

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## HLUBOKÉ VRTÁNÍ LETECKÉHO DÍLU

DEEP DRILLING OF AN AERONAUTICAL PART

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Jan KLÍMA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student: Bc. Jan Klíma

který studuje v **magisterském navazujícím 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:

### **Hluboké vrtání leteckého dílu**

v anglickém jazyce:

### **Deep drilling of an aeronautical part**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porovnání alternativních výrobních technologií pro hluboké vrtání leteckého dílu, technologicko-ekonomické zhodnocení.

Cíle diplomové práce:

Úvod

Analýza problému, původní technologie

Návrh inovované technologie

Technologicko-ekonomické srovnání

Závěry pro praxi

Seznam odborné literatury:

LEEP H.R. and ELDRIDGET.W. Effects of Cutting Conditions on Drilling of Aluminum 380. JMEPEG (1992) ASM International, pp.797-800

PÍŠKA, M, a kol.: Speciální technologie obrábění. Ucební text pro FSI, ISBN 978-80-214-4025-8, CERM, Brno, 2009, s. 248

Machininig Aluminium [online]. Dostupné na:

[http://www.sapagroup.com/pages/522511/Answer%20Book/05\\_Machining.pdf](http://www.sapagroup.com/pages/522511/Answer%20Book/05_Machining.pdf) [cit. 18.11.2012]

HUMÁR, Anton. Materiály pro rezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 18.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou hlubokého vrtání leteckého dílu ze slitiny hliníku EN AW 7075 T7351. Pojednává o materiálu této součásti a o aktuálním zpracování hliníkových slitin. Dále obsahuje část věnovanou různým druhům technologií hlubokého vrtání, primárně se zaměřuje na dělové vrtání. Popisuje nástroj, technologii a podmínky při dělovém vrtání hlubokých děr se zaměřením na rozbor sil. Poté porovnává současnou technologii vrtání dílce v kooperaci a navrhuje inovovanou metodu výroby. V závěru je provedeno technicko-ekonomické srovnání.

### Klíčová slova

hluboké vrtání, dělové vrtání, slitiny hliníku, slitina EN AW 7075

## ABSTRACT

Diploma thesis deals with problems about deep drilling of aeronautical part made of aluminum alloy EN AW 7075 T7351. This work is focused on the material properties component and current aluminum alloys processing. Further it contains a part dedicated to various kinds of technologies of deep drilling, primarily is focused to gun drilling. Describes a tool, technology and conditions in gun drilling of deep holes with focused to analysis of the forces. Then it compares contemporary manufacturing technology of part drilling in cooperation and proposes an innovative technology of manufacturing. This project is accomplished with technical-economical evaluation.

### Key words

deep drilling, gun drilling, aluminum alloys, EN AW 7075 alloy

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLÍMA, Jan. *Hluboké vrtání leteckého dílu*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 68 s. 3 přílohy. Prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Hluboké vrtání leteckého dílu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Jan Klíma

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT

PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD

1	ANALÝZA PROBLÉMU .....	10
2	HLINÍK A JEHO SLITINY .....	12
2.1	Historie hliníku.....	12
2.2	Výskyt hliníku .....	12
2.3	Vlastnosti hliníku .....	13
2.3.1	Použití hliníku.....	14
2.4	Metalurgie hliníku.....	14
2.4.1	Metalurgie hliníkových slitin.....	15
2.5	Slitiny hliníku.....	15
2.5.1	Slévárenské hliníkové slitiny .....	16
2.5.2	Hliníkové slitiny pro tváření .....	17
2.5.3	Slitina EN AW 7075 T7351.....	19
2.5.4	Označování hliníku a slitiny hliníku podle ČSN EN.....	20
2.6	Pěnový hliník a slitiny.....	22
2.7	Prášková metalurgie hliníku a slitiny.....	23
2.8	Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin .....	23
2.8.1	Žhání .....	24
2.8.2	Vytvrzování .....	24
2.8.3	Označování stavů hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN 515: .....	27
3	TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN.....	28
3.1	Podmínky při obrábění slitin hliníku.....	28
3.1.1	Řezné podmínky pro vrtání slitin hliníku .....	30
3.2	Nástroje na obrábění hliníkových slitin .....	31
3.2.1	Geometrie břitu nástroje .....	31
3.2.2	Materiály nástrojů .....	32
4	CHARAKTERISTIKA HLUBOKÉHO VRTÁNÍ.....	33
4.1	Přehled způsobů vrtání hlubokých otvorů a nástroje .....	33

4.1.1	Konstrukce dělového vrtáku .....	37
4.2	Charakteristika hlubokého vrtání jednobřitým dělovým vrtákem .....	39
4.2.1	Pracovní podmínky pro vrtání hlubokých děr .....	40
4.3	Rozbor sil působících na nástroj v procesu vrtání .....	42
4.3.1	Analýza průřezu třísky .....	43
4.3.2	Řezné síly při vrtání, potřebný řezný moment a výkon řezání .....	44
4.3.3	Síly působící na jednobřítý dělový vrták .....	46
4.3.4	Jednotkový strojní čas pro vrtání .....	49
4.4	Způsoby namáhání a výpočtů vrtáků .....	49
4.4.1	Kontrola na krut .....	49
4.4.2	Kontrola na vzpěr vrtací tyče .....	49
4.5	Hlubkovrtací stroje a zařízení .....	51
4.5.1	Řezné kapaliny .....	52
5	ANALÝZA VÝROBY .....	54
5.1	Frentech Aerospace s.r.o. ....	54
5.1.1	Horizontální stroj pro vrtání hlubokých otvorů .....	55
5.2	Optimalizace výrobních nákladů a časů .....	57
5.2.1	Kritérium minimálních výrobních nákladů .....	57
5.3	Původní metoda výroby .....	60
5.3.1	Technická dokumentace .....	61
5.3.2	Postup výroby .....	61
5.4	Zavedená metoda výroby .....	63
5.4.1	Postup výroby .....	63
5.5	Kalkulace úspory .....	65
5.5.1	Kalkulace nákladů současné metody hlubokého vrtání .....	65
5.5.2	Kalkulace nákladů inovované metody hlubokého vrtání .....	65
5.5.3	Kalkulace nákladů inovované metody na nástroje .....	65
6	TECHNICKO-EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ .....	67
	ZÁVĚRY .....	68

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEZNAM PŘÍLOH



## ÚVOD

Výrobní technologie hlubokým vrtáním má v současném třískovém obrábění velký význam. Ten spočívá ve vysoké kvalitě a produktivitě vrtání dosahovatelné touto technologií pomocí speciálních nástrojů, stejně jako v dosažitelných velkých poměrech délek k průměrům  $L/D$  s poměrem do cca 400. Předpokladem pro dobrý průběh vrtání je co nejmenší středový průběh sil a výborné odvádění třísek z otvoru.

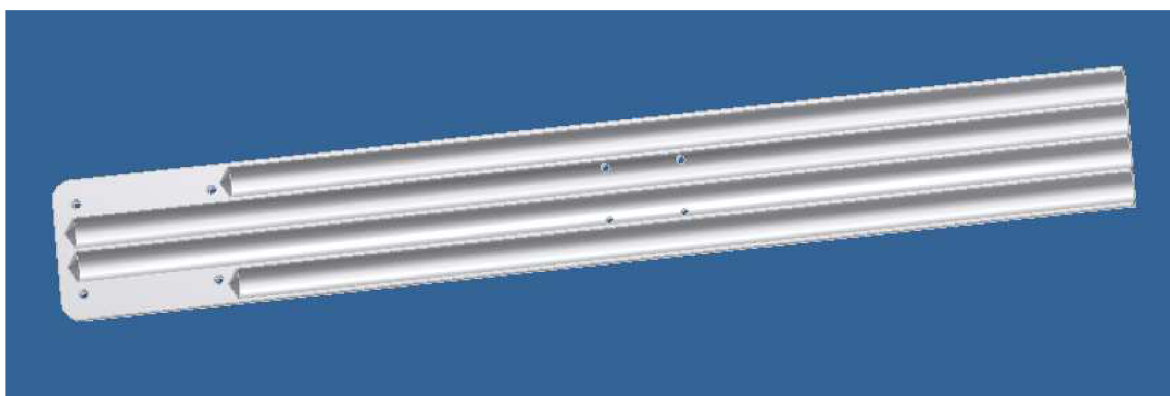
Středové vedení jednobřítých nástrojů se dosáhne pomocí rotujících radiálních složek sil, které se přes opěrné válcové plochy, tzv. vodítka zachycují na stěně otvoru. Tím se nástroj vede sám v právě zhotoveném otvoru a zároveň se vyhlazuje stěna otvoru, což způsobuje vysokou kvalitu obrobenej plochy.

Požadavek na plynulé odvádění třísek z místa řezu je plněn vhodně zvoleným vysokotlakým vyplachováním procesním médiem. Řezná kapalina usnadňuje nejen odchod třísky, ale také výrazně snižuje teploty v místě styku břitu a odřezávaného materiálu, což zvyšuje trvanlivost řezného nástroje. Odvod třísky, resp. lámání ovlivňuje také volba posuvu.

Před zahájením samotného obrábění je třeba seznámit se s průběhem procesu vrtání, vrtaným materiálem a jeho specifickými vlastnostmi způsobujícími jisté obtíže v průběhu vrtání, dále s možnostmi volby nástrojů a jejich řezných podmínek. Všechny zmíněné poznatky budou posléze aplikovány na zvolení řezných podmínek průběhu hlubokého vrtání ve společnosti Frentech Aerospace s.r.o.

## 1 ANALÝZA PROBLÉMU

Součást (obr. 1), pro kterou je navrhována nová technologie hlubokého vrtání patří mezi dlouhodobě vyráběné díly ve společnosti Frentech Aerospace s.r.o. Mimo operaci hlubokého vrtání se na celkové výrobě (obrobení) součásti podílejí také operace frézováním. Dílec je vyroben ze slitiny hliníku označované dle ČSN EN 573-3 jako EN AW-7075 s následným tepelným zpracováním T7351, význam těchto písmen a číslic bude popsán v kapitole zabývající se hliníkem a jeho slitinami. Stroj, na kterém bude obrábění dlouhých otvorů probíhat nese označení typu: T30–1000 KTA – TP177, což je repasovaný stroj od firmy TIBO Tiefbohrtechnik GmbH, zkráceně TIBO 535. Ten je určen pouze pro operace hlubokého vrtání a jako technologie je použito dělové vrtání. Dále v textu budou popsány různé technologie pro výrobu hlubokých otvorů včetně jejich specifikací, podrobněji však bude probírána hlavně technologie dělového vrtání, pro které je určen daný obráběcí stroj. Cílem je navrhnout novou technologii pro hluboké vrtání dílu z hliníkové slitiny určené pro letecký průmysl. Největší pozornost tedy bude věnována odpovídajícím řezným podmínkám pro obrábění. Před operací hlubokého vrtání je polotovar frézován dle příslušné výkresové dokumentace a vrtání proběhne jako poslední obráběcí operace. Jsou tedy kladeny vysoké nároky na kvalitu a stabilitu tohoto procesu, aby nedošlo ke znehodnocení předchozího obrobení a materiálu a tudíž i k finančním ztrátám.



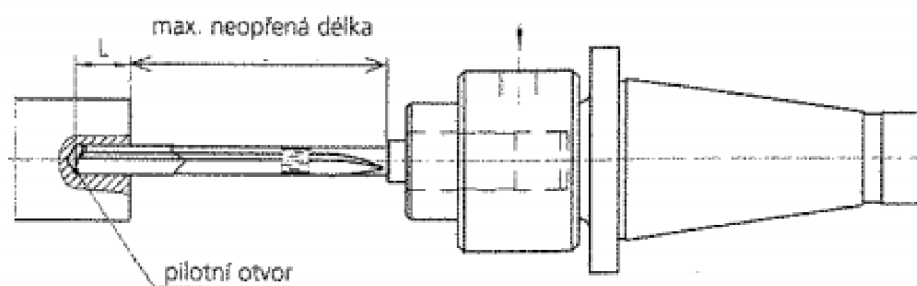
Obr. 1: Objemový model součásti v řezu (Inventor).

Vývoj obrábění zaznamenal v posledních desetiletích výrazný pokrok ve smyslu produktivity obráběcího procesu. K tomuto vývoji přispěl především vývoj řezných materiálů, materiálů obrobků, ale i zvýšení výkonnosti obráběcích strojů, které v minulosti nedosahovaly výkonů řezných nástrojů v řezných procesech. Právě vývoj a zpracování slitin hliníku, který ač je jedním z nejrozšířenějších kovů v zemské kůře, je poměrně mladou disciplínou. V současnosti je však produkce hliníku a jeho slitin velmi vysoká a zaujímají přední místo v použití v různých strojírenských či stavebních aplikacích, díky jeho specifickým vlastnostem.

Pro obrábění hliníku a jeho slitin lze obecně použít nástroje z rychlořezné oceli (RO), jemnozrnné slituté karbidy (SK) – nepovlakované, ale i povlakované, nebo nejnovější aplikace při vysokorychlostním obrábění, kterými jsou polykrystalický diamant (PKD).

Před zahájením obrábění je nutné ověřit, že obráběcí stroj splňuje předpoklady pro bezpečné hluboké vrtání. Na začátku vrtání, při zavrtávání, jelikož je nástroj – dělový vrták ze svého principu nevyvážený, je veden dostatečně dlouhým vrtacím pouzdrům velmi nízkými otáčkami ( $< 50$  ot/min), teprve až je dostatečně zavrtán (cca  $1 \times D$ ) je možno zapnout výplach a zvýšit otáčky. Po dosažení vrtané hloubky se vypne přívod řezného média a s nástrojem bez otáček se vyjede ven z vývrtu. Neopřená část vrtáku (obr. 1.1) nesmí nikdy překročit doporučené hodnoty výrobce nástroje, aby nedošlo k porušení vzpěrné stability [7].

Přepracovaný postup výroby a technologický postup jsou již úspěšně zavedeny do výroby a ověřeny vlastním obráběním 12 kusů. Proto bude inovovaná technologie níže nazývána jako současná.



Obr. 1.1: Zavedení vrtáku s pilotním otvorem, maximální neopřená délka vrtáku [7].



Obr. 1.2: Hlavička vrtáku ve vrtacím pouzdrům při najíždění k obrobku.

## 2 HLINÍK A JEHO SLITINY

### 2.1 Historie hliníku

Ačkoli hliník má největší procento zastoupení v zemské kůře, jeho výroba v průmyslovém měřítku začala teprve od roku 1859 [6]. První větší množství hliníkové slitiny dokázal v roce 1854 získat francouzský chemik Henri Étienne Sainte-Claire Deville za vlády Napoleona III., ale tehdejší velmi drahá výroba nedovolila výrobu v průmyslovém měřítku.

Masivnějšímu rozvoji produkce hliníku došlo až v období 2. světové války, především začátkem 50. let se začala postupně zvyšovat a s jejím zvyšováním se postupně snižovala i jeho cena, což samozřejmě vedlo k rozšíření jeho použití. Dnes jsou hliník a jeho slitiny nenahraditelné v mnoha průmyslových aplikacích díky svým specifickým vlastnostem.

### 2.2 Výskyt hliníku

Díky velké reaktivitě hliníku se v přírodě setkáváme prakticky pouze s jeho sloučeninami a v přírodě se nachází přibližně ve dvou stech padesáti různých minerálech, z nichž mezi nejdůležitější (tab. 2) patří korund, diaspor, boehmit, spinel, gibbsit, kyanit, andaluzit, silimanit, alunit a nefelín. Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou pro výrobu hliníku je bauxit (obr. 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 [6].



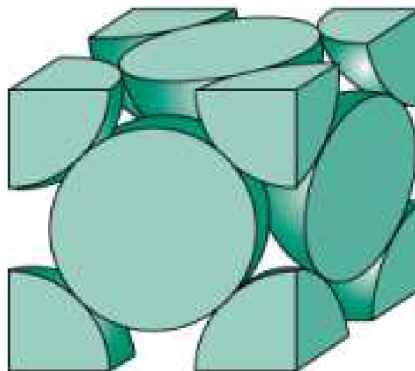
Obr. 2 Bauxit [10].

Tabulka 2. Přehled běžných minerálů hliníku [6].

Minerál	Chemický vzorec	Hmotnostní % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Korund	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100
Diaspor, boehmit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	85
Gibbsit (hydrargilit)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	65,4
Spinel	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·MgO	71
Kyanit, andaluzit, silimanit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>	63
Kaolinit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	39,5
Alunit	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·4Al(OH) <sub>3</sub>	37
Nefelín	(Na, K) <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	32,3 - 35,9
Leucit	K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4SiO <sub>2</sub>	23,5
Sericit	K <sub>2</sub> O·3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	38,4

### 2.3 Vlastnosti hliníku

Čistý hliník (Al) se v technické praxi řadí do skupiny neželezných kovů (Al, Mg, Be, Ti, ...). Je to nemagnetický stříbřitě šedý nepolymorfní kov krystalizující v krychlové plošně středěné mřížce FCC (obr. 2.1). Má nízkou měrnou hmotnost a teplotou tání 660°C.



Obr. 2.1: FCC - Kubická plošně středěná mřížka Al [11].

Hliník je svou spotřebou druhý nejvýznamnější po železe. Hlavní výhody hliníku jsou dobrá elektrická i tepelná vodivost, vysoká měrná tepelná kapacita, dobrá tvárnost za studena i za tepla a dobrá svařitelnost v ochranné atmosféře. Na vzduchu je hliník stálý, na povrchu se tvoří vrstvička  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která jej chrání před další oxidací. Vybrané technické vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.1.

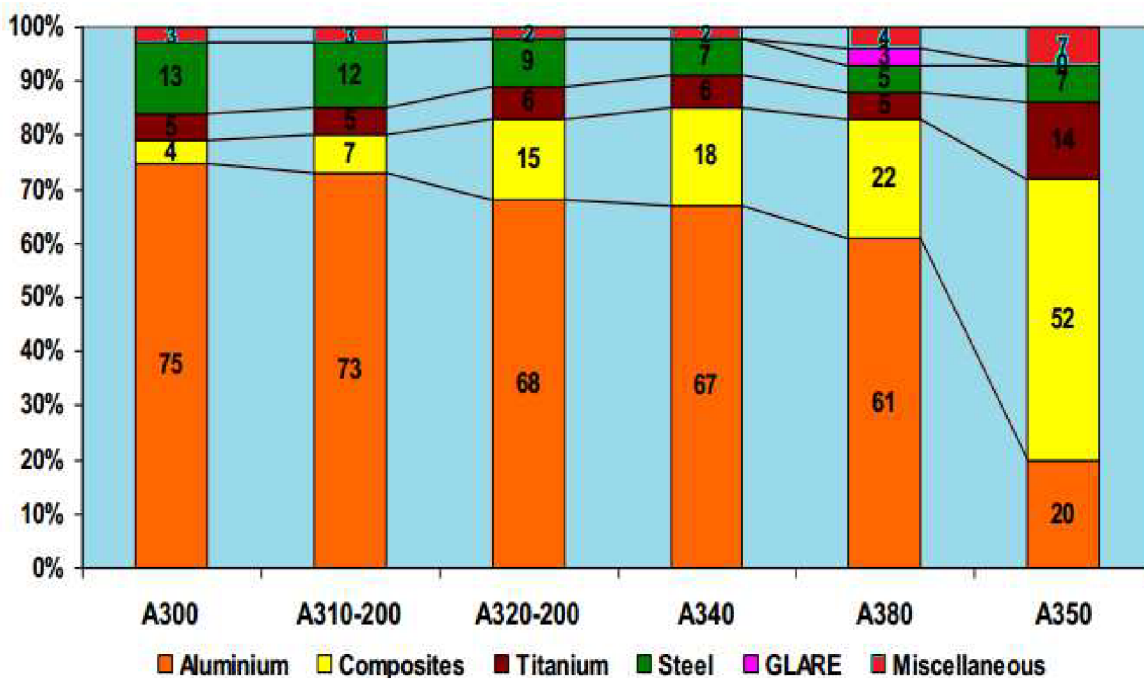
Tabulka 2.1 Vybrané technické vlastnosti hliníku [6, 12, 13].

Vlastnost	Hodnota
Druh mřížky	Kubická plošně centrovaná K12
Skluzové roviny / skluzové směry	{111} / <110>
Hustota	2,6989 g·cm <sup>-3</sup> (při 20 °C)
Atomová hmotnost	26,91854
Teplota tavení	660,4 °C
Latentní teplo tavení	397 kJ·kg <sup>-1</sup>
Teplota varu	2494 °C
Latentní teplo varu	10,78 MJ·kg <sup>-1</sup>
Změna objemu při tuhnutí	7,10%
Modul pružnosti E	67 GPa
Pevnost v tahu Rm	< 100 MPa
Tvrdość	20 - 30 HB

### 2.3.1 Použití hliníku

Díky svým specifickým vlastnostem má hliník velmi rozsáhlou oblast využití. V současnosti jsou hlavní oblasti jeho použití hlavně doprava, stavebnictví (díky své nízké hmotnosti, vysoké odolnosti proti korozi, výbornému vzhledu po dlouhou dobu, atd.), strojírenský a hutnický průmysl, potravinářský průmysl (hygienická nezávadnost, chemická stálost na vzduchu a další), chemický průmysl (potrubí, výměňky), rekreační průmysl a sport a jiné oblasti použití jako klenotnictví.

Hlavně je to dopravní průmysl (letecký, automobilový, kolejová doprava, konstrukce lodí, kosmonautika), který podle [6] spotřebuje téměř 60% celkové roční spotřeby hliníku. Největší procento použitých hliníkových materiálů z celkového objemu je při výrobě letadel (obr. 2.2).



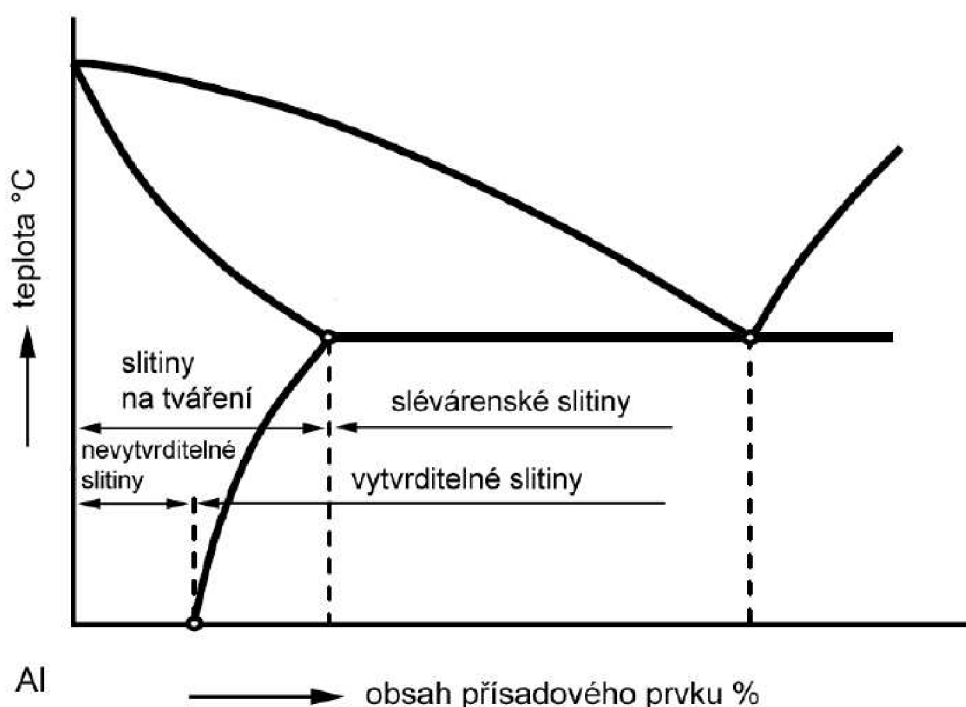
Obr. 2.2: Podíl konstrukčních materiálů různých typů letadel společnosti Airbus [14].

