centru Alfing. Pro účely diplomové práce jsou zejména důležité plochy 2F a 2F05, což jsou plochy pro připevnění víka převodovky, plocha 3F, což je příruba pro připevnění skříně spojky a plocha 3F03, což je dosedající plocha pro diferenciál. Tyto plochy jsou znázorněny na obrázku 7.3. Řezným nástrojem pro tyto plochy je frézovací hlava osazená 5 vyměnitelnými frézovacími vložkami s břitovými destičkami z polykrystalického diamantu. Parametry obrábění jsou uvedeny v tabulce 7.3.

Tabulka 7.3 Parametry obrábění operace 10J

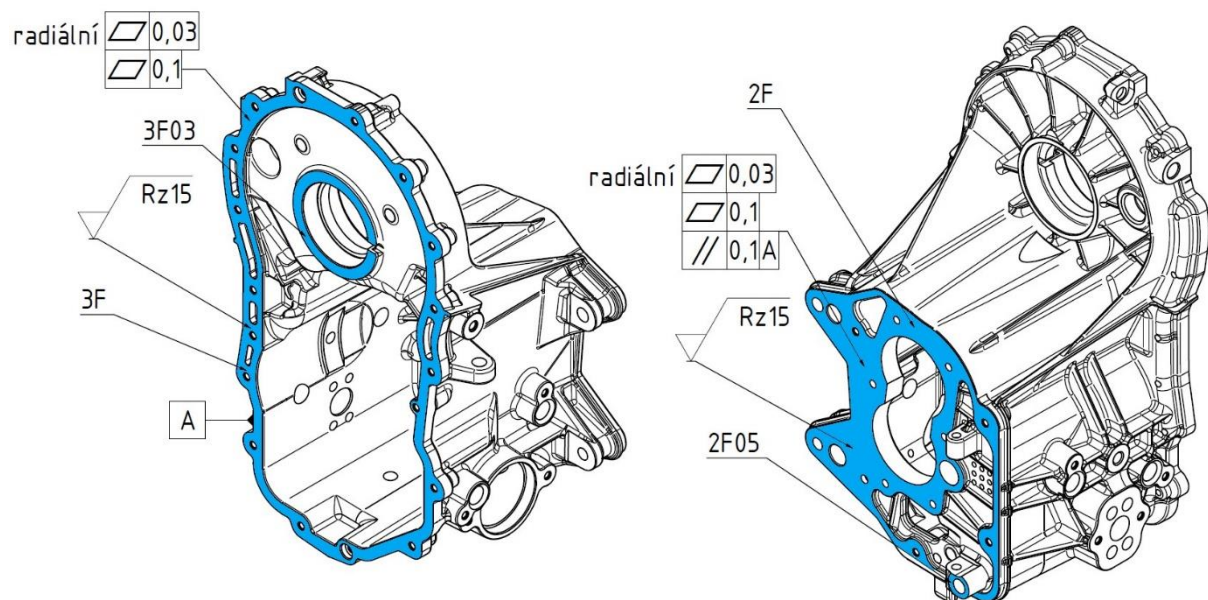
Plocha	2F05	2F	3F / 3F03
Průměr nástroje [mm]	63		
Počet otáček n [min^{-1}]	16 000		
Řezná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	3 167		
Posuv na otáčku f_n [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]	0,6		
Rychlost posuvu v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	9 600		
Strojní čas t_{As_i} [s]	0,2	5,6	7,2

V průběhu obrábění je nástroj a obrobek chlazen řeznou kapalinou Isocut VG 10-H/S, kdy je tato kapalina vedena tělem nástroje při tlaku 50 bar s průtokem $25 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato řezná kapalina se skládá ze směsi minerálních olejů (cca 98 %), polysulfidu (cca 1,5 %) a butyl-hydroxytoluenu (cca 0,5%). Hustota této kapaliny při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ je $0,85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a viskozita při teplotě $40 \text{ }^\circ\text{C}$ je 12,5.



Obrázek 7.2 Frézovací hlava na operaci 10J

Plochy 2F a 3F, což jsou plochy pro připevnění dalších dílů převodovky jsou geometricky tolerovány. Mají předepsanou obovovou rovinnost, radiální rovinnost a rovnoběžnost vůči sobě, přičemž základnou je plocha 3F. Obě plochy mají také předepsanou mezní hodnotu drsnosti. Číselné hodnoty těchto tolerancí jsou znázorněny na obrázku 7.2. Geometricky tolerované hodnoty jsou kontrolovány v operaci 55J. Měření drsnosti probíhá v operaci 22J. Dalším kontrolovaným parametrem je zanechávání otřepů na povrchu obrobku. Tato kontrola je pouze vizuální a provádí ji operátor stroje, případně seřizovač.



Obrázek 7.1 Tolerované hodnoty ploch 2F a 3F

V operaci 20J dojde v automatickém cyklu k očištění a osušení obrobku od řezné kapaliny, třísek a jiných nečistot. Automatický cyklus praní je rozdělen na 5 zón (1. Prací zóna, 2. Oplachovací zóna, 3. Ofukovací zóna, 4. Vakuové sušení a 5. Chladicí zóna).

Operace 22J je určena pro měření drsnosti ploch 2F a 3F. Měření drsnosti probíhá na drsnoměru Mahr Perthometer S2 a četnost tohoto měření je předepsána 1krát za týden ze všech výrobních strojů operace 10J.

V operaci 30J dojde v automatickém cyklu k tlakové zkoušce skříňe převodovky při zkušebním tlaku 0,5 bar. Pokud je únik tlaku menší než $20 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, díl je vyhodnocen jako dobrý a pokračuje na operaci 50J. Pokud je únik tlaku v rozmezí od $20 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ do $180 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, díl je vyhodnocen jako díl k impregnaci, která proběhne na operaci 40J. Po impregnaci je díl předán na operaci 45N, kde proběhne kontrolní tlaková zkouška stejná jako v operaci 30J. Pokud únik tlaku přesahuje hodnotu $180 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, je díl odeslán k analýze.

Operace 35J je určena pro kontrolu hutních vad. Vizuálně se zde zkontroluje stav obrobených ploch a jejich případná porezita, kdy obecně průměr póru menší než 0,5 mm není vyhodnocen jako vada. Důraz při kontrole hutních vad se klade zejména na otvory.

Operace 50J, neboli také konečná kontrola, je určena pro měření definovaných geometrií. Jedná se zejména o průměry otvorů, případně jejich hloubka. Tyto hodnoty jsou měřeny na stroji Zeiss CenterMax a četnost této kontroly je předepsána 1krát za 4 hodiny z každého výrobního stroje. Dále jsou zde ověřovány závitové otvory, které jsou kontrolovány vždy na začátku směny.

Operace 55J, což je kontrolní měření, se provádí na měrovém středisku, které je pod záštitou útvaru kvality domácích dílů. Kontrolovány jsou tolerované hodnoty předepsané výkresovou dokumentací. Kontroly probíhají na souřadnicových měřicích strojích Zeiss Prismo. Četnost této kontroly je 1krát za 12 hodin z každého výrobního stroje a upínače. Všechny tyto údaje jsou ukládány a statisticky vyhodnocovány v systému qs-STAT.

7.3. Montáž M6

Na dvou montážních linkách v Mladé Boleslavi se denně vyrobí až 2 200 ks kompletů převodovky. Především se jedná o převodovky s označením MQ 200. Pro účely diplomové práce jsou důležité zejména díly, které se montují k plochám 2F a 3F (viz obrázek 7.2). Na plochu 3F, což je příruba pro připevnění skříňe převodovky, se nanáší po celém obvodu těsnicí tmel s označením AMV 188200 v množství 3,12 g. Pro správnou funkci těsnicího tmelu

doporučuje výrobce drsnost plochy Rz_{max} 25 μm . Doporučení pro sériovou výrobu je však v rozmezí 5 – 12 μm . Dále také doporučuje hodnotu obvodové a radiální rovinnosti, která by se měla pohybovat v rozmezí 6 – 10 μm . Jedná se však pouze o doporučené hodnoty. Po založení skříňové spojky na skříň převodovky dojde k založení 18 ks šroubů, které jsou následně utaženy na utahovací moment 8 Nm + 180°. Časový interval od nanesení tmelu po utažení šroubů nesmí překročit 12 minut. V případě plochy 2F je nutné rozlišit, zda se jedná o 5stupňovou nebo 6stupňovou převodovku. V případě 5stupňové převodovky je na tuto plochu namontováno víko převodovky, ve kterém je obsaženo plechové těsnění. Toto víko převodovky je přimontováno 5 ks šroubů, které jsou utaženy na utahovací moment 5 Nm + 90°. V případě 6stupňové převodovky se na tuto plochu nanáší totožný tmel jako v případě plochy 3F v množství 2g. Následně dojde k založení víka převodovky, založení 6 ks šroubů a utažení na utahovací moment 5 Nm + 90°. Ověření těsnosti se provádí tlakovou zkouškou, kdy únik tlaku nesmí překročit hodnotu 4 $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

8. MATERIÁLOVÁ ANALÝZA

Chemické složení, případně mechanické vlastnosti obráběného materiálu ovlivňují jak trvanlivost nástroje, tak i kvalitu obráběného povrchu. Z tohoto důvodu je důležité průběžně sledovat tyto vlastnosti odlitku a zabránit tak následné výrobě nevyhovujících obrobků, případně zabránit rychlejšímu opotřebení nebo destrukci řezného nástroje.

8.1. Chemické složení

Analýza chemického složení probíhá v metalurgických laboratořích ve firmě Škoda Auto a.s. Při každé nové tavně ve slévárně je do malé kokily odlit vzorek, který je následně potrubní poštou poslán do metalurgické laboratoře. Tam dojde k úpravě povrchu na malé vertikální frézce HK 80F, případně dalším mechanickým úpravám povrchu, které jsou nutné pro následnou chemickou analýzu materiálu.



Obrázek 8.1 Příprava povrchu vzorku před analýzou chemického složení na vertikální frézce HK 80F

Po mechanické úpravě povrchu putuje vzorek do jiskrového optického emisního spektrometru Bruker-Quantron Q8 Magellan. Prvky obsažené ve vzorku pod vlivem budícího zdroje (jiskra) atomizují, případně zčásti ionizují, a atomy nebo ionty přecházejí do vyššího energetického stavu. Částice při návratu do nižšího energetického stavu emitují charakteristické

čárové spektrum. Intenzita spektrální čáry je úměrná obsahu prvku v materiálu. Z toho je pak možné určit přesné chemické složení materiálu. V tomto případě je optická emisní spektroskopie určena pro vstupní kontrolu před litím nebo k ověření chemického složení dodávaných polotovarů od externích dodavatelů. [11]



Obrázek 8.2 Jiskrový optický emisní spektrometr Bruker-Quantron Q8 Magellan ve Škoda Auto a.s.

Chemická analýza na spektrometru začíná analýzou vzorku s již známým chemickým složením. Výsledky jsou porovnány s již naměřenými hodnotami a v případě nesouladu jsou provedeny případné korekce. Následuje analýza chemického složení nového vzorku. Výsledky jsou uvedeny do protokolu a nahrány do systému MetLab. Rozmezí obsahu určitých prvků v odlitku je ve Škoda Auto a.s. oproti normovaným hodnotám omezen. Tyto hodnoty jsou společně s výsledky chemického složení uvedeny v tabulce 8.1.

