



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Bakalářská práce

Obrobitelnost hliníkových slitin

Autor práce: Martin Příbyl

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Mádl, CSc

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

13. 6. 2017

Martin Příbyl

Anotační list

Jméno autora: Martin Příbyl

Název BP: Obrobitelnost hliníkových slitin

Anglický název: Machinability of Al alloys

Rok: 2017

Obor studia: Teoretický základ strojního inženýrství

Ústav/odbor: Ústav technologie obrábění projektování a metrologie

Vedoucí: prof. Ing. Jan Mádl, CSc.

Konzultant: prof. Ing. Jan Mádl, CSc.

Bibliografické údaje: počet stran: 34
Počet obrázků: 7
Počet tabulek: 5
Počet příloh: 0

Klíčová slova:

Slitiny hliníku, obrobitelnost, nástrojové materiály

Keywords:

Aluminum alloys, machinability, tool materials

Anotace:

Tato práce pojednává o obrábění hliníku a hliníkových slitin. Jde především o vliv materiálu na obrobitelnost, okolnosti vzniku nárůstku na nástroji a stanovení optimálních řezných podmínek, při kterých bude obrábění nejefektivnější.

Abstract:

This Bachelor thesis discusses the machining of aluminum and aluminum alloys. It is mainly about the influence of the material on the machinability, the terms of the growth on the tool and the determination of the optimal cutting conditions in which machining will be the most effective.

Poděkování

Tímto děkuji prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. za odborné vedení, za poskytnutou literaturu a také za čas, který mi věnoval.

Obsah

Úvodní list	1
Zadání.....	2
Prohlášení	3
Anotační list	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
1. Úvod.....	8
2. Základní údaje o hliníku a rozdělení hliníkových slitin	9
2.1. Hliník.....	9
2.2. Slitiny hliníku	9
2.3. Rozdělení hliníkových slitin	10
2.3.1. Slévárenské slitiny hliníku	10
2.3.2. Slitiny hliníku vhodné ke tváření	10
2.3.3. Automatové slitiny hliníku	11
2.4. Značení hliníkových slitin	11
3. Obrábění	12
3.1. Geometrie břitu.....	13
3.2. Trvanlivost a opotřebení břitu	15
3.3. Řezné prostředí	15
3.4. Obrobitelnost materiálu.....	16
3.5. Řezné podmínky	17
4. Obrobitelnost hliníkových slitin	19
4.1. Rozdělení hliníkových slitin podle obrobitelnosti	20
4.1.1. Slévárenské slitiny hliníku	20
4.1.2. Tvářené slitiny hliníku.....	21
4.1.3. Automatové slitiny hliníku	21
5. Problémy při obrábění hliníkových slitin	22
5.1. Adheze.....	23
6. Řezné materiály	24
6.1. Rozdělení řezných materiálů	24
6.2. Rychlořezné oceli	25

6.3. Slinuté karbidy.....	25
6.4. Řezná keramika	27
6.5. Kubický nitrid bóru	27
6.6. Diamant.....	27
6.7. Geometrie řezných nástrojů	29
7. Řezné podmínky.....	29
7.1. Normativy.....	29
7.2. Výpočet řezných podmínek.....	30
7.2. Obvyklé řezné podmínky pro vybrané aplikace	31
Závěr	32
Seznam použité literatury.....	33

1. Úvod:

Dnes je hliník a jeho slitiny patrně nejpoužívanější člen skupiny materiálů, známé jako neželezné kovy. Od svého objevení ve druhé půli devatenáctého století pronikl již do celé řady průmyslových odvětví a nyní už je jejich neodmyslitelnou součástí. Mezi tyto odvětví patří například elektrotechnika nebo automobilový a letecký průmysl, kde se slitiny hliníku uplatňují hlavně díky své malé hmotnosti, dobrým mechanickým vlastnostem a například také dobrou elektrickou vodivostí.[2]

S rostoucí produkcí a výrobou se ale zvyšují i požadavky na přesnost a kvalitu výrobků z hliníkových slitin a tím i na technologii zpracování. A nejdůležitější technologií zpracování hliníku, aspoň pokud jde o přesnost rozměrů a kvality povrchu, je obrábění.

Je tedy důležité seznámit se s technologií obrábění hliníkových slitin, protože jedině díky tomu pak při výrobě dokážeme určit optimální řezné podmínky, nástroje a prostředí. Tím se také můžeme vyvarovat specifických problémů, ke kterým při obrábění hliníku dochází.

2. Základní údaje o slitinách hliníku a rozdělení hliníkových slitin:

2.1. Hliník:

Hliník (Al) je třetím nejrozšířenějším prvkem na Zemi (8,3 %). V přírodě se vyskytuje v mnoha různých formách a sloučeninách, ale z hlediska výroby hraje nejdůležitější roli minerál bauxit. Významné použití mají také kryolit a korund α (jeho zbarvenými odrůdami jsou drahokamy safír, rubín, topas a smaragd).[4]

Samotný hliník je stříbrobílý, silně elektropozitivní kov, dobře kujný a tažný s velmi dobrou tepelnou i elektrickou vodivostí (jeho vodivost odpovídá přibližně 60 % vodivosti mědi). Krystaluje v kubické plošně centrované mřížce. Ve vzduchu a vodě je hliník mimořádně stálý, protože se snadno pokrývá vrstvičkou oxidů, které ho chrání před korozi.[4]

Vybrané fyzikální charakteristiky hliníku:

- Teplota tání: $t = 658^{\circ}\text{C}$
- Hustota: $\rho = 2700\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Měrná tepelná kapacita: $c = 0,921\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Čistý hliník spatřil poprvé světlo světa již v roce 1827, ale první průmyslový postup na jeho výrobu byl navržen až v roce 1854 a i tak byl tehdy hliník velice drahý. Teprve až v roce 1886 se hliník začal vyrábět pomocí elektrolýzy a tato výrobní metoda se používá až do současnosti.[4]

2.2. Slitiny hliníku

Slitiny hliníku jsou po oceli a litině nejvyužívanější konstrukční materiál. Je to dáno především vlastnostmi, které umožňují široké průmyslové využití. Jde zejména o:

- malou hustotu
- dobrou elektrickou a tepelnou vodivost
- dobré mechanické vlastnosti
- tvárnost
- chemickou odolnost
- dobrou slévatelnost
- svařitelnost

Míra uvedených vlastností se pochopitelně u každé jednotlivé slitiny hliníku liší, jde o zevrubnou specifikaci. Dále se budu zabývat detailním rozdělením.[2]

Kategorizace slitin hliníku se dá provést několika způsoby. Jako většina průmyslových materiálů se i Al slitiny dají rozdělit podle chemického složení, způsobu použití nebo způsobu zpracování. Dají se také rozdělit podle toho, jestli lze danou slitinu tepelně vytvrdit – takzvané stárnutí hliníkových slitin. Nejprve zde uvedu rozdělení slitin podle použití a pak podle chemického složení.[5]

2.3. Rozdělení Al slitin podle způsobu použití:

- slévárenské slitiny hliníku
- slitiny hliníku vhodné ke tváření
- automatové slitiny hliníku

2.3.1. Slévárenské slitiny hliníku:

Tyto slitiny patří mezi nejpoužívanější slitiny hliníku a jsou určeny k odlévání odlitků do pískových nebo kovových forem nebo pro tlakové lití. Jejich výhoda spočívá hlavně v tom, že s nimi lze vytvářet tenkostěnné odlitky nebo odlitky s komplikovaným tvarem. Kvalita a pevnost odlitků pak závisí na způsobu lití a na materiálu formy. Co se týče pevnosti tak mez pevnosti tahu těchto slitin nepřesahuje 250 MPa. Hlavní legující prvek zde bývá obvykle křemík, který zlepšuje slévárenské vlastnosti, zvyšuje odolnost vůči otěru, ale zároveň také způsobuje rychlejší opotřebené nástrojů při obrábění. Někdy se používají i speciální slitiny, které navíc obsahují buď Cu nebo Mg, a jsou díky tomu vytvrditelné.[5][7]

2.3.2. Slitiny hliníku vhodné ke tváření:

Tvářené slitiny hliníku můžeme ještě rozdělit na slitiny s vysokou pevností nebo s dobrou odolností vůči korozi.