### 2.4 Metalurgie hliníku

Moderní výroba hliníku probíhá převážně elektrolýzou, z nejdůležitější ekonomicky využitelné suroviny pro výrobu hliníku, bauxitu, jehož hlavní složkou je oxid hlinitý. Hliník je výrazně neušlechtilý kov, proto ho není možné vyrobit elektrolýzou z vodních roztoků. Pro tento kov se výhodně používá elektrolýza z roztavených solí. Pro výrobu hliníku elektrolýzou je vhodná roztavená sůl kryolit  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , do které se vsází oxid hlinitý a přídavky na modifikaci vlastností elektrolytu, nejčastěji na bázi fluoridů a chloridů sodíku, hořčíku, vápníku, lithia apod. [6, 15].

### 2.4.1 Metalurgie hliníkových slitin

Čistý hliník se pro své špatné mechanické a technologické vlastnosti (v měkkém stavu např. pevnost v tahu 45-70 MPa a tvrdost mezi 20 a 30 HB, tažnost  $A=25\%$ ) používá pouze ojediněle. Ve většině případů se jedná o slitiny dvou a více kovů. Hlavními legujícími (přísadovými) prvky jsou měď, mangan, křemík, hořčík a železo. Jejich účinky na slitiny jsou podle [8] různé: Cu zvyšuje pevnost a zlepšuje obrobitelnost, Mn zlepšuje tvárnost a slévateľnost. Si působí na zlepšení korozivzdornosti a zlepšuje slévateľnost. Mg zlepšuje pevnost a korozivzdornost. Zn zvyšuje pevnost a zlepšuje slévateľnost, zatímco Fe zajišťuje pevnost a tvrdost.

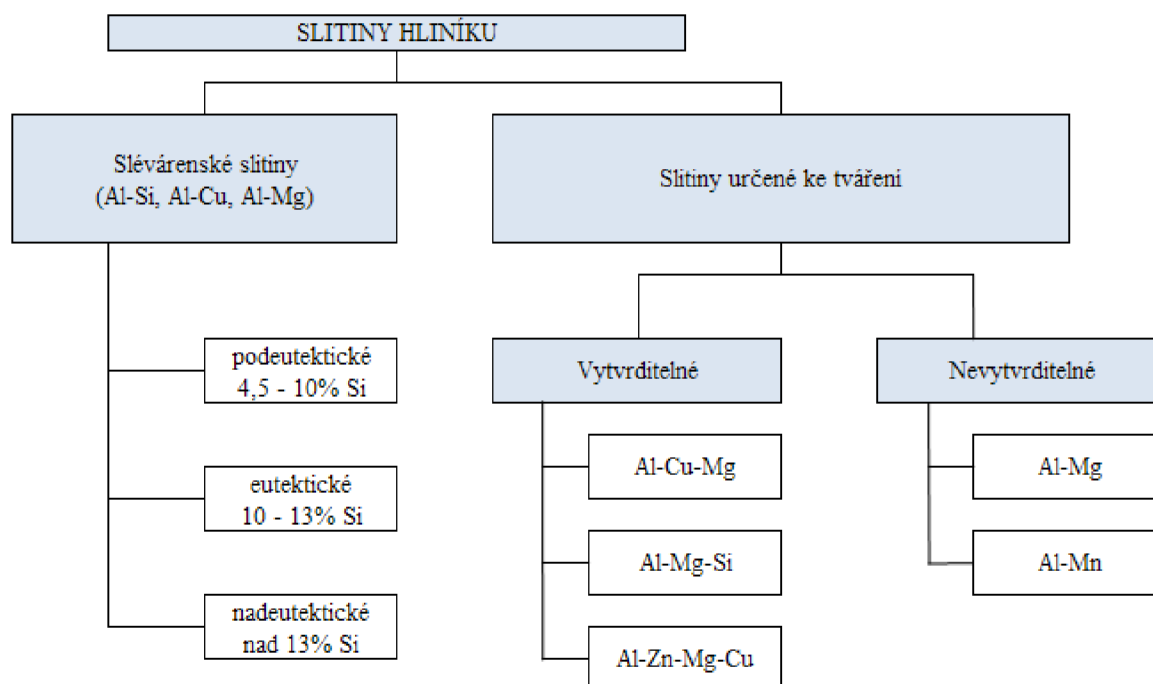


Obr. 2.3: Část soustavy slitiny hliníku Al – X [16].

### 2.5 Slitiny hliníku

Hliníkové slitiny se dělí podle chemického složení do dvou základních skupin (obr. 2.4): slévárenské slitiny nebo slitiny určené ke tváření. Z binárního eutektického diagramu Al-X (obr. 2.3) je toto rozdělení také zřejmé. Toto rozdělení je dáno množstvím přísadových (přísadového) prvků, podle kterých se liší i vlastnosti dané slitiny.

Klíčovým prvkem ovlivňujícím tekutost u slévárenských slitin je křemík plus další legující prvky pro zlepšení jejich vlastností (hlavně Cu, Mg, Zn). Se zvyšujícím se podílem eutektika podle chemického složení se slévateľnost výrazně zlepšuje. Zpravidla se však jedná o tepelně nezpracovatelné odlitky. Tvářené slitiny hliníku se vyskytují v provedení tepelně zpracovatelném a tepelně nezpracovatelném. U všech slitin určených pro tváření se v širokém spektru dají měnit jejich mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti přesným chemickým složením, technologickými parametry tváření a tepelným zpracováním. Tepelné zpracování Al a jeho slitin můžeme rozdělit do dvou základních skupin: žhání nebo vytvrzování [6, 8].



Obr. 2.4: Rozdělení kovových materiálů [11].

### 2.5.1 Slévárenské hliníkové slitiny

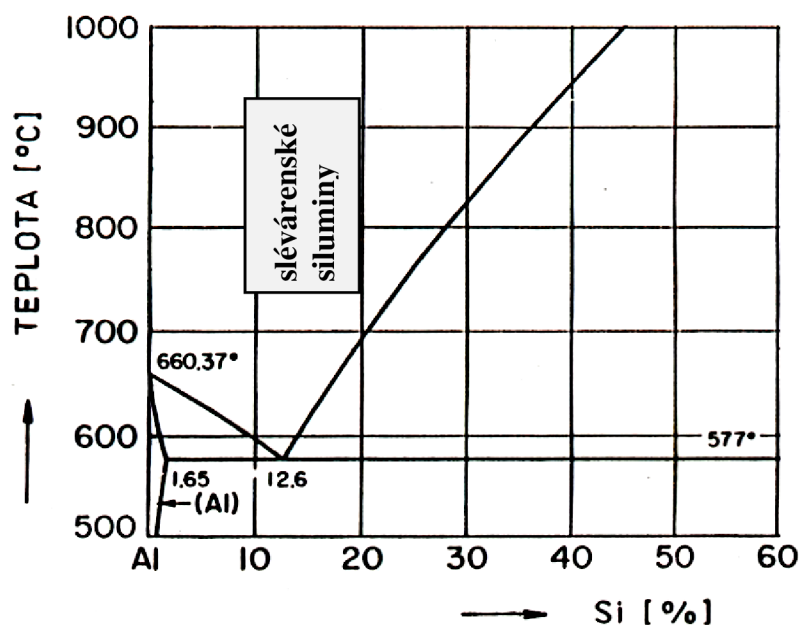
V současnosti, dle ASM (ASM International – The Materials Information Society), dělíme slévárenské slitiny hliníku, na základě obsahu legujícího prvku nebo legujících prvků, do šesti základních typů [6]:

1. Al-Cu (duraly)
2. Al-Cu-Si
3. Al-Si (siluminy)
4. Al-Mg (hydronaly)
5. Al-Zn-Mg
6. Al-Sn

Nejčastějším druhem slévárenských slitin jsou siluminy, označované jako binární (jednoduché) a dělí se na podeutektické (méně než 11,7% Si), eutektické (kolem 11,7% Si) a nadeutektické (více než 11,7% Si), přičemž nejlepší slévárenské vlastnosti mají eutektické slitiny [17].

Od slévárenských slitin hliníku se očekávají dobré technologické vlastnosti, jako jsou například tavitelnost (schopnost přecházet z tuhého skupenství do kapalného a tvořit homogenní taveniny), zabíhavost (schopnost slitiny vyplnit co nejdokonaleji dutiny formy), nízká teplota tavení, odolnost vůči vzniku trhlin za tepla atd. A jsou určeny k výrobě tvarově složitých či tenkostěnných odlitků litím do písku, do kovových forem nebo k tlakovému lití.





Obr. 2.5: Rovnovážný diagram Al-Si [15].

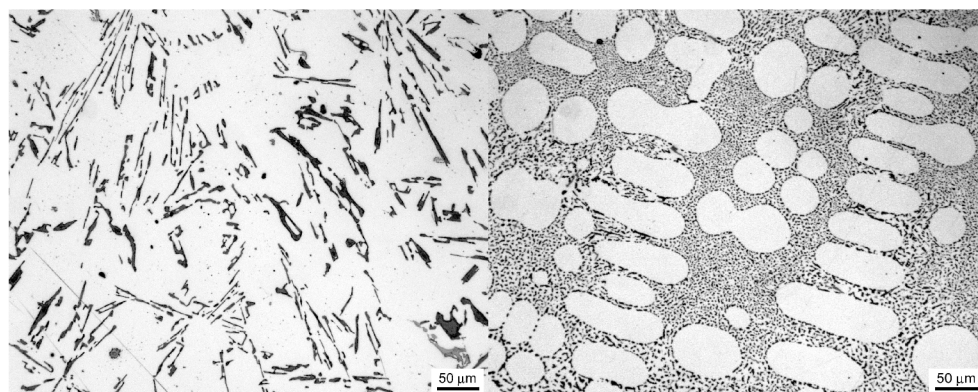
Slévárenské slitiny vykazují i dobré pevnostní charakteristiky, ovšem zvýšení pevnosti vede ke snížení korozní odolnosti a zabíhavosti. Vlastnosti slévárenských slitin se liší dle požadavků na materiál zpracovaný odléváním. Vyznačují se poměrně velkým obsahem legujících prvků a nečistot [6, 18]. Mimo Si jsou hlavními legujícími prvky Cu, Mg, Mn, ale také Ni a Cr.

Při tavení hliníkových slitin se provádí metalurgické zásahy, jejichž cílem je ovlivnění struktury slitiny a rafinace slitiny. Cílem těchto procesů je zlepšení mechanických a technologických vlastností a dosažení homogenity odlitků bez výskytu plynových dutin a vměstků [15].

Hlavními metalurgickými způsoby ovlivnění struktury je očkování a modifikace.

Proces **očkování** ovlivňuje strukturu slitiny a provádí se za účelem zjemnění primární fáze, neboli zjemnění zrna výsledné slitiny. Do roztaveného kovu se pomocí očkovadla vnáší nukleační (krystalizační) zárodky hliníku. Očkovadla mohou být ve formě očkovacích solí ( $\text{PCl}_5$ ), očkovacích tablet nebo ve formě předslitin ( $\text{Al-Ti}$ ,  $\text{Al-Ti-B}$ ,  $\text{CuP}_{10}$ ). Pro podeutektické slitiny se používá jako očkovadlo titan (Ti) či kombinace Ti a bóru (B), u nadeutektických slitin to je fosfor (P). Vliv zjemnění zrna se příznivě projevuje zejména u slitin Al-Cu, u slitin Al-Si je méně významné.

Účelem **modifikace** slitiny Al je zvýšení mechanických vlastností, zejména tažnosti a je primárně využívána u slitin Al-Si. Modifikace neboli úprava, spočívá ve změně tvaru eutektického křemíku a tím ke změně pevnostních charakteristik. Jako modifikátor se nejčastěji používá sodík (Na) ve formě kovových patron, solí či tablet nebo stroncium (Sr) ve formě předslitin a nebo antimon (Sb). Modifikace se projeví také ve zlepšené obrobitelnosti slitiny. Příklad modifikované struktury siluminu lze vidět na následujícím obrázku.



a) nemodifikovaný silumin  
(hrubé krystaly křemíku)

b) modifikovaný silumin  
(tuhý roztok  $\alpha$  a eutektikum  $\alpha$ +Si)

Obr. 2.6: Struktura siluminů [11].

Z pohledu obrábění se lité slitiny hliníku dají rozdělit na dvě podskupiny dle hlavního legujícího prvku. Siluminy, které obsahují hlavní legující prvek křemík, se obecně hůře obrábí a je zapotřebí nastavit jiné rezné podmínky oproti slitinám legovanými mědí, hořčíkem nebo zinkem, které jsou obrobitelné velmi dobře.

### 2.5.2 Hliníkové slitiny pro tváření

Hliníkové slitiny pro tváření lze zařadit podle ČSN EN 573-1 do skupin uvedených v kapitole 2.5.4, a to včetně hliníku čistoty minimálně 99,00 % a výše. Od všech těchto slitin se prioritně požaduje dobrá schopnost ke tváření jak za tepla, tak i za studena. V mikrostruktúře je tedy požadován vysoký podíl plastického roztoku  $\alpha$ , který zapříčiňuje dobrou tvařitelnost těchto slitin. Oproti slitinám určených pro odlévání s vysokým obsahem legur jsou slitiny pro tváření charakterizovány nižšími obsahy přísadových prvků (obr. 2.3), který zpravidla nepřekročí 10%. Největší předností hliníkových slitin pro tváření je jejich pevnost, která může u některých typů po tepelném zpracování dosahovat hodnoty až 550 MPa, což v kombinaci s jejich nízkou hmotností dělá z těchto slitin vhodné materiály pro automobilový a letecký průmysl [6, 19]. Podle jejich dalšího zpracování je možno je dělit:

**a) Slitiny s nízkou pevností a dobrou odolností proti korozi** většinou neobsahují měď nebo velmi malé množství, tudíž velmi dobře odolávají korozi i bez povrchové úpravy, také velmi dobře snášejí látky kyselé povahy. Mezi další výhody patří tvařitelnost, svařitelnost, dobrá lomová houževnatost a odolnost proti vibračnímu zatížení. Nemožnost zvýšení jejich mechanických vlastností následným tepelným zpracováním (precipitačním vytvrzováním) je však jejich nevýhoda. Především jsou to slitiny Al-Mn a Al-Mg.

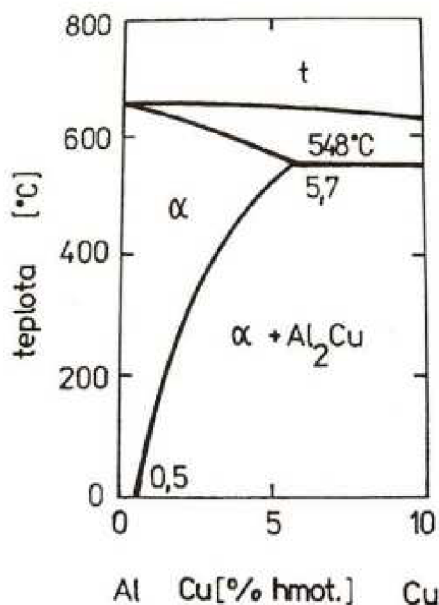
Slitiny **Al-Mn** se tepelně nevytvřují. Korozní odolnost je způsobena účinkem manganu. Jeho vliv na hliník a hliníkové slitiny snižuje náchylnost k intermetalické korozi a korozi pod napětím. Maximální rozpustnost Mn v Al se v publikacích různých autorů liší, převážně je však definována jako menší než 1%. Slitina AlMn1 má v měkkém stavu mez pevnosti  $R_m = 130$  MPa, ve stavu deformačně zpevněném  $R_m = 220$  MPa.

Slitiny **Al-Mg** se obvykle používají v koncentraci hořčíku menší než 6%, slitiny s vyšším obsahem mají sklon ke korozi po hranicích zrn. Pevnost této slitiny stoupá se zvyšujícím se obsahem hořčíku, který významně zlepšuje mechanické vlastnosti těchto slitin. V žíhaném stavu mají pevnost  $R_m = 140$  až  $200$  MPa, po deformačním zpevnění max.  $420$  MPa (slitina AlMg5 se stupněm deformace 20 až 30%).

Slitiny **Al-Mg-Si** se na rozdíl od slitin Al-Mg dají vytvrdit. Jejich vlastnosti jsou tvárnost, svařitelnost, dobrá korozní odolnost a schopnost povrchových úprav. Používají se zejména ve stavebnictví a letectví.

**b) Slitiny s vyšší a vysokou pevností a nízkou odolností proti korozi** jsou nejvýznamnějšími tvářenými slitinami hliníku. Vytvrzením získají výrazně vyšší mechanické vlastnosti. Nejvýznamnějšími zástupci této podskupiny jsou Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg a Al-Li.

Slitiny **Al-Cu** a **Al-Cu-Mg** neboli tzv. **duraly** patří k nejstarším vytvrzovaným slitinám hliníku. Prodělaly složitý vývoj od binárních slitin Al-Cu ke komplexním slitinám [6]. Obsahují cca 1 až 6% Cu a do 2% Mg a dosahují velmi dobrých mechanických vlastností ve stavu vytvrzeném. V leteckém průmyslu jsou velmi rozšířené pro svou pevnost a lomovou houževnatost, nejpoužívanější jsou slitiny řady 2000 (2017, 2014 a 2024). Všechny duraly obsahují pro zlepšení vlastností Mn a jako příměsy Fe a Si. Vzhledem ke zhoršené korozní odolnosti způsobené přítomností Cu se duraly často plátují čistým Al nebo korozně odolnou slitinou Al. Nejrozšířenější je slitina Al-Cu4-Mg, která dosahuje pevnosti po vytvrzení až  $530$  MPa (v měkkém stavu  $200$  MPa).

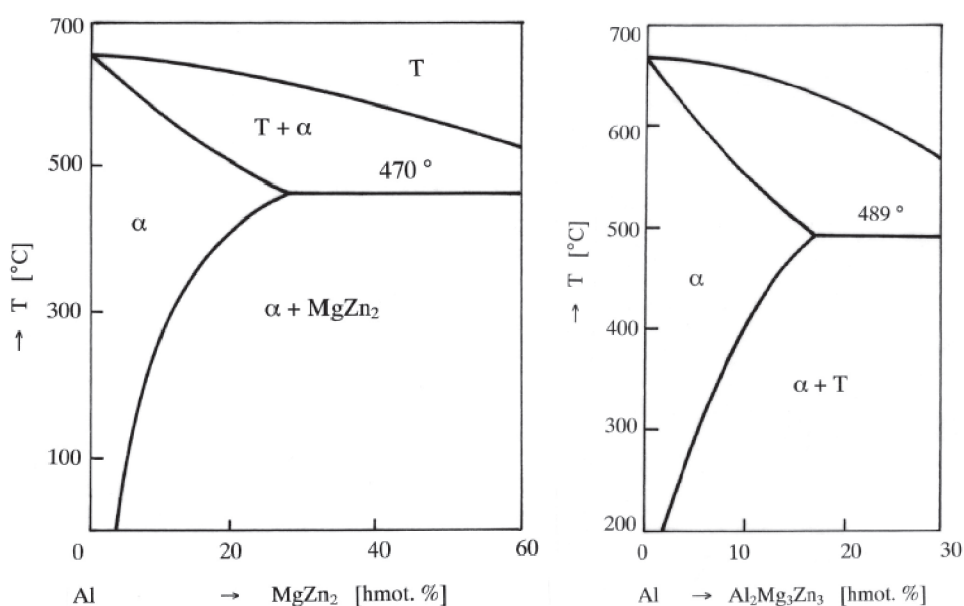


Obr. 2.7: Část soustavy Al-Cu [11].

Slitiny **Al-Zn-Mg** a **Al-Zn-Mg-Cu** patří mezi vysokopevné slitiny, dosahují hodnot pevnosti v tahu až  $600$  MPa. Tyto slitiny jsou díky příměsí Cu vysoce pevné, ale náchylné na mezikrystalickou korozi pod napětím. Mezi další nevýhody patří, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost. Mezi výhody naopak patří vysoká rozměrová stálost a dobrá obrobiteľnosť. Kvalita povrchu po obrobení, případně po eloxování

je vynikající. Nejuniverzálnější je slitina 7075, u které se podařilo omezit nevyhovující odolnost proti korozi pod napětím.

Hlavní legující prvek slitin Al-Zn-Mg(-Cu) je Zn, který je vždy zastoupen ve větším množství než Mg nebo Cu (2 - 8% Zn, 0,5 - 4,0% Mg, 0,0 - 3,0% Cu). Na poměru Zn : Mg závisí, která intermetalická fáze bude přítomna v rovnovážné struktuře. Když je poměr Zn : Mg > 2, pak bude přítomna fáze MgZn<sub>2</sub>, když je poměr Zn : Mg < 2, potom bude přítomna fáze Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>. Na obr. 2.8 jsou viditelné kvazibinární diagramy Al - MgZn<sub>2</sub> a Al - Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>. Pro oba diagramy platí, že uvedené intermetalické fáze jsou rozpustné v Al matrici ve značném množství. To umožnilo výrobu širokého sortimentu slitin tohoto typu s rozdílnými vlastnostmi [6].



Obr. 2.8: Část soustavy Al-Zn-Mg [6].

Do vytvrditelných slitin hliníku je třeba zařadit i slitiny **Al-Li**, které jsou v současné době stále vyvíjeny. Vzhledem k vysoké reaktivitě lithia s kyslíkem se tato slitina taví pod krycí struskou na vzduchu nebo v ochranné atmosféře argonu či ve vakuu. Motivace vývoje těchto slitin je snížení hmotnosti při zachování mechanických vlastností.

### 2.5.3 Slitina EN AW 7075 T7351

Tato slitina hliníku má velmi vysokou pevnost a je určena pro vysoce namáhané konstrukční díly, ovšem lze ji využít jen za nepříliš vysokých teplot. Hlavními přísadovými prvky jsou Zn, Mg a Cu, přičemž Zn je vždy zastoupen ve větším množství než Cu a Mg. Tepelné zpracování T7351 nabízí zvýšenou odolnost proti korozi pod napětím. Tato slitina je dostupná také jako plátovaná pod názvem AlClad 7075. Plátování je buď oboustranné s tloušťkou plátovací vrstvy 4% pro tloušťky plechů do 1,57 mm a 2,5% pro tloušťky plechů nad 1,57 mm nebo jednostranné, přičemž tloušťka vrstvy je podobná. Použití: součásti letadel, ozubená kola a hřídele, raketové díly, šneková kola, aplikace v letectví a vojenské technice [20, 21]. Další označení této slitiny je popsáno v tabulce 2.5.

Tabulka 2.2 Složení slitiny EN AW 7075 [příloha 2].

