

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Možnosti zvyšování efektivity frézování
drážek
Options for Increasing Efficiency of
Grooves Milling

Student:
Vedoucí diplomové práce

Bc. Petr Hamrozi
doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Hamrozi**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Možnosti zvyšování efektivity frézování drážek**
Options for Increasing Efficiency of Grooves Milling

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor možnosti zvyšování přesnosti frézování a drsnosti obrobeneho povrchu.
2. Rozbor stávajících strategií obrábění pro cílené zvyšování přesnosti obrábění.
3. Experimentální část.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

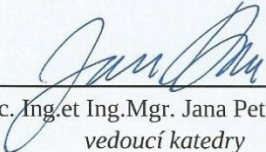
BÁTORA, B.; VASILKO, K. *Obrobené povrchy – technologická dedičnost, funkčnost*. Trenčín: Trenčianská univerzita, 2000. s. 183, ISBN 80-88914-19-1.
SADÍLEK, M. *Počítačová podpora výroby*. VŠB – TU Ostrava, 2011, 80 s., Dostupné na: http://www.346.vsb.cz/studijni_literatura.html.
AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6.
BRYCHTA, J.; CZÁN, A.; ČEP, R.; KRATOCHVÍL, J.; PETRŮ, J.; SADÍLEK, M.; STANČEKOVÁ, D.; ZLÁMAL, T. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. VŠB - TU Ostrava, Žilinská Univerzita v Žilině, 173 s., 2014, ISBN 978-80-248-3522-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Petr Hamrozi

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Polní 36, Český Těšín 737 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HAMROZI, P. *Možnosti zvyšování efektivity frézování drážek: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, s. Vedoucí práce: SADÍLEK, M.

Cílem práce je seznámit možného čtenáře s návrhem nové technologie obrábění zadaných kapes na určené součásti a s experimentem obrábění drážek vybranými strategiemi. Úvodní části práce se zabývají strategiemi obrábění a problémy vznikající během frézování a jejich řešení. Dále bude popsán průběh experimentu frézování drážek a jeho vyhodnocení. Druhá polovina práce popisuje stávající strategie výroby daných kapes a následně přibližuje návrhy nových technologií. Tyto návrhy jsou mezi sebou porovnávány z hlediska strojních časů a všechny tyto údaje jsou obsahem přílohy. V poslední části práce je uvedeno srovnání původní technologie s technologií novou. Výsledkem práce je inovace stávajícího technologického postupu a návod pro obrábění kapes.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HAMROZI, P. *Options for Increasing Efficiency of Grooves Milling: Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, p. Thesis head: SADÍLEK, M.

The purpose of the thesis is to familiarize a possible reader with designing a new technology for machining specified pockets on the specified component and on the experiment of grooves milling of selected strategies. The introduction of the thesis is about milling strategies and problems caused while milling and their solution. Then the process of the milling experiment will be described and evaluated. The second part of this thesis describes the current pocket milling strategy and it is focused on new technologies proposal afterwards. These proposals are compared with each other in terms of cutting times and all of these are included in the attachment. The last part of the thesis shows the comparison of the original technology with the new technology. The result of the master thesis is the innovation of the current technological process and the manual for pocket machining.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Úvod	12
1 Zvyšování přesnosti frézování a drsnosti obrobeného povrchu	13
1.1 2osé lineární zahlubování a zahlubování pomocí kruhové interpolace	13
1.2 Vytvoření, zvětšení dutiny nebo kapsy	13
1.3 Ponorné frézování	14
1.4 Zavrtávací frézování	15
1.5 Metody odřezávání tenkých vrstev	16
1.5.1 Trochoidální frézování	16
1.5.2 Metoda odřezávání tenkých vrstev – frézování rohů	17
2 Výskyt problémů při frézování a jejich řešení	18
2.1 Hromadění třísek	18
2.2 Přeřezávání třísek	19
2.3 Neuspokojivá kvalita obrobeného povrchu	19
2.3.1 Příliš vysoká hodnota posuvu na otáčku	19
2.3.2 Tvorba nárůstku na břitu	19
2.3.3 Záběr vedlejšího ostří (podřezávání)	19
2.3.4 Vydrolování povrchu obrobku	20
2.4 Vibrace	20
2.4.1 Vibrace podle směru výslednice řezných sil	20
2.4.2 Předcházení vibrací	20
2.4.3 Příklad postupu frézování hluboké kapsy	22
2.5 Výskyt problémů při frézování rohů	23
3 Frézování drážek	24
3.1 Zhodnocení časů při obrábění drážek	31
3.2 Měření drsnosti	32
3.3 Měření šířky drážek	35

3.4	Měření šířky žebra	35
3.5	Zhodnocení naměřených výsledků	36
3.5.1	Zhodnocení rozměrů přesností drážek.....	38
4	Stanovení strategie frézování na zadaných kapsách	40
4.1	Skupinový technologický postup výroby kapes společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o.	41
4.1.1	Charakteristika obrábění kapes A a B	41
4.1.2	Charakteristika obrábění kapes C a D	43
4.2	Výroba určené kapsy pomocí strategií kruhových interpolací nástroje.....	46
4.3	Srovnání strategií frézování kapes.....	50
4.3.1	Kapsa jedním směrem	50
4.3.2	Kapsa oběma směry.....	50
4.3.3	Konstantní přesah spirály	51
4.3.4	Paralelní spirála	51
4.3.5	Paralelní spirála s vyčištěním rohů.....	51
4.3.6	Vysokorychlostní spirála	52
4.3.7	Smíšená spirála.....	52
4.3.8	Opravdová spirála.....	53
4.3.9	Dynamické frézování.....	53
4.3.10	Koncentrické zbytkové frézování.....	54
4.4	Teoretické srovnávání postupů výroby zadaných kapes.....	54
4.5	Porovnávání způsoby obrábění kapes	55
4.5.1	Obrábění poloviny kapes a dna kapsy zvlášť	55
4.5.2	Obrábění kapes na plnou hloubku a následného obrábění zbylého materiálu v rozích kapsy s nástrojem o menším průměru	56
4.6	Použité nástroje pro porovnávání	57
4.7	Vzorce pro výpočet určitých hodnot.....	58
4.8	Maximální velikosti nástrojů pro obrábění kapes s maximální radiální hodnotou řezu	59

4.9	Výsledek porovnání nástrojů a strategií obrábění.....	60
4.9.1	Strojní časy jednotlivých strategií	60
4.9.2	Porovnání časů strategií obrábějící zbytkový materiál na rozích kapes ..	61
4.9.3	Srovnání nejdelších a nejkratších celkových časů hrubování všech způsobů obrábění kapes	62
4.10	Srovnání nově navržené technologie se skupinovou technologií předešlou..	64
5	Závěr	69
6	Použitá literatura	71
7	Seznam příloh.....	76

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Význam	Jednotka
A	kapsa s rozměry $377 \times 133 \times 36,5_{-0,5}^0$	[mm]
B	kapsa s rozměry $294 \times 123 \times 36,5_{-0,5}^0$	[mm]
C	kapsa s rozměry $56 \times 123 \times 36,5_{-0,5}^0$	[mm]
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporovaná konstrukce	[-]
CAM	Computer Aided Manufacturing – počítačem podporovaná výroba	[-]
CNC	Computer Numerical Control – počítačem řízený	[-]
D	kapsa s rozměry $67 \times 123 \times 36,5_{-0,5}^0$	[mm]
D_c	průměr nástroje	[mm]
D_m	naprogramovaný poloměr díry	[mm]
D_{vf}	naprogramovaný poloměr dráhy nástroje	[mm]
HSM	Hight Speed Machining – vysokorychlostní obrábění	[-]
L	délka vyložení nástroje	[mm]
M	metrický závit	[mm]
NC	Numerical Control – číslicově řízený	[-]
P_{mot}	výkon vřetene	[kW]
P_{mot1}	výkon vřetene při řezných podmínkách daných výrobcem nástroje	[kW]
P_{mot2}	výkon vřetene při snížených řezných podmínkách z hodnot daných výrobcem nástroje	[kW]
Q	množství úběru materiálu	[cm ³ /min]
Q_1	množství úběru materiálu při doporučených řezných podmínkách výrobcem stroje	[cm ³ /min]
Q_2	množství úběru materiálu při snížených řezných podmínkách z hodnot doporučených výrobcem nástroje	[cm ³ /min]
R	poloměr nástroje	[mm]
R_a	střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
R_z	výška nerovnosti profilu	[μm]
U	rozšířená kombinovaná nejistota	[μm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
XYZ	osy souřadného systému	[-]
a_e	radiální hloubka řezu	[mm]
a_{e1}	radiální hloubka řezu daná výrobcem nástroje	[mm]
a_{e2}	radiální hloubka řezu snížená z hodnoty danou výrobcem nástroje	[mm]

a_p	axiální hloubka řezu	[mm]
a_{p1}	axiální hloubka řezu daná výrobcem nástroje	[mm]
a_{p2}	axiální hloubka řezu snižená z hodnoty danou výrobcem nástroje	[mm]
f_{o1}	posuv na otáčku daný výrobcem nástroje	[mm]
f_{o2}	posuv na otáčku snižený z hodnoty danou výrobcem nástroje	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
f_{z1}	posuv na zub daný výrobcem nástroje	[mm]
f_{z2}	posuv na zub snižený z hodnoty danou výrobcem nástroje	[mm]
h	hloubka kapsy	[mm]
h_m	střední tloušťka třísky	[mm]
k	poměr mezi skutečným strojním časem a teoretickým	[-]
k_c	specifická řezná síla	[N/mm ²]
k_{ua}	koefficient rozšíření	[-]
m_c	nárůst křivky k_c	[-]
n	otáčky vřetene	[min ⁻¹]
p	pravděpodobnost	[%]
t_s	skutečný strojní čas	[min]
t_{s1}	skutečný strojní čas získaný použitím řezných podmínek doporučených výrobcem nástroje	[min]
t_{s2}	skutečný strojní čas získaný snížením doporučených řezných podmínek dané výrobcem nástroje	[min]
t_t	teoretický strojní čas	[min]
t_{t1}	teoretický strojní čas jedné operace získaný použitím řezných podmínek doporučených výrobcem nástroje	[min]
t_{t1c}	celkový teoretický strojní čas získaný použitím řezných podmínek doporučených výrobcem nástroje	[min]
t_{t2}	teoretický strojní čas jedné operace získaný snížením doporučených řezných podmínek dané výrobcem nástroje	[min]
t_{t2c}	celkový teoretický strojní získaný snížením doporučených řezných podmínek dané výrobcem nástroje	[min]
u_a	standardní nejistota typu A	[μm]
u_b	Standardní nejistota typu B	[μm]
u_{b1}	nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu	[μm]
u_{b2}	nejistota měřicího přístroje	[μm]
u_c	kombinovaná standardní nejistota	[μm]

v_c	řezná rychlost	[m/min]
v_{c1}	řezná rychlost daná výrobcem nástroje	[m/min]
v_{c2}	řezná rychlost snížena z dané hodnoty výrobce nástroje	[m/min]
v_f	rychlost posuvu	[mm/min]
v_{fm}	posuv na obvodu nástroje	[mm]
\bar{x}	střední hodnota	[μm]
x_i	naměřená hodnota	[μm]
z	počet zubů nástroje	[-]
κ_r	úhel nastavení nástroje	[$^\circ$]
w	radiální rozteč	[mm]
α	úhel zafrézování nástroje	[$^\circ$]
γ_o	úhel čela v ortogonální rovině	[$^\circ$]
η	účinnost stroje	[%]
*.stp	přípona modelu součásti vytvořeného ve formátu STEP	[-]

Úvod

V posledních letech dochází ke změnám kladených na obrábění materiálů. Zvyšují se požadavky na přesnost a výkonost CNC strojů, obrobky jsou stále složitější a nákladnější. Společnosti jsou nuceny minimalizovat náklady na personál, na výrobu, a navíc jsou vystaveny časovému omezení pro výrobu jednotlivých součástí.

Společnosti jsou tedy nuceny neustále hledat nové metody pro splnění těchto požadavků, aby si i po určité době zachovaly hospodárnost výroby. Jednou z nich může být použití CAM systémů, které vytvářejí nové strategie pro určité typy obrobků za použitých nástrojů, čímž vlastně optimalizuje přechody nástroje po obráběné ploše. Díky tomu lze jednotlivé strategie mezi sebou porovnávat a určovat, která použitá strategie na určitém obrobku může omezit opotřebení nástroje a významně snížit strojní časy.

Jako například lze použít obrábění strategiemi kruhových interpolací, které jsou vhodné pro výrobu hlubokých drážek a kapes a přičemž zvyšují životnost nástrojů.

Práce byla původně zaměřena na frézování drážek, ale během vypracovávání se vyskytla možnost zabývat se problematikou frézování kapes, která se nacházela ve společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o.

Diplomová práce se zabývá návrhem nové hrubovací skupinové technologie frézování na zadaných kapsách s cílem snížit strojní časy při výrobě. Tato práce může také sloužit jako návodka výroby kapes pro technology.

Jeden z hlavních úkolů práce je vybrání nejvhodnějších nástrojů a strategií z CAM systému Mastercam 2017 a následně vyrobít kapsu na zadaném materiálu. Během obrábění zjistit teoretické časy vygenerované z CAM systému a časy skutečné dosažené na obráběcím stroji, na kterém se daná kapsa bude obrábět. Dále se tato práce zabývá popisem jednotlivých strategií frézování kapes a drážek, obsažených v programu Mastercam 2017 a teoretickým porovnáním různých způsobů při výrobě kapes. Poslední kapitola se zabývá vyhodnocením výsledků a návrhů pro stanovení nové skupinové technologie obrábění pro zadané kapsy.

V práci je obsažena i experimentální část, ve které se obráběly drážky nástrojem s měnící se hodnotou axiálního řezu při frézování a zkoumalo se, zda vybrané použité strategie budou mít vliv na přesnost a drsnost těchto drážek.

1 Zvyšování přesnosti frézování a drsnosti obrobeného povrchu

K dosažení určité předepsané přesnosti rozměrů a drsnosti povrchů nebo jejich zvýšení je nutno použít efektivnějších strojů a nástrojů. S tím souvisí vhodná volba technologie výroby součásti, volba optimálních řezných podmínek a správné využití obráběcích nástrojů pro jednotlivé strategie obrábění. Ve většině případů na konečnou jakost obrobku má největší vliv dokončovací operace. Tato práce se hlavně zabývá strategiemi výroby drážek a kapes a strojními časy spojenými s procesem obrábění. Proto se tato kapitola zabývá způsoby strategií obrábění kapes a drážek.

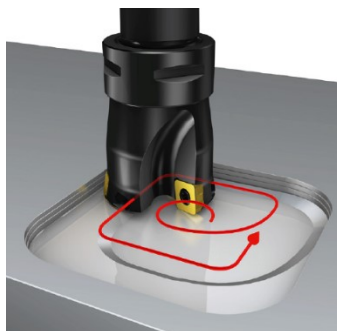
1.1 2osé lineární zahlubování a zahlubování pomocí kruhové interpolace

Lineární zahlubování se používá pro vstup do místa obrábění při obrábění uzavřených drážek, dutin nebo kapes. Tento způsob eliminuje použití vrtáků. Pohyb nástroje lze definovat jako současný posuv nástroje v ose Z (v axiálním směru) a v ose X nebo Y (v jednom z radiálních směrů) ⁷.

Lze použít i výhodnější metodu, a to metodu zahlubování pomocí šroubové interpolace, která umožňuje významně omezit velikost radiálního záběru a tím umožnit čistě sousledného frézování (dráha nástroje proti směru hodinových ručiček) a lepšího odvodu třísek. Jedná se o současný pohyb osy X a Y po kruhové dráze spolu s axiálním posuvem Z o určitou hodnotu stoupání ⁷.

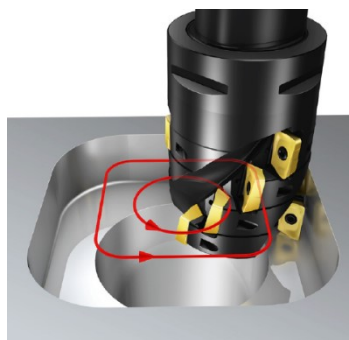
1.2 Vytvoření, zvětšení dutiny nebo kapsy

Pro tyto operace se používají dvě hlavní strategie. První strategie je postupné zahlubování pomocí šroubové interpolace s malou hodnotou axiálního řezu a_p . Používají se frézy s malým úhlem nastavení nebo frézy pro vysoké posuvové rychlosti (až 4 mm/zub). Velikost hloubky axiálního řezu je sice omezená na méně než 2 mm, ale díky velké rychlosti posuvu se tato metoda stává vysoce produktivní. Lze také použít frézy s kruhovými břitovými destičkami. Tato strategie je vhodná pro méně stabilní stroje a pro výrobu dutin se členitým tvarem, např. formy a zápustky. Při této strategii je vhodné se vyhnout obrábění stěn, které svírají úhel 90°, protože při tomto obrábění dochází ke ztrátě malého úhlu nastavení a tím se hloubka řezu změní ⁷.



Obrázek 1 – Postupné zahloubení pomocí šroubové interpolace s malou hodnotou axiální hloubky řezu a_p ⁷

Druhá strategie frézování pomocí kruhové interpolace využívá velké hodnoty a_p . Postup je následný, nejprve se vyvrtá díra, vymění se nástroj za stopkovou frézu pro frézování do rohu nebo s dlouhými břity. Při této metodě je vhodné zajistit dobré odvádění třísek, které se v místě řezu hromadí. S odvodem třísek také souvisí vysokotlaký přívod řezné kapaliny nebo přívod stlačeného vzduchu. Tyto přívody mohou být realizovány středem nástroje. Samotné řezání v předvrtané díře by mělo probíhat po kruhové interpolaci a při obrábění rohů volit co největší možný poloměr dráhy se spirálovým tvarem⁷.



Obrázek 2 – Postupné zahloubení pomocí šroubové interpolace s velkou hodnotou axiální hloubky řezu a_p ⁷

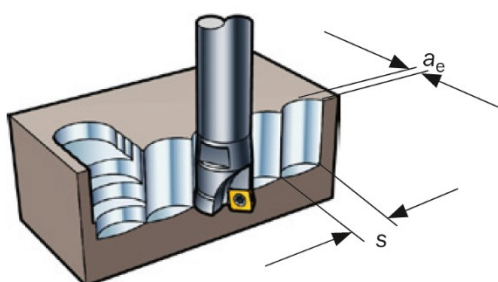
1.3 Ponorné frézování

Ponorné frézování umožňuje provádět řez na čele nástroje, kde dochází ke změně charakteru řezných sil. Radiální síly se mění na síly axiální. Tato metoda se používá v případě, kdy není možné použít frézování obvodem vzhledem ke vzniku vibrací nebo v případě, že existují omezení výkonu stroje nebo točivého momentu. Jedná se o případy, kdy vyložení nástroje přesahuje $4 \times D_c$ frézy, špatné stability, pro polodokončovací operace v rozích nebo pro obrábění materiálu jako např. titan, které jsou obtížně obrobitelné. Tato metoda by se neměla volit jako první volba, protože při ní dochází k nízkým rychlostem úběru materiálu⁷.

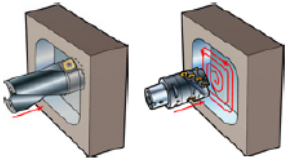
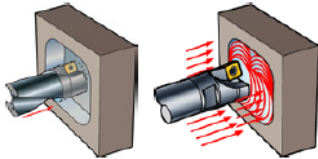
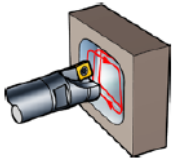
Pro tuto metodu obecně platí ⁷:

- 1) zabezpečit odvod třísek stlačeným vzduchem nebo pomocí řezné kapaliny,
- 2) v záběru by měl být vždy více než jeden zub,
- 3) v porovnání s tradičními metodami tato metoda vyžaduje menších velikostí posuvu na zub,
- 4) používání fréz s velmi jemnou zubovou roztečí,
- 5) postupné snižování velikosti hloubky ponoru nástroje, aby se zamezilo vibracím.

Tato metoda nachází využití při frézování neodebraného zbytkového materiálu v rozích po hrubování s úhlem 90° ⁷.



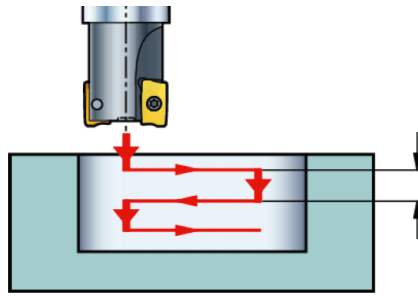
Obrázek 3 – Ponorné frézování ⁷

Vrtání + frézování kruhovou interpolací	Vrtání + ponorné frézování	Postupné zahlubování kruhovou interpolací
 <p>Výhody</p> <ul style="list-style-type: none"> + Vysoká rychlost úběru kovu u neokružovitých otvorů + První volba pro titanové konstrukční prvky trupů letadel <p>Nevýhody</p> <ul style="list-style-type: none"> - Je nutná stabilita stroje - Odvádění třísek – horizontální stroje - Při programování je zapotřebí pečlivost 	 <p>Výhody</p> <ul style="list-style-type: none"> + Řešení problémů u aplikací s dlouhým vyložení nástroje + Jednoduché programování vyhovující pro starší/víceřetenové stroje 	 <p>Výhody</p> <ul style="list-style-type: none"> + Menší množství nástrojů – není zapotřebí vrtání + Flexibilita – pro široký rozsah rozměrů + Není nutné použití řezné kapaliny – vhodná pro otevřené stroje + Vhodná pro všechny koncepce strojů a jakékoli uspořádání <p>Nevýhody</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nižší produktivita u velkých dutin

Obrázek 4 – Porovnání tří metod výroby kapes ⁷

1.4 Zavrtávací frézování

Tuto metodu lze chápat jako alternativu k postupnému zahlubování. Metoda však vyžaduje velký výkon, během obrábění se tvoří dlouhé třísky a vznikají nežádoucí síly řezání na nástroj. Z tohoto důvodu se tato metoda používá v případech, když stroj neumožňuje použití postupného zahloubení, nebo je-li obráběná drážka uzavřená a velmi úzká ⁷.



Obrázek 5 – Zavrtávací frézování ⁷

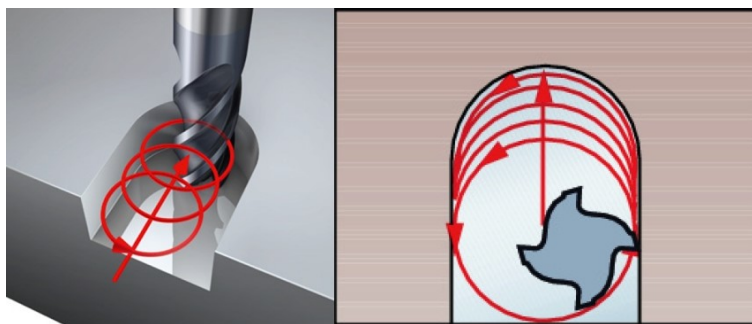
1.5 Metody odřezávání tenkých vrstev

Tyto metody frézování se původně používaly pro hrubování obtížně obrobitelných materiálů, ale jejich použití se rozšířilo i pro ostatní materiály, kde dochází k vibracím. Metody jsou založeny na využití malých hodnot a_e a díky tomu vznikají malé radiální řezné síly a otevírá možnost použití velkých radiálních hloubek řezu a_p a použití vyšších řezných rychlostí. V záběru je vždy jen jeden zub, proto se snižuje možnost výskytu vibrací ⁷.

