



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA SILOVÉHO ZATÍŽENÍ PŘI OBRÁBĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN MONOLITNÍMI FRÉZAMI ZE SLINUTÉHO KARBIDU

ANALYSIS OF THE FORCE LOAD WHEN MACHINING OF ALUMINUM ALLOYS
WITH MONOLITHIC MILLS FROM CEMENTED CARBIDE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Koubek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. David Koubek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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:

Analýza silového zatížení při obrábění hliníkových slitin monolitními frézami ze slinutého karbidu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu třískového obrábění je možno měřit aktuální hodnoty silového zatížení řezného nástroje a obrobku. Znalost velikosti silové výslednice i jejího směru pak umožňuje lépe rozhodovat o způsobu programování dané technologie a o vhodnosti aplikace různých obráběcích strategií.

Cíle diplomové práce:

- stručný rozbor možností měření silového zatížení nástroje a obrobku při frézování,
- návrh experimentálního měření silového zatížení monolitní stopkové frézy ze SK při obrábění tenkostěnné součástky,
- praktická realizace měření sil v průběhu frézování,
- vyhodnocení silového záznamu,

Seznam literatury:

- Tschätsch, H. (2009): Applied machining technology. Springer, Dordrecht.
- Smith, Graham T. (2008): Cutting tool technology: industrial handbook. Springer, London.
- Davim, Paulo J. (2008): Machining: fundamentals and recent advances. Springer, London.
- Campbell, F. (2006): Manufacturing technology for aerospace structural materials. Elsevier, Amsterdam.
- Shaw, Milton C. (2005): Metal cutting principles. Oxford University Press, New York.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je vytvoření návrhu a rozšíření znalostí v oblasti experimentálního měření silového zatížení při frézování tenkostěnné součástky z hliníkové slitiny monolitními stopkovými frézami ze slinutého karbidu (dále jen SK). Dále se věnuje teoretickému rozboru sil vznikajících při frézování a praktickými možnostmi jejich měření při experimentech. Tato práce se zabývá i rozbohem hliníku a jeho slitin. V další kapitole jsou popsány vhodné strategie pro obrábění tenkostěnných součástí včetně definování problémů, které mohou komplikovat obrábění tenké stěny. Praktická část se zabývá predikcí a následným návrhem experimentu měření silového zatížení. Poslední část je věnována praktické realizaci měření sil v průběhu frézování tenkostěnné součástky s následným vyhodnocením a porovnáním silového záznamu pro zvolené monolitní nástroje ze SK včetně vyhodnocení parametrů drsnosti.

Klíčová slova

Tenkostěnné součástky, hliník a jeho slitiny, frézování, silové zatížení, vychýlení součástí, frézovací strategie.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to create the proposal and expansion of knowledge in the field of experimental measurement of force load when milling thin-walled parts made of aluminum alloy monolithic cylindrical shank cutter of cemented carbide (hereinafter referred to as CC). It also discusses the theoretical analysis of the forces generated during milling, and practical approaches to their measurement experiments. This work also deals with the analysis of aluminum and its alloys. The next chapter describes the appropriate strategy for the machining of thin-walled components including defining the problems, that can complicate machining thin walls. The practical part deals with prediction and a following suggestion of the experiment measuring the power load. The last section is devoted to the practical implementation of the measurement of forces during the milling of thin-walled parts with subsequent evaluation and comparison of strength for the record selected from CC carbide tools, including evaluation of roughness parameters.

Key words

Thin-walled componets, aluminum and its alloys, milling, forces load, deflection parts, milling strategy.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUBEK, David. *Analýza silového zatížení při obrábění hliníkových slitin monolitními frézami ze slinutého karbidu*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s. 11 příloh. Ing. Aleš Polzer, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza silového zatížení při obrábění hliníkových slitin monolitními frézami ze slinutého karbidu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. David Koubek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Alešovi Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při tvorbě diplomové práce a panu Jiřímu Čechovi z Ústavu strojírenské technologie za pomoc při experimentu.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, která mně po dobu mého studia podporovala.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ.....	10
1.1 Průřez třísky při čelním frézování.....	10
1.2 Řezné síly při frézování	12
1.2.1 Měrná řezná síla (měrný řezný odpor).....	13
1.2.2 Řezné síly při čelním frézování	14
1.2.3 Analytické vyjádření řezné síly.....	15
1.3 Vztah velikosti opotřebení nástroje a jeho zatížení	16
2 MOŽNOSTI MĚŘENÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ.....	18
2.1 Přímé metody měření sil a momentů	19
2.1.1 Mechanické dynamometry	20
2.1.2 Pneumatické dynamometry.....	20
2.1.3 Hydraulické dynamometry	21
2.1.4 Elektrické dynamometry	21
2.2 Nepřímé metody měření sil a momentů.....	25
3 HLINÍK A JEHO SLITINY	27
3.1 Hlavní oblastí využití hliníku a jeho slitin.....	28
3.2 Vlastnosti hliníku a jeho slitin	29
3.2.1 Fyzikální vlastnosti hliníku.....	29
3.2.2 Chemické složení slitin hliníku.....	30
3.2.3 Mechanické vlastnosti.....	31
3.3 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin	31
3.3.1 Nevytvrditelné slitiny	31
3.3.2 Vytvrditelné slitiny	32
3.4 Označování slitin hliníku podle ČSN EN.....	32
3.5 Obrobitelnost slitin hliníku	33
3.6 Rozdělení slitin hliníku podle obrobitelnosti.....	35
3.6.1 Slévárenské slitiny hliníku.....	35
3.6.2 Tvářené slitiny hliníku	35
3.6.3 Automatové slitiny hliníku	36

4	TENKOSTĚNNÉ SOUČÁSTKY.....	37
4.1	Volba frézovací strategie	38
4.1.1	Hrubování a dokončování v jedné hladině	38
4.1.2	Strategie pro malý poměr výšky k tloušťce <15:1	39
4.1.3	Strategie pro střední poměr výšky k tloušťce <30:1	40
4.1.4	Strategie pro vysoký poměr výšky k tloušťce >30:1	40
4.1.5	Frézování do rohu při malé tloušťce dna	41
4.2	Problémy při obrábění tenkostěnných součástí	41
4.2.1	Teorie tuhosti	42
4.2.2	Povrchové vady při obrábění tenkostěnných součástek	44
4.3	Určení průhybu řezného nástroje a tenké stěny	45
5	NÁVRH EXPERIMENTU	47
5.1	Volba obrábějícího centra.....	47
5.2	Volba monolitních nástrojů z SK.....	48
5.2.1	Fréza JABRO® - SOLID ² - JS413.....	48
5.2.2	Fréza FRAISA AX - V3	49
5.3	Řezné podmínky	50
5.4	Materiál obrobku.....	51
5.5	Měřicí aparatura silového zatížení	52
5.6	Predikce průhybu řezných nástrojů a obrobku	53
5.7	Návrh tenkostěnné součástky včetně technologie a strategie frézování	56
6	PRAKTICKÁ REALIZACE EXPERIMENTU	59
6.1	Stanovení řezných podmínek.....	59
6.2	Ověření řezných podmínek	62
6.3	Praktická realizace tenkostěnné součástky	63
6.4	Vyhodnocení silového zatížení při frézování	65
	DISKUZE	71
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	76
	SEZNAM PŘÍLOH.....	78

ÚVOD

V dnešní moderní době řezné procesy obrábění kovů patří mezi nejpoužívanější metody pro výrobu součástí. Takovým hlavním a užívaným procesem obrábění je frézování, které je nedílnou součástí strojírenské průmyslové výroby. Neustále se vyvíjí směrem dopředu a dosahuje vysoké produktivity za použití moderních obráběcích center společně s aplikováním nových řezných nástrojů při zachování požadované rozměrové a geometrické přesnosti, ale zejména při dodržení optimálních výrobních podmínek. Proto je důležité analyzovat a pochopit mechanismy, které se odehrávají v procesu obrábění, protože tyto procesy jsou klíčové pro rozvoj technologie, ekonomičnost obrábění (minimální náklady), konkurence schopnost, environmentální aspekty obrábění, ale hlavně pro dodržení bezpečnosti procesu obrábění.

Pro kvalitní hodnocení a optimalizaci řezného procesu je nutné znát některé zásadní parametry obrábění. Například jako je velikost, směr a smysl jednotlivých složek silového zatížení a jejich průběh během procesu obrábění nebo znát jejich vývoj při změně z některých parametrů obráběcího procesu. Pro analýzu silového zatížení při experimentech se nejvíce používají piezoelektrické dynamometry, kterými získáme reálné hodnoty. Tyto hodnoty silového zatížení jsou i s odchylkami přesnější než hodnoty určené z teoretických výpočtů či simulací. Pro některé obrobky (součásti z křehkých materiálů nebo s tenkými stěnami náchylnými ke vzniku trhlin atd.) jsou právě tyto složky silového zatížení na obrobek důležitým parametrem, kterým se posuzuje přístup k dané problematice obrábění těchto specifických obrobků.

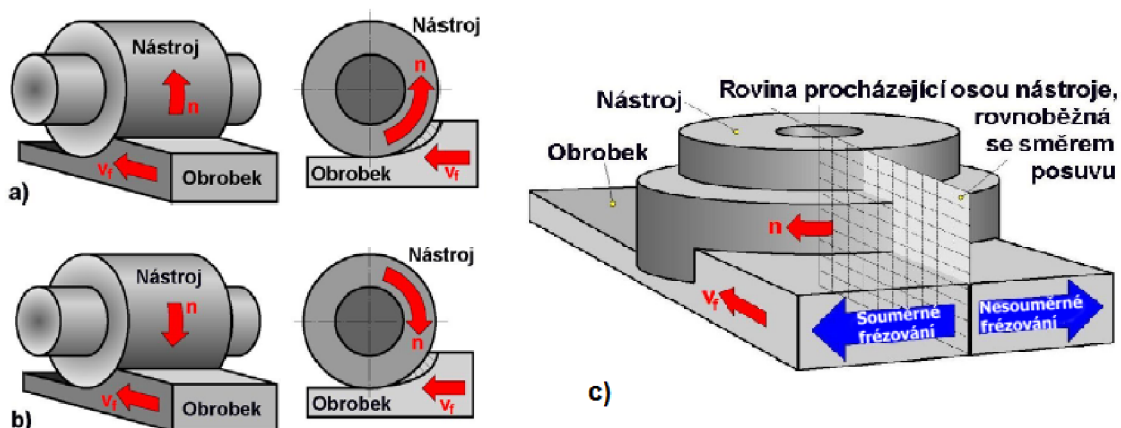
Použití hliníku a jeho slitin se neustále zvyšuje díky jeho značným zásobám v přírodě a prakticky neexistuje oblast, kde bychom nenašli výrobky z hliníku a jeho slitin. Největší nárůst hliníku je zaznamenán v leteckém, automobilovém a stavebním průmyslu. Důvodem je kladený důraz na snížení hmotnosti součástí při zachování jejich mechanických vlastností a následným dodržení funkčnosti těchto výrobků. Kombinace chemický, fyzikální a mechanických vlastností dělají z hliníku a jeho slitin výhodným technickým materiálem oproti konstrukční oceli a litiny. Mezi hlavní výhody patří velmi nízká hustota, relativně vysoké pevnostní vlastnosti, dobrá tepelná a elektrická vodivost, opracovatelnost a vysoká odolnost vůči korozi. Obrábění slitin hliníku lze považovat za bezproblémové při nastavení správných parametrů obrábění. Obrobitelnost u těchto slitin závisí nejvíce na chemickém složení, způsobu zpracování polotovaru (tažení, kování, slévání) případně i na tepelném zpracování. Z legovacích přísad zlepšuje obrobitelnost hliníku měď, hořčík, mangan, zinek, chrom, vizmut a naopak křemík ji zhoršuje.

Tenkostěnné součástky nacházejí největší uplatnění v leteckém průmyslu a taková konkrétní součástka může být například žebro křídla letadla, které je ze slitiny hliníku. Tyto součástky se kvůli špatné tuhosti snadno deformují během procesu obrábění. Vzhledem k postupnému zmenšování tloušťky stěny a její nízké tuhosti je frézování takových tenkostěnných součástí velmi složité, proto se využívá moderních CNC strojů pro dosažení složitých geometrických tvarů, které musí splňovat vysoké požadavky na přesnost a kvalitu obráběného povrchu. Dynamické namáhání soustavy stroj-nástroj-obrobek jednotlivými složkami silového zatížení má velký vliv na stabilitu řezného procesu, proto chceme dosáhnout co možná nejnižšího zatížení obrobku a nástroje optimální volbou obráběcích parametrů. Především zvolení vhodné obráběcí strategie za použití vhodných řezných nástrojů, abychom zamezili vznikům vibracím v průběhu obrábění, které snižují a omezují efektivitu obrábění.

1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Frézování, jako jedna z mnoha metod třískového obrábění kovů, je nedílnou součástí strojírenské výroby a neustále se rozvíjí směrem dopředu. Velkou předností frézování je velká výkonnost, která navazuje na dobrou kvalitu obrábění. Je nutné navázat na požadavky přesné výroby jako je dodržení rozměrové přesnosti, tvarové složitosti a jakosti povrchu u obráběného materiálu v závislosti na politicko-ekonomických a environmentálních aspektech v současné moderní době.

Podstata technologie frézování je založena na způsobu obrábění, při kterém je materiál odebrán břity rotujícího nástroje. Upnutý obrobek koná nejčastěji vedlejší pohyb posuvný, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů (obráběcí centra, víceosé CNC frézky) jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech. Řezný proces je přerušovaný, protože každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnlivé tloušťky. Z technologického hlediska v závislosti na použitém nástroji se frézování dělí na válcové a čelní (viz obr. 1). Válcové frézování se používá při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou tvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebrané vrstvy se nastavuje kolmo na osu nástroje a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování nesousledné a sousledné. Čelní frézování využívá při obrábění čelních fréz, jejich břity jsou rozmístěny po obvodu a na čele nástroje. Fréza se otáčí v rovině rovnoběžné se směrem radiálního posuvu [1, 2].



Obr. 1 Druhy frézování [1]. a) válcové nesousledné, b) válcové sousledné, c) čelní.

kde: v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] - posuvová rychlost,
 n [min^{-1}] - otáčky obrobku.

1.1 Průřez třísky při čelním frézování

Při řešení průřezu třísky (viz obr. 2) při frézování je nutné vzít na vědomí, že průřez třísky a silové zatížení není konstantní (mění se tloušťka třísky během frézování) a v záběru může být i více zubů frézy. V úvahu se bere i to, že záběr břitů je periodicky přerušovaný a tříska je dělená. U čelního frézování se tloušťka třísky mění od nulové do maximální hodnoty úhlu posuvového pohybu φ_i a je ovlivněna i úhlem nastavení hlavního ostří κ_r . Proto jmenovitá tloušťka třísky pro čelní frézování může být určena vztahem [1, 3, 4]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad (1.1)$$

kde: h_i [mm] - okamžitá tloušťka třísky,
 φ_i [°] - úhel posuvového pohybu,
 κ_r [°] - nastavení hlavního ostří.

Jmenovitá šířka třísky b_i je pro libovolný úhel φ_i konstantní a vypočítá se podle vztahu [2]:

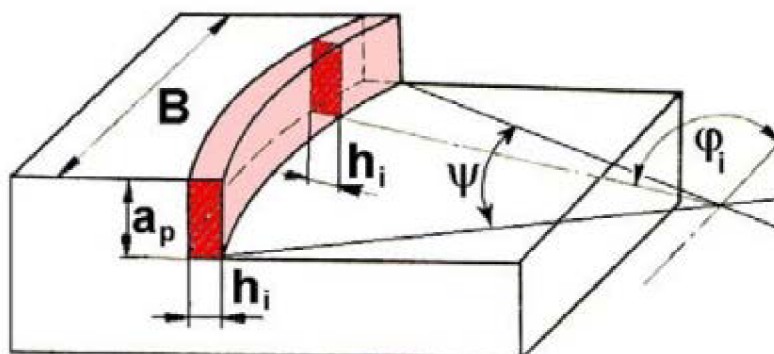
$$b_i = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ [mm]} \quad (1.2)$$

kde: b_i [mm] - okamžitá šířka třísky,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří.

Jmenovitý průřez třísky pro i -tý zub se vypočítá podle vztahu [2]:

$$A_{Di} = b_i \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.3)$$

kde: A_{Di} [mm²] - průřez třísky.



Obr. 2 Průřez třísky při čelním frézování [3].

Průřez třísky při čelním frézování nástrojem se šroubovicí

Plocha průřezu třísky odpovídá analýze šroubového konoidu a lze ji odvodit pro každý zub a jeho úhel záběru. Zub při frézování postupně mění v čase velikost průřezu třísky. V souvislosti s touto časovou změnou se mění i měrná řezná síla, celkové zatížení zubu frézy i řezný výkon. Element průřezu třísky lze získat jako součin elementu délky ostří a odpovídající tloušťce třísky v závislosti na posuvovém úhlu. Pro výpočet průřezu lze použít upravený a odvozený vztah pro určitý počet zubů v záběru [3]:

$$A_D = f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_f}{2\pi}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^{z_z} (\cos \varphi_{1i} - \cos \varphi_{2i}) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.4)$$

kde: R [mm] - poloměr frézy,

- s_s [mm] - stoupání šroubovice,
 z_z [-] - počet zubů v záběru.