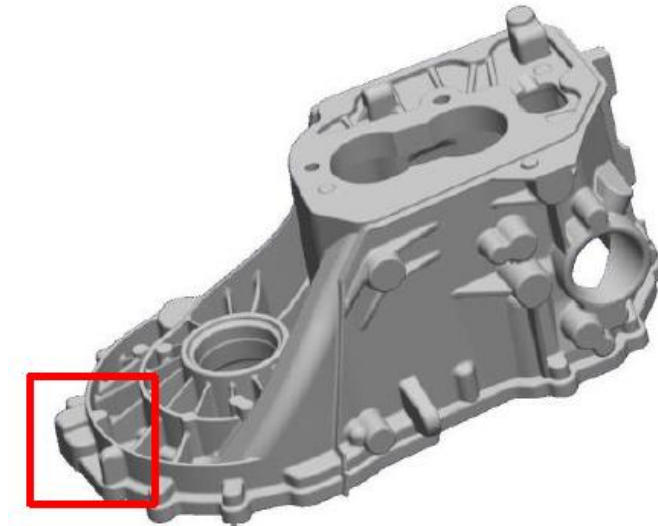
Tabulka 8.1 Výsledné hodnoty chemického složení odlitku v porovnání s hodnotami normy a interního předpisu

Prvek	Norma		Předpis		Výsledek 27.4.	Výsledek 24.5.	Výsledek 18.6.	Výsledek 12.7.
	Min.	Max.	Min.	Max.				
Si	8,00	11,00	8,30	10,00	8,97	8,88	9,17	8,92
Cu	2,00	4,00	2,00	3,50	2,31	2,12	2,28	2,31
Mg	0,050	0,550	0,100	0,500	0,180	0,201	0,305	0,207
Mn	0,000	0,550	0,100	0,400	0,280	0,298	0,260	0,238
Fe	0,00	1,30	0,00	1,00	0,65	0,77	0,72	0,84
Zn	0,00	1,20	0,00	1,20	0,81	0,88	0,79	0,83
Ni	0,000	0,550	0,000	0,300	0,029	0,047	0,042	0,052
Sn	0,000	0,150	0,000	0,100	0,026	0,015	0,015	0,027
Cr	0,000	0,150	0,000	0,070	0,034	0,033	0,030	0,032
Ti	0,000	0,250	0,000	0,150	0,043	0,056	0,047	0,047
Pb	0,000	0,290	0,000	0,200	0,048	0,051	0,047	0,054

Z výše uvedených výsledků je patrné stabilní chemické složení odlitků. Hodnota obsahu křemíku se pohybuje ve středu normovaného rozmezí, zatímco obsah mědi se pohybuje spíše u spodní tolerance, stejně jako obsah chromu a titanu. Interní předpis upravuje horní tolerance obsahu prvků, které by mohly způsobovat rychlejší opotřebení řezného nástroje, případně jeho destrukci (např.: křemík, nikl, chrom, titan), což je příznivé pro zajištění větší trvanlivosti řezného nástroje.

8.2. Mechanické vlastnosti

Hlavní analyzovanou mechanickou vlastností skříně převodovky v metalurgické laboratoři Škoda Auto a.s. je měření tvrdosti. Měření tvrdosti nejprve začíná mechanickou úpravou povrchu vyříznuté části skříně převodovky, která je definována interním předpisem (viz obrázek 8.3). Samotné měření tvrdosti probíhá na tvrdoměru DuraVision 30 G5. Vtisky jsou prováděny na přírubovou část, jejíž plocha se po obrobení montuje ke skříní spojky (neboli také plocha 3F). Stroj je schopný měřit různými indentory podle metody, která je dána interním předpisem.



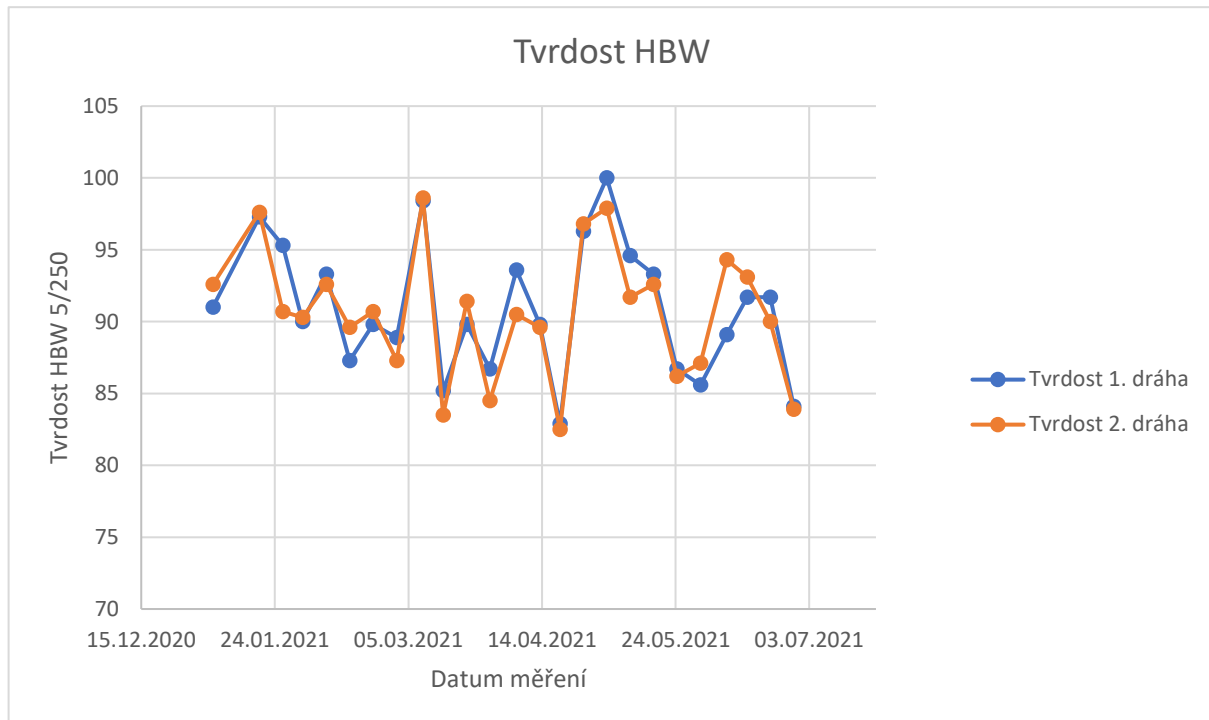
Obrázek 8.3 Definovaná část výřezu ze skříně převodovky dle interního předpisu

V tomto případě je předepsána zkouška tvrdosti podle Brinella tvrdokovovou kuličkou s průměrem 5 mm při zatížení 250 kgf (HBW 5/250) dle normy ČSN EN ISO 6506-1. Po provedení vtisků je stroj schopný v automatickém cyklu s případnými korekcemi určit průměr vtisku a vyhodnotit tvrdost. Měření tvrdosti probíhá na dvou na sobě nezávislých předem specifikovaných dráhách a výsledky jsou vyhodnocovány separátně, případně je jejich hodnota zprůměrována. Hodnota tvrdosti dle Brinella se v interním předpisu shoduje s normou ČSN EN 1706, která pro hliníkovou slitinu AlSi9Cu3(Fe) definuje minimální hodnotu tvrdosti 80 HBW.



Obrázek 8.4 Tvrdoměr DuraVision 30 G5 v metalurgické laboratoři Škoda Auto a.s.

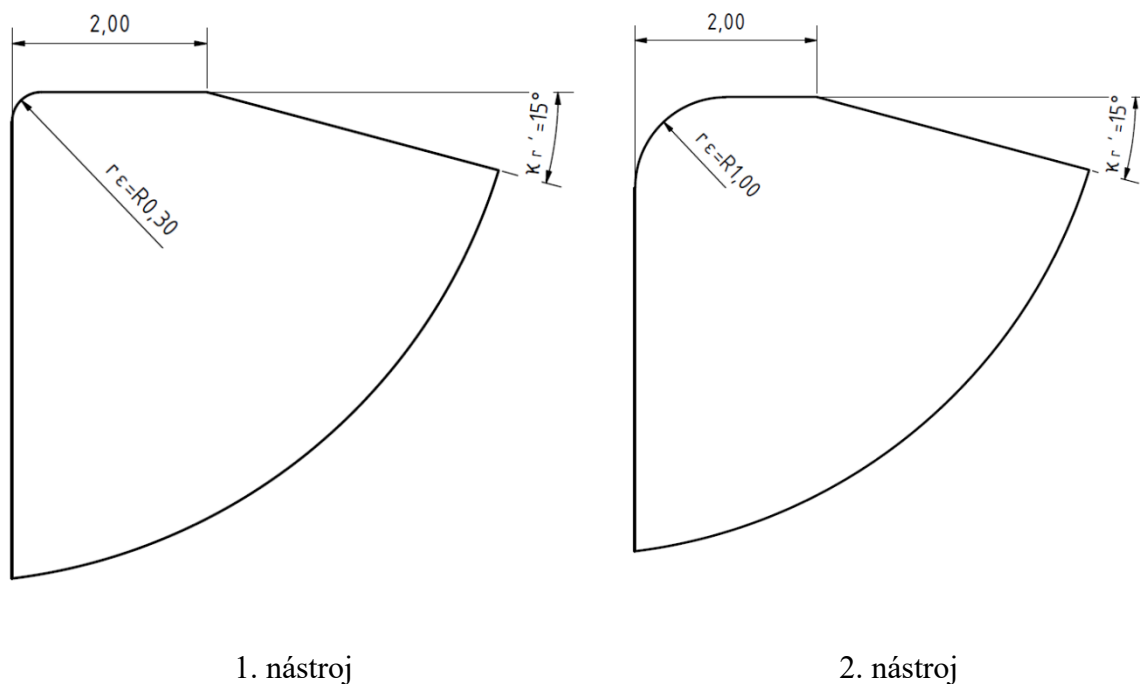
Na níže uvedeném grafu jsou uvedeny hodnoty tvrdostí měřených na skříních převodovky za období od 5.1.2021 do 28.6.2021. Z grafu je patrné, že výsledné hodnoty z různých drah se téměř neliší. Výsledné hodnoty za uvedené časové období se pohybují v rozmezí 83 HBW – 100 HBW a průměrná výsledná hodnota je 92 HBW, čímž splňují interní předpis i normu ČSN EN 1706.



