

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE CNC VÝROBY SOUČÁSTÍ
Z HLINÍKOVÝCH SLITIN
TECHNOLOGY OF CNC PRODUCTION OF ALUMINIUM ALLOYS PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUDĚK VĚRNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Luděk Věrný

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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 CNC výroby součástí z hliníkových slitin

v anglickém jazyce:

Technology of CNC production of aluminium alloys parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie CNC výroby součástí z hliníkových slitin, návrh postupu obrábění, výběr nástrojů, řezných podmínek, stanovení strategie obrábění, verifikace a rozbor dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod do problematiky
2. Analýza zpracovávaných materiálů a jejich povrchových úprav
3. Rozbor technologie výroby
4. Zpracování CNC programů pro obrábění
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr

Seznam odborné literatury:


- K. Sivakumar, R. Saravanan, A. Noorul Haq Cost-tolerance modelling and optimisation of machining tolerance design through intelligent techniques In: International Journal of Machining and Machinability of Materials Volume 3, Number 1-2 / 2008, pp. 162 - 189
- William J. Zdeblick, R.E. De Vor a John F. Kahles A Comprehensive Machining Cost Model and Optimization Technique. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 30, Issue 1, 1981, Pages 405-408
- TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.
- ČECH, J., PALÁN, K., ZALABA, R., BERGEROVÁ, K.:
Vliv technologických a metalurgických faktorů na poretitu u Al slitin, Transfer 2005.
- Využívání nových poznatků v strojířské praxi, pp.110-117, ISBN 80-8075-070-X, (2005), Trenčianska univerzita A. Dubčeka v Trenčine
- BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábánie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčine. 1.vyd., Slovensko, Trencin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno : CERM, 2006. s. 230. 1. vyd.. ISBN 80-214-2374-9.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.


prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu




prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce je zpracována na základě konkrétního zadání společnosti AB Komponenty s.r.o. Jádrem celé práce představuje návrh technologie výroby součásti BASE CROSSBAR z hliníkové slitiny EN AW 2017 na vertikálním obráběcím centru. CNC řídicí program pro navrženou technologii je zpracován v CAM softwaru PowerMill 2010. Aby byla práce kompletní, obsahuje i stručný úvod do problematiky a rozbor hliníku, hliníkových slitin a jejich povrchových úprav. Z pohledu praxe je pravděpodobně nejpřínosnější a nejzajímavější závěrečné technickoekonomické zhodnocení zvoleného řešení zadaného problému. Navrženou technologií může být dosaženo výrazných úspor výrobních nákladů.

Klíčová slova

Hliníková slitina, CNC technologie, PowerMill 2010, frézování, vertikální obráběcí centrum.

ABSTRACT

This diploma thesis is elaborated on the specific assignment of AB Komponenty Ltd. The core of this thesis features the technology of manufacturing of component BASE CROSSBAR of aluminium alloy EN AW 2017 on the vertical machining center. CNC control program for the suggested technology is developed in the CAM software PowerMill 2010th. To complete the work it also includes a brief introduction to the issues and analysis of aluminum, aluminum alloys and coatings. From the perspective of the practice is probably the most beneficial and interesting final technical economic evaluation of selected solution of the given problem. The suggested technology can be a significant saving in production costs.

Key words

Aluminium alloy, CNC technology, PowerMill 2010, milling, vertical machining center.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VĚRNÝ, L. *Technologie CNC výroby součástí z hliníkových slitin: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 83 s., 9 příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma ***Technologie CNC výroby součástí z hliníkových slitin*** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23. 5. 2011

.....
Bc. Luděk Věrný

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Miroslavu PÍŠKOVI, CSc. a Ing. Karlu PRAKSOVI z výrobní společnosti AB Komponenty s.r.o. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod	7
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	8
2 HLINÍK.....	11
2.1 Slitiny hliníku	13
2.1.1 Slitiny hliníku pro tváření	14
2.1.2 Slitiny hliníku pro odlitky	17
2.1.3 Prášková metalurgie hliníku	21
2.1.4 Slitiny druhého tavení	22
2.2 Tepelné zpracování slitin hliníku	22
2.2.1 Žihání	23
2.2.2 Vytvrzování slitin hliníku.....	25
2.3 Úprava povrchu hliníku a jeho slitin	27
2.3.1 Anodická oxidace hliníku	27
2.3.2 Práškové a mokré lakování hliníku.....	28
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY DÍLCE	30
3.1 Rozdělení technologických skupin	30
3.1.1 Plochy.....	31
3.1.2 Kontura obrysu	31
3.1.3 Válcové díry.....	32
3.1.4 Přesné válcové díry	33
3.1.5 Válcové zahloubení.....	34
3.1.6 Závity	34
3.1.7 Pravoúhlé otvory (kapsy)	39
3.1.8 Drážky	39
3.2 Obrobek.....	42
3.2.1 Materiál obrobku.....	44
3.2.2 Upnutí obrobku	45
3.3 Volba stroje	46
3.4 Volba nástrojů.....	48
3.4.1 Zvolené nástroje pro frézování	49
3.4.2 Zvolené nástroje pro vrtání	56
3.4.3 Zvolené nástroje pro vystružování.....	59
3.4.4 Zvolené nástroje pro závitování	59
3.4.5 Upínání a vyvážení rotačních nástrojů	60
4 CNC TECHNOLOGIE	63
4.1 Řídicí program	67
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	73
Závěr	76
Seznam použitých zdrojů	77
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	81
Seznam příloh	83

ÚVOD

V mé diplomové práci se budu zabývat CNC (Computer Numerical Control) technologií výroby součásti z hliníkových slitin. Toto téma jsem si nezvolil náhodou. Zaujala mě jednak možnost zaměřit diplomový projekt na řešení konkrétního úkolu ve výrobní společnosti, což podle mě vede k získání zajímavých poznatků a zkušeností, a dále také příležitost spolupráce při řešení tohoto úkolu s výrobní společností AB Komponenty s.r.o., mimo jiné významným dodavatelem obráběných dílců pro několik divizí celosvětově působící společnosti ABB.

Efektivní obrábění hliníkových slitin s využitím CNC řízených strojů je navíc aktuálním tématem v celé řadě průmyslových odvětví, například v automobilovém průmyslu. Projevuje se výrazná snaha o snížení celkové hmotnosti vyráběných sestav, čehož se dosahuje použitím vyššího počtu komponentů vyrobených právě z hliníkových slitin. Své uplatnění má i v leteckém průmyslu, kde je využito velké množství dílů obráběných z plného materiálu (obr. 1.1.).

Cílem této práce je navrhnout technologii výroby dílce, vybrat vhodné nástrojové vybavení s odpovídajícími řeznými podmínkami a zpracovat strategii jednotlivých obráběcích operací, které by měly být spojeny do jednoho CNC programu některou z dostupných možností tvorby řídicího programu. Návrhu technologie bude předcházet rešerše z dostupné odborné literatury, která bude analyzovat hliníkové slitiny, jejich tepelné zpracování a povrchové úpravy.

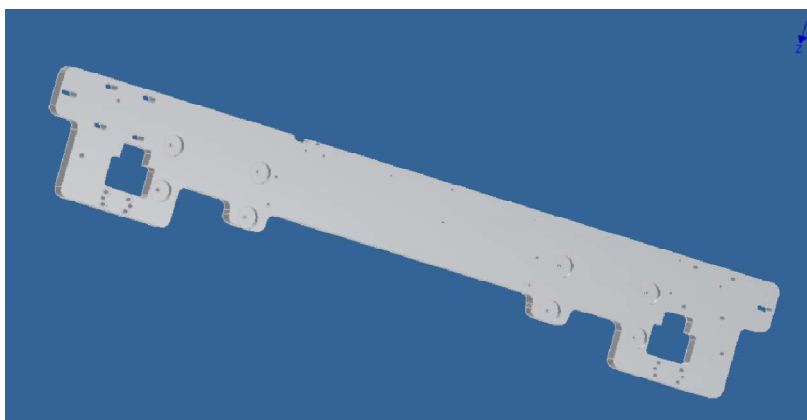
Diplomovou práci budu systematicky členit do tematicky oddělených celků, aby byla přehledná a srozumitelná.



Obr. 1.1 Příklad obrobené součásti z hliníkové slitiny pro letecký průmysl. [1]

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

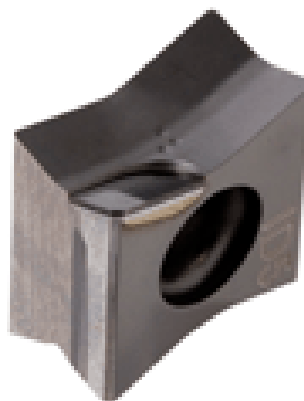
Součást, pro kterou je navrhovaná technologie určena (obr. 1.2), patří mezi nově vyráběné dílce společnosti AB Komponenty s.r.o. Tato společnost požaduje, aby byla technologie výroby dílce primárně zaměřena na nově zakoupené vertikální tříosé frézovací centrum, které umožňuje svými parametry a řídicím systémem nasazení i vysokorychlostního obrábění (High Speed Machining - HSM). Zvolené upínací nářadí a obráběcí nástroje by měly být dostupné z aktuálních nabídek dodavatelů strojního vybavení, přičemž není preferován žádný konkrétní dodavatel. Cílem je tedy navrhnout technologii výroby dílce na základě dodané výkresové dokumentace (viz Příloha 9) a parametrů obráběcího stroje tak, aby byla efektivní pro sérii 1000 ks ročně při výrobní dávce 250 ks. Na základě těchto požadavků bude největší pozornost věnována výběru polotovaru a jeho následnému upnutí, volbě nástrojů s odpovídajícími řeznými podmínkami a také sestavení strategie obrábění pomocí některého z možných způsobů vytvoření CNC programu.



Obr. 1.2 Objemový model součásti.

Hlavním současným vývojovým trendem v obrábění kovů je vysokorychlostní obrábění HSM, označované také High Speed Cutting (HSC). [2] Jedná se o velmi produktivní technologii. V případě obrábění hliníkových slitin se řezná rychlost pohybuje v řádech tisíců $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, což si ale samozřejmě klade vysoké nároky nejen na parametry obráběcích strojů, nástrojů a jejich upnutí, ale i na optimalizaci řezného procesu. HSM

technologie jsou realizovatelné hlavně díky použití nových řezných materiálů. [2] K obrábění hliníkových slitin při vysokých řezných rychlostech je s úspěchem používán polykrystalický diamant (PKD) (obr. 1.3).



Obr. 1.3 Vyměnitelná břitová destička osazená PKD. [3]

Vysokorychlostní obrábění se zaměřuje na zvýšení úběru materiálu, zlepšení kvality obrobeného povrchu a prodloužení trvanlivosti nástroje podstatným zvýšením řezné rychlosti při snížené odebírané vrstvě a menší řezné síle. Vysoká relativní rychlost třísky vzhledem k ploše čela řezného klínu nástroje spolu s kvalitou řezné hrany zvyšuje množství tepla z řezného procesu, které odchází s třískou. Snižuje se tepelné a mechanické namáhání nástroje a prodlužuje se tak jeho trvanlivost. Redukce tepelného toku do nástroje, do rámu stroje a do obrobku za současného snížení řezných sil přináší zvýšení přesnosti obrobku a kvality jeho povrchu. [2]

Pro HSM nejsou charakteristické pouze vysoké řezné rychlosti a posuvy, ale u této metody dochází ke splnění celé řady nutných parametrů, které jsou typické pro celou strategii HSM a jejichž kombinace vede k podstatnému zvýšení produktivity a snížení nákladů převážně v sériové výrobě. Výkonnost HSM podstatně ovlivňují především tyto prvky: vřeteno, vodící plochy, motory pohonů, upínací nářadí a řezné nástroje. [4]

S ohledem na výše uvedené skutečnosti, které podstatně zvyšují náklady na zařízení, není nasazení HSM strategií vždy vhodné a mělo by mu předcházet důkladné komplexní zvážení a porovnání s jinými dostupnými možnostmi. V případě obrábění hliníkových slitin se například nabízí zajímavá

alternativa v podobě nových nástrojů z jemnozrnného slinutého karbidu (SK) s odpovídající geometrií a leštěnou funkční částí nástroje, popřípadě opatřené vhodným povlakem. Řezné rychlosti pro hliníkové slitiny se u těchto nástrojů pohybují okolo $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, což v kombinaci s progresivně zvolenou a optimalizovanou strategií, může vést k velmi efektivnímu obrábění.

2 HLINÍK

Čistý hliník (Al) patří mezi lehké kovy, krystalizuje v krychlové plošně středěné mřížce (fcc). Hliník je nepolymorfní, nemagnetický a za normálních podmínek velmi stálý. Při zahřátí se ale stává silně reaktivním a slučuje se zejména s kyslíkem. Mezi jeho nejdůležitější vlastnosti patří výborná vodivost, tvárnost, nízká hmotnost a vysoká korozivzdornost. Další základní vlastnosti čistého hliníku jsou uvedeny v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Fyzikálně-chemické vlastnosti hliníku. [5]

Vlastnost	Hodnota
Atomové číslo	13
Počet přírodních izotopů	1
Atomová hmotnost [u]	26,98
Atomový poloměr [pm]	143
Elektronegativita	1,47
Teplota tání [°C]	660,4
Teplota varu [°C]	2467
Hustota (20 °C) [kg.m ⁻³]	2700
Tepelná vodivost (při 25 °C) [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	247

Hliník se nachází v přírodě přibližně ve dvou stech padesáti různých minerálech, z nichž mezi nejdůležitější patří korund (obr. 2.1), diaspor, boehmit, spinel, gibbsit, kyanit, andalusit, silimanit, kaolinit, alunit a nefelín (tab. 2.2). [5]



Obr. 2.1 Přírodní korund. [6]

Tab. 2.2 Přehled běžných minerálů hliníku. [5]

Minerál	Hmot. % Al_2O_3
Korund	100
Diaspor, Boehmit	85
Gibbsit (Hydrargilit)	65,4
Spinel	71
Kyanit, Andaluzit, Silimanit	63
Kaolinit	39,5
Alunit	37
Nefelín	32,3-35,9
Leucit	23,5
Sericin	38,4

Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou pro výrobu hliníku je bauxit (obr 2.2), jednu tunu hliníku lze získat ze čtyř až šesti tun bauxitu. Pojem bauxit neoznačuje specifický minerál, jedná se o horninu, která se skládá většinou z hydratovaných oxidů hliníku, zejména gibbsitu, boehmitu a diasporu. [5]



Obr. 2.2 Bauxit. [7]

Čistý hliník odolává některým chemickým a povětrnostním vlivům, má velmi dobré optické vlastnosti (například odrazovou schopnost pro paprsky všech vlnových délek), lze ho snadno tvářet za tepla i za studena a je dobře svařitelný. Tyto vlastnosti společně s vynikající elektrickou vodivostí předurčují specifickou oblast použití tohoto kovu. Jako zajímavý příklad lze uvést tenkou vrstvu čistého hliníku na povrchu primárního zrcadla Hubbleova teleskopu vyrobeného z křemene o průměru 2,4 m a hmotnosti 820 kg (obr. 2.3). [8]



Obr. 2.3 Primární zrcadlo Hubbleova teleskopu. [9]

K negativním mechanickým vlastnostem čistého hliníku patří malá mez pevnosti a kluzu (viz tab. 2.3). Tyto meze lze sice zvýšit tvářením polotovaru za studena, ale i přesto nedosahují hodnot potřebných pro většinu aplikací, kde by mohlo být využito hlavně jeho nízké měrné hmotnosti.

Tab. 2.3 Mechanické vlastnosti hliníku Al99,7. [5]

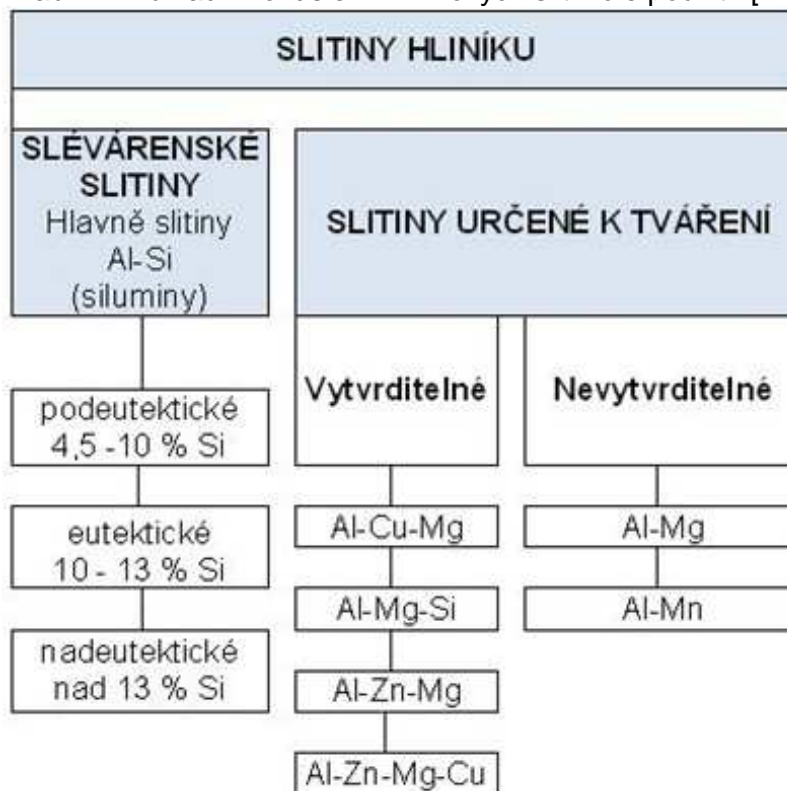
Vlastnost	Hodnota
Mez kluzu $R_{P0,2}$ [MPa]	20 - 40
Mez pevnosti R_m [MPa]	80 - 120
Tažnost A_5 [%]	10 - 25
Tvrdość HB	15 - 25

2.1 Slitiny hliníku

Zejména kvůli mechanickým vlastnostem čistého hliníku se v technické praxi ve větším měřítku používají především různé slitiny hliníku. Původní vlastnosti hliníku se mění legováním jedním nebo více prvky.

Slitiny hliníku lze dělit podle různých kritérií. Nejčastější dělení je podle způsobu zpracování (tab. 2.4). Jiným kritériem pro dělení slitin hliníku je jejich schopnost zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním – vytvrzováním. [10]

Tab. 2.4 Základní rozdělení hliníkových slitin dle použití. [11]



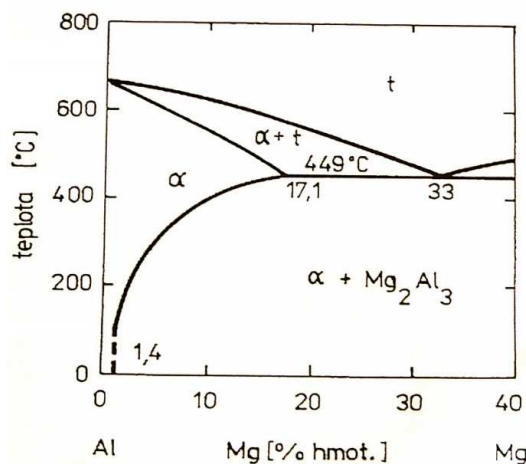
2.1.1 Slitiny hliníku pro tváření

Slitiny hliníku pro tváření lze rozčlenit do dalších podskupin, přičemž každá z nich se vyznačuje odlišnými vlastnostmi.

A. Slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi. V této podskupině jsou zařazeny slitiny soustav Al-Mg, Al-Mg-Si a Al-Mn. Jejich předností je především dobrá svařitelnost, tvařitelnost, odolnost proti vibračnímu zatížení a lomová houževnatost. Neobsahují měď, proto naprostá většina z nich odolává korozi i bez povrchové ochrany. Za jejich slabou stránku bývá považována nemožnost jejich zpevnění (vytvrzení) tepelným zpracováním. [10]

Slitiny **Al-Mg** (obr. 2.5) tvoří řadu $AlMg_2$, $AlMg_3$, $AlMg_5$ a $AlMg_6$. Slitiny s obsahem hořčíku větším než 6 % mají sklon ke korozi po hranicích zrn, zejména při mechanickém zatížení, proto se obvykle nepoužívají. Nevelkou pevnost slitin Al-Mg (v žíhaném stavu $R_m = 100$ až 170 MPa) lze zvýšit deformačním zpevněním, tedy až R_m max 400 MPa, které se používá

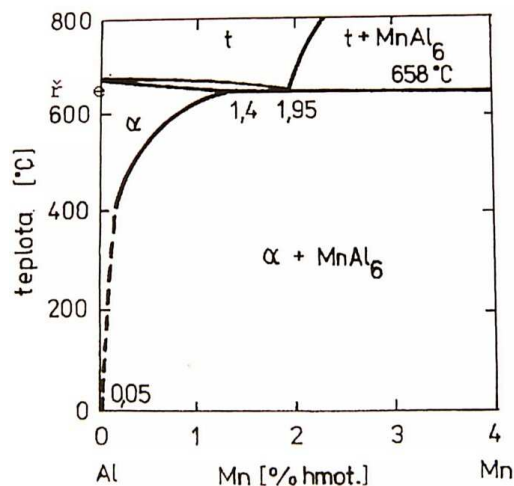
především pro slitiny AlMg5, a to se stupněm deformace 20 až 30 %. Při větších deformacích značně klesá tvárnost slitin i jejich odolnost proti korozi. [10]



Obr. 2.5 Část soustavy Al-Mg. [21]

Slitiny **Al-Mg-Si** lze na rozdíl od slitin Al-Mg tepelným zpracováním vytvrdit ($R_m = 170$ až 270 MPa). Jsou dobře tvárné a svařitelné. Používají se zejména v letectví, ve stavebnictví a v bytové architektuře.