Tyto metody jsou osvědčené jako bezpečné a produktivní a dělí se na trochoidální frézování, které se používá hlavně pro frézování drážek, a na metodu frézování metodou tenkých řezů nacházející uplatnění při polodokončování rohů ⁷.

1.5.1 Trochoidální frézování

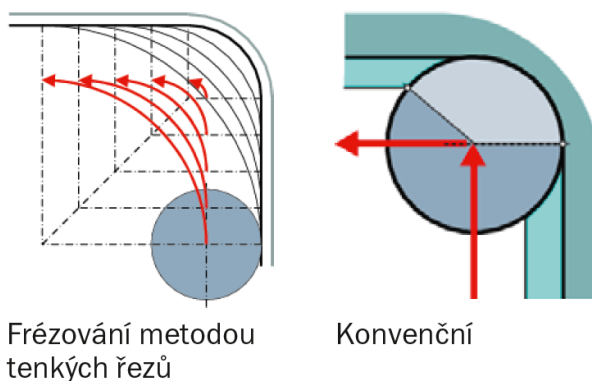
Metoda trochoidálního frézování je definována jako frézování po kruhové interpolaci se současným posuvem nástroje vpřed. Fréza postupuje po spirálové dráze a zároveň odebrává tenké plátky materiálu. Nástroj najíždí a vyjíždí ze záběru odvalovacím způsobem, což má za následek udržování nízké hodnoty radiální rozteče w . Nízká hodnota radiální rozteče přináší malé řezné síly a lze tedy použít velké hodnoty axiálního řezu a_p ^{7,8}. Během procesu obrábění je využívána celá délka ostří, což znamená, že teplo a opotřebení nástroje jsou v rovnoměrném rozdělení, a tedy životnost nástroje se prodlouží. Při této metodě se používají mnohabřité nástroje, které umožňují použití vysokých rychlostí posuvu a řezných rychlostí, které jsou oproti konvenčním metodám až desetinásobné. I přes tyto vlastnosti je životnost nástroje zaručena ⁷.



Obrázek 6 – Trochoidální frézování ⁷

1.5.2 Metoda odřezávání tenkých vrstev – frézování rohů

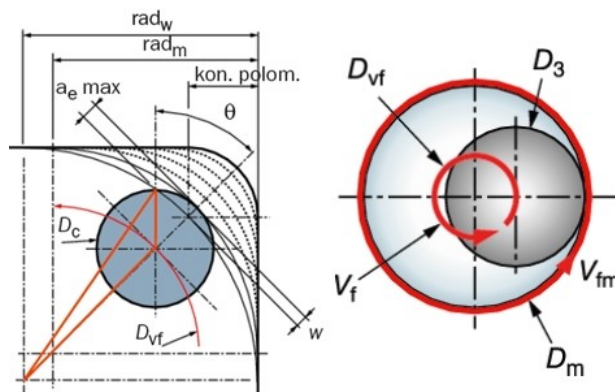
V porovnání této metody s metodou trochoidálního frézování není zde nutný odvalovací nájezd nebo výjezd z řezu, protože radiální hloubka řezu od nuly narůstá do maxima a následně opět klesá k nule. Postupné odebrání materiálu probíhá vícenásobnými průchody a hodnota úhlu záběru je trvalá a nízká ⁷.



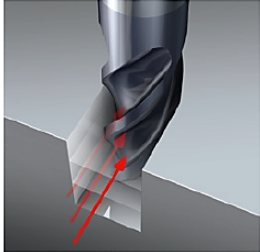
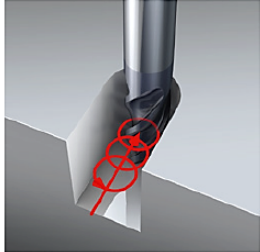
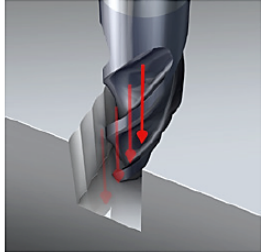
Obrázek 7 – Porovnání frézování rohů metodou tenkých řezů a konvenční metodou ⁷

Kritéria ⁷:

- rychlost posuvu středu nástroje v_f , je nutno snížit v závislosti na rychlosti posuvu na obvodu nástroje v_{fm} , aby byla zachována konstantní velikost posuvu na zub,
- poměr mezi naprogramovaným poloměrem dráhy nástroje D_{vf} a poloměrem díry D_m konstantně narůstá směrem ke konečnému poloměru rohu, to má za následek, že rychlost posuvu je nutno pro každý další průchod postupně snižovat,
- objevují se vibrace, protože proces se stává nestabilním,
- pro úspěšné frézování vnitřních rohů je nutno použít obráběcí stroj, který je vybaven dobrou dynamickou stabilitou a kontrolovaným snížením rychlosti posuvu středu nástroje.



Obrázek 8 – Schéma parametrů při frézování rohů metodou odřezávání tenkých vrstev ⁷

Konvenční frézování drážek	Trochoidální frézování	Ponorné frézování
		
<ul style="list-style-type: none"> + Lze použít konvenční 3-osé stroje + Vysoká rychlost úběru kovu za stabilních podmínek + Jednoduché programování + Široký sortiment nástrojů - Vznikají velké radiální řezné síly - Citlivost na vibrace – u hlubokých drážek je zapotřebí opakovaných průchodů 	<ul style="list-style-type: none"> + Vznikají malé radiální řezné síly - menší citlivost na vibrace + Minimální průhyb při frézování hlubokých drážek + Produktivní metoda pro: <ul style="list-style-type: none"> • obrábění tvrdých ocelí a HRSA (ISO H a S) + Průměr frézy by měl být maximálně 70% šířky drážky, D_c + Dobré odvádění třísek + Vzniká malé množství tepla - Je třeba náročnější programování 	<ul style="list-style-type: none"> + Řešení problémů v aplikacích citlivých na vibrace: <ul style="list-style-type: none"> • s dlouhým vyložení nástroje • při frézování hlubokých drážek • s malou tuhostí stroje nebo nástrojové sestavy - Nízká produktivita za stabilních podmínek - Je nutné začišťování/dokončování - Při frézování čelem nástroje mohou vznikat potíže s odváděním třísek - Omezený sortiment nástrojů

Obrázek 9 – Porovnání tří různých metod frézování drážek ⁷

2 Výskyt problémů při frézování a jejich řešení

2.1 Hromadění třísek

Tento problém se často vyskytuje při frézování drážek v případě, kdy obráběný materiál tvoří dlouhou třísku. Dochází zde k poškození rohů břitové destičky, k vylamování břitů a celkový lom a k přerézávání třísek ⁷.

Řešení spočívá v několika možnostech, a to v dokonalém odvádění třísek pomocí rezné kapaliny nebo stlačeného vzduchu, snížením posuvu f_z , rozdělení hloubky řezu do několika průchodů, použití nesousledného frézování při hlubokých drážkách, použití frézy s hrubou zubovou roztečí ⁷.

2.2 Přerézávání třísek

Výskyt problému při frézování drážek a dutin do plného materiálu, hlavně u obrábění titanu. Tento jev je velmi škodlivý pro životnost nástroje a spolehlivost procesu a dochází zde k lomu břitů ⁷.

Pro zabránění daného problému je nutné efektivní odvádění třísek pomocí stlačeného vzduchu nebo velkého množství řezné kapaliny přiváděného středem nástroje. Dále změněním strategií programování a polohy frézy, snížením posuvu f_z a rozdělením velkých hloubek řezu do několika menších ⁷.

2.3 Neuspokojivá kvalita obrobeného povrchu

Tato problematika má několik příčin a každá daná příčina má vlastní řešení.

2.3.1 Příliš vysoká hodnota posuvu na otáčku

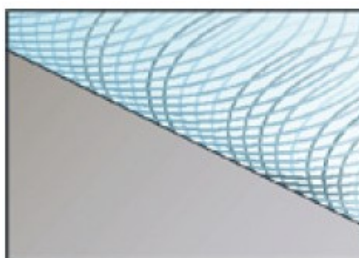
Hodnota může být zapříčiněna házením vřetena a upínací plochou frézy. Pokud je to možné, používat při obrábění hladící břitové destičky ⁷.

2.3.2 Tvorba nárůstku na břitu

Řeší se zvýšením teploty v řezu zvýšením řezné rychlosti v_c , vypnutím přívodu řezné kapaliny, použitím VBD s ostrými břitů s hladkou plochou čela s pozitivní geometrií destiček. Jako další variantu lze použít cermetových destiček při vyšších řezných podmínkách ⁷.

2.3.3 Záběr vedlejšího ostří (podřezávání)

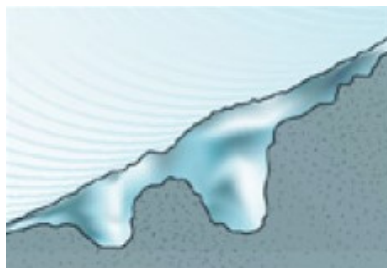
Kontrolovat správný sklon vřetena. Sklon vřetena by měl být přibližně 0,10 mm/1000 mm. Situaci lze řešit snížením hodnoty axiální hloubky řezu a_p , zvolením frézy o menším průměru. Důležité také je pevné upnutí frézy a rovnoběžnost paralelních zábřítů a hladících břitů na použitých břitových destičkách ⁷.



Obrázek 10 – Záběr vedlejšího ostří ⁷

2.3.4 Vydrolování povrchu obrobku

Příčina může být zapříčiněna velkou hodnotou posuvu f_z , proto je vhodné používat při obrábění frézy s jemnou zubovou roztečí, volit vhodnější úhel nastavení (45°) a ostrou VBD. Vydrolování lze předejít i zabráněním obrábění nástroje s opotřebovaným hřbetem ⁷.



Obrázek 11 – Vydrolování povrchu obrobku ⁷

2.4 Vibrace

Vibrace vznikají při frézování hlubokých tvarových ploch za použití velkého vyložení nástrojů, které se značí poměrem L/D_c ^{7 8}.

Podle poměru vyložení nástroje lze riziko vibrací dělit na 4 skupiny ⁸:

- méně než 3: žádné vibrace,
- méně než 6: riziko vibrací,
- méně než 9: vibrace,
- více než 9: vibracím nelze u běžného nástroje zamezit.

2.4.1 Vibrace podle směru výslednice řezných sil

V případě čelního frézování za použití fréz s úhlem nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 90^\circ$, jsou hlavní řezné síly v radiálním směru a za dlouhého vyložení nástroje dochází k průhybu frézy. Tyto malé axiální síly jsou vhodné pro frézování součástí citlivých na vibrace ⁷. U nastavení $\kappa_r = 45^\circ$ jsou axiální a radiální řezné síly rozloženy rovnoměrně ⁷. U fréz vybavenými kruhovými VBD nebo s úhlem nastavení $\kappa_r = 10^\circ$ vznikají řezné síly ve směru proti vřetenу, což má za následek omezení vznikání vibrací z důvodu velkého vyložení nástroje ⁷.

2.4.2 Předcházení vibrací

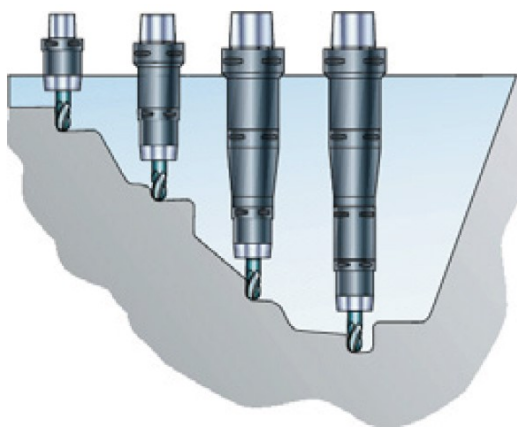
Vibracím lze předejít několika způsoby. Např. zvolit pro každou aplikaci nejmenší možný průměr frézy, která by měla mít průměr o 20–50 % větší než radiální hloubka řezu a_e , nebo používat frézy s nízkou hmotností s hliníkovým tělem ⁷. Další příčinou vibrací je zvolení nesprávné zubové rozteče frézy. Proto je nutné volit hrubou nebo nerovnoměrnou

zubovou rozteč⁷. Pokud celkové vyložení nástroje přesáhne 4–5násobek průměru, pak lze použít prodlužovací nástavce s vnitřním tlumením. Dané nástavce se volí s největším možným průměrem vzhledem k průměru frézy. Pracují-li otáčky vřetena nad 20 000ot/ min, používají se vyvážené nástroje a nástrojové držáky⁷. Mezi další způsoby snížení rizika vibrací patří snížení posuvu, změna rychlosti, snížení axiálních hloubek řezů a použití nástrojů s kuželovým tělem. Snížení axiální hloubky řezu v závislosti na vyložení lze vyčíst z následující tabulky⁸.

Tabulka 1 – Zvolení hloubky řezu v závislosti vyložení nástroje⁸

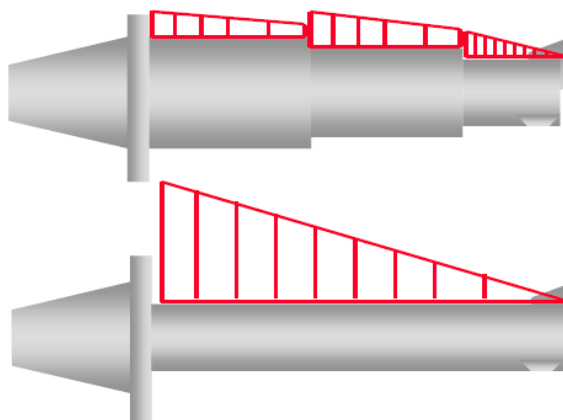
Vyložení nástroje	Hloubka řezu a_p [mm]
$2 \times D_c$	a_p
$3 \times D_c$	$a_p/4$
$4 \times D_c$	$a_p/10$

Při samotném procesu obrábění hlubokých rozměrů s použitím prodlužovacích nástavců se obrábění začíná vždy s nejkratším prodlužovacím adaptérem a postupně se mění za adaptéry delší, protože při použití delších adaptérů se omezuje produktivita a zvyšuje se možnost vzniku vibrací. Výměna adaptérů se provádí podle dané geometrie dutiny a pro jednotlivé délky nástrojů se následně volí přizpůsobené podmínky tak, aby se dosáhlo maximální možné produktivity⁷.



Obrázek 12 – Volba prodlužovacích adaptérů v závislosti na dané geometrii obráběné dutiny⁷

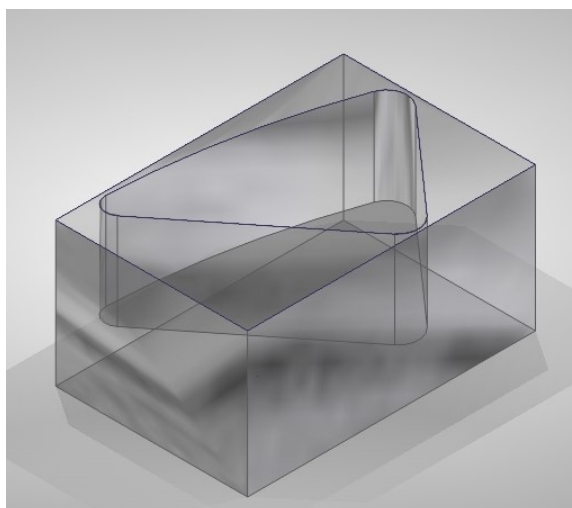
Na obrázku níže je znázorněno, jakým způsobem může konstrukce nástrojového systému ovlivnit velikost vibrací. U systému s odstupňovanými segmenty je výsledný točivý moment rozložen do jednotlivých segmentů a díky tomu také odolnější vůči vibracím.



Obrázek 13 – Velikost vibrací podle konstrukce nástrojového systému ⁸

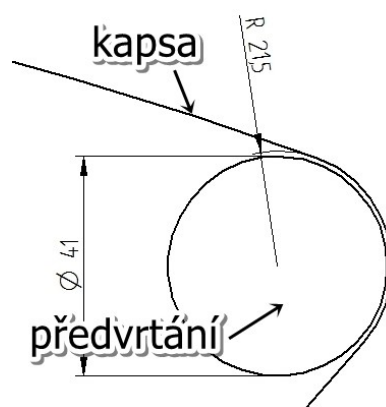
2.4.3 Příklad postupu frézování hluboké kapsy

Na zadané trojúhelníkové kapse hloubky $h = 100$ mm se provedl proces hrubování a během něho se postupně měnily radiální hloubky řezu v závislosti na vyložení nástroje, aby se předešlo vibracím.



Obrázek 14 – Model hluboké kapsy

Kapsa je vybavena se zaoblenými rohy, které bylo nutno před samotným obráběním odvrtat z důvodu bezpečnějšího průběhu frézování. Rohy byly předvrtány vrtákem o průměru menším, než je zaoblení rohů, tak aby zůstal přídavek na obrábění 1 mm viz Obrázek 15. Problémy při frézování rohů jsou detailněji rozepsány v následující podkapitole.



Obrázek 15 – Předvrtání rohu trojúhelníkové kapsy

Pro teoretické hrubování byla použita fréza o průměru 25 mm (dále již nástroje označovány písmenem D_c a rozměrem v milimetrech) s přídávky na dno a stěny 1 mm použitím strategie kruhové interpolace s názvem dynamické frézování. Jednotlivé nástroje a řezné podmínky jsou obsaženy v příloze.

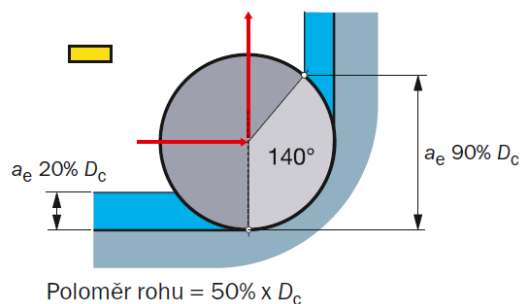
Tabulka 2 – Vyložení nástroje během hrubování

Vyložení nástroje L [mm]	Hloubka obrábění h [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]
52	50	30
75	72,5	7,5
100	96,5	3
102	100	2

2.5 Výskyt problémů při frézování rohů

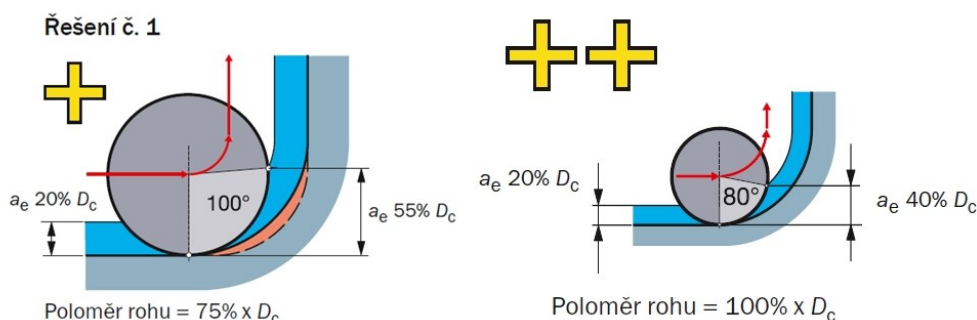
Při obrábění rohů je nutno pečlivě zvážit velikosti úhlů záběru frézy a přiměřenou rychlost posuvu. Najíždí-li fréza během obrábění do vnitřního rohu, zvětšuje se radiální oblouk záběru, což mimořádně ovlivňuje břit nástroje. Během řezu často dochází ke ztrátě stability řezného procesu, vzniku vibrací a snižuje se bezpečnost při obrábění. Dochází tak ke kolísání řezné síly, a tak může často docházet k vylamování břitů nebo celkového lomu nástroje ⁷.

Při tradičním frézování rohu dosahuje radiální hloubka řezu až 90 % průměru obráběcího nástroje a úhel záběru může dosáhnout velikosti až 140°. Proto je tento způsob nevyhovující ⁷.



Obrázek 16 – Frézování rohů při tradičním frézování ⁷

Řešení vzniklé situace při obrábění rohů spočívá ve zmenšení velikosti oblouku záběru a velikosti radiálního řezu. Toto zmenšení lze docílit využitím frézování kruhovou interpolací, dosáhne se tak ke snížení vibrací a umožní následné použití větších axiálních hloubek řezů a rychlostí posuvu. Samotné frézování se provádí tak, aby poloměr rohu odpovídal hodnotám v rozsahu 75–100 % průměru nástroje (Obrázek 17). Nástroj bude následně plynule odebrat materiál, poškození rohů a nástroje bude minimální ⁷.



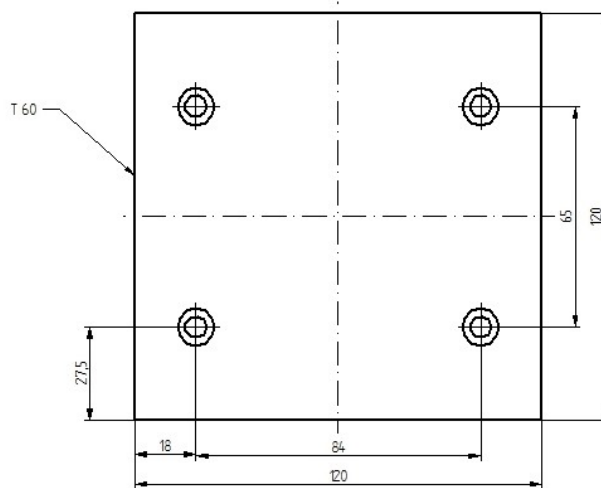
Obrázek 17 – Optimální volba nástroje vzhledem k obráběnému rohu dutiny ⁷

3 Frézování drážek

Jednalo se o experiment, ve kterém se zkoumaly vybrané parametry drsnosti a rozměrové přesnosti drážek pomocí obrábění monolitní frézou s měnící se axiální hloubkou řezu. Frézování probíhalo na dvou polotovarech z materiálu S355J2+N o rozměrech $120 \times 120 \times 60$ mm, do kterého se navrtaly díry se zahloubením pro upnutí polotovaru na dynamometr pomocí šroubu $M6 \times 8/12$ viz Obrázek 18. Označení S355J2+N znamená hodnotu zkoušky rázem v ohybu při -20 °C/40 J.

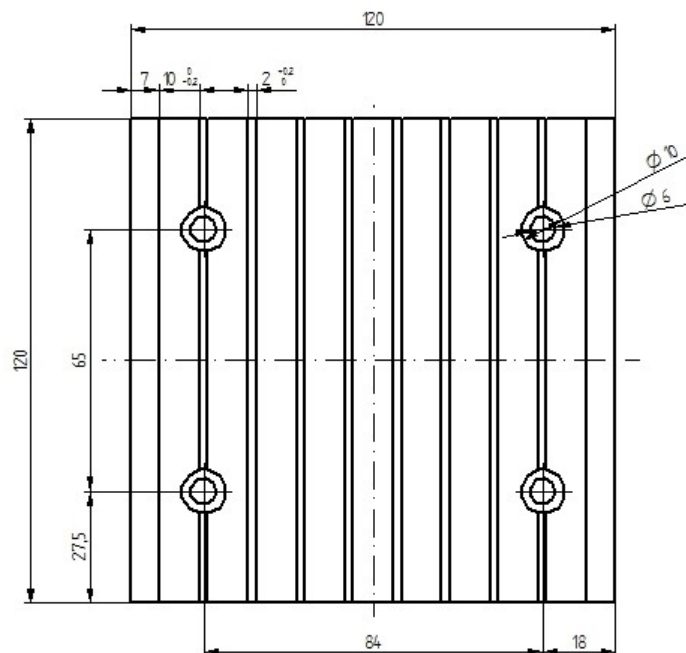
Tabulka 3 – Přehled vlastností oceli S355J2+N ²

C	Mn	Si	P	S	R_e	R_m
[hmot. %]	[hmot. %]	[hmot. %]	[hmot. %]	[hmot. %]	[MPa]	[MPa]
0,23	1,7	0,6	0,035	0,035	275 ÷ 355	450 ÷ 630



Obrázek 18 – Polotovár s předvrtanými díry pro frézování drážek

Na jeden polotovár mělo být vyfrézováno 9 drážek o rozměrech $10_{-0,2}^0$ mm a na druhý polotovár drážek 5, žebra mezi jednotlivými drážky měla mít rozměry $2_{0}^{+0,2}$ mm.



