



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA VÝHOD PROGRESIVNÍHO MODULU IMACHINING SOFTWARE SOLIDCAM

ANALYSIS OF THE ADVANTAGES OF PROGRESSIVE IMACHINING MODULE IN
SOLIDCAM SOFTWARE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Janovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2016

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být vevázáno v obou vyhotoveních práce. Do druhého výtisku bude vložena kopie.

Tento list není třeba tisknut!

ABSTRAKT

Adaptivní obrábění tvořené prostřednictvím modulu iMachining programu SolidCAM je porovnáváno s offsetovou technologií obrábění na experimentálně vytvořené součástce. V jednotlivých kapitolách jsou popsány tvorby programu, jejich simulace a obrábění součásti dle vytvořených programů. Je využito dvou různých frézek a několika druhů materiálů k získání dat. Porovnány jsou časy obrábění, délky drah a opotřebení nástrojů.

Klíčová slova

adaptivní obrábění, iMachining, CNC frézování, SolidCAM

ABSTRACT

Adaptive machining created by iMachining module of the program SolidCAM is being compared with the offset technology of milling on an experimentally created component. In individual chapters are described programming, simulations and milling of component according to developer programmes. In order to obtain data were used two different milling machines and several kinds of material. Comparison was made with milling time, length of tracks and wear of tools.

Key words

adaptive machining, iMachining, CNC milling, SolidCAM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANOVSKÝ, Petr. *Analýza výhod progresivního modulu iMachiningu softwaru SolidCAM*. Brno 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 47 s. 7 příloh. Ing. Aleš Polzer, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza výhod progresivního modulu iMachiningu softwaru SolidCAM** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Petr Janovský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Ivanu Cimrovi z firmy SolidCAM CZ za umožnění vypracování této práce, cenné rady, připomínky a příležitost se podrobně seznámit se softwarem SolidCAM.

Dále děkuji panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Také bych chtěl poděkovat otci Petru Janovskému, který poskytl své firemní vybavení k realizaci obrábění a celé své rodině za podporu a věcné připomínky.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 CHARAKTERISTIKA ADAPTIVNÍHO OBRÁBĚNÍ POPSANÁ PROSTŘEDNICTVÍM SOFTWARE SOLIDCAM	10
1.1 O firmě SolidCAM CZ.....	10
1.2 iMachining – modul ke generování adaptivních drah.....	10
1.2.1 Historie iMachingu	10
1.2.2 Způsob generování drah.....	10
1.2.3 Výpočet řezných podmínek	11
2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO OBROBKU	13
2.1 Tvar obrobku.....	13
2.2 Volba materiálů.....	14
3 TVORBA NC KÓDŮ	15
3.1 Volba nástrojů	15
3.2 Popis NC programu pro řídicí systém Heidenhain	15
3.3 Popis programování v programu SolidCAM	17
3.4 Shrnutí a porovnání NC kódů	20
4 VIRTUALIZACE A VERIFIKACE VSTUPNÍHO NC KÓDU.....	22
4.1 Simulace NC programu tvořeného pro řídicí systém Heidenhain	22
4.2 Simulace NC programu generovaného modulem iMachining.....	23
4.3 Výsledky a jejich porovnání.....	24
5 REALIZACE OBRÁBĚNÍ EXPERIMENTÁLNÍHO OBROBKU	25
5.1 Obrobení experimentální součásti.....	25
5.1.1 Obráběcí stroj FV 25 CNC A	25
5.1.2 Způsob upnutí	26
5.1.3 Frézování obrobků	26
5.1.4 Výsledky a porovnání technologií	28
5.2 Obrábění experimentální součástky na prezentaci iMachingu	30
5.2.1 Obráběcí stroj DMU 65 monoBLOCK.....	30
5.2.2 Volba nástrojů.....	31
5.2.3 Řezné podmínky	32
5.2.4 Realizace obrábění	33

5.2.5	Výsledky a porovnání technologií	34
ZÁVĚR		40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		41
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		43
SEZNAM PŘÍLOH.....		44

ÚVOD

Technologie adaptivního obrábění si zakládá na dynamické změně řezných podmínek v průběhu obrábění. Průběžnými změnami radiální šířky záběru a rychlosti posuvu nástroje je dosahováno téměř konstantní řezné síly. Aplikací této technologie se zvyšuje trvanlivosti nástroje a snižuje čas obrábění. [1, 2]

První software, který přišel s adaptivní technologií na trh, byl Surfcam se svým modulem TrueMill. Kvůli neshodám, které panovaly ve firmě, si skupina programátorů vyvinula vlastní algoritmus, ale nevytvořili pro něj žádný CAM systém. Svůj vytvořený modul VoluMill nabízejí k integraci firmám, které nepracují na vlastní adaptivní technologii. Mezi softwary využívající tuto možnost patří CAMWorks, CimatronE, GibbsCAM, NX CAM a další. Firmy, pracující s nativní technologií, jsou Delcam Ltd. s technologií Vortex, Nexnet a.s. s technologií Waweform, HSMWorks ApS s možností high-speed, a nakonec i firma SolidCAM Ltd. s modulem iMachining. [3]

Cílem této práce je analyzovat progresivní modul iMachining. Tato analýza je provedena prostřednictvím porovnání technologií offsetových drah s vhodně zvolenými řeznými podmínkami dle katalogu výrobce s dráhami a řeznými rychlostmi generovanými modulem iMachining. Porovnání je nejenom teoretické pomocí simulací, ze kterých jsou pouze patrné přibližné časy obrábění, ale i jeho realizace na modelové součástce. Z praktického testování lze navíc porovnat nejenom časy obrábění, ale i chování frézky a opotřebení nástroje.

1 CHARAKTERISTIKA ADAPTIVNÍHO OBRÁBĚNÍ POPSANÁ PROSTŘEDNICTVÍM SOFTWARE SOLIDCAM

Software SolidCAM se na českém trhu vyskytuje již od roku 2003. S adaptivní technologií přišel jako druhý mezi konkurencí v roce 2013. [3]

1.1 O firmě SolidCAM CZ

SolidCAM CZ je dceřiná firma SolidVision s.r.o. plně využívající systému SolidWorks. SolidCAM je integrovaný CAM systém nejenom pro SolidWorks, ale i jiné CAD systémy. Využívá přehlednosti a ergonomického uspořádání prostředí SolidWorks. Značnou výhodou je plynulý přechod mezi návrhem modelu až po přípravu programů pro jeho výrobu. SolidCAM je především zaměřen na technologii třískového obrábění jako je frézování a soustružení, ale podporuje i drátové řezání. K dynamickému přepočítávání řezných podmínek obsahuje materiálové tabulky kovů, plastů, ale i dřeviny.

Hlavní předností SolidCAMu je technologie iMachining, která jako jediná zohledňuje výkon vřetene, vlastnosti materiálu a geometrii nástroje pro výpočet řezných podmínek.

1.2 iMachining – modul ke generování adaptivních drah

Modul iMachining je hrubovací technologie využívající prvky vysokorychlostního a adaptivního obrábění. Díky svým algoritmům generuje dráhy, při kterých dosahuje hloubka zanoření nástroje až čtyřnásobku průměru. Toto nejen zvyšuje rychlost a efektivnost obrábění, ale nástroj se opotřebovává rovnoměrně po celé své řezné části.

Tato operace je rozdělena na tři technologie využívající tytéž principy. Hlavní technologií je iHrub, na kterou navazuje iZbytek a k dokončení slouží iFinish.

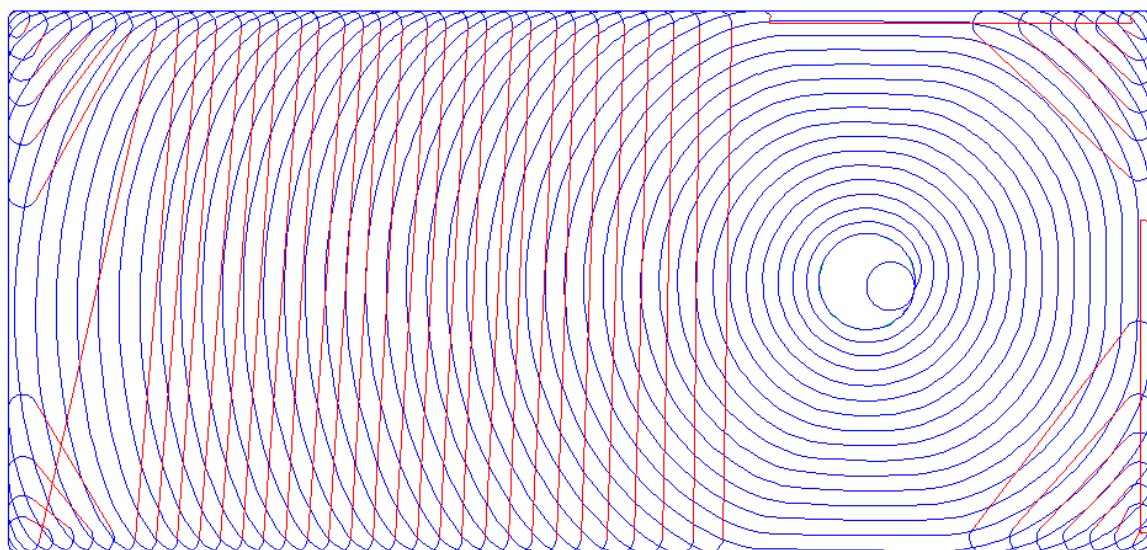
1.2.1 Historie iMachiningu

Počátky iMachiningu se datují k roku 2006. O jeho vznik se zasloužila tak trochu náhoda. Dcera zakladatele společnosti SolidCAM Ltd., která při škole hledala brigádu, sehnala práci jako číšnice, jejíž nový zaměstnavatel Mickey Berman byl dříve velice významný izraelský letecký inženýr, který se zabýval přes více jak 25 let procesy automatizace a CAM systémy. Avšak jejímu otci Emilu Somekhovi se jej nepodařilo v minulosti získat pro svoji firmu. [4]

Nyní se díky dceři oba pánové opět setkávají a spolu s hlavním programátorem Doronem Osovlanski rozvíjejí nápad pana Bermana na algoritmus pro adaptivní obrábění. Až po dlouhých pěti letech vzniká první 2D verze modulu iMachining a dva roky na to se na trhu objevuje i 3D verze. [4]

1.2.2 Způsob generování drah

Algoritmus výpočtu drah si zakládá na morfujících spirálních drahách (viz. Obr. 1.1), které neprovádějí náhlou změnu směru a eliminují výkonové šoky působící na nástroj. Morfující spirála se přizpůsobuje dané kontuře a popřípadě ostrůvkům ležícím v obráběném prostoru. Počátek spirály většinou vychází ze středu kontury, pokud není kontura rozdělena do několika oblastí, kde je využito několika spirál za předpokladu konstantního úběru materiálu. Jestliže toto pravidlo nemůže být dodrženo, dojde ke změně drah na částečně trochoidní. Tyto dráhy dodržují trochoidní pohyb pouze v době kontaktu s materiálem a po ukončení kontaktu přechází nástroj nejkratší možnou cestou na počátek nové dráhy. [2, 5]



Obr. 1.1 Dráha s morfující spirálou a částečně trochoidním pohybem. [6]

Velkou časovou úsporou je minimalizace a eliminace přejezdů a jiných různých nájezdů. Dráhy jsou optimalizovány tak, aby se nástroj nevracel vždy k počátku nového řezu, ale pokračoval řezem jiným. Když už jsou přejezdy nutné, nástroj nevyjíždí z pracovní plochy, pouze se přizvedne od dna obrobku, aby nedocházelo k tření a tupení čela nástroje.

Uživatel je schopen dráhy různými způsoby měnit. Má k dispozici změny efektivity využitím morfujících spirál nebo nastavením přídatných drah pro ochranu tenkých stěn. Stejně jednoduše může nastavovat výjezdy a nájezdy nástroje do pracovního posuvu.

1.2.3 Výpočet řezných podmínek

Řezné podmínky nejsou odvozovány od tabulkových parametrů výrobce nástroje, ale iMachining si je sám vypočítává z definice frézky, materiálu a samozřejmě nástroje. Tímto postupem je zaručena maximální efektivita a bezpečnost pro nástroj, ale i stroj. [2]

Frézka je definována maximálními možnými otáčkami, výkonem motoru vřetene, ale i způsobem převodu točivého momentu. K dispozici je i přizpůsobení ukazatele citlivosti k vibracím, který nezasahuje do výpočtů, pouze varuje uživatele na nebezpečně zvolené parametry.

Materiál je určen mezí pevnosti. Dále je zde zaveden faktor obrobiteľnosti, který není dán tabulkovou hodnotou. Je vytvořen pro jednoduché přizpůsobení výpočtu řezných podmínek dle zkušeností získaných na daném stroji, protože dva různé materiály se stejnou mezí pevnosti se při obrábění nemusí chovat stejně. Při definování materiálu lze předem definovat řezné podmínky, které se předvyplní v kartě průvodce.

U nástroje jsou vyžadovány jeho rozměry, materiál a úhel stoupání šroubovice. Pokud má fréza nerovnoměrný úhel, zapisuje se ten největší.