Graf 8.1 Výsledné hodnoty tvrdostí HBW skříní převodovek za období od 5.1.2021 do 28.6.2021

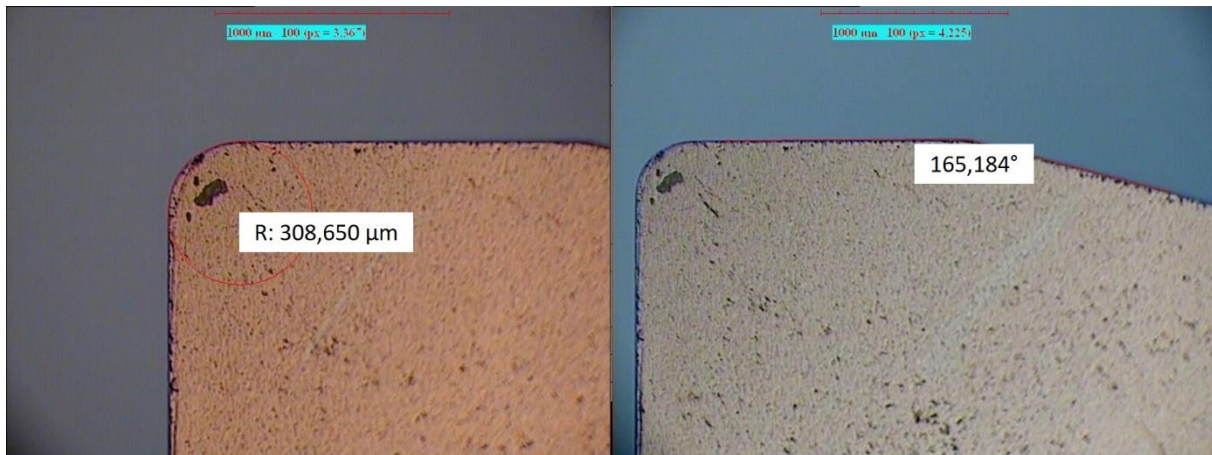
9. GEOMETRIE DIAMANTOVÝCH BŘITŮ

Pro studii byly použity dvě sady frézovacích vložek s rozdílnou geometrií břitových destiček. Největším rozdílem mezi geometriemi byl odlišný poloměr špičky, kde oproti původnímu poloměru špičky standardní břitové destičky 0,3 mm došlo ke zvýšení na 1 mm. Nástroje byly nasazeny na jeden stroj a dva různé upínače s označením Syncro H a Syncro J. Porovnání obou geometrií je znázorněno na obrázku 9.1. S nasazením většího poloměru špičky se předpokládalo zajištění větší pevnosti nástroje a zamezení tím předčasné destrukci nástroje vlivem vylamování břitu.



Obrázek 9.1 Použité geometrie břitových destiček v základní nástrojové rovině Pr

Geometrie diamantových břitů byla ověřena měřením na mikroskopu Messwelk s kamerou od firmy Hitachi. Příklad výsledků tohoto měření je uveden na obrázku 9.2. Výsledky z měření geometrie břitu nemusí být zcela přesné, jelikož body ze kterých byly parametry vyhodnocovány se do snímku zadávaly ručně. Avšak v rámci ověření správnosti geometrie je toto měření dostačující.



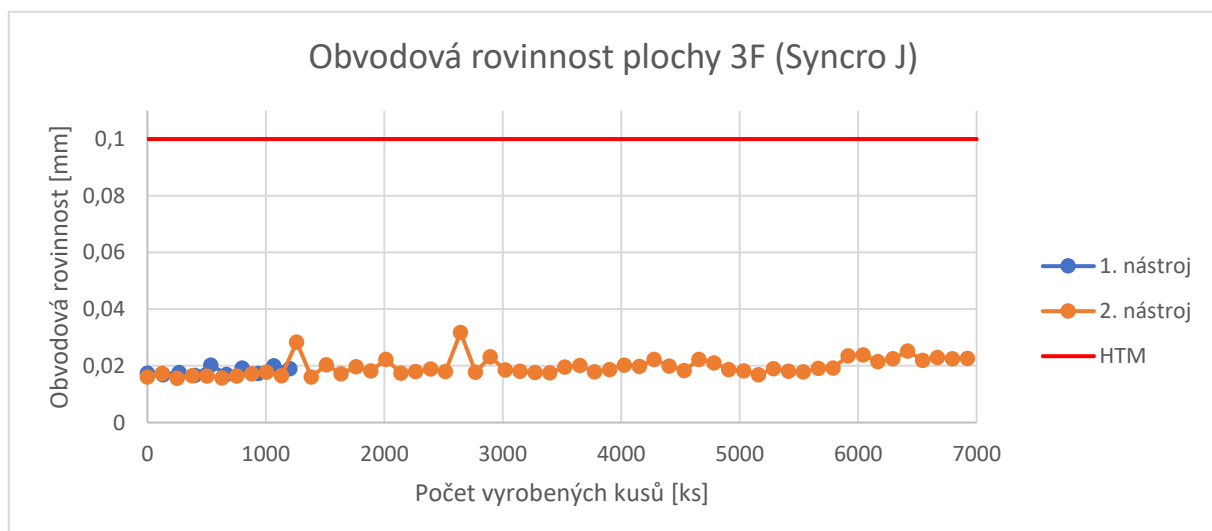
Obrázek 9.2 Kontrolní měření geometrie diamantového břítu na mikroskopu Messwelk

9.1. Dosažená kvalita povrchu

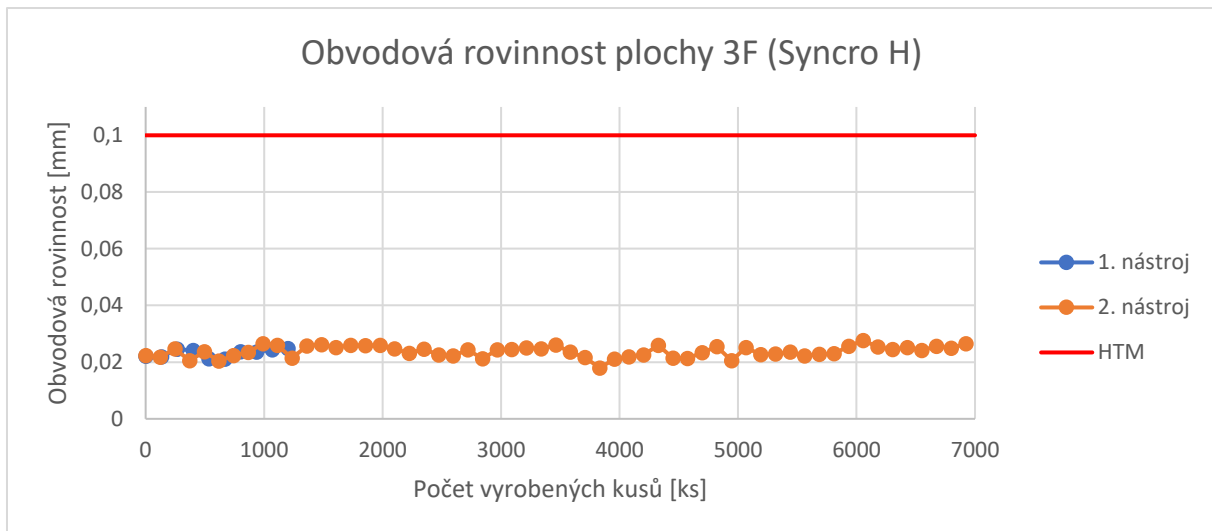
V průběhu obrábění zkušebními nástroji byla dle předepsaných četností prováděna kontrolní měření. Pro účely vyhodnocení kvality obrobených ploch zkušebními nástroji proběhlo zaměření na tolerované hodnoty ploch 2F a 3F, které jsou předepsány výkresovou dokumentací. Předepsané tolerované hodnoty, četnosti měření a měřidla jsou uvedeny v kapitole 7.2.

9.1.1. Obvodová rovinnost

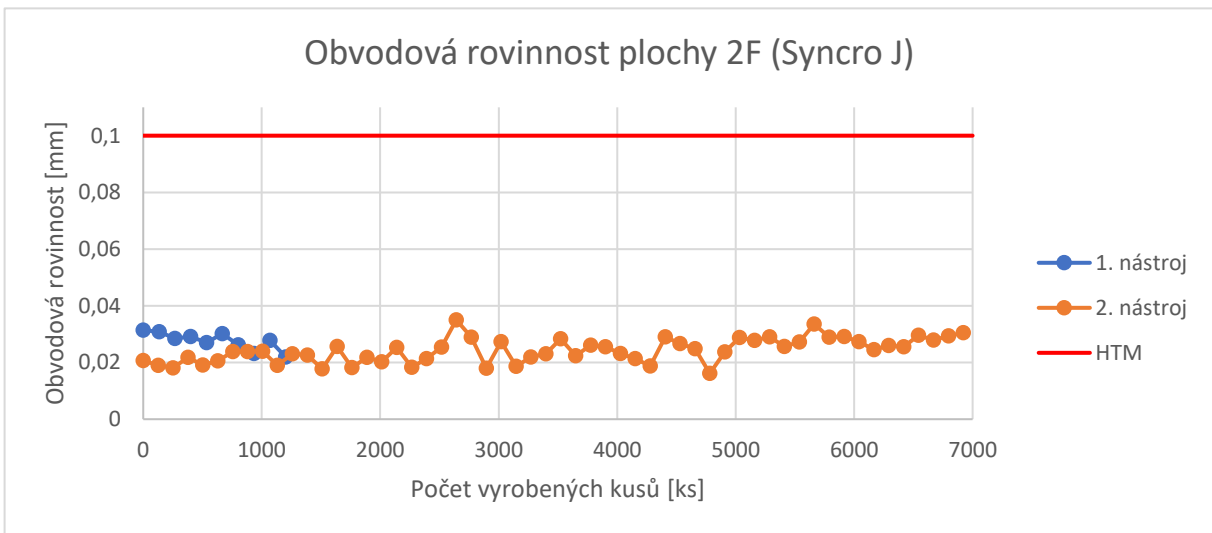
Měření obvodové rovinnosti probíhá na souřadnicových měřicích strojích Zeiss Prismo na měrovém středisku. Strategie měření je stanovena dotykem kuličky na měřenou plochu a následným skenováním povrchu po celém obvodu měřených ploch. Naměřené hodnoty jsou poté systémem Calypso vyhodnoceny a výsledkem je hodnota obvodové rovinnosti těchto ploch.



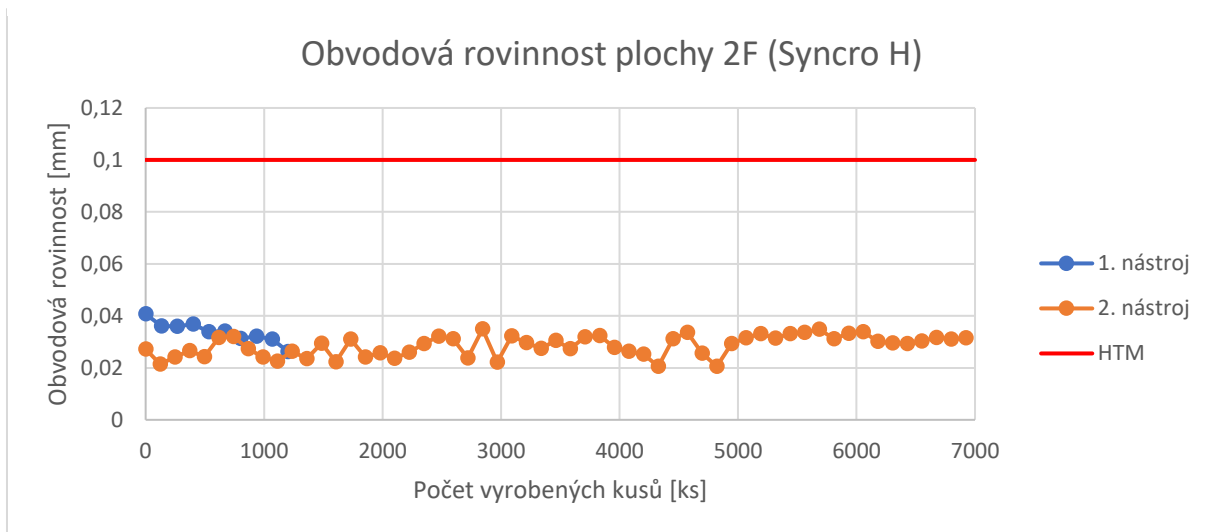
Graf 9.1 Obvodová rovinnost plochy 3F z upínače Syncro J



Graf 9.4 Obvodová rovinnost plochy 3F z upínače Syncro H



Graf 9.3 Obvodová rovinnost plochy 2F z upínače Syncro J



Graf 9.2 Obvodová rovinnost plochy 2F z upínače Syncro H

Z výše uvedených grafů jsou patrné hodnoty obvodových rovinností v závislosti na počtu vyrobených kusů. Z křivek obvodové rovinnosti v závislosti na počtu vyrobených kusů je zřejmé, že s přibývajícím počtem vyrobených kusů se hodnota obvodové rovinnosti téměř nemění. Dále je patrné, že hodnoty obvodové rovinnosti se nachází ve spodní části tolerančního pole, kde nepřesahují hodnotu 0,04 mm. Průměrné hodnoty obvodových rovinností v závislosti na nástroji, ploše a upínači jsou uvedeny v tabulce 9.1.

