

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a
metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tvorba nárůstku při obrábění Al slitin
Built-up edge formation in machining Al alloys

Praha 2018

Autor: Tomáš Tišer

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Mádl, CSc.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tišer** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **459645**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tvorba nárůstku při obrábění Al slitin

Název bakalářské práce anglicky:

Built-up edge formation in machining Al alloys

Pokyny pro vypracování:

1. Hliník a jeho slitiny (přehled)
2. Obrobitelnost hliníku a jeho slitin se zaměřením na tvorbu nárůstku
3. Řezné podmínky při obrábění hliníku a jeho slitin

Seznam doporučené literatury:

Vasilko, K., Mádl, J.: Teorie obrábění - 1. díl. (2012), UJEP, Ústí nad Labem. 298 s., ISBN 978-80-7414-459-2
Vasilko, K., Mádl, J.: Teorie obrábění - 2. díl. (2012), UJEP, Ústí nad Labem. 228 s., ISBN 978-80-7414-460-8
Odborné články.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Jan Mádl, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:

prof. Ing. Jan Mádl, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27.4.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením svého vedoucího bakalářské práce a s použitím uvedené literatury na konci této práce.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Děkuji touto cestou vedoucímu práce panu prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. za jeho rady, připomínky a cenné konzultace.

Anotace

Tato bakalářská práce podává obecný přehled o hliníku a jeho slitinách. Vysvětluje pojem obrobitelnosti materiálu a způsoby jejího hodnocení. Dále je zde vyložen současný názor na podstatu tvorby nárůstku na řezném nástroji a způsoby, jakými se předchází tomuto nežádoucímu jevu.

Abstract

This bachelor thesis gives a general overview of aluminum and its alloys. Explains the concept of material machinability and ways of its evaluation. Further, the current view of the nature of the built-up edge in growth of the cutting tool and ways of avoiding this undesirable phenomenon.

Klíčová slova

Hliník, slitiny hliníku, vznik třísky, plastická deformace, nárůstek, řezné podmínky, geometrie nástroje.

Keywords

Aluminum, aluminum alloys, chip formation, plastic deformation, increment, cutting conditions, cutting tool geometry.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Hliník a jeho slitiny	8
2.1	Hliník	8
2.2	Slitiny hliníku	9
2.2.1	Slévárenské slitiny hliníku	10
2.2.2	Slitiny hliníku ke tváření	10
2.2.3	Vytvrditelné slitiny hliníku	11
2.2.4	Nevytvrditelné slitiny hliníku	13
2.2.5	Vliv legujících prvků na vlastnosti slitin hliníku	13
2.3	Označování hliníku a slitin hliníku	14
2.3.1	Označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN	14
2.3.2	Označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN	16
3	Obrobitelnost.....	16
3.1	Absolutní obrobitelnost	17
3.2	Relativní obrobitelnost	18
3.3	Obrobitelnost hliníku a jeho slitin	21
3.3.1	Obrobitelnost slévárenských slitin hliníku	22
3.3.2	Obrobitelnost Al slitin určených pro tváření.....	22
3.3.3	Obrobitelnost automatových Al slitin	23
3.3.4	Praktický přehled hodnocení obrobitelnosti hliníkových slitin.....	23
4	Nárůstek.....	25
4.1	Mechanismus vzniku nárůstku	26
4.2	Tvar nárůstku.....	28
4.3	Tvorba nárůstku při obrábění Al slitin	30
5	Řezné podmínky při obrábění Al slitin.....	32
5.1	Řezný materiál.....	33
5.2	Geometrie nástrojů	34
5.3	Řezné rychlosti, posuvy.....	35
6	Závěr.....	36

7	Seznam použitých značek a symbolů	37
8	Seznam použitých zdrojů	38
9	Seznam obrázků	40
10	Seznam tabulek	41
11	Příloha 1.....	42
12	Příloha 2.....	46

1 Úvod

Hliník, respektive slitiny hliníku jsou dnes po slitinách železa nejpoužívanější skupinou kovů a to napříč všemi odvětvími průmyslu a lidské činnosti. Po kyslíku a křemíku je hliník nejhojněji zastoupený prvek v zemské kůře. Díky jeho poměrně vysoké reaktivitě se však v kůře vyskytuje ve formě sloučenin, ve kterých je doprovázen příměsemi na bázi oxidů křemíku, železa, titanu a dalších prvků [1]. Pro nás nejvýznamnější z těchto sloučenin je bauxit, ruda pro průmyslovou výrobu hliníku. Z bauxitu se hliník získává chemickou úpravou rudy a následnou elektrolýzou. Výroba je relativně drahá a energeticky náročná s negativním dopadem na životní prostředí. Z tohoto hlediska je výhodnější, je-li to možné, hliník získávat recyklací, zejména roste-li neustále a to již řadu let jeho spotřeba. Tato rostoucí spotřeba je důsledkem příznivých vlastností hliníku a jeho slitin.

S technickoekonomickým vývojem stoupá nutnost produkovat stále kvalitnější a přesnější polotovary a finální výrobky. Nejinak je to i s výrobky z hliníku a jeho slitin. Ve strojírenském průmyslu je tou metodou, která dosahuje největší rozměrové přesnosti a nejjakostnějšího povrchu, technologie obrábění.

2 Hliník a jeho slitiny

2.1 Hliník

Je stříbrošedý měkký kov, který se vyznačuje malou hustotou, výbornou tepelnou a elektrickou vodivostí, kujností, tažností a navzdory jeho reaktivitě i odolností vůči korozi, jelikož se na vzduchu pokrývá tenkou a souvislou ochrannou vrstvou Al_2O_3 . Krystaluje v kubické plošně centrované mřížce. Je rozpustný ve zředěných kyselinách a alkalických hydroxidech s tím, že koncentrovaná HNO_3 a H_2SO_4 tvoří na jeho povrchu ochrannou pasivační vrstvu oxidů. Využití má v elektrotechnice na výrobu zejména silnoproudých vodičů, v metalurgii jako legura či surovina pro výrobu slitin a při aluminotermické redukci kovů z jejich oxidů. V opravárenství se využívá při tavném svařování (termit). Práškový hliník se používá také jako složka některých trhavin, kde svou přítomností zvyšuje teplotu exploze a tříštivost výbuchu. Používá se i jako součást paliva raketových motorů na tuhá paliva. V tabulce 1 jsou uvedeny některé z vlastností čistého aluminia a na obrázku 1 [25] [26], ukázka bauxitu (vlevo) a čistého Al (vpravo).



Obrázek 1 - Bauxit [25] a hliník [26]

Tabulka 1 - Vybrané vlastnosti hliníku [1], [2]

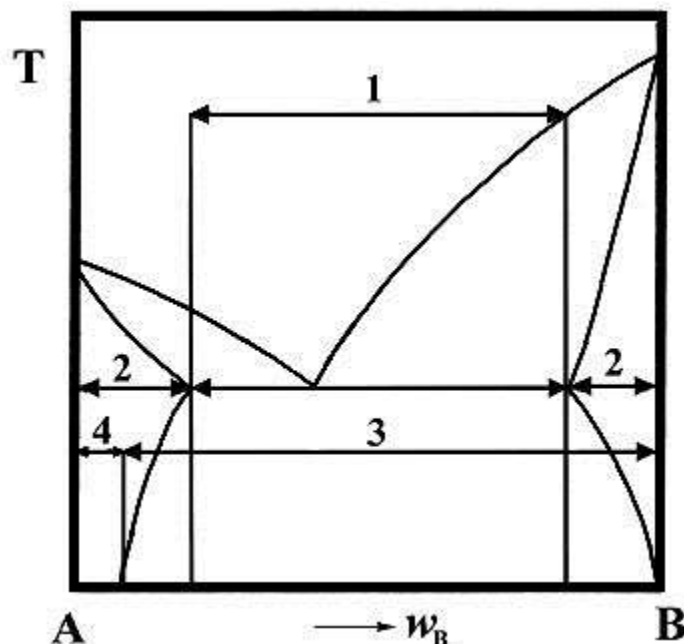
veličina - vlastnost	hodnota
krystalová mřížka	K2
mřížkový parametr [10^{-10} m]	4,04958
teplota tavení [$^{\circ}$ C]	660,4
teplota varu [$^{\circ}$ C]	2494
hustota při 20 $^{\circ}$ C [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2698,9
tepelná vodivost při 20 $^{\circ}$ C [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	237
měrný elektrický odpor [10^{-6} $\Omega\cdot\text{m}$]	0,0267
teplota supravodivosti [K]	1,175
součinitel tepelné roztažnosti při 20 $^{\circ}$ C [K^{-1}]	$23\cdot 10^{-6}$
modul pružnosti v tahu [GPa]	70
elektrická vodivost [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]	$37,7\cdot 10^6$
spalné teplo [MJ/kg]	31,05
atomová hmotnost [1]	26,98154

2.2 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku částečně dědí po své základní složce fyzikální, chemické a technologické vlastnosti, kterými je předurčeno jejich široké průmyslové využití a to:

- malou hustotu (jsou relativně lehké)
- dobrou elektrickou a tepelnou vodivost
- dobré mechanické vlastnosti
- tvárnost
- chemickou odolnost
- dobrou slévatelnost
- svařitelnost

Vhodnými a řízenými postupy při jejich výrobě je možné některé tyto vlastnosti slitin účelově rozvinout či naopak potlačit. Tím se získá široká plejáda slitin hliníku, které pak členíme podle některých navzájem podobných vlastností do skupin. Hledisek roztrídění může být a i je více. Základní dělení Al slitin je podle způsobu zpracování či podle schopnosti tepelného zpracování, a to na slitiny slévárenské a tvářené, resp. vytvrditelné či nevytvrditelné. Pro názornost je toto členění na obrázku 2 zasazeno do binárního diagramu [6], z něhož je patrné, že u tvářených slitin převažuje ve struktuře primární tuhý roztok hliníku, u slévárenských eutektikum.



Obrázek 2 - Rozdělení hliníkových slitin: 1 slévárenské slitiny, 2 slitiny určené k tváření, 3 precipitačně vytvrditelné slitiny, 4 nevytvrditelné slitiny [6]

Další rozdělení je možné na základě jejich chemického složení či obrobitelnosti, viz kap. 3.3. Avšak i v rámci takto utvořených skupin se slitiny některými vlastnostmi mohou lišit a dále je tedy jemněji, v rámci skupiny, členíme podle dalších kritérií. Jak již bylo uvedeno, podle způsobu zpracování dělíme Al slitiny na slévárenské (na odlitky) a slitiny ke tváření (tvářené). Na obrázku 3 je schematicky zobrazeno základní členění Al slitin.

2.2.1 Slévárenské slitiny hliníku

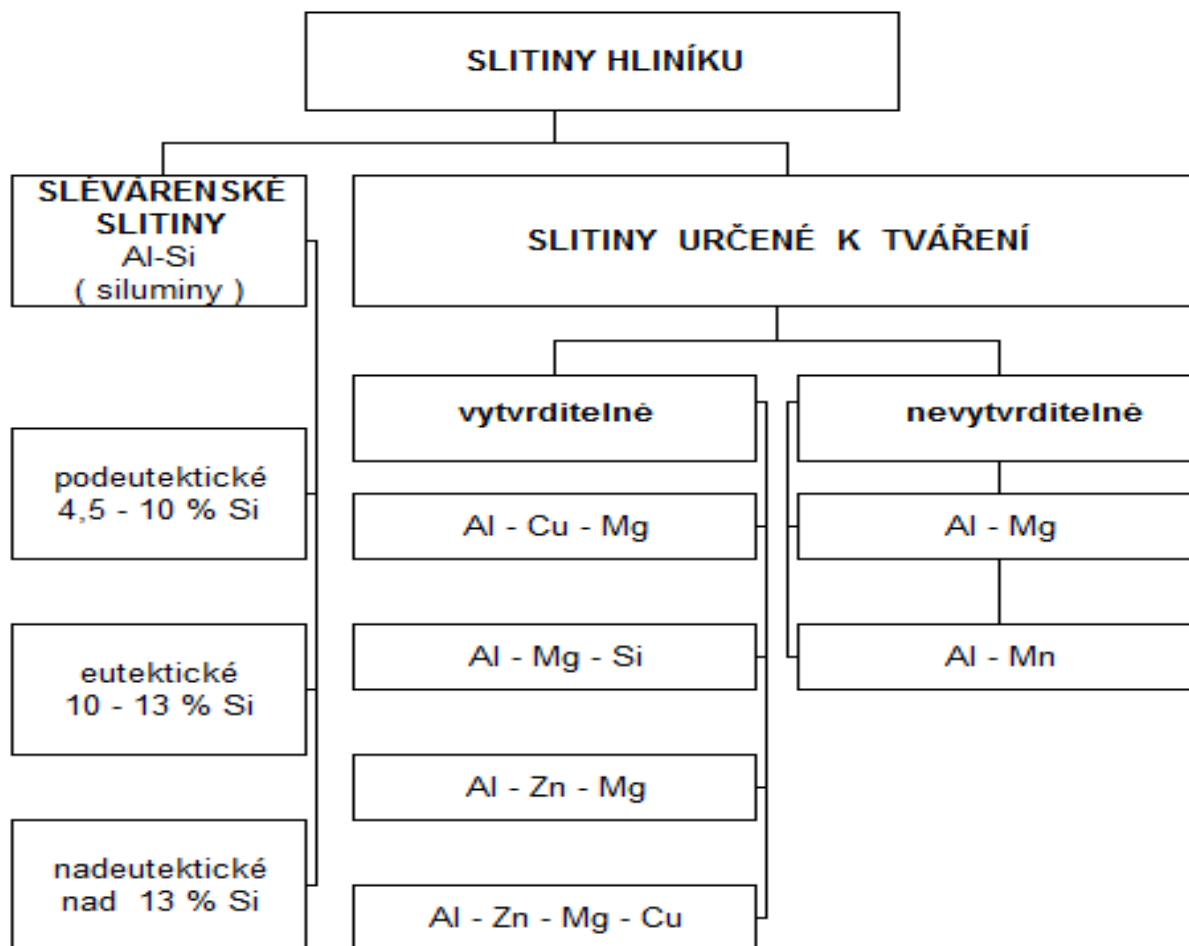
Jde o tzv. siluminy, binární slitiny Al-Si. Křemík zlepšuje slévárenské vlastnosti, zvyšuje zabíhavost a snižuje náchylnost k tvorbě staženin [1]. Hodí se pro lití do pískových i kovových forem a i pro tlakové lití. Je možné jimi odlít tenkostěnné odlitky nebo odlitky složitých tvarů. Dosahují pevnosti v tahu nejvýše 250 MPa. Eutektické siluminy mají nejlepší slévárenské vlastnosti. Eutektikum v binárních siluminech představuje směs tuhého roztoku α a krystalů takřka čistého křemíku. Tuhé částice křemíku zvyšují odolnost proti otěru. Vedle binárních slitin existují i speciální slévárenské slitiny Al-Si-Mg a Al-Si-Cu, kde přísady Mg a Cu umožňují tyto slitiny vytvrzovat [5].

