

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ NA CNC OBRÁBĚCÍM
CENTRU METODOU VOLUMILL**

ON THE MILLING TECHNOLOGY AT A MACHINING CENTER WITH THE VOLUMILL METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Kakáč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

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

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologie frézování na CNC obráběcím centru metodou VoluMill

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologická příprava výroby na CNC obráběcím centru s řídicím systémem FANUC s využitím CAM systému (GibbsCam) metodou VoluMill

Cíle diplomové práce:

Úvod do problematiky

1. Charakteristika a vlastnosti hliníku a jeho slitin
2. Teoretický rozbor tvorby třísky při frézování
3. Rešerše CAM systémů založených na střední tloušťce třísky při hrubovacím trochoidním frézování (i-Milling, VoluMill, Milling Advisor)
4. Návrh postupu výroby zvoleného dílce, určení limitního počtu kusů pro jednotlivé technologie
5. Zpracování řídicího programu metodou VoluMill na vybraný dílec
6. Technicko-ekonomické zhodnocení pro konkrétní počet kusů
7. Závěr

Seznam literatury:

Cihlářová, P., Hill, M. a Píška, M.: Fundamentals of CNC machining. Interaktivní studijní text v angličtině

<http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/obrCNC/Fundamentals%20of%20CNC%20Machining.pdf>

Mattson, M. (2002): CNC programming principles and applications. Delmar-Thompson Learning.

Quesada, R. (2005): Computer numerical control. Prentice Hall.

Computer numerical control. <http://cnc.fme.vutbr.cz/>

GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. Why VoluMill for GibbsCAM. [online]. [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/why-volumill-for-gibbscam-web.pdf>

GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. VoluMill - Features and Benefits [online]. [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/gibbs-cam-mlr118-web.pdf>

GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. VoluMill Gives 10x Feedrate for Performance [online]. [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/gibbs-cam-mlr119-web.pdf>

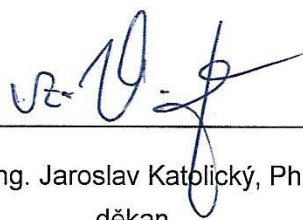
GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. VoluMill - Maximizing Machine Efficiencies [online]. [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/gibbs-cam-mlr120-web.pdf>

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

V Brně, dne 30. 11. 2015



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá technologickou přípravou výroby na CNC obráběcím centru, vybaveném řídicím systémem FANUC. Ve spolupráci s firmou AB KOMPONENTY s.r.o. se využívá CAM software GibbsCAM a její nadstavby VoluMill. První kapitola je věnována základním vlastnostem hliníku, slitinám hliníku a jejich využití v průmyslu. Dále je proveden rozbor tvorby třísky při frézování. Následuje rozbor trochoidního frézování a rešerše CAM systémů VoluMill a iMachining, tedy systémů založených na střední tloušťce třísky při hrubovacím frézování. V další kapitole je řešen návrh postupu výroby zvoleného dílce, volba polotovaru a zpracování řídicího programu metodou VoluMill pro tento dílec. Poslední kapitola práce je zaměřena na technicko-ekonomické zhodnocení pro daný počet kusů a jednotlivé technologie výroby.

Klíčová slova

frézování, VoluMill, CAM software

ABSTRACT

The diploma thesis deals with technological preparation of the production at a CNC machining center, equipped with FANUC control system. In cooperation with company AB KOMPONENTY s.r.o. has been used CAM software GibbsCAM and its extensions VoluMill. The first chapter is devoted to the basic properties of aluminum, aluminum alloys and their using in the industry. Furthermore, the chip formation in milling is analysed. The following is an analysis of trochoidal milling and research of CAM systems VoluMill and iMachining - systems based on a medium thickness of chip in rough milling operations. Next part deals with the design production process of the selected component, the choice of the blank and the processing of the control program with the VoluMill method for this component. The last chapter of the thesis is focused on the techno-economic evaluation for a given number of pieces and individual production technology.

Key words

milling, VoluMill, CAM software

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAKÁČ, M. *Technologie frézování na CNC obráběcím centru metodou VoluMill*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 85 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Technologie frézování na CNC obráběcím centru metodou VoluMill** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 5. 2016

Datum

Bc. Martin Kakáč

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce prof. Ing. Miroslavu Piškovi, CSc. a Ing. Karlu Praksovi ze společnosti AB KOMPONENTY s.r.o. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Dále děkuji mé rodině za podporu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 CHAREKTERISTIKA A VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN.....	10
1.1 Výroba	10
1.2 Vlastnosti hliníku a jeho slitin	11
1.3 Oblasti použití hliníku a jeho slitin.....	11
1.4 Slitiny hliníku	12
1.4.1 Slévárenské slitiny hliníku.....	13
1.4.2 Slitiny hliníku určené k tváření.....	14
1.5 Označování hliníku a jeho slitin dle ČSN EN	15
1.6 Obrobitelnost slitin hliníku	16
2 TEORETICKÝ ROZBOR TVORBY TŘÍSKY PŘI FRÉZOVÁNÍ	20
2.1 Mechanismus tvorby třísky.....	20
2.1.1 Silové poměry a vztahy v oblasti utváření třísky.....	22
2.2 Rozbor průřezu třísky, řezných sil a činitelů ovlivňující jejich velikost	24
2.2.1 Válcové frézování	25
2.2.2 Střední tloušťka třísky h_m	27
3 REŠERŠE CAM SYSTÉMŮ ZALOŽENÝCH NA STŘEDNÍ TLOUŠŤCE TŘÍSKY PŘI HRUBOVACÍM TROCHOIDNÍM FRÉZOVÁNÍ.....	30
3.1 Trochoidní frézování.....	30
3.1.1 Druhy trochoidních trajektorií	34
3.2 VoluMill.....	35
3.2.1 Dráhy nástroje.....	37
3.2.2 VoluMill 7.0.....	39
3.2.3 MillingAdvisor.....	40
3.3 iMachining	41
3.3.1 Dráhy nástroje.....	43
3.3.1 3D iMachining	44
4 NÁVRH POSTUPU VÝROBY ZVOLENÉHO DÍLCE, URČENÍ LIMITNÍHO POČTU KUSŮ PRO JEDNOTLIVÉ TECHNOLOGIE	45
4.1 Návrh technologie.....	45
4.2 Vertikální obráběcí centra YCM NSV102A a YCM NSV156A.....	47

4.3 Nástrojové vybavení	48
4.4 Limitní počet kusů pro jednotlivé technologie, založených na změně polotovaru....	51
5 ZPRACOVÁNÍ ŘÍDICÍHO PROGRAMU METODOU VOLUMILL NA VYBRANÝ DÍLEC	57
5.1 Řídicí program – Varianta B (metoda VoluMill)	57
5.1.1 Výrobní operace na vertikálním obráběcím centru YCM NSV102A	57
5.1.2 Výrobní operace na vertikálním obráběcím centru YCM NSV156A	62
5.1.3 Porovnání NC programů	64
5.2 Řídicí program – Varianta C (odlitek)	66
6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRO KONKRÉTNÍ POČET KUSŮ.....	68
ZÁVĚR	72
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	80
SEZNAM PŘÍLOH.....	85

ÚVOD

V posledních letech dochází s rozvojem průmyslu stále více k návrhu a výrobě součástí z hliníku a jeho slitin. Tyto materiály díky svým dobrým mechanickým vlastnostem, odolnosti vůči korozi a zejména nízké hmotnosti nacházejí odbyt převážně v oblasti dopravního průmyslu. A to hlavně u komponent v průmyslu leteckém a automobilovém, kde je aplikací hliníkových slitin dosaženo snížení hmotnosti dopravních prostředků, čímž je docíleno nižší spotřeby paliva a vyprodukovaných emisí.

Požadovaného tvaru a rozměru daného dílce je nejčastěji dosaženo obráběním. Jednou z jeho metod je technologie frézování, která je díky rozvoji strojírenství univerzálnější a nachází čím dál větší uplatnění v mnoha oblastech výroby. V poslední době jsou kladeny na frézovací operace větší požadavky – vyšší jakost obrobků, kratší výrobní proces, minimalizace nákladů na obrábění. Zároveň jsou obráběné součásti tvarově složitější. Manuální změny řezných podmínek za účelem dodržení výše uvedených požadavků jsou prakticky nemožné. Z toho důvodu dochází k prudkému vývoji systémů pro programování CNC obráběcích strojů, tzv. CAM software. Stále více se uplatňuje použití CAM systémů založených na střední tloušťce třísky, které jsou v této práci popsány.

S rozmachem CAM software je spojen vznik nových, mnohem efektivnějších obráběcích metod, které dosahují lepších výsledků než technologie využívané v minulosti. Řadí se mezi ně i metoda VoluMill, která je dostupná jako nadstavba pro CAM software GibbsCAM. Aplikace těchto software je také závislá na vhodné volbě řezných nástrojů, které díky své konstrukci zvládají specifika nových obráběcích metod.

Cílem této diplomové práce je návrh a následné porovnání výroby komponenty pro NC řezací stůl, levého držáku fotobuňky, v různých variantách technologie. Od stávající technologie, využívající tvářený polotovar ploché obdélníkové tyče, přes nasazení nadstavby CAM software GibbsCAM - metodu VoluMill, až po možnou variantu výroby tohoto dílce z polotovaru, kterým je hliníkový slévárenský odlitek.

Ve spolupráci se společností AB KOMPONENTY s.r.o. byla vytipována součást, která plně odpovídá aplikaci technologie frézování na CNC obráběcím centru metodou VoluMill, a na které se zároveň uplatní výhody této metody. Jedná se o metodu určenou pro zvýšení produktivity frézování zejména při hrubovacích cyklech. Díky vysokým posuvovým rychlostem je efektivněji odebrán velký objem materiálu obrobku během časové jednotky.

1 CHAREKTERISTIKA A VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN

Hliník (Al) se řadí mezi neželezné kovy, které tvoří asi tři čtvrtiny ze všech doposud známých prvků. Neželezné kovy se uplatňují v případech, kdy lze plně využít jejich specifických vlastností, a zejména jako legující prvky ve slitinách železa (Fe). Počátky výroby hliníku se datují kolem roku 1825, kdy pan Oerstedt získal malé množství tohoto prvku redukcí chloridu hliníku s amalgámem draslíku. Jeho masivnější průmyslová výroba přichází kolem roku 1886 s vynalezením možnosti jeho výroby pomocí elektrolýzy, Heroultem a Hallem. S prudkým rozvojem letecké a automobilové dopravy po 2. světové válce se podle údajů International Aluminium Institute, zvýšila jeho výroba v letech 1946 až 1975 téměř 15x. Tento zvyšující se trend produkce hliníku má dle předpokladů pokračovat i v následujících letech. Má na tom svůj podíl i postupné zvyšování produkce sekundárního hliníku získaného recyklací [1, 2, 3, 4, 5].

1.1 Výroba

Nejvýznamnějším surovinovým zdrojem pro výrobu hliníku je bauxit (viz obr. 1). Je to v podstatě oxid hlinitý Al_2O_3 s neurčitým obsahem vázané vody, kde je obsah oxidu hlinitého okolo 50 %. Obvykle je doprovázen látkami na bázi oxidů křemíku, titanu a železa. Ze čtyř až šesti tun této horniny se v závislosti na bohatosti získává jedna tona hliníku [1, 2, 6].



Obr. 1 Bauxit [7].

V současné době je oxid hliníku vyráběn téměř výhradně zásaditými metodami. Základní metodou je výroba oxidu hlinitého z bauxitu. Druhou z nich je celosvětově nejrozšířenější hydrometalurgický způsob výroby oxidu hlinitého, a to pomocí Bayerovy zásadité metody. Jedná se o jednoduchý a nejhospodárnější způsob zpracování bauxitu, jehož výsledkem je velmi čistý Al_2O_3 . Další způsob výroby oxidu hlinitého je spékací metoda. Jeden ze způsobů výroby tohoto neželezného kovu je také pomocí elektrolýzy z oxidu hlinitého. Tato metoda se realizuje v elektrolyzních pecích (elektrolyzérech), ve kterých je při teplotách okolo 960 °C roztavená sůl kryolit. Do kryolitu se přidává oxid hlinitý, který se v něm rozpouští, a následkem nastaveného napětí na elektrolyzáru se rozkládá na kovový hliník a kyslík. Mezi alternativní moderní trendy výroby hliníku se řadí i karbotermická redukce [1, 2, 6].

1.2 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

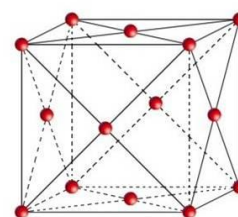
Hliník je stříbrolibý, nepolymorfní, lehký, paramagnetický, tvárný kov, u kterého je v posledních letech zaznamenáván enormní růst výroby a spotřeby. Je to dáno především výhodnou kombinací vlastností hliníku a jeho slitin. Jedná se hlavně o vlastnosti fyzikální – vysoká elektrická a tepelná vodivost, nízká měrná hmotnost. Dále mechanické vlastnosti – relativně vysoké pevnostní charakteristiky, dobré plastické vlastnosti, únavové vlastnosti, výborné mechanické vlastnosti při záporných teplotách. Chemické – dobrá odolnost proti korozi, která je dána vznikem tenké souvislé vrstvy Al_2O_3 na povrchu hliníku o tloušťce 5÷20 nm. V neposlední řadě jsou to vlastnosti technologické – dobrá schopnost k tváření za tepla i studena, dobrá svařitelnost slitin v ochranné atmosféře, dobrá obrobitelnost hliníkových slitin s legujícími prvky olovo (Pb), vizmut (Bi), cín (Sn) a výborná slévatelnost a zabíhavost slitin s křemíkem (Si). Hliník je nejrozšířenější kov v zemské kůře a spotřebou druhý nejvýznamnější po železe (Fe). Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tabulce 1 [1, 2, 3, 4, 5, 8].

Naopak mezi záporné vlastnosti hliníku patří špatná odolnost proti působení alkalických látek. Dále nízká tvrdost, z čehož vyplývá relativně snadné znehodnocení povrchu materiálu. V případech, kdy jsou hliníkové slitiny ve styku s ostatními kovy a slitinami, mohou být napadeny elektrolytickou korozi [1, 2, 3, 4, 5, 8].

Mechanické vlastnosti hliníku jsou závislé na mnoha parametrech a jedním z těch nejdůležitějších je teplota. U slitin hliníku, se zvyšující se teplotou relativně rychle klesá mez pevnosti (R_m), smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) a tvrdost při současném zvyšování tažnosti (A) a kontrakce (Z). Hliníkové slitiny mají v některých případech při nízkých teplotách lepší vlastnosti než při teplotách pokojových. Tato schopnost je dána především kubickou plošně středěnou mřížkou FCC, kterou lze vidět na obr. 2 [1, 2, 3, 4, 5, 8].

Tab. 1 Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [1, 5].

Vlastnosti	Hodnoty
krystalová mřížka	FCC
atomové číslo	13
parametr mřížky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
atomová hmotnost	$A_r = 26,98154$
hustota	$\rho = 2,6989 \text{ g.cm}^{-3}$ (při 20 °C)
teplota tavení	$T_t = 660,4 \text{ °C}$
teplota varu	$T_v = 2\,494 \text{ °C}$
tepelná vodivost	$\lambda = 247 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ (při 25 °C)
latentní teplo tavení	$l_t = 397 \text{ kJ.kg}^{-1}$
latentní teplo varu	$l_v = 10,78 \text{ MJ.kg}^{-1}$
součinitel tepelné roztažnosti	$\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (při 20 °C)
měrný elektrický odpor	$\rho = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ }\Omega\text{.m}$ (při 20 °C)
měrná tepelná kapacita	$c = 0,9 \text{ kJ.kg.K}^{-1}$



Obr. 2 Krystalová mřížka FCC [3].

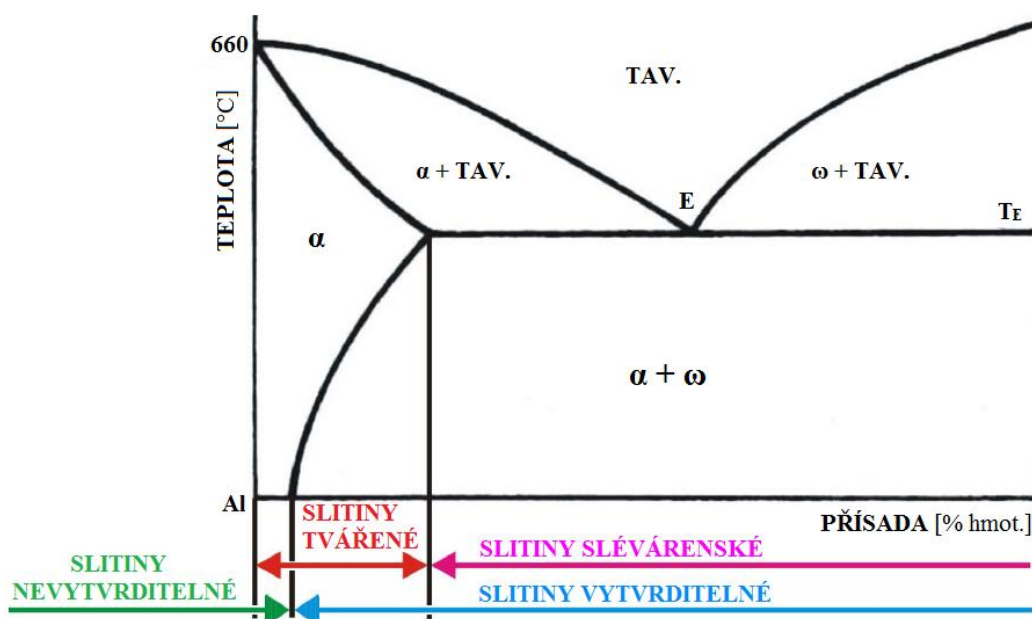
1.3 Oblasti použití hliníku a jeho slitin

V současné době téměř neexistuje oblast průmyslu a každodenního života, kde se nelze setkat s výrobky z hliníku nebo jeho slitin. Téměř 60 % celosvětové produkce hliníku

a jeho slitin se spotřebuje v oblasti dopravy. Z důvodu dobrých mechanických vlastností, zejména při nízkých teplotách pod 0 °C a nízké hmotnosti je letecký průmysl na špici. V automobilovém průmyslu se pak jedná o skříně motorů, hlavy válců, hnací komponenty, profily pro výplně dveří a v poslední době i celé karoserie aut. Ve stavebnictví nachází hliník uplatnění zejména díky jednoduché a levné údržbě, vysoké odolnosti vůči korozi, nízké hmotnosti používaných materiálů nebo zachování původního vzhledu po dlouhé časové období. Hliník se dále používá pro výrobu různých zařízení v chemickém průmyslu, a to díky dobré tepelné vodivosti a odolnosti proti korozi v kyselém prostředí. Mezi tyto zařízení patří např. části zařízení pro rafinaci ropy, destilační přístroje a chladiče pro čpavkovou vodu, zařízení pro rekuperaci použitých rozpouštědel a další. Obecně se ve strojírenství z hliníkových slitin vyrábí výměníky tepla, součásti textilních strojů, či součásti optických přístrojů. Z důvodu toho, že lze z hliníku vyrábět tenké fólie, nachází široké uplatnění také v potravinářském průmyslu. Tyto fólie jsou lehké, hygienicky nezávadné a dobře snášejí vysoké i nízké teploty [1, 2, 3, 4, 6].

1.4 Slitiny hliníku

Pro konstrukční účely jsou vlastnosti čistého hliníku nedostačující, proto se používají výhradně slitiny hliníku. Legující prvky zvyšují mechanické vlastnosti a zlepšují vlastnosti technologické. Všechny slitiny obsahují základní prvek, kterým je v tomto případě hliník. Dále hlavní přísadový prvek – to je prvek, který je rozhodující pro určení vlastností slitiny a spolu se základním prvkem stanovuje typ dané slitiny. Mezi hlavní přísadové prvky slitin hliníku se řadí křemík (Si), měď (Cu) a hořčík (Mg). Vedlejší přísadové prvky pak příznivě ovlivňují určité vlastnosti konkrétní slitiny – zvyšují mechanické vlastnosti, zlepšují obrobiteľnost, ovlivňují strukturu kovu, jsou důležité pro tepelné zpracování, či eliminují negativní vliv určitých doprovodných prvků. Poslední skupinou jsou prvky doprovodné [3, 4, 5].



Obr. 3 Dělení slitin hliníku [4, 8].

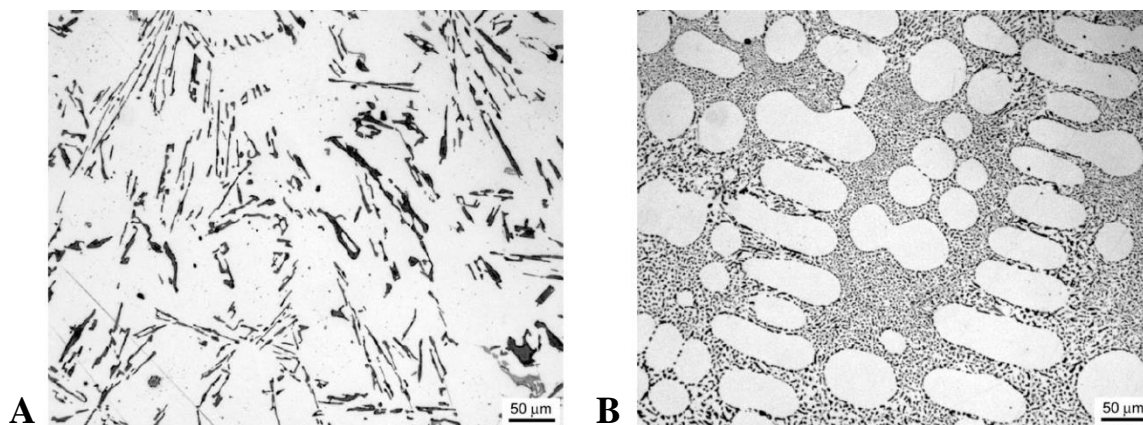
Hlavní dvě skupiny hliníkových slitin jsou slitiny slévárenské, které se podle obsahu křemíku (Si) dále rozdělují na podeutektické (4,5 – 10 %Si), eutektické (10 – 13 %Si) a nadeutektické (nad 13 %Si). Druhou skupinou jsou slitiny hliníku určené k tváření – precipitačně vytvrditelné a nevytvrditelné, jak je patrné z obr. 3 [3, 4].

1.4.1 Slévárenské slitiny hliníku

Tyto slitiny jsou určené k výrobě tvarových odlitků litím do písku, do kovových forem nebo tlakovým způsobem. Hodnoty mechanických vlastností odlitků jsou značně závislé na technologii odlévání, kdy se maximální mez pevnosti pohybuje okolo 250 MPa. Nejvýznamnější skupinou slévárenských slitin hliníku jsou slitiny na typu Al-Si, tzv. siluminy [1, 3, 4, 5].

- **Slitiny Al-Si (siluminy)**

Základní skupinou jsou binární siluminy, které mají velmi dobrou odolnost proti korozi. Mají špatné mechanické vlastnosti způsobené křehkými krystaly křemíku (obr. 4A). Pro zlepšení těchto vlastností se siluminy modifikují. Do taveniny je při 780÷830 °C přidáváno stanovené množství modifikátoru, a to po dobu 3 až 5 minut. Ve většině případů se používá sodík (Na) nebo soli, které sodík uvolňují. Tímto procesem se změní tvar a velikost krystalů křemíku (viz obr. 4B), vzroste mez pevnosti, houževnatost, rázová pevnost a hlavně se výrazně zvýší tažnost. Siluminy mají i dobré slévárenské vlastnosti – odlitky mají dobrou těsnost vůči plynům i kapalinám a také disponují dobrou svařitelností [1, 3, 4, 5].



Obr. 4 Druhy siluminu: A) nemodifikovaný, B) modifikovaný [4].

Druhou skupinou jsou speciální siluminy, které se legují dvěma základními prvky – Mg a Cu, případně také Mn, Zn, Ti, Ni. Nejpoužívanějším typem jsou slitiny Al-Si-Cu, které tvoří asi 50 % celkové produkce hliníkových odlitků. Díky mědi (Cu) mají dobré mechanické vlastnosti a obrobitelnost, ale měď naopak snižuje odolnost proti korozi [1, 3, 4, 5].

- **Slitiny Al-Cu (duralaluminum)**

Tyto slitiny hliníku obvykle obsahují i jiné prvky, jako je železo (Fe) a nikl (Ni). Patří k tzv. vysokopevnostním slitinám hliníku, vyznačující se vysokou mezí pevnosti až nad

$R_m = 400$ MPa. Hodnoty tažnosti a lomové houževnatosti jsou v porovnání se siluminy až dvojnásobné. Oproti siluminům mají horší slévárenské vlastnosti, které se zlepšují přísadou křemíku (Si), ovšem za cenu snížení pevnostních charakteristik. Nejčastěji se používají pro výrobu namáhaných odlitků pracujících za vyšších provozních teplot, jako jsou např. hlavy válců, převodové skříně [1, 3, 4, 5].

- **Slitiny Al-Mg (hydronalium)**

Tato skupina má nejvyšší pevnost a houževnatost ze slévárenských slitin hliníku. Díky vyššímu obsahu hořčíku (Mg), který zlepšuje obrobitelnost hliníkových slitin, jsou lépe obrobitelné než siluminy. Naopak mají horší slévárenské vlastnosti a větší pórovitost. Používají se v případech, kdy se požaduje vysoká odolnost proti korozi – stavba lodí, chemický průmysl, automobilové kování, nádobí pro styk s potravinami. Přidáním křemíku (Si) se zlepšuje jejich zabíhavost, která určuje schopnost tekutého kovu zaplňovat dutinu formy [1, 3, 4, 5].

- **Slitiny Al-Zn**

Slitiny Al-Zn obvykle obsahují 5÷7 % zinku (Zn) a méně než 1 % hořčíku (Mg). Slitiny se samovolně vytvrzují za studena a po době 20 až 30 dní dosahují meze pevnosti $R_m \approx 250$ MPa, tažnosti $A = 5$ %, tvrdosti zhruba 70 HB. Vyznačují se vysokou rozměrovou stabilitou, dobrou odolností proti korozi a dobrou obrobitelností. Naopak slévárenské vlastnosti jsou spíše špatné. Dále mají vysoký sklon k praskání za tepla [1, 5].

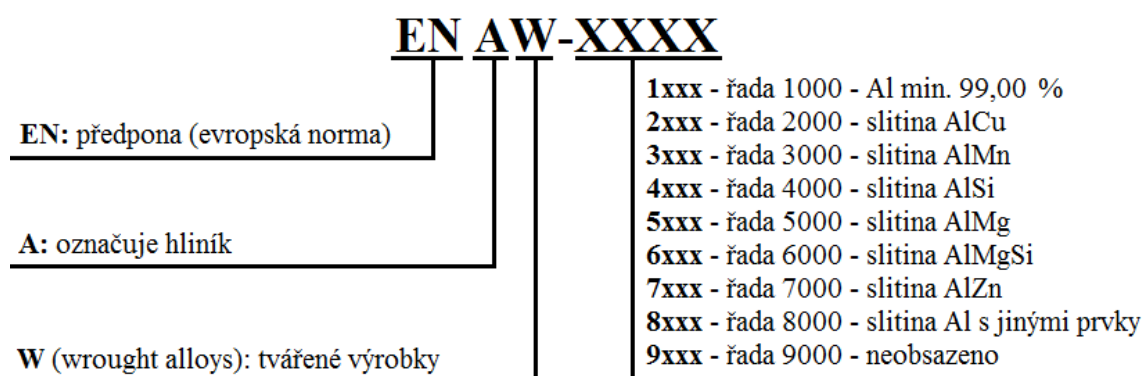
1.4.2 Slitiny hliníku určené k tváření

První skupinou jsou nízkopevnostní precipitačně nevytvrditelné slitiny s dobrou odolností proti korozi. Tato dobrá korozní odolnost je dána absencí mědi (Cu). Patří sem hliníkové slitiny Al-Mg, Al-Mn a Al-Mg-Si. Vykazují dobrou svařitelnost, tvařitelnost a lomovou houževnatost. Výborně odolávají korozi a to zejména v mořské vodě. Nejčastěji se využívají ve strojírenském a chemickém průmyslu. V leteckém průmyslu nachází největší využití skupina slitin Al-Mg-Si [1, 3, 4, 5].

Druhou skupinou jsou slitiny s vyšší a vysokou pevností – precipitačně vytvrditelné (Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu). Precipitační vytvrzování spočívá ve využití rozpadu přesyceného tuhého roztoku slitiny. Skládá se ze tří částí – rozpouštěcího ohřevu za teploty mezi křivkou změny rozpustnosti a solidem. Následuje rychlé ochlazení a samotné vytvrzování (stárnutí). Nejvýznamnějším představitelem jsou tzv. duraly, tedy slitiny Al-Cu-Mg. Po vytvrzení dosahují značné pevnosti až $R_m = 530$ MPa (základní stav $R_m = 70$ MPa). Nedostatkem je nízká odolnost proti působení koroze. Uplatňují se v případech, kde je požadována nízká hmotnost, při zachování dostatečných pevnostních charakteristik – součásti letadel, automobily, jízdní kola. Dalším typem jsou slitiny Al-Zn-Mg, které představují nejpevnější konstrukční hliníkové slitiny (R_m až 600 MPa). Mezi jejich záporné vlastnosti patří nižší lomová houževnatost, vyšší vrubová citlivost a razantní snižování pevnosti s rostoucí teplotou. Z těchto důvodů jsou používány na namáhané součásti pracující za normálních teplot [1, 3, 4, 5].

1.5 Označování hliníku a jeho slitin dle ČSN EN

Hliník a slitiny hliníku jsou podle evropské normy značeny písmeny EN, kterým předchází kód pro danou zemi, ve které byla daná norma vydána – v České republice se jedná o ČSN. Číselné označování hliníku a jeho slitin určených pro tváření se dle normy ČSN EN 573 týká tvářených výrobků a ingotů určených k tváření. Norma dále rozlišuje systém numerického značení (EN 573-1), kdy je konkrétní materiál označen písmeny EN AW a čtyřmi příslušnými číslicemi jak je uvedeno na obr. 5. Druhou variantou je norma EN 573-2, která je založena na chemických značkách jednotlivých prvků dané slitiny [2, 9, 10, 11, 12].

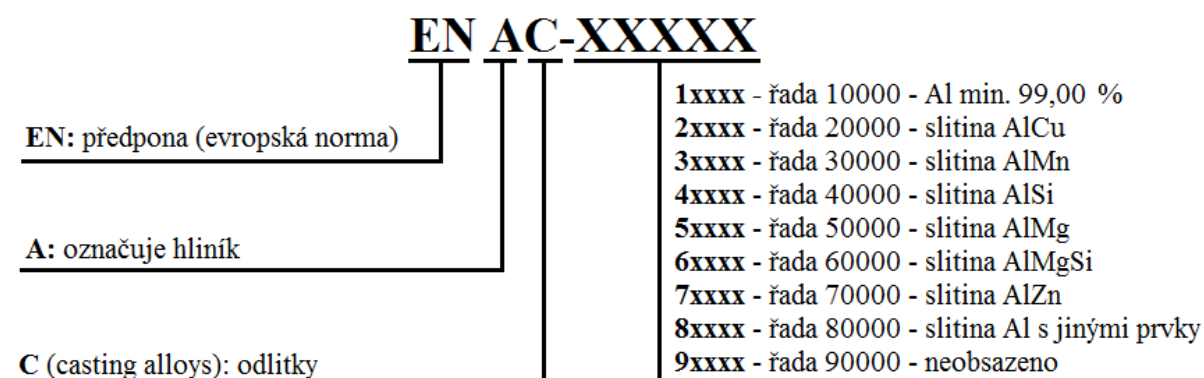


Obr. 5 Značení hliníku a jeho slitin určených k tváření dle normy ČSN EN 573 [10].

Systém číselného značení se skládá ze čtyř číslic, kde první číslice udává slitinovou skupinu podle hlavního slitinového prvku. První z nich je řada 1000, která představuje nelegovaný hliník, kde je jeho obsah minimálně 99,00 %. Druhá číslice v řadě 1xxx udává změny v mezním obsahu doprovodných nebo slitinových prvků. V případě, že se tato druhá číslice rovná nule, jedná se o nelegovaný hliník s normálním obsahem doprovodných prvků. V případě, že je čistota Al určena s přesností až do 0,01 %, určují tuto čistotu 3. a 4. číslice. Tyto poslední dvě číslice jsou tedy shodné se dvěma číslicemi za desetinnou čárkou minimálního procentuálního obsahu hliníku. Ve skupinách 2xxx až 8xxx značí druhá číslice modifikaci dané slitiny. Je-li druhé číslo nula, jedná se o základní skupinu. Číselné označení 1–9 určuje určitou modifikaci slitiny hliníku. Poslední dvě číslice v čtyřmístném označení nemají zvláštní význam a rozlišují pouze různé slitiny ve skupině [2, 9, 10, 11, 12].

Slitiny hliníku určené na odlitky se označují podle normy ČSN EN 1706. Tato norma se skládá z pěti číslic, kterým předchází označení EN AC, kde písmeno C značí, že se jedná právě o slitinu určenou pro odlitky. Výše uvedené číselné označení může být doplněno i chemickým označením. Systém značení je do značné míry totožný s označováním hliníku a jeho slitin určených k tváření. První z pětice číslic v pětimístném číselném kódu udává skupinu slitin, jak je vidět na obr. 6. Druhá číslice opět představuje modifikaci dané slitiny ve skupinách 2xxxx až 8xxxx. Zbývající číslice označují chemické složení a slouží k rozlišování různých slitin ve skupině. V případě, kdy je na čtvrté pozici místo

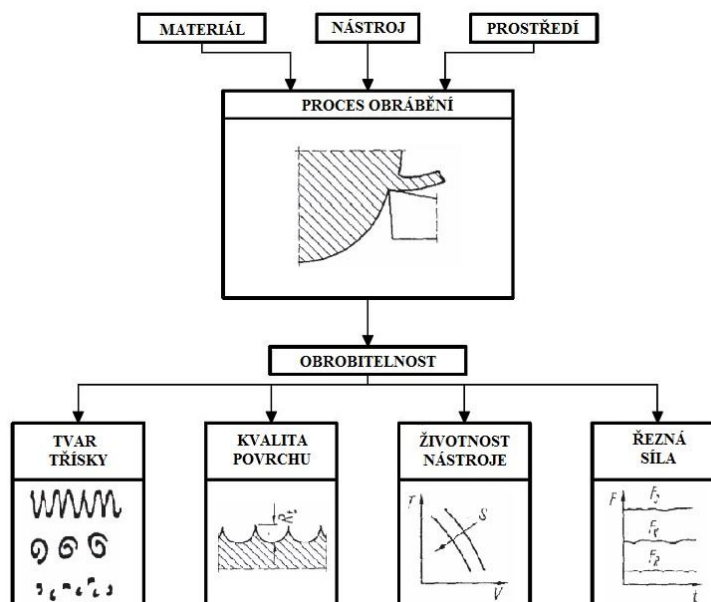
písmene C písmeno B, znamená to, že se jedná o nelegované nebo slitinové hliníkové ingoty pro přetavení [2, 11].



Obr. 6 Značení hliníku a jeho slitin určených k odlévání dle normy ČSN EN 1706 [2].

1.6 Obrobitelnost slitin hliníku

Obrobitelnost představuje jednu z klíčových vlastností materiálu a lze ji definovat jako schopnost materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Tato technologická vlastnost závisí na mnoha faktorech. Jedním z nejdůležitějších je způsob výroby a teplotní zpracování obráběného materiálu. Dále např. mikrostruktura, chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu. Obrobitelnost také závisí na metodě obrábění, která je daná reznými podmínkami a rezným prostředím. V neposlední řadě to jsou druh a vlastnosti nástrojového materiálu. Parametry charakterizující obrobitelnost jsou uvedeny na obr. 7 [2, 13, 14].



Obr. 7 Parametry charakterizující obrobitelnost [2].

Obrobitelnost je relativní vlastnost a pro daný materiál se určuje porovnáním s jiným materiálem, obráběným stejným rezným nástrojem za stejných definovaných rezných

podmínek. Nejčastějším srovnávacím kritériem je velikost řezné rychlosti při konstantní trvanlivosti (v_{cT}). Mezi další hodnocené veličiny patří velikost řezných sil, velikost teploty řezání, struktura povrchu obrobené plochy nebo druh vytváření a dělení třísky. Pro vyhodnocování obrobitelnosti jsou materiály podle českých normativů CNN (Celostátní normy a normativy) rozděleny do následujících devíti základních skupin [2, 13, 14]:

- a – litiny,
- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy, měď a slitiny mědi,
- d – lehké neželezné kovy, hliník a slitiny hliníku,
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,
- g – vrstvené hmoty,
- h – pryže,
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců.

Z každé této skupiny je vybrán jeden materiál, který slouží jako etalon obrobitelnosti. U lehkých neželezných kovů je tímto etalonem tvářená slitina hliníku, vytvrzená – ČSN 42 4380.11, s tvrdostí 100 HB. K tomuto materiálu se pak pomocí tzv. indexu kinetické obrobitelnosti, určuje relativní obrobitelnost ostatních materiálů z celé skupiny. Materiály všech skupin jsou děleny do jednotlivých tříd, které jsou označovány číslem, umístěným před písmeno dané skupiny materiálů (např. etalon 10d) [2, 13, 14, 15].