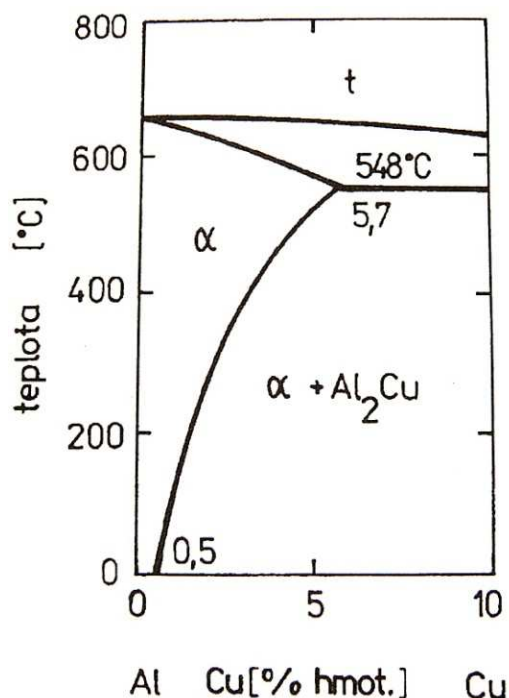
Slitiny **Al-Mn** (obr. 2.6) se tepelně nevytvrzují, neboť nevelké přesycení tuhého roztoku α umožňuje pouze nepatrné zvýšení pevnosti. Jejich vlastnosti a použití jsou obdobné jako u slitin Al-Mg. Průmyslově je vyráběna pouze slitina AlMn1 mající v měkkém stavu $R_m = 130$ MPa, ve stavu deformačně zpevněném $R_m = 220$ MPa. Často je používána jako poněkud pevnější náhrada čistého hliníku. [10]



Obr. 2.6 Část soustavy Al-Mn. [10]

B. Slitiny s vyšší a vysokou pevností, avšak s nízkou odolností proti korozi.

Slitiny **Al-Cu-Mg** představují nejvíce používané materiály této podskupiny. Jsou to zejména slitiny označované jako duraly AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCuMg1Mn dosahující značné pevnosti po vytvrzení tepelným zpracováním (R_m až 530 MPa). Část binárního diagramu soustavy Al-Cu (vliv Mg neuvažován) je na obr. 2.7. Hlavním produktem vyráběným z těchto slitin jsou plechy povrchově chráněné proti korozi tenkou vrstvou hliníku (plátované duraly). Maximální konstrukčně využitelná teplota těchto duralů v zatíženém stavu je 150 °C, přičemž duraly s obsahem hořčíku zvýšeným do 2 až 2,5 % mohou být dlouhodobě vystaveny teplotám až 200 °C. Dural AlCu2Mg se zvýšenou tvárností v důsledku menšího obsahu mědi je určen pro nýty (pevnost ve stříhu 200 MPa). Na rozdíl od nýtů z klasických duralů AlCu4Mg a AlCu4Mg1 jsou tyto nýty použitelné bez předchozího změkčení tepelným zpracováním, aniž by hrozilo nebezpečí vzniku trhlin v závěrné hlavě. [10]



Obr. 2.7 Část soustavy Al-Cu. [10]

Slitiny **Al-Cu-Mg-Ni** tvořené přísadou niklu do duralové báze jsou vhodné pro dlouhodobou funkci za teplot až 300 °C. V České republice je používána slitina AlCu2MgNi. [10]

Slitiny **Al-Cu-Si-Mn** jsou určeny pro volně a zápustkově kované výkovky. V České republice je používána slitina AlCu2SiMn. [10]

Slitiny **Al-Cu-Bi-Pb** jsou používány pro součásti nepříliš silově namáhané vyráběné ve velkých sériích obráběním na automatech. Na rozdíl od jiných slitin hliníku tvoří krátkou, drobnou třísku, což je způsobeno přísadou vizmutu a olova. [10] Vznikající tlak na zlepšení životního prostředí vede k vývoji obrobitelných slitin, které neobsahují olovo, jež bývá obvykle v těchto slitinách nahrazováno cínem. [5]

Slitiny **Al-Zn-Mg-Cu** jsou nejpevnějšími slitinami hliníku. Slitina AlZn6Mg2Cu po tepelném zpracování dosahuje pevnosti R_m 500 až 580 MPa (jiná slitina tohoto typu, ruská V96, dosahuje R_m až 730 MPa). K hlavním nedostatkům těchto slitin ve srovnání s duraly patří sklon ke korozi pod napětím, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost a intenzivnější průběh odpeňovacích pochodů s růstem teploty. Již asi od 125 °C jsou slitiny se zinkem méně pevné než klasické duraly. [10]

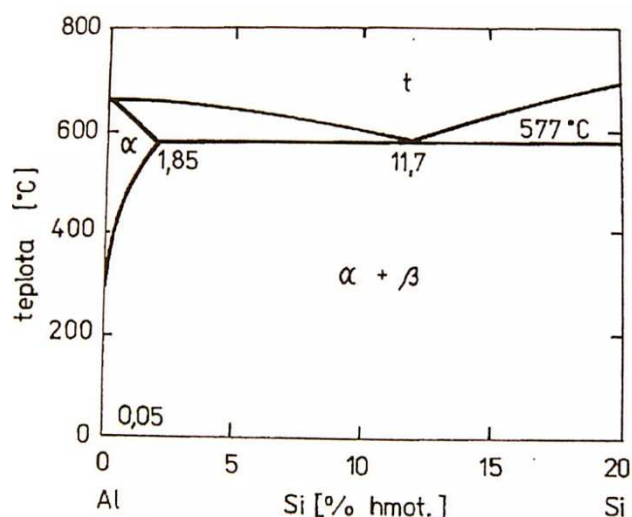
Slitiny **Al-Li** patří ke slitinám, které jsou v současné době stále vyvíjeny. Lithium je vysoce reaktivní prvek, snadno oxidující na vzduchu, proto jsou slitiny s lithiem taveny v ochranné atmosféře argonu nebo ve vakuu, případně na vzduchu pod krycí struskou. [10] Lithium na jedné straně snižuje hustotu hliníku, na druhé straně zvyšuje modul pružnosti a creepovou odolnost. [5]

2.1.2 Slitiny hliníku pro odlitky

Slitiny hliníku pro odlitky jsou určeny k výrobě tvarových odlitků litím do písku, do kovových forem či ke tlakovému lití. Mechanické hodnoty odlitků nedosahují hodnot výrobků tvářených a podstatně závisí na způsobu odlévání. Největší pevnost v tahu bývá 250 MPa. Hrubá struktura s nejnižšími pevnostními charakteristikami vzniká při lití do písku, jemná struktura s lepšími vlastnostmi se tvoří při lití do kovových forem nebo při tlakovém lití. [10]

Slitiny **Al-Si** (obr. 2.8), označované jako binární nebo jednoduché siluminy (silikon-aluminium), se dělí na podeutektické (pod 11,7 % Si),

eutektické (kolem 11,7% Si) a nadeutektické (od 11,7 do 24% Si). Nejlepší slévárenské vlastnosti mají eutektické siluminy. Eutektikum v binárních siluminech představuje směs tuhého roztoku α a krystalů téměř čistého křemíku (fáze β). Eutektikum přítomné v poměrně velkém obsahu (40 až 75 hm. %) dává binárním siluminům nejen vysokou zabíhavost, ale také snižuje jejich lineární smrštění a sklon k tvorbě trhlin za tepla a ke vzniku mikropórovitosti. K přednostem binárních siluminů Al-Si patří dobrá odolnost proti korozi. Přesto se pro tvarové odlitky používají zřídka. Osvědčily se však jako hliníkové pájky (například siluminy AlSi5 a AlSi12). Většina siluminů používaných k odlévání tvarových odlitků jsou pevnější siluminy speciální. [10]



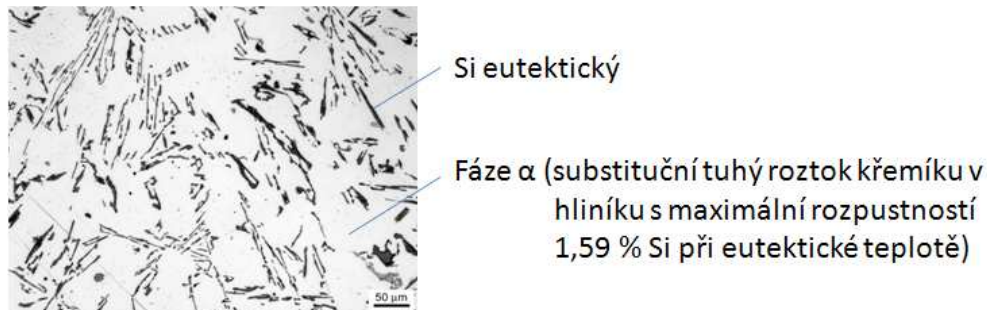
Obr. 2.8 Část soustavy Al-Si. [10]

Speciální siluminy. Největší vliv na zlepšení pevnostních charakteristik binárních siluminů mají přísady hořčíku a mědi, které umožňují takto vznikající speciální siluminy Al-Si-Mg a Al-Si-Cu vytvrzovat. Slitiny lze pak dlouhodobě mechanicky zatěžovat za teplot až do 275 °C. Slévárenské vlastnosti i těchto speciálních siluminů jsou však horší než u siluminů binárních Al-Si. Přísadami dalších prvků (Mn, Ti, Zn, Ni) vznikají siluminy soustav Al-Si-Cu-Mn, Al-Si-Cu-Mg-Ni a Al-Si-Cu-Zn s některými zlepšenými vlastnostmi. Ze speciálních siluminů jsou odlévány tvarově složité a tenkostěnné odlitky všeho druhu, včetně velkorozměrných, například skříně spalovacích motorů a

převodovek, píсты a hlavy válců, řemenice, pouzdra, disky kol, součásti pro letadla. [10]

Nadeutektické siluminy. Praktické využití těchto slitin je podmíněno zjemněním hrubých primárních krystalů křemíku, což se modifikací sodnými solemi dosahuje obtížně. Toto zjemnění se efektivněji provádí modifikací například červeným fosforem nebo solemi obsahujícími fosfor. Fosfor tvoří fosfid hliníku, jehož částice působí jako zárodky pro krystalizaci proeutektického křemíku. V konečné struktuře jsou jemné krystaly tohoto proeutektického křemíku uloženy v eutektiku. Obdobně působí i látky obsahující síru a uhlík. [10]

Modifikace siluminů. Průběh tvorby eutektika ($\alpha+\beta$) v siluminech má anomální charakter. Jeho důsledkem je značný podíl hrubých a křehkých krystalů křemíků (obr. 2.9). Siluminy krystalizující bez zásahu do mechanismu tvorby anomálního eutektika mají proto poměrně nízkou pevnost a tažnost ($R_m = 130$ až 140 MPa, $A = 1$ až 2 %). [10]



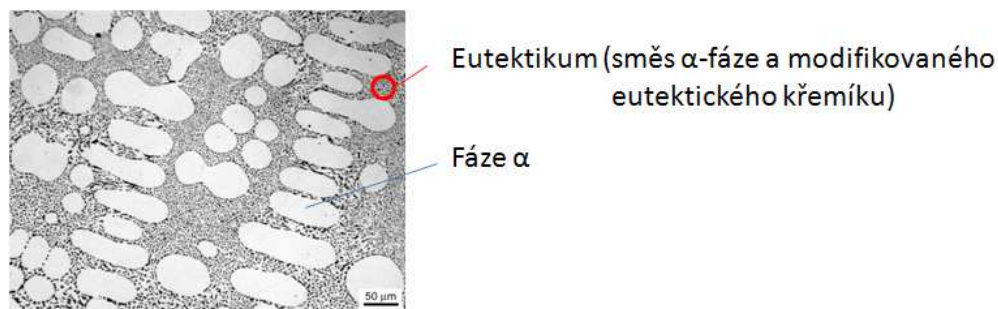
Obr. 2.9 Eutektický křemík ve tvaru jehlic v nemodifikovaném eutektiku slitiny Al-Si. [11]

Pevnost i tvárnost siluminů lze zvýšit zjemněním krystalů křemíku v eutektiku (obr. 2.10). Toho lze dosáhnout dvěma způsoby:

- podchlazením taveniny zvýšenou rychlostí ochlazování a následně pak vyšší rychlostí eutektické přeměny s tvorbou normálního eutektika,
- modifikací malým množstvím alkalických kovů (sodíku, lithia, stroncia).

První způsob vykazuje dobré výsledky, je však použitelný jen pro odlitky tenkostěnné, které jsou odlévány do kovových forem nebo lité tlakově.

Druhý způsob je univerzálnější. V praxi se široce používá modifikování siluminů sodíkem. Jako modifikátory slouží směsi fluoridových a chloridových solí sodíku (binární, ternární nebo polykomponentní směsi). Při modifikování binárním modifikátorem se povrch roztaveného siluminu s teplotou 780 až 830 °C pokrývá tenkou vrstvou modifikátoru v množství 2 až 3 % z hmotnosti siluminu, nebo se modifikátor vmíchává do taveniny. Po určité prodlevě, obvykle 5 až 7 minut, následuje odlití siluminu. Složitější modifikátory se aplikují v menším množství (0,5 až 1 % z hmotnosti siluminu) a vmíchávají se do siluminu o teplotě 750 až 720 °C. Doba jejich působení bývá 3 až 5 minut. [10]



Obr. 2.10 Optimální tvar eutektického křemíku (tvar zrn v rovině výbrusu) v modifikovaném eutektiku slitiny Al-Si. [11]

Slitiny **Al-Cu** mají malé použití. Slitiny polykomponentní, odvozené ze základní báze Al-Cu, obvykle obsahují nikl a železo. Sloučeniny těchto kovů s hliníkem disperzně zpevňují tuhý matriční roztok, ve kterém jsou nerozpustné. Tyto slitiny jsou proto určené pro dlouhodobou funkci za teploty 350 až 450 °C. Na rozdíl od siluminů však mají poměrně široký teplotní interval krystalizace (90 až 100 °C), což způsobuje horší slévárenské vlastnosti, zejména menší zabíhavost, větší sklon k tvorbě trhlin za tepla při tuhnutí odlitku a k mikropórovitosti. [10]

Slitiny **Al-Mg** mají nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost ze všech slévárenských slitin hliníku. Jsou vhodné pro rázově namáhané odlitky s náhlými změnami průřezů a pro odlitky odolávající koroznímu prostředí. Jejich obrobiteľnosť je lepší než u slitin Al-Si. Značné naplynění a oxidace při tavení, lití a krystalizaci jsou však příčinou jejich horších

slévárenských vlastností, větší pórovitosti a snížené těsnosti odlitků. Přísada křemíku zlepšuje zabíhavost, snižuje sklon k tvorbě trhlin za tepla a zvyšuje hustotu odlitků. [10]

Slitiny **Al-Zn-Mg** mají slévárenské vlastnosti obvykle lepší než slitiny Al-Cu a Al-Mg. Ve srovnání se slitinami Al-Cu je lepší i jejich odolnost proti korozi, může se však projevovat vyšší sklon ke korozi pod napětím, který se potlačuje přísadou 0,8 až 1,2 % Fe. Slitiny Al-Zn-Mg jsou méně citlivé na změnu tloušťky stěn odlitků než jiné slévárenské slitiny hliníku a také se dobře svařují. [10]

Slitiny **Al-Li** jsou určeny přednostně pro tvářené hutní polotovary, avšak v případě potřeby mohou být použity i pro odlitky. Vzhledem k vysoké reaktivitě lithia se vzdušnými plyny se tavení a odlévání těchto slitin provádí pod krycí struskou, v ochranné atmosféře nebo ve vakuu. [10]

2.1.3 Prášková metalurgie hliníku

Prášková metalurgie patří v současnosti k progresivním technologiím, které umožňují ekonomicky výhodnou výrobu nových materiálů s vysokými užitkovými vlastnostmi. Prášková metalurgie se zabývá výrobou prášků kovů, nekovů, kovových sloučenin a slitin, jímž se dalším zpracováním tlakem (lisováním) v pevná tělesa a následujícím ohřevem na vhodné teploty spékání (slinutí) dodává žádané pevnosti, tvrdosti a ostatních vlastností. Charakteristickým znakem těchto pochodů je, že ani tlak, ani účinek tepla nezpůsobují úplné roztavení výrobku, jak je tomu u klasické metalurgie. Výrobky práškové metalurgie dostávají konečný tvar zpravidla již při spékání, zatímco výrobky vzniklé tavením a odléváním vyžadují obvykle ještě další značné obrábění nebo zpracování. [5]

Prášky se průmyslově vyrábějí z vysoce čistých kovů a slitin mechanickým mletím v mlýnech nebo různými fyzikálně-chemickými způsoby (rozprašování, chemická redukce, elektrolýza, aj.). Progresivní metodou jsou také různé modifikace rotačního rozstříkávání, kterými se dosahuje vysoké rychlosti ochlazování dispergované taveniny (do $10^8 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$). To dovoluje vyrábět prášky s mikrokrytalickou, kvazikrytalickou nebo amorfní strukturou

a z nich dále výrobky s unikátními vlastnostmi. [5] Příklad součástí vyrobených práškovou metalurgií ukazuje obr. 2.11.



Obr. 2.11 Řemenice vyrobené z práškového hliníkového materiálu. [5]

2.1.4 Slitiny druhého tavení

Zpracování technologického odpadu z výroby součástí z hliníkových slitin spolu s druhotným materiálem získávaným sběrem kovového šrotu představuje v řadě zemí ekonomicky nezanedbatelnou část výroby slitin hliníku. V některých zemích pokrývá až 25 % celkové spotřeby hliníku. Slitiny druhého tavení jsou určeny pro běžné použití bez vyšších nároků na zaručené funkční vlastnosti výrobků. [10]

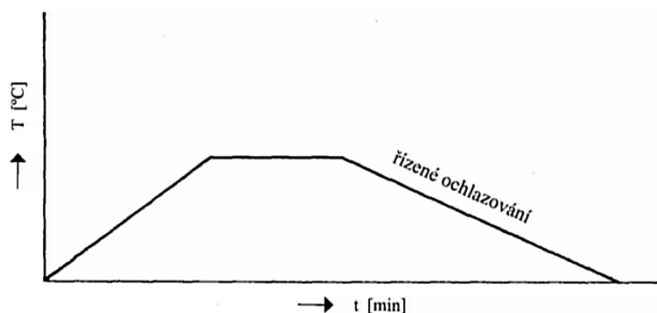
2.2 Tepelné zpracování slitin hliníku

Ve smyslu ČSN 42 0056 lze tepelné zpracování hliníku a jeho slitin definovat jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury/substruktury a vlastností. [5]

Mezi tepelným zpracováním slitin pro tváření a slitin pro odlévání není zásadní rozdíl. Tepelné zpracování slitin hliníku můžeme rozdělit do dvou základních skupin, žíhání a precipitační vytvrzování.

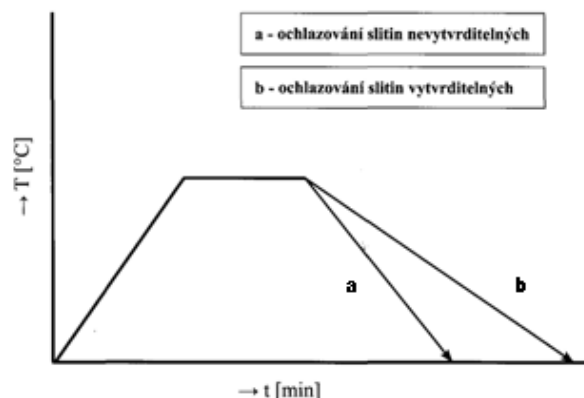
2.2.1 Žihání

Žihání na odstranění pnutí se používá u tvarově složitých součástí tvářených za tepla, u odlitků litých zejména do kovové formy a u svařovaných součástí. Pokles pnutí nastává již od teploty 200 °C, a le účinněji probíhá za teplot 300 až 400 °C. [10] Schéma technologie to hoto žihání je na obr. 2.12.