Řezné podmínky mohou být jednoduše měněny stupněm intenzity zatížení nástroje. K dispozici je celkem osm stupňů. Pro expertní uživatele je v nastavení možnost aktivace pokročilého řízení řezných podmínek. Tímto rozšířením je algoritmus nucen pracovat s hodnotami zadanými uživatelem, které limitují tloušťku třísky, úhel opásání nástroje,

napevno nastavují otáčky, maximální posuv nebo řeznou rychlost. Poslední možností v tomto rozšíření je turborežim. Při sepnutí tohoto módu se dosáhne vyššího úběru materiálu každého stupně asi o 25 %. [2]

Průvodce nastavení řezných podmínek zajišťuje i zpětnou kontrolu, která reflektuje možný vývoj vibrací za daných podmínek. Je zobrazen pod pojmem ACP, který zobrazuje počet axiálních kontaktních bodů definovaného nástroje s vertikální stěnou, která je obráběna. Tento parametr je vypočítáván ze stoupání zubů, počtu zubů a hloubky řezu. Čím blíže je výsledná hodnota celému číslu, tím menší je pravděpodobnost vibrací. Aby uživatel nemusel hlídat tuto hodnotu, je graficky znázorněna barevně (viz. Obr. 1.2). V nastavení frézky lze upravovat toleranci k této hodnotě. [2]

Po...	Krok do...	ACP	
1	10.0000	1.1	☒

Po...	Krok d...	ACP	
1	10.0000	1.6	☒

Po...	Krok do...	ACP	
2	5.0000	0.8	☒

Obr. 1.2 Grafické zobrazení rizika vibrací. [6]

Nepsaným pravidlem z praxe je, že zvolené podmínky jsou správné, pokud projde první řez nástroje. Protože dráhy jsou generovány s konstantním úběrem materiálu a v žádném momentě nebudou na nástroj působit větší síly než v prvním řezu.

2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO OBROBKU

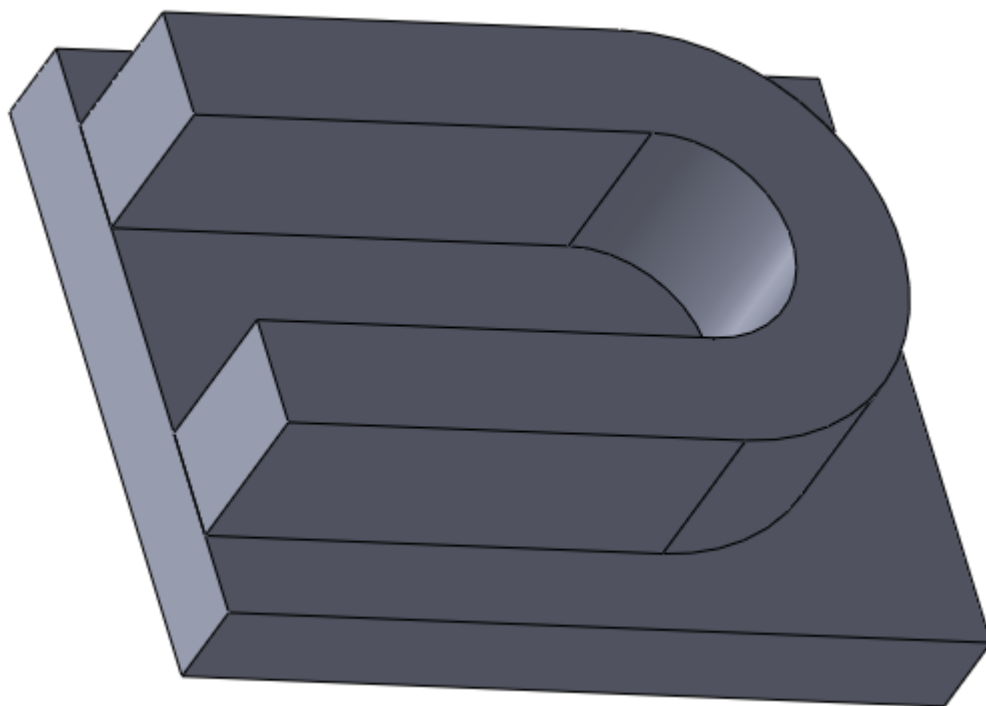
Při návrhu obrobku je nutné vycházet z několika vnějších faktorů:

- rozměry součásti musí vycházet ze snadno dostupného rozměru polotovaru, který je k dispozici v širokém spektru materiálů,
- tvar součásti musí být jednoduchý, pro snadné programování a krátkou dobu obrábění,
- obrobek musí mít vhodný tvar pro analýzu adaptivního obrábění.

Tímto je zajištěna snadná opakovatelnost a reprodukovatelnost testování zvolených technologií.

2.1 Tvar obrobku

Po uvážení všech výše zmíněných faktorů je nepřijatelnější tvar písmene „U“ (viz. Obr. 2.1). Ze znalosti tvorby drah adaptivního obrábění se vnější tvar výstupku obrobí pomocí morfující spirály. V otevřené kapse však nebude dostatečný prostor k jejímu vytvoření a bude použita částečně trochoidní dráha. Úmyslně je obrobek tvarován tak, aby nemuselo docházet k zanořování, které by testování komplikovalo.



Obr. 2.1 Výchozí tvar. [6]

Realizace testování probíhala na dvou úrovních. Vzniklo tak vícero obrobků vycházejících ze zmíněných faktorů. Výkresy jsou v příloze 1 a 2.

Rozměry zvoleného tvaru se uzpůsobí zvolenému rozměru polotovaru. Polotovar pro hlavní test byl zvolen 70x40-55 mm. Pro dodatkové testování byly použity polotovary $\varnothing 90$ mm.

2.2 Volba materiálů

Materiály byly voleny s ohledem na různost vlastností a četnost jejich využití v praxi. V rámci hlavního testu byly připraveny tyto materiály: [7]

- ČSN 15 142 (EN 42CrMo4) s mezí pevnosti $R_m = 1000$ MPa,
- ČSN 11 373 (EN S235JRG1) s mezí pevnosti $R_m = 300$ MPa,
- ČSN 17 240 (DIN 1.4301) s mezí pevnosti $R_m = 760$ MPa,
- EN AW 2007 s mezí pevnosti $R_m = 350$ MPa.

V rámci dodatkového testů byly připraveny tyto materiály: [7]

- ČSN 12 050 (EN C45) s mezí pevnosti $R_m = 540\text{--}720$ MPa,
- ČSN 17 349 (DIN 1.4404) s mezí pevnosti $R_m = 520\text{--}680$ MPa,
- ČSN 19 552 (DIN 1.2343) s mezí pevnosti $R_m = 1220\text{--}1880$ MPa,
- TOOLOX44 (DIN 1.2344) s mezí pevnosti $R_m = 1330\text{--}1450$ MPa.

3 TVORBA NC KÓDŮ

Pro tvorbu programu je třeba znát nástroje, které budou zvoleny k obrábění a způsob upnutí a polohování obrobku na pracovní ploše. Již z principů zvolených technologií vyplývá, že nebude možné použít stejné nástroje, ale upnutí a polohování zůstane stejné.

3.1 Volba nástrojů

Pro konvenční způsob obrábění je zvolena destičková fréza o průměru 35 mm osazená destičkami firmy UNITOOL (AOMT110304R IN2005). Pomocí této frézy bude obrobena vnější kontura součásti. Druhá destičková fréza o průměru 12 mm osazená destičkami firmy HITACHI (JDMT070204R JX1020) bude použita pro obrobení otevřené kapsy.

Pro adaptivní obrábění je vybrána pouze stopková monolitická fréza o průměru 8 mm firmy Hoffmann Group – HOLEX (203044).

3.2 Popis NC programu pro řídicí systém Heidenhain

Struktura NC programu pro Heidenhain je ve formátu popisného dialogu. Skládá se z jednotlivých bloků, které jsou vzestupně číslovány. Blok lze ještě rozdělit na jednotlivá slova.

Začátek programu je uvozen „BEGIN PGM“, jeho platným jménem a rozměrovými jednotkami. Pro zpřehlednění programu je pokračováno komentářem se jménem programu a datem jeho vytvoření. Dále následují bloky s informací o polotovaru, které slouží ke grafické kontrole programu na frézce. Pokud není využita tabulka nástrojů, pak je definován nástroj – jeho délka a průměr. Když je využívána tabulka nástrojů, tak jsou při vyvolání nástroje potřebné informace načteny z tabulky. Hlavní část programu obsahuje informace o otáčkách, posuvech, dráhových pohybech, cyklech a dalších funkcích. Program je ukončen „END PGM“, jeho platným jménem a rozměrovými jednotkami. [8]

```
0 BEGIN PGM 2015 MM
1 ;2015-01-5 KOTVA
2 BLK FORM 0.1 Z X-70.0 Y-22.5 Z-25.0
3 BLK FORM 0.2 X+0.0 Y+22.5 Z+0.0
4 ;HLAV_4B_TK_35
5 TOOL CALL 2 Z S1800
```

Začátek programu s jeho jménem, informacemi o programu, definicí polotovaru a voláním prvního nástroje.

```
1 L X+10 Y+0 R0 FMAX
2 L Z+Q21 FMAX M13
3 L X-44 FQ20
4 L Z+10 R0 FMAX
```

Část programu, která obsahuje informace o dráze a posuvech.

```
1 L Z+0 R0 FMAX M92 M5
2 L X+50 Y-50 R0 FMAX M9
4 END PGM 2015 MM
```

Konec programu s nájezdem do výchozí pozice.

Dráhy programu jsou programovány s nástrojovou korekcí. Pro optimalizaci programu je využito konstant, jak pro nastavení jednotlivých hloubek zanoření, tak pro jednoduché zadání otáček a posuvů. Program je krátký a přehledný, protože je využíváno návěští, které opakovaně volají podprogramy. Cílem bylo vytvořit univerzální program, ve kterém se jednoduše upravují řezné podmínky. Výsledný program je v příloze 3.

```
0 FN 0: Q11 =-1.6
0 CALL LBL 11
0 FN 0: Q11 =-3.2
0 CALL LBL 11
0 FN 0: Q11 =-4.8
0 CALL LBL 11
0 FN 0: Q11 =-6.4
0 CALL LBL 11

5 ; HLAV_3B_TK_12
6 TOOL CALL 6 Z S2200
0 FN 0: Q20 =200
0 FN 0: Q22 =150
```

Příklad využití parametru Q jako konstanty a volání stále stejného návěští vedoucí k danému podprogramu pokaždé s jinou hloubkou zanoření.

Volání nástroje s nastavením otáček. Parametry Q jsou využity pro rychlé nastavení pracovních posuvů.

Pro získání řezných parametrů je vycházeno z jednotlivých katalogů nástrojů a obráběného materiálu (viz. Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Vybrané údaje z katalogů. [9, 10]

Materiál	Fréza D35			Fréza D12		
	v_c [m/min]	f_z [mm]	a_p [mm]	v_c [m/min]	f_z [mm]	a_p [mm]
ČSN 11 373	200	0,09	1,6	150	0,06	1
ČSN 15 142	180	0,08	1,6	110	0,04	1
ČSN 17 240	140	0,08	1,6	120	0,06	1
EN AW 2007	700	0,10	2,0	400	0,08	2

Z těchto údajů jsou získány dle vztahu (3.1) a (3.2) orientační otáčky a posuv. Tyto hodnoty se následně upraví dle možnosti frézky. V následující tabulce (viz. Tab. 3.2) jsou zapsány údaje, které jsou zadávány do programu pod dané koeficienty. [11]

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} [\text{min}^{-1}] \quad (3.1)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n [\text{mm/min}] \quad (3.2)$$

Při obrábění frézou D12 je upravována rychlost, kterou je obráběn vnitřní rádius, protože dochází ke změně úhlu opásání frézy. Dle zkušeností z praxe je posuv zpomalen o 25 %. Pokud by nedošlo k této korekci, mohlo by dojít k nadlimitnímu vibrování, které může způsobit vylomení destičky.

Tab. 3.2 Nastavení posuvů a otáček.

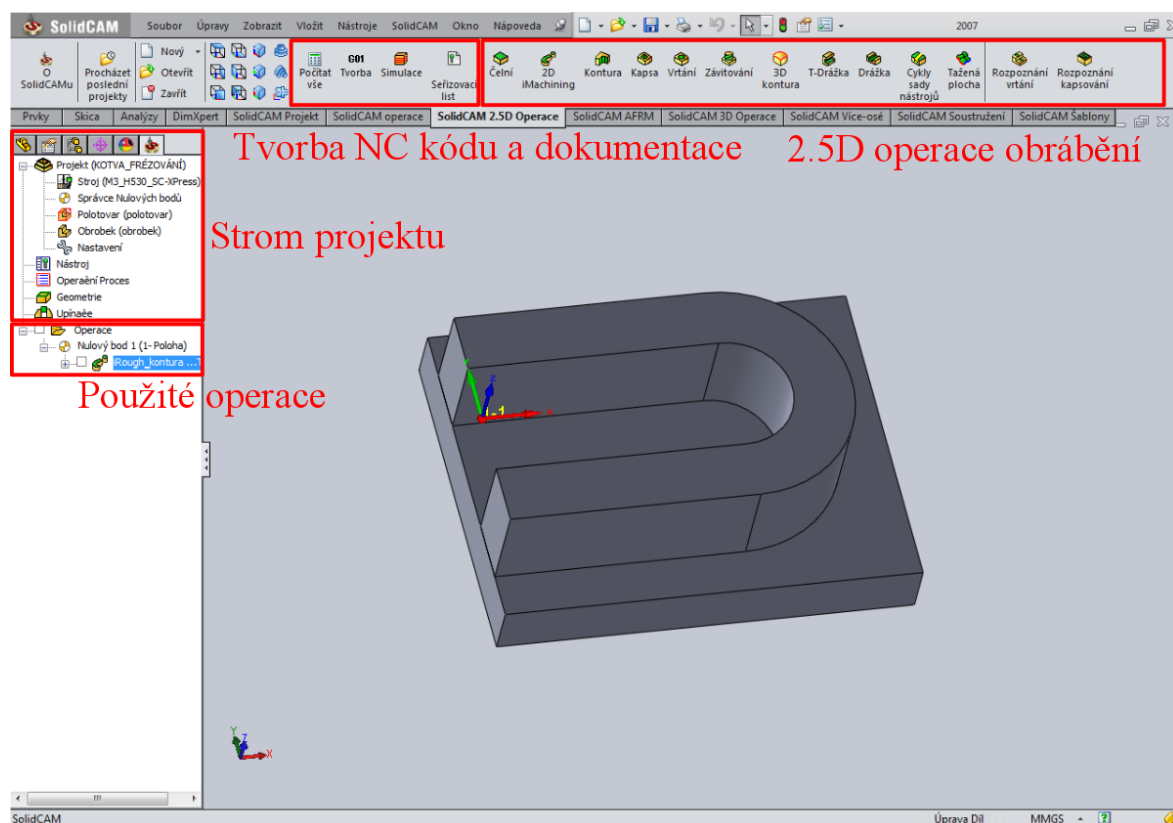
Materiál	Fréza D35		Fréza D12	
	v_f (F) [mm/min]	n (S) [min^{-1}]	v_f (F) [mm/min]	n (S) [min^{-1}]
ČSN 11 373	700	1820	1000	4500
ČSN 15 142	520	1650	570	3180
ČSN 17 240	400	1550	700	550
EN AW 2007	2500	6000	6000	4000

Kde F je označení rychlosti posuvu a S je označení otáček v NC kódu.