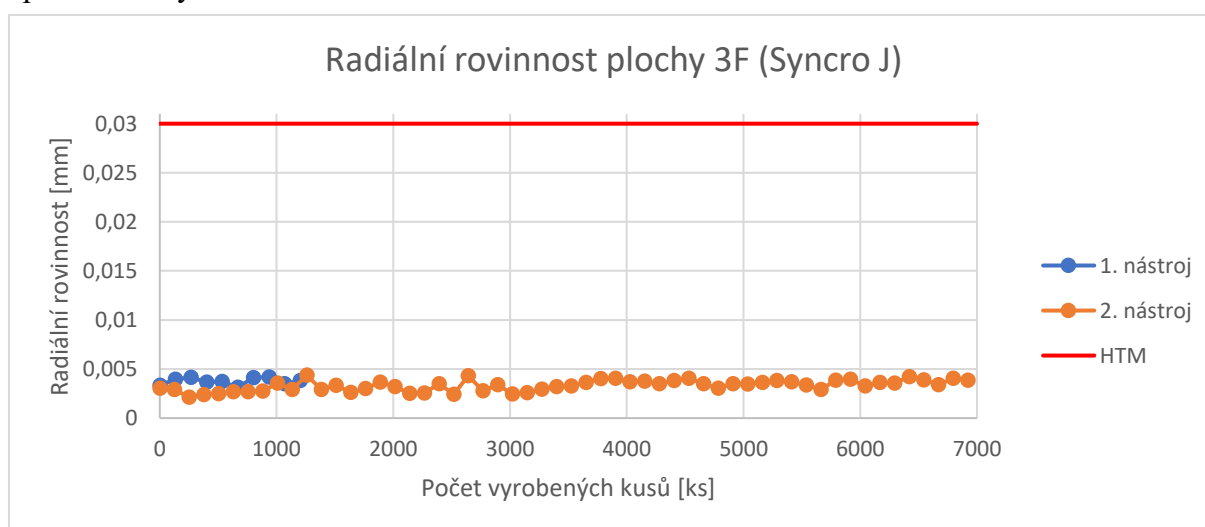
Tabulka 9.1 Průměrné hodnoty obvodové rovinnosti v závislosti na nástroji, ploše a upínači

	1. nástroj	2. nástroj
Plocha 3F (Syncro J)	0,0182 mm	0,0197 mm
Plocha 3F (Syncro H)	0,0231 mm	0,0237 mm
Plocha 2F (Syncro J)	0,0276 mm	0,0243 mm
Plocha 2F (Syncro H)	0,0338 mm	0,0286 mm

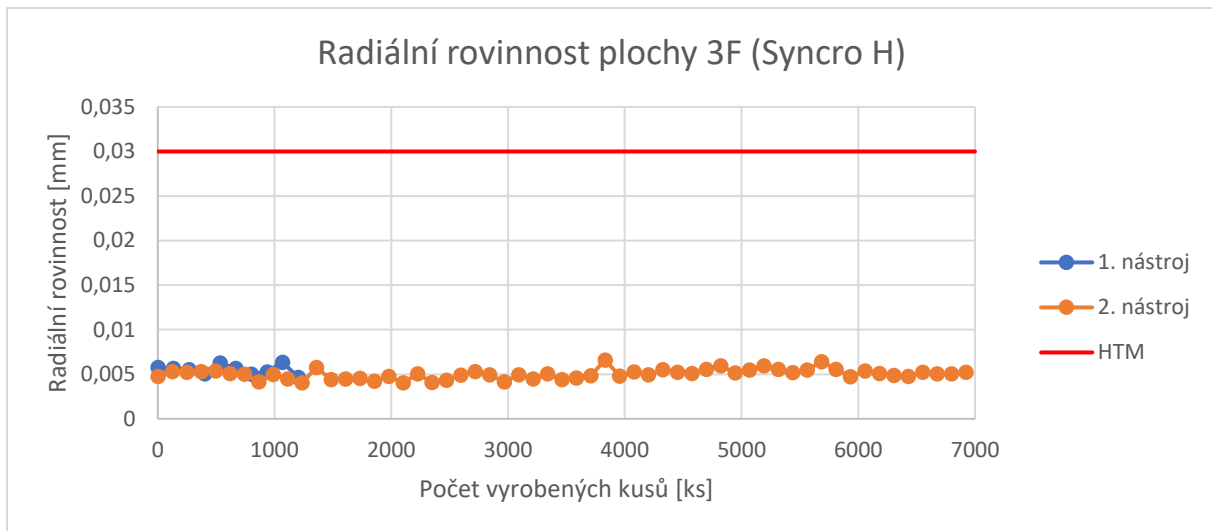
Z výše uvedených hodnot je zřejmé, že hodnoty obvodových rovinností se v závislosti na nástroji s rozdílnou geometrií břitu téměř nemění. Naopak při obrábění plochy 2F tvoří 2. nástroj v porovnání s 1. nástrojem mírně kvalitnější plochu z hlediska obvodové rovinnosti.

9.1.2. Radiální rovinnost

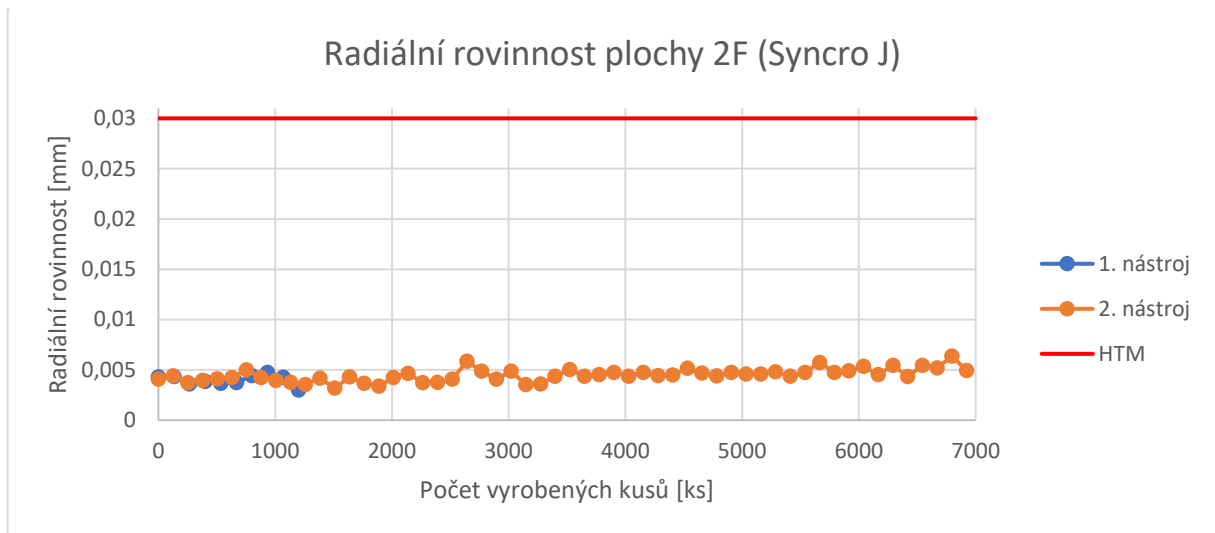
Měření radiální rovinnosti probíhá stejně jako v případě obvodové rovinnosti na souřadnicových měřicích strojích Zeiss Prismo. Na rozdíl však od obvodové rovinnosti je strategie měření odlišná, kdy dochází ke sběru hodnot ze 6 dotyků kuličky, které jsou následně vyhodnocovány zvlášť. Pro účely diplomové práce byly výsledné hodnoty z těchto 6 dotyků zprůměrovány.



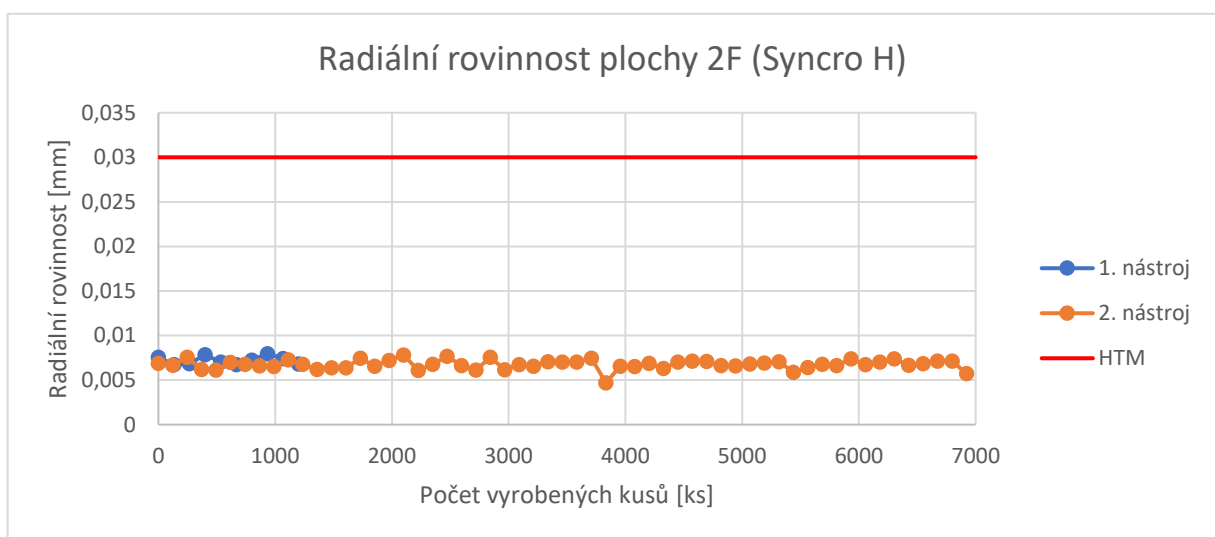
Graf 9.5 Radiální rovinnost plochy 3F z upínače Syncro J



Graf 9.8 Radiální rovinnost plochy 3F z upínače Syncro H



Graf 9.7 Radiální rovinnost plochy 2F z upínače Syncro J



Graf 9.6 Radiální rovinnost plochy 2F z upínače Syncro H

Ve výše uvedených grafech jsou uvedeny hodnoty radiálních rovinností v závislosti na počtu vyrobených kusů. Stejně jako v případě obvodové rovinnosti je zřejmé, že hodnota radiální rovinnosti se v závislosti počtu vyrobených kusů nemění. Dále je patrné, že se hodnoty pohybují ve spodní třetině tolerančního pole, kde nepřesahují hodnotu 0,01 mm. Průměrné hodnoty radiálních rovinností v závislosti na nástroji, ploše a upínači jsou uvedeny v tabulce 9.2.