Chemický prvek	Obsah prvku v EN AW 7075
Zinek (Zn)	5,10 - 6,10 %
Hořčík (Mg)	2,10 - 2,90 %
Měď (Cu)	1,20 - 2,00 %
Křemík (Si)	< 0,40 %
Železo (Fe)	< 0,50 %
Mangan (Mn)	< 0,30 %
Chrom (Cr)	0,18 - 0,28 %
Titan (Ti)	< 0,20 %

#### 2.5.4 Označování hliníku a slitiny hliníku podle ČSN EN

##### a) Označování hliníku a slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3 [6]

Tyto normy platí pro tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření a stanoví označování písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením, např. EN AW-5052 [AlMg2.5].

Ve čtyřmístném číselném označení udává první ze čtyř číslic skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků [6, 24]:

Řada 1000 – Al minimálně 99% a více,	řada 2000 – slitina AlCu,
Řada 3000 – slitina AlMn,	řada 4000 – slitina AlSi,
Řada 5000 – slitina AlMg,	řada 6000 – slitina AlMgSi,
Řada 7000 – slitina AlZn,	řada 8000 – slitina Al s různými prvky.

Seznam všech platných typů hliníku a slitin hliníku pro tváření je obsažen v normě: **ČSN EN 573-3 – Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 3: chemické složení:2004.**

Přehled některých vybraných slitin se současným porovnáním těchto druhů slitin podle ČSN a DIN 1725-1 (Německo) je uveden v tabulkách č. 2.3 – 2.5.

Tabulka 2.3 Značení slitin hliníku pro tváření řady 2000 – AlCu [6].

Slitiny hliníku - řada 2000 - AlCu					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW - 2014	EN AW-AlCu4SiMg	-	-	3.1255	AlCuSiMn
EN AW - 2030	EN AW-AlCu4PbMg	ČSN 42 4254	AlCu4PbMg	-	-
EN AW - 2117	EN AW-AlCu2,5Mg	ČSN 42 4204	AlCu2Mg	3.1305	AlCu2,5Mg0,5

Tabulka 2.4 Značení slitin hliníku pro tváření řady 4000 – AlSi [6].

Slitiny hliníku - řada 4000 - AlSi					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW - 4032	EN AW-AlSi12,5MgCuNi	ČSN 42 4237	AlSi12Ni1Mg	-	-

Tabulka 2.5 Značení slitin hliníku pro tváření řady 7000 – AlZn [6].

Slitiny hliníku - řada 7000 - AlZn					
Značení slitin dle ČSN EN 573-3		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW - 7020	EN AW-AlZn4,5Mg1	ČSN 42 4441	AlZn5Mg1	3.4335	AlZn4,5Mg1
EN AW - 7022	EN AW-AlZn5Mg3Cu	-	-	3.4345	AlZnMgCu0,5
EN AW - 7075	EN AW-AlZn5,5MgCu	ČSN 42 4222	AlZn6Mg2Cu	3.4365	AlZn4,5MgCu1,5

### b) Označování hliníku a slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706 [6]

Tato norma platí pro odlitky a stanoví označování písmeny EN AC a pěti číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením, např. EN AC-21000 [AlCu4MgTi].

V pětímístném číselném označení udává první z pěti číslic skupinu slitin stejně jako u slitin pro tváření podle hlavních slitinových prvků [6, 24]:

Řada 1000 – Al minimálně 99% a více, řada 2000 – slitina AlCu,  
 Řada 3000 – slitina AlMn, řada 4000 – slitina AlSi,  
 Řada 5000 – slitina AlMg, řada 6000 – slitina AlMgSi,  
 Řada 7000 – slitina AlZn, řada 8000 – slitina Al s různými prvky.

Seznam všech platných typů hliníku a slitin hliníku na odlitky je obsažen v normě: **ČSN EN 1706 – Hliník a slitiny hliníku – Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti:1999.**

Přehled některých vybraných slitin se současným porovnáním těchto druhů slitin podle ČSN a DIN 1725-2 (Německo) je uveden v tabulce č. 2.6.

Tabulka 2.6 Značení slitin hliníku na odlitky [6, 15].

Slitiny hliníku na odlitky					
Značení slitin dle ČSN EN 1706		Značení slitin dle ČSN		Značení slitin dle DIN 1725-2	
číselné označení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AC - 21000	EN AC-AlCu4MgTi	-	-	3.1371	AlCu4MgTi
EN AC - 21100	EN AC-AlCu4Ti	-	-	3.1841	AlCu4Ti
EN AC - 43000	EN AC-AlSi10Mg (a)	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2381	AlSi10Mg (a)
EN AC - 44200	EN AC-AlSi12 (a)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2373	AlSi12
EN AC - 45000	EN AC-AlSi6Cu	-	-	3.2151	AlSi6Cu
EN AC - 46000	EN AC-AlSi9Cu3 (a)	ČSN 42 4339	AlSi8Cu2Mn	3.2163	AlSi9Cu3 (a)
EN AC - 51200	EN AC-AlMg9	ČSN 42 4519	AlMg10SiCa	3.3292	AlMg9

## 2.6 Pěnový hliník a slitiny

Další aplikací hliníku a jeho slitin v současnosti je pěnový hliník. Na myšlenku použít vysoce porézního konstrukčního materiálu přivedly vědce po mnoho tisíciletích ověřené materiály (dřevo, kosti, korály apod.). Tyto velice lehké materiály mají díky své struktuře, složené z hliníkové slitiny a pórů vyplněných vzduchem rovnoměrně rozložených v objemu matrice, neobyčejně vysokou tuhost a dokážou přenášet velké mechanické zatížení. Pěnový hliník lze vyrobit dvěma způsoby:

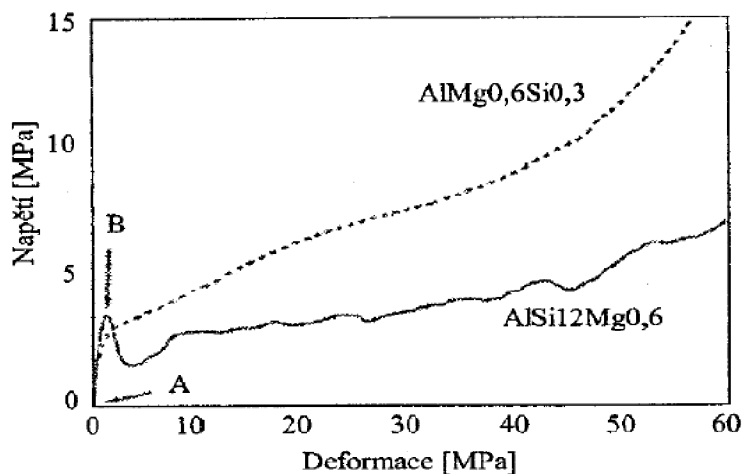
### Slévárensky:

- vmísením zpěňovala do roztavené slitiny Al, který v tavenině vytvoří póry. Takováto směs se vyrábí ve velkých ingotech, ze kterých se následným obráběním vytváří hotové výrobky s celulárním povrchem.

### Technologií práškové metalurgie:

- prášková směs se společně s Al zahřívá a lisuje, vznikne tak přímo součást s požadovaným tvarem.

Na následujícím obrázku je vidět rozdíl průběhu deformačních křivek pro tvářenou slitinu  $\text{AlMg}_{0,6}\text{Si}_{0,3}$  a křehkou slévárenskou slitinu  $\text{AlSi}_{12}\text{Mg}_{0,6}$ .



Obr. 2.9: Deformační křivka pěnového hliníku bez povrchové vrstvy [22].

## 2.7 Prášková metalurgie hliníku a slitiny

Současná progresivní technologie slinování kovových nebo nekovových prášků umožňuje výrobu nových materiálů s vysokými užitnými vlastnostmi, a to ekonomicky výhodně. Při technologii práškové metalurgie se výsledná pevná tělesa zpracovávají napřed tlakem (lisováním) a poté spékáním (slinováním) při vhodných teplotách. Dosahuje se tak žádaných pevností, tvrdosti a ostatních požadovaných vlastností. Výhodou této technologie je, že výrobek dostává požadovaný tvar již při spékání a nejsou potřeba žádné dodatečné úpravy.

Největší rozvoj při výrobě prášků zaznamenávají technologie rozprašování (atomizace) proudu taveniny kapalným nebo plynným médiem, vyrábí se tak až 99% prášků. Díky volnému výběru chemického složení a možnosti regulace mikrostruktury se vyrábí výrobky požadovaných vlastností, což je velmi ekonomicko-technologicky výhodné.

V současnosti stoupá zájem o výrobu dílů práškovou metalurgií v oblasti elektrických a elektrotechnických aplikací, ale i strojních součástí. Doposud však hlavní průmyslová odvětví využívající této technologie jsou průmysl automobilový, letecký a obchod se zbožím pro volný čas a sport.

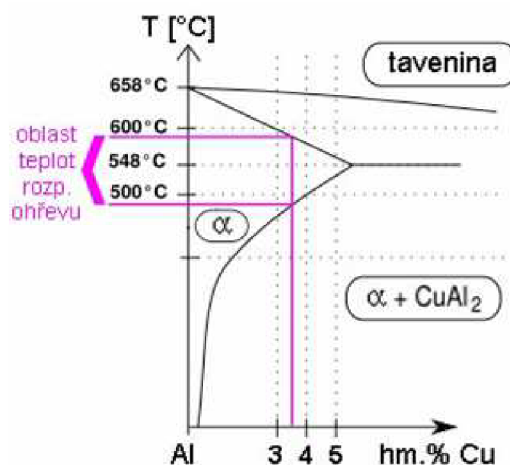
## 2.8 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

Proces tepelného zpracování se dá stručně popsat jako děj, při kterém je výrobek vystaven ohřevu a následnému řízenému ochlazení za účelem dosažení požadované struktury a vlastností. Výsledkem je určitý nerovnovážený stav struktury.



Tepelné zpracování je možno rozdělit do dvou základních skupin:

- žíhání,
- vytvrzování.



Obr. 2.10: Část soustavy Al-Cu, rozmezí teplot pro rozpouštěcí žíhání [11].

### 2.8.1 Žíhání

Při **žíhání ke snížení vnitřních pnutí** dochází k uvolnění vnitřní napjatosti při teplotách v rozmezí 200 až 300 °C, někdy i 400 °C a používá se u tvarově složitých odlitků, svařenců a tvářených součástí. Tato teplota však nesmí překročit teplotu rekrytalizace daného materiálu. Ochlazování probíhá běžně na vzduchu.

Účelem **rekrytalizačního žíhání** je transformace původní deformované struktury u výrobků tvářených za studena na nově rekrytalizovanou strukturu, tzn. odstranění zpevnění po předchozím tváření. Obvykle se provádí při teplotách okolo 350 °C. V průběhu rekrytalizačního žíhání rozlišujeme 3 pochody. První z nich je fáze zotavení, jež je nejvýznamnějším pochodem, co se týče snižování deformační energie. Po zotavení následuje samotná rekrytalizace, tu lze popsat jako vznik nových zrn, a posledním pochodem je růst nově vytvořených zrn.

**Stabilizační žíhání** se zpravidla provádí při teplotách v rozmezí 240 °C až 360 °C a uplatňuje se především u součástí, které mají pracovat za vyšších teplot. Cílem tohoto pochodu je stabilizace struktury materiálu, tzn. stabilizace mechanických, fyzikálních a chemických vlastností.

**Žíhání homogenizační** se provádí za vysokých teplot překračujících křivku změny rozpustnosti, používá se k odstranění resp. zmenšení chemické heterogenity (nerovnováhy) materiálu, která vzniká při krystalizaci.

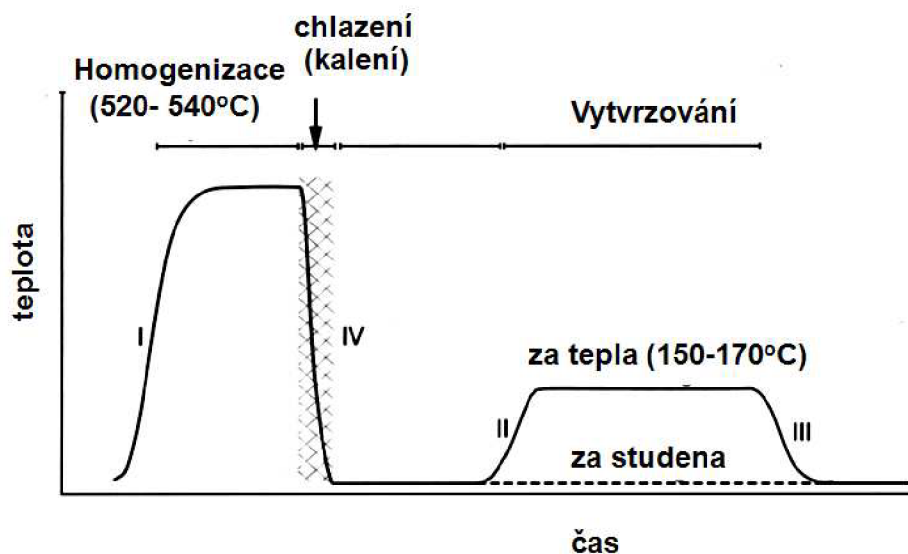
### 2.8.2 Vytvrzování

Účelem vytvrzování jako technologického procesu je výrazné ovlivnění mechanických, fyzikálních a technologických vlastností vůči výchozímu stavu. Princip vytvrzování

spočívá v mechanismu precipitačního zpevnění, které je podmíněné výraznou změnou rozpustnosti přísadových prvků v tuhém roztoku v souvislosti se snižováním teploty. Rozpustnost prvku v tuhém roztoku  $\alpha$  s klesající teplotou zpravidla klesá, což se v rovnovážném systému projevuje vylučováním tohoto prvku jako samotné fáze. Podstata precipitačního vytvrzování však spočívá ve vysoké ochlazovací rychlosti a tudíž vznikem přesyceného tuhého roztoku  $\alpha'$ , určitého nerovnovážného stavu struktury, který však v průběhu času podléhá rozpadu na stabilnější fáze. U tvářených slitin převažuje ve struktuře primární tuhý roztok hliníku  $\alpha$ , u slévárenských slitin ve struktuře převažuje eutektikum. Vytvrzování se skládá z:

- rozpouštěcího žíhání,
- rychlého ochlazení,
- vytvrzování (stárnutí).

Pojmem **rozpouštěcí žíhání** rozumíme ohřev a dostatečnou výdrž na takové teplotě, při které dojde k maximálnímu převedení intermetalických fází do tuhého roztoku hliníku. Při volbě teploty rozpouštěcího žíhání se vychází z fázového diagramu slitiny (obr. 2.10) 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.

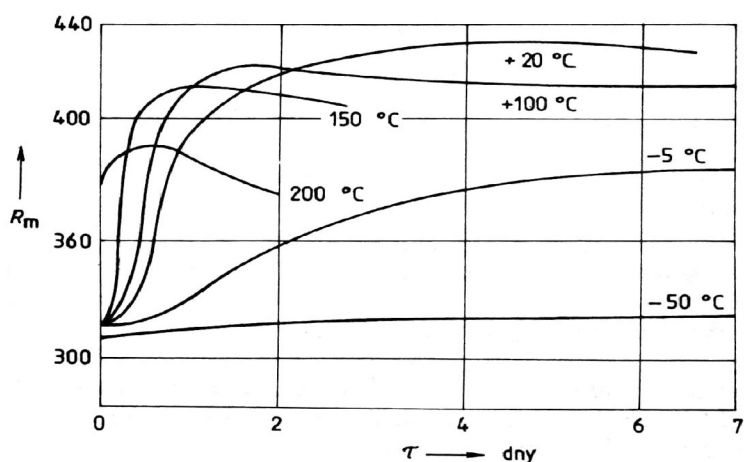


Obr. 2.11: Postup vytvrzování [11].

**Rychlé ochlazení** se provádí nadkritickou rychlostí, přičemž kritickou rychlostí ochlazování myslíme nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při níž nedojde k rozpadu přesyceného tuhého roztoku [6]. Nejčastěji se ochlazení provádí do vody. Veškerá manipulace se slitinou se musí provádět co nejrychleji, aby nedocházelo k částečnému rozpadu tuhého roztoku hliníku. U masivnějších součástí, kde hrozí nebezpečí deformací, jsou používány jiná, méně razantnější ochlazovací média.

V průběhu **vytvrzování** (stárnutí) dochází k rozpadu termodynamicky nestabilního přesyceného tuhého roztoku  $\alpha'$  na stabilnější fáze, což se projevuje změnou mechanických, fyzikálních i technologických vlastností, a to především nárůstem pevnosti. U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku již při teplotě okolí, tento pochod se označuje jako přirozené stárnutí. Při umělém stárnutí se proces urychluje ohřevem, přičemž delší výdrž na teplotě stárnutí dochází k nežádoucímu hrubnutí rovnovážného precipitátu, klesá tvrdost. Toto stádium se označuje jako přestárnutí.

Hodnoty pevnostních charakteristik, které bude slitina vykazovat po stárnutí, jsou závislé na délce trvání tohoto procesu a také na teplotě, při které se uskutečňuje [6].



Obr. 2.12: Vliv teploty a doby stárnutí na pevnost  $\text{AlCu}_4\text{Mg}$  v tahu [11].

### 2.8.3 Označování stavů hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN 515:

Slitiny hliníku pro tváření i na odlitky mohou být z hlediska dalšího tepelného zpracování vytvrditelné nebo nevytvrditelné. Podmínkami vytvrditelnosti Al slitin je dostatečná rozpustnost přísady v hliníku v tuhém stavu a klesající rozpustnost přísady v tuhém hliníku s klesající teplotou. Norma ČSN EN 515 rozlišuje pět základních stavů:

Tabulka 2.7 Základní stavy slitin hliníku [23, 24].

Písmeno	Stav výrobku	Charakteristika
F	z výroby	stav tvářený z výroby, kdy se nespecifikují mechanické vlastnosti,
O	žíhaný stav	stav žíhaný (měkký) k získání stavu s nejnižší mezí pevnosti,
H	stav deformačně zpevněný	u výrobků tvářených za studena po žíhání nebo po tváření za tepla, za písmenem vždy následují nejméně dvě číslice, z nichž první označuje způsob zpracování a druhá stupeň deformačního zpevnění,
W	stav po rozpouštěcím žíhání	nestabilní stav po rozpouštěcím žíhání u slitin, které stárnou při pokojové teplotě (přirozené stárnutí)
T	stav tepelně zpracovaný k získání stabilních stavů jiných než F, O, H	stav tepelně nebo tepelně-mechanicky zpracovaný, zpravidla precipitačně vytvrzený, první číslice rozlišuje pořadí základních etap zpracování (rozpouštěcí žíhání, stárnutí a tváření za studena), další číslice vyjadřují varianty těchto etap.

Tabulka 2.8 Vybrané označení stavu slitin hliníku řady 7000 [23, 24].

Označení ČSN EN 515	Stav	Charakteristika
T7	přestárnutý	uměle přestárnutý po rozpouštěcím žíhání
T73		T7 k dosažení max. odolnosti proti korozi pod napětím
T7351	tepelně-mechanicky zpracovaný	po uvolnění vnitřního pnutí vypnutím
		po rozpouštěcím žíhání nebo po ochlazení ze zvýšené teploty, zlepšení vlastností jako korozi odolnost pod napětím a lomová houževnatost, po vypnutí se dále nevyrovnávají

### 3 TRÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

#### 3.1 Podmínky při obrábění slitin hliníku

Při obráběcím procesu je základním předpokladem pro dosažení kvalitní obrobené plochy v požadované jakosti, rozměrové přesnosti a při hospodárnosti obráběcího procesu nastavení optimálních pracovních podmínek závislých na typu technologie a druhu obráběného i obráběcího materiálu. Při porovnání obráběcího procesu ocelí nebo litin vyžaduje obrábění hliníku zcela jiný přístup, zejména se jedná o nastavení pro daný proces optimálních řezných podmínek, které se při obrábění slitin hliníku významně liší od řezných podmínek železných materiálů. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané slitiny hliníku a jejich vlastnosti.

Tabulka 3. Značení slitin hliníku dle ČSN EN 573-1 až 3 a ČSN EN 515 [3].

Vybrané slitiny hliníku	
Slitina a její možné stavy tep. zpracování	Charakteristika
2011, (T3, T451, T8)	Bezproblémové obrábění (příslady Pb a Bi), snadno k dispozici, nízká korozní odolnost.
6262, (T6, T651, T6511, T8, T9)	Střední obrobiteľnosť (příslady Pb a Bi), lepší odolnosť proti korozi než slitina 2011/2024, dostupná tvářená za studena nebo tažená.
2024, (T351, T4, T6, T851)	Výtečné charakteristiky pro hluboké vrtání, zlepšená odolnosť proti korozi pod napětím ve tvrzeném stavu T8/T851, dostupná tvářená za studena nebo tažená.
7075, (T6, T6511, T73, T7351)	Vysoká pevnost slitiny, tříška není tak dobrá jako u slitin 2024 a 6262, korozní odolnosť horší než 6262.
6061/6082, (T6, T6511)	Střední obrobiteľnosť, tvorba tříška není tak dobrá jako u slitiny 6262, dobrá korozní odolnosť.

V současném vysoce konkurenčním prostředí třískového obrábění se výrobní podniky musí více soustředit na zlepšení kvality a výkonu obrábění, a jelikož vývoj výrobků vede ke stále lepším vlastnostem obrobeného povrchu, může být právě tento faktor kritický. Hodnocení dokončené plochy po obrábění se kromě jmenovitého rozměru skládá ze tří komponent: drsnosti, vlnitosti a odchylky tvaru. Vlnitost je důsledkem vibrací řezného nástroje v záběru. Odchylka tvaru souvisí s přímostí nebo kruhovitostí plochy na což má vliv hlavně tuhost upnutí nástroje. Pokud je obráběcí proces tzv. pod kontrolou, vlnitost a odchylka tvaru mohou být zanedbány [1].

Pro hodnocení stability obráběcího procesu může být použito měření **drsnosti povrchu**, jejíž nejběžnější parametr je střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ . Tato hodnota je aritmetický průměr absolutních hodnot vrcholů a prohlubní nerovností povrchu měřených v určité délce povrchu, která musí být dostatečně dlouhá pro vyhodnocení stopy nástroje, ale na druhou stranu dost krátká, aby výsledný aritmetický průměr nebyl ovlivněn vlnitostí.

Velkou mírou ovlivňuje průběh obrábění materiál obrobku. Jeho vlastnostem se přizpůsobuje volba řezného nástroje a na základě vzájemných interakcí těchto dvou materiálů se určují řezné podmínky, které celý proces také významně ovlivňují. Pro určitý materiál je mimo mechanické charakteristiky z pohledu obrábění použit ukazatel nazývaný **obrobitelnost**.

Pojem obrobitelnosti není jednoznačně definovaný. V odborných textech se hodnotí jako souhrn vlastností daného materiálu obrobku a jeho míru schopnosti být obráběn. Tím je myšleno, jak jednoduché, případně obtížné je opracovávat obrobek při použití řezných nástrojů. Obrobitelnost materiálů určují metalurgie, chemie, mechanika, tepelné zpracování, druh legujících přísad, vměstky a charakter povrchu materiálu obrobku. Důležitými faktory vlivu jsou dále kvalita břitu a držáku nástroje, obráběcí stroj a podmínky obrábění. Určení obrobitelnosti daného materiálu se ve většině případů provádí praktickými zkouškami, přičemž výsledky jsou udávány ve vtahu k jiné zkoušce pro jiný typ materiálu za přibližně stejných podmínek [8, 25].