Index kinetické obrobitelnosti [14]:

$$i_o = \frac{v_{c15}}{v_{c15 \text{ etalonu}}} \quad [-], \quad (1)$$

kde: v_{c15} [m.min⁻¹] – řezná rychlost při trvanlivosti $T = 15$ min pro sledovaný materiál,

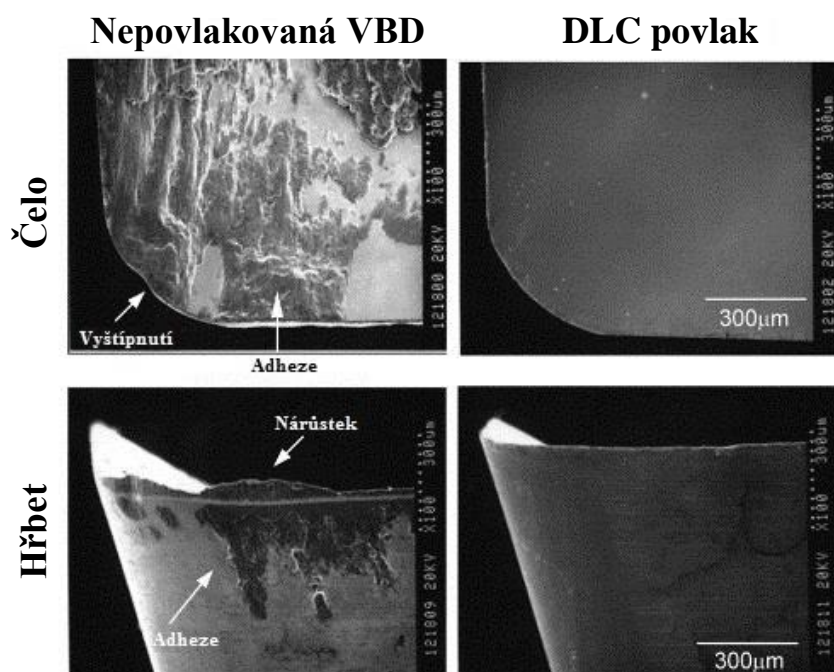
$v_{c15 \text{ etalonu}}$ [m.min⁻¹] – řezná rychlost při trvanlivosti $T = 15$ min pro etalonový materiál.

Hliník a jeho slitiny patří při obrábění (zejména za sucha) mezi velmi problematické materiály a to i přes relativně nízké mechanické charakteristiky. Což je způsobeno zejména jejich vlastnostmi, jako jsou vysoká tepelná vodivost, výrazný sklon k adheznímu chování na břitu řezného nástroje a nízká teplota tavení. Díky již zmíněné vysoké tepelné vodivosti se během procesu obrábění neodvádí z řezu prostřednictvím třísky dostatečné množství tepla. Tím pádem většina vygenerovaného tepla přechází do obrobku a vysoká tepelná roztažnost hliníku způsobuje tepelné deformace obrobku. Vzhledem k nízké teplotě tavení jsou utváření a odvod třísky z řezu problematické. Největším problémem při obrábění slitin hliníku je nalepování obráběného materiálu na ostří nástroje – nárůstek (obr. 8). Což vede k otřepům nebo k problémům s kvalitou obrobené plochy [2, 16, 17].



Obr. 8 Nárůstek [14, 18].

K zamezení ulpívání částic obráběného materiálu na břitu řezného nástroje a ke zvýšení kvality obrobenej plochy, potřebujeme pozitivní břit a velký úhel čela řezného nástroje. Také je nutné použít vhodnej procesnej kapaliny. Výrobci řezných nástrojů využívají různé přístupy k problematice obrábění těchto lehkých nezelezných kovů. Např. společnost WNT ve většině případů využívá leštěné vyměnitelné břitové destičky oproti povlakovaným. V poslední době se při frézování hliníkových slitin za sucha využívají tzv. DLC (Diamond-Like Carbon) povlaky. Jedná se tvrdý tenký film na povrchu nástroje, s nízkým koeficientem tření, vysokou tvrdostí, vysokou chemickou stabilitou a vysokou odolností proti opotřebení. Na obr. 9 jsou patrné rozdíly při provedeném testu frézování slitiny AlCu2.5Si18, bez použití procesnej kapaliny. Na levé nepovlakované VBD dochází na hřbetní a čelní ploše k adheznímu přilnutí materiálu obrobku. Kromě toho se na této destičce objevuje nárůstek a dochází k vyštípnutí hřbetu VBD. Při zachování stejné dosažené drsnosti povrchu obrobenej plochy, nevykazuje nástroj s DLC povlakem absolutně žádnou přilnavost materiálu na hřbetu ani čele řezného nástroje [16, 19, 20].



Obr. 9 Opotřebení hřbetní a čelní plochy po frézování slitiny AlCu2.5Si18 za sucha [20].

Jedním ze základních parametrů vyhodnocení obrobiteľnosti slitin hliníku je pak tvar třísky. Obrobiteľnost hliníkových slitin závisí především na jejich chemickém složení, způsobu zpracování polotovaru – zda je polotovar vyroben tažením, kováním, nebo je odléván. Z legur zlepšuje obrobiteľnost měď (Cu), hořčík (Mg), mangan (Mn), zinek (Zn), chrom (Cr), naopak ji zhoršuje křemík (Si) [2, 13].

Podle chemického složení lze slitiny hliníku z hlediska stupně obrobiteľnosti rozdělit do tří skupin. Do první skupiny nejlépe obrobiteľných materiálů patří slitiny: duraly – Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg dále pak superduraly: Al-Cu-Zn-Mn. Díky malému obsahu prvků jako olovo (Pb) či vizmut (Bi), se zlepšují podmínky pro vznik drobné lámavé třísky. Vzhledem k čím dál tím více diskutované otázce ekologie, je kladena pozornost na výrobu slitin neobsahujících olovo, které je obvykle nahrazováno cínem (Sn) [2, 13].

Druhou skupinou materiálů jsou obrobiteľné slitiny hliníku: Al-Si, Al-Si-Cu (Si < 5 %). U nevytvrditelných slitin se tvoří dlouhá spojitá tříska, kterou je nutné z místa řezu vhodně odstraňovat [2, 13].

Jako poslední se uvádí skupina těžko obrobiteľných slitin: Al-Si (až 12 %), slitiny s příměsí niklu (Ni), železa (Fe), manganu (Mn), kobaltu (Co), mědi (Cu), hořčíku (Mg). Slitiny, které mají jako hlavní legující prvek křemík, je nezbytné obrábět při nižších rezných rychlostech a posuvech. S rostoucími reznými podmínkami klesá drsnost obrobeného povrchu. Při jeho větším obsahu roste opotřebení rezného nástroje, což se projevuje hlavně u nadeutektických slitin s hrubými částicemi křemíku. U eutektických slitin se tvoří dlouhé slinuté třísky, které se od nástrojů velmi obtížně odstraňují [2, 13].

2 TEORETICKÝ ROZBOR TVORBY TŘÍSKY PŘI FRÉZOVÁNÍ

Frézování je univerzální metoda obrábění, kdy výroba dané součásti představuje vykonání cesty z výchozího bodu (hrubý obrobek) do bodu finálního (dokončený obrobek), s důrazem na maximální efektivitu při nejvyšší možné hospodárnosti celé operace. Tento vytyčený cíl je možné dosáhnout ideální kombinací dráhy nástroje a volbou vhodné technologie – výběr nástroje, řezné podmínky, metoda frézování. Největší výhody frézování představují: vysoký výkon obrábění, výtečná jakost obrobenej plochy, flexibilita při obrábění tvarově složitých obrobků a rozměrová přesnost [19, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Technologie frézování je založena na dvou, na sobě vázaných pohybech: rotačním pohybu vícebřitého řezného nástroje (frézy) a posuvném pohybu obrobku. Podle směru pohybů rozlišujeme tři základní druhy frézování. Prvním z nich je rovinné frézování čelní frézou, kdy jsou do obráběcího procesu zapojeny břity umístěné po obvodu frézy, za podpory vedlejších břitů čelních. Obráběcí nástroj rotuje v rovině kolmé na obráběnou plochu. Další variantou je rovinné frézování válcovou frézou. V některých operacích pracují frézy s posuvem axiálním (posuv ve směru osy nástroje). V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování sousledné (souměrné) a nesousledné (protisměrné, nesouměrné). Z technologického hlediska je preferováno frézování sousledné [19, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

2.1 Mechanismus tvorby třísky

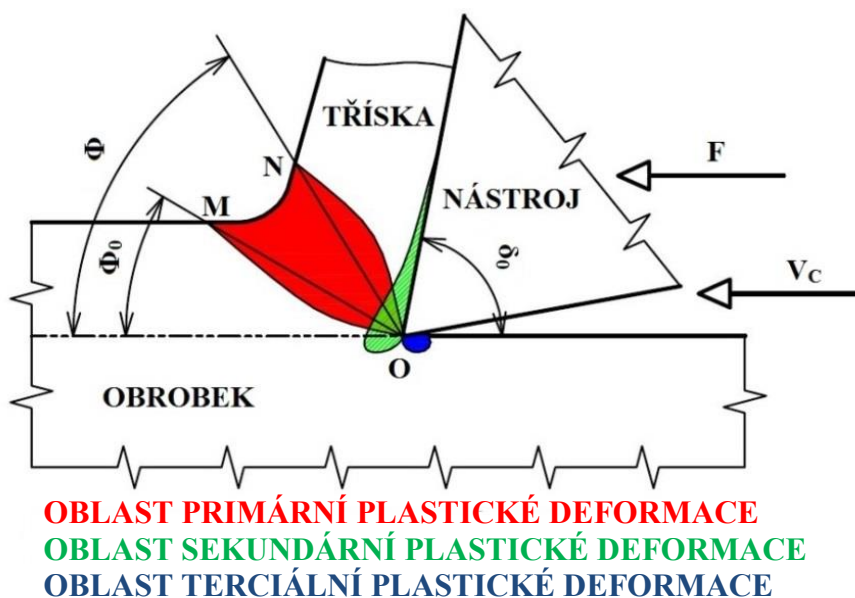
Proces utváření třísky vychází ze zatěžování řezného nástroje a v první řadě je procesem intenzivní plastické deformace podél smykové roviny – roviny maximálních smykových napětí. Obráběný materiál prochází při tvorbě třísky třemi mezními stavy – pružné napjatosti, plastické deformace a oddělení částic materiálu formou lomového porušení. Oblast materiálu, ve které dochází účinkem řezného nástroje k jeho přetváření na třísku, nazýváme kořenem třísky, který je uveden na obrázku 10. Na obrázku jsou dobře vidět jednotlivé segmenty třísky, které vznikají při napětí vyšším, než je stříhová mez pevnosti obráběného materiálu [13, 14, 19, 27, 28].



Obr. 10 Kořen třísky [14].

Pohyb materiálu je vyvolán tečným napětím působícím ve smykové rovině. Toto napětí narůstá do takové míry, až dojde k plastické deformaci materiálu před břitem nástroje (jedná se o posuv jednotlivých vrstev oddělovaného materiálu v kluzných rovinách pod úhlem střížné roviny Φ). Plastickou deformaci doprovází i stavy napjatosti v povrchových vrstvách jak oddělovaného materiálu, tak i materiálu obráběného. Jelikož deformační proces probíhá za zvýšených teplot, bývá průvodní jev komplikován rekrytalizací obráběného kovu. V povrchových vrstvách dochází ke zpevňování materiálu, ale naopak vlivem rekrytalizace se snižují stavy napjatosti. V průběhu tohoto procesu se uplatňují některé zákony. Prvním z nich je zákon stálosti objemu (změny objemu rekrytalizací jsou zanedbatelné). Dále zákon nejmenšího odporu a zákon maximálního smykového napětí – plastická deformace nastává až při překonání maximálního smykového napětí. Mechanismus tvorby třísky probíhá dvěma základními způsoby. Odtržením – křehkým lomem v polykrystalu a odstřížením – tvárným lomem v oblasti, kde převládají smyková napětí [13, 14, 19, 27, 28].

Vlivem deformačních procesů dochází ke zpevňování povrchové vrstvy materiálu (změna tvrdosti). Dále ke změnám napjatosti v povrchových vrstvách obrobku – důsledkem je zbytkové pnutí. Zbytkové pnutí závisí zejména na velikosti řezné rychlosti. Při malých řezných rychlostech se v povrchové vrstvě nachází tlaková napětí. Tato tlaková napětí souvisejí se zpevňováním. Naopak při velkých řezných rychlostech vzniká v povrchových vrstvách vlivem ohřátí a ochlazení materiálu tahové napětí. To může vést až k nežádoucímu popraskání povrchu materiálu. Oblast plastické deformace při vzniku třísky je rozdělena na tři jednotlivé oblasti, jak je vyobrazeno na obr. 11 [13, 14, 19, 27, 28].



Obr. 11 Oblasti plastické deformace [14, 28].

- **Oblast primární plastická deformace**

Jedná se o oblast ohraničenou body MNO. Křivka MO značí počátek plastické deformace a NO představuje konec plastické deformace. Velikost oblasti primární plastické

deformace je nejvíce ovlivňována velikostí řezné rychlosti a to tak, že s jejím zvyšováním dochází k zužování oblasti MNO. Při vyšších řezných rychlostech obráběním slinutými karbidy dochází ke spojení oblasti MNO v přímku. Všeobecně s vyšším úhlem střížné roviny (Φ) je štíhlejší tříska, obráběcí proces je energeticky méně náročný, povrchové a podpovrchové vrstvy materiálu jsou méně ovlivněny. Dále velikost této oblasti ovlivňují např. geometrie řezného nástroje, teplota procesu, řezné prostředí (chlazení – vzduch, procesní kapalina) a fyzikální vlastnosti obráběného materiálu – pevnost, tvrdost. Zvyšováním pevnosti a tvrdosti se oblast MNO zmenšuje [13, 14, 19, 27, 28].

- **Oblast sekundární plastické deformace**

Jde o oblast v povrchových vrstvách styčné plochy třísky s čelem nástroje. Při styku oddělovaného materiálu s čelem řezného nástroje dochází vlivem vysokých tlaků a teplot k zbrzdění částic materiálu přilehlých k čelu a k pohybu materiálu ve směru čela, což má za následek vytváření váznoucích vrstev materiálu, které se pohybují sníženou rychlostí ve směru roviny čela. Tato váznoucí vrstva se nazývá nárůstek a je důsledkem sekundární plastické deformace. Velikost tvorby nárůstku závisí na řezných podmínkách, především na řezné rychlosti. Váznoucí vrstva se cyklicky odtrhává. Tato oblast zasahuje i pod rovinu oddělování třísky, což má za následek stopy nárůstku na obrobeném povrchu [13, 14, 19, 27, 28].

- **Oblast terciální plastické deformace**

Tato oblast zahrnuje tření nástroje o obrobený povrch součásti a má vliv na výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Vlivem primární a terciální plastické deformace dochází ke zpevňování povrchové vrstvy obrobku. Materiál může dosáhnout až trojnásobku tvrdosti původního materiálu. Terciální plastická deformace toto zpevnění povrchové vrstvy obráběného materiálu ovlivňuje třením odpruženého materiálu o rovinu hřbetu nástroje [13, 14, 19, 27, 28].

2.1.1 Silové poměry a vztahy v oblasti utváření třísky

Pro popsání procesu řezání, jako procesu plastické deformace, se nejčastěji využívá model pravoúhlého ortogonálního řezání, kdy je ostří kolmé na směr řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině. Silovou výslednici F lze rozložit do složek na následující síly dle vztahu 2, 3 a 4. Pomocí dynamometru se přímo změří složky F_c a F_f , ze kterých se následně vychází při výpočtu sil a napětí [13, 28, 29].

Řezná a posuvová síla [13]:

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{F}_f \quad [\text{N}]. \quad (2)$$

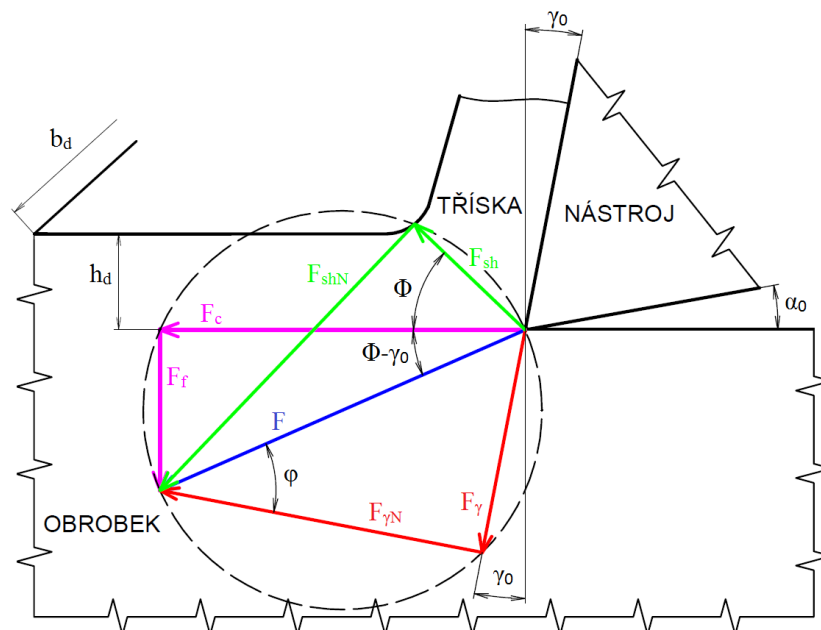
Tečná a normálová síla působící v rovině maximálních, smykových napětí [13]:

$$\vec{F} = \vec{F}_{sh} + \vec{F}_{shN} \quad [\text{N}]. \quad (3)$$

Tečná a normálová síla působící na čele nástroje [13]:

$$\vec{F} = \vec{F}_\gamma + \vec{F}_{\gamma N} \quad [\text{N}]. \quad (4)$$

Po vynesení všech složek sil v místě nástroje, vznikne diagram řezných sil (viz obr. 12).



Obr. 12 Rozklad sil při ortogonálním obrábění [13, 29].

Síly působící v tečném a normálovém směru k rovině maximálních smykových napětí je možné určit ze vztahu 5 a 6 [13, 28, 29]:

$$F_{sh} = F_c \cdot \cos \phi - F_f \cdot \sin \phi \quad [\text{N}], \quad (5)$$

$$F_{shN} = F_c \cdot \sin \phi + F_f \cdot \cos \phi \quad [\text{N}]. \quad (6)$$

Obdobě se určí i síly působící na čele řezného nástroje, které ovlivňují napjatost, deformaci nástroje a lze pomocí nich popsat i tribologii rozhraní tříska – nástroj [13, 29]:

$$F_\gamma = F_c \cdot \sin \gamma_0 + F_f \cdot \cos \gamma_0 \quad [\text{N}], \quad (7)$$

$$F_{\gamma N} = F_c \cdot \cos \gamma_0 - F_f \cdot \sin \gamma_0 \quad [\text{N}]. \quad (8)$$

Z výše uvedených vztahů lze určit součinitel tření na čele nástroje (vztah 9) [13, 29]:

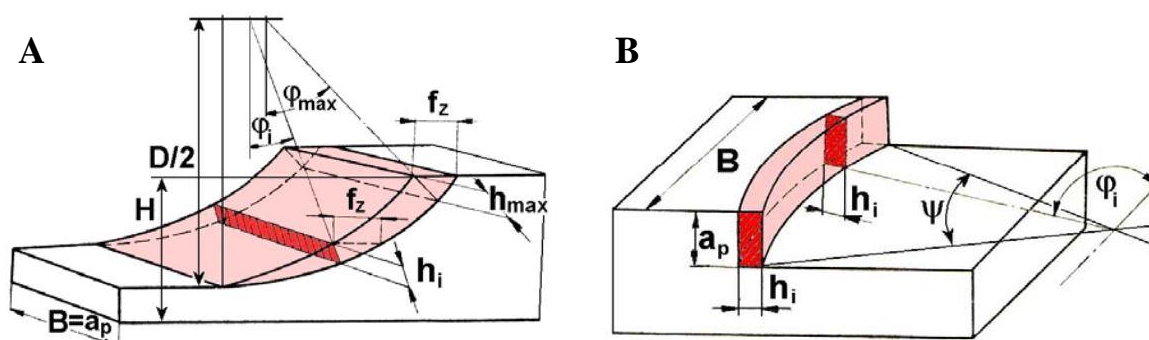
$$\mu = \operatorname{tg} \varphi = \frac{F_\gamma}{F_{\gamma N}} = \frac{F_c \cdot \sin \gamma_0 + F_f \cdot \cos \gamma_0}{F_c \cdot \cos \gamma_0 - F_f \cdot \sin \gamma_0} = \frac{F_f + F_c \cdot \operatorname{tg} \gamma_0}{F_c - F_f \cdot \operatorname{tg} \gamma_0} \quad [-]. \quad (9)$$

Tření materiálu obrobku o čelo řezného nástroje je nejdůležitějším činitelem ovlivňující vznik nárůstku. Tvorba nárůstku probíhá nejčastěji v rozmezí řezné rychlosti $v_c = 30$ až $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Nárůstek má vyšší tvrdost a pevnost než výchozí materiál. Vzhledem ke svým vlastnostem může nárůstek chránit břit nástroje před opotřebením. Ale ve většině případů jsou jeho projevy nežádoucí – mění geometrii nástroje, mění rozměry obrobku, zhoršuje strukturu obrobené plochy, způsobuje samobuzené kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek [13, 14, 28, 29].

2.2 Rozbor průřezu třísky, řezných sil a činitelé ovlivňující jejich velikost

Při frézování vícebřitým řezným nástrojem je nutné věnovat velkou pozornost utváření třísky. Za účelem docílení uspokojivého výkonu obrábění a trvanlivosti nástroje je nezbytné určit hodnotu tloušťky jednotlivé třísky. Tloušťka třísky je dominantním faktorem pro opotřebení nástroje, životnost nástroje, řezné síly, teplotu frézování, utváření třísky a jejich odvod. Průměrná tloušťka třísky by neměla dosahovat minimálních hodnot a ani by neměla být v rámci hodnot maximálních, platných pro danou frézu. Jestliže je tloušťka třísky příliš silná, velmi často dochází k vylamování nebo popraskání ostří kvůli velkému zatížení. Je-li tomu přesně naopak – příliš malá tloušťka třísky, enormně se tím snižuje životnost nástroje. Je to způsobeno vysokým třením, čímž se v oblasti řezu generuje velké teplo. Z toho vyplývá, že správné nastavení tloušťky třísky je pro frézování zcela zásadní [13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32].

Při určování průřezu třísky při frézování je třeba respektovat jeho specifické zvláštnosti – většinou je v záběru několik břitů frézy, jedná se o periodicky přerušovaný záběr a průřez třísky spolu se silovým zatížením není konstantní [13, 14].



Obr. 13 Průřez třísky při frézování: A) válcovém, B) čelním [14].

Jmenovitá tloušťka třísky (h_i) v kterékoli fázi jejího odřezávání je vyjádřena vztahem 10 [14]:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}], \quad (10)$$

kde: f_z [mm] – posuv na zub,
 φ_i [°] – úhel posuvového pohybu.

Pro danou polohu zubu frézy i se jmenovitý průřez třísky označuje A_{Di} a vyjadřuje se vztahem 11, na základě poměrů na výše uvedeném obrázku 13 [14]:

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2]. \quad (11)$$

U rovinného frézování čelní frézou se tloušťka třísky mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu (φ_i) a navíc je ovlivněna úhlem nastavení hlavního ostří (κ_r) [14]:

$$h_i = f(\varphi_i, \kappa_r) = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}]. \quad (12)$$

Jmenovitá šířka třísky (b) se vypočítá podle následujícího vztahu 13 [14]:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}]. \quad (13)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} pro $\kappa_f = 90^\circ$ [14]:

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2]. \quad (14)$$

Maximální hodnota jmenovitého průřezu třísky je při $\varphi_i = 90^\circ$ [14]:

$$A_{Dmax} = a_p \cdot f_z \quad [\text{mm}^2]. \quad (15)$$

Celková řezná síla, která působí na frézu je dána vztahem [14]:

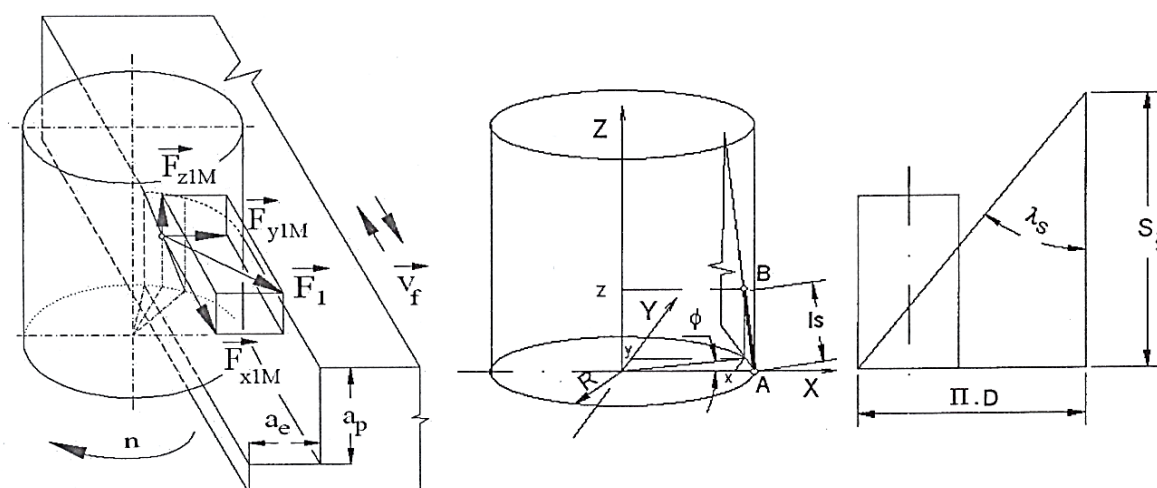
$$F_c = \sum_{i=1}^{z_z} A_{Di} \cdot kc_i \quad [\text{N}], \quad (16)$$

kde: z_z [-] – počet zubů frézy v záběru,

kc_i [MPa] – měrná řezná síla (měrný řezný odpor).

2.2.1 Válcové frézování

V případě frézování válcovou frézou (např. stopkovou frézou) obrábí materiál obrobku břity umístěné na obvodu frézy. Nástroj rotuje kolem osy otáčení, která leží v rovině rovnoběžné s obráběnou plochou. Při stanovení plochy průřezu třísky pro každý zub frézy a jeho úhel záběru (φ) se vychází z modelu šroubového konoidu - obr. 14 [13, 19].



Obr. 14 Silové zatížení zubu frézy při válcovém frézování [13].

Průřez třísky se v každém bodu mění a v souvislosti s časovou změnou se průběžně mění i celkové silové zatížení zubu frézy. Poloha bodu B z Obr. 14, je ve všech souřadných směrech určena následujícími rovnicemi [13]:

$$\begin{aligned}x &= R \cdot \cos \varphi \quad [\text{mm}], \\y &= R \cdot \sin \varphi \quad [\text{mm}], \\z &= \frac{S_{\text{š}}}{2\pi} \cdot \varphi \quad [\text{mm}].\end{aligned}\tag{17}$$

Rovnice 18 určuje hodnotu elementu délky ostří (dl_s) ve tvaru šroubovice [13]:

$$\begin{aligned}dl_s &= \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = \\&= \sqrt{R^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot d^2 \varphi + R^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot d^2 \varphi + \left(\frac{S_{\text{š}}}{2\pi}\right)^2 \cdot d^2 \varphi} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{S_{\text{š}}}{2\pi}\right)^2} \cdot d\varphi \quad [\text{mm}].\end{aligned}\tag{18}$$

Element průřezu třísky se určí součinem elementu délky ostří (dl_s) a tloušťky třísky ($h\varphi$) pro úhel φ [13]:

$$dA_D = dl_s \cdot h\varphi \quad [\text{mm}^2].\tag{19}$$

Po integraci pro rozsah záběru bříty v rozmezí úhlů $\varphi_1 - \varphi_2$ [13]:

$$\begin{aligned}A_D &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} dA_D = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{S_{\text{š}}}{2\pi}\right)^2} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \Rightarrow \\A_D &= f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{S_{\text{š}}}{2\pi}\right)^2} \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad [\text{mm}^2].\end{aligned}\tag{20}$$

Vztah pro elementární řeznou sílu odpovídající tloušťce třísky (h), při známém průběhu měrné řezné síly (k_c) jako funkce vlastností materiálu a tloušťky třísky [13, 14]:

$$dF_c(h) = dA_D \cdot k_c = dA_D \cdot \frac{k_{c1}}{h^{mc}} = dA_D \cdot \frac{k_{c1}}{(f_z \cdot \sin \varphi)^{mc}} \quad [\text{N}],\tag{21}$$

kde: k_{c1} [-] – konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu,

mc [-] – exponent vlivu tloušťky třísky h ,

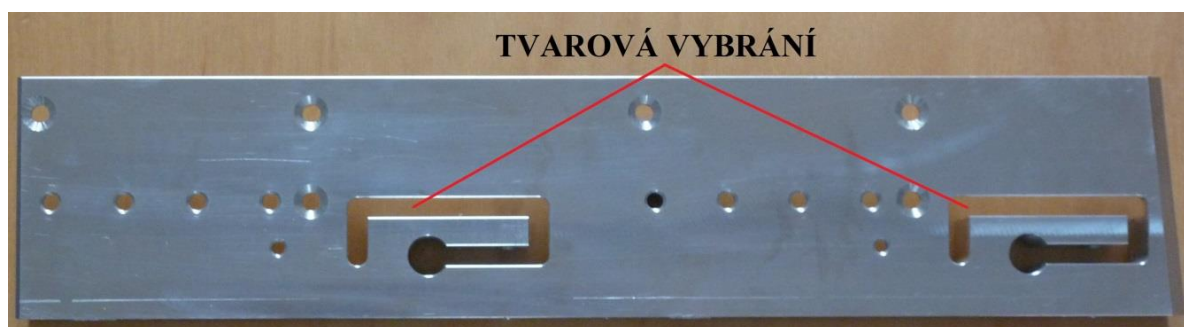
Řezná síla je následně vyjádřena vztahem 22 [13]:

$$\begin{aligned}F_c &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} dF_c = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{R^2 + \left(\frac{S_{\text{š}}}{2\pi}\right)^2} \cdot k_{c1} \cdot f_z^{1-mc} \cdot \sin \varphi^{1-mc} \cdot d\varphi \Rightarrow \\F_c &= c_0 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi^{1-mc} \cdot d\varphi \quad [\text{N}].\end{aligned}\tag{22}$$

Z uvedených vzorců je zřejmé, že silové zatížení nástroje během řezu je velmi ovlivňováno úhlem opásání frézy s obrobkem φ (úhel záběru). K jeho enormnímu zvýšení dochází

zejména při frézování rohů a drážek. Při drážkovém frézování obklopuje materiál obrobku polovinu frézovacího nástroje, úhel záběru hlavního ostří odpovídá 100 % průměru nástroje. Jednotlivé břity jsou v záběru celou polovinu času obrábění, čímž značně narůstá teplota v místě řezu a celkové silové namáhání frézy. Často dochází ke ztrátě stability procesu obrábění a ke vzniku vibrací. Výkyvy řezné síly často vedou ke zvyšování rizika vylamování břitů nebo lomu nástroje [19, 21, 23, 25, 26, 32, 33, 34].

Základními dvěma způsoby, jak zmenšit úhel opásání a dosáhnout tak snížení tendence k vibracím vlivem kolísání řezných sil, je zvětšení poloměru rohu na hodnotu větší, než ve výkresové dokumentaci nebo použít frézu o menším průměru. První varianta je výhodná zejména při hrubovacích operacích, kdy větší poloměr umožňuje aplikaci frézy o větším průměru. Druhou variantou je výroba daného poloměru nástrojem s menším průměrem, kdy dochází ke zmenšení úhlu opásání nástroje s obrobkem (ϕ). Tato strategie se mnohdy používá pro dokončovací obrábění. Toto řešení je použito také při výrobě dvou tvarových vybrání $\phi = 5$ mm do hloubky 25 mm (obr. 15), kde byla z důvodu menšího úhlu opásání nástroje a většího využití metody VoluMill použita fréza $\phi 4$ mm místo původního nástroje $\phi 4,5$ mm [34].

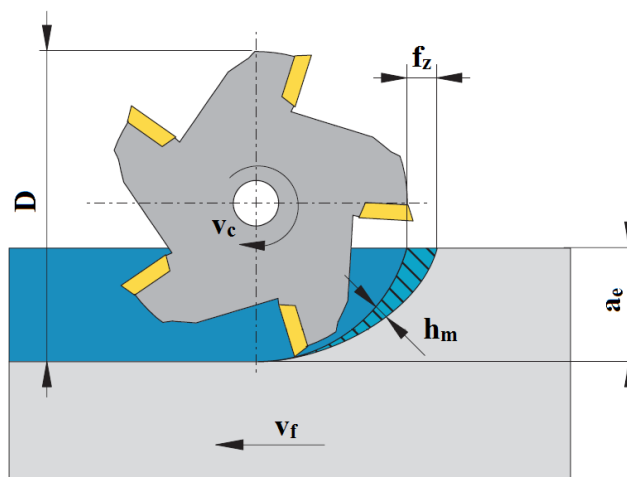


Obr. 15 Frézování tvarových vybrání.

Tloušťka třísky vytvářené během frézování se neustále mění podél dráhy ostří v obrobku a stanovuje se velmi obtížně. Z tohoto důvodu je z mnoha hledisek vhodnější pracovat se střední tloušťkou třísky (h_m) [13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32].

2.2.2 Střední tloušťka třísky h_m

Střední tloušťka třísky je definována jako tloušťka teoretické třísky obdélníkového průřezu (se stálou tloušťkou), jejíž objem je stejný jako skutečný objem odebraného materiálu při konkrétním záběru ostří do obrobku a k jejímuž odebrání je potřeba stejná řezná síla, jako u třísky skutečné. Její velikost se počítá pro dosažení příznivého průběhu obrábění vzhledem k optimální tloušťce třísky zejména u obvodového frézování válcovou frézou. Dále slouží pro zajištění řezivosti nástroje, frézování bez vibrací a bez zahřívání nástroje, potažmo obrobku. Výrobci nástrojů udávají hodnoty střední tloušťky třísky pro specifické geometrie nástroje, při kterých je dosahováno nejvyšší produktivity a životnosti nástroje. Z technologického hlediska musí fréza dobře odebírat materiál se správnou střední tloušťkou třísky – s korektní hodnotou posuvu na zub [13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32].



Obr. 16 Faktory ovlivňující střední tloušťku třísky [35].

Určujícími faktory střední tloušťky třísky jsou: velikost posuvu na zub (f_z), poloha frézy, radiální hloubka řezu (a_e), úhel nastavení hlavního ostří (κ_r) a průměr frézy (D), jak lze vidět na obr. 16. Průměr frézy je určujícím faktorem, protože ovlivňuje úhel styku břitu frézy (φ) s obrobkem. Čím menší tento úhel je, tím více je osa frézy vzdálena od samotného místa obrábění a tím tenčí je také třísky. Konkrétní výsledky výpočtů mají za úkol určit určitou minimální hodnotu střední tloušťky třísky. Každému typu frézy pak odpovídají hodnoty, ze kterých se vychází při stanovení velikosti posuvu na zub [13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32].

Rovnice střední tloušťky třísky pro rovinné frézování válcovou frézou [19]:

$$h_m = f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D}} \quad [\text{mm}]. \quad (23)$$

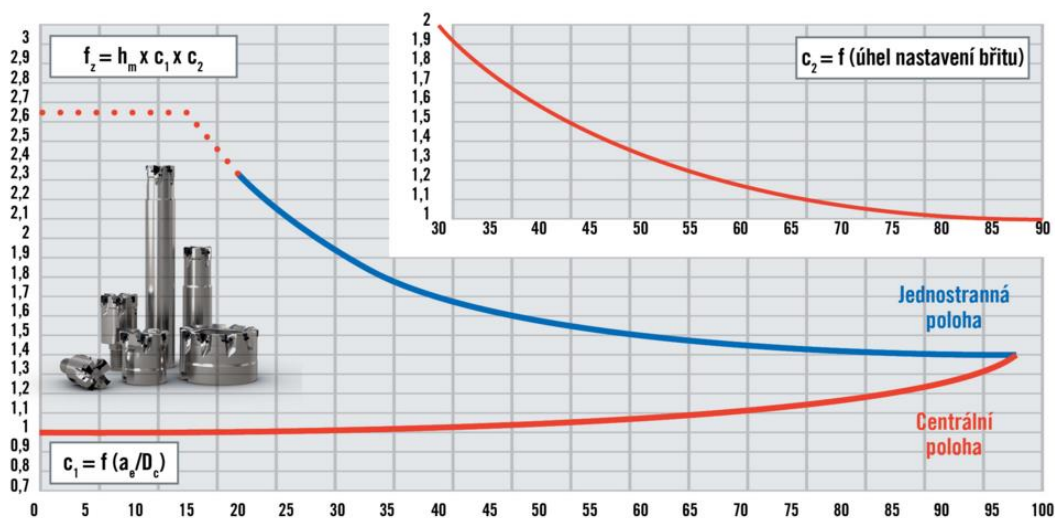
Rovnice střední tloušťky třísky pro rovinné frézování čelní frézou [19]:

$$h_m = \frac{\sin \kappa_r \cdot 180 \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arcsin\left(\frac{a_e}{D}\right)} \quad [\text{mm}]. \quad (24)$$

S malým poměrem mezi a_e/D bude střední tloušťka třísky pro daný posuv na zub malá, zatímco pokud tento poměr bude větší, bude se zvětšovat i střední tloušťka třísky. Z čehož plyne základní princip v technologii frézování, který říká, že malý poměr a_e/D umožňuje zvětšit hodnoty posuvu na zub (f_z). Což lze interpretovat také následujícím způsobem. Čím větší je radiální záběr frézy (poměr a_e/D), tím menší bude posuv potřebný pro vytváření požadované tloušťky třísky. Stejně tak musí být pro dosažení stejné tloušťky třísky při menším záběru frézy použit vyšší posuv [13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32].

Dále je střední tloušťka třísky ovlivňován úhlem nastavení hlavního ostří (κ_r). Při úhlu nastavení $\kappa_r = 90^\circ$ vzniká maximální tloušťka třísky. Z čehož vyplývá, že menší úhly vyžadují vyšší posuv, aby bylo dosaženo stejné tloušťky třísky. V neposlední řadě hraje důležitou roli také poloha frézy. Střední tloušťka třísky se pro daný posuv na zub zvětšuje s blížící se polohou frézy ke středovému frézování. Z toho můžeme odvodit druhou

závislost – stranová poloha obráběcího nástroje umožňuje využití větší hodnoty posuvů. Graficky jsou výše uvedené závislosti zobrazeny na obrázku 17 [13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32].



Obr. 17 Závislost střední tloušťky třísky na úhlu nastavení a poloze frézy [32].

