

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE NÁSTROJOVÉ ŘEZNÉ GEOMETRIE PRO VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ TENKOSTĚNNÝCH SOUČÁSTÍ

OPTIMIZATION OF TOOL CUTTING GEOMETRY FOR HIGH-SPEED
MACHINING OF THIN-WALLED PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB BARCUCH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Barcuch

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

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

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

Optimalizace nástrojové řezné geometrie pro vysokorychlostní obrábění tenkostěnných součástí

v anglickém jazyce:

Optimization of tool cutting geometry for high-speed machining of thin-walled parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá optimalizací nástrojové řezné geometrie pro vysokorychlostní obrábění tenkostěnných součástí z pohledu namáhání nástroje a dosažení kvality opracování.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Teoretický rozbor problému.

Návrh experimentálních zkoušek.

Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Diskuze.

Závěry

Seznam odborné literatury:

- HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. Praha. Scientia, s. r. o. 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.
- PÍŠKA, M., POLZER, A. Wear of coated solid carbide end mills when machining of hardened steels in dry conditions. In: Proceedings of the 3rd International Tools Conference, ITC 2003. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 21.-22.5.2003. ISBN 80-7318-135-56
- SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3
- BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1.vyd., Slovensko, Trenčin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.
- BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212, ISBN 80-8075-013-0.
- MARINESCU, I.D. et al. Tribology of abrasive machining processes. 1st ed. William Andrew, Norwich, 2004, pp.724, ISBN 0-8155-1490-5.
- LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed., Willet-VCH, Koln, 2005, p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

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

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

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce se zabývá materiály využívanými v leteckém průmyslu se zaměřením na slitiny hliníku. Dále se zabývá vysokorychlostním obráběním, jeho charakteristikami a porovnáním s konvenčním způsobem obrábění. V dalších kapitolách jsou popsány strategie pro obrábění tenkostěnných součástí a popis chvění, které vzniká při obrábění. Praktická část se zabývá volbou vhodné nástrojové geometrie a obráběním tenkostěnných součástí s vyhodnocením jejich vychýlení v průběhu obrábění.

Klíčová slova

Nástrojová geometrie, tenkostěnné součásti, vysokorychlostní obrábění, slitiny hliníku, vychýlení součástí, letecký průmysl, vibrace, chvění.

ABSTRACT

The theoretical part of the thesis deals with materials used in the aircraft industry with a focus on aluminium alloys. Then it describes high speed machining, its characteristics and its comparison with conventional machining. The following chapters describe strategies of machining thin-walled parts and a description of vibration that occurs during machining. The practical part deals with selection appropriate tool geometry, machining of thin-walled parts and evaluation of their deflection during machining.

Key words

Tool geometry, thin-walled parts, high speed machining, aluminum alloys, part deflection, aircraft industry, vibration, chatter.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARCUCH, J. *Optimalizace nástrojové řezné geometrie pro vysokorychlostní obrábění tenkostěnných součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 79 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace nástrojové řezné geometrie pro vysokorychlostní obrábění tenkostěnných součástí**, vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24. 5. 2013

Datum

Bc. Jakub Barcuch

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Fialovi, Milanu Rousiňákovi za pomoc při experimentech, rodině za umožnění studia na vysoké škole a psychickou podporu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	10
1 Hliník, slitiny hliníku, jejich vlastnosti a využití.....	11
1.1 Zdroje hliníku	12
1.2 Hlavní průmyslová odvětví využívající hliníku a jeho slitin.....	12
1.3 Využití hliníku a jeho slitin v leteckém průmyslu.....	13
1.3.1 Vývojové trendy v leteckém průmyslu	14
1.4 Fyzikální vlastnosti hliníku	14
1.5 Vliv legujících prvků na vlastnosti slitin hliníku.....	15
1.6 Rozdělení hliníkových slitin.....	15
1.6.1 Vlastnosti a aplikace série 1000.....	15
1.6.2 Vlastnosti a aplikace série 2000.....	16
1.6.3 Vlastnosti a aplikace série 3000.....	16
1.6.4 Vlastnosti a aplikace série 4000.....	17
1.6.5 Vlastnosti a aplikace série 5000.....	17
1.6.6 Vlastnosti a aplikace série 6000.....	17
1.6.7 Vlastnosti a aplikace série 7000.....	17
1.6.8 Vlastnosti a aplikace série 8000.....	18
1.7 Obrobitelnost hliníku a slitin hliníku.....	18
1.8 Rozdělení slitin hliníku z hlediska obrobitelnosti	19
1.8.1 Slévárenské slitiny	20
1.8.2 Tvářené slitiny	20
1.8.3 Automatové slitiny.....	20
1.9 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin.....	21
1.9.1 Precipitační zpevnění – vytvrzování.....	21
2 Frézování	22
2.1 Technologická charakteristika.....	22
2.2 Rozdělení podle kinematiky frézovacího procesu.....	22
2.2.1 Sousedné frézování.....	22
2.2.2 Nesousedné frézování.....	22
2.2.3 Výčet hlavních výhod sousledného a nesousledného frézování.....	23

3	Vysokorychlostní obrábění.....	24
3.1	Charakteristika HSM	27
3.1.1	Suché obrábění.....	28
3.1.2	Tvrdé obrábění.....	29
3.2	Mechanismus tvorby třísky	30
3.3	Rozdíly mezi konvenčním a vysokorychlostním obrábění.....	31
3.3.1	Řezný proces při konvenční obrábění.....	31
3.3.2	Řezný proces při vysokorychlostním obrábění.....	31
3.4	Požadavky na obráběcí proces.....	32
3.5	Výhody a nevýhody HSM	33
3.5.1	Výhody vysokorychlostního obrábění	33
3.5.2	Nevýhody vysokorychlostního obrábění	33
3.6	Vyvažování nástrojů pro HSM	33
3.7	Bezpečnost práce při HSM	34
4	Tenkostěnné součásti	35
4.1	Strategie při obrábění tenkostěnných součástí.....	36
4.1.1	Malý poměr výšky k tloušťce ($h/t < 15:1$).....	36
4.1.2	Střední poměr výšky k tloušťce ($h/t < 30:1$).....	37
4.1.3	Velmi vysoký poměr výšky k tloušťce ($h/t > 30:1$).....	37
4.1.4	Frézování do rohu při malé tloušťce dna	38
4.2	Problémy při obrábění tenkostěnných součástí	38
5	Stabilita obráběcího procesu.....	40
5.1	Statický průhyb	40
5.2	Dynamická nestabilita	40
5.2.1	Vlastní kmitání.....	40
5.2.2	Vynucené kmitání	40
5.2.3	Samobuzené kmitání.....	41
5.2.4	Rozlišení druhu kmitání.....	42
5.2.5	Diagramy stability (tzv. Lobe diagram stability).....	43
6	Nástrojová řezná geometrie	44
6.1	Nástrojové úhly.....	44
6.2	Druhy geometrií.....	45
6.2.1	Dvojitá negativní geometrie.....	46
6.2.2	Dvojitá pozitivní geometrie	46
6.2.3	Pozitivně-negativní geometrie	47

6.2.4	Vliv základní geometrie na záběrové podmínky	47
6.2.5	Geometrie ostří výměnných břitových destiček	48
7	Optimalizace nástrojové geometrie	49
8	Experimentální část	53
8.1	Obráběcí stroj	53
8.2	Řezné nástroje.....	53
8.4	Materiál obrobku	54
8.5	Metodika měření.....	54
8.5.1	Silové zatížení při sousledném frézování	56
8.5.2	Zpracování naměřených dat.....	56
8.6	Výpočet vychýlení vzorku.....	59
8.7	Měření vychýlení vzorků.....	61
8.8	Vyhodnocení úchylek rozměrů.....	64
8.9	Aplikace modelu použitého pro optimalizaci na experiment	68
9	DISKUZE	70
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	77
	SEZNAM PŘÍLOH.....	79

ÚVOD

Neustálý vývoj nových technologií způsobuje rostoucí konkurenční boj na trhu mezi jednotlivými průmyslovými podniky. Počet ekonomicky vyspělých států se neustále zvyšuje a v dnešním globalizovaném světě dochází k čím dál větší provázanosti jednotlivých trhů. V těchto podmínkách dokáže uspět především výrobce, který dokáže produkovat součásti s odpovídající kvalitou v co možná nejkratším termínu a také nízkou cenou. Zavádění nových technologií s vysokou produktivitou je v dnešní době důležitým faktorem, pokud chce průmyslový podnik obstát ve velké konkurenci.

Mezi technologie zaručující vysokou produktivitu figuruje vysokorychlostní obrábění (High Speed Machining – HSM), které kombinuje využití vysoký řezných rychlostí a posuvových rychlostí. Ve svých počátcích se o HSM mluvilo jako o “revoluci” v obrábění. V dnešní době se jedná o technologii zavedenou mnoha průmyslovými podniky a s jejím využitím je možné docílit velkého množství odebraného materiálu za časovou jednotku. Na trhu je celá řada výrobců obráběcích strojů, kteří nabízejí specializované výrobní zařízení pro tuto technologii. Výrobci nástrojového vybavení neustálým vývojem nástrojových materiálů a povlaků pro HSM rozšiřují oblast využití této technologie. S termínem HSM souvisí také další technologie jako suché obrábění nebo tvrdé obrábění [10].

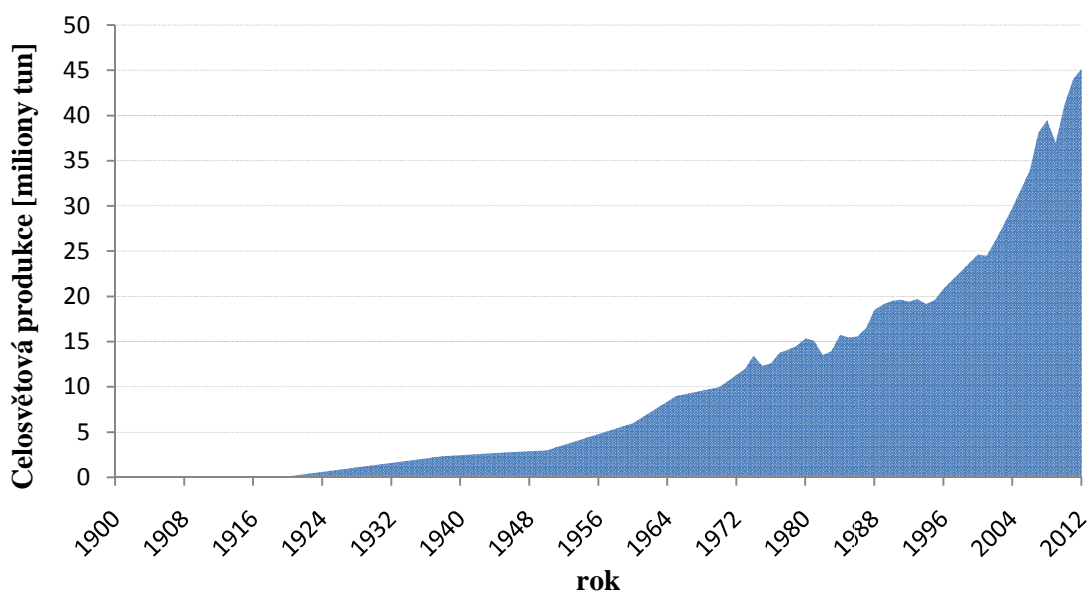
Tenkostěnné součásti hojně využívané v leteckém průmyslu jsou ve většině případů obráběny právě s využitím technologie HSM a to z důvodu vzniku nízkých řezných sil v průběhu obrábění. Tenké stěny se často lehce deformují, a proto je nutné co možná nejnižší silové zatížení obrobku volbou vhodných parametrů obrábění, především vhodné obráběcí strategie a řezné nástrojové geometrie. Trendem pro snížení hmotnosti letadel je využívání monolitických komponent, které jsou zhotoveny obráběním, a v některých případech dochází k objemovému úběru materiálu polotovaru v řádu 90% i více. Představitelem takové komponenty je žebro křídla letadla, které je vyrobeno ze slitiny hliníku. Využití slitin hliníku v konstrukci letadel je značné a hlavním důvodem je především úspora hmotnosti, jelikož hustota hliníku je více než třikrát nižší než u oceli. Vhodným tepelným zpracováním slitin hliníku lze docílit vlastností srovnatelných s konstrukčními ocelmi [15].

Volba geometrie řezného nástroje při obrábění tenkostěnných součástí může značně ovlivnit průběh obráběcího procesu, ale také výsledný výrobek. Součásti pro letecký průmysl se obrábí především s využitím technologie frézování. Komplexnost jejich tvarů (tenké stěny, hluboké kapsy, tenké dna), vznik chvění, malá tuhost obrobku, atd. patří mezi hlavní problémy při obrábění tenkostěnných součástí. Volba vhodné geometrie řezného nástroje patří mezi hlavní hlediska pro dosažení a dodržení požadovaných rozměrových tolerancí, geometrických tolerancí a požadovaných parametrů struktury povrchu (integritu povrchu).

1 HLINÍK, SLITINY HLINÍKU, JEJICH VLASTNOSTI A VYUŽITÍ

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem a vůbec nejrozšířenějším kovem na zemi. Historie průmyslového využití hliníku sahá do roku 1886, kdy nezávisle na sobě Paul Héroult ve Francii a Charles M. Hall ve Spojených státech amerických zdokonalili proces elektrolýzy a tím položili základ průmyslové produkci tohoto kovu, která však ve významnějším měřítku nastala až za několik desetiletí po tomto významném objevu. Počáteční produkce hliníku byla velmi malá, což bylo příčinou jeho vysoké ceny. Z počátku nalézal využití především v klenotnictví a pro speciální účely jako např. vrchol Washingtonova monumentu [1,3].

Nárůst produkce hliníku v první polovině 20. století byl zapříčiněn jeho využitím ve vojenské technice v průběhu druhé světové války. Následný pokles produkce byl důsledkem špatné ekonomické situace států zdevastovaných válkou, především se jednalo o Německo, Francii a okrajově Norsko. Po oživení ekonomické situace v 50. letech minulého století je patrný neustálý růst produkce hliníku. Objem produkce primárního hliníku, který je vyráběn z bauxitů ukazuje obr. 1.1 [1]. Významná je produkce i sekundárního hliníku, který je získán recyklací druhotných surovin. Množství recyklovaného hliníku v roce 1999 bylo celosvětově přibližně 7 milionů tun a v roce 2010 dokonce 20 milionů tun [1,6]. Celková celosvětová produkce primárního a sekundárního hliníku byla v roce 2010 tedy přibližně 61 milionů tun [5,6].



Obr. 1.1 Nárůst celosvětové produkce primárního hliníku [1,5].

V současné době je hliník neželezným kovem s největší produkcí následovaný mědí, olovem a cínem. Hliník a jeho slitiny nachází díky svým vlastnostem široké uplatnění v nejrůznějších oblastech průmyslu a v každodenním životě se setkáváme s výrobky vyprodukovanými z tohoto kovu. Ve stále větší míře dochází k nahrazování dříve používaných materiálů, kdy největší nárůst využití hliníku a jeho slitin byl zaznamenán v sektoru dopravy [1].

1.1 Zdroje hliníku

V přírodě je možné hliník nalézt až v 250 různých minerálech, mezi nejvýznamnější patří gibbsit, boehmit, korund, diaspor, spinel, alunit, nefelín atd. Pro výrobu hliníku je ekonomicky nejvýznamnější rudou bauxit, podle bohatosti je možné získat ze čtyř až šesti tun bauxitu jednu tunu hliníku [1]. Naleziště bauxitů jsou rozčleněna do regionů a produkce primárního hliníku v jednotlivých regionech v roce 2012 je uvedena v tabulce 1.1, podle které je patrné, že prim v produkci hraje jako v mnoha jiných oblastech Čína [5].

Tab. 1.1 Produkce primárního hliníku v jednotlivých regionech v roce 2012 [5].

Region	Objem produkce [miliony tun]
Afrika	1,639
Arabský poloostrov	3,662
Asie (mimo Čínu)	2,535
Čína	19,754
Jižní Amerika	2,052
Oceánie	2,186
Severní Amerika	4,851
Východní a centrální Evropa	4,323
Západní Evropa	3,605
Předpokládaná nehlášená produkce	0,6
Celková produkce	45,207

1.2 Hlavní průmyslová odvětví využívající hliníku a jeho slitin

- doprava,
- strojírenství,
- hutnictví,
- stavebnictví,
- potravinářství,
- energetika a elektrotechnika,
- chemický průmysl,
- sportovní potřeby a jiné [1].

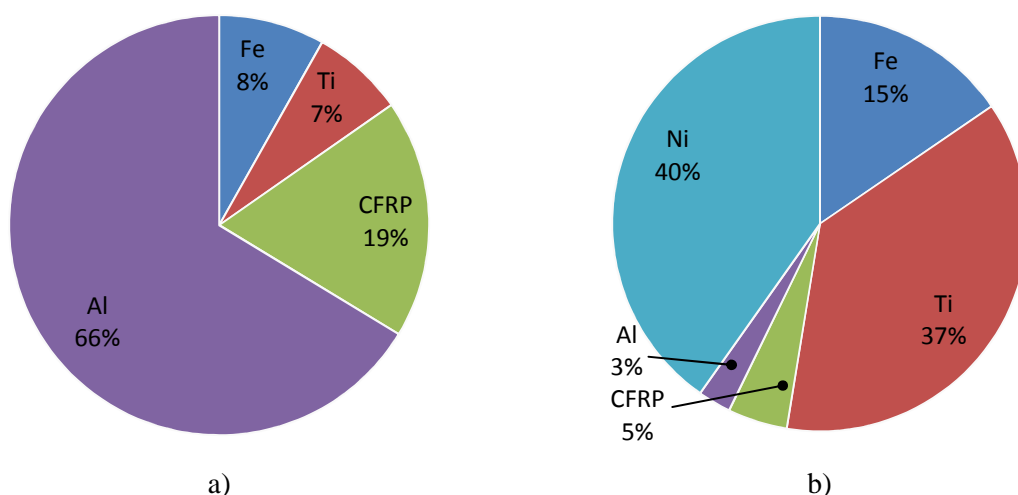
Jak již bylo uvedeno největší využití hliníku a jeho slitin je využíváno v sektoru dopravy, kde je těchto materiálů využíváno pro stavbu letadel, automobilů, autobusů, vlaků, lodí a své využití nalézají také v kosmonautice. Tabulka 1.2 ukazuje procentuelní využití v jednotlivých odvětvích [1].

Tab. 1.2 Produkce primárního hliníku v jednotlivých regionech v roce 2002 [1].

Průmyslové odvětví	Spotřeba [%]
Doprava (letecká, automobilová, lodní, železniční)	59,1
Stavebnictví	18,4
Strojírenství	10,3
Elektrotechnický průmysl	7,2
Potravinářský průmysl	4,3
Ostatní	0,7

1.3 Využití hliníku a jeho slitin v leteckém průmyslu

První letadlo, které využívalo slitin hliníku na blok motoru kvůli úspoře hmotnosti, pocházelo z dílny bratří Wrightů a vzletlo již v roce 1903. Postupně docházelo k nahrazování dřeva a oceli v konstrukci. Letadlo s konstrukcí využívající převážně hliníku a jeho slitin se objevilo na počátku dvacátých let minulého století [16]. Kombinace nízké hmotnosti, vysoké pevnosti zpravidla při nízkých teplotách a dobré obrobitelnosti tyto materiály předurčuje pro využití v hromadné výrobě letadel. V současné době je po celém světě využíváno přes 27 000 letadel a helikoptér určených pro komerční využití. Předpokládaný vývoj poptávky po letadlech pro komerční přepravu cestujících se ze současných 15 000 má dokonce zdvojnásobit do roku 2030 [1,16]. Zastoupení jednotlivých materiálů v konstrukci trupu prezentuje obr. 1.2, jedná se především o slitiny uvedených kovů, zkratka CFRP (carbon-fibre reinforced plastic) je ve volném překladu plast vyztužený uhlíkovými vlákny [8].



Obr. 1.2 a) Využití materiálů v konstrukci trupu letadla, b) Využití materiálů v konstrukci motoru letadla [4].

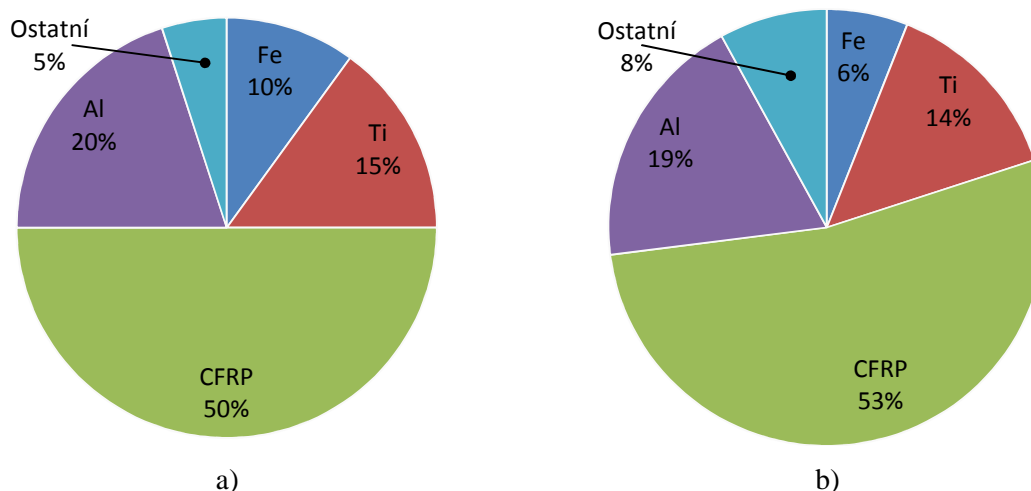
Typický příklad části trupu letadla Airbus A318 vyrobeného z hliníkové slitiny je na obr. 1.3. Hlavními materiály pro výrobu plechů a součástí trupů a křídel letadel jsou např. slitiny EN AW-2014 (AlCu_4SiMg), EN AW-2024 (AlCuMg_2), EN AW-6013 (AlMgSiCu), dále také vysoce pevnostní slitiny, kde je hlavním zástupcem slitina EN AW-7075 [1,16].



Obr. 1.3 Část trupu letadla vyrobená ze slitiny hliníku [1].

1.3.1 Vývojové trendy v leteckém průmyslu

Výrobci nejmodernějších dopravních letadel, která jsou určena pro přepravu civilních pasažérů, se vydávají cestou snižování hmotnosti letounů. Na obr. 1.4 je zobrazeno využití materiálů na v současné době dvou nejmodernějších letounech. Na konstrukci Boeingu 787 Dreamliner je využito až 50% pokročilých kompozitních materiálů (CFRP), tímto došlo výrazné úspoře hmotnosti, zefektivnění provozu výraznou úsporou pohonných hmot a snížení nákladů na údržbu až o 30%. Využití hliníkových slitin je však stále značné, když je v jeho konstrukci využito 20% hliníkových slitin [7]. Největší konkurent Dreamlineru, letoun Airbus A350 XWB, má dokonce v konstrukci zakomponováno celých 53% pokročilých kompozitních materiálů, využití slitin hliníku je 19% [8].



Obr. 1.4 a) Využití materiálů v konstrukci trupu letadla Boeing 787 Dreamliner [7]., b) Využití materiálů v konstrukci trupu letadla Airbus A350 XWB [8].

1.4 Fyzikální vlastnosti hliníku

Hliník i jeho slitiny mají kubickou plošně centrovanou mřížku K12, což je důsledkem dobrých plastických vlastností za tepla i za studena. Roviny skluzu jsou $\{111\}_\alpha$, skluzové směry $\langle 110 \rangle$, výběr některých fyzikálních vlastností hliníku je uveden v tabulce 1.3 [1].

Tab. 1.3 Výběr fyzikálních vlastností hliníku [1].

Vlastnost	Hodnota
Mřížka	K12
Parametr mřížky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Hustota	$2,6989 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (při 20 °C)
Teplota tavení	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivost	$247 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ (při 25 °C)
Objemová změna při krystalizaci	6,5 %

Čistý hliník se díky svým vlastnostem používá jen ve velmi omezené míře, hliník vysoké čistoty 99,999% v žíhaném stavu (01) má mez pevnosti $R_m = 40$ až 50 MPa a tažnost $A = 70$ až 90 %. Zlepšení mechanických, fyzikálních, technologických, chemických vlastností lze docílit vhodným chemickým složením slitin s kombinací tváření a tepelného zpracování [1].

Slitiny hliníku se vyznačují mnoho přednostmi, kvůli kterým jsou tak hojně využívány, mezi nejdůležitější patří:

- nízká hmotnost (hustota),
- dobré mechanické vlastnosti za nízkých teplot (absence tranzitního chování),
- dobrá tepelná vodivost,
- korozní odolnost (zapříčiněná vznikem ochranné vrstvy Al_2O_3 tloušťky 5-20 nm),
- dobrá tvařitelnost (za studena i za tepla) [1].

1.5 Vliv legujících prvků na vlastnosti slitin hliníku

Mezi hlavní legující prvky patří křemík, hořčík, mangan, měď, zinek a železo. Legující prvky ovlivňují slitiny různým způsobem. Zvýšení pevnosti a zlepšení obrobitelnosti způsobuje měď. Pozitivně na obrobitelnost působí i hořčík, mangan, zinek, chrom a vizmut. Naopak zhoršení obrobitelnosti způsobuje křemík, který však má pozitivní vliv na slévateľnost a zvýšení korozní odolnosti. Zlepšení pevnosti a korozivzdornosti způsobuje hořčík. Dalším prvkem, který zlepšuje slévateľnost je zinek, zároveň zlepšuje i pevnost. Pevnost a tvrdost získá slitina při legování železem [2,11].

1.6 Rozdělení hliníkových slitin

Tab. 1.4 Rozdělení hliníkových slitin pro tváření dle ČSN EN 573-1 [1,17].

Označení série	Hlavní legující prvek
1000	Hliník o čistotě minimálně 99,00%
2000	Měď
3000	Mangan
4000	Křemík
5000	Hořčík
6000	Hořčík a křemík
7000	Zinek
8000	Jiné prvky
9000	Nepoužitá skupina

Mezi tepelně nezpracovatelné slitiny hliníku patří zástupci sérií 1000, 3000, 4000 a 5000. Tepelně zpracovatelné jsou materiály ze sérií 2000, 6000 a 7000. Speciální skupinou slitin hliníku je série 8000 [18].

1.6.1 Vlastnosti a aplikace série 1000

Velmi nízká pevnost materiálů z této série je způsobena nízkým množstvím rozpuštěných nebo vyprecipitovaných slitinových prvků. Pohyb dislokací je tudíž usnadněný malým počtem překážek, což umožňuje snadné plastické deformace [18]. Hliník o vysoké čistotě (minimálně 99,00%) je využíváno v odvětvích, která požadují specifické fyzikální vlastnosti. To je především výborná elektrická a tepelná vodivost, ale i velká korozní odolnost. Materiály této série nalézají využití v elektrotechnice, energetice, chemickém průmyslu přes architekturu až po obalovou techniku [17,18].

1.6.2 Vlastnosti a aplikace série 2000

Hlavním legujícím prvkem je měď (obvykle 3-6%, i více) a jako sekundární je využíván hořčík (0-2%). Tyto slitiny je možné tepelně zpracovat a precipitačním vytvrzováním tím získat maximální pevnostní vlastnosti. Tepelně zpracované slitiny z této série dosahují nejvyšších pevnostních charakteristik, které předčí jen materiály ze série 7000. Korozní odolnost těchto slitin je špatná a jsou náchylné k interkrystalické korozi, protože měď má tendenci precipitovat na hranicích zrn. Zástupci této skupiny jsou využívány v leteckém, automobilovém i stavením průmyslu [17,18].

EN AW-**2014**, ISO: AlCu4SiMg [21].