3.3 Popis programování v programu SolidCAM

Tvorba programu v softwaru SolidCAM je intuitivní a uživatele logicky vede ke všem nastavením. Při založení projektu je vyžadováno zadání stroje, načtení modelu, definice polotovaru a nastavení nulového bodu obrobku. Provedením všech těchto kroků je umožněno projekt uložit a začít pracovat na technologii výroby daného produktu.

Celé pracovní prostředí (viz. Obr. 3.1) vychází z programu SolidWorks. V horní liště jsou umístěny operace obrábění, které se po výběru zobrazí v pracovním stromě na levé straně. Operace zobrazené ve stromě lze editovat, kopírovat či je uložit jako šablony pro další použití. Zpětná editace celého projektu je také možná například pro použití na-programované technologie na jiném obráběcím stroji. Vytvořený program je možné odsimulovat po jednotlivých operacích nebo jako celek. Při programování složitějších součástí je vhodné naimportovat model svěráku nebo upínek. Tyto objekty jsou brány v potaz při tvorbě drah nástroje, který se jim vyhýbá. Během simulace dochází také k vizuální kontrole kolizí s těmito upínacími mechanismy.



Obr. 3.1. Pracovní prostředí. [6]

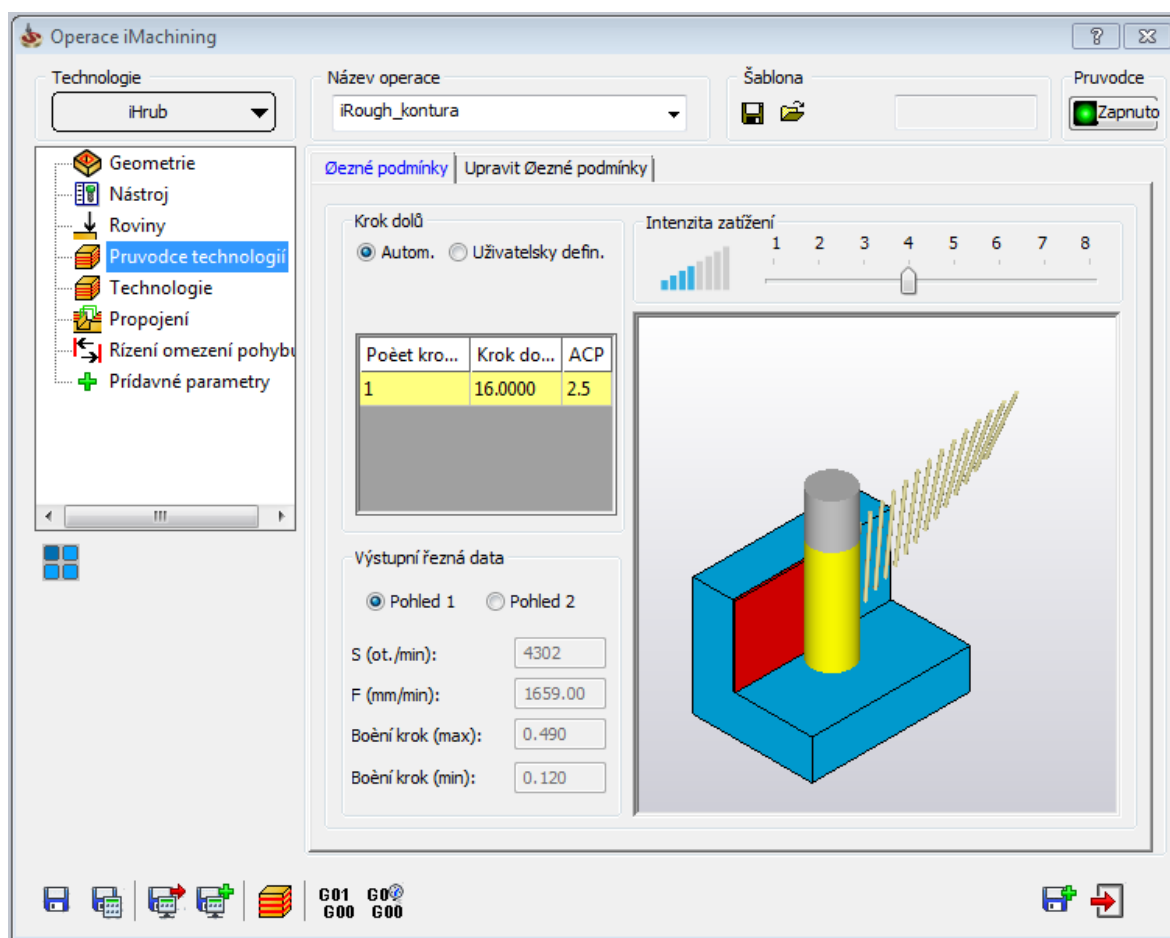
K použití adaptivní technologie je vybrána operace 2D iMachining – iHrub. Po spuštění se zobrazí průvodce (viz. Obr. 3.2), který systematicky vede skrze všechny volby a nastavení. Nejprve je určena obráběná geometrie. Výhodou CAM systému je, že lze interaktivně pracovat s modelem součástky. V tomto případě je označen obráběný tvar a hranice polotovaru, které jsou nastaveny jako otevřené. Následuje definice nástroje, při které jsou opsána potřebná data (viz. Tab. 3.1) z katalogu. Další položkou jsou roviny, které slouží k nastavení hloubky vybrané kontury a k určení bezpečných odjezdových rovin. [2, 5]

Tab. 3.3 Parametry frézy D8. [12]

D	d	l	L	z	λ	Typ	f_z (min)	f_z (max)
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[°]		[mm]	[mm]
8	8	21	63	4	38	W	0,04	0,05

D – průměr frézy, d – průměr dráku, l – délka řezné části, H – délka osazení, L – celková délka, z – počet zubů, λ – úhel šroubovice, Typ – způsob uchycení nástroje (W – weldon, C – válcové), f_z – posuv na zub

Velmi důležitou záložkou je průvodce technologií (viz. Obr. 3.2). Zde je nastavována intenzita zatížení a tím jsou měněny nejen otáčky a posuvy, ale i radiální šířka a hloubka záběru. V pokročilém nastavení jsou k dispozici rozsáhlejší možnosti změn parametrů. Správnost nastavených hodnot je ověřena hodnotou vibrací ACP. [2, 5]



Obr. 3.2 Průvodce operací. [6]

Poslední záložky ovlivňují samotné dráhy a nastavení tvorby programu. Nejvíce znatelné změny jsou při změnách efektivnosti morfuující spirály. Tato nastavení nejsou měněna.

Po nastavení všech potřebných parametrů je průvodce ukončen jeho uložením a přepočítáním nastavených dat. Po přepočítání dané operace jsou zobrazeny její dráhy na modelu součásti. Nyní je možnost odsimulovat dráhy i s nástrojem, aby došlo ke kontrole kolizí nástroje s obrobkem. K dispozici je i zobrazení již obrobených ploch v porovnání s originálním modelem. Program je generován po kontrole simulací.

Jednoduchost programování stejného dílu pro více druhů materiálu spočívá v tom, že projekt je přeuložen, aby se vytvořila jeho kopie, ve které se pouze obmění materiál. Nový projekt je přepočítán a otestován v simulaci, aby bylo možné vygenerovat další NC kód. Tento postup je opakován pro všechny materiály.

Řezné podmínky (viz. Obr. 3.3, 3.4, 3.5 a 3.6) byly získány během simulace a realizace obrábění součásti pomocí nastavování intenzity zatížení. Jsou nastaveny tak, aby chod frézky byl plynulý a bez nežádoucích vibrací.

Výstupní řezná data

☒ Pohled 1 ☐ Pohled 2

S (ot./min): 4490

F (mm/min): 1241.00

Boření krok (max): 1.050

Boření krok (min): 0.260

Obr. 3.3 Řezná data pro ocel ČSN 11 373. [6]

Výstupní řezná data

☒ Pohled 1 ☐ Pohled 2

S (ot./min): 4104

F (mm/min): 2228.00

Boření krok (max): 0.290

Boření krok (min): 0.060

Obr. 3.4 Řezná data pro ocel ČSN 15 142. [6]

Výstupní řezná data

☒ Pohled 1 ☐ Pohled 2

S (ot./min): 3755

F (mm/min): 1411.00

Boření krok (max): 0.410

Boření krok (min): 0.150

Obr. 3.5 Řezná data pro nerezavějící ocel ČSN 17 240. [6]

Výstupní řezná data

☒ Pohled 1 ☐ Pohled 2

S (ot./min): 4745

F (mm/min): 1407.00

Boření krok (max): 1.550

Boření krok (min): 0.240

Obr. 3.6 Řezná data pro hliník EN AW 2007. [6]

3.4 Shrnutí a porovnání NC kódů

Největší rozdíl tvorby obou programů je v časové náročnosti a v následných editacích NC kódů. CAM umožňuje jednoduše a rychle upravovat nejen dráhy a řezné podmínky, ale také umožňuje zásah do samotného modelu obrobku. Tento zásah nesmí narušit vybrané geometrie tvarů, ale dovoluje měnit rozměry a použitý polotovar. Lze přidávat i další prvky, které nenaruší již naprogramované technologie. Po těchto úpravách se pouze přepočítají operace a lze generovat nový NC kód. Ruční programování je v tomto směru značně omezeno.

Vizuálním porovnáním obou programů je na první pohled zřejmé, že program generovaný SolidCAMem obsahuje mnohem více řádků a není tak jednoduše čitelný. Dráhy jsou rozloženy lineární aproximací, k urychlení výroby na úkor přesnosti opisované kontury. Postprocesor byl takto naprogramován, protože frézky zpracovávají data lineárních drah rychleji. Kruhový cyklus musí být řídicím systémem přepočítáván a při rychlejších posuvech dochází k trhanému pohybu. Může nastat situace, kdy jsou rychlosti posuvu tak vysoké, že řídicí systém nestačí posílat data k pohybu a dochází opět k trhanému pohybu. U výrobců frézek (například HAAS) jsou k dispozici opce pro vysokorychlostní obrábění, která odstraňuje tento problém.

Problém s délkou programu nastane při odesílání dat do paměti obráběcího stroje. Při přenosu sériovou linkou, u frézek se starším řídicím systémem, může být doba přenosu neúměrně dlouhá. Druhým problémem je velikost paměti stroje. Tento problém je možné vyřešit blokovým přenosem dat, kdy v průběhu obrábění jsou do paměti načítána nová data z počítače. Tento způsob přenosu je opět velmi závislý na rychlosti linky mezi počítačem a frézku.

Rozsáhlý program znemožňuje jednoduchou úpravu programu na frézce. Při jakékoliv změně či drobné úpravě programu je jednodušší znovu generovat program s opraveným problémem a znovu jej zaslat do paměti frézky.