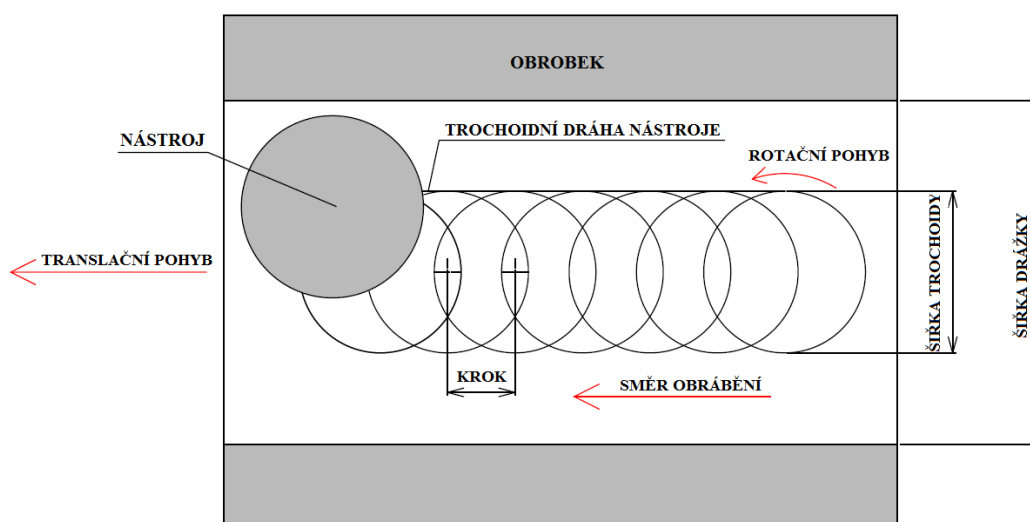
Pro výpočet střední tloušťky třísky plynou určitá doporučení. Střední tloušťka třísky by měla přibližně odpovídat velikosti posuvu na zub a to vzhledem k typu frézy, úhlu nastavení hlavního ostří a obráběnému materiálu. Dále by maximální tloušťka třísky měla být zkontrolována společně s úhlem nastavení hlavního ostří (κ_r), za účelem zaručení správného záběru nástroje, a aby se zamezilo přetěžování břitu frézy. V případě příliš tenké třísky dochází k současnému řezání a dření, které je doprovázeno enormním ohřevem a rychlým opotřebením hřbetu nástroje [13, 14, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 32].

3 REŠERŠE CAM SYSTÉMŮ ZALOŽENÝCH NA STŘEDNÍ TLOUŠŤCE TRÍSKY PŘI HRUBOVACÍM TROCHOIDNÍM FRÉZOVÁNÍ

Pokrok v řízení obráběcích strojů a CAM software umožňuje využití nových technologií obrábění, jako je například trochoidní frézování. Dále tyto systémy nabízí moduly pro udržení konstantního záběru obráběcího nástroje – Dynamic Milling, Adaptive Clearing či VoluMill. S nástupem CNC systémů pro řízení obráběcích strojů a s ním spojeným rozmachem CAM systémů, je třeba se zabývat i novou problematikou, kterou je volba strategie obrábění. To znamená generování dráhy nástroje, optimalizovanou pro danou operaci obrábění za účelem co nejefektivnějšího obrobení součásti. Cílem všeho je pochopení vzájemného působení řezného nástroje, obrobku a omezení střídavého namáhání, které vzniká při procesu frézování. Což umožní dosáhnout požadovaných cílů při obrábění – maximální produktivita, kvalita a životnost řezného nástroje [25, 32, 36].

3.1 Trochoidní frézování

S nástupem vysoce dynamických CNC obráběcích strojů, dochází ke vzniku nových strategií frézování, které splňují nároky na vysokorychlostní frézovací proces. Patří mezi ně trochoidní dráha nástroje, primárně vyvinuta pro hrubovací procesy obrábění. Jedná se o velmi efektivní metodu drážkování a frézování kapes. Trochoida je geometrická křivka, která je tvořena bodem na kruhu, který rotuje a jehož střed se zároveň pohybuje – kombinace rotačního a translačního pohybu nástroje, viz obr. 18 [37, 38, 39, 40, 41].



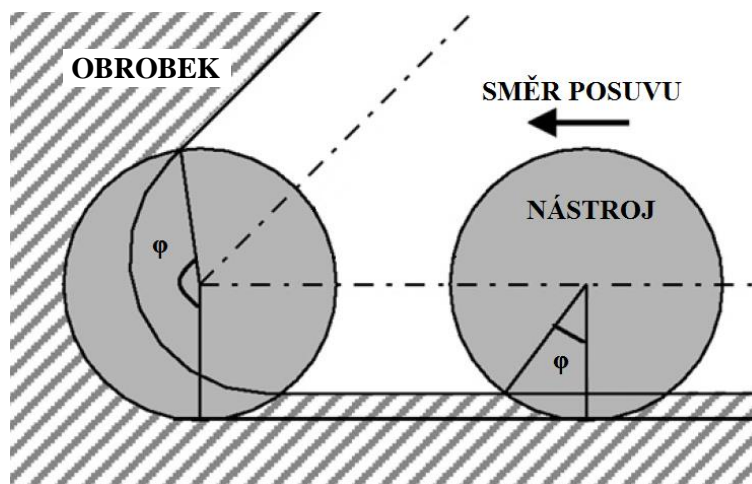
Obr. 18 Schéma trochoidního frézování pomocí kruhového modelu [38].

Výsledkem je kontinuální trajektorie, která vytváří příznivé podmínky pro frézování, z hlediska zatížení nástroje. Nicméně, délka dráhy nástroje je ve srovnání se standardním postupem mnohem delší, čímž dochází k nárůstu strojního času. Je to dáno tím, že velká část dráhy nástroje probíhá mimo záběr, kdy fréza neodebírá materiál obrobku. Tato trochoidní frézovací strategie je aplikována nejnovějšími CAM software - MasterCAM od

CNC Software, Inc., Catia V5 od Dassault Systemes a také např. GibbsCAM s nadstavbou VoluMill od Celeritive Technologies, Inc [37, 38, 39, 40, 41].

Hlavním způsobem zabránění kolísání řezných sil na libovolné dráze nástroje je přizpůsobování rychlosti posuvu. Modely založené na plánování posuvu, kdy simulátor předpovídá řezné síly podél dané dráhy nástroje a optimalizuje rychlost posuvu, se začaly zkoumat již od roku 1960. I když plánování rychlosti posuvu je účinné pro regulaci řezných sil na hladkých drahách nástroje, nezabrání požadovanému snížení řezných sil v rozích obrobku. Navíc delší kontakt nástroje s obrobkem v rohu zvyšuje teplotu nástroje a dochází ke zkrácení jeho životnosti, i když je řezná síla regulována posuvem [37, 38, 39, 40, 41].

V případech, kdy jsou drážky frézovány podle tohoto principu, lze řídit a upravovat radiální hloubku řezu. A tak je pod kontrolou i úhel opásání nástroje (úhel styku frézy s obrobkem φ) a lze použít strategii malého úhlu záběru, čímž dochází ke snížení řezných sil, eliminaci vibrací a k prodloužení životnosti řezného nástroje. Grafické znázornění úhlu záběru nástroje v závislosti na geometrii dráhy nástroje u dvojrozměrného (2D) obrábění je patrné z obrázku 19 [37, 38, 39, 40, 41].



Obr. 19 Úhel opásání frézy [37].

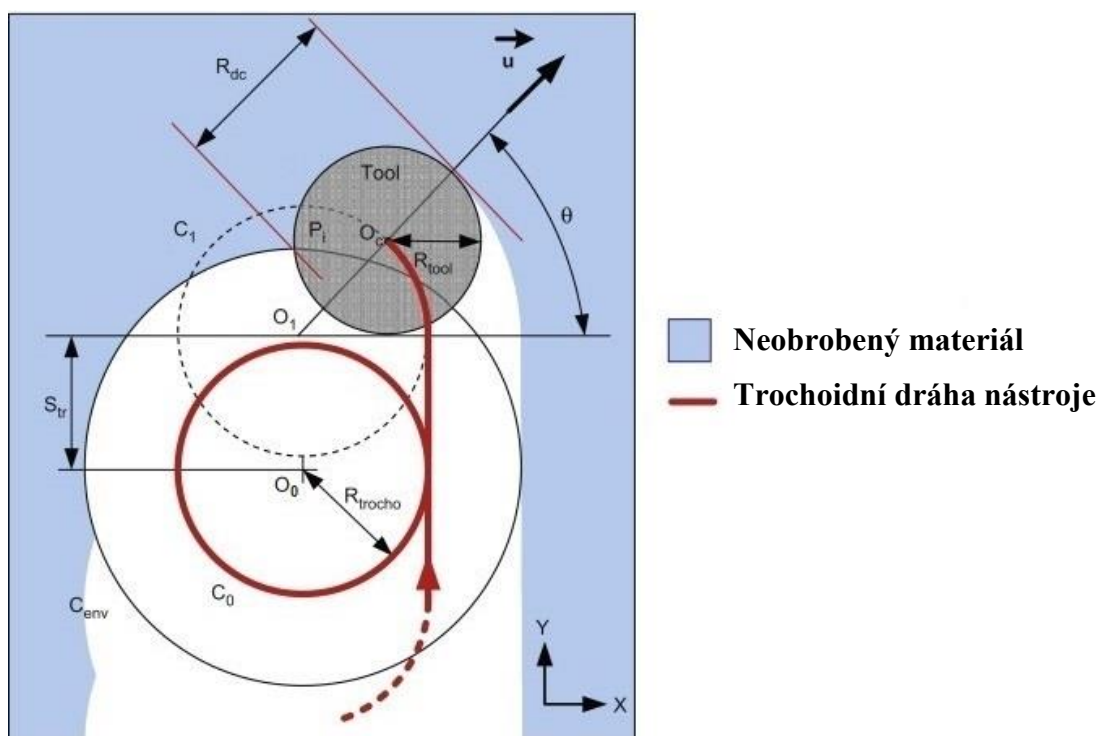
Je tedy zřejmé, že úhel opásání je jedním z dominantních procesních parametrů, které určují zatížení nástroje během řezu. Fréza není v kontaktu s obrobkem po takovou dobu, jako v případě běžných způsobů výroby drážek, má čas se chladit a nedochází k enormnímu vzniku tepla. Obrázek 19 také znázorňuje náhlé zvýšení úhlu záběru v ostrém rohu. Trochoidní frézování v sobě ideálně kombinuje parametry řezných podmínek a dráhy nástroje, což zaručuje vysokou efektivitu procesu obrábění [37, 38, 39, 40, 41].

Mezi hlavní výhody trochoidní dráhy nástroje se řadí možnost výroby drážek, jejichž šířka je větší než vlastní průměr frézy. Díky tomu, že při hrubovacích operacích tato technologie využívá relativně velké axiální hloubky řezu (až $2,5xD$), zatímco radiální hloubky řezu jsou obvykle menší než při standardním frézování, lze použít nástroje s malou zubovou roztečí. To umožňuje zvýšení rychlosti posuvu a řezné rychlosti v porovnání s běžnými aplikacemi. Čímž může být příznivě zvýšena celková produktivita operace. Vzhledem

k celkovému menšímu silovému namáhání, zatěžují naprogramované frézovací strategie mnohem méně obráběcí stroj. Také jsou kladeny nižší nároky na upínání obrobku i nástroje, a je zde menší riziko vzniku vibrací [37, 38, 39, 40, 41].

Hlavním účelem trochoidní strategie je vytvoření dráhy nástroje, která se vyhne velkému opásání nástroje při zachování maximální radiální hloubky řezu (a_e). Jedním ze způsobů splnění těchto kritérií je navržení geometrického modelu, který předpovídá maximální radiální hloubku řezu pro zadané základní hodnoty trochoidní dráhy nástroje, kterými jsou poloměr trochoidy – R_{troch} , krok trochoidy – S_{tr} a úhel trochoidy – θ [38, 40].

Výpočet maximální hodnoty a_e může být založen na dvou základních modelech s trochoidní dráhou nástroje - kruhového modelu a trochoidního modelu. U kruhového modelu je dráha nástroje modelována jako dva po sobě následující kruhy, které jsou spojeny lineárním segmentem, jak je patrné z obr. 20. Tento kruhový model dosud využívá většina CAM software, protože ho lze snadno implementovat do skutečných CNC systémů. U druhého, trochoidního modelu je naprogramovaná dráha nástroje v dotyku spojitá. Tento model obsahuje složitější numerické výpočty, proto potřebuje vyšší výpočtové časy, ale poskytuje vyšší přesnost. [38, 40].



Obr. 20 Parametry popisující trochoidní dráhu nástroje [38].

První kružnice u kruhového modelu představuje předchozí otáčku definovanou kruhem C_0 , se středem O_0 a poloměrem R_{trocho} . Tvar výsledné drážky je dán pohybem nástroje podél kruhu C_0 [0,0]. Výsledkem tohoto pohybu je kruh C_{env} , jehož střed je v bodu O_0 a poloměr $R_{env} = R_{trocho} + R_{tool}$. Aktuální otáčka frézy je modelována kružnicí C_1 , jejíž střed je v bodě O_1 [0, S_{tr}] s poloměrem R_{trocho} . Středová poloha nástroje O_c je závislá na úhlu trochoidy (θ) a definována následujícími rovnicemi 25 [38, 40]:

$$\begin{aligned} X_c &= R_{trocho} \cdot \cos \theta \quad [\text{mm}], \\ Y_c &= S_{tr} + R_{trocho} \cdot \sin \theta \quad [\text{mm}]. \end{aligned} \quad (25)$$

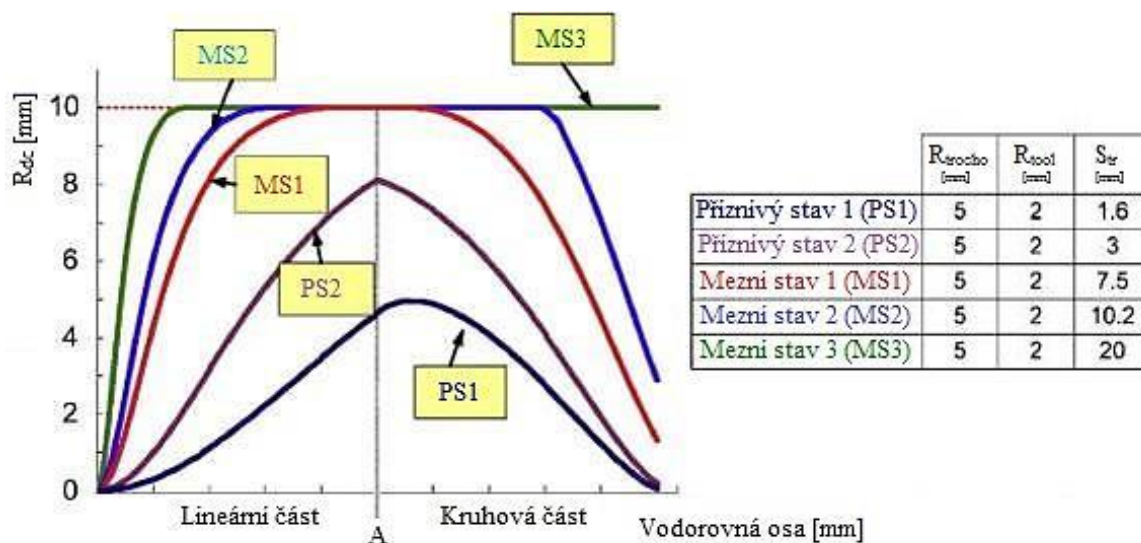
Pro výpočet radiální hloubky řezu je nutné určit bod $P_i [X_i, Y_i]$, tedy průsečík mezi C_{env} a nástrojem [38]:

$$\begin{aligned} X_i^2 + Y_i^2 &= R_{env}^2, \\ (X_i - R_{troch} \cdot \cos \theta)^2 + (Y_i - S_{tr} - R_{troch} \cdot \sin \theta)^2 &= R_{tool}^2. \end{aligned} \quad (26)$$

Dále se určí velikost radiální hloubky řezu R_{dc} [38]:

$$R_{dc} = \overline{P_i \cdot O_c} \cdot \vec{u} + R_{tool} = (X_i - X_c) \cdot \cos \theta + (Y_i - Y_c) \cdot \sin \theta + R_{tool} \quad [\text{mm}]. \quad (27)$$

Tento kruhový model umožňuje přímý výpočet radiální hloubky řezu podle hodnot R_{tool} , R_{trocho} a S_{tr} . V praxi pro daný nástroj a poloměr trochoidy existuje pět případů frézování, jak je vidět na následujícím obr. 21. Kdy tři z nich jsou mezní případy, které vedou k plnému opásání frézy a kterým je třeba se při trochoidním frézování vyhnout. Další dva případy jsou příznivé a umožňují kontrolu radiální hloubky řezu [38].

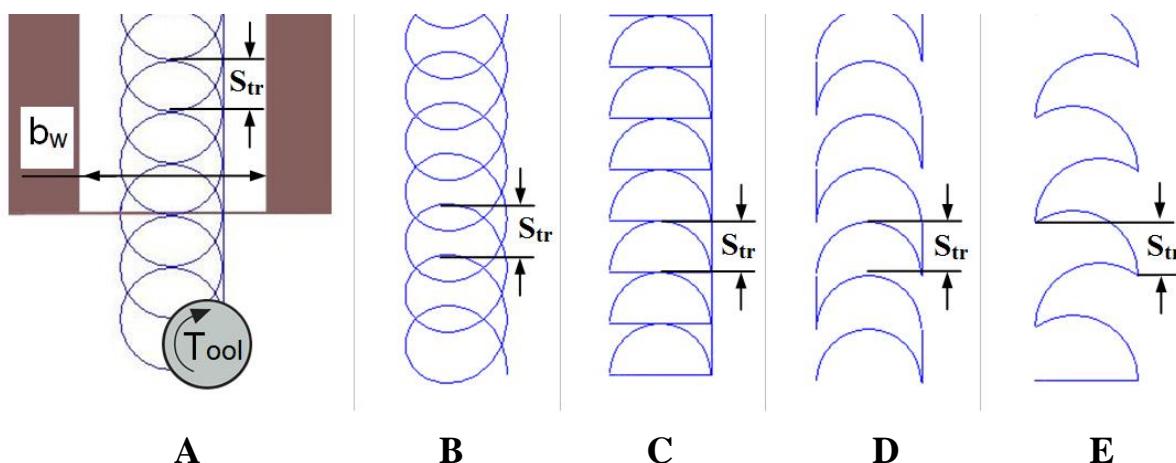


Obr. 21 Okamžitý vývoj radiální hloubky řezu při nastavení R_{tool} , R_{trocho} a S_{tr} [38].

Těchto několik příkladů zdůrazňuje, že je nutné vybrat přesné parametry dráhy nástroje s cílem zlepšení technologie frézování pomocí trochoidní strategie. Nejběžnějším případem je konfigurace PS1, kdy se radiální hloubka řezu zvyšuje průběžně na lineárním segmentu a na počátku kruhové části dosáhne maximální hodnoty. V druhém příznivém stavu PS2 se radiální hloubka řezu zvyšuje na lineární části a své maximální hodnoty dosahuje při přechodu do kruhového segmentu. Tento případ vede ke zvýšení kroku trochoidy S_{tr} pro stanovenou radiální hloubku řezu. Mezní stavy nemohou generovat opásání nástroje menší, než je průměr nástroje. V důsledku toho je maximální radiální hloubka řezu rovna průměru nástroje a koncepce trochoidního frézování zaniká [38].

3.1.1 Druhy trochoidních trajektorií

Pro naprogramování dráhy frézovacího nástroje existuje mnoho přístupů. Na následujícím obrázku 22 jsou uvedeny typy trajektorií, které mají různé vlastnosti z hlediska třískového obrábění a slouží jako základ pro následné modelování. V současné době lze strategie trochoidního frézování nalézt v mnoha moderních plánovacích a programovacích systémech, ale ve většině případů, jsou do značné míry zjednodušeny [40].



Obr. 22 Druhy trochoidních trajektorií frézy [40].

A. Trochoidní frézování s využitím modelu Catia (catmo)

Na obrázku 22A je graficky znázorněna simulace dráhy frézovacího nástroje vytvořená ve specializovaném modulu systému Catia V5R20 CAD/CAM. Pohyb nástroje je tvořen po sobě následujícími interpolacemi kruhů a lineárních čar. V první řadě je vykonána lineární interpolace po přímce, po které následuje kruhový pohyb. Tato lineární interpolace probíhá pouze po jedné straně obráběné drážky, což má za následek lepší hodnoty dosahované drsnosti povrchu právě na této straně. Na protější straně drážky se vlivem kruhové interpolace vytváří nežádoucí výstupky (malá vybrání), jejichž velikost je přímo závislá na hodnotě kroku trochoidy (S_{tr}). Výhodou této trajektorie je poměrně snadná programovatelnost [40].

B. Trochoidní frézování cykloidní (skutečná trochoidní operace)

Pohyb frézy cykloidní trajektorií je vidět na obrázku 22B. Tento druh frézovací strategie je výhodný zejména z hlediska nízkého silového namáhání nástroje. Metoda může být považována za méně produktivní, a to vzhledem k délce dráhy nástroje mimo záběr. Tyto časy, kdy nástroj neodebírá materiál obrobku, mohou při frézování dané drážky šplhat až k 50 % celkového strojního času [40].

C. Půlkruhová trajektorie frézování

Půlkruhová strategie frézování drážek (viz obr. 22C) je vhodným řešením pro zkrácení času, kdy je nástroj mimo záběr. Fréza obrábí drážku z jedné strany až do druhé po půlkružnici a zpáteční trasa je prováděna po nejkratší možné dráze - přímce. Mezi hlavní výhody této metody patří snadná programovatelnost a dobrá drsnost obrobenej plochy.

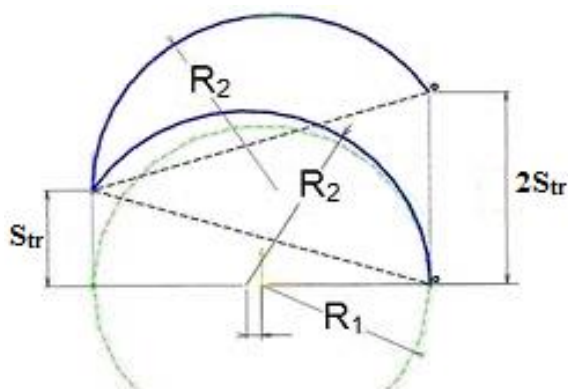
Naopak její nevýhodou je, že po skončení půlkruhu se musí provést ještě jeden krok, a proto je méně produktivní [40].

D. Kyvná trajektorie frézování

Ve srovnání s výše uvedenými strategiemi, je metoda kyvné trajektorie frézování, vyobrazena na obrázku 22D, výhodná z důvodu úplné eliminace neproduktivních časů, kdy nástroj pracuje naprázdno a neodebírání materiálu. Aplikace je přínosná zejména v případě, kdy je našim cílem zvýšení úběru materiálu daným nástrojem. Dráha nástroje je tvořena spojitou změnou interpolace, která obsahuje půlkruhy a rovné čáry. Danou trajektorii lze snadno naprogramovat a poskytuje vynikající výsledky z pohledu produktivity. Tento způsob má nevýhodu v tom, že po dokončení každého půlkruhu koná nástroj posuv vpřed (S_{tr}) a to je důvod vzniku výstupků na obou stranách frézované drážky [40].

E. Postupová kyvná trajektorie frézování (stepping-swinging)

Tato metoda byla vyvinuta výzkumným týmem Óbuda University v Budapešti – I. Szalóki – S. Csuka – S. Csesznok – S. Sipos dr. Jedná se o speciální variantu trochoidní dráhy nástroje vyvinutou za účelem dalšího zvýšení produktivity frézovacích operací. Jejím základem je kyvná trajektorie frézování uvedená v bodě D, proto se jedná o postupovou kyvnou trajektorii frézování, vyobrazenou na obrázku 22E. Nejdůležitější rozdíl je v tom, že zde neexistuje žádný mrtvý čas, jako lineární interpolace podél přímého úseku - frézovací nástroj pracuje pouze podél oblouků kruhu. Nástroj se nepohybuje podél skutečných půlkruhů, ale trajektorií je obecný oblouk s poloměrem R_2 . Tvar této obecné křivky je závislý na hodnotě kroku trochoidy, šířce drážky a průměru frézy. To zaručuje, že tangenciální kontakt bude zachován i v případě, kdy nástroj ustupuje od stěny drážky (viz obr. 23) [40].



Obr. 23 Postupová kyvná trajektorie frézování [40].

3.2 VoluMill

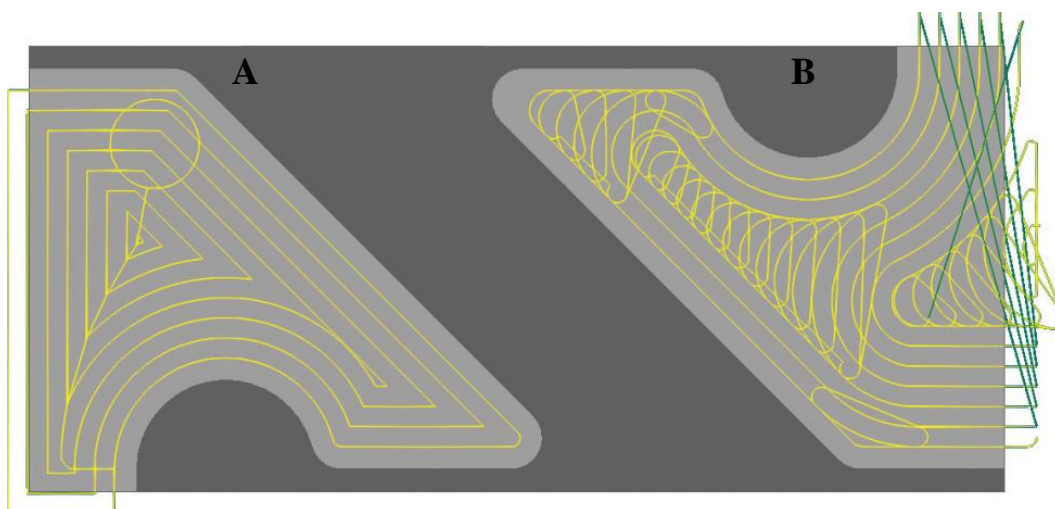
Tento výkonný modul byl vyvinut za účelem generování kontinuální vysokorychlostní dráhy řezného nástroje, což má za výsledek optimalizovaný CNC řídicí program. Výkonný algoritmus umožňuje dosáhnout a zachovat ideální podmínky obrábění při použití velkých hodnot otáček a posuvů. Program analyzuje součást a pak vygeneruje plynulou dráhu

řezného nástroje bez prudkých náhlých změn směru s nejkratším možným časem cyklu. To vše při zachování naprogramovaného množství odebíraného materiálu během časové jednotky (MRR – material removal rate – úběr materiálu v $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$). Tento program byl vyvíjen nezávisle na jakémkoliv CAM systému, a tak je možné jej využívat téměř na libovolné CAM platformě. Nicméně je úzce integrován a k dispozici jako volitelná výbava pro GibbsCAM, CAMWorks, TopSolid, nebo také Siemens NX. Dále je k dispozici také jako samostatný produkt - VoluMill NEXION, který je schopen pracovat se software jako jsou Catia, PTC Creo nebo Pro/ENGINEER [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49].

- **Vlastnosti a výhody**

VoluMill je produkt americké společnosti Celeritive Technologies, Inc. a mezi jeho zásadní přednosti patří výrazné zkrácení časů hrubovacích cyklů, což maximalizuje produktivitu obrábění. Dále mezi jeho výhody patří např. zvýšení životnosti řezného nástroje, snížení namáhání obráběcího stroje, úspory energie až 60 %. Modul využívá obloukové pohyby a umožňuje automatickou úpravu posuv a hloubky řezu nástroje tak, aby nikde nebylo překročeno naprogramované množství odebíraného materiálu. Výsledkem tohoto dynamického/variabilního posuvu je rychlejší, hladší řez a zvýšená životnost nástroje. Modul VoluMill využívá nový způsob generování dráhy nástroje s řadou jedinečných funkcí s ochrannou známkou. Mezi nejvýznamnější patří FastPath, CoolCut a InLine RestMill [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49].

FastPath – VoluMill generuje plynulé a hladké dráhy nástroje. Křivky a oblouky jsou vytvářeny s ohledem na to, aby se zabránilo přetížení nástroje. Tím je dosaženo optimálních podmínek obrábění, které umožňují použít maximální možné hodnoty posuvu a řezné rychlosti. Na obrázku 24 je možné porovnat dráhu vypočítanou standardním CAM software (obr. 24A) a optimální výpočet dráhy řezného nástroje pomocí metody VoluMill (obr. 24B). Proces automaticky zohledňuje nejlepší způsob frézování kapes, včetně otáček nástroje zanořujícího se do materiálu a rychlosti odebrání materiálu [42, 43, 48].



Obr. 24 Porovnání drah nástroje: A) konvenční frézování, B) s využitím VoluMill [43].

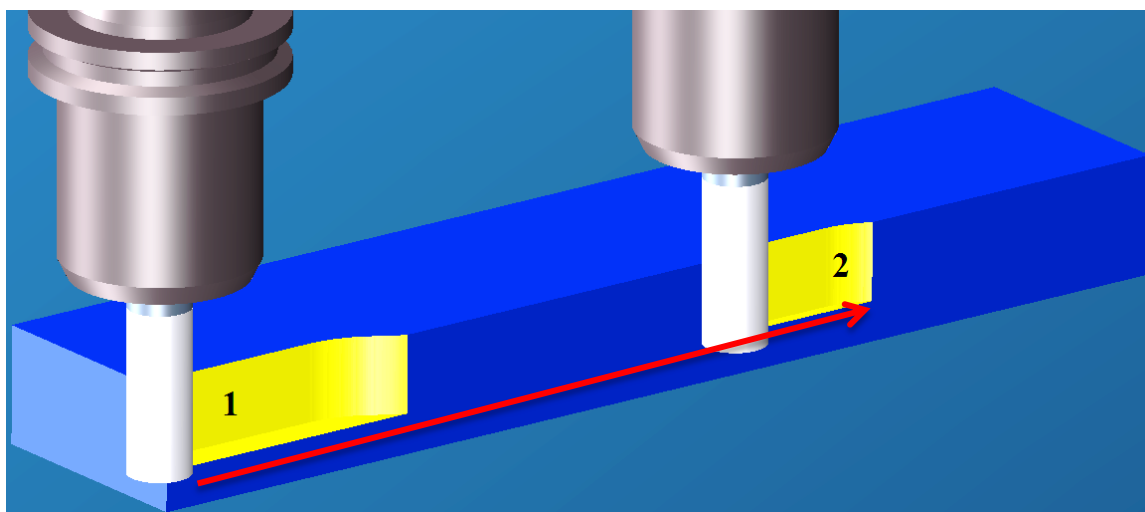
CoolCut – VoluMill dynamicky upravuje posuv, radiální a axiální hloubku řezu, a tím pádem je schopen udržet během procesu obrábění konzistentní teplotu. Nejvíce tepla je odvedeno třískou, čímž je minimalizováno opotřebení řezné části frézy. Odlupování a praskání břitu nástroje je zabráněno snížením rychlosti posuvu při vnikání nástroje do obrobku. VoluMill umožňuje efektivní využití nástroje tím, že řez v mnoha případech probíhá pomocí celé činné délky břitu obráběcího nástroje [42, 43, 48].

InLine RestMill – Tato rozšiřující nadstavba dále umožňuje využívat chytrou hrubovací strategii, s velikostmi úběru materiálu tak velkými, jak je to jenom možné. Frézuje se ze dna na povrch součásti a tím je zajištěn minimální přídavek na dokončovací frézování, což opět vede ke snížení potřebného času na výrobu dané součásti [42, 43, 48].

3.2.1 Dráhy nástroje

V případě VoluMill můžeme použít nejrychlejší interpolační posuv (nikoli rychloposuv), kterého je daný obráběcí stroj schopen. Jedná se o tzv. velký posuv, kterým se budou provádět přemístovací pohyby v dráze nástroje s výjimkou těch, které budou nad obrobkem prováděny rychloposuvem. Což je vidět na obrázku 25, kdy řezný nástroj přejíždí z řezu 1 do řezu 2 právě tímto posuvem [46, 47, 50].

V okamžiku, kdy VoluMill ukončí řez, musí se nástroj ve většině případů k dalšímu řezu přemístit, přes již obrobenou plochu. Tento program je schopen ponechat frézu dole v obrobené oblasti, místo jejího zvednutí do bezpečnostní roviny Z. Pro zkrácení časů a vyšší efektivitu, je přejezd k počátku dalšího řezu prováděn největším možným interpolačním posuvem. Zadávání bezpečnostní vzdálenosti dna, tedy vzdálenosti, do které se nástroj zdvihne při přejíždění do dalšího řezu, je používáno v kombinaci s výše uvedeným velkým posuvem [46, 47, 50].



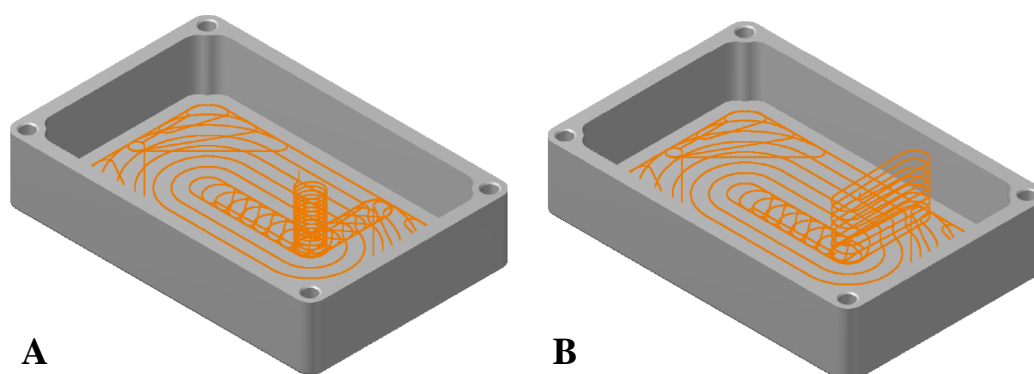
Obr. 25 Nástroj přejíždějící tzv. velkým posuvem do dalšího řezu.

Pomocí materiálové databáze, vycházející z chemického složení použitého materiálu obráběné součásti a řezného materiálu nástroje, je tato nadstavba schopna určit doporučené otáčky vřetene obráběcího stroje. Základní ideou modulu VoluMill je generování drah nástroje, které při obrábění nepřekročí předem stanovené množství odebíraného materiálu

během časové jednotky. Tohoto cíle je dosaženo dynamickou korekcí hloubek řezu a posuvu, kterým se nástroj bude pohybovat, když je v kontaktu s materiálem. VoluMill upraví posuv a/nebo hloubku řezu tak, aby bez ohledu na tvar frézovaného obrobku byly zachovány optimální podmínky obrábění [42, 43, 46].

- **Najížděcí pohyby**

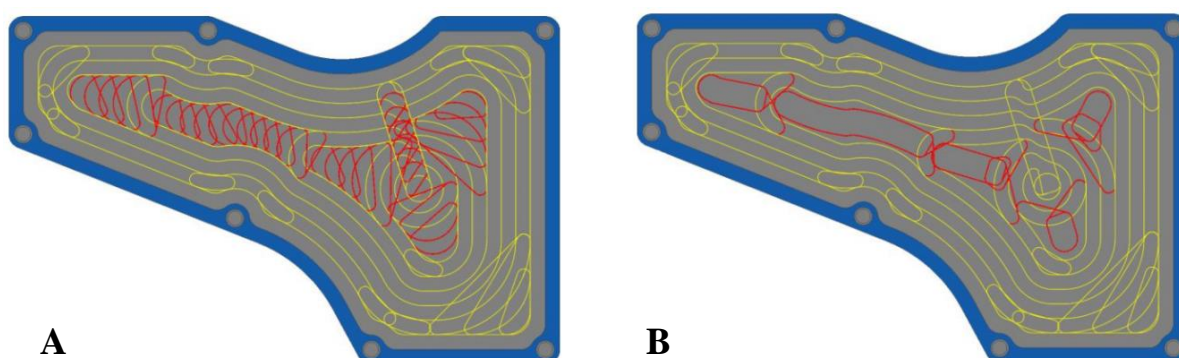
VoluMill nabízí dva typy najížděcích pohybů do požadované hloubky řezu. Prvním z nich je šroubovice (viz obr. 26A), která se používá jako výchozí typ vnoření a je doporučován pro obrábění tvrdších materiálů. Druhým typem je rampa, jehož dráha je znázorněna na obrázku 26B. Tento druh vnoření nástroje do požadované hloubky řezu využívá speciální pohyb po rampě. Modul vypočítává ideální polohu a tvar této rampy pro vnoření do přechodové oblasti, která je použita pro napojení z konce jednoho řezu na další. Použití rampy je doporučováno u měkčích materiálů obrobků, jako jsou slitiny hliníku. Podle zadané geometrie VoluMill automaticky vypočte místo, délku a orientaci rampy. Posuv rampování je aktualizován na 50 % vypočteného posuvu. Je zde stanovena bezpečnostní vzdálenost vnořování nad horní plochou v ose Z. Je to poloha, ve které se nástroj přestane pohybovat rychloposuvem a začne se pohybovat posuvem pracovním [42, 46, 50].



Obr. 26 Najížděcí pohyby do požadované hloubky řezu: A) po šroubovici, B) po rampě [46].