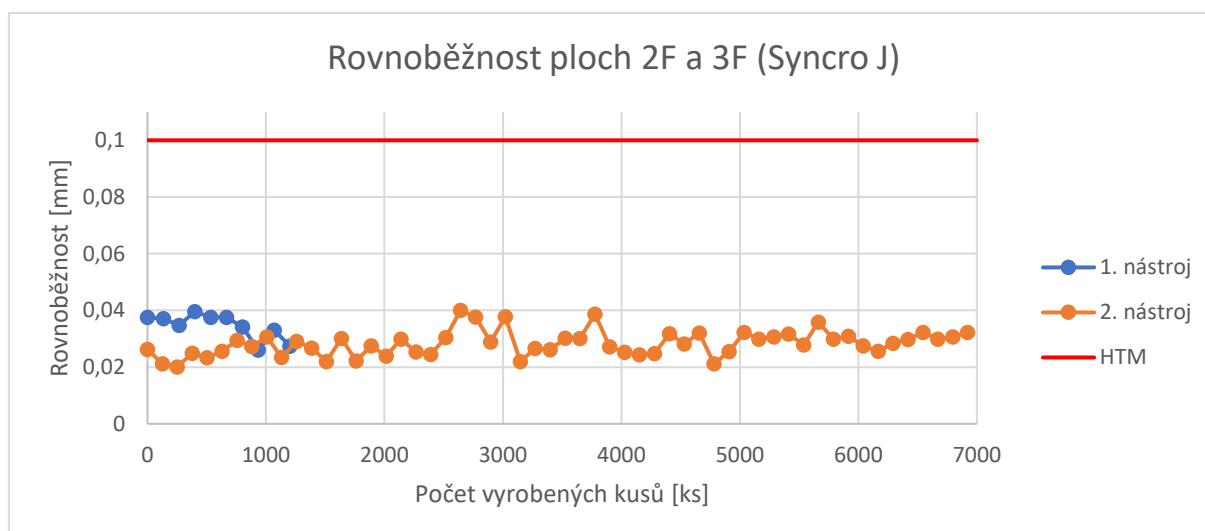
Tabulka 9.2 Průměrné hodnoty radiální rovinnosti v závislosti na nástroji, ploše a upínači

	1. nástroj	2. nástroj
Plocha 3F (Syncro J)	0,0038 mm	0,0033 mm
Plocha 3F (Syncro H)	0,0055 mm	0,0024 mm
Plocha 2F (Syncro J)	0,0040 mm	0,0040 mm
Plocha 2F (Syncro H)	0,0072 mm	0,0068 mm

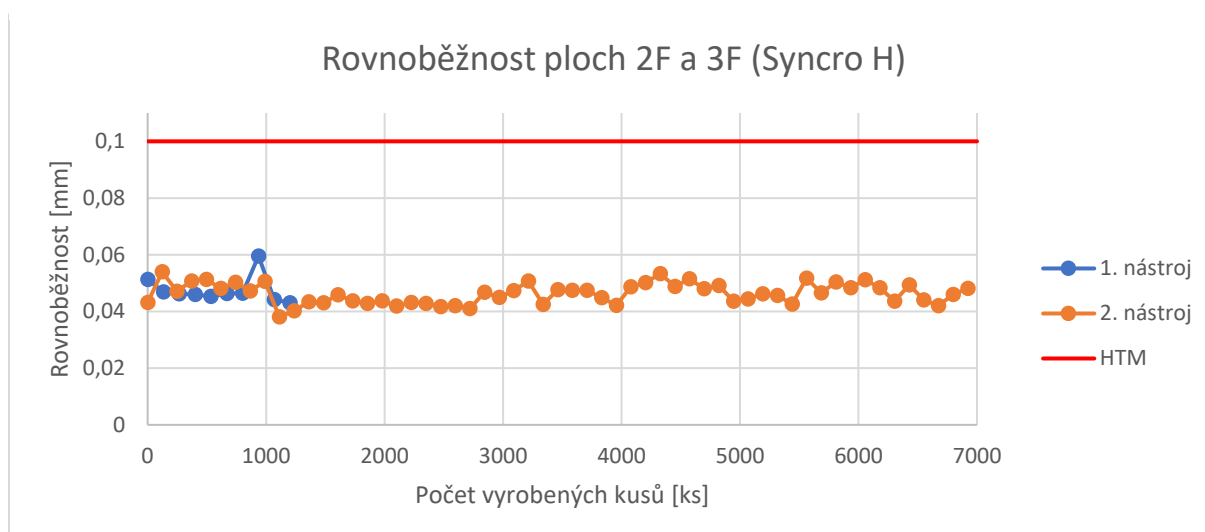
Z výše uvedených hodnot je patrné, že hodnoty radiálních rovinností se v závislosti na nástroji s rozdílnou geometrií břitů téměř nemění. Jedinou výjimkou mezi nástroji je plocha 3F z upínače Syncro H, kde se průměrné hodnoty od sebe liší o 0,0029 mm a lepších hodnot dosáhl 2. nástroj.

9.1.3. Rovnoběžnost

Měření rovnoběžnosti mezi plochami 2F a 3F, kde základnou je plocha 3F, probíhá stejně jako v předchozích případech na měrovém středisku na souřadnicových měřicích strojích Zeiss Prismo. Vyhodnocení rovnoběžnosti těchto dvou ploch probíhá z hodnot, které byly naměřeny v průběhu měření obvodových rovinností.



Graf 9.10 Rovnoběžnost ploch 2F a 3F z upínače Syncro J



Graf 9.9 Rovnoběžnost ploch 2F a 3F z upínače Syncro H

Ve výše uvedených grafech jsou uvedeny hodnoty rovnoběžností ploch 2F a 3F v závislosti na počtu vyrobených kusů. Z grafů je zřejmé, že hodnoty rovnoběžnosti se v závislosti na počtu vyrobených kusů téměř nemění. Dále je patrný rozdíl mezi upínači Syncro J a Syncro H, kdy hodnoty rovnoběžnosti z upínače Syncro J se pohybují ve spodní části tolerančního pole, zatímco hodnoty z upínače Syncro H se pohybují ve středu tolerančního pole. Hodnoty však nepřekračují hodnotu 0,06 mm. Průměrné hodnoty rovnoběžností v závislosti na nástroji a upínači jsou uvedeny v tabulce 9.3.

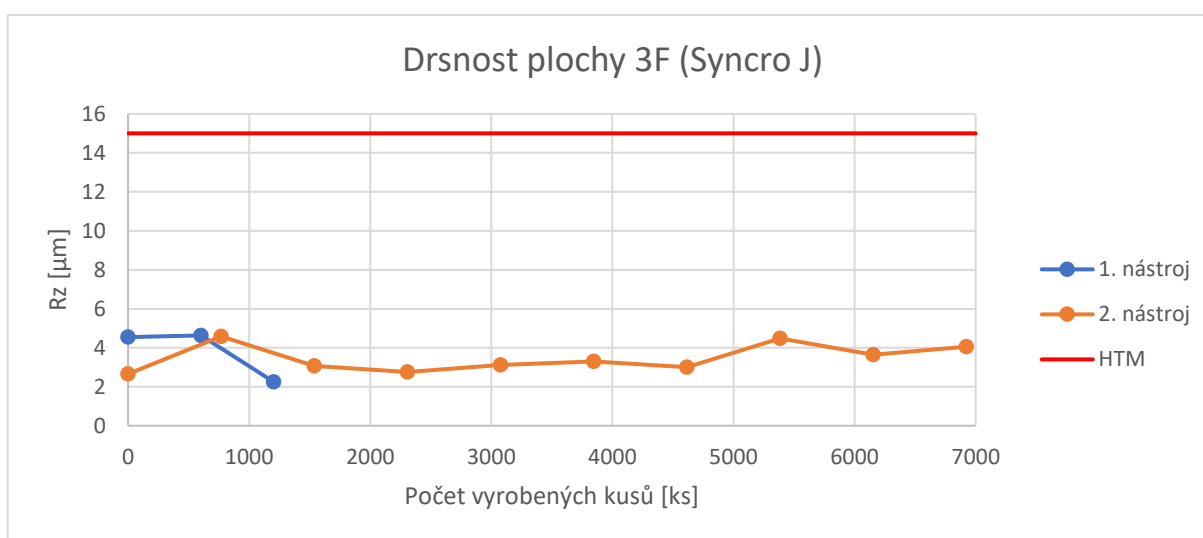
Tabulka 9.3 Průměrné hodnoty radiální rovinnosti v závislosti na nástroji a upínači

	1. nástroj	2. nástroj
Syncro J	0,0345 mm	0,0284 mm
Syncro H	0,0475 mm	0,0463 mm

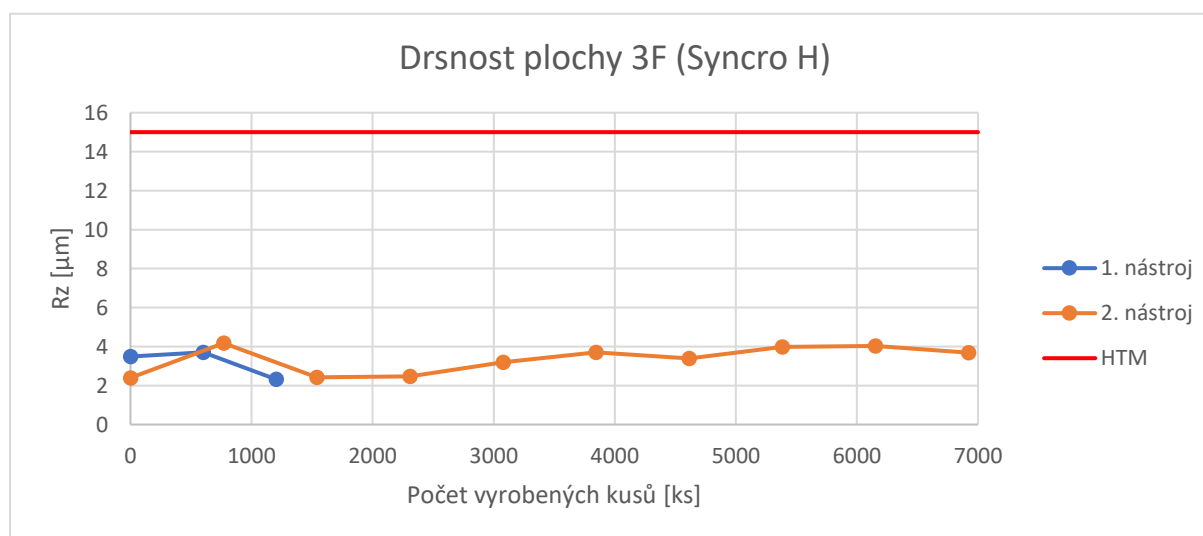
Z výše uvedených hodnot je patrné, že v případě upínače Syncro H je rozdíl mezi hodnotami rovnoběžnosti v závislosti na rozdílné geometrii nástroje zanedbatelný. V případě upínače Syncro J je patrný mírný rozdíl mezi nástroji, kdy oproti 1. nástroji je průměrná hodnota rovnoběžnosti z 2. nástroje o 0,0061 mm menší.