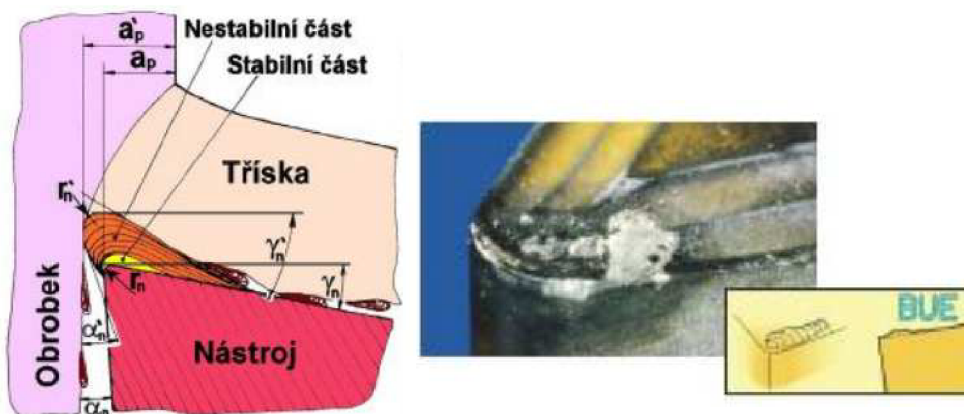
Obecně lze říci, že slitiny hliníku mají dobrou obrobitelnost. Pracovní teploty jsou většinou nízké a lze používat vysoké řezné rychlosti. Avšak zejména za sucha patří mezi problémové materiály, díky jejich nízké teplotě tavení a náchylnosti tvoření nárůstku na břitu nebo čele nástroje. Obrobitelnost hliníkových slitin také závisí na jejich chemickém složení, způsobu zpracování polotovaru (tažení, kování, slévání), u některých také na tepelném zpracování. Z legovacích přísad zlepšuje obrobitelnost hliníku měď, hořčík, olovo, mangan, zinek, chrom, vizmut, zhoršuje ji křemík. Z hlediska chemického složení je možno slitiny podle stupně obrobitelnosti rozdělit do přibližně tří skupin [5, 8, 26]:

- nejlépe obrobitelné – slitiny hliníku Al+Cu, Al+Mg, Al+Cu+Mg
- obrobitelné jsou slitiny hliníku Al+Si, Al+Si+Cu (Si<5%)
- těžko obrobitelné – slitiny Al+Si (až 12%), slitiny s přísadou Ni, Fe, Mn, Co, Cu, Mg.

Hodnocení obrobitelnosti slitin hliníku je založeno na charakteristických vlastnostech třísky při odřezávání [3]:

- A – Hodnocení:  
Velmi malé třísky, výborný obrobený povrch – drsnost povrchu (slitina 2011, 6020).
- B – Hodnocení:  
Zvlněné nebo snadno lámavé třísky, dobrý až výtečný povrch (slitiny 2024, 2017, 6262, 6013, 4032, 7075).
- C – Hodnocení:  
Plynulá tříška, dobrý dokončený povrch (slitiny 6061, 6005).
- D – Hodnocení:  
Plynulá tříška, uspokojivý povrch (slitiny 6063, 5056).

Pojem **nárůstek** je klasifikován jako jedna z možností **opotřebení** břitu při řezném procesu a spolu s opotřebením hřbetu jsou nejčastějším důvodem ukončení trvanlivosti řezného nástroje. Nárůstek (obr. 3) lze popsat jako silně spěchovanou vrstvu kovu s vysokou pevností a tvrdostí, která ulpívá na břitu ostří. Tvorba nárůstku probíhá podle [27] periodicky s frekvencí  $10^2$  až  $10^3$  Hz. Jeho růst při řezání způsobuje nerovnoměrné odebrání materiálu a tím zvyšuje drsnost obrobenej plochy a má dvě části, stabilní a nestabilní (obr. 3). U hliníku a jeho slitin dochází díky nízké teplotě tavení k problému s utvářením třísky a jejím následným odvodem. To má za následek nalepování na břit nebo čelo nástroje a vytváření nárůstku. Ke snížení tvorby nárůstku se u nástrojů provádí povrchová úprava – mikrořeštění řezné hrany a povrchu nástroje, tím se následně snižuje adheze, což se projeví na zlepšené jakosti (drsnosti) obrobenej povrchu. Proti vytváření nárůstku je velmi vhodné použití řezných kapalin.



Obr. 3: Tvorba nárůstku vlevo, vytvořený nárůstek vpravo [25, 27].

### 3.1.1 Řezné podmínky pro vrtání slitin hliníku

Uvedené řezné parametry posuvu pro vrtání vybraných slitin hliníku jsou uvedeny pro vrtání mělkých děr šroubovitými vrtáky [3]. Posuv resp. rychlost posuvu významně ovlivňuje proces vrtání.

Tabulka 3.1 Doporučené hodnoty optimálních posuvů pro vrtání hliníkových slitin [3].

Posuvy pro vrtání hliníku (mm/ot)			
Průměr díry (mm)	Slitina 2011	Slitiny 6262, 6020, 2024	Slitiny 6061, 7075, 6082
3,0	0,300	0,250	0,127
6,5	0,430	0,355	0,178
9,5	0,520	0,432	0,229
13,0	0,520	0,432	0,254
14,5	0,520	0,432	0,280
16,0	0,520	0,432	0,305
19,0	0,520	0,432	0,305

Vlivy velikostí posuvů a řezných rychlostí při vrtání slitiny hliníku AlSi8Cu3Fe na opotřebení nástroje a drsnost výsledného povrchu jsou v následujících vztazích. Pokud je řezná rychlost zvýšena o 50% své původní hodnoty, je prokázáno testováním, že opotřebení vzroste o přibližně stejnou hodnotu. Pokud je zvýšen posuv o hodnotu 50%, opotřebení nástroje vzroste pouze o 7%. Drsnost povrchu se zvýší o 16% při zmíněném zvýšení řezné rychlosti z 99 na 198 cm/s a při zvýšení posuvu z 0,406 na 0,812 mm/ot se zvýší o 15% [1].

Tudíž při volbě řezných podmínek je lepší volit vyšší hodnoty posuvu.

### 3.2 Nástroje na obrábění hliníkových slitin

Při obrábění hliníku by měly být dodrženy především tyto nástrojové doporučení [3]:

- nástroje a nástrojové držáky musí být dostatečně tuhé,
- nástroje by měly mít jemně broušenou řeznou hranu,
- řezné hrany by měly vydržet ostré za všech okolností,
- třísky musí být směřovány pryč od obrobku nebo lámány utvařečem třísek, aby se zabránilo porušení již obrobeného povrchu součásti,
- používat doporučené úhly čela ke snížení řezných sil, tím se vytváří tenčí třísky a redukuje kovový nárůstek,
- při vrtání používat systém vysokotlakého plynulého dodávání chladicí kapaliny.

**Vrtáky** pro obrábění hliníku mají typicky velký úhel šroubovice a rozsáhlé leštěné drážky pro rychlý odvod třísek a zamezení vzniku nárůstku. Standardní vrtáky mohou být použity pro vrtání mělkých děr v hliníku, ostatní vrtáky určené konkrétně pro hliník jsou vyvinuty speciálně. Vrtací operace se obvykle provádí za použití řezné kapaliny. Vrtané díry mohou být po vyvrtání příliš velké, zvláště u měkkých slitin mohou být mírně větší než průměr vrtáku. Jestliže jsou tolerance průměru vrtané díry příliš úzké, je doporučeno použít menší vrták a poté převrtat na požadovanou velikost [3].

#### 3.2.1 Geometrie břitu nástroje

Pro obrábění slitin hliníku je běžné použití speciálně vyvinutých řezných nástrojů právě pro Al a to především z důvodu tvoření nárůstku na břitu nástroje. Rychlé opotřebení břitu řezného nástroje a nekvalitní obrobená plocha jsou způsobeny právě sklonem k nalepování hliníku na čelo nástroje. K obrábění Al slitin potřebujeme ostrý pozitivní břit a speciálně pro zpracování hliníku dimenzované nástroje.

Při obrábění hliníkových slitin je obecným trendem volit **pozitivní geometrii** břitu nástroje, splňující požadavky pro dobrý odchod třísky z místa řezu. U soustružení nejlépe obrobitelných slitin hliníku se úhel čela pohybuje od 0 do 5° (slitiny 2011, 6020 a 6262) a pro slitiny výše zařazené do hodnocení obrobitelnosti B a C od 5 do 10° (slitiny 2024, 7075, 6061, 6082). S ještě více pozitivním úhlem čela může stoupat nežádoucí opotřebení nástroje [3]. Pozitivní geometrie je vhodná také při generování nízkých řezných sil, jež je projevem právě při obrábění hliníkových slitin.

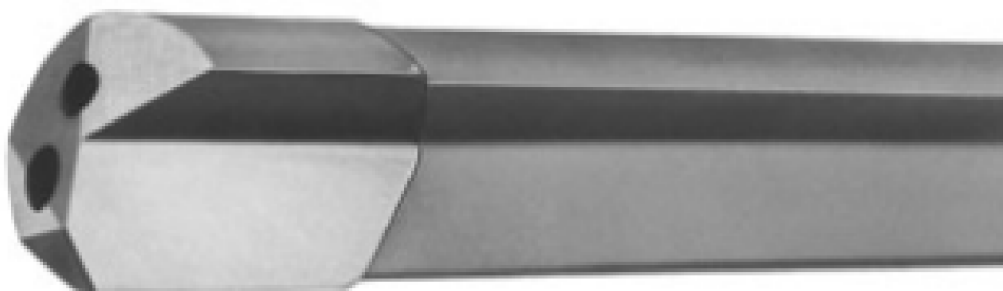


Doporučený úhel šroubovice univerzálních šroubovitých vrtáků při **vrtání** slitin hliníku se pohybuje v rozmezí 25 až 30°, pro aplikace při hlubokém vrtání se doporučuje vysoký úhel šroubovice v rozmezí 40 až 50°. Šroubovice by měla mít parabolický tvar, její povrch leštěný pro minimalizaci ucpávání třískami a tvoření nárůstku, a drážka by měla být symetrická opět k minimalizaci balení třísky. Vrcholový úhel vrtáku 118° při obrábění mělkých děr v hliníkových slitinách postačuje, při hlubokém vrtání je jeho velikost 130 až 140°, což při řezání produkuje užší třísku, která snadněji odchází z vrtané díry [3].

### 3.2.2 Materiály 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 teplotní vodivostí, sklonem k adhezi na břit většiny řezných materiálů a nízkou teplotou tavení (maximálně do cca 650 °C). Vlivem vysoké tepelné vodivosti se při obrábění hliníku odvádí značné množství tepla z místa řezu do obrobku a vysoká tepelná roztažnost 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 nástroje. 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  $\mu = 0,1$  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 [26].

Materiálu hlavice vrtáku použitého pro reálné obrábění K15 patří dle ozn. ČSN ISO 513 skupina nepovlakovaných SK s obsahem primárního WC (karbid wolframu), se složením WC (87-92) % + Co (4-12) % + (TaC.NbC). Skupina K je určena pro materiály tvořící krátkou drobnou třísku (neželezné kovy, šedé litiny a nekovové materiály). Řezné síly jsou přitom obvykle relativně nízké a převládá abrazivní a adhezní opotřebení [4].



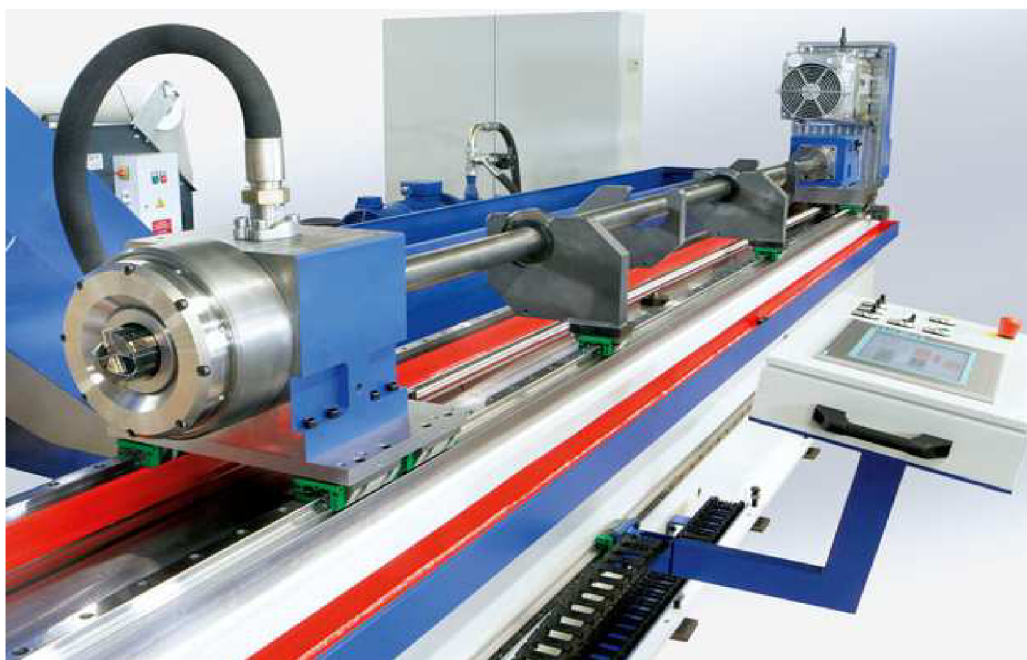
Obr. 3.1: Dělový vrták s pájenou vrtací hlavicí [7].

## 4 CHARAKTERISTIKA HLUBOKÉHO VRTÁNÍ

Mezi obrábění hlubokých otvorů do plného materiálu nebo předpracovaných děr patří zpravidla délky vrtání, které se pohybují v rozsahu od  $5D$  až po  $100D$  a více. Pro tuto technologii obrábění se používají vrtáky dělové – hlavňové, ejektorové, BTA, STS atd., u děr malých průměrů i prodloužené šroubovitě vrtáky [8, 27].

Vrtání hlubokých děr je spojeno obecně s kombinovaným namáháním a zejména s namáháním na vzpěr. Pod pojmem hluboké vrtání se rozumí obrábění děr, u nichž je poměr vrtané délky a průměru vrtáku relativně velký. V technologické praxi se uvažuje pro takové vrtání do plného materiálu, kde poměr  $L/D > 4:1$  ( $L$  – hloubka díry,  $D$  – průměr díry), přičemž v praxi se dnes dosahuje poměrů  $L/D$  v rozmezí 300-500 [2, 8].

Abychom toto porovnání zevšeobecnil – při vrtání dlouhých děr, zvláště v odvětví leteckého průmyslu, jsou často kladeny vysoké nároky na kvalitu vrtání, tj. zvláště vysoké požadavky na jakost obrobeného povrchu a také na tolerance rozměrů a tvarů. Proto je v průběhu obrábění prioritním kritériem spolehlivost funkce nástroje pro vrtání hlubokých děr, zatímco u krátkých děr, které se vyskytují mnohem častěji, je ve snaze o dosažení vyššího stupně hospodárnosti při obrábění kladen větší důraz na objem odebraného materiálu. To znamená, že rozdíl mezi vrtáním krátkých a hlubokých děr se neomezuje pouze na poměr délky a průměru díry [8].



Obr. 4. Hlubokovrtací stroj s technologií BTA firmy TIBO.

### 4.1 Přehled způsobů vrtání hlubokých otvorů a nástroje

Technologie vrtání hlubokých otvorů je volena v zásadě dle vrtaného průměru otvoru.

Nástroje pro vrtání hlubokých děr ( $L/D > 4:1$ ) musí zaručit plynulý vrtací proces bez zpětného vyjždění a vyprazdňování třísek. Vyprazdňování třísek a zároveň chlazení

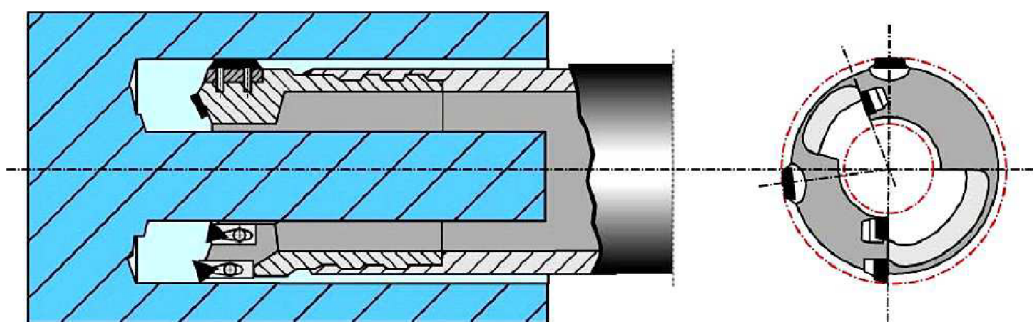
a mazání řezného procesu je vesměs zajišťováno přívodem vysokotlaké řezné kapaliny až k ostří nástroje.

**Spirálovité dělové vrtáky** jsou zvláštním případem nástrojů pro hluboké vrtání vyvinutých německou firmou Guehring. Jsou to monolitní vrtáky ze slinutého karbidu s konci povlakovanými TiAlN. Vrták je ve srovnání s klasickým šroubovitým vrtákem delší se speciálně konstruovanými drážkami pro odvod třísek. Dosahuje nižších strojních časů díky použití větších posuvů a řezné rychlosti. Vrtáky jsou vyráběny s vnitřním chlazením a v délkách viditelných na obr. 4.1 [29].



Obr. 4.1: Spirálové dělové vrtáky, vysoký úhel šroubovice [29].

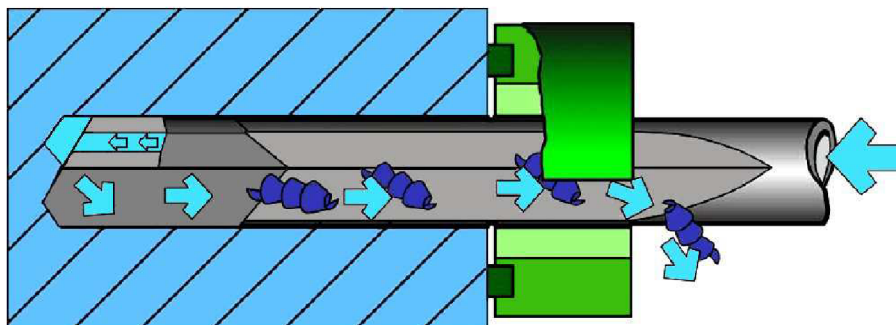
**Korunkové (trepanační) vrtáky** (obr. 4.2) jsou mnohabřitě nástroje používané pro vrtání průchozích děr na jádro. Mají široké rozmezí použití  $\varnothing$  55,00 až 197,99 mm. Vzhledem k omezenému prostoru pro odvod třísek je nutno věnovat velkou pozornost jejich rozdělení a tvarování. Mimo třísky vzniká vrtáním středová tyč [2, 27].



Obr. 4.2: Korunkový vrták [27].

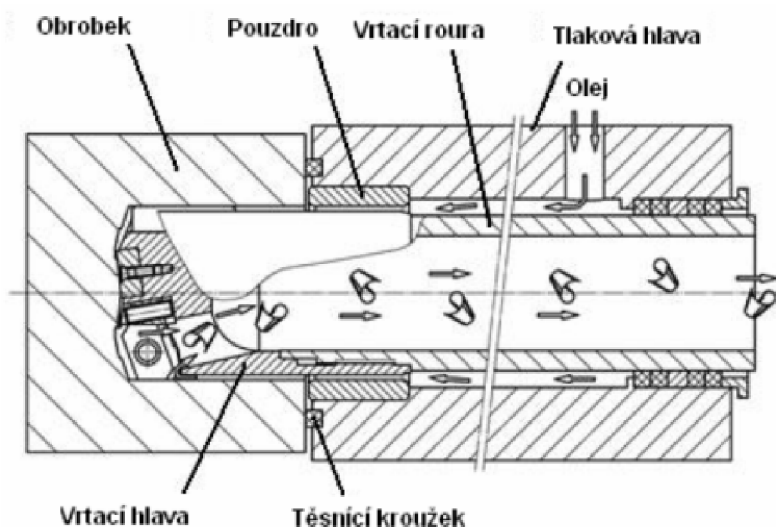
**Dělové - hlavňové vrtání** je vhodné pro menší průměry, použitelné i na přestavěných konvenčních strojích (soustruhy s dlouhým ložem) a obráběcích centrech, podmíněné vydatným chlazením nebo mazáním řeznými emulzemi nebo oleji (tlak 10 MPa, 100 l/min) a tvorbou malých částic třísky (posuv na otáčku je malý, v setinách mm). Dle [2] je nutné předvrtání pilotní díry konvenčním vrtáním do hloubky  $1,5xD$  a průměrem nepatrně větším (lícování  $m7/h5$ ), než je průměr dělového vrtáku, protože nástroj nemá symetrické ostří. Musí se dát pozor i při jeho zavádění do díry (bez rotace obrobku). Přívod kapaliny se realizuje vnitřkem trubky a třísky se vyplavují vnější „V“ drážkou v prostoru mezi stěnou drážky a povrchem vrtané díry, u větších průměrů to lze realizovat i naopak, čímž se chrání opracovaný povrch. Nástroj je dobře veden v díře pomocí vodiček a lze dosáhnout vrtané délky běžně 200 až 10 000 mm, výjimečně až 25 000 mm, ale volná délka nástroje bez podpěry by neměla přesáhnout  $40xD$ . Po obrábění nám vznikne nejen dobrý povrch otvoru, ale i minimální odchylka průměru. Řezná kapalina je pod velkým tlakem dopravena drážkami v těle nástroje až k břitům, kde tak odvádí teplo, snižuje tření a pomáhá odvádět

třísky drážkou ve vrtáku. Dělové vrtáky se vyrábí jednobřité i dvoubřité. Ve zvláštních případech se používají jednobřité vrtáky s výměnnými břity a výměnnými vodícími lištami [2, 27].



Obr. 4.3: Odvod třísky při vrtání dělovým vrtákem [27].

**Nástroje BTA** (Boring and Trepanning Association – obr. 4.4) a **nástroje STS** (Single Tube System) umožňují vrtat do plného materiálu, na jádro, nebo zvětšování předvrtaných otvorů. Tyto výkonné vrtací hlavice s jedním nebo více břity (pájenými nebo vyměnitelnými) jsou vhodné pro těžkoobrobitelné materiály – korozivzdorné oceli, materiály s heterogenní strukturou a zhoršenou lámavostí třísky, hloubky děr delší než 200 mm, velké série shodných vrtaných typorozměrů obrobků. K této technologii je zapotřebí speciální stroj i příslušenství, zvláště těsnění a výkonné chlazení. Vrtací hlavice se upínají pomocí čtyřchodého závitu k vrtací tyči a třísky se vyplavují vnitřkem trubky. Tlaková hlava vhání procesní kapalinu prostorem mezi vnějším nástrojem a vnitřkem díry. STS i DTS jsou výkonnější i spolehlivější ve srovnání s dělovým vrtáním. STS je ideální pro vrtání velmi hlubokých děr vzhledem ke své vyšší tuhosti ve srovnání s DTS (vnější trubka má menší tloušťku stěny z důvodu potřeby vnitřní trubky), lepším přívodem kapaliny (vnitřní trubka snižuje její světlost). Vrtací hlavice do plného materiálu jsou vyráběny až do průměru 180 mm, vrtací hlavice pro vrtání na jádro v rozsahu průměrů 120 až 300 mm [2, 27].