Tato slitina dosahuje při vhodném tepelném zpracování vysokých pevnostních vlastností a její využití je především u komponentů letadel, vojenských vozidel, zbraní a také v aplikacích pro hydraulické komponenty [21].

Charakteristiky slitiny po tepelném zpracování ve stavu T4:

$R_m = 460 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 400 \text{ MPa}$, HB = 125 [19].

EN AW-**2017A**, ČSN 424201, ISO: Al Cu4MgSi(A) [19,21].

Tato slitina je využívána pro pevnostní komponenty letadel, části strojů, vojenské techniky a nýty. Mezi přednosti této slitiny patří vysoká pevnost, únavová odolnost a dobrá obrobitelnost. Hlavní nevýhodou je velmi nízká korozní odolnost a z toho plynoucí nutnost povrchových úprav [21].

Charakteristiky slitiny po tepelném zpracování ve stavu T3,T4:

$R_m = 380 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 260 \text{ MPa}$, HB = 110 [19].

EN AW-**2024**, ČSN 424203, ISO: Al Cu4Mg1 [19,21].

Využití této slitiny je téměř identické jako u předchozí slitiny, hlavní rozdíly jsou však v pevnostních vlastnostech, které jsou značně vyšší [21].

Charakteristiky slitiny po tepelném zpracování ve stavu T3,T4:

$R_m = 440 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 310 \text{ MPa}$, HB = 115 [19].

1.6.3 Vlastnosti a aplikace série 3000

U těchto slitin není možné využít tepelného zpracování ke zlepšení pevnostních vlastností, proto je používáno legování manganem do 1,5%, což způsobí jejich zvýšení o cca 20%. Slitiny z této skupiny se řadí mezi materiály s průměrnými pevnostními vlastnostmi a velmi dobrou tvařitelností. Aplikovány jsou především ve výměnících tepla a architektuře [17,18].

1.6.4 Vlastnosti a aplikace série 4000

Ve většině případů není možné slitiny z této série tepelně zpracovat. Využívají se při svařování jako svařovací dráty (s obsahem Si do 12%) a pájení [17,18].

1.6.5 Vlastnosti a aplikace série 5000

Hořčík jako hlavní legující prvek je z hlediska substitučního zpevnění α matrice efektivnější volbou než mangan. Pro porovnání je cca 0,8% Mg ekvivalentem cca 1,25% Mn. Vysoká korozní odolnost materiálů z této série předurčuje tyto slitiny pro využití v lodním průmyslu (stavba lodí, mol, atd.), potravinářském průmyslu, architektuře a v zařízeních pracujících za kryogenních teplot [17,18].

1.6.6 Vlastnosti a aplikace série 6000

Důležitým faktorem u této série je množství intermetalické fáze Mg_2Si , která umožňuje tepelné zpracování. Mezi charakteristické vlastnosti patří jejich výborná tvařitelnost, svařitelnost, korozní odolnost a dobrá obrobitelnost. Pevnostní vlastnosti jsou průměrné, obecně nižší než u série 2000 a 7000 [17,18].

EN AW-**6005A**, ČSN 424401, ISO: Al SiMg(A) [19,21].

Materiál využívaný především ve formě profilů v dopravní technice pro stavbu vagonů, autobusů s vysokou korozní odolností a výbornou svařitelností [21].

Charakteristiky slitiny po tepelném zpracování ve stavu T6:

$R_m = 270 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 240 \text{ MPa}$, HB = 14 [19].

EN AW-**6061**, ISO: Al Mg1SiCu [21].

V leteckém průmyslu je tato slitina využívána pro rotory helikoptér, části letadel a nůty. V železniční technice je tento materiál využíván pro náročnější aplikace než předešlá slitina, vyznačuje se vysokou korozní odolností a dobrou svařitelností [21].

Charakteristiky slitiny po tepelném zpracování ve stavu T6:

$R_m = 290 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 240 \text{ MPa}$ [19].

1.6.7 Vlastnosti a aplikace série 7000

Tato série materiálů je významná tím, že její zástupci při vhodné kombinaci chemického složení a tepelného zpracování, dosahují nejvyšších pevnostních vlastností ze všech slitin hliníku. Ideální množství zinku, který je pro tuto sérii hlavním legujícím

prvkem, je mezi 1 až 8% a pro dosažení maximálních pevnostních vlastností je dalším legujícím prvkem hořčík (1-3%). Další prvky jsou měď a chrom. Sníženou korozní odolnost, která se vyskytuje u slitin s maximální pevností, je možné odstranit vhodným tepelným zpracováním avšak na úkor pevnostních vlastností. Tyto slitiny nalézají hlavní využití především v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, ale také pro různé komponenty kosmických lodí a sond [17,18].

EN AW-7020, ČSN 424441, ISO: AlZn4,5Mg1 [19,21].

Pro dobré pevnostní vlastnosti má tato slitina široké spektrum využití od svařovaných konstrukcí železničních vagonů, mostů až po aplikace ve vojenské technice [21].

Charakteristiky slitiny po tepelném zpracování ve stavu T6:

$R_m = 350 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 280 \text{ MPa}$, HB = 100 [19].

EN AW-7075, ČSN 424222, ISO: AlZn5,5MgCu [19,21].

Pevnostní vlastnosti předurčují tuto slitinu pro vysoce namáhané součásti v konstrukci letadel, vojenských zařízení a také aplikace v jaderné energetice. Další využití je pro šrouby, matice a sportovní vybavení [21].

Charakteristiky slitiny po tepelném zpracování ve stavu T6:

$R_m = 510 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 440 \text{ MPa}$, HB = 140 [19].

1.6.8 Vlastnosti a aplikace série 8000

Hlavní legující prvky slitin z této série jsou rozdílné od předešlých uvedených sérií. Relativně nedávno byly vyvinuty slitiny, u kterých je hlavním legujícím prvkem Lithium. Jde především o slitiny 8090, 8091 a 8093. Lithium má výrazně nižší hustotu než hliník a relativně dobrou rozpustnost, což umožňuje legování dostatečným množstvím lithia. Tímto lze dosáhnout až 10% úsporu hmotnosti oproti ostatním slitinám hliníku. Významný je i růst tvrdosti a odolnosti proti únavovému lomu. Díky kombinaci vhodných vlastností jsou tyto slitiny využívány především v leteckém průmyslu. Dále pak v automobilovém průmyslu a ve speciálních aplikacích v jaderné energetice [18].

1.7 Obrobitelnost hliníku a slitin hliníku

Obrobitelnost je hliníku a jeho slitin ovlivněna více faktory, závisí na chemickém složení, druhu zpracování výchozího polotovaru ať už tažením, kování, či sléváním a v některých případech i na tepelném zpracování [11]. Čistý hliník způsobuje při obrábění potíže, kdežto slitiny hliníku se dají specifikovat jako dobře obrobitelné materiály, tento

rozdíl je způsoben rozdílnou strukturou. Příznivý vliv na obrábělnost mají precipitáty, konstituční fáze a měkké částice. Za zmínku stojí také stupeň deformačního zpevnění [1].

Při obrábění slitin hliníku (Obr. 1.5) je možné používat vysoké řezné rychlosti, přičemž dosahované teploty jsou nízké. V současné době je využíváno nástrojů speciálně dimenzovaných pro obrábění hliníku, které mají ostrý pozitivní břit. Výrobci nástrojů bylo vyvinuto nespočet univerzálních nástrojů, které umožňují hospodárné obrábění široké spektrum hliníkových slitin. K zamezení tvorby nárůstku a dobrému odvodu třísky z místa řezu je všeobecně vyžadován velký úhel čela [2]. Při srovnání velikosti řezných sil při obrábění konstrukčních ocelí o stejné pevnosti jako u slitin hliníku jsou řezné síly mnohem nižší [1,2].



Obr. 1.5 Příklad ponorného frézování hliníku [22].

Velmi využívaný je způsob hodnocení obrábělnosti hliníku a jeho slitin založený na vyhodnocování trvanlivosti břitu nástroje, kvalitě obrobenej plochy a tvaru třísky [1,2]. Hodnocení obrábělnosti podle tvaru třísky je posuzováno vizuálně, třísky jsou na základě jejich tvaru rozděleny pěti do skupin s označením A až E [1].

Popis jednotlivých skupin [1]:

- A – slitina je dobře obrábělná, tříška je ve formě drobných šupin, výborný povrch,
- B – tříška ve formě svitků nebo dobře lámavých šupin, dobrý nebo výborný povrch,
- C – tříška je spojitá, dobrý povrch,
- D – tříška je spojitá, dostatečná kvalita povrchu,
- E – nevyhovující tříška, nutnost změny podmínek při obrábění, špatná kvalita povrchu.

1.8 Rozdělení slitin hliníku z hlediska obrábělnosti

Podle obrábělnosti je možné slitiny hliníku rozdělit do tří základních skupin na [1]:

- slévárenské slitiny,
- tvářené slitiny,
- automatové slitiny.

1.8.1 Slévárenské slitiny

Hlavními legujícími prvky jsou měď, hořčík nebo zinek. Vyznačují se dobrou obrobitelností a v průběhu obrábění nezpůsobují žádné výrazné problémy. V některých případech však dochází k ulpívání materiálu na čele nástroje a vzniku nárůstku [1,2]. Podmínky krystalizace u slévárenských slitin mohou výrazně ovlivnit opotřebení nástrojů, homogenní jemnozrnná struktura způsobí menší opotřebení a naopak výskyt nespojitostí, oxidických vrstev a vměstků vede k výraznému opotřebení [1].

Slitiny, u kterých je hlavním legujícím prvkem křemík, je vhodné obrábět nižšími řeznými rychlostmi a posuvy. Tyto slitiny lze podle obsahu křemíku rozdělit na podeutektické, eutektické a nadeutektické. S rostoucím obsahem křemíku ve slitině značně roste opotřebení nástrojů, výjimku tvoří pouze slitiny s obsahem křemíku kolem 12% (eutektické). Matrice těchto slitin je poměrně měkká a při obrábění dochází k zatlačování tvrdých částic Si do matrice. V případě těchto slitin je nepříznivé také tepelné zpracování, které způsobuje zpevnění měkké matrice. Křemíkem legované slitiny se při obrábění převážně vyznačují krátkou dobře lámavou třískou, výjimkou jsou uvedené eutektické slitiny, které vytváří dlouhé svinuté třísky [1,22].

1.8.2 Tvářené slitiny

Převážná většina tvářených slitin se vyznačuje výbornou obrobitelností. Optimálních podmínek obrábění lze dosáhnout vhodnou geometrií nástrojů a patřičnými parametry obrábění. Nevytvrditelné slitiny tvoří dlouhou spojitou třísku, která se musí v průběhu obrábění odstraňovat, obrobitelnost těchto slitin je možné zlepšit tvářením za studena. Vytvrditelné slitiny mají velmi dobrou obrobitelnost, tříska ve vytvrzeném stavu je obvykle dlouhá a stočená, u některých slitin se velmi snadno láme. Obrobitelnost těchto slitin před vytvrzením je horší a dala by se přirovnat k obrobitelnosti nevytvrditelných slitin [1,22].

1.8.3 Automatové slitiny

Legující prvky mají nízkou teplotu tání, mezi hlavní prvky patří Pb, Bi, Sb, a Cd. U těchto prvků nedochází k rozpouštění v základní hliníkové matici, ale k vytvoření měkkých částic. Toto napomáhá vzniku drobné lámavé třísky v průběhu obrábění, kdy za zvýšených teplot dochází k jejich částečnému natavení a tvorbě drobné třísky. Opotřebení nástrojů je i při vysokých řezných rychlostech (kolem 1000 m/min) relativně malé. Velikost řezných sil a kvalita povrchu je srovnatelná s tvářenými vytvrditelnými slitinami. Nejpoužívanějšími slitinami jsou zástupci série 2000 a 6000 (legovány Bi, Pb). Olovo v těchto slitinách je v současné době nahrazováno převážně cínem, důvodem je snaha zlepšení životního prostředí [1].

1.9 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

Tepelné zpracování pro tvářené slitiny a odlévané slitiny se zásadně neliší, základní rozdělení je do dvou skupin [1,17]:

- **žihání,**
- **vytvrzování.**

1.9.1 Precipitační zpevnění – vytvrzování

Hlavní podmínkou pro vytvrzování je výrazná změna rozpustnosti legujícího prvku nebo prvků na teplotě, což je základním předpokladem vzniku přesyceného tuhého roztoku. Tímto způsobem je možné ve značné míře ovlivňovat fyzikální, technologické a především mechanické vlastnosti slitin [17].

Samotné vytvrzování se skládá ze dvou na sebe navazujících pochodů [17,18]:

- **rozpouštěcí žihání** – materiál je ohřát na žhací teplotu, následuje výdrž na teplotě nutná pro rozpuštění a převedení jedné nebo více intermetalických fází (např. Mg_2Si , $CuAl_2$) do tuhého roztoku. Dalším krokem je ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí s cílem získání nasyceného tuhého roztoku.
- **stárnutí** – je pochod, v jehož průběhu dochází ke změnám mechanických, fyzikálních a technologických vlastností důsledkem změny substruktury. Přírozené stárnutí probíhá při běžné teplotě, kdežto umělé stárnutí za zvýšených teplot. V některých případech se využívá tzv. stupňovitého stárnutí, kdy proces stárnutí je uskutečňován při dvou nebo více teplotách.

Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin je velmi rozsáhlou problematikou, proto je v Tab. 1.5 uveden pouze jejich výběr s ohledem na předem uvedené pevnostní charakteristiky po tepelném zpracování u jednotlivých materiálů používaných v leteckém průmyslu.

Tab. 1.5 Výběr stavů tepelného zpracování podle ČSN EN 515 [1,18].

Stav	Definice
T1	Ochlazení ze zvýšené teploty tváření, přirozené stárnutí do stabilního stavu.
T2	Ochlazení ze zvýšené teploty tváření, tváření za studena, přirozené stárnutí.
T3	Rozpouštěcí žihání, tváření za studena, přirozené stárnutí.
T4	Rozpouštěcí žihání, přirozené stárnutí.
T5	Ochlazení ze zvýšené teploty tváření, umělé stárnutí.
T6	Rozpouštěcí žihání, umělé stárnutí.
T7	Rozpouštěcí žihání, umělé přestárnutí. (pro maximální pevnost)
T8	Rozpouštěcí žihání, tváření za studena, umělé stárnutí.
T9	Rozpouštěcím žihání, umělé stárnutí, tváření za studena.

2 FRÉZOVÁNÍ

Ve své podstatě je frézování druhem obráběcího procesu, při kterém dochází k úběru materiálu vázanými pohyby rotujícího nástroje a obrobku. Posuvný pohyb je v nejběžnějších případech vykonáván obrobkem. V minulosti byl vykonáván pouze jako kombinace přímočarých pohybů, současné moderní obráběcí stroje však již umožňují plynulou změnu posuvného pohybu ve více směrech. Frézy jsou ve většině případů vícebřitě nástroje, průběh řezného procesu je přerušovaný a každým zubem je odebrána tříska o proměnné tloušťce [2,9].

2.1 Technologická charakteristika

S ohledem na aplikovaný nástroj je možné z technologického hlediska rozlišit následující způsoby frézování [2,9]:

- **válcové** – obrábění je prováděno břity, které jsou rozmístěné po obvodu nástroje.
- **čelní** – jde o kombinovaný proces obrábění, kdy je úběr materiálu realizován břity na obvodu frézy za podpory vedlejších břitů, které jsou umístěny na čele nástroje.

Další způsoby frézování jsou odvozeny od těchto dvou základních, jako např. frézování s axiálním posuvem, planetové a okružní [9].

2.2 Rozdělení podle kinematiky frézovacího procesu

Existují dva hlavní způsoby frézování, které vyjadřují poměr pohybu obrobku, a zásadním způsobem ovlivňují průběh procesu obrábění. Oba způsoby jsou především významné rozdílnými způsoby při vstupu a výstupu břitu nástroje do řezu. Pohyb obrobku je možný ve směru otáčení frézy, tehdy se jedná o sousledné (sousměrné) frézování. Při pohybu obrobku proti směru otáčení frézy se jedná o nesousledné (protisměrné) frézování [2,9].

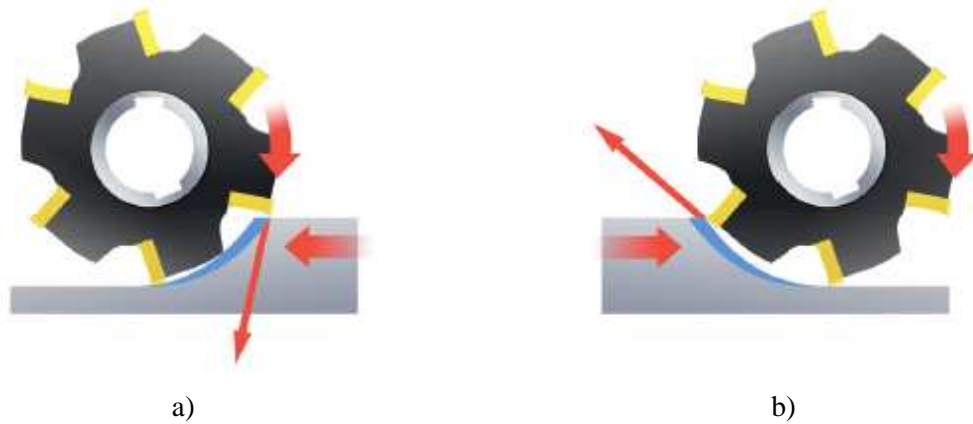
2.2.1 Sousledné frézování

V průběhu sousledného frézování dochází k náhlému vstupu břitu do materiálu obrobku. Obrábění začíná velkou tloušťkou třísky a klesá až k nulové hodnotě, jak ukazuje obr. 2.1 a) je obrobený povrch vytvořen při výstupu břitu ze záběru. Vliv velké tloušťky třísky má příznivý vliv a tendencí řezných sil je přitlačování obrobku ke stolu frézky, což klade zvýšené nároky na posuvový mechanismus stolu frézky. Nutností je vymezení vůli mezi maticí a posuvovým šroubem. Moderní obráběcí stroje však již disponují kuličkovými posuvovými šrouby a sousledné frézování nezpůsobuje žádné potíže [2,9].

2.2.2 Nesousledné frézování

Při nesousledném frézování vzniká obrobený povrch v průběhu vnikání nástroje do obrobku obr. 2.1 b). Velikost tloušťky třísky se mění z nulové hodnoty až po maximální hodnotu. Na počátku záběru je břit nástroje odtlačován ze záběru, kdy dochází ke skluzu břitu po obrobené ploše a zpevnění povrchové vrstvy obrobku. Síly vznikající při

nesousledném frézování mají tendenci zvedat obrobek od stolu frézky, což klade vyšší nároky na upnutí obrobku [2,9].



Obr. 2.1 Kinematika válcového frézování a) sousledné frézování, b) nesousledné frézování [23].

2.2.3 Výčet hlavních výhod sousledného a nesousledného frézování

Sousledné frézování [9]:

- trvanlivost břitů nástroje je vyšší a je možné využít vyšších posuvů a řezných rychlostí,
- nižší požadavky na upnutí obrobku, díky příznivému vlivu řezných sil,
- nižší řezný výkon stroje,
- menší náchylnost ke vzniku chvění,
- snížená náchylnost ke tvorbě nárůstku,
- vyšší kvalita drsnosti obrobenej plochy.

Nesousledné frézování [9]:

- není nutné vymezení vůle mezi maticí stolu a posuvovým šroubem,
- snížení opotřebení posuvového šroubu a matice,
- záběr při zařezávání břitů frézy nezávisí na hloubce řezu,
- při frézování materiálů, u kterých se na povrchu vyskytují okuje nebo písek, nedojde k ovlivnění trvanlivosti nástroje.

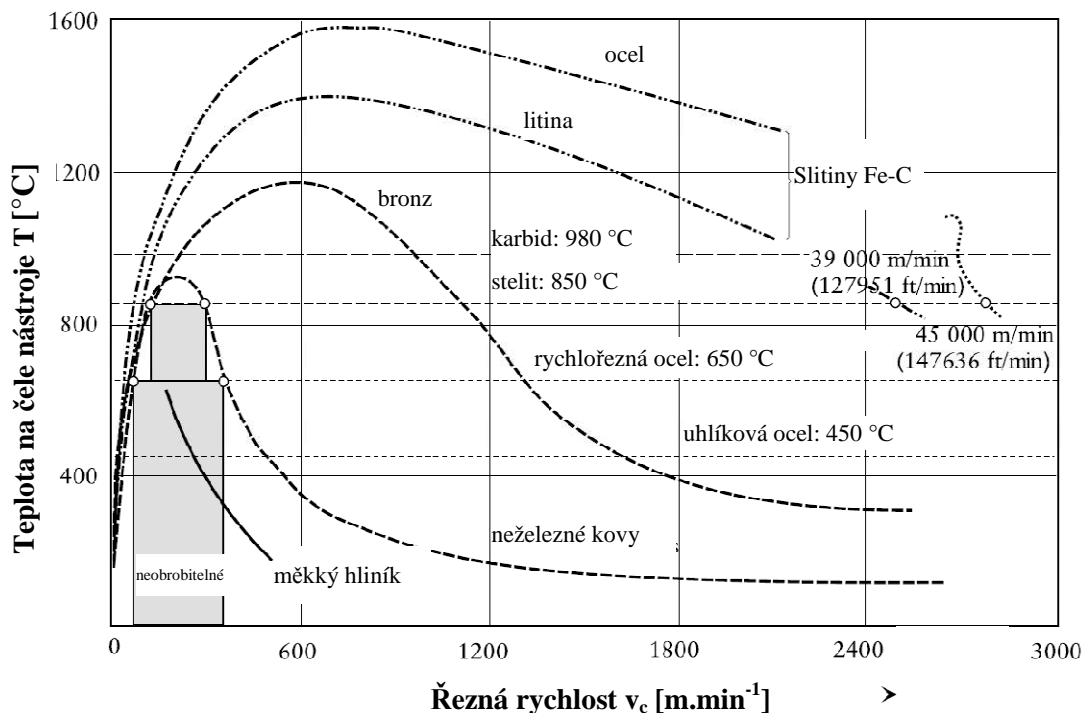
3 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ

Historie této moderní výrobní technologie se značným budoucím potenciálem sahá až do třicátých let minulého století. Kdy v letech 1924 až 1931 provedl německý vědec Carl J. Salomon řadu experimentů s využitím vysokých řezných rychlostí na různých kovových materiálech uvedených v tabulce 3.1. Salomon předpokládal, že pro každý materiál existuje kritická řezná rychlost, při které dosáhne teplota čela nástroje maximální hodnoty a při jejím dalším zvyšování dojde k poklesu teploty a tím ke zvýšení trvanlivosti nástroje [10,12,13].

Tab. 3.1 Řezné rychlosti dosažené C. J. Salomonem na různých materiálech [13].

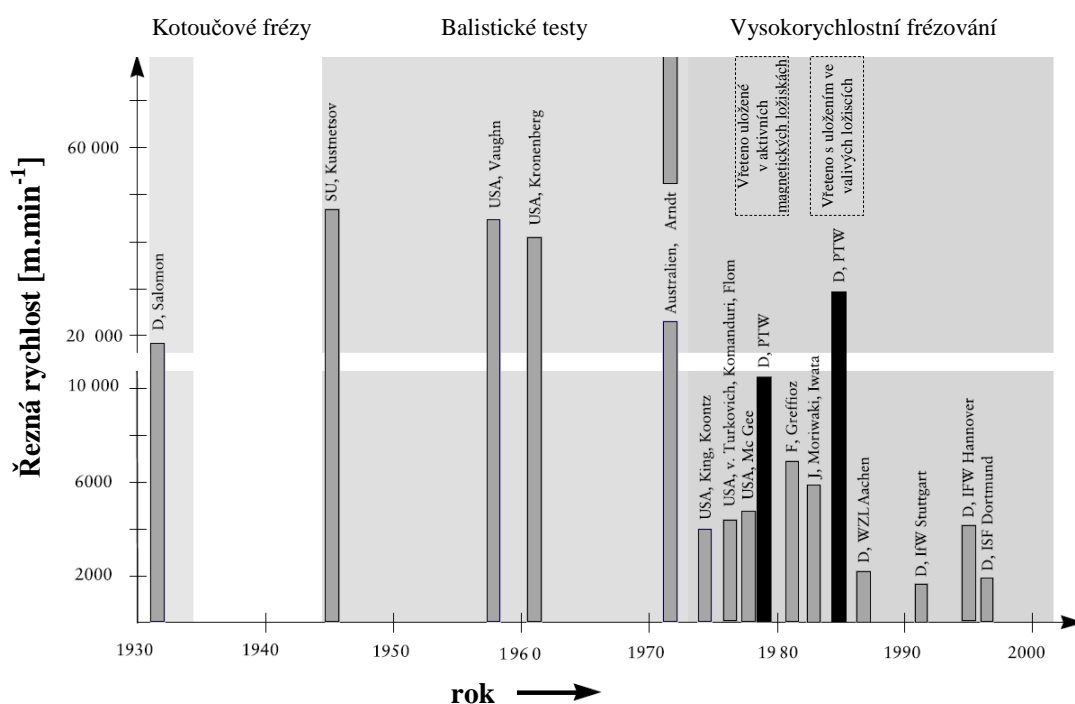
Materiál	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
Ocel	440
Bronz	1 600
Měď	2 840
Hliník	16 500

Salomon pro svůj základní výzkum využíval kotoučových fréz, jelikož v době jeho pokusů stále neposkytovaly dostatečně vysoké otáčky pro dosažení vysokorychlostního obrábění, byl nucen využívat fréz velkých průměrů. Výsledkem jeho výzkumu byl německý patent udělený v roce 1931, který popisoval závislost teploty na řezné rychlosti pro různé materiály (Obr. 3.1). Poukázal také na určité oblasti, kde není možné obrábění z důvodu příliš vysokých teplot, zvané v cizojazyčné literatuře jako “the dead valley” – “mrtvé údolí”. Vysokorychlostní obrábění (High Speed Machining – dále jen HSM) je tedy také možné nazývat jako obrábění za touto oblastí. Moderní pojetí PTW Institutu definuje HSM jako konvenční obrábění, při kterém jsou řezné rychlosti navýšeny 5x až 10x [13].



Obr. 3.1 Teplota při frézování vysokými řeznými rychlostmi [13].

Pokles teploty po dosažení maximální řezné rychlosti zdůvodňoval Salomon zmenšením primární plastické deformace při zvyšování řezné rychlosti. Jelikož je stupeň plasticity materiálu závislý na rychlosti deformace, rostoucí řezná rychlost způsobí pokles plasticity. Jeho cílem bylo překonání hranice kritické řezné rychlosti s odpovídající kritickou řeznou teplotou, při které již není fréza schopná odolávat tepelnému a silovému působení. Podle jeho předpokladů mělo za touto hranicí dojít ke snížení teploty na hodnotu odpovídající běžné řezné rychlosti a prodloužení trvanlivosti nástroje. Takto by proces obrábění mohl probíhat při nízkých teplotách, avšak s využitím vysokých řezných rychlostí [10,12].



Obr. 3.2 Historické milníky vysokorychlostního obrábění [13].