Odvození vztahu (1.4) lze nalézt ve zdroji [3].

1.2 Řezné síly při frézování

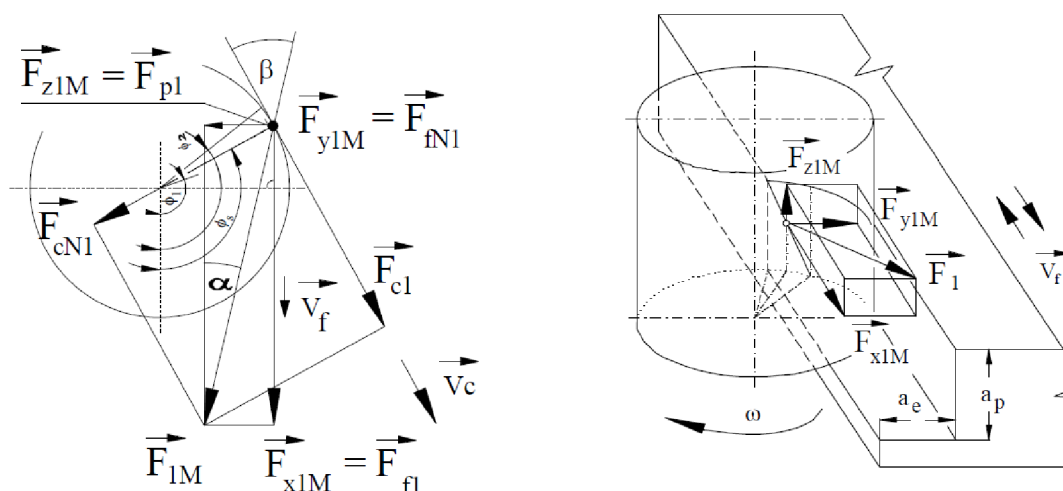
Řezné síly jsou jedny z mnoha nejzákladnějších a nejvýznamnějších parametrů při procesu obrábění. Při frézování způsobují posunutí části nástroje a to může vést k nedodržení tolerance. Řezné síly mohou být modelovány pro danou geometrii břitu, pro konkrétní řezné podmínky a pro daný obráběcí materiál. Produktivita při frézování je obvykle snížena z důsledku omezení procesu frézování, které způsobují velké řezné síly nebo stabilita celé soustavy stroj-nástroj-obrobek (dále jen S-N-O). Řezné síly působí na součástku a nástroj tak, že způsobují průhyby, které jsou ve výrobě nežádoucí [5].

Zatížení řezného nástroje při obrábění je realizováno působením odporu obrobku proti břitu vnikajícího nástroje. Síly jsou rozloženy na celém břitu v axiálním směru a jsou závislé na aktuální poloze břitu. Tyto síly vyvolávají deformaci nástroje, která způsobuje problémy zmíněné výše. Vyjádření těchto řezných sil nezvažuje tuto deformaci a síly jsou odvozeny pro tuhý nástroj [6].

Vyjádření celkových sil F_j působící na řezný nástroj (obrobek) je možno provést v různých orientovaných kartézských souřadných systémech [6]:

- souřadný systém řezného nástroje (F_c , F_{cN} , F_p),
- souřadný systém obráběcího stroje (F_x , F_y , F_z),
- souřadný systém měřicí aparatury Kistler (F_x , F_y , F_z),
- případně souřadný systém uvažující bod ostří a ortogonální rovina hlavního ostří (F_{sh} , F_{shN} , F_{tr}).

V těchto souřadnicových systémech je celková působící síla na nástroj rozložena na jednotlivé složky (viz obr. 3). Použité souřadné systémy jsou v souladu s ČSN ISO 3002.



Obr. 3 Fyzikální model zatížení řezného nástroje (obrobku) v průběhu obrábění [3] [6].

1.2.1 Měrná řezná síla (měrný řezný odpor)

Podobně jako nauka o materiálu a mechanika těles určuje pevnost materiálu v tahu nebo v tlaku, stejně tak i teorie obrábění definuje velikost měrné síly potřebné k překonání spjitosti materiálu účinkem řezného procesu. V základním tvaru je měrná řezná síla definovaná jako síla, která působí ve směru hlavního řezného pohybu, vztažena na průřez třísky – tzn. jednotkou je MPa (měrná řezná síla a měrný řezný odpor vychází z principu akce a reakce [7, 8]). Vztah pro výpočet řezné síly v různých technologických procesech vychází z Kinzelova matematického modelu [23], který byl vytvořen na základě experimentálních měření. Tento vztah pro výpočet řezné síly je definován takto [7, 8]:

$$F_c = k_{c11} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \text{ [N]} \quad (1.5)$$

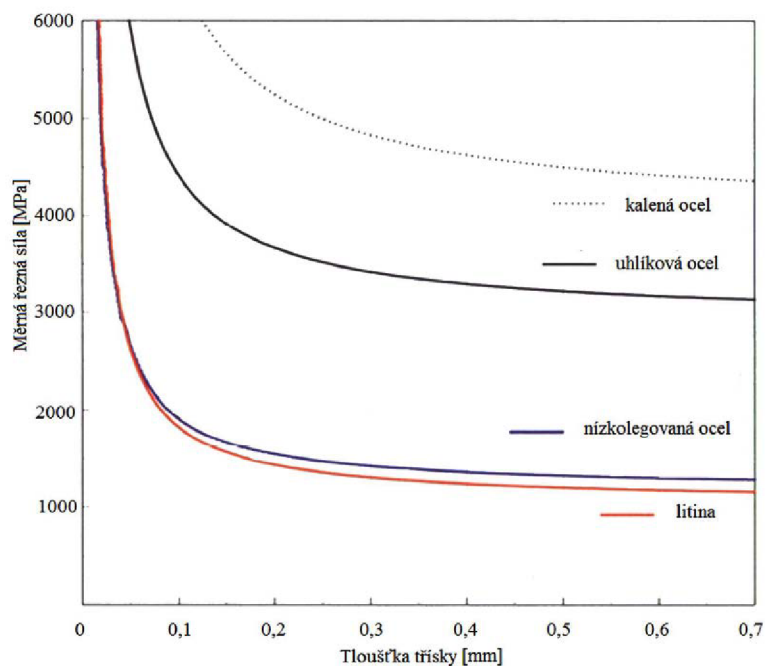
kde: k_{c11} [N.mm⁻²] - základní hodnota měrné řezné síly pro průřez třísky $A = 1 \text{ mm}^2$,
 m_c [-] - materiálová konstanta.

Vztah měrné řezné síly je popsán rovnicí [1, 9]:

$$k_c = k_{c11} \cdot h^{1-m_c} \text{ [N.mm}^{-2}\text{]} \quad (1.6)$$

kde: k_c [N.mm⁻²] - měrná řezná síla.

Hodnoty konstant k_{c11} a m_c vychází z mechanických vlastností obráběného materiálu. Velikosti těchto konstant byly určeny experimentálně při různých řezných podmínkách v různých technologických operacích, dají se nalézt v odborné literatuře, případně v katalozích prodejců nástrojů pro obrábění. Tyto konstanty berou v úvahu i další vnější vlivy, jako je řezná rychlost, úhel čela nástroje, opotřebenění a typ technologické operace. Na obr. 4 můžeme vidět závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [8, 9].



Obr. 4 Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [9].

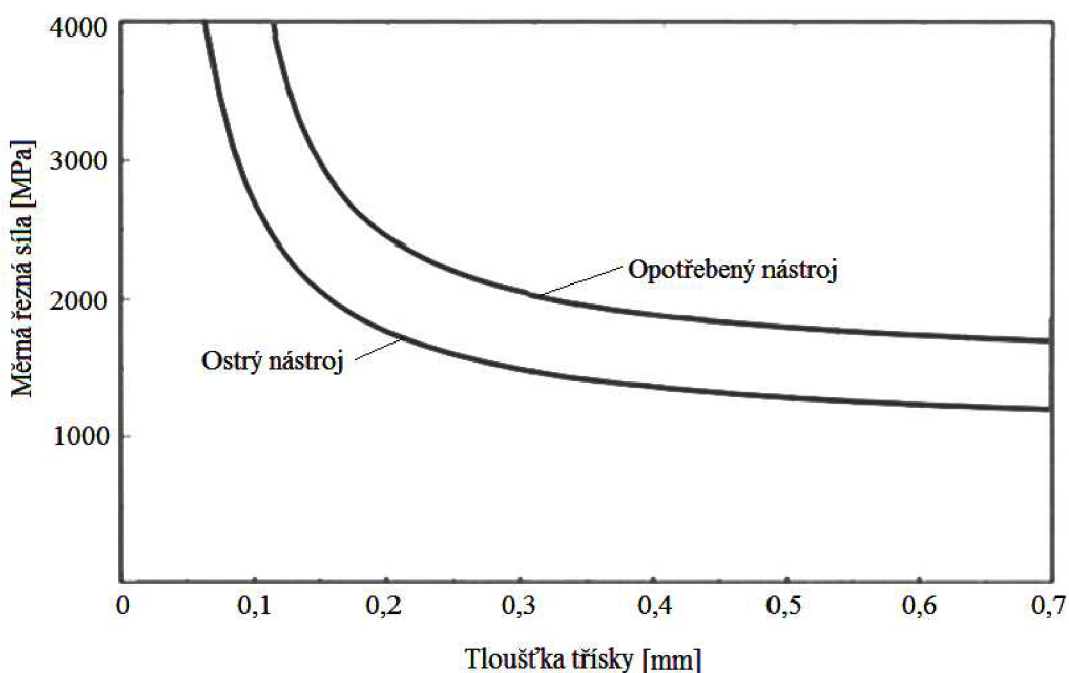
Hodnota velikosti řezné síly může být závislá na [3, 9]:

- fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku,
- řezných podmínkách (průřez třísky),
- mikro/makro geometrii řezného nástroje,
- řezném prostředí a další.

Dalším faktorem, který ovlivňuje velikost měrné řezné síly, je řezná rychlost a ta ovlivňuje především [3]:

- velikost oblasti a intenzity primární plastické deformace,
- teplotu deformovaného materiálu,
- určuje rychlost zatěžování materiálu obrobku,
- velikost součinitele tření na čele i na hřbetě a vznik a velikost nárůstku.

Znáмым faktem je, že při větším opotřebení nástroje dochází k zvýšení měrné řezné síly (viz obr. 5).



Obr. 5 Vliv opotřebení nástroje na měrné síle [9].

1.2.2 Řezné síly při čelním frézování

Při určení velikosti řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu nástroje, který je v určité poloze φ_i . Síla působící na i -tý zub frézy je pak určena vztahem [3]:

$$F_c = A_{Di} \cdot k_{ci} \text{ [N]} \quad (1.7)$$

Potom měrná síla je definovaná vztahem [3]:

$$k_c = \frac{F_{ci}}{A_{Di}} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (1.8)$$

A celková řezná síla působící na frézu je daná vztahem, kde z_z počet zubů v záběru [3].

$$F_c = \sum_{i=1}^{z_z} A_{Di} \cdot k_{ci} [\text{N}] \quad (1.9)$$

Potom z této silové analýzy plyne cyklické zatěžování frézovacích hlav, které může mít negativní důsledky na průběh opotřebení břitů a zapříčinit vznik chvění v obráběcí soustavě S-N-O. Ve výrobní praxi se tento jev potlačuje vhodnou volbou geometrie frézovací hlavy, kdy podle frézovací hlavy mohou být břity frézy, s geometrií čela v rovině zadní a boční $\gamma_p : \gamma_f$ na tzn. pozitivně-positivní, pozitivně-negativní a negativně-negativní. Nebo volbou vhodné rozteče zubů frézy na velkou, malou, zvláště malou roztečí a zuby s nepravidelnou roztečí [3].

1.2.3 Analytické vyjádření řezné síly

Řezné síly jsou u frézování nástrojem se zuby ve šroubovici závislé na úhlu záběru φ , poloměru nástroje a sklonu šroubovice λ_s . Tyto parametry ovlivňují průřez třísky A_D . Vyjádření složek elementární síly pro zub j-tý frézy je uvedeno ve vztazích [6]:

$$dF_c(\varphi, z) = K_t \cdot h_j(\varphi, z) dz [\text{N}] \quad (1.10)$$

$$dF_{cNj}(\varphi, z) = K_r \cdot dF_{cj}(\varphi, z) [\text{N}] \quad (1.11)$$

kde tloušťka třísky h_j lze vyjádřit [3]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_j(z) [\text{mm}] \quad (1.12)$$

kde z je axiální hloubka řezu. Velikost úhlu φ_j je závislá nejen na pootočení frézy, ale také na umístění vyšetřovaného elementu v axiálním směru na šroubovici zubu. Závislost jde potom vyjádřit [6]:

$$\varphi_j(z) = \varphi + j\varphi_p - k_\beta [\text{rad}] \quad (1.13)$$

kde $\varphi_p = 2\pi/N$ a $k_\beta = (\tan\beta)/R$, β je úhel stoupání šroubovice a N , R je počet zubů a poloměr nástroje.

K_t, K_r ze vztahů (1.10)(1.11) závisí na jmenovité tloušťce třísky h_a , na materiálu nástroje a obrobku [6].

$$K_t = K_T \cdot h_a^{-p} \quad (1.14)$$

$$K_r = K_R \cdot h_a^{-q} \quad (1.15)$$

Konstanty K_T, K_R p a q jsou zjištěny experimentálně pro konkrétní dvojici stroj obrobek. Elementární řeznou sílu je možno také přesunout do souřadnicového systému ztotožněného se směrem posuvu nástroje [6]:

$$dF_{xj}(\varphi, z) = -dF_{cj}(\varphi, z) \cos \varphi_j(z) - dF_{cNj}(\varphi, z) \sin \varphi_j(z) [\text{N}] \quad (1.16)$$

$$dF_{yj}(\varphi, z) = dF_{cj}(\varphi, z) \sin \varphi_j(z) - dF_{cnj}(\varphi, z) \cos \varphi_j(z) \text{ [N]} \quad (1.17)$$

Zjednodušené vztahy mezi složkami řezných sil pro frézu se zuby ve šroubovici uvádí Tlustý [10], který předpokládá že:

$$\Delta F_c = 0,3\Delta F_{cN} \text{ [N]} \quad (1.18)$$

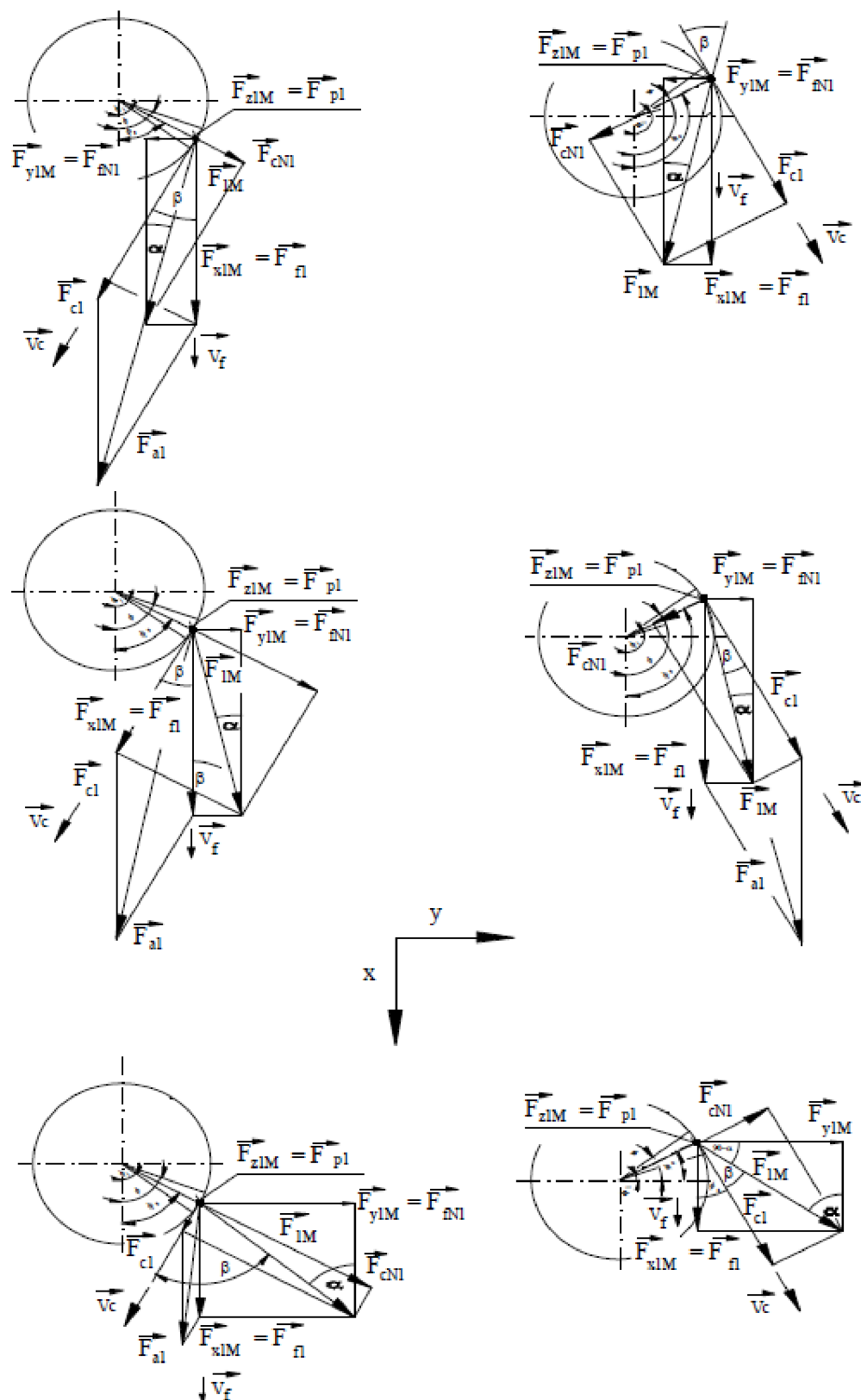
1.3 Vztah velikosti opotřebení nástroje a jeho zatížení

Pomocí vztahů (1.10), (1.11) lze vyjádřit elementární řeznou sílu v čase t . Při frézování dochází k opotřebení frézy, a tím i ke změně jeho geometrie, což je doprovázeno změnou řezné síly během obrábění. Tato změna v průběhu životnosti nástroje způsobuje celkové navýšení řezných sil, které běžně dosahuje 200 %, zcela výjimečně až 300 %. Obě složky síly se mění nerovnoměrně, takže během frézování se mění i směr působících sil (viz obr. 6). Kdy na začátku frézování může být nástroj v důsledku pozitivních úhlů čela vtahován do řezu a na konci frézování, kdy je fréza zcela opotřebovaná, se od obrobeneho povrchu výrazně odtlačuje. Tuhle tu změnu můžeme vyjádřit (v závislosti na čase t v souřadném systému pro ortogonální rovinu řezu) rovnicemi [3, 6, 11]:

$$dF_h = \frac{\delta F_h}{\delta t} \cdot dt = \frac{\delta F_h}{\delta \gamma_o} \cdot d\gamma_o + \frac{\delta F_h}{\delta r_n} \cdot dr_n + \mu \cdot dF_v + \frac{\delta F_h}{\delta R_a} \cdot dR_a \text{ [N]} \quad (1.19)$$

$$dF_v = \frac{\delta F_v}{\delta t} \cdot dt = \frac{\delta F_v}{\delta VB} \cdot dVB + \frac{\delta F_v}{\delta r_n} \cdot dr_n \text{ [N]} \quad (1.20)$$

kde γ_o je ortogonální úhle čela, r_n je radius řezné hrany, μ je Newton-Colombův koeficient tření a VB je šířka plochy opotřebení hřbetu [6, 11].