Obr. 4.4: Princip vrtání systémem BTA a STS [30].

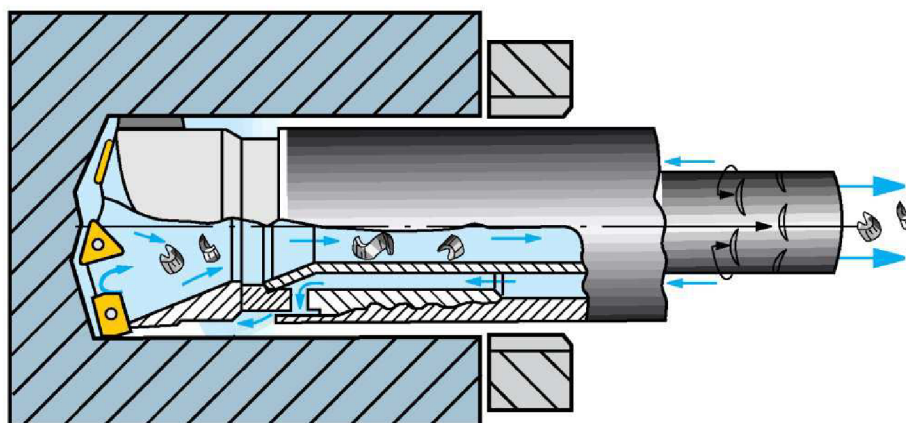
Další výhody tohoto systému jsou možnosti použití vyšší posuvové rychlosti, delší dosažitelné délky vrtání (běžně  $300 \times D$ ), větší sortiment vrtaných průměrů, lepší kvalita opracování ( $Ra\ 0,1\ \mu\text{m}$  je běžné), minimální náběhy a přeběhy, minimální chvění a vibrace, lepší výsledky u houževnatých a exotických materiálů, vyšší úběr materiálu, řezné oleje jsou optimalizované na tuto technologii [2].



Obr. 4.5: Nástroje pro vrtání systémem BTA [30].

**Ejektorové vrtáky** se skládají z ejektorové vrtací hlavy DTS, která je našroubována do vnější vrtací trubky, podobně jako systém BTA/STS. Systém dále neobsahuje zvláštní těsnění mezi obrobkem a vrtacím pouzdrům, ani tlakovou hlavu, řezná kapalina je přiváděna k břítům nástroje mezikružím mezi vnější a vnitřní trubkou. Přičemž její malé množství, odcházející štěrbinami zadní části vnitřní trubky, způsobuje tzv. Venturiho ejektorový efekt – prakticky odsávání třísek z místa řezu a jejich usměrněný odvod vnitřkem trubky, tudíž není potřeba tak velkých tlaků v řezné kapalině. Ejektorové vrtání se doporučuje všude tam, kde může nastat problém s těsněním (např. tvarové čelo obrobku nebo jeho necelistvost). Technologie je realizovatelná i na přestavěných konvenčních strojích (soustruzích a horizontálních vyvrtávačkách), což je její předností a doporučuje se taktéž zhotovení pilotní díry. Těmito vrtáky lze vrtat díry o průměru 18 až 250 mm, v délce menší než  $30 \times D$  [2].

Z ekonomických důvodů se doporučuje ejektorové vrtání pro méně kvalitní díry (tolerance díry je pro menší otvory méně než 0,01 mm, přímot díry 0,05 mm/1000 mm). U obou druhů nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami (BTA i DTS) je nutno dávat pozor na správnou montáž břitových destiček (středové mají označení C, obvodové P, mezilehlé M) [2].

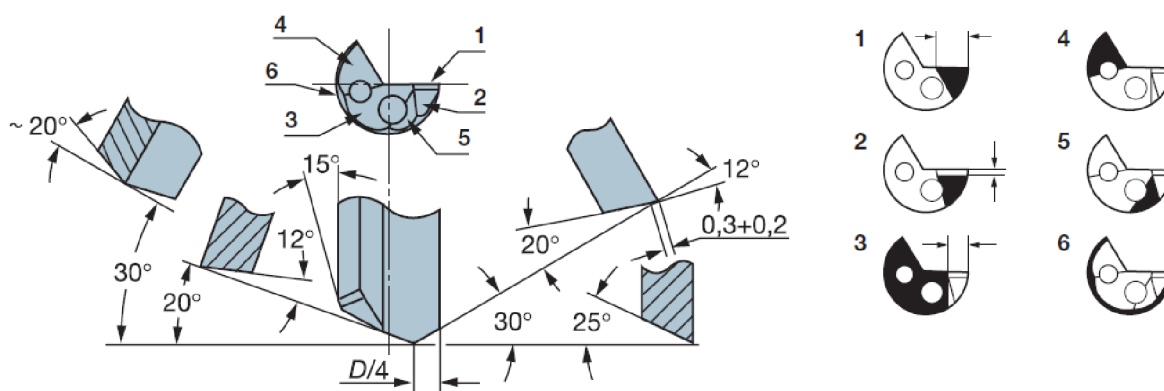


Obr. 4.6: Princip ejektorového vrtání [27].

### Nástroje s vnitřním přívodem řezné kapaliny a vnějším odvodem třísek:

Kromě šroubovitých a kopinatých vrtáků sem patří hlavně dělové a hlavňové vrtáky. Řezná část nástroje (z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu) je připájena na trubku nebo tyč potřebné délky. Někdy je řezná část tvořena pájenými břitovými destičkami, spolehlivé středění zajišťují vodítka, rovněž připájená k tělesu vrtáku. Řezná kapalina je přiváděna dírami v tělese vrtáku a zaručuje vyplavování vznikajících třísek (obr. 4.12). Pro vrtání pomocí dělových a hlavňových vrtáků se používají speciálně upravené soustruhy [27].

Špička břitu dělových vrtáků má být vyosena o  $\frac{1}{4} D$ . Její poloha závisí na úhlech nastavení ostří  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  a druhu obráběného materiálu.



Obr. 4.7: Standardní geometrie jednobřitých dělových vrtáků [34].

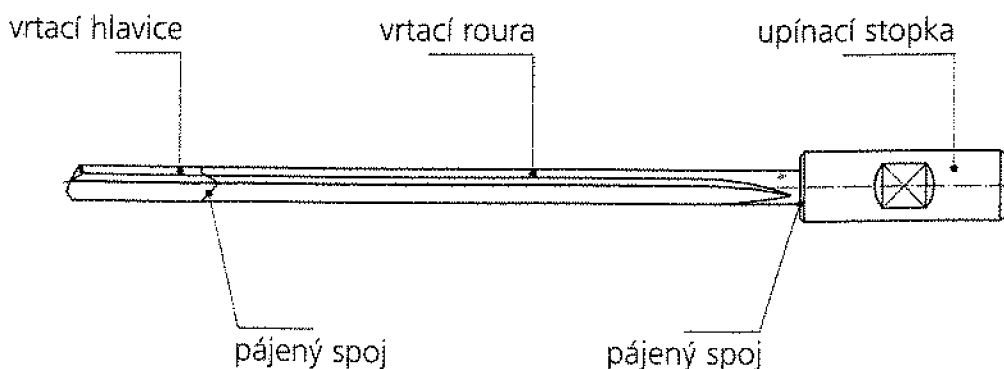
### Nástroje s vnějším přívodem řezné kapaliny a s vnitřním odvodem třísek:

O nástrojích systému BTA (STS), které jsou popsány výše je možno uvést v porovnání s dělovým vrtákem několik výhod:

- vrtací tyč má vhodnější tvar a větší plochu přířezu – je proto tužší a pevnější,
- trubkový tvar hlavy i vrtací tyče umožňuje jejich snadnou rozebíratelnost,
- odcházející třísky nepoškozují obrobenou plochu,
- je menší riziko ucpání třískami.

#### 4.1.1 Konstrukce dělového vrtáku

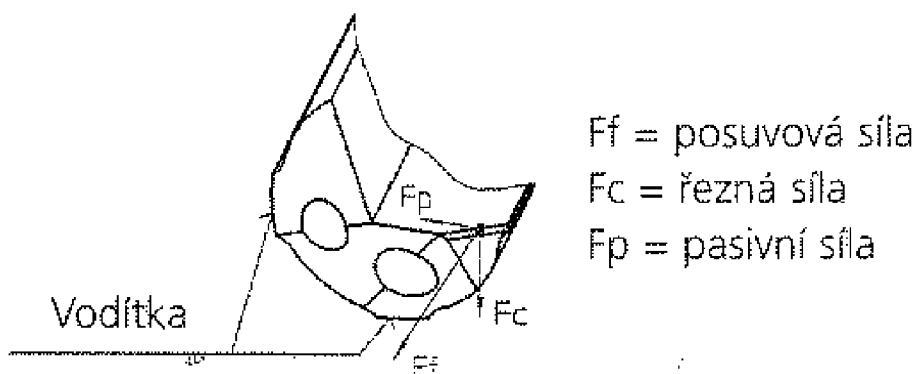
Konstrukce dělového vrtáku může být celokarbidová nebo s pájenou vrtací hlavicí (obr. 4.8). Právě nástroj s pájenou hlavicí ze slinutého karbidu je popsán dle katalogu firmy Botek, jejichž vrták je aplikován při obrábění dané součásti.



Obr. 4.8: Skladba vrtáku [7].

### a) Vrtací hlavice

Na hlavici dělového vrtáku jsou patrná **vodítka**, která jsou během vrtání v kontaktu s vrtaným materiálem. Řezná síla (obr. 4.9) tlačí vodítka vrtáku proti stěně vývrtnu tak silně, že mírně přetváří povrch a vzniká tak vysoká kvalita opracování typická pro vrtání jednobřítým vrtákem. Pro různé materiály a aplikace jsou k dispozici různé varianty uspořádání vodítek [7].



Obr. 4.9: Působící síly na břit (zanedbány síly na vodítkách) [7].

Řezná geometrie a její změna má přímý vliv na přesnost otvoru a povrch vývrtnu, tvorbu a odchod třísky, životnost nástroje, ale i na odchylku vývrtnu od ideální osy. **Geometrie ostření** je viditelná na obrázku 4.7 [7].

### b) Roura vrtáku

Standardně se používá zušlechťená **tvarová roura** s prolisovanou vynášecí drážkou ve tvaru V viditelná na obr. 5.3. Pouze převrtávací nástroje s odchodem třísky ve směru vrtání mají válcovou rouru. Poměr mezi silou stěny a největším průměrem roury nejvíce ovlivňuje torzní tuhost a průtok chladicího média, což rozhodující měrou ovlivňuje výkonnost a životnost nástroje. Vynášecí drážka je standardně provedena až k upínacímu pouzdru (stopce) [7].

### c) Upínací stopka

Dělový vrták je zpravidla dodáván včetně upínací části. **Stopka** přenáší kroucí moment ze stroje na nástroj [7].

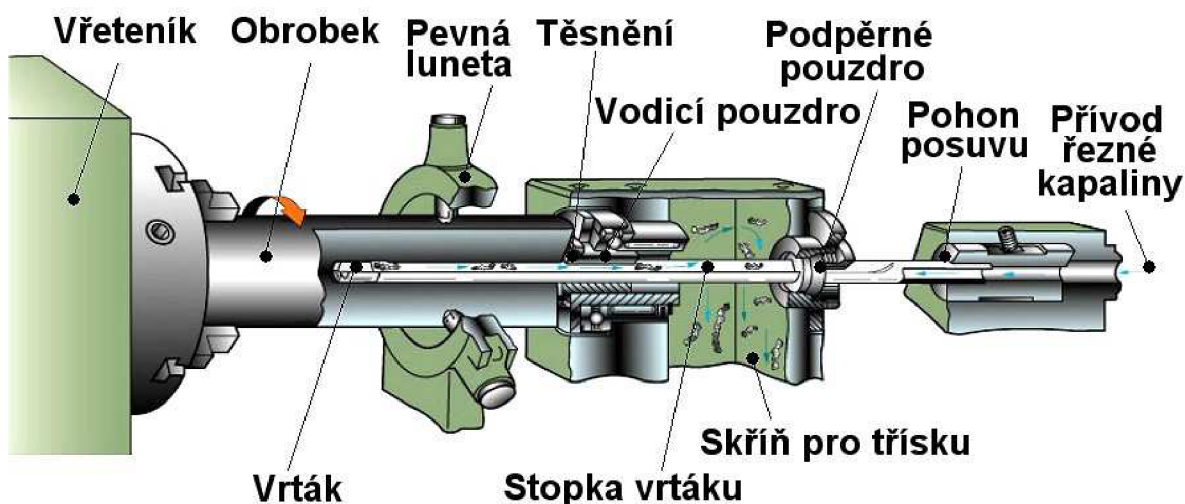


Obr. 4.11: Stopka dělového vrtáku.

## 4.2 Charakteristika hlubokého vrtání jednobřitým dělovým vrtákem

Charakteristickým rysem pro použití jednobřítých vrtáků je vedení chladicího a mazacího média vnitřním kanálem nástroje k místu řezu. Odtud pak spolu s třískami odchází vnějším prolisem tvaru V, tvořícím se stěnou vrtaného otvoru výstupní kanál. Bezproblémový výplach třísek je umožněn tehdy, když řezné médium, tj. vrtací olej nebo emulze (min 10 až 12% koncentrace s aditivy) má správný tlak a množství ve vztahu k vrtanému průměru [2, 7].

Vhodná vysokotlaká čerpadla pro použití jednobřítých vrtáků bývají již přímo zabudovaná do obráběcího stroje, nebo je lze instalovat mimo stroj jako samostatnou jednotku. Použití není omezeno jen na speciální hlubokovrtací stroje, ale můžete je s výhodou používat i na konvenčních nebo CNC obráběcích strojích [7].



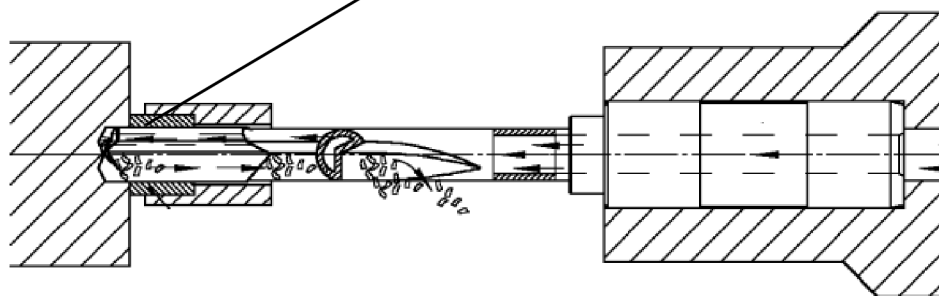
Obr. 4.12: Princip vrtání dělovým vrtákem [27].



Jednobřítý (dělový) vrták, jak z názvu vyplývá, má jeden břit bez vlastního osového vedení. Proto při pronikání do materiálu musí být veden buď vrtacím pouzdrem, nebo tzv. pilotním otvorem. Přesnost a kvalita vedení vrtáku při zavrtávání má přímý vliv na životnost vrtáku, kvalitu povrchu vývrtu a osovou přesnost vrtaného otvoru.

#### Zavedení vrtáku na začátku vrtání:

- a) S vrtacím pouzdrem (vrtací pouzdro)



Obr. 4.13: Zavedení vrtáku s vrtacím pouzdrem [7].

- b) S pilotním otvorem viz. Obr. 1.1

Maximální neopřená délka pro otvor  $\varnothing 20$  mm je cca  $40 \times D$ .

#### 4.2.1 Pracovní podmínky pro vrtání hlubokých děr

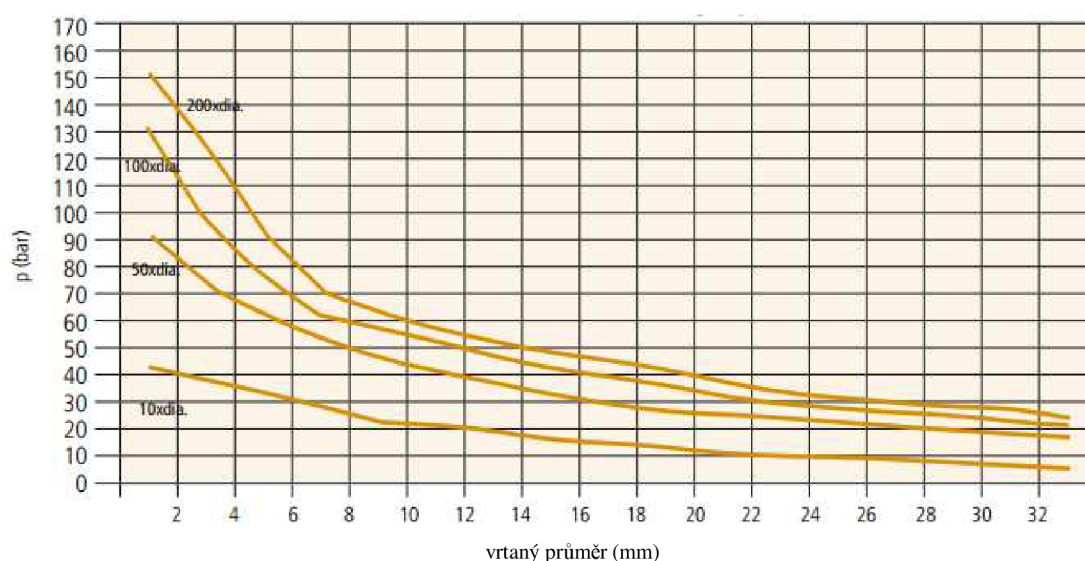
Při volbě rezných podmínek se nejprve řídíme správným tvarem třísky, pak výkonem stroje a jakostí povrchu. Řezná rychlost - podle druhu použitého rezného materiálu SK a materiálu obrobku. Posuv z doporučených rozsahů je nutno odzkoušet, silně spěchovaná tříška zvyšuje opotřebení. Tažená tříška není přípustná. Trvanlivost nástroje je vyjádřena v metrech vrtané délky.

Spolehlivé výsledky jsou podmíněné dostatečným množstvím a tlakem **řezné kapaliny**, která je vedle rezné rychlosti a velikosti posuvu třetím nejdůležitějším činitelem ovlivňujícím vlastní proces řezání.

Řezná kapalina musí zabezpečovat:

- chlazení rezné části nástroje,
- spolehlivý odvod třísek z vrtaného otvoru,
- zamezení vzniku nárůstku na rezné části nástroje, čímž se příznivě ovlivňuje drsnost vrtané díry,
- zmenšuje tření mezi nástroji a obrobkem a tím snižuje kroučící moment,
- tlumí chvění.

Spolehlivý odvod třísek z místa řezu je možný pouze při dopravení rezné kapaliny nástrojem na břit v dostatečném množství. Hodnoty tlaků chladicího média pro dělové vrtáky s pájenou hlavicí v závislosti na vrtaném průměru a vrtané hloubce jsou viditelné na následujícím grafu.



Obr. 4.14: Tlak chladicího média [7].

### Doporučené řezné podmínky pro hluboké vrtání slitin hliníku dělovým vrtákem s pájenou hlavicí:

Řezné podmínky, hlavně hodnoty posuvu se liší v závislosti na vrtném průměru a dle [7] jsou uvedeny pro vybrané průměry otvorů v následující tabulce pro vybrané materiály.

Tabulka 4. Doporučené hodnoty optimálních posuvů pro vrtání hliníkových slitin [7].

<b>Dělový vrták s pájenou hlavicí</b>				
Vybrané skupiny materiálů	konstrukční ocel neleg. a nízkoleg. automatová ocel ocel k zušlechťování cementační ocel nástrojová ocel ( $< 900 \text{ N/mm}^2$ ) „dobře obrobitelná“	nerezová ocel + ocelolitina (martenzitická/ feritická) 13-25% Cr „dobře obrobitelná“	hliník + hliníkové odlitky obsah Si $> 5\%$ „dobře obrobitelné“	hliník + hliníkové slitiny obsah Si $< 5\%$ „netvrzené“
Řezná rychlost (m/min)	70 - 100	40 - 80	80 - 160	100 - 300
Vrtný $\varnothing$ (mm)	Posuv (mm/ot) od - do			
5,0 - 5,99	0,0089 - 0,0295	0,0118 - 0,0222	0,0165 - 0,1717	0,0122 - 0,0324
10,0 - 11,99	0,023 - 0,063	0,026 - 0,053	0,042 - 0,396	0,026 - 0,075
14,0 - 15,99	0,032 - 0,090	0,038 - 0,077	0,063 - 0,560	0,035 - 0,111
20,0 - 23,99	0,051 - 0,130	0,068 - 0,119	0,094 - 0,754	0,053 - 0,167
28,0 - 31,99	0,070 - 0,211	0,100 - 0,168	0,126 - 0,989	0,070 - 0,234
Velikost řezné rychlosti a posuvu je závislá na délce nástroje, chladícím médiu, materiálu obrobku, ale také na stabilitě stroje a upnutí obrobku. Všechny uvedené hodnoty jsou pouze orientační.				

### 4.3 Rozbor sil působících na nástroj v procesu vrtání

Následující vztahy platí pro šroubovitý vrták.

Pro každý bod na ostří nástroje v závislosti na vzdálenosti od osy otáčení  $D_i$  [mm] a otáčkách nástroje  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] je jiná řezná rychlost  $v_{ci}$  dle následujícího vztahu:

$$v_{ci} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (4.1)$$

Maximální hodnoty dosahuje obvodová rychlost na vnějším průměru vrtáku a běžně se označuje jako řezná rychlost  $v_c$  (dle vztahu 4.2). Opět ať již jde o krátké či dlouhé (hluboké díry), proces řezání je totožný. Hlavní rozdíl mezi vrtáním krátkých a hlubokých děr se liší u každé řešené technologie, obecně je dán určitým poměrem  $L/D$ .

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (4.2)$$

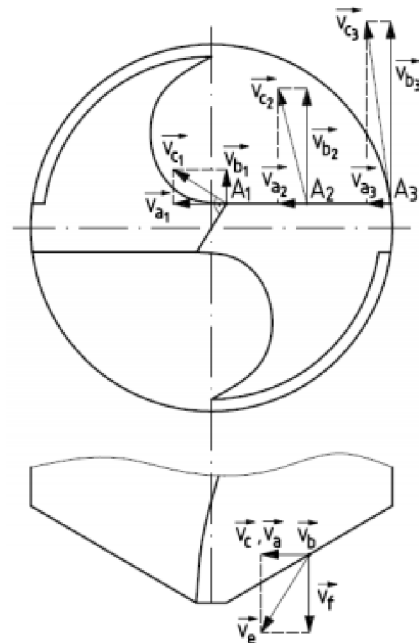
kde  $D$  [mm] je průměr nástroje.

Vedlejší řezný přímočarý pohyb je závislý na velikosti posuvu  $f$  [mm] a otáčkách nástroje  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] a označuje se jako posuvová rychlost  $v_f$  dle vztahu:

$$v_f = f \cdot n \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (4.3)$$

Hodnota rychlosti řezného pohybu  $v_e$  se určí na základě následujícího vztahu:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (4.4)$$



Obr. 4.15: Směry vektorů hlavního a vedlejšího pohybu při vrtání dvoubřitým šroubovitým vrtákem [5].

### 4.3.1 Analýza průřezu třísky

Jmenovitý průřez třísky určuje významnou měrou sílu vrtání. Pro průřez třísky (obr. 4.16) platí následující vztahy.