2.2.2 Slitiny hliníku ke tváření

Tato skupina se člení na slitiny s menší pevností a dobrou odolností proti korozi a na slitiny s vyšší pevností avšak s nízkou odolností proti korozi. V první skupině je hliník legován Mg nebo Mn, což způsobuje vyšší korozivzdornost, nelze je však tepelně

vytvrdit. Slitiny Al-Mg, tzv. hydronalium, se však dají zpevnit deformačně, zejména Al-Mg5 se stupněm deformace 20%-30% [5].

Rozhodující přísadou slitin druhé skupiny, způsobující jejich pevnost, je Cu. Tyto slitiny mohou být současně legovány i Mg, Mn nebo Zn. Známi jsou pod názvem dural.



Obrázek 3 - Dělení Al slitin podle účelu použití - zjednodušený přehled [27]

Podle schopnosti tepelného zpracování dělíme Al slitiny na vytvrditelné a nevytvrditelné.

2.2.3 Vytvrditelné slitiny hliníku

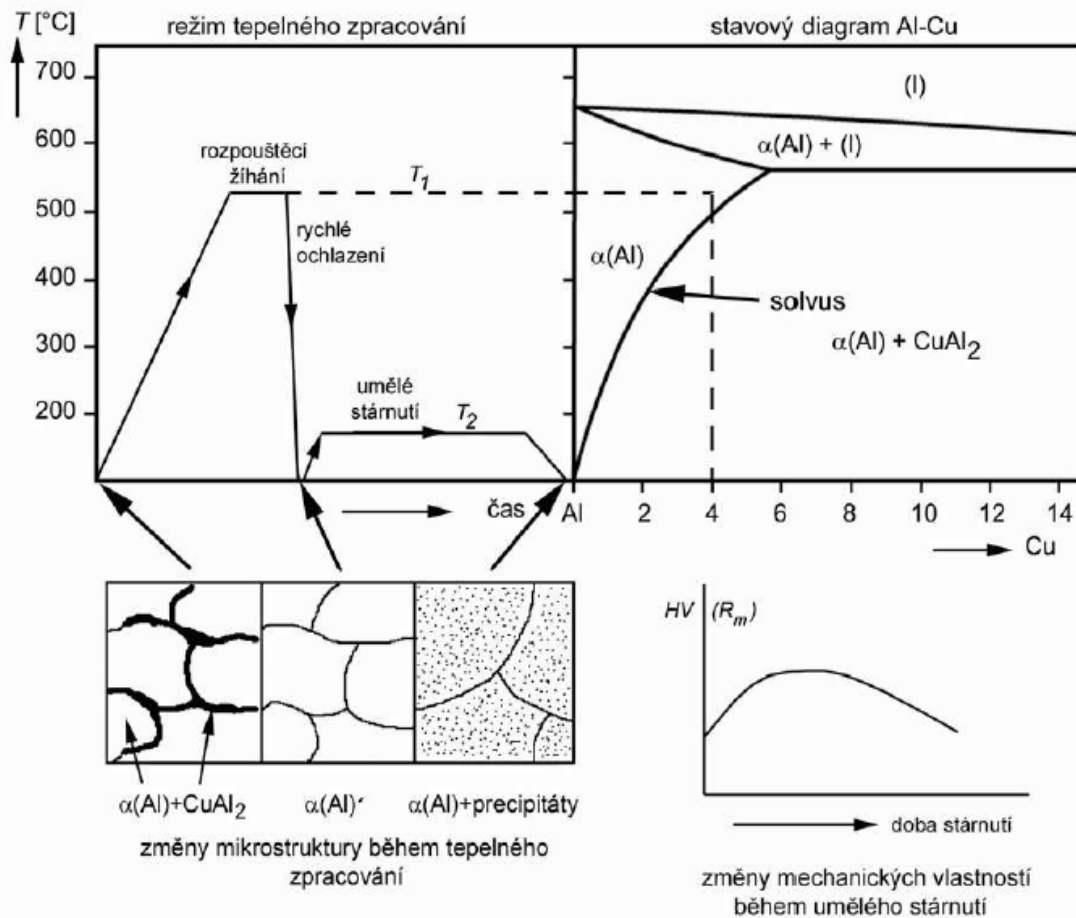
Vytvrzují se precipitačním vytvrzováním, tzn. uplatňují se u slitin se změnou v rozpustnosti složek. Se změnou teploty u nich dochází k rozpadu přesyceného roztoku za vzniku precipitátu, struktura se zpevňuje. Nejvýznamnějšími zástupci jsou Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Li.

Princip a postup precipitačního vytvrzování je možné ukázat např. na nejznámější vytvrditelné slitině hliníku AlCu4Mg. Výřez rovnovážného diagramu soustavy Al-Cu a souvislost mezi změnou struktury a postupem vytvrzování jsou znázorněny na obr. 4 [17]. Za pokojové teploty je rozpustnost mědi v hliníku nižší než je její celkový obsah ve slitině, což znamená, že mikrostruktura je heterogenní.

Kromě tuhého roztoku α ji tvoří intermediální fáze CuAl_2 , vyloučená jako síťoví po hranicích zrn tuhého roztoku α , což negativně ovlivňuje pevnostní a zejména deformační charakteristiky slitiny [17]. Cílem precipitačního vytvrzování je tento stav změnit k lepšímu. Precipitační vytvrzování se skládá ze tří základních kroků:

1. rozpouštěcí ohřev
2. rychlé ochlazení
3. umělé stárnutí

Rozpouštěcí ohřev je třeba provádět při teplotě ležící nad křivkou (solvus) změny rozpustnosti, tedy v oblasti homogenního tuhého roztoku α . Při tomto ohřevu dojde k rozpuštění fáze CuAl_2 v tuhém roztoku. U slitin hliníku leží teploty rozpouštěcího ohřevu v rozmezí teplot 470-530°C. Po rozpouštěcím ohřevu následuje rychlé ochlazení, takže fáze CuAl_2 se ve struktuře vyloučit nestihne a vznikne přesycený tuhý roztok α , u něhož je obsah legujícího prvku vyšší, než by odpovídalo rovnovážné koncentraci. Po rychlém ochlazení následuje přirozené (za pokojové teploty) nebo umělé (při teplotě 140-200°C) stárnutí. V této fázi dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku α , který je spojen s procesem precipitace. V tuhém roztoku dochází k vylučování velice jemných částic (precipitátů) fáze CuAl_2 .



Obrázek 4 - Princip a postup precipitačního vytvrzování [17]

Jelikož tyto precipitáty představují účinnou překážku pro skluz dislokací, je jejich vznik spojen s výrazným zpevněním slitiny (nárůstem pevnosti a tvrdosti) [1]. Postup vytvrzování je v diagramu teplota-čas a stavovém diagramu naznačen na obrázku 4.

2.2.4 Nevytvrditelné slitiny hliníku

Jejich pevnost je způsobena substitučním zpevněním tuhého roztoku. Potenciál dalšího možného zpevnění spočívá v deformačním zpevnění, neboli tváření za studena. Zástupci těchto slitin jsou slitiny Al-Mn, Al-Mg, přičemž Mg je z hlediska substitučního zpevnění hliníkové matrice mnohem efektivnější než Mn, cca 0,8 % Mg ~ 1,25 % Mn.

2.2.5 Vliv legujících prvků na vlastnosti slitin hliníku

Vlastnosti slitin jsou dosaženy, krom tepelného a mechanického zpracování, zejména vlivem legur. Základními přísadami jsou Cu, Mg, Mn, Si a Zn. Vliv těchto hlavních přísad na vlastnosti slitin je dle [3], tento:

- měď zvyšuje pevnost a tvrdost slitin, zhoršuje však tvárnost a odolnost proti korozi. Ve slitinách určených ke tváření bývá její obsah max. 6 %, ve slévárenských pak bývá její obsah do 12 %.

- hořčík zvyšuje pevnost, vytvrditelnost a odolnost proti korozi. Ve tvářených slitinách bývá do 8 %, ve slévárenských až do 11 %.

- mangan zvyšuje pevnost, tvárnost a odolnost proti korozi. Jeho obsah obvykle nepřekročí 2 %.

- křemík zvyšuje pevnost tuhého roztoku a mírně odolnost proti korozi. Při větším obsahu je přítomen jako čistý Si, čímž se zvyšuje křehkost. Slitiny tvářené obsahují do 1 % Si, oproti tomu slitiny slévárenské obsahují až 25 % Si. Tuhé částice Si zvyšují odolnost proti otěru, zároveň tím zvyšují opotřebení řezných nástrojů.

- zinek zvyšuje pevnost, ale zhoršuje houževnatost a odolnost proti korozi. Ve tvářených slitinách ho bývá až do 8 %, ve slévárenských maximálně do 6 %.

Vedle těchto základních legur jsou Al slitiny legovány i dalšími prvky, jejich podíl je ovšem mnohem nižší.

- železo zvyšuje pevnost a zlepšuje tvárnost, zhoršuje však houževnatost a odolnost proti korozi. Ve slitinách pro tváření bývá jeho obsah do 0,5 %, výjimečně až do 1,6 %. Ve slévárenských slitinách do 1 %. Železo je v Al slitinách vždy přítomno a to i neúmyslně, kontaminací od nářadí a pecní vsázky.

- nikl zvyšuje pevnost i houževnatost za normální i zvýšené teploty. Používá se proto ve slitinách určených pro práci za vyšších teplot, a to do obsahu 2 %. U slitin s Cu zlepšuje rovněž odolnost proti korozi.

- titan, chrom, molybden a vanad zjemňují zrno
- olovo zlepšuje obrobitelnost. Z ekologických a zdravotních hledisek je snahou olovo nahradit, alternativou může být Bi a Sn
- cín a antimon zlepšuje kluzné vlastnosti u ložiskových slitin

Účinky jednotlivých prvků platí pro binární soustavy. Skutečně vyráběné Al slitiny jsou většinou legovány více než jediným prvkem a vliv na výsledné vlastnosti slitin jsou pak komplikovanější.

Nejdůležitější slitiny hliníku jsou magnalium (10-35 % Mg), duraluminium (Cu, Mg, Mn, Si), silumin (13 -25 % Si), hydronalium (Mg) nebo pental (Mg, Si). Mezi nejpevnější slitiny hliníku patří slitiny se zinkem, hořčíkem, titanem, chromem a mědí. Přídavek lithia a kobaltu zlepšuje pevnostní a plastické vlastnosti hliníkových slitin, nikl zlepšuje pevnost za vysokých teplot, zirkonium a molybden zjemňují strukturu, skandium zlepšuje svařitelnost, stříbro zvyšuje chemickou odolnost, olovo a bismut zlepšují mechanickou obrobitelnost, antimon zvyšuje odolnost vůči korozi v mořské vodě, bor zlepšuje elektrickou vodivost. Hlavním legujícím prvkem hliníkových slitin je křemík, který zvyšuje pevnost a slévárenské vlastnosti a v kombinaci s hořčíkem umožňuje vytvrzování.

2.3 Označování hliníku a slitin hliníku

Označování hliníku a slitin hliníku se řídí českými technickými normami. V současnosti je platné označování jak podle norem ČSN EN, tak podle norem ČSN. Normy ČSN EN mají v technické praxi přednost. Při označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN se písemné značení ČSN doplňuje šestimístnou číslicí. Podle ČSN EN písemné značení doplňuje čtyřmístná, resp. pětimístná číslice. Toto číselné označení doplňuje chemické označení. To se skládá z chemických značek, za kterými obvykle následují čísla udávající čistotu hliníku, nebo jmenovitý obsah příslušného prvku. Systém označování číslicemi je prioritní, označování chemickými značkami je pouze doplňkové.

2.3.1 Označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN

A) Označování hliníku a slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3

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]. Jednotlivé části označení následují v pořadí:

- předpona EN značí „evropská norma“ následována mezerou
- písmeno A určuje hliník
- písmeno W určuje tvářené výrobky
- spojovací čárka
- čtyři číslice označují chemické složení

V čtyřmístném číselném označení udává první ze čtyř číslic skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků:

řada 1000 – Al minimálně 99.00% 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 příloze 1 [1].

B) Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706

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]. Jednotlivé části označení následují v pořadí:

- předpona EN následována mezerou,
- písmeno A určuje hliník
- písmeno C určuje odlitky
- spojovací čárka
- čtyři číslice označují chemické složení

První z pěti číslic v pětimístném číselném označení udává skupinu slitin stejně jako u slitin pro tváření podle hlavních slitinových prvků:

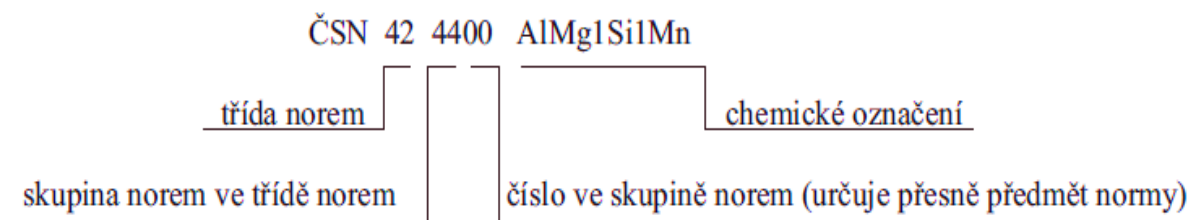
řada 1000 – Al minimálně 99.00% a více	řada 2000 – slitina AlCu
řada 3000 – slitina AlMn	řada 4000 – slitina AlSi
řada 5000 – slitina AlMg	řada 6000 – slitina AlMgSi
řada 7000 – slitina AlZn	řada 8000 – slitina Al s různými prvky

Seznam všech platných typů hliníku a slitin hliníku pro tváření je obsažen v normě: ČSN EN 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 příloze 2 [1].

2.3.2 Označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN

V ČSN normách jsou jednotlivé typy hliníku a slitin hliníku označovány vždy samostatnou normou ČSN a šestimístným číslem. Příklad šestimístného číslování za značkou ČSN: Třída norem 42 udává hutnictví, skupina norem 40 - 45 uvádí, že jde o Al nebo slitiny Al na odlitky nebo pro tvářené výrobky. Číselné označení lze také doplnit i chemickým označením tak, jak je uvedeno na obrázku 5 [1].



Obrázek 5 - Schéma označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN [1]

3 Obrobitelnost

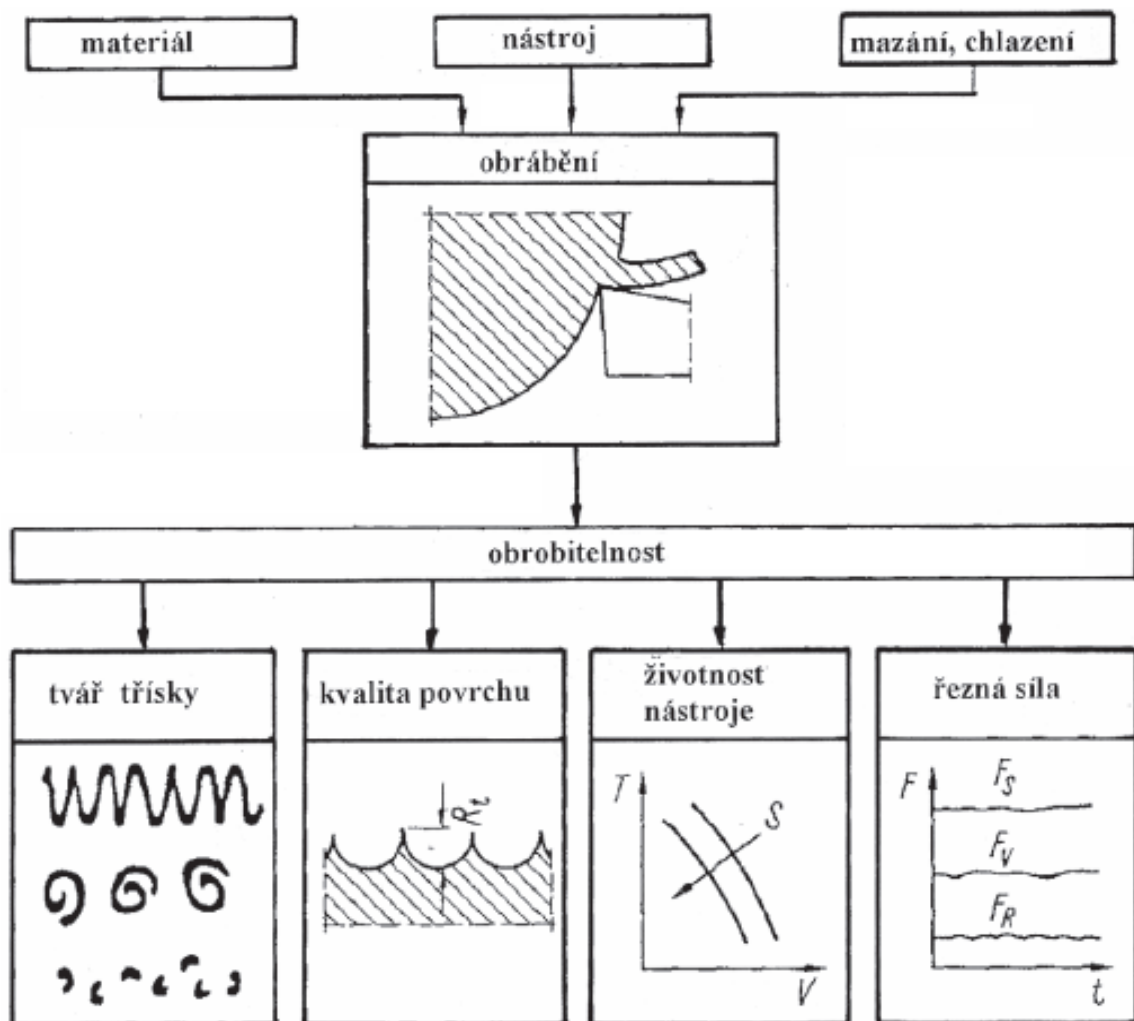
Obrobitelnost materiálu je chápána jako míra jeho schopnosti být zpracováván technologií třískového obrábění. Jedná se o souhrn fyzikálně-mechanických a technologických vlastností konkrétního materiálu, které ovlivňují řezný proces [7]. Obrobitelnost je činitel ovlivňující volbu řezných podmínek a dalších parametrů obrábění [12], je to technologický pojem, který zahrnuje vedle již zmíněných vlastností materiálu obrobku i metodu obrábění a i stav použité techniky [1]. Vlastnosti materiálu obrobku tedy nejsou jedinými účinky, které na řezný proces a tedy i obrobitelnost působí. Ta je výslednicí i dalších spolupůsobících faktorů [10], zejména:

- Způsob výroby a tepelného zpracování obráběného materiálu
- Mikrostruktura obráběného materiálu
- Chemické složení obráběného materiálu
- Fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu
- Metoda obrábění
- Řezné podmínky
- Řezné prostředí
- Geometrie nástroje
- Druh a vlastnosti nástrojového materiálu

Z uvedeného plyne, že obrobitelnost jednoho a téhož materiálu se může lišit s metodou obrábění.

V technické praxi rozlišujeme obrobitelnost při soustružení, frézování, vrtání a broušení. Parametry vystihující obrobitelnost jsou schematicky znázorněny na obrázku 6 [1]. V obrázku 6 jsou uvedeny zastaralé symboly řezných sil, které se již

nepoužívají. Symboly označující řezné síly F_s , F_v , F_R , jsou v novější literatuře označovány F_c , F_f , F_p .



Obrázek 6 - Parametry charakterizující obrobitelnost [1]

Z hlediska charakteristik je možné obrobitelnost členit na obrobitelnost absolutní a obrobitelnost relativní.

3.1 Absolutní obrobitelnost

Je odvozena od funkčních vztahů mezi parametry, které s ní souvisí, nebo určitou velikostí dané veličiny obrobitelnost charakterizující - popisující [8]. Její stanovení vyžaduje určit vzájemné vztahy výpočtu řezných sil, trvanlivosti nástroje, drsnosti povrchu ve vztahu k parametrům řezání a rovněž i poznatky o tvarování třísky ale i dalších [11]. Nejdůležitější z takových závislostí je komplexní Taylorův vztah, rovnice (1). Některé závislosti lze určit jen empiricky za podmínek co nejvíce

se blížícih provozním. Stanovení absolutní obrobiteľnosti je tudíž velmi složitý, nákladný a zdlouhavý proces, opírající se ve velké míře o experiment.

$$v_c = \frac{C_v}{a_p^{x_v} \times f^{y_v} \times T^{\frac{1}{m}}} \quad [8] \quad (1)$$

Kde:
 C_v - empirická konstanta vyjadřující vliv řezných podmínek
 v_c - řezná rychlost
 a_p - hloubka řezu
 f - posuv
 x_v, y_v, m - empirické exponenty
 T - trvanlivost nástroje

3.2 Relativní obrobiteľnost

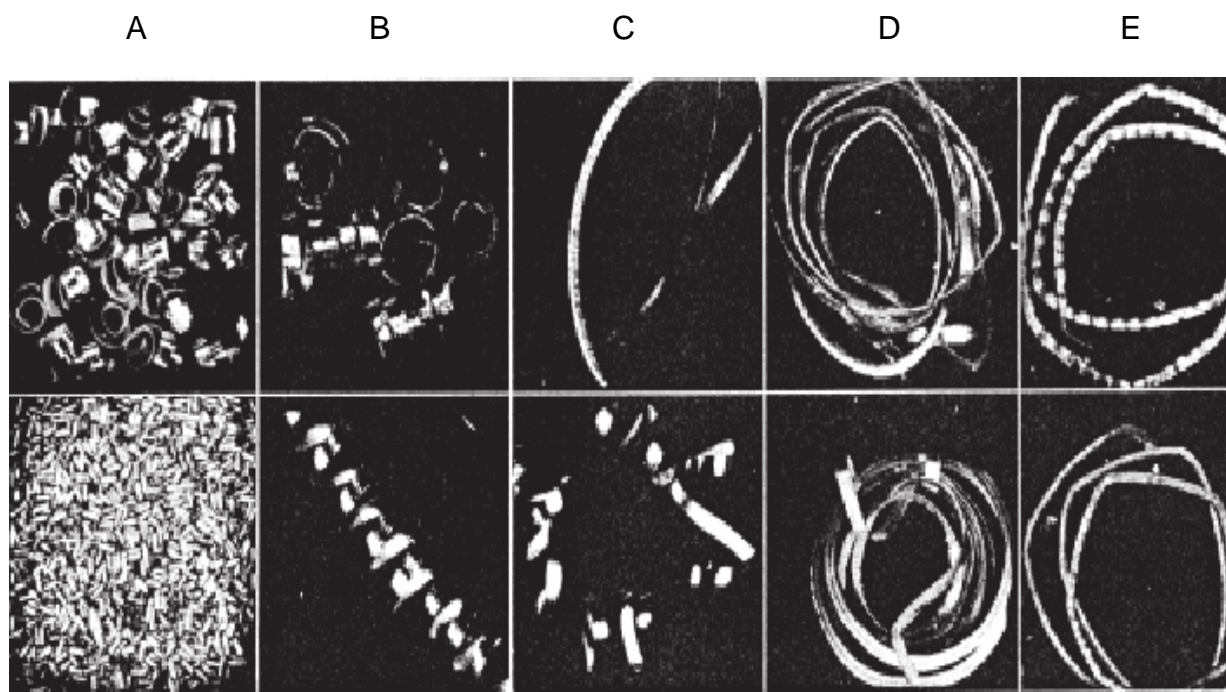
Odvozujeme ji od porovnání míry vlastnosti zkoumaného materiálu s mírou totožné vlastnosti materiálu referenčního, etalonového. Vlastnost materiálu obrobku a etalonu zjišťujeme za identických poměrů řezného procesu. Tuto závislost, poměr, vyjadřujeme jako bezrozměrný index obrobiteľnosti i_0 . Porovnáním velikostí jevů generovaných v průběhu řezného procesu při obrábění zkoumaného a referenčního materiálu, může být odvozena obrobiteľnost materiálu např. dle kvality obrobeného povrchu, životnosti nástroje, velikostí řezných sil (případně řezného odporu), tepelné bilance, či dalších hledisek [8]. Relativní obrobiteľnost hodnotíme nejčastěji z hlediska intenzity opotřebení břítu nástroje. Index obrobiteľnosti pak stanovujeme jako poměr:

$$i_0 = \frac{v_T}{v_{T_{ET}}} \quad [1] \quad (2)$$

Kde v_T je řezná rychlost jakou byl obráběn hodnocený materiál, přičemž bylo dosaženo trvanlivosti nástroje T a $v_{T_{ET}}$ je řezná rychlost, jakou byl obráběn materiál etalonový a bylo dosaženo stejné trvanlivosti nástroje T . Metod zkoušení a určování obrobiteľnosti materiálu existuje více a podrobněji jsou uvedeny např. v [8], [11], [12]. V praxi se používají takové zkoušky, které technicky a ekonomičností nejlépe vyhovují daným dílenským potřebám.

Podle schématu na obrázku 6, je jedním z důležitých parametrů při hodnocení obrobiteľnosti, exaktně těžko popsateľný tvar třísky, důležitý zejména při sériové a hromadné výrobě, kde je nutný spolehlivý odvod třísky z prostoru úběru materiálu. Pro klasifikaci tvaru třísky se používá vizuální hodnocení a rozdělení na jednotlivé kategorie. Na obrázku 7 je příklad kategorizace převzatý z [1]. Tříška je zde

rozdělena podle tvaru do pěti skupin označených písmeny A až E. Tvarů třísek z obr. 7 bylo dosaženo při obrábění materiálu o výchozím tepelném zpracování a řezných podmínkách uvedených v tab. 2 [20]. Takto vzniklé třísky vznikly obráběním identickým nástrojem. Popis tvaru ev. chování třísek, obrobitelnosti materiálu a dosažené kvality obrobeného povrchu je uspořádáno do tab. 3 [18].