Obrázek 19 – Model polotovaru pro frézování drážek


Drážky byly frézovány třemi strategiemi, třemi druhy upínačů a nástrojem D_c 6 s označením ECL-H7-CF 7 od firmy Iscar. Frézování probíhalo sousledně ve dvou osách s nakloněním pracovního stolu pod úhlem $\alpha = 2,8642^\circ$ tak, aby nástroj najížděl do materiálu v axiálním řezu $a_p = 6$ mm a končil řez na $a_p = 12$ mm. Jednalo se o strategii podle dvou řídicích křivek, kdy dráhy nástroje připomínaly hřeben, proto se dále pro tuto strategii bude používat označení „hřeben“. Druhá metoda byla dynamická s názvem „slupky“ a poslední způsob frézování byly dráhy vygenerované technologií iMachining v programu SolidWorks. Po procesu obrábění danými strategiemi následoval cyklus s názvem „standardní kapsa“ jako cyklus dokončovací pro úpravu konečných rozměrů.

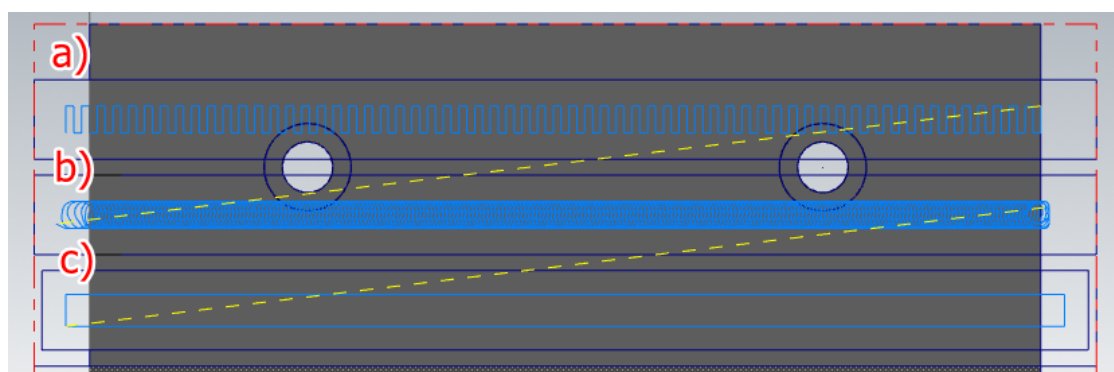
Tento cyklus se prováděl za stejného způsobu upnutí, jako byl při frézování drážky danou strategií. Nástroje byly upnuty pomocí kleštiny a pomocí hydraulického a tepelného upínače. Každou strategií a upínačem se frézovaly 2 drážky vedle sebe z důvodu lepšího porovnání rozměrů drážek, žeber mezi drážkami a parametrů drsnosti na dně drážek. Jednotlivé dráhy nástrojů byly naprogramovány v programech MasterCam 2017 a SolidWorks technologií iMachining, model obrobku byl zhotoven v CAD programu Solid Edge ST4. Po procesu frézování se porovnávaly skutečné strojní časy se strojními časy vygenerovanými CAM programy a jednotlivé drážky ohledně parametrů drsnosti a rozměrů. Rozměry drážek se kontrolně měřily z důvodu případné deformace drážek vzniklých při dynamice frézování nebo teploty.

Tabulka 4 – Doporučené řezné podmínky frézy Iscar ECL-H7-CF ³

D _c [mm]	a _p [mm]	a _e [mm]	z [-]	Dokončení [mm]		HSM [mm]		v _c [m/min]
				f _z (min.)	f _z (max.)	f _z (min.)	f _z (max.)	
6	24	1,5	7	0,02	0,04	0,08	0,15	250 ± 300

Tabulka 5 – Použité řezné podmínky frézy Iscar ECL-H7-CF 7

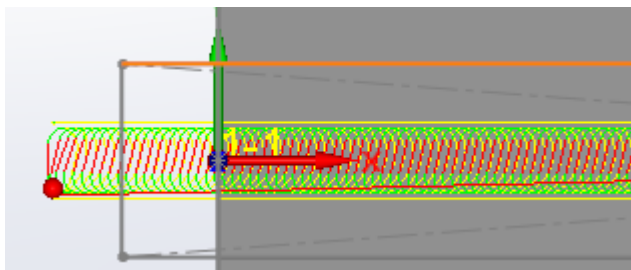
obrázek	operace	D _c [mm]	z [-]	f _z [mm]	v _c [m/min]
	hrubování	6	7	0,08	250
	dokončování	6	7	0,03	250



Obrázek 20 – Použité strategie frézování drážek z programu Mastercam

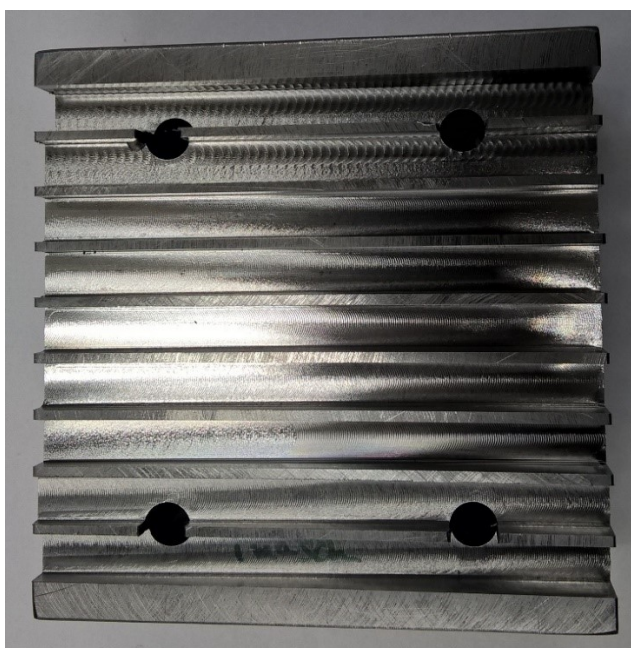
Strategie hřeben (Obrázek 20[a)) je podobná strategii oboustranným obrábění kapes viz. kapitola 4.3 zabývající se strategiemi obrábění kapes níže. Z důvodu vysoké rychlosti obrábění a velkého namáhání nástroje, byla dále tato strategie vynechána. Při frézování slupkovou strategií (Obrázek 20 [b)), se nástroj pohybuje po spirálové dráze a odebírá materiál ve formě krátkých třísek. Díky těmto vlastnostem tato strategie snižuje vibrace při obrábění a je vhodná pro obrábění úzkých drážek nebo dutin. Jako třetí strategie byla použita metoda „kapsy“ (Obrázek 20 [c)), která sloužila jako dokončení obrábění po předešlých

dvou strategiích a nástroj vytváří dráhy nástroje kopírováním nastaveného obráběného profilu programátorem. Poslední strategie byla naprogramována pomocí Imachiningu. Dráha nástroje byla podobná slupkové strategii z programu Mastercam 2017 viz Obrázek.



Obrázek 21 – Dráhy nástroje zhotoveny technologií iMachinig

Již při vizuálním zkoumání byly jasně viditelné dráhy nástroje při frézování a bylo zřejmé, že jednotlivé drsnosti strategií se budou od sebe lišit viz Obrázek 22 a 23.



Obrázek 22 – Drážky po procesu frézování prvního kusu



Obrázek č. 23 – Drážky po procesu frézování druhého kusu

Jednotlivý postup frézování drážek je zobrazen v následující tabulce. Při frézování došlo ke zlomení 2 nástrojů, použité nástroje byly celkem 3, a to po frézování první drážky na kusu č. 1 (označení 1UP_1STR_DR1), a při frézování druhého kusu drážky tepelným upínačem pomocí strategie, která byla zhotovena v programu SolidWorks technologií iMachinig (3UP_3STR_DR2) viz Obrázek 20. Proto se tato drážka nebude zahrnovat jak při porovnání času obrábění, tak při porovnávání šířky drážky a šířky žebra mezi jednotlivými drážkami.

Tabulka 6 – Použité strategie při frézování drážek

Strategie č. 1	hřeben
Strategie č. 2	slupky
Strategie č. 3	iMachining SolidWorks
Dokončení	strategie kapsa

Tabulka 7 – Použité upínače při frézování drážek

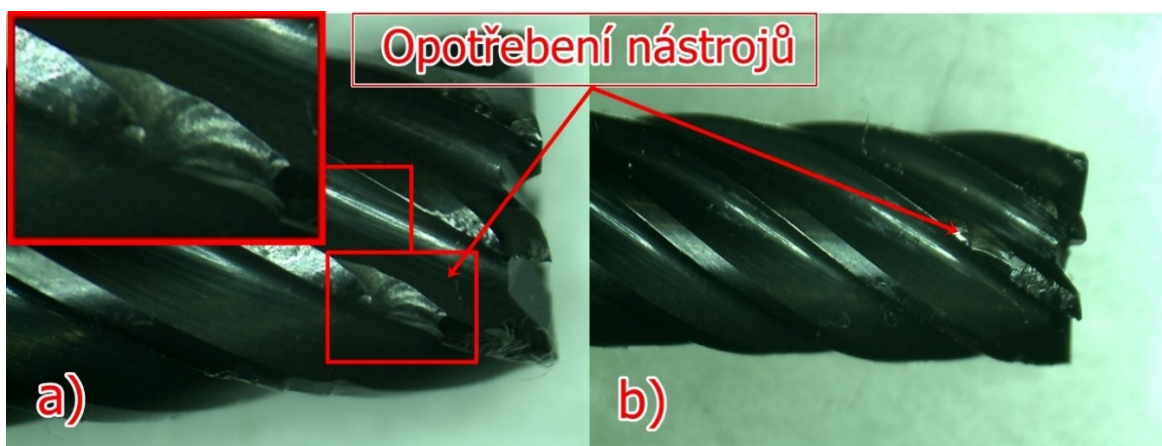
Upínač 1	kleština
Upínač 2	hydraulický upínač
Upínač 3	tepelný upínač

Tabulka 8 – Postup frézování drážek

Postup frézování drážek	t_s [s]	t_t [s]	k [-]	Poznámky
kus č. 1				
1UP_1STR_DR1	27,57	4,43	6,22	zlomení nástroje po obrobení drážky
1UP_1STR_DR1	27,56	4,43	6,22	
1UP_2STR_DR1	118,59	22,51	5,27	
1UP_2STR_DR2	118,75	22,51	5,28	
1UP_1STR_DR1_dokončení	5,80	5,96	0,97	
1UP_1STR_DR2_dokončení	5,80	5,96	0,97	
1UP_2STR_DR2_dokončení	5,80	5,96	0,97	
1UP_2STR_DR2_dokončení	5,80	5,96	0,97	
2UP_2STR_DR1	119,07	22,51	5,29	
2UP_2STR_DR1_dokončení	5,90	5,96	0,99	
2UP_2STR_DR2	118,92	22,51	5,28	
2UP_2STR_DR2_dokončení	5,76	5,96	0,97	
3UP_2STR_DR1	53,09	-	-	přerušeno, jiný upínač – důvod vibrace
3UP_2STR_DR1.1	115,08	22,51	5,11	dokončena vyměněným upínačem
3UP_2STR_DR1.1_dokončení	5,42	5,96	0,91	
2UP_3STR_DR1	126,95	87,00	1,46	špatná hloubka řezu
2UP_3STR_DR1_dokončení	13,05	11,56	1,13	Poloviční posuv na zub, $f_z = 0,015$ mm
2UP_3STR_DR1.1	126,95	87,00	1,46	nová drážka se správnou hloubkou řezu
2UP_3STR_DR1.1_dokončení	12,76	11,56	1,10	Poloviční posuv na zub, $f_z = 0,015$ mm
kus č. 2				
3UP_2STR_DR2	118,90	22,51	5,28	
3UP_2STR_DR2_dokončení	11,51	11,56	1,00	Poloviční posuv na zub, $f_z = 0,015$ mm
3UP_3STR_DR1	127,20	87,00	1,46	1
3UP_3STR_DR1_dokončení	12,58	11,56	1,09	Poloviční posuv na zub, $f_z = 0,015$ mm
3UP_3STR_DR2	62,94	-	-	zlomení nástroje
Zlomení - chybí dokončení	-	-	-	
1UP_3STR_DR1	127,50	87,00	1,47	
1UP_3STR_DR1_dokončení	17,05	11,56	1,47	Poloviční posuv na zub, $f_z = 0,015$ mm
1UP_3STR_DR2	127,45	87,00	1,46	
1UP_3STR_DR2_dokončení	12,80	11,56	1,11	Poloviční posuv na zub, $f_z = 0,015$ mm

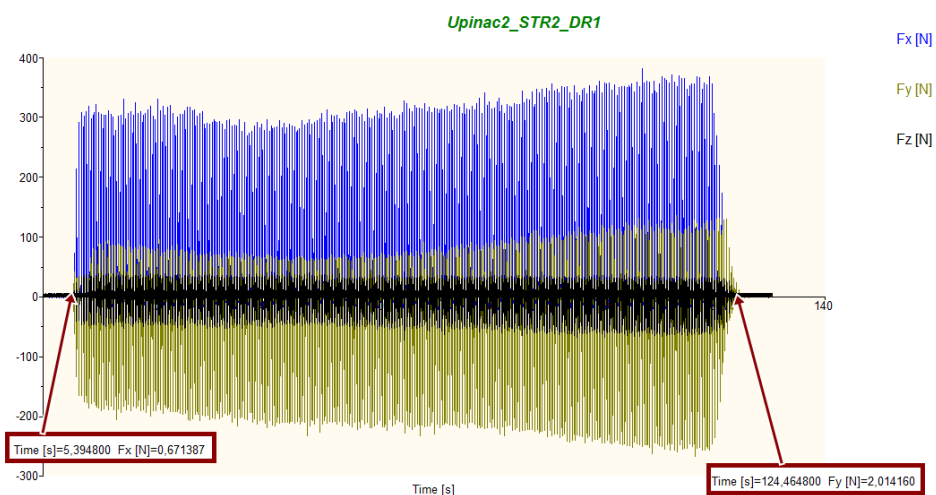
Během procesu obrábění se také kontroloval stav nástroje a jeho opotřebení pomocí mikroskopu. Značné opotřebení nástroje č. 2 (Obrázek 24 [a]) bylo změřeno po hrubování

drážky s názvem 1UP_STR_DR2_dokončení. Kontrola nástroje po celkovém procesu obrábění je znázorněna na Obrázku 24 b).

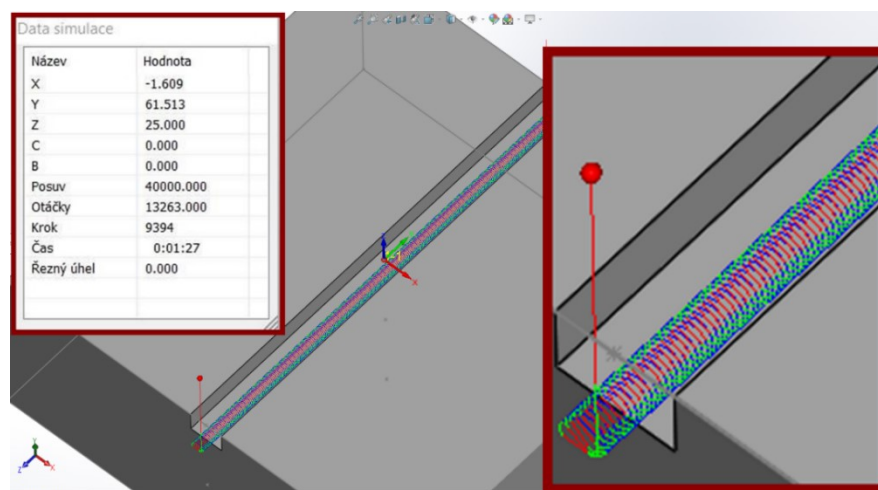


Obrázek 24 – Opotřebení nástrojů při obrábění drážek

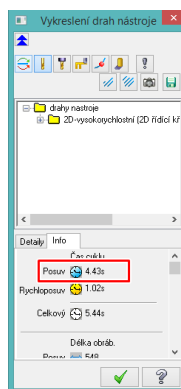
Skutečné časy byly stanoveny z dynamometru a z programu DynoWare, který měřil síly a časy při frézování. Čas obrábění byl dosažen rozdílem posledního a konečného okamžiku obrábění.



Obrázek 25 – Stanovení skutečného řezného času během obrábění drážek



Obrázek 26 – Stanovení teoretického času obrábění z programu SolidWorks

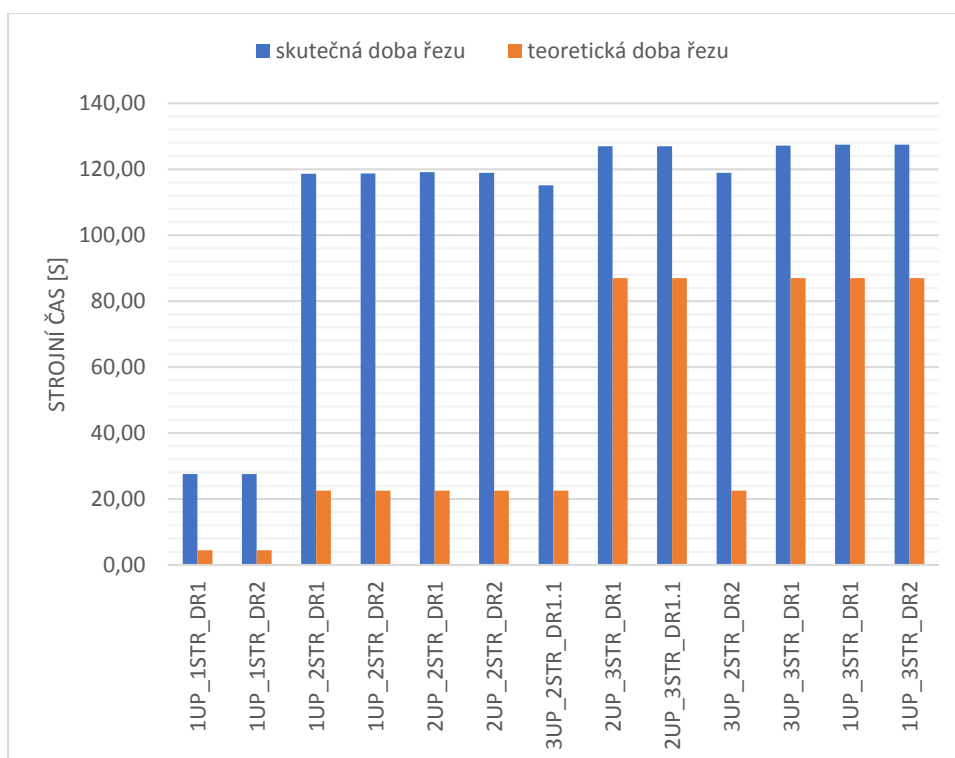


Obrázek 27 – Stanovení teoretického času obrábění strategie hřebenu z MasterCamu

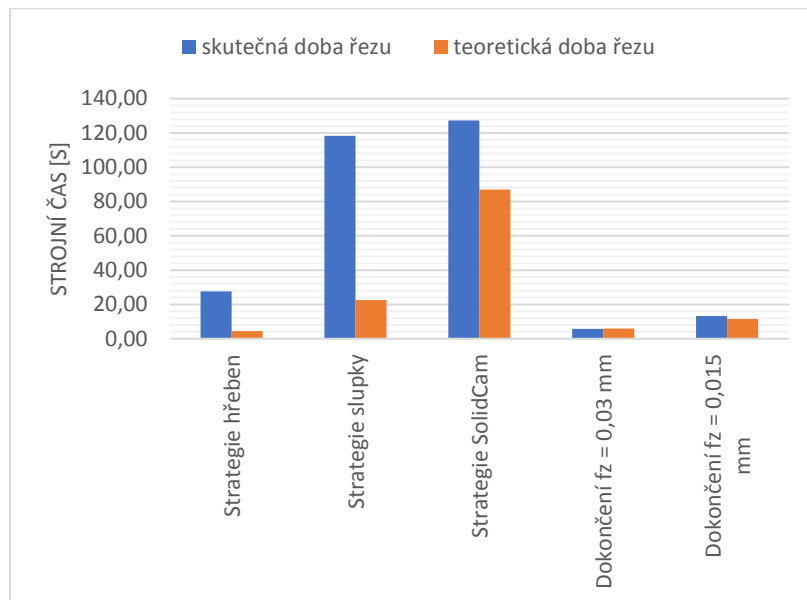
3.1 Zhodnocení časů při obrábění drážek

Tabulka 9 – Průměrné časy různých strategií při obrábění drážek

Průměrné strojní časy strategií	Naměřený skutečný čas	Teoretický čas stroje	koeficient
Strategie	t_s [s]	t_t [s]	k [-]
Strategie hřeben	27,56	4,43	6,22
Strategie slupky	118,22	22,51	5,25
Strategie SolidWorks	127,21	87,00	1,46
Dokončení fz = 0,03 mm	5,75	5,96	0,97
Dokončení fz = 0,015 mm	13,29	11,56	1,15



Obrázek 28 – Porovnání strojních časů použitých strategií

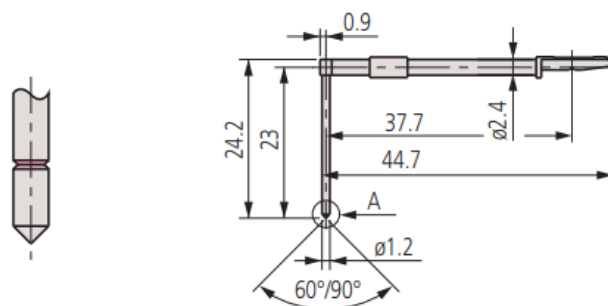


Obrázek 29 – Porovnání průměrných časů použitých strategií při frézování drážek

Z hlediska teoretických a skutečných časů obrábění se strategie „hřeben“ v porovnání se zbylými dvěma strategiemi jeví jako nejlepší možnost. Při frézování touto strategií však docházelo k velkému namáhání nástroje a k jeho opotřebení a po obrobení dvou drážek již dále nebyla použita. Naopak při této strategii docházelo k největšímu rozdílu mezi skutečnými časy a teoretickými časy obrábění. Strategie zhotovená v programu SolidWorks, měla sice nejdelší čas obrábění, zato nejmenší rozdíl mezi teoretickým a skutečným časem obrábění. Koeficienty můžou dále sloužit ke stanovení skutečných časů obrábění jiných obrobků za použití daných strategií obrábění.

3.2 Měření drsnosti

Drsnost byla měřena drsnoměrem Mitutyuo SJ – 400 dotykem pro měření drážek 12AAC736 s délkou patičky 20 mm a s tolerancí přesností přístroje $\pm 0,03 \mu\text{m}$.