Slitiny dobře odolné vůči korozi obsahují legující prvky Mn nebo Mg, ale neobsahují Cu. Tyto slitiny pak dobře odolávají korozi i bez povrchové úpravy, ale nedají se tepelně vytvrdit. Obvykle se používají spíše jen jako stabilnější verze čistého hliníku. U slitin Al-Mg sice lze zvýšit mez pevnosti až nad 400MPa tvářením za studena, ale i tak se tyto slitiny moc často nepoužívají, maximálně jako trochu pevnější varianta čistého hliníku. Při obrábění těchto slitin pak bývá problém kromě adheze i hodně dlouhá tvárná tříška, která se při soustružení může ovinout kolem obrobku.[5][7][15]

Slitiny s vysokou pevností obsahují legury Cu, Mg, Mn nebo Zn a jsou často souhrnně nazývány jako dural. Striktně vzato však název dural označuje pouze slitinu EN AW 2017, popřípadě superdural – EN AW 2024. Tyto slitiny je možné vytvrdit s tím, že jejich výsledná pevnost obvykle nejvíce závisí na množství přidané Cu a způsobu vytvrzení. Mez pevnosti těchto vytvrzených slitin pak dosahuje až 530 MPa.[5][7]

2.3.3. Automatové slitiny hliníku:

Tento druh slitin obsahuje kromě obvyklých přísad Cu, Mg a Mn také Pb, které způsobuje větší lámavost třísky. Od 90. let však sílí tendence nahrazovat toxické Pb jiným prvkem, který bude méně škodlivý, levný a zároveň bude podporovat vznik lámavé třísky. Nejčastěji se jako náhražka používá Sn. Tyto přísady však kromě lepší obrobitelnosti zhoršují ostatní vlastnosti slitin. Automatové slitiny jsou díky tomu málo pevné, nesvařitelné a jejich povrch se nedá eloxovat, takže tato snaha zlepšit obrábění nakonec může omezit použití těchto materiálů.[2][5]

2.4. Značení hliníkových slitin podle normy ČSN EN 573-1-2-3:

- EN AW - 1xxx – hliník – minimální obsah 99% a více
- EN AW - 2xxx – slitiny Cu
- EN AW - 3xxx – slitiny Mn
- EN AW - 4xxx – slitiny Si
- EN AW - 5xxx – slitiny Mg
- EN AW - 6xxx – slitiny Mg a Si
- EN AW - 7xxx – slitiny Zn
- EN AW - 8xxx – ostatní slitiny
- EN AW - 9xxx – neobsazená řada

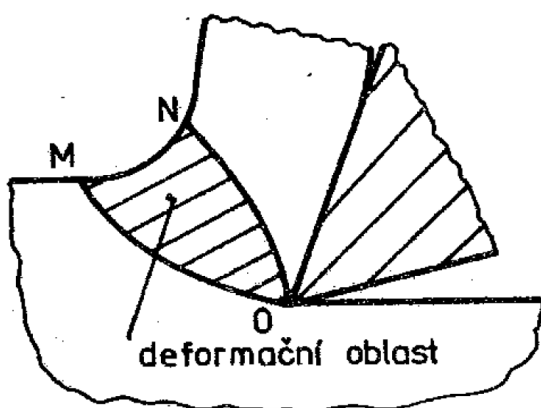
EN – evropská norma, A – hliník, W – tvářené výrobky, 1xxx - skupina slitiny, zbývající 3 čísla označená jako xxx charakterizují konkrétní slitinu.[2]

3. Obrábění:

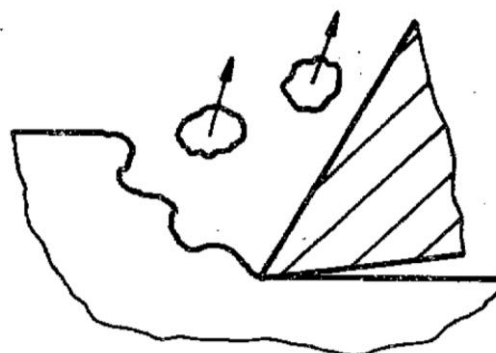
Než se budu zabývat specifikacemi obrábění hliníku, tak nejprve uvedu obrábění jako takové. Nebudu zde uvádět všechny aspekty obráběcího procesu, jen základní výběr, ze kterého pak budu vycházet.

Technologie obrábění je proces, ve kterém dochází k oddělování materiálu z obrobku ve formě třísky. Tato tříška vzniká v důsledku relativního pohybu břitu rezného nástroje vůči obrobku. V podstatě se jedná o kontrolovaný odchod třísky. Následně lze třísky vzniklé při obrábění rozdělit do několika základních skupin, které zároveň charakterizují i samotný obráběcí proces – tvar a průřez třísek je kromě dalších faktorů určen geometrií nástroje a reznými podmínkami.[1]

Nejprve se třísky dělí na tvářené a netvářené. Tvářená tříška vzniká působením plastické deformace v místě řezu (např. při obrábění kovů), zatím co netvářená tříška se z místa lomu odlamuje nebo je vytrhávána bez plastické deformace (tato tříška vzniká například při obrábění keramiky).[1]



Obrázek 1: obrábění s plasticky deformovanou třískou [1]



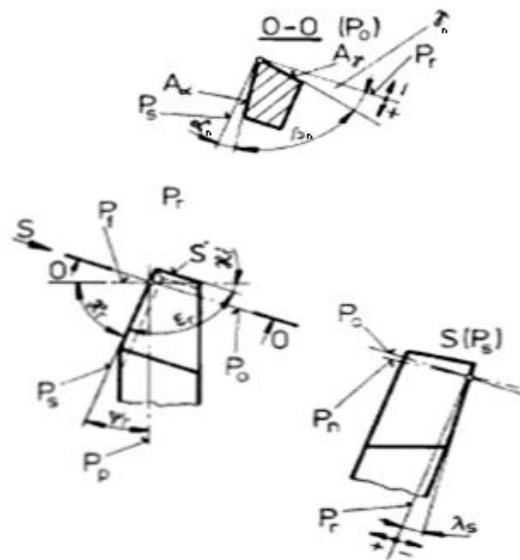
Obrázek 2: Obrábění s třískou bez plastické deformace [1]

Tvářené třísky se pak dále dělí na třísky elementární a soudržné, a třísky soudržné se dělí zase na třísky plynulé a článkovité. Toto rozdělení je určeno převážně pevností a houževnatostí obráběného materiálu s tím, že čím je materiál houževnatější, tím mají třísky menší tendenci se dělit a lámat. Z tohoto důvodu se na rezných nástrojích používají lamače a utvářeče třísek pro lepší odchod třísek z pracovního prostoru.[1]