9.1.4. Drsnost

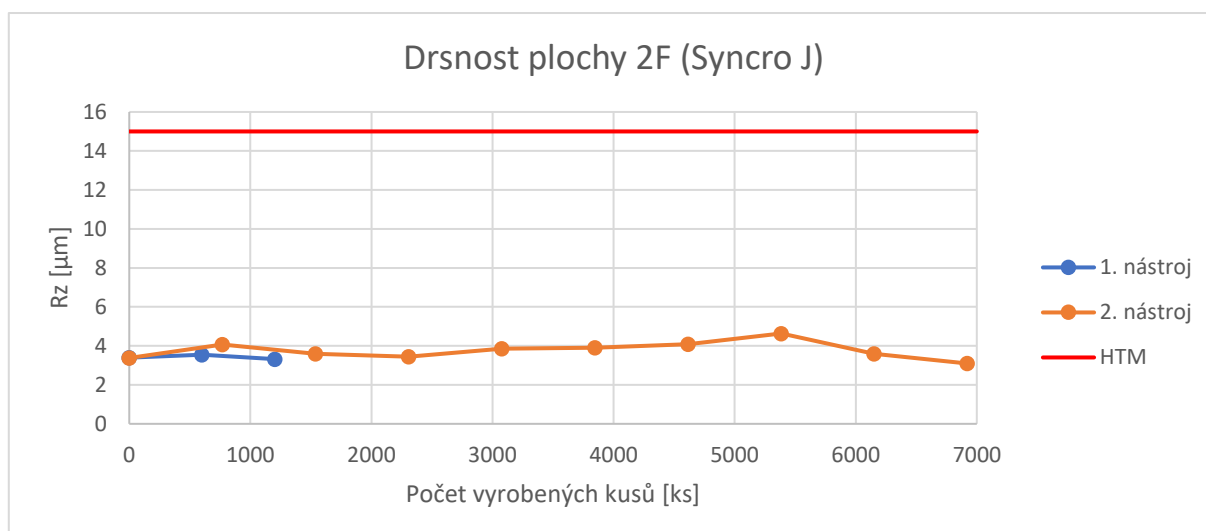
Měření drsnosti ploch 2F a 3F probíhá na pracovišti seřizovače na drsnoměru Mahr Perthometer S2. Z každé plochy jsou změřeny dva úseky a výsledné hodnoty jsou zapsány do papírového formuláře. Pro účely diplomové práce byly tyto dvě naměřené hodnoty drsnosti z jedné plochy zprůměrovány.



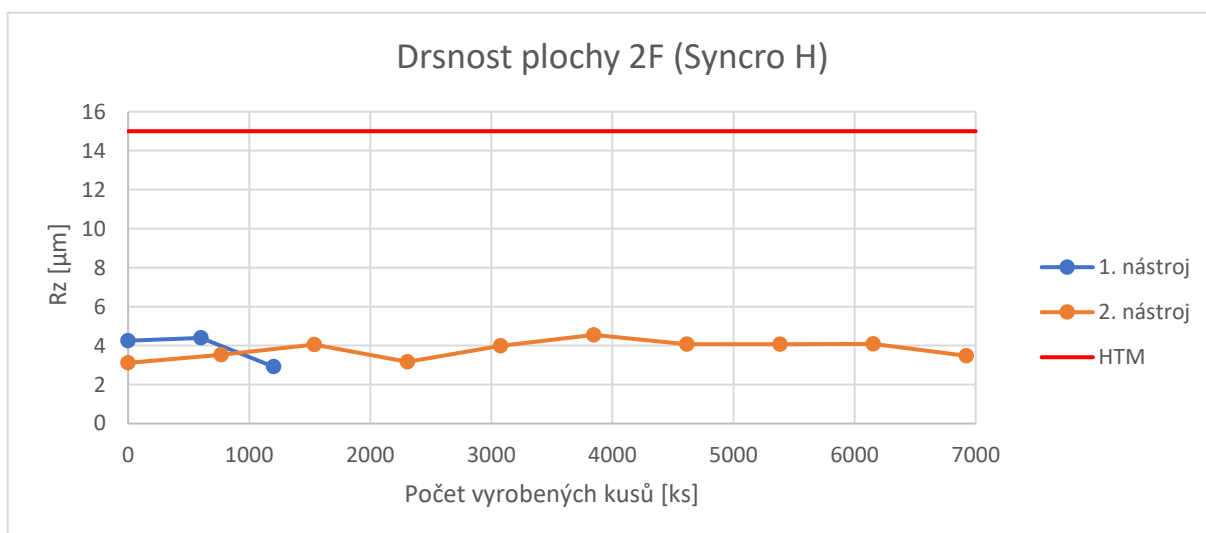
Graf 9.12 Drsnost plochy 3F z upínače Syncro J



Graf 9.11 Drsnost plochy 3F z upínače Syncro H



Graf 9.13 Drsnost plochy 2F z upínače Syncro J



Graf 9.14 Drsnost plochy 2F z upínače Syncro H

Ve výše uvedených grafech jsou uvedeny hodnoty drsnosti v závislosti na počtu vyrobených kusů. Z grafů je patrné, že hodnota drsnosti se v závislosti na počtu vyrobených kusů téměř neliší. Dále je zřejmé, že se naměřené hodnoty drsnosti pohybují ve spodní třetině tolerančního pole, kdy nepřekračují hodnotu 5 μm . Průměrné hodnoty drsností v závislosti na nástroji, ploše a upínači jsou uvedeny v tabulce 9.2.

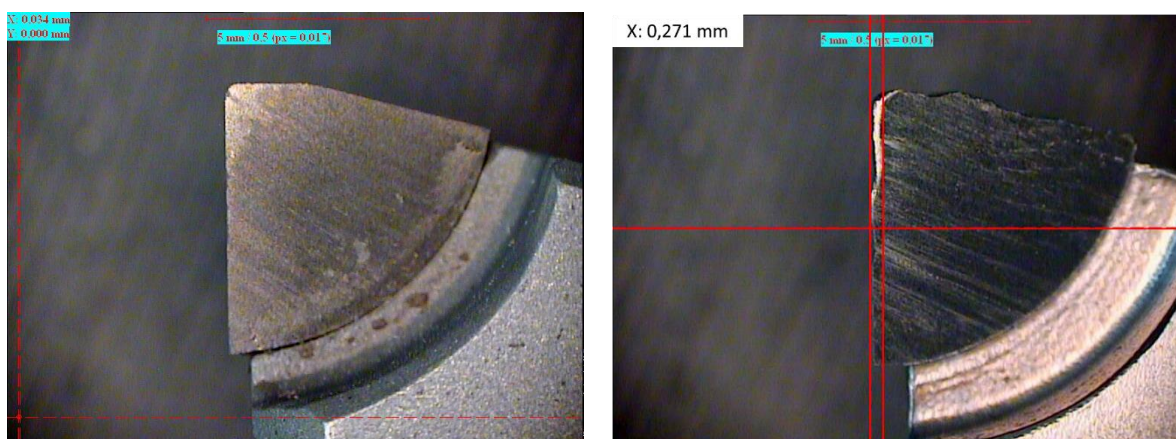
Tabulka 9.4 Průměrné hodnoty radiální rovinnosti v závislosti na nástroji, ploše a upínači

	1. nástroj	2. nástroj
Plocha 3F (Syncro J)	3,81 μm	3,47 μm
Plocha 3F (Syncro H)	3,17 μm	3,34 μm
Plocha 2F (Syncro J)	3,42 μm	3,77 μm
Plocha 2F (Syncro H)	3,86 μm	3,81 μm

Z výše uvedených hodnot je patrné, že průměrné hodnoty drsností se v závislosti na nástroji, ploše a upínači téměř neliší. V kapitole 7.3. bylo uvedeno doporučené rozmezí drsnosti pro sériové použití tmelu AMV 188200 ($Rz = 5 - 12 \mu\text{m}$). Jedná se však o doporučené hodnoty od výrobce a správná funkce tmelu a těsnost kompletu převodovky je ověřována tlakovou zkouškou na montážní lince.

9.2. Trvanlivost nástrojů

Nejčastějším důvodem výměny nástroje, který obrábí plochy 2F a 3F, je zanechávání otřepů na hraně příruby pro přichycení skříně spojky. Méně častým důvodem výměny může být nesplnění tolerovaných hodnot předepsaných výkresovou dokumentací, případně úplné destrukce nástroje – například vlivem obsahu vměstků ve slitině, ke kterému dochází především při přetavení hliníkových odlitků a jejich opětovnému lití. K zanechávání otřepů na hraně plochy dochází otupením břítu, který se s přibývajícím počtem vyrobených kusů postupně mechanicky opotřebovává. V případě, kdy dojde k otupení nástroje, přestane břit správně odřezávat třísky, které pak zůstávají na hranách plochy. Při pravidelném zanechávání těchto otřepů na hranách je stroj zastaven, nástroj vyměněn za nový a po seřízení je stroj opět spuštěn. Při každém zásahu do stroje je odečten počet vyrobených kusů a zaznamenán do systému. Otupené frézovací vložky jsou poté odeslány k externímu výrobcí, který provede jejich renovaci nebo úplnou výměnu. Příklad otupení 1. nástroje je uveden na obrázcích 9.3, 9.4 a 9.5. Pro porovnání je u těchto obrázků uveden nový stav frézovací vložky.



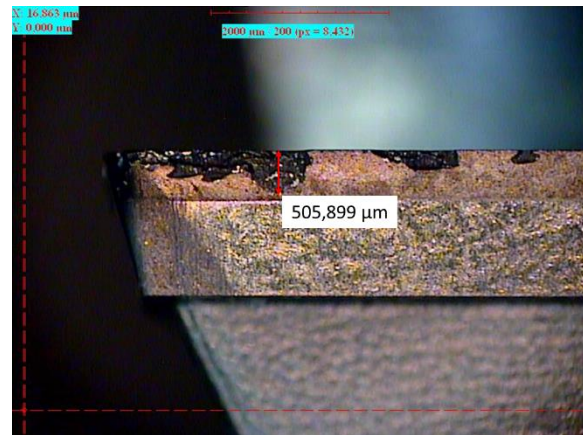
Nová frézovací vložka

Otupená frézovací vložka

Obrázek 9.3 Porovnání nové frézovací vložky s otupenou frézovací vložkou v základní nástrojové rovině Pr

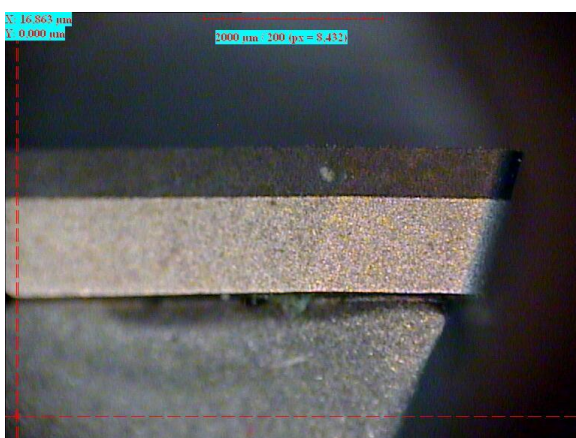


Nová frézovací vložka

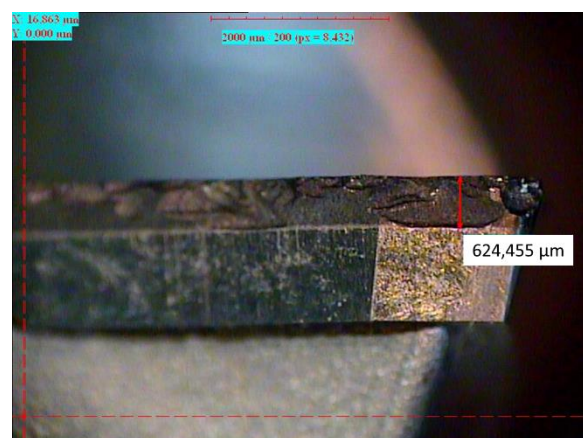


Otupená frézovací vložka

Obrázek 9.4 Porovnání nové frézovací vložky s otupenou frézovací vložkou v nástrojové rovině zadní Pf