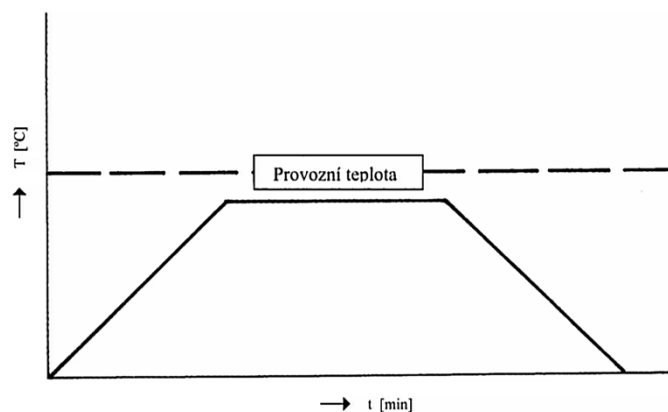
Obr. 2.12 Schéma žihání na odstranění pnutí. [3]

Žihání rekrytalizační je způsob tepelného zpracování za studena tvářeného kovu, kdy z původně deformované struktury vzniká nová rekrytalizovaná struktura. Rekrytalizačním žiháním se snižují pevnostní a zvyšují se plastické vlastnosti původně deformovaného materiálu. V praxi se nejběžněji aplikují teploty v rozmezí 250 až 500 °C. Použitá teplota závisí především na velikosti předcházející deformace za studena (s rostoucí deformací klesá teplota rekrytalizace a velikost zrn) a na čistotě hliníku, respektive chemickém složení slitiny. [5] Schéma rekrytalizačního žihání je na obr. 2.13.



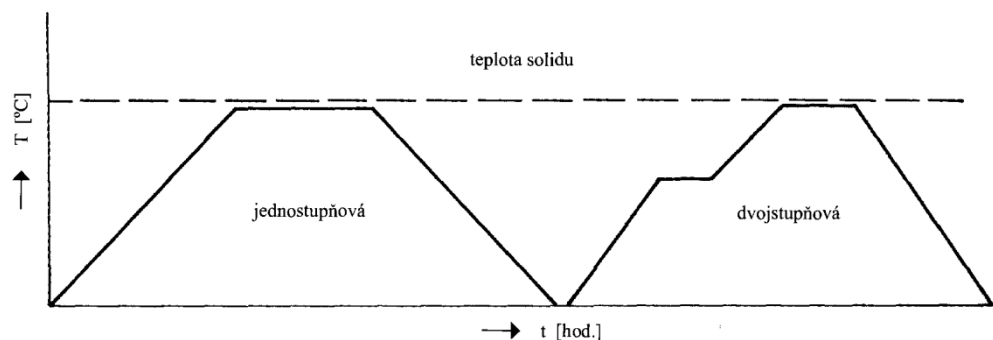
Obr. 2.13 Schéma rekrytalizačního žihání. [5]

Žihání stabilizační se používá pro stabilizaci struktury a tedy i vlastností a rozměrů součástí, které mají být dlouhodobě vystaveny funkci za zvýšených teplot. Teploty obvykle bývají 240 až 350 °C. [5] Schéma technologie tohoto žihání je na obr. 2.14.



Obr. 2.14 Schéma stabilizačního žihání. [5]

Žihání homogenizační je tepelné zpracování při vysoké teplotě (blízké solidu) za účelem odstranění nebo snížení chemické heterogenity difúzními procesy. Dvojstupňová homogenizace je způsob homogenizace spočívající v aplikaci dvou po sobě následujících různých teplot za účelem odstranění nebo snížení chemické heterogenity difúzními procesy. [5] Schéma jednostupňové a dvojstupňové homogenizace je na obr. 2.15.



Obr. 2.15 Schéma jednostupňového a dvoustupňového homogenizačního žihání. [5]

Žihání vytvrzených slitin k dosažení odpevnění se používá tehdy, je-li vytvrzený materiál určen k další operaci tváření. Žihací teploty jsou obvykle 350 až 450 °C. [10]

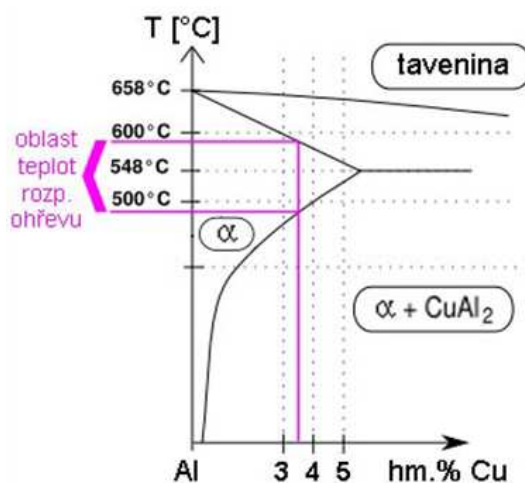
2.2.2 Vytvrzování slitin hliníku

Z pohledu fyzikální metalurgie existují tyto možnosti zvýšení pevnostních vlastností u slitin hliníku, vyjma deformačního zpevnění:

- substituční zpevnění mřížky Al vytvořením tuhého roztoku α ,
- precipitační zpevnění (GP zóny, koherentní precipitáty),
- disperzní zpevnění (nekoherentní precipitáty). [5]

Značný praktický význam má **precipitační zpevnění – vytvrzování**. Tímto způsobem se dají ve značném rozsahu měnit mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitin. Podmínkou je, že tyto slitiny mají z hlediska příslušného rovnovážného diagramu výraznou změnu rozpustnosti legujícího prvku/prvků na teplotě. Změna rozpustnosti v tuhém roztoku α je tedy základním předpokladem pro vznik přesyceného tuhého roztoku α . Vytvrzování se skládá z následujících technologických úkonů, které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že každé dílčí provedení ovlivňuje konečný výsledek. [5] Jedná se o rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení a vytvrzování (stárnutí).

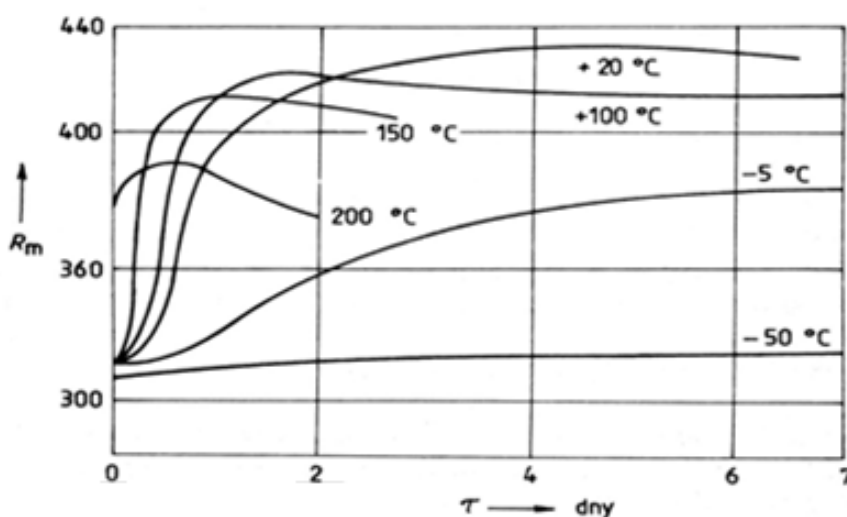
Rozpouštěcí žíhání znamená ohřev a dostatečnou výdrž na takové teplotě, při které dojde k maximálnímu převedení přísady do tuhého roztoku hliníku. Při volbě teploty rozpouštěcího žíhání se vychází z fázového diagramu slitiny (obr. 2.16) a z přesnosti regulace teploty v peci. Při homogenizačním ohřevu nesmí dojít k překročení teploty solidu, aby nedošlo k natavení hranic zrn slitiny. V takovém případě dochází k degradaci mechanických vlastností materiálu. [11]



Obr. 2.16 Fázový diagram slitiny hliníku Al-Cu. [11]

Rychlé ochlazení se provádí nejčastěji do vody o teplotě 20 až 40 °C. Minimální potřebná rychlost ochlazování z teploty rozpouštěcího ohřevu je určena kritickou rychlostí ochlazování, kterou lze stanovit z kinetických diagramů rozpadu nerovnovážného tuhého roztoku α . U tenkostěnných součástí to znamená rychlost 600 až 800 °C.s⁻¹, což je mnohonásobně více než je kritická rychlost ochlazování kterékoliv slitiny hliníku. Získaný metastabilní tuhý roztok α je ve srovnání s výchozím stavem slitiny tvárnější bez nebezpečí vzniku trhlin. [10] Veškerá manipulace se slitinou se musí provádět co nejrychleji, aby nedocházelo k částečnému rozpadu tuhého roztoku hliníku. U masivnějších součástí, kde hrozí nebezpečí deformací, se používají jiné méně razantnější ochlazovací média.

Při **vytvzování (stárnutí)** je přesycený roztok termodynamicky nestabilní, dochází k jeho rozpadu. U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku již při teplotě okolí – pochod označujeme jako přirozené stárnutí. Při umělém stárnutí se proces urychluje ohřevem (obr. 2.17). [5]



Obr. 2.17 Vliv teploty a doby stárnutí na pevnost v tahu slitiny AlCu4Mg. [11]

Při delší výdrži na teplotě stárnutí dochází k nežádoucímu hrubnutí rovnovážného precipitátu, klesá tvrdost. Toto stádium označujeme jako **přestárnutí**.

2.3 Úprava povrchu hliníku a jeho slitin

Neupravený hliník vytváří na svém povrchu vlivem atmosféry přírodní oxidickou vrstvu, která zpravidla chrání základní materiál před další korozi. Tato přírodní oxidická vrstva propůjčuje hliníku za normálních klimatických podmínek relativně vysokou odolnost proti korozi. Přirozená oxidická vrstva je ale velmi slabá. Již po několika sekundách vzniká na chemicky vyčištěném povrchu hliníku vrstvička o síle asi 0,001 μm , po jednom dni 0,003 až 0,005 μm a po několika měsících dosahuje 0,1 až 0,5 μm . Za přítomnosti vlhkosti dojde ve vnější části oxidické vrstvy k hydratizaci a oxid se zformuje na hydroxid $\text{Al}(\text{OH})_3$ – barit. Výsledné oxidické vrstvy nejsou dekorativní, nemají velkou tvrdost, a snadno se proto poškodí mechanicky nebo vlivem atmosférických podmínek. [5]

Pro korozní odolnost hliníkových slitin je rozhodující, zda jde o slitiny obsahující měď či nikoli. Slitiny hliníku bez mědi mají prakticky stejné korozní vlastnosti jako čistý hliník Al 99,5. Patří sem slitiny Al-Mn, Al-Mg-Mn, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg. Odolnost některé z nich může být snížena při aplikaci za vyšších teplot. [5]

Slitiny hliníku s mědí mají nízkou korozní odolnost, například slitiny Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Mg, legované Fe a Ni, Al-Mg-Cu-Si a Al-Zn-Mg-Cu, proto se při vysokých nárocích na korozní odolnost používají plátované čistým hliníkem, případně slitinou Al-Zn. [5] Dalším způsobem jak zvýšit korozní odolnost hliníkových slitin je možnost aplikovat některou z povrchových úprav.

2.3.1 Anodická oxidace hliníku

Anodizace znamená anodickou oxidaci hliníku. Elox znamená elektrickou oxidaci hliníku. Oba pojmy označují stejnou metodu. Během anodické oxidace vznikne na povrchu kompaktní vrstva oxidů hliníku. Slitiny hliníku, předúprava a parametry anodické oxidace určují vzhled a vlastnosti oxidické vrstvy. Takto vytvořené kompaktní a tvrdé povrchy chrání eloxovaný hliník proti korozi a mechanickému poškození. Různými postupy anodické oxidace se mohou vytvořit dekorativní, funkční a barevné oxidické vrstvy. Hliník teprve po anodické oxidaci (eloxování) získá stálost, odolnost proti korozi a velmi

dobře se ošetřuje. Eloxovaný hliník se dá znovu beze všeho použít k dalšímu zpracování a představuje tímto ekologicky přijatelný způsob zušlechťování povrchu odpovídající požadavkům na jeho stálost. [5]

Vzniklá eloxovaná vrstva je nevodivá, velmi tvrdá a dá se snadno barvit (obr. 2.18). V současné době existuje mnoho technologických postupů anodické oxidace, které umožňují realizaci oxidických vrstev s velmi rozdílnými vlastnostmi, mezi něž patří:

- rozdíly v tloušťce vrstvy od 0,3 do cca 200 μm ,
- čiré, průhledné vrstvy,
- barevné vrstvy vytvořené vlastním zbarvením oxidické vrstvy,
- barevné vrstvy vytvořené barvením oxidické vrstvy prostřednictvím organických barviv,
- elektrolyticky barvené oxidické vrstvy,
- oxidické vrstvy se zapuštěnými částicemi (například PTFE). [5]



Obr. 2.18 Součásti ošetřené anodickou oxidací. [12]

2.3.2 Práškové a mokré lakování hliníku

Povrchová úprava mokrým a práškovým lakováním umožňuje hliníkové povrchy tónovat neomezeným množstvím barevných odstínů v lesklém i matném provedení. K hlavním přednostem patří dekorativní vzhled (obr. 2.19) a protikorozní ochrana základního materiálu.

Důležitou fází při lakování hliníku je předúprava povrchu materiálu. Úkolem je jednak vytvoření odpovídající konverzní vrstvy (transformační

vrstvy), která zaručuje přilnavost mezi povrchem a následnou krycí vrstvou, a dále optimální protikorozi ochrana základního materiálu. [5]

Mezi klasické postupy při předúpravě hliníkových povrchů již po dlouhou dobu patří metody žlutého, zeleného a transparentního chromatování, vyznačují se výraznou ochranou proti korozi a skvělou přilnavostí vytvářených vrstev. Jelikož ale bylo zjištěno, že chrom a jeho sloučeniny mohou být nebezpečné pro zdraví lidí a životní prostředí, hledají se odpovídající alternativní metody předúpravy povrchu hliníku bez obsahu chromu. Znamé metody bez obsahu chromu se zakládají na bázi kyselých roztoků sloučenin zirkonu, titanu, fluoridů a navíc obsahují organický (polyakrylát) nebo anorganický (polymerní silikátové sloučeniny) přípravek vytvářející film. V principu se dá i anodická oxidace, používaná již desetiletí, počítat k metodám bez obsahu chromu. Ale jejímu širšímu využití brání vysoké náklady na technické zařízení. Tím se omezuje použití této metody jen ve specifických oblastech. [5]

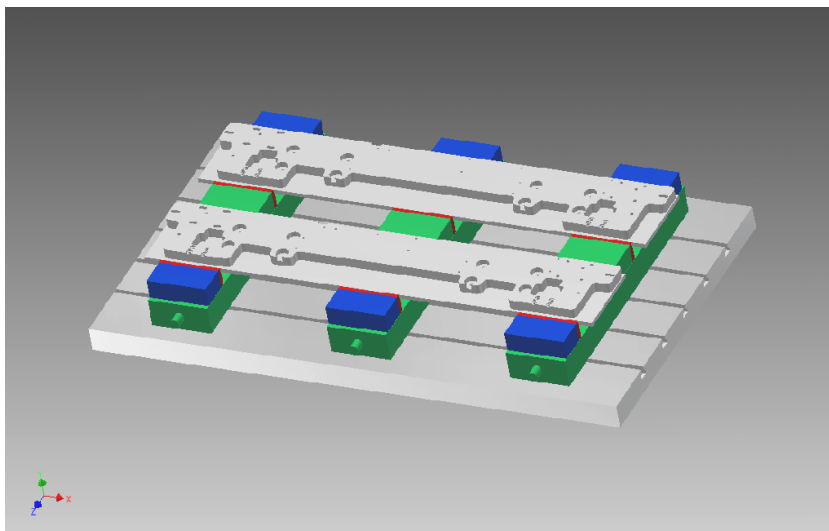


Obr. 2.19 Plechové výrobky ošetřené práškovým lakováním. [13]

3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY DÍLCE

Návrh technologie výroby dílce je dle požadavku směřován na vertikální tříosé obráběcí centrum, jehož parametry jsou uvedeny v podkapitole volba stroje. Tomu je podmíněna i následná volba polotovaru, respektive jeho upnutí a samotná strategie s volbou nástrojů, kterým se bude blíže věnovat tato kapitola.

Navrhovaná technologie počítá s obrobením dvou dílců na jedno upnutí, při kterém budou všechny technologické prvky vyrobeny nahotovo (obr. 3.1), kromě pravoúhlé drážky na jednom boku součásti. Dokončení součásti z druhé strany představuje pouze obrobení čelní plochy na požadovaný rozměr a jakost povrchu. V rámci další optimalizace by mohla být tato operace přemístěna na konvenční vertikální frézku s odpovídajícími parametry, protože nevyžaduje CNC řízení. Sražení hran a očištění závitů z druhé strany součásti bude realizováno na zámečnickém pracovišti.



Obr. 3.1 Hotové obrobky při prvním upnutí.

3.1 Rozdělení technologických skupin

Především z důvodu větší přehlednosti a uspořádanosti při sestavování CNC programu a technologického postupu (viz Příloha 5) jsou technologické prvky se stejnou nebo podobnou technologií výroby rozděleny do jednotlivých skupin.

3.1.1 Plochy

Nedostačující rozměrová a hlavně geometrická přesnost použitého polotovaru vyžaduje frézovat čelní plochu obrobku. Navrhovaná čelní fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) ze slinutého karbidu určená pro obrábění hliníku a jeho slitin představuje kompromis mezi pořizovací cenou nástroje a produktivitou.

Pro výrazné zvýšení produktivity by bylo možné nasazení čelní frézy s VBD osazenými PKD (obr. 3.2). Tato aplikace umožňuje dle doporučení výrobce nastavit jen malé šířky záběru ostří a to do 2 mm. Ale na druhou stranu můžeme obrábět řeznou rychlostí až $3000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, a to při doporučeném posuvu na zub představuje posuvové rychlosti nad $10\,000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. S těmito hodnotami se pohybujeme v doporučeném pásmu parametrů pro HSM. Navíc předpokládaná životnost nástroje z PKD výrazně převyšuje navrhovanou variantu VBD z SK. Pořizovací cena VBD osazených PKD je ale řádově vyšší. Na základě orientačního propočtu a konzultace s dodavatelem nástrojů není v tomto konkrétním případě nasazení tohoto nástroje rentabilní, aniž by nástroj byl využitý v jiné výrobě.



Obr. 3.2 Čelní nástrčná fréza vyrobená z vysoce legovaného hliníku s VBD osazenými PKD společnosti Sandvik Coromant. [14]

3.1.2 Kontura obrysu

Pro frézování obvodu obrobku je pro hrubování navrženo použít monolitní SK čelní válcovou frézu s děleným ostřím, které dokonale drobí třísku a to zabezpečuje jejich snadný odvod a plynulé obrábění. Veškeré frézování bude probíhat sousledně. Navrhovaná stopková fréza je primárně

určená pro obrábění hliníkových slitin a doporučené řezné podmínky z ní dělají velmi výkonný nástroj. Abychom dosáhli optimálního poměru mezi trvanlivostí a výkonem, volíme šířku záběru ostří, šířku frézované plochy, posuv a řeznou rychlost na středních hodnotách doporučených výrobcem.

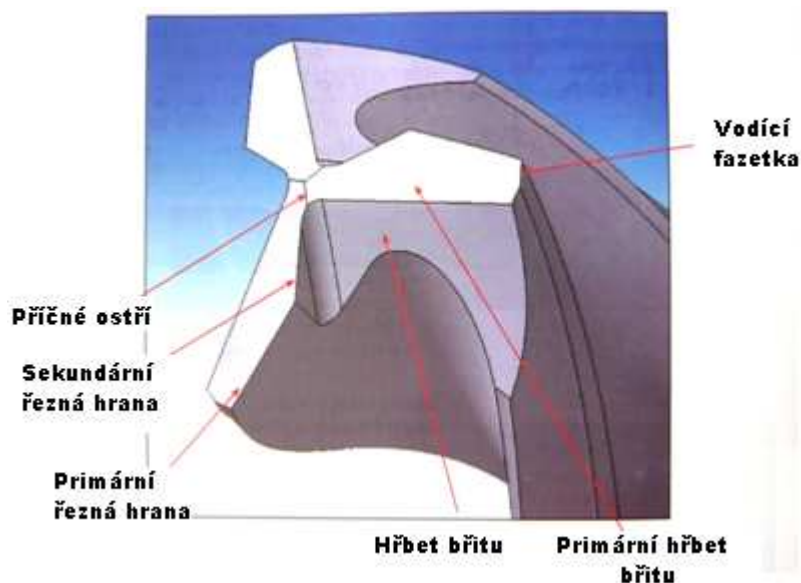
Následné frézování obvodu načisto představuje odebrání pouze radiálního přídávku 1 mm na stěnách obvodu obrobku, které se bude frézovat sousledně na plnou šířku záběru ostří, tudíž na jedno projetí monolitní SK čelní válcovou frézou s hladkým ostřím. Řezné parametry volíme jako střední hodnoty doporučené výrobcem s návrhem pro následnou optimalizaci na základě dosahovaných parametrů struktury povrchu.