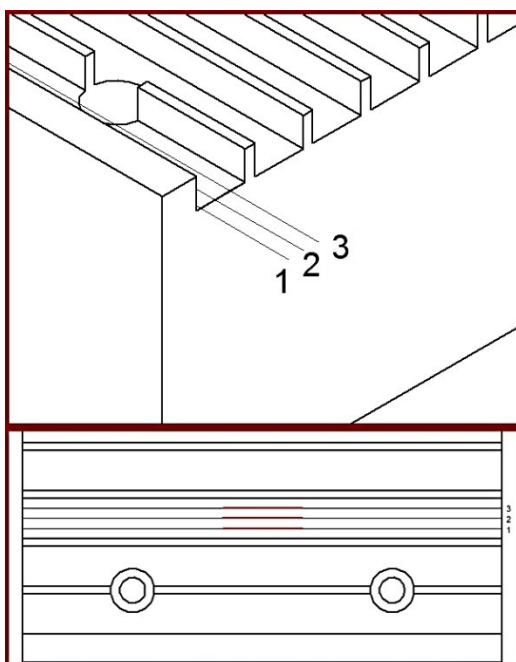


Obrázek 30 – Dotyk pro měření drážek ⁴



Obrázek 31 – Drsnoměr Surftest SJ-400 ⁵

Jelikož obrábění probíhalo pod úkosem, bylo nutno obrobky nastavit tak, aby dna drážek byla vodorovná se základní deskou drsnoměru. K ustavení obrobku byly použity destičky, které se položily pod tu stranu obrobku, kde byla axiální hloubka řezu největší. Pro úspěšné vyrovnaní dna bylo potřeba sestavit podpěrné destičky způsobem, aby jejich součet byl 6 mm. Každá drážka se z hlediska drsnosti měřila 3× na různé šířce drážky a uprostřed drážky z hlediska její délky, vyznačeno červeně na obrázku. Pro měření drsnosti byly vybrány pouze parametry R_z a R_a a výpočet hodnot proběhl podle následujících vzorců a výsledné hodnoty byly uvedeny do tabulky. Kompletní tabulka se nachází v přílohách.



Obrázek 32 – Měření drsnosti obrobku

Dle značení měření drsnosti na šířce drážky (Obrázek 32) a podle směru pohybu nástroje při obrábění je úsek č. 1 blíže k levé straně drážky.

Jako příklad je zde uveden výpočet parametru R_a z naměřených hodnot drážky s označením 1UP_1STR_DR1.

Výpočet standardní nejistoty typu A (u_A) ¹:

$$u_A = s(\bar{x}) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(2,23-2,14)^2 + (2,15-2,14)^2 + (2,05-2,14)^2}{3(3-1)}} = 0,05 \mu m \quad (3.2.1)$$

kde: \bar{x} je střední hodnota [μm],
 x_i je naměřená hodnota [μm],
 n je rozsah výběru.

Výpočet standardní nejistoty typu B (u_B) ¹:

Nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu (u_{B1}) ¹:

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k} = \frac{2,14 \cdot 0,03}{\sqrt{3}} = 0,04 \mu m \quad (3.2.2)$$

Nejistota měřicího přístroje (u_{B2}) ¹:

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03 = 2,14 \cdot 0,03 = 0,06 \mu m \quad (3.2.3)$$

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = \sqrt{0,04^2 + 0,06^2} = 0,07 \mu m \quad (3.2.4)$$

Výpočet rozšířené kombinované nejistoty U ¹:

$$U = 2 \cdot \sqrt{k_{UA}^2 + u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{2,3^2 + 0,04^2 + 0,06^2} = 0,02 \mu m \quad (3.2.5)$$

Zápis výsledku $R_a = (2,14 \pm 0,02) \mu m$

Kde: k_{UA} je koeficient rozšíření a pro pravděpodobnost $p = 95 \%$ a menší počet měření, než je $n < 10$ se tento koeficient volí dle následující tabulky. Pro tento případ, kde $n = 3$, se zvolil koeficient v hodnotě 2,3.

Tabulka 10 – Hodnoty k_{UA} pro pravděpodobnost $p = 95 \%$ ¹

n	2	3	4	5	6	7	8	9
k_{UA}	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

Jednotlivé výsledky měření jsou zapsány v souhrnné tabulce 11 níže v podkapitole 3.5. Celé tabulky jsou obsaženy v příloze.

3.3 Měření šířky drážek

Měření šířky drážky probíhalo pomocí digitálního posuvného měřítka Mahr 16 Ex 4102400 s přesností $\pm 0,03$ mm. Každá drážka byla změřena desetkrát na čele obrobku – tj. na minimální hloubce drážky a na různých místech její délky. Měření začínalo na straně obrobku s největší hloubkou drážky a končilo na opačné straně, kde hloubka drážky byla nejmenší. Výsledné hodnoty byly statisticky zpracovány a zapsány do tabulky. Výsledky jsou znázorněny v souhrnné tabulce naměřených hodnot viz níže. Tabulky v celé velikosti jsou obsahem přílohy.



Obrázek 33 – Digitální posuvné měřítko Mahr 16 Ex 4102400 ⁶

3.4 Měření šířky žebra

Šířka žebra byla měřena pomocí talířkového mikropasometru Feinmesszeugfabrik SOHL DDR s tolerancí přesností 0,01 mm. Měření začínalo rovněž na straně obrobku s největší hloubkou drážky a končilo na opačné straně, kde hloubka drážky byla nejmenší. Celkový počet měření šířky žebra byl deset a měření probíhalo na různých místech její délky, tak jak to bylo i u předchozího měření drážek posuvným měřítkem.

Jednotlivé vztahy byly spočteny dle vzorců viz předešlá kapitola o měření drsnosti, s tím rozdílem, že výpočet kombinované nejistoty U byl proveden pro měření $n = 10$.

Výpočet rozšíření kombinované nejistoty U pro měření $n = 10$ ¹:

$$U = k_U \cdot u_C \quad (3.4.1)$$

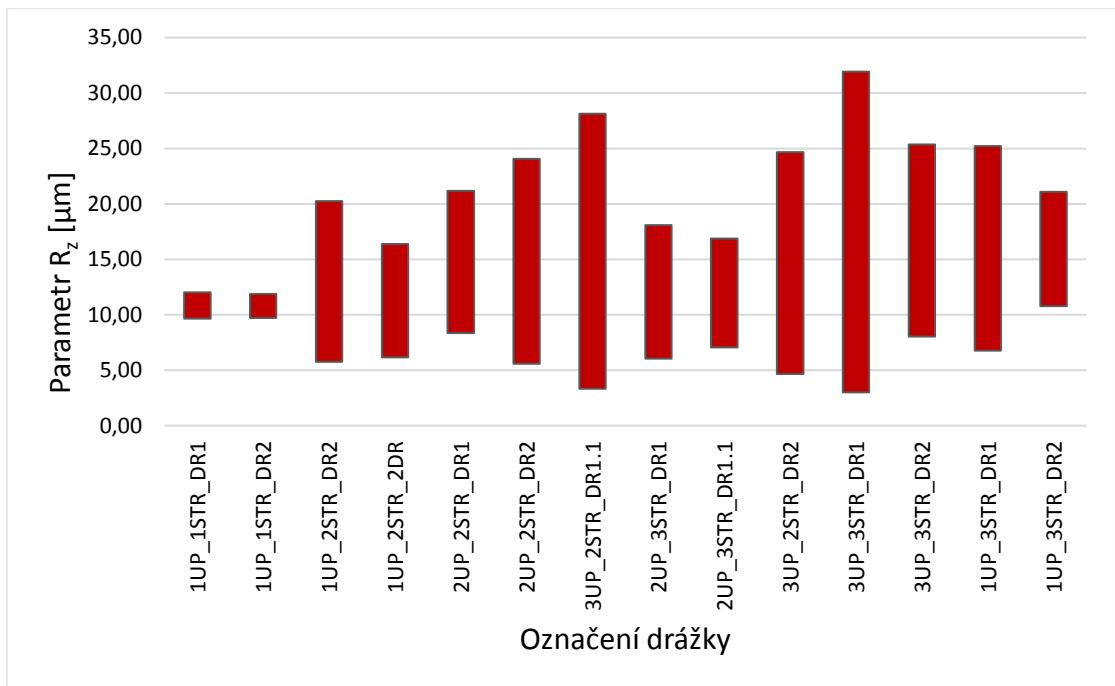
$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.4.2)$$

3.5 Zhodnocení naměřených výsledků

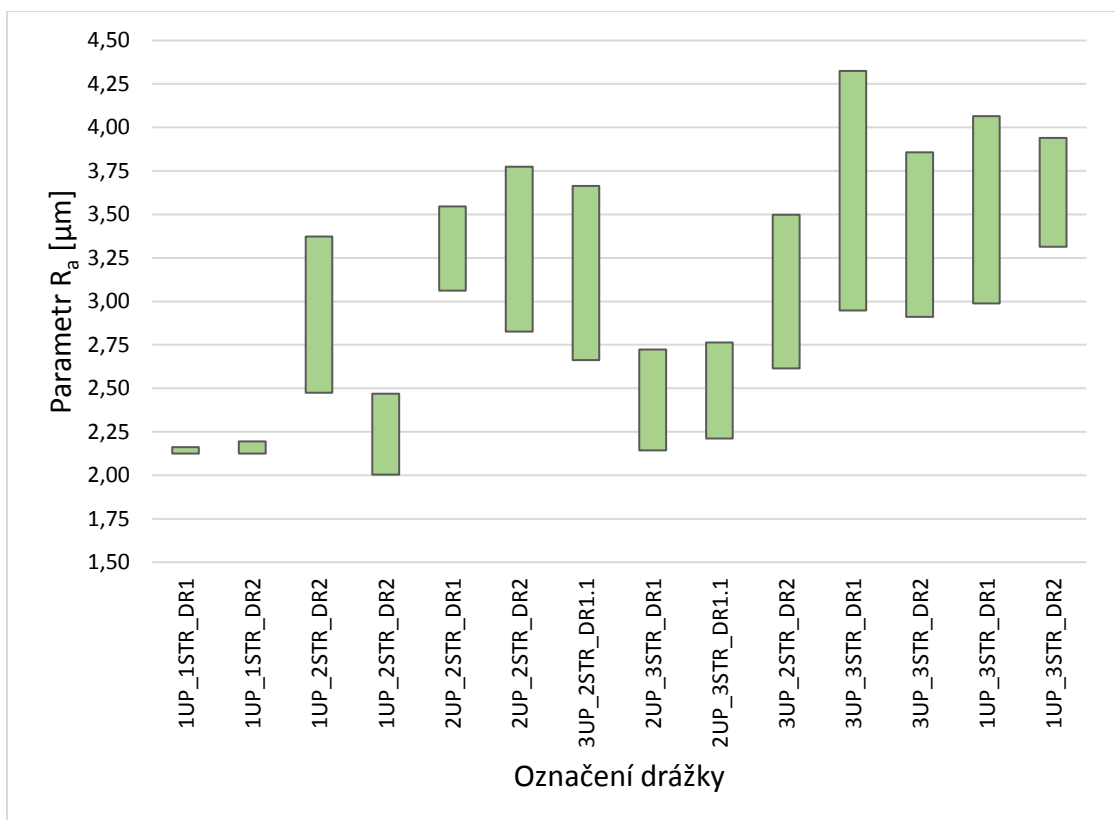
Tabulka 11 – Souhrnná tabulka naměřených hodnot při frézování drážek

Označení drážky	šířka žebra [mm]	šířka drážky [mm]	R _a [μm]	R _z [μm]
1UP_1STR_DR1	kus č. 1	(9,85 ± 0,05)	(2,14 ± 0,02)	(10,83 ± 1,18)
	(2,19 ± 0,06)			
1UP_1STR_DR2		(9,85 ± 0,05)	(2,16 ± 0,03)	(10,80 ± 1,07)
	(2,29 ± 0,02)			
1UP_2STR_DR1		(9,82 ± 0,05)	(2,92 ± 0,45)	(13,00 ± 7,25)
	(2,18 ± 0,02)			
1UP_2STR_DR2		(9,83 ± 0,04)	(2,24 ± 0,23)	(11,27 ± 5,11)
	(2,15 ± 0,01)			
2UP_2STR_DR1		(9,69 ± 0,05)	(3,30 ± 0,24)	(14,77 ± 6,40)
	(2,22 ± 0,01)			
2UP_2STR_DR2		(9,72 ± 0,04)	(3,30 ± 0,47)	(14,83 ± 9,24)
	(2,24 ± 0,02)			
3UP_2STR_DR1.1		(9,69 ± 0,05)	(3,16 ± 0,50)	(15,73 ± 12,41)
	(2,25 ± 0,03)			
2UP_3STR_DR1		(9,75 ± 0,04)	(2,43 ± 0,29)	(12,07 ± 6,01)
	(2,23 ± 0,04)			
2UP_3STR_DR1.1		(9,76 ± 0,04)	(2,49 ± 0,28)	(11,97 ± 4,90)
	kus č. 2			
3UP_2STR_DR2		(9,71 ± 0,01)	(3,06 ± 0,44)	(14,67 ± 10,00)
	(2,27 ± 0,02)			
3UP_3STR_DR1		(9,64 ± 0,02)	(3,64 ± 0,69)	(17,47 ± 14,46)
3UP_3STR_DR2			(3,38 ± 0,47)	(16,70 ± 8,65)
1UP_3STR_DR1		(9,68 ± 0,01)	(3,53 ± 0,54)	(16,00 ± 9,22)
	(2,35 ± 0,03)			
1UP_3STR_DR2		(9,65 ± 0,01)	(3,63 ± 0,31)	(15,93 ± 5,16)

- Šířka žebra mezi drážky 3UP_3STR_DR1 a 3UP_3STR_DR2 a 3UP_3STR_DR2 a 1UP_3STR_DR1 a šířka drážky 3UP_3STR_DR2 nejsou v tabulce zahrnuty z důvodu zlomení nástroje v průběhu frézování drážky 3UP_3STR_DR2.



Obrázek 34 – Grafické porovnání hodnot parametru R_z



Obrázek 35 – Grafické porovnání hodnot parametru R_a

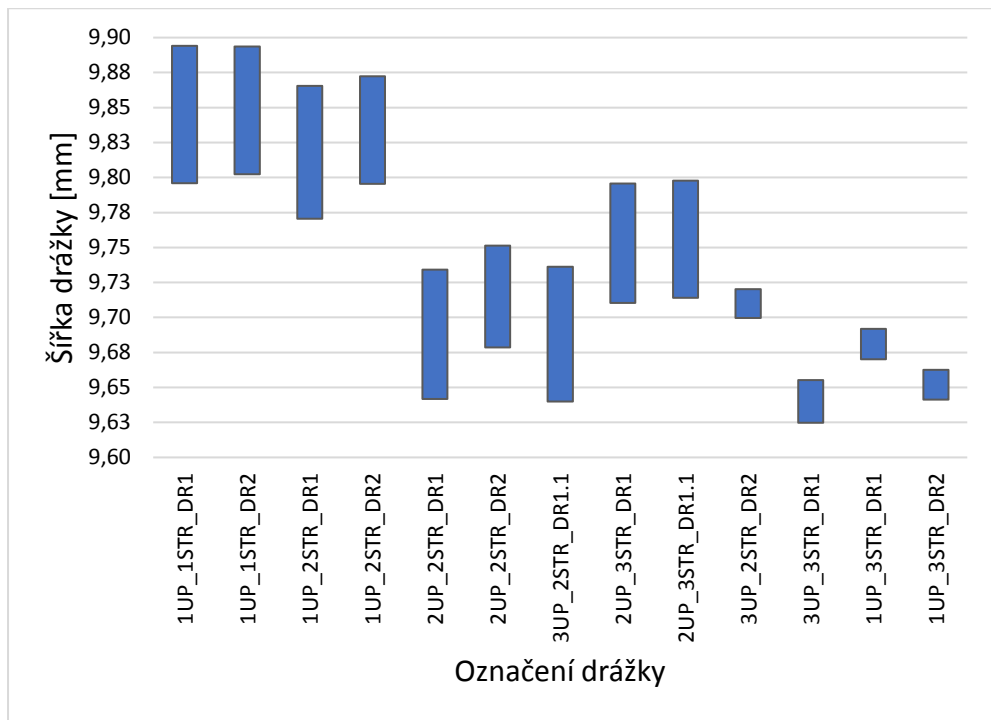
Dle číselných a grafických výsledků je zřejmé, že parametry drsnosti R_z a R_a při frézování strategií „hřeben“ a za použití kleštiny jako upínače, jsou si velice podobné. Drsnosti se na šířce dna drážky liší jen nepatrně. U ostatních způsobů obrábění a upnutí nástrojů jsou výsledky rozdílné. Z důvodu vynechání strategie „hřeben“ po obrobení dvou drážek nelze přesně říci, jestli určitá strategie a způsob upnutí má nějaký přímý vliv

na drsnost obrobku. Na drsnost povrchu mohlo mít vliv i opotřebení nástroje, ke kterému v průběhu frézování docházelo.

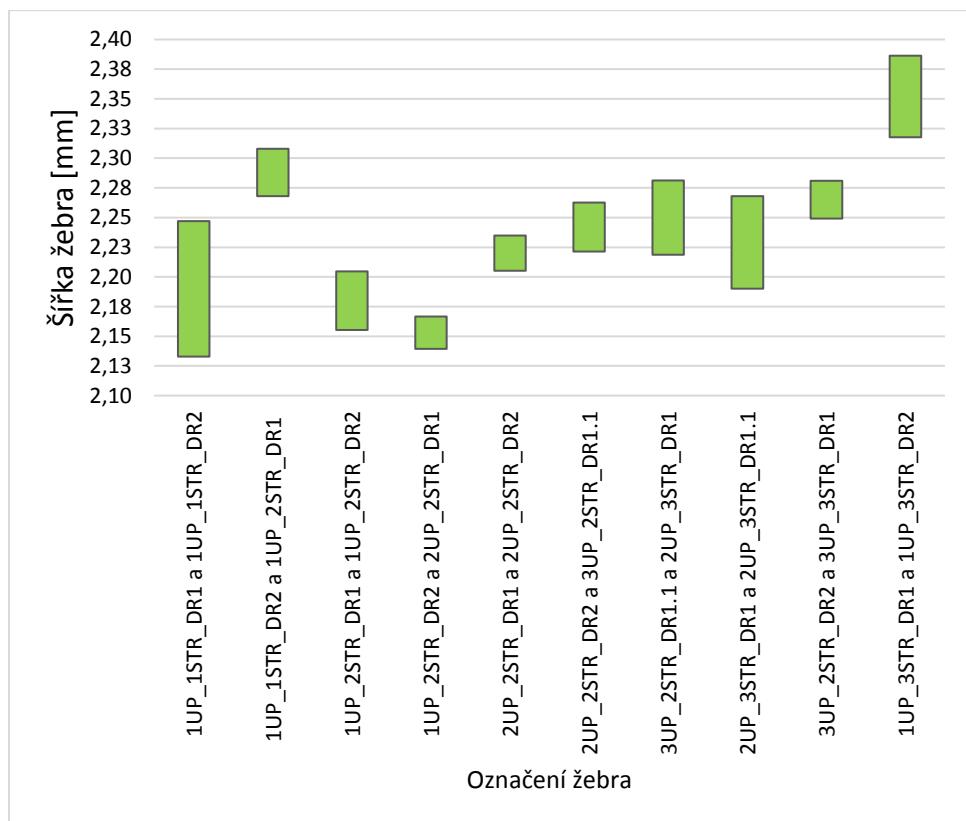
3.5.1 Zhodnocení rozměrů přesností drážek

Tabulka 12 – Porovnání naměřených hodnot s hodnotami požadovanými

	šířka žebra [mm]	požadovaná šířka žebra [mm]	šířka drážky [mm]	Požadovaná šířka drážky [mm]
1UP_1STR_DR1	kus č. 1		9,85	$10_{-0,2}^0$
	2,19	$2_{0}^{+0,2}$		
1UP_1STR_DR2			9,85	$10_{-0,2}^0$
	2,29	$2_{0}^{+0,2}$		
1UP_2STR_DR1			9,82	$10_{-0,2}^0$
	2,18	$2_{0}^{+0,2}$		
1UP_2STR_DR2			9,83	$10_{-0,2}^0$
	2,15	$2_{0}^{+0,2}$		
2UP_2STR_DR1			9,69	$10_{-0,2}^0$
	2,22	$2_{0}^{+0,2}$		
2UP_2STR_DR2			9,72	$10_{-0,2}^0$
	2,24	$2_{0}^{+0,2}$		
3UP_2STR_DR1.1			9,69	$10_{-0,2}^0$
	2,25	$2_{0}^{+0,2}$		
2UP_3STR_DR1			9,75	$10_{-0,2}^0$
	2,23	$2_{0}^{+0,2}$		
2UP_3STR_DR1.1			9,76	$10_{-0,2}^0$
	kus č. 2			
3UP_2STR_DR2			9,71	$10_{-0,2}^0$
	2,27	$2_{0}^{+0,2}$		
3UP_3STR_DR1			9,64	$10_{-0,2}^0$
3UP_3STR_DR2				
1UP_3STR_DR1			9,68	$10_{-0,2}^0$
	2,35	$2_{0}^{+0,2}$		
1UP_3STR_DR2			9,65	$10_{-0,2}^0$



Obrázek 36 – Grafické porovnání hodnot šířek drážek



Obrázek 37 – Grafické porovnání hodnot šířky žebra

Na rozměry jednotlivých drážek se před samotným obráběním kladl požadavek ohledně tolerancí žebra a šířky drážky. Šířka drážky měla mít rozměr $10_{-0,2}^0$ mm a šířka žebra $2_{0}^{+0,2}$ mm. Z výsledků vyplývá, že rozměry drážek vyhovují u strategie „hřeben“ upnutím nástroje pomocí kleštiny a u strategie „slupky“ stejným způsobem upnutí. Co se týká

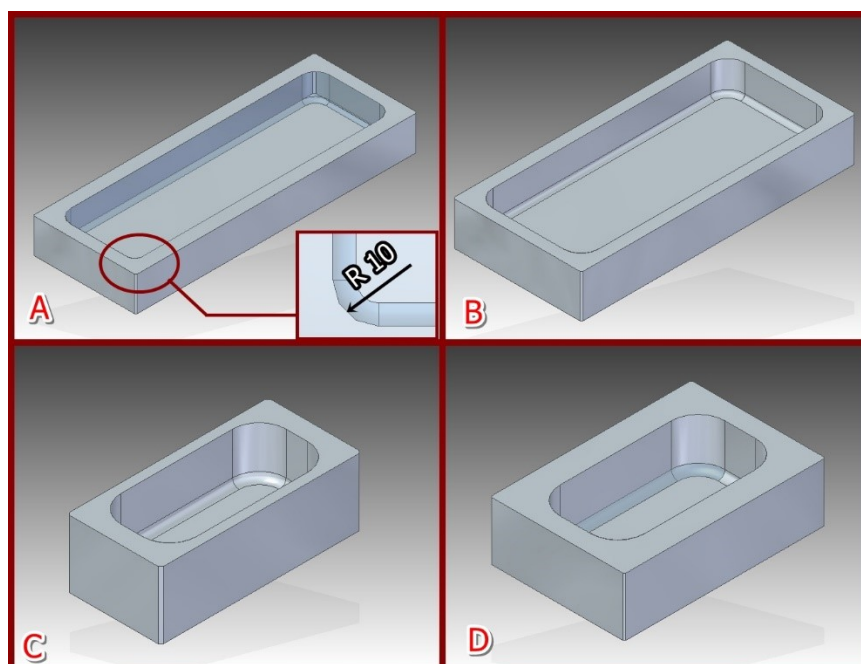
rozměrů šířky žebra, tak vyhovují ty, které vznikly mezi strategiemi „hřeben“ a „slupky“ s kleštinovým upínačem nebo mezi drážky „slupky“, kdy jedna byla zhotovena kleštinovým upínačem a druhá hydraulickým upínačem. Jednotlivé vyhovující rozměry jsou vyznačeny výše v tabulce 12 červenou barvou čísel. Rozměr žebra vzniklý mezi drážkou vyrobenou „hřebenem“ a mezi drážkou vyrobenou „slupkami“ použitím kleštiny předepsané toleranci nevyhovuje. Ostatní způsoby obrábění drážek předepsaným tolerancím nevyhovují. K dosažení tolerovaných přesností lze dále docílit případným změřením drážky mezi procesy hrubování a dokončování a podle naměřených hodnot upravit NC program. Z naměřených hodnot vyplývá, že během obrábění nedošlo k deformaci drážek a žebor vlivem tepla nebo dynamiky frézování jednotlivých strategií. Rozměry týkající se šířky drážky v libovolných bodech její délky, byly srovnatelné a lze podle nich usoudit, že použité způsoby obrábění si udržují stálý stupeň přesnosti i s měnící se axiální hloubkou řezu. Jako příklad byly vybrány naměřené hodnoty drážky vyrobenou strategií „slupky“, kde nástroj byl upnut do hydraulického upínače viz. tabulka 13.