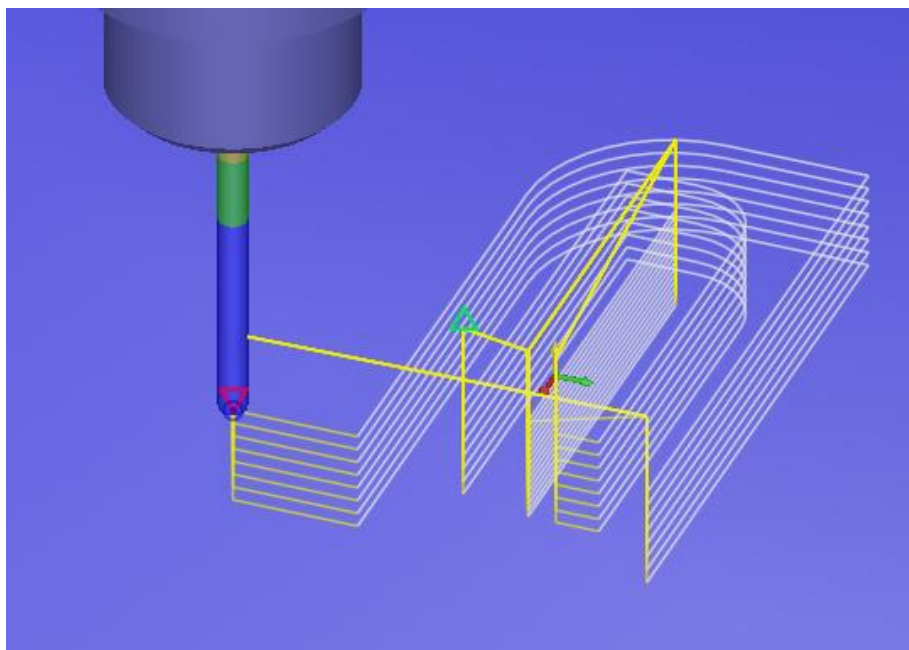
4 VIRTUALIZACE A VERIFIKACE VSTUPNÍHO NC KÓDU

Před každým použitím programu v provozu je potřebné otestovat NC program. CAM softwary jsou omezeny na simulaci vnitřních drah nástrojů, což je pouze virtuální obrábění. S touto virtualizací je spojená kontrola kolizí, avšak nedochází ke kontrole NC kódu, jen ke kontrole použité technologie. Dalším způsobem testování drah je použití řídicího systému frézky, pokud to systém umožňuje. Při nahrání NC kódu do paměti dochází ke kontrole syntaxe kódu. Spuštěním simulace je zároveň spuštěna základní verifikace. Simulace zobrazí dráhy nástroje či 3D zobrazení průběhu obrábění daného obrobku. Verifikace běžící na pozadí kontroluje sémantické chyby. Například pokud je využito korekce nástroje, tak dochází k ověřování správnosti zvoleného průměru nástroje vzhledem k projížděným kruhovým drahám. Pokud dojde k chybě, je zobrazen řádek, na kterém je chyba objevena.[13]

Pro simulaci a verifikaci, která navíc nabízí kontrolu kolizí těles s nástrojem a kolizí při rychloposuvu, byl zvolen komplexní editor NC kódů CIMCO Edit 7. Další výhodou tohoto programu je i komunikace se strojem pomocí sériové linky. Lze tedy vytvořený program přímo odeslat do paměti frézky. K dispozici je i vytvoření DNC serveru, který umožňuje posílat rozsáhlé programy blokovým přenosem. [13]

4.1 Simulace NC programu tvořeného pro řídicí systém Heidenhain

Napsaný program je zkopírován do editoru. Na rozdíl od psaní v poznámkovém bloku nebo přímo na panelu stroje jsou zde barevně rozlišené dané typy slov, které zpřehledňují kód. Prostřednictvím sepnutí dané funkce je spuštěno vykreslování drah nástrojů. V nově objeveném okně se zobrazí veškeré dráhy programu (viz. Obr. 4.1), které je možné krokově ověřovat procházením řádků textu kurzorem. Dráhy jsou rozlišeny na pracovní posuv a rychloposuv. Další možností je 3D simulace, u které je nutné zapsat rozměry polotovaru vůči souřadnému systému a nadefinovat zvolené nástroje před jejím spuštěním.



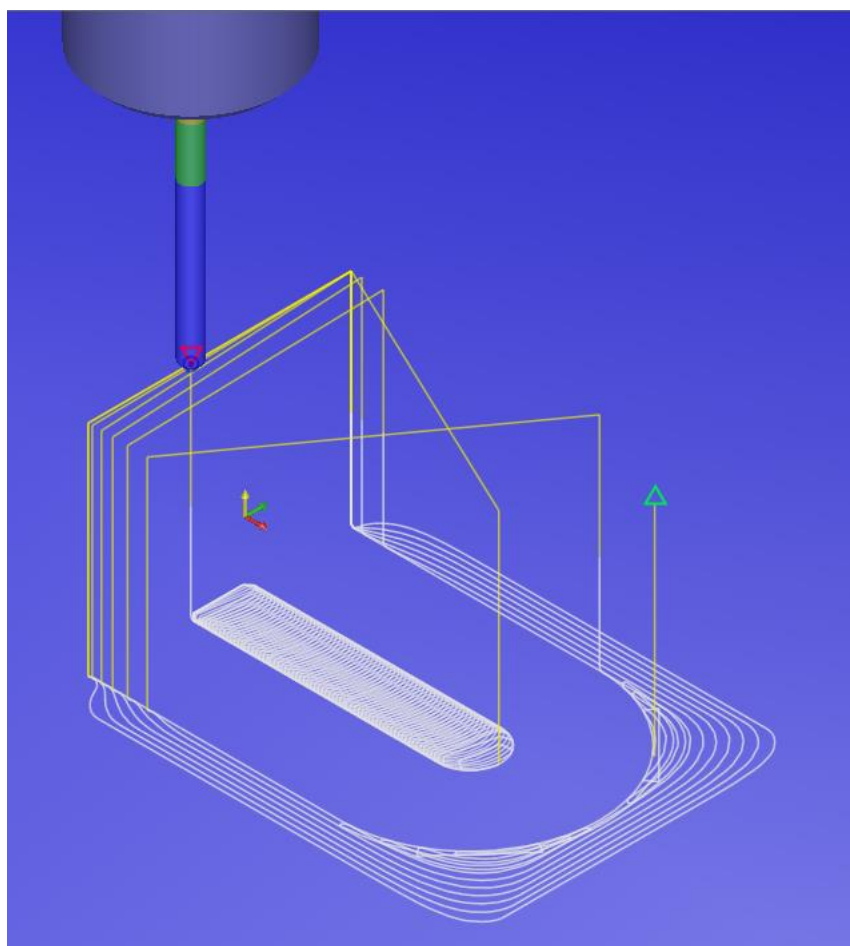
Obr. 4.1 Simulace offsetových drah. [14]

K určení doby obrábění je zde funkce statistika drah nástroje. Po spuštění se objeví tabulka, ve které se zadává doba výměny nástrojů a používaný posuv. Je patrné, že tuto jednoduchou analýzu doby obrábění nelze použít pro určení času NC kódu generovaného iMachiningem, protože posuvová rychlost je proměnná.

Kromě získaného času obrábění, jsou zobrazeny informace o délce drah jak v řezu tak i mimo něj. Vzhledem k získaným informacím je potřeba zvážit další optimalizaci programu, která by mohla být nutná hlavně při sériové výrobě, ve které se počítá každá sekunda.

4.2 Simulace NC programu generovaného modulem iMachining

Dráhy generované softwarem SolidCAM jsou virtualizovány v tomto programu, ze kterého jsou získány teoretické doby obrábění. Odsimulované dráhy programem nemusí úplně odpovídat realitě, protože program simuluje naprogramovanou technologii, která je až poté postprocesorem převáděna na NC kód. Zvláště pokud je použit neověřený postprocesor, je zapotřebí využít i externího programu, ve kterém dojde nejen k virtualizaci ale i k verifikaci NC kódu (viz. Obr. 4.2). Všechny získané časové údaje jsou ze simulace SolidCAMu a informace o drahách jsou z CIMCO Editoru.



Obr 4.2 Simulace drah generovaných iMachiningem. [14]

4.3 Výsledky a jejich porovnání

Tvorba NC kódu byla prováděna zároveň s praktickým testováním, protože nelze určit vhodnou intenzitu zatížení, když není známo chování stroje. Proto je při prvním testování intenzita poměrně nízká a po provedení prvního obrábění je úměrně přenastavována. Díky tomuto je dosaženo téměř stejných výsledků (viz. Tab. 4.1). Z tohoto je zřejmé, že je simulace nedostatečným zdrojem informací, protože lze nastavit různé podmínky pro daný materiál a až realita odhalí jejich vhodnost.

Tab. 4.1 Časové porovnání simulace. [6, 14]

Materiál	Konvenční [min]	Adaptivní [min]	Intenzita zatížení
ČSN 11 373	5:39	6:53	3
ČSN 15 142	8:32	9:00	6
EN AW 2007	1:51	2:43	5
ČSN 17 240	7:58	9:32	3

Zajímavou informací je celková dráha nástroje, která potvrzuje principy algoritmu technologie iMachining. Z tabulky (viz. Tab. 4.2) je patrné, že se zvyšující mezí kluzu materiálu jsou hustěji generovány dráhy. Toto se samozřejmě výrazně projeví v celkové délce drah.

Tab. 4.2 Porovnání celkové délky drah. [14]

Materiál	Konvenční [mm]		Adaptivní [mm]	
	Celková	Rychloposuv	Celková	Rychloposuv
ČSN 11 373	6 905	2 995	5 260	1 015
ČSN 15 142	6 905	2 995	18 173	3 040
EN AW 2007	6 295	2 770	3 785	670
ČSN 17 240	6 905	2 995	12 692	2 250

Pokud se provede ještě detailnější rozbor drah na dráhy v řezu a dráhy rychloposuvem, tak je patrné, že iMachining generuje minimální délku přejezdů navzdory své celkové délce drah.

5 REALIZACE OBRÁBĚNÍ EXPERIMENTÁLNÍHO OBROBKU

Realizace byla uskutečněna nejenom mnou, ale i na prezentaci firmy SolidCAM. Díky spolupráci na této události je analýza adaptivního obrábění rozšířena jak o další materiály, tak o obráběcí stroj.

Prezentace modulu iMachining byly určeny pro výrobce nástrojů jako je Iscar, Dormer Pramet, WNT. Vzhledem ke konkurenci firem není možné využívat stejných rozměrů součástí, protože cílem prezentace nebylo porovnávat výkonosti nástrojů mezi nimi, ale ukázat možnosti a výhody modulu iMachining.

5.1 Obrobení experimentální součásti

Po vytvoření a vygenerování NC kódů a jejich odsimulování, se dospělo k závěru, že pouhá simulace je nedostatečná k analýze adaptivního obrábění. Proto se přešlo od simulace také k realizaci.

5.1.1 Obráběcí stroj FV 25 CNC A

Obrábění proběhlo na frézce FV 25 CNC A (viz. Tab. 5.1) roku výroby 2000. Jedná se o svislou konzolovou frézku (viz. Obr. 5.1) s plynule řízenými osami. Stůl vykonává pohyby ve směrech X, Y a pohyb v ose Z zajišťuje výsuvná pinola s vřetenem. Výsuvná pinola je slabším článkem frézky. Proto musí být stůl, který je ručně stavitelný, co nejblíže k pevnému vřeteníku, aby pinola nebyla vysouvána do maximální pozice kvůli snížené tuhosti vřetene.

Maximální kapacita paměti je 128 Kbyte. Přenos dat je prováděn sériovou linkou pomocí programu TNCRemo. Rychlost sériové linky je nastavena na 9600 baud. [8]

Tab. 5.1 Technické informace. [15]

Typ	FV 25 CNC A
Výrobce	TOS Olomouc s.r.o
Řídicí systém	TNC 310
Výkon motoru [kW]	5,5
Otáčky [min^{-1}]	6 000
Posuv [mm/min]	2 500 (7 000)
Typ upínání	ISO 40



Obr. 5.1 FV 25 CNC.

5.1.2 Způsob upnutí

Upnutí obrobku musí být velmi tuhé, aby nebylo vneseno do testování nechtěné chvění, anebo v horším případě uvolnění obrobku. Z těchto důvodů byl zvolen svěrák GRESSEL gripos, který má výměnné čelisti (viz. Obr. 5.2). Pro testování byly zvoleny čelisti se 4 mm osazením a s vroubkovou upínací částí (grip). Obrobek byl následně upínán momentem 40 kNm.

5.1.3 Frézování obrobků

Před započítím obrábění musí být polotovar ve svěráku správně napolohován vzhledem k napsaným programům. K určení jeho pozice vůči výchozímu souřadnému systému stroje slouží 3D dotyková analogová sonda (viz. Obr. 5.2), se kterou byl změřen nulový bod obrobku (viz. Příloha 1). K usazování dalších obrobků bylo využito rysky na čelisti, se kterou je zajištěno upnutí s maximální chybou dvou desetin. Tato chyba byla zjištěna opakovaným upnutím a změřením polohy.



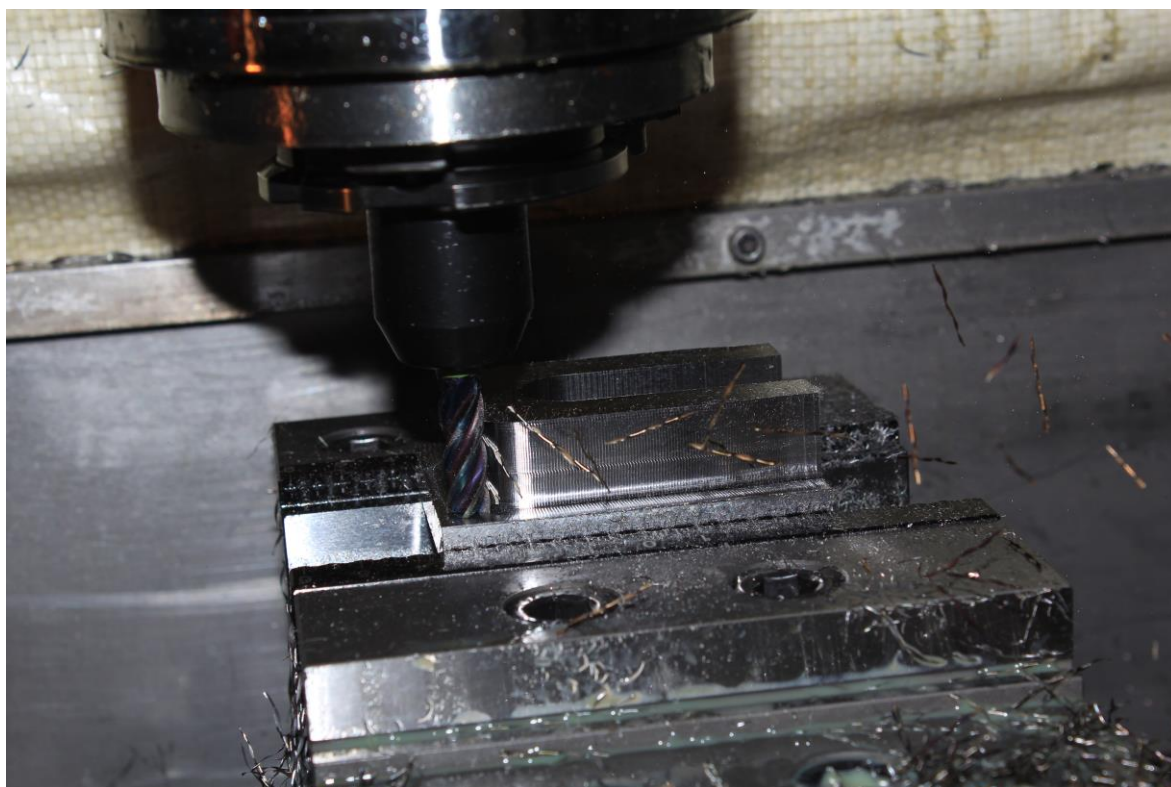
Obr. 5.2 Nastavování nulového bodu.