Obrázek 7 - Typy třísek rozdělené do skupin dle tvaru [1]

Tabulka 2 - Materiál obrobku a řezné parametry, za nichž vznikly třísky z obr. 7 [18]

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

Tabulka 3 - Hodnocení třísek, materiálu a povrchu obrobku [18]

A	Krátká lámavá tříška, dobře obrobitelný materiál, výborná jakost povrchu obrobku
B	Drobné svitky či lámavé šupiny, dobrý až výborný povrch
C	plynulá tříška, dobrá jakost povrchu
D	plynulá tříška, vyhovující povrch
E	nevhodná tříška, nutné přestavit podmínky obrábění, aby bylo dosaženo lepšího formování třísky a lepší jakosti povrchu

Pro snazší stanovení řezných podmínek pro daný materiál jsou strojírenské materiály seřazeny v jednotném „Normativu obrobiteľnosti materiálu“ – CNN. V něm je uvedeno rozdělení materiálů podle kategorií, stanoven rozsah skupin obrobiteľnosti a zásady pro určení skupin obrobiteľnosti. Význam dělení materiálů do skupin obrobiteľnosti je ve stanovení jednotné základny pro určení optimálních řezných podmínek [7]. CNN uvádí tyto kategorie materiálů a jejich označení minuskulí do celkem devíti základních skupin.

a – litiny

b - oceli

c - těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi)

d - lehké neželezné kovy (hliník a jeho slitiny)

e - plastické hmoty

f - přírodní nerostné hmoty

g - vrstvené hmoty

h - pryže

v - tvrzené litiny pro výrobu válců.

V jednotlivých kategoriích je vždy vybrán jeden konkrétní materiál, sloužící v této skupině jako etalon obrobiteľnosti a ve vztahu k tomuto materiálu je pak stanovována relativní obrobiteľnost všech ostatních materiálů celé skupiny. Každá kategorie materiálů je dále tříděna podle stupně obrobiteľnosti do dvaceti tříd, označených čísly 1 až 20. Stupně obrobiteľnosti tvoří geometrickou řadou s koeficientem q .

$$q = \sqrt[10]{10} \approx 1,258925 \quad (2)$$

Ve třídě 1 jsou zařazeny materiály nejhůře obrobitelné, ve třídě 20 materiály nejlépe obrobitelné. Jako základní třídy obrobiteľnosti se stupněm obrobiteľnosti $i_0 = 1$ byly stanoveny pro jednotlivé skupiny materiálů třídy 11a, 14b, 12c, 12d, tabulka 4 [12]. Řezné podmínky pro daný materiál se zjistí vynásobením tabulkových hodnot základní třídy stupněm obrobiteľnosti i_0 daného materiálu [7].

Tabulka 4 - Rozdělení materiálů do tříd obrobitelnosti [12]

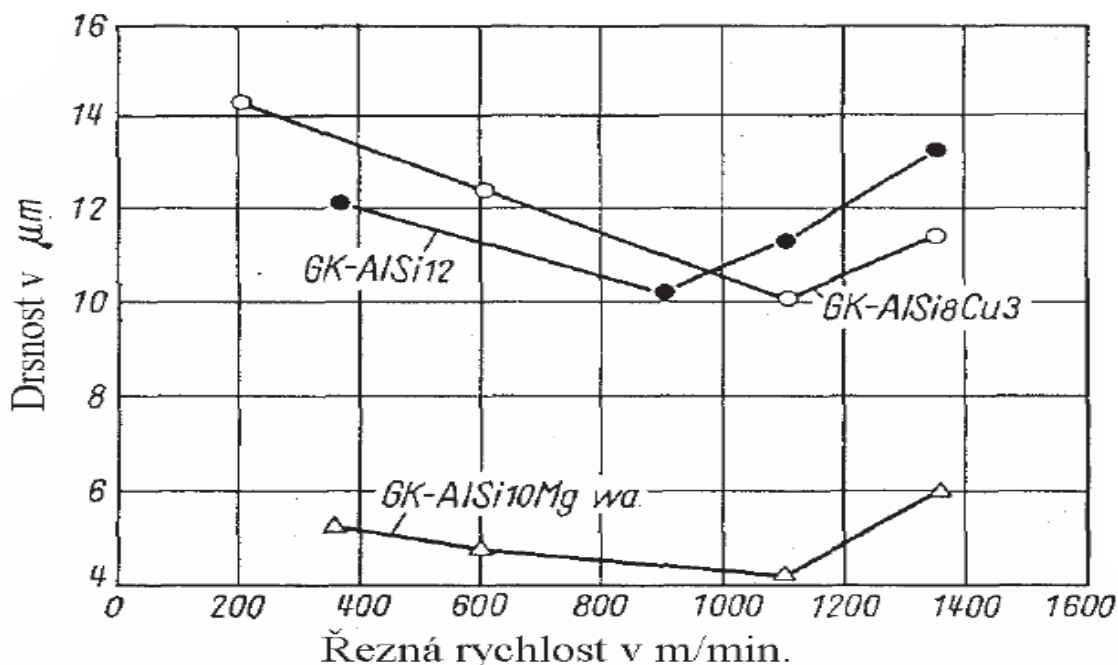
Index obrobitelnosti i_o			Materiál			
Vyjádřeno kvocientem	Střed	Rozsah	Litiny	Oceli	Slitiny	
					mědi	hliníku
$1,26^{-13}$	0,050	0,045÷0,054		1b		
$1,26^{-12}$	0,065	0,055÷0,069		2b		
$1,26^{-11}$	0,080	0,070÷0,089		3b		
$1,26^{-10}$	0,10	0,09÷0,11	1a	4b		
$1,26^{-9}$	0,13	0,12÷0,14	2a	5b	2c	
$1,26^{-8}$	0,16	0,15÷0,17	3a	6b	3c	
$1,26^{-7}$	0,20	0,18÷0,22	4a	7b	4c	
$1,26^{-6}$	0,25	0,23÷0,28	5a	8b	5c	4d
$1,26^{-5}$	0,32	0,29÷0,35	6a	9b	6c	5d
$1,26^{-4}$	0,40	0,36÷0,44	7a	10b	7c	6d
$1,26^{-3}$	0,50	0,45÷0,56	8a	11b	8c	7d
$1,26^{-2}$	0,63	0,57÷0,71	9a	12b	9c	8d
$1,26^{-1}$	0,80	0,72÷0,89	10a	13b	10c	9d
$1,26^0$	1,00	0,90÷1,12	11a	14b	11c	10d
$1,26^1$	1,26	1,13÷1,41	12a	15b	12c	11d
$1,26^2$	1,59	1,42÷1,78	13a	16b	13c	12d
$1,26^3$	2,00	1,79÷2,24	14a	17b	14c	13d
$1,26^4$	2,50	2,25÷2,82		18b	15c	14d
$1,26^5$	3,15	2,83÷3,55		19b		15d
$1,26^6$	4,00	3,56÷4,47		20b		16d

3.3 Obrobitelnost hliníku a jeho slitin

Hliník je měkký a houževnatý kov. Jeho obrábění je tím dost znesnadněné a obrobitelnost je špatná. Slitiny hliníku jsou naopak obrobitelné poměrně dobře. Tento rozdíl je způsoben strukturou, kdy přítomnost precipitátů, konstitučních fází a měkkých částic ve struktuře Al slitin, oproti čistému Al, způsobuje jejich dobrou obrobitelnost z hlediska opotřebení a sil [1]. Přesto má obrábění hliníkových slitin, navzdory relativně nízkým mechanickým vlastnostem, svá specifická úskalí. To je způsobeno jejich vysokou tepelnou vodivostí, vysokou reaktivitou hliníku, výrazným sklonem k adhezi na břit většiny rezných materiálů a nízkou teplotou tavení - maximálně do cca 650°C. Vlivem vysoké tepelné vodivosti se při obrábění odvádí značné množství tepla z místa řezu do obrobku a vysoká tepelná roztažnost hliníku má za následek tepelné deformace obrobku. Vzhledem k nízké teplotě tavení vznikají problémy s utvářením třísky, jejím odvodem a tvorbou nárůstku [14]. Obrobitelnost je dalším kritériem ve členění slitin hliníku, ve smyslu kapitoly 2.2. Podle obrobitelnosti dělíme slitiny hliníku na slitiny slévárenské (kap. 2.2.1), slitiny vhodné k tváření (kap. 2.2.2) a slitiny automatové. Etalonem obrobitelnosti Al slitin je materiál ČSN 42 4380.11

3.3.1 Obrobitelnost slévárenských slitin hliníku

Binární slitiny Al-Si je nutné obrábět nižšími rychlostmi a posuvy. Nadeutektické slitiny obsahují totiž v matici hrubé částice Si, které způsobují opotřebení nástrojů, přičemž se vzrůstajícím podílem Si roste i opotřebení nástrojů.



Obrázek 8 - Závislost drsnosti obrobeného povrchu na rezné rychlosti u slévárenských slitin Al [1]

Výjimku tvoří eutektické slitiny s cca 12% Si, u kterých je matrice natolik měkká, že během obrábění jsou tyto částice do ní vmáčknuty, čímž je potlačeno opotřebovávání nástroje. Nadeutektické Al-Si slitiny tvoří při úběru materiálu krátkou a dobře lámavou třísku. Eutektické slitiny tvoří třísky naopak dlouhé a svinuté [1]. Při obrábění s rostoucí reznou rychlostí, se u podeutektických a eutektických binárních slitin Al-Si objevuje interval, kdy do určité meze klesá drsnost obrobeného povrchu, aby se s dalším růstem rychlosti drsnost začala zhoršovat [1], obrázek 8. Slévárenské slitiny hliníku, které obsahují Cu, Mg nebo Zn jako hlavní legury, jsou dobře obrobitelné. Komplikací někdy bývá tvorba nárůstku na nástroji [1].

3.3.2 Obrobitelnost Al slitin určených pro tváření

Jde o tzv. hydronalia a duraly (kap. 2.2.2). Při správných parametrech rezného procesu a geometrie nástroje, jsou zcela bezproblémově obrobitelné. U slitin nevytvrditelných (precipitačně), právě díky jejich nezpevnění, se obráběním tvoří spojitá dlouhá tříška. Tyto slitiny je však možno zpevnit tvářením za studena [1], tzn. v podstatě skluzem a množstvím dislokací. Takto zpevněné slitiny pak vykazují zlepšenou obrobitelnost s příznivějším odvodem třísky. Vytvrditelné slitiny jsou dobře

obrobitelné s vynikající jakostí povrchu. Jsou-li nevytvrzené, obrobitelnost je snížena přibližně na úroveň nevytvrzených slitin. Tříška bývá dlouhá a stočená a v takových případech je vhodné použít lamače a utvářeče třísky.

3.3.3 Obrobitelnost automatových Al slitin

Automatové slitiny byly vyvinuty s ohledem právě na co nejlepší obrobitelnost, kterou mají zaručenou. Od předešlých slitin se liší tím, že kromě běžných legur, užívaných v Al slitinách, jsou navíc legovány prvky s nízkou teplotou tání. Tyto prvky jsou v hliníkové matici nerozpustné a ve struktuře slitiny tvoří měkké částice. Ty jsou při řezném procesu částečně nataveny, matrice slitiny je tím zeslabena, čímž dochází k snazšímu úběru a vývinu drobné a lámavé třísky. Legurami, které se pro tento účel používají, jsou zejména Pb, Bi, Sb, a Cd [1]. Teplota tání těchto legur nepřesahuje, kromě Antimonu 330 °C. Antimon pak 630 °C. Nejčastěji používanými slitinami, patřícími do této skupiny, jsou vytvrditelné slitiny řad 2xxx a 6xxx s dolegováním Pb a Bi. Nejznámější automatové slitiny jsou AlMgSiPb, AlCu4PbMg a AlCu6BiPb. Vzhledem ke škodlivému účinku Pb (ve slitinách cca 1 – 1,5 %) na živé organismy, se olovo začalo nahrazovat cínem (teplota tání 232 °C). Těmito slitinami jsou AlCuSnBi s obchodním názvem Stanal 37 a AlMgSiSnBi s obchodním názvem Stanal 32. Tyto bezolovnaté alternativy se plně vyrovnají stávající skupině olovnatých obrobitelných hliníkových slitin [15].

3.3.4 Praktický přehled hodnocení obrobitelnosti hliníkových slitin

Zkušenosti z praxe s obráběním některých důležitých slitin, zejména klasickými způsoby kusové výroby a ruční obsluhou, tedy pracovníků, kteří své znalosti získali empiricky, je uvedeno v [21].

Duraly - EN AW 20xx

Frézování automatového duralu je velmi příjemná práce, jelikož se materiál téměř nelepí na nástroj. Preventivní přimazávání je třeba pouze při hlubším celooobvodovém frézování. Pro hladký povrch při obvodovém frézování je nutný sousledný posuv, což ale platí pro všechny hliníkové slitiny. Při hlubokém frézování, rozřezávání, či velkém úběru materiálu, je třeba počítat s vnitřním pnutím a svíráním materiálu, což může pokřivit již načisto obrobené plochy a úhly.

5083 - AlMg4,5Mn

Frézování této slitiny je bezproblémové. Přimazávání proti zalepování nástroje je třeba až při větších hloubkách záběru. Opět platí, že dosažení lesklého povrchu je mírně složitější - univerzální rada je samozřejmě ostrý nástroj, vysoké otáčky, tuhý stroj, malý úběr a mazání obráběného povrchu.

5754 - AlMg3

Tato slitina (5754) je velmi měkká, takže snadno zalepí břity nástroje. Proto je třeba mazání, především při celoobvodovém frézování, nebo větší hloubce záběru. Při zvládnutí těchto nástrah, lze na materiálu 5754 docílit velmi dobrého povrchu.

6060 - AlMgSi0,5

Zatímco soustružení je poměrně útrpné, frézování je o dost příjemnější. Avšak na některá úskalí je třeba si dát pozor. Především je tento materiál náchylný na zalepení nástroje třískami. Toto riziko samozřejmě stoupá s šířkou a hloubkou záběru a s rychlostí posuvu. Pomůže jednoznačně mazání - ve většině případů stačí občas kápnout do řezu trochu oleje, u větších úběrů je třeba kontinuální proud emulze. Bez mazání také nelze očekávat perfektní povrch hned při hrubování. Pro dosažení kvalitního povrchu je nutné frézovat poslední jednu až dvě desetiny na druhý průchod. Pozor je třeba dávat při frézování dílů, kde vznikají různě tenké stěny atd. - materiál je velmi měkký a v těchto místech může docházet k deformacím, obzvláště když není zcela ostrý nástroj. Nejhůře proveditelná operace obrábění této slitiny je čelní zavrtávání nástroje, které je bez mazání a pořádně tuhého stroje téměř nemožné. Proto se vyplatí materiál do příslušné hloubky předvrtat.