Tabulka 13 – Naměřené hodnoty šířky drážky 1UP_2ST_DR2

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1UP_2STR_DR2 [mm]	9,82	9,81	9,80	9,82	9,81	9,87	9,83	9,86	9,87	9,85

4 Stanovení strategie frézování na zadaných kapsách

Tato kapitola se zabývá možnostmi obrábění zadaných kapes společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o., porovnáním se stávající skupinovou technologií frézování daných kapes a následným návrhem nové technologie pro efektivnější způsob výroby.



Obrázek 38 – Kapsy společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o.

Všechny čtyři kapsy jsou charakterizovány zaoblením rohů s rádiusem R 20 mm, zaoblením dna s R 5 mm a hloubkou kapsy s $36,5 \text{ }_{-0,5}^0$ mm. Kapsa s označením A se od ostatních kapes liší jedním rohem se zaoblením R 10 (Obrázek 38 [a])). Rozměry jednotlivých kapes jsou znázorněny v tabulce níže.

Tabulka 14 – Rozměry zadaných kapes

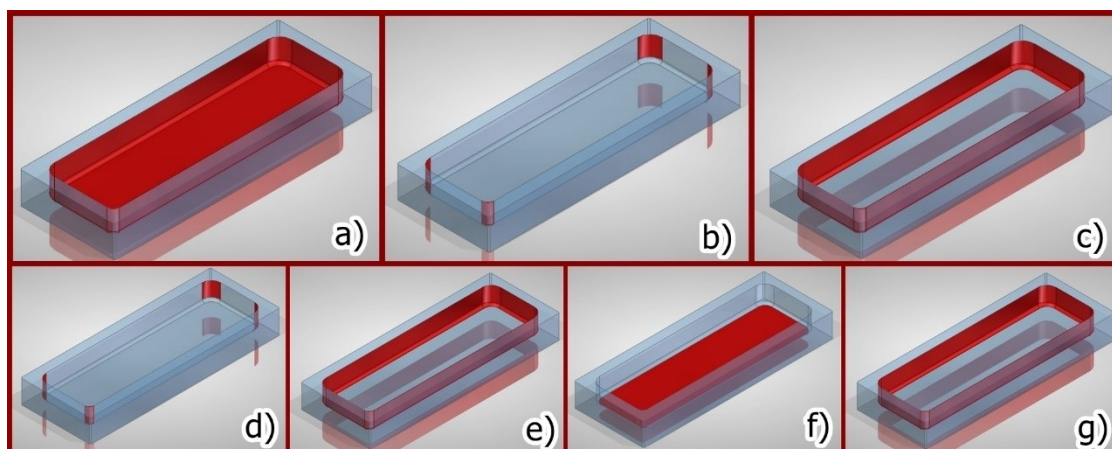
Označení kapsy	A	B	C	D
Rozměry kapsy [mm]	377 x 133 x $36,5 \text{ }_{-0,5}^0$	123 x 294 x $36,5 \text{ }_{-0,5}^0$	123 x 56 x $36,5 \text{ }_{-0,5}^0$	123 x 67 x $36,5 \text{ }_{-0,5}^0$

Podle zadaných NC programů se za použití simulačního softwaru Cimco Edit 8 stanovily dráhy nástrojů a parametry obrábění při frézování kapes společností Huisman Konstrukce, s.r.o. Zjištěný skupinový technologický postup kapes se následně naprogramoval v CAM programu Masercam 2017 tak, aby bylo možné co nejlépe porovnat stávající postup s novou skupinovou technologií výroby.

4.1 Skupinový technologický postup výroby kapes společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o.

Všechny 4 kapsy byly součástí obrobku, který se obráběl frézováním více nástroji, díky čemu jednotlivé nástroje obráběly různé plochy, které se na obrobku vyskytovaly. To mělo za následek, že jednotlivé kapsy se neobráběly najednou, ale postupně s celým obrobkem. Pro zjednodušení vysvětlení je níže vysvětlen postup obrábění na každé kapse zvlášť.

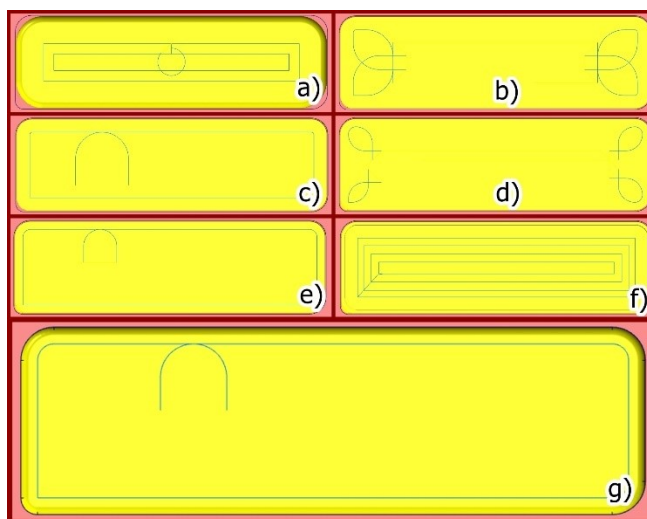
4.1.1 Charakteristika obrábění kapes A a B



Obrázek 39 – Postup frézování kapes s označením A a B




Jako první se obě kapsy obráběly frézou Dc 66 (Obrázek 39 [a])), následně zbytkový materiál na rozích kapsy frézou Dc 32 (Obrázek 39 [b])). Toutéž frézou se obráběly stěny

kapes (Obrázek 39 [c])). Znovu se vyměnil nástroj, tentokrát za frézu D_c 20 s rádiusem R 5, a znovu se obrobily rohy kapes (Obrázek 39 [d])), poté stěny kapes (Obrázek 39 [e])). Pro dokončovací operace byl znovu použit nástroj D_c 32 pro obrobení dna drážek (Obrázek 39 [f])). Stěny a rohy kapes byly dokončeny nástrojem D_c 20 R 5 (Obrázek 39 [g])). Přibližné dráhy nástrojů jsou zobrazeny na obrázku níže modře, žlutě je vyznačený obrobený materiál. Přesný postup výroby, řezné podmínky a názvy nástrojů jsou zobrazeny ve zkrácených tabulkách 15 a 16 níže, celé tabulky jsou obsahem přílohy.



Obrázek 40 – Dráhy nástrojů při obrábění kapes s označením A a B

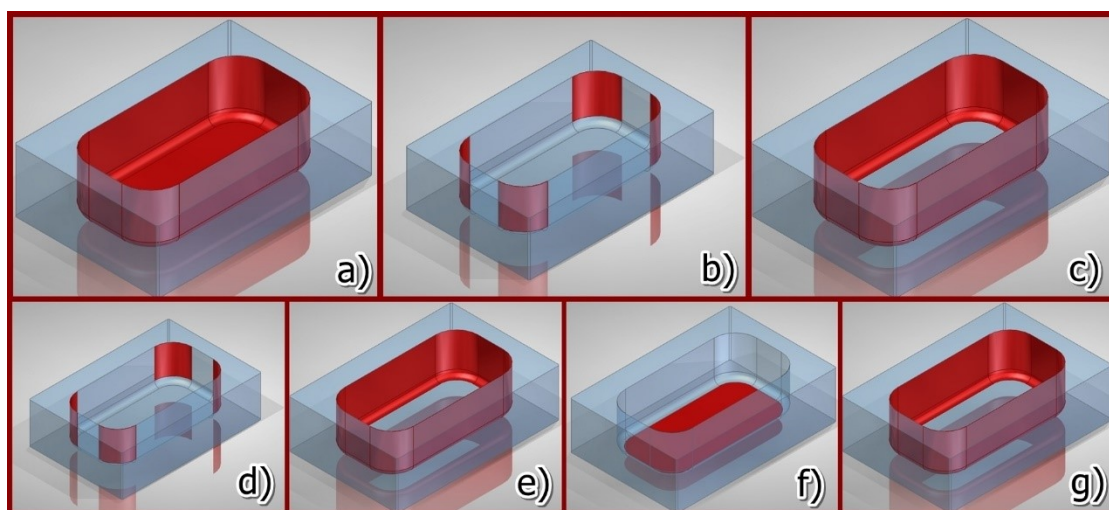
Tabulka 15 – Použité nástroje při obrábění kapes s označením A a B společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o.

Obrázek nástroje	Zdroj obrázku	Operace	Výrobce a označení nástroje	D _c	z	f _{z1}	v _{c1}
				[mm]	[-]	[mm]	[m/min]
	[9]	a)	Seco R220.29-0066-08.6A	66	6	0,5	275
	[10]	b)	Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	32	3	0,22	200
		f)	Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	32	3	0,25	250
	[11]	d)	Precitool 179064 20,00x5,00	20	4	0,35	160
		g)	Precitool 179064 20,00x5,00	20	4	0,15	160

Tabulka 16 – Popis obrábění kapes s označením A a B

výrobce a označení nástroje	Operace	strategie	popis
Seco R220.29-0066-08.6A	a)	kapsa	hrubování do $h = 35,5$ mm s přídavky 1 mm, $a_p = 1,5$ mm $a_e = 25$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	b)	kontura	hrubování 4 rohů do $h = 30,25$ mm s přídavky 1 mm, $a_p = 3$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	c)	kontura	hrubování stěn v $h = 34$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	c)	kontura	hrubování stěn v $h = 35,5$ mm, $a_p = 1,5$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	d)	kontura	hrubování 4 rohů do $h = 34$ mm, $a_p = 0,7$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	e)	kontura	hrubování stěn v $h = 34$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	e)	kontura	hrubování stěn v $h = 34,75$ mm, $a_p = 0,75$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	e)	kontura	hrubování stěn v $h = 35,5$ mm, $a_p = 0,75$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	f)	kapsa	dokončení dna do $h = 36,35$ mm s přídavky na stěny 5 mm a na dno 0,15 mm, $a_p = 1,75$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	g)	kontura	dokončení stěn v $h = 15,275$ mm s přídavky 0,15 mm
Precitool 179064 20,00x5,00	g)	kontura	dokončení stěn v $h = 36,35$ mm s přídavky 0,15 mm, $a_p = 21,075$ mm

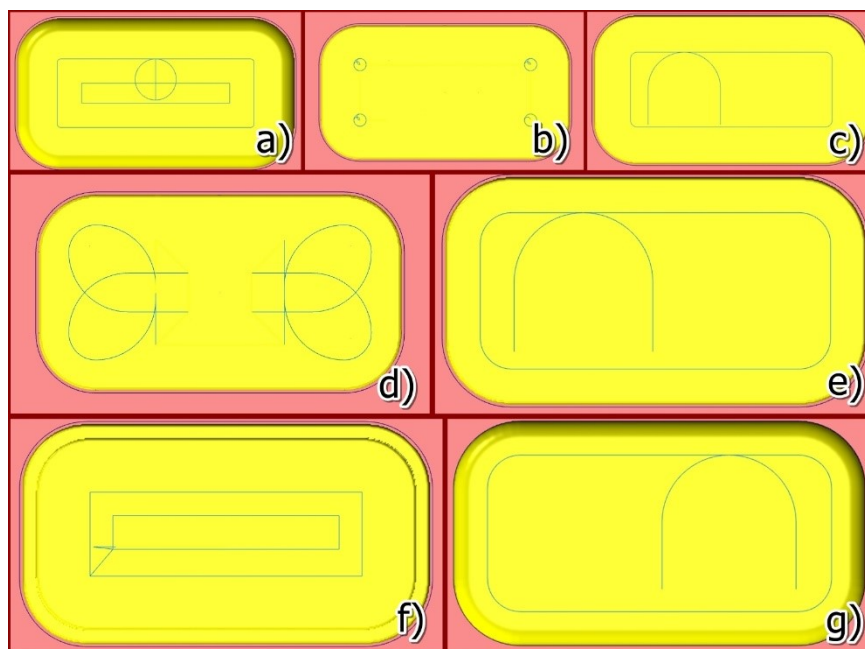
4.1.2 Charakteristika obrábění kapes C a D



Obrázek 41 – Postup frézování kapsy s označením D

Kapsy se nejprve předobrobily frézou $D_c 35$ (Obrázek 40 [a]) a následně se zbytkově obráběly rohy nástrojem $D_c 32$ (Obrázek 41 [b]), poté stěny kapes (Obrázek 41 [c]). Všechny čtyři rohy se obráběly pomocí drah ve tvaru šroubovice. Po výměně nástroje za




nástroj $D_c 20$ s $R 5$ se znovu obráběly rohy (Obrázek 41 [d])) a stěny kapsy (Obrázek č. 41 [e])). Dokončení dna probíhalo pomocí nástroje $D 32$ (Obrázek č. 41 [f])) a zbytku kapsy pomocí $D_c 20$ $R 5$ (Obrázek 41 [g])).



Obrázek 42 – Dráhy nástrojů při obrábění kapsy s označením D

Při obrábění kapsy C byl oproti kapse D rozdíl v tom, že úsek b) byl rozdělen na dva cykly a mezi nimi probíhalo obrábění stěn kapsy. Tzn. obrobily se dva rohy, poté stěny kapsy a následně zbylé dva rohy.

Tabulka 17 – Použité nástroje při obrábění kapes s označením C a D společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o.

Obrázek nástroje	Zdroj obrázku	úsek	Výrobce a označení nástroje	D_c	z	f_{z1}	v_{c1}
				[mm]	[-]	[mm]	[m/min]
	[12]	a)	Pokolm 3 35 200/7	35	3	0,5	275
	[10]	b), c),	Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	32	3	0,22	200
		f)	Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	32	3	0,25	250
	[11]	d), e),	Precitool 179064 20,00x5,00	20	4	0,35	160
		g)	Precitool 179064 20,00x5,00	20	4	0,15	160

Tabulka 18 – Popis obrábění kapsy s označením D

výrobce a označení nástroje	úsek	strategie	popis
Seco R220.29-0066-08.6A	a)	kapsa	hrubování do $h = 35,5$ mm s přídky 1 mm, $a_p = 1,5$ mm $a_e = 10,6$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	b)	šroubovice	hrubování 4 rohů do $h = 30,25$ mm s přídky 1 mm, $a_p = 3$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	c)	kontura	hrubování stěn v $h = 34$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	c)	kontura	hrubování stěn v $h = 35,5$ mm, $a_p = 1,5$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	d)	kontura	hrubování 4 rohů do $h = 34$ mm, $a_p = 0,7$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	e)	kontura	hrubování stěn v $h = 34$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	e)	kontura	hrubování stěn v $h = 34,75$ mm, $a_p = 0,75$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	e)	kontura	hrubování stěn v $h = 35,5$ mm, $a_p = 0,75$ mm
Seco R0,8 R217.69-1632.RE-18-3AN	f)	kapsa	dokončení dna do $h = 36,35$ mm s přídky na stěny 5 mm a na dno 0,15 mm, $a_p = 1,75$ mm
Precitool 179064 20,00x5,00	g)	kontura	dokončení stěn v $h = 15,275$ mm s přídky 0,15 mm
Precitool 179064 20,00x5,00	g)	kontura	dokončení stěn v $h = 36,35$ mm s přídky 0,15 mm, $a_p = 21,075$ mm

Dané kapsy se frézovaly na 5ti osém frézovacím centru Hedelius RS 100, které používá společnost Huisman Konstrukce, s.r.o.



Obrázek 43 – Frézovací centrum Hedelius RS 100 ¹³

Tabulka 19 – Vybrané parametry stroje Hedelius RS 100 používaného společností Huisman Konstrukce, s.r.o.

Osa X	1500 mm pevný stůl + 1000 mm otočný stůl
Osa Y	1000 mm
Osa Z	770 mm
Upínání	SK 50
Upínací plocha otočného stolu	800 × 800 mm
Naklápění otočného stolu	+10° ; -90°
Max. Zatížení	1500 kg
Upínací plocha pevného stolu	2100 × 1000 mm
Zásobník nástrojů	30 míst
hmotnost nástroje	15 kg
Výkon vřetene [13]	55 kW
Otáčky vřetena [13]	max. 12 000 min ⁻¹

V důsledku zjištění postupu výroby jednotlivých kapes se navrhly možné efektivnější strategie výroby pomocí kruhové interpolace nástroje viz následující kapitola 4.2.


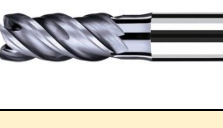

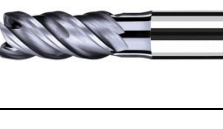
4.2 Výroba určené kapsy pomocí strategií kruhových interpolací nástroje

Na zadaném materiálu S355J2+N o rozměrech 150 × 200 × 50 se vyrobila frézováním vybraná kapsa o rozměrech 56 × 123 × 36 mm s označením C celkem šestkrát, za pomoci dvou nástrojů, vrtáku a tří strategií frézování. Jednotlivé strategie opravdová spirála, smíšená spirála a dynamické frézování byly naprogramovány v programu Mastercam 2017. Tyto strategie jsou porovnány níže v kapitole 4.3. Použité nástroje byly doporučeny samotnými výrobcí viz tabulka 20. Po obrobení jednotlivých kapes se stanovil čas obrábění, který se následně porovnával s teoretickým časem vygenerovaným programem Mastercam 2017. Podle jednotlivých časů obrábění a trvanlivosti nástroje se stanovila teoretická hodnota nákladů na jednotlivé nástroje. Mezi samotným obráběním se jednotlivé nástroje kontrolovaly vizuálně lupou z důvodu opotřebení. Kapsy se obráběly na 5ti – osém frézovacím centru DGM MORI DMU 50.



Obrázek 44 – Frézovací centru DMU 50 ¹⁴

Tabulka 20 – Doporučené a zvolené podmínky fréz pro obrábění vybrané kapsy

obrázek	výrobce a označení nástroje	Zdroj	doporučené podmínky výrobcem						
			z	D _c	f _{z1}	a _{p1}	a _{e1}	v _{c1}	Q ₁
			[mm]				[m/min]	[cm ³ /min]	
	Iscar ECL-H7 12-48C12CF-110	[3]	7	12	0,175	48	3	200	935,8
	Fraisa MB-NVDS D16/16x92/32	[15]	4	16	0,186	32	3,2	231	350,12
			zvolené podmínky						
obrázek	výrobce a označení nástroje	Zdroj	z	D _c	f _{z2}	a _{p2}	a _{e2}	v _{c2}	Q ₂
			[mm]				[m/min]	[cm ³ /min]	
	Iscar ECL-H7 12-48C12CF-110	[3]	7	12	0,08	30,5	0,8	200	75,5
	Fraisa MB-NVDS D16/16x92/32	[15]	4	16	0,1	30,5	1	200	48,9

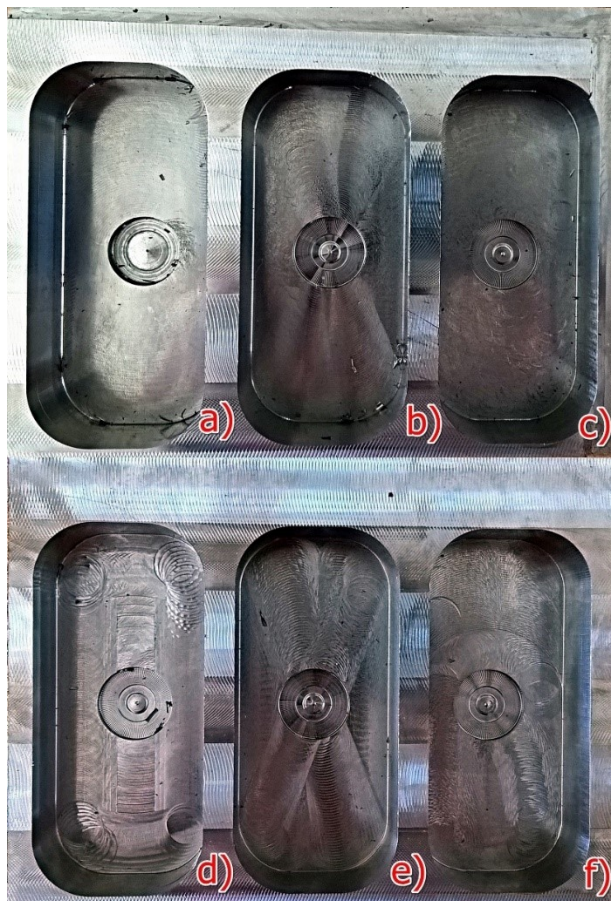
Kapsy se obráběly na zadaném vyžíhaném materiálu. Žihání proběhlo za teploty 570 ± 10 °C a výdrž na dané teplotě 60 min s předehřátou pecí, která nesměla přesahovat teplotu 300 °C. Rychlost ohřevu na danou teplotu byla 100 °C/hod a rychlost ochlazování na teplotu 300 °C se provedlo během jedné hodiny, pak se materiál chladil na vzduchu.

Před samotným obráběním kapes se na polotovaru provedla úprava rozměrů. Zarovnal se rozměry polotovaru ve všech osách souřadného systému. V osách X a Y proběhlo

obrábění konturou a čelní frézou o D_c 44 a v ose Z obrábění čela plochy čelní frézou D_c 72. Předvrtané kapsy vrtákem D_c 24 byly frézovány nástroji na plnou hloubku kapsy s $a_p = 31,5$ mm. Přidavky na obrábění dna a stěny byly ve velikosti 1 mm a obrábělo se bez dokončovacího cyklu. Při prvním použití nástroje se provedl zkušební řez s axiální hloubkou řezu $a_p = 10$ mm s přidavky a podle něho se následně upravovaly řezné podmínky nástroje.



Obrázek 45 – Zkušební řez a řez na plnou axiální hloubku nástrojem Iscar D_c 12 strategií opravdová spirála



Obrázek 46 – Kapsa po obrobení dvěma nástroji a třemi strategiemi

Obrázek 46 je podrobněji popsán v následující tabulce.

Tabulka 21 – Charakteristika jednotlivých způsobů obrábění kapsy

nástroj	strategie	označení kapsy	poznámky
Iscar	opravdová spirála	a)	bez známek opotřebení nástroje
Iscar	smíšená spirála	b)	bez známek opotřebení nástroje
Iscar	dynamické frézování	c)	hromadění třísky v místě řezu, horší drsnost stěn, mírně poškozený jeden zub na nástroji
Fraisa	opravdová spirála	d)	bez známek opotřebení nástroje
Fraisa	smíšená spirála	e)	špatná drsnost na rádiusech, hlasitější chod, bez známek opotřebení nástroje
Fraisa	dynamické frézování	f)	bez známek opotřebení nástroje

Jak již je z obrázku 46 zřejmé, při obrábění frézou Fraisa (Obrázek 64 [d, e, f]), která má větší průměr než fréza od Iscaru, je obrobený povrch horší, i když vyložení nástroje bylo menší než u nástroje Iscar, zato vibrace vyšší. U Iscaru bylo vyložení 50 mm a u Fraisy 41 mm. Obrobek byl během obrábění upnut do svěráku a pro zamezení vibrací by pro praxi bylo výhodnější obrobek upnout do dvou svěráků, aby se docílilo tužšího upnutí.