Obr. 6 Rozklad sil v průběhu opotřebení pro sousledné (vpravo) a nesousledné (vlevo) frézování [3].

2 MOŽNOSTI MĚŘENÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ

Mechanismus tvorby třísky je komplikovaný fyzikální proces a probíhá při vnikání řezného klínu do materiálu obrobku, u kterého dochází k pružné a plastické deformaci v odřezávané vrstvě materiálu a současně k vnitřnímu tření v materiálu třísky a vnějšímu tření na stykových plochách břitu s třískou a plochou řezu. Kromě jevů deformačních se při tomto procesu prosazují i poměry silové. Určení silových poměrů u procesu frézování nám umožní přehled o mechanické interakci obráběcí soustavy N-O [4, 12].

Vysvětlením a poznáním těchto silových poměrů v procesu řezání nám umožní získat znalosti o mechanickém namáhání u konkrétní soustavy obrábění. Tyto znalosti nám mohou pomoci při řešení celé technologické soustavy a to jak z pohledu pevnosti, tak i z pohledu její tuhosti včetně dynamické stability řezného procesu. Dále je možné určit podklady pro zjištění příkonu stroje a tím i zajištění energetické účinnosti řezného procesu [12].

Analýzu silového zatížení můžeme provádět například u experimentů řezivosti nástrojů, sledování průběhu sil při použití povlakovaných nástrojů, při použití nových materiálů nebo například při sledování tribologického chování materiálů při různých nastaveních a mnoha dalších experimentech. Měření silového zatížení probíhá nejčastěji pomocí přímého měření v průběhu experimentu, tedy v průběhu procesu řezání. Jedná se o metodu náročnější a nákladnější, ale jsme schopni získat poměrně přesné hodnoty, které slouží pro lepší pochopení a optimalizaci procesu řezání [6].

Zvlášť významnou veličinou v procesu řezání je řezná síla mezi čelem nástroje a třískou F , kterou je potřeba chápat jako veličinu časově proměnnou. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor R , který řezná síla musí při procesu řezání neustále překonávat. Pak pro podmínku rovnováhy platí vztah (2.1) [4]:

$$F = -R \text{ [N]} \quad (2.1)$$

kde: F [N] - řezná síla,
 R [N] - řezný odpor.

Při studiu řezných sil a jejich poměrů je nutné jejich experimentální ověření. Pro tyto zkoušky byly navrženy speciální přístroje a metody. Měření sil při obrábění může být realizováno základními dvěma způsoby a to měření přímou metodou nebo měření metodou nepřímou [6, 13].

Přímá metoda zahrnuje upnutí nástroje nebo obrobku na snímací zařízení zvané dynamometr. Tento snímač při zatěžování reaguje na síly tím, že vytvoří elektrický signál v poměru k těmto silám a jsme tak schopni zaznamenat tyto síly do silových složek F_x , F_y a F_z , popřípadě momentů. Používají se v případech, kdy je nutné znát jejich velikosti a směry síly nebo krouticích momentů [14].

Nepřímá metoda vychází ze sledování reakcí stroje v průběhu obráběcího procesu, kdy můžeme měřit výkon elektromotoru stroje (na vřetenu stroje, posuvové zařízení) v souvislosti navýšením zatěžujících sil vzniklých např. opotřebením nástroje. Při měření se používá měřicí aparatura nebo ampérmetr. Při tomto způsobu měření je ze získaných hodnot vypočtena hodnota celkové síly, ale velkou nevýhodou je, že není možné určit směr jejího působení [4, 14].

Obecně síly (nejen řezné síly) mohou být měřeny z některých následujících základních metod [12]:

- vyvážení měřené síly známou gravitační silou, vyvozenou tělesem o určité hmotnosti buď přímo, nebo přes soustavu pák,
- měřením zrychlení tělesa známé hmotnosti, na které působí měřená síla,
- vyvážení měřené síly magnetickou silou, vyvozenou elektrickým proudem, který prochází cívkou umístěnou v magnetickém poli,
- převedení síly na tlak kapaliny (případně plynu) a následné měření tohoto tlaku,
- působení síly na pružné těleso a měření deformace tohoto tělesa,
- působením síly na speciální krystal a měření elektrického náboje, který vzniká při deformaci tohoto krystalu.

2.1 Přímé metody měření sil a momentů

Přímé měření složek řezných sil a případně jejich momentů je založena na měření deformací v obráběcí soustavě S-N-O během procesu řezání prostřednictvím dynamometrů. Dynamometr je měřicí zařízení, které musí zaručit nezávislost měřené veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Dále musí měřit sledovanou veličinu v určitém zvoleném rozsahu s maximální přesností, musí zaručit neměnnost naměřených hodnot s časem. Z těchto podmínek plynou některé základní parametry kladené na dynamometry [4]:

- dostatečná tuhost dynamometrů,
- dobrá citlivost dynamometrů,
- stálost naměřených údajů po celou dobu měření,
- co možná nejmenší setrvačnost dynamometrů (závisí přímo úměrně na hmotnosti soustavy),
- konstrukce dynamometrů musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly.

Základní rozdělení dynamometrů lze provést dle následujících hledisek, které jsou uvedené na obr. 7 [4, 12].



Obr. 7 Základní rozdělení dynamometrů [4].

2.1.1 Mechanické dynamometry

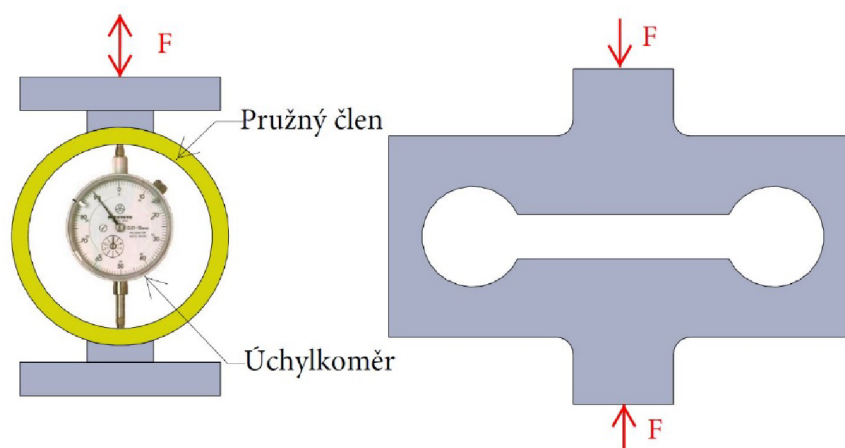
Působení síly se transformuje přímo nebo znásobeně mechanickým převodem na měřicí prvek. Jejich hlavním konstrukčním prvkem je pružný člen, který se při zatížení deformuje a promítnutá deformace může být viditelná na měřicím prvku, jako je například číselníkový úchylkoměr. Velikost síly je ukázkou deformace silových pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán nebo podle hloubky vtažení kuličky do materiálu o známé tvrdosti. Hlavním představitelem mechanických dynamometrů jsou dynamometry třmenové, které se využívají pro zatížení až do 10 000 N a dynamometry kruhové (viz obr. 8) nebo také prstencové jsou pro ještě vyšší zatížení [12].

Výhody [12]:

- Jednoduchá konstrukce (v případě snímání síly pouze v jednom směru, při snímání sil ve více směrech např. F_f , F_p a F_c se konstrukce stává složitější),
- jednoduchá obsluha,
- nízké pořizovací náklady,
- vysoká přesnost vzhledem k lineární závislosti síly na deformaci.

Nevýhody[4, 12]:

- Malý rozsah tuhosti (závislost na materiálu a rozměrech pružného členu),
- různé pružné členy pro různý rozsah zatěžujících sil,
- časově náročné měření a zejména vyhodnocení dosažených výsledků,
- závislost údajů na teplotě
- obtížná změna rozsahu měření.

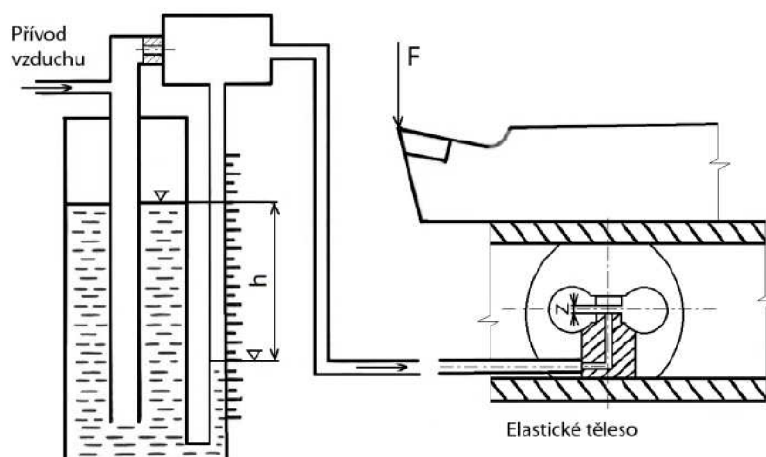


Obr. 8 Ukázka mechanického dynamometru [12].

2.1.2 Pneumatické dynamometry

Základ těchto zařízení je podobný jako u mechanických dynamometrů a to pružný člen, přičemž vyhodnocování výsledků je založeno na principu využívání dynamických vlastností vzduchu. Princip měření spočívá ve změně tlaku či průtoku vzduchu v závislosti na změně výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu. Výsledek pak může být tlak, který se zobrazí na tlakoměru. Hlavní předností je snadná obsluha a údržba, vysoká spolehlivost a citlivost. Na obr. 9 můžeme vidět příklad konstrukce

využívající deformace elastického členu, kdy reakcí síly dochází k deformaci a změně vzdálenosti mezi stěnami. Tato změna nám mění tlak plynu proudícího přes trysku, která je snímána trubicovým manometrem v podobě změny hladiny h kapaliny [4, 12].



Obr. 9 Schéma pneumatického dynamometru [12].

2.1.3 Hydraulické dynamometry

V současnosti málo využívaný způsob měření, vzhledem k problémům s utěsněním pracovní kapaliny a nízké přesnosti při malých zatěžujících silách (v desítkách N). Podstatou je přenos účinku měřené síly nebo momentu na píst nebo membránu hydraulického obvodu, jejichž pohyb vyvolává určitou změnu tlaku v kapalině. Tyto změny se vyhodnocují pomocí manometru, nebo jiným zařízením. Výhodou těchto dynamometrů je jednoduchá konstrukce a možnost měření více složek ve stejný okamžik. Nevýhodou je nízká citlivost a velká setrvačnost, proto se nepoužívají pro dynamická měření [12, 15]



Obr. 10 Ukázka hydraulického dynamometru [12].

2.1.4 Elektrické dynamometry

Jsou to nejpoužívanější a nejrozšířenější zařízení v technické praxi pro měření silového zatížení, protože disponují řadou výhod [4]:

- snadný přenos dálkového signálu s celou řadou možných úprav,
- možnost snímání signálu při rotujících a pohybujících se součástech,
- využití miniaturních měřicích elementů,
- možnost vhodné registrace zachycených signálů různých průběhů a frekvencí,
- snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu.

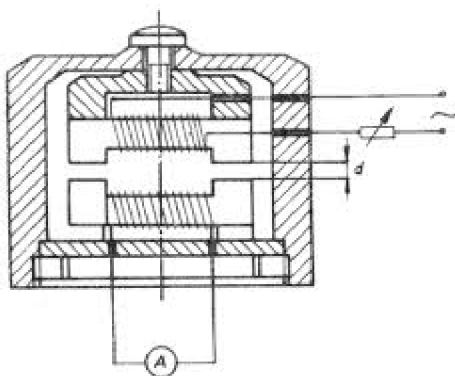
Podle druhu mechanicko-elektrické transformace je možné rozdělit dva základní systémy elektrických dynamometrů. To na systémy parametrické, které jsou založeny na principu změny jednoho z parametrů elektrického obvodu a to buď indukčnosti L [H], kapacity C [F] nebo odporu R [Ω]. Nebo na systémy generátorové, které pracují na vzniku napětí nebo proudu při deformaci měřeného elementu [4].

Elektrické dynamometry můžeme rozdělit na [4, 12]:

- indukční dynamometry,
- kapacitní dynamometry,
- tenzometrické dynamometry,
- piezoelektrické dynamometry.

Indukční dynamometry

Principem indukčního snímače je, že jeho pohyblivá část je spojena s pružným členem dynamometru a snímá jeho deformaci, kterou transformuje na elektrický signál. Převážně se používají snímače, které využívají malé vzduchové mezery, kdy působením zatěžující síly se mění šířka této mezery. Dochází tak ke změně impedance magnetického obvodu a tím se mění i indukčnost cívky. Změna indukčního odporu způsobí změnu indukčnosti cívky (viz obr. 11). Na známých cejchovacích křivkách pak lze na ručičce měřícího zařízení zjistit hodnotu působící síly přímo v Newtonech [4, 12].



Obr. 11 Jednoduché schéma indukčního snímače [5].

Kapacitní dynamometry

Kapacitní snímače disponují velkou citlivostí a zejména pak malou hmotností. Reagují velmi citlivě na okolní vlivy a jsou velmi náročné na měřící techniku. V praxi se využívají velmi zřídka [4].

Podle principu měření zatěžující síly se dělí na [12]:

- mezerové,
- diferenční mezerové,

- překrývající,
- diferenční překrývající,
- souosé s válcovými elektrodami.

Tenzometrické dynamometry

Nejpoužívanějším typem snímačů jsou odporové tenzometry, které jsou určené pro měření sil případně prodloužení. Při měření se využívá změny elektrického odporu vodiče v závislosti na jeho mechanickém namáhání, kdy odporový tenzometr se deformuje spolu s deformačním elementem, protože je s tímto elementem pevně spojen. Relativní změna odporu je u kovových odporových tenzometrů přímo úměrná deformaci, která vzniká na deformačním elementu při působení síly při řezání nebo točivého (krouťícího) momentu. Při namáhání vodiče se mění délka a průřez vodiče a s tím je spojena změna měrného odporu materiálu [4, 12, 16].