Odvod třísky je při obrábění realizován řezným nástrojem a funkčním prvkem všech řezných nástrojů je řezný klín neboli břit. Ten je vymezen dvěma plochami – čelem, plochou po které odchází tříska, a hřbetem, plochou která klouže po obrobku. Břit je průsečnice těchto dvou ploch (nejde o geometricky přesnou hranu, ale o velmi malý rádius).[1][3]

3.1. Geometrie břitu:

Spolu s materiálem tvoří geometrie břitu dva nejdůležitější parametry řezného nástroje (respektive parametry vyměnitelné řezné destičky). Geometrie břitu má vliv na vnikání nástroje do materiálu, na jeho pevnost, tvar třísky, směr jejího odchodu od ostří a kvalitu obrobenej plochy. Proto je velmi důležitá volba jednotlivých dále popisovaných úhlů. Definice jednotlivých úhlů odpovídají pravému přímému uběracímu soustružnickému noži (název nože popisuje smysl jeho posuvu).[1][3]



Obrázek 3: Geometrie břitu [18]

V základní rovině [18] jsou určovány úhel nastavení hlavního ostří κ_r , úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' a úhel špičky nože ϵ_r .

Úhel nastavení hlavního ostří κ_r je definován jako úhel, který svírá rovina řezu se směrem posuvu. Díky tomu má tento úhel vliv na průřez třísky. Úhel κ_r tedy společně s hloubkou záběru a_p a posuvem f [18] zásadně ovlivňuje šířku třísky a s ní řezný odpor (tenká tříska se snáze ohýbá a řezný odpor je menší). Se zmenšující se tloušťkou třísky se ale zvětšuje radiální síla působící mezi nástrojem a obrobkem, a tím pádem je obrobek více prohýbán a také dochází k jeho chvění. Úhel nastavení hlavního ostří může být podle tvaru nástroje od 0° do 90° . [3]

Úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' je definován jako úhel, který svírá rovina řezu vedlejšího ostří se směrem posuvu a má vliv především na výslednou kvalitu povrchu obráběné plochy (drsnost).[3]

Úhel špičky ε_r je doplňkovým úhlem k úhlům κ_r a κ_r' s tím, že platí:

Rovnice 1: Výpočet úhlů v základní rovině [3]

$$\kappa_r + \kappa_r' + \varepsilon_r = 180^\circ$$

V řezu vedeném normálovou rovinou [17] přes břit nože se určuje úhel čela γ_n , úhel hřbetu α_n , úhel břitu β_n a úhel řezu δ_n .

Velikost úhlu čela γ_n ovlivňuje především pevnost břitu, velikost řezného odporu a drsnost obrobené plochy. Čím je úhel čela větší, tím snadněji vniká břit do materiálu a řezný odpor je menší. Tím se ale břit zeslabuje a snáze se vylomí. Naopak při velkém úhlu čela se zhoršuje kvalita obrobené plochy (drsnost). Úhel čela se pak podle konkrétních podmínek obrábění volí od $+40^\circ$ do -25° . Záporné úhly čela se více využívají u břitů zhotovených z materiálů s malou pevností v ohybu – např. slinuté karbidy a keramické materiály.[3]

Velikost úhlu hřbetu α_n má vliv na pevnost břitu a tření nože o obrobek. Podle konkrétních podmínek obrábění se jeho velikost pohybuje mezi 2° až 25° . [3]

Velikost úhlu břitu β_n ovlivňuje pevnost břitu, velikost řezného odporu a odvod tepla z místa obrábění do tělesa nože. Podle konkrétních podmínek obrábění se volí od 40° do 100° . [3]

Jinak mezi úhly v normálové rovině vždy platí rovnice:

Rovnice 2: Výpočet úhlů v normálové rovině [3]

$$\alpha_n + \beta_n + \gamma_n = 90^\circ \quad \gamma_n + \delta_n = 90^\circ$$

V pohledu vedeném kolmo na rovinu řezu je určován úhel sklonu hlavního ostří λ_s . Velikost tohoto úhlu se volí v rozmezí od $+20^\circ$ do -45° a je jeden z faktorů ovlivňující pevnost břitu, trvanlivost břitu, směr odchodu třísek od ostří a drsnost obrobené plochy. Úhel sklonu hlavního ostří nabývá kladné hodnoty směrem do nástroje a záporné hodnoty směrem ven (při záporné geometrii má nástroj větší pevnost).[3]

3.2. Trvanlivost a životnost břítu:

Během obrábění se nástroj otupuje a jeho řezivost se snižuje. Tato skutečnost se projeví zvýšením řezného odporu a tím i příkonu stroje, chvěním obrobku, zhoršením přesnosti a kvality obrobených ploch. Při určitém stupni opotřebení je tedy nutné vyměnit nástroj, respektive břitovou destičku. Doba mezi aplikací a přístrojením nebo vyměněním destičky či nástroje se nazývá trvanlivost břítu. Mezi trvanlivostí břítu a řeznou rychlostí platí vztah:

Rovnice 3: Výpočet trvanlivosti řezného nástroje [3]

$$T \cdot v_c^m = konst.$$

kde T je trvanlivost břítu, v_c je řezná rychlost a m je exponent (číslo mezi 2 až 20), jehož velikost závisí na materiálu obrobku, materiálu břítu nástroje, geometrii nástroje a řezných podmínkách.[3]

Životností břítu znamená součet všech trvanlivostí od prvního použití nástroje do jeho vyřazení z užívání.[3]

3.3. Řezné prostředí:

Obrábění probíhá v určitém řezném prostředí. Řezné prostředí může být přirozené – vzduch, nebo umělé – jiný plyn, mlha nebo řezná kapalina. Každé řezné prostředí má specifické účinky na řezný proces. Jde hlavně o chladicí a mazací účinky řezných prostředí a dále taky o účinky „řezací“ a čistící.[1]