- **Strategie frézování**

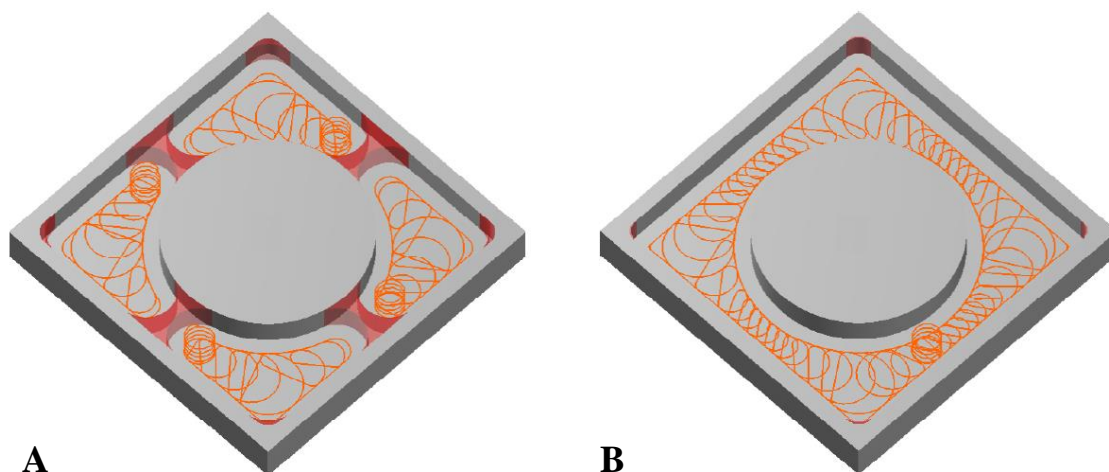
V případech, kdy se mají na daném obrobku frézovat úzké oblasti, jsou zvažovány dvě základní strategie – boční frézování a drážkování. Pokud není v ovládacích záložkách uživatelem vybrána jedna z těchto strategií, VoluMill automaticky vybere strategii, která generuje nejkratší časy cyklů. U jedné obráběné součásti lze dle její tvarové složitosti uplatnit obě dvě metody. Při použití progresivního způsobu frézování – boční frézování (viz obr. 27A), není nástroj nikdy plně v záběru. Použití strategie bočního frézování je vhodné zejména při obrábění tvrdších materiálů. V druhém případě – při použití drážkovacího frézování, které je vyobrazeno na obr. 27B, provede VoluMill plný drážkovací řez pro najetí do nové oblasti řezu. Protože jsou drážkovací řezy mnohem efektivnější, je nezbytné, aby modul v průběhu těchto řezů automaticky snížil hodnotu posuvu při současné změně radiální hloubky řezu. A to vše z toho důvodu, aby byla dodržena základní idea metody VoluMill – zachování stejného množství odebíraného materiálu za jednotku času MRR [42, 46, 50].



Obr. 27 Strategie frézování: A) boční, B) drážkovací [50].

- **Vyhlazovací rádius**

Dalším významným aspektem je vyhlazovací rádius. Jedná se o minimální hodnotu rádiusu, po kterém bude fréza příčně přejíždět během obrábění. Optimální a výchozí vyhlazovací rádius je roven 45 % průměru frézy. Díky této hodnotě je VoluMill schopen stále dosahovat hodnot rychlostí, které vedou ke zkrácení času cyklů. Riziko takto velkého vyhlazovacího rádiusu je to, že některé oblasti obrobku zůstanou neobroběny, jak je patrné z obr. 28A. Aplikací menší hodnoty tohoto rádiusu je nástroj schopen obrobít více materiálu, což je graficky znázorněno na obrázku 28B. To ale ve většině případů vede k menší produktivitě operace. VoluMill je navržen tak, aby nástroj během řezu nikdy neprováděl ostré změny směru. V případě součásti, která má zaoblení rohu rovno rádiusu nástroje, zůstane v těchto rozích malé množství materiálu, i když byl vyhlazovací rádius nastaven na minimální povolenou hodnotu [42, 46, 50].

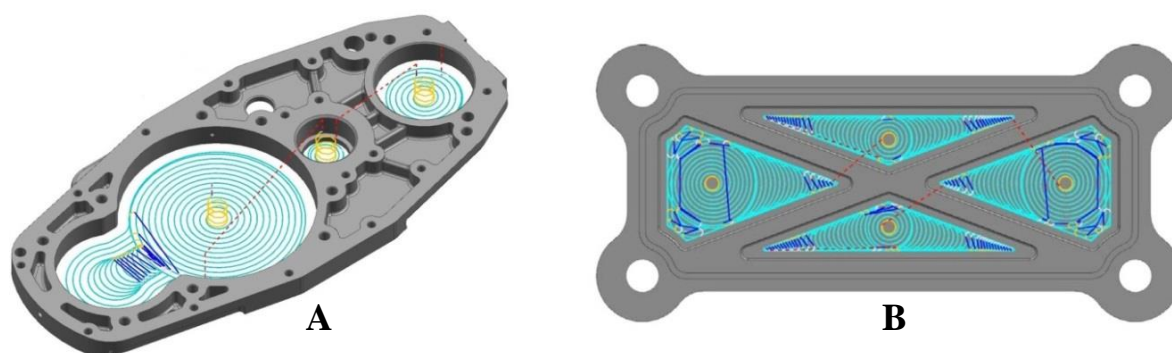


Obr. 28 Vyhlazovací rádius: A) velký, B) malý [46].

3.2.2 VoluMill 7.0

Tato nejnovější verze VoluMill přináší oproti klasické verzi několik vylepšení pro ještě větší efektivitu frézovacích operací. Jednou z vlastností je možnost využití spirálových pohybů. VoluMill používá tuto strategii zejména pro obrábění jednoduchých tvarových

oblastí, jako jsou kruhy či čtverce, jak je vidět na obr. 29A. V těchto aplikacích dochází k úspoře strojních časů až o více jak 15 %. Další vlastností je tzv. zvýšená šířka drážky. Při přesunu nástroje do nových oblastí obrobku použije VoluMill tzv. D-tvarovaný pohyb. V případech, kdy je to možné, použije řezný nástroj tento typ pohybu, čímž se zvýší jak pracovní rozpětí nástroje, tak jeho životnost. Další z vlastností je obrábění rohů pomocí „cik-cak“ pohybů (viz obr. 29B). Těto vlastnosti odebrání materiálu v rozích obrobku je použito pouze v případech, kdy je pomocí automatické funkce zjištěno, že tato strategie vede ke snížení času cyklu [51].



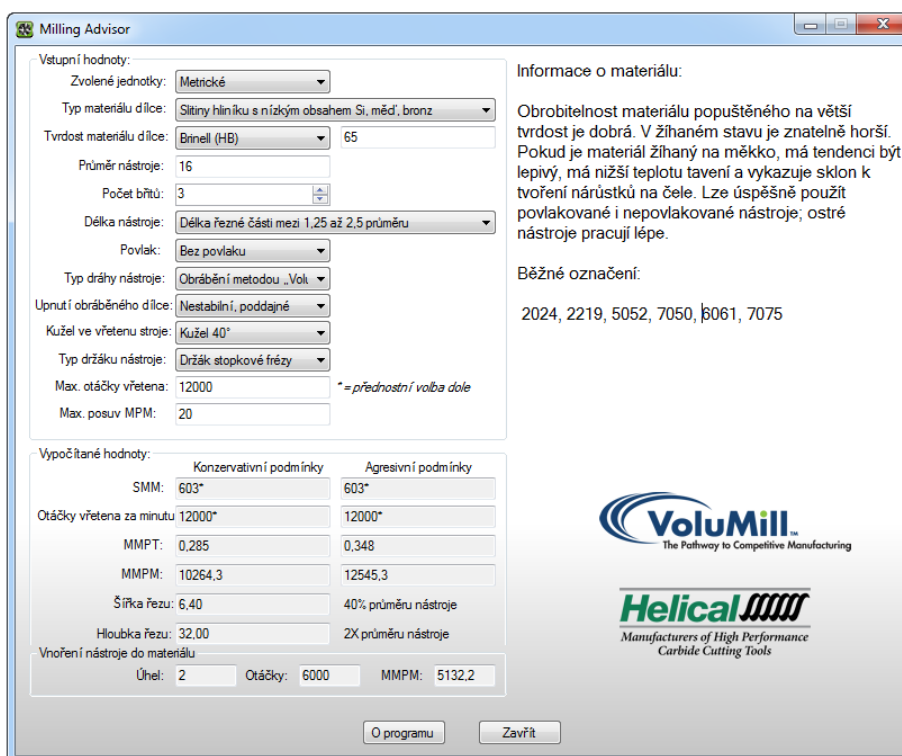
Obr. 29 Nové vlastnosti VoluMill 7.0: A) spirály, B) „cik-cak“ obrábění rohů [51].

3.2.3 MillingAdvisor

Jedná se o tzv. výpočtového poradce, navrženého speciálně pro frézování metodou VoluMill. Tato metoda VoluMill je generátor dráhy nástroje pro vysoce výkonné hrubování, který je integrován do technologického CAD/CAM software GibbsCAM [52, 53].

Aby bylo možné využít celý potenciál modulu VoluMill, je nezbytné použít mnohem agresivnějších frézovacích parametrů, než těch, které jsou uváděny jednotlivými výrobci řezných nástrojů. Dráhy nástroje metodou VoluMill jsou vytvořeny za účelem udržování konstantního úběru materiálu obrobku během časové jednotky s mnohem větší axiální hloubkou řezu než v případě běžné hrubovací technologie. Proto je použití těchto vyšších hodnot řezných parametrů nejenom možné, ale žádoucí. Hodnoty řezných parametrů jsou určovány v závislosti na typu materiálu obrobku, řezném nástroji, možnostech obráběcího stroje a několika dalších faktorech, což umožní okamžité efektivní využívání vlastností VoluMill [52, 53].

Mezi hlavní vlastnosti MillingAdvisor se řadí výpočet řezné rychlosti a hodnoty posuvu pro velké množství obráběných materiálů, jak je patrné z obr. 30. Dále stanovuje doporučené velikosti axiální a radiální hloubky řezu frézovací operace. To vše s ohledem na maximální využití možností obráběcího stroje a řezných nástrojů (celé činné délky břitu) [52, 53].



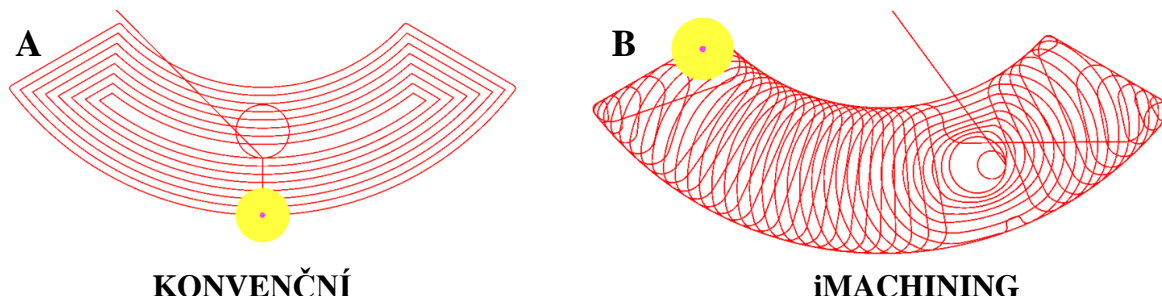
Obr. 30 Uživatelské prostředí MillingAdvisor.

Pro danou frézovací technologii je také velmi důležité zvolit správný počet břitů obráběcího nástroje. Rozteč zubů frézy je definována jako vzdálenost mezi dvěma za sebou následujícími efektivními břity. Frézy se podle rozteče zubů dělí na nástroje s velkou, střední a malou roztečí. Nástroje s velkou roztečí zubů nacházejí uplatnění zejména při hrubování. Dále se používají při operacích s nízkou stabilitou, při podmínkách s velkým vyložení nebo na obráběcích strojích s nízkým výkonem a nedostačující tuhostí. Všeobecně všude tam, kde se počítá se vznikem nežádoucích vibrací. Díky velké vzdálenosti mezi jednotlivými břity mají tyto frézy dostatečný prostor pro vznikající třísky, což umožňuje dobrý odvod třísek z místa řezu. Čehož se s výhodou využívá při frézování právě metodou VoluMill, s vysokými posuvy na zub [19, 21, 23, 25, 26, 54, 55].

3.3 iMachining

Jedná se o program určený k výpočtu drah řezného nástroje v CAM programu SolidCAM a je plně integrovaný v CAD software SolidWorks a AutoDesk Inventor. Tento produktivní algoritmus tvoří dráhu nástroje za účelem toho, aby amplituda řezné síly byla pouze v úzkém pásmu, čímž jsou potlačeny extrémní hodnoty v zatížení nástroje. Z tohoto důvodu iMachining umožňuje využití vysokých řezných rychlostí v celém rozsahu obrábění a dochází tak k celkové úspoře časů cyklů potřebných k obrobení dané součásti. Dále také tento modul přispívá k menšímu opotřebení jak řezného nástroje, tak i obráběcího stroje, což zvyšuje celkovou efektivitu frézovací operace. iMachining disponuje řadou specializovaných algoritmů, mezi které patří např. Look-ahead, který slouží k předvídání nepříznivých podmínek obrábění v problematických oblastech, jako je

např. obrábění tenkých žeber. Nebo Step-up pro produktivní 3D hrubování s maximálním odběrem materiálu obrobku za časovou jednotku. Na obr. 31 je grafické porovnání dráhy nástroje v případě konvenčního frézování a za použití iMachining [56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63].



KONVENČNÍ

iMACHINING

Obr. 31 Porovnání drah nástroje: A) konvenční frézování, B) s využitím iMachining [58].

- **Vlastnosti a výhody**

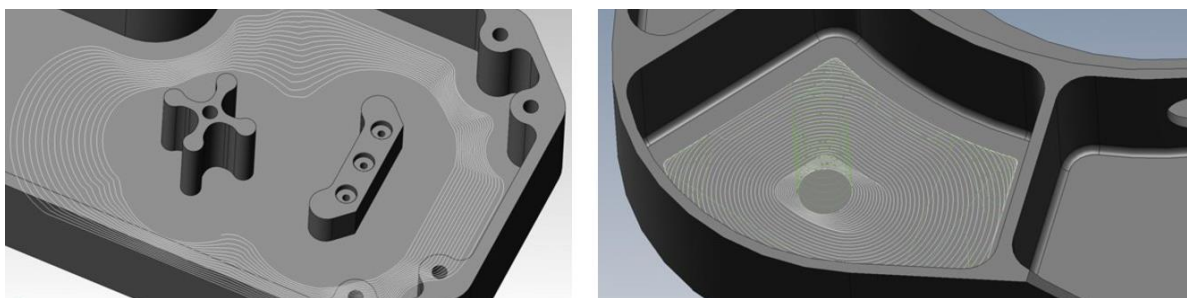
Mezi hlavní výhody iMachining se řadí kratší strojní čas obrábění až o 70 %, čehož je docíleno pomocí patentované tzv. technologie řízeného kroku pro konstantní zatížení nástroje. Dále k tomu přispívá eliminace neproduktivních pohybů a přejezdů, obrábění ve velké axiální hloubce nejvyššími optimalizovanými otáčkami a posuvy. Mezi další výhody se řadí např. snížení vibrací, dobrý odvod třísek, rovnoměrné zatížení celé soustavy stroj – nástroj – obrobek, zvýšení životnosti obráběcího stroje, kratší a jednodušší postup programování, což značně zvyšuje produktivitu programování. Těchto výsledků je dosaženo pomocí specifických vlastností modulu, jako jsou: adaptabilní řezné podmínky, obrábění s rovnoměrnou třískou, tangenciálně spojené dráhy a spirální dráhy [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63].

- **Průvodce technologií**

Významná část systému iMachining je věnována výpočtu odpovídajících hodnot řezných podmínek. Řízení probíhá pomocí tzv. průvodce technologií (Technology Wizard), který stanovuje vhodné hodnoty posuvů a otáček vřetena. Průvodce technologií iMachining používá pro výpočet optimálních řezných podmínek vlastnosti CNC obráběcího stroje, materiálu nástroje a polotovaru. Pomocí technologie tzv. řízení bočního kroku zajišťuje dráha nástroje to, že jsou průvodcem nastavené řezné podmínky striktně dodržovány, což dále vede k delší životnosti nástroje. V opačném případě by docházelo k nastavení zbytečně pomalých řezných podmínek, což vede k nevyužití charakteristických vlastností iMachining. Dále tento modul umožňuje automatické nastavení axiální hloubky řezu, což je vzhledem k vysokým rychlostem během obráběcího procesu zcela zásadní vlastnost. Aby byla frézovací operace co nejefektivnější, je nezbytné se zabývat úhlem styku frézy s obrobkem (φ). Opásání řezného nástroje se vždy pomalu mění mezi minimální ($\varphi_{\min} = 20^\circ$) a maximální ($\varphi_{\max} = 80^\circ$) hodnotou a současně se dynamicky mění posuv nástroje pro zajištění konstantního mechanického a tepelného zatížení nástroje [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63].

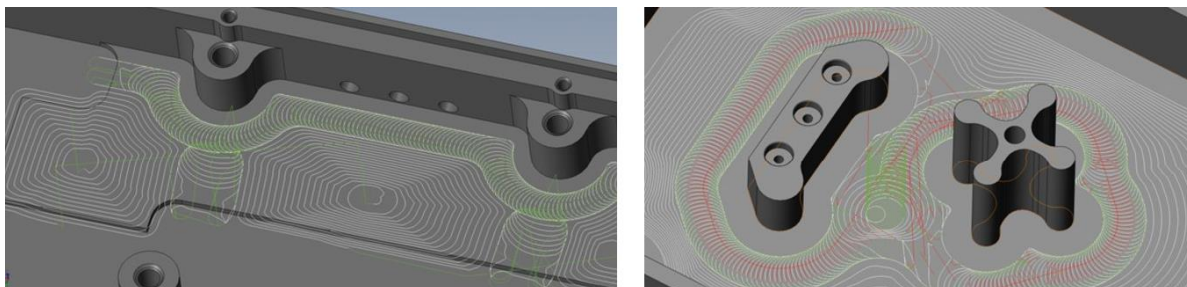
3.3.1 Dráhy nástroje

Modul přináší specializované vlastnosti dráhy nástroje. První z nich je přizpůsobivá spirála. Na rozdíl od běžné spirálové dráhy používá iMachining pokročilou přizpůsobivou spirálu, která zaručuje o 50 až 100 % větší úběry materiálu během časové jednotky (MRR). Vzhledem ke skutečnosti, že spirály mají větší úběr materiálu než trochoidní dráhy nástroje, tak iMachining používá tyto spirály mnohem častěji, než trochoidní dráhy nástroje. Tato přizpůsobivá spirála se tvaruje podle geometrie obráběného prvku a tím maximalizuje dobu nástroje v řezu, jak je vidět z obrázku 32 [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63].



Obr. 32 Přizpůsobivé spirály [60].

Další vlastností dráhy nástroje v iMachining jsou oběhy, kdy program automaticky oddělí malé prvky uvnitř obrobku, někdy nazývané jako ostrovy. Pomocí této funkce jsou také rozděleny všechny velké oblasti (viz obr. 33). Tím je umožněno aplikování spirály v maximální možné míře a tak je dosaženo konstantního zatížení nástroje bez přejezdů a bez přeskokování nástroje uvnitř kapes [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63].



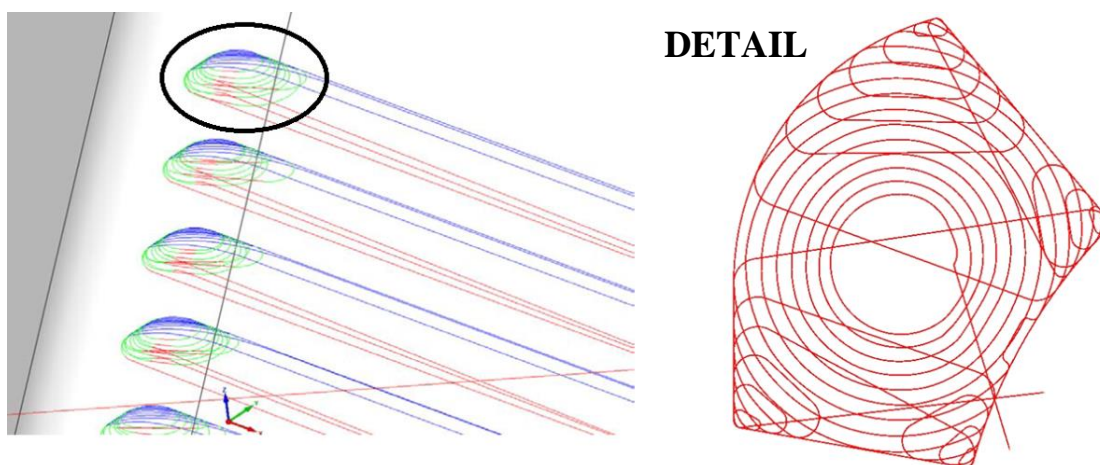
Obr. 33 Oběhy [60].

Poslední z těchto vlastností je minimalizace zbytečných pohybů, kdy všechny dráhy nástroje iMachining pracují pouze na předem definovaném tvaru. Tím je zaručeno, že je nástroj co nejdelší dobu v záběru a nedochází ke generování nežádoucích časů, kdy nástroj jede na prázdko. Polotovar je během procesu frézování od prvního do posledního řezu dynamicky aktualizován tak, aby byl obráběn pouze existující materiál. V obráběné hloubce se používá tzv. chytré polohování a nástroj se tak pohybuje z jednoho řezu do druhého a přejíždí pouze v nezbytných případech. Výsledkem je minimalizace neproduktivních pohybů nástroje [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63].

3.3.1 3D iMachining

Nově iMachining obsahuje vlastní 3D modul, který generuje optimalizované dráhy nástroje a řezné podmínky pro každou axiální hloubku řezu. 3D iMachining používá model obrobku a aktualizovanou geometrii polotovaru, kde automaticky rozpoznává oblasti, které je třeba obrábět a bere tak v úvahu předchozí vykonané operace. Tento modul má tzv. lokalizované obrábění s optimálním uspořádáním a eliminuje tak skoro všechny přejezdy, dlouhé polohování a obrábění na prázdno. V každé tzv. Z-úrovni se automaticky upravují řezné parametry, kdy se analýzami určuje, který objem odebrat jako další a v jaké Z-úrovni. Dalším přínosem je hrubování pomocí hlubokého kroku dolů, kdy při generování hrubovacích drah nástroj nejdříve odebírá plnou hloubku pomocí kroku dolů a poté dynamický krok nahoru odebírá zbytkový materiál [58, 59, 61, 62, 63, 64].

Hladký souvislý pohyb nástroje je zajištěn tím, že všechny polohovací pohyby obsahují nájezd/odjezd po oblouku (v rovině) nebo po hladké 3D křivce (v prostoru), což snižuje čas cyklu. Dráha nástroje je optimalizována jen pro obrábění toho zbytkového materiálu, který je nutno odebrat. Všechny dráhy nástroje se řídí dynamicky aktualizovaným 3D modelem polotovaru, což zaručuje eliminaci neefektivního obrábění na prázdno. 3D model polotovaru je po každém krátkém pohybu nástroje přesně aktualizován. Optimalizované řezné podmínky pro každou radiální hloubku řezu výrazným způsobem snižují obráběcí časy a opotřebení řezného nástroje. Další z vlastností zefektivňující technologii frézování je automatické hrubování a zbytkové hrubování, které probíhá v jediné operaci. Modul pracuje s nájezdovými a odjezdovými tečnými oblouky (viz obr. 34), které se provádí automaticky při najíždění a odjíždění z řezu. Plynulý pohyb nástroje dovoluje rychlejší a efektivnější obrábění se současnou zvyšující se životností nástroje i obráběcího stroje [58, 59, 61, 62, 63, 64].

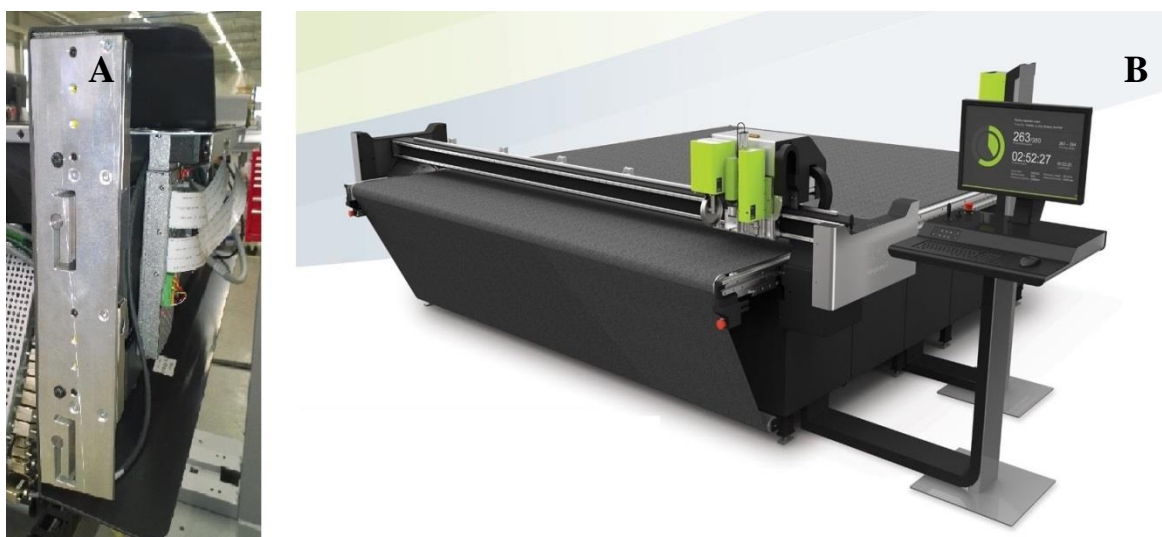


Obr. 34 Tečné nájezdové a odjezdové oblouky [58].

3D iMachining obsahuje i specializovanou funkci pro frézování prizmatických dílů, které obsahují více kapes a ostrovů. Celá součást je obrobena pouze pomocí jediné operace, a to bez ohledu na její tvarovou složitost přímo z objemového modelu obráběné součásti a objemového modelu polotovaru bez definice řetězců geometrie. Modul vypočítá optimální dráhu nástroje automaticky, čímž se razantně sníží čas programování [64].

4 NÁVRH POSTUPU VÝROBY ZVOLENÉHO DÍLCE, URČENÍ LIMITNÍHO POČTU KUSŮ PRO JEDNOTLIVÉ TECHNOLOGIE

V praktické části této práce je řešena výroba levého držáku fotobuňky NC řezacích stolů, který firma AB KOMPONENTY s.r.o. kooperačně vyrábí pro společnost ESKO Brno, s.r.o. Vyráběný držák, je spolu s jeho pravým provedením součástí bezpečnostní brány na NC řezacích stolech Kongsberg řady C a řady XP, jak je uvedeno na obr. 35A. Bezpečnostní brána je schopna okamžitě zastavit stroj a zvyšuje tak bezpečnost práce na pracovišti. Kongsberg C (obr. 35B) je multifunkční NC řezací stůl s velmi rozměrnou pracovní plochou, určený pro řezání široké škály materiálů o různých tloušťkách (až 50 mm) např. pro: reklamní obaly, kartonové krabice, různé pozvánkové kartičky a další [65, 66],



Obr. 35 A) odkrytovaná bezpečnostní brána, B) NC řezací stůl Kongsberg C [65].

4.1 Návrh technologie

Návrh výroby je vytvořen ve třech variantách technologie, které se vzájemně liší metodou frézování a použitým polotovarem:

- Varianta A – původní technologie výroby, polotovarem je přířez z ploché tyče,
- Varianta B – frézování metodou VoluMill, polotovarem je přířez z ploché tyče,
- Varianta C – frézování bez metody VoluMill, polotovarem je slévárenský odlitek.

Společnost AB KOMPONENTY s.r.o. v současné době při výrobě této součásti využívá variantu A - technologii frézování bez metody VoluMill. Dle požadavku zákazníka má být součást vyrobena ze slitiny hliníku EN AW-6082 (EN AW- AlSi1MgMn). Vzhledem k tomu, že se z této slitiny hliníku nevyrábí hutní polotovary o rozměru, který je potřeba na výrobu dílce, je po konzultaci se zákazníkem zvolena slitina ze skupiny 6xxx o podobném chemickém složení. A to slitina EN AW-6060 T6 (EN AW- AlMgSi), jejíž chemické složení, s obsahy jednotlivých prvků, je uvedeno v tabulce 2.

Tab. 2 Chemické složení slitiny EN AW-6060 T6 [1].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Jiné	Al min.
0,30÷0,60	0,1÷0,30	0,10	0,10	0,35÷0,60	0,05	0,15	0,10	0,15	zbytek

Pozn.: množství jednotlivých prvků je vyjádřeno v procentech hmotnosti – hm%

Požadované tvrdosti této slitiny bylo dosaženo teplem zpracováním v kombinaci s vytvrzením - rozpouštěcím žiháním a následným umělým zestárnutím. Vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce 3.

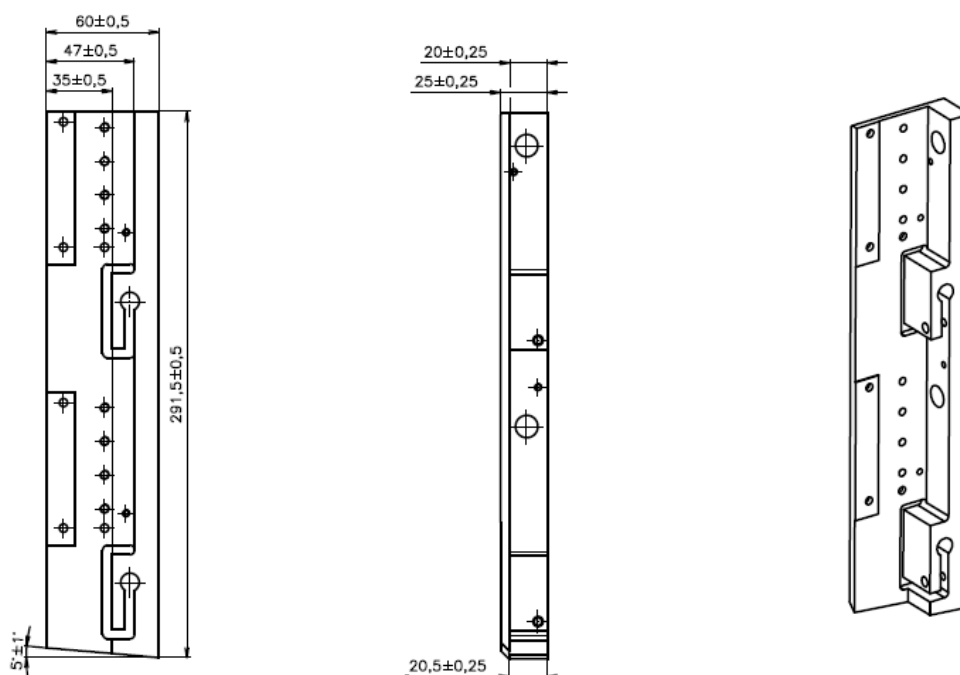
Tab. 3 Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny EN AW-6060 T6 při 20 °C [67].

$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]	Tvrdost [HBW]	E [GPa]	α [K ⁻¹ ·10 ⁻⁶]	λ [W·K ⁻¹ ·m ⁻¹]
150÷140	170÷215	6	60÷65	~70	23,4	200÷220

Pozn.: $R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu, R_m – mez pevnosti, A_{50} – tažnost, E – modul pružnosti v tahu, α – součinitel teplené roztažnosti, λ – měrná tepelná vodivost

Hliníková slitina EN AW-6060 T6 nachází široké uplatnění tam, kde nejsou kladeny žádné specifické požadavky na pevnostní vlastnosti. Typickými oblastmi výrobků z toho materiálu jsou části nábytku, rámy oken a dveří, či různé architektonické prvky [9, 67].

Při návrhu polotovaru je cílem dosáhnout toho, aby se jeho tvar co nejvíce podobal výslednému výrobku a tak dosáhnout jeho maximálního využití. První technologie výroby levého držáku fotobuňky (varianta A) je zpracována pro přířez z ploché obdélníkové tyče o rozměrech 60 x 30 mm, která je pomocí pásové pily řezána na délku 293±1 mm. Jak je vidět na obrázku 36, je z výchozího polotovaru nutné odebrat velký objem materiálu, což v případě konvenčního frézování znamená vyšší strojní časy na obrobení součásti do požadovaného tvaru.



Obr. 36 Základní rozměry levého držáku fotobuňky.

Koeficient využití materiálu přířezu z ploché obdélníkové tyče (k_m), podle vztahu 28, vychází pouze 29,8 %. Celkový výpočet je uveden v příloze 5 [68].

$$k_m = \frac{Q_s}{Q_m} \quad [\%]. \quad (28)$$

$$k_m = \frac{0,428}{1,436} = 0,298 = 29,8 \%,$$

kde: Q_s [kg] – hmotnost hotové součásti,

Q_m [kg] – norma spotřeby materiálu.

Snížení pracnosti u současné technologie frézování je možné řešit aplikací metody VoluMill (varianta B), která je určena ke snížení časů hrubovacích cyklů díky specifickým vlastnostem, které jsou uvedeny v kapitole 3.2.

Další variantou C je výroba této součásti z polotovaru, kterým je slévárenský odlitek. U odlitku se očekává menší objem odebíraného materiálu. Jeho případné zavedení do výroby je závislé na budoucím zvýšení roční produkce daného dílce. Z toho důvodu je určen limitní počet kusů levého držáku fotobuňky, od kterého bude oproti variantě A výhodnější aplikovat polotovar, kterým bude hliníkový slévárenský odlitek.

Pro jednotlivé technologie jsou zpracovány technologické postupy s NC řídicími programy, které jsou součástí příloh této práce. Technologie výroby pro levý držák fotobuňky je navržena pro vertikální obráběcí centra. Na závěr je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení pro stávající a očekávané roční výrobní série.

4.2 Vertikální obráběcí centra YCM NSV102A a YCM NSV156A

Součást je obráběna na vertikálních obráběcích centrech taiwanské společnosti YCM, kterou v České republice zastupuje společnost VASON CZ, s.r.o. V první operaci se jedná o stroj NSV102A (obr. 37), který zajišťuje převážnou část obrábění. V druhé operaci je využito centrum NSV156A, které se liší pouze rozměry pracovního stolu.

Tato obráběcí centra jsou určena pro obrábění, frézování, vrtání, vystružování a řezání závitů na středních a velkých obrocích. Obráběcí centrum zajišťuje obrábění v plně automatickém cyklu pomocí výměny nástroje oboustranným ramenem. Stranový zásobník nástrojů má kapacitu pro 30 nástrojů. Velká tuhost a opakovaná přesnost je dána litinovou konstrukcí stroje a velmi přesným lineárním vedením. Obráběcí stroj je osazen řídicím systémem FANUC MXP-200i. Rychloposuvy se ve všech osách pohybují se zrychlením až 1G (9,82 m.s⁻²). Speciální vřeteno IDD se středovým chlazením o tlaku 20 bar, zaručuje minimální vznik negativních vibrací a je také dobře tepelně izolované. Výsledkem je vynikající drsnost obrobene plochy se současnou dobrou životností, jak řezného nástroje, tak samotného stroje při obrábění i agresivními řeznými podmínkami. Vřeteno je uloženo v keramických kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem a poskytuje vysoký točivý moment při nízkých otáčkách a maximální výkon při vysokých řezných rychlostech [69, 70, 71].

Tab. 4 Technická data YCM NSV102A [69, 71].

Vřeteno YCM IDD	
otáčky	12 000 min ⁻¹
výkon motoru	22 kW
velikost kuželu	ISO 40, DIN 69871
Pojezdy	
osa X	1 020 mm
osa Y	600 mm
osa Z	600 mm
vzdálenost vřetena od stolu	100 ~ 700 mm
Rychloposuvy	
posuvy v osách X/Y/Z	48/48/48 m.min ⁻¹
pracovní posuv	20 000 mm.min ⁻¹
Rozměry stolu	
délka	1 120 mm
šířka	650 mm
nosnost	1 000 kg
počet T-drážek	6
šířka T-drážek	18 mm
Rozměry stroje	
délka	2 937 mm
šířka	2 760 mm
výška	3 021 mm
Obecné údaje	
požadovaný příkon	36 kVA
hmotnost	7 000 kg

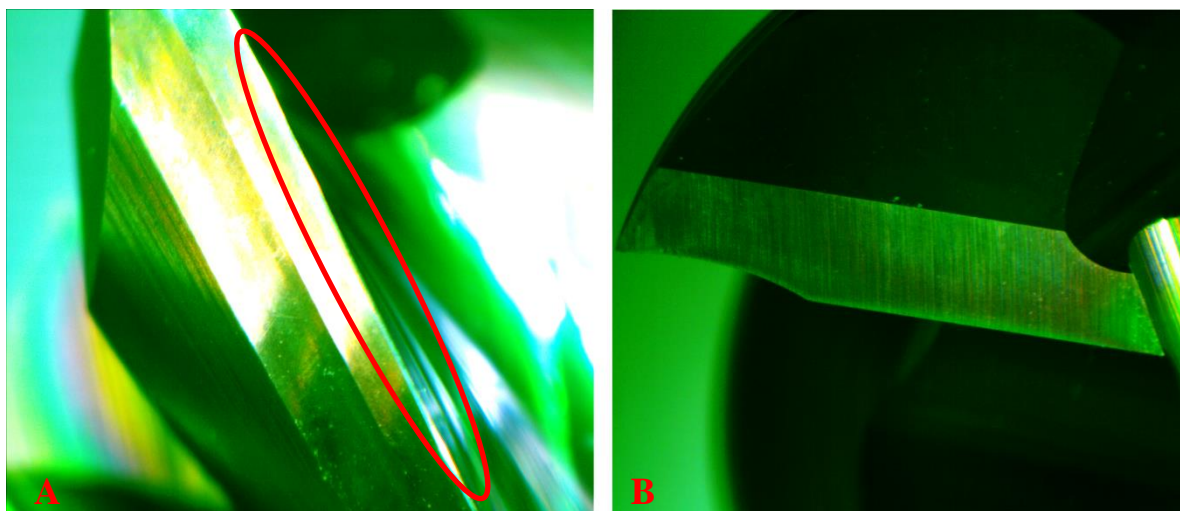


Obr. 37 Vertikální obráběcí centrum YCM NSV102A [70].

Obráběcí centrum je dále vybaveno přídavným otočným stolem, který představuje osu A. Mezi další doplňkové příslušenství patří sondy od společnosti RENISHAW - sonda odměrování obrobku a sonda odměrování řezného nástroje. Odvod třísek je zajištěn vynášecím dopravníkem třísek.

4.3 Nástrojové vybavení

Pro výrobu levého držáku bezpečnostní brány NC řezacího stolu jsou použity převážně nástroje od německé společnosti WNT. Primárně jsou nasazeny monolitní stopkové frézy ze slinutých karbidů nové řady AluLine typ W. Oproti stávajícím frézám je tento nástroj doplněn válcovou vlasovou fazetou, jak lze vidět na obrázku 38A. Účelem toho prvku řezného nástroje je dosažení větší stability nástroje v řezu. Na obr. 38B je detail zubu přes střed této monolitní tříbřité frézy, který jí umožňuje axiální zavrtání do obrobku. Snímky jsou pořízeny stereomikroskopem OPTIKA LAB-20 ve společnosti ROTANA a.s. U všech nástrojů musí být zajištěna optimální rotace bez házení, což je zajištěno HA válcovými stopkami v toleranci h5 [72, 73].