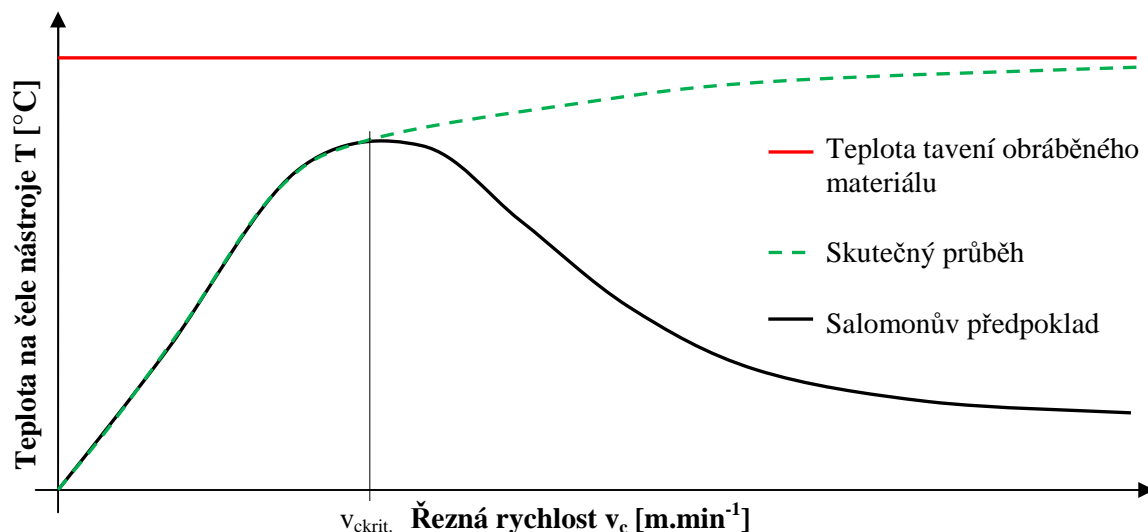
Salomonem předložená teorie se stala velmi zajímavým tématem pro mnoho vědeckých pracovišť, která se bez úspěchu snažila prokázat její platnost [12]. Problematice však nebylo věnováno mnoho pozornosti až do padesátých let minulého století (Obr. 3.2), kdy se začalo využívat balistických testů. Dosahované řezné rychlosti se pohybovaly řádově od 50 000 až do 80 000 m/min . Výsledky testů prokázaly pokles řezných sil, teplot i změnu podmínek tvorby třísky. S ohledem na velmi krátkou dobu kontaktu břitu s obrobkem, která se pohybovala v řádu milisekund, byly však výsledky málo vypovídající vzhledem k běžným způsobům obrábění [10,13].

Americké námořnictvo sponzorovalo v roce 1970 výzkum ve společnosti Lockheed Missiles & Space Company, který byl především zaměřen na HSM hliníkových slitin pro letecký průmysl s využitím číslicově řízených strojů. Amdt v roce 1971 zjistil při pokusech výrazný pokles řezných sil, což bylo dle jeho názoru založeno na změně procesu tvorby třísky, kdy při růstu řezné rychlosti se ve střižné rovině změnila deformace kontinuálního tuhého materiálu na deformaci zahrnující lokalizované roztavené oblasti a dutiny vytvořené mikrotrhlinami [12,24].

Dalším významným milníkem byla spolupráce amerických společností General Electric a DARPA. Rozsáhlý výzkum byl opět zaměřen na možnosti využití HSM pro obrábění slitin hliníku, niklových slitin, titanových slitin (Ti-6Al-4V) a oceli. Hlavním cílem projektu bylo snížení nákladů na výrobu zbraňových systémů na základě využití moderních metod obrábění. Výsledky výzkumu byly prezentovány na konferenci o HSM v roce 1984, při testech bylo dosaženo řezných rychlostí až $7500 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ s využitím modifikovaných konvenčních strojů. Při balistických testech bylo dosaženo řezných rychlostí až $72\,000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. S využitím konvenčních nástrojových materiálů bylo pro slitiny hliníku potvrzeno, že je možné jejich obrábění při všech rychlostech dostupných na vysoce výkonných obráběcích strojích. U slitiny Ti-6Al-4V je nutné obrábění při relativně nízkém úběru materiálu pro zachování dostatečné trvanlivosti nástroje. Slitiny niklu a oceli leží mezi těmito dvěma extrémy [12].

Vývoj HSM v Evropě byl zaznamenán především na německých technických univerzitách, které této oblasti věnovaly značnou pozornost. Technická univerzita v Darmstadtu jako první uvedla do provozu v roce 1980 stroj, který využíval vysokorychlostního vřetena uloženého v aktivních magnetických ložiscích [13].

V [24] je uveden rozsáhlý přehled literatury, která zmiňuje Salomonovu teorii. Naprostá většina autorů však zastává názor, že tato teorie je chybná a skutečný průběh teploty se při zvyšování řezné rychlosti asymptoticky blíží teplotě tavení obráběného materiálu (Obr. 3.3), což dokládají provedenými experimenty. Jedním z důvodů je také fakt, že většina ze Salomonovy práce byla ztracena během druhé světové války a její výklad není tedy přesný.

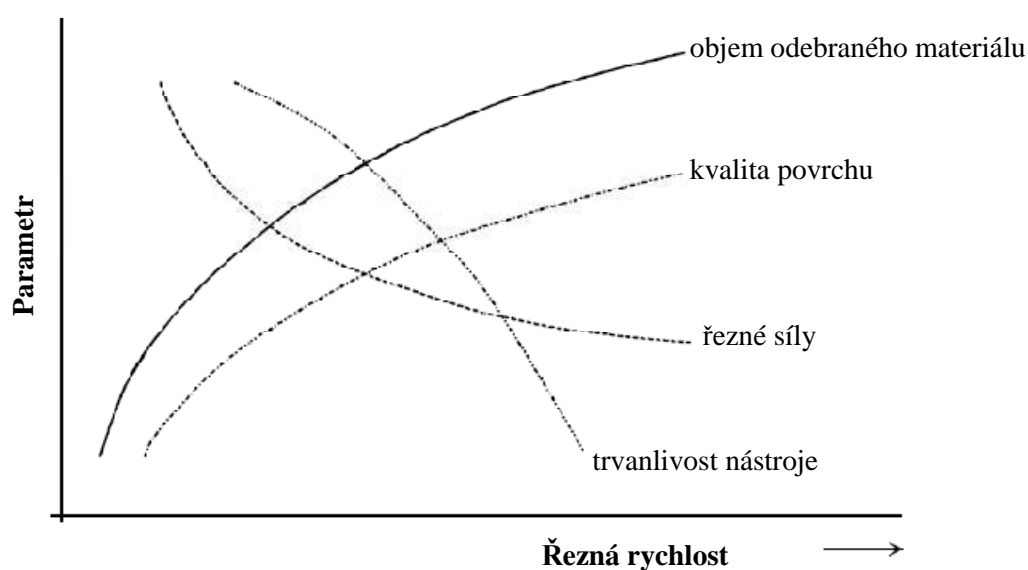


Obr. 3.3 Grafický průběh závislosti teploty čela nástroje na řezné rychlosti [10].

Tento odborný článek nabízí i jiný pohled na tuto teorii a zmiňuje možnost její platnosti pro povrchovou teplotu obrobené součásti. Odkazuje se na výzkumy HSM provedené na různých vědeckých pracovištích, kdy bylo prokázáno, že s růstem řezné rychlosti dochází ke snížení distribuce tepla do obrobku a tím lze dosáhnout vyšší přesnosti. Autoři těchto výzkumů avšak v převážné většině Salomonovu teorii nezmiňují.

3.1 Charakteristika HSM

Vysokorychlostní obrábění nezahrnuje pouze využití vysokých řezných rychlostí, ale také vysoké posuvové rychlosti, což umožňuje úběr velkých objemů materiálu za časovou jednotku a tím výrazné zkrácení výrobních časů. Tato metoda výrazně přispívá ke zvýšení objemu, produktivity výroby a snížení výrobních nákladů při dodržení požadovaných nároků na kvalitu a přesnost výrobků [10,26]. Hlavní charakteristiky HSM zobrazuje Obr. 3.4, který popisuje závislost jednotlivých parametrů na řezné rychlosti. Samotný termín vysokorychlostní obrábění je velmi relativní, jelikož nelze zcela přesně stanovit hodnotu řezné rychlosti, kdy konvenční obrábění přechází ve vysokorychlostní. Nutné je vzít v potaz druh obráběného materiálu a také druh obráběcího procesu. Přehled oblastí konvenčního a HSM pro jednotlivé materiály zobrazuje obr. 3.4. Intervaly řezných rychlostí pro HSM u jednotlivých metod popisuje tab. 3.3 [10,14].



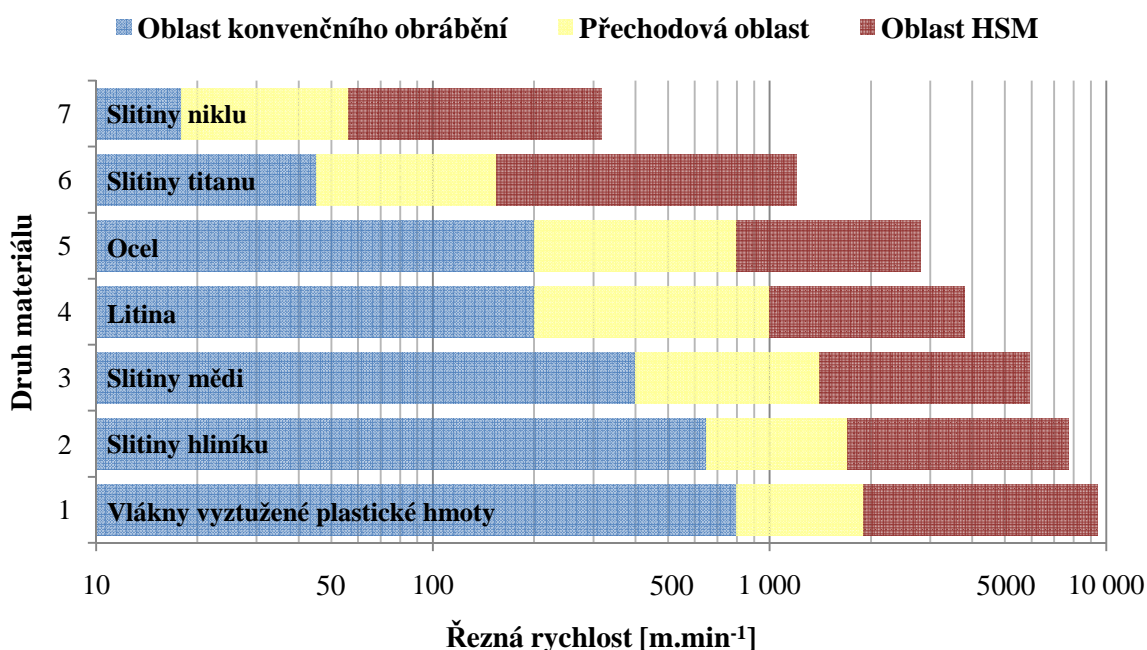
Obr. 3.4 Závislost jednotlivých parametrů na řezné rychlosti při HSM [13,14].

Nárůst řezné rychlosti má za následek snížení koeficientu tření mezi třískou a nástrojem. Taktéž dochází k výraznému poklesu řezných sil, což přináší menší nároky na upnutí součásti a umožňuje relativně jednodušší obrábění tenkostěnných součástí v kontrastu s konvenčními technologiemi. Velké množství vygenerovaného tepla je odvedeno třískami. Procentuální podíl odvedeného tepla se podle autorů odborné literatury různí. Podle [24] Shaw stanovil, že je až 90% tepla odvedeno třískami, 5% nástrojem a 5% obrobkem. Jiní autoři zastávají stanovisko 80% tepla odvedených třískami, 10% nástrojem a 10% obrobkem. Malý nárůst teploty obrobku tedy pozitivně ovlivňuje výslednou přesnost [14,15].

Tab. 1.6. Intervaly vysokorychlostního obrábění u vybraných metod obrábění [20,22].

Metoda obrábění	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
Soustružení	800 – 8000
Vrtání	100 – 1100
Frézování	560 – 6000
Protahování	12 – 70
Vystružování	10 – 250
Broušení	6000 – 9500, (100 – 160 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Vysokorychlostní obrábění s sebou přináší celkově odlišný pohled na obráběcí proces, je zde využíváno strojní zařízení a nástroje, které jsou značně finančně náročné, zároveň i výrazně roste množství spotřebovaných nástrojů. Tato metoda klade zvýšené nároky na řídicí systémy, příprava výroby vyžaduje větší využití moderních CAD/CAM systému, než samotné programování na obráběcích strojích. Nutností je také větší zkušenosti operátorů [14].



Obr. 3.5 Intervaly řezných rychlostí pro jednotlivé materiály [22,27].

Mezi další metody, které jsou zahrnuty v technologii HSM, patří především tzv. suché a tvrdé obrábění. Z těchto technologií jsou odvozeny další příbuzné technologie, které jsou založeny na stejném principu, a to na období jevů vznikajících v průběhu obráběcího procesu při zvyšování řezné rychlosti. Jedná se např. o vysokovýkonné obrábění, vysokorychlostní broušení, odvalovací frézování atd. [25].

3.1.1 Suché obrábění

Procesní kapaliny jsou využívány především za účelem chlazení, mazání a odvodu třísek. Hlavním cílem suchého obrábění (DM – Dry Machining) je minimalizace nebo úplné vyloučení procesních kapalin v průběhu obrábění, což umožňuje výrazné snížení finančních nákladů spojené s jejich nákupem, údržbou a likvidací. Výhodou je také omezení dalších průvodních technologických operací jako např. čištění (odmaštění) obrobků, mokřích třísek atd. [10,33].

Z technologických důvodů není vždy možné zcela vyloučit využití procesních kapalin. Využívá se tzv. kvazi suché obrábění, kdy je při obráběcím procesu využíváno redukované množství procesní kapaliny, která zajišťuje pouze mazání kontaktní plochy mezi nástrojem a třískou, za účelem snížení třecích sil na čele nástroje.

Důraz kladený na ochranu životního prostředí a ochranu zdraví pracovníků kladou vysoké nároky na využívané procesní kapaliny. V současné době je především využíváno kapalin, které nepoškozují zdraví pracovníků a jsou snadno recyklovatelné. Jedná se o tzv. ekologické procesní kapaliny [33].

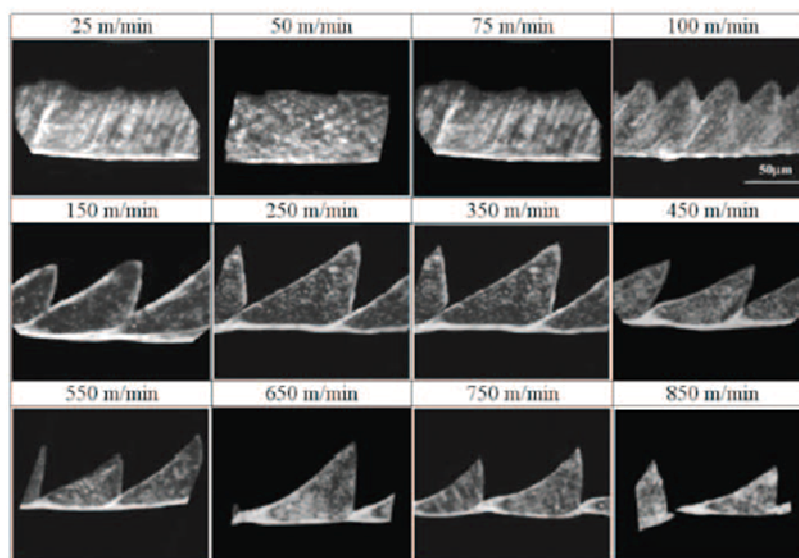
3.1.2 Tvrdé obrábění

Materiály s vysokou tvrdostí a pevností byly v minulosti obráběny především s využitím technologie broušení. Tvrdé obrábění (HM – Hard Machining) nástroji s definovanou geometrií břitu bylo umožněno především velkým pokrokem v oblasti nástrojových materiálů. Nástroje z jemnozrnných slinutých karbidů se speciálními povlaky a především nástroje z kubického nitridu bóru umožňují obrábění tvrdých materiálů [10,36]. Hranice pro rozlišení tvrdého obrábění se podle různých zdrojů liší, autory uváděná tvrdost materiálu obrobku však vždy leží v intervalu 40 – 70 HRC. Tvrdé obrábění klade vysoké požadavky na tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek. Využití nalézá především ve výrobě forem a zápustek, kdy se po předhrubování ve většině případů tepelně zpracují. Následně je nutné odebrat přídavek materiálu pro dokončení načisto, nejčastěji bývá využito kulových (Obr. 3.5) a válcových fréz. Chlazení v průběhu obrábění bývá omezeno na minimum, aby se zabránilo tepelným šokům na nástroji. Nejlepším řešením je využití stlačeného vzduchu, pro rychlý odvod třísek z místa řezu. Cílem této technologie je minimalizace času nutného na dokončení formy nebo zápustky, které bývá realizováno leštěním [29,30].



Obr. 3.6 Příklad tvrdého obrábění oceli (ČSN 19 552) zušlechtné na 56 HRC [30].

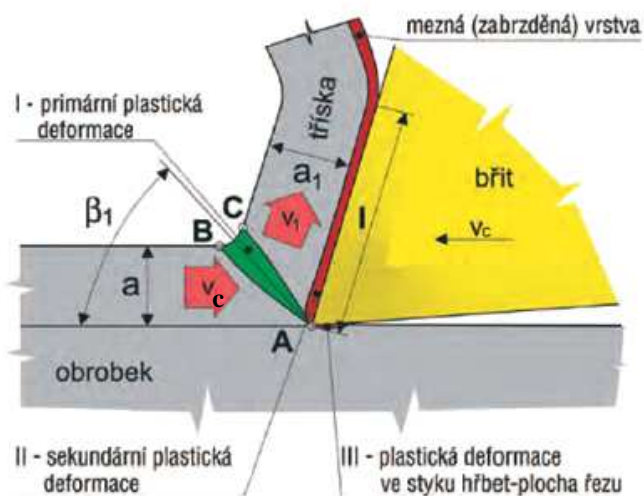
Mezi hlavní aspekty charakterizující řezný proces patří řezné síly, tepelné ovlivnění obrobeného povrchu, ale také mechanismus tvorby třísky. V [34] bylo popsáno autory vysokorychlostní tvrdé obrábění nástrojové oceli pro výrobu zápustek a forem ČSN 19 556, materiál byl tepelně zpracován na tvrdost 56 HRC a následně byly provedeny testy zaměřené na změny tvaru třísky při různých řezných rychlostech od 25 m.min⁻¹ až do 1700 m.min⁻¹. Metalograficky bylo možné zpracovat třísky do rychlosti 850 m.min⁻¹ z důvodu vzniku článkovité třísky nad hodnotou této rychlosti, různé druhy třísek ukazuje obr. 3.6.



Obr. 3.7 Příklad metalografických vzorků třísek při tvrdém obrábění oceli (ČSN 19 556) zušlechtné na 56 HRC [34].

3.2 Mechanismus tvorby třísky

V průběhu tvorby třísky obráběný materiál prochází stavy pružné napjatosti, plastické deformace, až dojde k jeho oddělení lomovým porušením. Důsledkem působení řezného nástroje dochází k přeměně materiálu ve třísku v oblasti známé jako kořen třísky, která se dělí na tři oblasti s výraznou plastickou deformací (Obr. 3.7). Oblast primární plastické deformace (A-B-C) je místem největší plastické deformace a probíhá zde přeměna obráběného materiálu na třísku. V této oblasti dochází k pěchování třísky a obvykle platí, že $a_1 > a$. Tříska odcházející po čele nástroje v_1 má nižší rychlost, než je řezná rychlost v_c [11,35].



Obr. 3.8 Mechanismus tvorby třísky [35].

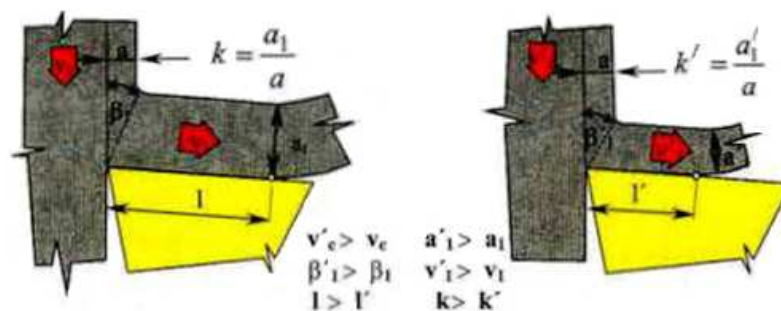
Oblast sekundární plastické deformace je charakterizována intenzivním třením třísky po čele nástroje, probíhá zde silná plastická deformace tenké vrstvy třísky, tzv. mezní (zabrzdné) vrstvy. V oblasti terciální plastické deformace dochází ke tření nástroje o obrobený povrch, což ovlivňuje výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Plastická deformace je největší v sekundární oblasti, protože je omezena na velmi tenkou vrstvu materiálu, čímž dochází k zásadnímu tepelnému ovlivnění čela nástroje [11,35].

3.3 Rozdíly mezi konvenčním a vysokorychlostním obráběním

Odlišnost konvenčního a vysokorychlostního obrábění se výrazně projevuje v mechanismu tvorby třísky. Průběh tvorby a oddělování třísky je velmi složitým procesem a závisí na mnoha činitelích. Mezi hlavní činitele patří fyzikální vlastnosti obráběného materiálu a jejich závislost na podmínkách plastické deformace. Obecně lze uvést, že se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k zužování oblasti plastické deformace v zóně tvorby třísky a k jejímu vzniku dochází plastickým skluzem v tzv. rovině stříhu [20].

3.3.1 Řezný proces při konvenční obrábění

V průběhu konvenčního obrábění prochází odebíraný materiál oblastí primární plastické deformace, kde dochází k jeho výrazné plastické deformaci, tím dochází k jeho zpevnění a zvýšení tvrdosti. Takto zpevněný materiál klade větší řezný odpor, který v kombinaci s malým úhlem střížné roviny vede ke zvětšování tloušťky třísky. Plocha kontaktu mezi třískou a čelem nástroje se zvětšuje a dochází ke zvýšení koeficientu přechování třísky k (Obr. 3.9). V oblasti sekundární plastické deformace smykové napětí přesahuje mez kluzu ve smyku u již zpevněného materiálu a dochází k další výrazné plastické deformaci. Velká přítlačná síla třísky a teplo vygenerované při přeměně materiálu v třísku s teplem vzniklým třením třísky o čelo nástroje podporují difúzní a abrazivní procesy na čele bříty nástroje, což vede k jeho zvýšenému opotřebení [10].

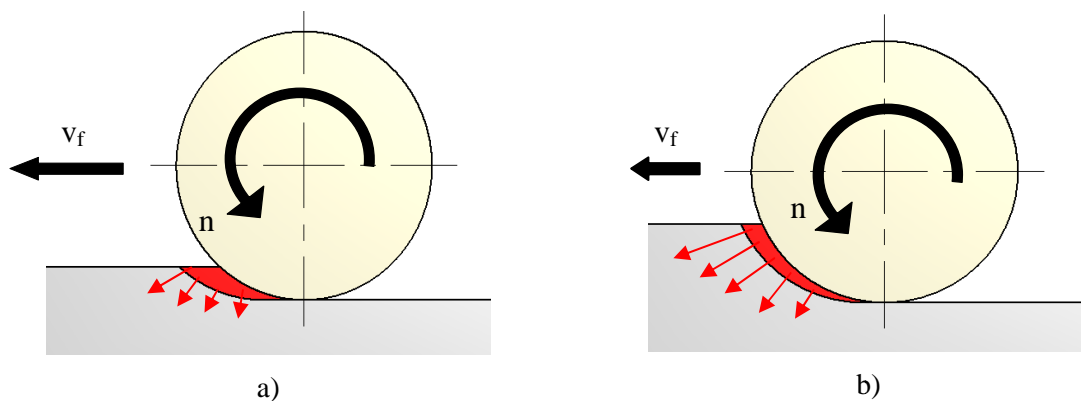


Obr. 3.9 Porovnání řezných procesů při konvenčním a vysokorychlostním obrábění [25].

3.3.2 Řezný proces při vysokorychlostním obrábění

Pochody popsané u konvenčního obrábění se u HSM výrazně liší. Teplota třísky se u HSM blíží tavné teplotě obráběného materiálu, při určité rychlosti dojde k náhlé změně mechanických i metalurgických vlastností třísky. Dojde k poklesu tvrdosti třísky, snížení

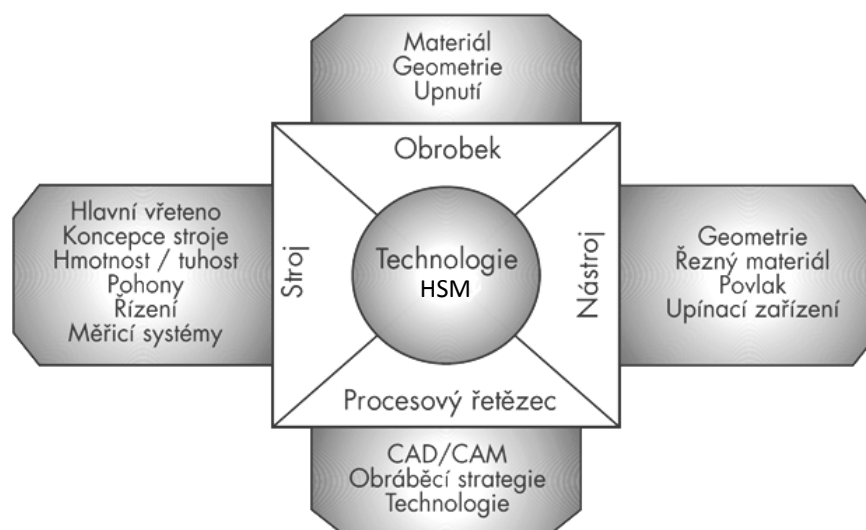
přítlačné síly na čele nástroje, třecí síly i řezného odporu. Zvětšením úhlu střižné roviny dojde k zmenšení tloušťky třísky a zmenšení kontaktní plochy čela nástroje a třísky. Dále dojde ke zvýšení rychlosti odchodu třísky z kontaktní zóny a tím k omezení nárůstu teploty v kontaktní zóně. Většina tepla vygenerovaného řezáním je odvedena třískou a tím dojde k minimalizaci přenosu tepla do nástroje a obrobku. Teplota třísky roste do dosažení určité řezné rychlosti a maxima dosahuje pro hliníkové slitiny asi 600 °C, 1000 °C pro bronz, 1300 °C u litin a až 1500 °C u ocelí. Nutností je vysoká kvalita řezné hrany nástrojů pro HSM a jejich povlaky, které na povrchu nástroje vytváří tepelně izolační vrstvu. Jejich úkolem je především zvýšení odolnosti nástroje proti difúznímu a abrazivnímu opotřebení [10].



Obr. 3.10 Porovnání množství tepla odvedeného do obrobku: a) HSM, b) konvenční způsob obrábění [10].

3.4 Požadavky na obráběcí proces

Při vysokorychlostním obrábění je parametry obrábění ovlivněn nejen samotný řezný proces, ale celá soustava stroj – nástroj – obrobek. Obr. 3.5 ukazuje faktory ovlivňující celý proces [22].



Obr. 3.11 Faktory ovlivňující proces při vysokorychlostním obrábění [22].

3.5 Výhody a nevýhody HSM

Výrazné zvýšení řezné rychlosti a posuvové rychlosti (5x až 10x), při relativně malých hloubkách řezu s sebou přináší velké množství výrazných výhod, avšak přináší také řadu nevýhod [22]. Výčet hlavních výhod a nevýhod je uveden v následujících podkapitolách.

3.5.1 Výhody vysokorychlostního obrábění

Mezi hlavní výhody HSM patří [10,20, 22]:

- dosažení vysokých hodnot objemu odebraného materiálu za jednotku času, kdy množství odebraného materiálu je až o 30% větší než při konvenčním obrábění,
- výrazná redukce času potřebného pro obrobení součásti,
- vysoká rozměrová přesnost a kvalita obrobeného povrchu, což vede až k odstranění nebo minimalizaci dokončovacích operací,
- snížení řezných sil až o 30% a tím deformací soustavy stroj – nástroj – obrobek,
- omezení vzniku chvění soustavy přesunem podmínek obrábění mimo oblast samobuzeného kmitání,
- možnost aplikace suchého obrábění (ekonomické i ekologické hlediska),
- tvarová stálost obrobků z důvodu odvedení převážné většiny tepla třískami (eliminace tepelné roztažnosti).