3.1.3 Válcové díry

Nejmenší válcové díry na součásti jsou průměru 2,8 mm do hloubky 10 mm. Tyto díry budou vrtány monolitním SK dvoubřitým vrtákem s geometrií břítu pro vrtání hliníku a jeho slitin.

Pro vrtání děr průměrů větších než 3 mm jsou navrhnuté monolitní SK tříbřité vrtáky s hloubkou vrtání až 5xD. Tyto vrtáky jsou zejména používány pro vrtání neželezných materiálů, protože zde dosahují maximální výkonnosti. Tříbřité vrtáky (obr. 3.3) vykazují lepší válcovitost, kruhovitost, přímost a sousost vrtaných děr v porovnání s monolitními SK dvoubřítými vrtáky. Nasazení tříbřitých vrtáků je doprovázeno snížením řezných sil na každý z břitů, což umožňuje volbu vyšších posuvů. Výsledkem je mimo jiné prodloužení životnosti nástroje, snížení seřizovacích časů a vyšší produktivita. [15]

Všechny díry musí být dle výkresové dokumentace sraženy na hodnotu 0,5x45°. Pro toto sražení je navrhuta monolitní SK čtyřbřítá fréza na sražení hran s odpovídajícím průměrem, aby bylo možné s tímto nástrojem srazit hranu nejmenší díry průměru 2,8 mm a zároveň kruhovou a lineární interpolací srazit hrany válcových osazení, respektive ostatních ostrých hran.



Obr. 3.3 Základní popis geometrie tříbitého vrtáku. [3]

3.1.4 Přesné válcové díry

Přesné válcové díry na dílci představují čtyři díry průměru 6H7, pro které je navrženo použít monolitní SK výstružník SOLID H-REAM společnosti Iscar vyráběný dle požadavků normy DIN 1420. Tyto nástroje zaručují vysoce přesnou výrobu děr a také výjimečné řezné parametry. Je nutno dodržet běžné podmínky pro vystružování jako je tuhost upnutí, správně předvrtanou díru, způsob mazání, vhodný typ výstružníku, stabilitu stroje a řezné podmínky. [16]

Řezná rychlost má největší vliv na drsnost povrchu vystružované díry a životnost nástroje. Zvýšením řezné rychlosti nad optimum může negativně ovlivnit životnost nástroje v důsledku zvýšení teploty v místě řezu. Zvýšení řezné rychlosti může též zvýšit riziko tvorby nárůstků (nalepování materiálu na řeznou hranu). Vlastní nárůstek pak může poškrábat povrch díry a snižovat životnost nástroje. Proto v zájmu dosažení kvalitní drsnosti povrchu a co nejdelší životnosti nástroje musíme držet řeznou rychlost relativně nízko. [16]

Nastavené hodnoty posuvů rovněž ovlivňují opotřebení bříty nástroje. S vyšším posuvem úměrně vzrůstají řezné síly. Na drsnost povrchu a opotřebení nástroje mají menší vliv než řezná rychlost. Posuv lze moderovat ve větším rozsahu bez podstatnějšího okamžitého vlivu na povrch

vystružované díry. Proto se doporučuje zvolit hladinu posuvu na vyšší hranici za účelem zkrácení doby vystružování bez významného zkrácení životnosti nástroje. [16]

Další parametry, jako přídavek na vystružování a typ procesních kapalin, jsou zvoleny na základě doporučených hodnot pro vystružovaný materiál. Z důvodu vystružování neprůchozích děr je doporučeno použít výstružník s přímými břity. Předvrtaná díra bude před vystružovací operací zahloubena na předepsanou hodnotu pro dokonalé zavedení výstružníku.

3.1.5 Válcové zahloubení

Válcové zahloubení otvorů se bude hrubovat frézováním pomocí kruhové interpolace za současného zavrtávání po spirále s radiálním a axiálním přídavkem monolitní SK čelní válcovou frézou zvoleného průměru tak, aby zabírala alespoň dvě třetiny otvoru zahloubení. Přídavek pro dokončení se odfrézuje kruhovou interpolací v plné hloubce osazení s následným tečným výjezdem z hotového zahloubení.

3.1.6 Závity

Pro výrobu závitů M6 a M8 jsou navrženy monolitní SK závitové frézy (obr. 3.4), které jsou v porovnání se závitníky mnohem výkonnější, přesnější a odpadají komplikace spojené se zalomeným nástrojem v obráběné díře.



Obr. 3.4 Monolitní závitová fréza. [3]

Protože se v tomto případě budou frézovat závity relativně malých průměrů, je navrhováno použít monolitní SK závitové frézy MTECS (Mill Thread Endmills Carbide Short) společnosti Iscar (obr. 3.5). Frézy se

vyznačují krátkou pracovní částí se třemi břity a odlehčeným krčkem mezi pracovní částí a stopkou. Krátká pracovní část nástroje a malý počet břitů v záběru zaručují malé řezné síly a minimální ohyb nástroje. [16]



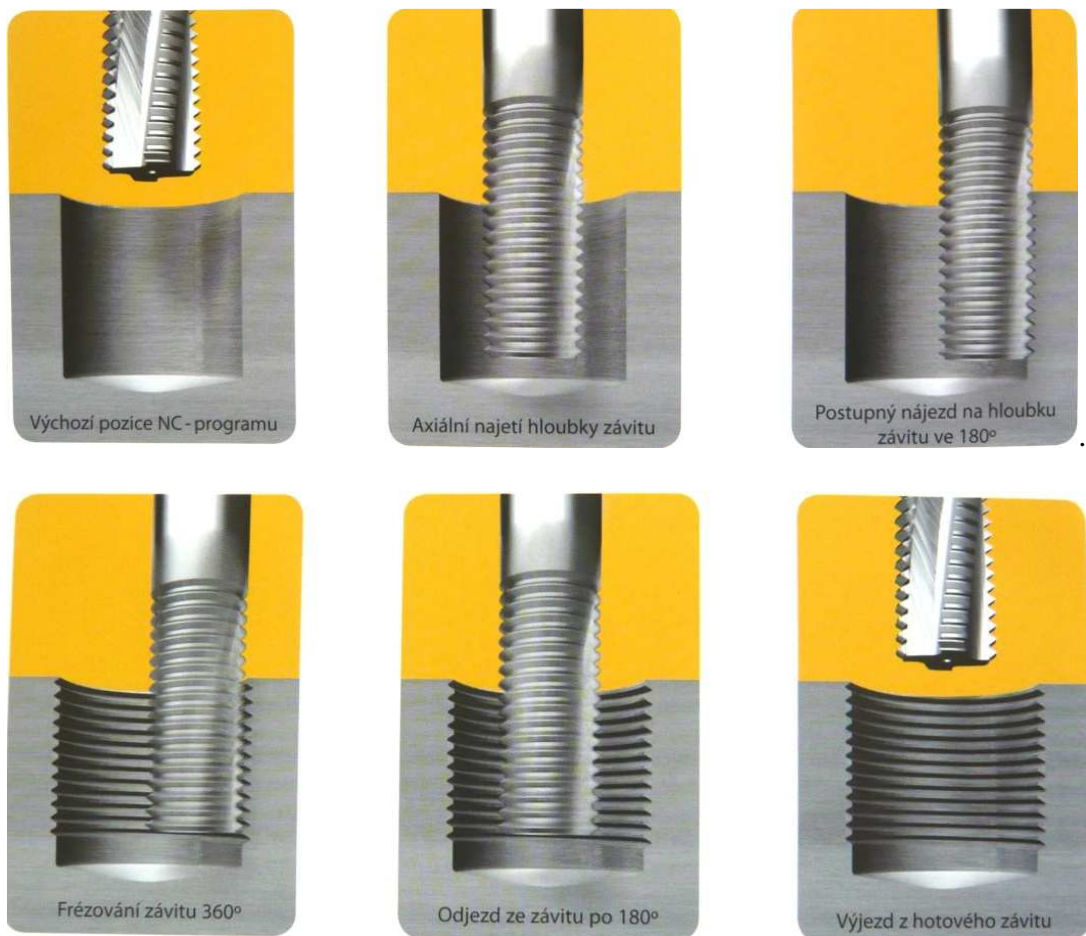
Obr. 3.5 Monolitní závitové frézy MTECS. [3]

Výroba závitů frézováním přináší při porovnání s dosavadními klasickými metodami závitování řadu významných výhod. Například při srovnání výroby závitů klasickým závitníkem a monolitní SK závitovou frézou lze jednoznačně hodnotit ve prospěch frézovací metody dosaženou kvalitu povrchu závitů, jeho toleranci a geometrii. Běžně dosažitelnou toleranci závitů standardní monolitní SK závitovou frézou v rozsahu 4H – 6H lze zajistit pouze speciálním závitníkem. Při frézování jsou též dosahovány výrazně nižší řezné časy i řezné síly. V celkovém hodnocení charakteristických vlastností rozsáhlé oblasti rozmanitých nástrojů pro frézování závitů lze specifikovat řadu optimalizačních prvků proti klasickým metodám závitování, a to:

- možnost zhotovení přesných závitů na CNC frézovacích strojích a obráběcích centrech s využitím kruhových interpolačních programů,
- bezproblémové obrábění kvalitních vnějších i vnitřních závitů umístěných mimo osu rotace obráběného dílu či na nerotačních součástech,
- velmi přesné a jakostní závitování i v tvrdých a dalších těžkoobrobitelných materiálech a taktéž i v měkkých materiálech bez rozdírávání opracované plochy,

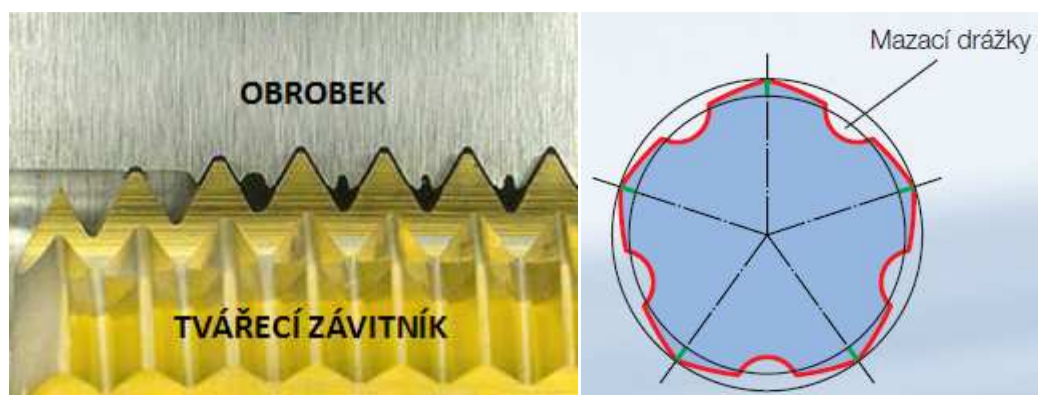
- eliminace problémů s odstraňováním zbytků zalomených závitníků v závitových otvorech mnohdy nákladných rozpracovaných dílů,
- výrazné cenové zvýhodnění frézovacích nástrojů oproti závitníkům větších rozměrů,
- možnost použít jediného nástroje pro různé průměry závitů o stejném stoupání, v pravém i levém provedení,
- možnost spolehlivého zhotovení závitů u tenkostěnných obrobků díky zmenšeným řezným silám, při přerušovaném řezu a do dna bez odlehčení ve slepých otvorech,
- eliminace přebušovací operace s ohledem na dobrou kvalitu obrobeného závitů,
- odstranění nepříznivého pěchování třísek běžného při použití závitníku,
- podstatné zkrácení obráběcího cyklu na jediný průchod v délce závitů,
- hladký a klidný řez bez vibrací. [17]

Frézování závitů se uplatní na obráběcích strojích, na kterých lze naprogramovat současnou šroubovou interpolaci ve třech směrech – pohyb v osách X a Y určuje průměr závitů, pohyb v ose Z stoupání. Pracovní cyklus frézování závitů je jednoduchý (obr. 3.6). Z výchozí polohy (hloubky) otáčející se nástroj postupně radiálně najede na plnou hloubku závitů (180°). Následuje frézování závitů (projetí 360°) a vyjetí nástroje – radiálně ze záběru (180°) a axiálně z otvoru. Přitom začátek frézování pravého závitů je od jeho konce nahoru a levého závitů shora dolů. Při volbě řezných podmínek je třeba mít na paměti, že závitovací frézy mají při frézování větší kontaktní plochu s obrobkem než stejně dlouhé stopkové frézy a často také nevhodný poměr délky k průměru. [18]



Obr. 3.6 Postup při frézování závitu. [19]

Kvůli své hloubce 20 mm v průchozí díře budou zbývající závity M5 zhotoveny tvářecím závitníkem.



Obr. 3.7 Průběh tváření vnitřního závitu tvářecím závitníkem s drážkami pro lepší přívod procesní kapaliny. [20]

Tváření vnitřních závitů zastudena dle DIN 8583-5 patří do skupiny tváření plastickou deformací materiálů. Vnitřní závit je vytvářen vtlačováním spirálové části závitového profilu zubu v oblasti náběhu tvářecího závitníku do předem připraveného otvoru. Požadovaný profil a rozměr závitu potom vzniká plastickou deformací obráběného materiálu (obr. 3.7). [20]

V závislosti na druhu obráběného materiálu přináší tváření závitů výhody jako výbornou kvalitu povrchu závitů a zvýšení jejich statické a dynamické pevnosti. Dosahovanou hloubku závitu nelimituje problém s odvodem třísek z místa řezu, jako je tomu u řezání závitů závitníkem, což dále zvyšuje provozní bezpečnost této pracovní metody. V praxi tato hloubka závisí na kvalitě chlazení a mazání a je omezena konstrukční délkou nástroje. Neméně důležitá je také větší stabilita tvářecích závitníků, zejména u menších průměrů. [20]

Pracovní část tvářecího závitníku má tvar polygonu (obr. 3.8). Tento tvar, zejména zdvih a průběh, je určující pro kontaktní dotykovou zónu na tvářecích vrcholcích. Tvářecí vrcholky ovlivňují průběh a rychlost tváření a tečení tvářeného materiálu a charakteristiky tření nástroje. [20]



Obr. 3.8 Tvářecí závitníky. [20]

Tvářecí závitník byl vybrán z katalogu německého výrobce nástrojů Emuge, který se specializuje na nástroje pro výrobu závitů. Konkrétně se jedná o tvářecí závitník z řady InnoForm-AI. Rozsah použití tohoto nástroje zahrnuje tvárné slitiny hliníku a neželezné kovy. Při běžných podmínkách mazání, například při mazání emulzí, vykazují tyto materiály při tváření závitů silný sklon k nalepování na pracovní břity. Tento závitník je opatřen povlakem

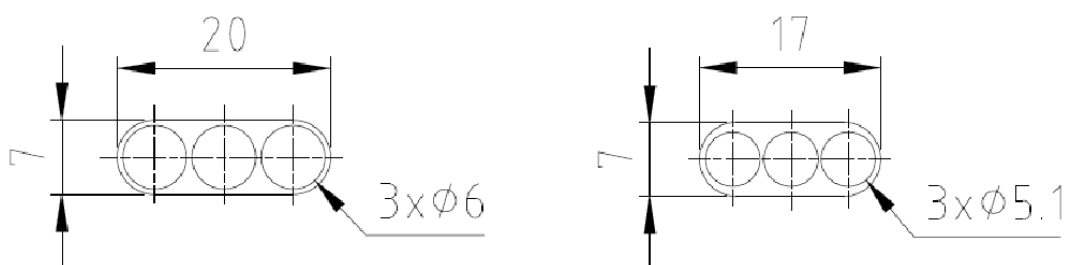
s vynikajícími třecími vlastnostmi, což eliminuje problém s nalepováním a zajišťuje tak vysoký stupeň bezpečnosti procesu. [20]

3.1.7 Pravoúhlé otvory (kapsy)

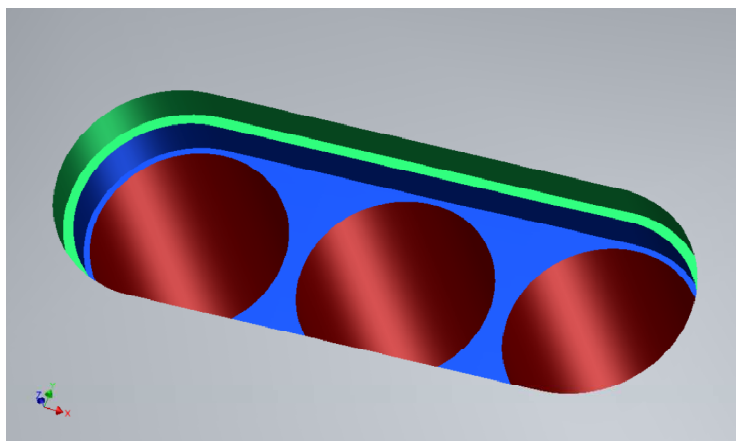
Dílec obsahuje dva stejné pravoúhlé otvory, které se budou hrubovat stejným nástrojem jako obvod dílce s následným obrobením zbytkového materiálu monolitní SK čelní vřetovou frézou s hladkým ostřím průměru 10 mm. Stejným nástrojem se bude frézovat otvor načisto. Otvory se budou frézovat pouze do hloubky 21 mm, čímž vzniknou kapsy. Navíc tímto nástrojem se bude frézovat drážka na boku dílce s R5 nahotovo.

3.1.8 Drážky

Rozměr drážek, hlavně jejich hloubka, představuje problém z pohledu plynulého odchodu třísek z místa řezu, což může vést až k přídření povrchu stěny drážky a poškození nástroje. Z toho důvodu je navrženo co nejvíce drážku předhrubovat vyvrtáním pomocných děr s následným hrubováním drážky s přídávkem, kdy odstraníme vzniklé můstky mezi vyvrtanými otvory. Následuje bezpečné dokončení načisto (obr. 3.10). Tento postup je pomalejší než frézovat drážku do plna, ale stupeň bezpečnosti procesu je výrazně vyšší. Dílec obsahuje dva typy drážek, rozdíl je pouze v celkové délce drážky (obr. 3.9), což umožňuje vyvrtat pomocné díry většího průměru v případě delší drážky.



Obr. 3.9 Postupový náčrt výroby drážky.



Obr. 3.10 Objemový model postupného frézování drážky.

Obrobit pravoúhlou drážku, která je na jednom z boků obrobku, při prvním upnutí je možné s aplikací kompaktního nástroje poháněného chladicí kapalinou. Poháněné nástroje Titespot (obr. 3.11), primárně určené pro obrábění drážek v otvorech, představují netradiční přístup pro řešení tohoto problému na obráběcích centrech (obr. 3.12) nebo soustruzích při jednom upnutí obrobku. Tyto nástroje americké společnosti Eltool Corporation ke svému pohonu využívají tlak chladicí kapaliny (14 až 140 barů), který je díky hydromotoru s kulovými písty a přesnému spirálovému kuželovému ozubení převáděn na rotační pohyb nástroje. Výsledné otáčky jsou závislé na rychlosti průtoku chladicí kapaliny, krouticí moment pak na jejím tlaku. Hlava je pevně upnuta ve vřetenu bez jakéhokoliv dalšího příslušenství, díky tomu je i automatická výměna naprosto bezproblémová. Při tlaku chladicí kapaliny 70 barů dosahuje výsledný krouticí moment hodnoty 13 Nm. [21]

Především z důvodu, že navrhovaná technologie je směřovaná na vertikální obráběcí centrum, které nemá v aktuální modifikaci vysokotlaké chlazení dodávající chladicí kapalinu osou vřetene, je tato možnost neaktuální. Výrobce stroje sice nabízí dodatečně instalaci vysokotlakého chlazení, ale tato varianta představuje nemalé další investiční náklady. To je hlavní důvod, proč je navrhováno operaci frézování pravoúhlé drážky obrobit na konvenční horizontální frézce FGH 32 s použitím univerzálního vřeteníku, která je součástí strojového parku výrobní společnosti AB Komponenty s.r.o. Navrhuto je upnout pět kusů najednou ve dvou strojních svěracích

rovnoběžně s podélnou osou stolu frézky a drážku frézovat v příčném směru stavitelnou kotoučovou frézou na plnou radiální hloubku řezu.



Obr. 3.11 Poháněný nástroj Titespot. [21]



Obr. 3.12 Aplikace poháněného nástroje Titespot. [21]

3.2 Obrobek

Výchozí polotovar byl zvolen na základě výpočtů normy spotřeby materiálu (viz Příloha 1), posouzením různých strategií a technologií výroby dílce, kdy hlavním kritériem výběru byla konečná cena součásti. Vzhledem ke geometrickému tvaru vyráběného dílce (obr. 3.13), bylo porovnáno několik variant výchozího polotovaru. Operační přídavky byly zvoleny s ohledem na charakter výroby s dostatečnou rezervou.

Varianta „**A**“ - Tyč plochá válcovaná 160x30x952 mm (přířez).

Varianta „**B**“ - Polotovar řezaný vodním paprskem bez přídavku.