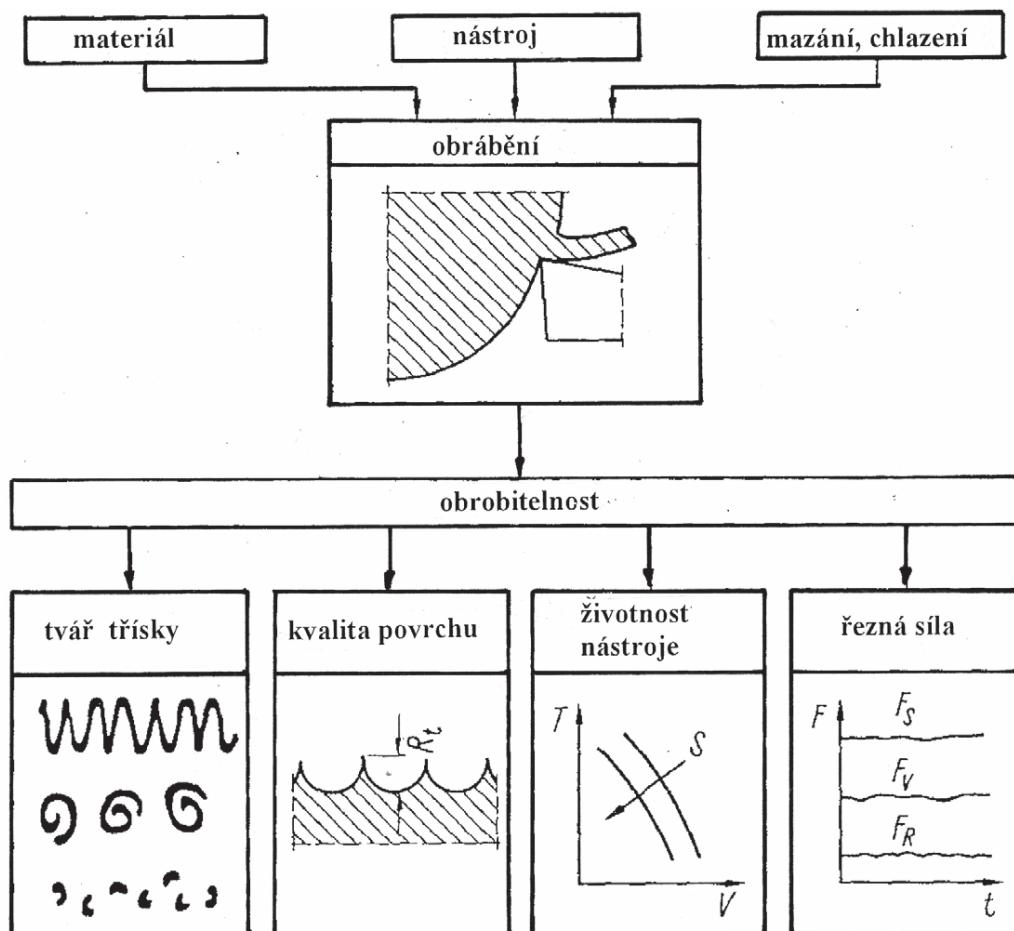
Použití řezných prostředí záleží na dostatečném proniknutí prostředí do místa řezu, teploty řezání, mechanických vlastnostech řezných nástrojů a také na požadovaném odvádění třísky. V praxi se jako řezná prostředí používají převážně řezné kapaliny.[1]

Řezné kapaliny se dělí do několika skupin:

- Vodní roztoky chemických sloučenin – chladicí a čistící účinky pro aplikace s vysokou teplotou řezání
- Olejové emulze – dobrý chladicí a mazací účinek pro většinu technologií a středně vysoké teploty řezání
- Řezné oleje – mazací účinek pro nízké teploty řezání

3.4. Obrobitelnost materiálu:

Obrobitelnost je schopnost materiálu být obráběn konkrétním způsobem, danou technologií, určitým nástrojem v určitém řezném prostředí. Jde o komplexní vlastnost, která zahrnuje celou řadu parametrů, například: požadavky na přesnost rozměrů obrobku, životnost nástrojů, řezné síly nebo kvalita povrchu. Složitost vlivu obrobitelnosti na obrobek ostatně dobře znázorňuje následující schéma.[2]



Obrázek 4: Schéma faktorů ovlivňující obrobitelnost [2]

K hodnocení obrobitelnosti (v tomto případě relativní obrobitelnosti) se většinou používá srovnávání, respektive poměr mezi velikostí určité veličiny obráběného materiálu a velikostí té samé veličiny etalonového materiálu.[1]

Do této charakteristiky patří například index obrobitelnosti

Rovnice 4: Výpočet indexu obrobiteľnosti [1]

$$i = \frac{v_T}{v_{Tet}}$$

kde v_T je hodnota řezné rychlosti odpovídající určité trvanlivosti pro daný obráběný materiál a v_{Tet} je hodnota řezné rychlosti odpovídající určité trvanlivosti pro etalonový materiál. Obdobným způsobem se určuje také například teplotní index nebo silový index.[1]

Tato charakteristika materiálů, založená na indexech určených výpočtem, by však byla nepřehledná, a proto byl vytvořen zvláštní způsob zařazování materiálů podle jejich obrobiteľnosti do tříd.[1]

Rozdělení obrobiteľnosti podle CMC kódu (Coromant material classification):

- ISO P – nízko, středně a vysoce legované oceli
- ISO M – oceli
- ISO K – litiny
- ISO N – neželezné kovy
- ISO S – žáruvzdorné superslitiny
- ISO H – oceli s vysokou tvrdostí[11]

3.5. Řezné podmínky:

Řezné podmínky jsou souhrnný název pro řeznou rychlost v_c , posuv f a hloubku záběru a_p .

Volba řezných podmínek ovlivňuje výkon obrábění, velikost řezných sil, trvanlivost ostří, příkon stroje, jakost obroběné plochy a další parametry. Při vypracování výrobního postupu je snahou určit tak zvané optimální řezné podmínky. To znamená řezné podmínky, které umožní hospodárné a co nejrychlejší obrábění, při kterém ještě lze dosáhnout požadované kvality obrobku.[3]

Volbu řezných podmínek ovlivňují celá řada parametrů, například: materiál výrobku, materiál nástroje, geometrie břítu, výrobní stroj, požadavky na přesnost a drsnost. [3]

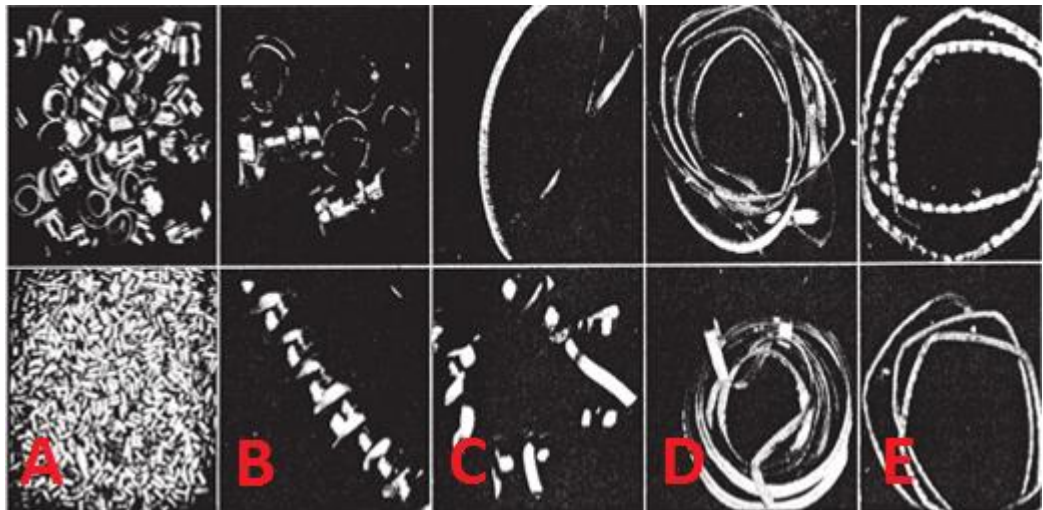
Tabulka 1: Řezné podmínky pro vybrané materiály a operace [3]

druh obrábění	materiál nástroje	materiál obrobku	Posuv – hrubování [m.min ⁻¹]	Posuv - na čisto [m.min ⁻¹]
soustružení	RO	ocel	25	15
		litina	20	15
		bronz a mosaz	40	30
		hliník	150	150
	SK	ocel	55	170
		litina	60	80
		bronz a mosaz	150	220
		hliník	1000	1000
	keramika	ocel	250	500
		litina	150	280
		neželezné kovy	350	500
frézování	RO	ocel	25	40
		litina	25	40
		bronz a mosaz	30	50
		hliník	250	375
	SK	ocel	130	180
		litina	130	180
		bronz a mosaz	150	200
		hliník	1200	2000
broušení		ocel	1800	
		litina	1500	
		neželezné kovy	1800	