3.5.2 Nevýhody vysokorychlostního obrábění

Mezi hlavní nevýhody HSM patří [10, 22]:

- finančně velmi nákladné strojní vybavení,
- růstem řezné rychlosti dochází k intenzivnějšímu opotřebení řezných nástrojů,
- nutnost přizpůsobení řezných materiálů a povlaků parametrům obrábění (speciální materiály – finančně nákladné),
- speciální (velmi přesné) upínání nástrojů a nutnost jejich vyvažování,
- zvýšené požadavky na zajištění ochrany obsluhujícího personálu,
- vyšší opotřebení částí strojů (vedení, ložiska, uložení, atd.) z důvodu vysokých hodnot zrychlení a zpomalení při startu respektive při zastavování vřetene.

3.6 Vyvažování nástrojů pro HSM

S nárůstem otáček obráběcích strojů souvisí nutnost vyvažování nástrojových držáků i samotných nástrojů. Při aplikaci HSM bývá problémem házení nástrojového držáku nebo vlastního nástroje. Po upevnění nástroje do držáku může být hodnota házení opět odlišná. Výrobci garantovaná hranice házení je při otáčkách kolem 8000 min^{-1} , kdy není nutné dodatečné vyvažování upínače. Při využití vyšších otáček je vhodné kontrolovat hodnotu obvodového házení. Ke zjištění nevyváženosti se využívá speciálních vyvažovacích strojů,

např. Obr. 3.13 a). Odstranění nevyváženosti probíhá úběrem nebo naopak přidáním materiálu. Mezi standardní způsoby patří: odvrtání/odfrézování materiálu, využitím vyvažovacích šroubů nebo kroužků [42]. Nevyváženost nástrojů má nepříznivý vliv na životnost nástroje, kvalitu obrobeneho povrchu i vznik hluku při obrábění. Obr. 3.13 b) ukazuje upínače, které využívají vyvažovací kroužky s karbidovými závažími. Samotného vyvážení se docílí vhodným natočením těchto kroužků a kontrole na správnosti vyvážení na běžně dostupných vyvažovacích strojích [26].



Obr. 3.12 Vyvažování nástrojů: a) vyvažovací stroj ToolDynamic od firmy Haimer [42], b) upínač s vyvažovacími kroužky [26].

3.7 Bezpečnost práce při HSM

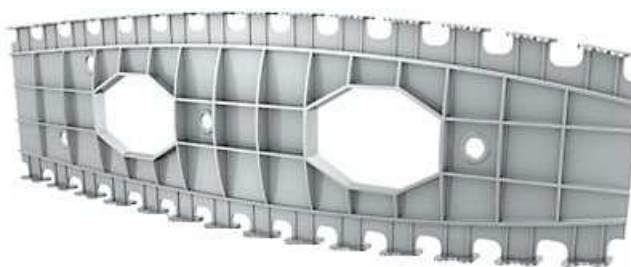
Vysoké otáčky vřeten strojů s sebou přináší nejen výhody, ale také značná rizika. Kinetická energie, která se uvolní při destrukci nástroje Obr., je srovnatelná s energií projektilu vystřeleného ze zbraně. Kryty obráběcích strojů tedy musí být dimenzované vhodným způsobem, aby nedošlo k jejich selhání a tím k ohrožení zdraví pracovníků [27,41]. Při využití suchého obrábění může dojít ke vzniku zdraví škodlivého kovového prachu a vysoké řezné rychlosti často zapříčiní emisi hluku, který musí co nejúčinněji snižován vhodnými bezpečnostními a ochrannými kryty.[41]



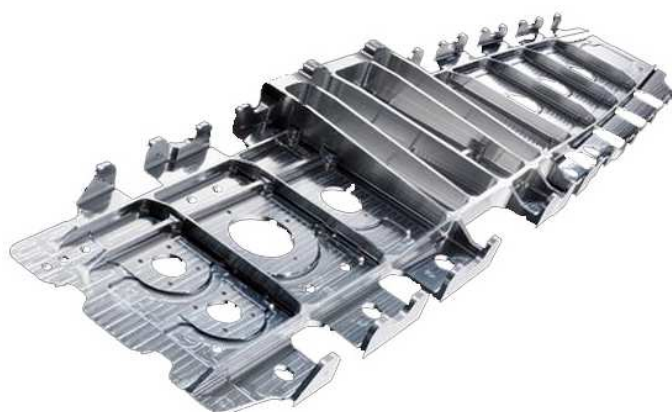
Obr. 3.13 Příklad destrukce nástroje: a) selhání základního tělesa, b) selhání kazety [41].

4 TENKOSTĚNNÉ SOUČÁSTI

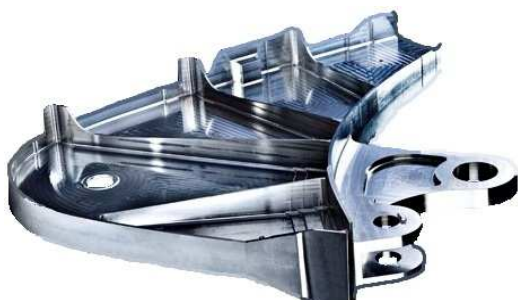
V konstrukci letadel jsou využívány různé typy součástí vyrobených z hliníkových slitin. Mezi ně patří nejrůznější druhy nosníků, vzpěr, částí opláštění nebo žebra křidel (Obr. 4.1, Obr. 4.2, Obr. 4.3), se kterými jsou spojeny specifické problémy při jejich obrábění způsobené především velmi malou tloušťkou stěn [31]. Součásti se často vyznačují velmi geometricky komplexními tvary a obvykle jsou vyráběny obráběním z monolitních bloků hliníkových slitin, kdy dochází k velkým objemovým úběrům materiálu, v některých případech je odebráno až 90% z celkového objemu polotovaru [15].



Obr. 4.1 Výztuha křídla letounu tzv. "žebro křídla" [31].



Obr. 4.2 Výztuha křídla letounu tzv. "žebro křídla" [32].



a)



b)

Obr. 4.3 a) Výztuha křídla letadla, b) Závěs dveří letadla [32].

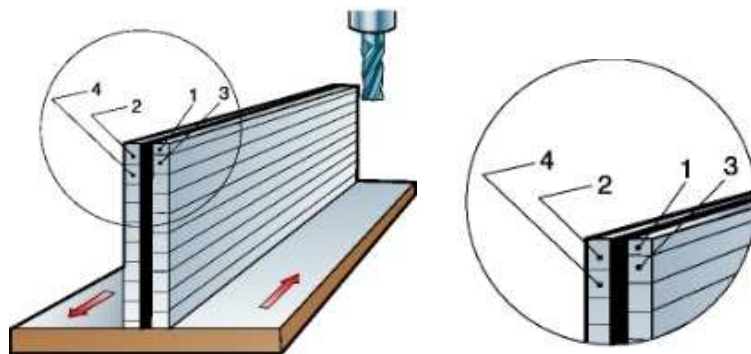
4.1 Strategie při obrábění tenkostěnných součástí

Tenkostěnné součásti se dají velmi dobře obrábět s využitím vysokorychlostního obrábění, vysoká řezná rychlost, malé a_p/a_c zkracují dobu záběru nástroje, což vede ke snížení rázového zatížení a průhybu obráběné součásti. Preferováno je sousledné frézování a počet průchodů určují rozměry stěny a axiální hloubka řezu. Při frézování hliníku i titanu se využívá stejných metod, které jsou především určeny závislostí výšky a tloušťky stěny. Rozdělení podle poměru výšky k tloušťce [28]:

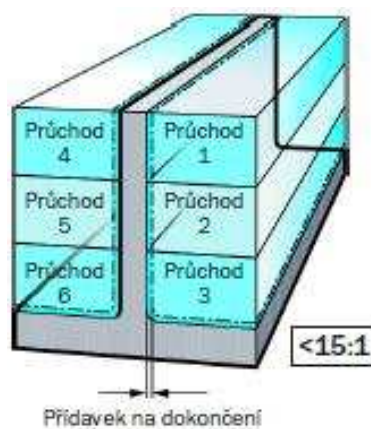
- malý poměr $h/t < 15:1$,
- střední poměr $h/t < 30:1$,
- velmi vysoký poměr $h/t > 30:1$.

4.1.1 Malý poměr výšky k tloušťce ($h/t < 15:1$)

Využívá se dráha nástroje zvaná “cikcak”, kterou zobrazuje Obr. 4.4, Obr. 4.5. Obrábí se nejdříve jedna strana stěny s překrývajícím se průchodem, následně se postup opakuje na druhé straně stěny, ponechává se přídavek na následné dokončení [28].



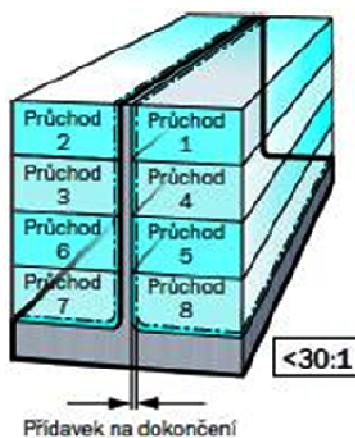
Obr. 4.4 Obráběcí strategie zvaná “zik-zak” [10,28].



Obr. 4.5 Obráběcí strategie pro malý poměr výšky k tloušťce stěny [28,40].

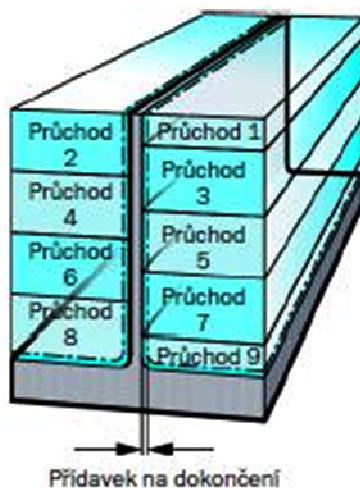
4.1.2 Střední poměr výšky k tloušťce ($h/t < 30:1$)

Zde jsou možné dva způsoby obráběcí strategie. První strategie pro nepřekrývané frézování zvaná “po vrstevnici”, kdy se střídají jednotlivé strany při úběru materiálu a průchody se nepřekrývají (Obr. 4.6).



Obr. 4.6 Obráběcí strategie zvaná “po vrstevnici” [28].

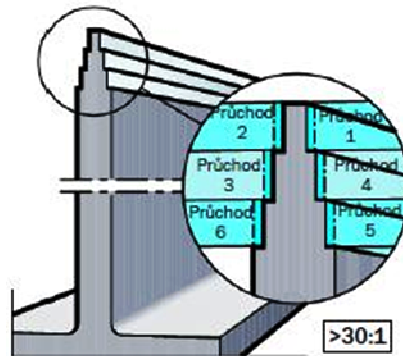
Druhým typem strategie je tzv. překrývané frézování s opěrnými stupni, kdy se dosáhne větší opory v místě řezu (Obr. 4.7). Na obou stranách se ponechává přídavek na dokončení.



Obr. 4.7 Obráběcí strategie s opěrnými stupni [28].

4.1.3 Velmi vysoký poměr výšky k tloušťce ($h/t > 30:1$)

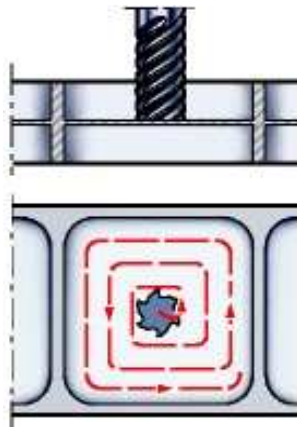
Kromě střídání stran při obrábění je využíváno podpěrných stupňů a postupně se přibližuje na požadovanou tloušťku stěny, tento princip ukazuje Obr. 4.8. Tenká část stěny má oporu v tlustší a tímto krokovým způsobem se postupuje až k dosažení konečné stěny, jde o princip “vánočního stromku” [28].



Obr. 4.8 Obráběcí strategie zvaná “vánoční stromek” [28].

4.1.4 Frézování do rohu při malé tloušťce dna

Při obrábění součástí s malou tloušťkou dna je vhodné použít kruhové interpolace ze středu (Obr. 4.9) kapsy s postupným zahlubováním nástroje až do požadované hloubky kapsy. U povrchů, které byly obrobeny z protilehlé strany, je vhodné použít nástroje s minimálními počty zubů, důvodem je snížení zatížení tenké stěny dna. Zvláštní přístup vyžadují součásti, které mají ve středu tenkého dna otvor. Při obrábění první části je vhodné ponechat na této straně pomocnou příčku, která zvýší stabilitu součásti, následuje obrábění druhé strany obrobku a po dokončení obrábění obou stran je tato příčka odstraněna [28].

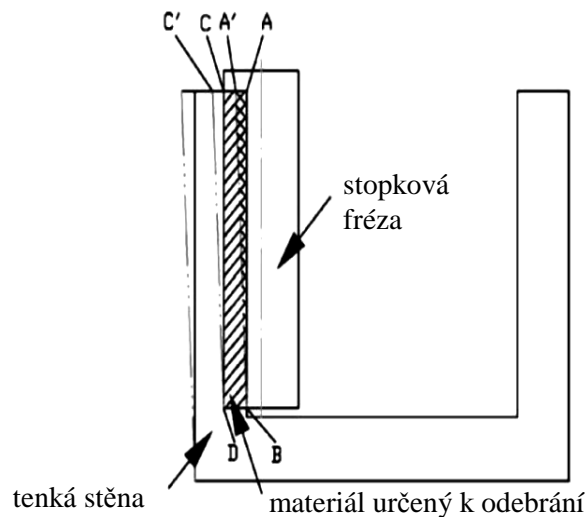


Obr. 4.9 Obráběcí strategie pro malé tloušťky dna [28].

4.2 Problémy při obrábění tenkostěnných součástí

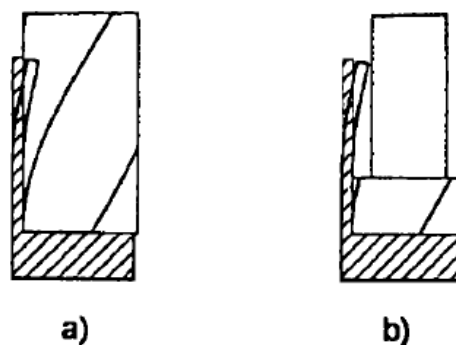
Tenkostěnné součásti se ve většině případů vyznačují svými komplexními tvary a nízkou tuhostí, což představuje značné problémy při obrábění. Rozměrová přesnost, dodržení geometrických tolerancí a kvality povrchu (integrity), ovlivňují funkční vlastnosti hotového výrobku [45]. Obrábění tenkostěnných součástí je klíčovým procesem především v leteckém průmyslu, kde jsou tyto součásti široce využívány z důvodů úspory hmotnosti. Nízká tuhost součástí umožňuje deformaci součástí v důsledku působení rezných sil během obráběcího procesu. I při využití CNC obrábění, kdy jsou nástroje vedeny přesně podle

naprogramované kontury, často dochází k deformaci stěny. Tenká stěna se vlivem řezných sil vychýlí a dojde k jejímu podřezání, tedy stěna bude mít u spodní části menší tloušťku, kdežto u horního konce bude stěna mít větší tloušťku (Obr. 4.10). Oblast ABCD je určena k odebrání, vlivem řezných sil dojde k vychýlení stěny a odebraný je materiál v oblasti A'BCD. Po posunu nástroje dojde k elastickému návratu stěny do původní pozice a materiál CDC' zůstane neodebrán [46].



Obr. 4.10 Příklad vychýlení tenké stěny při obrábění [46].

U velmi tenkých stěn může dojít v důsledku kmitání horního konce k jejich poškození. V těchto případech se využívá modifikovaných nástrojů (Obr. 4. 11) [38].



Obr. 4.11 Použití různých typů fréz pro obrábění tenkostěnných součástí: a) čelní válcová fréza, b) modifikovaná čelní válcová fréza [38].

K dosažení požadovaných rozměrových a geometrických tolerancí je také využíváno tzv. NC kompenzačních metod, které upravují dráhu nástroje. S využitím metody konečných prvků (MKP) je možné predikovat chování tenkostěnné součásti v průběhu obrábění a tím následně kompenzovat dráhu nástroje [46].

5 STABILITA OBRÁBĚCÍHO PROCESU

Při obrábění může dojít k odchylce od požadovaného rozměru nebo nedodržení předepsaných geometrických tolerancí dvěma hlavními způsoby [12]:

- statický průhyb – vede k nepřesnosti obráběné součásti,
- dynamická nestabilita – vede k periodicky se opakujícím chybám, jako jsou vlnitost a špatná drsnost povrchu.

5.1 Statický průhyb

Vznik statického průhybu může být zapříčiněn nedostatečnou tuhostí konstrukčních částí stroje, včetně ložisek, průhybu obrobku nebo nástroje, různou teplotní roztažností nebo rozměrovou nestabilitou materiálů zapříčiněnou zbytkovými napětími. Další možností je změna hustoty způsobená strukturními změnami materiálu [12].

5.2 Dynamická nestabilita

Průběh obráběcího procesu je v mnoha případech spjat se vznikem kmitání. Při kmitání jednotlivých prvků obráběcího procesu může docházet ke zhoršení kvality obráběné plochy např. zhoršením drsnosti povrchu nebo vzniku vlnitosti. Kmitání má také negativní vliv na obráběcí nástroj, kdy může docházet k jeho zvýšenému opotřebení, vylamování částí břitu nástroje, či dokonce k celkové destrukci nástroje. U obráběcích strojů má kmitání za následek větší intenzitu opotřebení jednotlivých částí stroje a ve značné míře může přispívat ke zhoršení pracovního prostředí [11]. V [12] bylo uvedeno rozdělení dynamické nestability na dva základní druhy, vynucené kmitání a samobuzené kmitání. Tlustý v [37] uvedl rozdělení kmitání na volné neboli přirozené kmitání, vynucené kmitání a samobuzené kmitání.

5.2.1 Vlastní kmitání

Tento druh kmitání se vyskytne, pokud je soustava vyvedena z rovnováhy rázem. Soustava kmitá, postupně však dojde k utlumení kmitání a návratu do původní polohy. Tento druh kmitání je vzácný a zřídka předstává problémy při obrábění [37]. K vyvolání tohoto druhu kmitání může dojít zapnutím spojky nebo záběrem řezného nástroje [11].

5.2.2 Vynucené kmitání

Ke vzniku vynuceného kmitání dojde působením periodicky proměnlivé působící síly na technologickou soustavu, kdy je síla nezávislá na soustavě. Největší účinek na obráběcí proces má vynucené kmitání v případě, kdy se frekvence působící síly blíží nebo shoduje s frekvencí kmitání soustavy [37]. V tomto případě dojde k absorbování větší části energie kmitání než k utlumení soustavou a ta může zvětšit amplitudu kmitů. K růstu amplitudy kmitů bude docházet až do doby, kdy se energie utlumená v jednom cyklu bude rovnat energii absorbované soustavou v jednom cyklu. V případě, kdy by tlumící schopnost byla konstantní, amplituda by mohla růst bez limitu. V praktických případech s rostoucí

amplitudou kmitů však dochází ke zvýšení tlumící schopnosti soustavy a je relativně rychle dosaženo ustáleného stavu amplitudy kmitů [12].

Možné způsoby snížení amplitudy kmitů [12]:

- eliminace periodicky působících budících sil,
- vyhnutí se přiblížení frekvencí budících sil a frekvence technologické soustavy,
- zvýšení tuhosti,
- zvýšení tlumících schopností.

V dnešní době je značná pozornost věnována zvýšení tlumících schopností obráběcích strojů s využitím tzv. modální analýzy, při které je možné vlastní frekvence strojů přesně stanovit [12].

Existují tři hlavní druhy vynuceného kmitání technologické soustavy [11]:

- kmitání vyvolané řezným procesem – příčinou vzniku kmitání je přerušovaný řez nebo nekonstantní hloubka řezu,
- kmitání, které není vyvolané vlastním řezným procesem – mezi příčiny, které mohou způsobit tento druh kmitání, patří nepřesnosti v převodových mechanismech obráběcích strojů, špatná vyváženost rotujících částí a setrvačné síly vznikající vratným přímočarým nebo rotačním pohybem,
- přenášené kmitání způsobené interferencí více obráběcích strojů ve výrobním závodě.

5.2.3 Samobuzené kmitání

Vznik samobuzeného kmitání není výsledkem působení periodického vnějšího budícího účinku, ale vznik zapříčiní samotný řezný proces. V cizojazyčné literatuře se pro samobuzené kmitání často využívá termínu “chatter” – chvění. Mezi charakteristické znaky samobuzeného kmitání patří především [15, 37]:

- amplituda kmitů roste s časem, dokud není dosaženo její stabilní hodnoty,
- frekvence chvění se velmi blíží frekvenci vlastních kmitů nebo kritické frekvenci soustavy,
- energie potřebná pro vznik kmitů vzniká ve stabilním vnitřním zdroji.

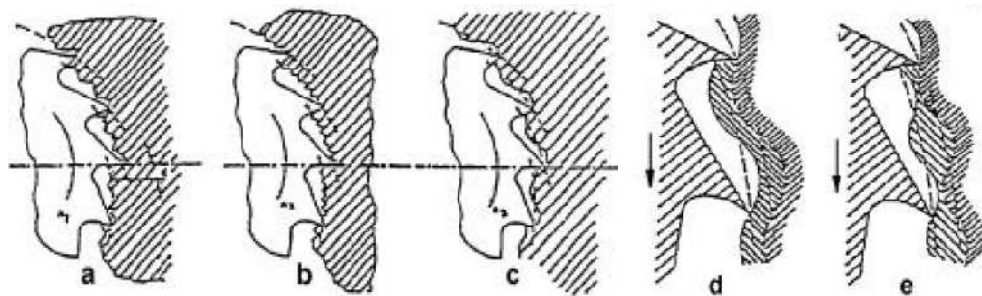
Vznik samobuzeného kmitání může být vyvolán stykem nebo nárazem nástroje na tvrdou strukturální částici v obráběném materiálu [11,12]. V průběhu obráběcího procesu břit nástroje odebírá třísku z povrchu vytvořeného při předchozím průchodu. U soustružení předchozím záběrem nebo u frézování předchozím zubem frézy. Pokud soustava v průběhu obrábění kmitá, dochází ke tvorbě vlnitosti povrchu jednotlivými zuby a k jejich regeneraci při dalším záběru. Z důvodu rozdílné frekvence chvění a zubové frekvence nejsou stopy na

obrobeném povrchu pravidelně rozmístěné jako u vynuceného kmitání. Při tomto druhu kmitání dochází na povrchu k tvorbě hlubších a delších vln, které jsou nazývány “stopy chvění”. Amplituda kmitů neustále roste až k hodnotě, která je nebezpečná pro nástroj i stroj. Z tohoto důvodu je nutné vyhnout se příliš velkému záběru a vyhnout se tak vzniku chvění [37].

Vlivy, které mohou způsobit vznik samobuzeného kmitání [11]:

- kmitání vyvolané řezným procesem – mezi hlavní příčiny patří např. reprodukce předchozí vlnitosti povrchu, změna stability nárůstku a změna součinitele tření, či postupné oddělování elementů třísky,
- kmitání nesouvisející s řezným procesem – při kopírovacím obrábění může dojít ke vzniku kmitání u systémů se zpětnou vazbou, u vyvrtávacích strojů může dojít vlivem velmi malých posuvů a s ním souvisejících trhavých pohybů ke vzniku tzv. relaxačního kmitání.

U všech případů samobuzeného kmitání při obrábění je frekvence kmitů téměř rovna frekvenci vlastních kmitů systému, což zahrnuje obrobek, obráběcí stroj, držák nástroje a nástroj. Vznik vlnitosti povrchu při frézování je popsán v [37]. Závisí především na vhodně zvolených podmínkách obrábění a vhodné volbě nástroj. Při nízkých otáčkách dochází ke vzniku velkého množství malých vln (Obr. 7.1 b)), dalším zvyšováním dochází ke snížení jejich počtu, ale ke zvětšení jejich výšky (Obr. 7.1 a)). Při vysokých otáčkách může docházet ke vzniku pouze půl, jedné, jedné a půl vlny (Obr. 7.1 c), d), e)).



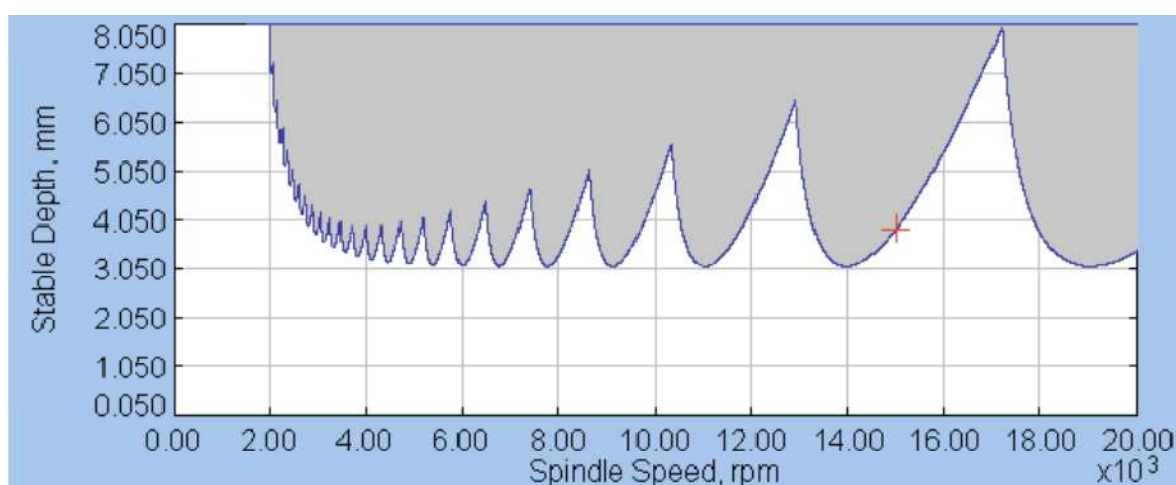
Obr. 5.1 Regenerace vlnitosti při frézování [37].

5.2.4 Rozlišení druhu kmitání

Způsobem pro rozlišení vynuceného kmitání a samobuzeného kmitání (chvění) je fakt, že po ukončení obráběcího procesu dojde k vymizení samobuzeného kmitání, kdežto vynucené kmitání přetrvává, i když nástroj již neodebírá třísku. Dalším způsobem je provedení testu při dvou různých řezných rychlostech. Pokud se při obou řezných rychlostech frekvence kmitání změní a je při obou testech rovna násobku otáček vřetena, jedná se o vynucený druh kmitání. V případě, že nedojde k výrazné změně frekvence, jedná se o samobuzené kmitání neboli chvění [37].

5.2.5 Diagramy stability (tzv. Lobe diagram stability)

Využití diagramů stability spočívá v jednoduchém určení hranice stabilního obrábění pro různé kombinace axiální hloubky řezu a otáček vřetene. Diagram na obr. 7.2 je rozdělen na dvě části a to na oblast stabilního (bílá část pod křivkou stability) a nestabilního (šedá část) obrábění. Hlavní výhodou diagramu je možnost maximalizace produktivity na obráběcím stroji, kdy je snahou docílit co největšího možného úběru materiálu za jednotku času. V diagramu se jedná o oblast ve stabilní oblasti v pravé části nahoře. Nutno podotknout, že diagram je vždy vytvořen pro určitý stroj a nástroj. Jeho použití není možné na jiném stroji i v případě použití stejného nástroje [39,44].



Obr. 5.2 Lobe diagram stability [39].