Obr. 38 Geometrie frézy typu W: A) válcová vlasová fazeta, B) zub přes střed.

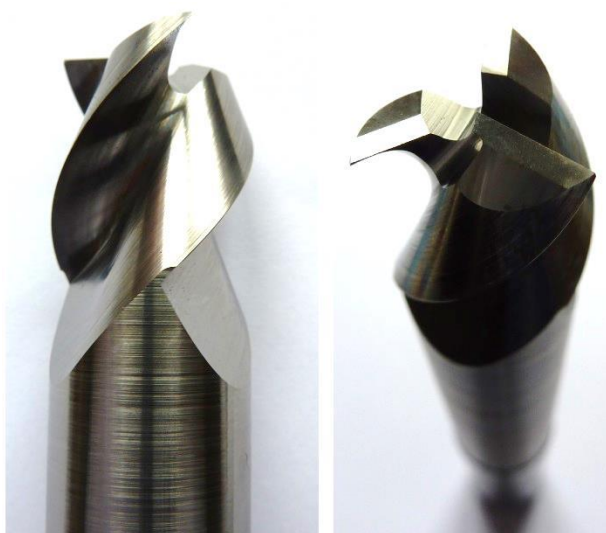
Při hrubování součásti je největší objem materiálu odebrán tříbitou frézou $\phi 16$ mm řady 53 521, která je uvedena na obr. 39. Hrubování součásti u tvarových vybrání je prováděno monolitní stopkovou frézou $\phi 10$ mm řady 53 522. Obě použité hrubovací frézy $\phi 16$ mm a $\phi 10$ mm mají povlak DLC (Diamond-Like Carbon). Jedná se o PVD monovrstvý povlak o tloušťce vrstvy max. $0,6 \mu\text{m}$, s mikrotvrdostí $HV_{0,05} = 6000$. Díky velmi tenké vrstvě DLC povlaku jsou eventuální nerovnosti přenášeny přes vrstvu na břit nástroje. Z toho důvodu je nezbytné všechny frézy před povlakováním leštit. Jedná se o velmi tvrdý povlak (cca 60 – 80 % tvrdosti diamantového povlaku), přednostně určený pro obrábění vysoce adhezivních materiálů. Povlak tvoří amorfni (atomy bez uspořádané struktury) uhlíková vrstva s vlastnostmi podobným diamantu. DLC povlak vykazuje vysokou otěruvzdornost a minimální součinitel tření. Díky tomu nedochází k vytváření nežádoucího nárůstku na řezném nástroji při obrábění jak za použití procesní kapaliny, tak i při obrábění za sucha [72, 73].



53 521/522 (AluLine typ W)

Obr. 39 Monolitní stopková fréza ze sliutých karbidů řady AluLine typ W.

Tvarové vybrání šířky 5 mm je frézováno tříbřitou stopkovou frézou $\phi 4$ mm řady 54 612 (W-HPC), která je zobrazena na obrázku 40. Díky vysokému úhlu stoupání šroubovice a drážce pro odvádění třísek u čelního břitu odvádí tato fréza dobře třísky z místa řezu. Výše uvedený nástroj je opatřen povlakem Ti 1005 typu PVD. Tento multivrstvý povlak na bázi chromu (Cr) a zirkonia (Zr) o maximální tloušťce vrstvy 4 μm zajišťuje optimální odvod třísek a potlačuje tvorbu nárůstku. Povlak je velice houževnatý a umožňuje frézování s využitím velkých posuvů. Ti 1005 je velmi odolný proti popraskání a jeho vícevrstvá struktura zabraňuje šíření trhlin [72, 73].



54 612 (W-HPC)

Obr. 40 Monolitní stopková fréza ze slinutých karbidů řady W-HPC.

Na zarovnání horního a spodního čela je aplikována nástrčná rovinná fréza $\phi 63$ mm s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů. VBD ze slinutých karbidů typu CWK mají tvar S. Destička je leštěná bez naneseného povlaku. Provedení břitu má ostrou geometrii spolu se speciálním utvářečem třísek ALP určeným pro obrábění neželezných kovů. Dále jsou použity vysoce výkonné vrtáky WPC o různých průměrech s chladicími kanálky pro středové chlazení nástroje. Vrtáky ze slinutých karbidů mají TiAlN povlak a válcovou stopku HA. Závity M4 a M5 jsou řezány strojními závitníky z rychlořezné oceli s CrN povlakem. Strojní výstružník z rychlořezné oceli je aplikován na vystružení dvou děr $\phi 10\text{H}8$ mm. Odjehlení součásti, všech otvorů a sražení hran je provedeno monolitní frézou na srážení hran ze slinutých karbidů [35].

Frézování kuželového otvoru $\phi 19/\phi 12/30^\circ$ mm je realizováno pomocí speciální kuželové frézy s vrcholovým úhlem 30° od výrobce UniCut s.r.o. Fréza je povlakována stříbrno-šedým povlakem AluSpeed, vyvinutého pro výkonné obrábění hliníku, hliníkových a neželezných slitin. Díky hladkému povrchu je redukováno tření nástroje, což společně s jeho nízkou afinitou k hliníku zajišťuje plynulejší odvod třísky bez tvorby nežádoucího nárůstku. Kompletní seznam všech nástrojů použitých na výrobu levého držáku bezpečnostní brány, spolu s doporučenými řeznými podmínkami je uveden v následující tabulce 5. V příloze 1 jsou nástroje blíže specifikovány [74, 75].

Tab. 5 Seznam použitých nástrojů, doporučené řezné podmínky [35, 72, 75].

Číslo nástroje	Název	Specifikace	Materiál	Povlak	Doporučené řezné podmínky	
					v_c [m.min ⁻¹]	f_z, f_n [mm]
T10	nástrčná fréza rovinná $\phi 63$	A270.63.R.06-12	NO	---	< 2000	0,100÷0,250
	VBD	SDHT 1204AEFN-ALP CWK 26	SK	---		
T11	stopková fréza $\phi 16$	W-SF.16, 0.Z3.45° R.HA.K	SK	DLC	420	0,120÷0,203
T12	stopková fréza $\phi 10$	W-SF.10, 0.Z3.45° R.HA.ML-S	SK	DLC	420	0,120÷0,140
T13	vrták $\phi 9,8$	WPC-VA.9.80.R.3D.IK.DIN6535.HA	SK	TiAlN	200	0,280
T14	stopková fréza $\phi 4$	W-HPC.4.0.Z3.45° R.HA.EL.8xD	SK	Ti 1005	200	0,030÷0,070
T15	vrták $\phi 4,2$	WPC-VA.4.20.R.3D.IK.DIN6535.HA	SK	TiAlN	200	0,150
T16	vrták $\phi 3,3$	WPC-VA.3.30.R.3D.IK.DIN6535.HA	SK	TiAlN	200	0,150
T17	fréza na srážení hran $\phi 12$	N-NE.12,0.Z4.0° R.90° HB	SK	---	200÷250	0,080÷0,016
T18	vrták $\phi 4,5$	WPC-VA.4.50.R.3D.IK.DIN6535.HA	SK	TiAlN	200	0,150
T19	strojní závitník M5	AL.M5.ISO2-6H.DIN371-B	HSS-E	CrN	15-40	0,800
T20	strojní závitník M4	AL.M4.ISO2-6H.DIN371-B	HSS-E	CrN	15-40	0,700
T21	vrták $\phi 11$	WPC-VA.11.00.R.3D.IK.DIN6535.HA	SK	TiAlN	200	0,280
T22	kuželová fréza $\phi 14$	F.kužel.30° 9.V14.104.14.Z2-01	SK	ALUSPEE	180	0,040
T23	vrták $\phi 5,6$	WPC-VA.5.60.R.5D.IK.DIN6535.HA	SK	TiAlN	200	0,210
T24	strojní výstružník $\phi 10$	NC.10,0.H7.D.DIN 212	HSS-E	---	20	0,300

Pozn.: VBD - vyměnitelná břitová destička, SK - slitinový karbid, NO - nástrojová ocel, HSS-E - rychlořezná ocel (High Speed Steel)

- f_z [mm] - posuv na zub (frézování), f_n [mm] - posuv na otáčku (vrtání, vystružování, závitování)
- doporučené řezné podmínky určeny pro třídu obrobitelnosti N4.3 (AlMgSi1) dle katalogu WNT

4.4 Limitní počet kusů pro jednotlivé technologie, založených na změně polotovaru

Roční výrobní série levého držáku fotobuňky NC řezacího stolu v současnosti činí zhruba 500 ks.rok⁻¹. Nyní je firmou AB KOMPONENTY s.r.o. tato součást vyráběna z přířezu ploché obdélníkové tyče. V budoucnosti, kdy se očekává nárůst roční výrobní série, se uvažuje o změně výchozího polotovaru. Návrh počítá s využitím slévárenského odlitku.

U odlitku se očekává snížení množství odebíraného materiálu, a tím pádem snížení celkového strojního času na obrobek jednoho kusu výrobku.

Za účelem vyhodnocení volby hliníkového odlitku byla poptána jeho cena, spolu s cenou modelového zařízení či potřebného nářadí na jeho výrobu. Poptávka byla zaslána několika slévárnám, které jsou svoji výrobou zaměřeny na odlévání hliníkových slitin. Tyto oslovené slévárny při zpracování cenové nabídky vycházely ze zaslání výkresu dílu, 3D modelu vytvořeného v CAD systému Catia V5R20, informací o hmotnosti dílce ($m = 0,428 \text{ kg}$) a jeho objemu ($V = 158,5 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$). Jednotlivými slévárnami byl po zaslání informace o stávajícím materiálu navržen jeho slévárenský ekvivalent. V tabulce 6 jsou uvedeny ceny za odlitky pro obě očekávané roční výrobní série $1\,000 \text{ ks.rok}^{-1}$, $5\,000 \text{ ks.rok}^{-1}$ a ceny modelového zařízení, případně všech potřebných nástrojů na výrobu daného hliníkového odlitku.

Tab. 6 Cenové nabídky sléváren.

Slévárna	Materiál	Cena odlitku ¹ [Kč]	Cena odlitku ² [Kč]	Cena nástrojů [Kč]
slévárna A	EN AB-43000	93,0	91,0	35 000
slévárna B	EN AC-43000	110,0	108,0	32 000
slévárna C	EN AB-46000	94,5	94,5	770 000
slévárna D (tlakové lití)	EN AC-43400	63,5	63,2	701 200
slévárna D (gravitační lití)	EN AC-43000	168,6	167,5	292 000

Pozn.: ¹ roční výrobní série $1\,000 \text{ ks.rok}^{-1}$, ² roční výrobní série $5\,000 \text{ ks.rok}^{-1}$
- ceny jsou uvedeny bez DPH

Z uvedených cen je zřejmé, že pro výrobu odlitku levého držáku fotobuňky bylo slévárnami navrženo několik technologií odlévání. V případě prvních dvou sléváren je použito gravitační lití do pískové bentonitové formy, se strojním poloautomatickým formováním. Přidávky na opracování na obráběných plochách jsou 2 mm, respektive 3 mm. Slévárnami C a D byla navržena technologie tlakového lití, která je spojena s vysokými náklady na nářadí potřebného pro výrobu odlitku – licí forma a následný ostříhvací nástroj. Tato nákladná technologie umožňuje oproti gravitačnímu odlévání předlití otvorů a použití minimálních přídavků na obrábění. Na základě celkové nejnižší cenové nabídky byla pro určení limitního počtu kusů pro jednotlivé technologie vybrána cenová nabídka od slévárny A.

Tab. 7 Vstupní údaje pro určení limitního počtu kusů pro jednotlivé technologie.

Technologie	N_{pm}^1 [Kč.ks ⁻¹]	N_{pm}^2 [Kč.ks ⁻¹]	1) Pásová pila VMB 305 DC			2) YCM NSV102A		
			N_{hs} [Kč.h ⁻¹]	t_{mA} [min]	t_{mB} [min]	N_{hs} [Kč.h ⁻¹]	t_{mA} [min]	t_{mB} [min]
přířez	93,5	93,5	452	0,3	18	570	35,7	120
odlitek	165,0	128,0	---	---	---	570	31,3	120

Pozn.: N_{pm} – náklady na přímý materiál, N_{hs} – náklady na hodinu provozu stroje, t_{mA} – jednotkový čas stroje, t_{mB} – dávkový čas stroje, ¹ roční výrobní série 500 ks.rok^{-1} , ² roční výrobní série $1\,000 \text{ ks.rok}^{-1}$

Na základě hodnot z tabulky 7 jsou vypočteny náklady na výrobu jednoho kusu dílce. Uvažují se pouze první dvě výrobní operace, tedy řezání polotovaru na pásové pile a obrábění na vertikálním obráběcím centru YCM NSV102A. A to z toho důvodu, že následující operace jsou pro obě technologie shodné. Náklady na přímý materiál se u přířezu určí ze vztahu 29 [76]:

$$N_{pm_p} = Q_m \cdot c_m - Z_m \cdot c_o \quad [Kč. ks^{-1}]. \quad (29)$$

$$N_{pm_p} = 1,436 \cdot 80 - 0,979 \cdot 21,80 = 93,50 \text{ Kč. ks}^{-1},$$

kde: Q_m [kg] – norma spotřeby materiálu,

c_m [Kč] – cena materiálu,

Z_m [kg] – celková ztráta materiálu,

C_o [Kč] – cena odpadu.

V případě slévárenského odlitku se náklady na přímý materiál určí z následujícího vztahu 30:

$$N_{pm_o} = c_{odl} + \frac{c_{mod}}{s} \quad [Kč. ks^{-1}]. \quad (30)$$

$$N_{pm_o} = 95 + \frac{35\,000}{500} = 165 \text{ Kč. ks}^{-1},$$

kde: c_{odl} [Kč] – cena slévárenského odlitku,

c_{mod} [Kč] – cena modelového zařízení,

s [ks.rok⁻¹] – roční výrobní série.

Z výše uvedeného výpočtu je patrné, že se náklady na přímý materiál v případě odlitku budou snižovat se zvyšující se roční výrobní sérií.

A. Roční výrobní série 500 ks.rok⁻¹

Následující výpočty jsou provedeny pro stávající roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹, při výrobní dávce 50 ks. Index p označuje stávající technologii výroby založenou na přířezu ploché obdélníkové tyče a index o značí slévárenský odlitek.

1) Pásová pila VMB 305 SC

Jednicové náklady provozu stroje (N_{mA}) za čas t_{mA} v dané operaci [77]:

$$N_{mA_{p,1}} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} \quad [Kč. ks^{-1}]. \quad (31)$$

$$N_{mA_{p,1}} = \frac{452}{60} \cdot 0,3 = 2,26 \text{ Kč. ks}^{-1}.$$

Dávkové náklady provozu stroje (N_{mB}) za čas t_{mB} v dané operaci [77]:

$$N_{mB_{p,1}} = \frac{N_{hs}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB} \quad [Kč. ks^{-1}]. \quad (32)$$

$$N_{mB_{p,1}} = \frac{452}{60.50} \cdot 18 = 2,71 \text{ Kč. ks}^{-1},$$

kde: d_v [ks] – výrobní dávka.

2) Vertikální obráběcí centrum YCM NSV102A

Jednicové náklady provozu stroje (N_{mA}) za čas t_{mA} v dané operaci [77]:

$$N_{mA_{p,2}} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA_p} \quad [\text{Kč. ks}^{-1}].$$

$$N_{mA_{p,2}} = \frac{570}{60} \cdot 35,7 = 339,15 \text{ Kč. ks}^{-1}.$$

$$N_{mA_o} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA_o} \quad [\text{Kč. ks}^{-1}].$$

$$N_{mA_o} = \frac{570}{60} \cdot 31,3 = 297,35 \text{ Kč. ks}^{-1}.$$

Dávkové náklady provozu stroje (N_{mB}) za čas t_{mB} v dané operaci [77]:

$$N_{mB_{p,2}} = \frac{N_{hs}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB_p} \quad [\text{Kč. ks}^{-1}].$$

$$N_{mB_{p,2}} = \frac{570}{60.50} \cdot 120 = 22,80 \text{ Kč. ks}^{-1}.$$

$$N_{mB_o} = \frac{N_{hs}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB_o} \quad [\text{Kč. ks}^{-1}].$$

$$N_{mB_o} = \frac{570}{60.50} \cdot 120 = 22,80 \text{ Kč. ks}^{-1}.$$

Operační náklady (N), na výrobu jednoho kusu dílce, při výrobní dávce 50 ks:

$$N_p = (N_{mA_{p,1}} + N_{mB_{p,1}}) + (N_{mA_{p,2}} + N_{mB_{p,2}}) \quad [\text{Kč. ks}^{-1}]. \quad (33)$$

$$N_p = (2,26 + 2,71) + (339,15 + 22,80) = 366,92 \text{ Kč. ks}^{-1}.$$

$$N_o = N_{mA_o} + N_{mB_o} \quad [\text{Kč. ks}^{-1}].$$

$$N_o = 297,35 + 22,80 = 320,15 \text{ Kč. ks}^{-1}.$$

Operační náklady (N_{500}) při roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹:

$$N_{500,p} = N_p \cdot s \quad [\text{Kč. série}^{-1}]. \quad (34)$$

$$N_{500,p} = 366,92 \cdot 500 = 183\,460 \text{ Kč. série}^{-1}.$$

$$N_{500,o} = N_o \cdot s \quad [\text{Kč. série}^{-1}].$$

$$N_{500,o} = 320,15 \cdot 500 = 160\,075 \text{ Kč. série}^{-1}.$$

Celkové výrobní náklady (VN_{500}) při roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹ se určí jako součet operačních nákladů a nákladů na polotovary při dané roční výrobní sérii:

$$VN_{500,p} = N_{500,p} + N_{pm}^1 \cdot s \quad [Kč.série^{-1}]. \quad (35)$$

$$VN_{500,p} = 183\,460 + 93,50 \cdot 500 = 230\,210 \text{ Kč.série}^{-1}.$$

$$VN_{500,o} = N_{500,o} + N_{pm}^1 \cdot s \quad [Kč.série^{-1}].$$

$$VN_{500,o} = 160\,075 + 165 \cdot 500 = 242\,575 \text{ Kč.série}^{-1}.$$

B. Roční výrobní série 1 000 ks.rok⁻¹

Při očekávaném navýšení roční výrobní série na 1 000 ks.rok⁻¹ se díky rozpočítání nákladů na modelové zařízení sníží cena vstupního polotovaru odlitku na 128 Kč.ks⁻¹. A tak se sníží celkové výrobní náklady na tuto roční výrobní sérii.

Operační náklady (N_{1000}) při roční výrobní sérii 1 000 ks.rok⁻¹:

$$N_{1000,p} = N_p \cdot s \quad [Kč.série^{-1}].$$

$$N_{1000,p} = 366,92 \cdot 1000 = 366\,920 \text{ Kč.série}^{-1}.$$

$$N_{1000,o} = N_o \cdot s \quad [Kč.série^{-1}].$$

$$N_{1000,o} = 320,15 \cdot 1000 = 320\,150 \text{ Kč.série}^{-1}.$$

Celkové výrobní náklady (VN_{1000}) při roční výrobní sérii 1 000 ks.rok⁻¹ se určí jako součet operačních nákladů a nákladů na polotovary při dané roční výrobní sérii:

$$VN_{1000,p} = N_{1000,p} + N_{pm}^2 \cdot s \quad [Kč.série^{-1}].$$

$$VN_{1000,p} = 366\,920 + 93,5 \cdot 1000 = 460\,420 \text{ Kč.série}^{-1}.$$

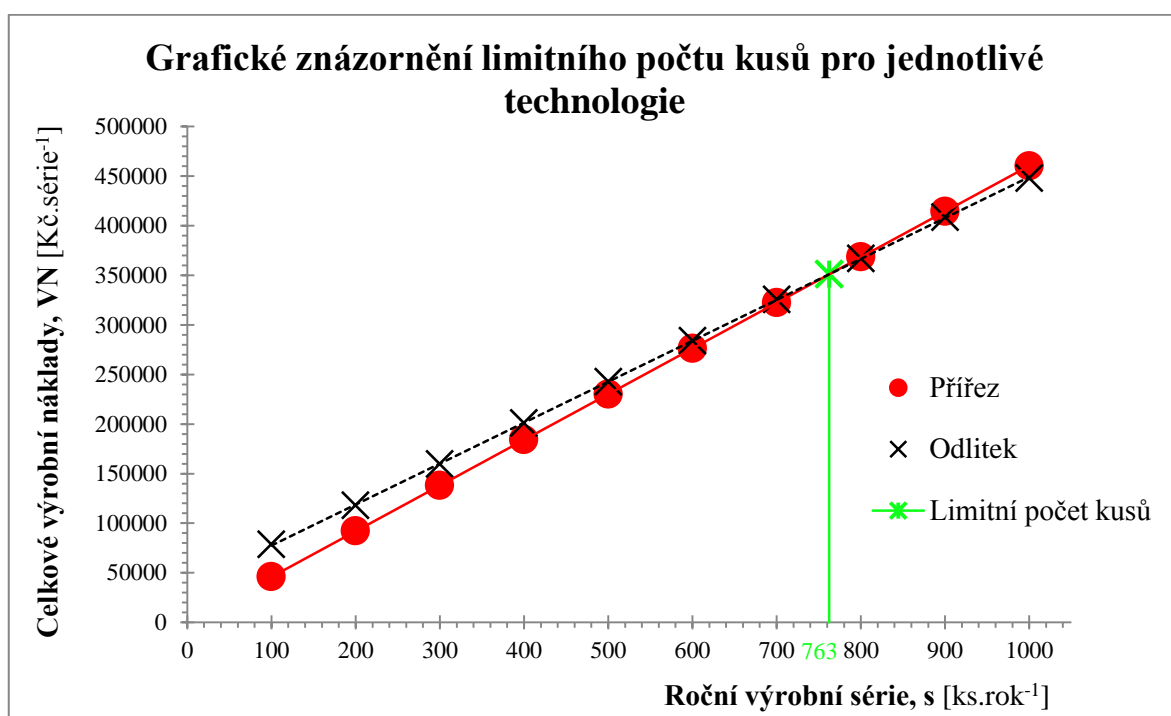
$$VN_{1000,o} = N_{1000,o} + N_{pm}^2 \cdot s \quad [Kč.série^{-1}].$$

$$VN_{1000,o} = 320\,150 + 128 \cdot 1000 = 448\,150 \text{ Kč.série}^{-1}.$$

Tab. 8 Celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹ a 1 000 ks.rok⁻¹.

Technologie	Celkové výrobní náklady při dané roční výrobní sérii [Kč.série ⁻¹]	
	500 ks.rok ⁻¹	1 000 ks.rok ⁻¹
přířez	230 210	460 420
odlitek	242 575	448 150

Po srovnání obou technologií výroby, založených na rozdílné volbě vstupního polotovaru, pro stávající roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹, je z tabulky 8 patrné, že celkové výrobní náklady při použití slévárenského odlitku jsou oproti současnému polotovaru přířezu vyšší. Navzdory vyšší vstupní ceně slévárenského odlitku je díky kratšímu strojnímu času, potřebného na obrobení levého držáku fotobuňky, rozdíl v celkových výrobních nákladech minimální. Při plánované sérii 1 000 ks.rok⁻¹ je již vhodné zavést výrobu, jejímž polotovarem je hliníkový slévárenský odlitek.



Obr. 41 Závislost celkových výrobních nákladů na roční výrobní sérii.

Z tohoto grafického znázornění (obr. 41) je zřejmé, že průsečík obou křivek určuje limitní počet kusů levého držáku fotobuňky, který je 763 ks.rok⁻¹. Při této roční výrobní sérii začíná být rentabilnější varianta s odlitkem, oproti stávající variantě s přířezem z ploché obdélníkové tyče.

5 ZPRACOVÁNÍ ŘÍDICÍHO PROGRAMU METODOU VOLUMILL NA VYBRANÝ DÍLEC

Pro výrobu daného dílce byly pomocí CAM software GibbsCAM zpracovány dva NC řídicí programy - varianta B, varianta C. Řídicí program pro variantu A, který firma AB KOMPONENTY s.r.o. v současné době pro výrobu využívá, je uveden v příloze 7.

První řídicí program pro výrobu levého držáku fotobuňky je zpracován pro variantu B - polotovar z ploché tyče, s aplikací metody VoluMill. Tato metoda je určena ke generování inovativní dráhy řezného nástroje a její použití vede ke snížení doby hrubovacích cyklů a celkově ke kratším strojním časům. Díky tomu představuje vhodné řešení pro případy, kdy je nutné z výchozího polotovaru odebrat velký objem materiálu. Což je právě případ stávající technologie, kdy je využití polotovaru přířezu pouze 29,8 % a hrubovací frézování stávajícím způsobem generuje dlouhé strojní časy. Z toho důvodu je aplikována nová metoda VoluMill. Výše uvedené výhody této metody byly ověřeny v praktickém testu, včetně vytvoření řídicího programu.

Druhý NC program je pak zpracován pro výrobní technologii, jejímž polotovarem je slévárenský odlitek – varianta C. Odlitek je navržen tak, aby využití materiálu polotovaru bylo co nejvyšší. Tím pádem u něj není nutné odebrat tak velký objem materiálu, jako v případě přířezu z ploché obdélníkové tyče. Z tohoto důvodu zde není na hrubování součásti aplikována nadstavba VoluMill.

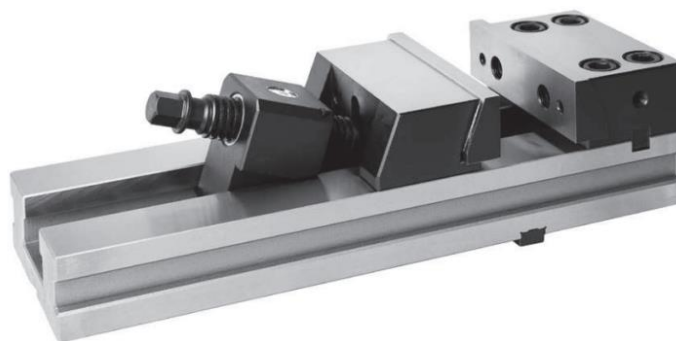
Modely byly vytvořeny v CAD systému Catia V5R20 a do GibbsCAM jsou naimportovány jako 3D objemové modely v datovém formátu .stp. V prvním programu se vychází z 3D modelu držáku fotobuňky, jehož geometrické prvky slouží pro vytváření drah řezných nástrojů. V druhém případě byl vytvořen 3D model odlitku, sloužící přímo jako polotovar vhodný k následnému obrábění.

5.1 Řídicí program – Varianta B (metoda VoluMill)

Při výrobě součásti je výchozí polotovar, plochá tyč o rozměrech 60 x 30 - 3000 mm, řezán pomocí pásové poloautomatické pily VMB 305 DS na délku 293+1 mm.

5.1.1 Výrobní operace na vertikálním obráběcím centru YCM NSV102A

Technologie je založena na současném obrábění dvou dílců upnutých do univerzálních přesných svěráků CNC 6620 od firmy ZJP, s.r.o. (obr. 42).

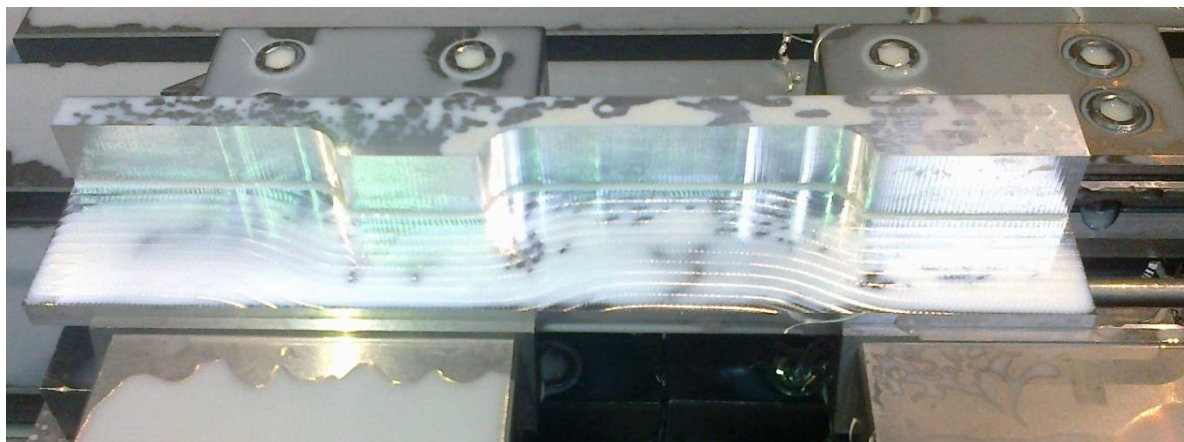


Obr. 42 Univerzální svěrák CNC 6620 [78].

Při obrábění je použita procesní kapalina CIMCOOL Cimstar 620 NFM. Jedná se o emulzní kapalinu primárně určenou pro obrábění hliníkových slitin. Koncentrace se pohybuje v rozmezí 5 % - 10 % [79].

- **Hrubování tvaru součásti**

V první operaci je na vertikálním obráběcím centru YCM NSV102A pomocí stopkové frézy ze slinutých karbidů $\phi 16$ mm hrubován předběžný tvar součásti dle programu (obr. 43). Z důvodu hrubovací operace je použita tříbřitá fréza s dostatečně velkou zubovou mezerou zajišťující dobrý odvod třísek z místa řezu a umožňující využití charakteristických vlastností metody VoluMill. Tato fréza je díky svému menšímu vyložení z držáku nástrojů zároveň dostatečně tuhá, což umožňuje použití agresivnějších řezných podmínek bez vzniku negativního kmitání, které mnohdy vede ke snížení životnosti nástroje a horší kvalitě obrobenej plochy.

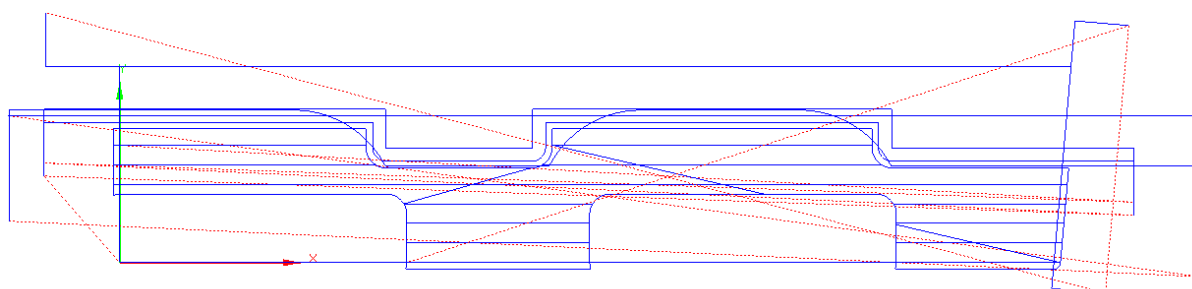


Obr. 43 Hrubování tvaru součásti metodou VoluMill.

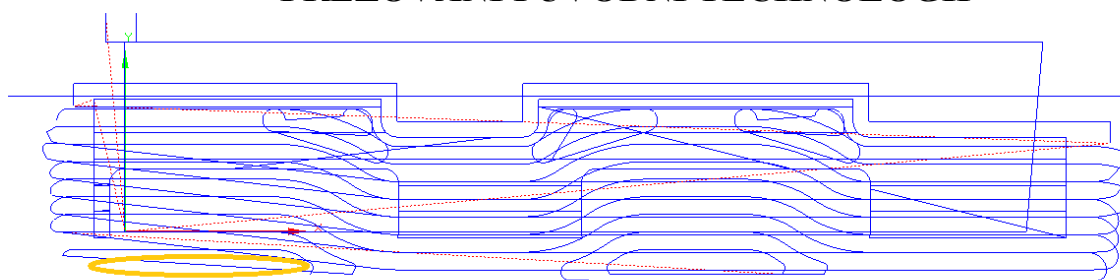
Axiální hloubka řezu činí při použití metody VoluMill 20 mm, což odpovídá požadované maximální hloubce dílce dle výkresu součásti, kterou je nutné odebrat. Jedná se tedy téměř o 60 % činné délky břitu řezného nástroje. Tím pádem je zde minimální přídavek na dokončovací obrábění, který činí 0,5 mm. Při této operaci byly zhotoveny také dvě plošky, ve výšce 20 mm. Tento přístup, s využitím velké části činné délky břitu monolitní stopkové frézy, představuje zcela odlišnou technologii, než která je použita ve variantě A při stávající výrobě. Při té je frézováno vybrání do hloubky 20 mm nástrčnou rovinnou frézou $\phi 63$ mm, na osm hloubek řezu. Touto frézovací hlavou je také frézováno horní a spodní čelo součásti na konečný rozměr, což je shodné s novou technologií výroby.

Frézou $\phi 16$ mm řady 53 522 je také dokončován celý obvod součásti a zarovnáván bok pod úhlem 5° dle výkresu součásti. Kvůli většímu průměru tohoto nástroje není součást vyrobena na konečný rozměr, ale frézuje se na šířku 39 mm.

Výsledného rozměru 47 mm je dosaženo stopkovou frézou $\phi 10$ mm, která frézuje zbytky materiálu po předcházejícím nástroji. Stejným nástrojem je dokončeno dno součásti na konečný rozměr 20,5 mm.



FRÉZOVÁNÍ PŮVODNÍ TECHNOLOGIÍ



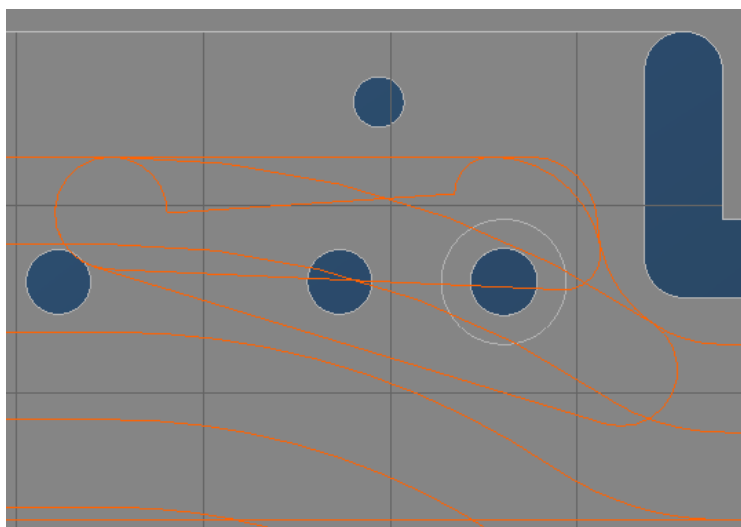
FRÉZOVÁNÍ METODOU VOLUMILL

Obr. 44 Grafické porovnání dráhy nástrojů při původní technologii frézování a metodou VoluMill.

Na obrázku 44 je názorné porovnání drah nástrojů v případě původní technologie a metody VoluMill. Dráha nástroje v řezu je znázorněna modrou čarou. Z porovnání je patrné, že při variantě technologie A je k dosažení stejného výsledku zapotřebí mnohem více pohybů nástroje mimo záběr, které jsou na obrázku znázorněny červenou tečkovanou čarou. VoluMill tyto pohyby naprázdno eliminuje na minimum, čímž dochází k větší efektivnosti celé operace a k celkovému snížení strojního času. V případě původní technologie trvá výroba dílce na tvar dle výše uvedeného obrázku 11 min 08 s, zatímco při použití VoluMill činí čas cyklu 6 min 34 s. Tím dochází ke zvýšení produktivity hrubovací operace o více než 40 %.

Programově řízený úběr materiálu udržuje konstantní tloušťku třísky a objem odebíraného materiálu během frézování. Díky této vlastnosti je udržována konzistentní teplota nástroje i obrobku. Automatické nastavení rychlosti posuvu a radiální hloubky řezu minimalizuje opotřebení nástroje, vývin tepla, požadavky na upínání obrobku a vibrace. VoluMill zajišťuje to, že je vysoký podíl procesového tepla vzniklého při obrábění odváděn v tříse. Část dráhy nástroje zvýrazněna oranžovou čarou představuje tzv. velký posuv, který je detailněji popsán v kapitole 3.2.1. VoluMill umožňuje přemístit nástroj k dalšímu řezu v již obrobené oblasti nejrychlejším možným interpolačním posuvem, místo jeho pohybu do bezpečnostní roviny.

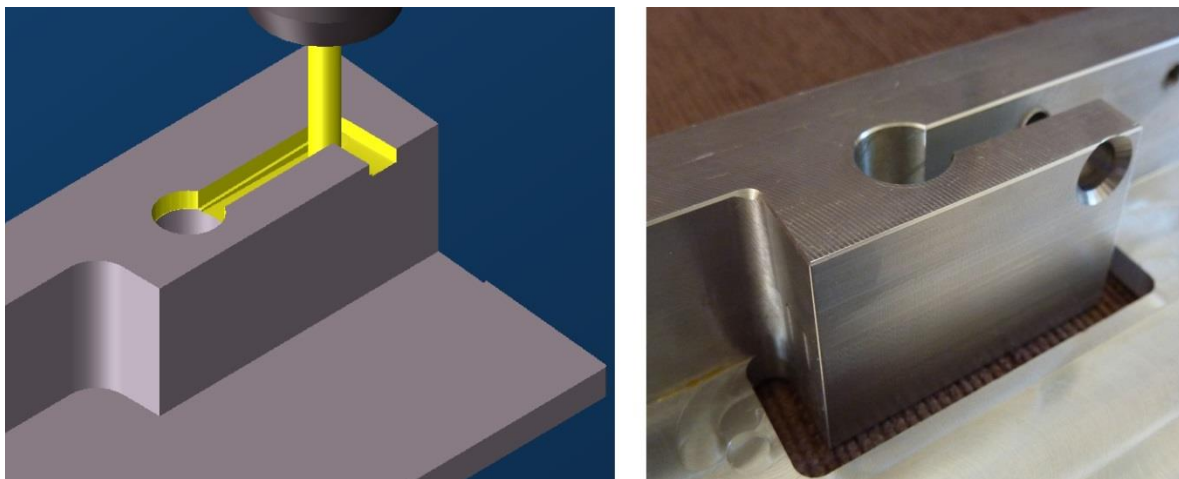
Nadstavba VoluMill také maximalizuje využití řezného nástroje tím, že má vlastnost automatického vyhlazení rádiusů, jak je vidět na obr. 45 z grafické simulace GibbsCAM. Oranžová čára pak představuje dráhu nástroje v blízkosti tvarového vybrání.