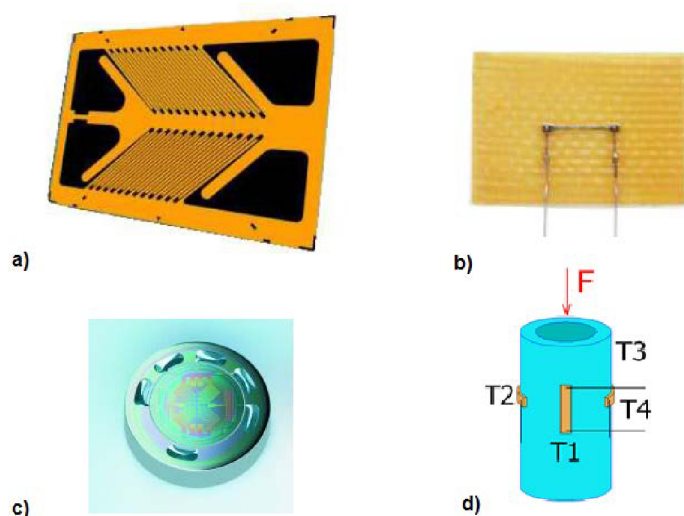
U kovových tenzometrů se nejčastěji používá jako odporový materiál konstantan (slitina Cu-Ni) s velkým měrným odporem a hodnotou součinitele citlivosti $k = 2$. Měřicí mřížka u drátových tenzometrů je tvořena odporovými dráty o průměru 0,01 až 0,05 mm. Tato mřížka se lepí na tenkou izolační podložku z papíru nebo pryskyřice. Drátkové odporové tenzometry mají malý rozptyl hodnoty odporu, součinitele deformační citlivosti i teplotních součinitelů [12].

Dalším často používaným typem tenzometrů jsou foliové tenzometry, kdy měřicí mřížka je vyrobena z velmi tenké folie o tloušťce kolem 0,013 mm. Požadovaný tvar mřížky se dosahuje fotochemickou cestou. Jejich velkou výhodou je necitlivost proti stranovému namáhání, poměrně velké přípustné zatížení proudové s ohledem na velké ochlazovací plochy a možnosti vytvoření libovolného tvaru tenzometru. Vyznačují se lepším spojením měřicí mřížky se základní folií i lepšími podmínkami pro převod deformace na mřížku. Se srovnáním s drátkovými jsou přesnější a stabilnější [4].

Novějším typem snímače síly jsou takzvané napařované tenzometry, kdy se postupně napařují jednotlivé vrstvy přímo na měřené místo deformačního elementu. Tímto způsobem lze vytvořit snímače velmi malých rozměrů a tloušťky. Na předem upravené místo se nanáší postupně nejdříve vrstva izolační, dále vrstva pro spojovací a napájecí sekci a naposledy v požadovaném uspořádání vrstva odporová. Na konec se snímač pokryje ochrannou vrstvou [4, 12].

Dále se používají polovodičové tenzometry, které pro měření sil využívají piezorezistentních vlastností některých druhů polovodičových materiálů (např. křemík, germanium) spojené s různými příměsemi. Odporovým elementem je výřez ve tvaru tenkého pásku z monokrystalu polovodiče, který při deformaci mění svůj odpor. Výhodou těchto snímačů je vysoká hodnota součinitele deformační citlivosti. Jsou to velice drahá zařízení, protože jejich výroba je složitější a tedy i finančně náročnější [4].

Na obr. 12 můžeme vidět ukázkou konkrétních tenzometrických snímačů, včetně praktické ukázky měření pomocí těchto zařízení.



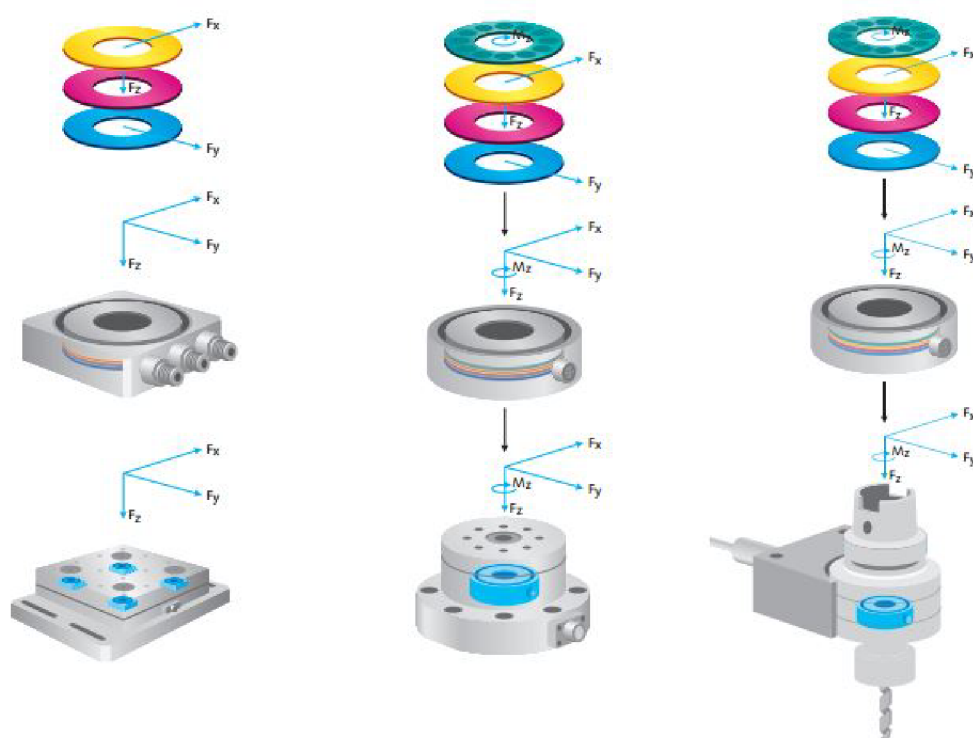
Obr. 12 Druhy tenzometrických snímačů [12, 16, 17]. a) foliový, b) polovodičový, c) napařovací, d) ukázka měření síly pomocí tenzometrů.

Piezoelektrické dynamometry

Piezoelektrické dynamometry se využívají pro zaznamenání deformace piezoelektrického jevu, který využívá schopnosti krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Intenzita elektrického náboje na elektrodách je úměrná velikosti zatěžující síly. Mezi nejznámější piezoelektrické materiály patří hlavně monokrystalický křemen, dále materiály na bázi titaničitanu barnatého anebo Seignettovy soli. Základním prvkem piezoelektrického snímače pro tyto dynamometry je měřicí destička vhodně vyříznutá z příslušného materiálu, pracující na piezoelektrickém principu. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti zatěžující síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje až do nulového zatížení [4].

Piezoelektrické dynamometry patří mezi nejčastěji používané typy dynamometrů pro svoje značné výhody. Umožňují velký rozsah měření. Dokáží měřit malé síly i s velkými dynamometry. Dalším hlavní výhodou je jejich pevná konstrukce (téměř absolutní tuhost). Mezi výhody patří i zaznamenání sil v různých směrech, malé rozměry a hmotnost při vysokých hodnotách zatěžujících sil a momentů, vysoká reprodukovatelnost měření, snadná obsluha, lineární závislost vzniklého napětí na působící síle a možnost zobrazení výsledků přes počítač [4, 26].

V současnosti jsou nejznámější piezoelektrické dynamometry od společnosti Kistler, speciálně navržené pro praktické měření při experimentech. Na obr. 13 můžeme vidět různé typy konstrukce piezometrických dynamometrů od této společnosti pro různé využití měření sil a momentů, jako například při frézování nebo vrtání a dalších aplikacích.



Obr. 13 Ukázka typů piezometrických dynamometrů pro měření sil a momentů při různých aplikacích [26].

2.2 Nepřímé metody měření sil a momentů

Metody vycházející hlavně z výkonů elektromotoru obráběcího stroje. Ze známého vztahu pro užitečný výkon $P_{už}$ (viz vztah 2.2) při obrábění plyne, že touto metodou z výkonu hnací jednotky lze stanovit jen tangenciální složku řezné síly. Hlavně u CNC strojů, vybavených vysoce citlivými pohonnými jednotkami (vřetenem stroje, posuvového zařízení) mohou být nepřímé metody využity k určení aktivních složek těchto sil [4, 15].

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad (2.2)$$

kde: $P_{už}$ [W] - užitečný výkon stroje,
 F_c [N] - tangenciální (řezná složka síly obrábění).

Zjištění tangenciální složky síly nepřímou metodou je poměrně jednoduché a nevyžaduje žádné speciální měřicí zařízení a je možné ji aplikovat u všech způsobů obrábění. Avšak nevýhodou této metody je omezená přesnost měření zapříčiněna rozdílnou účinností stroje při zátěži a při chodu naprázdno a zanedbání vlivu ostatních složek síly při obrábění na výkon elektromotoru obráběcího stroje. Proto se v praxi používá jen na monitorovací účely [4].

Pro stanovení tangenciální složky řezné síly můžeme využít hodnoty řezného (kroutícího) momentu M_k , kdy se tento postup nejvíce uplatňuje při vrtání. Také tento princip stanovení tangenciální složky síly obrábění vychází z měření celkového výkonu pomocí přesného universálního zapisovacího zařízení. Při dokončení měření se nástroj vysune ze

záběru a při stejných otáčkách se vřeteno obráběcího stroje zatěžuje vhodnou mechanickou brzdou tak, až se dosáhne stejného údaje na registračním přístroji jako při obrábění. Potom z podmínky rovnováhy točivého momentu od tangenciální síly řezání a točivého momentu vyvolaného mechanickou brzdou plyne vztah [4]:

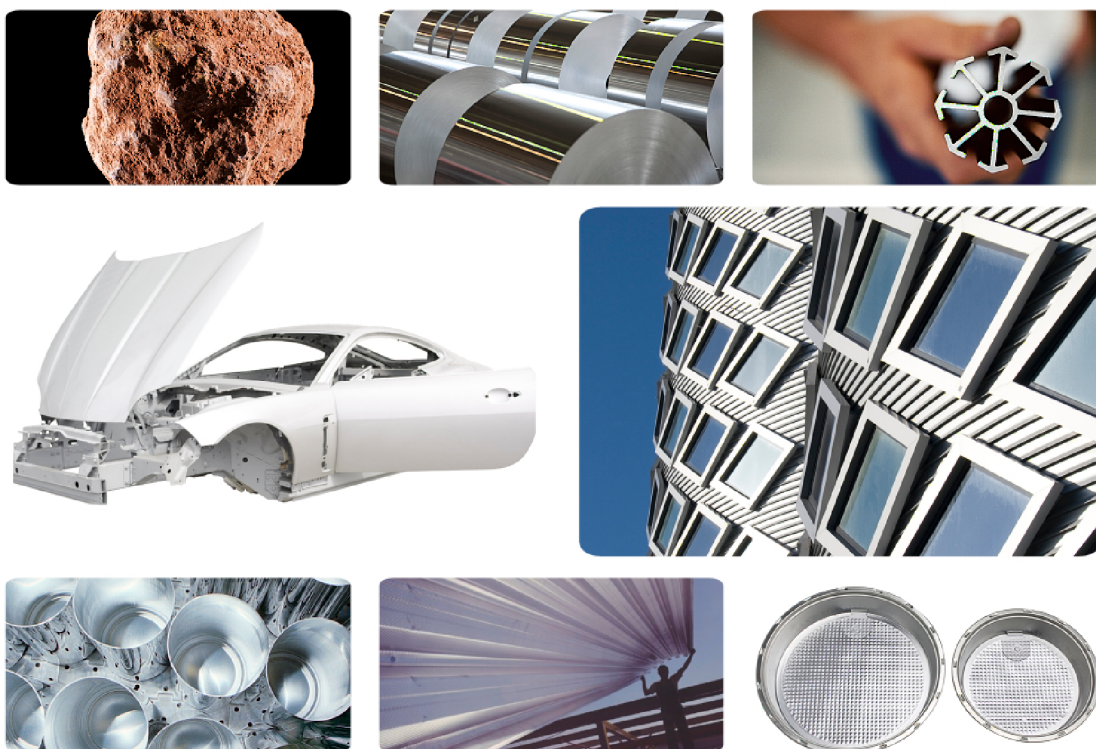
$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (2.3)$$

kde: M_{kb} [N.m] - užitečný výkon stroje,
 D [mm] - průměr řezného nástroje,
 M_k [N.m] - hodnota řezného moment od tangenciální síly.

Údaje z měření při použití nepřímé metody stanovení tangenciální složky síly obrábění z krouticího momentu nejsou ovlivňovány rozdílnou účinností obráběcího stroje při zatížení a chodu naprázdno, jsou nicméně ovlivňovány proměnlivostí součinitele tření na brzdě. Při experimentálním studiu dynamiky řezného procesu se nevyužívá zas tak často [4].

3 HLINÍK A JEHO SLITINY

Hliník je třetí nejrozšířenější prvek po kyslíku a křemíku a mezi kovy v zemské kůře se řadí mezi nejrozšířenější vůbec. Hliník najdeme v přírodě až v 250 různých minerálech a mezi hlavní patří korund (Al_2O_3), diaspor ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), boehmit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), spinel ($\text{AlO}_3 \cdot \text{MgO}$), gibbsit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), kyanit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_3$), andaluzit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_3$), silamanit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_3$). Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou na výrobu hliníku je bauxit. Ze šesti až čtyř tun bauxitu se dá získat jedna tuna čistého hliníku. Vyznačuje se výbornou tepelnou a elektrickou vodivostí, malou hmotností, výbornou kujností, tažností, odolností vůči korozi, vysokou životností a je stoprocentně recyklovatelný bez ztráty kvality. Z hlediska vlastností je hliník vhodným konstrukčním a obalovým materiálem, je zejména rozšířen ve formě hliníkových slitin v elektrotechnice, v leteckém a automobilovém průmyslu, ve stavebnictví a dalších odvětvích. Výroba hliníkových slitin ve světě, tak i v ČR a v Slovenské republice zaznamenává velký růst, a to jak do objemu výroby, tak i k nabízenému množství sortimentu a už není prakticky odvětví v lidské činnosti, kde by se produkty z Al slitin nepožívaly[18, 19, 20]. Na obr. 14 lze vidět ukázky použití hliníku a jeho slitin.

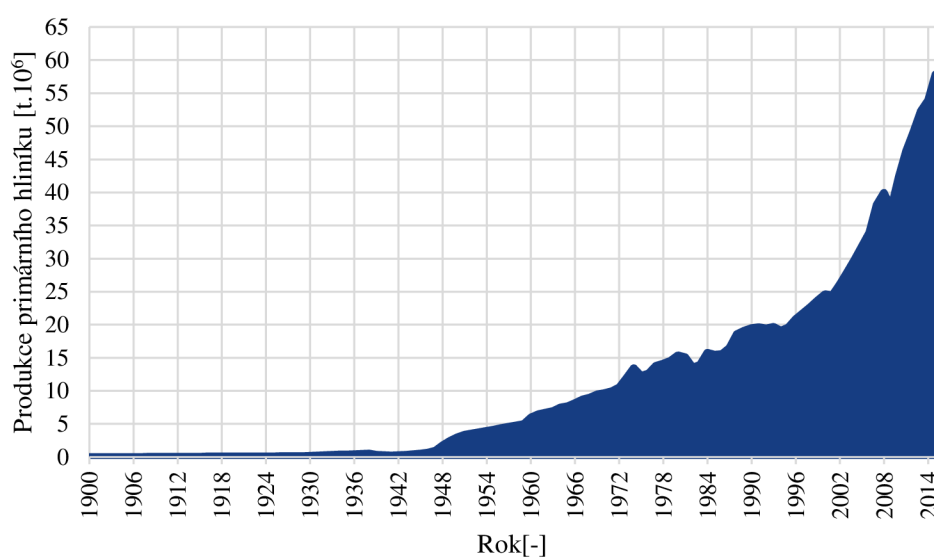


Obr. 14 Použití hliníku a hliníkových slitin v praxi [21].

Počátky výroby hliníku lze přiřadit k roku 1825, kdy byl prvně izolován jako samostatný kov, ovšem průmyslová výroba hliníku začala až v roce 1886, kdy nezávisle na sobě Paul Héroult ve Francii a Charles Martin Hall ve Spojených státech amerických zdokonalili výrobní proces pro výrobu hliníku, který probíhal za pomoci elektrolýzy. Ze začátku výroba hliníku byla velice nízká a to z důvodu jeho vysoké ceny. Uplatnění tehdy nalézal především v klenotnictví. Zajímavými léty pro hliník byly roky 1938 až 1946, kdy nastal skoro exponenciální nárůst výroby. Nárůst výroby souvisel zejména s masivním

rozvojem letecké a automobilové dopravy během 2. světové války. Následný pokles produkce byl způsoben špatným vlivem ekonomického stavu států devastovanými válkou, jako bylo Německo, Francie nebo i Norsko. V posledních letech se tento trend nárůstu produkce hliníku nezastavil (viz obr. 8), ale naopak roste a to díky postupnému zvyšování produkce sekundárního hliníku získaného recyklací. V budoucnu se počítá s ještě větším navyšováním primárního a sekundárního hliníku [19, 22].

Celosvětová produkce primárního hliníku 1900-2015



Obr. 15 Celosvětová produkce primárního Al v letech 1900 – 2015 [19, 23].