Nová frézovací vložka



Otupená frézovací vložka

Obrázek 9.5 Porovnání nové frézovací vložky s otupenou frézovací vložkou v nástrojové rovině boční Pf

Z výše uvedených obrázků je patrný mechanismus opotřebení nástroje, kdy se části diamantové vrstvy během obráběcího cyklu vylamují. Největší zjištěná hodnota tohoto poškození byla na čele nástroje, kde velikost odtržené diamantové vrstvy sahala až ke karbidovému substrátu (podklad diamantové vrstvy). To je patrné z obrázku 9.5, kdy velikost odtržené diamantové vrstvy dosahuje hodnoty přibližně 0,62 mm. Na hřbetu nástroje byla velikost vylomené diamantové vrstvy přibližně 0,51 mm. Mechanické vylamování břitů vzniká přetížením břitů mechanickým namáháním např. v důsledku zasekávání třísek, vysoké hodnoty posuvu a hloubky posuvu, vměstků obsažených v materiálu obrobku, tvorby nárůstků, vibrační atd. [16]

V případě 1. nástroje došlo k výrobě 1 202 kusů obrobků převodovky. V průběhu předchozích dvou nasazení tohoto nástroje došlo však k výrobě v průměru 2 599 kusů. V případě 2. nástroje bylo vyrobeno 6 922 obrobků, což znamená zlepšení

o 5 720 kusů. Vzorec pro trvanlivost nástroje je vyjádřen následovně, kdy řezné podmínky zůstaly stejné a tím tedy i jednotlivé strojní časy, které jsou vyjádřeny v tabulce 7.3:

$$T = t_{As} \cdot n_{WT} = \sum t_{As_i} \cdot n_{WT} \quad (9.1)$$

$$T_{1.nástroj} = 0,217 \cdot 1\,202 = 260,8 \text{ min}$$

$$T_{2.nástroj} = 0,217 \cdot 6\,922 = 1\,502,1 \text{ min}$$

Při porovnání trvanlivosti 2. nástroje oproti trvanlivosti 1. nástroje je patrné zvýšení trvanlivosti o 1 241,3 minut. Pokud bychom porovnali trvanlivost 2. nástroje oproti předchozím dvěma nasazením 1. nástroje, který průměrně obrobil 2 599 kusů, zlepšení trvanlivosti by bylo o 938,1 minuty větší. Uvedené trvanlivosti jsou pouze orientační a závisí na zachování počtu obrobených kusů při stejných řezných podmínkách.

9.3. Ekonomické hledisko

Po dosažení tolerovaných hodnot, je snaha snížit režijní náklady na výrobu jednoho kusu na možné minimum. Do režijních nákladů spadají například odpisy výrobního stroje, nástroje, řezné kapaliny atd. Z tohoto důvodu je snaha zvýšit trvanlivost na možné maximum a tím snížit odpisy nástroje na minimum. Při snížení odpisů nástroje, dojde také ke snížení celkových režijních nákladů. V případě obrábění skříně převodovky se režijní náklady na výrobu jednoho kusu pohybují okolo 300 Kč.

V případě porovnání výhodnosti jednoho nástroje oproti druhému je potřeba počítat s několika základními údaji. Hlavními údaji jsou zejména počet obrobených kusů, pořizovací cena nástroje a počet měsíčně zhotovených obrobků. Níže jsou uvedeny výpočty, jež dokumentují očekávané úspory při použití 2. nástroje, jehož pořizovací cena je stejná jako u prvního nástroje, ale oproti 1. nástroji obrobil o 5 720 obrobků více. Vzhledem k tomu, že nedochází k ostření nástroje, nejsou uvažovány jeho náklady.

$$n_{We} = \frac{n_{Wt} \cdot n_s}{n_a} \quad (9.2)$$

$$n_{We \text{ 1.nástroj}} = \frac{1\,202 \cdot 1}{5} = 240 \text{ ks}$$

$$n_{We \text{ 2.nástroj}} = \frac{6922 \cdot 1}{5} = 1\,384 \text{ ks}$$

Pokud uvažujeme počet vyrobených kusů na 1. nástroji 1 202 ks při 5 ks nasazených frézovacích vložkách na nástroji, kdy každá má 1 řeznou hranu, tak po dosazení do vzorce 9.2 vyjde počet zhotovených obrobků na jednu frézovací vložku. V případě prvního nástroje je to 240 ks a v případě druhého nástroje je to 1 384 ks zhotovených obrobků. Pokud bychom uvažovali s průměrným počtem 2 559 vyrobených kusů na 1. nástroji za předchozí dvě nasazení tohoto nástroje, tak počet zhotovených obrobků na jednu frézovací vložku by byl 520 ks.

$$K_W = \frac{W_a + W_k}{n_{We}} \quad (9.3)$$

$$K_{W \text{ 1.nástroj}} = \frac{1\,140 + 0}{240} = 4,74 \text{ Kč/ks}$$

$$K_{W \text{ 2.nástroj}} = \frac{1\,140 + 0}{1\,384} = 0,82 \text{ Kč/ks}$$

Pořizovací cena jednoho kusu frézovací vložky je stejná pro obě geometrie břitu a pohybuje se přibližně okolo hodnoty 1 140 Kč. Vzhledem k nulovým nákladům na údržbu nástroje, která zahrnuje například náklady na povlakování a broušení, při dosazení do vzorce 9.2 vyjdou celkové náklady jednoho nástroje na jeden obrobek. Pro 1. nástroj je to 4,74 Kč/ks a pro druhý nástroj je to 0,82 Kč/ks. Pokud bychom do vzorce 9.3 dosadili hodnotu 520 ks zhotovených obrobků na jednu frézovací vložku, tak by výsledná hodnota celkových nákladů jednoho nástroje na jeden obrobek byla 2,19 Kč/ks.

$$W_M = n_{TM} \cdot K_W \quad (9.4)$$

$$W_{M \text{ 1.nástroj}} = 2\,500 \cdot 4,74 = 11\,855,24 \text{ Kč/měsíc}$$

$$W_{M \text{ 2.nástroj}} = 2\,500 \cdot 0,82 = 2\,058,65 \text{ Kč/měsíc}$$

Při dosazení průměrného počtu 2 500 vyrobených obrobků za měsíc a celkových nákladů jednoho nástroje na obrobek do vzorce 9.4, vyjdou měsíční náklady na nástroj. Pro 1. nástroj jsou tyto náklady 11 855,24 Kč/měsíc a pro 2. nástroj 2 058,65 Kč/měsíc. Pokud bychom do tohoto vzorce dosadili náklady nástroje na obrobek pro průměrnou hodnotu

2 599 vyrobených kusů dosažených v předchozích dvou nasazeních tohoto nástroje, hodnota měsíčních nákladů na nástroj by byla 5 482,22 Kč/měsíc.

Z výsledných hodnot celkových měsíčních nákladů na nástroj je patrné, že 2. nástroj, který vyrobil 6 922 kusů obrobků oproti 1. nástroji, který vyrobil pouze 1 202 kusů obrobků, je 2. nástroj z ekonomického hlediska výhodnější. Při použití 2. nástroje v případě zachování počtu vyrobených kusů by došlo k očekávané úspoře 3,92 Kč/ks, 9 796,59 Kč/měsíc a 107 762,46 Kč/rok. Pokud by byly nástroje nasazeny na všech 11 výrobních strojů, byla by celková očekávaná úspora 1 185 387,39 Kč/rok.

Pokud dojde k porovnání 2. nástroje s předchozími dvěma nasazeními 1. nástroje, kde průměrný počet vyrobených obrobků byl 2 599 kusů, tak by se při zachování počtu vyrobených obrobků dosáhlo úspory 1,37 Kč/ks, 3 424,22 Kč/měsíc a 37 666,47 Kč/rok. Při nasazení 2. nástroje na všech 11 výrobních strojů by byla očekávaná úspora 414 331,17 Kč/rok.

Pro zachování výše uvedených hodnot je důležité, aby byl zachován i počet vyráběných obrobků. Zároveň se jedná o orientační očekávané úspory, které se mohou ve skutečnosti lišit. Uvedené úspory jsou vyjádřeny pouze pro náklady na nástroj. Při konečném zhodnocení případných úspor je třeba započítat i snížení ostatních nákladů spojených s vyšší trvanlivostí nástroje – např. náklady na výměnu nástroje a jejich dopad do režijních nákladů.

10. DOPORUČENÍ PRO ŠKODA AUTO A.S.

Vzhledem k zjištěným informacím v rámci praktické části této diplomové práce, bych společností Škoda Auto a.s. rád doporučil další postup při obrábění skříní převodovek:

- Nasadit nástroje s poloměrem špičky 1 mm (2. nástroj) namísto nástroje s poloměrem špičky 0,3 mm (1. nástroj) za účelem zvýšení trvanlivosti nástroje a snížení režijních nákladů na obrobení skříně převodovky.
- Pokračovat ve sledování parametrů, které byly sledovány v rámci této diplomové práce (kvalita obrobeného povrchu, trvanlivost nástroje, ekonomické hledisko).
- Na základě dlouhodobého sledování parametrů zhodnotit skutečné ekonomické přínosy a porovnat je s orientačními ekonomickými přínosy, které byly uvedeny v této práci.
- V případě zlepšení trvanlivosti nástroje vyhodnotit ekonomické hledisko společně s náklady na nástroj a jeho výměnu a dalších nákladů spojených se zvýšenou trvanlivostí nástroje a dopad těchto nákladů do režijní ceny skříně převodovky.

11. ZÁVĚR

Teoretická část této diplomové práce je věnována teorii frézování, jeho metodám a programově řízeným CNC frézovacím strojům. Dále jsou zde popsány slitiny hliníku pro tlakové lití, jejich chemické složení a obecné a výrobní vlastnosti. Další kapitola je zaměřena na materiály řezných nástrojů, jejich chemickému složení, vlastnostem, účelu použití a doporučených řezných rychlostí. Následuje kapitola, ve které jsou popsány druhy řezných kapalin, jejich složení, vlastnosti a účel použití. Tato část je zakončena popisem technologií mechanických dokončovacích metod rovinných ploch hliníkových slitin.

Praktická část je věnována popisu výroby skříní převodovek ve společnosti Škoda Auto a.s. se zaměřením na proces obrábění rovinných ploch určených pro montáž skříně spojky a víka převodovky. Dále obsahuje rozbor obráběného materiálu, který zahrnuje analýzu tvrdosti a chemického složení hliníkové slitiny AlSi9Cu3(Fe), která je následně porovnána s údaji předepsanými normou ČSN EN 1706 a interním předpisem. Tato část se především věnuje technologickým zkouškám řezného nástroje s frézovacími vložkami s polykrystalickým diamantovým břitem s rozdílnou geometrií. Geometrie diamantového břitu se liší zejména poloměrem špičky, kdy oproti původnímu poloměru špičky 0,3 mm byly nasazeny frézovací vložky s poloměrem špičky 1 mm. V rámci těchto technologických zkoušek je sledován dopad na kvalitu obráběného povrchu, která zahrnuje výkresem předepsané tolerované parametry, dopad na trvanlivosti, ze kterých plyne i ekonomické hledisko použití těchto nástrojů.