Tabulka 22 – Srovnání použitých strategií při výrobě kapsy z hlediska strojního času

výrobce	strategie	t_t	t_s	k
a označení nástroje	obrábění	[min]	[min]	[-]
Iscar ECL-H7 12-48C12CF-110	kapsa - opravdová spirála	3,833	4,167	1,09
Iscar ECL-H7 12-48C12CF-110	kapsa - smíšená spirála	3,45	3,667	1,06
Iscar ECL-H7 12-48C12CF-11	kapsa - dynamické frézování	3,233	3,7	1,14
Fraisa MB-NVDS D16/16x92/32	kapsa - opravdová spirála	5,35	5,4	1,01
Fraisa MB-NVDS D16/16x92/32	kapsa - smíšená spirála	4,7	4,717	1,00
Fraisa MB-NVDS D16/16x92/32	kapsa - dynamické frézování	4,867	5,05	1,04

Koeficient „k“ může být dále užitečný ke stanovení přesnějších strojních časů při obrábění podobných součástí za podobných podmínek obrábění.

Co se týká srovnání časů obrábění, tak nejkratší časy byly docíleny strategiemi dynamického frézování a smíšené spirály, kratší časy byly však použitím nástroje od Iscaru. S jednotlivými časy také souvisí teoretická cena nástroje během obrábění.

4.3 Srovnání strategií frézování kapes

Po experimentální výrobě zvolené kapsy a doporučených nástrojů se zvolily nástroje a strategie pro teoretické porovnání výroby všech kapes v programu Mastercam 2017. Z tohoto důvodu se tato kapitola zabývá popisem použitých strategií pro teoretické porovnání. Všechny zmíněné strategie obsahují najetí do materiálu pomocí šroubovice, rampy nebo lze možnost najetí vypnout.

4.3.1 Kapsa jedním směrem

Nástroj se pohybuje po přímkách, úběr materiálů probíhá jen v jednom směru, čímž lze zajistit sousledné nebo nesousledné frézování a po dosažení nástroje konce přímky se na prázdno vrací do místa začátku obrábění a následně se posune o navolenou šířku řezu a vytvoří další dráhu ve tvaru přímky. V místech, kde se nástroj vrací zpátky, zůstávají neobrobené zbytky materiálu, které lze pomocí dokončovacího řezu, který kopíruje obvod kapsy, obrobít.



Obrázek 47 – Strategie jedním směrem

4.3.2 Kapsa oběma směry

Během této strategie se nástroj pohybuje po přímkách, ale dokáže také kopírovat stěny dutiny. Nástroj po obrobení jednoho směru se posune o předem navolenou šířku řezu nástroje a vrací se zpět. V místech, kde nástroj mění svou dráhu a vrací se zpět, zůstává zbytkový materiál, podobně jako u strategie frézování jedním směrem. Pomocí zbytkového řezu se zbytkový materiál doobrobí.



Obrázek 48 – Strategie oběma směry

4.3.3 Konstantní přesah spirály

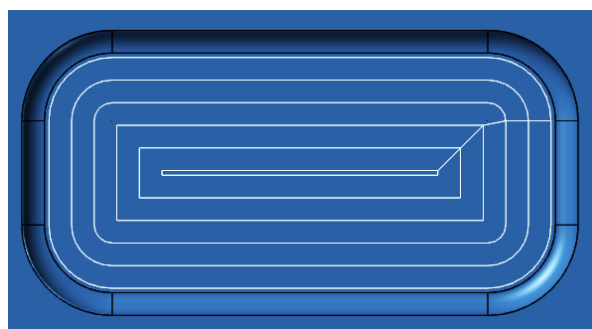
Nástroj kopíruje po přímkách obvod kapsy a pohybuje se ve směru ze středu k obvodu nebo naopak. Strojní časy obrábění se liší podle toho, kde se nastaví místo zařiznutí do materiálu. Způsob programování pohybu nástroje zevnitř kapsy ven může mít výhodu v kratší dráze záběru nástroje s maximální hodnotou radiálního řezu $1 \times D_c$ nástroje. Při tomto způsobu z místa řezu odcházejí třísky plynuleji, což má pozitivní vliv na trvanlivost nástroje.



Obrázek 49 – Strategie konstantní přesah spirály

4.3.4 Paralelní spirála

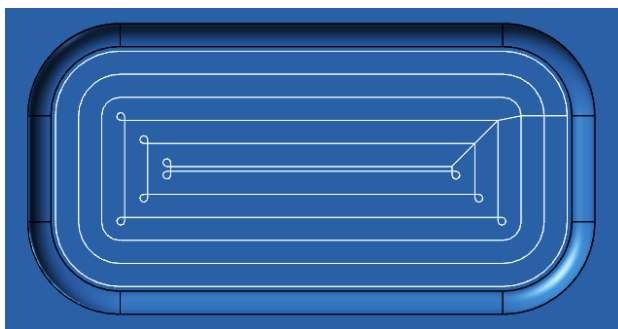
Při této strategii nástroj také kopíruje obvod kapsy a může se pohybovat ze středu směrem ke stěnám, a naopak jako u strategie konstantní přesah spirály, ale s tím rozdílem, že paralelní spirála dokáže kopírovat tvar kapsy po obloucích. Při velkých radiálních hloubkách řezu např. $0,9 \times D_c$ a více, může docházet k neobrobení některých ploch, které se nacházejí mezi jednotlivými dráhami nástrojů.



Obrázek 50 – Strategie paralelní spirála

4.3.5 Paralelní spirála s vyčištěním rohů

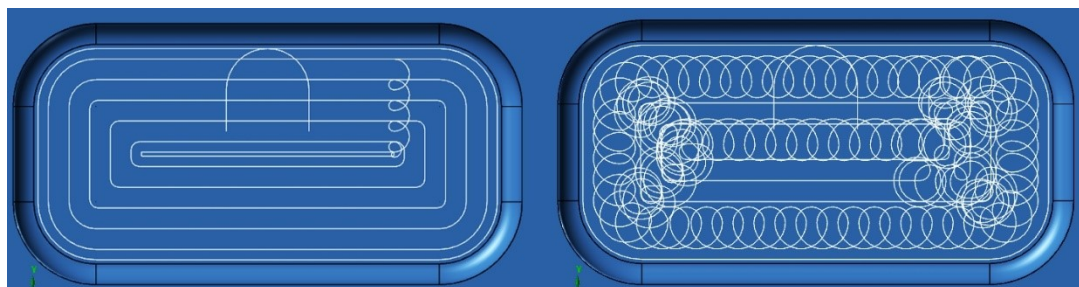
Tato strategie se od paralelní spirály liší v tom, že pohybem po kružnici lépe obrobí rohy a zamezí tím neobrobení ploch při velkých hodnotách radiálního řezu, jako tomu docházelo u strategie s názvem paralelní spirála.



Obrázek 51 – Strategie paralelní spirála s vyčištěním rohů

4.3.6 Vysokorychlostní spirála

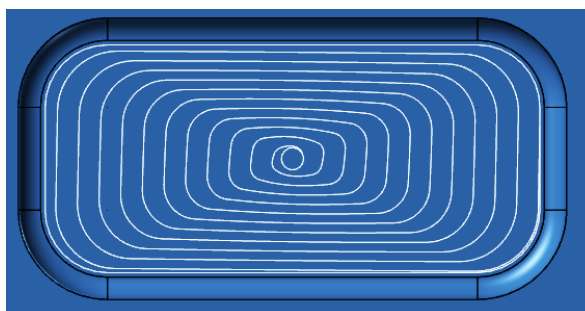
Strategie vysokorychlostní spirála je podobná strategií paralelní spirále, lze ale u ní naprogramovat obrábění pomocí trochoidy, která snižuje opotřebení nástroje. Trochoidní obrábění v tomto případě může pomoci s obráběním zbytkového materiálu, ke kterému může docházet při velkých používaných hodnotách a_e .



Obrázek 52 – Strategie vysokorychlostní spirála

4.3.7 Smíšená spirála

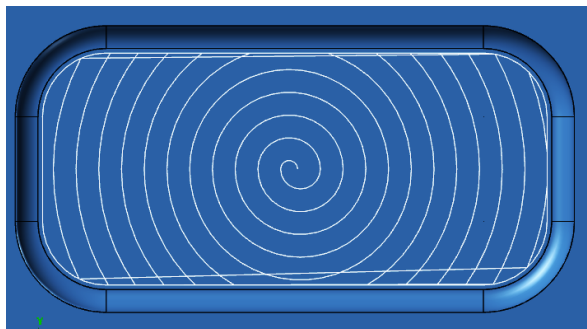
Nástroj po zavrtání do určité hloubky začíná postupně obrábět kruhovou interpolací. Obrábění probíhá zevnitř kapsy ven nebo směrem dovnitř. V případě obrábění kapes, které nejsou kruhové, se dráhy postupně natahují až se v některých místech dráhy nástrojů mění na dráhy přímkové.



Obrázek 53 – Strategie smíšená spirála

4.3.8 Opravdová spirála

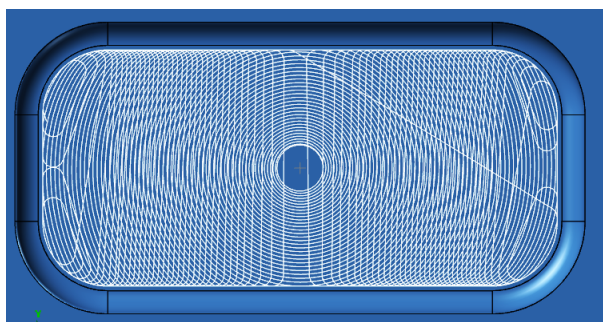
Při této strategii se nástroj zavrtá do předem nastavené hloubky a ze středu směrem ven obrábí pomocí kruhové interpolace, rozdíl mezi tuto strategií a strategií smíšené spirály je v tom, že při strategii opravdovou spirálou se dráhy nástrojů vždy drží své dráhy zvětšující se kružnice. Strategie také umožňuje provádění drah nástroje opačně směrem do středu obrobku. Tyto strategie kruhové interpolace mají velkou výhodu v lepším odvádění třísek, což prodlužuje životnost nástroje a zlepšuje samotný povrch obráběné kapsy.



Obrázek 54 – Strategie opravdová spirála

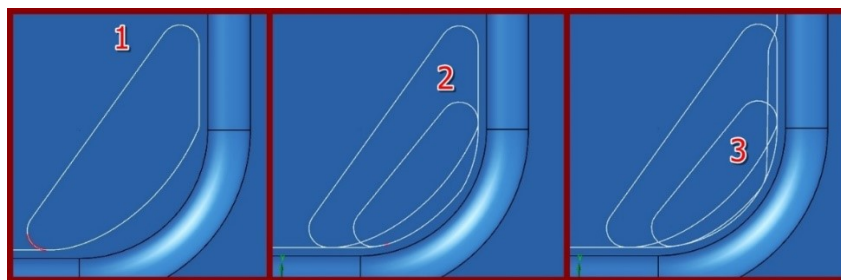
4.3.9 Dynamické frézování

Tato strategie využívá zbytkového obrábění a je vhodná jak pro samotný proces obrábění, tak pro obrábění zbytkového materiálu. Strategie počítá zbytkový materiál z předvrtané díry a z předem definované hloubky zařiznutí obrábí zbytkový materiál pomocí kruhové interpolace. Nástroj se postupně pohybuje ze středu obráběné kapsy směrem k jejímu obvodu způsobem, že rohy jsou obráběny až v konečné fázi procesu obrábění.



Obrázek 55 – Strategie zbytkové dynamické obrábění

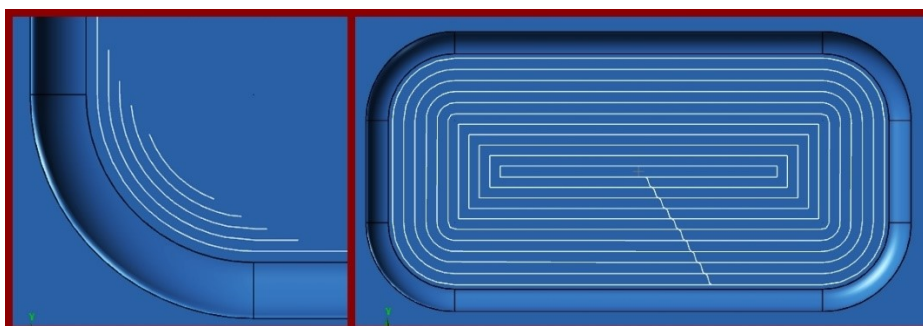
Rohy obrobku jsou obráběny postupně, jak lze vidět na obrázku níže. Provedení začíná částí zleva dráhou nástroje č.1.



Obrázek 56 – Strategie dynamické dokončování rohů

4.3.10 Koncentrické zbytkové frézování

Tato strategie slouží stejně jako strategie dynamické zbytkové obrábění k obrábění zbytkového materiálu s tím rozdílem, že dráhy koncentrického frézování kopírují zbytkový materiál bez vracejících se pohybů na prázdno. Použitím této metody pro obrábění kapes z předvrtané díry za použití velkých hodnotách radiálních řezů a_e , může docházet k neobrobení určitých částí kapes. Tuto situaci strategie řeší možností nastavení minimální a maximální šířky záběru v procesu obrábění.

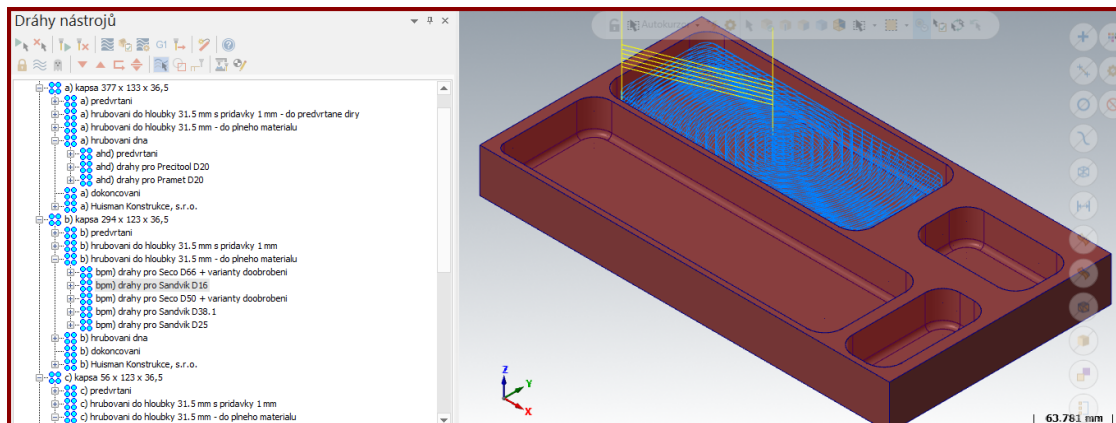


Obrázek 57 – Strategie koncentrické zbytkové

4.4 Teoretické srovnávání postupů výroby zadaných kapes

Pro vytvoření jednotlivých postupů sloužil program Mastercam 2017, do kterého se vložil model obrobku obsahující všechny 4 kapsy ve formátu *.stp, který byl vymodelován v CAD programu SolidEdge ST4. Po načtení modelu do programu Mastercam 2017 se přizpůsobilo polohování modelu, vybral se postprocesor pro frézovací centrum DMG DMU 50 a pro model se nastavil polotovar. Do knihovny nástrojů se vytvořily jednotlivé vybrané nástroje. Všechny vybrané strategie obrábění se pro jednotlivé nástroje nebo skupinu nástrojů stanovily zvlášť pro lepší přehlednost. Jednotlivé parametry strategií jako např. najetí nástroje, přídavky, místa zařiznutí do materiálu, se volily tak, aby následné porovnání bylo co nejpřesnější. Srovnání se zabývalo jen hrubovacími strategiemi, které měly přídavky 1 mm na dno i na stěny. Jednotlivé strategie byly prováděny bez dokončení. Stanovené časy cyklů a celkové časy obrobení jednotlivých kapes, které se získaly ze

simulace, se následně zapsaly do tabulek. Kromě porovnání časů jednotlivých strategií se také porovnávalo množství odebraného materiálu nebo výkonů stroje potřebného pro danou strategii obrábění za zvolených podmínek.

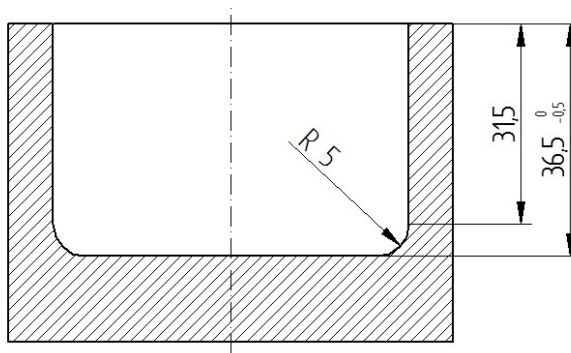


Obrázek 58 – Struktura programu pro porovnání strategií obrábění v CAM systému Mastercam 2017

4.5 Porovnávání způsoby obrábění kapes

4.5.1 Obrábění poloviny kapes a dna kapsy zvlášť

Obráběné kapsy měly zaoblené dno rádiusem $R\ 5$ mm, z toho důvodu se nabízí možnost rozdělit samotné obrábění na dvě části. Jako první by se obráběla část kapsy do hloubky $h = 31,5$ mm a následně dno drážky do hloubky $h = 36,5$ mm viz obrázek.



Obrázek 59 – Hloubkové rozměry obráběných kapes

Způsobů provedení je více např. obrábění pomocí zařízení do materiálu šroubovicí nebo rampou, kde se vstupní bod volí podle charakteristiky obráběné kapsy a strategie, anebo také pomocí předvrtáním díry vrtákem na požadovanou hloubku, ze které by se provádělo samotné obrábění při konstantní souřadnici Z.

Tyto otvory jsou v některých případech zhotoveny v rozích kapsy, což působí negativně, protože přerušovaný řez má nepříznivý vliv na trvanlivost břitu nástroje, hlavně u řezné keramiky a slinutých karbidů. V těchto místech také dochází k hromadění třísek a nástroj,

který toto množství třísek překonává, snižuje svou trvanlivost díky vysoké teplotě vyskytovaných třísek. Teplota neovlivňuje jen nástroj, ale také povrch obráběné součásti ¹⁶. V předvrtané díře může zůstat po vrtáku neobrobený zbytkový materiál z důvodu geometrie nástroje. To může při následném najetí frézy způsobit kolizi.

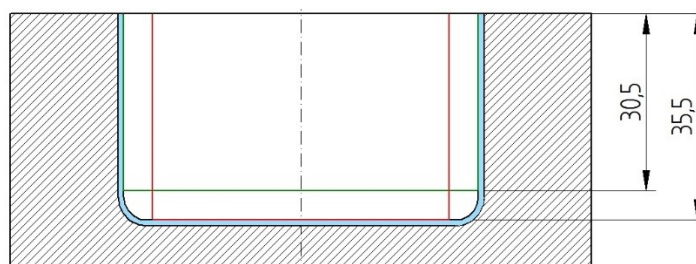
Dále se porovnával způsob frézování kapes nástroji s většími průměry než poloměry kapes všemi vybranými strategiemi a následného obrobení zbytkového materiálu nástroji s průměry menšími.

4.5.2 Obrábění kapes na plnou hloubku a následného obrábění zbylého materiálu v rozích kapsy s nástrojem o menším průměru

Tyto varianty se mohou od způsobu frézování horní části kapsy a dna zvláště lišit složitostí programování cyklů, kde je potřeba zvážit velikost přídavek na obrábění. Během tohoto postupu může být použito více nástrojů, než tomu bylo v předešlém případě.

Varianta plné hloubky na jednu axiální hloubku řezu strategiemi kruhových interpolací a zbytkového obrábění

Jedná se o variantu, kdy se kapsa obráběla frézou na jednu hloubku řezu strategiemi kruhových interpolací nástroje a zbytkový materiál stěn a dna se následně obrobil jinými nástroji pomocí zbytkových strategií. Na obrázku je znázorněno červeně odebrání materiálu pomocí strategií kruhových interpolací, zeleně hloubky řezu při obrábění zbylého materiálu na stěnách kapsy a zbytek se provádělo nástrojem s rohovým rádiusem, který měl rozměr zaoblení dna pro obrobení zbytkového materiálu na dně drážky. Přídávky na obrábění jsou zvýrazněny modře.

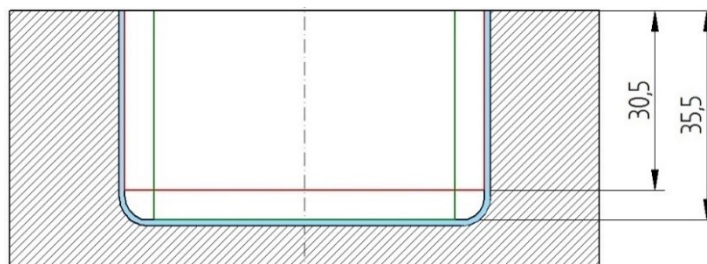


Obrázek 60 – Varianta obrábění hloubky kapsy na jednu hodnotu axiální hloubky řezu a_p strategiemi kruhových interpolací a zbytkového obrábění

Varianta plné hloubky na více axiálních hloubek řezu a zbytkového obrábění

Pomocí této varianty se kapsa obráběla ze dvou cyklů. První cyklus obráběl do hloubky $h = 31,5$ mm s přídávky na dno a stěny 1 mm a druhý do $h = 35,5$ mm s většími přídávky na stěnách kapes z důvodu požadovaného zaoblení dna kapsy a jednoho milimetru na dno

kapes. Zbylý materiál vzniklý navolením přídávku se dokončil frézou se zaoblením řezné části nástroje, aby dno mělo požadovaný tvar. Na obrázku je červeně vyznačený první cyklus a zelenou cyklus druhý. Zvolené přídávky pro proces hrubování jsou zvýrazněny modře.