4. Obrobitelnost hliníkových slitin:

Ve srovnání s ostatními konstrukčními materiály se dá říct, že slitiny hliníku patří mezi ty snáze obrobitelné (z hlediska opotřebení materiálu a velikosti řezných sil). Tak například právě řezné síly jsou při obrábění hliníkových slitin výrazně menší než při obrábění ocelí se stejnou pevností.[2]

Jedním z nejdůležitějších parametrů při hodnocení obrobitelnosti je tvar třísky (hlavně při obrábění na CNC obráběcích strojích, kde je nutný efektivní odvod třísky z místa řezu). Pro toto hodnocení se používá rozdělení třísek do jednotlivých kategorií na základě tvaru (vizuální hodnocení). Na obrázku je příklad takové kategorizace. Tříška je zde rozdělena podle tvaru do pěti skupin označených písmeny A až E. Popis tvaru jednotlivých třísek je s příslušným označením uveden v tabulkách 2 a 3. Jde o výběr hliníkových slitin ve vybraných stavech tepelného zpracování a všechny byly obráběny stejným nástrojem. Jde však jen o ilustrativní znázornění, protože skutečné rozdělení třísek podle tvaru je daleko komplikovanější. Velmi podobný způsob hodnocení obrobitelnosti je založen také na hodnocení podle kvality obrobeného povrchu nebo životnosti nástroje.[1]



Obrázek 5: Vizuální kategorizace třísek [1]

Tabulka 2: Legenda k obrázku 5 [2]

A	- velmi krátká a lámavá tříška, dobře obrobitelný materiál, vynikající jakost povrchu
B	- stočená nebo dělená tříška, výborný až dobrý povrch
C	- plynulá tříška, dobrá jakost povrchu
D	- plynulá tříška, vyhovující povrch
E	- špatná tříška, nutné nastavit podmínky obrábění, aby bylo dosaženo lepší třísky a lepší jakosti povrchu

Tabulka 3: Legenda k obrázku 5 [2]

Obrobitelná skupina	Slitina	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv f [mm.ot ⁻¹]	
			Dolní snímek	Horní snímek
A	2011-T3	120	0,66	0,152
B	2024-T4	30	0,152	0,264
C	6061-T6	120	0,152	0,264
D	3004-H32	120	0,152	0,264
E	1100-H12	120	0,152	0,264

4.1. Slitiny hliníku lze z hlediska obrobitelnosti rozdělit do tří skupin (analogicky s kapitolou o kategorizaci slitin).

4.1.1. Slévárenské slitiny:

Slévárenské slitiny jsou až na občasnou adhezi dobře obrobitelné. Co se týče opotřebené nástrojů, tak u slévárenských slitin záleží na podmínkách krystalizace a kvalitě lití. Jemnozrná homogenní struktura způsobuje menší opotřebení, zato však výskyt nespojitostí, oxidických vrstev a nekovových vměstků zvětšuje opotřebení nástrojů.[2][7]

Dále obrobitelnost ovlivňuje množství křemíku. Slitiny, které jsou legovány právě tímto prvkem, je nutné obrábět při nižších rychlostech a posuvech. Vzhledem k míře opotřebení nástroje se pak slitiny legované křemíkem dělí na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Obecně platí, že čím je větší přidané množství křemíku, tak tím více se zvyšuje opotřebení. Výjimku tvoří jen eutektické slitiny, kde se při obrábění křemíková zrna zatlačují do měkké matrice. Kromě zvýšené abraze však křemík způsobuje i krátkou, dobře lámavou třísku.[2][7]

4.1.2. Tvářené slitiny:

Tvářené slitiny mají také celkově dobrou obrobitelnost, která je dána nebo se dá ještě zlepšit vytvrzením nebo tvářením za studena. Slitiny v tvrdém stavu mají i lepší povrch a jejich třísky mají větší tendenci se lámat. Problém může nastat u nevytvrzených slitin, kde se při obrábění tvoří dlouhá spojitá tříška, která se buď může dostat do místa řezu, nebo se omotat kolem nástroje, a tak je nutné jí odstraňovat.[7]

4.1.3. Automatové slitiny:

Automatové slitiny jsou kromě obvyklých přísad legovány i prvky s nízkou teplotou tání. Tyto prvky, hlavně Pb, Bi, Sb a Cd zlepšují podmínky pro vznik drobné lámavé třísky. To je dáno tím, že se nerozpouštějí v základní hliníkové matici a v materiálu vytváří měkké částice. Při rovnoměrném rozmístění těchto částic dochází při vysokých teplotách na hraně rezného nástroje k jejich natavení, a tím i k tvorbě drobných třísek.[2]

Z hlediska opotřebení nástrojů způsobují automatové slitiny malé opotřebení i při rychlostech přesahujících $1000\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. V současnosti se nejčastěji používají vytvrzované slitiny řady 2xxx a 6xxx legované Pb a Bi.[2]

Z výše uvedených skupin slitin hliníku se mi jeví jako nejlépe obrobitelné vytvrditelné slitiny vhodné k tvářením, protože neobsahují tak velké nepřesnosti ve struktuře jako slévárenské slitiny, a díky vytvrzení mají dobře lámavou třísku bez určité ztráty pevnosti, která se může vyskytovat u automatových slitin.

Tabulka 4:Obrobitelnost vybraných slitin [2]

(hodnocení uvedené v tabulce 4 je totožné s hodnocením v tabulce 2)

Slitina	Stav	Tvrđost HB	Hodnocení	Slitina	Stav	Tvrđost HB	Hodnocení	
1060	O	19	E	6061	O	30	D	
Al99.60	H12	23	E	AlMgSiCu	T4	65	C	
	H18	35	D		T6	95	C	
2011	T3	95	A	6063	O	25	D	
AlCuBiPb	T8	100	A	AlMg0.7Si	T1	42	D	
	2014	O	45		D	T6	73	C
AlCuSiMn		T4	105		B	T83	82	C
	2024	O	47	D	6262	T9	120	B
AlCu4Mg1		T3	120	B	AlMg1SiPb	O	60	B
	7001				T6		160	B
	T61	130	B	7075	O	60	D	
				AlZnMgCu1.5	T6	150	B	
2219	O	-	-	7178	O	60	-	
	AlCu6Mn	T351	100	B	AlZn7MgCu	T6	160	B
		T851	130	B		T76	-	-
3003	O	28	E	208	F	55	B	
AlMnCu	H18	55	D	AlCu4Si3				
	T6	120	B	242	T21	70	B	
AlSi12NiMg	T6	120	B	AlMg3	T77	70	B	
				A332	T551	105	C	
5005	O	28	E	AlSi10(Cu)	T65	125	C	
AlMg1	H12	36	E	A356	T51	60	C	
				H18	51	D	AlSi7Mg	T6
	H38	51	D				T7	70
				A357	T6	85	-	
5052	O	47	D	AlSi7Mg0.6				
AlMg2.5	H38	77	C	A360	F	75	C	
	5154	O	58	D	AlSi9.5Mg0.5			
AlMg3.5	H38	80	C	413	F	80	E	
				AlSi12				

5. Problémy při obrábění hliníkových slitin:

Než se budu věnovat vhodným řezným nástrojům, materiálům a řezným podmínkám, tak se zde budu nejprve věnovat problémům při obrábění hliníkových slitin, protože volba všech již zmíněných parametrů z těchto problémů vychází, respektive se jim snaží zamezit. Největší problém při obrábění hliníkových slitin je adheze.