Tvorba těchto diagramů je založena na tzv. modální analýze (Obr. 7.3), kdy je na nástroj připevněn akcelerometr a do nástroje je modálním kladívkem udeřeno. Akcelerometr měří vibrace nástroje vzniklé důsledkem úderu. Oba přístroje jsou dále propojeny s počítačem, kde dochází k vyhodnocení charakteristik [44].



Obr. 5.3 Ukázka modální analýzy na čelní válčové fríze [44].

6 NÁSTROJOVÁ ŘEZNÁ GEOMETRIE

Volba vhodného nástroje pro frézování závisí na tvaru vyráběné součásti, druhu slitiny, způsobu obrábění (hrubování, dokončování) a také na obráběcím stroji. Frézovací operace při obrábění slitin hliníku je možné rozdělit do dvou skupin podle aplikace [40]:

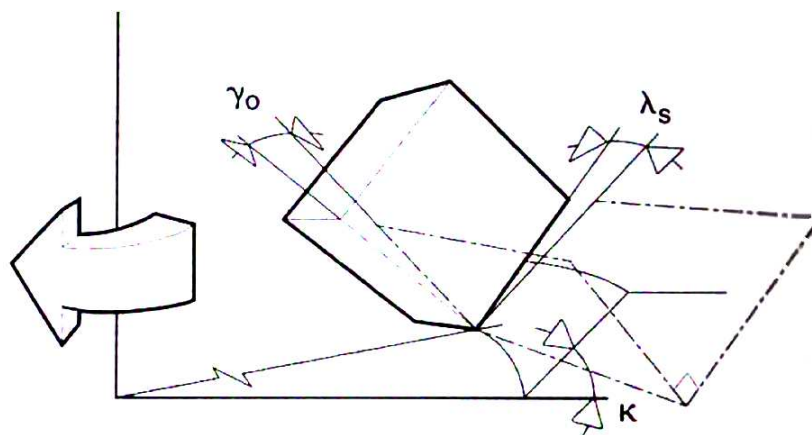
- v případech požadavku maximálního úběru materiálu (např. konstrukční prvky letadel),
- v případech vysokého počtu operací s krátkými obráběcími časy (např. automobilový průmysl).

Tenkostěnné součásti v leteckém průmyslu často obsahují různé kapsy, otvory a podobné konstrukční prvky, proto je většinou omezen počet břitů nástroje na minimum jak u monolitických nástrojů, tak i u nástrojů s výměnnými břitovými destičkami a to z důvodu dobrého odvodu třísek. Monolitické nástroje ze slinutého karbidu se ve většině těchto aplikací využívají jako dvoubřité. Kritéria, která je nutné vzít v potaz při frézování [40]:

- nástrojové úhly,
- geometrie výměnných břitových destiček,
- nástrojové materiály,
- povlaky nástrojů (PVD, CVD).

6.1 Nástrojové úhly

Geometrie břitu frézy je určena velkým počtem úhlů, které specifikují polohu upnutí vyměnitelné břitové destičky (dále jen VBD) v tělese frézy. Úhel nastavení hlavního ostří κ_r je úhel mezi hlavním ostřím a obráběnou plochou opracovávaného obrobku. Mezi další úhly určující polohu VBD patří úhel sklonu ostří λ_s a ortogonální úhel čela γ_o (Obr. 6.1), které značně ovlivňují společně s úhlem nastavení hlavního ostří výkon stroje potřebný pro obrábění, utváření a odchod třísky z místa řezu [2].



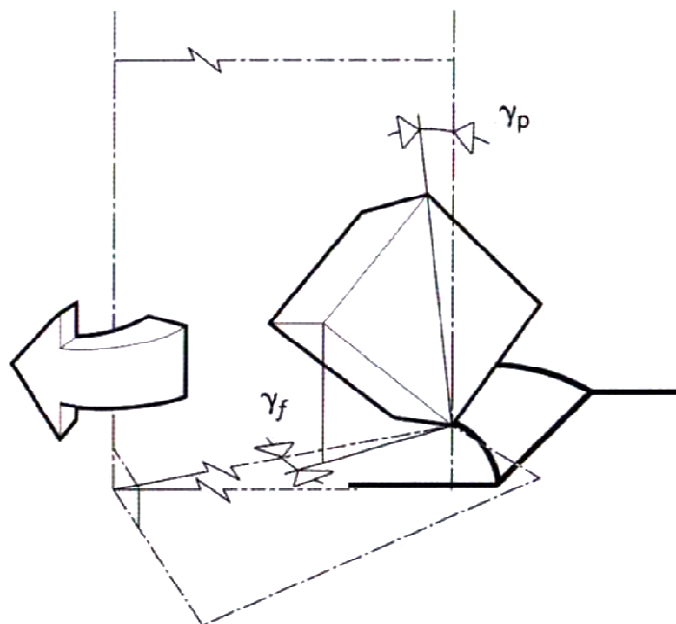
Obr. 6.1 Úhly na nástroji [2].

Způsob vnikání hlavního ostří nástroje do materiálu ovlivňuje především úhel nastavení hlavního ostří κ_r a úhel sklonu ostří λ_s , jejich vliv je také značný na způsob odvodu třísek z místa řezu. Měření úhlu sklonu ostří se provádí v rovině rovnoběžné s hlavním ostřím. Ortogonální úhel čela, rovněž známý jako efektivní úhel čela, má vliv na velikost řezných sil a tím ovlivňuje příkon obráběcího stroje. Při využití nástrojů s pozitivními úhly čela je potřebný nižší příkon stroje. Měření úhlu čela se provádí v rovině kolmé k hlavnímu ostří [2].

U nástrojů pro frézování se rozlišují konstrukční úhly (Obr. 6.2) [2]:

- axiální úhel čela γ_p (nástrojový zadní úhel čela – podle DIN, ISO, ČSN),
- radiální úhel čela γ_f (nástrojový boční úhel čela – podle DIN, ISO, ČSN).

Měření axiálního úhlu čela γ_p se provádí v rovině rovnoběžné s osou rotace frézy a měření radiálního úhlu čela γ_f je realizováno rovině kolmé k ose rotace nástroje. Těmito úhly je určen typ frézy a v kombinaci s příslušným úhlem nastavení hlavního ostří jsou určeny pracovní úhly [2].



Obr. 6.2 Konstrukční úhly na nástroji [2].

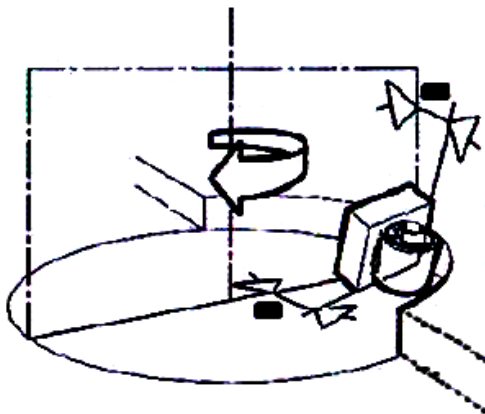
6.2 Druhy geometrií

Rozdělení kombinací geometrie při frézování rovinných ploch je do tří skupin [2,40]:

- dvojitá negativní geometrie,
- dvojitá pozitivní geometrie,
- pozitivně negativní geometrie.

6.2.1 Dvojitá negativní geometrie

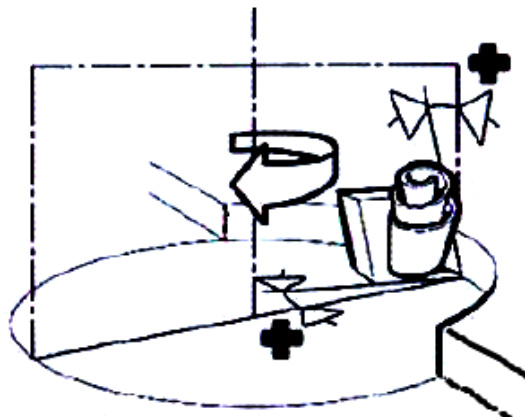
U této geometrie je radiální i axiální úhel čela negativní (Obr. 6.3), využívá se taktéž negativních VBD. Sklonem VBD je vytvořen úhel hřbetu a výhodou toho způsobu je možnost využití obou stran břitové destičky. Při použití této geometrie dochází ke vzniku velkých řezných sil. Využívá se především při obrábění tvrdé oceli a šedé litiny [2,40]. Velká kontaktní plocha třísky s nástrojem zapříčiňuje vznik třísky o velké tloušťce. U materiálů, které tvoří dlouhou třísku, často dochází ke špatnému utváření třísky. Při obrábění měkkých materiálů dochází ke hromadění třísek v místě řezu [2].



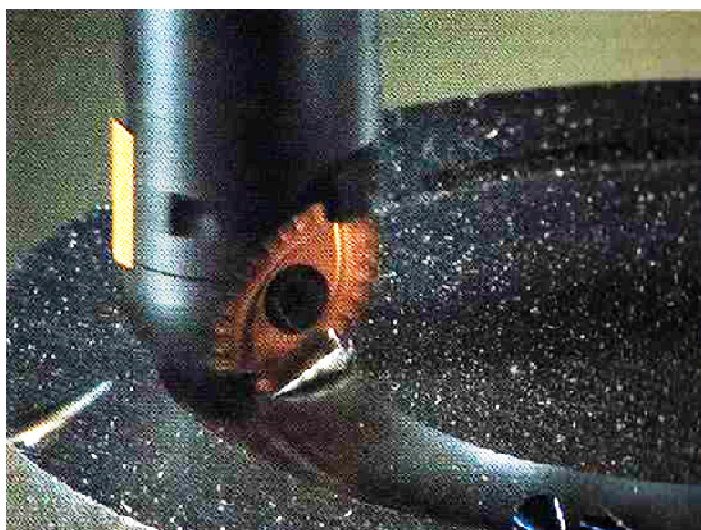
Obr. 6.3 Dvojitá negativní geometrie [2].

6.2.2 Dvojitá pozitivní geometrie

Úhel čela radiální i axiální je v tomto případě kladný (Obr. 6.4, Ob. 6.5), použití VBD je omezeno na jednostranné kladně pozitivní. Použití tohoto druhu geometrie je širší než u předešlé geometrie. Při použití této geometrie dochází ke vzniku nižších řezných sil, protože plocha kontaktu třísky a čela nástroje je menší [2]. Velmi příznivě se u tohoto druhu geometrie formuje tříska, která je stáčena do krátkých šroubovic. Využívá se pro obrábění lehkých kovů a jejich slitin [40], ale také u korozivzdorných ocelí, kdy dochází ke vzniku nárůstku. Tato geometrie je vhodná pro obrábění tenkostěnných a málo tuhých obrobků na strojích s menším příkonem [2].



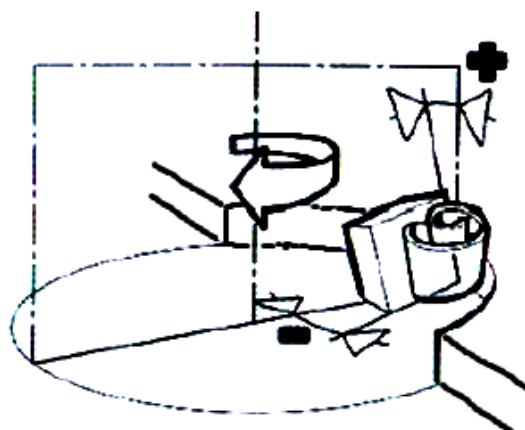
Obr. 6.4 Dvojitá pozitivní geometrie [2].



Obr. 6.5 Stopková fréza osazená půlkruhovými břity s pozitivní geometrií [2].

6.2.3 Pozitivně-negativní geometrie

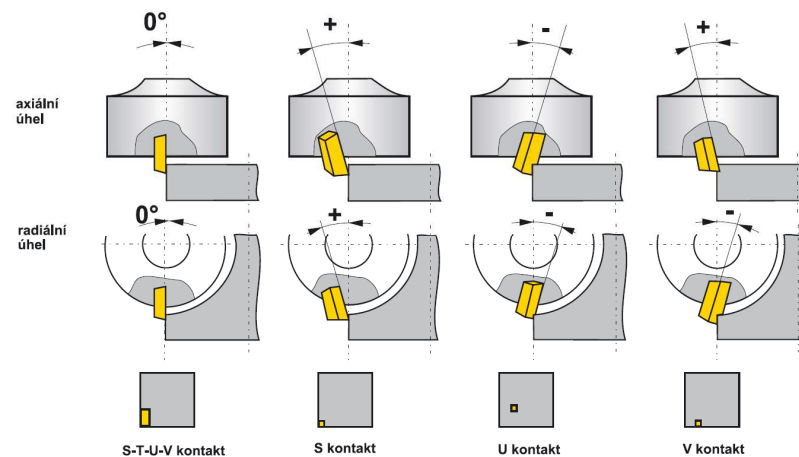
Geometrie pozitivně-negativní leží z pohledu požadovaného výkonu stroje mezi předešlými uvedenými druhy. Axiální úhel čela je v tomto případě pozitivní a radiální úhel čela je negativní (Obr. 6.6). Negativní radiální úhel čela poskytuje nástrojům dostatečnou odolnost proti lomu, proto je možné obrábění s využitím vysokých posuvů na zub při velkých hloubkách řezu. Pozitivní úhel čela přitom zabezpečuje dobré utváření a odvod třísek [2]. Využití této geometrie je vhodné pro obrábění široké škály materiálů [2,40].



Obr. 6.6 Pozitivně-negativní geometrie [2].

6.2.4 Vliv základní geometrie na záběrové podmínky

Vliv základní geometrie značným způsobem ovlivňuje záběrové podmínky, místa prvního kontaktu nástroje a obrobku se pro různé nástrojové geometrie výrazně liší. Přehled prvního kontaktu nástroje s obrobkem ukazuje obr. 6.7.

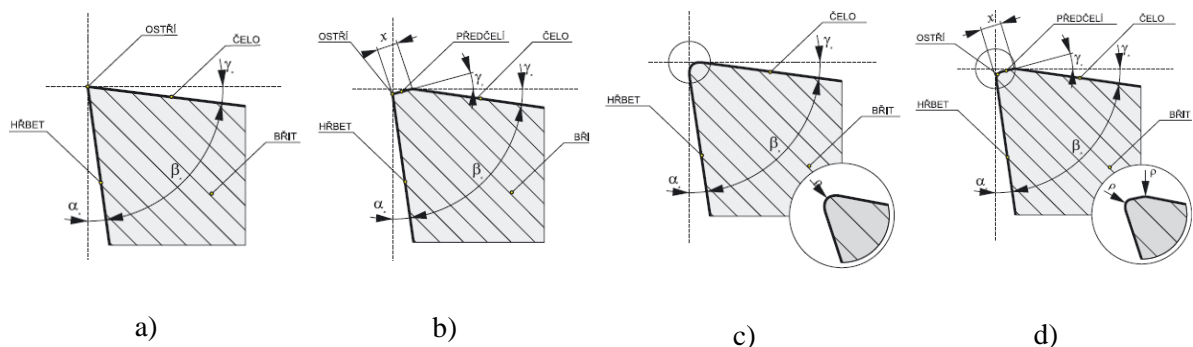


Obr. 6.7 Místo prvního kontaktu obrobku a nástroje s ohledem na základní geometrii [43].

6.2.5 Geometrie ostří výměnných břitových destiček

Funkční vlastnosti jsou výrazně ovlivněny různými úpravami ostří VBD, které se liší pro různé materiály. VBD od výrobce Pramet jsou dodávány s různou úpravou ostří [43]:

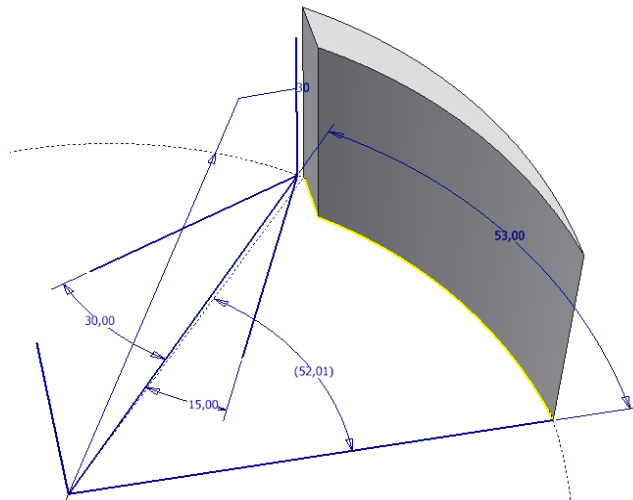
- ostrý břit – tento druh je doporučován pro obrábění neželezných kovů (např. slitiny hliníku, bronzy, atd.), použitím ostrého břitu se dosahuje minimální deformace odebírané vrstvy, omezuje se vznik nárůstku a velikost řezných sil, nevýhodou je nižší pevnost ostří (Obr. 6.8 a)),
- břit s předčelím (tzv. fazetkou) – tento druh (Obr. 6.8 b)) se v současné době využívá již méně, fazetka zvětšuje úhel břitu γ_n , čímž je docíleno jeho větší pevnosti (odolnost proti křehkému porušení),
- břit s rektifikovaným ostřím – rektifikací se rozumí mírné zaoblení ostří velmi malým poloměrem, jejímž cílem je snížení nerovností řezné hrany a tím zvýšení odolnosti proti porušení řezné hrany (křehkým lomem, mikrovydrolení), v současné době je využívána u všech druhů VBD bez fazetky (Obr. 6.8 c)),
- rektifikovaný břit s fazetkou – u tohoto druhu je navíc rektifikována i fazetka, výhodou tohoto způsobu provedení ostří je získání maximální odolnosti břitu (Obr. 6.8 d)).



Obr. 9.7 Úpravy ostří: a) ostrý břit (F), b) břit s předčelím (T), c) břit s rektifikovaným ostřím (E), d) rektifikovaný břit s fazetkou (S) [43].

7 OPTIMALIZACE NÁSTROJOVÉ GEOMETRIE

Pro stanovení vhodných úhlů nástroje bylo využito parametrického modeláře Autodesk Inventor 2010. Simulace obráběcího procesu na element třísky (Obr. 7.1) byla zvolena pro případ válcového sousledného frézování. Různé geometrie nástroje byly testovány na elementu třísky odebrané jedním zubem nástroje. Pro případ obrábění hliníkových slitin je v [2, 22] doporučována ostrá pozitivní geometrie, testování geometrií bylo tedy omezeno na pozitivní geometrie (dvojitá pozitivní geometrie).



Obr. 7.1 Element třísky zvolený pro optimalizaci geometrie.

Mezi funkce tohoto modeláře patří možnost zjištění velikosti plochy. Při simulaci otáčení nástroje s krokem 2° byla vždy zjištěna velikost plochy A_D , která sloužila k dalšímu výpočtu dle vzorce (7.3). Další hodnotou potřebnou je hodnota tloušťky třísky h_m , která byla taktéž určena odměřením a je důležitou veličinou pro určení měrné řezné síly, rovnice (7.1).

Měrná řezná síla [48]:

$$k_C = k_{C1} \cdot h_m^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) \quad (7.1)$$

kde: k_{C1} – měrná řezná síla potřebná k oddělení třísky o ploše 1 mm^2 a tloušťce 1 mm [$\text{N}/\text{mm}^2 = \text{MPa}$],

h_m – tloušťka třísky [mm],

m_c – koeficient zahrnující vliv obráběného materiálu [-],

γ_o – ortogonální úhel čela výměnné břitové destičky [$^\circ$].

V počátečních úvahách nebude do výpočtů zařazen ortogonální úhel čela γ_o a analýza se zaměří pouze na úhly γ_p a γ_f . Rovnice bude tedy ve tvaru (7.2). Úhel nastavení hlavního ostří je pro úvahu $\kappa_r = 90^\circ$.

Měrná řezná síla [48]:

$$k_C = k_{C1} \cdot h_m^{-m_c} \quad (7.2)$$

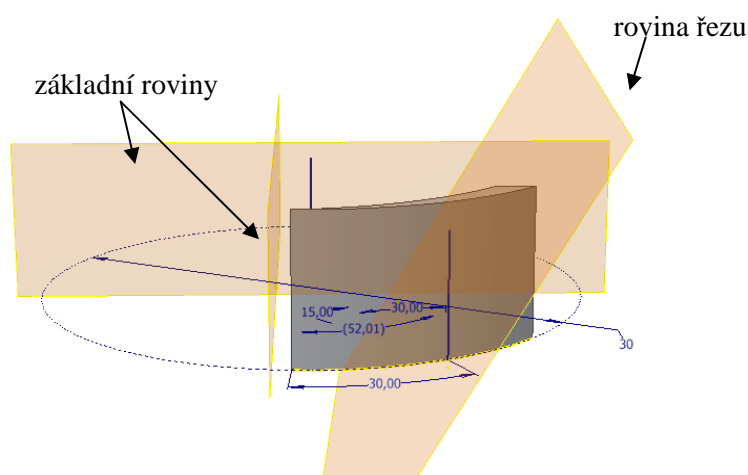
Řezná síla působící na zub frézy [11]:

$$F_C = k_C \cdot A_D \quad (7.1)$$

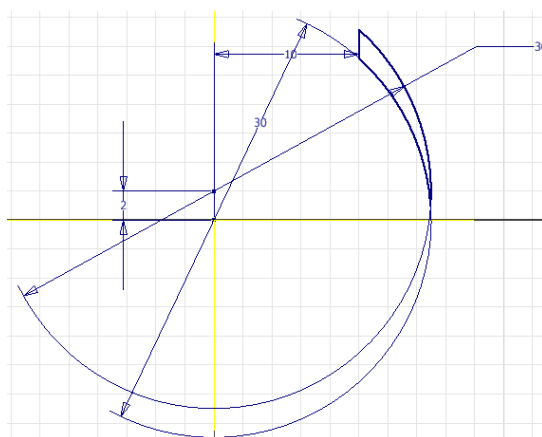
kde: k_C – měrná řezná síla [$\text{N}/\text{mm}^2 = \text{MPa}$],

A_D – průřez třísky [mm^2].

Element třísky byl v jednotlivých krocích řezán různou geometrií a byly určeny jednotlivé veličiny potřebné k výpočtu. Obr. 7.2 ukazuje postup při zjišťování průřezů třísky a tloušťky třísky.



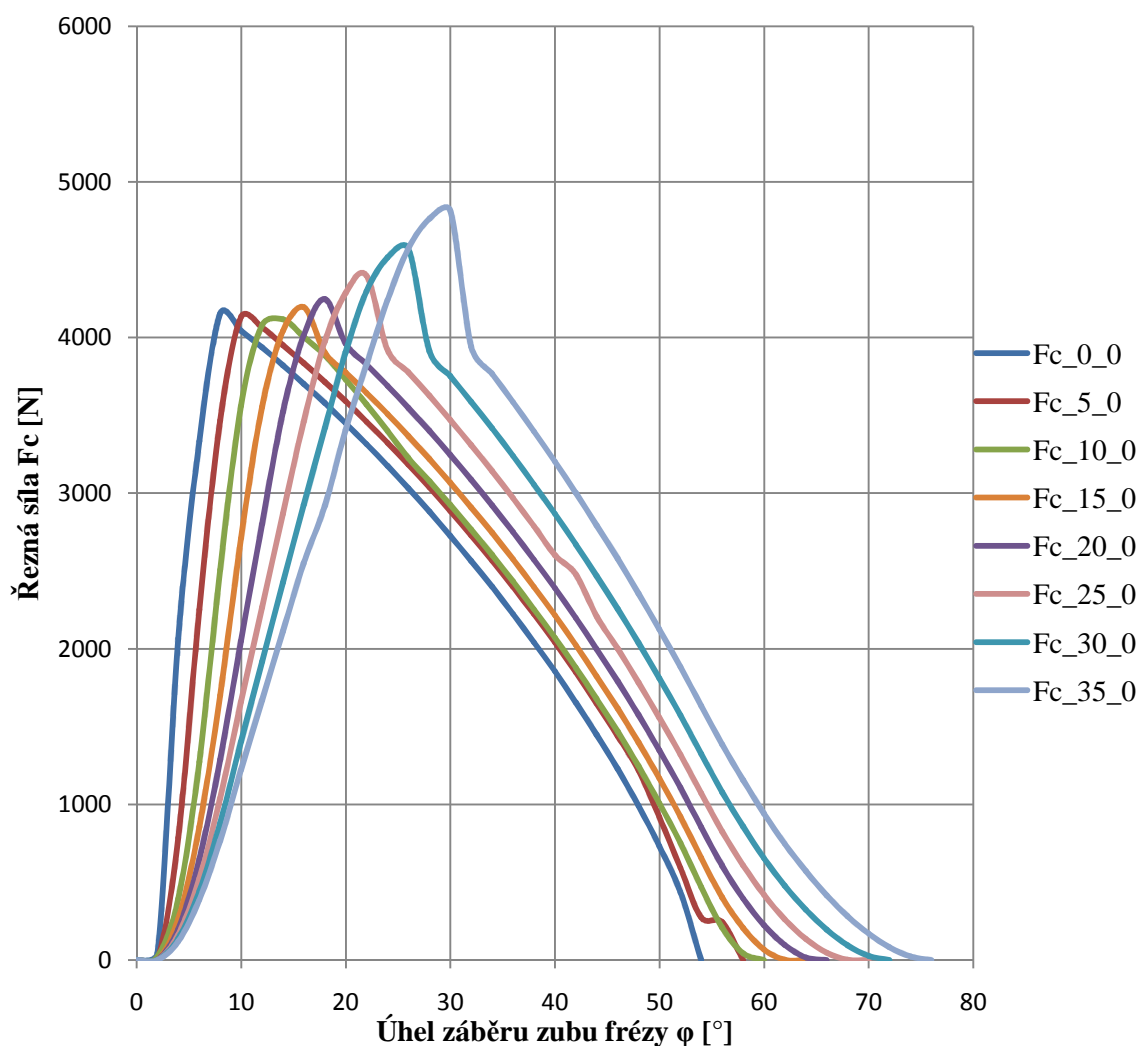
Obr. 7.2 Postup aplikovaný při zjišťování A_D a h_m .