Varianta „**C**“ - Polotovar řezaný vodním paprskem s přídavkem.

Varianta „**D**“ - Polotovar řezaný metodou elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou (EDM).

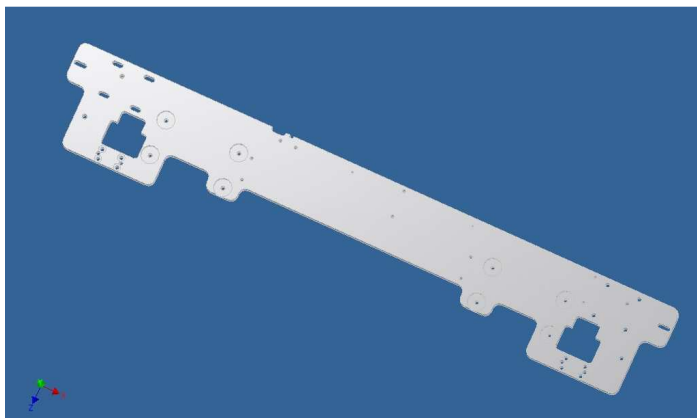
Varianta „**A**“ počítá s válcovanou plochou tyčí o rozměru 160x30 mm v požadované délce. Z důvodu problematické dostupnosti polotovaru v navrhovaném rozměru je dodavatelem materiálu navržena alternativa v podobě přířezu z válcované tabule. V tomto případě je cena materiálu vyšší o cca 30 Kč.kg⁻¹.

Varianta „**B**“ by použila jako výchozí polotovar zhotovený technologií řezání vodním paprskem. V této variantě je obrys součásti, včetně dvou průchozích pravoúhlých otvorů, zhotovený nahotovo. Tato varianta je spojena s další úsporou materiálu v podobě použití tabule se zaručenou rozměrovou a geometrickou přesností, nebude tedy nutné frézovat čelní plochy obrobku.

Varianta „**C**“ je pouze kombinací varianty „**B**“, kdy je obrys součásti řezaný vodním paprskem, ale s podstatně rychlejším posuvem, jehož výsledkem je kratší řezný čas s výrazně horší rozměrovou přesností řezné plochy a k tomu odpovídající strukturou povrchu. V tomto případě se počítá s radiálním přídavkem pro dokončení frézováním.

Varianta „**D**“ posuzuje možnost vyrobit polotovar metodou EDM. Na základě konzultace s dodavatelem dílců vyrobených metodou EDM není v tomto případě tato technologie rozhodně vhodná, ale představuje zajímavou alternativu v případě potřeby výroby například jen jednoho kusu. Výhoda této

technologie spočívá v kompletně vyrobeném obrysu součásti v požadované rozměrové přesnosti i struktuře povrchu, včetně pravoúhlé drážky na boku dílce, obou průchozích pravoúhlých otvorů a všech průchozích drážek nahotovo.



Obr. 3.13 Objemový model součásti.

Tab. 3.1 Porovnání ceny polotovaru (pouze materiál, ceny uvedeny bez DPH).

VARIANTA	N_m [kg.ks ⁻¹]	CENA [Kč.kg ⁻¹]	CENA [Kč.ks ⁻¹]
A	12,77	140	1788
B	9,61	250	2403
C	9,61	250	2403
D	8,246	250	2062

Použitím přesné tabule ve variantách „B“ „C“ a „D“ je spojeno s výrazně vyšší nákupní cenou. Výsledky výpočtů normy spotřeby materiálů doplněné o aktuální cenu dodavatele hliníkových polotovarů jsou shrnuty v tabulce 3.1.

Tabulka 3.2 navazuje na zjištěné ceny materiálu a je rozšířená o cenu za opracování, která představuje hodnotu technologických operací, kterých je potřeba pro získání polotovaru do požadovaného stejného stádia tak, aby mohly být jednotlivé varianty korektně porovnány. Hodnota technologických operací je ve variantě „A“ vyčíslení strojních časů získaných výpočtem odběru materiálu a ověřených simulací v CAM softwaru PowerMill. Ve variantě „B“ a „C“ tato cena opracování představuje nejlevnější nabídku dodavatele dílců řezaných vodním paprskem (viz Příloha 2). U varianty „D“ je cena opracování určena odborným odhadem technologa

zabývající se přípravou cenových nabídek dílců zhotovených technologií EDM na základě výkresové dokumentace.

Tab. 3.2 Porovnání ceny polotovaru (ceny bez DPH).

VARIANTA	CENA MATERIÁLU [Kč.ks ⁻¹]	CENA OPRACOVÁNÍ [Kč.ks ⁻¹]	CENA CELKEM [Kč.ks ⁻¹]
A	1788	105	1893
B	2403	508	2911
C	2403	324	2727
D	2062	1707	3769

Na základě vypočtených celkových cen polotovaru v tab. 3.2 je pro navrhovanou technologii zvolena varianta „A“, která doporučuje použít jako polotovar přířez z válcované tabule o rozměru 160x30x952 mm.

3.2.1 Materiál obrobku

Materiál obrobku byl zadán konstrukčním oddělením. Jedná se o hliníkovou slitinu EN AW 2017, která má dle normy ČSN 42 4201 označení AlCu4Mg. Přesnější chemické složení je uvedeno v tabulce tab. 3.3.

Tab. 3.3 Chemické složení hliníkové slitiny EN AW 2017. [22]

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti+Zn
%	0,2-0,8	max.0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-1	max 0,1	max 0,25	max 0,25

Hliníková slitina EN AW 2017 patří podle normy EN 573-1 do slitin série 2000, kde hlavním legujícím prvkem je měď, sekundárním hořčík. Slitiny jsou tepelně zpracovatelné a lze u nich dosáhnout maximálních pevnostních vlastností. Jejich odolnost vůči korozi je špatná, mají sklon k interkrystalické korozi. [5] Pevnostní vlastnosti jsou uvedené v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 2017. [23]

Mechanické vlastnosti	Typické hodnoty
Mez kluzu R _{P0,2} [MPa]	245
Pevnost v tahu R _m [MPa]	385
Tažnost A ₅₀ [%]	12
Tvrdost HBW [2,5/62,5]	105

3.2.2 Upnutí obrobku

Navrhovaná technologie předpokládá použití přířezu z válcované tabule o rozměru 160x30x952 mm. Obrobek bude upnutý ve třech univerzálních upínacích zařízeních od společnosti Schunk (katalogový list viz Příloha 3), které zajistí požadované upnutí polotovarů (obr. 3.14). V tomto konkrétním případě je navrženo univerzální upínací zařízení v provedení KSD 125/570 s osazenými čelistmi do hloubky 8 mm (viz Příloha 4). Pro zajištění přesné polohy bude krajní upínací zařízení vybaveno podélným dorazem.

Toto dvojitě upínací zařízení s možností použití osazených a měkkých čelistí maximálně vyhovuje navrhované technologii. Díky relativně velkému rozměru stolu obráběcího centra lze upnout dva polotovary současně (obr. 3.15), ty budou obrobeny z jedné strany načisto a také bude obroben celý obvod obou součástí. Pro ověření upínací síly, byl proveden kontrolní výpočet, který potvrdil bezpečné upnutí polotovarů pro zvolenou technologii obrábění (viz Příloha 8).

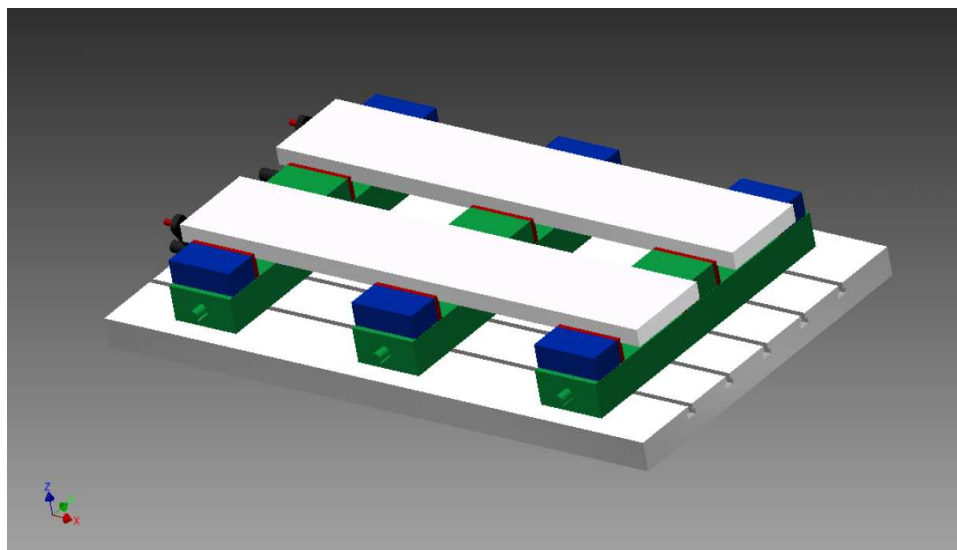
Při obrobení druhé strany, což obnáší pouze frézování čelní plochy na požadovaný rozměr a jakost povrchu, může být upnutí obrobku realizováno stejným způsobem.

Tab. 3.5 Použité komponenty pro upnutí dvou polotovarů. [24]

Název	Označení	Ks
KSD 125-570	430336	3
Podélný doraz	430021	2
Osazená čelist 8mm	430139	12



Obr. 3.14 Upínací nářadí od společnosti Schunk. [24]



Obr. 3.15 Objemový model navrhovaného upnutí dvou kusů polotovarů.

3.3 Volba stroje

Pro tento projekt bude použito vertikální tříosé obráběcí centrum NSV102A taiwanského výrobce YCM (Yeong Chin Machinery Industries), které je nejnovějším přírůstkem ve strojovém parku společnosti AB komponenty s.r.o. a jeho parametry (tab. 3.6) jsou dostačující pro nasazení navrhované technologie. Obráběcí centrum je vybaveno řídicím systémem FANUC MXP-200i, včetně integrovaného dílenského programování MANUAL GUIDEi.



Obr. 3.16 Vertikální obráběcí centrum YCM NSV102A. [25]

Vertikální obráběcí centrum NSV102A (obr. 3.16) je určeno pro frézování, vrtání, vystružování a řezání závitů především středních a velkých tvarově složitých dílců. Jedná se o vysokorychlostní přesné obráběcí centrum s lineárním vedením, které umožňuje obráběním docílit velmi přesných složitých tvarů, povrchů a drsností. Rychloposuvy se pohybují se zrychlením 1G ve všech osách. Automatická výměna nástroje pomocí oboustranného ramena zajišťuje obrábění v plně automatickém cyklu. Velkou tuhost a vysokou opakovanou přesnost zaručuje tuhá litinová konstrukce stroje (MEEHANITE®) a velmi přesné lineární vedení. Centrum je také vhodné pro výrobu forem. [26]

Tab. 3.6 Technické parametry stroje YCM NSV102A. [25]

Typ stroje		
Výrobce a typ stroje	YCM - NSV102A	
Vřeteno		
Otáčky vřetena	ot.min ⁻¹	12 000
Výkon motoru pro pohon vřetena	kW	22
Ukončení vřetena		BBT40
Rozsahy posuvů v jednotlivých osách		
Osa X	mm	1 020
Osa Y	mm	600
Osa Z	mm	600
Upínací stůl		
Velikost stolu	mm	1 120 x 650
Max. zatížení stolu	kg	1 000
Posuvy		
Rychloposuv	m.min ⁻¹	48/48/48
Pracovní posuv	mm.min ⁻¹	20 000
Přesnost		
Přesnost nastavení polohy podle ISO 10791-4	mm	0,010
Opakovatelnost nastavení polohy podle ISO 10791-4	mm	0,007
Zásobník nástrojů		
Počet nástrojů v zásobníku	ks	30
Max. hmotnost nástroje včetně upínače	kg	6
Max. rozměr nástroje/při vynechání vedlejšího místa	mm	ø76/ ø125
Čas výměny nástroje	s	2,5
Obecné údaje		
Celkový příkon stroje	kVA	36
Celková hmotnost stroje	kg	7 000

3.4 Volba nástrojů

Hliník a jeho slitiny patří při obrábění, především za sucha, i přes ne příliš dobré mechanické vlastnosti mezi velmi problémové materiály. Je to způsobeno jejich vysokou tepelnou vodivostí, výrazným sklonem k adhezi na břit většiny řezných materiálů a nízkou teplotou tavení (maximálně do cca 650 °C). Vlivem vysoké tepelné vodivosti se při obrábění odvádí značné množství tepla z místa řezu do obrobku a vysoká tepelná roztažnost hliníku má pak za následek tepelné deformace obrobku. Vzhledem k nízké teplotě tavení vznikají problémy s utvářením třísky, jejím odvodem a nalepováním na břit, eventuálně čelo vyměnitelné břitové destičky. Problém nalepování hliníku při obrábění standardními řeznými nástroji ze slinutého karbidu je všeobecně známý. Tendence k nalepování stoupá s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu (WC), obsahu kobaltu (Co) a drsností řezné hrany a povrchu řezného nástroje. Zvýšením kteréhokoli z uvedených parametrů se projeví ve zvýšeném nalepování hliníku na řezný nástroj. U nástrojů s povrchovou úpravou diamantovým mikroleštěním se v důsledku nižší drsnosti adheze snižuje. Další nalepování hliníku omezuje aplikace ochranných vrstev s nízkým koeficientem tření $m = 0,1$ až $0,2$ (např. TiB_2 , MoS_2 , DLC vrstvy). Obdobný antiadhezní účinek mají i diamantové povlaky nebo polykrystalický diamant. Aplikace těchto materiálů je nejvhodnější pro obrábění hliníkových slitin s vyšším obsahem křemíku ($Si > 12 \%$) z důvodu nízké afinity a adheze uhlíku a hliníku a vysoké otěruvzdornosti diamantu. [27]

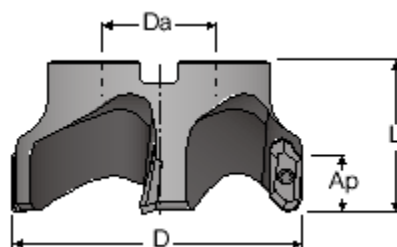


Obr. 3.17 Těleso frézy pro hrubování hliníku s povlakem GOLDALU. [28]

Při obrábění hliníku a jeho slitin frézami s vyměnitelnými břitovými destičkami, hlavně při hrubování ve větších hloubkách, kdy je produkce velkého množství třísek, se poškozuje těleso frézy od přilnavých nárůstků. Tento problém řeší tvrdý TiN povlak označený GOLDALU od společnosti Iscar (obr. 3.17), který velmi účinně zabraňuje nalepování třísek a jiných nárůstků na těleso frézy. [15]

3.4.1 Zvolené nástroje pro frézování

Čelní nástrčná fréza - HM90 FAL - 22

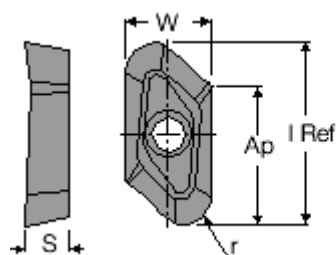


Obr. 3.18 Čelní nástrčná fréza z řady HELIALU od společnosti Iscar. [3]

Tab. 3.7 Rozměry nástroje. [16]

Označení	$\varnothing D$ [mm]	z [ks]	L [mm]	$\varnothing Da$ [mm]
HM90 FAL-D125-40-22	125	5	50	40

Vyměnitelná břitová destička: HM90 APCR 220623R-P IC28



Obr. 3.19 Vyměnitelná břitová destička pro frézování hliníku a jeho slitin. [3]

Tab. 3.8 Rozměry vyměnitelné břitové destičky. [16]

Označení	r [mm]	I Ref [mm]	a_p [mm]	S [mm]	W [mm]
HM90 APCR 220623R-P IC28	2,3	29,7	22,1	6,6	13,72

Tab. 3.9 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	400 - 560	500
Posuv na zub – f_z [mm.zub ⁻¹]	0,15 - 0,25	0,2
Šířka záběru ostří – a_p [mm]	max. 8	5

Kontrolní výpočet krouticího momentu působícího na čelní frézu:

Celková řezná síla F_C působící na nástrčnou čelní frézu je dána vztahem:

$$F_C = \sum_{i=1}^z A_{Di} \cdot k_{Ci} = \sum_{i=1}^2 (f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_1 \cdot k_{C1}) + (f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_2 \cdot k_{C2}) =$$

$$F_C = (0,2 \cdot 5 \cdot \sin 90^\circ \cdot 1196) + (0,2 \cdot 5 \cdot \sin 18^\circ \cdot 1603) = 1692 \text{ N} \quad (3.1)$$

kde měrná řezná síla materiálu k_C je podle vztahu:

$$k_{C\varphi_1} = k_{C1} \cdot h_{m1}^{-m_C} = 800 \cdot 0,2^{-0,25} = 1196 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

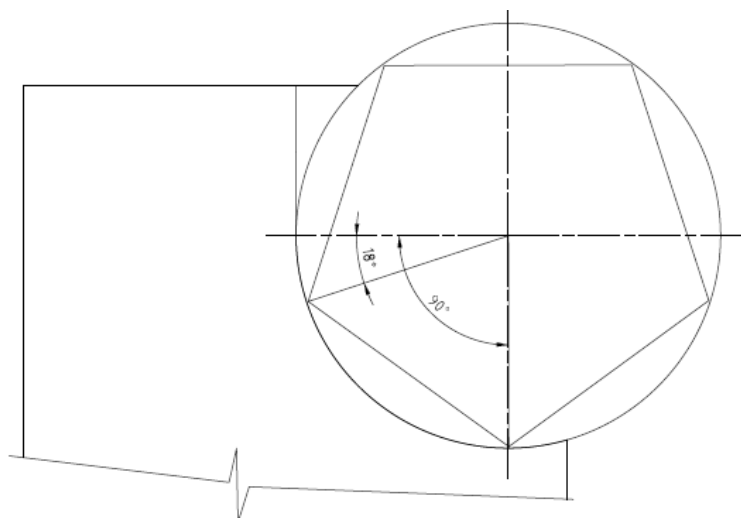
$$k_{C\varphi_2} = k_{C1} \cdot h_{m2}^{-m_C} = 800 \cdot 0,062^{-0,25} = 1603 \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \quad (3.2)$$

Hodnota h_m tloušťka třísky pro zvolené řezné podmínky:

$$h_{m1} = f_z \cdot \sin \varphi_1 = 0,2 \cdot \sin 90^\circ = 0,2 \text{ mm}$$

$$h_{m2} = f_z \cdot \sin \varphi_2 = 0,2 \cdot \sin 18^\circ = 0,062 \text{ mm} \quad (3.3)$$

- A_{Di} jmenovitý průřez třísky pro i-tý zub [mm²],
 f_z posuv na zub [mm.zub⁻¹],
 a_p šířka záběru ostří [mm],
 φ_i úhel pozice pro i-tý zub [°],
 k_{C1} měrná řezná síla [N.mm⁻²],
 m_C faktor tloušťky třísky [-],
 h_{mi} tloušťka i-té třísky [mm],
 $k_{C\varphi_i}$ měrná řezná síla materiálu pro i-tý zub [N.mm⁻²],
 z počet zubů v záběru dle obr. 3.20 [ks]. [16,29]



Obr. 3.20 Operační náčrt pro určení počtu zubů čelní frézy v záběru.

Z vypočtené hodnoty působící řezné síly získáme dalším výpočtem hodnotu krouticího momentu M_C .

$$M_C = F_C \cdot \frac{D}{2} = 1692 \cdot \frac{0,125}{2} = 106 \text{ Nm} \quad (3.4)$$

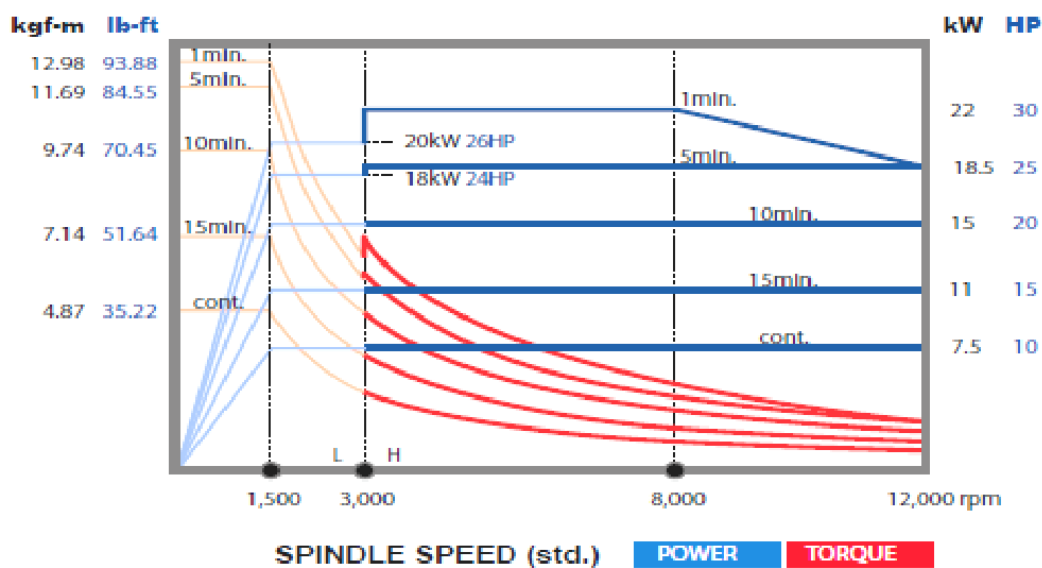
F_C celková řezná síla [N],

D průměr frézy [m]. [30]

Přepočet krouticího momentu na jednotky kgf.m (kilogram force meter) pro možnost odečtení hodnot z grafu obr. 3.21, dodaného výrobcem stroje.