Obr. 45 Dráha nástroje při vyhlazování rádiusů.

- **Tvarová vybrání šířky 5 mm**

V dalším úkonu jsou frézována dvě tvarová vybrání šířky 5 mm (obr. 46). Jedná se o typické drážkovací frézování, při kterém se uplatní vlastnosti GibbsCAM 10. V případě varianty A byla využívána fréza $\phi 4,5$ mm, která díky svému většímu průměru vykazovala větší úhel opásání nástroje (ϕ). Výroba probíhala z obou stran součásti.

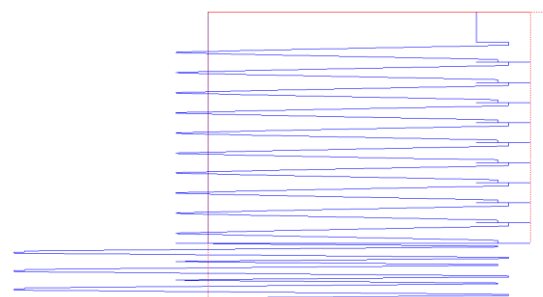


Obr. 46 Výroba tvarového vybrání s využitím rampování.

Nyní je na výrobu těchto vybrání použita odlehčená stopková fréza $\phi 4$ mm. Tvarové vybrání, které je hluboké 25 mm, je při variantě technologie B frézováno pouze z jedné strany obrobku. Nejdříve je vrtákem $\phi 9,8$ mm předvrtán otvor pro $\phi 10H8$. V případě varianty A je drážka frézována nejdříve do hloubky 20,5 mm, a to na osm hloubek řezu, jak je vidět na grafickém porovnání obou strategií na obr. 47. Následně je její tvar dokončen z druhé strany součásti. Nástroj najede do požadované hloubky řezu a po každém tomto řezu následuje jeho pohyb zpět do bezpečné vzdálenosti $Z = 3$ mm, čímž opět dochází ke generování „mrtvých časů“, kdy nástroj neodebírá materiál obrobku.



PŮVODNÍ TECHNOLOGIE



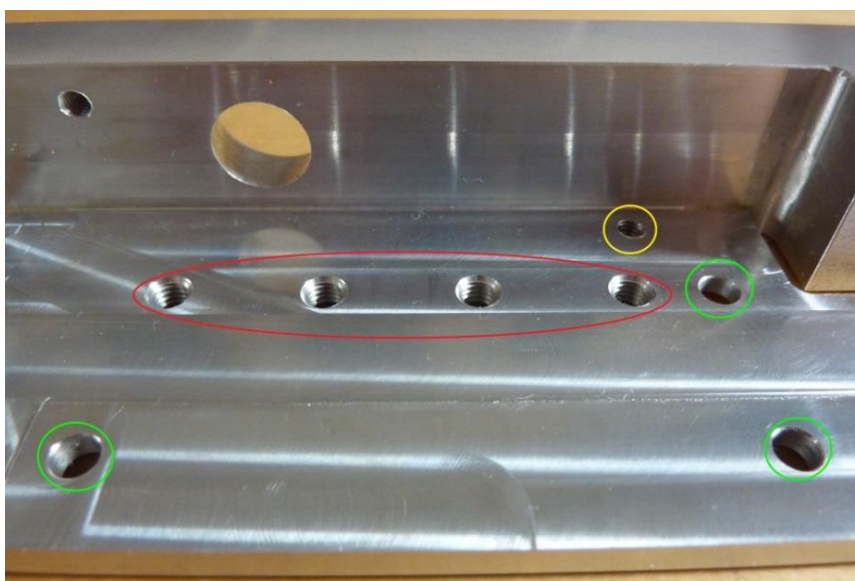
RAMPOVÁNÍ

Obr. 47 Porovnání drah původní technologie frézování a s využitím rampování.

GibbsCAM pro výrobu tohoto tvarového vybrání využívá jednu ze svých charakteristických vlastností řízení dráhy řezného nástroje. A to rampování, které maximalizuje úběr materiálu v těsných prostorách a poskytuje bezpečný přístup do tvarově úzkých částí obrobku. Při sjíždění na požadovanou hloubku řezu je zde používán definovaný úhel a posuv rampování. Rampa neobsahuje žádné ostré změny směru pohybu nástroje. Modul automaticky vypočítává dráhu nástroje. Výsledkem je jeho pohyb přes již obrobený otvor $\phi 10H8$ mm. Tím pádem opouští nástroj tvarové vybrání a zároveň má v tomto místě čas na své ochlazení, což se kladně projevuje na jeho celkové životnosti. Při variantě A trvá obrábění obou tvarových vybrání 8 min 8 s. Zatímco v případě aplikace rampování je doba cyklu zkrácena o 15 % na hodnotu 6 min 53 s.

- **Vrtání otvorů**

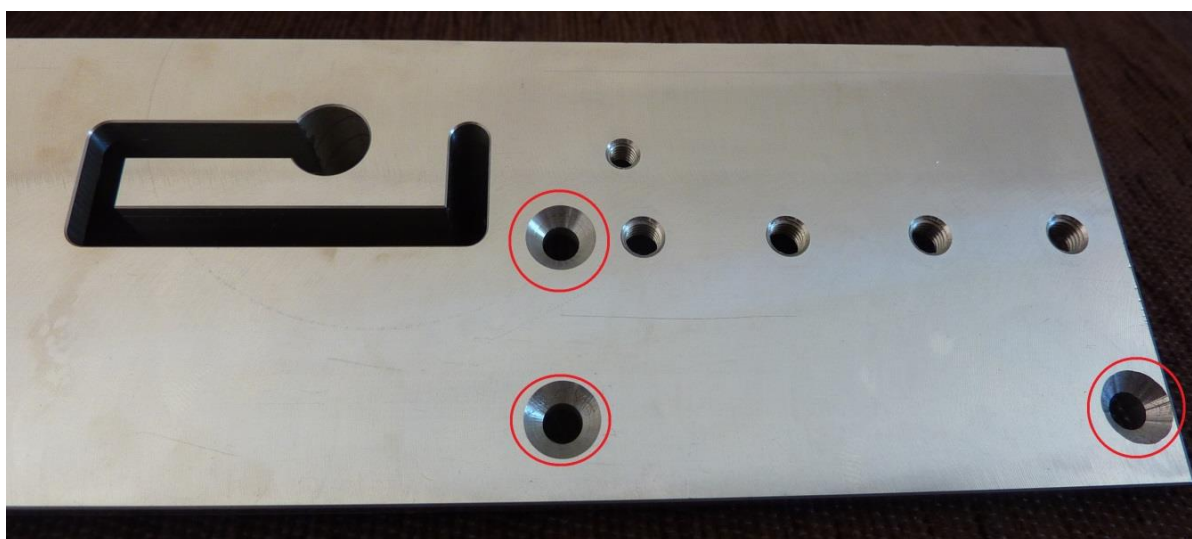
Po frézování těchto vybrání následuje výroba otvorů vrtáky ze slinutých karbidů. Nejdříve je vrtán $\phi 4,2 - 8x$ (červené zvýraznění) pro metrický závit M5 a poté $\phi 3,3 - 2x$ (žluté zvýraznění) pro M4. Následně je vrtákem $\phi 4,5$ mm vrtán $\phi 4,3^{+0,3}_0 - 6x$ (zelené zvýraznění) pro šrouby se zápustnou hlavou, jak je vidět na obrázku 48.



Obr. 48 Vrtání otvorů.

- **Odjehlení součásti**

Monolitní frézou na srážení hran ze slinutých karbidů $\phi 12$ mm jsou kromě $\phi 3,3$ - 2x odjehleny všechny otvory z přední strany dílce. Díry $\phi 3,3$ mm se nachází příliš blízko stěny dílce, a tím pádem nelze provést jejich strojní odjehlení nástrojem $\phi 12$ mm. Tyto otvory jsou odjehleny na ručním pracovišti. Dále jsou frézou na srážení hran sraženy hrany $2 \times 45^\circ$ mm a $4 \times 45^\circ$ mm na vnějším obvodu levého držáku fotobuňky. Z druhé strany součásti jsou před závitováním odjehleny otvory určeny pro závity M5 a M4. Poslední operací tohoto nástroje je zahloubení $\phi 8^{+0,5}/90^\circ$ - 6x, jak je vidět na obr. 49.



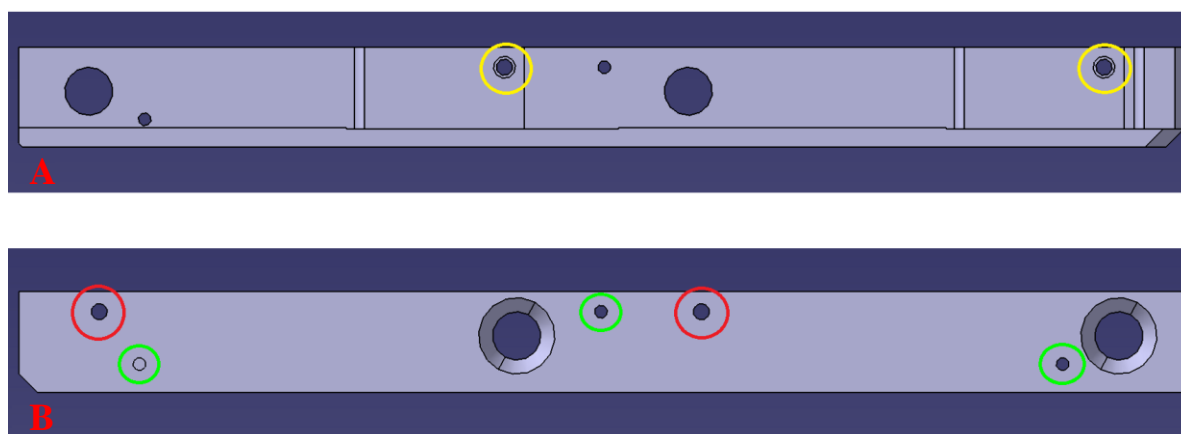
Obr. 49 Zahloubení pro šrouby se zápuštnou hlavou.

- **Řezání závitů**

Na závěr jsou na YCM NSV102A řezány metrické závity M5 - 8x a M4 - 2x dle výkresu součásti. Jsou použity strojní řezací závitníky z rychlořezné oceli se třemi rovnými drážkami opatřené CrN povlakem. Aplikace tohoto vysoce otěruvzdorného povlaku umožňuje využití vyšších hodnot řezných rychlostí. Dále zajišťuje lepší odvod třísek, vyšší kvalitu opracování a vyšší odolnost proti opotřebení. Závitník má tvar náběhu B, kdy je náběh v délce 4 až 5 stoupání závitu. Toto provedení je vhodné pro průchozí otvory, což je právě případ těchto závitů [80].

5.1.2 Výrobní operace na vertikálním obráběcím centru YCM NSV156A

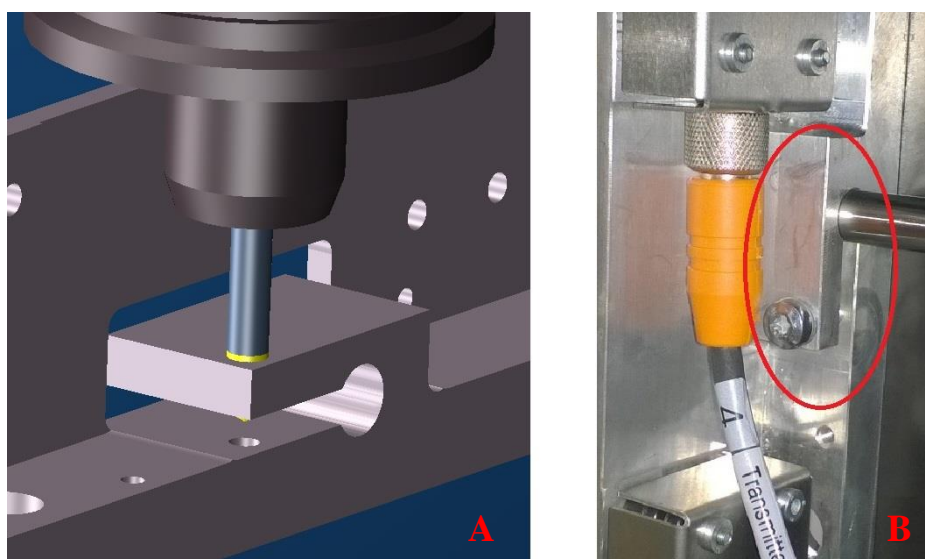
Další část výroby levého držáku NC řezacího stolu probíhá na druhém vertikálním obráběcím centru YCM NSV156A. Jedná se o výrobu všech otvorů na bočních stranách součásti, jak je vidět na obr. 50. Součást je opět upnuta v univerzálních svěrácích CNC 6620 a to obráběnou plochou směrem k vřetenu obráběcího stroje, jako na obrázku 50A. Druhá součást je pak otočena o 180° (obr. 50B).



Obr. 50 Obráběné prvky na YCM NSV156A.

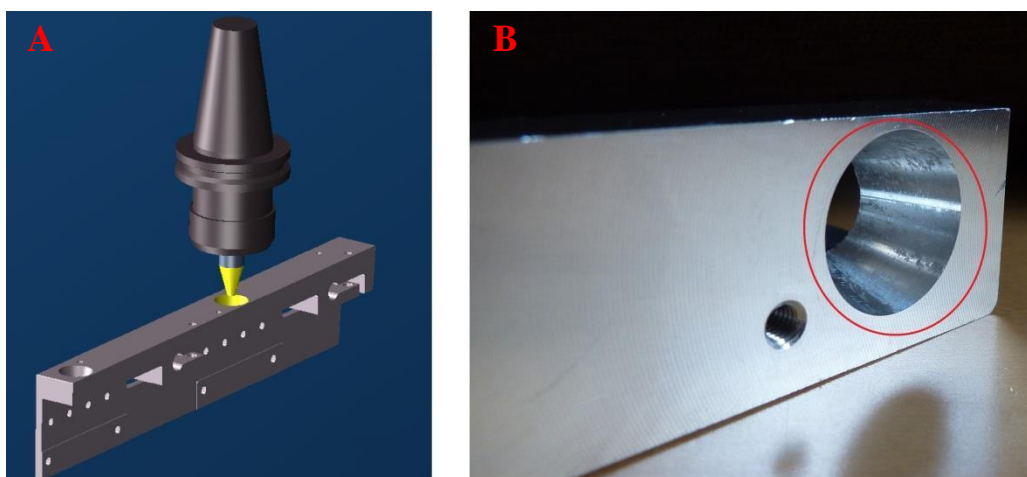
- **Otvor $\phi 5,5^{+0,5}_0$ mm**

Nejdříve je vrtákem ze slinutých karbidů $\phi 5,6$ mm vrtán otvor $\phi 5,5^{+0,5}_0$ - 2x (žluté zvýraznění + obr. 51A). Jedná se o otvor, který po zašroubování příslušného šroubu vytváří svěrné spojení. Toto svěrné spojení ustavuje dvě vodící tyče fotobuňky NC řezacího stolu Kongsberg v otvoru $\phi 10H8$ mm, jak je vidět na obrázku 51B. Po vrtání jsou tyto otvory zbaveny nežádoucích ostřin.

Obr. 51 Svěrné spojení: A) výroba otvoru $\phi 5,5^{+0,5}_0$ mm, B) detail svěrného spojení.

- **Kuželové otvory**

Po výrobě otvorů pro svěrné spojení následuje výroba dvou kuželových otvorů (obr. 52A). Detail jednoho z těchto otvorů, je vidět na obrázku 52B. Nejdříve jsou vrtákem ze slinutých karbidů $\phi 11$ mm předvrtány dvě díry pro kuželový otvor $\phi 19/\phi 12/30^\circ$ mm. Poté následuje výroba samotného kuželového otvoru. Nástrojem je zde dvoubřitá kuželová fréza ze slinutých karbidů, s vrcholovým úhlem 30° a s monovrstevným povlakem AluSpeed. Jedná se o nástroj vyrobený na zakázku pro společnost AB KOMPONENTY s.r.o. od firmy UniCut s.r.o.



Obr. 52 A) výroba kuželových otvorů, B) detail kuželového otvoru.

- **Vrtání, odjehlení, řezání závitů**

Dále jsou stejnými nástroji jako na prvním obráběcím stroji vrtány díry pro metrické závity $\phi 4,2$ - 2x pro M5 (obr. 50 B červené zvýraznění) a $\phi 3,3$ - 3x pro M4 (obr. 50 B zelené zvýraznění). V další operaci jsou frézou na srážení hran $\phi 12$ mm odjehleny $\phi 4,2$ - 2x a $\phi 3,3$ - 3x. Závěrečnou operací na tomto vertikálním obráběcím centru je řezání metrických závitů M5 - 2x a M4 - 3x do již předvrtaných děr.

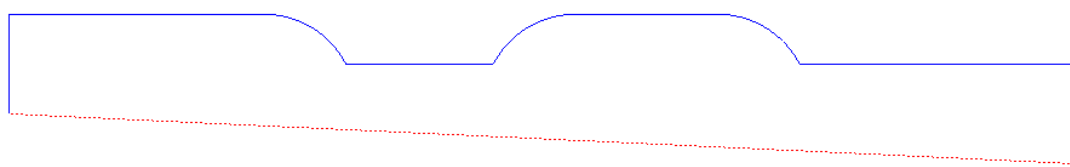
5.1.3 Porovnání NC programů

V příloze 8. je na základě post-processingu vygenerovaný pro výrobu levého držáku fotobuňky NC program metodou VoluMill. Oproti NC programu, který společnost AB KOMPONENTY s.r.o. v současné době pro výrobu tohoto dílce využívá je tento program delší. Je to dáno tím, že VoluMill oproti stávajícímu způsobu frézování automaticky vypočítává a dynamicky upravuje polohu nástroje při frézování. Ukázka částí NC programů je uvedena v následující tabulce 9.

Tab. 9 Porovnání NC programů původní technologie frézování a metody VoluMill.

Původní technologie	VoluMill
G1Z-5.F1000.	X315.366Y-6.167I-.416J4.101
G42Y46.7	X307.296Y-1.001Z-19.8I-7.994J-3.602F5000.
X53.354F1500.	G2X302.126Y-1.012I-3.428J395.637
G2X81.234Y29.861J-31.5	G1X299.296Y-1.002F4967.33
G3X81.5Y29.7I.266J.139	X296.77Y-1.F9934.65
G1X131.5	X237.86F10000.
G3X131.765Y29.861J.3	G2X235.182Y-.962J94.748
G2X159.646Y46.7I27.881J-14.661	X232.512Y-.779I.938J33.173
G1X208.354	X230.747Y-.532I5.089J42.921
G2X236.234Y29.861J-31.5	X228.994Y-.21I6.173J38.435
G3X236.5Y29.7I.266J.139	X225.191Y.832I7.906J36.354
G1X330.969	X221.517Y2.265I11.977J36.122
G40Y-4.3	X218.869Y3.62I15.598J33.75
G0Z3.	X216.335Y5.176I19.317J34.297

Z tabulky 9 je patrné, že VoluMill automaticky mění hodnoty posuvové rychlosti, která je v tab. 9 zvýrazněna zelenou barvou. Zatímco při původní technologii frézování je vybrání hrubováno pouze jednou, výrazně menší hodnotou posuvové rychlosti. VoluMill neustále vypočítává pozici nástroje, což je také vidět na ukázce NC programu. V případě původní technologie frézování je výše uvedenými čtrnácti řádky programu popsána celá dráha frézy $\phi 63$ mm, potřebná pro výrobu jedné hloubky vybrání (viz modrá čára na obr. 53).



FRÉZOVÁNÍ PŮVODNÍ TECHNOLOGIÍ



FRÉZOVÁNÍ METODOU VOLUMILL

Obr. 53 Porovnání délky drah.

Metodou VoluMill je stejným počtem řádků NC řídicího programu, díky automaticky aktualizované poloze nástroje, popsána výrazně kratší část dráhy rezného nástroje, což je patrné ze zeleného zvýraznění na obrázku 53.

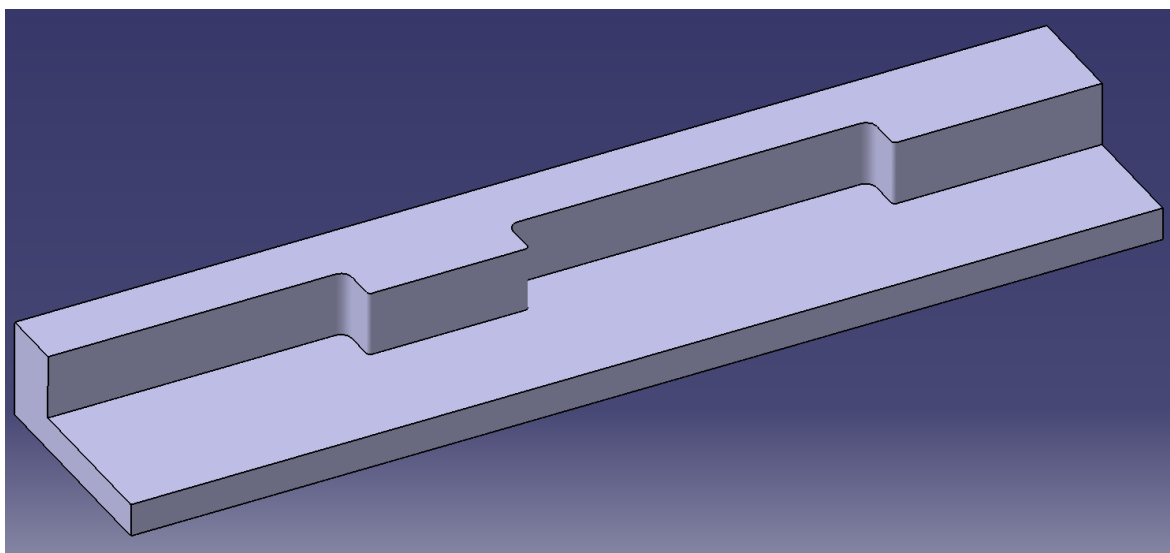
Další rozdíl v dráze nástroje je u výroby dvou tvarových vybrání šířky 5 mm. V případě varianty B je využíváno vlastnosti GibbsCAM 10, rampování. Řezný nástroj kontinuálně postupuje až na konečnou hloubku řezu bez zpětných pohybů do bezpečné hladiny Z, čímž se zkracuje doba cyklu. Z tab. 10 je z červeného zvýraznění patrné, že u rampování se axiální hloubka řezu mění po malých inkrementech. Grafické porovnání obou drah je uvedeno na obr. 47.

Tab. 10 Porovnání původní technologie výroby tvarového vybrání a s využitím rampování.

Původní technologie	Rampování
G1Z-2.562F500.	G43Z3.H13M8
X128.75F300.	G1Z0.F500.
Y42.	X129.5
G3X126.5Y44.25I-2.25	Y44.5Z-.312F600.
G1X105.83	G3X129.Y45.Z-.329I-.5
G3X103.881Y43.125J-2.25	G1X105.83Z-.819
G2Y45.875I-2.381J1.375	G2X104.098Y46.Z-.864J2.
G3X105.83Y44.75I1.949J1.125	G3Y43.Z-1.196I-2.598J-1.5
G1X129.	G2X105.83Y44.Z-1.24I1.732J-1.
G2X129.25Y44.5J-.25	G1X126.5Z-1.678
G1X127.25	G2X128.5Y42.Z-1.744J-2.
G0Z3.	G1Y29.927Z-2.
X129.75Y26.443	X131.5

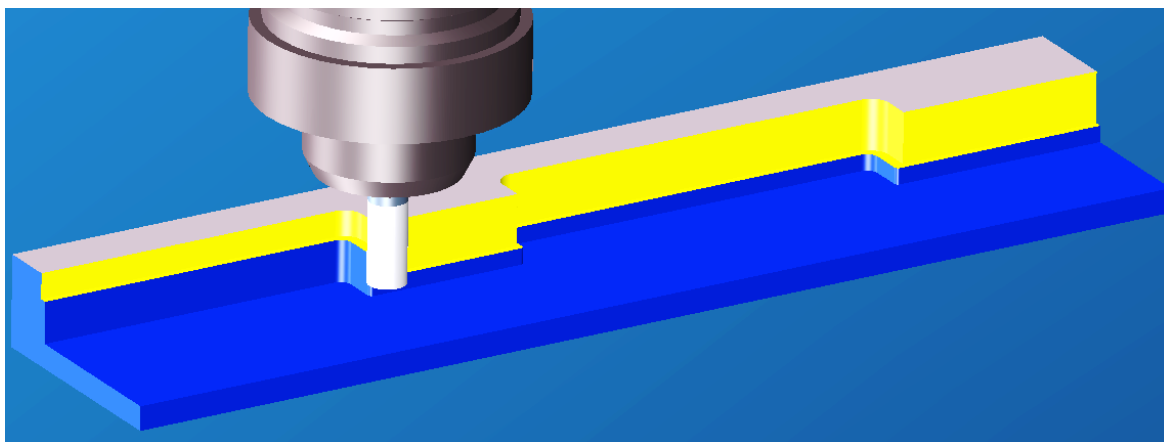
5.2 Řídicí program – Varianta C (odlitek)

Druhý řídicí NC program je zpracován pro hliníkový slévárenský odlitek. Výchozí polotovary pro software GibbsCAM je uveden na obr. 54. Na základě poskytnuté nabídky na výrobu tohoto dílce od slévárny hliníku A jsou na obráběných plochách voleny přídavky na obrábění 2 mm. Pro výrobu odlitku byla použita technologie gravitačního odlévání, která neumožňovala na daném dílci předlití otvorů malých rozměrů.



Obr. 54 Návrh polotovaru odlitku.

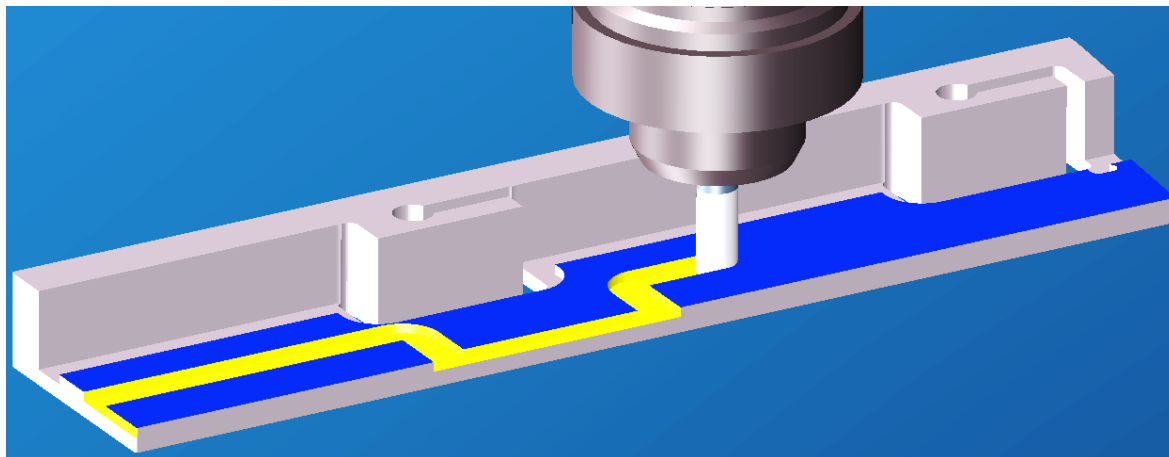
Řídicí program je velmi podobný programu zpracovanému pro variantu B. V první operaci je vynecháno hrubování tvaru součásti stopkovou frézou $\phi 16$ mm, které bylo realizováno pomocí VoluMill. Po frézování horního a spodního čela nástrčnou rovinnou frézou následuje frézování součásti u tvarových vybrání dle programu monolitní stopkovou frézou ze slinutých karbidů $\phi 10$ mm (obr. 55). Díky větším přídávkům na obrábění na boční stěně je zde větší radiální hloubka řezu než v případě varianty B, tím pádem je zde snížena posuvová rychlost.



Obr. 55 Frézování u tvarových vybrání.

Následuje výroba dvou tvarových vybrání šířky 5 mm. Poté je stopkovou frézou $\phi 10$ mm řady 53 522 frézováno dno součásti na konečnou výšku 20,5 mm (obr. 56). Díky

přídavkům na obráběné plochy hliníkového odlitku 2 mm je zde větší přídavek na dokončení než v předcházejícím programu. Z toho důvodu je u odlitku větší axiální hloubka řezu a snížena posuvová rychlost.



Obr. 56 Dokončovací frézování dna součásti.

Následuje frézování dvou plošek nástrčnou rovinnou frézou $\phi 63$ mm na výšku 20 mm. Vrtání všech otvorů, jejich odjehlení, sražení hran a řezání závitů je shodné jako v minulém programu varianty B. Rovněž totožné jsou všechny operace prováděné na druhém vertikálním obráběcím centru YCM NSV156A.

Pomocí programu editNC je u obou variant technologie provedena zpětná kontrola dráhy řezných nástrojů z NC řídicího programu vygenerovaného na základě post-processingu software GibbsCAM. Tento NC kód s koncovkou .NCF je přímo určen k výrobě levého držáku fotobuňky na CNC vertikálních obráběcích centrech. Tato aplikace nabízí mnoho užitečných vlastností k verifikaci a editaci NC programů. Řadí se mezi ně např. analýza a 3D vizualizace dráhy nástroje, což se uplatňuje při porovnání stávajícího stavu s metodou VoluMill. Výstupem je také obecná analýza programu, která umožňuje vyhodnotit maximální či minimální hodnoty posuvů nebo otáček vřetene [81].

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRO KONKRÉTNÍ POČET KUSŮ

Pro finanční vyhodnocení jednotlivých variant technologie výroby levého držáku fotobuňky NC řezacího stolu je zpracováno technicko-ekonomické zhodnocení. A to pro stávající roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹ a také pro série, které se očekávají s růstem výroby tohoto dílce v následujících letech – 1 000 ks.rok⁻¹ a 5 000 ks.rok⁻¹. Z těchto vyhodnocení se určí, zda by bylo pro společnost AB KOMPONENTY s.r.o. zajímavé na základě kratších strojních časů uvažovat o zavedení metody VoluMill do výroby, či při zvýšení roční série zvolit slévárenský hliníkový odlitek oproti přífězu z ploché obdélníkové tyče.

Tab. 11 Vstupní hodnoty pro technicko-ekonomické zhodnocení.

Pracoviště	Jednotkový čas pracoviště [min]			Dávkový čas pracoviště [min]			Náklady na hodinu provozu pracoviště [Kč.h ⁻¹]
	t _{mA} ^A	t _{mA} ^B	t _{mA} ^C	t _{mB} ^A	t _{mB} ^B	t _{mB} ^C	N _{hs}
1 - VMB 305 DC	0,3	0,3	---	18	18	---	452
2 - YCM NSV102A	35,7	26,3	31,3	120	120	120	570
3 - YCM NSV156A	8,0	8,0	8,0	40	40	40	570
4 - začištění	4,5	4,5	4,5	6	6	6	247
5 - odmaštění	0,2	0,2	0,2	6	6	6	590

Pozn.: ^A Varianta A (původní technologie), ^B Varianta B (metoda VoluMill), ^C Varianta C (odlitek)

V jednotkovém času stroje t_{mA} z tabulky 11 je dle zvyklostí společnosti AB KOMPONENTY s.r.o. zahrnut strojní čas dané operace, čas výměn nástrojů a nutné přestávky. Tento výsledný čas je následně navýšen o 25 %.

V případě stávající technologie frézování, varianty A, jsou uvedeny časy z již zavedené výroby. Časy u metody VoluMill byly nejdříve teoreticky zjištěny pomocí simulace obrábění v CAM software GibbsCAM a následně ověřeny při praktickém testu. U varianty C, využívající slévárenský odlitek, jsou uvedeny teoretické strojní časy z GibbsCAM. Na základě hodnot uvedených v tabulce 11 jsou vypočteny konkrétní výrobní náklady pro jednotlivé varianty technologie.

Operační náklady (N), na výrobu jednoho kusu dílce, při výrobní dávce 50 ks [77]:

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{N_{hs1}}{60} \cdot t_{mA1} + \frac{N_{hs1}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB1} + \frac{N_{hs2}}{60} \cdot t_{mA2} + \frac{N_{hs2}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB2} + \frac{N_{hs3}}{60} \cdot t_{mA3} + \\
 &+ \frac{N_{hs3}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB3} + \frac{N_{hs4}}{60} \cdot t_{mA4} + \frac{N_{hs4}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB4} + \frac{N_{hs5}}{60} \cdot t_{mA5} + \frac{N_{hs1}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB5} \Rightarrow \quad (36) \\
 N &= \sum_{i=1}^5 \left(\frac{N_{hs_i}}{60} \cdot t_{mA_i} + \frac{N_{hs_i}}{60 \cdot d_v} \cdot t_{mB_i} \right) \quad [Kč. ks^{-1}].
 \end{aligned}$$

Operační náklady (N_A), na výrobu jednoho kusu dílce, při variantě A [77]:

$$N_A = \frac{452}{60} \cdot 0,3 + \frac{452}{60.50} \cdot 18 + \frac{570}{60} \cdot 35,7 + \frac{570}{60.50} \cdot 120 + \frac{570}{60} \cdot 8 + \frac{570}{60.50} \cdot 40 + \\ + \frac{247}{60} \cdot 4,5 + \frac{247}{60.50} \cdot 6 + \frac{590}{60} \cdot 0,2 + \frac{590}{60.50} \cdot 6 = 472,69 \text{ Kč.ks}^{-1}.$$

Operační náklady při stávající variantě výroby levého držáku fotobuňky jsou 472,69 Kč.ks⁻¹. V tabulce 12 jsou uvedeny operační náklady na další dvě navrhované varianty.

Tab. 12 Operační náklady, na výrobu jednoho kusu dílce, při výrobní dávce 50 ks.

Technologie	Operační náklady [Kč.ks ⁻¹]
Varianta A – původní technologie	472,69
Varianta B – metoda VoluMill	383,39
Varianta C – odlitek	425,92

Do výrobních nákladů na jeden kus dílce (VN) je započtena i cena materiálu. U prvních dvou variant výroby jsou přímé náklady na plochou obdélníkovou tyč pro všechny roční výrobní série shodné, a to 93,50 Kč. Náklady u varianty C se snižují s rostoucí roční výrobní sérií, což se projevuje také na celkových nákladech na výrobu jednoho kusu dílce, jak je vidět v tabulce 13. Je to dáno rozpočítáním ceny modelového zařízení na více kusů hliníkového slévárenského odlitku. Určení přímých nákladů na materiál pro jednotlivé technologie je uvedeno již v kapitole 4.4.

Náklady na výrobu jednoho kusu dílce (VN) se tedy určí jako součet operačních nákladů (N) a nákladů na přímý materiál (N_{pm}).

Náklady na výrobu jednoho kusu dílce (VN_A) při Variantě A:

$$VN_A = N_A + N_{pm_A} \quad [\text{Kč.ks}^{-1}].$$

$$VN_A = 472,69 + 93,50 = 566,19 \text{ Kč.ks}^{-1}.$$

Náklady na výrobu jednoho kusu dílce (VN_B) při Variantě B:

$$VN_B = N_B + N_{pm_B} \quad [\text{Kč.ks}^{-1}].$$

$$VN_B = 383,39 + 93,50 = 476,89 \text{ Kč.ks}^{-1}.$$

Náklady na výrobu jednoho kusu dílce (VN_C) při Variantě C:

$$VN_C = N_C + N_{pm_C} \quad [\text{Kč.ks}^{-1}].$$

$$VN_C = 425,92 + 165 = 590,92 \text{ Kč.ks}^{-1}.$$

V tabulce 13 jsou určeny náklady na výrobu jednoho kusu dílce pro všechny technologie výroby a roční výrobní série.

Tab. 13 Náklady na výrobu jednoho kusu dílce pro jednotlivé varianty technologie a roční série.

Technologie	Náklady na výrobu jednoho kusu dílce [Kč.ks ⁻¹]		
	500 ks.rok ⁻¹	1 000 ks.rok ⁻¹	5 000 ks.rok ⁻¹
Varianta A – původní technologie	566,19	566,19	566,19
Varianta B – metoda VoluMill	476,89	476,89	476,89
Varianta C – odlitek	590,92	553,92	523,92

Celkové výrobní náklady na danou roční výrobní sérii (VN_s) se pak určí jako výrobní náklady na jeden kus dílce (VN) vynásobené danou roční výrobní sérií. Níže uvedené výpočty jsou provedeny pro stávající roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹. Celkové výrobní náklady na očekávané roční série jsou pro jednotlivé varianty technologie uvedeny v tabulce 14.

Celkové výrobní náklady (VN_{A,500}) při Variantě A:

$$VN_{A,500} = VN_A \cdot s \quad [\text{Kč. série}^{-1}].$$

$$VN_{A,500} = 566,19 \cdot 500 = 283\,095 \text{ Kč. série}^{-1},$$

Celkové výrobní náklady (VN_{B,500}) při Variantě B:

$$VN_{B,500} = VN_B \cdot s \quad [\text{Kč. série}^{-1}].$$

$$VN_{B,500} = 476,89 \cdot 500 = 238\,445 \text{ Kč. série}^{-1}.$$

Celkové výrobní náklady (VN_{C,500}) při Variantě C:

$$VN_{C,500} = VN_C \cdot s \quad [\text{Kč. série}^{-1}].$$

$$VN_{C,500} = 590,92 \cdot 500 = 295\,460 \text{ Kč. série}^{-1}.$$

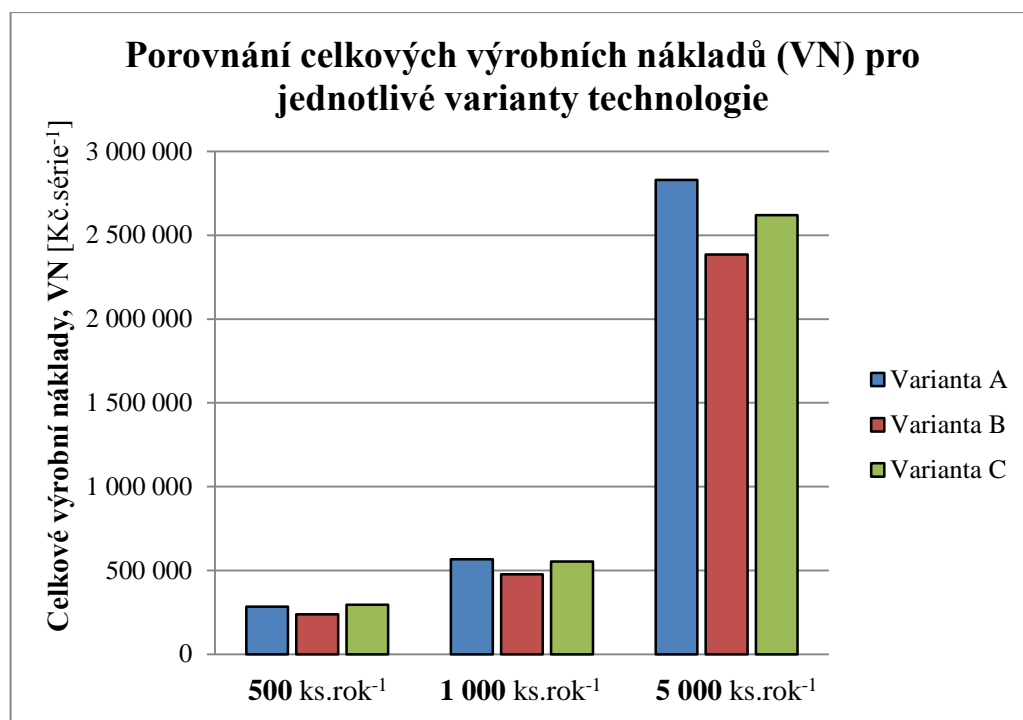
Tab. 14 Celkové výrobní náklady pro jednotlivé varianty technologie a roční série.