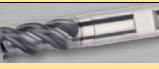


Obrázek 61 – Varianta plné hloubky na více hodnot axiální hloubky řezu a_p a zbytkového obrábění

4.6 Použité nástroje pro porovnávání

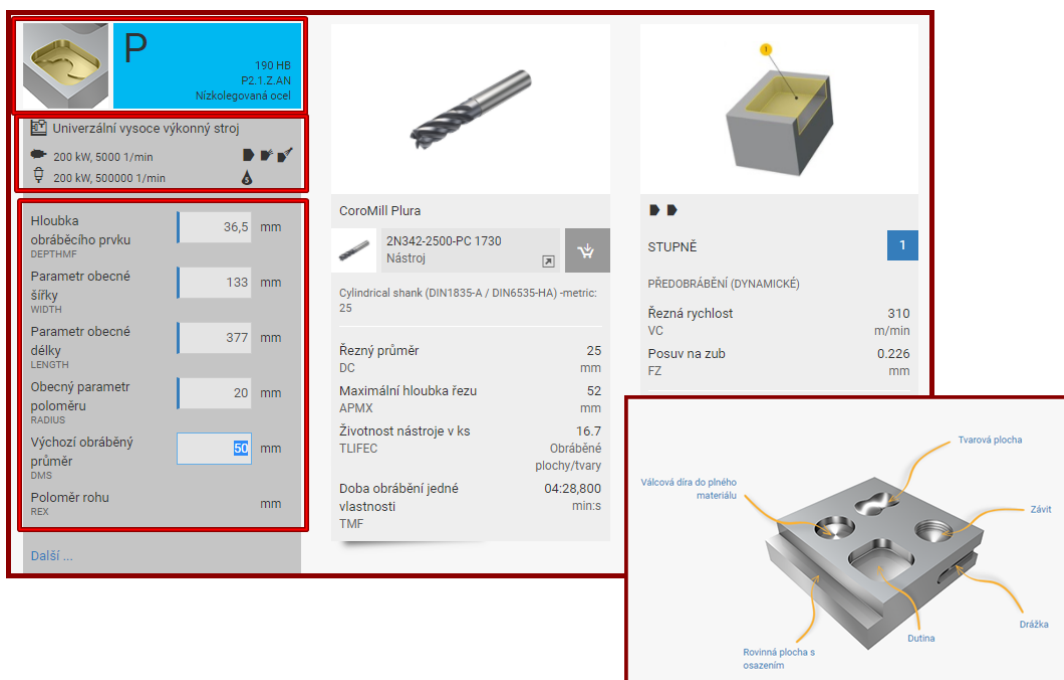
Zde se nachází jen část nástrojů a jejich řezných podmínek, kompletní tabulky srovnávaných nástrojů jsou obsaženy v příloze. Pro jednotlivé kapsy se vybíraly nástroje s průměry od nejmenšího po největší v závislosti rozměrů jednotlivých kapes. Mezi vybranými nástroji byly i nástroje, kterými se experimentálně obráběly kapsy v kapitole 4.2.

Tabulka 23 – Tabulka vybraných porovnávaných nástrojů a jejich zvolené řezné podmínky

obrázek	výrobce a označení nástroje	zdroj	D_c	f_z	a_p	a_e	v_c
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]
	Sandvik 2N342-1600-PC1730	[19]	16	0,08	5	8	150
		[19]	16	0,10	30,5	0,6	280
	Sandvik 2N342-2500-PC1730	[20]	25	0,09	5	12,5	150
		[20]	25	0,20	30,5	0,8	290
	Sandvik RA390-038M32-17H VBD R390-17 04 08M-KH 3040	[21] [22]	38,1	0,15	5	19	250
	Seco R220.29-0066-08.6A VBD RPHT1605MOT-M12 F40	[9] [25]	66	0,30	1,5	33	160
	Precitool 179064 20,00x5,00	[11]	20	0,09	5	8	150

Řezné podmínky byly stanoveny pro jednotlivé strategie zvlášť podle katalogových hodnot jednotlivých výrobců, nebo podle kalkulátorů řezných podmínek daných výrobců.

Například pro nástroj od Sandviku s označením 2N342-2500-PC 1730 byly řezné podmínky stanoveny podle výpočetního programu Tool Guide, který přizpůsobuje pracovní podmínky nástroje dle použité strategie, rozměrů obrobku, materiálu nebo výkonu stroje viz Obrázek 62. Tato aplikace také dokáže navrhnout optimální volbu nástrojů pro dané operace.



Obrázek 62 – Stanovení řezných podmínek aplikaci Tool Guide³¹

V případě podmínek nástrojů výrobce SECO se použil kalkulátor Suggest³².

4.7 Vzorce pro výpočet určitých hodnot

Jako příklad byl vybrán nástroj D_c 50 SECO R220.69-00050-033-12,4AN se zvolenými parametry z parametrů doporučených výrobcem. Jednotlivé výkony nástrojů jsou obsahem přílohy.

Otáčky¹⁷:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{D_c \cdot \pi} = \frac{130 \cdot 1000}{50 \cdot \pi} = 827,61 \text{ min}^{-1} \quad (4.7.1)$$

kde: v_c je řezná rychlost [$m \cdot \text{min}^{-1}$]
 D_c je průměr nástroje [mm]

Rychlost posuvu¹⁷:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,09 \cdot 4 \cdot 827,61 = 297,94 \text{ mm/min} \quad (4.7.2)$$

kde: f_z je posuv na zub [mm]

z je počet zubů nástroje [-]

Objem úběru materiálu za jednotku času ¹⁷:

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} = \frac{25 \cdot 5 \cdot 297,94}{1000} = 37,24 \text{ cm}^3/\text{min} \quad (4.7.3)$$

kde a_e je hodnota radiálního řezu [mm]

a_p je hodnota axiálního řezu [mm]

Střední tloušťka třísky ¹⁷:

$$h_m \cong f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_c}} = 0,09 \cdot \sqrt{\frac{25}{50}} = 0,06 \text{ mm} \quad (4.7.4)$$

Specifická řezná síla ^{17 18}:

$$k_c = \frac{1-0,01 \cdot \gamma_0}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1.1} = \frac{1-0,01 \cdot -5,8}{0,06^{0,25}} \cdot 1700 = 3634,1 \text{ N/mm}^2 \quad (4.7.5)$$

kde γ_0 je úhel čela v ortogonální rovině[°]

$k_{c1.1c}$ je specifická řezná síla [N/mm^2]

m_c je nárůst křivky k_c [-]

Výkon vřetene ¹⁷:

$$P_{mot} = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{6 \cdot 10^7 \cdot \eta} = \frac{5 \cdot 25 \cdot 297,94 \cdot 3634,1}{6 \cdot 10^7 \cdot 0,9} = 2,47 \text{ kW} \quad (4.7.6)$$

kde η je účinnost stroje [%]

4.8 Maximální velikosti nástrojů pro obrábění kapes s maximální radiální hodnotou řezu

Velikost nástroje může ovlivňovat při jednotlivých strategiích obrábění tvorbu drah nástrojů. Jako příklad může sloužit strategie paralelní spirála – vyčistit rohy, u které docházelo u větších průměrů nástrojů k tomu, že samotné čištění vygenerováno nebylo a dráhy nástrojů vypadaly jako u obvyčejné paralelní spirály.

Kapsy lze obrábět i způsobem uzavřené drážky pomocí lineárního zahlubování. Frézování pomocí stopkových fréz je náročná operace, dochází zde ke špatnému odvodu třísek a kladou se požadavky ohledně tuhosti stroje. Nástroje jsou citlivé k účinkům řezných sil a nástroj má proto tendenci k průhybům a frézována drážka pak nemá dokonalý pravoúhlý tvar. Přesnost a produktivita lze zvýšit rozdělením operace do dvou fází, kdy se použije

nástroj o menším průměru, než je šířka drážky. V první fázi probíhá hrubování v plném materiálu a ve fázi druhé se dokončuje obvod drážky ⁷.

Bude – li se kapsa obrábět najednou na danou hloubku s přídavky na stěnu 6 mm vzhledem k zaoblení dna, budou pro jednotlivé kapsy maximální rozměry následující.

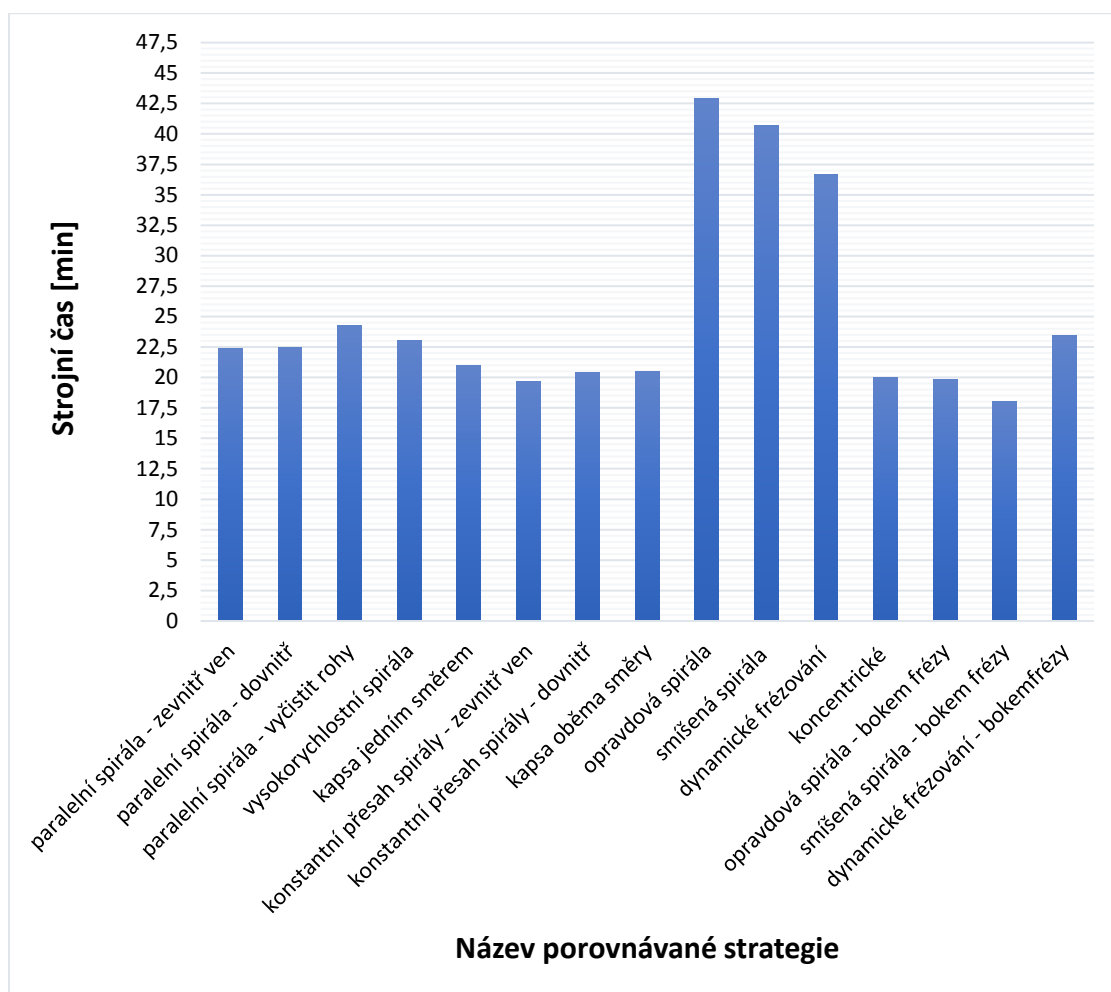
Tabulka 24 – Maximální rozměr nástrojů při hrubování kapes s maximální hodnotou radiálního řezu

kapsa [mm]	D _c [mm]
377 x 133 x 36,5 _{-0,5} ⁰	121
294 x 123 x 36,5 _{-0,5} ⁰	111
56 x 123 x 36,5 _{-0,5} ⁰	44
67 x 123 x 36,5 _{-0,5} ⁰	55

4.9 Výsledek porovnání nástrojů a strategií obrábění

4.9.1 Strojní časy jednotlivých strategií

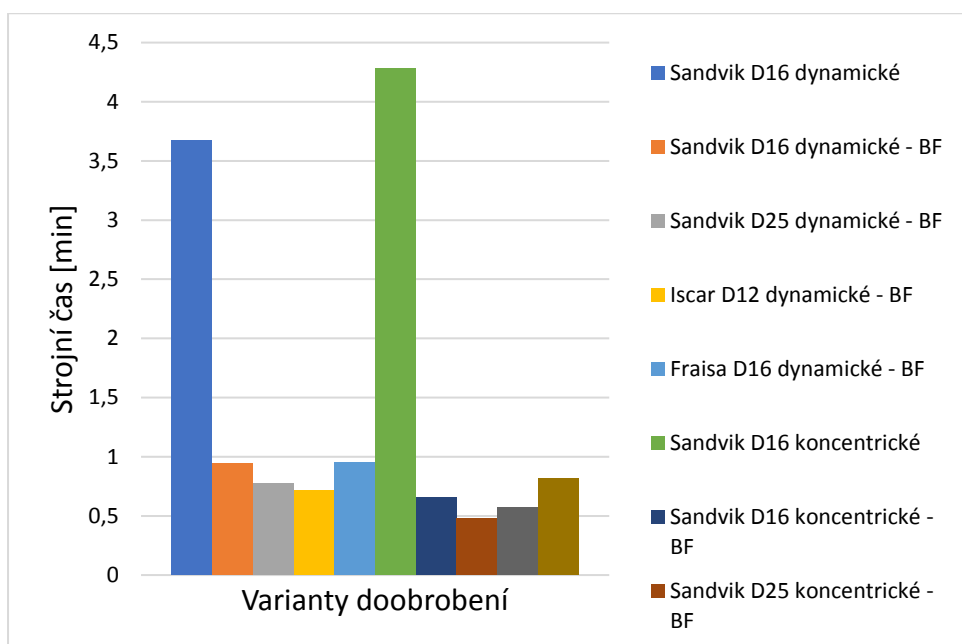
Jako časy strategií se počítaly jen strojní časy bez času rychloposuvů a výměn nástrojů. Časové rozdíly strategií lze rozebrat na daném příkladu, kde byly vybrány teoretické strojní časy při obrábění kapsy s označením B nástrojem Sandvik D_c 25 při způsobu obrábění do hloubky $h = 30,5$ mm, dno se obrábělo již jiným nástrojem a zahloubení do materiálu bylo pomocí zafrézování po šroubovici. Z grafu jasně vyplývá, že nejdelší časy byly u strategií kruhových interpolací s názvy opravdová spirála, smíšená spirála a dynamické frézování s řeznými podmínkami, které nebyly voleny pro frézování kruhovou interpolací s velkou hodnotou axiální hloubky řezu. Zde je názorná ukázka, jak špatná volba řezných podmínek může mít vliv na trvanlivost nástroje ale také na celkový řezný čas. Naopak tyto strategie při použití podmínek určených pro obrábění bokem frézy, měly časy nejkratší.



Obrázek 63 – Grafické znázornění strojních časů různých strategií použitím nástroje Sandvik D 25

4.9.2 Porovnání časů strategií obrábějící zbytkový materiál na rozích kapes

Při způsobu obrábění nástrojem o průměru větším, než byly poloměry rohů kapes, zůstal v těchto rozích neobrobený materiál. Časy jednotlivých variant doobrobení jsou porovnány v grafu. Jako příklad byl vybrán způsob obrábění frézou SECO D_c 50 + varianty nástrojů doobrobení u kapsy s označením B. V grafu jsou uvedena zkratková označení těchto nástrojů pro lepší orientaci (zkratka BF znamená bokem frézy). U daného způsobu obrábění kapes doobrobením zbytkového materiálu u většiny variant byl nejlepší čas frézou Sandvik D_c 25 použitím strategie zbytkové koncentrické.

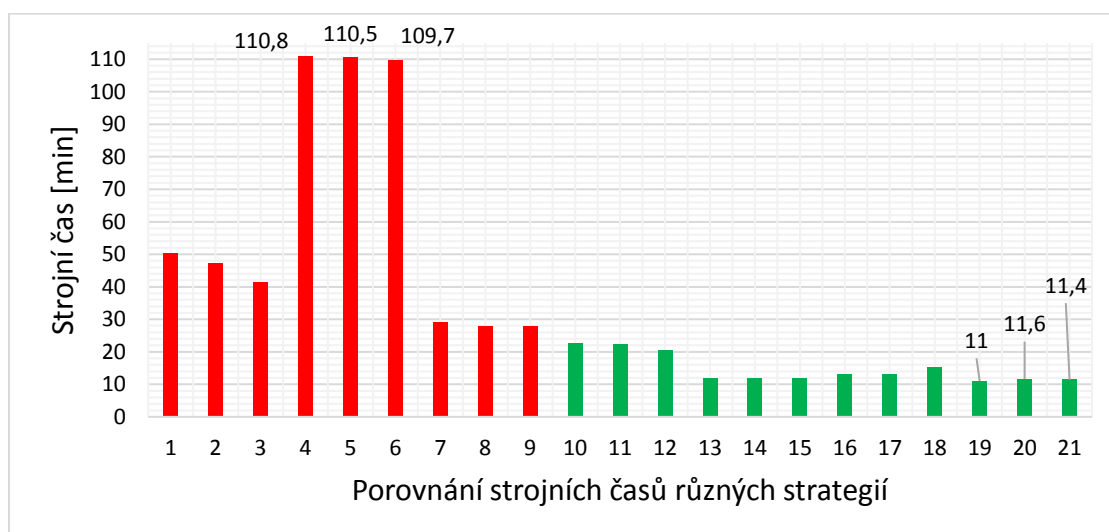


Obrázek 64 – Porovnání variant doobrobení zbytkového materiálu v rozích kapsy vzniklého po obrobení větším nástrojem

4.9.3 Srovnání nejdelších a nejkratších celkových časů hrubování všech způsobů obrábění kapes

Strategie s nevhodně zvolenými řeznými podmínkami viz podmínky nevhodné pro strategie kruhovými interpolacemi pro monolitní stopkové frézy, ve srovnání nejsou zahrnuty. Vybrané strojní časy byly součástí při hrubování kapsy s označením B.

Na obrázku 65 jsou znázorněny nejkratší a nejdelší strojní časy tří způsobů obrábění (vysvětleno pod obrázkem 65). Červeně jsou vyznačeny způsoby s nejdelším strojním časem a zeleně s nejkratším.



Obrázek 65 – Grafické znázornění vybraných nejdelších a nejkratších strojních časů jednotlivých způsobů obrábění kapsy u kapsy B

Způsob č. 1 znamená obrábění horní částí kapsy a dna zvlášť jiným nástrojem, při způsobu č. 2 probíhá obrábění kapsy s průměrem nástroje větším než poloměr zaoblení rohu kapsy, následného obrábění zbytkového materiálu na rozích použitím dalšího nástroje a poté obrábění dna kapsy třetím nástrojem. Způsob č. 3 je obrábění jedním nástrojem na požadovanou hloubku kapsy a následným obráběním zbytkového materiálu na dně kapsy nástrojem druhým. Vysvětlení srovnávaných způsobů obrábění je v tabulkách 25.1 a 25.2.

Ze všech srovnávaných variant obrábění se s ohledem na délku strojních časů nejlépe jeví ten, kdy se danou strategií obrobila celá kapsa najednou a následně se obrobil zbytkový materiál viz kapitola 4.5.2 Ze srovnání jednotlivých strategií hrubování za použití různých nástrojů, nebylo možné určit nejvýhodnější strategii pro obrábění kapes o různých rozměrech. Proto je třeba pro daný obráběný tvar hledat nejvýhodnější strategii. Všechny varianty a způsoby obrábění s jednotlivými časy jsou obsahem přílohy.

V tabulce 25.1 je červeně vyznačena varianta s nejdelším strojním časem

Tabulka 25.1 – Vysvětlení porovnávaných způsobu obrábění kapes s nejdelšími strojními časy

Zp.	Č.	První nástroj	Druhý nástroj	Třetí nástroj
1	1	Sandvik D _c 16 opravdová spirála – BF	Pramet D _c 20 opravdová spirála	
1	2	Sandvik D _c 16 smíšená spirála – BF	Pramet D _c 20 opravdová spirála	
1	3	Sandvik D _c 16 paralelní spirála – vyčistit rohy	Pramet D _c 20 opravdová spirála	
2	4	SECO D _c 50 opravdová spirála – BF	Sandvik D _c 16 zbytkové koncentrické	Pramet D _c 20 opravdová spirála
2	5	SECO D _c 50 smíšená spirála - BF	Sandvik D _c 16 zbytkové koncentrické	Pramet D _c 20 opravdová spirála
2	6	SECO D _c 50 dynamické – BF	Sandvik D _c 16 zbytkové koncentrické	Pramet D _c 20 opravdová spirála
3	7	Sandvik D _c 25 paralelní spirála – vyčistit rohy	Precitool D _c 20 zbytkové dynamické	
3	8	Sandvik D _c 25 paralelní spirála – zevnitř ven	Precitool D _c 20 zbytkové dynamické	
3	9	Sandvik D _c 25 vysokorychlostní spirála	Precitool D _c 20 zbytkové dynamické	

V tabulce 25.2 je zeleně vyznačena varianta s nejkratším strojním časem

Tabulka 25 – Vysvětlení porovnávání způsobu obrábění kapes

Zp	Č.	První nástroj	Druhý nástroj	Třetí nástroj
1	10	Sandvik D _c 25 koncentrické	Pramet D _c 35 oběma směry	
1	11	Sandvik D _c 25 opravdová spirála – BF	Pramet D _c 35 oběma směry	
1	12	Sandvik D _c 25 smíšená spirála - BF	Pramet D _c 35 oběma směry	
1	13	Sandvik D _c 38,1 – paralelní spirála – zevnitř ven	Pramet D _c 35 oběma směry	
1	14	Sandvik D _c 38,1 paralelní spirála dovnitř	Pramet D _c 35 oběma směry	
1	15	Sandvik D _c 38,1 oběma směry	Pramet D _c 35 oběma směry	
2	16	Seco D _c 66 konstantní přesah spirály zevnitř ven	Iscar D _c 12 zbytkové koncentrické	Pramet D _c 35 oběma směry
2	17	Seco D _c 66 konstantní přesah spirály dovnitř	Iscar D _c 12 zbytkové koncentrické	Pramet D _c 35 oběma směry
2	18	Seco D _c 66 oběma směry	Iscar D _c 12 zbytkové koncentrické	Pramet D _c 35 oběma směry
3	19	Sandvik D _c 38,1 koncentrické	Precitool D _c 20 zbytkové dynamické	
3	20	Sandvik D _c 38,1 paralelní spirála zevnitř ven	Precitool D _c 20 zbytkové koncentrické	
3	21	Sandvik D _c 38,1 oběma směry	Precitool D _c 20 zbytkové koncentrické	

4.10 Srovnání nově navržené technologie se skupinovou technologií předešlou

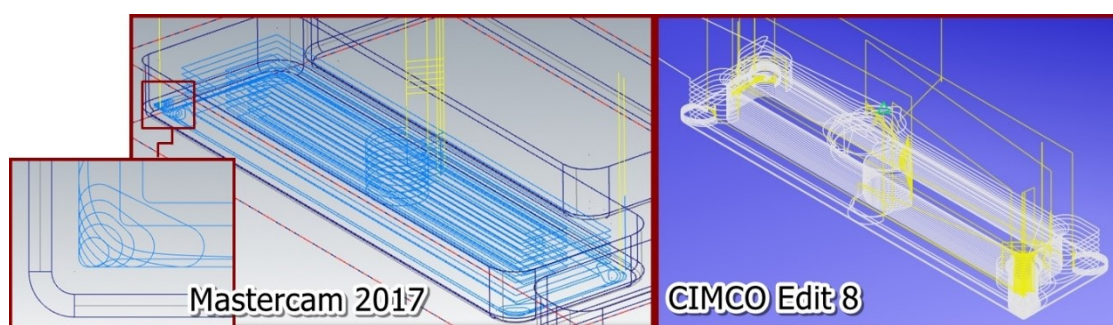
Jak již bylo napsáno výše, ze srovnání jednotlivých teoretických způsobů hrubování nebylo možno určit nejvýhodnější strategii, protože jsou ovlivněny rozměry daného obrobku, proto za daných řezných podmínek se pro různé kapsy jevíly různé nejlepší strategie. Jako obecné doporučení nových strategií byly doporučeny s kruhovou interpolací. Přesněji strategie opravdová spirála, smíšená spirála a dynamické frézování s axiální hloubkou řezu v hodnotě požadované hloubky kapsy a dynamického doobrobení zbylého materiálu dalším nástrojem. Strategie dynamické zbytkové bylo z teoretického časového srovnání se strategií zbytkového koncentrického obrábění horší, zato ze způsobů provedení výhodnější z hlediska trvanlivosti nástroje a výsledného povrchu obrobku po obrobení.