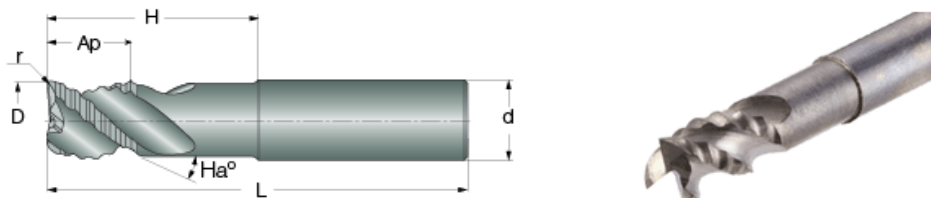
$$\begin{aligned} 1 \text{ Nm} &= 0,10197 \text{ kgf.m} \\ 106 \text{ Nm} &= 10,8 \text{ kgf.m} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Velikost vypočítaného krouticího momentu umožňuje při zvolených řezných parametrech podle grafu obr. 3.21 maximálně 7 minut provozu. Operace zarovnání čela z druhé strany pro dva upnuté polotovary dle získaného strojního času ze simulace činí 3:01 minut, což tento předpoklad splňuje.



Obr. 3.21 Graf průběhu výkonu a krouticího momentu vřetena vertikálního obráběcího centra YCM - NSV102A . [25]

Monolitní SK čelní válcová fréza hrubovací – ECR-B3-R



Obr. 3.22 Monolitní SK čelní válcová fréza hrubovací. [3]

Tab. 3.10 Rozměry vybrané monolitní SK čelní válcové hrubovací frézy. [16]

Označení	$\varnothing D$ [mm]	a_p [mm]	R [mm]	$\varnothing d$ [mm]	z [ks]
ECR-B3 20-22/80C20R02A150	20	22	0,2	20	3

Tab. 3.11 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	730 - 830	730
Posuv na zub - f_z [mm.zub ⁻¹]	0,1 - 0,34	0,22
Šířka záběru ostří - a_p [mm]	20	20,5
Šířka frézované plochy - a_e [mm]	max. 10	4

Zvolené řezné podmínky jsou přibližně střední hodnotou z výrobcem doporučeného rozsahu hodnot. V závislosti na opotřebením mohou být řezné podmínky upraveny za účelem optimalizace výkonu.

Kontrolní výpočet požadovaného výkonu vřetena stroje:

Výpočet řezného výkonu bude aplikovaný pro operaci hrubování obrysu součásti monolitní SK hrubovací frézou průměru 20 mm a to z důvodu zvolených řezných parametrů, které odpovídají nejrychlejšímu odběru materiálu Q.

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} = \frac{a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot n}{1000} = \frac{20,5 \cdot 4 \cdot 0,22 \cdot 3 \cdot 11618}{1000} =$$

(3.6)

$$Q = 628,766 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

a_p	šířka záběru ostří [mm],
a_e	šířka frézované plochy [mm],
f_z	posuv na zub [mm.zub ⁻¹],
z	počet zubů frézy [ks],
n	otáčky [min ⁻¹]. [16]

Na základě vypočtené hodnoty rychlosti odběru materiálu je možné dopočítat potřebný řezný výkon P_C a tomu odpovídající požadovaný výkon vřetena obráběcího stroje P pro danou operaci:

$$P_C = \frac{Q}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta} \cdot k_C = \frac{628,766}{6 \cdot 10^4 \cdot 0,85} \cdot 1170 = 14,4 \text{ kW}$$

(3.7)

$$P_M = P_K \cdot 0,9 = 22 \cdot 0,09 = 2 \text{ kW}$$

(3.8)

$$P = P_C + P_M = 14,4 + 2 = 16,4 \text{ kW}$$

(3.9)

- Q rychlost odběru materiálu [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$],
 η mechanická účinnost stroje [-],
 k_C měrná řezná síla [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$],
 P_M výkon motoru vřetena na prázdno [ks],
 P_K maximální výkon motoru vřetena [kW]. [16,29]

Kde měrná řezná síla materiálu k_C je podle vztahu:

$$k_C = k_{C1} \cdot h_m^{-mc} = 800 \cdot 0,219^{-0,25} = 1170 \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \quad (3.10)$$

Hodnota h_m tloušťka třísky pro zvolené řezné podmínky:

$$h_m = \frac{(\sin \kappa \cdot 180 \cdot a_e \cdot f_z)}{\pi \cdot D \cdot \sin^{-1} \left(\frac{a_e}{D} \right)} = \frac{(\sin 90 \cdot 180 \cdot 4 \cdot 0,22)}{\pi \cdot 20 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{4}{20} \right)} = 0,219 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Vypočtený potřebný výkon vřetena při zvolených řezných parametrech představuje podle grafu obr. 3.20 maximálně 7 minut provozu. Hrubovací operace pro dva upnuté polotovary dle získaného strojního času ze simulace činí 2:49 minut, což tento předpoklad s rezervou splňuje.

Monolitní SK čelní válcová fréza – ECA-B-3



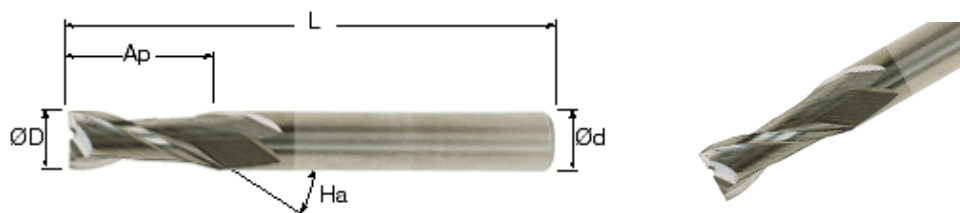
Obr. 3.23 Monolitní SK čelní válcová fréza. [3]

Tab. 3.12 Rozměry vybraných monolitních SK čelních válcových fréz. [16]

Označení	$\varnothing D$ [mm]	a_p [mm]	R [mm]	$\varnothing d$ [mm]	z [ks]
ECA-B-3 20-38C20-104	20	38	0,2	20	3
ECA-B-3 10-22C10-72	10	22	0,2	10	3

Tab. 3.13 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	750 - 850	750
Posuv na zub - f_z [mm.zub ⁻¹]	0,05 - 0,17	0,15
Šířka záběru ostří - a_p [mm]	20	20,5
Šířka frézované plochy - a_e [mm]	max. 10	1

Monolitní SK drážkovací fréza – EC-A-2

Obr. 3.24 Monolitní SK drážkovací fréza. [3]

Tab. 3.14 Rozměry vybrané monolitní SK drážkovací frézy. [16]

Označení	ØD [mm]	a_p [mm]	Ød [mm]	L [mm]
EC065A20-2C07	6,5	20	7	60

Tab. 3.15 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	750 - 850	750
Posuv na zub - f_z [mm.zub ⁻¹]	0,03 - 0,07	0,05
Šířka záběru ostří - a_p [mm]	max. 3	1

Všechny vybrané stopkové frézy jsou dostupné v jakosti karbidu IC08, která představuje optimální poměr mezi houževnatostí, tvrdostí a trvanlivostí bříty. [16] Důležité fyzikální, mechanické a další vlastnosti tohoto karbidu jsou uvedeny v tab. 3.16.

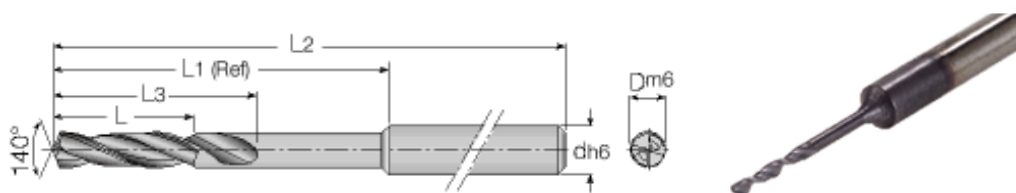
Tab. 3.16 Základní vlastnosti karbidu IC08. [16]

Klasifikace	ISO K20-K30, ANSI C2-C3
Složení podle hmotnosti	
WC	89,50 %
Co	10 %
Cr ₃ C ₂	0,50 %

Fyzikální a mechanické vlastnosti	
Tvrдость	92 HRA, 1600 HV
Hustota	14,45 g.cm ³
Pevnost ve sřihu	4100 N.mm ²
Pevnost v tlaku	6250 N.mm ²

3.4.2 Zvolené nástroje pro vrtání

Monolitní SK dvoubřítý vrták – hloubka vrtání 4xD – **SCD-AN4**



Obr. 3.25 Monolitní SK dvoubřítý vrták. [3]

Tab. 3.17 Rozměry vybraného monolitního SK dvoubřitého vrtáku. [16]

Označení	øD [mm]	ød [mm]	L [mm]	L ₁ [mm]	L ₂ [mm]
SCD 028-011-030 AN4	2,8	3	11,2	16,8	60

Tab. 3.18 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	80 - 150	100
Posuv - f [mm.ot ⁻¹]	0,08 - 0,2	0,05

Kontrolní výpočet pro dovolené namáhání vrtáku na krut a na vzpěr:

Vrták je při vrtání namáhán krouticím momentem na krut a axiální silou na vzpěr. U vrtáků větších průměrů a menšího poměru délky ku průměru je omezující podmínkou namáhání na krut, u vrtáků menších průměrů a většího poměru délky ku průměru na vzpěr. Doporučená mezní hodnota poměru vysunutě části vrtáku a jeho průměru je přibližně 7,5. [31]

Všechny navržené vrtáky se poměrem délky ku průměru pohybují kolem mezní hodnoty. Pro konkrétní výpočet byl vybrán monolitní SK dvoubřítý vrták nejmenšího průměru 2,8 mm.

$$\frac{l_0}{D} = \frac{17}{2,8} = 6,07$$

(3.12)

l_0 délka vysunuté části vrtáku [mm],
 D průměr vrtáku [mm]. [31]

Pro vypočtený poměr délky vrtáku ku jeho průměru postačí posoudit kritérium namáhání v krutu. Řezný krouticí moment $M_{\text{ŘEZ}}$ nesmí překročit kritický krouticí moment M_{KRIT} , při kterém by došlo k destrukci vrtáku.

Výpočet M_{KRIT} se provede na redukovaný průřez vrtáku. Moment odporu redukovaného průřezu je $W_K = 0,0194 \times D^3$. Pro praktický výpočet je nutno M_{KRIT} násobit experimentálně určeným opravným součinitelem ε , který bere v úvahu vliv stoupání šroubovice a redukci skutečného průřezu vrtáku, a součinitelem bezpečnosti K , zahrnujícím vliv dynamického namáhání, jehož velikost se volí 3 až 4.

$$M_{\text{KRIT}} = \frac{0,0112 \cdot D^3 \cdot R_m \cdot \varepsilon}{K} =$$

(3.13)

$$M_{\text{KRIT}} = \frac{0,0112 \cdot 0,0028^3 \cdot 6250 \cdot 10^6 \cdot 1,6}{4} = 0,615 \text{ Nm}$$

W_K moment odporu redukovaného průřezu $W_K = 0,0194 D^3$,
 R_m mez pevnosti materiálu nástroje [MPa],
 ε experimentálně určeným opravný součinitel (1,6),
 K součinitel bezpečnosti (3 až 4). [31]

Krouticí moment potřebný k řezání:

$$M_{\text{ŘEZ}} = \frac{f \cdot k_C}{1000} \cdot \frac{D^2}{8} \cdot \sin \kappa_r \cdot k_m = \frac{0,05 \cdot 800}{1000} \cdot \frac{2,8^2}{8} \cdot \sin 70^\circ \cdot 0,85 =$$

(3.14)

$$M_{\text{ŘEZ}} = 0,031 \text{ Nm}$$

f posuv [mm.ot⁻¹],
 k_C měrná řezná síla obráběného materiálu [N.mm⁻²],

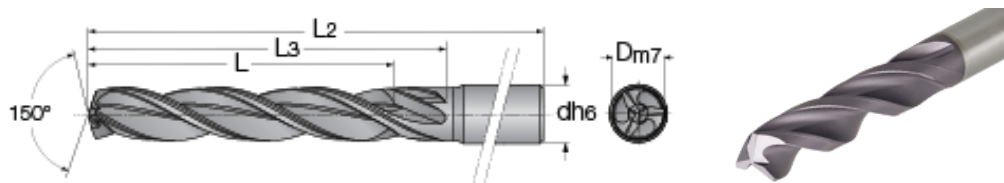
D průměr vrtáku [mm],
 κ_r úhel nastavení hlavního ostří [°]
 k_m koeficient geometrie vrtáku SCD [-]. [16]

Musí platit:

$$M_{\text{ŘEZ}} \leq M_{\text{KRIT}}$$

$$0,031 \leq 0,615 \quad (3.15)$$

Monolitní SK tříbřitý vrták – hloubka vrtání 5xD – SCCD-AP5



Obr. 3.26 Monolitní SK tříbřitý vrták. [3]

Tab. 3.19 Rozměry vybraných monolitních SK tříbřitých vrtáků. [16]

Označení	øD [mm]	ød [mm]	L [mm]	L ₃ [mm]	L ₂ [mm]
SCCD 047-029-060 AN5	4,7	6	29	36	74
SCCD 051-035-060 AN5	5,0	6	35	44	82
SCCD 059-035-060 AN5	5,9	6	35	44	82
SCCD 064-043-080 AN5	6,4	8	43	53	91
SCCD 065-043-080 AN5	6,5	8	43	53	91
SCCD 069-043-080 AN5	6,8	8	43	53	91
SCCD 070-043-080 AN5	7,0	8	43	53	91

Tab. 3.20 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	100 - 300	200
Posuv - f [mm.ot ⁻¹]	0,14 - 0,35	0,2 - 0,3

Monolitní SK fréza na srážení hran – 45° – ECF/45



Obr. 3.27 Monolitní SK fréza na srážení hran. [3]

Tab. 3.21 Rozměry vybrané monolitní SK frézy na srážení hran. [16]

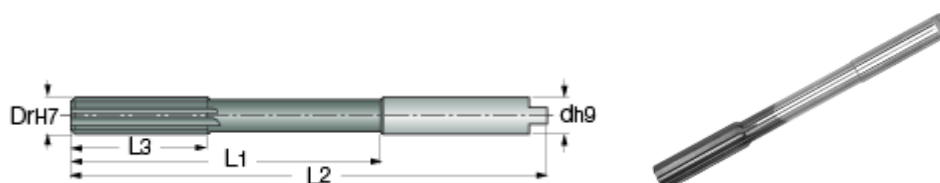
Označení	$\varnothing d_1$ [mm]	$\varnothing d$ [mm]	L [mm]	a_p [mm]	z [ks]
ECF D-4/45-4C10	2	10	72	4	4

Tab. 3.22 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [$m \cdot min^{-1}$]	750 - 850	750
Posuv na zub - f_z [$mm \cdot zub^{-1}$]	0,03 - 0,098	0,05

3.4.3 Zvolené nástroje pro vystružování

Monolitní SK výstružník s přímými břity - RM-SHR



Obr. 3.28 Monolitní SK výstružník s přímými břity. [3]

Tab. 3.23 Rozměry vybraného monolitního SK výstružníku s přímými břity. [16]

Označení	$\varnothing D$ [mm]	$\varnothing d$ [mm]	L_1 [mm]	L_3 [mm]	z [ks]
RM-SHR-0600-H7S-CS-C 07	6	5,6	56	26	6

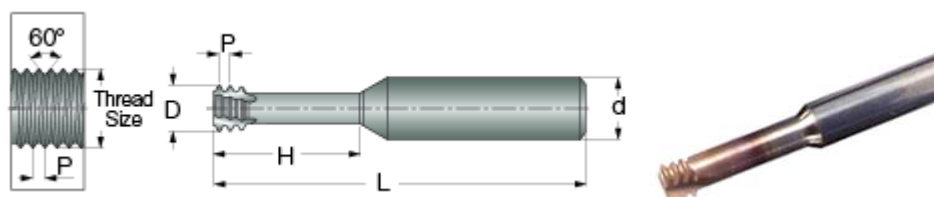
Dostupná jakost karbidu IC07.

Tab. 3.24 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [$m \cdot min^{-1}$]	10 - 30	20
Posuv - f [$mm \cdot ot^{-1}$]	0,2 - 0,3	0,25
Přídavek pro vystružování	0,06 - 0,12	0,1

3.4.4 Zvolené nástroje pro závitování

Monolitní SK závitová fréza – 3xD – MTECS ISO



Obr. 3.29 Monolitní SK závitová fréza MTECS. [3]

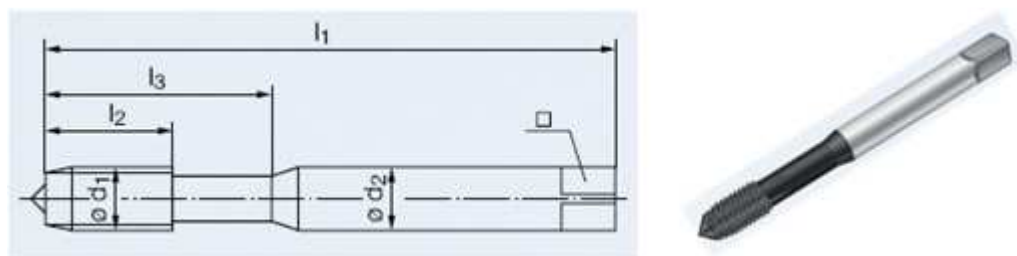
Tab. 3.25 Rozměry vybraných monolitních SK závitových fréz. [16]

Označení	$\varnothing D$ [mm]	$\varnothing d$ [mm]	P [mm]	H [mm]	L [mm]
MTECS 06047C20 1.0 ISO	4,65	6	1	20	58
MTECS 0606C24 1.25 ISO	5,95	6	1,25	24	58

Tab. 3.26 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [16]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	80 - 150	135
Posuv na zub - f_z [mm.zub ⁻¹]	0,11 - 0,15	0,13

Tvářecí závitník – InnoForm-AI



Obr. 3.30 Tvářecí závitník. [20]

Tab. 3.27 Rozměry vybraného tvářecího závitníku. [20]

Označení	Závit	P [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
B521S800	M5	0,8	6	70	8	28

Tab. 3.28 Doporučené a zvolené řezné podmínky. [20]

	Doporučené hodnoty	Zvolené hodnoty
Řezná rychlost - v_c [m.min ⁻¹]	10 - 50	30

3.4.5 Upínání a vyvážení rotačních nástrojů

S ohledem na navržené nástroje, především monolitní SK frézy s doporučenými řeznými rychlostmi přes 700 m.min⁻¹, je nutné použít upínací prvky, které zaručí bezpečné a spolehlivé upnutí nástrojů.