6082 - AlMgSi1 (AlSiMgMn)

Tato slitina je velmi podobná slitině 6060, ale díky podstatně vyššímu podílu křemíku má vyšší pevnost, tvrdost, a lepší obrobitelnost. Nicméně všechna úskalí materiálu 6060 platí i zde, pouze s vrtáním je to o hodně lepší. Technologické vlastnosti jsou téměř stejné jako u 6060. Slitina 6082 je dobrý univerzální materiál, který sice není v žádné vlastnosti vynikající, ale také nikde zcela nepropadá. Nabídka polotovarů, v případě této poměrně žádané slitiny, je bohužel na tuzemském trhu nízká.

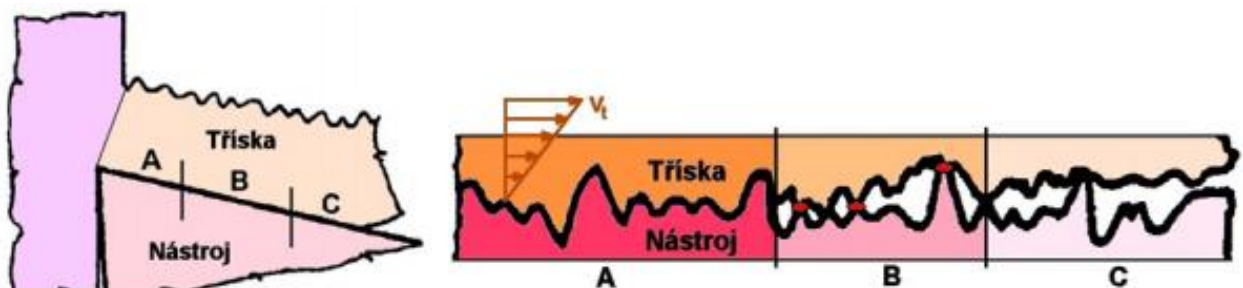
7075 - AlZn5,5MgCu

Tato slitina se často nazývá letecký dural, stejně jako další slitiny této řady, např. 7019 nebo 7022, které jsou k dostání většinou u specializovaných firem pod různými obchodními názvy jako např. Certal (7022) nebo Unidal (7019). Letecký dural 7075 je v porovnání se všemi výše uvedenými slitinami odlišný. Jeho pevnost v tahu je kolem 500 MPa a tvrdost až 160 HB, což jsou hodnoty, ke kterým se z výše uvedených slitin přibližuje snad jen automatový dural. Třískové obrábění slitiny 7075 je velmi záluďné (trochu připomíná obrábění mosazi). Frézování je jediná operace, která je u slitiny 7075 takřka bezproblémová. Materiál nemá náchylnost lepit se na nástroj, a to ani při obrábění nasucho. Tříska je drobná a pružná, takže snadno odlétává pryč a nekazí právě obrobený povrch. Díky tomu lze dosáhnout velmi

pěkného povrchu i přímo při hrubování, podmínkou je samozřejmě maximálně tuhý stroj, nástroj, i upnutí obrobku. Jak již bylo zmíněno u soustružení, tato slitina automaticky vytváří lesklý povrch. Na druhou stranu na tomto povrchu jsou dobře viditelné všechny nepřesnosti, stopy po vibraci nástroje, atd. Při obrábění takto tvrdé a houževnaté slitiny, je zapotřebí počítat s mnohem větším řezným odporem, který se blíží řeznému odporu automatových ocelí. Tomu musí odpovídat tuhost a výkon stroje, nebo naopak adekvátně menší záběr nástroje do materiálu. Při frézování kotoučovými frézami lze očekávat stejné problémy jako při řezání na pásové pile - kotouč bude mít tendenci uhýbat a podřezávat, někdy se i zcela zastaví nebo dokonce rozlomí.

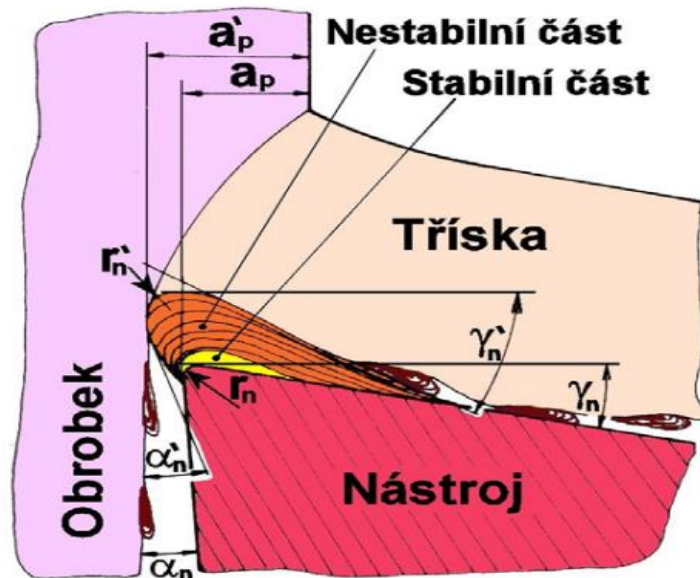
4 Nárůstek

Nárůstek je útvar tvořený plasticky zdeformovanými částicemi obráběného materiálu, který ulpěl na řezném nástroji. Kontakt čela nástroje s odchozí třískou lze rozdělit do tří oblastí A - váznutí, B - svařování, C - kluz, viz obrázek 9 [12]. V oblasti A působí nejvyšší tlak a teplota a z těchto důvodů je pohyb třísky těsně u čela nástroje brzděn až na nulovou hodnotu rychlosti v_t .



Obrázek 9 - Kontakt čela nástroje s materiálem třísky [12]

Odchod třísky z řezu je umožněn tím, že dochází k vnitřnímu pohybu mezi jednotlivými vrstvami třísky. Rychlost pohybu těchto vrstev se s rostoucí vzdáleností od čela nástroje zvyšuje tak, že od určité vrstvy se tříska pohybuje danou rychlostí v_t . Zbrzděné vrstvy pak vytvářejí na čele nástroje nárůstek, který má dvě části - stabilní a nestabilní [12], [24], viz obrázek 10.



Obrázek 10 - Nárůstek a jeho stabilní a nestabilní část [12]

a_p hloubka řezu, a'_p hloubka řezu zvětšená nárůstkem, r_n poloměr zaoblení ostří, r'_n poloměr nárůstku

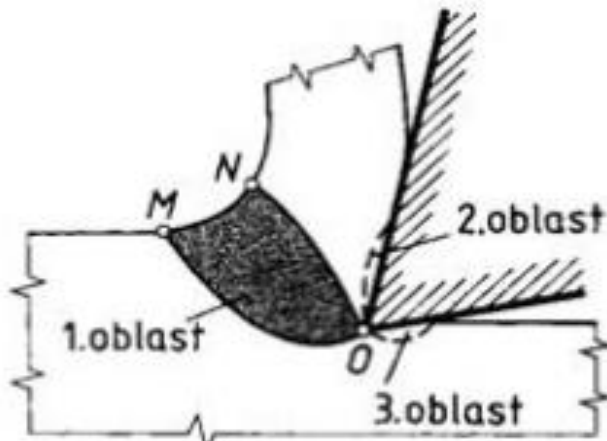
Nárůstek je produktem adheze, pro jejíž vznik jsou podstatné tyto výchozí podmínky:

- vysoká teplota
- vysoký tlak
- styk chemicky příbuzných materiálů
- styk kovově čistých povrchů, tzn. bez kontaminovaných povrchových vrstev

Tyto podmínky musejí být splněny všechny současně.

4.1 Mechanismus vzniku nárůstku

Při úběru materiálu obrobku řezáním a vlivem vždy existujícího zaoblení břitu nástroje, je tento materiál tvářen a prochází značnou plastickou deformací. Při tvorbě třísky a obrobeneho povrchu pozorujeme tři zóny plastické deformace odebíraného materiálu, jak je naznačeno na obrázku 11 [7].



1. Oblast primární plastické deformace - PPD
2. Oblast sekundární plastické deformace - SPD
3. Oblast terciální plastické deformace (povrchové zpevnění)

Obrázek 11 - Deformace a napětí v oblasti tvoření třísky [7]

Tvorba nárůstku je spjatá s oblastí sekundární plastické deformace. Tříška vzniklá v oblasti PPD odchází po čele nástroje, dosahuje teplot řádově 10^2 °C a mezi plochou čela nástroje a styčnou plochou třísky se generují tlaky 10^2 až 10^4 MPa [16]. Tyto poměry, spolu s faktem, že styk třísky a nástroje se uskutečňuje zpočátku jen po vrcholcích mikrone rovností chemicky čistých povrchů, které byly očištěny předešlým kontaktem, vedou k uplatnění adhezních sil. Ty způsobují lokální svaření nástroje a třísky, obrázek 12. Další pohyb třísky je možný jen přerušením těchto vazeb. To vede ke vzrůstu tečných napětí, která převyšují τ_k již v oblasti PPD zpevněného materiálu třísky. Tím se odchází materiál v okolí styku s čelem nástroje znovu plasticky deformuje a dochází k jeho SPD [16].



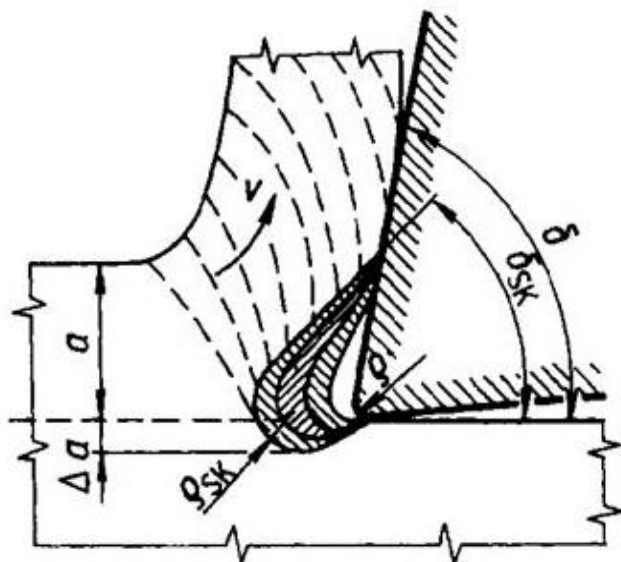
1 – porušení v materiálu obrobku, vznik nárůstku

2 – porušení v místě spoje, důsledek málo pevného adhezního spoje

3 – porušení v materiálu nástroje je jeho adhezním opotřebením

Obrázek 12 - Adhezní spojení v místě bodového styku [8]

Dojde-li k porušení vzájemné vazby v místě 1, obr. 12, je přerušena kohezní pevnost odcházejícího materiálu a část materiálu třísky zůstane spojena s nástrojem. Tím vzniká zárodek nárůstku. Tento děj probíhá bez přerušení, kontinuálně a množství ulpělého materiálu roste, jak je znázorněno na obrázku 13 [16]. Tím se zvětšuje jeho plocha vystavená toku odchozího materiálu a tím současně i síly, které na něho působí. V obrázku je uveden úhel řezu δ , který se v novější literatuře označuje δ_n a tloušťka odřezávané vrstvy a , která má mít označení a_p .

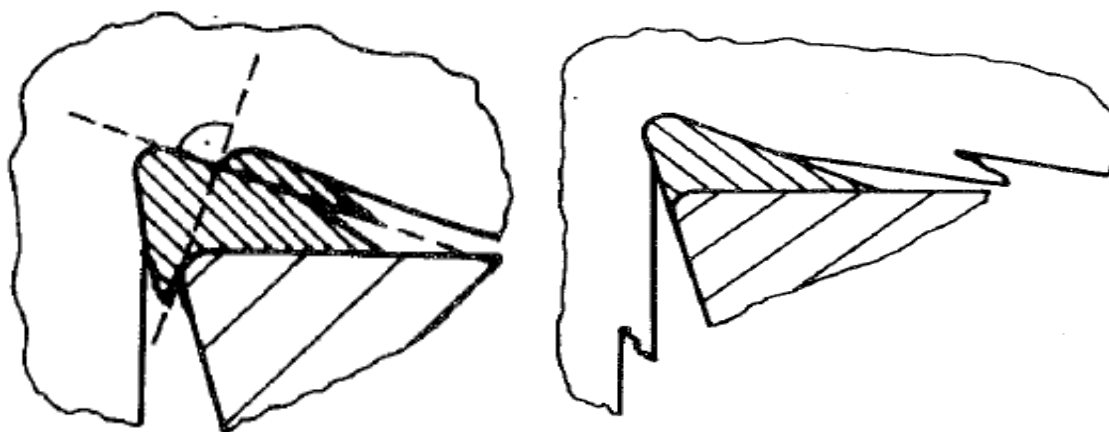


Obrázek 13 - Postupné vytváření nárůstku [16], kde:

a_p - tloušťka odřezávané vrstvy; Δa - zvětšení tloušťky odřezávané vrstvy; p - poloměr zaoblení ostří; v - rychlost odchodu třísky; p_{sk} - skutečný poloměr ostří; δ_n - úhel řezu, δ_{sk} - skutečný úhel řezu

V jistém okamžiku již není nárůstek schopen těmto rostoucím silám odolávat a nastane jeho porušení. Nárůstek se, pokud je jeho pevnost velká, oddělí od nástroje celý, čímž vzniká adhezní opotřebení nástroje, anebo se v případě jeho nižší pevnosti rozpadne a odchází částečně s třískou a částečně s obrobenou plochou a zhoršuje tím její jakost.