Doba obrábění je měřena od okamžiku prvního kontaktu nástroje s materiálem. Jsou dva důvody k tomuto postupu. Prvním důvod je, že zahájení automatického chodu stroje, který je inicializován prostřednictvím tlačítka start, dochází až po přednačtení části programu. Rozsáhlejší programy se tak načítají delší dobu. Druhým důvodem je využití dvou nástrojů u konvenčního obrábění. K frézování byly zvoleny dva nástroje, které musí být ručně měněny. Proto byl čas pozastavován a spouštěn vždy s prvním kontaktem.

Velkou starostí při frézování adaptivní technologií byl odvod třísek při úběru v otevřené kapse. K vyplavování třísek procesní kapalinou nedocházelo, protože její tlak byl nedostatečný. Z tohoto důvodu musela být nastavena vzduchová tryska, která odstraňovala třísky a chladila nástroj.

Při konvenčním obrábění bylo použito procesní kapaliny na všechny materiály. Nastavené hodnoty řezných podmínek byly přijatelné, ač frézování bylo po subjektivní stránce hlučnější. Dle předpokladů se nejlépe obráběl hliník a naopak nejhůře nerezová ocel.

Obrábění adaptivní technologií (viz. Obr. 5.3) bylo při prvním testu mírně překvapivé. Frézka neměla problém se stálými změnami posuvů ani s trochoidními drahami. Frézování bylo tišší než při konvenční technologii. Chlazení bylo pouze vzduchem.



Obr. 5.3 Úběr materiálu.

Obrobeny byly všechny materiály, avšak nastaly předpokládané komplikace. Problém nastal u materiálů ČSN 15 142 a DIN 1.4301, kde je zapotřebí hustších drah. Prvním řešením byl blokový přenos NC kódu. Řešení nebylo špatné, ale pohyby frézky byly trhané, protože rychlost přenosu dat nestačila a řídicí systém musel zastavovat a čekat, než se načte opět potřebný blok informací. Druhé, komplikovanější řešení spočívalo ve vytvoření dvou programů o podobné datové velikosti. Tímto způsobem již mohly být načteny do paměti a postupně spuštěny.

5.1.4 Výsledky a porovnání technologií

Může se zdát, že výsledné časy (viz. Tab. 5.2) jsou srovnatelné, ale v tomto případě byl iMachining velice omezen vlastnostmi frézky. Při programování je stále velká rezerva v intenzitě zatížení a v řezných rychlostech. Na druhé straně řezné rychlosti destiček téměř dosahovaly svého maxima. Další nejen časová úspora se nalézá ve výměně nástroje, protože při adaptivním obrábění je použit pouze jeden nástroj, který byl rovnoměrně využit po celé své řezné části. Krom nižších časů bylo pomocí iMachiningu dosaženo klidnějšího chodu frézky bez jakéhokoliv drnčení, v porovnání s konvenčním způsobem frézování, kde se tento problém vyskytoval.

Povrch obrobených součástí (viz. Obr. 5.4) má velice podobnou drsnost. U obou technologií musí být následně použita dokončující operace. U vzorků obrobených adaptivní technologií je patrná struktura drah, které zanechala fréza. U svislých stěn v otevřené kapse se objevuje zvlnění, které způsobila, když zde měnila směr své dráhy. Při změření stěny, je naměřena menší hodnota než hodnota výchozí. Tento rozdíl je v řádu stovek, protože fréza je vtahována do materiálu.

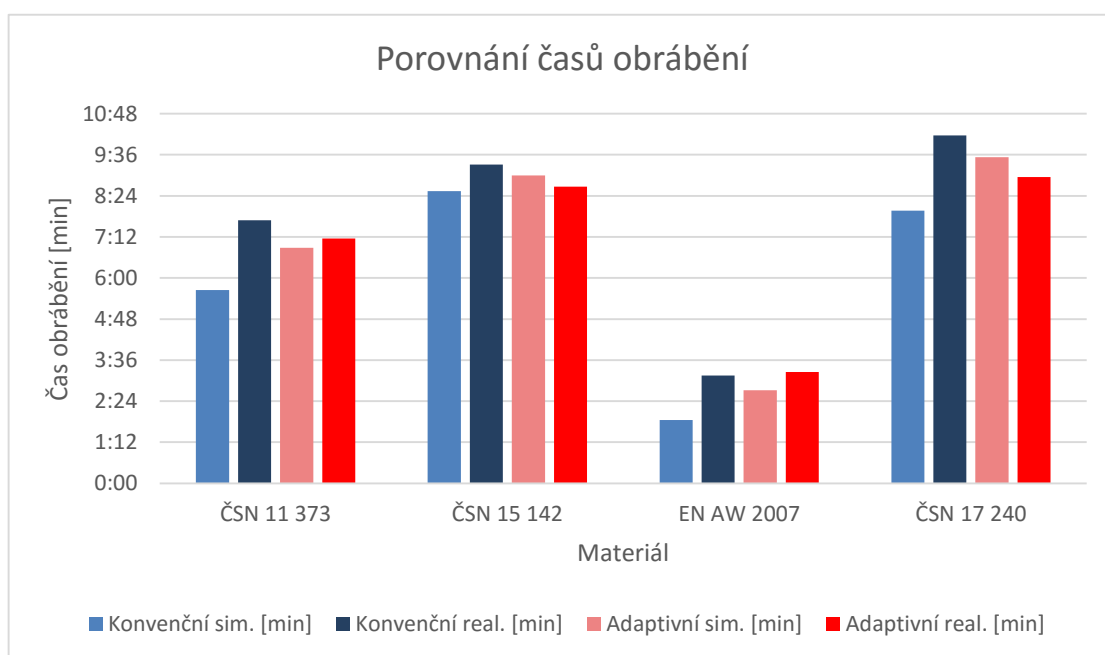


Obr. 5.4 Experimentální obrobky.

Tab. 5.2 Porovnání časů obrábění.

Materiál	Konvenční [min]	Adaptivní [min]	Časová úspora [%]
ČSN 11 373	7:41	7:09	7,04
ČSN 15 142	9:19	8:40	7,05
EN AW 2007	3:09	3:15	-3,17
ČSN 1.4301	10:10	8:57	11,91

Pokud jsou srovnány doby obrábění v simulaci s realitou (viz. Obr. 5.5), tak si lze povšimnout značných rozdílů. Program CIMCO pouze generoval výsledky ze statiky drah a hrubých údajů o rychlosti obrábění. Jde tedy spíše o hrubý nástřel doby obrábění. Zatímco program SolidCAM vychází i z údajů stroje a jeho výsledky jsou téměř srovnatelné s realitou.



Obr 5.5 Grafické zobrazení časů obrábění.

5.2 Obrábění experimentální součástky na prezentaci iMachiningu

Na první pohled se může zdát, že výrobci nástrojů nestojí o technologii, která prodlužuje životnost nástroje. Když se však na toto podíváme blíže, tak zjistíme, že výrobci nástrojů neprodávají pouze nástroje. Navrhují i technologie výroby a k navržené technologii dodávají své nástroje. Proto potřebují i v tomto ohledu být o krok před konkurencí i za cenu menší prodejnosti nástrojů.

Pro dosažení nejlepších výsledků jsou k dispozici ke každému materiálu dva testovací kusy, na kterých se ověří navržené rezné podmínky.

5.2.1 Obráběcí stroj DMU 65 monoBLOCK

Jedna z prezentací se uskutečnila v Plzni na 5-osém obráběcím centru. Je to veliký skok v technickém vývoji se srovnáním s frézou FV 25 CNC A. Obráběcí centrum (viz. Obr. 5.6) firmy DMG MORI má tuto charakteristiku (viz. Tab. 5.3).



Obr. 5.6 DMU 65 monoBLOCK.

Tab. 5.3 Technické informace obráběcího centra DMU 65 monoBLOCK. [16]

Typ	DMU 65 monoBLOCK
Výrobce	DMG MORI
Řídicí systém	DMG ERGOline® Control with Siemens 840D solutionline
Výkon motoru [kW]	25
Otáčky [ot/min]	18 000
Posuv [mm/min]	40 000
Typ upínání	HSK A 63

5.2.2 Volba nástrojů

Prezentace probíhala pro firmu Iscar, proto také bylo využito jejich nástrojů. Při použití technologie iMachining byla zvolena monolitní fréza průměru 8 mm (EC-E4L 08-18/26W08CF63 IC900) z řady Chatterfree¹.

Pro konvenční obrábění byly vybrány dva průměry fréz (viz. Tab 5.5). První je monolitní hrubovací fréza o průměru 12 mm (ECP-H4L 12-24/38C12CFR.6 IC900), vhodná pro obrábění nástrojových ocelí a žáruvzdorných litin. Druhá je monolitní fréza o průměru 16 mm (EC-H4S 16-16C16CF-E82 IC900), vhodná pro obrábění slitin, nerezových ocelí a titanu. Obě frézy jsou opět z řady Chatterfree.

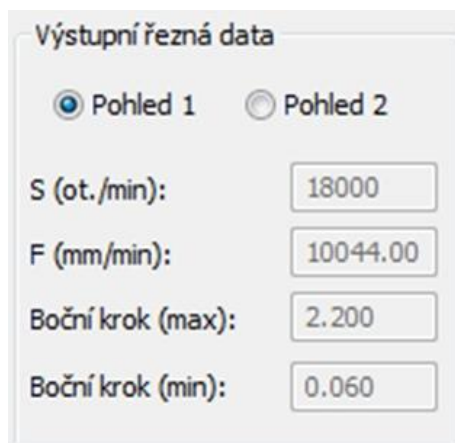
Tab. 5.5 Shrnutí nástrojů použitých na první prezentaci. [17]

Materiál	Nástroje konvenčního obrábění	Nástroje adaptivního obrábění
ČSN 12 050 (C45 EN)	D12 ISCAR ECP-H4L 12	D8 ISCAR EC-E4L 08
ČSN 19 552 (DIN 1.2343)	D12 ISCAR ECP-H4L 12	D8 ISCAR EC-E4L 08
ČSN 17 349 (DIN 1.4404)	D16 ISCAR EC-H4S 16	D8 ISCAR EC-E4L 08
Toolox 44	D16 ISCAR EC-H4S 16	D8 ISCAR EC-E4L 08

¹ Chatterfree se vyznačuje maximalizací možného úběru materiálu, eliminací nechtěných vibrací při větším vyložení frézy a zvýšením její stability při hloubce zanoření až 2×D. Díky všem těmto vlastnostem je prodloužena životnost nástroje a je vhodná pro stroje s nižším výkonem. [18]

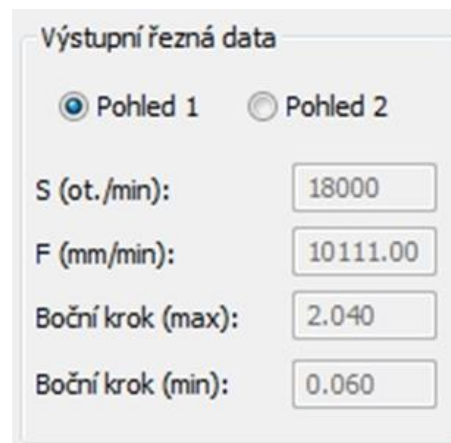
5.2.3 Řezné podmínky

Nastavení řezných podmínek v první prezentaci, které ke svým drahám zvolil iMachining. Při výpočtech musel algoritmus zahrnout nastavení použitá v rozšířeném rozhraní. V tomto rozhraní byl využit mód turbo režim. U všech materiálů byla zvolena hloubka úběru na celou výšku součástky. Výsledkem jsou tato data (viz. Obr. 5.8, 5.9, 5.10, 5.11).