Prognózy dokonce ukazují nárůst produkce do roku 2025 o 400 % až 600 %. Tato skutečnost je ovlivněna určitými faktory, které především ovlivňují růst jeho výroby. Některé faktory ovlivňující celkovou světovou výrobu hliníku v následujícím období [19]:

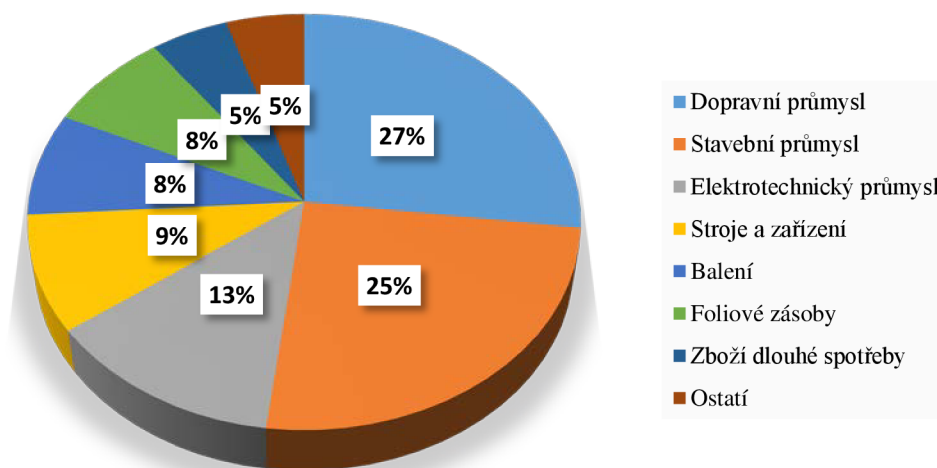
- vývoj poptávky po hliníkových materiálech v automobilovém a leteckém průmyslu,
- nové oblasti použití hliníkových materiálů (kosmonautika),
- celosvětově rostoucí hospodářský vývoj,
- zvyšování výroby hliníkových kompozitů,
- vývoj ceny elektrické energie,
- rozvoj výroby hliníku recyklací.

3.1 Hlavní oblastí využití hliníku a jeho slitin

Hliník nás v současnosti obklopuje doslova na každém rohu, dá se říct, že nás provází v každodenním životě při všem, co děláme od budíku, přes zubní pasty, spreje, fólie u jogurtů, až po cestu do práce autem nebo autobusem. Používá se i při stavbách budov. Dnešní výrobky z hliníku nacházejí uplatnění v široké škále aplikací, kdy musí splňovat současné náročné požadavky na funkčnost či estetiku. Hliníkové materiály se čím dál tím více používají na náhradu jiných materiálů. Proto se zaměříme jen na odvětví s největším objemem spotřeby hliníku a hliníkových slitin, kdy největší nárůst, co do objemu, nastal v dopravním sektoru. Nejdůležitější oblastí použití hliníku (viz obr. 16) v současnosti jsou [18, 19]:

- doprava,
- strojírenství,
- hutnictví,
- stavebnictví.

Celosvětová spotřeba hliníku v různých sektorech v roce 2014



Obr. 16 Celosvětová spotřeba hliníku v různých sektorech v roce 2014 [24].

3.2 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Rychlý růst výroby a spotřeby hliníku a jeho slitin ve světě je způsoben především tím, že mají jeho slitiny specifické vlastnosti, které spojuje výborná kombinace fyzikálních (např. tepelná vodivost), mechanických, chemických (např. odolnost vůči korozi) a technologických vlastností (např. dobrá schopnost k tváření za tepla i za studena) a jak již bylo zmíněno dříve, zvyšují atraktivnost použití hliníku v široké škále různých aplikací. Hliník vyšší čistoty než 99,999 % se využívá velice zřídka, jelikož v žíhaném stavu dosahuje jeho mez pevnosti pouze $R_m = 40$ až 50 Mpa a naopak tažnost $A = 70$ % až 90 %. Zlepšením původních mechanických, fyzikálních, technologických a chemických vlastností hliníku můžeme dosáhnout vhodným chemickým složením slitin s kombinací tváření a tepelného zpracování [18, 19].

Přehled hlavních vlastností hliníku:

- nízká hmotnost (příznivá hustota),
- dobré mechanické vlastnosti za nízkých teplot,
- dobrá tepelná vodivost,
- korozní odolnost,
- dobrá svařitelnost.

3.2.1 Fyzikální vlastnosti hliníku

Hliník je lehký nepolymorfni, nemagnetický kov a jeho slitiny mají kubickou plošně centrovanou mřížku K12, proto mají dobré plastické vlastnosti za tepla tak i za studena.

Roviny skluzu jsou $\{111\}_\alpha$ a skluzové směry jsou $\langle 110 \rangle_\alpha$. Některé další vybrané fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1. [19].

Tab. 1 Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [19].

VLASTNOSTI	HODNOTY
Atomové číslo	13
Mřížka	K12
Parametr mřížky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Hustota	$2,6989 \text{ g.cm}^{-3}$ (při 20 °C)
Teplota tavení	660,4 °C
Teplota varu	2 494 °C
Tepelná vodivost	247 W.m^{-1} (při 25 °C)
Elektrická vodivost	62 % IACS (Al 99,8) 65 - 66 % IACS (Al 99,999+)
Atomová hmotnost	26,98154
Objemová změna při krystalizaci	6,50 %
Počet přírodních izotopů	1
Atomový poloměr	143 pm

13	26.982
2520	1.5
660.25	
Al	
[Ne]3s ² 3p	
2.699	3

Obr. 17 Hliník
v periodické tabulce prvků
[25].

3.2.2 Chemické složení slitin hliníku

Slitiny hliníku obsahují [26]:

- *základní prvek*, který nám udává druh slitiny a v hliníkových slitinách je to Al,
- *hlavní přísadové prvky* určují výsledné vlastnosti těchto slitin. Spolu se základním prvkem rozhodují o typu slitiny a jejich obsah bývá po základním prvku druhý nejvyšší. Hlavními přísadovými prvky u těchto slitin jsou převážně křemík, měď a hořčík, ale můžeme se setkat i se zinkem nebo manganem,
- *vedlejší přísadové prvky* jsou takzvané chemické elementy, které vhodně ovlivňují konkrétní vlastnosti. Obsah těchto prvků ve slitinách bývá menší než u hlavních přísadových prvků. Ve slitinách se jich může vyskytovat hned několik najednou. Prvek, který nejvíce ovlivňuje danou skupinu, rozděluje tyto slitiny do jednotlivých kategorií,
- *doprovodné prvky* nejsou záměrně přidávány do slitiny, jelikož při vymezení z určité hranice koncentrace způsobí často zhoršení mechanických, technologických nebo chemických vlastností slitin a považují se za nečistoty. Obsah doprovodných prvků bývá omezen jejich maximálním přípustným obsahem ve slitině. Do slitiny se dostávají především z vsázkových surovin případně z rozpadu vyzdívky v tavicím zařízení. Velký problém u značné skupiny doprovodných prvků je způsob odstranění ze slitiny nebo snížení na přípustnou hodnotu jejich koncentrace.

3.2.3 Mechanické vlastnosti

Druh a vlastnosti základní struktury určuje chování slitiny. Jemnozrnná struktura umožňuje zlepšit mechanické i technologické vlastnosti. Z mechanických vlastností se porovnává zejména pevnost v tahu za normální teploty, mez kluzu, tažnost a tvrdost. U některých slitin jsou důležité vlastnosti za zvýšené nebo dokonce snížené teploty, únavové vlastnosti, rozměrová stálost či index kvality, který je dán z meze pevnosti v tahu a tažnosti [19].

Základní mechanické vlastnosti charakterizující materiál [27]:

- *mez pevnosti v tahu* u hliníkových slitin v litém stavu se pohybuje v rozmezí 150 až 250 MPa. Vytvrzováním lze mez pevnosti výrazně zvýšit,
- *tažnost* A_{80} [%] se pohybuje v rozmezí 1 - 4 % u obvyklých slitin hliníku, přičemž výrazné zvýšení lze dosáhnout modifikací eutektika, které způsobí nárůst tažnosti až o 200 %,
- *tvrdost* v litém stavu slitiny typu Al-Si mají tvrdost podle Brinella v rozmezí 60 až 80 HB. Možné je i zvýšení tvrdosti až na 100 HB, které probíhá vytvrzením. U slitin typu Al-Mg se tvrdost pohybuje kolem 50 HB.

3.3 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

Vlastnosti hliníku a jeho slitin se dají za pomoci vhodného tepelného zpracování výrazně ovlivnit. Přičemž můžeme podle druhu tepelného zpracování dělit hliník a jeho slitiny do dvou základních skupin a to na nevytvrditelné (Al, AlMg, AlMn) a vytvrditelné slitiny (AlCu, AlMgSi, AlMgZn) [28].

3.3.1 Nevytvrditelné slitiny

Jestliže vycházíme z (vyztuženého) stavu tváření za studena. Jsou pro tuto skupinu nejobvyklejší zpracování, jako je zotavení nebo rekrystalizační žihání [28].

Zotavení

Vycházíme-li z materiálu zpracovaného a vytvrzeného za studena tak u něho probíhá změna tvrdosti beze změn struktury. Dochází i k úbytku pevnosti v tahu a hranice průtažnosti 0,2 % se výrazně zvětšuje. Po zotavení je úbytek vytvrzení podstatný pro výrobu prefabrikátů s průměrnou tvrdostí. Zotavením silně vytvrzených prefabrikátů je možné dosáhnout určité míry pevnosti v tahu, které lze dosáhnout i vhodným tvarováním za studena. Při zotavení jsme schopni dosáhnout lepší tvářitelnosti, způsobenou nižší mezí průtažnosti a vyšší pružnosti při zachování stejné pevnosti v tahu oproti vytvrzení za studena. Proto z těchto důvodů je lepší volit při tvářecích procesech jakostem s tepelnou úpravou zotavení (například pro ohýbání). Zotavení je označováno písmenem H a doprovázející číslicí 2 [28].

Rekrystalizační žihání

Provádí se při vyšších teplotách než předchozí zpracování. Při rekrystalizačním žihání dochází k úplné rekrystalizaci, což způsobuje proměnu struktury, která způsobí, že předešlé formování úplně vyruší. Tím docílíme, že pevnost v tahu, mez průtažnosti a tvrdost výrazně klesne a pružnost se naopak zvýší [28].

3.3.2 Vytvrditelné slitiny

Nejběžnějším způsobem tepelného zpracování pro vytvrditelné slitiny je precipitační vytvrzování nebo žíhání naměkko. Za normálních podmínek se tato zpracování provádí výrobcem polotovarů, ale pokud se při dokončování výrobků vychází ze stavu měkkého žíhání, je nutné provést vytvrzující ošetření s ohledem na použití výrobků [28].

Precipitační žíhání

Jedná se o žíhání, které způsobuje změny v materiálu, které souvisí s rozdělením konkrétních částic. Pro vytvrzení musí materiál splňovat určité podmínky. Například při zvýšení teploty by mělo dojít k zvýšené rozpustitelnosti legovacích prvků přidaných do základní mřížky. Celkové tepelné zpracování se skládá z rozpouštěcího žíhání a následným vytvrzením [28].

Rozpouštěcí žíhání

Rozpouštěcí žíhání se v mnoha případech u velké části slitin provádí při teplotě 500 °C. Při tomto tepelném zpracování dochází, k tomu že základní částice se rozpouštějí v základní mřížce a tím dojde k vytvoření homogenní struktury. Rychlým ochlazením homogenní struktury (převážně ve vodě) se jakoby struktura z vysoké teploty zmrazí. Dojde tak k vytvoření přesyceného stavu. Takto se tvrdost nijak výrazně nezmění, ale materiál dostane dobré výchozí podmínky pro vytvrzení [28].

Vytvrzení

Rozpouštěcím žíháním vznikne nestabilní stav, který se chce vrátit do stabilního stavu. Vytvrzení může probíhat pro většinu vytvrditelných slitin při pokojové teplotě (vytvrzení za studena) nebo při zvýšené teplotě (vytvrzení za tepla, většinou do 200 °C). Toto zpracování se značí písmenem T, následovaným jednou nebo více číslicemi, které vyjadřují druh tepelného zpracování a průběh [28].

Žíhání na měkko

Slouží pro dosažení co nejměkčího stavu u vytvrzeného materiálu. Většinou se používá tam, kde chceme umožnit a zjednodušit formovací procesy. U vytvrzeného materiálu je cílem získat stabilní stav, který by byl i při pokojové teplotě. To znamená, že se zvýšení síly, dosažené při vytvrzení, zcela vyruší. Nutné je dávat pozor, aby rychlost ochlazování z teploty žíhání, byla dostatečně pomalá. Takto zůstanou prvky v lázni a umožní tak opakovanému vytvrzení [28].

3.4 Označování slitin hliníku podle ČSN EN

Označování hliníku a jeho slitin pro tváření se řídí podle ČSN EN 573-1 až 3. Tyto normy pro výrobky tvářené a ingoty určené ke tváření se označují písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Číselné označení se doplňuje i chemickým označením jako například EN AW-6060 (AlMgSi0,5) [19].

Jednotlivé části označení dle ČSN EN [19]:

- předpona EN,
- písmeno A určuje hliník,
- písmeno W určuje tvářené výrobky,
- čtyři číslice označují chemické složení.

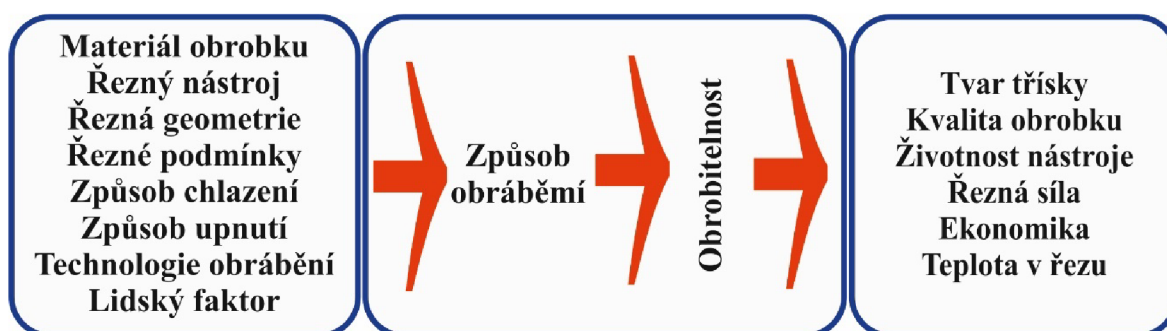
V tabulce č. 2 je uvedeno rozdělení pomocí čtyřmístného číselného označení, kdy první číslo udává skupinu slitin hliníku podle hlavních přísadových prvků [19]:

Tab. 2. Rozdělení hliníkových slitin pro tváření dle ČSN EN 573-1 [19, 28]

Označení skupiny	Hlavní přísadový (legující) prvek
1000	Hliník o čistotě min. 99,00 %
2000	Měď (slitina AlCu)
3000	Mangan (slitina AlMn)
4000	Křemík (slitina AlSi)
5000	Hořčík (slitina AlMg)
6000	Hořčík a křemík (slitina AlMgSi)
7000	Zinek (slitina AlZn)
8000	Jiné prvky (slitina Al s různými prvky)

3.5 Obrobitelnost slitin hliníku

Obrobitelnost obecně není platnou definovanou standardizovanou vlastností a to z důvodů různorodosti operací obrábění, stálého vývoje a zlepšování rezných nástrojů. Všeobecně můžeme říct, že obrobitelnost vyjadřuje řadu aktuálních vlastností a parametrů obráběného materiálu, jako jsou požadavky na přesnost rozměrů obrobku, životnost nástroje, kvalitu povrchu a požadovaný tvar třísky pro daný způsob obrábění. Vlastnosti a parametry, které charakterizují obrobitelnost jsou znázorněny na obr. 18. Obrobitelnost nezávisí pouze na fyzikálních a mechanických vlastnostech či stavu obráběného materiálu, jakou jsou například tvrdost, houževnatost a struktura. Dále se nedá popsat konkrétní hodnotou, spíše se jedná o technologický pojem, který zahrnuje vedle fyzikálních, mechanických a chemických vlastností obráběného materiálu i stav techniky používané při procesu obrábění. V širším smyslu je obrobitelnost funkční veličinou vztahu N-O, pro které jsou důležitá následující kritéria, jako trvanlivost břitů, utváření třísky, stav povrchové vrstvy, výkon obrábění, rezná síla a sklon k vytváření nárůstků [19].



Obr. 18 Vybrané parametry charakterizující obrobitelnost [19].

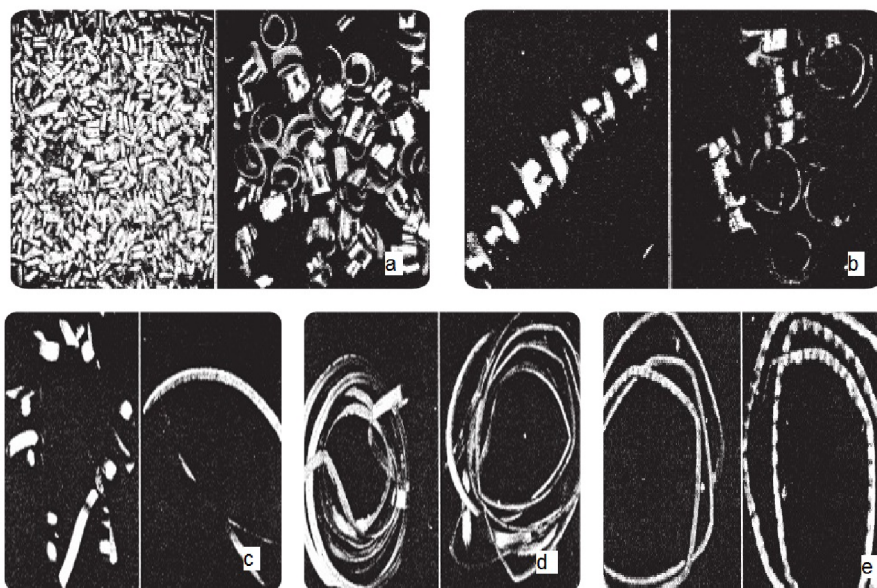
Ve srovnání s ostatními kovovými konstrukčními materiály se hliníkové slitiny řadí mezi lépe obrobitelné. Například v porovnání s ocelí stejné pevnosti se rezná síla jeví u hliníkových slitin mnohem menší. Naopak čistý hliník vykazuje horší obrobitelnost, vzhledem ke své tvárnosti a adheznímu ulpívání na rezném nástroji, které může být částečně vysvětleno jeho jednofázovou strukturou. Kdežto slitiny hliníku mají ovlivněnou strukturu vlivem precipitátů, konstitučních fází, měkkých částic a v neposlední řadě i stupně deformačního zpevnění, který na obrobitelnost hliníkových slitin má velmi pozitivní účinek.