Jmenovitý průřez třísky  $A_D$ , odebíraný jedním břitem při vrtání do plného materiálu:

$$A_D = h_D \cdot b_D = a_p \cdot f_z \quad [mm^2]. \quad (4.5)$$

Jelikož nástroje na obrábění válcových děr mohou mít více než jeden břit, uvádí se také tzv. posuv na zub  $f_z$  [mm]:

$$f_z = \frac{f}{z} \quad [mm], \quad (4.6)$$

kde  $z$  [-] je počet zubů (břitů) nástroje a  $f$  [mm] je posuv na otáčku.

Jmenovitá tloušťka třísky odebíraná při odřezávání materiálu:

$$h_D = f_z \cdot \sin \kappa_r \quad [mm]. \quad (4.7)$$

Jmenovitá šířka třísky při vrtání do plného materiálu:

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [mm], \quad (4.8)$$

kde  $\kappa_r$  [°] je pracovní úhel nastavení hlavního ostří.

Šířka záběru ostří:

$$a_p = \frac{(D-d)}{2} \quad [mm], \quad (4.9)$$

kde  $d$  je hodnota průměru předvrtaného otvoru.

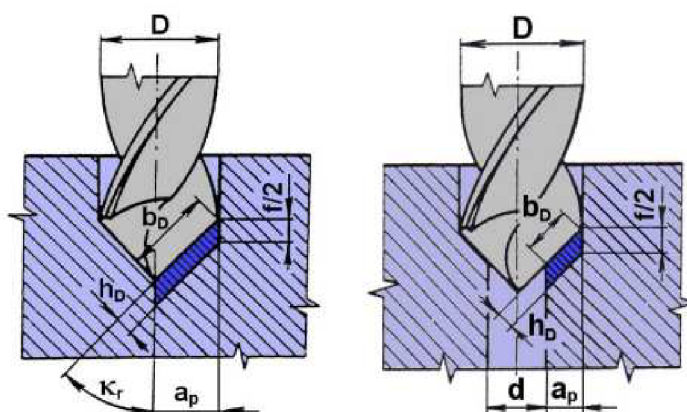
Pro vrtání do plného materiálu je šířka záběru ostří  $a_p=D/2$ , pro vrtání do předpracované díry  $a_p=(D-d)/2$ .

Jmenovitá šířka třísky při předpracované díře:

$$b_D = \frac{D-d}{2 \sin \kappa_r} \quad [mm]. \quad (4.10)$$

Tudíž průřez třísky při předvrtaném otvoru je určen následujícím vztahem:

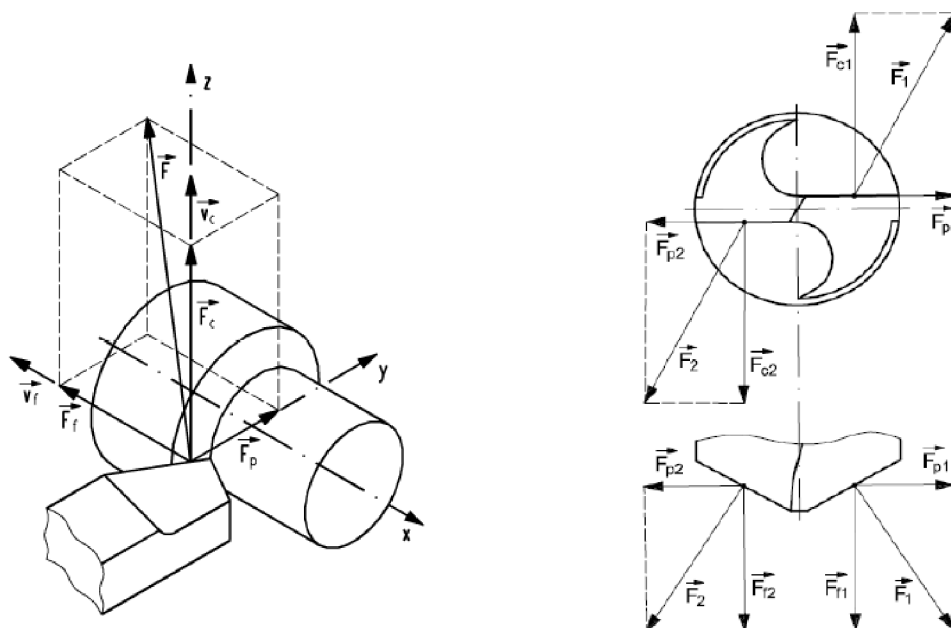
$$A_D = h_D \cdot b_D = \frac{(D-d)}{4} \cdot f \quad [mm^2]. \quad (4.11)$$



Obr. 4.16: Průřez třísky při vrtání dvoubřítým šroubovitým vrtákem [27].

#### 4.3.2 Řezné síly při vrtání, potřebný řezný moment a výkon řezání

Při vrtání šroubovitým vrtákem jsou řezné síly rozloženy na obou řezných hranách symetricky. Výsledné řezné síly působící na řeznou hranu  $F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2}$  je možno si představit koncentrované do bodů, ležících ve vzdálenosti  $D/4$  od podélné osy nástroje.



Obr. 4.17: Složky výsledné síly při soustružení vlevo a složky sil na šroubovitém vrtáku vpravo [5].

Pro výpočet řezné síly při vrtání je možné použít rovnici jako při soustružení s tím, že se použije tzv. faktor metody vrtání „ $f_B$ “, pro zohlednění vlivu na řeznou sílu, která je při vrtání vlivu jiná, jako při soustružení [9].

Řezná síla na zub při vrtání do plného materiálu [9]:

$$F_{c,z} = \frac{D}{2} \cdot f_z \cdot k_c \cdot f_B \quad [N]. \quad (4.12)$$

Řezná síla na zub při vrtání do předvrtaného otvoru:

$$F_{cz} = \frac{(D-d)}{2} \cdot f_z \cdot k_c \cdot f_B \quad [N], \quad (4.13)$$

kde  $D$  [mm] je průměr otvoru,  $d$  [mm] je předvrtaný (předlitý) průměr otvoru,  $f_z$  [mm/z] je posuv na zub,  $k_c$  [N/mm<sup>2</sup>] je měrný řezný odpor,  $f_B$  [-] je faktor metody vrtání a  $z$  [-] je počet zubů (břitů) nástroje.

Faktor metody vrtání do plna je  $f_B = 1$ , při zvětšování otvoru  $f_B = 0,95$  [9].

Na každém zubu šroubovitého vrtáku působí řezná síla  $F_{cz}$  na rameni  $D/4$ . Při zvětšování otvoru  $(D+d)/4$ .

Kroutící moment od vrtáku, při vrtání doplna je:

$$M_c = \frac{F_{cz} \cdot z \cdot \frac{D}{4}}{10^3} \quad [N \cdot m], \quad (4.14)$$

pro  $z = 2$ :

$$M_c = \frac{F_c \cdot D}{2 \cdot 10^3} \quad [N \cdot m]. \quad (4.15)$$

Řezný výkon vrtání  $P_c$  je možno určit z řezné síly a řezné rychlosti vrtání ze vztahu:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \quad [kW], \quad (4.16)$$

kde  $v_c$  [m/min] je řezná rychlost vrtání a  $F_c$  je celková řezná síla ( $F_c = F_{cz} \cdot z$ ) [N].

Celkový kroutící moment s uvážením třecího momentu [2]:

$$M_c + M_\mu = \frac{D \cdot f_n \cdot k_c \cdot a_p}{2 \cdot 10^3} \cdot \left( 1,17 - \frac{a_p}{D} \right) \quad [N \cdot m]. \quad (4.17)$$

Celkový kroutící moment s uvážením třecího momentu [2]:

$$P_c + P_\mu = \frac{D \cdot f_n \cdot k_c \cdot v_c}{240 \cdot 10^3} \cdot 1,34 \quad [N \cdot m]. \quad (4.18)$$

Vyjádření řezných sil a momentu je možno také použitím empirických vzorců podobných vzorcům pro výpočet řezných sil při soustružení.

Celková řezná síla:

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [N], \quad (4.19)$$

kde  $C_{F_c}$  [-] je konstanta, vyjadřující zejména vliv obráběného materiálu,  $x_{F_c}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku a  $y_{F_c}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.

Celková posuvová síla:

$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [N], \quad (4.20)$$

kde  $C_{Ff}$  [-] je konstanta, vyjadřující zejména vliv obráběného materiálu,  $x_{Ff}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv průměru vrtáku a  $y_{Ff}$  [-] je exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.

Hodnoty  $C_{Fc}$ ,  $C_{Ff}$ ,  $x_{Fc}$ ,  $x_{Ff}$ ,  $y_{Fc}$ ,  $y_{Ff}$  jsou určovány empiricky a lze je nalézt v odborné literatuře, popřípadě v katalogích a příručkách výrobců nástrojů.

Dalším způsobem jak určit řeznou sílu je z měrného řezného odporu obráběného materiálu. Měrný řezný odpor, nebo také měrná řezná síla, je definována jako síla ve směru hlavního řezného pohybu vztažená na jednotku průřezu třísky. Celková řezná síla je pak dána vztahem [5, 27, 31]:

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad [N], \quad (4.21)$$

kde  $k_c$  [MPa] je měrný řezný odpor materiálu.

Obdobně jako v předchozím vztahu lze i  $k_c$  nalézt v odborné literatuře, popřípadě v katalogích a příručkách výrobců nástrojů.

#### 4.3.3 Síly působící na jednobřítý dělový vrták

Jednobřítý dělový vrták zabírá při vrtání do plného materiálu dvěma řeznými hranami, kde se na každé hraně tvoří různé průřezy třísek a vznikají různě velké síly s rozdílnou vzdáleností od osy vrtáku. Tyto síly se koncentrují do bodů ve vzdálenosti  $D/8$ , resp.  $3D/8$  od osy (obr. 4.18) a platí:

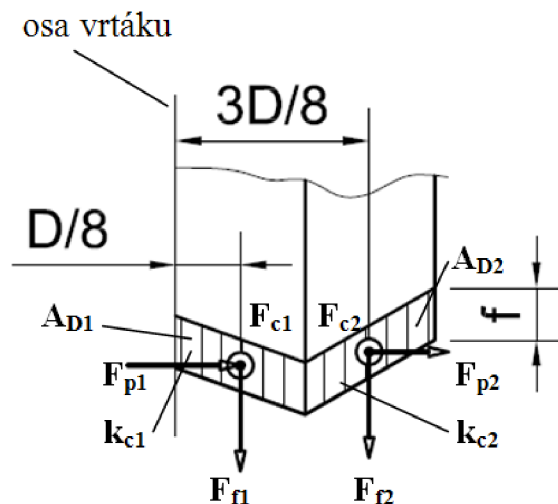
$$F_c = F_{c1} + F_{c2}, \quad (4.22)$$

$$F_f = F_{f1} + F_{f2}, \quad (4.23)$$

$$F_p = F_{p1} + F_{p2}, \quad (4.24)$$

$$F_{c1} = k_{c1} \cdot A_{D1}, \quad (4.25)$$

$$F_{c2} = k_{c2} \cdot A_{D2}, \quad (4.26)$$



Obr. 4.18: Síly na břitu.

Tyto rovnoběžné síly je možno sečíst a určit jejich výslednice vztažené k bodu na ose vrtání, proto bude následné odvození třecích sil na vodičkách počítáno právě s těmito výslednicemi viz. obr. 4.19.

Při vrtání jednobřítým nástrojem působí na nástroj síla  $F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2}$  související s překonáním řezného odporu a reakční radiální síly na vodítkách nástroje  $N_1$ ,  $N_2$  a jim odpovídající třecí síly  $T_1$  a  $T_2$  (obr. 4.19).

Tangenciální složka řezné síly  $F_c$  má směr hlavního řezného momentu a je zachycována vodítkem 1. Radiální složka  $F_p$  je zachycována vodítkem 2. Axiální složka  $F_f$  působí ve směru osy nástroje a je složkou posuvové síly.

Síly působící na jednobřítý dělový vrták jsou:

$$\sum M_i = 0: M - F_c \cdot \frac{D}{4} - (T_1 + T_2) \cdot \frac{D}{2} = 0, \quad (4.27)$$

$$\sum F_{zi} = 0: F_c - N_1 - T_2 = 0, \quad (4.28)$$

$$\sum F_{yi} = 0: -F_p - T_1 + N_2 = 0. \quad (4.29)$$

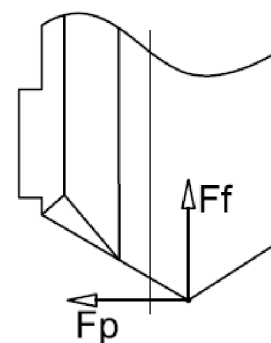
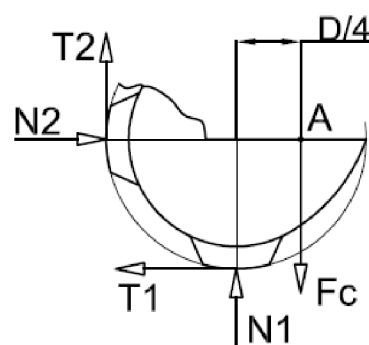
Normálové síly působící na vodítka lze vyjádřit:

$$N_1 = \frac{T_1}{\mu}, \quad N_2 = \frac{T_2}{\mu}, \quad (4.30, 4.31)$$

Dosazením za  $N_1$  a  $N_2$ :

$$F_z = \frac{T_1}{\mu} + T_2, \quad (4.32)$$

$$F_y = \frac{T_2}{\mu} - T_1, \quad (4.33)$$



Obr. 4.19: Složky sil působících na vrták.



Po provedení naznačené úpravy:

$$T_1 = F_c \cdot \mu - T_2 \cdot \mu, \quad (4.34)$$

dosazením  $T_1$  a sečtením obou rovnic dostaneme:

$$T_2 = \frac{F_c \cdot \mu^2 + F_p \cdot \mu}{(1 + \mu^2)}. \quad (4.35)$$

Dosazením  $T_2$  do rovnice:

$$T_1 = F_c \cdot \mu - T_2 \cdot \mu, \quad (4.36)$$

dostaneme:

$$T_1 = F_c \cdot \mu - \frac{F_c \cdot \mu^3 + F_p \cdot \mu^2}{1 + \mu^2} = \frac{F_c \cdot \mu - F_p \cdot \mu^2}{1 + \mu^2}. \quad (4.37)$$

Po dosazení  $T_1$  a  $T_2$  do rovnice momentové rovnováhy dostaneme:

$$M = \underbrace{F_c \cdot \frac{D}{4}}_{M_c} + \underbrace{\left( \frac{F_c \cdot \mu - F_p \cdot \mu^2}{1 + \mu^2} + \frac{F_c \cdot \mu^2 + F_p \cdot \mu}{1 + \mu^2} \right) \cdot \frac{D}{2}}_{M_\mu}, \quad (4.38)$$

kde  $\mu$  je koeficient tření vrtáku ve směru rotace.

Ze vzorce pro celkový moment je patrné, že výsledný moment působící na vrták v průběhu obrábění se skládá ze složky od kroutícího momentu  $M_c$ , jinak také řezného momentu ve tvaru dle vztahu (4.17) při počtu zubů  $z = 1$  a složky od třecího momentu  $M_\mu$ .

Potom je možno psát rovnici (4.17) pro výpočet výsledného momentu působícího na nástroj v řezu dle [2] s uvážením třecího momentu:

$$M_c + M_\mu = \frac{D \cdot f_n \cdot k_c \cdot a_p}{2 \cdot 10^3} \cdot \left( 1,17 - \frac{a_p}{D} \right) [N \cdot m].$$

Při vrtání hlubokých děr je kladen velký důraz na stabilitu procesu vrtání, proto jsou běžně používány **jisticí systémy** hlubokovrtacích strojů, které měří síly a momenty při vrtání a kontrolují stabilitu vrtání. Při porušení nástroje se řezné síly generované při obrábění skokově zvýší, díky těmto systémům dojde k zastavení vrtání a nedojde tak k ještě větším škodám vzniklých při nestandardním průběhu procesu. Tyto síly se výrazně promítají do opotřebení nástroje.

Proto musí být silám při obrábění věnována velká pozornost, zvláště při vrtání hlubokých otvorů.

#### 4.3.4 Jednotkový strojní čas pro vrtání

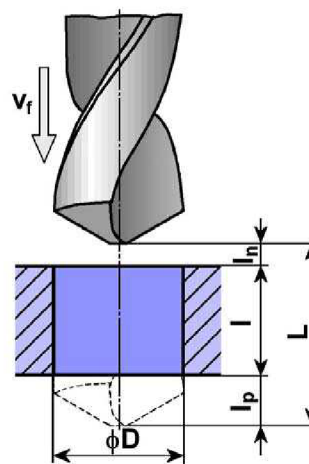
Pro určení jednotkového strojního času při vrtání platí stejné vztahy jako při soustružení či frézování:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} = \frac{l_n + l + l_p}{v_f} \quad [min], \quad (4.39)$$

$$l_n = \frac{D}{2 \cdot \operatorname{tg} \kappa_r} \quad [mm], \quad (4.40)$$

$$l_p = \frac{D}{2 \cdot \operatorname{tg} \kappa_r} + (0,5 \div 2) \quad [mm], \quad (4.41)$$

kde  $L$  [mm] je celková dráha vrtáku,  $l$  [mm] je hloubka vrtaného otvoru,  $l_n$  [mm] je dráha náběhu vrtáku,  $l_p$  [mm] je dráha přeběhu vrtáku (při neprůchozím otvoru  $l_p = 0$ ),  $f$  [mm] je velikost posuvu  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou otáčky nástroje.



Obr. 4.20: Dráha vrtáku [27].

#### 4.4 Způsoby namáhání a výpočtů vrtáků

Šroubovitý vrták je svým způsobem práce namáhán převážně kombinací krutu a vzpěru. Pokud jde o hlubokovací nástroje s vysokým poměrem  $L/D$ , ty musejí být kontrolovány především na vzpěr.

##### 4.4.1 Kontrola na krut

Vlivem řezného momentu  $M_c$  vzniká ve vrtáku smykové napětí  $\tau_k$  o velikosti [32]:

$$\tau_k = \frac{M_c}{W_k} < \tau_{dov} \quad [MPa], \quad (4.42)$$

kde  $W_k$  [ $\text{mm}^3$ ] je modul průřezu v krutu nejslabším (kritickém) místě.

##### 4.4.2 Kontrola na vzpěr vrtací tyče

U dlouhých štíhlých nástrojů (primárně u hlubokovrtacích), u kterých je nebezpečí ztráty stability, se provádí také kontrola na vzpěr. Následující postup ukazuje kontrolu vzpěrné stability prutů namáhaných tlakem [32].

Pro výpočet vzpěrné stability je použita Eulerova teorie vzpěru přímého prutu, konkrétně 3. typ uložení, s jedním koncem vetknutým a druhým vedeným vodítky vrtáku (posuvná vazba).

Nejprve se stanoví štiřlostní poměr [32]:

$$\lambda_p = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{J_{min}}{S}}} \quad [-], \quad (4.43)$$

kde  $L_0[mm]$  je tzv. vzpěrná délka vyložení vrtacího nástroje,  $J_{min} [mm^4]$  je minimální kvadratický moment průřezu,  $S [mm^2]$  je plocha průřezu tyče.

Dále se určí mezní štiřlostní poměr [32]:

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_u}} \quad [-], \quad (4.44)$$

kde  $E [MPa]$  je Youngův modul pružnosti materiálu nástroje v tahu,  $\sigma_u [MPa]$  napětí na mezi úměrnosti materiálu nástroje.

Je-li:  $\lambda_p < 0,6\lambda_m$ , jde o případ namáhání prostým tlakem a vzpěrnou stabilitu není potřeba kontrolovat,

je-li:  $0,6\lambda_m < \lambda_p < \lambda_m$ , je dovolená osová síla dána vztahem:

$$F_D = \frac{S}{k_k} (3,1 - 0,0114\lambda_p) \quad [N], \quad (4.45)$$

kde  $k_k[-]$  je koeficient bezpečnosti (volí se 2,5 až 3,5).

Posuvová síla  $F_f$  pak nesmí překročit dovolenou osovou sílu  $F_D$ .

Je-li:  $\lambda_p \geq \lambda_m$ , dojde pro  $F_f \geq F_{kr}$  ke ztrátě vzpěrné stability.  $F_{kr}$  je kritická síla dána Eulerovým vztahem:

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{L_0^2} \quad [N], \quad (4.46)$$

Hodnota dovolené síly:

$$F_D = \frac{F_{kr}}{k_k} \quad [N], \quad (4.47)$$

kde součinitel bezpečnosti se volí  $k_k \geq 3 - 5$ .

#### 4.5 Hlubokovrtací stroje a zařízení

Vzhledem k hojnému používání technologie výroby hlubokých otvorů jsou kladeny zvýšené požadavky na výkon, tuhost konstrukce hlubokovrtacích strojů a odolnost vůči chvění. Pro zabezpečení trvanlivosti nástroje musí být dodržena především rovinnost vedení lože s osou vřetena, sousost nástroje s vřetenem stroje a samozřejmě i speciální požadavky na posuvový systém a chladicí zařízení.

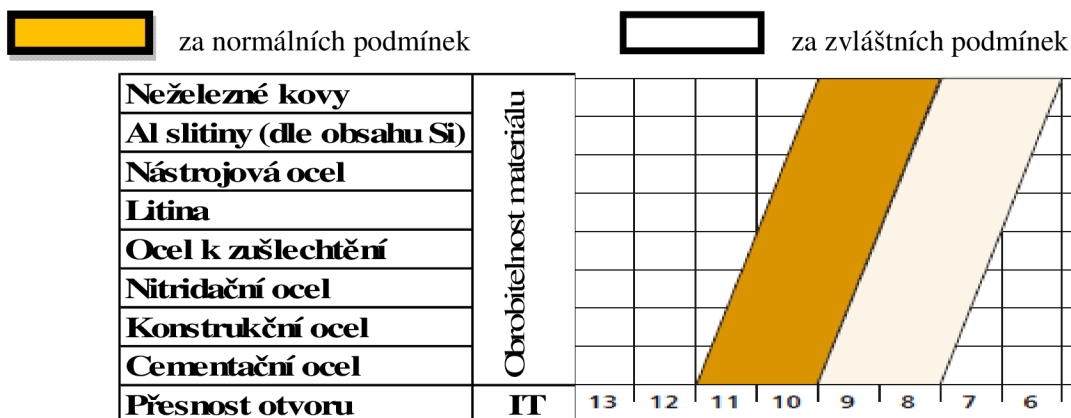


Obr. 4.21 Hlubokovrtací stroj TIBO 535.

Stroje mohou pracovat ve třech základních provedeních:

- rotující obrobek – nástroj v klidu,
- stojící obrobek – rotující nástroj,
- rotující obrobek – rotující nástroj,

přičemž rotující obrobek – rotující nástroj a stojící vrtací pouzdro je z hlediska přesnosti otvoru (obr. 4.22) nejvýhodnější.



Obr. 4.22: Dosažitelné tolerance vývrtu s dělovými vrtáky [7].

Odchylka od osy vývrtu je pozitivně ovlivněna přesným vedením vrtáku při zavrtání, zejména je kladen důraz na:

- přesnost průměru vrtacího pouzdra nebo pilotního otvoru.