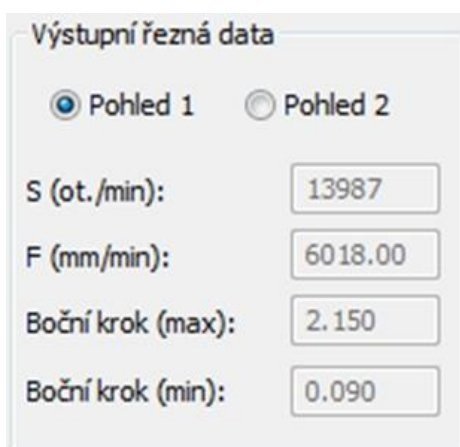
Výstupní řezná data	
☒ Pohled 1	☐ Pohled 2
S (ot./min):	18000
F (mm/min):	10044.00
Boční krok (max):	2.200
Boční krok (min):	0.060

Obr. 5.8 Řezná data pro ocel
ČSN 12 050 (C45 EN). [6]



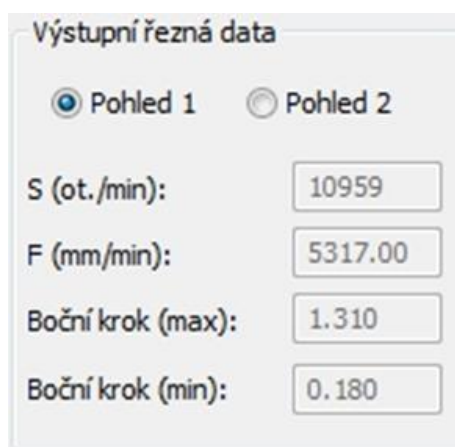
Výstupní řezná data	
☒ Pohled 1	☐ Pohled 2
S (ot./min):	18000
F (mm/min):	10111.00
Boční krok (max):	2.040
Boční krok (min):	0.060

Obr. 5.9 Řezná data
ČSN 19 552 (DIN 1.2343). [6]



Výstupní řezná data	
☒ Pohled 1	☐ Pohled 2
S (ot./min):	13987
F (mm/min):	6018.00
Boční krok (max):	2.150
Boční krok (min):	0.090

Obr. 5.10 Řezná data pro ocel
ČSN 17 349 (DIN 1.4404.) [6]



Výstupní řezná data	
☒ Pohled 1	☐ Pohled 2
S (ot./min):	10959
F (mm/min):	5317.00
Boční krok (max):	1.310
Boční krok (min):	0.180

Obr. 5.11 Řezná data pro ocel
Toolox 44. [6]

Řezné podmínky pro konvenční obrábění jsou zvoleny z katalogu. (viz. Tab. 5.6)

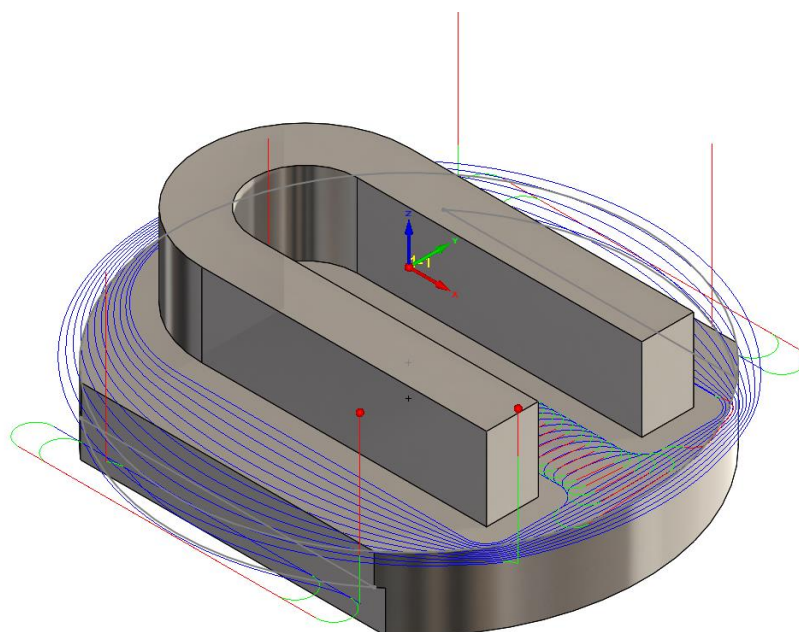
Tab. 5.6 Řezné parametry konvenčního obrábění. [17, 19]

Materiál	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm]	Překrytí drah [%]	Chlazení
ČSN 12 050	120	16	0,06	55	Vzduch
ČSN 19 552	90	16	0,05	55	Vzduch
ČSN 17 349	70	8	0,06	80	Emulze
Toolox 44	80	8	0,06	80	Emulze

5.2.4 Realizace obrábění

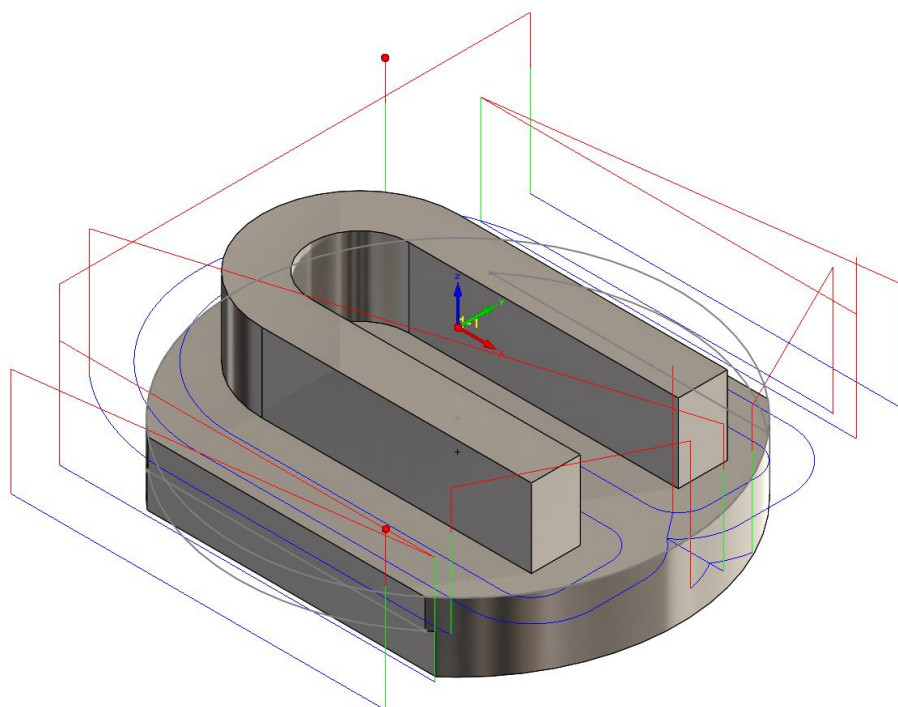
Konečné testování proběhlo bez jakýchkoliv problémů. Při obrábění adaptivní technologií bylo použito pouze chlazení vzduchem. Při klasické technologii bylo při frézování nerezové oceli a oceli toolox bylo použito procesní kapaliny.[19]

Obráběné dráhy (viz. Obr. 5.12) jsou velice podobné s dráhami, které byly testovány v prvním testu. Morfovací spirála se pouze přizpůsobila danému polotovaru. Zatímco dráhy, které byly vytvořeny pro test konvenční technologie (viz. Obr. 5.13), jsou jednoduché, ale mají zvýšenou náročnost na nástroj.



Obr. 5.12 Dráhy generované iMachiningem. [6]

Konvenční technologie překonala adaptivní technologii při frézování otevřené kapsy. Speciálně zvolený nástroj, vyhruboval celou kapsu na plnou výšku pouze na dva průjezdy.



Obr. 5.13 Konvenční dráhy. [6]

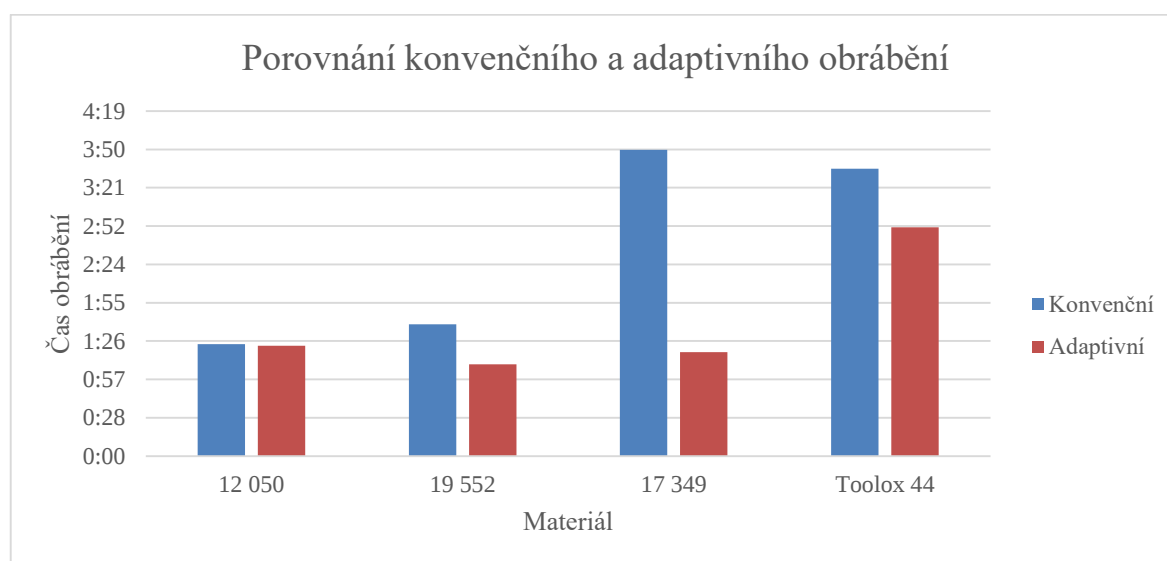
5.2.5 Výsledky a porovnání technologií

Při použití výkonnějšího stroje se náskok technologie iMachining zvětšil. Největší rozdíl v obráběcích časech je u nerezové oceli. Je třeba si uvědomit, že celá výroba se neskládá pouze z časů obrábění, ale i časů programování a její přípravy. Neméně důležitou položkou je i počet použitých nástrojů a jejich cena. V tomto ohledu (viz. Tab. 5.7) je iMachining ve výhodě.

Z časů dále vyplývá (viz. Obr. 5.14), že čím hůře je obrobitelný materiál tím větší náskok získává adaptivní technologie před technologií klasickou.

Tab. 5.7 Porovnání časů obrábění.[19]

Materiál	Klasické obrábění [min]	iMachining [min]	Časová úspora [%]
ČSN 12 050 (C45 EN)	1:24	1:23	1,43
ČSN 19 552 (DIN 1.2343)	1:39	1:09	20,30
ČSN 17 349 (DIN 1.4404)	3:50	1:18	76,05
Toolox 44	3:36	2:52	10,56

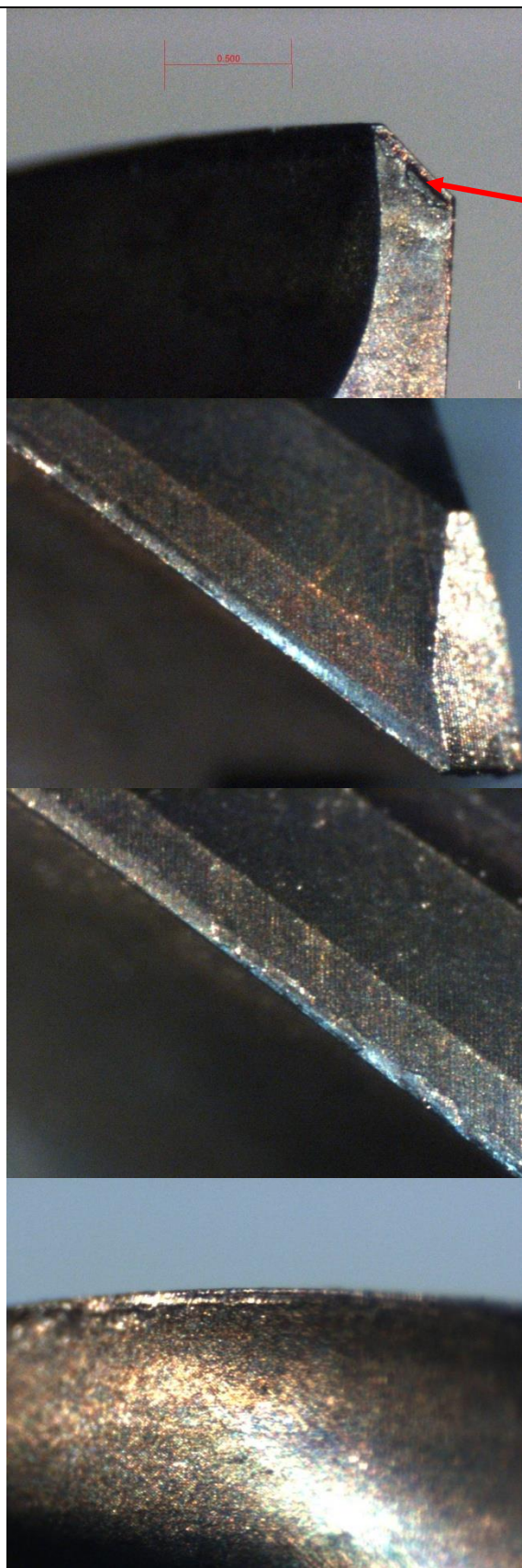


Obr. 5.14 Grafické zpracování času obrábění. [19]



Obr. 5.15 Vzorek obrobený adaptivní technologií. [19]

Po uskutečněním testování bylo na nástrojích vyhodnoceno opotřebení, které bylo vyhodnoceno pomocí světelné mikroskopie (viz. Obr. 5.16, 5.17, 5.18). Dle normy ČSN ISO 3685 jsou dána kritéria opotřebení nástroje, mezi která patří KT a VB. Doporučené mezní hodnoty pro výměnu nástroje je pro KT = 0,2 – 0,3 mm a pro VB = 0,2 – 0,8 mm. [20]



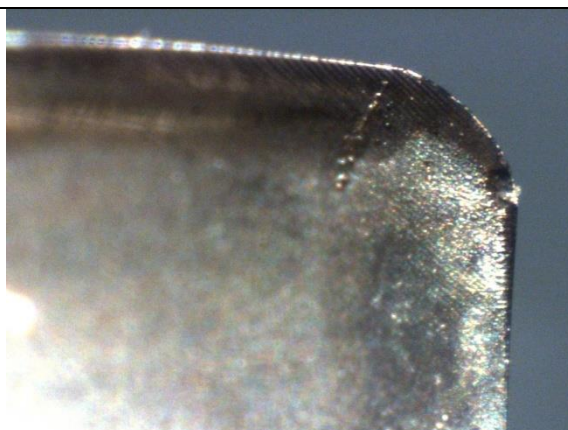
Pohled na vedlejší hřbet, na kterém je patrné abrazivní opotřebení a s ním může docházet k částečné delaminaci povlakové vrstvy.