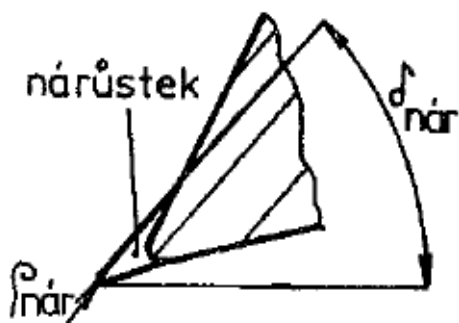
Na obrázku 14 [8] je zachycen vnitřní rozpad nárůstku podle znázorněných kluzových systémů. Plynule přitom začíná tvorba nárůstku nového. Frekvence rozpadu nárůstku bývá 10^2 až 10^3 Hz a může být příčinou kmitání systému stroj – nástroj – obrobek [8]. Za určitých řezných podmínek tvoří nárůstek, nebo jen jeho část, tzv. váznoucí oblast, na obr. 9 oblast A, která je součástí oblasti PPD a není ovlivněna třením a SPD. Ve váznoucí oblasti se tříška proti břítu nepohybuje, její materiál je zde namáhán všestranným tlakem a bývá na břítu či nárůstku navařen zastudena. Váznoucí oblast představuje část původního nárůstku, nebo část navazující na nárůstek vytvořený třením a SPD [11].



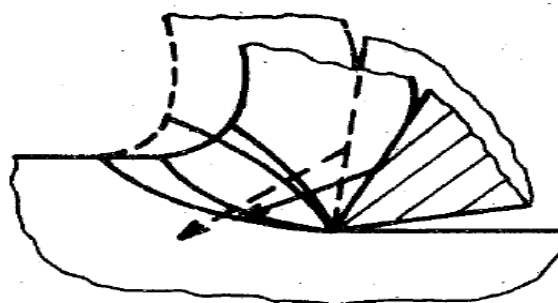
Obrázek 14 - Rozpad a odchod částic nárůstku s třískou a plochou řezu [8]

4.2 Tvar nárůstku

Nárůstek mění geometrii nástroje a může nabývat ostrého či zaobleného tvaru. Ostrý tvar, viz obrázek 15, má malý poloměr zaoblení $\rho_{nár}$ a zmenšuje úhel řezu nástroje na $\delta_{nár}$. Tím se oblast PPD stáčí směrem od obrobku a zužuje se, jak je naznačeno na obrázku 16, klesá součinitel přechování a měrný řezný odpor, čímž klesá i řezná síla. Její směr zůstává přibližně zachován [8].



Obrázek 15 Geometrie ostrého nárůstku [8]



Obrázek 16 Vliv úhlu řezu na polohu a velikost oblasti PPD [8]

Zaoblené tvary nárůstku bývají různé, viz obr. 17 [8]. Obecně vzato zvětšují poloměr ostří nástroje a tím zvětšují oblast PPD, kterou stáčí směrem do obrobku. Rezná síla roste, obrábění se znesnadňuje.



Obrázek 17 - Zaoblené tvary nárůstku [8]

Zaoblený tvar nárůstku je příznačný pro obrábění litin, kdy nárůstek bývá malých rozměrů a pro obrábění slitin hliníku, kdy může vzniknout masivní nárůstek s výškou až několik milimetrů.

Nárůstek se vyznačuje vysokou pevností a tvrdostí, ta může být 2 až 5 krát větší než tvrdost materiálu obrobku. Z obr. 15 je patrné, že nárůstek mění úhel řezu a poloměr ostří, prakticky přebírá funkci břitu. Vyvine-li se nad původní ostří, v podstatě chrání nástroj, který tím není v interakci s obrobkem. Přesto je nárůstek nežádoucím jevem, protože jeho vznik, růst, rozpad a geometrické poměry je neřízený a nepředvídatelný jev vyvolávající kolísání řezných sil a zhoršuje drsnost obrobkové plochy. Nárůstek se tvoří nejčastěji u hliníku a jeho slitin. Litiny mají malou plasticitu, takže je u nich tvorba nárůstku minimální. Nárůstek se neobjevuje při malých řezných rychlostech do $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a při vyšších řezných rychlostech od $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

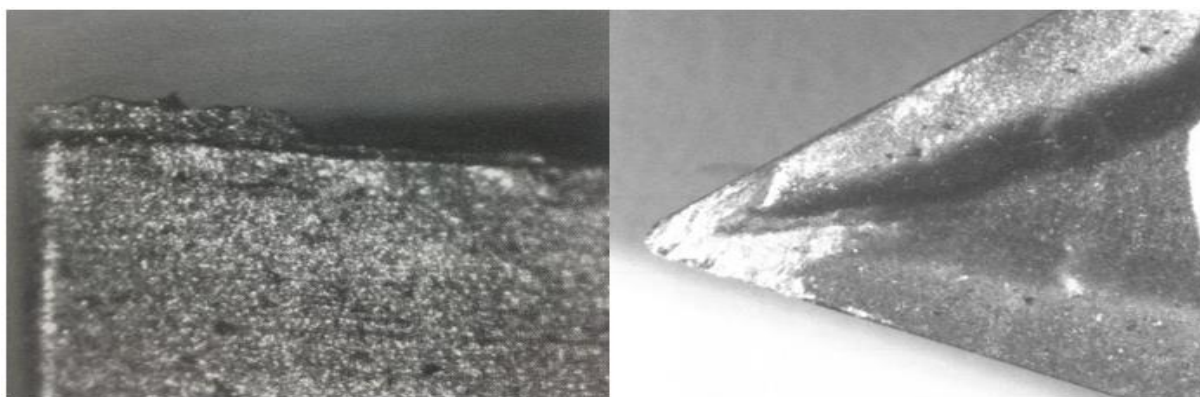
4.3 Tvorba nárůstku při obrábění Al slitin

Zákonitosti tvorby nárůstku jsou do jisté míry popsány pro uhlíkové oceli, které jsou nejvíce používaným konstrukčním materiálem, resp. bývají publikovány vždy pro konkrétní ocel, nejčastěji 12 050 (60) coby představitel této skupiny ocelí. Pro ostatní materiály, a tedy i slitiny hliníku, nejsou závislosti vzniku nárůstku detailně popsány [8]. Tento stav je dán jednak širokým spektrem Al slitin, za druhé faktem, že eventuální vznik nárůstku je jev doprovázející konkrétní řezný proces, běžící při konkrétních podmínkách a zkoumání zákonitostí tvorby nárůstku pro různé možné kombinace parametrů řezného procesu (materiálů obrobku – nástrojů - řezných podmínek a prostředí), je až neúměrně náročný úkol.

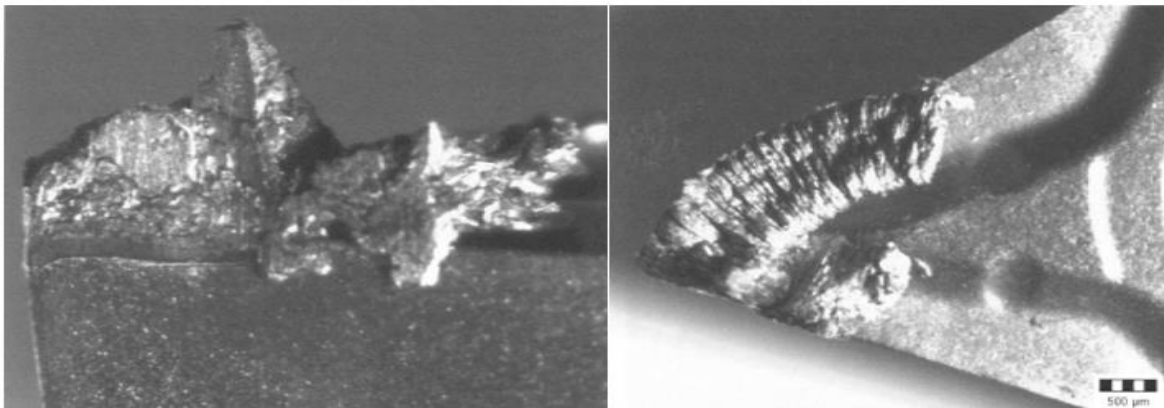
Než prakticky provést tato zkoumání, je snazší dosáhnout takových poměrů řezného procesu, kdy se nárůstek vůbec netvoří. Ty u Al slitin nastanou, jestliže teplota řezání překročí 450°C [8], kdy styk tříška-nástroj získá charakter plošného styku, čímž je znemožněna adheze a vyloučena tvorba nárůstku. Vzhledem k faktu, že teplotu řezání zásadně ovlivňuje řezná rychlost, je to právě tento parametr, kterým se předchází tvorbě nárůstku. To znamená, že při obrábění Al slitin se především volí vyšší řezné rychlosti. Některé, zejména starší stroje nemusí však disponovat takovými otáčkami či výkonem, za kterých by se generovala teplota řezání nad 450°C, zaručující obrábění bez tvorby nárůstku. V takových případech se využívá procesních kapalin s mazacími, chladícími a čistícími účinky.

Vedle výchozích podmínek vzniku adheze, kap. 4, podporuje vznik nárůstku zpevňovací schopnost materiálu obrobku [8]. Tuto schopnost mají zvýšenu slitiny ke tváření Al-Mg (řada 5000 - hydronalia) [1], nejvíce z nich AlMg5. Proto lze od těchto materiálů, při jejich průchodu plastickou deformací související s úběrem materiálu, očekávat sklon k tvoření nárůstku na břítu nástroje.

Na tvorbu nárůstku má nezanedbatelný vliv intenzita tření mezi obrobkem a nástrojem. Oporu pro toto tvrzení lze nalézt v [19], kde je zkoumán vliv očkování hliníkové slitiny AlSi7Mg0,3 očkovadlem AlTi5B1 (za účelem zjemnění struktury materiálu pro zlepšení technologických vlastností), na opotřebení nástroje při jejím obrábění. Slitina má obecně sklon k tvorbě nárůstku, obr. 18, který se zvyšuje s rostoucím podílem Ti ve slitině, viz obrázek 19. Příčinou je pravděpodobně to, že Ti má mezi kovy nejvyšší koeficient tření s jakýmkoli jiným materiálem [19].



Obrázek 18 - Nárůstek po obrábění vzorku s podílem 0 % Ti [19]

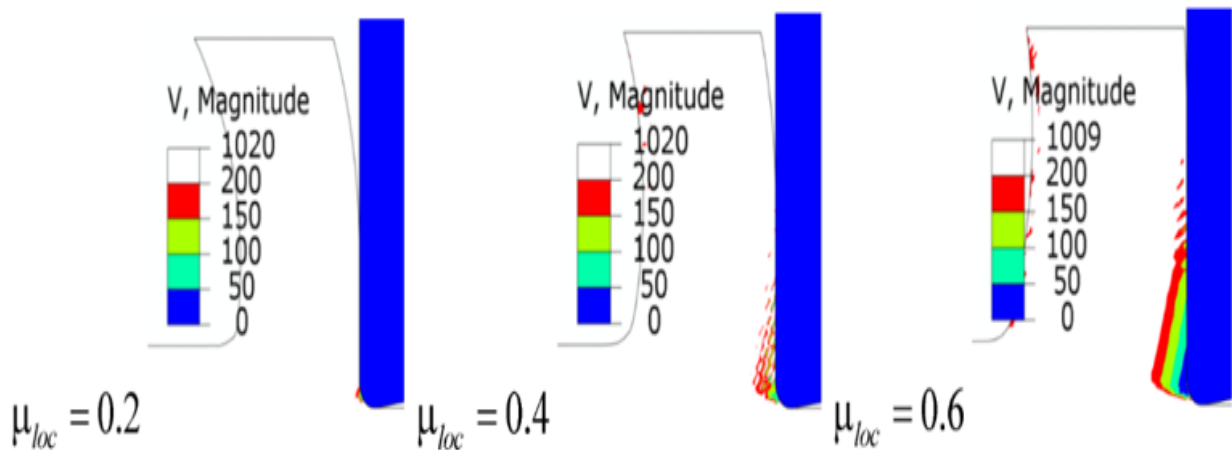


Obrázek 19 - Nárůstek po obrábění vzorku s podílem 0.2 % Ti [19]

Stavu z obrázků 18 a 19 bylo dosaženo, kromě zvýšeného podílu Ti ve slitině, za jinak stejných řezných podmínek.

Vliv tření na tvorbu nárůstku je popsán i v [20], kde je sledován vliv rostoucího koeficientu tření mezi třískou (mat. AW2024) a nástrojem ze slinutého karbidu (WC-Co) na tvorbu nárůstku, bez použití řezné kapaliny. Je zde konstatováno, že podmínky pro vznik nárůstku se díky zvětšující se zóně váznutí třísky na čele nástroje, jako důsledek rostoucího koeficientu tření, zlepšují. Na obr. 20 jsou barevně odlišeny oblasti o stejné rychlosti odcházejícího materiálu třísky, pro tři různé součinitele tření mezi nástrojem a třískou. V extrémní, tj. nulové rychlosti odchodu třísky, může dojít k prolnutí obou komponent, tvoří se nárůstek, což je v souladu s kap. 4.1. Z obr. 20 je patrné, že u největšího koeficientu tření je váznoucí oblast největší a za těchto podmínek se tedy bude tvořit nárůstek nejprogresivněji [20].

Významný vliv na tvorbu nárůstku má i materiál nástroje. U slinutých karbidů je známa zvýšená tendence k tvorbě nárůstku, navíc s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu (WC), obsahu kobaltu (Co) a drsností řezné hrany a povrchu řezného nástroje se tento problém umocňuje. Zvýšení kteréhokoli uvedeného parametru se projeví v progresi nárůstku na řezném nástroji. U nástrojů s povrchovou úpravou diamantovým mikroleštěním se v důsledku nižší drsnosti adheze snižuje. Tvorbu nárůstku při obrábění slitin hliníku omezuje aplikace ochranných vrstev s nízkým koeficientem tření $m = 0,1 \div 0,2$ (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 ($< Si12\%$) z důvodu nízké afinity a adheze uhlíku a hliníku a vysoké ořezuvzdornosti diamantu [14].