Pro zajištění maximální přesnosti a tuhosti upnutí osových rotačních nástrojů je navrženo použít systém Shrinkin od společnosti Iscar. Jedná se o tepelnou jednotku a sady integrálních ER kleštín a držáků (obr. 3.31). Systém využívá efekt tepelné roztažnosti dutiny integrálních ER kleštín, které lze používat pro upnutí stopkových fréz ze slinutého karbidu. Upnutí se vyznačuje dokonalou pevností, přesností a díky vlastní symetričnosti použitého upínače

i uspokojivým vyvážením. Upínače Shrinkin mají protáhlý tvar různé délky a jsou vhodné pro polodokončovací a dokončovací operace i v hlubokých dutinách forem a zápustek. [4]



Obr. 3.31 Indukční tepelná jednotka, sady integrálních ER kleštin a držák. [4,16]

Vyšší otáčky nástroje mohou způsobit vibrace, ty často vznikají odstředivou silou samotného osově nesymetrického nástroje. Tyto vibrace se pak přenášejí na obrobek a vřeteno. Výsledkem je špatná kvalita povrchu, snížení životnosti nástroje a také nepříjemný hluk. Pro přesné upnutí a vyvážení takových nástrojů lze použít systém Iscar Balancin (obr. 3.32). Jedná se o upínače opatřené sadou vyvažovacích kroužků, které mají uvnitř závaží ze slinutého karbidu. Po obvodu vyvažovacích kroužků je stupnice pro odečet vzájemného posunu, proces vyvážení se provádí na běžně dostupných vyvažovacích strojích vzájemným natáčením těchto kroužků. [4]



Obr. 3.32 Iscar Balancin. [16]

Správné upnutí závitníků úzce souvisí s kvalitou a bezpečností operace závitování. Často využívané tzv. synchronní závitování může být, hlavně při větších rychlostech, doprovázené odchylkou v axiálním posuvu stroje v poměru k otáčkám vřetena. I když jsou tyto rozdíly minimální, způsobují nadměrné namáhání těla nástroje i jeho řezných částí, čímž dochází ke snížení jeho životnosti, či přímo k zalomení v díře. Společnost Prototyp nabízí řadu upínačů Protoflex C (obr. 3.33) s minimální kompenzací v radiálním i axiálním směru. U běžných systémů se užívají plastové deformační členy, jejichž elasticita však časem klesá a schopnost kompenzace se výrazně snižuje. Upínač Protoflex C využívá jedinečných vlastností prvku Flexor, který je vyroben ze speciální slitiny vyvinuté pro NASA. [32]



Obr. 3.33 Upínač Protoflex C. [32]

4 CNC TECHNOLOGIE

V současnosti jsou konveční obráběcí stroje stále častěji nahrazovány moderními číslicově řízenými stroji (obr. 4.1). Mezi největší výhodu těchto strojů patří prvky tzv. pružné automatizace, přechod mezi různými výrobky je velmi rychlý a uskutečňuje se pomocí řídicího programu. Navíc odpadá použití složitých kopírovacích zařízení pro obrábění náročných tvarových ploch a eliminuje se vnesení lidské chyby do samotného procesu obrábění. Nasazení číslicově řízených strojů je doprovázeno také zvýšením bezpečnosti obsluhujících pracovníků.



Obr. 4.1 Pracovní prostor soustružnického obráběcího centra Emcoturn 420. [33]

Metoda přípravy řídicího programu pro číslicově řízené stroje je závislá především na řídicím systému stroje a dostupných možnostech.

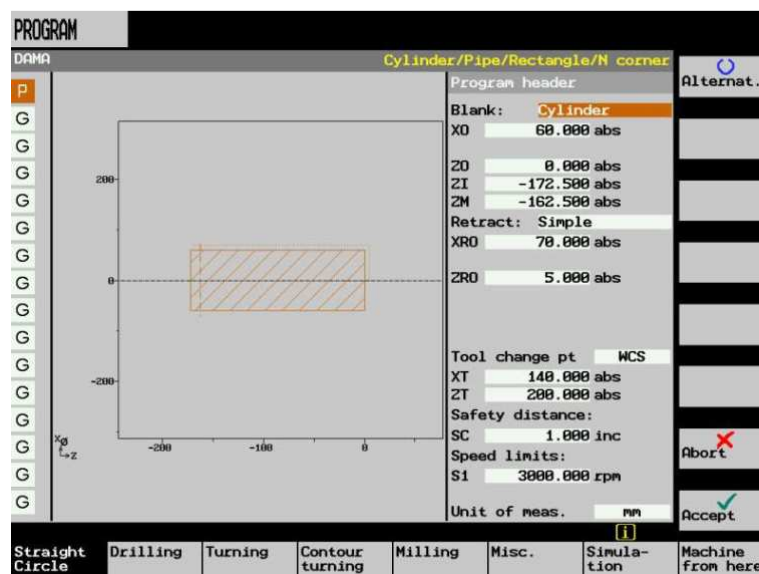
Mezi nejstarší a stále používaný způsob tvorby řídicího programu patří tvorba ISO kódu, který bývá označován také jako G kód, přímo v řídicím systému stroje (obr. 4.2), či v textovém editoru s následným přenesením

do řídicího systému stroje. V některých případech, kdy potřebujeme obrobit jenom dílčí prvky (například zarovnat čelo obrobku na soustruhu, frézovat plochu jedním průchodem frézovacího nástroje), může být tento na první pohled „primitivní“ způsob programování velmi efektivní a rychlejší než v drahých CAM softwarech. Má samozřejmě své omezení, v aplikacích, kdy potřebujeme řídit souvisle více os obráběcího stroje, je tato metoda nepoužitelná.



Obr. 4.2 Zapisování ISO kódu přímo v řídicím systému Sinumerik. [34]

Další možnost, jak sestavit program pro číslicově řízené stroje, nabízí metoda tzv. dílensky orientovaného programování. V tomto případě je možné sestavit program bez detailní znalosti struktury a jednotlivých funkcí ISO kódu. Samotné programování probíhá na ovládacím panelu stroje formou tzv. definování technologických postupů, kdy jsou postupně vyplňovány tabulky hodnot (obr. 4.3), které bývají většinou doprovázeny grafickou podporou. Tyto systémy většinou podporují i další usnadnění programování, mezi něž patří simulace vytvořeného řídicího programu, nebo možnost importování obrysu tvarové součásti v některém z CAD (Computer Aided Design) formátů.



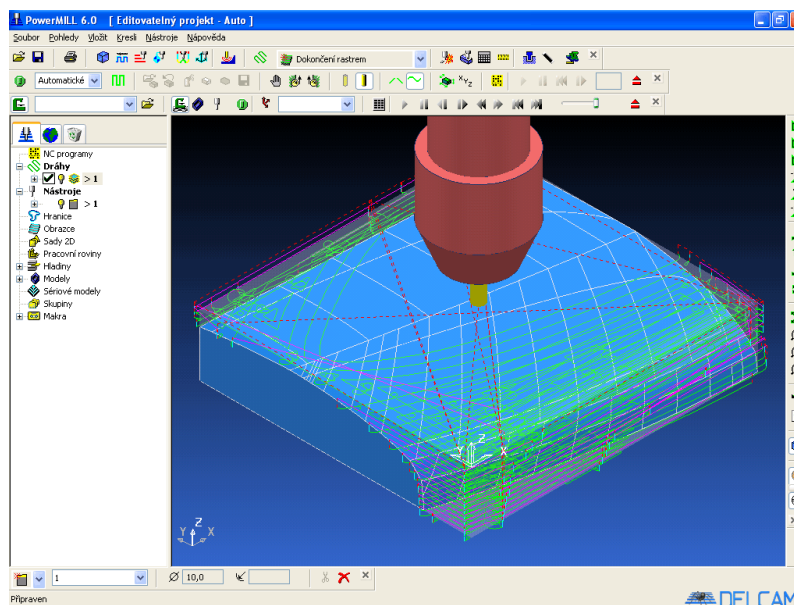
Obr. 4.3 Dílensky orientované programování v řídicím systému Sinumerik. [34]

V případě tvarově náročných součástí je s úspěšností využíváno generování řídicích programů s počítačovou podporou mimo obráběcí stroj. CAM (Computer Aided Manufacturing), respektive CAD/CAM softwary představují výkonné nástroje pro zpracování strategie obrábění. Tyto softwary většinou počítají s využitím modelu součásti, který je možné importovat nebo vymodelovat přímo v CAD části softwaru. Následně se zpracuje kompletní strategie obrábění, která obsahuje informace o polotovaru, řezných nástrojích, řezných podmínkách a ostatních důležitých parametrech.

CAM softwary (obr. 4.4) umožňují simulaci procesu obrábění přímo na počítačové stanici. U moderních výkonných systémů bývají simulace doplněny i o model obráběcího stroje s upínacím zařízením, se kterým je počítáno pro zjištění kolizních situací v průběhu obrábění. Následuje transformace elektronických dat pomocí postprocesoru do formátu používaného pro konkrétní číslicově řízený stroj.

V poslední době se výrazně zvýšila aktivita společností zabývajících se tvorbou programového vybavení, které se zaměřuje na řešení výroby jako celku. Jejich cílem je systém řízení s minimem administrativy a vysokými požadavky na pružnost a spolehlivost. Pokrokové systémy řízení výroby mají ve svých podnicích nasazeny i výrobci obráběcích strojů a vlastními

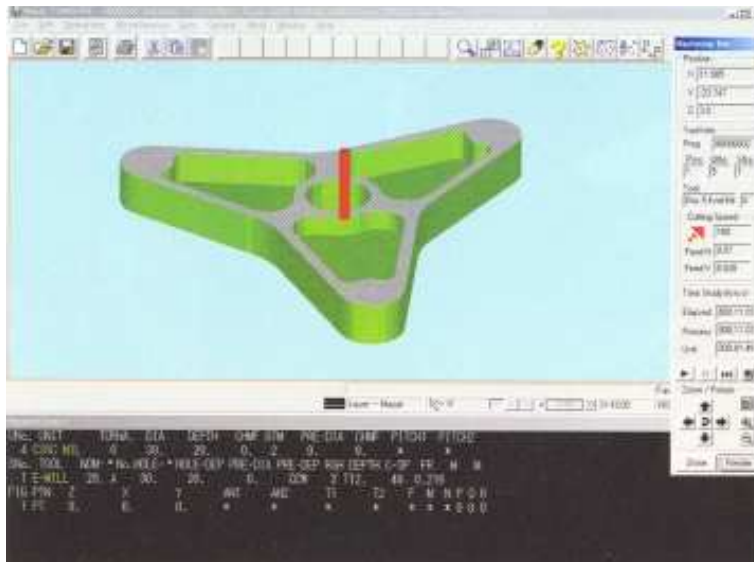
zkušenostmi zdokonalené systémy pak nabízejí jako nadstavbu dodávek strojů také svým zákazníkům.



Obr. 4.4 Uživatelské prostředí CAM softwaru PowerMill. [35]

Japonský výrobce obráběcích strojů Yamazaki Mazak postupně zavedl vlastní systém řízení výroby do svých výrobních podniků v Japonsku, Singapuru, Americe a Anglii. Systém obsahuje i moduly vzájemného propojení konstrukčních kanceláří s výrobou, obdobně jsou dokonce celosvětově propojeny i marketingové a distribuční moduly. Nejvýznamnější modul systému je po důkladném ověření nabízen jako samostatný produkt Mazak pod označením CPC (Cyber Production Center), pro české prostředí nazván Kybernetický systém řízení a sledování výroby. CPC je programový produkt určený pro zvýšení produktivity výroby. Významně napomáhá při minimalizaci vedlejších časů, plánování výroby, diagnostice strojů a v nástrojovém hospodářství. Systém CPC sestává ze čtyř základních modulů: CAMWaru, Cyber Production Scheduleru, Cyber Tool Managementu a Cyber Monitoru. CAMWare slouží k přípravě technologie obrábění (dialogové programování Mazatrol nebo EIA/ISO kód) v prostředí Windows, jeho uživatelské prostředí znázorňuje obr. 4.5. Geometrii budoucího výrobku lze pohodlně načíst ve standardních grafických formátech DXF, DWG a IGES. Kontroly probíhají na 3D modelu, výstupy jsou kromě samotného programu například i podrobná

časová studie a soupis požadovaných nástrojů. [37] Tyto sofistikované systémy představují velký potenciál pro střední a velké podniky.



Obr. 4.5 Uživatelské prostředí modulu CAMWare v systému CPC. [36]

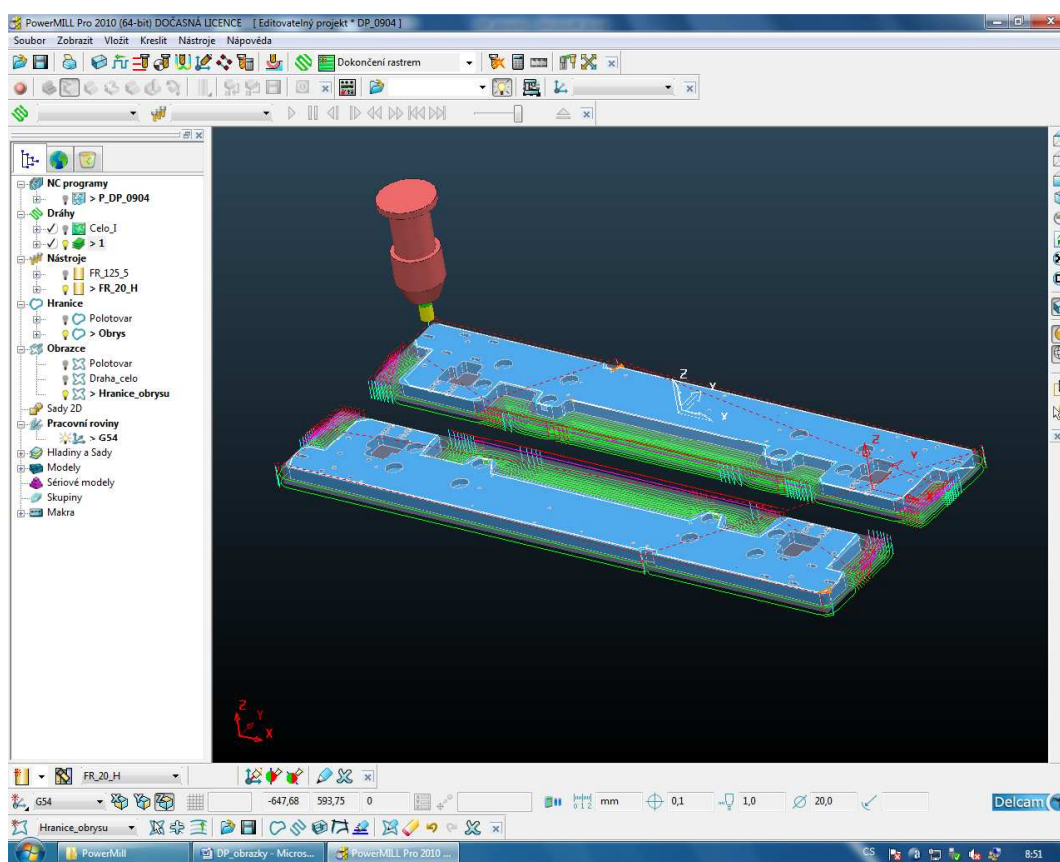
Korektně rozhodnout, který z uvedených způsobů programování je nejlepší, nelze. Jednak jsou zde uvedeny pouze v poslední době nejpoužívanější možnosti programování, nikoli naprosto všechny, a navíc má každá z uvedených metod svoji nezastupitelnou oblast aplikace.

4.1 Řídicí program

Charakter obráběného dílce s jednoduchým tvarem kontury obrysu a souřadnicovým rozmístěním děr je možné naprogramovat přímo v řídicím systému stroje s využitím podpůrných cyklů, respektive je v tomto konkrétním případě možné programovat v integrovaném dílenském programování – MANUAL GUIDEi. Vzhledem k tomu, že se zatím jedná pouze o navrhovanou technologii, není důvod pro blokování obráběcího stroje. Navrhovaná strategie obrábění bude zpracována ve velmi vyspělém CAM softwaru PowerMill 2010 od společnosti Delcam, který je dostupný v rámci výuky.

Použití CAM softwaru PowerMill 2010 umožní získat cenná výchozí data, včetně simulace, které můžeme použít pro vyhodnocení navrhované

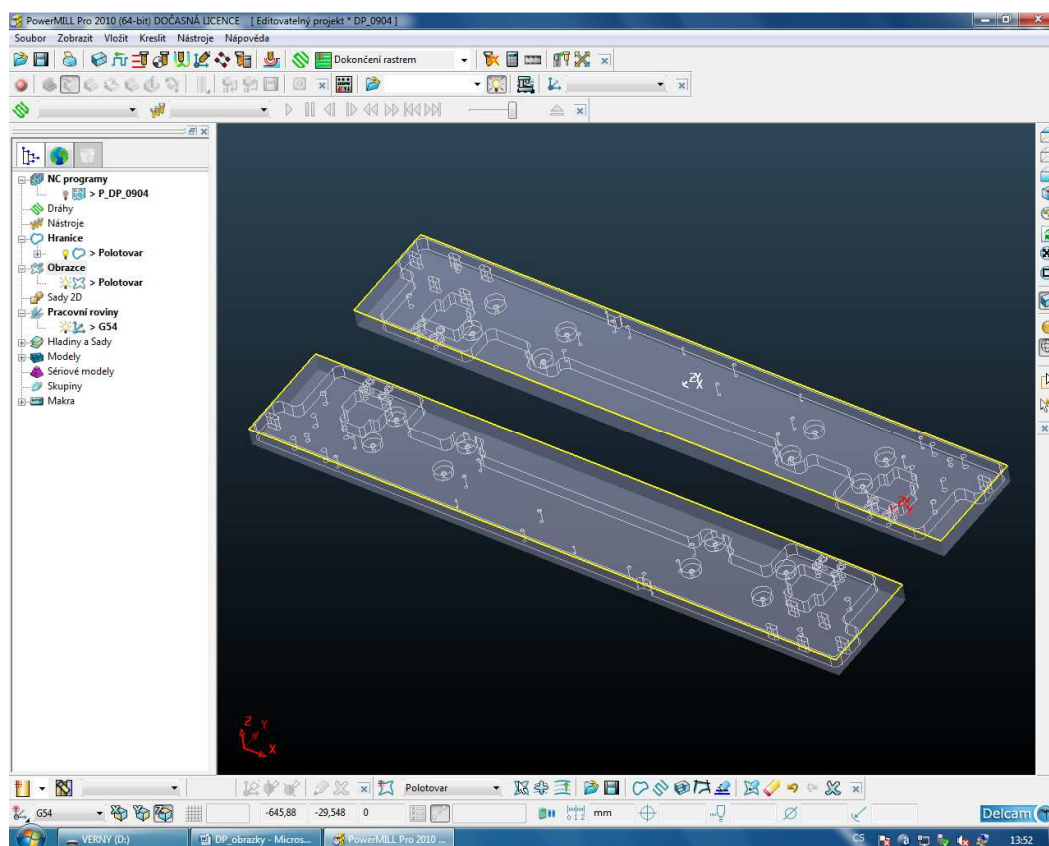
technologie. Mezi důležitá data patří především informace o strojním čase, který můžeme aplikací různých strategií obrábění s následnou úpravou jednotlivých parametrů výrazným způsobem optimalizovat. Přínosem tohoto postupu může být také možnost zjistit různá úskalí již v procesu programování, která by byla jinak zjištěna až při samotné verifikaci řídicího programu přímo na obráběcím stroji. Uživatelské prostředí CAM softwaru PowerMill 2010 se znázorněnými dráhami nástroje při hrubování obrysu součásti zobrazuje obr. 4.6.



Obr. 4.6 Uživatelské prostředí CAM softwaru PowerMill 2010.

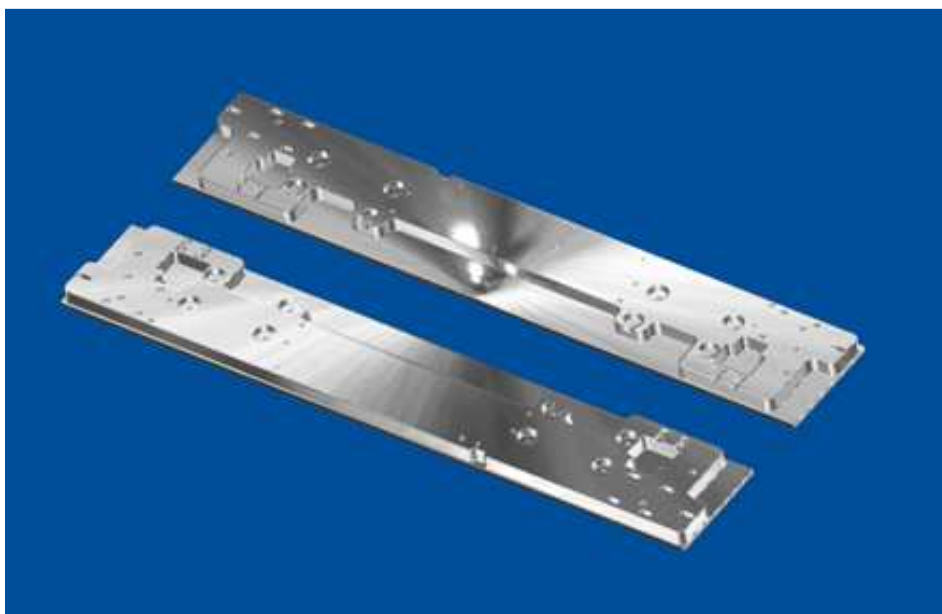
Obráběcí strategie je sestavena pro obě obráběné součásti najednou, získáme tím další úsporu výrobního času, jelikož každý nástroj obrábí definované prvky na obou součástech zároveň. Nulový bod obrobků je definovaný pouze jeden, což by nebylo možné bez zajištěné přesné pozice upnutých polotovarů a vhodně zvolených přídavek.

Prvním krokem je import modelu, respektive modelů, a transformace na požadovanou pozici odpovídající reálnému upnutí polotovarů. Následuje volba nulového bodu označeného G54 s umístěním, které bylo zvoleno na základě výkresové dokumentace, kde je výchozí nulový bod pro kótování rozměrů umístěn ve středu jedné z přesných děr průměru 6H7. Definice polotovarů odpovídá hraničním oblastem, které byly definovány vytvořeným obrazcem v požadovaném rozměru a poloze (obr. 4.7).



Obr. 4.7 Definice polotovaru na základě vytvořeného obrazce.