Pohled na hlavní hřbet. $VB = 0,05$ mm.

Hlavní hřbet v místě maximální axiální hloubky řezu. Na hřbetu je patrné abrazivní opotřebení s místním vydrolováním částí ostří. $VB = 0,05$ mm.

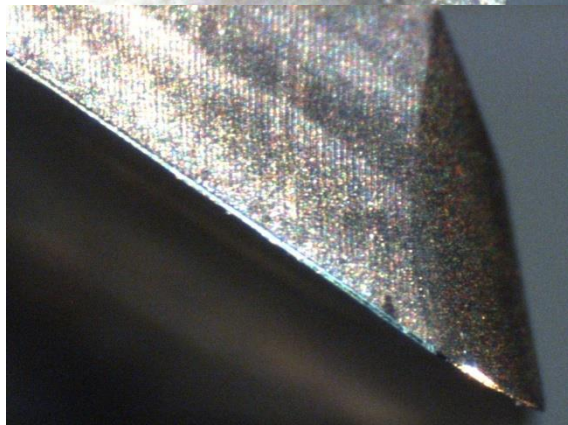
Pohled na čelo nástroje. $VB = 0,05$ mm.

Obr. 5.16 Snímky frézy D 8 mm s komentáři. [20, 21]

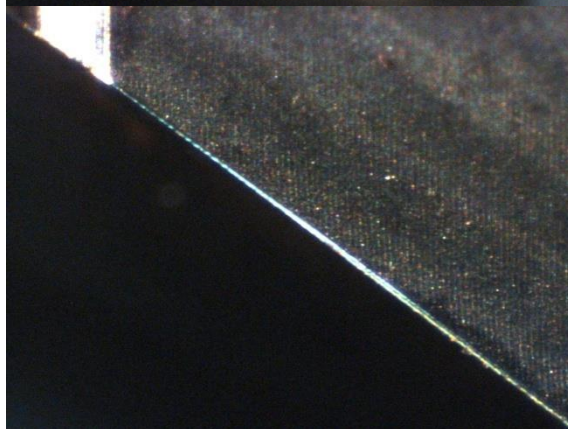


Pohled na čelo nástroje břitu č.3, na kterém je patrné opotřebení čela ve tvaru žlábků.

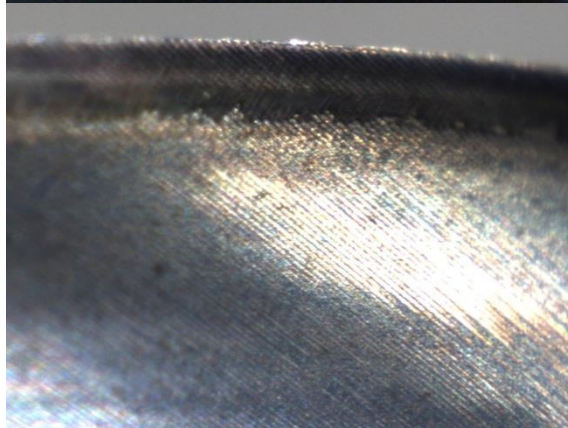
- břit č.1 – $KT = 0,032 \text{ mm}$
- břit č.2 – $KT = 0,087 \text{ mm}$
- břit č.3 – $KT = 0,107 \text{ mm}$
- břit č.4 – $KT = 0,083 \text{ mm}$



Pohled na hlavní hřbet. $VB = 0,025 \text{ mm}$.

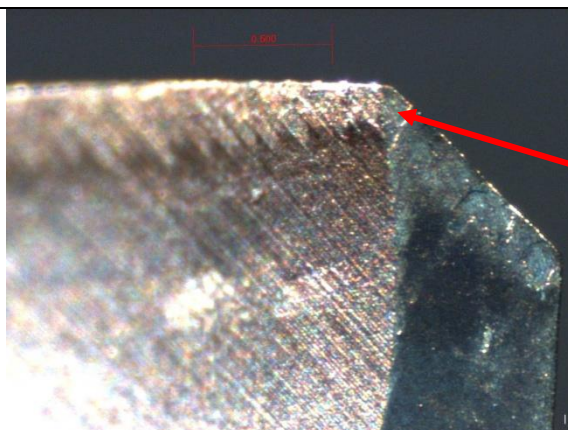


Hlavní hřbet v místě maximální axiální hloubky řezu. $VB = 0,025 \text{ mm}$.

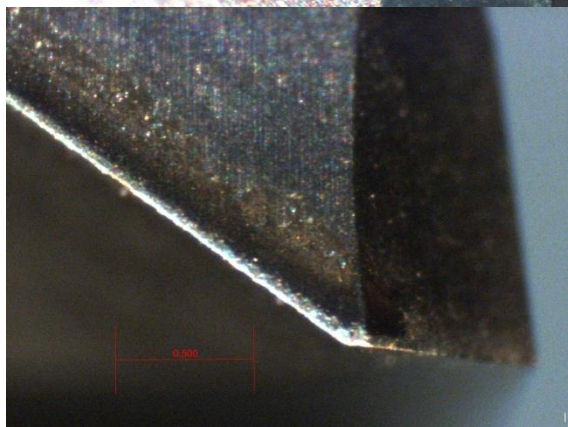


Pohled na čelo nástroje uprostřed břitu č.1. Bez známek měřitelného opotřebení. Tmavá mapa je pouze tepelně ovlivněný povlak. Rozměr tepelného ovlivnění $0,290 \text{ mm}$.

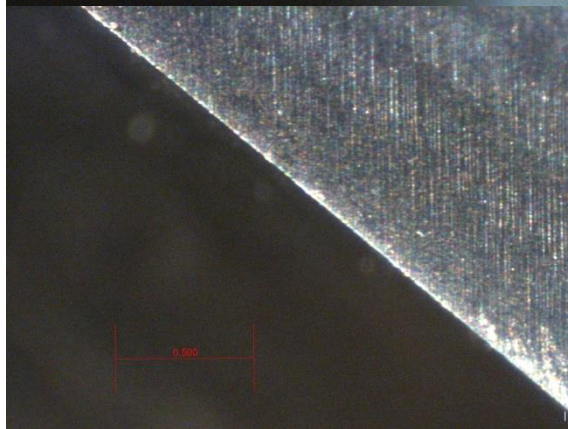
Obr. 5.17 Snímky frézy D 12 mm s komentáři. [20, 21]



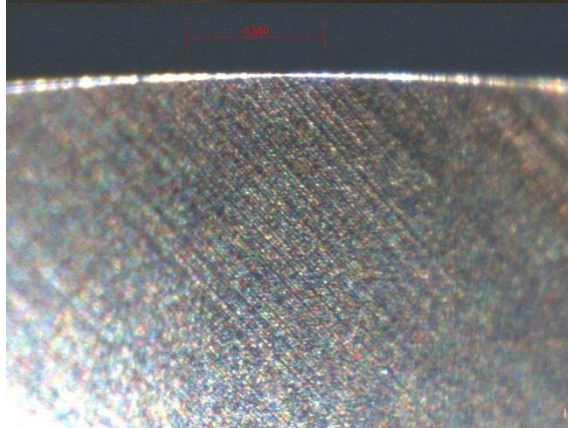
Břit č.1, patrné abrazivní opotřebení s patrným opotřebením ve tvaru žlábků.



Pohled na hlavní hřbet. VB = 0,04 mm.



Hlavní hřbet v místě maximální axiální hloubky řezu. VB = 0,015 mm.



Pohled na čelo nástroje uprostřed břitu č.2. VB = 0,015 mm.

Obr. 5.18 Sada snímků frézy průměru 16 mm. [21]

Vyhodnocení opotřebení nástrojů dokazuje, že u frézy průměru 8 mm (viz. Obr. 5.16), která byla použita k obrábění adaptivní technologií, došlo k rovnoměrnému opotřebení nástroje v celé své řezné délce. Vydrolení v maximální axiální hloubce může být způsobeno kmitáním, které způsobila špičková zatížení. U frézek (viz. Obr 5.17 a 5.18) použitých při konvenční technologii je patrné opotřebení čela ve tvaru žlábků. Toto opotřebení vzniká při abrazivních pochodech, ale hlavně difúzním opotřebením v místech, která jsou vysoce teplotně zatížená. Žádný z nástrojů není opotřebován tak, aby musel být vyměněn, ale jediná fréza s průměrem 8 mm obráběla všechny 4 materiály. [20, 22]

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá analýzou progresivní technologie iMachining, kterou porovnává s offsetovým způsobem obrábění. Je zde teoreticky nastíněn způsob tvorby drah a způsob, kterým algoritmus určuje řezné podmínky. V praktické části je navržena teoretická součást, na které jsou porovnány způsoby programování a získání NC kódu. Tyto NC kódy jsou mezi sebou porovnány a následně odsimulovány v simulačním programu. Tímto jsou získány ověřené programy pro obrobení experimentální součásti. Další data jsou získána na prezentaci modulu iMachining, kde je obráběna podobná experimentální součást.

Porovnáním NC kódu a jejich simulací byly získány tyto výsledky:

- adaptivní technologie v porovnání s offsetovou technologií má mnohonásobně rozsáhlejší NC kód,
- celková dráha nástroje se prodlužuje s mezí pevnosti materiálu,
- dráha rychloposuvu je vzhledem k celkové dráze minimální,

Při realizaci výroby experimentální součástky byla získána tato shrnutí:

- adaptivní technologii bylo dosaženo až o 75 % kratších obráběcích časů,
- s vyšší mezní pevností materiálů narůstal časový rozdíl mezi oběma technologiemi,
- subjektivně byl zjištěn klidný chod bez vibrací v porovnání s obráběním konvenční technologií,
- k obrábění byl použit pouze jeden nástroj, což přináší finanční úsporu,
- nástroj využívá celou svou řeznou plochu,
- kratší doba přípravy a programování,
- z dat získaných mikroskopem vyplývá nižší opotřebení nástroje, které je rovnoměrné po celé délce řezu.

Technologie adaptivního obrábění přináší úspory nejen časové, ale i finanční. Je vhodná pro kusovou a malosériovou výrobu, ve které je zapotřebí využívat univerzální nástroje. V této výrobě hraje roli doba přípravy, programování a prodloužení životnosti nástrojů. Je vhodná k použití na strojích s nižším výkonem, které si nemohou dovolit využít plné možnosti nabízených fréz.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BEADLE, Bruce a John BOLLINGER. *Adaptive machining*. 3784798. United State. Užitený vzor G05B19/416. 1974-01-08. [cit. 2016-05-07] Dostupné také z: <http://www.freepatentsonline.com/3784798.html>
- [2] SOLIDCAM LTD. *Imachining: Frequently Asked Questions* [online]. 2014, 54 s. [cit. 2016-02-15] Dostupné také z: <https://solidcam.box.com/shared/static/6npwj4bqcpnxcgh6yok7.pdf>
- [3] CIMR, Ivan. *Historie vývoje algoritmů adaptivního obrábění v CAM systémech* [ústní konzultace]. BRNO: SolidCAM CZ, [2015-11-11].
- [4] SOMEKH, Emil. SOLIDCAM. *The Unbelievable iMachining Story!* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://emilsomekh.com/decisions/the-unbelievable-imachining-story/>
- [5] SOLIDCAM LTD. *Imachining: Getting started*. 2015. 39 s. [cit. 2016-02-17] Dostupné také z: http://www.solidcam.cz/fileadmin/user_upload/support/SolidCAM_2015_iMachining_Getting_Started.zip
- [6] SOLIDCAM LTD. SolidCAM 2015 [software]. [přístup 2015-18-10]. Dostupné také z: <http://www.solidcam.cz/trial-test-drive/>. Požadavky na systém: PC Microsoft® Windows 8.1, 7, 4 GB RAM; 15 GB místa na disku, Grafickou kartu NVIDIA® aktuální série Quadro s min. 512 MB, Microsoft® Direct3D 9®, USB 2.0
- [7] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [8] HEIDENHAIN S.R.O. *Uživatelská příručka TNC 310*. Traunreut, 1998, 205 s.
- [9] UNITOOL PLUS S.R.O. *Unitool řezné materiály a povlaky* [online]. 2008, 57 s. [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://unitool.sk/dat/unitool.pdf>
- [10] HITACHI TOOL ENGINEERING EUROPE GMBH. *ASM/AHU Mini* [online]. 3rd ed. Germany, 2013, 12 s. [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: http://www.tgs.cz/content/fck/files/nastroje/asm.ahu_mini.pdf
- [11] HOFFMANN GROUP. *Garant příručka k obrábění*. 2014, 846 s. ISBN 3-00-016882-6.
- [12] HOFFMANN GROUP. *Hlavní katalog*. 2015, 1664 s. [cit. 2015-11-18]. Dostupné také z: http://landingpages.hoffmann-group.com/bk/ONLINE_all_Languages/html5/?catName=BD1&lang=cs_CZ#/?onlinekatpage=1664
- [13] STANĚK, Vlastimil. *CAM: Simulace virtuálního obrábění, postprocesing a verifikace NC programu* [online]. 2011, (9) [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/cam-simulace-virtualniho-obrabeni-postprocesing-a-verifikace-nc-programu-9>