5.1. Adheze:

Adheze znamená navaření za studena, respektive navaření části materiálu obrobku na břít řezného nástroje, kde se tak vytvoří nárůstek. Tento nárůstek je pak plasticky deformován a tím dochází k jeho zpevnění (bývá 3 až 5 krát pevnější než tříska). Nárůstek pak může způsobit celou řadu problémů – od zhoršení drsnosti povrchu obrobku až po destrukci řezného nástroje.[1][8]

Vytvoření nárůstku je obvykle podmíněno vysokými teplotami a tlaky v místě řezu a taky chemicky čistými stykovými plochami. Chemicky čisté plochy při obrábění vznikají tak, že plocha řezného nástroje je neustále omílána třískou, a tím je zbavena většiny nečistot a nově vznikající povrch obrobku lze těsně po odříznutí třísky také považovat za chemicky čistý. [1]

Hlavní roli při tvorbě nárůstku hraje teplota, která je dána řeznou rychlostí tloušťkou odřezávané vrstvy. Dále je pro tvorbu nárůstku důležitá zpevňovací schopnost obráběného materiálu a také chemická příbuznost materiálů obrobku a břitu, která podporuje adhezní spojení.[1]

Co se týče tvorby nárůstku při obrábění hliníku a jeho slitin, tak kvůli velkému množství slitin nejsou známy přesné zákonitosti jeho tvorby. Obecně se dá říct, že se nárůstek tvoří do 450°C teploty řezu. Tato teplota však vyžaduje vysoké otáčky a řeznou rychlost, která ale nemusí být na některých menších strojích k dispozici.[1][2]

Když na břitu řezného nástroje vznikne nárůstek, tak se změní geometrie řezného nástroje. Z hlediska této změny geometrie tak nárůstek dá rozdělit na dva tvary – ostrý a zaoblený. Ostrý nárůstek má malý poloměr břitu, a také zmenšuje úhel řezu na $\delta_{nár}$. Zaoblené nárůstky nejsou tak časté a i když mohou mít rozdílné tvary, tak je pro všechny charakteristické zvětšení poloměru hlavního ostří.[1]

Zaoblené nárůstky jsou typické pro slitiny hliníku (ale vyskytovat se můžou i ostré nárůstky). Vyznačují se velkými rozměry až několik milimetrů, především při velkém úhlu řezu δ_n a u vícebřitých nástrojů, kde můžou vyplnit mezery mezi zuby a tím celý nástroj zničit. Zaoblený nárůstek také zvyšuje řezné síly.[1]

Kromě zahlcení mezer mezi břity u vícebřitých nástrojů tvorba nárůstku způsobuje i tzv. adhezní otěr. I když je nárůstek velice tvrdý a pevný, tak může být nestabilní a po určité době se utrhne i s kouskem řezného nástroje. Vyskytují se i stabilní nárůstky, které vydrží na břitu dlouhou dobu a chrání ho tak před otěrem, ale to není moc častý jev. Naopak kousky utrženého nestabilního nárůstky mohou ulpět na povrchu obrobku nebo na spodní ploše třísky a mohou tak zvýšit abrazi nástroje a drsnost povrchu obrobku.[1]

Velký vliv na odstranění adhezního tření a tvorbu nárůstku má řezné prostředí. Jde o povrchově aktivní kapaliny, které na povrchu obrobku a řezného nástroje vytvoří film, který zabraňuje styku řezných ploch a tím i ulpění materiálu obrobku na nástroji. Pokud jde o chladicí účinek řezného prostředí, tak se vždy vychází z teploty, při které nárůstek vzniká. Změnou teploty v místě řezu tak lze nárůstek zabránit nebo i podpořit jeho vznik.[1][8]

Tvorbě nárůstku se dá také zabránit vyššími otáčkami nebo teplotou v místě řezu. U řady materiálů jsou známy rozmezí teplot a řezných rychlostí, kdy nárůstky vznikají a kdy by už vznikat neměli, takže lze použít správnou kombinaci řezných podmínek – například u uhlíkových ocelí se nárůstek objevuje v rozmezí teplot od 120 do 600°C nebo, jak již bylo řečeno, u hliníkových slitin (u kterých se nárůstek tvoří) se nárůstek přestává tvořit při řezné teplotě větší než 450°C.[1][8]

6. Řezné materiály:

Další věc, která má zásadní vliv na řezný proces je materiál řezného nástroje. Řezné materiály se volí podle obráběného materiálu, kinematických podmínek obráběcího stroje, množství odebíraného materiálu a také podle požadavků na kvalitu obrobeného povrchu. Dále je při výběru nutné brát ohled na náklady (náklady pořizovací ale i náklady na ostření a náklady na výměnu) a také na trvanlivost.[9]

Není přesně určeno, který z řezných materiálů se nejvíce hodí k obrábění hliníkových slitin, ale v současnosti jsou pravděpodobně nepoužívanější slinuté karbidy. Dá se říct, že trend při vývoji řezných materiálů je zvýšení fyzikální a chemické stability za vysokých teplot, zvýšení odolnosti proti abrazivnímu otěru a dosažení vyšší odolnosti proti křehkému porušení. V případě hliníkových slitin jde také o snahu zabránit tvorbě nárůstku vhodnou úpravou povrchu řezného nástroje.[9]

6.1. Rozdělení nástrojových materiálů do skupin:

- nástrojové oceli
 - uhlíkové
 - slitinové
 - nízkolegované
 - vysokolegované
 - rychlořezné (RO)
- slinuté karbidy (SK)
 - povlakované
 - nepovlakované
- řezná keramika
- polykrystalický kubický nitrid boru
- diamant

Z výše uvedených řezných materiálů se dále budu zabývat jen těmi významnějšími a těmi, které jsou používány při obrábění hliníkových slitin.[9]

6.2. Rychlořezné oceli:

Rychlořezné oceli vznikly legováním nástrojových ocelí za účelem dosažení lepšího řezného výkonu. Jako legury se používají: wolfram 6 – 10 %, mangan 1,2 – 2 % a chrom 0,5 %. Obsah uhlíku byl 1,2 až 2,5 %. Tyto legury pak zaručují „samokalitelnost“ takto vyrobených ocelí.[9]

Vzhledem k malé měrné řezné síle jsou rychlořezné oceli na obrábění hliníku dost dobře použitelné, především ve formě monolitických fréz a vrtáků malých rozměrů, kde ještě nelze použít břitové destičky a kde jsou velké požadavky na houževnatost nástroje.[9]

6.3. Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou patrně nejpoužívanější řezné materiály. Vyrábějí se ve formě malých břitových destiček metodou práškové metalurgie slinutím karbidů wolframu (WC), titanu (TiC), Ta, Cr a dalších kovů do kovové (nejčastěji kobaltové) matrice. Slinuté karbidy, dále jen SK, mají vysokou tvrdost a snázejí zahřátí břitu přibližně až na 900 °C.[9]

Od 60. let minulého století se SK povlakují. Jde o nanesení řádově několika mikrometrů silného povlaku z tvrdého materiálu. Jde především o Karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN), oxid hlinitý (Al_2O_3), a karbonitrid titanu (TiCN). Malá vrstva z těchto materiálů pak zvyšuje výkonnost řezných nástrojů - zmenšuje

otěr, prodlužuje životnost a umožňuje obrábět při vyšších řezných rychlostech. Dnes už se povlakuje přibližně 75% všech břitových destiček ze SK.[6]