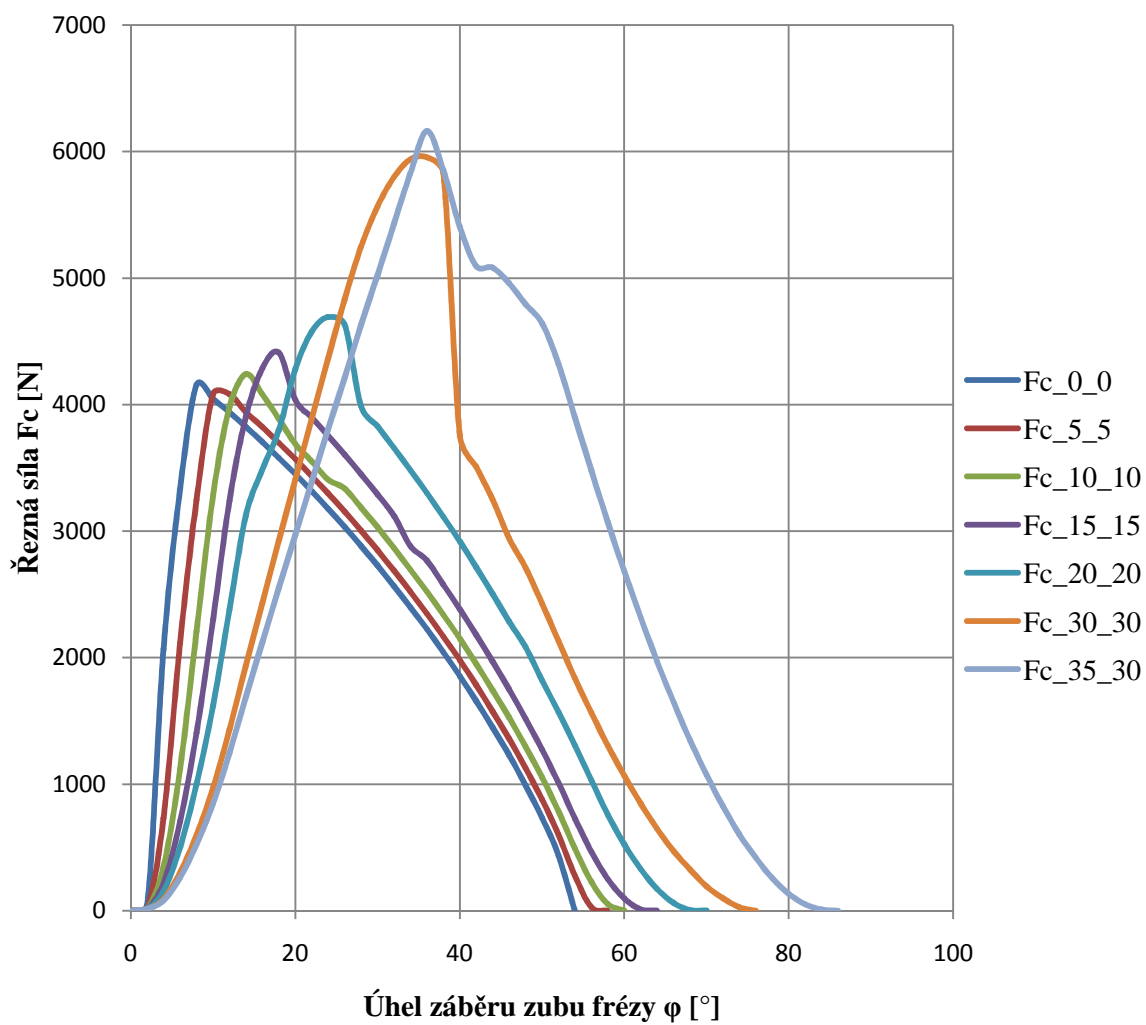
Obr. 7.3 Náčrt elementu třísky pro výpočty.

Obr. 7.3 ukazuje náčrt elementu třísky použitý pro optimalizaci řezné geometrie nástroje, pro větší názornost bylo použito menších průměrů $D = 30$ mm, ale uvažován byl velký posuv na zub $f_z = 2$ mm. Axiální hloubka řezu $a_p = 9$ mm a radiální hloubka řezu $a_e = 5$ mm. Pro výpočty byly využity hodnoty materiálu, který se použil při další praktické části (slitina hliníku, viz kapitola 7.4).

Modelovány byly různé geometrie nástroje. V prvním kroku byl optimalizován pouze axiální úhel čela (Obr. 7.5). V další části byly zvoleny různé kombinace axiálního a radiálního úhlu (Obr. 7.6).



Obr. 7.5 Optimalizace axiálního úhlu (Fc_5_0 – popis označení: Fc – řezná síla, první číselná hodnota (5) γ_p – axiální úhel čela, druhá číselná hodnota (0) γ_r – radiální úhel čela).



Obr. 7.6 Optimalizace axiálního úhlu ($F_{c_5_5}$ – popis označení: F_c – řezná síla, první číselná hodnota (5) γ_p – axiální úhel čela, druhá číselná hodnota (5) γ_r – radiální úhel čela.

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Návrh experimentálních zkoušek proběhl na základě zadání tématu a snažil se sledovat problematiku při obrábění tenkostěnných součástí, kterou je především malá tuhost. V průběhu experimentů bylo měřeno silové zatížení pomocí piezoelektrického dynamometru Kistler 9257B. Na vzorky byl dále připevněn akcelerometr pro snímání okamžité výchylky součástí.

8.1 Obráběcí stroj

Experimentální zkoušky byly realizovány na vertikální frézce FD32V (Obr. 8.1) od výrobce TOS Kuřim v dílnách ÚST FSI v Brně. Příkon elektromotoru je 14 kW a stroj umožňuje volbu otáček od 45 – 1440 min⁻¹, což umožnilo s použitím frézovací hlavy o $\varnothing 250$ mm při otáčkách 1400 min⁻¹ dosažení vysokorychlostního obrábění.



Obr. 8.1 Vertikální frézka FD32V.

8.2 Řezné nástroje

Při experimentu bylo využito výměnné břitové destičky ADEX 160608FR-FA z materiálu HF7 (složení materiálu 93% WC + 7% Co) a povlakem Triple Alvin, výrobcem je firma Pramet Tools, s. r. o. Tento druh řezného materiálu je vhodný pro obrábění neželezných kovů (materiálů skupiny N). Geometrie čela destičky je vysoce

pozitivní. Výměnná břitová destička byla upnuta do speciální frézovací hlavy o $\varnothing 250$ mm od stejného výrobce.

Tab. 8.1 Doporučené řezné podmínky pro výměnnou břitovou destičku ADEX 160608FR-FA.

Veličina	označení	jednotka	hodnota
posuv na zub	f_z	[mm]	0,05 – 0,35
axiální hloubka řezu	a_p	[mm]	1,0 – 13,0

8.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly zvoleny na základě požadavku dosažení vysokorychlostního obrábění a dodržení výrobcem doporučených parametrů pro výměnnou břitovou destičku, hranicí pro vysokorychlostní obrábění hliníkových slitin je podle [22,27] hodnota řezné rychlosti nad $1000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Tab. 8.2 Použité řezné podmínky při experimentu.

Veličina	označení	jednotka	hodnota
otáčky	n	$[\text{min}^{-1}]$	1400
řezná rychlost	v_c	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	1100
posuvová rychlost	v_f	$[\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$	250
posuv na zub	f_z	[mm]	0,179
axiální hloubka řezu	a_p	[mm]	4
radiální hloubka řezu	a_e	[mm]	2

8.4 Materiál obrobku

Z dostupných zdrojů ÚST FSI v Brně byly vyhotoveny tři kusy vzorků stejných rozměrů lišící se pouze tloušťkou. Chemické složení popisuje tab. 10.2. Materiál vzorků je slévárenská slitina hliníku EN AB – AlSi9Cu3(Fe), (ČSN 42 4339). Tento materiál je v současné době ve značné míře využíván pro odlitky bloků spalovacích motorů.

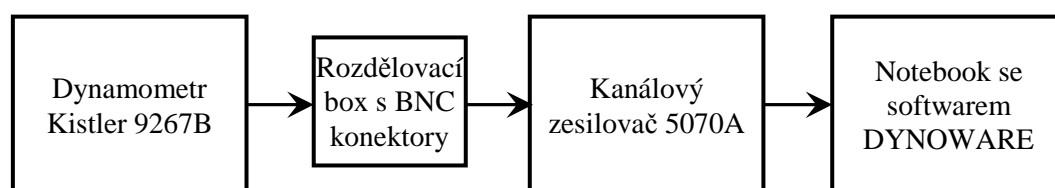
Tab. 8.3 Chemické složení materiálu vzorků.

Druh slitiny	Chemické složení [hm. %]								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Pb	Sb	Sn
AlSi9Cu3 (-DIN50CrV4)	8,570	0,826	2,380	0,261	0,391	1,180	0,084	0,004	0,041

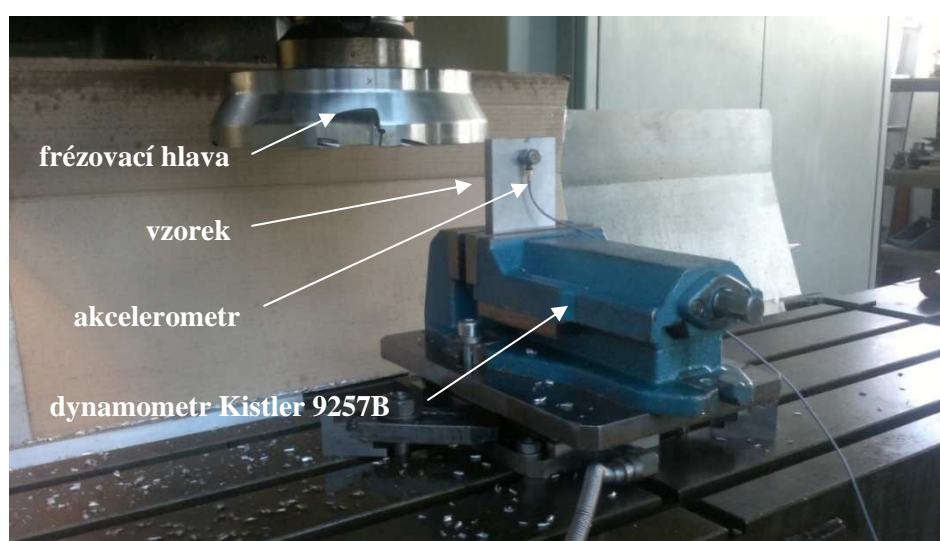
Tvrlost HRB = 46

8.5 Metodika měření

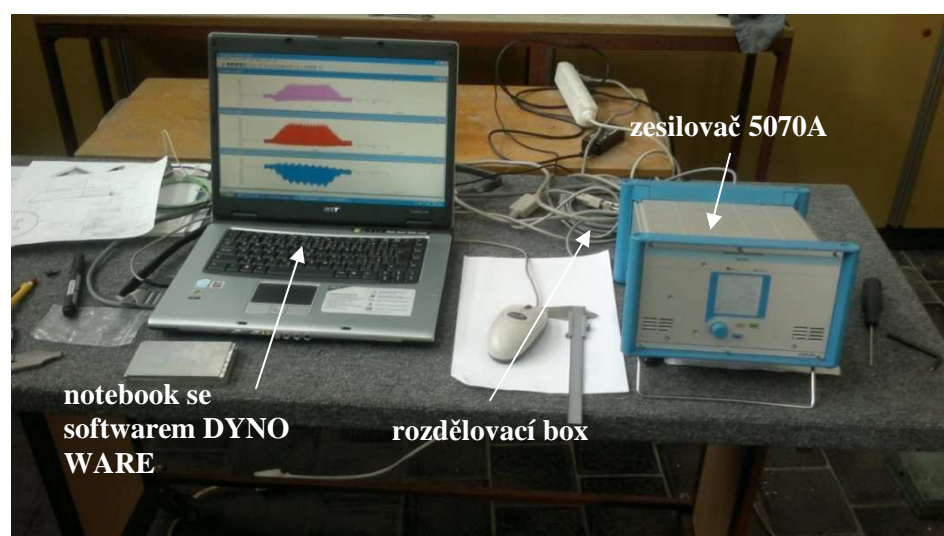
Měřicí aparatura byla zapojena podle schématu na obr. 8.2. Měření axiálních, radiálních a tangenciálních silových účinku probíhalo pomocí piezoelektrického dynamometru KISTLER 9257B a nábojovým zesilovačem 5070A. Po ustavení součástí a umístění snímačů byly nastaveny řezné podmínky a také byly nastaveny parametry pro měřicí přístroje. Vzorkovací frekvence byla nastavena na hodnotu 6000 Hz a čas měření byl nastaven na 40 s. Na frézovací hlavu byla v průběhu všech měření umístěna pouze jedna vyměnitelná břitová destička, v záběru byl tedy vždy pouze jeden břit frézy.



Obr. 8.2 Uspořádání experimentu.

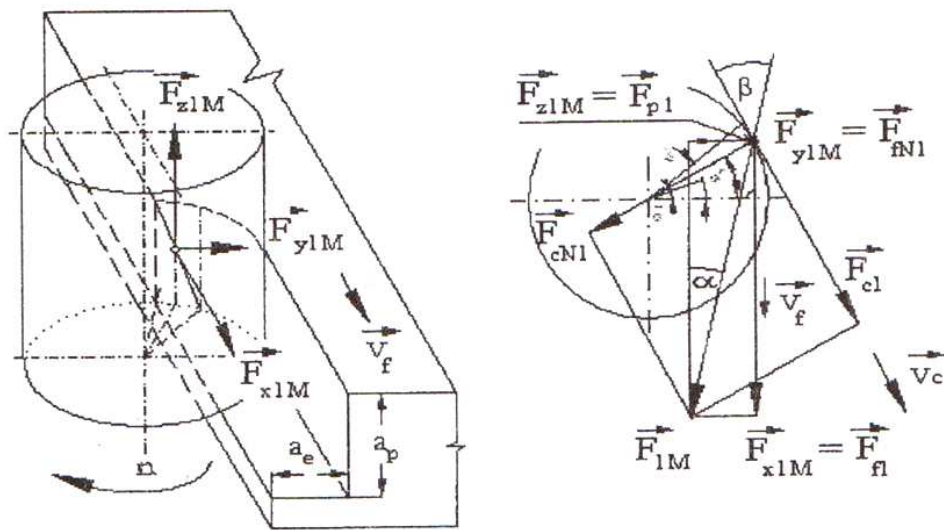


Obr. 8.3 Uspořádání experimentu.



Obr. 8.4 Měřící aparatura pro vyhodnocení silového zatížení.

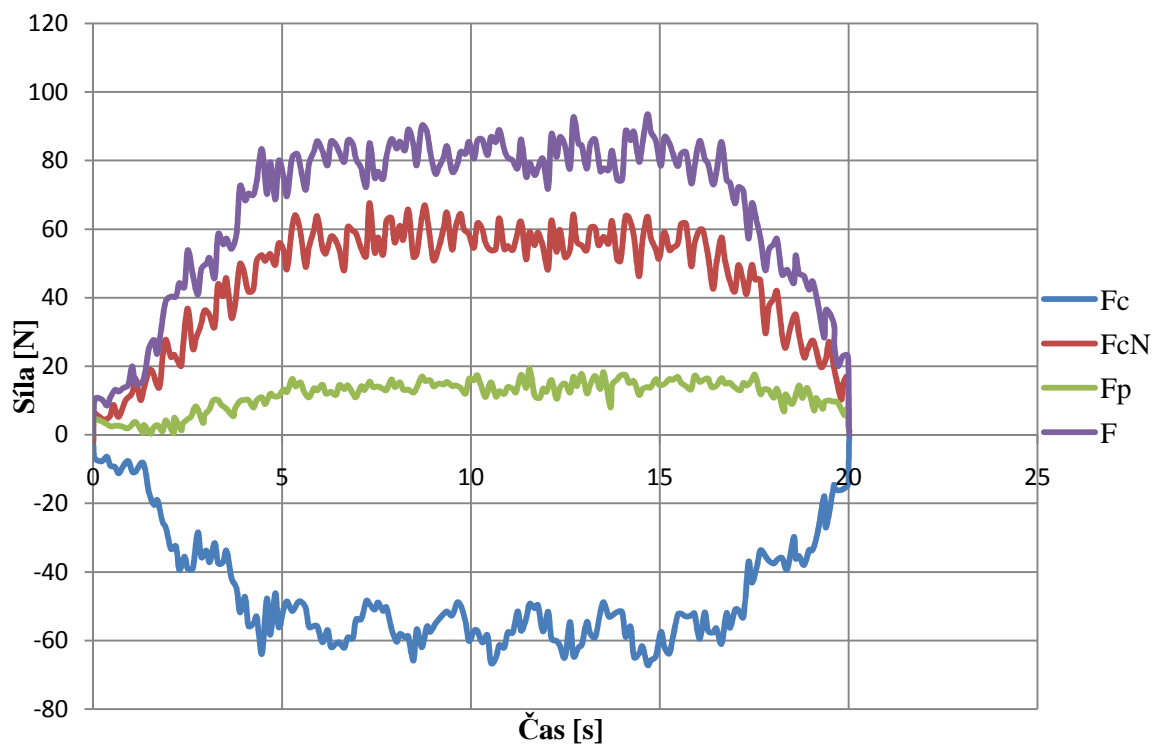
8.5.1 Silové zatížení při sousledném frézování



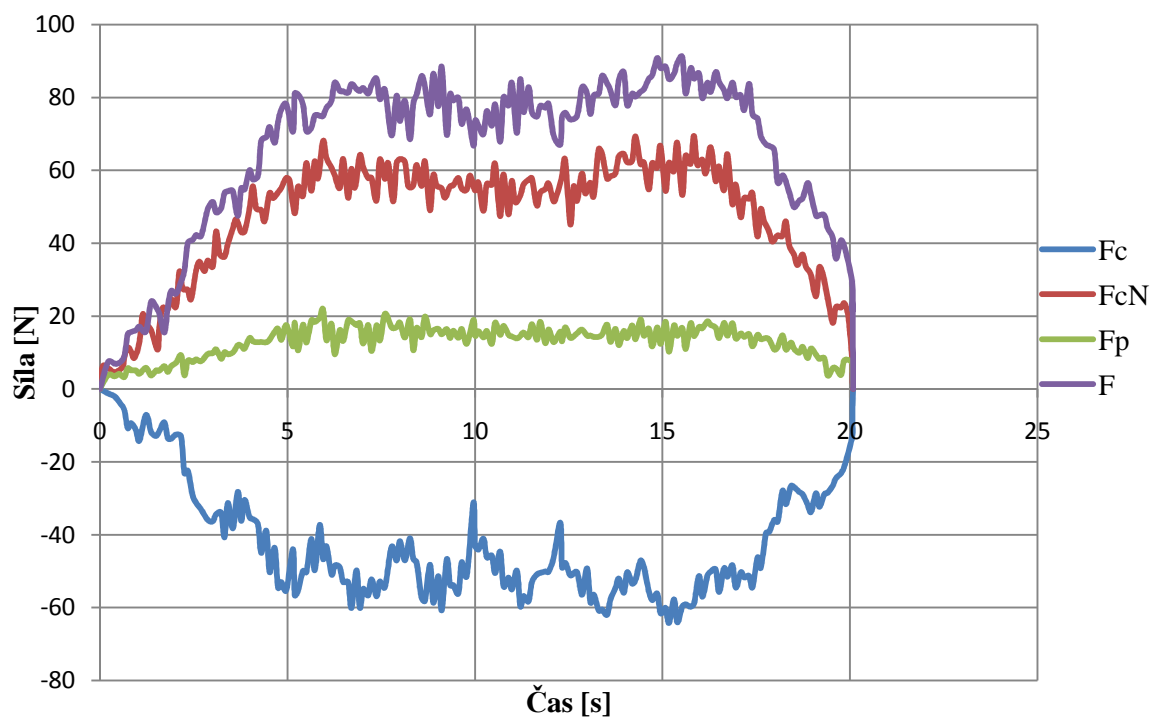
Obr. 8.5 Rozklad sil při sousledném frézování [11].

8.5.2 Zpracování naměřených dat

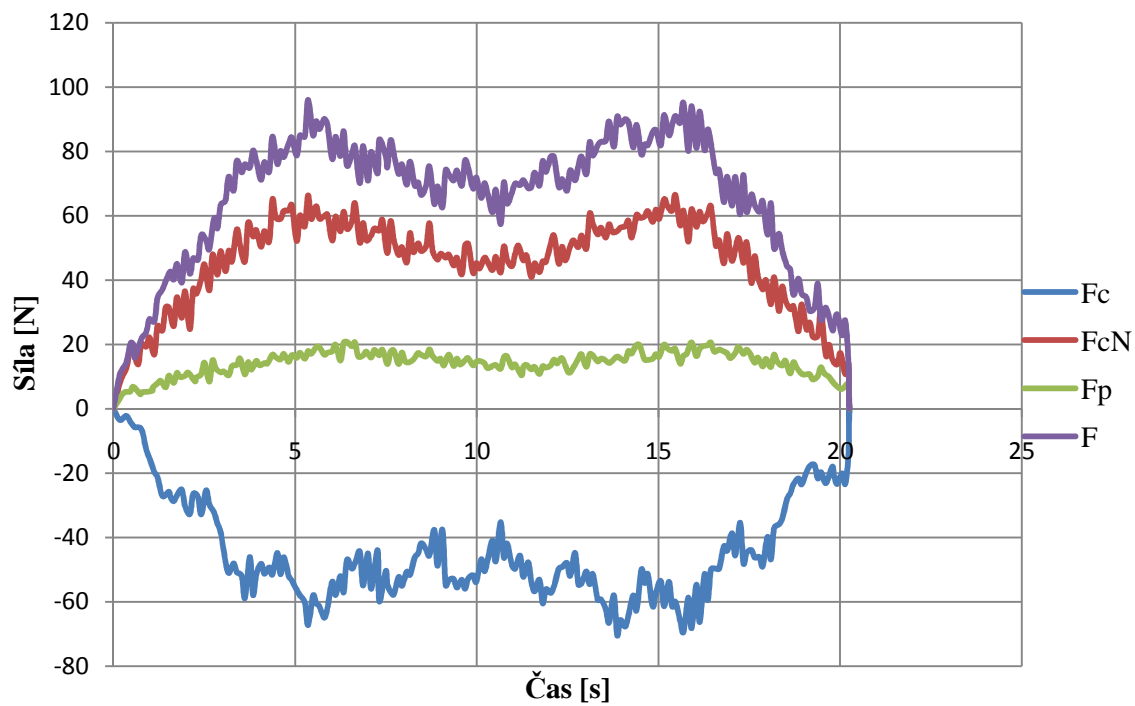
Naměřená data bylo nutné vzhledem k jejich velkému počtu filtrovat. Filtrování probíhalo ve speciálním programu s ohledem na maximální hodnotu výslednice sil. Dále byly určeny jednotlivé silové účinky (F_c , F_{cN} , F_p a F), které byly vyneseny do grafů



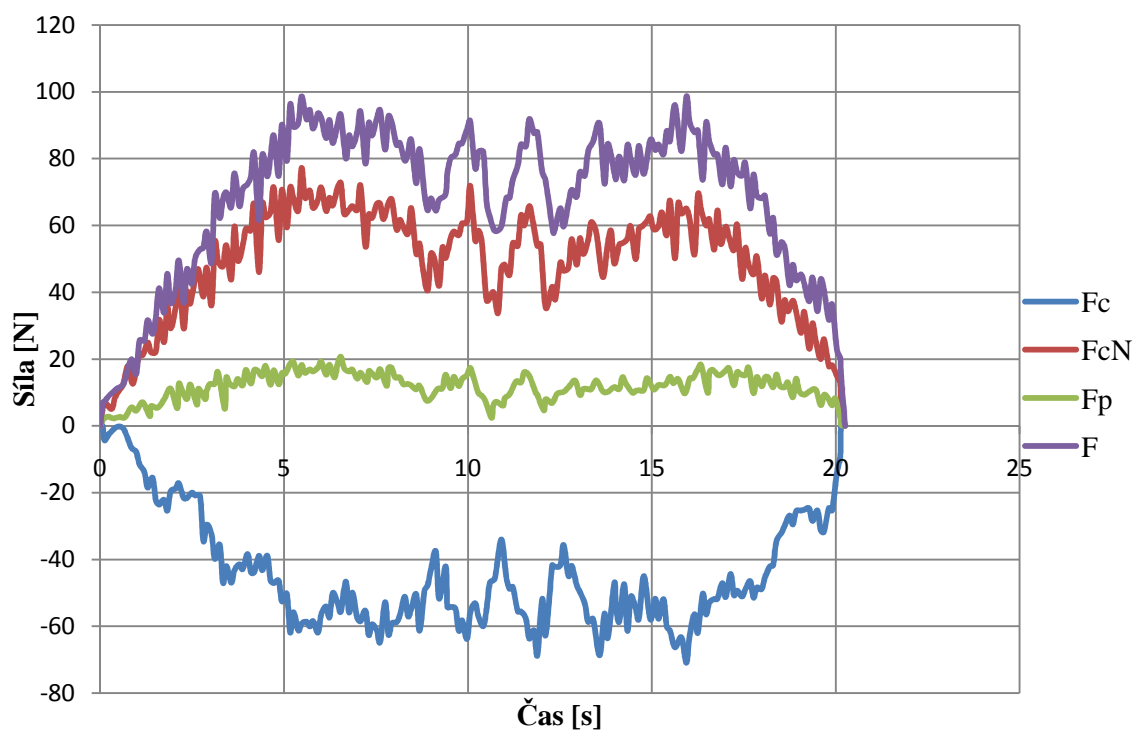
Obr. 8.6 Filtrované silové průběhy pro vzorek I, záběr I.



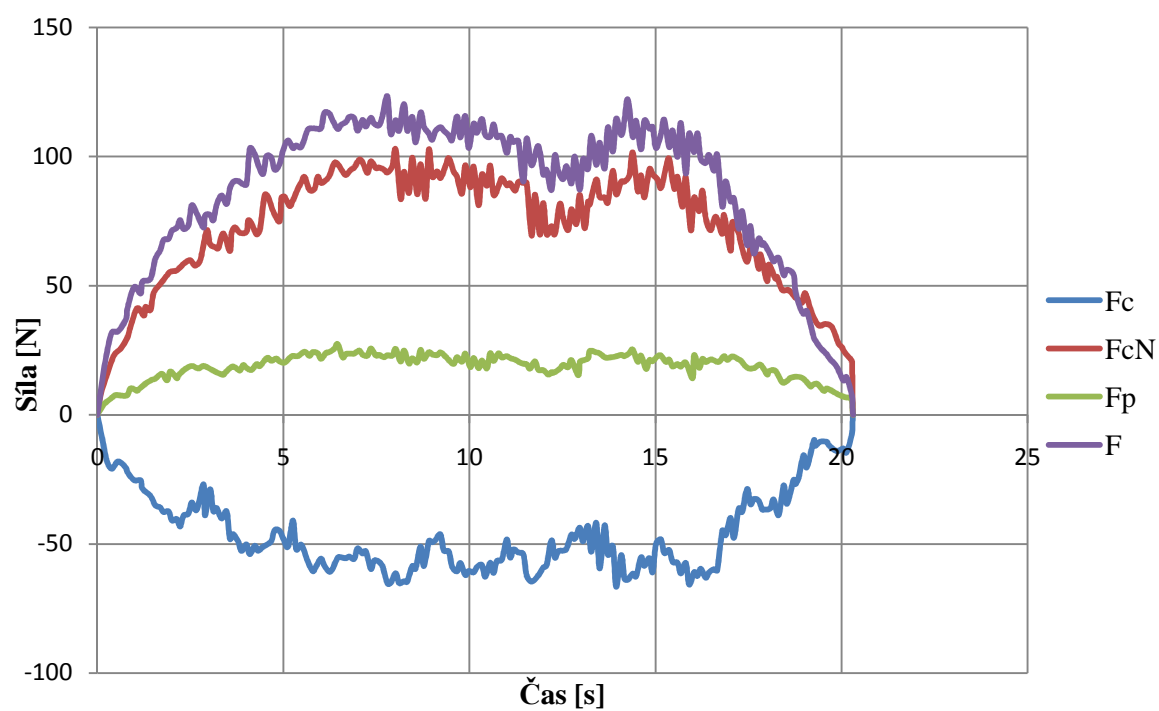
Obr. 8.7 Filtrované silové průběhy pro vzorek I, záběr II.