U větších kapes, kde bylo možné u jiných strategií použít větších nástrojů, byly jednotlivé časy kratší. V těchto případech byla doporučena strategie vysokorychlostní spirála.

Teoretické porovnávání jednotlivých strategií probíhalo za snížených doporučených podmínek výrobců nástrojů, ale také podmínkami doporučenými. Strojní časy strategií kruhových interpolací s doporučenými řeznými podmínkami výrobců byly s porovnáním s ostatními strategiemi znatelně kratší. Proto se tedy nabízí možnost použití větších nástrojů, nebo zvýšení řezných podmínek.

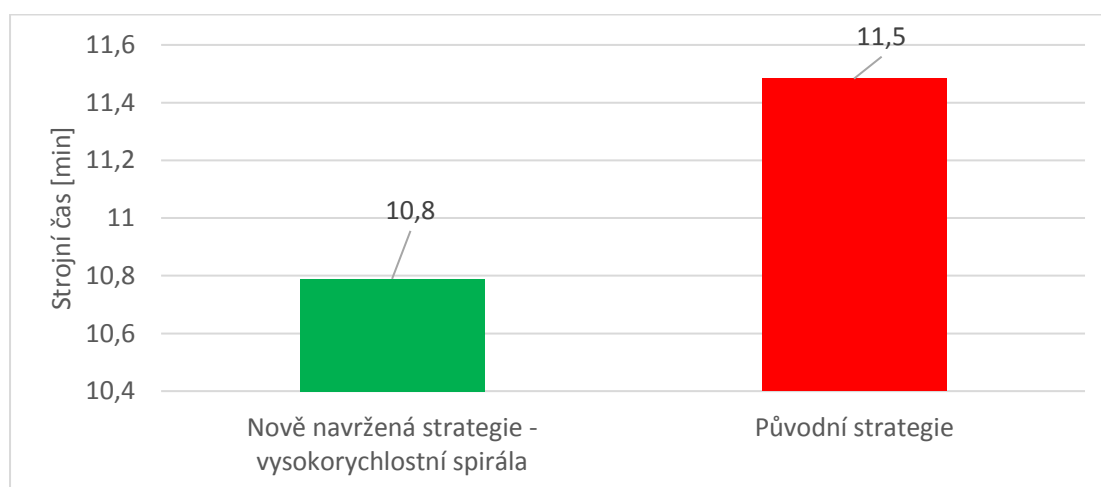
Stanovené řezné podmínky pro porovnávání nově navržené technologie s technologií předešlou jsou obsaženy ve výpočtové tabulce, která je součástí přílohy.

Pro kapsu s označením A byla doporučena strategie vysokorychlostní spirála. Porovnávaly se časy řezu původní strategie získané ze simulačního programu CIMCO Edit 8 a nově navržené strategie z programu Mastercam 2017. Jednotlivé návrhy jsou zobrazeny graficky níže.



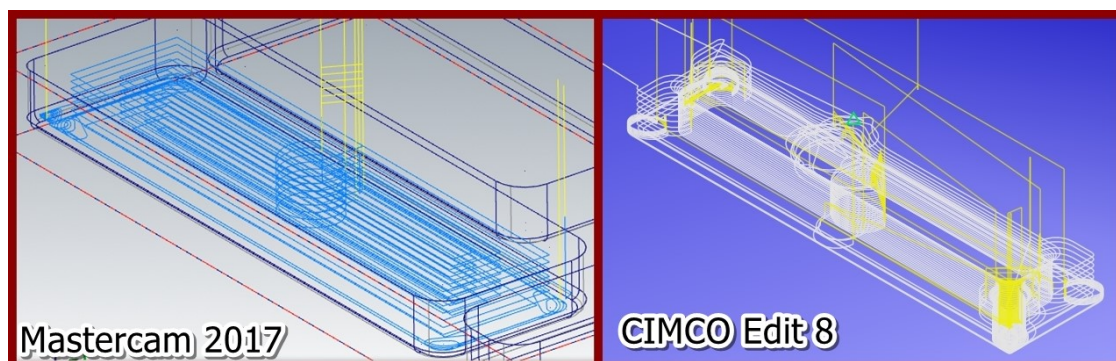
Obrázek 66 – Srovnání nových drah nástrojů s původními u kapsy s označením A

Dle srovnání jednotlivých nástrojů byly nejkratší časy za použití nástrojů Sandvik D_c 38,1; Iscar D_c 12; Precitool D_c 20. Nástrojem Sandvik D_c 38,1 se kapsa obrobila na požadovanou hloubku kapsy, nástrojem Iscar D_c 12 se obrobil zbytkový materiál v rohu kapsy zaoblený rádiusem R 10. Pro obrobení zbytkového materiálu dna sloužil nástroj Precitool D_c 20 s R 5 pro dosažení požadovaného rozměru kapsy.

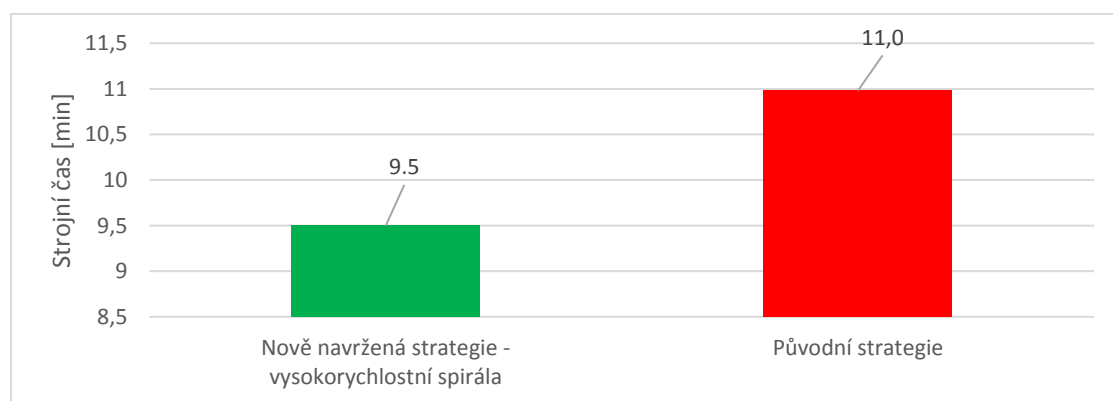


Obrázek 67 – Grafické srovnání nově navržené strategie se strategií původní u kapsy s označením A

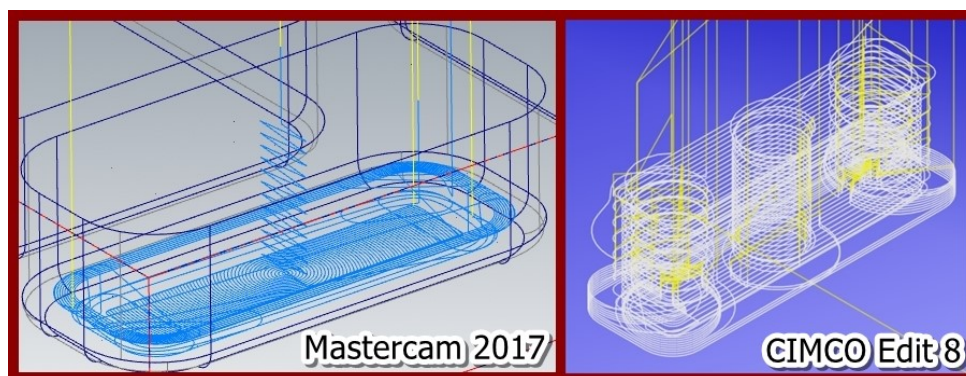
U kapsy B bylo navržnuto podobné řešení jako u kapsy A, nejkratší časy byly dosaženy kombinací Sandvik D_c 38,1 a Precitool D_c 20. Stejným způsobem jako u předešlé kapsy, ale bez použití nástroje Iscar D_c 12, protože daná kapsa měla všechny 4 rohy zaobleny s R 20. Použité řezné podmínky použité při srovnání jsou obsahem přílohy.



Obrázek 68 – Srovnání nových drah nástrojů s původními u kapsy s označením B



Obrázek 69 – Grafické srovnání nově navržené strategie se strategií původní u kapsy s označením B

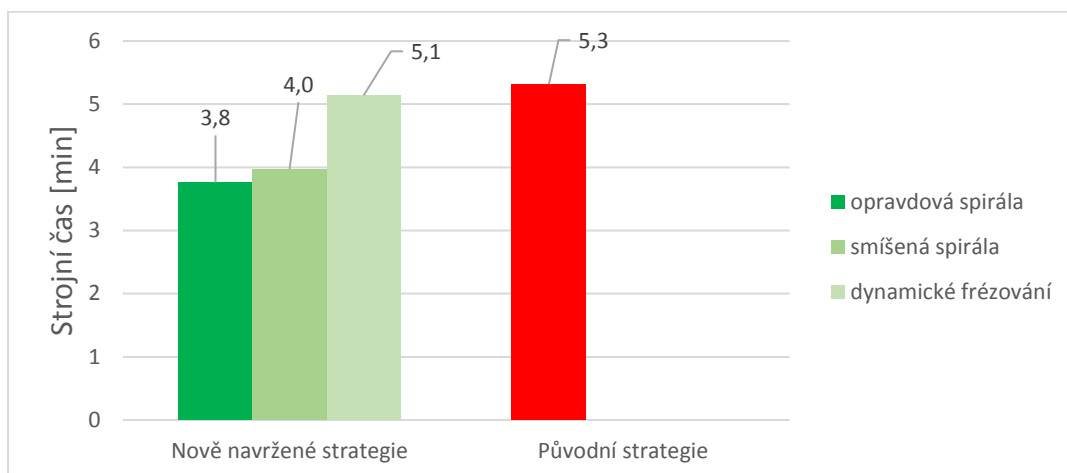


Obrázek 70 – Srovnání nových drah nástrojů s původními u kapsy s označením C

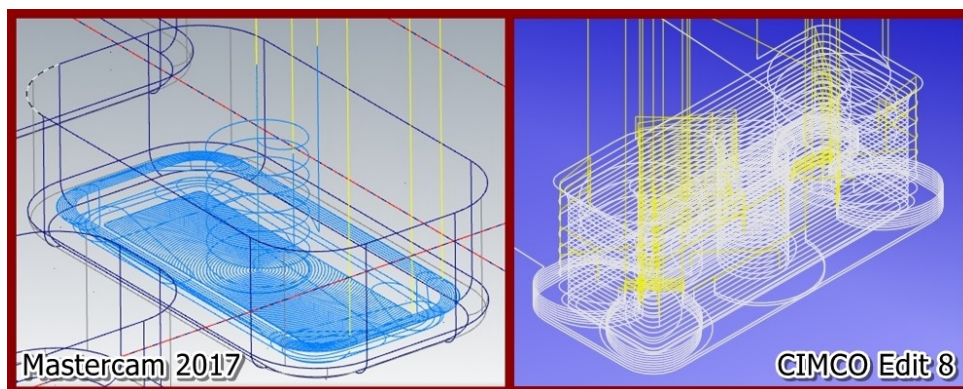
U kapes s označením C a D se z časového hlediska jako nejlépe jevíly strategie kruhových interpolací s použitím nástrojů Sandvik D_c 25; Iscar D_c 12; Precitool D_c 20.

Průběh frézování byl pomocí nástroje Sandvik D_c 25 s axiální hloubkou řezu $a_p = 36,5$ mm s přídavky 1 mm, nástrojem Iscar D_c se obrobil zbytkový materiál na stěnách kapsy s hodnotou $a_p = 31,5$ mm s přídavky 1 mm. Zbytkový materiál na dně kapsy byl

obroben nástrojem Precitool D_c 20. Použité řezné podmínky pro srovnání jsou obsahem přílohy.

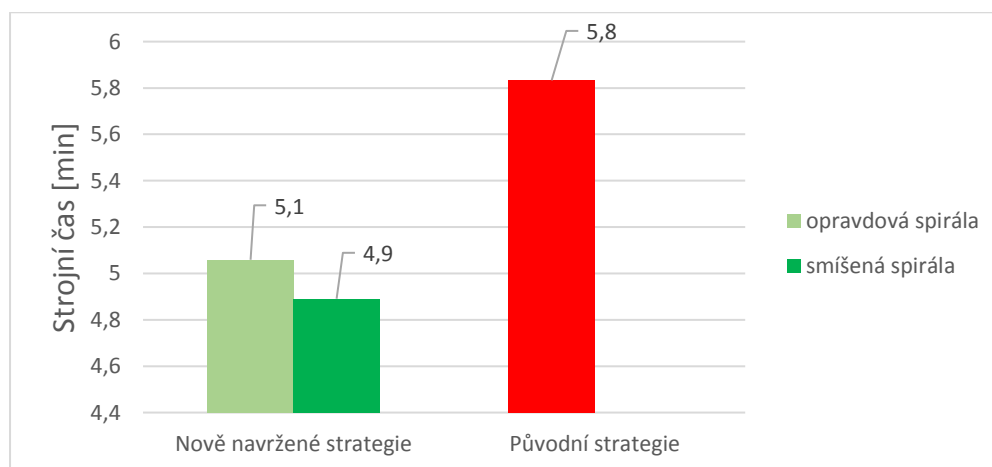


Obrázek 71 – Grafické srovnání nově navržené strategie se strategií původní u kapsy s označením C



Obrázek 72 – Srovnání nových drah nástrojů s původními u kapsy s označením D

V případě kapsy s označením D strategie dynamické frézování není zahrnuta, neboť její strojní čas byl delší než u původní strategie.



Obrázek 73 – Grafické srovnání nově navržené strategie se strategií původní u kapsy s označením D

Srovnání v použití počtu nástrojů a způsobů obrábění kapes je zobrazeno v tabulce 26. Srovnání platí pouze pro strategie s použitými nástroji pro nově navržené strategie obrábění viz. výše. Tabulka neplatí pro kapsu s označením A, protože obsahuje jeden zaoblený roh s R 20, který je nutno doobrobit nástrojem navíc.

Tabulka 26 – Porovnání vybraných strategií při obrábění kapes

Vysokorychlostní spirála		Kruhové interpolace		Původní strategie	
Počet nástrojů					
2		3		3	
nástroj	Postup	nástroj		nástroj	
1	Hrubování do h = 31,5 mm, do h = 36,5 mm+ přídavky	1	Hrubování do h = 36,5 mm + přídavky	1	Hrubování do h = 36,5 mm + přídavky
2	Zbytkové hrubování dna	2	Hrubování stěn a rohů	2	Hrubování rohů a stěn
		3	Zbytkové hrubování dna	3	Hrubování rohů a stěn

5 Závěr

Diplomová práce se skládala ze dvou částí. V první části se experimentálně zkoušelo obrábět drážky. Experiment probíhal použitím tří strategií pro obrábění drážek a třemi různými upínači nástrojů pod naklopením polotovaru o úhel $2,8642^\circ$, aby nástroj najížděl do materiálu v axiálním řezu $a_p = 6$ mm a končil řez na $a_p = 12$ mm. Cílem experimentu bylo zjistit, zda použité strategie frézování za různých způsobu upnutí a měnicí se hodnoty axiálního řezu nějakým způsobem ovlivní výslednou rozměrovou přesnost a drsnost povrchu. Zkoumaly se také rozdíly mezi teoretickými strojními časy ve generované programem Mastercam 2017 a časy skutečnými při obrábění na frézovacím centru DMU 50.

Vyhodnocení a závěry:

- drážky zhotovené strategií s názvem hřeben měly v porovnání s ostatními strategiemi nejkratší skutečný a teoretický strojní čas, ale poměr mezi těmito časy největší,
- drážky zhotovené technologií iMachiningu měly v porovnání s ostatními strategiemi nejdelší skutečné a teoretické strojní časy, ale poměr mezi těmito časy nejkratší,
- ohledně naměřených parametrů drsnosti na šířce dna drážky nelze přesně určit, zda určité strategie a způsob upnutí měly přímý vliv na drsnost obrobku,
- požadovanému rozměru šířky drážky vyhovovaly jen ty, které byly zhotovené pomocí strategie hřeben s upnutím nástroje do kleštiny,
- šířky drážky v libovolných bodech její délky byly srovnatelné.

Druhá část práce se zabývala inovací technologie frézování kapes na daném obrobku, který byl zadán společnosti Huisman Konstrukce, s.r.o. Práce se zabývala jen procesem hrubování. Po prozkoumání způsobu výroby se navrhlo řešení použitím strategií kruhových interpolací s nástrojem, jehož hodnota axiální hloubky řezu byla ve velikosti požadované hloubky kapes zmenšené o přídávky na obrábění. Jednotlivé dráhy se naprogramovaly pomocí programu Mastercam 2017. Po obrobení vybrané kapsy doporučenými nástroji se stanovily teoretické a skutečné strojní časy a zhodnotil se průběh frézování. Ve druhé polovině této části práce se teoreticky srovnávaly způsoby výroby zadaných kapes za použití různých nástrojů a strategií obrábění a následně se navrhla nová technologie.

Zhodnocení návrhu nové technologie:

Z teoretického srovnání strategií a nástrojů vyplynulo, že neexistuje jedna nejvýhodnější strategie pro kapsy různých rozměrů, proto je nutné hledat pro každý obráběný tvar strategii zvlášť. Ze srovnání jednotlivých strategií a nástrojů se pro každou kapsu zvlášť vybrala

nejvhodnější varianta a porovnávala se s teoretickými strojními časy stávající technologie výroby kapes.

Zhodnocení nově navržených teoretických technologií v porovnání se současnou skupinovou technologií z hlediska strojních časů:

- u kapsy s označením A se dosáhlo o 6,1 % kratšího strojního času doporučenou strategií vysokorychlostní spirály,
- u kapsy s označením B se dosáhlo o 13 % kratšího strojního času doporučenou strategií vysokorychlostní spirály,
- u kapsy s označením C se dosáhlo o 28,3 % kratšího strojního času strategií opravdové spirály, o 24,5 % kratšího strojního času použitím smíšené spirály a o 1,9 % kratšího strojního času pomocí strategie dynamické frézování,
- u kapsy s označením D se dosáhlo o 12,1 % kratšího strojního času pomocí opravdové spirály a o 15,5 % pomocí smíšené spirály.

6 Použitá literatura

1. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004, 104 s. ISBN 80-248-0671-1.
2. Přehled vlastnosti oceli 355J2. *Bolzano: ocel v pohybu...* [online]. Kladno, 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP-%20Prehled%20vlastnosti_S355J2.pdf
3. *Chatterfree: Solid Carbide CHATTERFREE Long Endmills for Finishing Applications* [online]. 2016, 3 s. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.iscar.cz/npa.aspx/countryid/6>
4. *Přístroje na měření tvaru* [online]. 2015, 60 s. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.kubousek.cz/files/kubousek-sro/uploads/files/14-pristroje-na-mereni-tvaru.pdf>
5. MITUTOYO AMERICA CORPORATION. *Surftest SJ-400* [online]. 2011, 14 s. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.mitutoyo.com/Images/003/308/2013_SJ-400.pdf
6. Mahr 150mm Digital Caliper 0.01 mm, Metric. *RS Components Ltd.* [online]. Corby [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://uk.rs-online.com/web/p/calipers/3564771/>
7. SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ S.R.O. *Technická příručka - soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. Sandvik Coromant, 2010, 802 s.
8. SECO TOOLS AB. *Základní úvahy technologie frézování*. Seco Tools AB, 2010, 122 s.
9. Kruhová fréza s kruhovými destičkami R220.29-0066-08.6A. *SECO* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/p_02426225
10. Rohová fréza R217.69-1632.RE-18-3AN. *SECO* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/p_02691805
11. GP UNI Toroidní fréza s podbrušenou stopkou. *Precitool International* [online]. 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.precitool.cz/cz/bk/index.php?catalog=B1302_F1302%20-%20page_16
12. Šroubovací fréza s kruhovými břitovými destičkami 3 35 200/7. *Pokolm: Premium tools. We know how.* [online]. 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.pokolm.de/cz/artikelansicht/?f=3%2035%20200/7>

13. Bearbeitungszentrum - Vertikal HEDELIUS RS 100 K Celox. *LagerMaschinen: European network of stockholding machinery dealers* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://www.lagermaschinen.de/Bearbeitungszentrum---Vertikal_HEDELIUS_RS-100-K-Celox_2013-E0147.html#.WvK2QqSFPIU
14. DMG MORI DMU 50. In: *TECHSPEX* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: [https://www.techspex.com/machining-centers/dmg-mori-seiki\(14926\)/6354](https://www.techspex.com/machining-centers/dmg-mori-seiki(14926)/6354)
15. Cylindrical end mill NB-NVDS. *Fraisa: passion for precision* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [http://webshop.fraisa.ch/index.php/fraeswerkzeuge?lng=en&art\[\]=P8200610](http://webshop.fraisa.ch/index.php/fraeswerkzeuge?lng=en&art[]=P8200610)
16. SKOPEČEK, Tomáš a Petr HOFMANN. Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18.5.2005 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapusťek.html>
17. *Produktová příručka: Frézování* [online]. Kuřim: Walter CZ, 2010, 84 s. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/manuals/cs-cz/handbook-tts-milling-2010-cz.pdf>
18. ISO P Oceli. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_p_steel/pages/default.aspx
19. CoroMill® Plura 2N342-1600-PC 1730: solid carbide end mill for Heavy Duty milling. *Sandvik Coromant*[online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=2N342-1600-PC%20%20%20%20%20%20%20%201730>
20. 2N342-2500-PC 1730: CoroMill® Plura solid carbide end mill for Heavy Duty milling. *Sandvik Coromant*[online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=2N342-2500-PC%20%20%20%20%20%20%20%201730>

30. 880-06 04 06H-C-LM 1044: Břítové destičky CoroDrill® 880 pro vrtání. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-06%2004%2006H-C-LM%20%201044>
31. ToolGuide™. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z:
<http://toolguide.sandvik.coromant.com/TouchTime/coromant/>
32. Suggest. *SECO* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z:
<https://www.secotools.com/#dashboard/Suggest/Suggest>
33. 880-D2800C6-04: Vrták CoroDrill® 880 s vyměnitelnými břítovými destičkami. *Sandvik Coromant*[online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-D2800C6-04>
34. 880-05 03 W08H-P-GR 4024: Břítové destičky CoroDrill® 880 pro vrtání. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-05%2003%20W08H-P-GR%204024%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20&unitsystem=Metric>
35. 880-05 03 05H-C-GR 1044: Břítové destičky CoroDrill® 880 pro vrtání. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-05%2003%2005H-C-GR%20%201044%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20&unitsystem=Metric>
36. 880-D4100C5-03: Vrták CoroDrill® 880 s vyměnitelnými břítovými destičkami. *Sandvik Coromant*[online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-D4100C5-03>
37. 880-07 04 W12H-P-GR 4024: Břítové destičky CoroDrill® 880 pro vrtání. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-07%2004%20W12H-P-GR%204024%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20&unitsystem=Metric>

38. 880-07 04 06H-C-GR 1044: Břítové destičky CoroDrill® 880 pro vrtání. *Sandvik*

Coromant [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:

<https://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-07%2004%2006H-C->

[GR%20%201044%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20&unitsystem=Metric](https://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/Pages/productdetails.aspx?c=880-07%2004%2006H-C-GR%20%201044%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20&unitsystem=Metric)

7 Seznam příloh

Přílohy k diplomové práci

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D. za cenné odborné rady při vypracování stěžejních částí diplomové práce.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2018/136 specifický výzkum v oblasti obrábění a strojírenské metrologie s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.