Kromě použitých materiálů se povlakování rozlišuje také podle způsobu nanášení. Rozlišuje se technologie povlakování PVD a CVD s tím, že PVD znamená fyzické nanášení a CVD, které je rozšířenější, znamená chemické nanášení reakcí několika různých plynů.[6]

Břítové destičky mohou být potaženy i několika vrstvami najednou. Jako podklad se díky dobré přilnavosti na SK nanáší karbonitrid titanu a na něj se pak podle účelu nanáší další vrstvy TiN nebo Al_2O_3 . I při několika vrstvách se však celková tloušťka povlaku pohybuje v rozmezí 2 až 12 μm (respektive 3 - 5 μm při DPD a 12 - 15 μm při CPD), protože při větší tloušťce je povlak křehký a hrozí jeho odloupení.[6]

SK lze rozdělit do mnoha kategorií – podle obsažených tvrdých částic nitridů a karbidů, podle hrubosti zrn základní matrice, jestli jsou povlakované, a podle druhu a způsobu aplikace povlaku, ale já zde uvedu jen rozdělení celkového použití, protože mi přijde nejvhodnější.[6]

Rozdělení SK podle normy ISO podle použití (prakticky totožné s rozdělením obrobitelnosti podle již zmíněného CMC kódu):

- P – ocel
- M – korozivzdorná ocel
- K – litina
- N – neželezné materiály
- S – žáruvzdorné superslitiny
- H – tvrzené materiály

V každé skupině jsou pak ještě uvedena dvě čísla, která udávají různé požadavky na obrábění – od hrubování až po dokončovací operace. Skupina 01 je určena pro dokončovací operace velkou řeznou rychlostí, malým posuvem a malou hloubkou řezu, skupina 25 patří zas mezi nepoužívanější – střední obrábění a poslední skupina 50 je určena pro hrubování nízkou řeznou rychlostí s velkým posuvem. (Příklad označení SK pro hrubování ocelí: P50)[6][11]

SK jsou nepoužívanější řezný materiál pro obrábění hliníkových slitin – jak vyplývá z výše popsaného rozdělení, jsou to SK typu N s tím, že mohou být i nepovlakované díky již dříve zmíněným malým řezným silám.[6]

Co se týká SK a tvorby nárůstku, tak tendence k nalepování stoupá s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu, obsahu kobaltu a drsností řezné hrany a povrchu řezného nástroje. Zvýšení kteréhokoli uvedeného parametru se projeví ve zvýšeném nalepování hliníku na řezný nástroj.[6][9]

6.4. Řezná keramika

Základní složkou keramických řezných materiálů je oxid hlinitý Al_2O_3 . Řezná keramika je velice tvrdá, chemicky stálá a velmi odolná vůči vysokým teplotám, jenže je také křehká, a proto se do ní přidává nikl, molybden, chrom a také karbidy titanu, molybdenu a wolframu pro zvýšení houževnatosti. Řezivost keramických nástrojů je dána přímo tvrdostí korundu, případně přimíslených karbidů. Tepelné zpracování za účelem zvýšení tvrdosti se neprovádí. [9]

Řeznou keramiku zde uvádím spíše jen pro úplnost, jinak při obrábění hliníkových slitin nehraje velkou roli.[17]

6.5. Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid boritý je syntetický, velmi tvrdý materiál, s vysokou pevností za tepla a také s chemickou stálostí vůči železným kovům. Svými vlastnostmi je jinak podobný diamantu a řezné keramice, která může sloužit jako pojivo jednotlivých krystalů nitridu boritého.[17]

I kubický nitrid bóru zde uvádím hlavně pro úplnost, protože se spíše používá k obrábění superslitiny nebo slinutých karbidů a na slitiny hliníku je zbytečně moc tvrdý.[8]

6.6. Diamant

Diamant je vysoce tvrdý materiál, vhodný pro zhotovení obráběcích nástrojů pracujících při speciálních požadavcích. Diamant snáší teploty až asi 1600 °C a proto se nástrojů s diamantovým břitem užívá pro obrábění s vysokou řeznou rychlostí, potřebnou k dosažení vysoce jemného povrchu (tzv. jemné obrábění).[12]

Jaksi zákonitě s velkou tvrdostí je diamant i velice křehký. Řezný nástroj s tímto materiálem je obvykle realizován, jako břit z konstrukční nebo rychlořezné oceli potažený slabou vrstvou diamantu. Vzhledem k tomu, že se diamant začíná aplikovat na nástroje a břitové destičky vyrobené ze SK, tak ho lze vnímat i jako druh povlaku.[12]

Hlavní nevýhoda diamantu spočívá v tom, že se nedá použít při obrábění všech ocelí a litin, protože se díky difúznímu otěru při jejich obrábění v podstatě vypaří – respektive dochází k uvolňování uhlíku z krystalové mřížky diamantu a pak difúzí vniká do povrchu obrobku, kde tak stoupá množství karbidu železa (Fe_3C).[9][12]

V posledním desetiletí se stále více používají vyměnitelné břitové destičky ze SK (systém WC-Co) povlakované polykrystalickým diamantem (PKD) s mikroleštěným povrchem. Leštěný povrch vykazuje v porovnání s neleštěným nižší drsnost ($R_a = 0,05 \mu\text{m}$), a tím pádem i nižší koeficient tření, který téměř znemožňuje adhezní tření, a také dochází ke zlepšení odvodu třísek, zlepšuje se kvalita povrchu obrobku i přesnost rozměrů.[12]

Tak například nejnovější vyměnitelné břitové destičky (od firmy Pramet Diadur) pro soustružení hliníku, hliníkových slitin i dalších neželezných materiálů už mají optimalizovanou konstrukci Al utvářeče třísky, který zajišťuje dobrý odvod třísky od hloubek řezu od 0,5 mm do 7 mm a posuvů od velikosti $0,06 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Pozitivní ostrá řezná hrana s nízkou drsností způsobuje snížení řezných sil a zajišťuje dobrou kvalitu obrobeného povrchu.[12]

Kromě destiček s diamantovým povlakem se také vyrábějí i vrtáky a frézy do průměru 25 až 30mm s jádrem z rychlořezné oceli nebo nově i ze slinutého karbidu.[13]



Obrázek 6: Univerzální čelní válcová fréza Gúhring GS 100 s vnitřním chlazením[13]



Obrázek 7: Vrtáky Beyond KN15 [14]

Jako příklad zde uvádím hrubovací frézy GS 100 určené pro obrábění hliníkových slitin od firmy Gúhring a vrtáky Beyond KN15 od firmy Kennametal.[13][14]

I když nástroje s povlakem PKD dosahují poměrně dobrých výsledků, tak se stejně moc nepoužívají a oproti ostatním řezným nástrojům jsou navíc dost drahé.[13]

6.7. Geometrie nástrojů pro obrábění hliníkových slitin:

Geometrie řezných nástrojů nebo též geometrie vyměnitelných břitových destiček je dána obráběcí operací a požadovanou geometrií obrobku.[8]

Tvary fréz, břitových destiček a vrtáků jsou určeny normou ČSN a ISO – například: ČSN 22 2130, 22 2132, 22 21.... (značení fréz)[17]