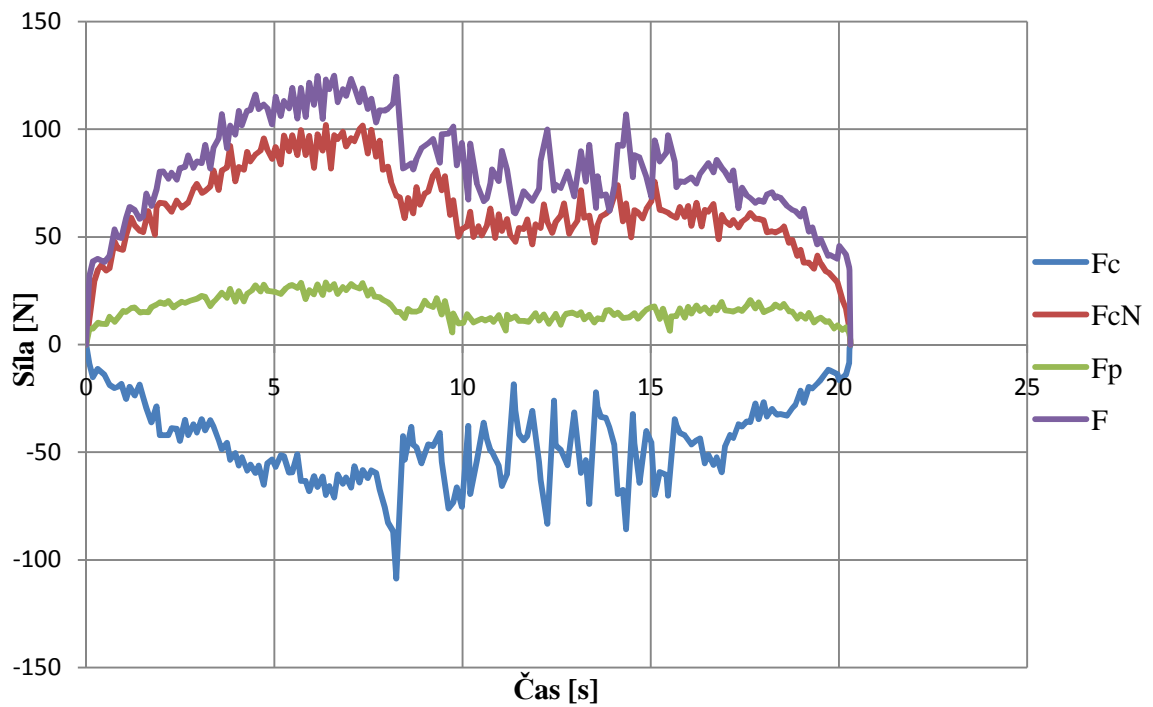
Obr. 8.8 Filtrované silové průběhy pro vzorek II, záběr I.



Obr. 8.9 Filtrované silové průběhy pro vzorek II, záběr II.



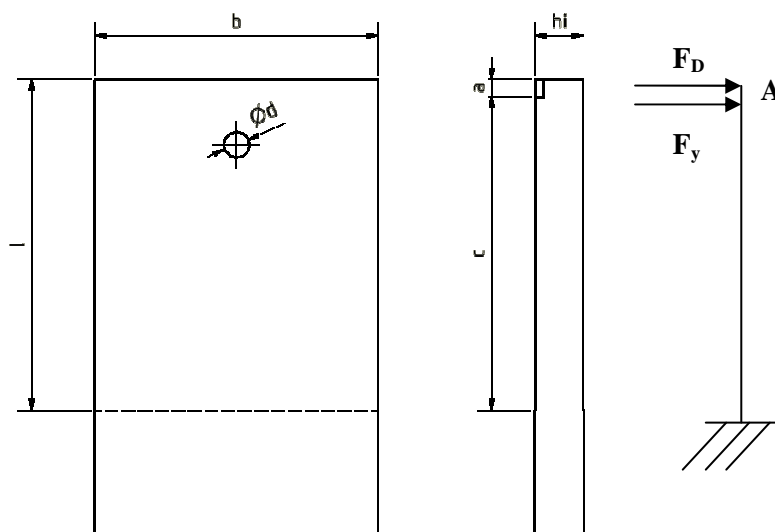
Obr. 8.10 Filtrované silové průběhy pro vzorek III, záběr I.



Obr. 8.11 Filtrované silové průběhy pro vzorek III, záběr II.

8.6 Výpočet vychýlení vzorku

Pro výpočet byly využity hodnoty maximálního silového zatížení jednotlivých vzorků, které byly naměřené dynamometrem, vychýlení horního konce stěny bylo určeno pomocí vzorce (8.1). Na konec stěny byla přidána doplňková síla F_D ($F_D = 0$ N), nutná pro správné odvození vztahů (Obr. 8.12). Rozměry vzorků jsou uvedeny v tab. 8.4.



Obr. 8.12 Rozměry vzorků a nahrazení vzorku nosníkem.

Tab. 8.4 Rozměry jednotlivých vzorků.

Vzorek	h [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	l [mm]
Vzorek I	11,2	4	65	72	76
Vzorek II	9,4				
Vzorek III	6,2				

Průhyb vzorku v bodě A [47]:

$$w_A = \frac{\partial w}{\partial F_D} = \int_0^l \frac{M_o}{E \cdot J_y} \cdot \frac{\partial M_o}{\partial F_y} \cdot dx \quad (8.1)$$

kde: M_o – ohybový moment [N.m],

E – modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa],

J_y – osový kvadratický moment [mm⁴].

Integrací a úpravou vzorce dostaneme tvar (8.2):

$$w_A = \frac{1}{E \cdot J_y} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot F \cdot a \cdot c^2 + \frac{1}{3} \cdot F \cdot c^3 \right) \quad (8.2)$$

Pro obdélníkový průřez má osový kvadratický moment tvar (8.3) [47]:

$$J_y = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (8.3)$$

Dosažením vzorce (8.3) do vzorce (8.2) dostaneme konečný vztah pro výpočet průhybu součásti (8.4):

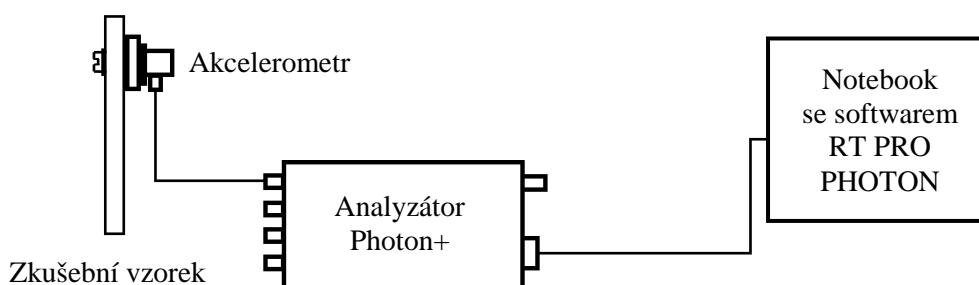
$$w_A = \frac{12}{E \cdot b \cdot h^3} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot F \cdot a \cdot c^2 + \frac{1}{3} \cdot F \cdot c^3 \right) \quad (8.4)$$

Tab. 8.5 Vypočítaný průhyb u jednotlivých vzorků.

Vzorek		F_{\max} [N]	Vypočítaná hodnota průhybu w_A [mm]
Vzorek I	záběr I	67,6	0,017
	záběr II	69,5	0,017
Vzorek II	záběr I	66,3	0,028
	záběr II	72,7	0,030
Vzorek III	záběr I	102,7	0,149
	záběr II	101,9	0,148

8.7 Měření vychýlení vzorků

Při měření vychýlení jednotlivých vzorků bylo měřící zařízení zapojeno podle schématu na obr. 8.13. Do zkušebních vzorků bylo nutné vyvrtat otvory pro upevnění akcelerometru. Obvykle se akcelerometry připevňují magnety, ale hliník a jeho slitiny patří mezi nemagnetické materiály, dalším způsobem je připevnění akcelerometru voskem. První série experimentů proběhla se snímačem upevněným voskem a uspokojivé výsledky byly zaznamenány pouze u prvního vzorku, kdy kmitání vzorku bylo na nízké úrovni. U dalších vzorků již akcelerometr na vzorcích nedržel, bylo tedy nutné upravit vzorky pro upevnění akcelerometru (Obr. 8.14).

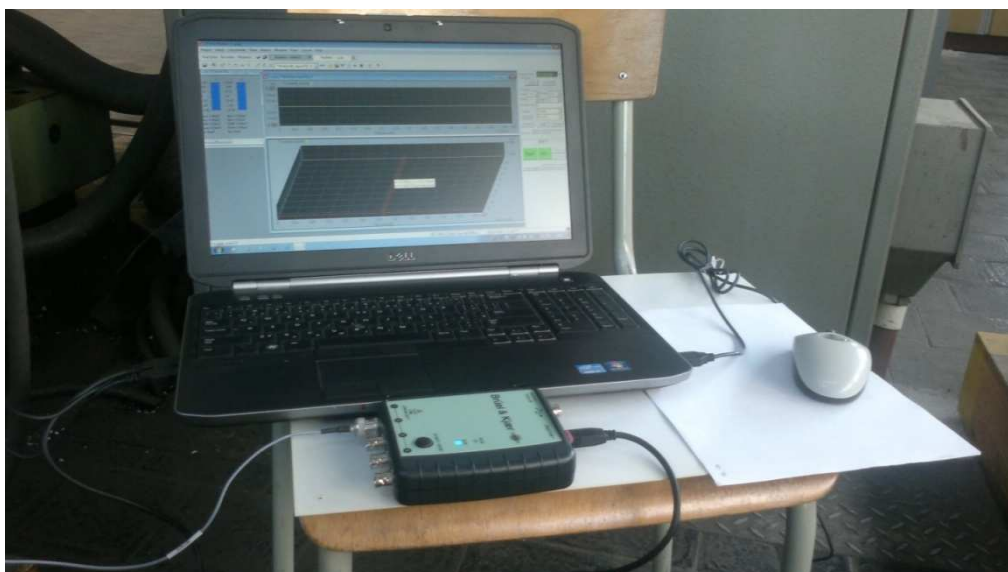


Obr. 8.13 Blokové schéma zapojení při měření výchylky součásti.



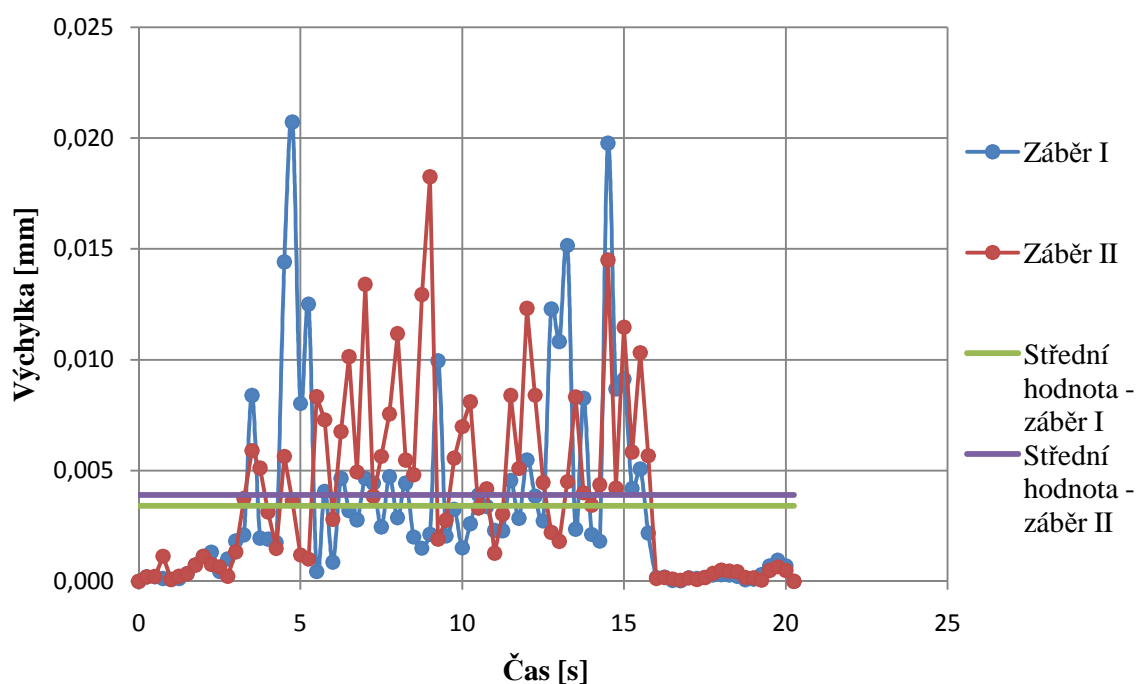
Obr. 8.14 Detail připojení akcelerometru.

Akcelerometr byl připojen k FFT analyzátoru Photon+, který sloužil k zaznamenání dat a dále je předával do notebooku (Obr. 8.15). Software RT PRO PHOTON slouží ke zpracování dat a nabízí mnoho různých funkcí, umožňuje také export dat v různých formátech např. pro Microsoft Excel k dalšímu zpracování.



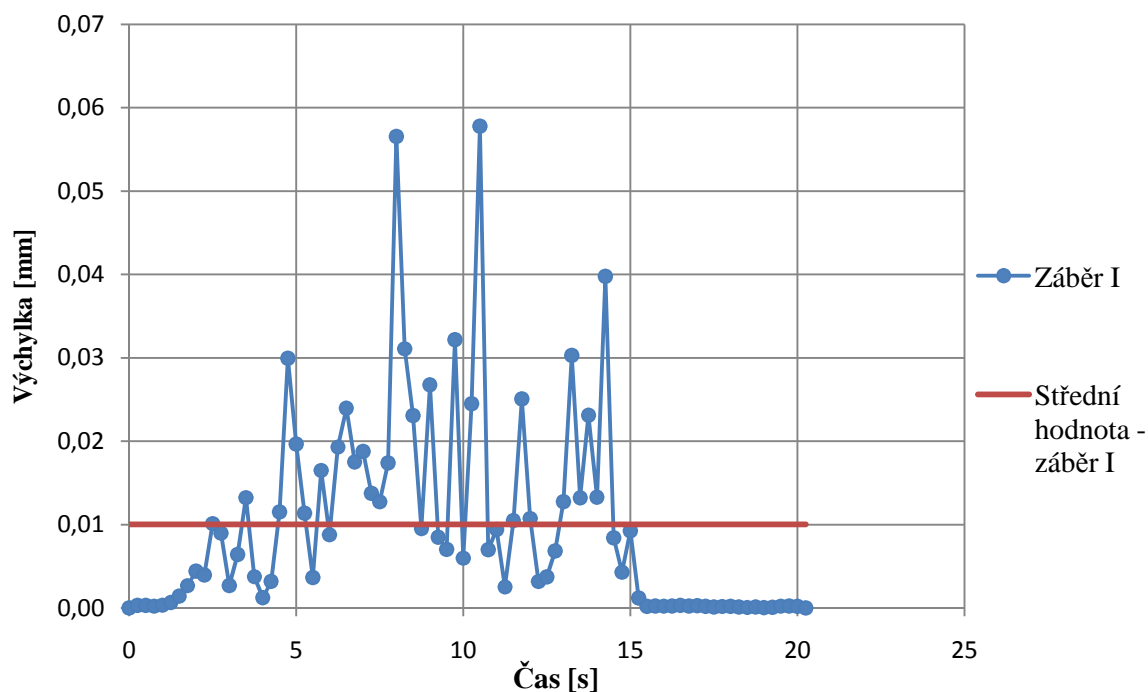
Obr. 8.15 Měřicí aparatura pro vyhodnocení výchylky vzorku.

Naměřené hodnoty mohou být částečně ovlivněny z důvodu umístění akcelerometru ve středu zkušební vzorku a pro přesnější měření by bylo pravděpodobně vhodné umístění více snímačů. Pro měření byl k dispozici však pouze jeden akcelerometr. Průhyby jednotlivých vzorků ukazují obr. 8.16, obr. 8.17 a obr. 8.18.



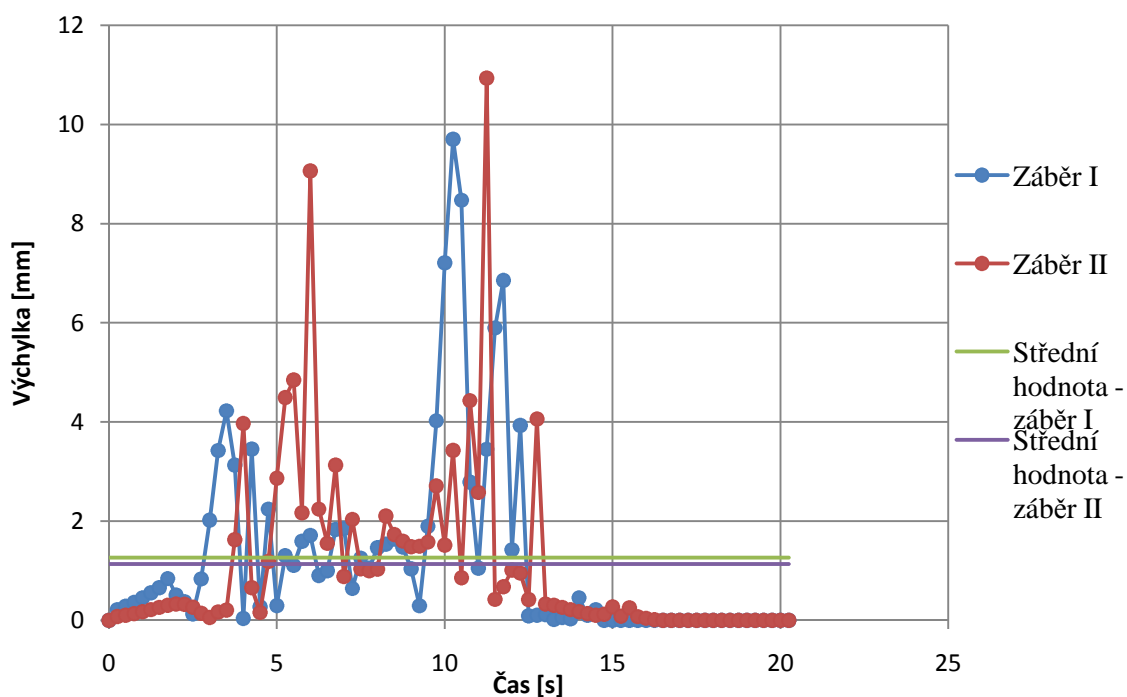
Obr. 8.16 Vychýlení vzorku I v průběhu obrábění.

V průběhu obrábění druhého vzorku došlo při druhém záběru pravděpodobně k uvolnění akcelerometru a detekovány byly nevěrohodné hodnoty, grafický průběh je tedy omezen jen na první záběr.



Obr. 8.17 Vychýlení vzorku II v průběhu obrábění.

Hodnoty výchylek u vzorku III ukazuje Obr. 8.18, vysoké hodnoty výchylek byly pravděpodobně způsobeny překročením měřicího rozsahu použitého akcelerometru. V průběhu obrábění došlo ke znatelnému kmitání vzorku, které bylo doprovázeno i znatelným zvukovým projevem. Na obrobeném povrchu je značná vlnitost, což ukazuje následující měření úchylek rozměrů.



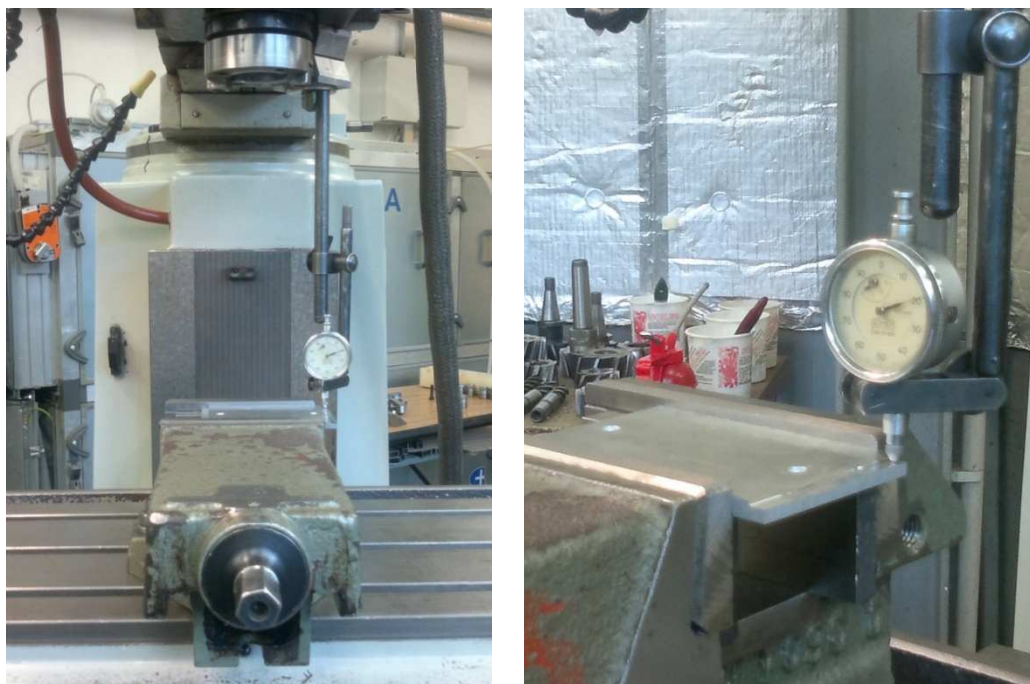
Obr. 8.18 Vychýlení vzorku III v průběhu obrábění.

Tab. 8.6 Porovnání vypočtených a naměřených hodnot.

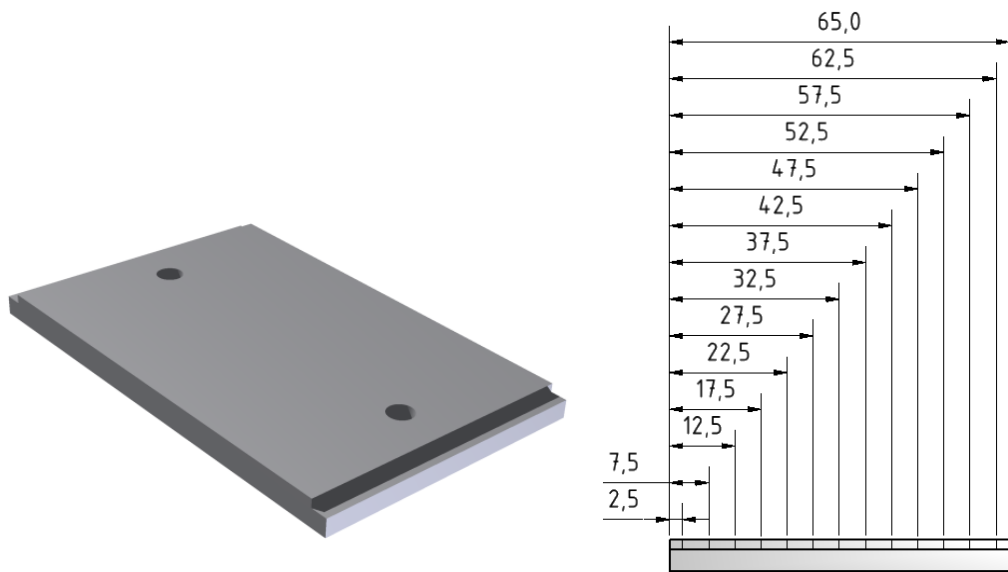
Vzorek		F _{max} [N]	Vypočtený průhyb w _A [mm]	Naměřený průhyb (střední hodnota) w _{m1} [mm]	Naměřený průhyb (medián) w _{m2} [mm]
Vzorek I	záběr I	67,6	0,017	0,003	0,002
	záběr II	69,5	0,017	0,004	0,003
Vzorek II	záběr I	66,3	0,028	0,010	0,006
	záběr II	72,7	0,030	-	-
Vzorek III	záběr I	102,7	0,149	1,268	0,417
	záběr II	101,9	0,148	1,137	0,288

8.8 Vyhodnocení úchylek rozměrů

Po obráběcím procesu byly všechny vzorky proměřeny pomocí číselníkového úchylkoměru Somet (ČSN 25 1811, přesnost 0,01), který byl upnut na vertikální frézce FNK 25A od výrobce TOS Kuřim (Obr. 8.19). Na obr. 8.20 je zobrazena metodika měření úchylek rozměrů. Naměřené hodnoty (Obr. 8.21, Obr. 8.22 a Obr. 8.23) poukazují na různou tuhost jednotlivých vzorků a tím nestabilitu při procesu obrábění.

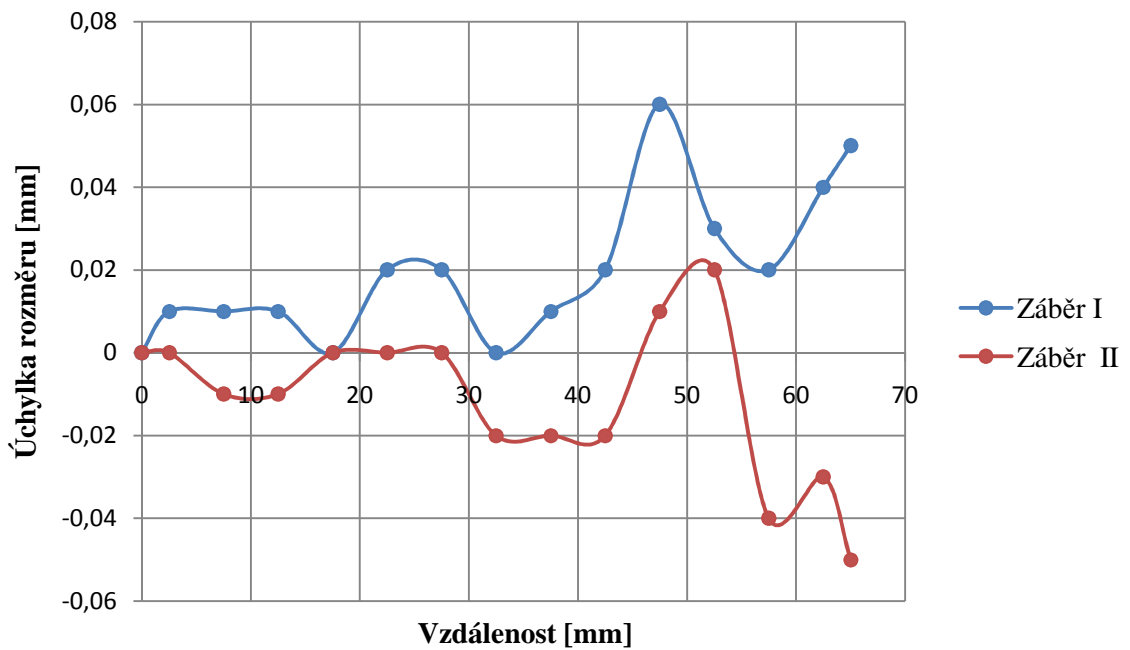


Obr. 8.19 Měření součástí číselníkovým úchylkoměrem.

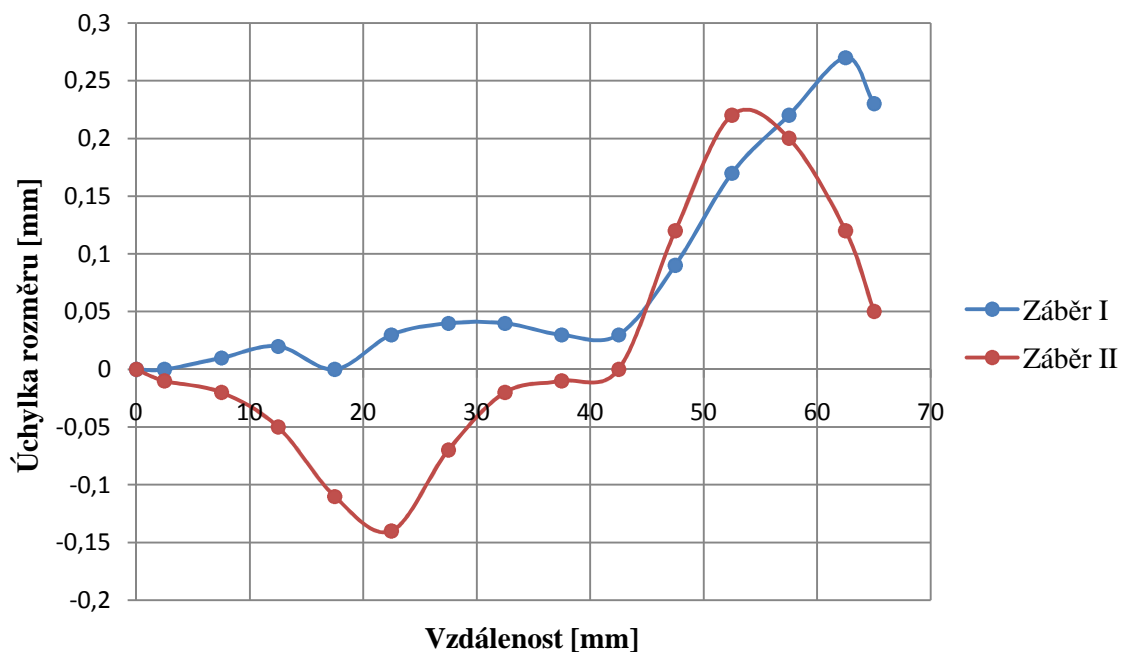


Obr. 8.20 Metodika měření součástí číselníkovým úchylkoměrem.