Technologie	Celkové výrobní náklady na danou roční výrobní sérii [Kč.série ⁻¹]		
	500 ks.rok ⁻¹	1 000 ks.rok ⁻¹	5 000 ks.rok ⁻¹
Varianta A – původní technologie	283 095	566 190	2 830 950
Varianta B – metoda VoluMill	238 445	476 890	2 384 450
Varianta C – odlitek	295 460	553 920	2 619 600

Při návrhu technologie byla věnována pozornost zejména snížení strojních časů. Důvod je ten, že operační náklady, ve kterých jsou právě tyto časy započteny, představují až 80 % z celkových nákladů na výrobu jednoho kusu dílce. Zkrácení strojního času se do celkové ceny výrobku promítne podstatně více než cena vstupního polotovaru. Těchto cílů lze docílit volbou metody VoluMill, která je určena pro zkrácení doby hrubovacích cyklů, nebo aplikací slévárenského odlitku, u kterého se očekává menší množství odebíraného materiálu a tím pádem zkrácení strojních časů.

Z porovnání celkových výrobních nákladů (VN) pro jednotlivé varianty technologie na obrázku 57 je zřejmé, že při všech ročních výrobních sériích je nejvýhodnější

varianta B – frézování metodou VoluMill. Je to dáno zejména nejkratším strojním časem potřebným na výrobu právě touto technologií výroby. Cenová úspora na jeden kus je v porovnání s původní technologií výroby 89,30 Kč, tedy téměř 16 %. Při stávající roční výrobní sérii činí celková úspora 44 650 Kč. Při očekávané roční výrobní sérii 5 000 ks.rok⁻¹ může úspora dosáhnout až podstatných 446 500 Kč. Proto aplikace metody VoluMill při zpracovávání NC řídicích programů znamená pro společnost finanční úsporu při výrobě tohoto dílce téměř ihned.



Obr. 57 Grafické znázornění celkových výrobních nákladů pro jednotlivé varianty technologie.

V případě varianty C, kdy je aplikován hliníkový slévárenský odlitek, je z důvodu vysoké vstupní ceny polotovaru odlitku při stávající roční výrobní sérii stále výhodnější využívat přířez z ploché tyče. Odlitek začíná být cenově výhodnější až od limitního počtu 763 ks.rok⁻¹, jak je uvedeno v kapitole 4.4. V případě očekávaných sérií 1 000 ks.rok⁻¹ a 5 000 ks.rok⁻¹ je při variantě C cenová úspora na jeden kus dílce 12,27 Kč, respektive 42,27 Kč. Úspora celkových nákladů při sérii 5 000 ks.rok⁻¹ činí oproti variantě A 211 350 Kč, tedy 7,5 %.

ZÁVĚR

Stále častěji se začíná do strojírenské výroby promítat vliv nových progresivních metod obrábění, které se neobejdou bez podpory výkonných CAD/CAM systémů. Je to důsledkem vývoje v oblasti hardware a software, které umožňují provádět náročné výpočetní operace a následně aplikovat tyto obráběcí strategie v řídicím systému CNC obráběcích strojů. K rozmachu těchto metod v neposlední řadě přispívají nově vyvinuté řezné nástroje, např. monolitní frézy ze slinutých karbidů s proměnným úhlem stoupání šroubovice a nestejnou roztečí zubů. Nástroje jsou také opatřeny novými typy povlaků, jako je DLC povlak, který odolává náročným podmínkám v obráběcím procesu a minimalizuje vznik nárůstku při obrábění adhezivních materiálů. Tento typ povlaku mají i nasazené monolitní frézy ze slinutých karbidů řady AluLine typ W od německé společnosti WNT.

Diplomová práce řeší návrh technologie výroby levého držáku fotobuňky pro NC řezací stůl. Pro počáteční výrobu byl polotovár tohoto dílce zvolen z přířezu ploché obdélníkové tyče z tvářené hliníkové slitiny řady 6xxx. Jelikož je u tohoto polotovaru velmi malý koeficient využití materiálu ($k_m = 29,8 \%$), je zde řešena i možnost jeho změny na slévárenský odlitek. Dále je řešena změna původní technologie výroby, protože náklady na odebrání tak velkého objemu materiálu obrobku a s ním spojené operační náklady činí až 80 % celkových nákladů na výrobu jednoho kusu dílce. Zvýšení produktivity obrábění je docíleno nasazením metody VoluMill, což je nadstavba CAM software GibbsCAM. Tato metoda, určená pro hrubovací frézování, automaticky upravuje dráhu řezného nástroje a zajišťuje, aby úhel opásání nástroje nepřekročil požadovanou hodnotu. Tím nedochází k přetížení nástroje a je možné využívat větší hodnoty posuvů, čímž se zvyšuje celková produktivita frézovací operace. Navzdory použití takto agresivních řezných podmínek se snižuje opotřebení řezných nástrojů a zvyšuje se tak jejich životnost a dochází k finanční úspoře spojené s náklady na nástroje.

Výstupem diplomové práce je porovnání a vyhodnocení jednotlivých variant technologie výroby a návržení nejvhodnější metody s důrazem na sériovost a celkové výrobní náklady na výrobu levého držáku fotobuňky. Porovnání nákladů na výrobu jednoho kusu dílce pro navržené varianty výroby, lišící se zvolenou strategií obrábění, s využitím VoluMill a následně použitým polotovarem je následující:

- Varianta A (původní technologie) – 566,19 Kč.ks⁻¹,
- Varianta B (metoda VoluMill) – 476,89 Kč.ks⁻¹,
- Varianta C (odlitek) – 590,92 Kč.ks⁻¹.

Po porovnání těchto nákladů, které se skládají z operačních nákladů a nákladů na vstupní polotovár, pro stávající roční výrobní sérii 500 ks.rok⁻¹, je zřejmé, že nejvýhodnější je varianta B – frézování metodou VoluMill. Oproti původní technologii je úspora na jednom kusu levého držáku fotobuňky 16 % (89,30 Kč). Celková dosažená úspora s využitím

metody VoluMill je 44 650 Kč. Při očekávané roční výrobní sérii 5 000 ks.rok⁻¹ je tato úspora téměř 450 000 Kč.

Při variantě výroby s využitím odlišného polotovaru, kterým je slévárenský hliníkový odlitek, jsou z důvodu vysoké vstupní ceny odlitku náklady při stávající roční sérii vyšší, než v případě varianty A. Limitním počtem kusů pro tuto technologii je 763 ks.rok⁻¹. Pro obě očekávané roční výrobní série 1 000 ks.rok⁻¹ a 5 000 ks.rok⁻¹ by bylo finančně výhodnější zavedení hliníkového slévárenského odlitku do výroby oproti přířezu z obdélníkové tyče. U odlitku je nutné počítat s jeho delší dobou zavádění do procesu výroby, kdy jeho výroba spolu s potřebným modelovým zařízením je časově náročnější než v případě polotovaru, kterým je přířez. Změnu polotovaru na odlitek, jako v případě levého držáku fotobuňky, však není možné realizovat u každé součásti. Naopak metoda VoluMill je univerzální a lze ji ihned aplikovat na široké spektrum součástí.

Vhodnou investicí do CAM software s využitím jejich vlastností a metod obrábění dochází ke zvýšení produktivity a snížení nákladů na obrábění. Vzhledem k tomu, že metoda VoluMill může najít využití nejenom u levého držáku fotobuňky NC řezacího stolu, ale i při výrobě mnoha dalších součástí ve společnosti AB KOMPONENTY s.r.o., znamenalo by její zavedení pro společnost výrazné úspory celkových nákladů na výrobu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. 1. Ústí nad Labem: PrintPoint Praha, s.r.o., 2014, 245 s. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [2] MICHNA, Štefan et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [3] PODRÁBSKÝ, T., NĚMEC, K., JULIŠ, M. *Přednáška – Neželezné kovy a jejich slitiny I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [4] PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Přednáška – Neželezné kovy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [5] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [6] PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Přednáška – Strojírenské materiály (kovové materiály)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [7] MINERALS.NET. *Bauxite*. [online]. [vid. 2016-02-15] Dostupné z: <http://www.minerals.net/mineral/bauxite.aspx>
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. str. 396.
- [9] ALUCAD BOHEMIA, s.r.o. *Technické údaje*. [online]. [vid. 2016-03-01] Dostupné z: http://www.alucad.cz/public/var/files/file_109.pdf
- [10] FERONA, a.s. *Evropské značení hliníku a slitin hliníku*. [online]. [vid. 2016-02-29] Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/nezelezne_kovy.php?typ=2#
- [11] ESAB VAMBERK, s.r.o. *Evropský systém značení hliníku a jeho slitin*. [online]. [vid. 2016-02-29] Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Znacen%C3%ADAI_2005.pdf
- [12] THE ALUMINIUM ASSOCIATION, Inc. *Selection and Applications*. [online]. [vid. 2016-02-29] Dostupné z: <http://www.calm-aluminium.com.au/documents/aluminium-alloys.pdf>
- [13] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. str. 225. 80-214-2374-9.
- [14] HUMÁR, Anton. *Technologie I, Technologie obrábění - I. část*. [online]. [vid. 2016-01-15] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [15] KAKÁČ, Martin. *Slinuté karbidy pro obrábění korozivzdorných ocelí*. Brno, 2014. 40s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie obrábění. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [16] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem*. [online]. [vid. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>

- [17] SANDVIK CZ, s.r.o. *Frézování hliníku*. [online]. [vid. 2016-02-12]
Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/aluminium_milling/pages/default.aspx
- [18] DE VOS, Patrick. *Příručka pro technology – Opotřebení se nevyhneme*. MM Průmyslové spektrum. [online]. [vid. 2016-02-16] Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [19] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. str. 857. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [20] FUKUI, H., OKIDA J., OMORI, N., MORIGUCHI, H., TSUDA, K. *Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys*. Surface and Coatings Technology. [online]. [vid. 2016-03-02] Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897204000428>
- [21] AB SANDVIK COROMANT. *Produktivní obrábění kovů*. Sandviken: AB Sandvik Coromant, 1997.
- [22] DE VOS, Patrick. *Příručka pro technology: Frézování - nezapomněli jsme jeho základy*. MM Průmyslové spektrum. [online]. [vid. 2016-01-17] Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-frezovani-nezapomneli-jsme-jeho-zaklady.html>
- [23] KOUŘIL, Karel. *Přednáška - Základní pojmy z teorie obrábění: Frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [24] KOUŘIL, Karel. *Přednáška - Základy z teorie obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [25] SECO TOOLS CZ, s.r.o. *Frézování – Příručka pro technology*. Brno: Seco Tools CZ, s.r.o., 2013.
- [26] WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *Základy frézování*. Velké Meziříčí: WNT Česká republika s.r.o., 2014.
- [27] KOUŘIL, Karel. *Přednáška - Základní pojmy z teorie obrábění: Utváření třísky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [28] CHLADIL, Josef. *Přesnášky - Teorie obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [29] BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání*. [online]. [vid. 2016-03-05]
Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf
- [30] FIALA, Zdeněk. *Přednáška 4 - Řezné síly*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [31] SANDVIK CZ, s.r.o. *Maximální tloušťka třísky*. [online]. [vid. 2016-01-26]
Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/max_chip_thickness/pages/default.aspx

- [32] SECO TOOLS CZ, s.r.o. *Mechanické zatížení při frézování*. [online]. [vid. 2016-01-21] Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Aktuality/TECHNICKE-LANKY/Mechanicke-zatizeni-pri-frezovani/>
- [33] SANDVIK CZ, s.r.o. *Úhel nastavení*. [online]. [vid. 2016-01-25] Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/entering_angle/pages/default.aspx
- [34] SANDVIK CZ, s.r.o. *Frézování rohů*. [online]. [vid. 2016-03-08] Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/milling_in_corners/pages/default.aspx
- [35] WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *Katalog 2014*. Velké Meziříčí: WNT Česká republika s.r.o., 2014.
- [36] IŽOL,P., ĎURÍČEK, M. *CAM systémy a hodnocení strategií obrábění*. [online]. [vid. 2016-01-31] Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2385-cam-systemy-a-hodnoceni-strategii-obrabeni.html>
- [37] IBARAKI, S., YAMAJI, I., MATSUBARA, A. *On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving*. Precision Engineering, 2010, Vol.34(3), pp.467-473 [online]. [vid. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635910000103>
- [38] RAUCH M., DUC E., HASCOET J. *Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modeling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, Vol.49(5), pp.375–383 [online]. [vid. 2016-02-02] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508002332>
- [39] SECO TOOLS CZ, s.r.o. *Trochoidní frézování*. [online]. [vid. 2016-01-21] Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/Global/Services--Support/Tool-Selection-Support/Trochoidal-Milling/>
- [40] SZALÓKI, I., CSESZNOK, S., CSUKA, S., SIPOS, S., *Can trochoidal milling be ideal?* Manufacturing 2012 The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies. [online]. [vid. 2016-02-03] Dostupné z: http://www.forgacsolaskutatas.hu/innovacio/can_trochoidal_milling_be_ideal/
- [41] WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *Trochoidní frézování*. Velké Meziříčí: WNT Česká republika s.r.o., 2014
- [42] GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. *VoluMill - Features and Benefits*. [online]. [vid. 2015-11-23] Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/gibbs-cam-mlr118-web.pdf>
- [43] GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. *VoluMill - Maximizing Machine Efficiencies*. [online]. [vid. 2015-11-23]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/gibbs-cam-mlr120-web.pdf>
- [44] GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. *VoluMill Gives 10x Feedrate for Performance*. [online]. [vid. 2015-11-23]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/gibbs-cam-mlr119-web.pdf>

- [45] GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. *Why VoluMill for GibbsCAM*. [online]. [vid. 2015-11-23]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/data/File/pdf/why-volumill-for-gibbscam-web.pdf>
- [46] GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. *Začínáme s VoluMill*. Moorpark: Celeritive Technologies, Inc., 2014
- [47] GIBBS AND ASSOCIATES, A CIMATRON COMPANY. *VoluMill pro GibbsCAM*. [online]. [vid. 2016-02-01] Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/cs/solutions/gibbscam-modules/volumill-gibbscam#.VrISvbLhDIW>
- [48] CELERITIVE TECHNOLOGIES, Inc. *How VoluMill Works*. [online]. [vid. 2016-02-12] Dostupné z: <http://www.volumill.com/content/how-volumill-works>
- [49] TECHNOLOGY-SUPPORT s.r.o. *VoluMill – vysoce výkonné 2- a 3-osé hrubování pro CNC obrábění*. [online]. [vid. 2016-02-14] Dostupné z: <http://www.t-support.cz/kat/volumill-vysoce-vykonne-2-a-3-ose-hrubovani-pro-cnc-obrabeni>
- [50] CELERITIVE TECHNOLOGIES, Inc. *VoluMill Universal Reference v2.1*. [online]. [vid. 2016-04-08] Dostupné z: http://www.celeritive.com/documents/VoluMill_Universal_Reference_Guide.pdf
- [51] CELERITIVE TECHNOLOGIES, Inc. *What's New in VoluMill 7.0*. [online]. [vid. 2016-02-12] Dostupné z: http://www.volumill.com/sites/default/files/V7_NX_Whats_New.pdf
- [52] CELERITIVE TECHNOLOGIES, Inc. *MillingAdvisor*. [online]. [vid. 2016-02-14] Dostupné z: <http://www.volumill.com/syndicatedfr/MillingAdvisor.php>
- [53] TECHNOLOGY-SUPPORT s.r.o. *MillingAdvisor*. [online]. [vid. 2016-02-14] Dostupné z: <https://www.t-support.cz/novinka/millingadvisor>
- [54] SANDVIK CZ, s.r.o. *Rozteč a zn*. [online]. [vid. 2016-01-25] Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/pitch_and_zn/pages/default.aspx
- [55] SANDVIK CZ, s.r.o. *Vibrace*. [online]. [vid. 2016-01-27] Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/vibration/pages/default.aspx
- [56] iMachining Overview - Introduction. Youtube [online]. 01.11.2012 [vid. 2016-02-05] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=kqD6r3FNaCY>. Kanál uživatele SolidCAMProfessor.
- [57] SOLIDCAM CZ, s.r.o. *iMachining – Brochure 2012 CZ*. Brno: SolidCAM CZ, s.r.o., 2012.
- [58] SOLIDCAM CZ, s.r.o. *Prezentace: iMachining – 2D, 3D*. Brno: SolidCAM CZ, s.r.o., 2015.
- [59] SOLIDCAM CZ, s.r.o. *Prezentace: SolidCAM 2015/InventorCAM 2015*. Brno: SolidCAM CZ, s.r.o., 2015.
- [60] SOLIDCAM CZ, s.r.o. *Dráhy nástroje*. [online]. [vid. 2016-02-05] Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/imachining/imachining-toolpaths/>

- [61] SOLIDCAM, Inc., *iMachining – Frequently Asked Questions*. Newtown: SolidCAM, Inc., 2014.
- [62] SOLIDCAM, Inc., *iMachining Presentation*. Newtown: SolidCAM, Inc., 2013.
- [63] SOLIDCAM, Inc., *SolidCAM iMachining – Getting Started Interactive*. Newtown: SolidCAM, Inc., 2013.
- [64] SOLIDCAM CZ, s.r.o. *3D iMachining*. [online]. [vid. 2016-02-05] Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/imachining/imachining-3d/>
- [65] ESKO-Graphics, BVBA. *Kongsberg C*. [online]. [vid. 2016-02-21] Dostupné z: www.esko.com/en/products/overview/Kongsberg-c/overview/
- [66] DATALINE TECHNOLOGY, a.s. *Kongsberg - řezací stoly*. [online]. [vid. 2016-02-21] Dostupné z: <http://dataline.cz/digitalni-vyrezavani/>
- [67] NEDAL ALUMINIUM, B.V. *Alloy data sheet - EN AW-6060 [AlMgSi]*. [online]. [vid. 2016-03-01] Dostupné z: http://www.nedalextrusion.com/files/4013/0678/5548/Data_6060.pdf
- [68] PROKOP, Jaroslav. *Přednáška - HTV2: Metodika navrhování výrobních postupů obráběných součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [69] VASON CZ s.r.o. *NSVI02A*. [online]. [vid. 2016-02-21] Dostupné z: <http://www.vason.cz/vmc/nsv-series/nsv102a>
- [70] VASON CZ s.r.o. *YCM - NSV serie - CNC vysokorychlostní vertikální obráběcí centra*. Vsetín: Vason CZ s.r.o., 2016.
- [71] YEONG CHIN MACHINERY INDUSTRIES CO., LTD. *NSV Series - E-catalogue-ENG*. Schengang : Yeong Chin Machinery Industries CO., LTD., 2015.
- [72] WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *Nové produkty pro obráběcí techniky - TK frézy typ W*. Velké Meziříčí: WNT Česká republika s.r.o., 2015.
- [73] WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *Pokročilé školení - nové produkty 2015*. Velké Meziříčí: WNT Česká republika s.r.o., 2015.
- [74] CEMECON, s.r.o. *CC AluSpeed*. [online]. [vid. 2016-03-15] Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/povlakovani/cc-aluspeed.aspx>
- [75] AB KOMPONENTY s.r.o. *Kuželová fréza s vrcholovým úhlem 30°*. Brno: AB KOMPONENTY s.r.o., 2015.
- [76] PROKOP, Jaroslav. *Přednáška – HTV 7: Výběr optimální varianty obráběcího stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [77] PROKOP, Jaroslav. *Přednáška - HTR1: Technologicko-ekonomické aspekty CNC obráběcích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [78] ZJP, s.r.o. *Přesný svěrák pro CNC 6620*. [online]. [vid. 2016-04-16] Dostupné z: <http://www.zjp.cz/presny-sverak-pro-cnc-6620/p2455>
- [79] CIMCOOL INDUSTRIAL PRODUCTS B.V. *CIMSTAR 620 NFM*. [online]. [vid. 2016-04-16] Dostupné z: <http://www.cimcool.com/wp-content/uploads/manage-msds-pif/pif/cs620nfm.pdf>

[80] WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *Technologie závitování*. Velké Meziříčí:
WNT Česká republika s.r.o., 2016.

[81] TECHNOLOGY-SUPPORT.CZ. *editNC - editor a verifikace NC programů*. [online].
[vid. 2016-03-22] Dostupné z: [https://www.t-support.cz/kat/
editnc-editor-a-verifikace-nc-programu](https://www.t-support.cz/kat/editnc-editor-a-verifikace-nc-programu)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CAD	[-]	computer aided design/drafting
CAM	[-]	computer aided manufacturing
CNC	[-]	computer numerical control
CNN	[-]	celostátní normy a normativy
DLC	[-]	diamond-like carbon
FCC	[-]	kubická plošně středěná mřížka
HA	[-]	válcová stopka
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
HSS-E	[-]	rychlořezná ocel
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
IDD	[-]	isolated direct drive
MRR	[cm ³ .min ⁻¹]	material removal rate
NC	[-]	numerical control
NO	[-]	nástrojová ocel
PVD	[-]	physical vapoured deposition
SK	[-]	slinutý karbid
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
A _{Di}	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
A _r	[-]	atomová hmotnost
D	[mm]	průměr frézy
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
F _c	[N]	řezná síla
F _f	[N]	posuvová síla
F _{sh}	[N]	tečná síla působící v rovině maximálních smykových napětí
F _{shN}	[N]	normálová síla působící v rovině maximálních smykových napětí
F _γ	[N]	tečná síla působící na čele nástroje

$F_{\gamma N}$	[N]	normálová síla působící na čele nástroje
$N_{1000,o}$	[Kč.série ⁻¹]	operační náklady při roční výrobní sérii 1000 ks.rok ⁻¹ pro odlitek
$N_{1000,p}$	[Kč.série ⁻¹]	operační náklady při roční výrobní sérii 1000 ks.rok ⁻¹ pro přířez
$N_{500,o}$	[Kč.série ⁻¹]	operační náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok ⁻¹ pro odlitek
$N_{500,p}$	[Kč.série ⁻¹]	operační náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok ⁻¹ pro přířez
N_{hs}	[Kč.h ⁻¹]	náklady na hodinu provozu stroje
N_{mA_0}	[Kč.ks ⁻¹]	jednicové náklady provozu obráběcího centra YCM NSV102A za čas t_{mA} pro odlitek
$N_{mA_{p,1}}$	[Kč.ks ⁻¹]	jednicové náklady provozu pásové pily VMB 305 SC za čas t_{mA} pro přířez
$N_{mA_{p,2}}$	[Kč.ks ⁻¹]	jednicové náklady provozu obráběcího centra YCM NSV102A za čas t_{mA} pro přířez
N_{mB_0}	[Kč.ks ⁻¹]	dávkové náklady provozu obráběcího centra YCM NSV102A za čas t_{mA} pro přířez
$N_{mB_{p,1}}$	[Kč.ks ⁻¹]	dávkové náklady provozu pásové pily VMB 305 SC za čas t_{mB} pro přířez
$N_{mB_{p,2}}$	[Kč.ks ⁻¹]	dávkové náklady provozu obráběcího centra YCM NSV102A za čas t_{mA} pro přířez
N_o	[Kč.ks ⁻¹]	operační náklady, na výrobu jednoho kusu dílce pro odlitek
N_p	[Kč.ks ⁻¹]	operační náklady, na výrobu jednoho kusu dílce pro přířez
N_{pmA}	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na přímý materiál při Variantě A
N_{pmB}	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na přímý materiál při Variantě B
N_{pmC}	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na přímý materiál při Variantě C
N_{pm_o}	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na přímý materiál odlitku
N_{pm_p}	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na přímý materiál přířezu
Q_m	[kg]	norma spotřeby materiálu

Q_s	[kg]	hmotnost hotové součásti
R_{dc}	[mm]	radiální hloubka řezu
R_{env}	[mm]	polovina šířky drážky
R_m	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_{tool}	[mm]	poloměr řezného nástroje
R_{troch}	[mm]	poloměr trochoidy
S_{tr}	[mm]	krok trochoidy
T	[min]	trvanlivost řezného nástroje
T_t	[°C]	teplota tavení
T_v	[°C]	teplota varu
V	[m ³]	objem
$VN_{1000,o}$	[Kč.série ⁻¹]	celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 1000 ks.rok ⁻¹ pro odlitek
$VN_{1000,p}$	[Kč.série ⁻¹]	celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 1000 ks.rok ⁻¹ pro přířez
$VN_{500,o}$	[Kč.série ⁻¹]	celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok ⁻¹ pro odlitek
$VN_{500,p}$	[Kč.série ⁻¹]	celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok ⁻¹ pro přířez
VN_A	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na výrobu jednoho kusu dílce při Variantě A
$VN_{A,500}$	[Kč.série ⁻¹]	celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok ⁻¹ při Variantě A
VN_B	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na výrobu jednoho kusu dílce při Variantě B
$VN_{B,500}$	[Kč.série ⁻¹]	celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok ⁻¹ při Variantě B
VN_C	[Kč.ks ⁻¹]	náklady na výrobu jednoho kusu dílce při Variantě C
$VN_{C,500}$	[Kč.série ⁻¹]	celkové výrobní náklady při roční výrobní sérii 500 ks.rok ⁻¹ při Variantě C
Z_m	[kg]	celková ztráta materiálu

a	[nm]	parametr krystalové mřížky FCC
a _e	[mm]	radiální hloubka řezu
a _p	[mm]	axiální hloubka řezu (šířka záběru ostří)
b	[mm]	jmenovitá šířka třísky
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
c _m	[Kč]	cena materiálu
c _{mod}	[Kč]	cena modelového zařízení
c _o	[Kč]	cena odpadu
c _{odl}	[Kč]	cena slévárenského odlitku
d _v	[ks]	výrobní dávka
f _n	[mm]	posuv na otáčku
f _z	[mm]	posuv na zub
h	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
h _m	[mm]	střední tloušťka třísky
i _o	[-]	index kinetické obrobiteľnosti
k _{c1}	[-]	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
k _{ci}	[MPa]	měrná řezná síla (měrný řezný odpor)
k _m	[%]	koeficient využití materiálu
l _t	[J.kg ⁻¹]	latentní teplot tavení
l _v	[J.kg ⁻¹]	latentní teplot varu
m	[kg]	hmotnost
m _c	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky h
n	[min ⁻¹]	otáčky
s	[ks.rok ⁻¹]	roční výrobní série
s _š	[mm]	stoupání šroubovice
t _{mA}	[min]	jednotkový čas stroje
t _{mAp}	[min]	jednotkový čas obráběcího centra YCM NSV102A pro přířez
t _{mAo}	[min]	jednotkový čas obráběcího centra YCM NSV102A pro odlitek
t _{mB}	[min]	dávkový čas stroje

t_{mB_p}	[min]	dávkový čas obráběcího centra YCM NSV102A pro přířez
t_{mB_o}	[min]	dávkový čas obráběcího centra YCM NSV102A pro odlitek
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_{cT}	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost při dané trvanlivosti T
v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rychlost
Z_z	[-]	počet zubů frézy v záběru
α	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	součinitel teplené roztažnosti
θ	[°]	úhel trochoidy
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná vodivost
μ	[-]	součinitel tření na čele nástroje
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
ρ_e	[Ω.m]	měrný elektrický odpor
φ	[°]	úhel opásání nástroje (úhel posuvového pohybu)
Φ	[°]	úhel střižné roviny

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Nástrojové vybavení
Příloha 2	Technologický postup – Varianta A (původní technologie)
Příloha 3	Technologický postup – Varianta B (metoda VoluMill)
Příloha 4	Technologický postup – Varianta C (odlitek)
Příloha 5	Koeficient využití materiálu, k_m (přířez z ploché tyče)
Příloha 6	Výkres součásti – Photocell holder left
Příloha 7	NC řídicí program – Varianta A (původní technologie)
Příloha 8	NC řídicí program – Varianta B (metoda VoluMill)
Příloha 9	NC řídicí program – Varianta C (odlitek)

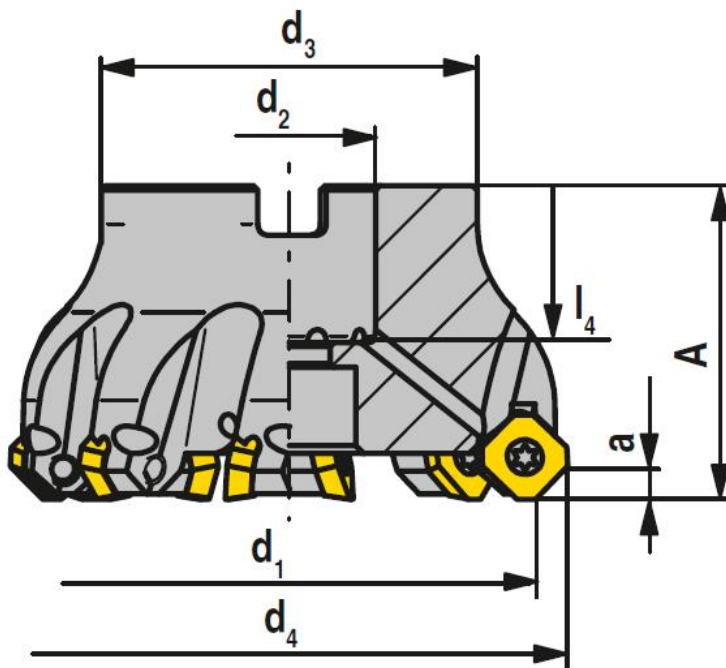
Příloha 1: Nástrojové vybavení

- **Nástrčná fréza rovinná (T10)**

- úzká rozteč zubů pro maximální řezný výkon při rovinném frézování

- 6 zubů

- $\kappa_r = 45^\circ$



Tab. Parametry.

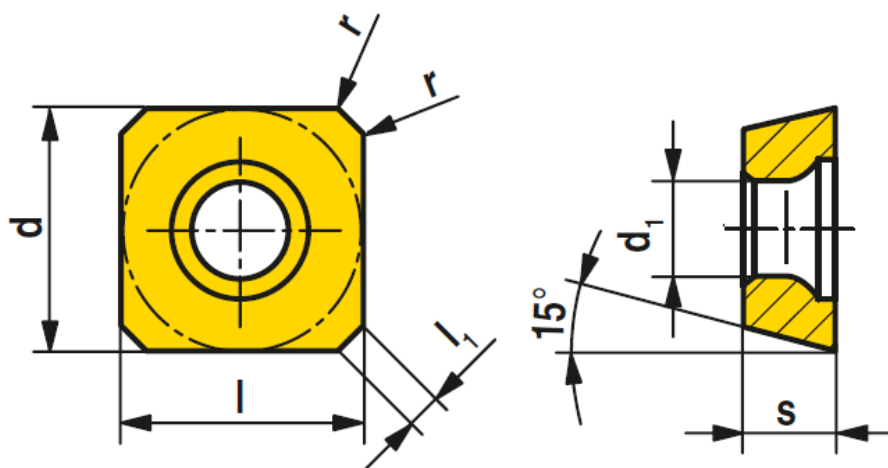
Označení	d_1 [mm]	$d_{2\ H6}$ [mm]	A [mm]	l_4 [mm]	a [mm]	d_3 [mm]	d_4 [mm]
A270.63.R.06-12	63	22	40	20	6	48	77

- Frézovací vyměnitelná břitová destička SDHT

- materiál: slinuté karbidy typu CWK26

- leštěná VBD

- ALP utvářec třísek určený pro neželezné kovy




Tab. Parametry.


Označení	l_1 [mm]	l [mm]	s [mm]	d_1 [mm]	r [mm]
SDHT 1204AEFN-ALP	1,74	12,7	4,76	5,5	1

Tab. Doporučené řezné podmínky.

Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]	a_p [mm]
SDHT 1204AEFN-ALP	< 2000	0,10-0,25	2,00-4,00

CWK 26






Složení:
6,0 % Co, zbytek WC

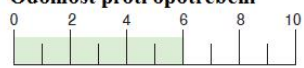
Velikost zrn:
1 μm

Tvrдость:
HV₃₀ 1630


Houževnatost



Odolnost proti opotřebení



S procesní kapalinou / za sucha



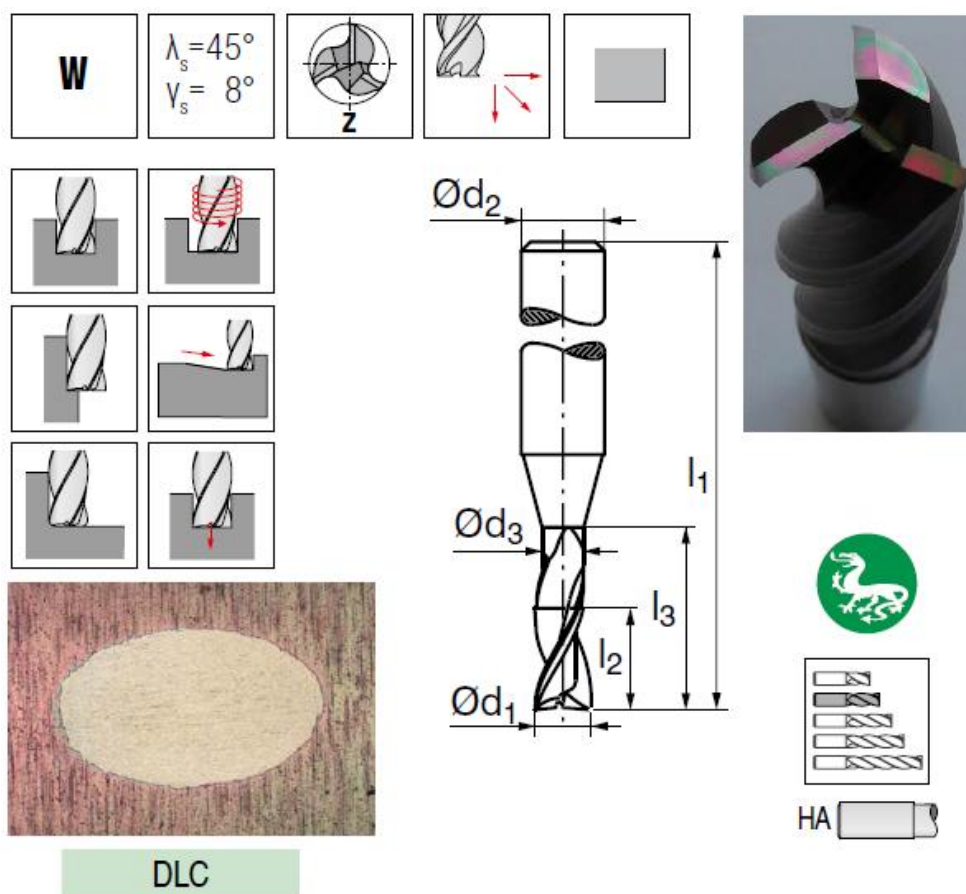
- **Stopková fréza (T11)**

- materiál: slinuté karbidy

- povlak: DLC (druh povlaku: PVD, struktura: monovrstvý, materiál: uhlík, tloušťka vrstvy: max. 0,6 μm, mikrotvrdość: HV 0,05 = 6000, max. aplikační teplota: 550 °C)

- stopka: válcová (HA)

- délka: krátká



Tab. Parametry.

Označení	$d_{1\ h6}$ [mm]	l_2 [mm]	d_3 [mm]	l_3 [mm]	l_1 [mm]	$d_{2\ h5}$ [mm]	Z [-]
W-SF.16,0.Z3.45°.R.HA.K	16	36	15	42	92	16	3

Tab. Doporučené řezné podmínky.