Pracovní teploty jsou převážně nízké a lze použít vysoké řezné rychlosti. K obrábění těchto slitin se většinou používá ostrý pozitivní břit a speciálně dimenzované nástroje [9, 19].

Jedním z hlavních kritérií při hodnocení obrobitelnosti hliníku a jeho slitin může být tvar vytvořené třísky. Pro posouzení obrobitelnosti na základě tvaru třísky se využívá vizuálního hodnocení, kdy jsou třísky rozříděny podle jejich tvaru do konkrétních pěti skupin s označením A až E [19].

Skupiny dle tvaru třísek [19]:

- A - dobře obrobitelná, tříska ve formě drobných šupin, výborný povrch součástky,
- B - tříska ve formě drobných svitků nebo dobře lámavých šupin, dobrý až výborný povrch součástky,
- C - spojitá tříska, dobrý povrch součásti,
- D - spojitá tříska, uspokojivý povrch součásti,
- E - nevyhovující až špatná tříska, nutnost změnit podmínky obrábění pro dosažení lepší třísky a lepšího povrchu součásti.



Obr. 19 Ukázka typických třísek rozdělené do skupin dle tvaru [19].

Zhodnocení obrobitelnosti

Obrábění hliníku a jeho slitin, není obvykle obtížný úkol. Hlavní problémy se vyskytují pouze u slitin s vysokým obsahem Si (nad 7,5 % hm.), nebo tvrdých částic SiC či částic Al_2O_3 . Za normálních okolností jsou řezné síly poměrně nízké, stejně jako řezné teploty nebo vygenerovaná energie, což nabízí vysokou produktivitu. Největší výzvou pro dosažení dobré kontroly tvorby třísky může být závislost rozměrové tolerance, kvality dokončeného povrchu s minimální deformací. Tyto problémy jsou obvykle důsledkem vysoké tažnosti obráběného materiálu a jeho tendenci ulpívat na povrchu řezného nástroje. Zejména pak u vrtání je tendence zůstávání materiálu na vrtácích, například z rychlořezné oceli (HSS) a slinutých karbidů (SK) je velký problém, který způsobuje ucpávání vrtaných děr, čímž se zvyšuje točivý moment a to může vést k selhání nástroje. Na vrtáky, které mají povrchovou úpravu technologií PCD (speciální geometrie bránící delaminaci a výskytu

neodřezaných vláken) působí mnohem méně. Správná volba řezných nástrojů, řezných podmínek, mazání a chlazení je zásadní pro spolehlivé a hladké obrábění. Mezi doporučené nástroje jsou nástroje z HSS N-tého stupně, ze SK a z umělého diamantu. Poslední zmínění představuje nejnižší koeficient tření proti hliníku, proto má i nejmenší problémy s ulpíváním materiálu na břitu nástroje. Doporučené geometrie by měli být vysoce pozitivní, v závislosti na slitině a procesu obrábění. Při opotřebení nastává normální opotřebení hřbetu, ale může také docházet k tvorbě kráterů nebo vrubovému opotřebení u některých slitin, které obsahují tvrdé částice. Převládající mechanismus opotřebení je adheze a abraze v důsledku přítomnosti tvrdých částic v hliníkové matici nebo pocházející ze samotného nástroje. Použití řezné kapaliny ve formě povodňového chlazení nebo MQL (Minimum Quantity Lubrication), podporuje proces opracování materiálu [29].

3.6 Rozdělení slitin hliníku podle obrobitelnosti

Slitiny hliníku z hlediska jejich obrobitelnosti se dělí do tří významných skupin [19]:

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

3.6.1 Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny jako hlavní legující prvky obsahují měď (Cu), hořčík (Mg) a zinek (Zn). Zaručují dobrou obrobitelnost a v průběhu obrábění nezpůsobují žádné podstatné problémy. Pro představu je jejich obrobitelnost přibližně srovnatelná s tvářenými slitinami. Při obrábění může občas docházet k nalepování materiálu na řeznou hranu nástroje a vzniku nárůstku na čele nástroje. Opotřebení nástrojů je také ovlivněno podmínkami krystalizace slévárenských slitin hliníku. Homogenní jemnozrná lící struktura způsobuje menší opotřebení, kdežto výskyt nespojitostí, dutin, oxidačních vrstev, nekovových vměstků vede převážně k většímu opotřebení při obrábění. Slitiny, které obsahují jako hlavní legující prvek křemík (Si), by se měly obrábět při menších rychlostech a posuvech. Obsahem Si ve slitinách se zvyšuje opotřebení nástrojů a vzhledem k velikosti opotřebení nástrojů lze slitiny Si rozdělit na: podeutektické, eutektické a nadeutektické, kdy slitiny nadeutektické obsahují hrubé částice Si, které způsobují velmi rapidní opotřebení nástrojů. Výjimkou jsou slitiny eutektické s určitým obsahem Si kolem 12 %, které se vykazují měkkou maticí, do které se tvrdé částice Si při obrábění snadno zatlačí a nezpůsobují tak rapidní opotřebení nástrojů. Proto je u těchto slitin nepříznivé tepelné zpracování, které způsobuje zpevnění matrice. Takže při obrábění těchto slitin legovaných Si se tvoří převážně krátká dobře lámavá tříška. Avšak výjimkou jsou eutektické slitiny, které tvoří dlouhé svinuté třísky a mohou tak tvořit při opotřebených nástrojích dlouhé smotané třísky, které se špatně odstraňují od nástrojů nebo z obrobku [19].

3.6.2 Tvářené slitiny hliníku

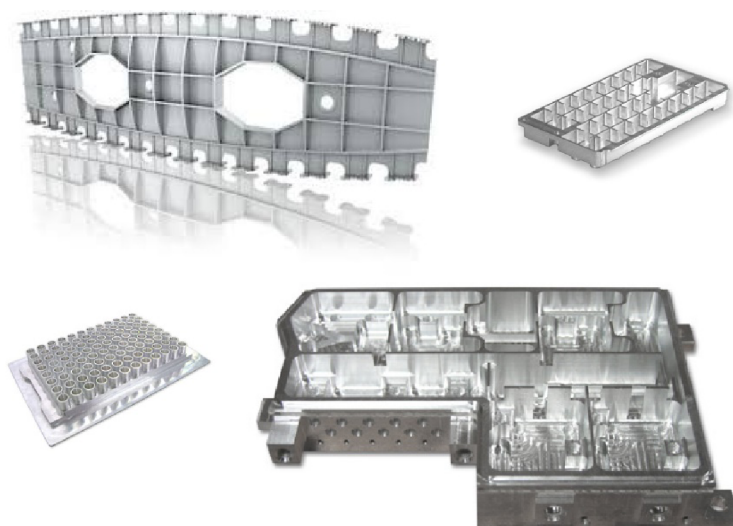
Velká část tvářených slitin je charakterizována výbornou obrobitelností. Pro získání optimálních podmínek obrábění je nezbytně nutné věnovat pozornost parametrům obrábění a geometrii řezných nástrojů. Spojitá tříška, kterou je nezbytné v průběhu obrábění odstraňovat, se vytváří u takzvaných nevytvrzovatelných slitin. Jejich obrobitelnost lze však zlepšit tvářením za studena. Potom je jejich obrobitelnost a kvalita povrchu velmi dobrá. Ve vytvrzeném stavu se tříška stává dlouhou a stočenou a v některých případech se i snadno láme. Proto v nevytvřeném stavu se tyto slitiny hůře obrábějí [19].

3.6.3 Automatové slitiny hliníku

Prvky, kterými se tyto slitiny legují, jsou charakterizovány zejména nízkou teplotou tání a jsou to olovo (Pb), bismut (Bi), antimon (Sb) a kadmium (Cd). Tyto prvky zlepšují podmínky pro uskutečnění drobné lámavé třísky při obrábění, tento fakt je způsoben tím, že se nerozpouštějí v základní hliníkové matici a tvoří tak měkké částice. Při dobrém pravidelném rozdělení těchto částic dojde při zvýšených teplotách na hraně řezného nástroje k jejich částečnému natavení, a tím dochází ke tvorbě drobných třísek. Při zvýšených řezných rychlostech kolem $1000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ dosahuje opotřebení nástrojů relativně nízkých hodnot. Velikost řezných sil a kvalita povrchu je přibližně stejná jako u tvářených vytvrzovaných slitin. V současnosti se jako automatové slitiny hliníku nejčastěji používají vytvrzené slitiny z řad 2XXX a 6XXX, které se legují Pb a Bi. Legování Pb nese však některé záporné vlastnosti, které neprospívají životnímu prostředí a z toho důvodu je kladen důraz na vývoj obrobitelných slitin bez přidaného Pb. Obvykle tedy dochází nahrazení Pb cínem (Sn) [19].

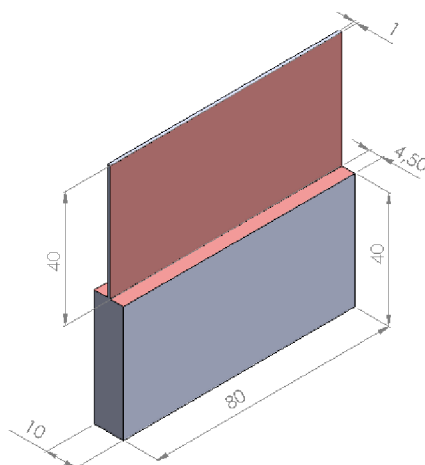
4 TENKOSTĚNNÉ SOUČÁSTKY

S tenkostěnnými součástmi se nejčastěji můžeme potkat v leteckém, kosmickém, elektrickém, automobilním a energetickém průmyslu (viz obr. 20). V dopravním průmyslu se používají pro jejich nízkou hmotnost u klíčových konstrukčních částí letadel a automobilů. Hlavním představitelem v energetickém průmyslu jsou lopatky turbínových kol.



Obr. 20 Ukázka tenkostěnných součástí z různých průmyslů [21, 33].

Pod tenkostěnnou součástkou si můžeme představit konstrukční prvky, které jsou tvořeny stěnami malé tloušťky a dalšími rozměry součástky. Tenkostěnná součást je taková, u které tloušťka stěny je výrazně menší než výška (viz obr. 21). Za tenkostěnné součástky lze už typicky považovat takové, kde tloušťka stěny je menší než 5 mm a hloubka řezu a_p je větší jak 30 mm. Dosažení tenkostěnné součástky je možné soustružením, frézováním a progresivními metodami obrábění. Podle jejich tvaru se používá od 2D přes 3D až po 5D frézování [30].



Obr. 21 Model tenkostěnné součástky [30].

Tenkostěnné prvky nesou řadu problémů při obrábění. Vhodná metoda či strategie obrábění tenkostěnných prvků je výrazně závislá na výšce a tloušťce stěny. Hlavním problémem při frézování bývá postupně měnící se tuhost součástky s postupným odebráním materiálu z obrobku. Před případným obráběním je potřeba zjistit stabilitu procesu, tzn. predikovat stabilitu frézy tak i stěny. Protože tuhost se zmenšuje a tím se frézovaná součástka stává více náchylnou na vznik samobuzeného chvění. Chvění způsobuje zhoršení kvality obrábění a nedodržení rozměru obrobků. Doporučeno je i aplikování techniky vysoko rychlostního frézování, tj. malé a_p , a_e a vysoké v_c , vhodné nastavení těchto podmínek nám usnadní frézování tenkých stěn tím, že zmenšují dobu záběru nástroje a v konečném důsledku také snižují rázy a eventuální průhyb. Důležitý je i směr frézování, kdy je zapotřebí použít sousledné frézování, které je pro tuto aplikaci nejvýhodnější. Z hlediska materiálu se stejné zásady dodržují jak při frézování hliníku, tak i titanu [30, 31].

4.1 Volba frézovací strategie

V prvním kroku se musí stanovit přístup k dané problematice. Takový standartní přístupe při frézování tuhých obrobků spočívá v tom, že jako první se provedou operace hrubovací a následně operace dokončovací. Při hrubování se odebere většina materiálu až po rozměry součástky, které se zvětšují o určitý přídavek na dokončení. Při dokončování chceme dosáhnout požadovaných vlastností součástky optimálními řeznými parametry. Takový standartní přístup pro frézování tenkostěnných součástí není možný a vedl by k úplné destrukci součástky při dokončování (viz obr. 22). Proto vhodné strategie obrábění tenkých součástí se liší v závislosti na jejich výšce a výsledné tloušťce stěny. Tyto strategie se dají použít u různých materiálů [30].

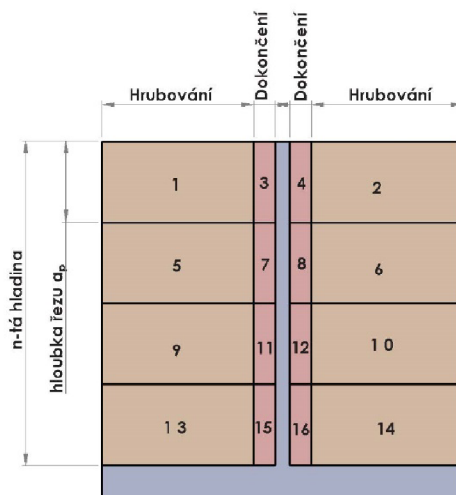


Obr. 22 Destrukce tenkostěnné součástky při obrábění [30].

4.1.1 Hrubování a dokončování v jedné hladině

Jednu z možných strategií vymysleli Smith a Dvorak [32] a zavedli strategii pro vysokorychlostní frézování tenkostěnných součástek. Popsali strategii pro rámové a žebrované tenkostěnné součástky. Při frézování tenkostěnné součástky k zajištění větší tuhosti, použili samotný materiál obrobku a použili frézování v jednotlivých hladinách. Rozdíl je v tom, že dráhy nástroje jsou seřazeny v daném pořadí (hrubovací a dokončovací) tak, aby byla zaručena co největší tuhost obrobku. Z důvodů nízké tuhosti součástky se

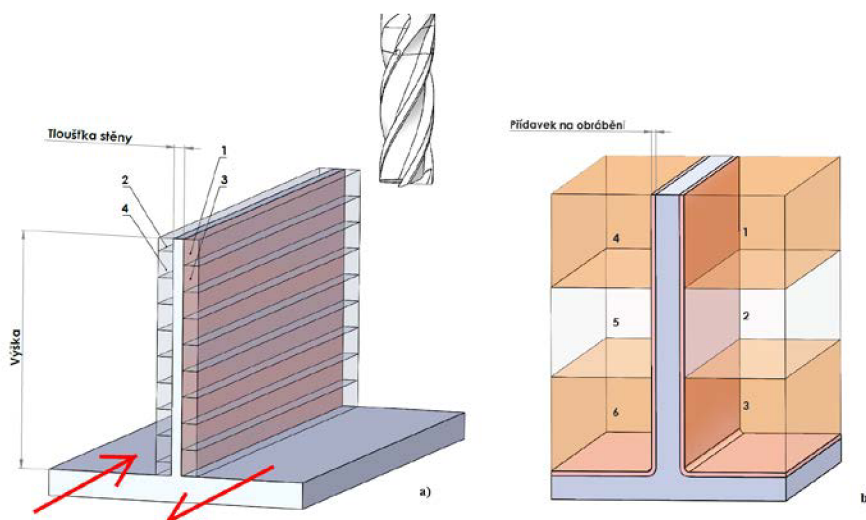
používají způsoby, kdy se po jednotlivých hladinách hrubuje i dokončuje zároveň. Pro navýšení tuhosti frézované tenkostěnné součástky se využívá způsob střídavého odebrání materiálu v horizontálním směru se změnou hloubky řezu. Při odebrání materiálu ze součástky se střídavě mění hrubování s dokončováním, ale ne na celé součástce pouze na úrovni jedné hladiny. Obrázek 23 ukazuje pořadí, ve kterém se materiál má odebrat [30].



Obr. 23 Strategie hrubování a dokončování v jedné hladině [30].