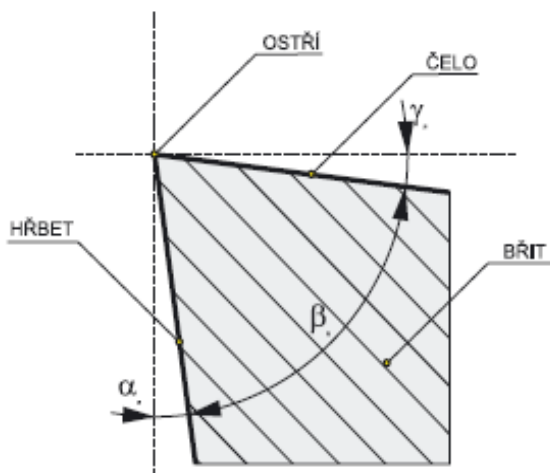
Obrázek 20 - Vliv koeficientu tření μ na rychlost toku materiálu na rozhraní tříška – nástroj [20]

5 Řezné podmínky při obrábění Al slitin

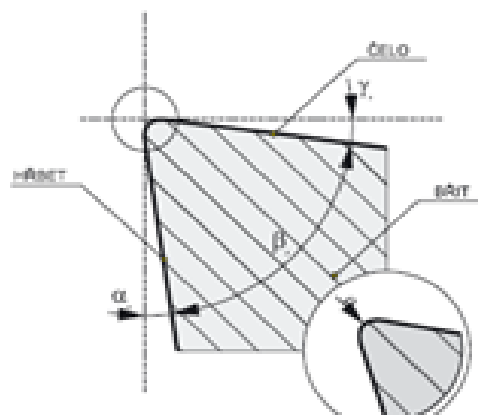
Důsledkem výše uvedených specifických vlastností těchto hliníkových materiálů, kap. 2.2, je volba řezných podmínek, odlišná od jiných konstrukčních materiálů. Odlišnost spočívá nejčastěji ve velikosti řezné rychlosti a geometrii nástroje. Řezná rychlost může špičkově dosahovat i více než 2500 m/min, samozřejmě je ovšem její přizpůsobení konkrétním podmínkám. Geometrie nástroje je obecně vzato dána ostrým pozitivním břitem, tzn. s malým úhlem břitu β_n , velkým úhlem čela γ_n a relativně větším úhlem hřbetu α_n .

Geometrie nástroje vypadá podle obr. 21, resp. obr. 22, kde je vyobrazen břit s rektifikovaným ostřím, což je úprava ostří mírným zaoblením, s cílem snížení mikronerovností řezné hrany. Rektifací ostří se dosahuje zvýšení odolnosti břitu proti mechanickému porušení, zejména porušení křehkým lomem nebo tzv. mikrovýdrolením.

V obrázcích 21 a 22 jsou označeny úhly hřbetu, břitu a čela bez indexů, mají být označeny α_n , β_n , γ_n .

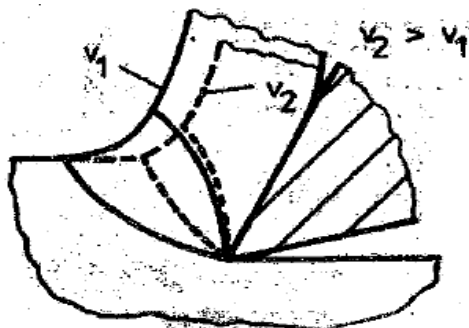


Obrázek 21 - pozitivní geometrie nástroje

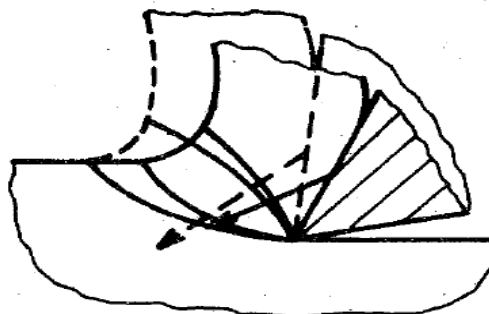


Obrázek 22 - pozitivní geometrie nástroje s rektifikovaným ostřím

Z pozitivní geometrie nástrojů plyne zmenšený úhel řezu δ_n , což má za následek zúžení a stočení oblasti PPD k čelu nástroje, obázek 24. Vysoké řezné rychlosti řezu slitin hliníku mají stejný účinek na oblast PPD, jako malý úhel řezu, obrázek 23. Těmito mechanismy je snížen měrný řezný odpor a tím i řezná síla. V novější literatuře se řezné rychlosti v_1 , v_2 označují v_{c1} , v_{c2} .



Obrázek 23 - Vliv řezné rychlosti na PPD [8]



Obrázek 24 - Vliv úhlu řezu na PPD [8]

Protichůdný vliv na řezný odpor, řeznou sílu, měrný skluz a součinitel pěchování má drsnost povrchu nástroje. Proto se často funkční plochy nástrojů lapují a některé i povlakuji tvrdými kluznými vrstvami.

Při obrábění slitin hliníku, často houževnatých materiálů, může vznikat problém s odvodem třísky. Tvoří-li se dlouhá spojitá tříska, geometrie nástroje musí zabezpečit bezproblémový odvod třísky. Za tím účelem se nástroje vybavují utvářeči třísek, někdy jsou doplněny i lamačem třísek.

Dle katalogu [22] jsou slitiny hliníku zařazeny do skupiny obráběného materiálu N. Ta je dále rozdělena na skupiny:

N₁ - Hliník a jeho měkké slitiny Al (s nízkým obsahem Si) zejména tvářené a lité (nevytvrzené), tvrdost do 100HB

N₂ - Tvrdé slitiny Al, zejména lité vytvrzené (s vysokým obsahem Si).

5.1 Řezný materiál

Dnes používané řezné nástroje jsou velmi často vybaveny vyměnitelnými břitovými destičkami. Univerzální použití mají vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů, obrázek 25. Materiál destiček zachovává dobrou houževnatost při dostatečné otěruvzdornosti a vysoké stabilitě řezného procesu. Tyto požadavky splňují vyměnitelné břitové destičky typu WC-Co. Speciálně pro obrábění slitin hliníku jsou určeny jemnozrnné nepovlakované druhy slinutých karbidů. Problém vzniká při obrábění slitin s vyšším obsahem abrazivního křemíku. Velké, tvrdé částice křemíku vyvolávají nadměrné a rychlé opotřebení nástroje. Pro tento druh slitin jsou určeny nástroje, představující kombinaci houževnatého, otěruvzdorného jemnozrnného submikronového substrátu a moderního typu PVD povlaku sestávajícího ze supertvrdých nanokrystalických kompozitních multivrstev (TiAl)N + Si₃N₄ v celkové tloušťce 3 ÷ 5 mm.

Mezi nástrojový materiál vhodný pro opracování Al slitin patří i nástroje, které

jsou opatřeny diamantovým povlakem nebo přímo osazené diamantem. Další možností je použití vyměnitelných břitových destiček z polykrystalického diamantu, dále jen PD.

Destičky z PD se uplatňují především při dokončovacích operacích a také při obrábění velmi vysokými řeznými rychlostmi. Vhodné jsou i tam, kde je požadavek na vysokou jakost obrobené plochy a vysokou přesnost rozměrů. Z ekonomických důvodů by se destičky z PD měli používat v hromadné a velkosériové výrobě, kde je předpoklad návratnosti tohoto poměrně drahého řezného materiálu.



Obrázek 25 - Řezná destička Mitsubishi AXD4000 pro opracování lehkých slitin [23]

5.2 Geometrie nástrojů

Jak již bylo uvedeno, pro Al slitiny se uplatňuje pozitivní geometrie [23]. Z katalogů výrobců nástrojů je možné zjistit rozsah používaných nástrojových úhlů. Ty nabývají těchto hodnot:

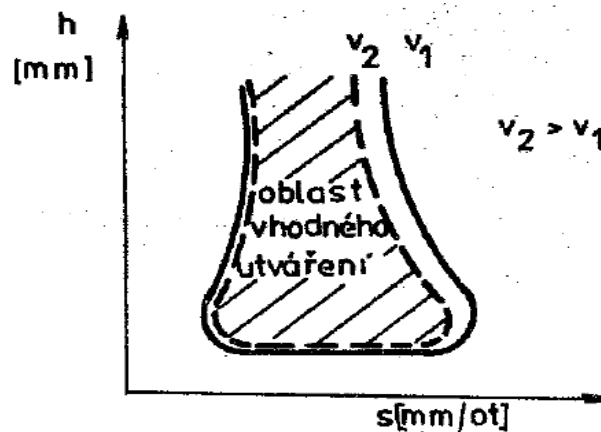
- Úhel hřbetu α_n bývá často v úzkém intervalu 6° až 8°
- Úhel čela γ_n má rozmezí 25° až 32°
- Úhel břitu β_n mívá rozsah 50° až 59°
- Poloměr špičky nástroje r_ϵ má rozsah od 0,05 mm až 1,00 mm.

Tyto hodnoty je ovšem nutné chápat jako startovní nastavení, nejsou dogmatem a bude-li to vyžadovat řezný proces či ekonomičnost obrábění, lze je pochopitelně upravit.

Volba konkrétní řezné destičky, jejího materiálu a geometrie, je závislá na mnoha faktorech jako jsou druh obráběného materiálu (N_1 nebo N_2), způsob obrábění, záběrové podmínky (lehké, střední, těžké), plynulost řezu apod. Významný vliv má i hledisko ekonomické.

5.3 Řezné rychlosti, posuvy

Řezné rychlosti již byly zmíněny a ve startovním nastavení se řídí pokyny výrobce použitého řezného materiálu. Důležitým faktorem je nastavení posuvu a hloubky řezu. Opět zde záleží na konkrétnostech řezného procesu, je však záhodno, aby vztah posuv – hloubka řezu ležel v oblasti vhodného utváření třísky, obrázek 26 [8]. V Obrázku jsou uvedeny starší symboly označující řezné rychlosti v_1 a v_2 , hloubku řezu h a posuv s . tyto parametry se nyní označují: řezné rychlosti v_{c1} , v_{c2} , hloubka řezu a_p , posuv f .



Obrázek 26 - Diagram oblasti vhodného utváření třísky [8]

Tento problém je v katalogích a doporučených řezných podmínkách výrobců nástrojů respektován a zohledněn.

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo shrnutí dostupných informací o současném stavu poznání o tvorbě nárůstku při obrábění Al slitin, jejich obrobiteľnosti a používaných řezných podmínkách při jejich obrábění.

Tvorba nárůstku je komplikovaný jev ovlivněný mnoha faktory. Současné vysvětlení tohoto nežádoucího jevu neumožňuje jeho zobecnění a případná doporučení, existují-li vůbec, pro jeho eliminaci, se vztahují jen pro jediný konkrétní řezný proces, tedy materiály obrobku, nástroje a řezné podmínky. Důležitým univerzálním poznatkem však je, že nad teplotou řezání 450°C se u slitin hliníku nárůstek netvoří.

Vedle běžných metod stanovení obrobiteľnosti slitin hliníku se jako vhodné kritérium pro její stanovení osvědčil tvar třísky. Tímto kritériem dokážeme částečně zohlednit i komplikace s nárůstkem při daném procesu. Při obrábění jsou přednostně požadovány pouze určité druhy třísek, které jsou z hlediska jejich odvodu z místa řezu, plynulosti a bezvadnosti procesu nejvhodnější.

Ve stručnosti je zde poukázáno na specifika řezných podmínek při obrábění Al slitin, kterým dominuje přísně pozitivní geometrie nástroje a vyšší řezná rychlost. Ty ve spojení s SK či PD řeznými nástroji, jejichž používání se při obrábění Al slitin v praxi ustálilo, zajišťují kvalitní a ekonomické obrábění.

Zajímavostí je, že za posledních 25 let se téměř všechny parametry řezného procesu o řád posunuly k vyšším výkonům.