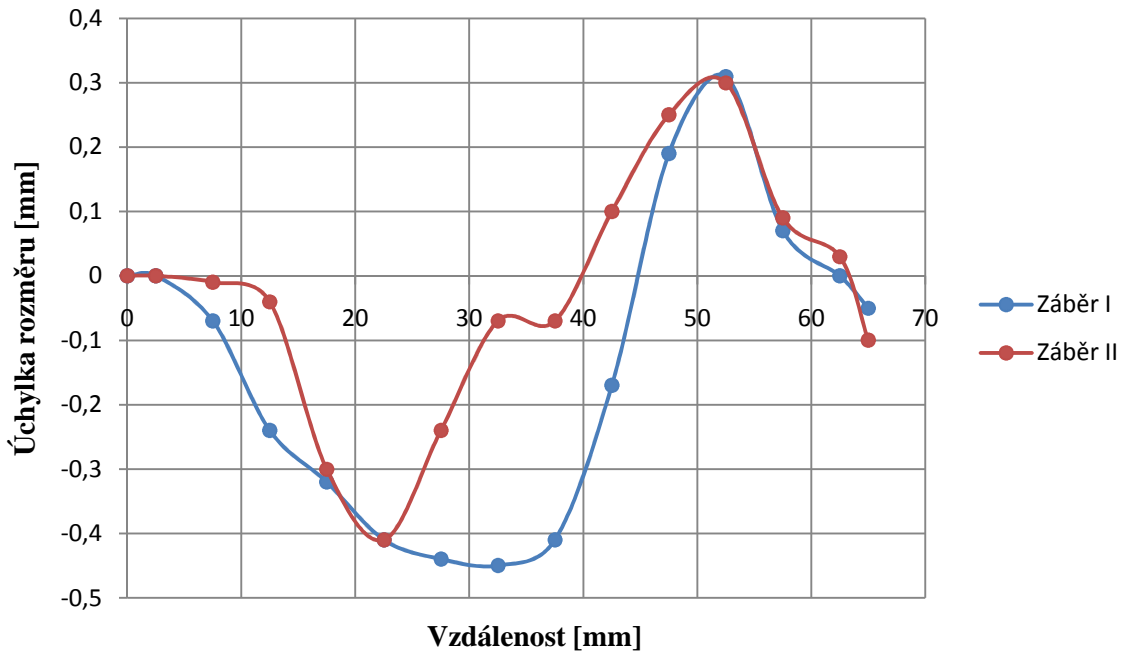
Nulová hodnota v následujících grafech představuje jmenovitý rozměr, tedy rozměr požadovaný po obráběcím procesu.



Obr. 8.21 Naměřené úchylky rozměrů pro vzorek I.

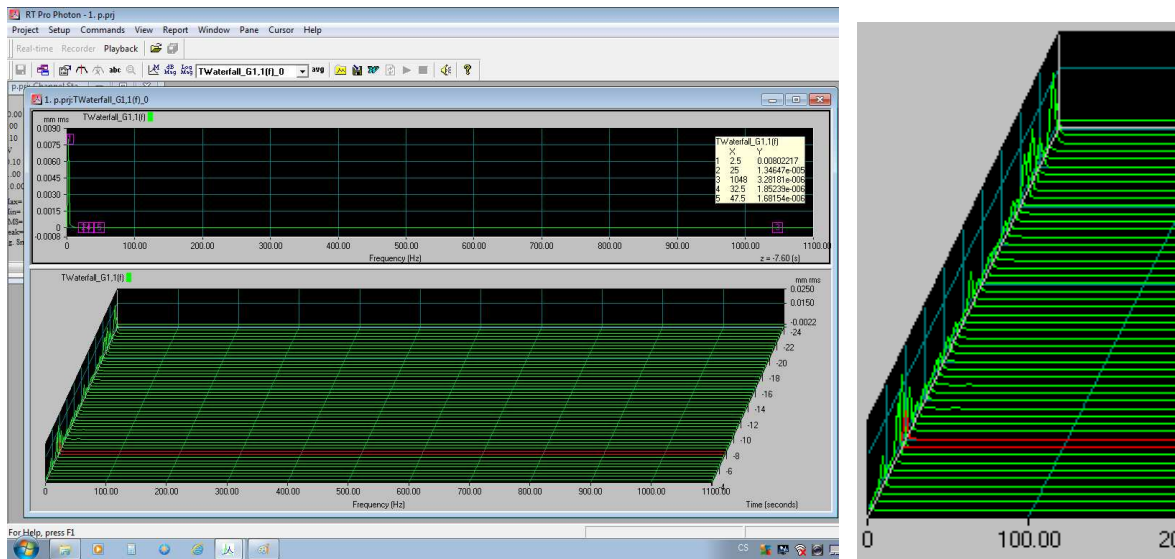


Obr. 8.22 Naměřené úchylky rozměrů pro vzorek II.

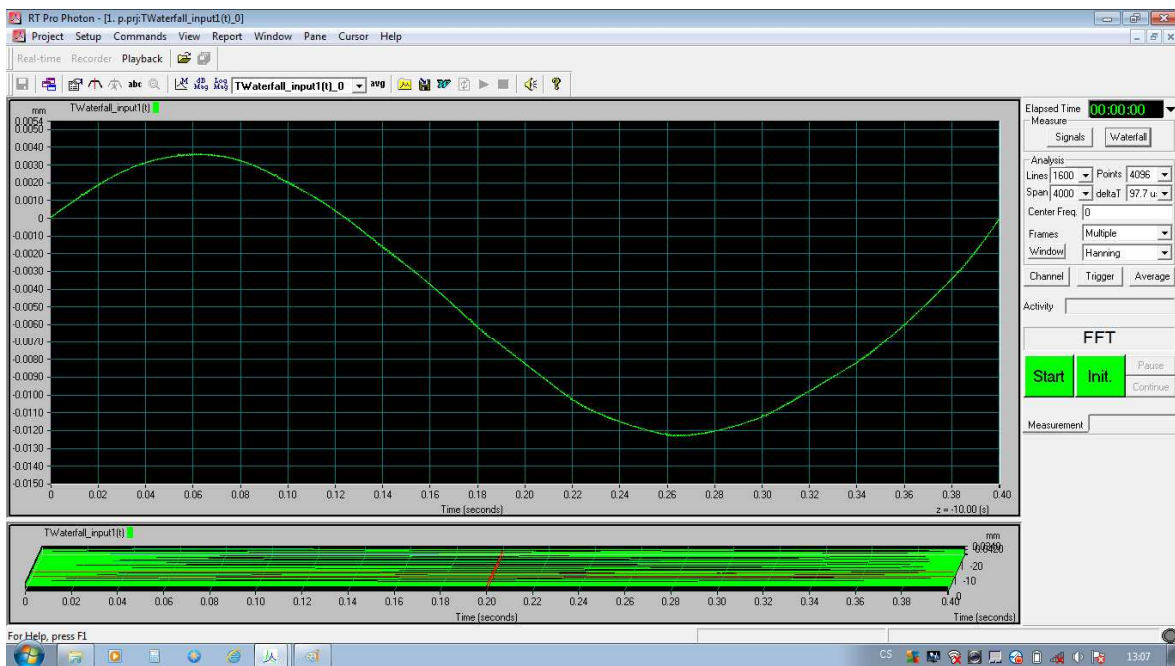


Obr. 8.23 Naměřené úchylky rozměrů pro vzorek III.

Další možnosti vyhodnocení v softwaru RT PRO PHOTON ukazují obr. 8.24, obr. 8.25 a obr. 8.26.



Obr. 8.24 Měření výchylky součásti v softwaru RT PRO PHOTON (vlevo), detail zaznamenané výchylky (vpravo).



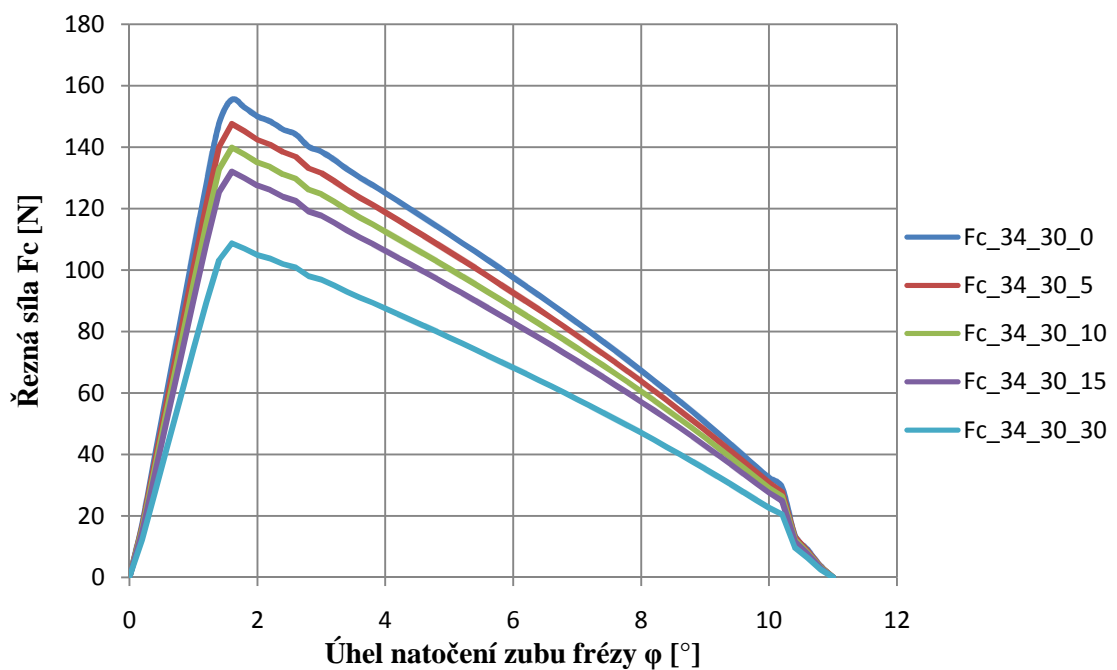
Obr. 8.25 Závislost výchylky na čase v softwaru RT PRO PHOTON.



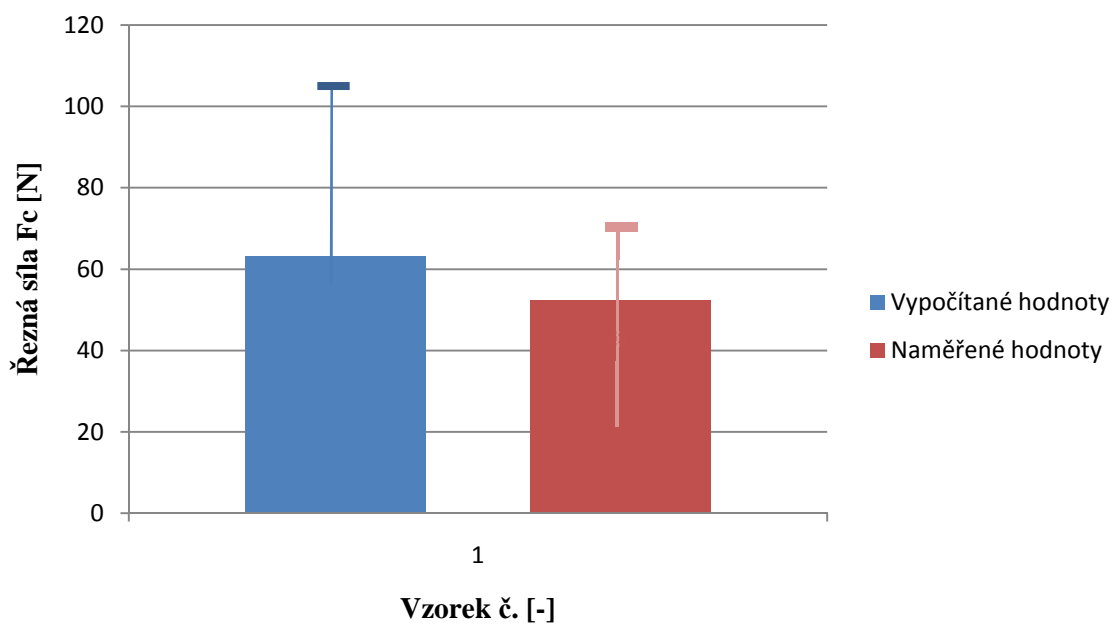
Obr. 8.26 Závislost výchylky na čase se znatelným nájezdem zubu do záběru v softwaru RT PRO PHOTON.

8.9 Aplikace modelu použitého pro optimalizaci na experiment

Stejným způsobem jako byla provedena optimalizace geometrie, byl model aplikován na simulaci obrábění při experimentu. Hlavním rozdílem byla následná aplikace ortogonálního úhlu čela do výpočtu, snahou bylo ověření správnosti použitého postupu. Výsledky zobrazuje obr. 8.27.



Obr. 8.27 Ověření optimalizačního modelu na podmínkách při experimentu.



Obr. 8.28 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot s chybovými úsečkami.

9 DISKUZE

Optimalizace geometrie byla provedena pro modelový případ elementu třísky a velikosti sil vypočtených při úvahách jsou velmi vysoké a neblíží se reálným hodnotám, snahou bylo zachycení trendu při změně velikosti a kombinaci různých nástrojových úhlů. Vliv růstu řezné síly při optimalizaci geometrie při použití uvedeného modelu především ze zvyšování plochy nástroje v záběru nakloněním destičky pod různými konstrukčními úhly. Na druhou stranu se však zvyšuje doba, po kterou je nástroj aktivně v záběru a hodnoty řezné síly nejsou skokově navýšeny, což má pozitivní vliv na vznik chvění a namáhání nástroje. Optimalizace geometrie by vždy měla být potvrzena příslušnými měřeními, pro potvrzení její správnosti.

Měření silového zatížení jednotlivých vzorků a jejich vyhodnocené průběhy (Obr. 8.6 až Obr. 8.11) poukazují na různé stability vzorků při obrábění. Jejich nárůst v průběhu obrábění za konstantních parametrů obráběcího procesu poukazuje na různou tuhost, vlivem vibrací došlo k jejich vychýlení a vtáhnutí respektive odtlačení obrobku od frézovací hlavy. Při obrábění tenkostěnných součástí zvláště pokud by se jednalo o finančně nákladné, by bylo možným řešením snímání silového zatížení obrobku a využití těchto dat pro kompenzaci dráhy nástroje na CNC řízených strojích.

ZÁVĚR

V diplomové práci byl uveden přehled vybraných slitin hliníku určených především pro použití v leteckém průmyslu a na jejich aplikaci pro tenkostěnné součásti. Obrábění tenkostěnných součásti s sebou přináší velkou řadu obtíží způsobenou zpravidla působením sil vznikajících v průběhu obráběcího procesu a vzniku nežádoucích vibrací. Důležitým hlediskem je volba vhodné obráběcí strategie, ale také volba vhodné geometrie nástroje. Nalezení optimální geometrie je složitým úkolem a vyžaduje mnoho úsilí. V diplomové práci byl uveden jeden z možných způsobů určení nástrojové řezné geometrie s cílem nalezení optimálního řešení. Zvolený způsob je časově velice náročný a pracný. Jeho výsledky jsou však uspokojivé, i když při jeho aplikaci bylo využito řady zjednodušení, aplikací popsaného modelu pro porovnání se skutečným obráběním se hodnoty řádově neliší. Navržený způsob má určitá omezení, kvůli kterým bylo dosaženo zmíněných rozdílných výsledků:

- při výpočtu bylo v některých případech nutné přibližně určit tloušťku třísky, jelikož promítnutím geometrie docházelo k vykreslení komplikovaných plošných tvarů,
- při výpočtech nebyl uvažován rádius špičky nástroje, tato hodnota mohla určitým způsobem ovlivnit přesnost vypočtených hodnot,
- krok 2° při simulaci otáčení frézovacího nástroje byl zvolen z důvodu menší časové náročnosti výzkumu průřezu třísky, u aplikace na reálný model byl zvolen krok $0,2^\circ$, aby vyšetřené hodnoty co možná nejvíce odpovídaly skutečnému procesu obrábění a bylo umožněno porovnání,
- porovnáním vypočtených a naměřených hodnot byla zjištěna odchylka, která byla způsobena především z důvodu neznalosti přesné geometrie břitové destičky, která byla určena pro výpočet přibližným měřením, a tím mohlo dojít k významnému ovlivnění přesnosti výpočtu.

Praktický experiment byl zaměřený na obrábění tenkostěnných součástí při aplikaci vysokorychlostního obrábění na vzorky o různé tloušťce a určení výchylky stěny při obrábění. Následné vyhodnocení úchylek rozměrů prokázalo:

- vypočtené a naměřené hodnoty se značně liší, proto by bylo vhodné další porovnání hodnot, relativně jednoduchou a časově ne příliš náročnou možností je např. využití programů umožňujících analýzy silového zatížení, což však požaduje znalost této problematiky,
- vyhodnocení úchylek rozměrů prokázalo značné rozdíly tuhosti jednotlivých vzorků,
- pro druhý a třetí vzorek již nebyly zvolené parametry obráběcího procesu optimálně zvoleny, v průběhu obrábění došlo k vychýlení vzorků vlivem řezných sil, vzniku vibrací a značné úchylce od požadovaného rozměru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A. A KOL. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, ISBN 80-890-4188-4.
2. AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, c1997, ISBN 91-972-2994-6.
3. CHEMICAL HERITAGE FOUNDATION. *Paul Héroult, Charles M. Hall, and Julia Brainerd Hall* [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: <http://www.chemheritage.org/discover/online-resources/chemistry-in-history/themes/electrochemistry/heroult-hall-hall.aspx>
4. LEYENS, C., PETERS, M. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, ISBN 35-273-0534-3.
5. INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. *Primary aluminium production* [online]. 21 Jan 2013. [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: <http://world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/#data>
6. INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. *Global Aluminium Industry Sustainability Performance 2010* [online]. 2011 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: http://world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/2011_-_for_iai_website.pdf
7. HALE, J., *Boeing 787: from the Ground Up*. [online]. 2006, [cit. 2013-01-28]. Dostupné z: http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_1.html
8. AIRBUS SAS, *The future takes shape. A350 XWB* [online]. 2013 [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: <http://www.a350xwb.com/#sensational/shape/>
9. KOČMAN, K., PROKOP, J., *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, ISBN 80-214-3068-0.
10. ŠKOPEČEK, T., VODIČKA, J., PAHL, J. P., HERKNER V., *Základy vysokorychlostního obrábění - HSC*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, c2005, ISBN 80-704-3344-2.
11. FOREJT, M., PÍŠKA, M., *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, ISBN 80-214-2374-9.
12. SHAW, M. C., *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, ISBN 01-951-4206-3.
13. SCHULZ, H., SCHÜTZER, K., *The history of high speed machining* [online]. Germany: Sao Paolo: Ed. Erica, 2004 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.unimep.br/phpg/editora/revistaspdf/rct13art01.pdf>

14. ERDEL, B. P., *High-speed machining*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, c2003, xv, ISBN 08-726-3649-6.
15. López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., *Machine tools for high performance machining*. London: Springer, 2009, ISBN 978-1-84800-379-8.
16. INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. *The Future Moves with Aluminium* [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: <http://transport.world-aluminium.org/index.php?id=93&L=0>
17. MICHNA, Š. *Rozdělení Al slitin do skupin* [online]. [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/rozdeleni_AL_slitin.pdf
18. GRAEVE, I., HIRSCH, J., *Wrought Aluminium Alloys*. European aluminium association, Matter, [online]. [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417044>
19. NPS PROAL S.R.O. *Hliníkové slitiny: Ekvivalentní materiály* [online]. [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/slitiny.htm>
20. KOČMAN, K., *Speciální technologie: obrábění*. 3. přepr. a dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, ISBN 80-214-2562-8.
21. EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, MATTER. *Alu Select Applications* [online]. [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/01_applications.asp
22. GARANT příručka obrábění, Obj. č. 11 0959, vydání kat. 24, 2006.
23. SANDVIK COROMANT CZECH REPUBLIC., *Silent tools: uživatelská příručka* [online]. [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/cs-cz/C-1020-17.pdf>
24. Longbottom, J.M., Lanham, J.D., *A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issue 14, November 2006, Pages 1740-1747, [online]. [cit. 2013-18-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505003214>, ISSN 0890-6955.
25. ZELENÝ, J., *Řezné procesy a materiály HSC strojů*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Duben 1999, č. 4., s. 56-58, ISSN 1212-2572.

26. ISCAR, *Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Březen 2010, č. 3., s. 46-47, ISSN 1212-2572.
27. CHRISTOFFEL, K., RICHT, C., *Vývoj nástrojů pro rychloobrábění (1.část)*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Říjen 2003, č. 10., s. 46-47, ISSN 1212-2572.
28. SANDVIK COROMANT CZECH REPUBLIC, *Frézování do rohu v případě tenkých a poddajných stěn* [online]. [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/shoulder_milling/shoulder_milling_thin_walls/Pages/default.aspx?#locale
29. LIŠKA, J., *Frézování tvrdých materiálů*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Březen 1999, č. 3., s. 50-51, ISSN 1212-2572.
30. OETTLE, M., *Tvrdé frézování v oblasti nástrojů a forem*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Duben 2005, č. 4., s. 30-31, ISSN 1212-2572.
31. SANDVIK COROMANT, *Wing rib* [online]. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industriesolutions/aerospace/aluminium/Pages/Wing-rib.aspx>
32. CHIRON-WERKE GmbH & CO. KG, *Ahead through Experience* [online]. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.chiron.de/us/home/industry-solutions/industry-overview/aerospace.html>
33. BARÁNEK, I., ŠANDORA, J., *Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky*. 1. vyd. Trenčín: Vydavateľstvo TnUAD, 2004, ISBN 80-8075-017-3.
34. ŠKOPEČEK, T., SVOBODA, J., ŘEHOŘ, J., *Experimentální studium tvorby třísky při HSC – tvrdém frézování*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Prosinec 2003, č. 12., s. 25-26, ISSN 1212-2572.
35. HOUDEK, J., KOUŘIL K., *Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Prosinec 2004, č. 12., s. 20-21, ISSN 1212-2572.
36. BARÁNEK, I., *Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie*. 1. vyd. Trenčín: Vydavateľstvo TnUAD, 2004, ISBN 80-8075-013-0.
37. TLUSTY, J., SCHUELLER, J., *Applying High-Speed Machining techniques on rotor grip configurations*. University of Florida at Gainesville, Presented at the American Helicopter Society, 55th Annual Forum, Montreal, Quebec, Canada, May 25 – 27, 1999, [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.mfg->

labs.com/FileDownload/Papers_Presentations/Paper%20-%20HSM%20of%20Aluminum%20Clevis%20Conf%20Leigh.PDF.

38. TLUSTY, J., SMITH, S., WINFOUGH, W. R., *Techniques for the use of Long Slender End Mills in High-Speed Milling*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1996, vol. 45, no. 1, pp. 393-396. [online]. [cit. 2013-02-15] Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com.rpl.ensam.eu/science/article/B8CXH-4P3KRDP-30/2/9a225558b4e6b75599d7d4e67762aa5e>>. ISSN 0007-8506.
39. SMITH, S., *Post-processing should not work*. University of North Carolina at Charlotte, 2009, [online]. [cit. 2013-03-08] Dostupné z: <http://www.mfg-labs.com/filedownload/Papers_Presentations/CTE_August2009_ss.pdf>
40. MARANDET, B., VERQUIN, B., SAINT-CHELY, J., ANDERSON C., RYCKEBOER, M., *Milling*. European aluminium association, Matter, [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=126&pageid=2144416174>
41. ŠKOPEČEK, T., *HSC a bezpečnost práce*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Prosinec 2005, č. 12., s. 52-53, ISSN 1212-2572.
42. SUCHNA, K., *Vyvažování nástrojů*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Zář 2004, č. 9., s. 56, ISSN 1212-2572.
43. PRAMET TOOLS, s.r.o., ČR, *Příručka obrábění*. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.mavslovakia.sk/pdf/pramet/prirucka_cz.pdf
44. SMITH, S., *Some measurement required*. University of North Carolina at Charlotte, 2009, [online]. [cit. 2013-03-18] Dostupné z: <http://www.mfg-labs.com/filedownload/Papers_Presentations/CTE_July2009_ss.pdf>
45. HUANG, Y., ZHANG X., XIONG, Y., *Finite element analysis of machining thin-wall parts: Error prediction and stability analysis*. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan,, China, 2012, [online]. [cit. 2013-03-23] Dostupné z: <<http://www.intechopen.com/books/finite-element-analysis-applications-in-mechanical-engineering/finite-element-analysis-of-machining-thin-wall-parts-error-prediction-and-stability-analysis>>
46. PANDIAN, P., PRABHU RAJA, V., SAKTHIMURUGAN, K., *Surface Error Compensation in HSM of Thin Wall Structures*. International Journal of Engineering Science Invention., February 2013, Volume 2 Issue 2, [online]. [cit. 2013-03-05] Dostupné z: <<http://www.ijesi.org/papers/Vol%282%292%20%28Version-3%29/A220111.pdf>>. ISSN (Online): 2319 – 6734.
47. MICHALEC, J., *Pružnost a pevnost II*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha. ISBN 80-010-1087-2.

48. SANDVIK COROMANT, *Měrná řezná síla* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/the_specific_cutting_force/pages/default.aspx
49. SANDVIK COROMANT, *ISO N Neželezné materiály* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_n_non_ferrous_materials/pages/default.aspx

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
CFRP	[-]	<i>Carbon fiber reinforced plastic</i> (plast vyztužený uhlíkovými vlákny)
CNC	[-]	Computer Numerical Control (číslicové řízení počítačem)
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition (chemické naprašování)
ČSN	[-]	Česká technická norma
DM	[-]	Dry Machining (suché obrábění)
EN	[-]	Evropská norma
EN AW	[-]	Evropská norma pro tvářené hliníkové slitiny
HB	[-]	Tvrdost dle Brinella
HM	[-]	Hard Maschining (tvrdé obrábění)
HRC	[-]	Tvrdost dle Rockwella
HSM	[-]	High Speed Maschining (vysokorychlostní obrábění)
MKP	[-]	Metoda konečných prvků
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition (nanášení odpařením z pevné fáze)
VBD	[-]	výměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	průřez třísky
a_e	[mm]	radiální šířka řezu
a_p	[mm]	axiální šířka řezu
D	[mm]	průměr frézovacího nástroje
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
F	[N]	celková řezná síla
F_{cN}	[N]	kolmá řezná síla
F_{ci}	[N]	řezná síla
f_z	[mm]	posuv na zub
h_m	[mm]	tloušťka třísky
j	[°]	úhel záběru nástroje
k_C	[MPa]	měrná řezná síla
k_{CI}	[N/mm ² = MPa]	měrná řezná síla potřebná k oddělení třísky o ploše 1 mm ² a tloušťce 1 mm
m_c	[-]	koeficient zahrnující vliv obráběného materiálu
R_m	MPa	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mezi kluzu
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
w_A	[mm]	průhyb
γ	[°]	úhel sklonu fazetky
γ_f	[°]	radiální úhel čela
γ_n	[°]	úhel břitu
γ_o	[°]	ortogonální úhel čela výměnné břitové destičky
γ_p	[°]	axiální úhel čela
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
λ_s	[°]	úhel sklonu ostří
π	[-]	Ludolfovo číslo