Pro každou z technologických skupin je zvolena odpovídající strategie, která je následně alespoň částečně optimalizována z pohledu korekce drah nájezdů a přejezdů.



Obr. 4.8 Výsledek simulace po prvním upnutí.

Získaná data v podobě strojních časů, které obsahují vygenerované seřizovací listy (viz Příloha 6 a Příloha 7), budou následně použity pro zpracování technicko-ekonomického zhodnocení. Samotná simulace (obr. 4.8) vizuálně ověřila navrhovanou strategii obrábění a finálním výstupem by měl být řídicí CNC program zapsaný ve strojovém kódu. Na základě volby postprocesoru může software vygenerovat CNC program pro konkrétní řídicí systém, respektive obráběcí stroj. V rámci výuky je volba postprocesoru omezená, proto byl vygenerován řídicí CNC program pro především rozměrovými parametry podobnou vertikální tříosou frézku s řídicím systémem Heidenhain iTNC530.

Část řídicího CNC programu P_CB_I:

```
10 BEGIN PGM Obrys_hr MM
11 ; Job Number : Obrys_hrub
12 ; Date : 28.04.11 - 15:48:45
13 ; Programmed by : AP-alpik
14 ; DP Version : 1516 Option File : Heid530_3osy
15 BLK FORM 0.1 Z X-475. Y-329.5 Z-20.5
16 BLK FORM 0.2 X475. Y72.5 Z0.0
```

```
17 ; TOOL NO. : 20
18 ; TOOL TYPE : ENDMILL
19 ; TOOL ID : FR_20_H
20 ; TOOL DIA. 20. LENGTH 210.
21 TOOL CALL 20 Z S11937 DL+0.0 DR+0.0
22 Q1= 780 ; PLUNGE FEEDRATE
23 Q2= 7878 ; CUTTING FEEDRATE
24 Q3= 10000 ; SKIM FEEDRATE
25 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
26 CYCL DEF 32.1 T0.1
27 ; =====
28 ; Toolpath : Obrys_hrub
29 ; Allowance : +1.000
30 ; =====
31 L X-869.952 Y141.316 FQ1 M03
32 L Z2.000 M8
33 L Z-20.500
34 L X-869.910 Y141.281 FQ2
35 CC X-869.598 Y141.666
36 C X-869.213 Y141.355 DR+
37 L X-867.315 Y143.701
38 L X-865.920 Y145.291
39 L X-864.403 Y146.765
40 L X-863.881 Y147.221
41 L X-862.923 Y147.996
42 L X-861.926 Y148.721
43 L X-859.348 Y150.500
44 L Z2.000 FMAX
45 L X-862.911 Y-25.586 FMAX
46 L Z-20.500 FQ1
47 L X-862.859 Y-25.568 FQ2
48 CC X-863.019 Y-25.100
49 C X-862.550 Y-24.940 DR+
```


Pro další využití CNC řízení zvoleného obráběcího vertikálního centra je navrženo aplikovat měřicí dotykovou sondu (obr. 4.9), která umožní rychlé a přesné zaměření nulového bodu obrobku. Měřicí dotyková sonda může být použita i pro konečnou kontrolu přesnosti obrobených prvků. Anglická společnost Renishaw, která se zabývá vývojem a výrobou dotykových měřících sond, nabízí mimo jiné i software Produktivity+™, který představuje nový zjednodušený přístup k vytváření měřících cyklů Renishaw pro obráběcí stroje. Program pracuje v prostředí systému Windows a zjednodušuje vytváření a začleňování měřících cyklů do výrobního procesu. [38]



Obr. 4.9 Měření obrobku dotykovou sondou Renishaw. [38]

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro výrobu dílce byly porovnány čtyři varianty výroby (tab. 5.1). Volba polotovaru nejvýrazněji ovlivnila celkové výrobní náklady, proto jsou jednotlivé možnosti rozděleny právě podle navrženého polotovaru.

Varianta „A“ - přířez 160x30x952 mm z válcované tabule

Varianta „B“ - polotovar řezaný vodním paprskem bez přídavku

Varianta „C“ - polotovar řezaný vodním paprskem s přídavkem

Varianta „D“ - polotovar řezaný metodou EDM

Tab. 5.1 Porovnání ceny výroby dílce.

VARIANTA	CENA POLOTOVARU [Kč.ks ⁻¹]	CENA CNC OBRÁBĚNÍ [Kč.ks ⁻¹]	CENA CELKEM [Kč.ks ⁻¹]
A	1.745,--	160,--	1.905,--
B	2.911,--	160,--	3.071,--
C	2.727,--	173,--	2.900,--
D	3.769,--	105,--	3.874,--

Na základě získaných hodnot byla vyhodnocena navrhovaná technologie (varianta „A“) ve srovnání s ostatními možnými jako nejvýhodnější, proto v navazujícím výpočtu je uvažována pouze tato varianta.

Náklady na přímý materiál N_p polotovaru pro součást BASE CROSSBAR:

$$N_p = N_{mA} \cdot c_m - z_{mA} \cdot c_0 = \quad (5.1)$$

$$= 12,77 \cdot 140 - 7,36 \cdot 20 = 1640 \text{ Kč}$$

N_{mA}	norma spotřeby materiálu [kg.ks ⁻¹],
c_m	cena materiálu [Kč.kg ⁻¹],
z_{mA}	celkové ztráty materiálu [kg.ks ⁻¹],
c_0	výkupní cena materiálu [Kč.kg ⁻¹]. [30]

Vyčíslené operační náklady na realizaci operace prováděné na CNC:

$$N = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} + \frac{N_{hs}}{60} \cdot \frac{t_{mB}}{dv} =$$

$$= \frac{450}{60} \cdot 21,36 + \frac{450}{60} \cdot \frac{180}{250} = 165,60 \text{ Kč} \quad (5.2)$$

N_{hs}	náklady na hodinu provozu stroje [Kč.hod ⁻¹],
t_{mA}	jednotkový čas stroje [min],
t_{mB}	dávkový čas stroje [min],
dv	výrobní dávka [ks]. [30]

Během zpracování diplomového projektu byla ve výrobní společnosti AB Komponenty s.r.o. navrhnutá a aplikována technologie výroby dílce pro zkušební sérii s využitím polotovaru řezaného technologií vodním paprskem bez přídavku (obdobu varianty „B“). Díky tomu je možné porovnat zde navrhovanou technologii s výsledky získanými přímo ve výrobě (tab. 5.2).

Tab. 5.2 Porovnání stávající a navrhované technologie.

	Technologie AB Komponenty s.r.o.	Navrhovaná technologie
Cena materiálu	2.419,-- Kč	1.640,-- Kč
Cena zpracování polotovaru do stejného stádia	Vodním paprskem 589,-- Kč	Frézováním 105,-- Kč (14 min)
Dávkový čas na CNC obráběcím centru	120 min	180 min
Strojní čas na CNC obráběcím centru	30 min	21,36 min
Cena 1 ks při dávce 250 ks	3.237,-- Kč	1.911,-- Kč
Cena 1 ks při sérii 1000 ks	3.234,-- Kč	1.907,-- Kč
ÚSPORA při dávce 250 ks		331.500,-- Kč
ÚSPORA při sérii 1000 ks		1.327.000,-- Kč
ÚSPORA v %		41 %

U navrhované technologie se počítá s teoretickými hodnotami strojních časů získaných pomocí CAM softwaru PowerMill 2010 navýšených o 10 % a výše nákladů na hodinu provozu stroje, kterou sdělila společnost.

Celková cena součásti CROSSBAR pro výrobní dávku 250 ks na CNC obráběcím centru činí 1.911,-- Kč. Určitě je zde prostor pro další optimalizaci, například řezné podmínky byly zvoleny převážně na středních hodnotách doporučených výrobcem, tudíž na základě ověření spolehlivosti obráběcího procesu by mělo být možné tyto parametry zvýšit, ale za cenu nižší trvanlivosti řezných nástrojů. Další zkrácení strojního času je možné důkladnější optimalizací řídicího programu. Obě tyto změny představují možnou úsporu výrobních nákladů odhadem maximálně v řádech jednotek procent. Největší pozornost by měla být věnována volbě polotovaru, protože představuje přibližně 85% celkových výrobních nákladů. Například použitím válcované ploché tyče, kterou je v tomto rozměru obtížné objednat v malém množství, protože by se musela nechat válcovat na zakázku, ale při předpokladu odběru většího množství představuje další výraznou úsporu, dle propočtů až 10 % z celkové částky výrobních nákladů.

Ale i bez výše zmiňovaných optimalizačních opatření představuje navrhovaná technologie úsporu ve výši 1.326,-- Kč na 1 ks při výrobní dávce 250 ks ve srovnání s technologií požívanou v současné době ve společnosti. Vzhledem k tomu, že se předpokládá výroba série 1000 ks ročně, navrhovaná technologie může snížit výrobní cenu o 1.327.000,-- Kč, tj. 41 %.

ZÁVĚR

Nasazení CNC strojů ve strojírenské výrobě je doprovázeno výrazným zvýšením produktivity a kvality obráběných dílců. Často ale nedochází k efektivnímu využití potenciálu těchto strojů. To může být způsobeno celou řadou faktorů, mimo jiné i možnostmi technologa, který sestavuje celkovou strategii obrábění s volbou nástrojů, a také jeho přístupem, znalostmi a zkušenostmi.

Cílem diplomového projektu bylo navrhnout technologii výroby dílce z hliníkové slitiny na konkrétním CNC vertikálním tříosém frézovacím centru.

Navrhnutá technologie vychází z parametrů určeného obráběcího stroje a počítá s nasazením moderních výkonných nástrojů z jemnozrnného slinutého karbidu určených pro obrábění hliníkových slitin, které se svými řeznými podmínkami pohybují na hranici dosažitelných otáček a výkonů vřetena konkrétní modifikace obráběcího stroje.

Volba vhodného polotovaru pro výrobu požadované součásti měla zásadní vliv na konečný výsledek. I přes další uvažované varianty bylo navrženo použití přířezu z válcované tabule v požadovaném rozměru. Použití tří univerzálních upínacích zařízení umožnilo upnout dva polotovary najednou. Progresivně zvolená strategie obráběcích operací vedla k dalšímu zkrácení výrobních časů. CNC program pro výrobu zadané součásti byl sestaven ve vyspělém CAM softwaru PowerMill 2010, který umožnil zpracovat, porovnat a optimalizovat jednotlivé obráběcí strategie.

Vhodnou kombinací výše zmíněných faktorů bylo možné dosáhnout velmi uspokojivého výsledku. Při srovnání dat získaných při zpracování projektu s daty poskytnutými společností AB Komponenty s.r.o., která vycházela již přímo z výroby, bylo zjištěno, že zde navržená technologie by vedla k významnému snížení výrobních nákladů. Při předpokládané výrobní sérii 1000 ks ročně lze dosáhnout použitím navržené technologie výroby součásti úspory ve výši 1.327.000,-- Kč, tj. 41%.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. STARTECH, s.r.o. *Výrobní program* [online]. c2011, [cit. 2011-03-15]. <http://www.startech-ricany.cz/index.php?menu=vyrobní_program>.
2. BARÁNEK, Ivan. *Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie*. 1. vydanie. Trenčín : TnUAD, 2004. 112 s. ISBN 80-8075-013-0.
3. ISCAR. *E-catalog* [online]. c2010, [cit. 2011-02-15]. <<http://www.iscar.com/Ecat/Application.asp/mapp/ML/GFSTYP/M/lang/EN>>.
4. Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 3. března 2010, MM 2010 / 3, [cit. 2011-03-06]. <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite>>.
5. MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
6. ZAUBERSTERNWELT. *Korund* [online]. c2010, [cit. 2011-02-22]. <<http://www.zaubersternwelt.de/edelsteinlexikon-teil-2/korund/index.html>>
7. JIRÁSEK, J. *Ložiska nerostů - Bauxit* [online]. 2006, [cit. 2011-02-22]. <<http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/rudy/bauxit.html>>.
8. KRYL, Milan. *Hubbleův dalekohled* [online]. 20.2.2001, [cit. 2011-02-22]. <<http://utf.mff.cuni.cz/vyuka/OFY016/F2000/Kryl.html>>.
9. GRAIG, *Freudenrich. How hubble space telescope works* [online]. c2011, [cit. 2011-02-22]. <<http://www.howstuffworks.com/hubble.htm/printable>>.
10. PTÁČEK L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 392 s. ISBN: 80-7204-248-3.
11. ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ FSI VUT. *Podklady pro výuku – přednášky – Neželezné kovy* [online]. [cit. 2011-02-23]. <<http://ime.fme.vutbr.cz/bumls007FP.php>>.
12. BOMEX, s.r.o. *Eloxování* [online]. [cit. 2011-02-22]. <<http://www.bomex.cz/cz/3-technologie/9-eloxovani.html>>.
13. AB KOMPONENTY, s.r.o. *Povrchové úpravy* [online]. c2005, [cit. 2011-02-13]. <<http://www.abkomponenty.cz/index.html>>.

14. SANDVIK COROMANT. *CoroMill Century* [online]. 12. 06. 2008, [cit. 2011-04-15]<<http://www.sandvik.com/sandvik/0110/Internet/I-Kit1/se02672.nsf>>.
15. Nejnovější jakosti řezných materiálů firmy ISCAR . *Technický týdeník* [online]. 2008, 18/2008, [cit. 2011-03-06]. <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=4563&mark=>>>.
16. ISCAR, LTD. *Kompletní přehled frézovacích nástrojů ISCAR*. Czech Version 2008, Israel, 7/2008.
17. Frézování závitů nástroji firmy ISCAR . *Technický týdeník* [online]. 2008, 13/2008, [cit. 2011-03-07]. <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1264&mark=>>>.
18. Frézování závitů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 13. dubna 2005, MM 2005/4, [cit. 2011-03-07]. <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-zavitu>>.
19. WALTER PROTOTYP. *Tool innovations – příloha – Závitovací fréza ze slinutého karbidu*. Supplementary catalogue 2009.
20. EMUGE FRENKEN. *Emuge technologie závitování* [online]. 09-2005, [cit. 2011-03-08]. <<http://www.emugefranken.cz/soubory/80cz.pdf>>.
21. BĚLÍN, Zdeněk. Kompaktní nástroje poháněné chladicí kapalinou: Obrábění drážek v otvorech. *MM Průmyslové spektrum*. Únor 2011, 1,2, s. 70-71. ISSN 1212-2572.
22. PRIMAPOL-METAL-SPOT, s.r.o. *Hliníkové desky* [online]. c2008, [cit. 2011-02-14]. <<http://www.primapol.cz/alcu4mgsi-en-aw-2017a.html>>.
23. GLEICH ALUMINIUM, s.r.o. *Technický datový list* [online]. c2011, [cit. 2011-02-14]. <<http://www.gleich.de/cz/valcovane-desky/en-aw-2017-details/?generatepdf>>.
24. SCHUNK GmbH. *Stationary Workholding 2010*. Version 9954732-10M, Mungen, 09/2010.
25. YEONG CHIN MACHINERY INDUSTRIES, co. *Vertical Machining Centers* [online]. c2009, [cit. 2011-03-05]. <http://www.ycmcnc.com/english/01_products/04_photo_gallery.php?cid=1&id=13>.
26. VASON, Obráběcí stroje. *NSV102A* [online]. c2010, [cit. 2011-03-05]. <<http://www.vason.cz/vmc/nsv-series/nsv102a>>.

27. Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 17. dubna 2002, MM 2002 / 4, [cit. 2011-03-06]. <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolesteny-povrchem>>.
28. VBD pro frézování hliníku a prořezávací frézy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 17. prosince 2008, MM 2008/12, [cit. 2011-03-06]. <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vbd-pro-frezovani-hliniku-a-prorezavaci-frezy>>.
29. FOREJT M., PÍŠKA M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. 225 s. ISBN: 80-214-2374-9.
30. KOČMAN K., PROKOP J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 270 s. ISBN: 80-214-3068-0.
31. KOČMAN K. *Speciální technologie obrábění*. 3. přepr. a dop. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2004. 227 s. ISBN:80-214-2562-8.
32. MATĚJČEK, Jan; KOUTNÝ, Aleš. Bezpečné a efektivní závitování: Správné upnutí závitníku. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 6. září 2006, MM 2006 / 9, [cit. 2011-04-13] <<http://www.mmspektrum.com/clanek/bezpecne-a-efektivni-zavitovani>>.
33. DIRECT INDUSTRY. *Emcoturn 420 - Emco* [online]. c2007, [cit. 2011-02-18]. <<http://pdf.directindustry.com/pdf/emco/emcoturn-420/7241-133333.html>>.
34. CAD/CAM A CNC TECHNOLOGIE. *Sinutrain – Trapézový závit* [online] Studijní opory VUT FSI – ústav Strojírenské technologie [cit. 2011-02-18]. <http://cadcam.fme.vutbr.cz/sinutrain/shopturn/gkod/zavit/image_02a.gif>
35. CAD/CAM A CNC TECHNOLOGIE. *PowerMill – hrubování tvaru součástí* [online] Studijní opory VUT FSI – ústav Strojírenské technologie [cit. 2011-02-18]. <<http://cadcam.fme.vutbr.cz/powermill/auto/image030.gif>>.
36. BADESTNOST. *Cyber Production Center* [online]. c2004, [cit. 2011-02-18]. <<http://www.hydraulic-vlv.com/en/CyberProductionCenter/MazakCamware>>.
37. Kybernetické výrobní systémy. *MM Průmyslové spektrum*. [online] 2002. [cit. 2011-02-18]. <<http://www.mmspektrum.com/clanek/kyberneticke-vyrobní-systemy>>.

38. RENISHAW. *OMP40-2 – kompaktní dotyková sonda* [online]. c2011, [cit. 2011-04-15]. <<http://www.renishaw.cz/cs/omp40-2-kompaktni-dotykova-sonda--7992>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_D	mm^2	průřez třísky
A	%	tažnost
a_p	mm	šířka záběru ostří
a_e	mm	šířka frézované plochy
EDM	-	<i>(Electric Discharge Machining)</i> elektrojiskrové obrábění
CAD	-	<i>(Computer Aided Design)</i> počítačem podporované navrhování
CAM	-	<i>(Computer Aided Manufacturing)</i> počítačem podporovaná výroba
CNC	-	<i>(Computer Numerical Control)</i> počítačem číslicově řízený
CPC	-	<i>(Cyber Production Center)</i> kybernetický systém řízení
c_0	Kč.kg^{-1}	výkupní cena materiálu
c_m	Kč.kg^{-1}	cena materiálu
dv	ks	výrobní dávka
HSM	-	<i>(High Speed Machining)</i> vysokorychlostní obrábění
HSC	-	<i>(High Speed Cutting)</i> vysokorychlostní obrábění
h_m	mm	tloušťka třísky
fcc	-	<i>(Face Centred Cubic)</i> plošně středěná krystalová mřížka
F_C	N	celková řezná síla
f	mm.ot^{-1}	posuv na otáčku
f_z	mm.zub^{-1}	posuv na zub
η	-	mechanická účinnost stroje
κ_r	°	úhel nastavení hlavního ostří
k_C	N.mm^{-2}	měrná řezná síla
N_{Ma}	kg.ks^{-1}	norma spotřeby materiálu
N_P	Kč	náklady na materiál
N_{hs}	Kč.hod^{-1}	náklady na provoz stroje
mc	-	faktor tloušťky třísky
M_C	Nm	řezný krouticí moment
$M_{\text{ŘEZ}}$	Nm	řezný krouticí moment
M_{KRIT}	Nm	kritický krouticí moment
P	kW	požadovaný celkový výkon stroje

P_C	kW	řezný výkon
P_K	kW	maximální výkon motoru včetně
P_M	kW	výkon motoru včetně na prázdko
PKD	-	polykrystalický diamant
Q	$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	rychlost odběru materiálu
R_m	MPa	pevnost v tahu
R_p	MPa	mez kluzu
r	mm	poloměr zaoblení špičky nástroje
SK	-	slinutý karbid
t_{mA}	min	jednotkový čas stroje
t_{mB}	min	dávkový čas stroje
v_c	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	řezná rychlost
v_f	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	posuvová rychlost
VBD	-	vyměnitelná břitová destička
z	ks	počet zubů
Z_{mA}	$\text{kg} \cdot \text{ks}^{-1}$	celkové ztráty materiálu
PTFE	-	(<i>Polytetrafluorethylen</i>) fluorovaný polymer

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výpočty normy spotřeby materiálu pro jednotlivé varianty
Příloha 2 Nabídka kooperace řezání vodním paprskem
Příloha 3 Katalogový list Schunk KSD 125-570
Příloha 4 Katalogové listy Schunk příslušenství
Příloha 5 Technologický postup výroby součásti BASE CROSSBAR
Příloha 6 Seřizovací listy programu P_BC_I
Příloha 7 Seřizovací listy programu P_BC_II
Příloha 8 Kontrolní výpočet upínací síly
Příloha 9 Vložená příloha - výkres součásti BASE CROSSBAR