4.1.2 Strategie pro malý poměr výšky k tloušťce <math><15:1</math>

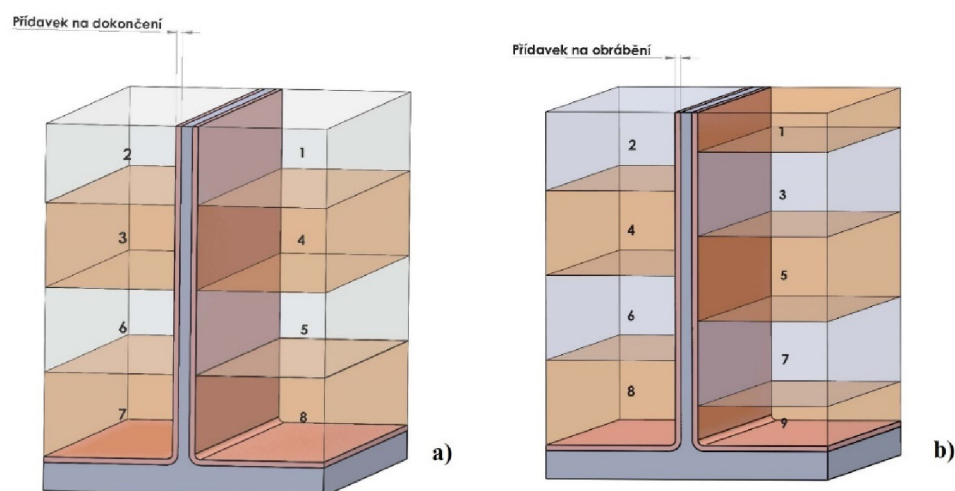
Vhodnou strategií na poměr výšky k tloušťce <math><15:1</math> lze využít strategii nazývanou „cikcak“, která je zobrazena na obrázku 24a, kdy fréza v prvním řezu zabírá dvounásobnou axiální hloubku než ve druhém řezu, který jede na protější straně. Další navazující průjezdy už se rovnají prvnímu řezu frézy. Další strategie může být taková, že se nejprve hrubuje jedna strana stěny na několik vzájemně se nepřekrývajících průchodů a stejná strategie se zvolí i na protější stěně, přičemž se na obou stranách ponechá přídavek na konečné dokončení (viz obr. 24b) [33].



Obr. 24 Strategie pro malý poměr výšky k tloušťce [32]. a) „cikcak“, b) hrubování jedné strany s přídavkem.

4.1.3 Strategie pro střední poměr výšky k tloušťce <math><30:1</math>

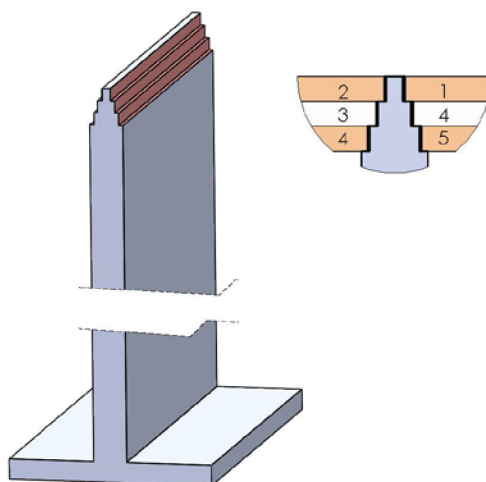
Pro střední poměr výšky k tloušťce můžeme použít rovnou dvě frézovací strategie. První strategie je nepřekrývané frézování (viz obr. 25a), které se nazývá „po vrstevnici“, kdy se střídají jednotlivé strany při úběru materiálu a průchody se nepřekrývají. Druhým způsobem je strategie tzn. překrývané frézování (viz obr. 25b) s opěrnými stupni, kdy se zvýší opora v místě řezu. První řez se provádí s poloviční hloubkou řezu $a_p/2$ a druhý řez se provádí při plné hloubce řezu a_{p0} . U obou strategií se na obou stranách nechává přídavek na dokončení [32].



Obr. 25 Strategie pro střední poměr výšky k tloušťce [32]. a) nepřekrývané, b) překrývané frézování.

4.1.4 Strategie pro vysoký poměr výšky k tloušťce >math>>30:1</math>

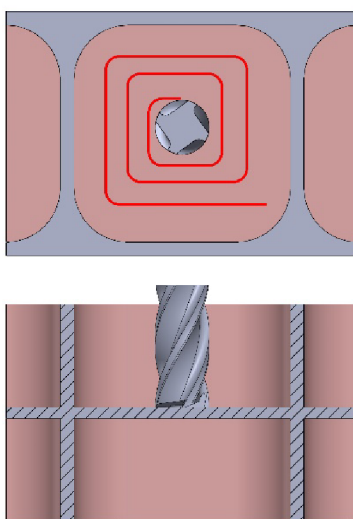
Při frézování velmi vysokých stěn se kromě střídání stran využívá i podpěrných stupňů a postupně se přibližuje na požadovanou tloušťku stěny, kdy se tato strategie nazývá „vánoční stromek“. Tenká část je vždy podpírána tlustší částí pod ní tak, jak jdou po sobě jednotlivé řezy. K dosažení konečné stěny se postupuje tímto krokovým způsobem [32].



Obr. 26 Strategie zvaná vánoční stromek [32].

4.1.5 Frézování do rohu při malé tloušťce dna

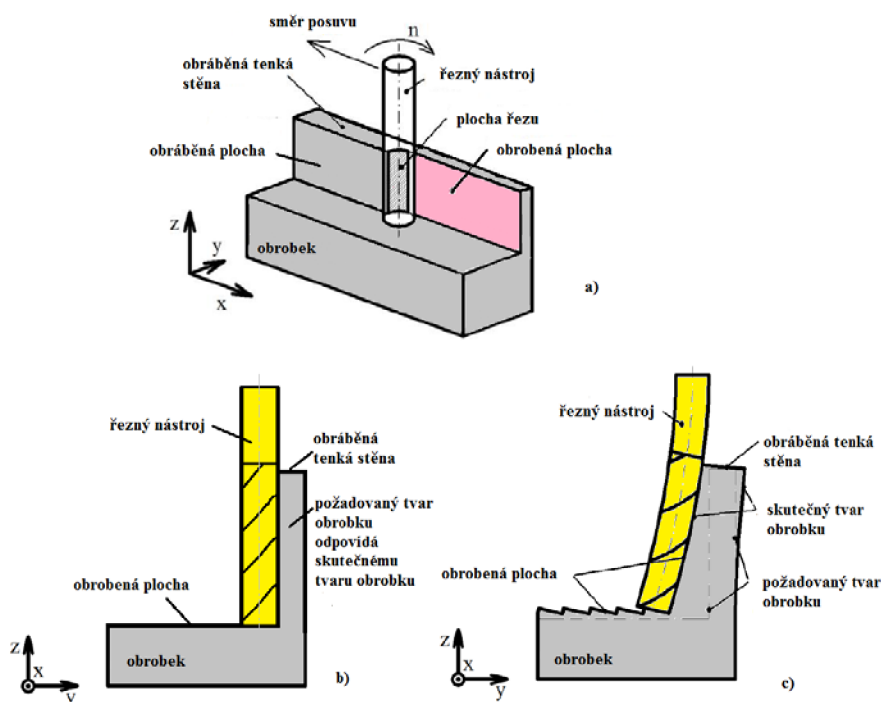
Při frézování součástí kde je malá tloušťka dna (viz obr. 27), je vhodné použít zahlabování kruhovou interpolací ze středu plochy obráběného dna, kdy se nástroj pohybuje směrem ven s využitím okružní dráhy až k dosažení požadované hloubky kapsy. V případě frézování povrchu, jehož protilehlá strana již byla frézovaná, je vhodné použít nástroj s menším počtem zubů, pro snadnější docílení co nejmenšího tlaku na stěnu. V dalším specifickém případě, kdy má součást otvor ve středu dna, se při obrábění první strany ponechá vhodná pomocná příčka, která zvyšuje stabilitu procesu obrábění a může následovat frézování druhé strany. Po dokončení obrábění obou stran se tato pomocná příčka odstraňuje [32].



Obr. 27 Obrábění tenkého dne [32].

4.2 Problémy při obrábění tenkostěnných součástí

Tenkostěnné součástky jsou široce používány ve zmíněných odvětvích (zejména letecký průmysl). Při opracování těchto prvků se složitou konstrukcí se postupuje tak, že dochází k odebrání až 90 % materiálu z původního objemu polotovaru. Pro větší efektivitu obrábění se nastavují vhodné parametry obrábění, kdy se chce docílit co největší řezné hloubky a rychlosti posuvu, což způsobuje nárůst řezných sil při obrábění. V případě, kdy jsou řezné síly příliš vysoké, může dojít k zhoršení stability procesu obrábění nebo k technologicky významným pružným deformacím, které způsobují průhyb soustavy N-O (viz obr 28). Většina zahraničních studií říká, že hlavním ovlivňujícím faktorem ovlivňující deformaci zmíněných částí je právě řezná síla. U dokončovacího obrábění chceme dosáhnout ideálního stavu, kdy vzniklé řezné síly při obrábění by měli zatěžovat řezný nástroj a obrobek co možná nejméně, aby nezpůsobovaly výrazný technologický průhyb těchto dílčích částí [34, 35].

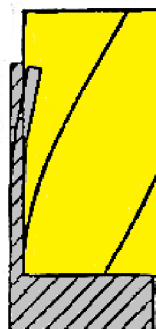


Obr. 28 Schéma frézování tenkých stěn součástí stopkovou frézou [35, 36]. a) model obrábění bokem frézy, b) ideální stav - deformace nástroje i obrobku jsou zanedbatelné, c) reálný stav – deformace nástroje i obrobku zhoršují kvalitu obrobku.

4.2.1 Teorie tuhosti

Při procesu řezání je třeba zajistit určitou lokální tuhost obráběné soustavy, aby se zabránilo vymezení z tolerance. K dodržení dostačující tuhosti je potřeba stanovit určitou formu výpočtového modelu a takový standartní model tuhosti je například vetknutá rovná stěna. Proto je dobré při obrábění zlepšit (zvýšit tuhost) tvar obrobku a tím zlepšit i celkový průběh procesu obrábění, při kterém může docházet k nepřesnostem způsobených [37]:

- průhybem řezného nástroje a obrobku,
- vibračním přetvořením způsobeným velkým odběrem materiálu z obrobku, který rozpojuje stěnu s následným narážením na řezný nástroj (viz obr. 29),
- regenerativními vibracemi způsobenými procesem řezání,
- rezonancí způsobenou frekvencí působící síli blížíci se k frekvenci kmitání soustavy.



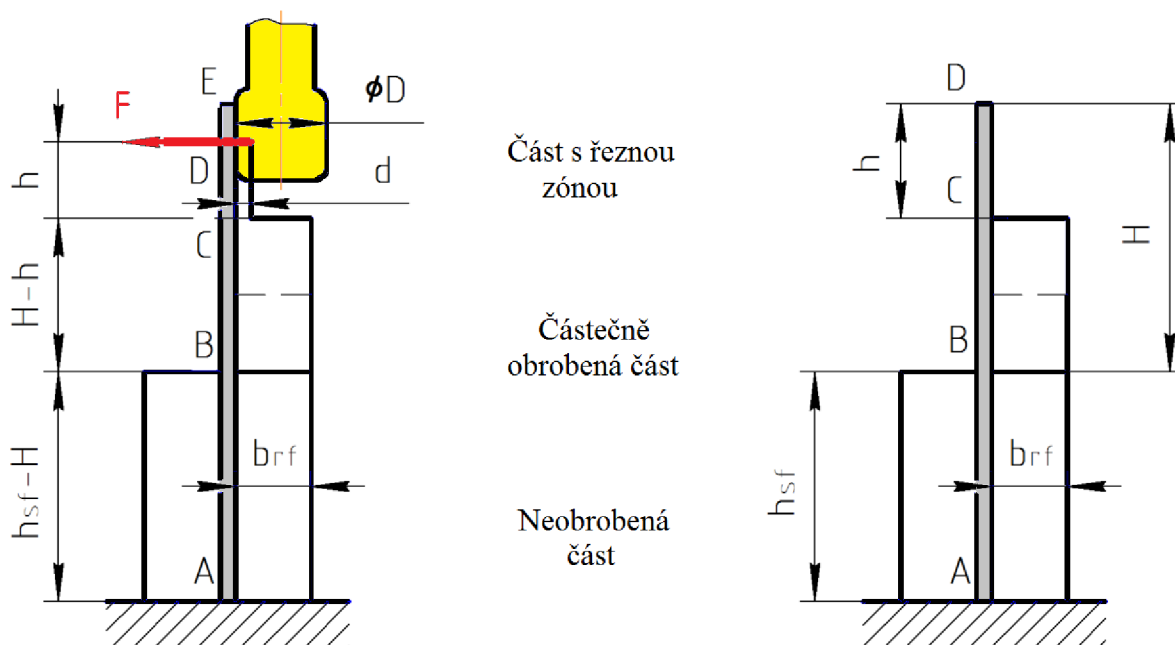
Obr. 29 Vibrační přetvoření [37] [38].

Vibrační přechození se nedá jednoduše analyzovat, jelikož zdroj vibrací není zřejmý. Tento jev může být důsledkem vlastního kmitání stěny s určitou návazností na průhyb. Pokud se v důsledku ohybového namáhání řezný nástroj nebo stěna odkloní (prohne), výsledný obrobek může být oproti zadání silnější. Při následném hlubším průchodu řezného nástroje podél stěny může tak snadněji dojít k přechození této silnější části stěny. Tento efekt nemusí nutně způsobovat tento problém, ale minimálně má negativní vliv na obrábění [37].

Nicméně hlavní problémem je průhyb, neboť právě on způsobuje největší odchylky. Odchylky (deformace) zapříčiněné ohybovým namáháním jsou důsledkem nominální řezné síly, zatímco odchylky způsobené vibracemi jsou důsledkem změny řezné síly. Průhyby při obrábění zapříčiňují problémy s přesností dané součástky, zatímco vibrace ovlivňují kvalitu povrchu [37].

Pro praktické použití tohoto modelu v systému plánovacího procesu, nesmí být výpočet příliš složitý. Proto se z tohoto důvodů nepoužívá metoda konečných prvků ani metoda s iteračním přístupem, při nichž se geometrie součásti průběžně mění s odstraňováním materiálu. Přednost se dává aproximaci vycházející na základě nejhorší možné variantě [37].

Geometrický tvar modelu vychází ze situace znázorněné na obrázku 30, který ukazuje stav při největším průhybu, neboť tam vzniká největší ohybový moment. Předpokládá se, že obrábění probíhá v horní části stěny a řezná síla působí v horní části řezu. Materiál, na kterém daná stěna stojí, je považován za pevný (tuhý). Tyto předpoklady slouží pro zjednodušení výpočtu [37, 39].

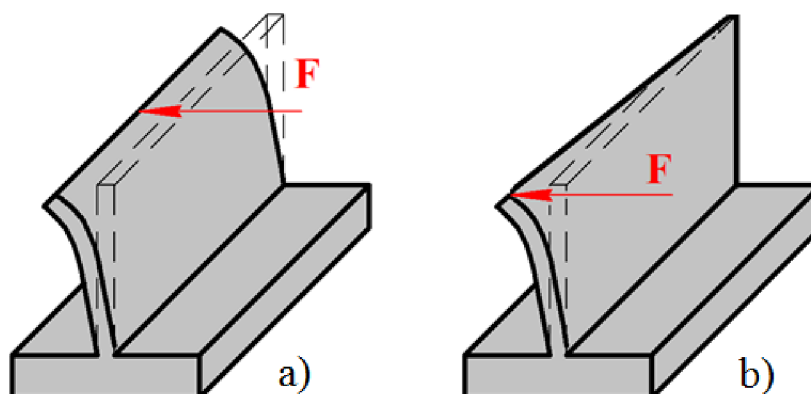


Obr. 30 Schéma ohybového modelu při obvodovém frézování [37, 39].

Pro výpočet průhybu tato situace odpovídá vetknutému konzolovému nosníku rozdělenému na 3 části, které se prohýbají odlišně. Potom celkový deformační obraz vzniká složením těchto průhybů v těchto částech. Reálný stav odpovídá spíše deformaci vetknuté desky pod bodovým zatížením než deformaci nosníku pod spojitým zatížením rovnoměrně

rozděleným podél horní hrany stěny. Jak je uvedeno v odborné literatuře od Vana Ouwerkerka, stěna se bude ohýbat lokálně. Rozdíl obou modelů je uveden na obrázku 31. U modelu konzolového nosníku se předpokládá stejný průhyb po celé délce a odolnost vůči ohybu se zvyšuje s délkou. Jelikož k průhybu dochází lokálně a ne spojitě, vliv délky stěny na tuhost začne být od určité délky zanedbatelný. Takže, pokud síla působí na horní hranu stěny konstantní tloušťky dál od volných konců, vzniklý průhyb je ve vzdálenosti ve směru její délky rovnající se dvojnásobku její výšky desetkrát menší, než průhyb v místě působení síly. Proto Van Ouwerkerk navrhuje při výpočtu průhybu stěny pracovat pouze s určitou efektivní délkou, která se rovná násobku výšky stěny. V případě, že skutečná délka je větší jak efektivní, výpočty mohou zahrnout pouze tuto efektivní délku stěny [37].