Při analýze chemického složení obráběného materiálu bylo zjištěno dodržení obsahu jednotlivých prvků, jejichž rozmezí je předepsáno interním předpisem, který oproti normě ČSN EN 1706 omezuje rozmezí obsahu prvků, které mají nepříznivý vliv na vlastnosti obrábění. V rámci sledování kvality obráběných ploch bylo zjištěno, že změna geometrie břitu při zachování řezných podmínek nemá vliv na tolerované hodnoty udávané výkresovou dokumentací (rovinnost, rovnoběžnost, drsnost). Zároveň se tyto parametry v závislosti na počtu vyrobených kusů výrazně neměnily. Dále bylo v rámci technologických zkoušek rozdílných geometrií diamantových břitů provedeno porovnání trvanlivostí těchto nástrojů, kdy původním nástrojem s poloměrem špičky 0,3 mm bylo vyrobeno 1 202 kusů skříní převodovek. V předchozích dvou nasazeních tohoto nástroje však bylo vyrobeno průměrně 2 599 kusů těchto obrobků. Zkušební nástrojem s poloměrem špičky 1 mm bylo vyrobeno 6 922 kusů skříní převodovky, což přineslo zvýšení trvanlivosti o 1 241,3 minut, respektive o 938,1 minuty. Z ekonomického hlediska jsou vyhodnocena očekávaná úspora nákladů na

nástroj za předpokladu zachování počtu vyrobených obrobků, které byly zjištěny v rámci technologické zkoušky. V porovnání zkušebního nástroje, kterým bylo obrobena 6 922 kusů s nástrojem, jež vyrobil 1 202 obrobků, je hodnota úspory za nástroj při nasazení na všech 11 výrobních strojů a zachování počtu zhotovených obrobků 1 185 387,39 Kč za rok. Při porovnání zkušebního nástroje s nástroji, jimiž bylo vyrobeno průměrně 2 599 obrobků, se hodnota úspor při nasazení na všechny výrobní stroje pohybuje okolo 414 000 Kč za rok.

Závěrem je potřeba říci, že zjištěné hodnoty trvanlivostí nástrojů a úspor jsou pouze orientační a je třeba dlouhodobých zkoušek pro zhodnocení skutečných přínosů na trvanlivost a nákladů, které zahrnují nejenom náklady na nástroj, ale také náklady na jeho výměnu a dalších výdajů závislých na trvanlivosti nástroje. Tyto celkové náklady se poté promítají do režijní ceny výroby jednoho kusu skříně převodovky.

12. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02610-8.

[2] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.

[3] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, [2016]. ISBN 1-4665-8753-9.

[4] ANDERSON, Kevin, John WERITZ a J. G. KAUFMAN. *Properties and selection of aluminum alloys*. Materials Park, Ohio: ASM International, [2019]. ASM Handbook, v. 2B. ISBN 978-1-62708-208-2.

[5] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-514206-3.

[6] ANDERSON, Kevin, John WERITZ a J. G. KAUFMAN. *Aluminium science and technology*. Materials Park, Ohio: ASM International, [2018]. ASM Handbook, v. 2A. ISBN 978-1-62708-158-0.

[7] DAVIS, Joseph R. *Machining*. Materials Park, Ohio: ASM International, [1989]. ASM Handbook, v. 16. ISBN 978-0-87170-022-3.

[8] YAZID, Mza a Azreen ZAINOL. Tool Life and Surface Roughness in Dry High Speed Milling of Aluminum Alloy 7075-T6 using Bull Nose Carbide Insert. *Journal of Engineering Science and Technology* [online]. 2020, (15) [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/339229853_Tool_Life_and_Surface_Roughness_in_Dry_High_Speed_Milling_of_Aluminum_Alloy_7075-T6_using_Bull_Nose_Carbide_Insert

[9] ČSN EN 1706 Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[10] Stena Aluminium. *Stena Aluminium*. © Copyright 2021 [online]. [cit. 2021-7-3]. Dostupné z: <https://www.stenaaluminium.com/siteassets/document/product-sheets/nov2019/en/eng-en-ab-46000.pdf>

[11] NĚMCOVÁ, Irena; ČERMÁKOVÁ, Ludmila; RYCHLOVSKÝ, Petr. *Spektrometrické analytické metody I.* Praha: Karolinum, 1997.

[12] Gühring KG. *Gühring KG*. © Copyright 2021 [online]. [cit. 2021-6-7]. Dostupné z: <https://webshop.guehring.cz/>

[13] Výukový program: Základy programování CNC strojů: Obecný úvod do problematiky CNC programování. *SOS* – Střední odborná škola Jana Tiraye Velká Bíteš [online]. [cit. 2021-6-13]. Dostupné z: https://www.sosbites.cz/images/stories/Pro-studenty/studijni-materialy/VUKOV_TEXT_-_1.ST.pdf

[14] Media Room - ŠKODA Storyboard. [online]. Copyright © ŠKODA AUTO a.s. 2021 [cit. 18.07.2021]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/skoda-auto-vyrobila-dvanactimiliontou-prevodovku-soucasne-generace/>

[15] Media Room - ŠKODA Storyboard. [online]. Copyright © ŠKODA AUTO a.s. 2021 [cit. 18.07.2021]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/spolecnost-skoda-auto-vyrobila-trinactimiliontou-prevodovku-aktualni-generace/>

[16] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 18.07.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Schéma válcového frézování [1]	13
Obrázek 2.2 Schéma čelního frézování [1]	13
Obrázek 2.3 Schéma sousledného frézování [1]	14
Obrázek 2.4 Schéma nesousledného frézování [1]	15
Obrázek 2.5 Tříosé vertikální obráběcí centrum s pevným sloupem s pojezdem v ose Z (svislý pohyb vřetenové hlavy), upínacím stolem s pojezdem ose X a sedlem upínacího stolu s pojezdem v ose Y [3]	16
Obrázek 2.6 Čtyřosé horizontální obráběcí centrum s pohyblivou hlavou vřetena v ose X a Y, upínacím rotačním stolem s pojezdem v ose Z a vykonávající rotační pohyb B [3]	17
Obrázek 2.7 Názvosloví pro pohyby a rotace CNC strojů [13]	18
Obrázek 4.1 Schematické znázornění vstupních a výstupních parametrů a vlastností obráběcího procesu [5]	28
Obrázek 4.2 Vyměnitelná frézovací destička s diamantovým břitem od firmy Gühring [12].	35
Obrázek 4.3 Vyměnitelná frézovací destička s diamantovým břitem od firmy Gühring [12].	35
Obrázek 7.1 Tolerované hodnoty ploch 2F a 3F	49
Obrázek 7.2 Frézovací hlava na operaci 10J	49
Obrázek 8.1 Příprava povrchu vzorku před analýzou chemického složení na vertikální frézce HK 80F	52
Obrázek 8.2 Jiskrový optický emisní spektrometr Bruker-Quantron Q8 Magellan ve Škoda Auto a.s.	53
Obrázek 8.3 Definovaná část výřezu ze skříně převodovky dle interního předpisu	55
Obrázek 8.4 Tvrdoměr DuraVision 30 G5 v metalurgické laboratoři Škoda Auto a.s.	55
Obrázek 9.1 Použité geometrie břitových destiček v základní nástrojové rovině Pr	57
Obrázek 9.2 Kontrolní měření geometrie diamantového břitu na mikroskopu Messwelk	58
Obrázek 9.3 Porovnání nové frézovací vložky s otupenou frézovací vložkou v základní nástrojové rovině Pr	66
Obrázek 9.4 Porovnání nové frézovací vložky s otupenou frézovací vložkou v nástrojové rovině zadní Pp	67
Obrázek 9.5 Porovnání nové frézovací vložky s otupenou frézovací vložkou v nástrojové rovině boční Pf	67

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Chemické složení slitin Al-Si-Cu [4].....	20
Tabulka 3.2 Obecné mechanické vlastnosti slitin 380.0 a A380.0 u zkušební tyče o průměru 6,5 mm odlévané ve studené komoře [4]	20
Tabulka 3.3 Obecné mechanické vlastnosti slitiny B380.0 u zkušební tyče o průměru 6,5 mm při pokojové teplotě [4]	20
Tabulka 3.4 Chemické složení slitin Al-Si-Mg [4]	21
Tabulka 3.5 Obecné mechanické vlastnosti slitiny 360.0 a A360.0 [4]	22
Tabulka 3.6 Chemické složení slitin Al-Si-Mg-Cu [4]	23
Tabulka 3.7 Mechanické vlastnosti slitiny 390.0 [4]	23
Tabulka 3.8 Chemické složení slitin Al-Si [4]	24
Tabulka 3.9 Obecné vlastnosti slitin Al-Si [4]	25
Tabulka 3.10 Chemické složení slitiny 518.0 [4].....	26
Tabulka 3.11 Obecné vlastnosti slitiny 518.0 [4].....	27
Tabulka 4.1 Chemické složení rychlořezných ocelí typu M2, M42 a T42 [5].....	29
Tabulka 4.2 Kategorie slinutých karbidů, jejich použití a označení [5].....	30
Tabulka 4.3 Doporučené použití základních druhů cermetů, doporučené řezné rychlosti a posuv [3]	32
Tabulka 6.1 Porovnání brusných dokončovacích operací [6]	43
Tabulka 6.2 Dosahované parametry při lapování a honování [6]	44
Tabulka 7.1 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe) [10].....	47
Tabulka 7.2 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe) [10].....	47
Tabulka 7.3 Parametry obrábění operace 10J	48
Tabulka 8.1 Výsledné hodnoty chemického složení odlitku v porovnání s hodnotami normy a interního předpisu.....	54
Tabulka 9.1 Průměrné hodnoty obvodové rovinnosti v závislosti na nástroji, ploše a upínači 60	
Tabulka 9.2 Průměrné hodnoty radiální rovinnosti v závislosti na nástroji, ploše a upínači ...	62
Tabulka 9.3 Průměrné hodnoty radiální rovinnosti v závislosti na nástroji a upínači	63
Tabulka 9.4 Průměrné hodnoty radiální rovinnosti v závislosti na nástroji, ploše a upínači ...	65

Seznam grafů

Graf 4.1 Rozmezí řezných rychlostí pro různé druhy řezných materiálů [3].....	37
Graf 8.1 Výsledné hodnoty tvrdostí HBW skříní převodovek za období od 5.1.2021 do 28.6.2021	56
Graf 9.1 Obvodová rovinnost plochy 3F z upínače Syncro J.....	58
Graf 9.2 Obvodová rovinnost plochy 2F z upínače Syncro H	59
Graf 9.3 Obvodová rovinnost plochy 2F z upínače Syncro J.....	59
Graf 9.4 Obvodová rovinnost plochy 3F z upínače Syncro H	59
Graf 9.5 Radiální rovinnost plochy 3F z upínače Syncro J.....	60
Graf 9.6 Radiální rovinnost plochy 2F z upínače Syncro H	61
Graf 9.7 Radiální rovinnost plochy 2F z upínače Syncro J.....	61
Graf 9.8 Radiální rovinnost plochy 3F z upínače Syncro H	61
Graf 9.9 Rovnoběžnost ploch 2F a 3F z upínače Syncro H	63
Graf 9.10 Rovnoběžnost ploch 2F a 3F z upínače Syncro J.....	63
Graf 9.11 Drsnost plochy 3F z upínače Syncro H.....	64
Graf 9.12 Drsnost plochy 3F z upínače Syncro J.....	64
Graf 9.13 Drsnost plochy 2F z upínače Syncro J	65
Graf 9.14 Drsnost plochy 2F z upínače Syncro H.....	65