7 Seznam použitých značek a symbolů

Al_2O_3	-	oxid hlinitý
HNO_3	-	kyselina dusičná
H_2SO_4	-	kyselina sírová
w_B	-	koncentrace prvku B
ČSN	-	česká technická norma
EN	-	evropská norma
DIN	-	německá národní norma
T	min	trvanlivost nástroje
v_c, v_t, v_{tET}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	řezná rychlost
f	$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$	posuv
i_0	-	index obrobitelnosti
CNN	-	celostátní normy a normativy
a_p	mm	hloubka řezu
a_p	mm	hloubka řezu zvětšená nárůstkem
r_n	mm	poloměr zaoblení ostří
$r_n, \rho_{nár}$	mm	poloměr nárůtku
α_n	°	úhel hřbetu nástroje
α_n	°	úhel hřbetu změněný nárůstkem
γ_n	°	úhel čela nástroje
γ_n	°	úhel čela nástroje změněný nárůstkem
δ_n	°	úhel řezu
$\delta_{nár}$	°	úhel řezu zmenšený nárůstkem
β_n	°	úhel břítu
PPD	-	primární plastická deformace
SPD	-	sekundární plastická deformace
Hz	s^{-1}	frekvence
μ, μ_{loc}	-	součinitel tření
DLC	-	diamantu podobné uhlíkové povlaky
TiB_2	-	diborid titanu
MoS_2	-	disulfid molybdenu
Si_3N_4	-	nitrid křemíku
SK	-	sliutý karbid
WC-Co	-	sliutý karbid složený z karbidu wolframu a kovového kobaltu
PVD	-	fyzikální depozice vrstev (povlakování na fyzikálních principech)
PD, PKD	-	polykrystalický diamant (spékaný diamant s kovovou spojovací fází)
α	-	tuhý roztok
α'	-	přesycený tuhý roztok
τ_k	MPa	kritické smykové napětí

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] Periodická tabulka hliník [online]. [cit. 2018-07-09]. Dostupné z: <https://www.tabulka.cz/prvky/ukaz.asp?id=13>
- [3] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK a Přemysl RYŠ. *Nauka o materiálu I. 2. rozš. a přeprac.* vyd. Praha: Academia, 1966.
- [4] KŘÍŽ, Rudolf. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v 8 svazcích*. Praha: Scientia, 1993. ISBN 80-85827-23-9.
- [5] Hliník a slitiny hliníku [online]. 2005 [cit. 2018-06-23]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf
- [6] Tepelné zpracování hliníkových slitin – teorie [online] [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20hlin%C3%ADkov%C3%BDch%20slitin.pdf?redirected>
- [7] D. DRIENSKY– P. FÚRIK–T. LEHMANOVÁ–J. TOMAIDES.: *Strojní obrábění I* / SNTL 1988 L13-C1-II-84/26080
- [8] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [9] VASILKO, Karol a Jan MÁDL. *Teorie obrábění*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012. ISBN 978-80-7414-460-8.
- [10] SADÍLEK, Marek a Jaroslav DUBSKÝ. *Obrábění I: výběr přednášek*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3857-1.
- [11] CHLADIL, Josef a Erich MOUKA. *Teorie obrábění: Určeno pro posl. fak. strojní*. 3., přeprac. vyd. Brno: VUT, 1989. ISBN 8021410086.
- [12] HUMÁR A.: Technologie I, Technologie obrábění – 1. Část [online] Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [13] BUDA, Ján, Karol VASILKO a Ján SOUČEK. *Teória obrábania: celoštátna vysokoškolská učebnica pre strojnícke fakulty vysokých škôl. 2.*, přeprac. vyd. Bratislava: Alfa, 1988. Edícia strojárskej literatúry (Alfa).
- [14] *Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>

- [15] Nové obrobiteľné slitiny hliníku bez olova [online] [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-obrobitelne-slitiny-hliniku-bez-olova.html>
- [16] PŘIKRYL, Zdeněk a Rosa MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění: učebnice pro vysoké školy*. 3., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [17] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [18] PŘIBIL M.: Obrobiteľnosť hliníkových slitin. Bakalárska práca [online] 2017 [cit. 2018-06-11]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73073/F2-BP-2017-Pribyl-Martin-Bakalarska%20prace%20-%20Obrobiteľnosť%20hliníkových%20slitin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] NÁPRSTKOVÁ N.: Vliv očkování slitiny AlSi7Mg0,3 očkovadlem AlTi5B1 na opotřebení nástroje při jejím obrábění. *Stroj. technologie*, ročník XVII, říjen / prosinec 2012 číslo 5 a 6, ISSN 1211-4162, Universita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem
- [20] BADIS HADDAG, SAMIR ATLATI, MOHAMED NOUARI, ABDELHADI MOUFKY: Dry Machining Aeronautical Aluminum Alloy AA2024-T351: Analysis of Cutting Forces, Chip Segmentation and Built-Up Edge Formation, Lorraine University, France 2016 Dostupné z: <http://www.mdpi.com>
- [21] SPÁČIL P.: *Praktický přehled hliníkových slitin dostupných v ČR* [online] [cit. 2018-06-24]. Dostupné z: <http://www.kovo-spacil.cz/alloys/cz.htm>
- [22] Pramet katalog 2017 [online], [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cs-cz/newssite/Pages/Pramet-catalogue-2017-launched.aspx?country=cz>
- [23] Zvláštnosti třískového obrábění vybraných materiálových skupin [online] [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/zvlastnosti-triskoveho-obrabeni-vybranych-materialovych-skupin-12>
- [24] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění: průvodce tvorbou třísky*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-498-6.
- [25] Bauxit - <http://sanseibsn.com/kousanbutu/bauxite/>
- [26] Hliník - <https://www.purewaterproducts.com/water-problems/aluminum>
- [27] Dělení Al slitin podle účelu použití - http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/pr ednasky/09%20-%20Nezelezne%20kovy%20A.pdf

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Bauxit a hliník [1].....	8
Obrázek 2 - Rozdělení hliníkových slitin [6].....	10
Obrázek 3 - Dělení Al slitin podle účelu použití - zjednodušený přehled	11
Obrázek 4 - Princip a postup precipitačního vytvrzování [17].....	12
Obrázek 5 - Schéma označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN [1].....	16
Obrázek 6 - Parametry charakterizující obrobitelnost [1].....	17
Obrázek 7 - Typy třísek rozdělené do skupin dle tvaru [1].....	19
Obrázek 8 - Závislost drsnosti obrobeného povrchu na řezné rychlosti	22
Obrázek 9 - Kontakt čela nástroje s materiálem třísky [12].....	25
Obrázek 10 - Nárůstek a jeho stabilní a nestabilní část [12].....	26
Obrázek 11 - Deformace a napětí v oblasti tvoření třísky[7].....	26
Obrázek 12 - Adhezní spojení v místě bodového styku [8].....	27
Obrázek 13 - Postupné vytváření nárůstku [16], kde:.....	27
Obrázek 14 - Rozpad a odchod částic nárůstku s třískou a plochou řezu [8]	28
Obrázek 15 Geometrie ostrého nárůstku [8].....	29
Obrázek 16 Vliv úhlu řezu na polohu a velikost oblasti PPD [8]	29
Obrázek 17 - Zaoblené tvary nárůstku [8].....	29
Obrázek 18 - Nárůstek po obrábění vzorku s podílem 0 % Ti [19]	30
Obrázek 19 - Nárůstek po obrábění vzorku s podílem 0.2 % Ti [19]	31
Obrázek 20 - Vliv koeficientu tření μ na rychlost toku materiálu na rozhraní třísky – nástroj [20].....	32
Obrázek 21 - pozitivní geometrie nástroje	32
Obrázek 22 - pozitivní geometrie nástroje s rektifikovaným ostřím.....	32
Obrázek 23 - Vliv řezné rychlosti na PPD.....	33
Obrázek 24 - Vliv úhlu řezu na PPD	33
Obrázek 25 - Řezná destička Mitsubishi AXD4000 pro opracování lehkých slitin [23]	34
Obrázek 26 - Diagram oblasti vhodného utváření třísky [8].....	35

10 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Vybrané vlastnosti hliníku [1], [2]</i>	str. 9
<i>Tabulka 2 - Materiál obrobku a řezné parametry, za nichž vznikly třísky z obr. 7 [18]</i>	str. 19
<i>Tabulka 3 - Hodnocení třísek, materiálu a povrchu obrobku [18]</i>	str. 20
<i>Tabulka 4 - Rozdělení materiálů do tříd obrobitelnosti [5]</i>	str. 21

11 Příloha 1

ČSN EN 573 - 3 Hliník a slitiny hliníku

Chemické složení a druhy tvářených výrobků

Přehled některých vybraných slitin se současným porovnáním těchto druhů slitin podle ČSN a DIN 1725-1

Technicky čistý hliník - řada 1000					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-1050A	EN AW-Al 99.5(A)	ČSN 42 4004 ČSN 42 4005	Al 99.5 E Al 99.5	3.0255	Al 99.5
EN AW-1070A	EN AW-Al 99.7(A)	ČSN 42 4003	Al 99.7	3.0275	Al 99.7
EN AW-1080A	EN AW-Al 99.8(A)	ČSN 42 4002	Al 99.8	3.0285	Al 99.8
EN AW-1200	EN AW-Al 99.0(A)	ČSN 42 4009	Al 99	3.0205	Al 99
EN AW-1350	EN AW-EAl 99.5(A)	ČSN 42 4004	Al 99.5 E	-	-
EN AW-1350A	EN AW-EAl 99.5(A)	-	-	3.0257	E - Al

Slitiny hliníku - řada 2000 - AlCu					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-2007	EN AW-Al Cu4PbMgMn	-	-	3.1645	AlCuMgPb
EN AW-2011	EN AW-Al Cu6BiPb	-	-	3.1655	AlCuBiPb
EN AW-2014	EN AW-Al Cu4SiMg	-	-	3.1255	AlCuSiMn
EN AW-2017A	EN AW-Al Cu4MgSi(A)	ČSN 42 4201	AlCu4Mg	3.1325	AlCuMg1
EN AW-2024	EN AW-Al Cu4Mg1	ČSN 42 4203	AlCu4Mg1	3.1355	AlCuMg2
EN AW-2030	EN AW-Al Cu4PbMg	ČSN 42 4254	AlCu4PbMg	-	
EN AW-2117	EN AW-Al Cu2.5Mg	ČSN 42 4204	AlCu2Mg	3.1305	AlCu2.5Mg0.5
EN AW-2618A	EN AW-Al Cu2Mg1.5Ni	ČSN 42 4218	AlCu2Mg2Ni	-	

Slitiny hliníku - řada 3000 - AlMn					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-3002	EN AW-Al Mn0.2Mg0.1	-	-	-	-
EN AW-3003	EN AW-Al Mn1Cu	-	-	3.0517	AlMnCu
EN AW-3102	EN AW-Al Mn1	ČSN 42 4432	AlMn1	-	-
EN AW-3103A	EN AW-Al Mn1(A)	ČSN 42 4201	AlCu4Mg	3.0515	AlMn1
EN AW-3004	EN AW-Al Mn1Mg1	-	-	3.0526	AlMn1Mg1
EN AW-3005	EN AW-Al Mn1Mg0.5	-	-	3.0525	AlMn1Mg0.5
EN AW-3105A	EN AW-AlMn0,5Mg0,5(A)	-	-	3.0505	AlMn0.5Mg0.5
EN AW-3207	EN AW-Al Mn0.6	-	-	3.0506	AlMn0.6

Slitiny hliníku - řada 4000 - AlSi					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-4032	EN AW-Al Si12.5MgCuNi	ČSN 42 4237	AlSi12Ni1Mg	-	-

Slitiny hliníku - řada 5000 - AlMg					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-5005A	EN AW-Al Mg1(C)	-	-	3.3315	AlMg1
EN AW-5019	EN AW-Al Mg5	ČSN 42 4415	AlMg5	3.3555	AlMg5
EN AW-5049	EN AW-Al Mg2Mn0.8	-	-	3.3527	AlMg2Mn0.8
EN AW-5051A	EN AW-Al Mg2(B)	-	-	3.3326	AlMg1.8
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2.5	-	-	3.3523	AlMg2.5
EN AW-5083	EN AW-Al Mg4.5Mn0.7	-	-	3.3547	AlMg4.5Mn
EN AW-5086	EN AW-Al Mg4	-	-	3.3545	AlMg4Mn
EN AW-5182	EN AW-Al Mg4.5Mn0.4	-	-	3.3549	AlMg5Mn
EN AW-5251	EN AW-Al Mg2Mn0.3	ČSN 42 4412	AlMg2	3.3525	AlMg2Mn0.3
EN AW-5454	EN AW-Al Mg3Mn	-	-	3.3537	AlMg2.7Mn
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	ČSN 42 4413	AlMg3	3.3535	AlMg3

Slitiny hliníku - řada 6000 - AlMgSi					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg	-	-	3.3210	AlMgSi0.7
EN AW-6012	EN AW-Al MgSiPb	-	-	3.0615	AlMgSiPb
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	ČSN 42 4401	AlMgSi	3.3206	AlMgSi0.5
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	-	-	3.3211	AlMg1SiCu
EN AW-6063A	EN AW-Al Mg0.7Si	ČSN 42 4401	AlMgSi	-	-
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	ČSN 42 4400	AlMg1Si1Mn	3.2315	AlMgSi1
EN AW-6101B	EN AW-Al Mg4	-	-	3.3207	E-AlMgSi0.5

Slitiny hliníku - řada 7000 - AlZn					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-7020	EN AW-Al Zn4.5Mg1	ČSN 42 4441	AlZn5Mg1	3.4335	AlZn4.5Mg1
EN AW-7022	EN AW-Al Zn5Mg3Cu	-	-	3.4345	AlZnMgCu0.5
EN AW-7075	EN AW-Al Zn5.5MgCu	ČSN 42 4222	AlZn6Mg2Cu	3.4346	AlZn4.5MgCu1.5

Slitiny hliníku - řada 8000 - různé					
označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-8011A	EN AW-Al FeSi(A)	ČSN 42 4441	AlZn5Mg1	3.0915	AlFeSi

12 Příloha 2

ČSN EN 1706 - Hliník a slitiny hliníku - odlitky-

chemické složení a mechanické vlastnosti

Přehled některých slitin a jejich porovnání podle ČSN a DIN

Slitiny hliníku na odlitky					
Označení slitin podle ČSN EN 1706		označení slitin podle ČSN		označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi			3.1371	AlCu4MgTi
EN AC-21000	EN AC-Al Cu4Ti			3.1841	AlCu4Ti
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0.3			3.2371	AlSi7Mg0.3
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2381	AlSi10Mg(a)
EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)			3.2383	AlSi10Mg(Cu)
EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2373	AlSi9Mg
EN AC-43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)			3.2382	AlSi10Mg(Fe)
EN AC-44000	EN AC-Al Si11			3.2211	AlSi11
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2373	AlSi12
EN AC-44300	EN AC-Al Si12(Fe)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2582	AlSi12(Fe)
EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu			3.2151	AlSi6Cu
EN AC-46000	EN AC-Al Si9Cu3(a)	ČSN 42 4339	AlSi8Cu2Mn	3.2163	AlSi9Cu3(a)
EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3			3.2163	AlSi9Cu3
EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2583	AlSi12(Cu)
EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu(Fe)			3.2982	AlSi12Cu(Fe)
EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg				AlSi12CuNiMg
EN AC-51100	EN AC-Al Mg3(a)			3.3541	AlMg3
EN AC-51200	EN AC-Al Mg9	ČSN 42 4519	AlMg10SiCa	3.3292	AlMg9
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5			3.3561	AlMg5Si
EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)	ČSN 42 4515	AlMg5Si1Mn	3.3261	AlMg5Si