Při obrábění hliníkových slitin se klade důraz především na přítomnost utvářeče třísky, pozitivní úhel čela γ_n a také na malý poloměr hlavního ostří.[9][15][16]

7. Řezné podmínky pro obrábění hliníkových slitin:

Řezné podmínky pro obrábění hliníkových slitin se určují stejně jako u ostatních obráběných materiálů z normativů nebo výpočtem. Ke stanovení řezných podmínek lze použít i tabulky uvedené výrobcem řezných nástrojů, ale v nich uvedené hodnoty jsou jen orientační a rozdíl mezi nimi a optimálními řeznými podmínkami může být značný,[3]

7.1. Normativy:

Normativy jsou velmi podrobnými a dokonale propracovanými tabulkami, sledujícími řadu faktorů ovlivňujících proces obrábění. Řezné podmínky určené podle normativů se velmi přibližují optimálním podmínkám. Tento způsob je přesnější než z odečítání obyčejných tabulek a dá se už uplatnit v sériové výrobě. Dnes se však již normativy moc nepoužívají, protože nejsou aktualizované.[3]

7.2. Výpočet řezných podmínek:

Výpočet řezných podmínek, respektive optimálních řezných podmínek je velice komplikovaný, protože vzhledem k tomu, že řezné podmínky přímo ovlivňují strojní čas, je třeba v tomto výpočtu zohledňovat mnoho faktorů. Mezi tyto faktory patří technologie výroby, ekonomie i ekologie. Hlavním požadavkem však jsou v tomto případě minimální výrobní náklady na zvolenou jednotku – například na operační úsek. V takovém případě se obvykle provádí výpočet hned několika řezných podmínek najednou pro jednu operaci a z nich se poté vyberou optimální řezné podmínky.[8]

Tímto způsobem se postupně určí trvanlivost řezného nástroje T , posuv f a hloubka záběru a_p a z nich pak lze spočítat řeznou rychlost v_c .

Rovnice 5: Výpočet řezné rychlosti [3]

$$v_c = \frac{C}{T^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^x \cdot f^y} \cdot K_K \cdot K_{K1} \cdot K_r \cdot K_{ch} \cdot K_m \cdot K_n \cdot K_d$$

- v_c je řezná rychlost při žádané trvanlivosti ostří T ,
- T je žádaná trvanlivost ostří,
- a_p je hloubka záběru,
- f je posuv na otáčku obrobku,
- C je konstanta určující vliv způsobu práce – typ obrábění,
- m je exponent určující vliv materiálu břitu na trvanlivost ostří,
- x je exponent určující vliv hloubky záběru na řeznou rychlost,
- y je exponent určující vliv posuvu na řeznou rychlost,
- K_k je konstanta určující vliv úhlu nastavení hlavního ostří k na řeznou rychlost D ,
- K_{k1} úhlu nastavení vedlejšího ostří k_1 na řeznou rychlost,
- K_r je konstanta určující vliv poloměru zaoblení špičky nože na řeznou rychlost,
- K_{ch} je konstanta určující vliv způsobu chlazení na řeznou rychlost,
- K_m je konstanta určující vliv materiálu obrobku na řeznou rychlost,
- K_n je konstanta určující vliv materiálu břitu nástroje na řeznou rychlost,
- K_D je konstanta určující vliv dovoleného opotřebení břitu na řeznou rychlost.[3]

Tento vzorec je jednoduchý a není složité ho vypočítat, ale zase je obtížné zjistit hodnoty všech vypsanych koeficientů, z čehož vyplývá, že tento způsob určení řezných podmínek se vyplatí hlavně ve velkosériové a hromadné výrobě, kdy dosažené zvýšení produktivity práce převáží náklady spojené s náročným určením řezných podmínek.[3]

7.3. Nakonec zde uvádím tabulku s rozsahem obvyklých řezných podmínek pro vybrané operace při obrábění hliníkových slitin.

Tabulka 5: Řezné podmínky pro obrábění hliníkových slitin[3][10][12][13]

Obráběcí operace	Řezné podmínky	Rychlořezná ocel	Slinutý karbid	Slinutý karbid s PKD povlakem
Soustružení - hrubování	Řezná rychlost V_c [m.min ⁻¹]	100 - 200	100 - 1000	až 2000
	Posuv f [mm.ot ⁻¹]	2	2	2
Soustružení na čisto	Řezná rychlost V_c [m.min ⁻¹]	100 - 200	150 - 1000	optimální - 2000 (až 8000)
	Posuv f [mm.ot ⁻¹]	0,2	0,2	0,06
Frézování - hrubování	Řezná rychlost V_c [m.min ⁻¹]	100 - 200	300 – 500	-
Frézování na čisto	Řezná rychlost V_c [m.min ⁻¹]	200 - 300	500 - 1000	-
Vrtání	Řezná rychlost V_c [m.min ⁻¹]	40 - 120	-	-
	Posuv f [mm.ot ⁻¹]	0,05 – 0,5	-	-

Závěr:

Obráběcí proces (bez ohledu na obráběný materiál nebo typ obrábění) podléhá podrobné analýze, na základě které se snažíme stanovit optimální řezné podmínky, řezné nástroje, řezné prostředí atd. Cíl této činnosti je vytvořit obrobek co nejvyšší možné kvality za nejnižší cenu. Obrábění hliníkových slitin je pouze specifické v tom, že musíme brát ohled na tvorbu nárůstku a správné utváření třísky, jinak se řídí stejnými požadavky a zákonitostmi jako u všech ostatních materiálů.

Dá se také říct, že se optimalizace výrobního procesu více uplatňuje při hromadné a velkosériové výrobě, protože tam má větší vliv na hospodárnost výroby než je tomu u výroby malosériové nebo kusové.

Seznam použité literatury:

- [1]MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [2]*Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 8089041884.
- [3]HAMERNÍK, Jan. *Základy obrábění* [online]., 1 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [4]*Hliník* [online]. 2005, , 1 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/C2442/skripta/kapitola0507.html>
- [5]Technologie. *Strojírenské vývojové centrum* [online]. 2005 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://konstrukce.webz.cz/sups/3too1.html>
- [6]*Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 9197229946.
- [7]*Hliník a slitiny hliníku* [online]. 2005 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf
- [8]MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998.
- [9]Fyzikální podstata řezání. *Ústav strojírenské technologie* [online]. 2005 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf
- [10]Řezné podmínky nástrojů. *TUMLIKOVO: Metal cutting technologies* [online]. 2011 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/rezne-podminky-nastroju/>
- [11]Materiály. *RPB, s.r.o. Chrudim* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_H.pdf
- [12]Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem. *Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2002,(4), 1 [cit. 2017-05-30]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>
- [13]VRBA, Pavel. Co zvolit pro obrábění Al slitin. *Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o, 2008,(12), 1 [cit. 2017-05-30]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/co-zvolit-pro-obrabeni-al-slitin.html>
- [14]Nové celokarbidové vrtáky Beyond.. *Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2014,(4), 1 [cit. 2017-05-30]. ISSN 1212-2572. Dostupné z:

<http://www.cnckonstrukce.cz/novinka-121/nove-celokarbidove-vrtaky-beyond-pro-obrabeni-hliniku.html>

[15] Al slitiny. *Kovo-Spacil* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.kovo-spacil.cz/alloys/cz.htm>

[16] MÁDL, Jan. *Experimentální metody v teorii obrábění*. 4. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1988.

[17] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 9788073610814.

[18] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 8001026108.