- [14] CIMCO A/S. Cimco Edit 7 [software]. [přístup 2015-11-20]. Dostupné také z: <http://www.cimco.com/download.php3>. Požadavky na systém: PC Microsoft® Windows XP a vyšší, 2 GB RAM; 500 MB místa na disku, Procesor 1,5 GHz.
- [15] OBRÁBĚCÍ STROJE OLOMOUC. *FV 25 CNC A: Návod pro obsluhu stroje FV 25 CNC A*. 2000, 42 s.
- [16] DMG MORI. Technical Data DMU 65 monoBLOCK®. *Dmgmori.com* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://en.dmgmori.com/products/milling-machines/universal-milling-machines-for-5-sided-5-axis-machining/dmu-monoblock/dmu-65-monoblock#Technic>
- [17] ISCAR: eCatalog. *Iscar.com* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/>
- [18] ISCAR: CHATTERFREE. *Iscar.com* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/Products.aspx/CountryId/1/ProductId/3801>
- [19] SOLIDCAM. *Prezentace modulu iMachining*. Plzeň, 2016
- [20] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1 část. Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 2003, 138 s. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [21] HNÁTÍK, Jan. *Opotřebení nástrojů* [email]. [cit. 2016-03-16].
- [22] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-7204-722-2.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[mm/min]	Rychlost posuvu
f_z	[mm]	Posuv na zub
a_p	[mm]	Hloubka řezu
n	[min ⁻¹]	Otáčky
z	[-]	Počet zubů
D	[mm]	Průměr frézy
d	[mm]	Průměr dříku
l	[mm]	Délka řezné části
L	[mm]	Celková délka
H	[mm]	Délka osazení
λ	[°]	Úhel stoupání šroubovice
VB	[mm]	Průměrné opotřebení hřbetu
KT	[mm]	Hloubka žlábků opotřebení čela
$\varnothing$	[mm]	Průměr

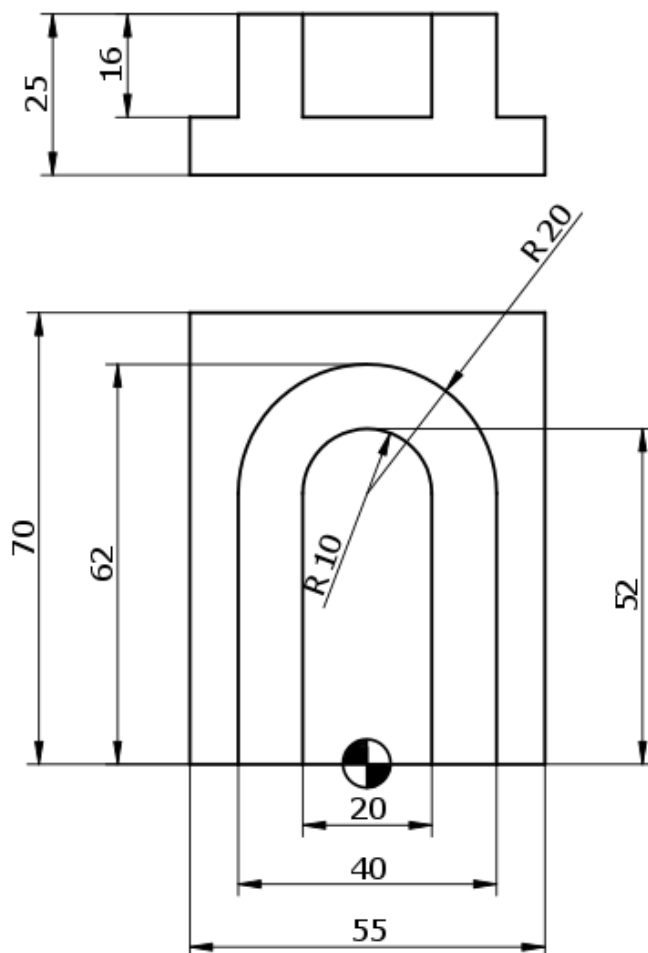
Zkratka	Význam	Popis
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporované projektování
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačová podpora obrábění
ACP	Axial Contact Points	Axiální kontaktní body
NC	Numeric Control	Číslicové řízení
DNC	Distributed Numerical Control	Distribuované číslicové řízení

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres experimentální součásti
Příloha 2	Výkres experimentální součásti použité na prezentaci
Příloha 3	NC kód konvenčního obrábění
Příloha 4	NC kód generovaný modulem iMachining pro materiál ČSN 15 142
Příloha 5	NC kód generovaný modulem iMachining pro materiál ČSN 11 373
Příloha 6	NC kód generovaný modulem iMachining pro materiál ČSN 17 240
Příloha 7	NC kód generovaný modulem iMachining pro materiál EN AW 2007

PŘÍLOHA 1

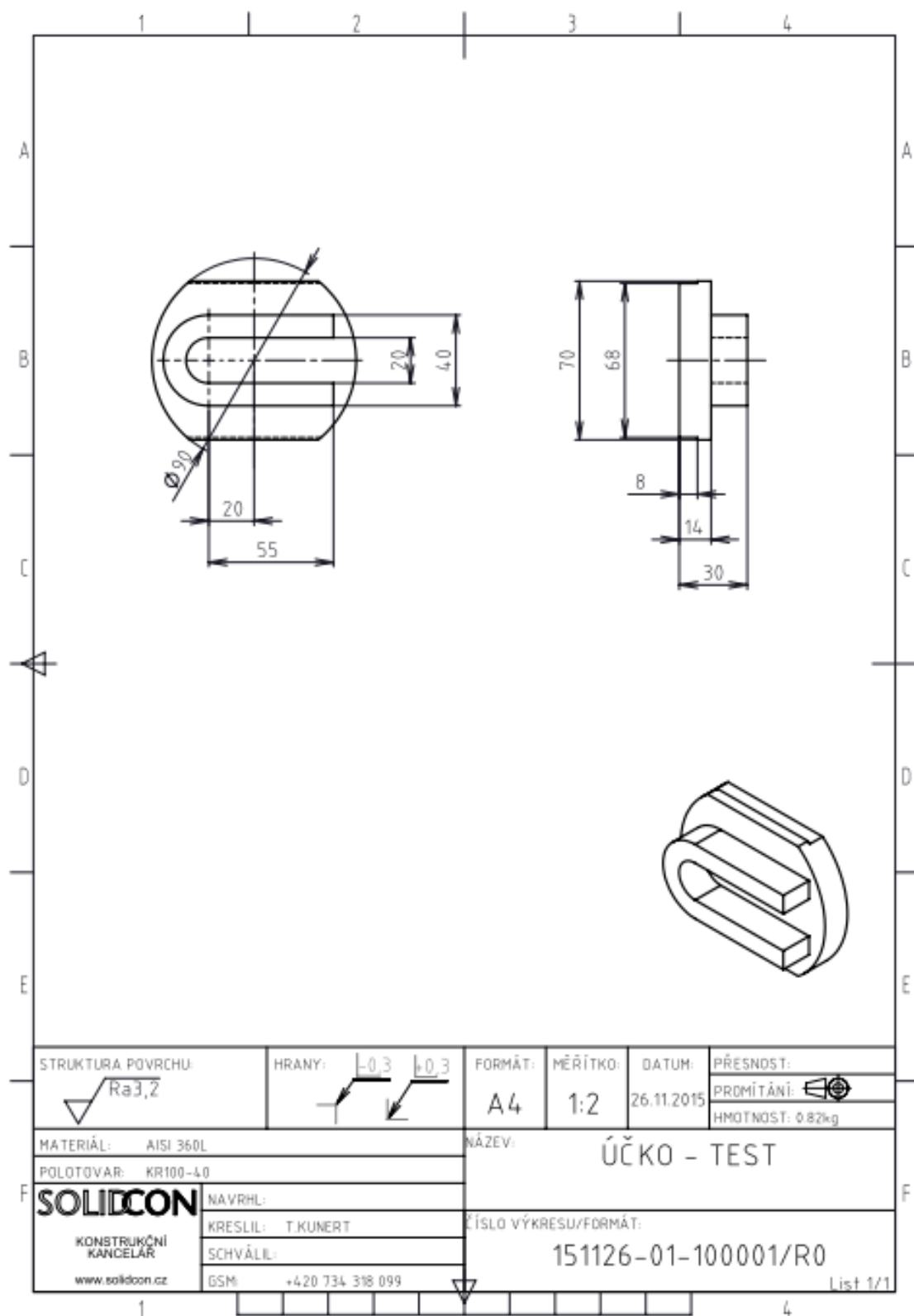
3,2/



HRANY SRAŽENY 0,2x45°
NETOLEROVANÉ ROZMĚRY DLE ISO 2768-mK

					Petr Janovský Hruškové Dvory 37 586 01 JIHLAVA mobil: +420 605 819 540 e-mail: pjanovs@sezim.cz www.pjanovs.cz		Číslo kopie:
Index	Změna	Datum	Podpis		Hmotnost (kg):	Měřítko:	Formát:
Materiál: 42 4254 (2030-T 4, AlCuMgPb) Polotovár: 70x25-60 Vypracoval: Janovský Vyprac. dne: 15. 12. 2015 Přezkoušel: _____					0,154 kg	1:1	A4
Datum: _____ Schválil: _____ Název:					Pozice: _____ Poznámka: _____ Číslo sestavy: _____ Starý výkres: _____		
KOTVA				2015-01-5			Listů: _____ List: _____

PŘÍLOHA 2



PŘÍLOHA 3

```
0 BEGIN PGM 2015 MM
1 ;2015-01-5 KOTVA
2 BLK FORM 0.1 Z X-70.0 Y-22.5
Z-25.0
3 BLK FORM 0.2 X+0.0 Y+22.5
Z+0.0
4 ; HLAV_4B_TK_35
5 TOOL CALL 2 Z S1800
6 FN 0: Q10 =200
7 CALL LBL 1
8 CALL LBL 99
9 M0
10 ; HLAV_3B_TK_12
11 TOOL CALL 6 Z S2200
12 FN 0: Q20 =200
13 FN 0: Q22 =200
14 CALL LBL 2
15 CALL LBL 99
16 M0
17 ; STOP_4B_TK_8
18 TOOL CALL 21 Z S2200
19 FN 0: Q30 =200
20 CALL LBL 31
21 CALL LBL 32
22 L Z+0 R0 FMAX M92
23 L X-120 Y+30 R0 FMAX M2
24 LBL 1
25 FN 0: Q11 =-1.6
26 CALL LBL 11
27 FN 0: Q11 =-3.2
28 CALL LBL 11
29 FN 0: Q11 =-4.8
30 CALL LBL 11
31 FN 0: Q11 =-6.4
32 CALL LBL 11
33 FN 0: Q11 =-8
34 CALL LBL 11
35 FN 0: Q11 =-9.6
36 CALL LBL 11
37 FN 0: Q11 =-11.2
38 CALL LBL 11
39 FN 0: Q11 =-12.8
40 CALL LBL 11
41 FN 0: Q11 =-14.4
42 CALL LBL 11
43 FN 0: Q11 =-15.8
44 CALL LBL 11
45 LBL 0
46 LBL 11
47 L X+20 Y-37.6 R0 FMAX
48 L Z+Q11 FMAX M13
49 L Y-20.1 RL FMAX
50 L X-62.1 FQ10
51 RND R20.1
52 L Y+20.1
53 RND R20.1
54 L X+19
55 L Z+10 R0 FMAX
56 LBL 0
57 LBL 2
58 FN 0: Q21 =-1
59 CALL LBL 21
60 FN 0: Q21 =-2
61 CALL LBL 21
62 CALL LBL 22
63 FN 0: Q21 =-3
64 CALL LBL 21
65 FN 0: Q21 =-4
66 CALL LBL 21
67 CALL LBL 22
68 FN 0: Q21 =-5
69 CALL LBL 21
70 FN 0: Q21 =-6
71 CALL LBL 21
72 CALL LBL 22
73 FN 0: Q21 =-7
74 CALL LBL 21
75 FN 0: Q21 =-8
76 CALL LBL 21
77 CALL LBL 22
78 FN 0: Q21 =-9
79 CALL LBL 21
80 FN 0: Q21 =-10
81 CALL LBL 21
82 CALL LBL 22
83 FN 0: Q21 =-11
84 CALL LBL 21
85 FN 0: Q21 =-12
86 CALL LBL 21
87 CALL LBL 22
88 FN 0: Q21 =-13
89 CALL LBL 21
90 FN 0: Q21 =-14
91 CALL LBL 21
92 CALL LBL 22
93 FN 0: Q21 =-15
94 CALL LBL 21
95 FN 0: Q21 =-15.9
96 CALL LBL 21
97 CALL LBL 22
98 LBL 0
99 LBL 21
100 L X+10 Y+0 R0 FMAX
101 L Z+Q21 FMAX M13
```

102 L X-44 FQ20
103 L Z+10 R0 FMAX
104 LBL 0
105 LBL 22
106 L X+10 Y+3.9 R0 FMAX
107 L Z+Q21 FMAX M13
108 L Y+9.9 RL FMAX
109 L X-51.9 FQ22
110 RND R9.9
111 L Y-9.9
112 RND R9.9
113 L X+8
114 L Z+10 R0 FMAX
115 LBL 0
116 LBL 31
117 L X+10 Y-37.5 R0 FMAX
118 L Z-16 FMAX M13
119 L Y-20 RL FMAX
120 L X-62 FQ30
121 RND R20
122 L Y+20
123 RND R20
124 L X+6
125 L Z+10 R0 FMAX
126 LBL 0
127 LBL 32
128 L X+10 Y+6 R0 FMAX
129 L Z-16 FMAX M13
130 L Y+10 RL FMAX
131 L X-52 FQ30
132 RND R10
133 L Y-10
134 RND R10
135 L X+6
136 L Z+10 R0 FMAX
137 LBL 0
138 LBL 99
139 L Z+0 R0 FMAX M92 M5
140 L X+50 Y-50 R0 FMAX M9
141 LBL 0
142 END PGM 2015 MM