Zásadní podmínkou pro hlubokovrací stroje je rovněž vybavenost **chladicím systémem**. Pro volbu množství kapaliny při vrtání celokarbidovým vrtákem do plna se používá empirický vztah [2]:

$$Q_{SKC} = 3 \cdot D \quad [l \cdot \text{min}^{-1}]. \quad (4.48)$$

Dalším ze zásadních zařízení hlubokovrtacích strojů je **filtrační systém**. V zásadě se používají dva filtrační systémy:

- magnetický filtr,
- pásový papírový filtr.

#### 4.5.1 Řezné kapaliny

Hlavní funkcí rezné kapaliny je účinný odvod tepla z místa řezání dokonalým chlazením nebo mazáním zmenšit jak vnitřní, tak i vnější tření. Existují i prostředky konzistentní, jako jsou tuky, nebo pevné, jako jsou prášková maziva. Tyto sice snižují tření, ale neumožňují intenzivní odvod tepla z místa řezu. Při obrábění se tyto prostředky uplatňují pouze ojediněle, např. při řezání závitů nebo při některých speciálních obráběcích operacích.

Vedle chladicího a mazacího účinku mají chladicí kapaliny i funkci čistící. Navíc nesmí způsobovat korozi strojů nebo obrobků a musí být zdravotně nezávadné. Dále se také požaduje, aby rezné kapaliny byly snadno likvidovatelné a ekologicky nezávadné.

Volba rezné kapaliny se posuzuje podle [31]:

- mechanismu tvoření třísky,
- vlastností obráběného materiálu,
- vlastností použitého nástrojového materiálu,
- požadavku na jakost opracování součásti.

Za ztížených rezných podmínek jako tomu je u hlubokého vrtání se musí chladit či mazat neustále, je tím zaručen i bezproblémový odchod třísek z místa řezu. Jednou z hlavních příčin poškození rezného nástroje je teplo. Teplo totiž ovlivňuje jeho trvanlivost a pevnost. To se projeví opotřebením nástroje na obou jeho funkčních plochách, tj. na čele a na hřbetě (obr. 4.23). Proto rezné prostředí ovlivňuje proces opotřebením nástroje.

Významnou funkcí rezné kapaliny je její vliv na jakost obrobené plochy. Rezná kapalina ovlivňuje jak rozměrovou a tvarovou přesnost, tak drsnost povrchu. Přívod rezné kapaliny způsobuje, že se mění objem plasticky deformované oblasti, odstraní se tvoření nárůstku na čele nástroje, což se projeví i na výsledné drsnosti povrchu.

Z hlediska technologického a provozního je třeba uvést další požadavky na tyto kapaliny. Jedná se o tyto požadavky:

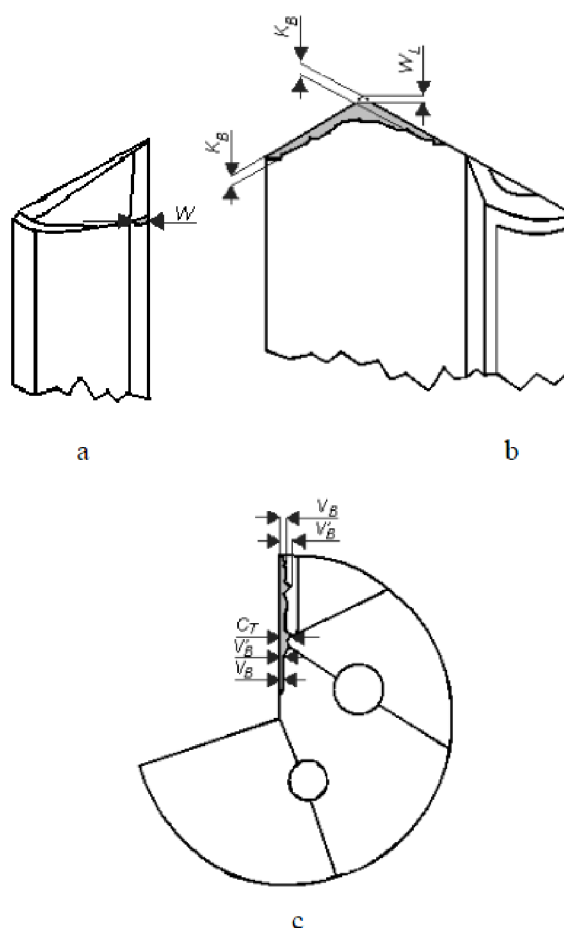
- chladicí účinek,
- mazací účinek,
- čistící účinek,
- provozní stálost,
- ochranný účinek,
- zdravotní nezávadnost.

Řezné kapaliny se obecně rozdělují do dvou hlavních skupin podle účinku na proces řezání, tj. kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem a používají se oba typy. Různé metody obrábění mohou vyžadovat různé typy řezných kapalin.

Typy řezných kapalin pro obrábění slitin hliníku [3]:

- Vodní emulze minerálních olejů.
- Řezné oleje. Minerální, živočišné nebo rostlinné.
- Sloučeniny olejů – minerální olej a živočišný nebo rostlinný olej.
- Chemické sloučeniny na bázi vody.
- Parafín nebo alkohol.
- Vosk nebo mix vosku a tuku (lůj).

Pro obrábění hliníkových slitin vrtáním jsou nejvhodnější a používají se řezné kapaliny vodních emulzí minerálních olejů, řezné oleje, chemické sloučeniny na bázi vody a parafín nebo alkohol [3].



Obr. 4.23 Různé typy opotřebení dělového vrtáku (a) vnější roh, (b) V drážka, (c) horní část špičky vrtáku [35].

## 5 ANALÝZA VÝROBY

### 5.1 Frentech Aerospace s.r.o.

Brněnská firma Frentech Aerospace s.r.o. byla založena v roce 1994 pod názvem Frencken Brno s.r.o. s cílem stát se kvalifikovaným a konkurence schopným dodavatelem v oboru přesné mechaniky, lékařské techniky, mikroelektroniky a speciálních přístrojů. Od roku 1997 se datuje spolupráce v oboru Aerospace, kdy byla uskutečněna první dodávka dílů do leteckého průmyslu.

Od počátku se firma zaměřila na kusovou až malosériovou výrobu přesných strojních a mechanických součástí na CNC strojích. Dnes tvoří asi 70% obratu firmy výroba pro letecký průmysl, zbytek produkce tvoří náročné díly pro medicínskou, měřicí, radarovou a laserovou techniku a kosmický průmysl. Za zmínku stojí spolupráce na projektech ESO (European Organization for Astronomical Research In the Southern Hemisphere) a ESA (European Space Agency). Firma je držitelem certifikátu ISO 9001:2008, AS 9100 – B, ISO 14001:2004 a QSF-A.

Tab. 5. Strojní park Frentech Aerospace, CNC soustruhy a soustružnická centra zdroj [33].

STROJ	VÝROBCE	POČET OS	POČET STROJŮ	PRACOVNÍ ROZSAH [mm]
Apha	HERISON	2	2	Ø 3 - 150
SQT 10	MAZAK	3	1	Ø 5 - 125
QTN 100	MAZAK	3	1	Ø 5 - 125
SQT 200	MAZAK	4	1	Ø 20 - 250
STAR VNC 20C	STAR	4	1	Ø 1 - 20
STAR SV 32	STAR	9	1	Ø 0,1 - 32
INTEGREX 100	MAZAK	5	1	Ø 20 - 125
INTEGREX 200	MAZAK	4+1	1	Ø 30 - 250

Tab. 5.1 Strojní park Frentech Aerospace, CNC frézovací centra [33].

STROJ	VÝROBCE	POČET OS	POČET STROJŮ	PRACOVNÍ ROZSAH [mm]
FJV 20	MAZAK	3	1	300X250X150
MCFV 100	TAJMAC	3	2	800X600X200
MCFV 1060	TAJMAC	3	1	1000X600X200
MCFV 1680	TAJMAC	3	1	1600x800x400
H400N	MAZAK	4	1	350X350X200
HCN 400-II	MAZAK	4	1	400x400x250
FH580	MAZAK	4	1	500X400X300
VARIAXIS 630	MAZAK	5	2	650X500X200
PICOMAX 90	FEHLMANN	5	1	200X200X200
PICOMAX 95	FEHLMANN	5	1	300X300X200

Nově je do strojového parku zařazen i hlubokovrtací stroj od firmy Tibo.

### 5.1.1 Horizontální stroj pro vrtání hlubokých otvorů

Jako novinku ve strojovém vybavení firmy je na obr. 4.20 možno vidět repasovaný horizontální hlubokovrtací stroj TIBO 535. Ten je určen pouze pro operace hlubokého vrtání otvorů za použití technologie dělového vrtání.



Obr. 5: Vrtací tyč nástroje uložená v lunetách.

Stroj je vybaven digitálním pohonem pro osu Z a vřeteno, řídicím systémem Siemens a digitálním odměřováním pro osy X a Y. Ve stroji je zabudováno vysokotlaké zařízení pro výplach třísek. Procesní médium je pouze řezný olej. Maximální průtok oleje je 90 l/min. Při tomto průtoku je tlak přibližně 40 barů, při průtoku kolem 20 l/min je tlak přibližně 80 až 100 barů. Tyto parametry jsou pro výrobu daného dílce dostatečné.

Tab. 5.2 Technická data obráběcího stroje TIBO 535.

Vrtání do plna	Ø4 - Ø33 mm
Jmenovitá hloubka vrtání	1000 mm
Pohon vřetena	10 kW
Rozsah otáček	500 - 5000 ot/min
Pracovní posuv	35 - 320 mm/min
Rychloposuv	3500 mm/min
Objem nádrže	1000 l
Vysokotlaké čerpadlo	90 l/min
Pojezdy	X: 520 mm
	Y: 370 mm
Lunety	až 3

Čištění řezného oleje probíhá přes hrubé síto (obr. 5.1), kde se zachycují třísky větších (viditelných) rozměrů, z řezného oleje je zde odstraněno téměř 100% viditelných třísek a přes pásový papírový filtr (obr. 5.2), kde se z řezného oleje přečistí ují mikročástice materiálu odřezaného ve formě třísek.





Obr. 5.1: Hrubé čištění třísek z řezného oleje.



Obr. 5.2: Filtrování řezného oleje přes pásový papírový filtr.

Součástí stroje jsou ložiska (umístěná v lunetách). Podle průměrů použitých vrtáků také plastová pouzdra (obr. 5.3). Dodavatelská firma doporučila po nejlepších zkušenostech nástroje od firmy Botek. Stroj je vybaven technologií pro použití dělových nebo hlavňových vrtáků, technologie BTA ne. A jako řezný olej je zvolen produkt CASTROL VARIOCUT D 734.



Obr. 5.3: Ložisko s plastovým pouzdrem, drážka ve tvaru V v těle vrtáku.

## 5.2 Optimalizace výrobních nákladů a časů

Technologie obrábění zaznamenává v posledních desetiletích rychlý vývoj. Jsou kladeny vysoké požadavky na obráběcí stroje, nástroje, měřidla a technické materiály, toto zvláště v leteckém průmyslu. Společně s rostoucími požadavky na přesnost a rychlost obrábění (zkracování výrobních časů) a efektivnost výroby rostou také požadavky na snížení celkových výrobních nákladů. Většinou lze výrobu konkrétní součásti realizovat více způsoby, je však nutností vyrábět metodami nejefektivnějšími, tzn. dosáhnout za daných podmínek nejlepšího možného výsledku. Také je kladen důraz na vysokou efektivitu a maximální využití nejmodernějších strojů a nástrojů a jejich schopností. Při současných požadavcích na rychlost výroby a rozmanitost nových dílů se většinou na zavedení výroby nových dílů spěchá, a proto nebývá prvně zvolená technologie tou nejvhodnější z pohledu efektivnosti. Proto se na základě zkušeností výroby posléze technologie upravuje, což může to být způsobeno, jak snižováním nákladů na výrobu a zkrácení výrobních časů, tak na základě rozšiřování strojového vybavení, jelikož v jistých případech musí podnik nedisponující všemi technologiemi na obrobění součásti a případně nízké návratnosti investice do strojového vybavení využít kooperace.

Při optimalizaci obrábění je nutno zvolit takové technologie a strategie, aby celý proces, který obsahuje hlavně náklady na nástroje, stroj a časy obrábění, byl co nejvyváženější a uspořil co nejvíce nákladů. Nutností je přihlídnout také na velikost výrobní dávky (kusová, malosériová nebo hromadná výroba), protože s rostoucí dávkou rostou i požadavky na optimalizaci nákladů, ale hlavně na produktivitu. Optimalizace obrábění z pohledu zkrácování strojních časů je totiž spojená se zvýšením opotřebením nástrojů, čímž sice klesají náklady na strojní práci, ale zároveň rostou náklady na nástroje, proto je nutné zvolit především kompromis řešení a docílit tím snížení nákladů. Cílem optimalizace tedy je zvolit ty nejvhodnější parametry pracovního procesu (zahrnuje  $v_c$ ,  $a_p$ ,  $v_f$  atd.) a docílit tak co největších výhod z pohledu ekonomického.

Obrábění hliníkových slitin je vzhledem k jejich vlastnostem proti ostatním obráběným materiálům příznivé. Díky vlastnostem hliníkových slitin je obecně možno dosáhnout nejvyšších přípustných rychlostí řezání, vynikajícího obrobeného povrchu – drsnosti povrchu, nízkých řezných sil – tudíž nižší energetické náročnosti obrábění a vynikající životnosti nástroje. Díky použití relativně vysokých řezných parametrů vedou vyjmenované faktory ke snížení strojních časů, což směřuje ke snižování nákladů na obrábění. Moderní CNC stroje s vysokou tuhostí a dosahování vysokých parametrů při řezání jsou velice nákladné, a proto je nutností zhodnotit vhodnost těchto zařízení pro zvolenou aplikaci (aplikace), náklady na provoz a hodinovou sazbu se totiž významně podílejí na ekonomickém zhodnocení.

### 5.2.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů

Název kritérium minimálních výrobních nákladů jakožto druhu optimalizace napovídá, že snahou je minimalizovat náklady spojené s obráběním se zaměřením na co nejvyšší hospodárnost daného procesu. Jedná se o základní aplikované optimalizační kritérium používané ve strojírenské technologii, pokud není předmětem optimalizace jiné kritérium, např. kritérium maximální výrobnosti. Snahou tohoto kritéria je snížení výrobního času a nákladů na jednici a je ovlivňováno celou řadou parametrů. Jedná se zejména o pořizovací náklady stroje, náklady na nástroje a jejich ostření nebo vyměnitelné břitové destičky, držáky nástrojů, mzdy výrobních dělníků, režijních nákladů podniku atd.

Mezi těmito vstupními daty je zapotřebí nalézt co největší rovnováhu, pro co nejvyšší ekonomickou hospodárnost výrobního procesu. Se zvyšujícími se řeznými podmínkami a snižováním nákladů na strojní časy totiž rostou náklady na nástroje a držáky [5, 31].

Celkové operační výrobní náklady na jednici:

$$N_C = N_S + N_N + N_V \quad [\text{Kč}], \quad (5.1)$$

kde  $N_S$  jsou náklady na strojní čas,  $N_N$  jsou náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden obráběný kus,  $N_V$  jsou náklady na vedlejší práci.

Náklady na strojní čas:

$$N_S = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} \quad [\text{Kč}], \quad (5.2)$$

kde  $t_{AS}$  je jednotkový strojní čas (automatický strojní) viz. kap. 4.3.3,  $N_{sm}$  je minutová sazba stroje,  $N_{sn}$  je hodinová sazba stroje.

$$N_{sm} = \frac{N_{sn}}{60} \quad [\text{Kč}], \quad (5.3)$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu vztaženo na 1 obráběcí kus lze vyjádřit:

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} = \frac{N_T}{\frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}}} = \frac{N_T \cdot \lambda \cdot t_{AS}}{T} = \frac{N_T \cdot \lambda \cdot L}{T \cdot v_f} = \left( \frac{N_T \cdot \lambda \cdot (l_n + l + l_p)}{T \cdot n \cdot f} \right) \quad [\text{Kč}], \quad (5.4)$$

kde  $N_T$  jsou náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost břítu,  $Q_T$  je počet obroběných kusů jedním břitem,  $T$  je trvanlivost břítu,  $\lambda \cdot t_{AS}$  je čistý čas řezání, kdy je nůž v záběru a fyzicky se tvoří třísky,  $L$  je celková délka obráběné plochy,  $l_n$  je nájezd nástroje,  $l_p$  je přejezd nástroje,  $v_f$  je rychlost posuvu,  $n$  jsou otáčky stroje,  $f$  posuv řezného nástroje.

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} \quad [\text{Kč}]. \quad (5.5)$$

Náklady na nástroj s VBD a jeho výměnu:

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} \quad [\text{Kč}], \quad (5.6)$$

kde  $N_1$  je cena nástroje,  $n_B$  je počet břitů,  $N_2$  je cena držáku,  $z$  je životnost držáku.

Náklady na nástroj s pájeným břitem a jeho výměnu:

$$N_T = N_1 + N_2 \quad [\text{Kč}], \quad (5.7)$$

kde  $N_1$  je cena nástroje,  $N_2$  je cena za ostření a povlakování nástroje za dobu jeho životnosti.

Počet obrobených kusů během trvanlivosti břitu lze vypočítat podle vztahu:

$$Q_T = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}} \quad [\text{ks}], \quad (5.8)$$

Náklady na vedlejší práce:

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} = t_{AV} \cdot N_{Vm} \quad [\text{Kč}], \quad (5.9)$$

$$D_V = M \cdot \left(1 + \frac{R}{100}\right) \quad [\text{Kč} \cdot \text{min}^{-1}], \quad (5.10)$$

$$N_{Vm} = \frac{D_V}{60} \quad [\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}], \quad (5.11)$$

kde  $D_V$  je hodinová sazba vedlejší práce,  $t_{AV}$  je čas vedlejší práce,  $N_{Vm}$  je minutová sazba vedlejší práce,  $M$  mzdový tarif dělníka pro vedlejší práce,  $R$  je režije dílny pro vedlejší práce.

Zjednodušeně lze náklady na obrábění vztahované k jednomu kusu vypočítat:

$$N_C = t_{AS} \cdot \frac{N_{sm}}{60} + \frac{N_T}{Q_T} \quad [\text{Kč}]. \quad (5.12)$$

Pro proces optimalizace ze širšího pohledu dle [5] existuje řada dalších fyzikálních, technologických a ekonomických omezení, která zahrnují například:

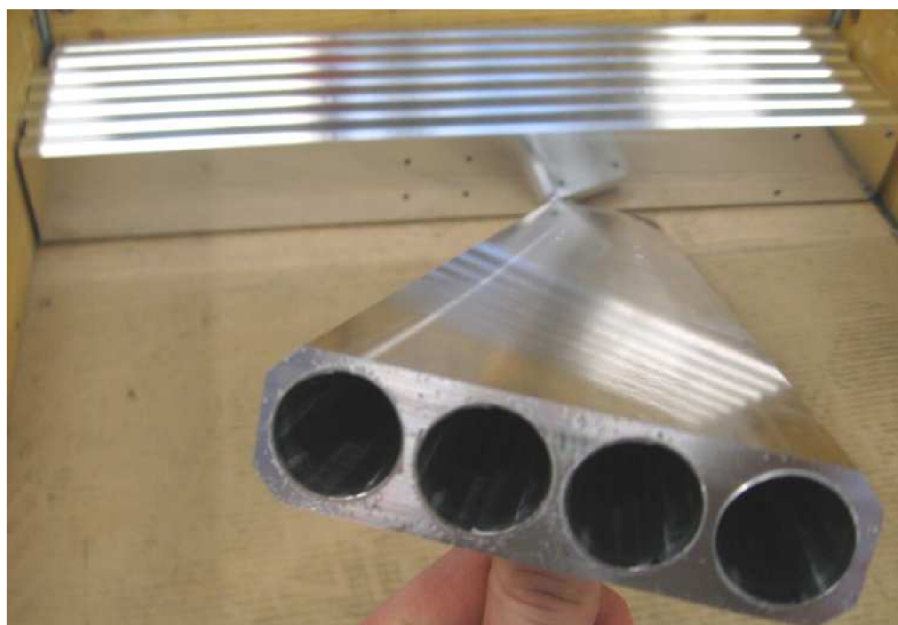
- a) Řezivost nástroje a způsob její kvantifikace,
- b) Vliv rezných podmínek na silovou a energetickou náročnost obrábění,
- c) Tuhost a únosnost nástroje, odolnost proti kombinovanému namáhání,
- d) Rozsah použitelných rezných rychlostí, posuvů,
- e) Druh utvařeče třísek,
- f) Příkon a tuhost stroje, jeho rozsahy otáček, posuvů,
- g) Požadavky na kvalitu povrchu – drsnost povrchu, zbytková napjatost.

### 5.3 Původní metoda výroby

Součást, kterou se budeme dále zabývat je vyráběna pro letecký průmysl. Dílec je do výsledného tvaru v tolerancích předepsaných na výkrese v příloze 1 přiveden třískovým obráběním, konkrétně technologií frézování a hlavně již výše popsaným hlubokým vrtáním. Pokud jde o hluboké otvory, nejsou na výkrese předepsány nějak zvlášť vysoké požadavky na geometrickou nebo rozměrovou přesnost ani na jakost povrchu, a tomu budou přizpůsobeny i řezné podmínky vrtání. Součást je navržena z hliníkové slitiny EN AW 7075, a přestože není známo její přesné použití, je možno uvažovat nad důvody použití do konstrukce letadel: nejspíše kvůli své pevnosti, schopnosti odolávat korozi pod napětím a měrné hmotnosti slitiny. Tato slitina je obecně konstruktéry velmi využívána.

Výroba dané součásti ve firmě Frentech Aerospace s.r.o. se pravidelně s proměnnou délkou vrtaných otvorů dle příslušné výkresové dokumentace opakuje, při průměrné výrobní dávce 8 kusů. Přičemž celková roční produkce se pohybuje okolo 25 kusů. Při původním procesu výroby součásti bylo slabé místo ve výrobním toku možno identifikovat ve strojovém vybavení dílny, která nebyla vybavena systémem pro vrtání hlubokých otvorů. Proto se nejprve frézováním předhruboval tvar, součást se poté kooperovala u externího dodavatele pro vyvrtání hlubokých otvorů a po zhotovení otvorů se následně přes kalibrické trny složitě najížděla pro dokončovací obrábění opět CNC frézováním. Tato metoda zajišťovala výrobu bez zvýšené zmetkovitosti, nicméně byla náročná z pohledu časového, technologického i náročností na plánování výroby a zvýšených nákladů.

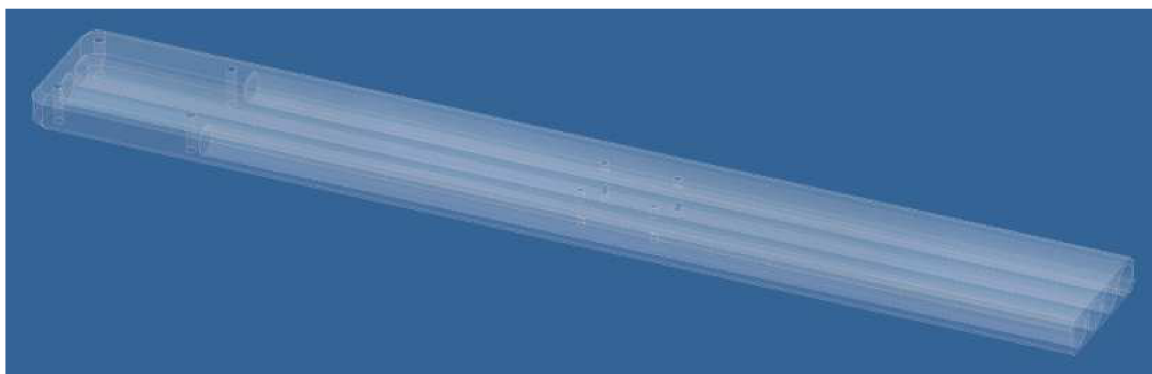
Z důvodu opakovatelnosti a časové náročnosti výroby této součásti i jí podobných se vedení firmy přiklonilo k rozšíření strojového parku a zakoupilo hlubokovrtací stroj pro vrtání hlubokých otvorů technologií dělového vrtání. Poznatky uvedené v této práci tedy budou aplikovány na tuto technologii a umožnění co nejproduktivnějšího průběhu.