Označení	v_c [m.min ⁻¹]	$a_e\ 0,1-0,2$ x d_1	$a_e\ 0,3-0,4$ x d_1	$a_e\ 0,6-1,0$ x d_1	$a_{p\ max.}\ x\ d_1$ [mm]
		f_z [mm]			
W-SF.16,0.Z3.45°.R.HA.K	420	0,203	0,155	0,120	1

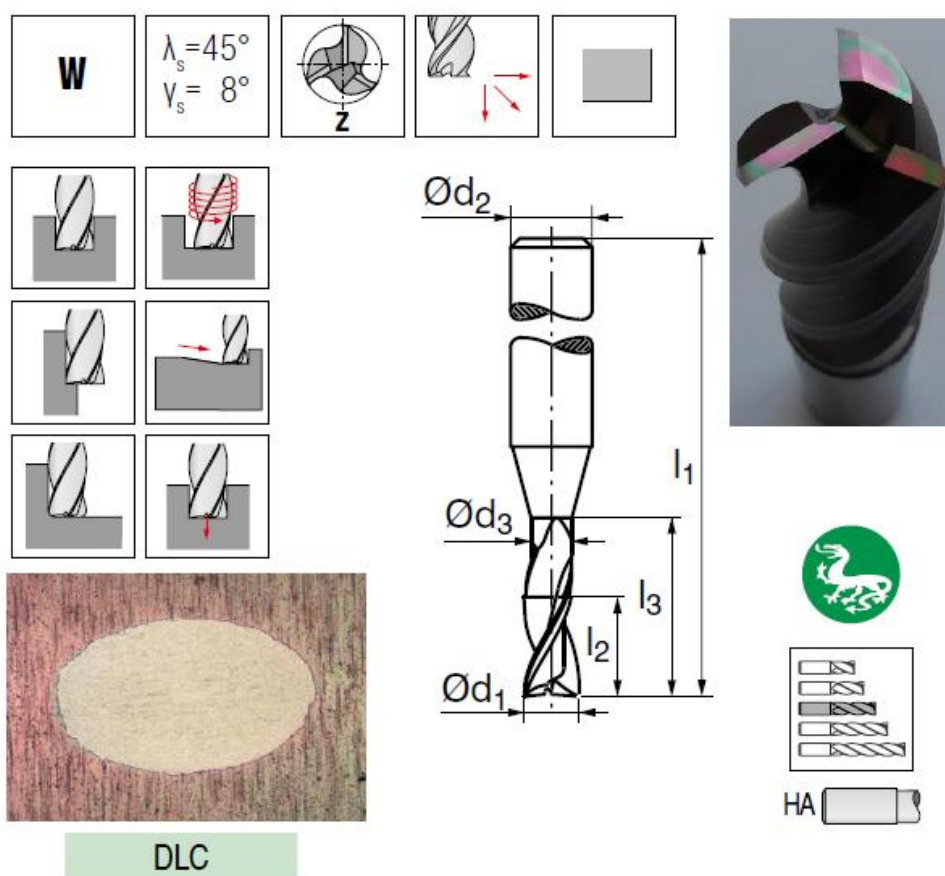
- **Stopková fréza (T12)**

- materiál: slinuté karbidy

- povlak: DLC (druh povlaku: PVD, struktura: monovrstvý, materiál: uhlík, tloušťka vrstvy: max. 0,6 μm, mikrotvrdość: HV 0,05 = 6000, max. aplikační teplota: 550 °C)

- stopka: válcová (HA)

- délka: středně dlouhá



Tab. Parametry.

Označení	d_1 h6 [mm]	l_2 [mm]	d_3 [mm]	l_3 [mm]	l_1 [mm]	d_2 h5 [mm]	Z [-]
W-SF.10,0.Z3.45°.R.HA.ML-S	10	22	9,2	30	72	10	3

Tab. Doporučené řezné podmínky.

Označení	v_c [m.min ⁻¹]	a_e 0,1-0,2 x d_1	a_e 0,3-0,4 x d_1	a_e 0,6-1,0 x d_1	$a_{p \max}$ x d_1 [mm]
		f_z [mm]			
W-SF.10,0.Z3.45°.R.HA.ML-S	420	0,120	0,089	0,060	1

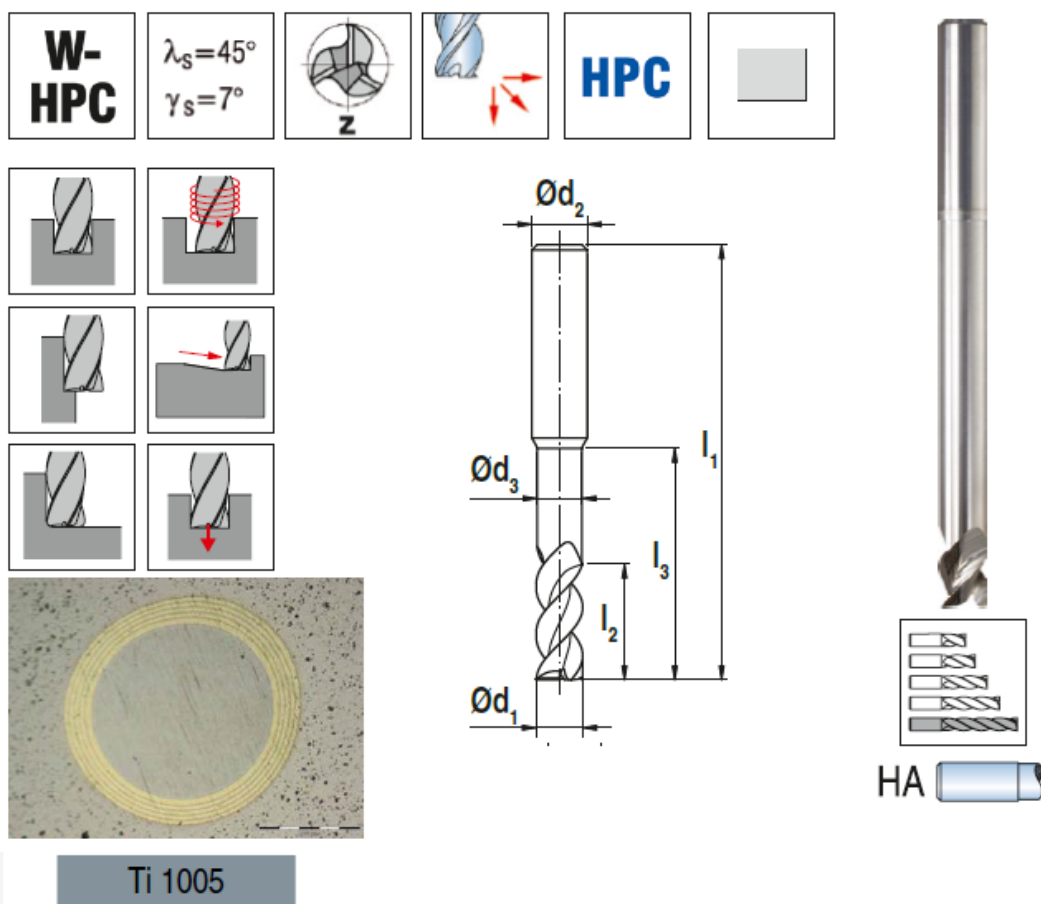
- **Stopková fréza (T14)**

- materiál: slinuté karbidy

- povlak: Ti 1005 (druh povlaku: PVD, struktura: multivrstvý, materiál: na bázi Cr a Zr, tloušťka vrstvy: max. 4 μm, mikrotvrdość: HV 0,05 = 2800, max. aplikační teplota: 600 °C)

- stopka: válcová (HA)

- délka: extra dlouhá



Tab. Parametry.

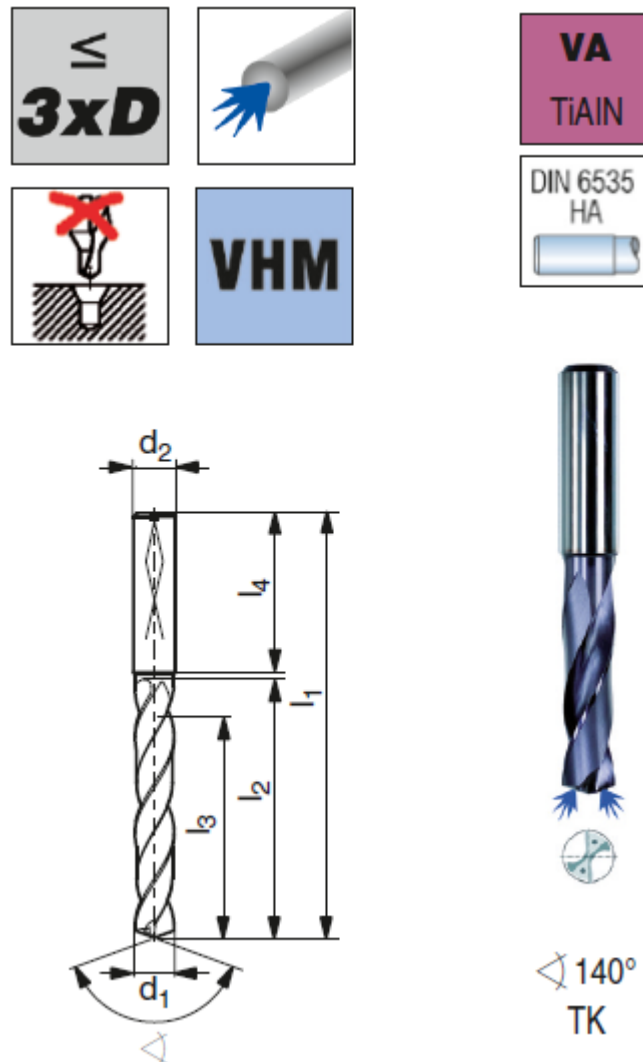
Označení	d_{1H6} [mm]	l_2 [mm]	d_3 [mm]	l_3 [mm]	l_1 [mm]	d_{2H5} [mm]	Z [-]
W-HPC.4,0.Z3.45°R.HA.EL.8xD	4	4,5	3,8	32	74	6	3

Tab. Doporučené řezné podmínky.

Označení	v_c [m.min ⁻¹]	a_e 0,1-0,2 x d_1	a_e 0,3-0,4 x d_1	a_e 0,6-1,0 x d_1	$a_{p\ max}$ x d_1 [mm]
		f_z [mm]			
W-HPC.4,0.Z3.45°R.HA.EL.8xD	180	0,018	0,014	0,010	0,75

- Vrtáky (T13, T15, T16, T18, T21, T23)

- materiál: slinuté karbidy
- povlak: TiAlN
- stopka: válcová (DIN 6535 HA)
- vnitřní chlazení



Tab. Parametry.

Označení	č. nástroje	$d_{1\ m7}$ [mm]	$d_{2\ h6}$ [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_4 [mm]
WPC-VA.9,80.R.3D.IK.DIN6536.HA	T13	9,80	10	89	47,0	35,0	40,0
WPC-VA.4,20.R.3D.IK.DIN6536.HA	T15	4,20	6	66	24,0	17,0	36,0
WPC-VA.3,30.R.3D.IK.DIN6536.HA	T16	3,30	6	62	20,0	14,0	36,0
WPC-VA.4,50.R.3D.IK.DIN6536.HA	T18	4,60	6	66	24,0	17,0	36,0
WPC-VA.11,00.R.3D.IK.DIN6536.HA	T21	11,00	12	102	55,0	40,0	45,0
WPC-VA.5,60.R.5D.IK.DIN6536.HA	T23	5,60	6	82	44,0	35,0	36,0

Tab. Doporučené řezné podmínky.

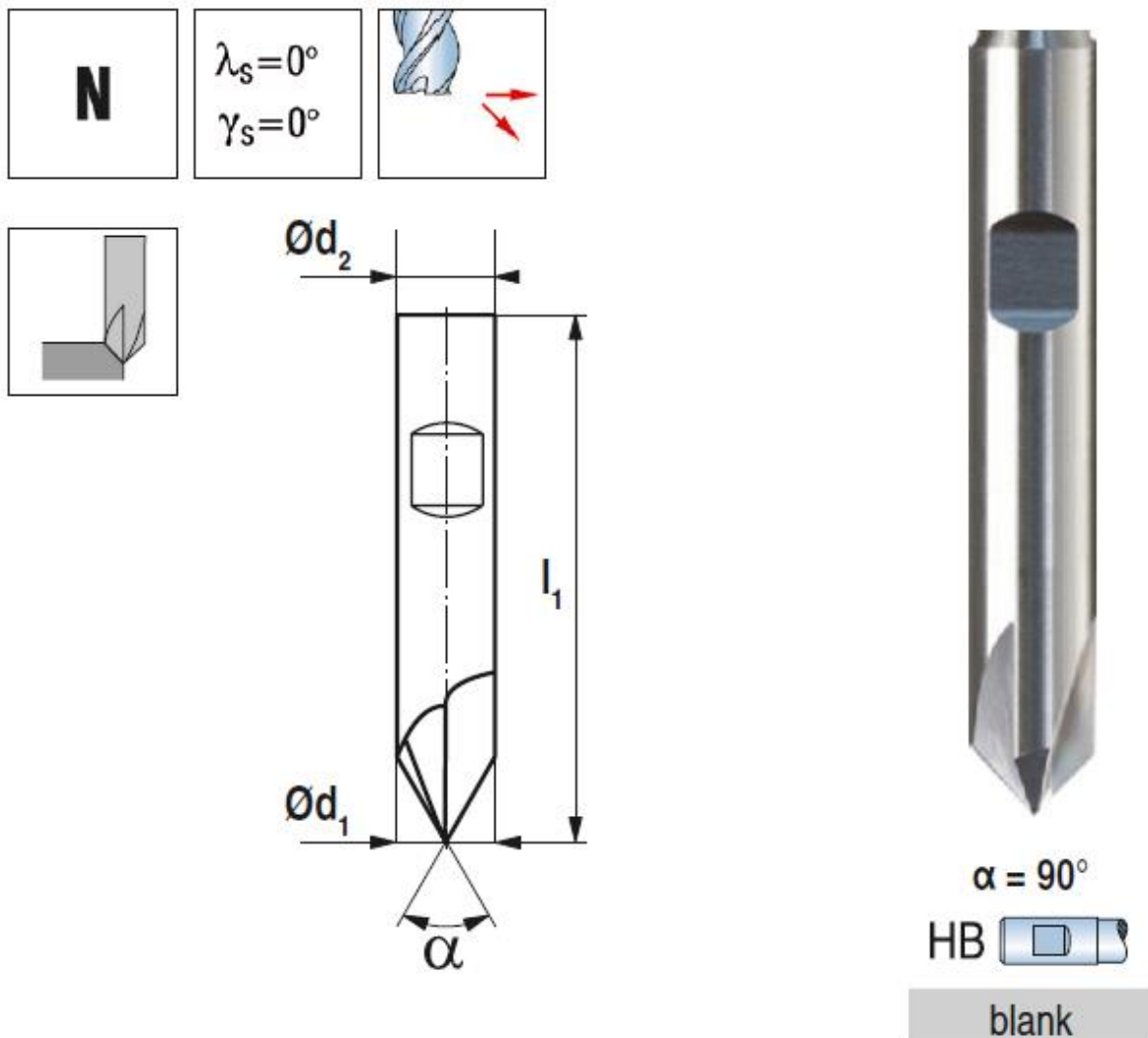
Označení	č. nástroje	v_c [m.min ⁻¹]	f_n [mm]
WPC-VA.9,80.R.3D.IK.DIN6536.HA	T13	200	0,28
WPC-VA.4,20.R.3D.IK.DIN6536.HA	T15	200	0,15
WPC-VA.3,30.R.3D.IK.DIN6536.HA	T16	200	0,15
WPC-VA.4,50.R.3D.IK.DIN6536.HA	T18	200	0,15
WPC-VA.11,00.R.3D.IK.DIN6536.HA	T21	200	0,28
WPC-VA.5,60.R.5D.IK.DIN6536.HA	T23	200	0,21

- **Fréza na srážení hran (T17)**

- materiál: slinuté karbidy

- stopka: weldon (HB)

- vrcholový úhel: $\alpha = 90^\circ$



Tab. Parametry.

Označení	$d_{1\ h6}$ [mm]	l_1 [mm]	$d_{2\ h6}$ [mm]	Z [-]
N-NE.12,0.Z4.0°.R.90°.HB	12	74	12	4

Tab. Doporučené řezné podmínky.

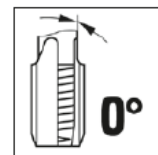
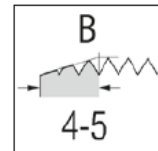
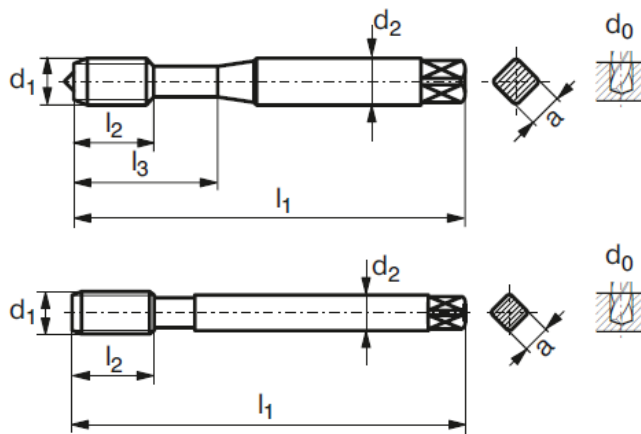
Označení	v_c [m.min ⁻¹]	$a_e\ 0,1-0,2$ x d_1	$a_e\ 0,3-0,4$ x d_1	$a_e\ 0,6-1,0$ x d_1
		f_z [mm]		
N-NE.12,0.Z4.0°.R.90°.HB	200÷250	0,16	0,10	0,08

- **Strojní závitník (T19, T20)**

- materiál: rychlořezná ocel HSS-E

- povlak: CrN

- metrický ISO závit DIN 13



DIN 371
ISO 2 6H
pravý
≤ 3xD

Tab. Parametry.

Označení	č. nástroje	d ₁ [mm]	p [mm]	l ₁ [mm]	d ₂ [mm]	a [mm]	d ₀ [mm]	l ₃ [mm]	drážky
AL.M5.ISO2-6H.DIN371-B	T19	M5	0,80	70	6,0	4,9	4,2	25	3
AL.M4.ISO2-6H.DIN371-B	T20	M4	0,70	63	4,6	3,4	3,3	21	3

Tab. Doporučené řezné podmínky.

Označení	č. nástroje	v _c [m.min ⁻¹]	f _n [mm]
AL.M5.ISO2-6H.DIN371-B	T19	14÷50	0,80
AL.M4.ISO2-6H.DIN371-B	T20	14÷50	0,70

- **Kuželová fréza (T22)**

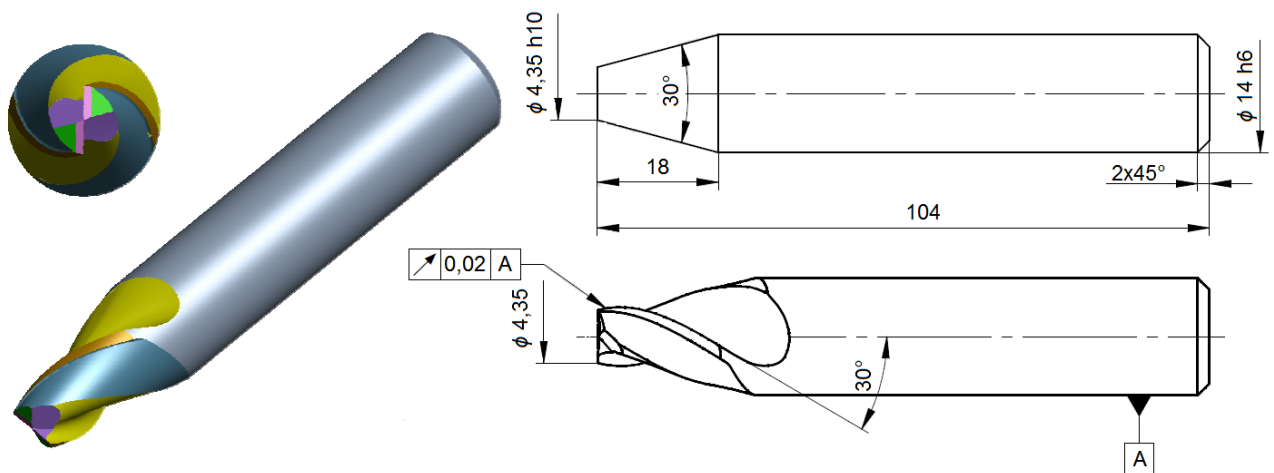
- speciál (UniCut s.r.o.)

- materiál: slinuté karbidy

- povlak: AluSpeed (materiál: TiB₂, struktura: monovrstvý, mikrotvrdost: HV 0,05 = 4000, max. aplikační teplota: 900 °C)

- vrcholový úhel: $\alpha=30^\circ$

- stopka: válcová



Tab. Doporučené řezné podmínky.

Označení	č. nástroje	v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]
F.kužel.30°.9.V14.104.14.Z2-01	T22	180	0,04

- **Strojní výstružník (T24)**

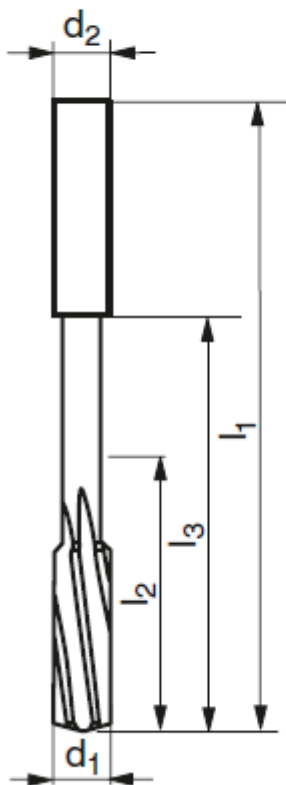
- dle normy DIN 212-3

- materiál: rychlořezná ocel HSS-E

- stopka: válcová (DIN 1835 A), pro upnutí v upínači Centro-P nebo v hydropínači

- pravořezný, s břity ve šroubovici

- rozsah tolerance H7 dle DIN 1420



Tab. Parametry.

Označení	d_{1H7} [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	d_{2h5} [mm]	Z [-]
NC.10,0.H7.D.DIN212	10,0	133	38	87	10	6

Tab. Doporučené řezné podmínky.

Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f_n [mm]
NC.10,0.H7.D.DIN212	20	0,30

Zdroje:

WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o., *Katalog 2014*. Velké Meziříčí: WNT Česká republika, s.r.o., 2014.

WNT ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o., *Nové produkty pro obráběcí techniky – TK frézy typ W*. Velké Meziříčí: WNT Česká republika s.r.o., 2015.

AB KOMPONENTY s.r.o., *Kuželová fréza s vrcholovým úhlem 30°*. Brno: AB KOMPONENTY s.r.o., 2015.

CEMECON, s.r.o. *CC AluSpeed*. [online]. [vid. 2016-03-15] Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/povlakovani/cc-aluspeed.aspx>

Příloha 2: Technologický postup – Varianta A (původní technologie)

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta A		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne:	Vyhotovil:	Kontroloval:	Polotovár:	Materiál:	Hmotnost:	Číslo listu:	
25.3.2016	KAKÁČ MARTIN	Ing. PRAKS KAREL	60 x 30 - 293 mm	EN AW 6060 T6	0,428 kg	1/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	S [min^{-1}]	V_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
10	pásová pila VMB 305 DC	18	0,3	- řezat na délku $l = 293+1$ mm - kusy nepotlouct, nepoškodit povrch - balit do síťoviny	pilový pás 4900 x 41 x 1,30 mm		
20	vertikální obráběcí centrum YCM NSV102A	120	35,7	- hrubovat součást dle programu na výšku 20 mm - frézovat horní čelo - frézovat spodní čelo	nástrčná fréza rovinná $\phi 63$	3000	1500
				- frézovat součást u tvarových vybrání dle programu - frézovat dno na výšku 20,5 mm - zarovnat bok pod úhlem 5° - frézovat obvod součásti	stopková fréza $\phi 12$	8000 6500 8000	500 800 500
				- vrtat $\phi 9,8$ - 2x do hloubky 25 mm dle výkresu	vrták $\phi 9,8$	6300	1200
				- vystružit $\phi 9,8$ - 2x dle výkresu	strojní výstružník $\phi 10$	600	200
				- frézovat R2,5 - 3x na výšku 20,5 mm - frézovat tvarové vybrání $\text{š} = 5$ mm - 2x do hloubky 20,5 mm - frézovat tvarové vybrání $\text{š} = 5$ mm - 2x do hloubky 5 mm	stopková fréza $\phi 4,5$	10000	300
				- vrtat $\phi 4,2$ - 8x pro M5 dle výkresu	vrták $\phi 4,2$	10000	1500
				- vrtat $\phi 3,3$ - 2x pro M4 dle výkresu	vrták $\phi 3,3$	10000	1500

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta A		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne: 25.3.2016	Vyhotovil: KAKÁČ MARTIN	Kontroloval: Ing. PRAKS KAREL	Polotovar: 60 x 30 - 293 mm	Materiál: EN AW 6060 T6	Hmotnost: 0,428 kg	Číslo listu: 2/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	s [min ⁻¹]	v_f [mm.min ⁻¹]
				- vrtat $\phi 4,3^{+0,3}_0$ - 6x dle výkresu	vrták $\phi 4,5$	10000	1500
				- srazit hranu 2x45° - srazit hranu 4x45° - odjehlit $\phi 4,2$ - 8x - odjehlit $\phi 4,3^{+0,3}_0$ - 6x - odjehlit $\phi 4,2$ - 8x pro M5 - odjehlit $\phi 3,3$ - 2x pro M4 - zahloubit $\phi 8^{+0,5}_0/90^\circ$ - 6x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	800
				- řezat závit M5 - 8x dle výkresu	strojní závitník M5	900	720
				- řezat závit M4 - 2x dle výkresu	strojní závitník M4	1000	700
30	vertikální obráběcí centrum YCM NSV156	40	8	- vrtat $\phi 5,5^{+0,5}_0$ - 2x	vrták $\phi 5,6$	10000	1800
				- odjehlit $\phi 5,5^{+0,5}_0$ - 2x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	600
				- vrtat $\phi 11$ - 2x	vrták $\phi 11$	5000	1200
				- frézovat kuželový otvor $\phi 19/\phi 12/30^\circ$ - 2x	kuželová fréza $\phi 14$	6000	500
				- vrtat $\phi 4,2$ - 2x pro M5 dle výkresu	vrták $\phi 4,2$	10000	1500
				- vrtat $\phi 3,3$ - 3x pro M4 dle výkresu	vrták $\phi 3,3$	10000	1500
				- odjehlit $\phi 4,2$ - 2x - odjehlit $\phi 3,3$ - 3x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	600
				- řezat závit M5 - 2x dle výkresu	strojní závitník M5	900	720
				- řezat závit M4 - 3x dle výkresu	strojní závitník M4	1000	700

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta A		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne:	Vyhotovil:	Kontroloval:	Polotovar:	Materiál:	Hmotnost:	Číslo listu:	
25.3.2016	KAKÁČ MARTIN	Ing. PRAKS KAREL	60 x 30 - 293 mm	EN AW 6060 T6	0,428 kg	3/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	s [min^{-1}]	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
40	ruční středisko	6	4,5	- začistit po opracování - odjehlit			
50	ruční středisko	6	0,2	- odmastit - kusy nepotlouct, nepoškodit povrch - balit do sítoviny			

Příloha 3: Technologický postup – Varianta B (metoda VoluMill)

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta B		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne:	Vyhotovil:	Kontroloval:	Polotovar:	Materiál:	Hmotnost:	Číslo listu:	
25.3.2016	KAKÁČ MARTIN	Ing. PRAKS KAREL	60 x 30 - 293 mm	EN AW 6060 T6	0,428 kg	1/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	S [min^{-1}]	V_f [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]
10	pásová pila VMB 305 DC	18	0,3	- řezat na délku $l = 293+1$ mm - kusy nepotlouct, nepoškodit povrch - balit do síťoviny	pilový pás 4900 x 41 x 1,30 mm		
20	vertikální obráběcí centrum YCM NSV102A	120	26,3	- hrubovat součást dle programu na výšku 20 mm	stopková fréza $\phi 16$	10000	proměnlivý
				- frézovat horní čelo - frézovat spodní čelo	nástrčná fréza rovinná $\phi 63$	3000	1500
				- frézovat součást u tvarových vybrání dle programu	stopková fréza $\phi 10$	7500	1000
				- frézovat obvod součásti - zarovnat bok pod úhlem 5°	stopková fréza $\phi 16$	6500	1000
				- vrtat $\phi 9,8$ - 2x do hloubky 25 mm dle výkresu	vrták $\phi 9,8$	6300	1200
				- vystružit $\phi 9,8$ - 2x dle výkresu	strojní výstružník $\phi 10$	600	200
				- frézovat tvarové vybrání $\text{š} = 5$ mm - 2x do hloubky 25 mm	stopková fréza $\phi 4$	10000	600
				- frézovat dno na výšku 20,5 mm	stopková fréza $\phi 10$	10000	1200
				- vrtat $\phi 4,2$ - 8x pro M5 dle výkresu	vrták $\phi 4,2$	10000	1500
- vrtat $\phi 3,3$ - 2x pro M4 dle výkresu	vrták $\phi 3,3$	10000	1500				

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta B		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne: 25.3.2016	Vyhotovil: KAKÁČ MARTIN	Kontroloval: Ing. PRAKS KAREL	Polotovar: 60 x 30 - 293 mm	Materiál: EN AW 6060 T6	Hmotnost: 0,428 kg	Číslo listu: 2/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	S [min ⁻¹]	V _f [mm.min ⁻¹]
				- vrtat $\phi 4,3^{+0,3}_0$ - 6x dle výkresu	vrták $\phi 4,5$	10000	1500
				- srazit hranu 2x45° - srazit hranu 4x45° - odjehlit $\phi 4,2$ - 8x - odjehlit $\phi 4,3^{+0,3}_0$ - 6x - odjehlit $\phi 4,2$ - 8x pro M5 - odjehlit $\phi 3,3$ - 2x pro M4 - zahloubit $\phi 8^{+0,5}_0/90^\circ$ - 6x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	800
				- řezat závit M5 - 8x dle výkresu	strojní závitník M5	900	720
				- řezat závit M4 - 2x dle výkresu	strojní závitník M4	1000	700
30	vertikální obráběcí centrum YCM NSV156	40	8	- vrtat $\phi 5,5^{+0,5}_0$ - 2x	vrták $\phi 5,6$	10000	1800
				- odjehlit $\phi 5,5^{+0,5}_0$ - 2x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	600
				- vrtat $\phi 11$ - 2x	vrták $\phi 11$	5000	1200
				- frézovat kuželový otvor $\phi 19/\phi 12/30^\circ$ - 2x	kuželová fréza $\phi 14$	6000	500
				- vrtat $\phi 4,2$ - 2x pro M5 dle výkresu	vrták $\phi 4,2$	10000	1500
				- vrtat $\phi 3,3$ - 3x pro M4 dle výkresu	vrták $\phi 3,3$	10000	1500
				- odjehlit $\phi 4,2$ - 2x - odjehlit $\phi 3,3$ - 3x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	600
				- řezat závit M5 - 2x dle výkresu	strojní závitník M5	900	720
				- řezat závit M4 - 3x dle výkresu	strojní závitník M4	1000	700

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta B		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne:	Vyhotovil:	Kontroloval:	Polotovar:	Materiál:	Hmotnost:	Číslo listu:	
25.3.2016	KAKÁČ MARTIN	Ing. PRAKS KAREL	60 x 30 - 293 mm	EN AW 6060 T6	0,428 kg	3/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	s [min^{-1}]	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
40	ruční středisko	6	4,5	- začistit po opracování - odjehlit			
50	ruční středisko	6	0,2	- odmastit - kusy nepotlouct, nepoškodit povrch - balit do síťoviny			

Příloha 4: Technologický postup – Varianta C (odlitek)

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta C		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne: 25.3.2016	Vyhotovil: KAKÁČ MARTIN	Kontroloval: Ing. PRAKS KAREL	Polotovár: ODLITEK	Materiál: EN AB-43000	Hmotnost: 0,428 kg	Číslo listu: 1/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	S [min ⁻¹]	V _f [mm.min ⁻¹]
10	vertikální obráběcí centrum YCM NSV102A	120	31,3	- frézovat horní čelo - frézovat spodní čelo	nástrčná fréza rovinná $\phi 63$	3000	1500
				- hrubovat součást u tvarových vybrání dle programu	stopková fréza $\phi 10$	7500	800
				- frézovat obvodu součásti - zarovnat bok pod úhlem 5°	stopková fréza $\phi 16$	6500	700
				- vrtat $\phi 9,8$ - 2x do hloubky 25 mm dle výkresu	vrták $\phi 9,8$	6300	1200
				- vystružit $\phi 9,8$ - 2x dle výkresu	strojní výstružník $\phi 10$	600	200
				- frézovat tvarové vybrání $\check{s} = 5$ mm - 2x do hloubky 25 mm	stopková fréza $\phi 4$	10000	300
				- frézovat dno na výšku 20,5 mm	stopková fréza $\phi 10$	10000	450
				- frézovat plošky na výšku 20 mm	nástrčná fréza rovinná $\phi 63$	3000	1500
				- vrtat $\phi 4,2$ - 8x pro M5 dle výkresu	vrták $\phi 4,2$	10000	1500
				- vrtat $\phi 3,3$ - 2x pro M4 dle výkresu	vrták $\phi 3,3$	10000	1500
				- vrtat $\phi 4,3^{+0,3}_0$ - 6x dle výkresu	vrták $\phi 4,5$	10000	1500

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta C		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne:	Vyhotovil:	Kontroloval:	Polotovár:	Materiál:	Hmotnost:	Číslo listu:	
25.3.2016	KAKÁČ MARTIN	Ing. PRAKS KAREL	ODLITEK	EN AB-43000	0,428 kg	2/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	S [min^{-1}]	V_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
				- srazit hranu 2x45° - srazit hranu 4x45° - odjehlit $\phi 4,2$ - 8x - odjehlit $\phi 4,3^{+0,3}_0$ - 6x - odjehlit $\phi 4,2$ - 8x pro M5 - odjehlit $\phi 3,3$ - 2x pro M4 - zahloubit $\phi 8^{+0,5}_0/90^\circ$ - 6x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	800
				- řezat závit M5 - 8x dle výkresu	strojní závitník M5	900	720
				- řezat závit M4 - 2x dle výkresu	strojní závitník M4	1000	700
30	vertikální obráběcí centrum YCM NSV156	40	8	- vrtat $\phi 5,5^{+0,5}_0$ - 2x	vrták $\phi 5,6$	10000	1800
				- odjehlit $\phi 5,5^{+0,5}_0$ - 2x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	600
				- vrtat $\phi 11$ - 2x	vrták $\phi 11$	5000	1200
				- frézovat kuželový otvor $\phi 19/\phi 12/30^\circ$ - 2x	kuželová fréza $\phi 14$	6000	500
				- vrtat $\phi 4,2$ - 2x pro M5 dle výkresu	vrták $\phi 4,2$	10000	1500
				- vrtat $\phi 3,3$ - 3x pro M4 dle výkresu	vrták $\phi 3,3$	10000	1500
				- odjehlit $\phi 4,2$ - 2x - odjehlit $\phi 3,3$ - 3x	fréza na srážení hran $\phi 12$	7000	600
				- řezat závit M5 - 2x dle výkresu	strojní závitník M5	900	720
				- řezat závit M4 - 3x dle výkresu	strojní závitník M4	1000	700

TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Varianta C		Název celku: NC ŘEZACÍ STŮL	Název součástky: PHOTOCELL HOLDER LEFT	Číslo součástky: 1-407631-XP	
Dne:	Vyhotovil:	Kontroloval:	Polotovar:	Materiál:	Hmotnost:	Číslo listu:	
25.3.2016	KAKÁČ MARTIN	Ing. PRAKS KAREL	ODLITEK	EN AB-43000	0,428 kg	3/3	
Č. op.	Středisko/ Název stroje	Čas t_{BC} [min]	Čas t_{AC} [min]	Popis práce:	Výrobní pomůcky:	s [min ⁻¹]	v_f [mm.min ⁻¹]
40	ruční středisko	6	4,5	- začistit po opracování - odjehlit			
50	ruční středisko	6	0,2	- odmastit - kusy nepotlouct, nepoškodit povrch - balit do sít'oviny			

Příloha 5: Koefficient využití materiálu, k_m (přířez z ploché tyče)

- Stanovení hmotnosti hotové součásti Q_s

$$Q_s = V_s \cdot \rho \cdot 10^{-6}$$

kde: V_s [mm³] – objem součásti

ρ [g.cm⁻³] – hustota součásti

- hmotnost byla zjištěna za pomoci software Catia V5R20

$$Q_s = 0,428 \text{ kg}$$

- Polotovar

- celkový přírůstek na obrábění

Výška: $p_c = a_s - a_p$ [mm]

$$p_c = 30 - 25 = 5 \text{ mm}$$

kde: a_s [mm] – výška polotovaru

a_p [mm] – výška součásti

Délka: $l_0 = l_{max} + 2$ [mm]

$$l_0 = 291 + 2 = 293 \text{ mm}$$

kde: l_{max} [mm] – délka součásti

- Norma spotřeby materiálu

$$Q_m = Q_p + q_d + q_k \quad [kg \cdot ks^{-1}]$$

$$Q_m = 1,407 + 6,316 \cdot 10^{-4} + 0,028 = 1,436 \text{ kg} \cdot ks^{-1}$$

kde: Q_p [kg] – hmotnost přířezu

q_d [kg] – odpad vzniklý prořezem

q_k [kg] – odpad z nevyužitého konce polotovaru

- hmotnost přířezu

$$Q_p = V \cdot \rho = l_0 \cdot a_s \cdot \rho \quad [kg]$$

$$Q_p = 293 \cdot 30 \cdot 60 \cdot 2,669 \cdot 10^{-6} = 1,407 \text{ kg}$$

- délka nevyužitého konce tyče

$$l_k = l_t - n \cdot (l_0 + l_u) \quad [mm]$$

$$l_k = 3000 - 10 \cdot (293 + 1,3) = 57 \text{ mm}$$

kde: n [-] – počet přířezů z polotovaru

l_0 [mm] – délka přířezu

l_u [mm] – šířka prořezu (při použití pásové pily činí 1,3 mm)

l_t [mm] – délka hutního polotovaru

- počet přířezů z tyče

$$n = \frac{l_t}{l_0 + l_u} \quad [ks]$$

$$n = \frac{3000}{293 + 1,3} = 10,19 \Rightarrow 10 \text{ ks}$$

- odpad vzniklý při obrábění

$$q_o = Q_p - Q_s \quad [kg]$$

$$q_o = 1,407 - 0,428 = 0,979 \text{ kg} \cdot \text{ks}^{-1}$$

- odpad vzniklý prořezem

$$q_d = \frac{S}{n} \cdot l_u \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad [kg \cdot \text{ks}^{-1}]$$

$$q_d = \frac{60 \cdot 30}{10} \cdot 1,3 \cdot 2,699 \cdot 10^{-6} = 6,316 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{ks}^{-1}$$

kde: S [mm²] – plocha průřezu součásti

- odpad z nevyužitého konce přířezu

$$q_k = \frac{S}{n} \cdot l_k \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad [kg \cdot \text{ks}^{-1}]$$

$$q_k = \frac{60 \cdot 30}{10} \cdot 57 \cdot 2,699 \cdot 10^{-6} = 0,028 \text{ kg} \cdot \text{ks}^{-1}$$

- **Koeficient využití materiálu přířezu**

$$k_m = \frac{Q_s}{Q_m} \quad [\%]$$

$$k_m = \frac{0,428}{1,436} = 0,298 = 29,8\%$$

Zdroj:

PROKOP, Jaroslav. *HTV2 - Metodika navrhování výrobních postupů obráběných součástí*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.