Obr. 5.4: Hlubokovrtaný dílec z hliníkové slitiny.

### 5.3.1 Technická dokumentace

Příslušná výkresová dokumentace je přiložena (příloha 1) v podobě, jak byla předložena zákazníkem pro výrobu. Na výkrese nehleďte popisové pole, které bylo odstraněno z důvodu utajení a dodržení smluvních závazků firmy. Na výkresové dokumentaci lze nalézt kompletní kóty pro přesnou definici tvaru dílce, nicméně výkres je pouze informativní a slouží hlavně pro komunikaci mezi firmami. Úplná definice tvaru a rozměrů je zřejmá z 3D modelu zasláného jako závaznou dokumentaci pro výrobu společně s výkresem, což je v současnosti pro letecký i např. automobilový průmysl typické. Tato informace je uvedena na výkrese jako „Complete definition of geometry in the 3D model“.



Obr. 5.5: 3D model součásti (Inventor).

### 5.3.2 Postup výroby

Ve firmě Frentech Aerospace s.r.o. je využíván systém Exact Globe, který přiřazuje číselné označení jednotlivých zakázek, teprve poté je zpracován výrobní příkaz – technologický postup.

Následuje stručný popis výroby součásti:

1. Označení revize:

- neustálý vývoj dílů v leteckém průmyslu často znamená změnu specifikací vyráběné součásti, proto je nutné před zahájením výroby zkontrolovat aktuálnost revize výkresové dokumentace a případně změnit technologický postup nebo CNC programy.

2. Vstupní kontrola polotovaru:

- vstupní kontrola je zahrnuta do režijních nákladů firmy. Pro propuštění polotovaru do výroby musí projít vstupní kontrolou.

3. Frézování – hrubování:

- probíhá na 3-osém vertikálním frézovacím centru CNC ZPS MCFV 100,
- součást je upnuta, po obvodě nahrubována spřídavkem 1 mm, díry o průměru 6,6H7 hotově.

4. Výstupní (mezioperační) kontrola polotovaru:
  - Výstupní kontrola probíhá na vybraných kusech z celé série, stoprocentní kontrola se provádí pouze při prvním kusů při použití CNC operací.
5. Kooperace => vstupní (mezioperační) kontrola:
  - součásti po kooperaci projdou opět vstupní kontrolou před zahájením dokončovacích operací, stoprocentní kontrola.
6. Frézování – dokončování:
  - přes kalibrované kolíky jsou najety nulové body (velká časová náročnost, vysoké požadavky na obsluhu stroje),
  - dokončení vnějšího tvaru a otvorů průměru 5,1H7, použitý stroj CNC ZPS MCFV 100.
7. Zámečnick:
  - odjehlení protínajících se ploch a celkově celé součásti, očištění součásti a vyfoukání hlubokých děr stlačeným vzduchem.
8. Výstupní kontrola hotového dílce:
  - opět stoprocentní kontrola prvního kusu, ostatní namátkově dle předepsaného počtu.
9. Balení, expedice:
  - hlavní část balení je moderní identifikace dílců pomocí čipů pro snadnou identifikovatelnost při předání a montáži.

Tab. 5.3 Původní technologický postup výroby součásti

<b>TECHNOLOGICKÝ POSTUP</b>				
Letecký díl				
<b>Číslo operace</b>	<b>Pracoviště</b>	<b>t<sub>AV</sub> [min]</b>	<b>t<sub>AS</sub> [min]</b>	<b>Popis</b>
10	REV		0	Vstupní kontrola materiálu
20	MCFV100	90	30	Příprava frézovacího centra MCFV100; úhlovat na 27x96x714 v tol.+/-0,1mm. Rovinnost základny 0,2mm max.; kontrola prvního kusu
30	KONT		0	Mezioperační kontrola
40	KOOP			Vrtat otvory pr.20 (4x); Pozor polotovary mají rozměry 27x96x714 +/-0,1mm; otvory umístit do středu dílu
50	KONT		0	Mezioperační kontrola

60	MCFV100	90	42	Příprava frézovacího centra MCFV100; frézovat hotově tvar, vrtat a protočit otvory, vycházet z vyrobených otvorů pr.20; kontrola prvního kusu
70	ZAM	20	8	Příprava zámečnick; celkově odjehlit, pečlivě vyčistit a vyfoukat stlačeným vzduchem hluboké díry
80	KONT		0	Konečná kontrola
90	BAL		0	Balení a identifikace dílů

#### 5.4 Zavedená metoda výroby

Po zakoupení hlubokovrtacího stroje TIBO 535 bylo nutné přepracovat postup výroby a technologický postup. Upravený technologický postup snížil počet operací a kvůli sloučení dvou operací frézováním se musel vytvořit nový CNC program pro frézování. Tato operace byla přesunuta na stroj MCFV 1060 a dílec je nyní hotově ofrézován v jediné operaci, po které následuje hluboké vrtání.

##### 5.4.1 Postup výroby

Stručný popis výroby součásti popsaný v bodě 5.3.2 se příliš neliší od změněného postupu, proto současný postup nebude popisovat úkony a pracoviště již popsané. Začíná se a pokračuje:

1. Označení revize.
2. Vstupní kontrola polotovaru.
3. Frézování tvaru součásti hotově:
  - probíhá na 3-osém vertikálním frézovacím centru CNC ZPS MCFV 1060,
  - součást je upnuta a obrebena ze všech stran stejným úběrem hotově, jsou zhotoveny i všechny otvory kromě čtyř hlubokých  $\varnothing 20$  mm.
4. **Odpadá** mezioperační kontrola před kooperací.
5. **Odpadá** kooperace i vstupní (mezioperační) kontrola po kooperaci a následuje vrtání hlubokých otvorů.
6. Hluboké vrtání:
  - probíhá na horizontálním hlubokovrtacím stroji TIBO 535,
  - součást je upnuta a poté vrtána technologií dělového vrtání jako poslední operace, vrtány jsou díry  $\varnothing 20$  mm do délky 595/700 mm.
7. Zámečnick.
8. Výstupní kontrola hotového dílce.
9. Balení, expedice.



Tab. 5.4 Současný technologický postup výroby součásti

<b>TECHNOLOGICKÝ POSTUP</b>				
Letecký díl				
Číslo operace	Pracoviště	$t_{AV}$ [min]	$t_{AS}$ [min]	Popis
10	REV		0	Vstupní kontrola materiálu
20	MCFV1060	120	35	Příprava frézovacího centra MCFV1060; frézovat hotově tvar, vrtat stružit 4xpr.6,6H7, otvory pr.5,1H7; kontrola prvního kusu
30	TIBO 535	90	80	Příprava hluboké vrtání; Vrtat 4xpr.20; Otáčky $n=1592/\text{min}$ , posuv $f=85\text{mm}/\text{min}$ , tlak oleje 25 barů, počet lunet: 1
40	ZAM	20	8	Příprava zámečník; celkově odjehlit, pečlivě vyčistit a vyfoukat stlačeným vzduchem hluboké díry
50	KONT		0	Konečná kontrola
60	BAL		0	Balení a identifikace dílů

Před zahájením obrábění bylo ověřeno, že obráběcí stroj splňuje požadavky pro bezpečné hluboké vrtání, a že maximální vyložená délka vrtáku nepřekračuje doporučení výrobce nástroje, tudíž nedojde ke ztrátě vzpěrné stability.

Volba řezných podmínek vychází z doporučených hodnot výrobce nástroje a jsou zvoleny s ohledem na požadavky přesnosti otvoru (drsnot povrchu, geometrické a tvarové úchytky), viz. tabulka 5.5.

Tab. 5.5 Zvolené řezné podmínky

Otáčky nástroje <b>n</b>	1 592 ot/min
Posuv nástroje <b>f</b>	85 mm/min
Tlak oleje <b>p</b>	25 bar
Počet lunet	1

Na základě zvolených řezných parametrů jsou níže uvedeny odhady velikostí řezné síly a kroutícího momentu generovaných při obrábění dané slitiny hliníku jednobřitým dělovým vrtákem o průměru 20 mm. Pro výpočet byly použity vztahy 4.5, 4.14 a 4.21. Měrný řezný odpor  $k_c = 700 \text{ N}/\text{mm}^2$  je zvolen dle [25] vzhledem k poměrně velké tloušťce třísky.

$$F_c = k_c \cdot (A_{D1} + A_{D2}) = k_c \cdot \left( f \cdot \frac{D}{4} + f \cdot \frac{D}{4} \right) = \mathbf{385 \text{ N}}$$

$$M_c = \frac{F_c \cdot D}{4 \cdot 10^3} = 1,925 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

## 5.5 Kalkulace úspory

### 5.5.1 Kalkulace nákladů současné metody hlubokého vrtání

Náklady původní technologie hlubokého vrtání dílce vyráběného ve firmě Frentech Aerospace s.r.o. jsou vlastně náklady pořizovacími, jelikož výroba hlubokých otvorů na tomto dílci byly vlastně nakupované. Cena kooperace byla 2600 Kč/ks. V ceně je zahrnuta pouze cena obrábění, nejsou v ní zahrnuty režijní náklady na mezioperační výstupní a vstupní kontrolu a dopravu mezi firmami.

Celkové operační náklady na jednici:

$$N_c = 2600 \text{ Kč}.$$

### 5.5.2 Kalkulace nákladů inovované metody hlubokého vrtání

Náklady na vrtání hlubokých otvorů na obráběcím stroji TIBO 535 vycházejí ze vztahů 5.2 a 5.8z kapitoly 5.4.1:

Tab. 5.6 Vstupní data pro kalkulaci nákladů hlubokého vrtání.

Jednotkový strojní čas $t_{AS}$	80 min
Čas vedlejší práce $t_{AV}$	90 min
Hodinová sazba stroje $N_{sn}$	1 100 Kč
Hodinová sazba vedlejší práce $D_V$	1 100 Kč

$$N_S = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = 1\,467 \text{ Kč},$$

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60} = 1\,650 \text{ Kč}.$$

Hodinová sazba pracoviště zahrnuje přímé náklady na procesní kapalinu, údržbu stroje, mzdu operátora a veškeré vedlejší práce. Proto je hodnota kalkulované hodinové sazby stroje a hodinové sazby vedlejší práce totožná. Ceny byly dodány firmou Frentech Aerospace s.r.o.

### 5.5.3 Kalkulace nákladů inovované metody na nástroje

Kalkulace vychází z použití vztahu 5.6 z kapitoly 5.4.1.

Náklady na nástroj s pájeným břitem a jeho výměnu:

$$N_T = N_1 + N_2 = 7\,600 \text{ Kč}.$$

Tab. 5.7 Vstupní data pro kalkulaci nákladů nástroje hlubokého vrtání.

Cena nástroje N1	5 200 Kč
Cena nástroje za ostření po dobu jeho životnosti	2 400 Kč
Trvanlivost nástroje	8 000 min
Cena jednoho ostření	80 Kč
Počet možných přeastření	40

Náklady na nástroj a jeho výměnu vztaženo na 1 obráběcí kus lze vyjádřit:

$$N_N = \frac{N_T}{\lambda \cdot \tau_{AS}} = 304 \text{ Kč}.$$

Náklady na hluboké vrtání leteckého dílu inovovanou metodou je kalkulován podle vztahu 5.1 z kapitoly 5.4.1:

$$N_{C1} = N_S + N_N + N_V = 3\,421 \text{ Kč}.$$

Skutečnost, že vedlejší čas na přípravu pracoviště je spočteno na celou výrobní dávku, je nutné ji rozpočítat na jednotlivé kusy výrobní dávky. V případě výroby leteckého dílu je průměrná velikost výrobní dávky 8 kusů.

$$N_{Ce} = \frac{n \cdot (N_S + N_N) + N_V}{n} = 1\,978 \text{ Kč}.$$

Tudíž náklady na hluboké vrtání čtyř otvorů v leteckém dílu inovovanou technologií jsou 1 987 Kč/ks.

## 6 TECHNOLOGICKO - EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ

Do technologicko-ekonomického srovnání je zahrnuta pouze úspora při hlubokém vrtání. Další úspory vznikly nejen zrušením mezioperačních kontrol, ale i zkrácením, jak přípravného času ze 180 minut na 120 minut, tak strojního času z původních 72 minut na současných 35 min, což uvedenou úsporu ještě zvýší.

Celková úspora nákladů  $N_C$  na výrobu 1 kusu součásti po inovované technologii:

$$2600 - 1978 = \mathbf{622 \text{ Kč/ks}}$$

Celková roční úspora nákladů  $N_{C/rok}$  při výrobě 25 kusů leteckého dílu:

$$622 \text{ Kč} \times 25 = \mathbf{15\,550 \text{ Kč}}$$

Mezi další výhody patří: možnost přijímání dalších zakázek hlubokého vrtání, úspora režijních nákladů na mezioperační kontroly, nezapočítaná úspora při předchozím frézování, zkrácení dodacího času a celkové lepší využití výrobní kapacity firmy Frentech Aerospace s.r.o.

## ZÁVĚRY

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat komplexní studii hlubokého vrtání leteckého dílu z vysokopevné slitiny hliníku. K objasnění dané problematiky bylo využito dostupných zdrojů a literatury, společně s praktickými zkušenostmi pracovníků firmy Frentech Aerospace s.r.o.

V úvodu byla zaměřena na nezbytnou studii hliníku a jeho slitin, speciálně slitiny EN AW 7075, pro lepší porozumění problematice obrábění těchto materiálů. Před návrhem řezných podmínek hlubokého vrtání pro reálné obrábění a přepracování výrobního postupu, byl vysvětlen rozdíl mezi obecně známým vrtáním mělkých otvorů šroubovitým vrtákem a vrtáním hlubokých děr. Byly uvedeny základní způsoby vrtání hlubokých otvorů s detailnějším zaměřením na dělové vrtání, skladbu těchto nástrojů a odvození řezných sil při obrábění nevyváženým jednobřítým nástrojem. Po rozboru dané problematiky bylo cílem porovnat původní výrobní metodu s využitím kooperace a inovovanou metodu se zaměřením na hlubokovrtací operaci na obráběcím stroji TIBO 535.

Navrhnutá technologie vychází z parametrů daného obráběcího stroje a výsledného obrobku. Jako obráběcí nástroj byl zvolen dělový vrták s pájenou hlavicí z jemnozrnného slinutého karbidu určeného pro obrábění hliníkových slitin.

Výsledné řezné parametry a technologie byly ověřeny a nyní jsou úspěšně používány v praxi. Při porovnání dvou výrobních technologií bylo zjištěno, že zde navržená technologie vede ke snížení výrobních nákladů, které jsou vyčísleny při průměrné výrobní dávce 25 kusů ročně na 15 550 Kč. Tato úspora je stanovena pouze pro operaci vrtání a nejsou v ní zahrnuty další vzniklé úspory při zkrácení doby předchozího frézování a zrušení mezioperačních kontrol, nemluvě o zkrácení celkového času při výrobě tohoto dílce.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LEEP H.R. and ELDRIDGET W. Effects of Cutting Conditions and Drilling of Aluminum 380. JMEPEG (1992) ASM International, pp.797-800.
2. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
3. Machining Aluminium. In: [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: [http://www.sapagroup.com/pages/522511/Answer%20Book/05\\_Machining.pdf](http://www.sapagroup.com/pages/522511/Answer%20Book/05_Machining.pdf)
4. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
5. FOREJT, Milan a M. PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
6. MICHNA, Š., I. LUKÁČ a V. OČENÁŠEK. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.
7. BOTEK PRAZISIONSBOHRTECHNIK GMBH. *Jednobřité dělové vrtáky: Katalog*. 2009
8. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, c1997, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 91-972-2994-6.
9. MAJERÍK, J. a J. ŠANDORA. *Nové progresívne nástroje a metódy technológie obrábania*. 2011, s. 127-131.
10. Bauxit. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bauxit>.
11. Ústav materiálových věd a inženýrství. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-letni-semestr>.
12. Hliník. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>.
13. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu]*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 118 s. ISBN 978-80-01-04212-0.
14. Podíl konstrukčních materiálů Al. In: [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.izmiraerospace.com/presentations/3\\_KARL\\_HEINZ\\_RENDIGS.pdf](http://www.izmiraerospace.com/presentations/3_KARL_HEINZ_RENDIGS.pdf).
15. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
16. Rozdělení slitin Al dle Al-X. In: [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_slevarenstvi/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_slevarenstvi/teorie.htm).
17. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
18. Hliník a jeho slitiny. In: [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.benjamin.ic.cz/hlinik\\_slitiny.pdf](http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf).
19. SEDLÁČEK, Vladimír. *Únava hliníkových a titanových slitin*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1989, 351 s. ISBN 80-030-0180-3.

20. Aluminum 7075. In: [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075t6>.
21. PRZECZEK, J., *Nové slitiny hliníku v konstrukci letadel*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.
22. JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
23. Označování Al a jeho slitin [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.generalweld.cz/cz/standards.php?id=7>.
24. Označování Al a jeho slitin [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.techportal.cz/1/1/evropske-oznaceni-tvarenych-druhu-hliniku-jeho-slitin-a-stavu-techto-technickyh-materialu-cid33868/>.
25. Opotřebení břitu. [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/>
26. Nástrojové materiály Al. [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>
27. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění 2* [online]. Brno [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf). VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
28. Hlubokovrtací stroje TIBO. [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.tibo.com/the-company.html>
29. GUEHRING S.R.O. *Exklusive line*. 1. Vyd., 2009. 11 s. 115 958/0838-V-15.
30. *Deep drilling hole system* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.botekusa.com/>
31. KOČMAN, Karel. *Speciální technologie: obrábění*. 3., přepr. a dopl. vyd. Brno: CERM, 2004, 227 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2562-8.
32. ŘASA, J. *Výpočetní metody v konstrukci řezných nástrojů*. 1. Vyd. Praha: SNTL, 1986. 460 s.
33. Frentech Aerospace s.r.o. [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: [http://www.frentech.eu/index\\_c.php](http://www.frentech.eu/index_c.php)
34. Vrtání hlubokých děr: Katalog produktů a aplikační příručka. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/c-1202-1.pdf>
35. Tool Condition Monitoring in Gundrilling Using Feed Force and Torque Measurements. JAAKO, I. And J. VARIS. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.icpr19.cl/mswl/Papers/206.pdf>
36. Generátor citací. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://generator.citace.com>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>SK</b>	[-]	slinutý karbid
<b>RO</b>	[-]	rychlořezné oceli
<b>PKD</b>	[-]	polykrystalický diamant
<b>Al</b>	[-]	hliník
<b>Mg</b>	[-]	hořčík
<b>Be</b>	[-]	berilium
<b>Ti</b>	[-]	titan
<b>FCC</b>	[-]	kubická plošně středěná mřížka
<b>HB</b>	[-]	tvrdost dle Brinella
<b>Cu</b>	[-]	měď
<b>Mn</b>	[-]	mangan
<b>Si</b>	[-]	křemík
<b>Zn</b>	[-]	zinek
<b>Fe</b>	[-]	železo
<b>Ni</b>	[-]	nikl
<b>Cr</b>	[-]	chrom
<b>B</b>	[-]	bor
<b>P</b>	[-]	fosfor
<b>Na</b>	[-]	sodík
<b>Sr</b>	[-]	stroncium
<b>Sb</b>	[-]	antimon
<b>WC</b>	[-]	karbid wolframu
<b>Co</b>	[-]	kobalt
<b>CNC</b>	[-]	computer numeric control



Symbol	Jednotka	Popis
<b>L</b>	[mm]	hloubka díry
<b>D</b>	[mm]	průměr díry, nástroje
<b>E</b>	[MPa]	modul pružnosti
<b>R<sub>m</sub></b>	[MPa]	pevnost v tahu
<b>A</b>	[%]	tažnost
<b>R<sub>a</sub></b>	[μm]	střední aritmetická úchylna profilu
<b>μ</b>	[-]	koeficient tření
<b>α</b>	[°]	primární tuhý roztok
<b>α´</b>	[°]	přesycený tuhý roztok
<b>κ<sub>1</sub>, κ<sub>2</sub></b>	[°]	úhel nastavení ostří
<b>F<sub>f</sub></b>	[N]	posuvová síla
<b>F<sub>c</sub></b>	[N]	řezná síla
<b>F<sub>p</sub></b>	[N]	pasivní síla
<b>D<sub>i</sub></b>	[mm]	vzdálenost od osy otáčení
<b>n</b>	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky nástroje
<b>v<sub>c</sub></b>	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
<b>f</b>	[mm]	velikost posuvu
<b>v<sub>f</sub></b>	[m.min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost
<b>v<sub>e</sub></b>	[m.min <sup>-1</sup> ]	rychlost řezného pohybu
<b>A<sub>D</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	jmenovitý průřez třísky
<b>f<sub>z</sub></b>	[mm]	posuv na zub
<b>h<sub>D</sub></b>	[mm]	jmenovitá tloušťka odebírané třísky
<b>b<sub>D</sub></b>	[mm]	jmenovitá šířka třísky při vrtání
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	šířka záběru ostří
<b>d</b>	[mm]	průměr předvrtaného otvoru
<b>F</b>	[N]	výsledná řezná síla
<b>F<sub>cz</sub></b>	[N]	řezná síla na zub při vrtání
<b>z</b>	[-]	počet zubů nástroje

$M_c$	[N.m]	kroutící moment od vrtáku
$P_c$	[kW]	řezný výkon vrtání
$M_\mu$	[N.m]	třecí moment
$C_{FC}$	[-]	konstanta vlivu obráběného materiálu
$x_{FC}$	[-]	exponent průměru vrtáku
$y_{FC}$	[-]	exponent posuvu na otáčku
$t_{AS}$	[min]	jednotkový strojní čas
$l_n$	[mm]	dráha náběhu
$\tau_k$	[MPa]	smykové napětí
$\tau_{dov}$	[MPa]	dovolené smykové napětí
$W_k$	[mm <sup>3</sup> ]	modul průřezu v krutu
$\lambda_p$	[-]	stíhlostní poměr
$L_0$	[mm]	vzpěrná délka
$J_{min}$	[mm <sup>4</sup> ]	minimální kvadratický moment průřezu
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha průřezu tyče
$k_k$	[-]	koeficient bezpečnosti
$F_{kr}$	[N]	kritická síla
$F_D$	[N]	dovolená síla
$Q_{SKC}$	[l.min <sup>-1</sup> ]	průtok chladicí kapaliny
$k_c$	[N.mm <sup>-2</sup> ]	měrný řezný odpor

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Výkres součásti  
Příloha 2      Materiálový list  
Příloha 3      Geometrie broušení dělového vrtáku

## **PŘÍLOHA 1**

## **PŘÍLOHA 2**

## **PŘÍLOHA 3**