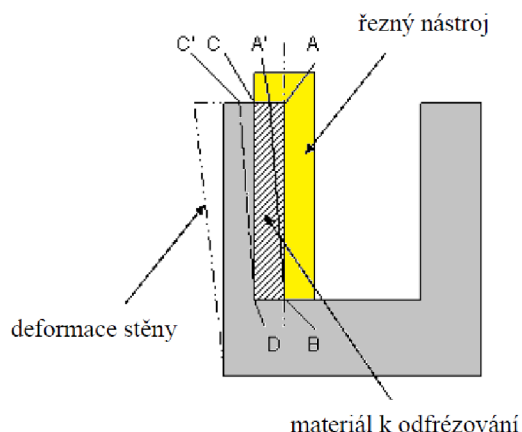
Van Ouwerkerk navrhl výpočtový model, který počítá s průhybem vzniklým zatížením maximální frézovací síly tak, jak je znázorněno na obrázku 30. Omezujícím faktorem je deformace v bodě E, která vychází z použitých tolerancí. Bod E znázorňuje vrchol řezné části nástroje, něm může dojít k vibračnímu přeroobnění. Tento bod se ve skutečnosti vyskytuje až nad stěnou. Část DE tak představuje (virtuální) výšku stěny nad silou, která může potencionálně působit na nástroj. Jinak řečeno, v úvahu se bere deformace pro mírně vyšší stěnu. I když je tento výpočtový model v určitých ohledech nereálný, jelikož nereprezentuje praktickou situaci, ale naopak nabízí kombinaci snazšího výpočtu a bezpečnostní rezervy tím, že implicitně předpokládá větší průhyb [37, 39].



Obr. 31 Znázornění ohýbání stěny [37]. a) ohyb stěny pod předpokládaným stejnoměrným spojitým zatížením, b) realističtější lokální ohyb stěny.

4.2.2 Povrchové vady při obrábění tenkostěnných součástek

Vady při obrábění tenkostěnných součástek vznikají v důsledku nižší tuhosti těchto specifických dílů, jelikož je větší pravděpodobnost vyskytnutí deformace u soustavy N-O. Tyto vady mají za následek nedodržení určitých rozměrů. Na obrázku 32 je znázorněno schéma obráběné tenké stěny s jejím vychýlením v průběhu obrábění. Vyšrafovaná oblast ABCD představuje materiál, který by měl být v ideálním stavu odebrán z polotovaru. Kvůli působení řezné síly v radiálním směru se vyznačené body A a C přemístily do polohy C' a A'. Při obrábění tohle vychýlení z ideálního stavu způsobí odebrání materiálu pouze na ploše A'BCD. Jakmile se řezný nástroj od obráběného povrchu oddálí, tak se stěna pružně vrátí a materiál v ploše CDC', který měl být odebrán, nám zůstává na stěně a způsobuje tak povrchovou vadu na součástce [40].



Obr. 32 Schéma obrábění tenko stěnné součástky [37].

4.3 Určení průhybu řezného nástroje a tenké stěny

Průhyb skutečného řezného nástroje obsahuje energie napjatosti W zahrnující namáhání na ohyb M_y , smyk T_z a krutu M_k a jejich následné derivace podle zatěžující síly F . Potom matematické vyjádření je dáno vztahem [35]:

$$w_F = \frac{1}{E} \cdot \int_{(I)} \frac{M_y(x)}{I_y(x)} \cdot \frac{\partial M_y(x)}{\partial F} \cdot dx + \frac{\beta}{6} \cdot \int_{(I)} \frac{T_z(x)}{G(x)} \cdot \frac{\partial T_z(x)}{\partial F} \cdot dx + \frac{1}{G} \cdot \int_{(I)} \frac{M_k(x)}{I_\rho(x)} \cdot \frac{\partial M_k(x)}{\partial F} \cdot dx \quad (4.1)$$

Deformaci čelní frézy lze zjednodušit na vetknutý válcový nosník a potom matematické vyjádření průhybu je ve tvaru [35]:

$$w(x) = \frac{F}{6 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot L^3 - 3 \cdot L^2 \cdot x + x^3) \text{ [mm]} \quad (4.2)$$

kde: F [N] - radiálně působící síla na frézu,
 L [mm] - délka frézy vysunutého z upínače,
 x [mm] - vzdálenost od radiálně působící síly,
 I [mm⁴] - kvadratický moment průřezu frézy,
 E [GPa] - Youngův modul pružnosti.

Kvadratický moment průřezu kruhu pro válcovou část frézy je určen vztahem:

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \text{ [mm}^4\text{]} \quad (4.3)$$

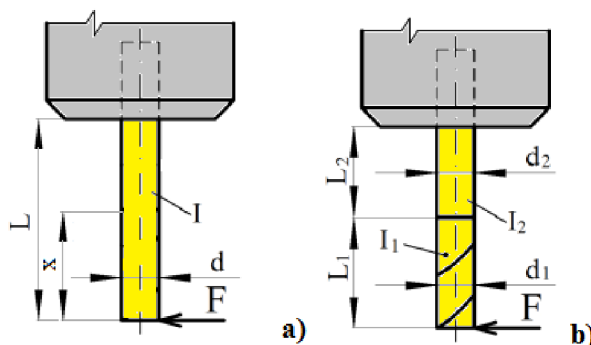
V dílech odborné literatury můžeme najít i matematické vyjádření pro válcový nosník, který závisí na dvou průřezových charakteristikách [36]:

$$w(\max) = \frac{F \cdot L_1^3}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{F \cdot [(L_1 + L_2) - L_1^3]}{3 \cdot E \cdot I_2} \text{ [mm]} \quad (4.4)$$

kde: L_1 [mm] - délka řezné části frézy,
 L_2 [mm] - délka válcové části frézy,
 I_1 [mm⁴] - kvadratický moment průřezu řezné části,

I_2 [mm⁴] - kvadratický moment průřezu válcové části,

Ze vztahů vidíme, že velikost průhybu řezného nástroje je závislá na velikosti zatížení vzniklé při obrábění, na materiálu řezného nástroje, na velikosti kvadratického momentu průřezu nástroje a na délce vyložení z upínače [35]. Na obr. 33 můžeme vidět schéma modelu nástroje upnutého v upínači.



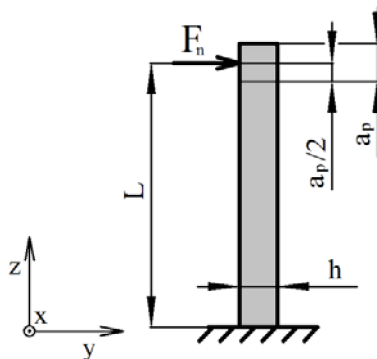
Obr. 33 Ukázka modelů [36]. a) jednoduchý vetknutý válcový nosník, b) vetknutý nosník se dvěma průřezovými charakteristikami.

Jestliže bude matematický model určující průhyb reálných čelních stopkových frézovacích nástrojů co nejvíce odpovídající reálné situaci, tím přesnější budou podklady pro kompenzování odchylky průhybu, které lze využít při programování polohy špičky frézy s využitím kompenzací jejího průhybu [35].

Průhyb obrobku ve tvaru pevně vetknuté desky (viz obr. 34) je matematicky vyjádřen vztahem [36]:

$$w_L = \frac{12}{E \cdot b \cdot h^3} \cdot \left(\frac{F_n \cdot L^3}{3} - 2 \cdot F_n \cdot L^2 \right) \quad [\text{mm}] \quad (4.5)$$

kde: F_n [N] - normálová síla působící na obrobek,
 b [mm] - šířka tenké stěny,
 h [mm] - tloušťka tenké stěny,
 L [mm] - výška obrobku tenké stěny,



Obr. 34 Model pevně vetknuté desky [36].

Velký význam má umístění působící síly na obrobek, kdy při zatížení síly v rozích součástí bude vychýlení větší, než při působení síly uprostřed součásti.

5 NÁVRH EXPERIMENTU

Tahle kapitola se zabývá návrhem dílčích etap, které jsou nutné pro realizaci experimentu určeného v zadání diplomové práce. Experimentem máme změřit silové zatížení monolitními stopkovými frézami z SK při frézování tenkostěnné součástky z hliníkové slitiny. Dále je zde vysvětlení konkrétní volby obrábějího centra, frézovacích nástrojů z SK, materiálu obrobku (polotovaru), určení řezných podmínek, zvolení zařízení pro experimentální měření silového záznamu včetně příslušenství a určení zařízení pro měření kvality povrchu. Tahle část diplomové práce se věnuje i predikci průhybu řezného nástroje a tenkostěnné součástky, která vychází z teoretických i experimentálně určených hodnot. V navazující kapitole je popsána i navazující praktická realizace tohoto experimentu.

Stručný rozbor dílčích etap experimentu:

- návrh experimentu z technického hlediska (obráběcí stroj, nástroje, řezné podmínky, materiál polotovaru a měřicí zařízení),
- predikce průhybu řezných nástrojů a obrobku (volba tenkostěnné součástky a technologie obrábění),

5.1 Volba obrábějího centra

Experiment bude realizován na moderním portálovém obráběcím centru MCV 1210 (viz obr. 35) v prostorách dílny na fakultě strojního inženýrství v Brně. Tento stroj je vysoce produktivní se širokým uplatněním při obrábění složitých tvarů od mezinárodního výrobce TAJMAC - ZPS a.s.. Volba stroje byla ovlivněna současnými trendy výběru stroje při obrábění, ale i vhodnými parametry, které nám dovolí stanovení optimálních řezných podmínek pro navržený experiment. Některé vybrané parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 3. Úplné technické údaje o obráběcím centru najdeme v příloze 1.

Tab. 3 Základní technická data obrábějího centra MCV 1210 [38].

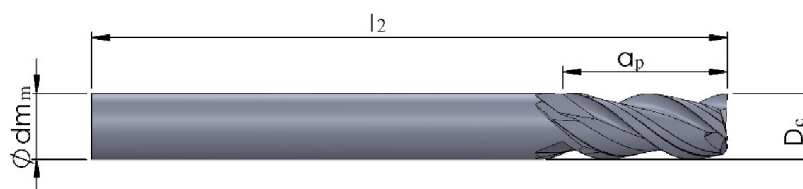
Parametry otočného stolu	
Rozměr upínacích ploch stolu	ϕ 600 mm
Rozměr stolu	1 280 x 860 x 520 mm
8 T-drážek	14 H8
Vzdálenost mezi T - drážkami	62,5 mm
Hmotnost obrobku při natočení $A \pm 15^\circ$	700 kg
Posuv v osách X, Y, Z	
Max. pracovní posuv	20 m.min ⁻¹
Rychloposuv	40 m.min ⁻¹
Maximální zrychlení os	5 m.s ⁻²
Vřetenová jednotka Weiss 176	
Max otáčky	18000 min ⁻¹
Max výkon vřetena	31 kW
Upínací kužel	HSK-A63
Max krouticí moment	197 N.m
Ostatní technická data	
Řídicí systém	Sinumerik 840D



Obr. 35 Ukázka obráběcího centra MCV 1210 [41].

5.2 Volba monolitních nástrojů z SK

Podle zadání diplomové práce byly pro experiment vybrány dvě monolitní stopkové frézy z SK z katalogu společnosti Seco Tools CZ s.r.o. a společnosti FRAISA SA. Volba fréz vycházela z navrženého experimentu, kdy mělo dosáhnout správného optimálního výkonu pro danou operaci. Při výběru se posuzovaly konkrétní parametry těchto rezných nástrojů (viz obr. 36), jako je počet zubů (z), rezný průměr (D_c), povrchová úprava nástroje (bez povlaku), typ provedení (válcové), velikost rezné části (a_p), vhodnost použití podle materiálu obrábění (skupina N- nezelezné kovy) a další. Byly vybrány prodloužené verzi nástrojů, které jsou více vhodné pro frézování, kde je potřeba velkého axiálního zanoření nástroje do obrobku.



Obr. 36 Schéma monolitní stopkové frézy.

5.2.1 Fréza JABRO® - SOLID² - JS413

Generace Jabro-Soli² nabízí přibližně 30% zvýšení životnosti nástrojů a dokonce i o 20 % vyšší rezné rychlosti v porovnávání s předešlou generací. Tyto nástroje jsou navrženy pro použití v širším množství aplikací. Toto výrazné zlepšení produktivity bylo způsobeno optimalizací geometrie a speciální úpravou rezných hran. Nástroj JS 413 (viz obr. 37) je vhodný zejména pro obrábění hliníkových slitin, dále pak pro operace hrubování, frézování kapes, dokončovací obrábění, drážkování, pro obrábění tenkostěnných a vystouplých profilů. Zaručují lehký řez bez vzniku chvění. V následující tabulce 4. jsou shrnuty základní parametry toho to zvoleného nástroje, případně další parametry jsou uvedeny v příloze 2.

Tab. 4 Základní parametry JS413 [42].

Označení	D_c [mm]	d_{m_m} [mm]	a_p [mm]	l_2 [mm]	z [-]	γ [°]	λ [°]	v_c [m/min]	f_z [mm]	Typ upnutí
JS413120D3SZ3.0	12	12	50	115	3	20	40	230-890	0,02-0,17	válcové



Obr. 37 Ukázka prodloužené verze frézy JS413.

5.2.2 Fréza FRAISA AX - V3

Tato monolitní fréza (viz obr. 38) podle výrobce zvyšuje bezpečnost a plynulost procesu obrábění. Je navržena tak, aby minimalizovala vznik oscilací a vibrací při procesu řezání. Díky částečně leštěným břitům dokáže absorbovat lépe vysoké řezné síly. Tyto vlastnosti frézy zvětšují jeho životnost, zaručují lepší kvalitu povrchu jak z obvodové strany, tak i z čelní. V následující tabulce 5. jsou shrnuty základní parametry nebo v příloze 3 jsou uvedeny veškeré parametry z katalogu společnosti FRAISA SA.

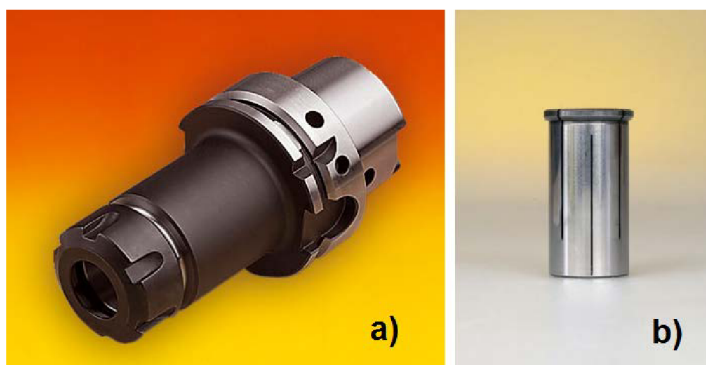
Tab. 5 Základní parametry AX – V3 [43].

Označení	D_c [mm]	d_{m_m} [mm]	a_p [mm]	l_2 [mm]	z [-]	γ [°]	λ [°]	v_c [m/min]	f_z [mm]	Typ upnutí
15561.501	12	12	53	110	3	20	40	200-600	0,04-0,12	válcové



Obr. 38 Ukázka prodloužené verze frézy AX – V3.

Tyto řezné nástroje byly upnuty do hydraulického upínače HSK 63A - CC2 pomocí redukční kleštiny RS 2012 (viz obr. 39) od společnosti Pramet Tools, s.r.o..



Obr. 39 Ukázka upinacího příslušenství [44]. a) upínač HSK 63A - CC2, b) redukční kleštiny RS 2012.

5.3 Řezné podmínky

Stanovení řezných parametrů je velmi podstatným faktorem při obrábění s cílem dosáhnout efektivního a účinného obráběcího procesu. Vysoké řezné parametry zajišťují vysokou produktivitu na úkor větších nákladů, naopak při zvolení nízkých parametrů jsou náklady nižší, včetně produktivity. Kombinací vhodných parametrů se může dosáhnout optimálního opotřebení nástroje, bezpečnosti procesu obrábění (např. tím, že se zamezí vzniku vibracím) a dosažení dobré kvality povrchu při optimálních nákladech a produktivitě.

Konkrétní a konečné řezné podmínky byly stanoveny až na základě experimentu, který je popsán níže. Nejprve se vycházelo z doporučených podmínek, které byly uvedeny v katalogích a internetových průvodcích daných společnostmi pro vybrané řezné nástroje. Kdy byla stanovena vhodná řezná rychlost, otáčky vřetene, axiální a radiální hloubka řezu pro zvolenou technologii frézování a technické možnosti v závislosti na obou frézách. Tyto stanovené podmínky jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 Zvolené řezné podmínky pro experiment.

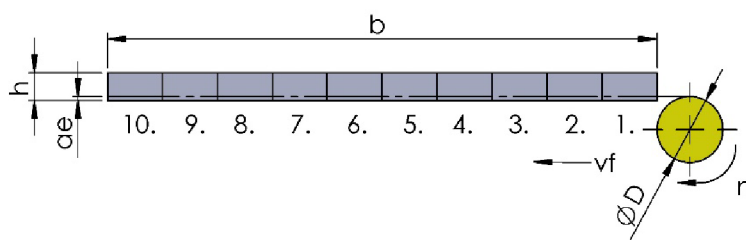
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Otáčky vřetene n [ot.min ⁻¹]	Axiální hloubka řezu a_p [mm]	Radiální hloubka řezu a_e [mm]	Technologie frézování
565	15 000	10	0,7	sousledné

Posuv na zub f_z bude stanoven až v praktické části provedení experimentu, kdy pro určení vhodného posuvu, který bude sloužit pro praktickou ukázkou obrábění tenkostěnné součástky je navrženo 10 různých posuvů na zub (viz tab. 7), které vyhovují oběma řezným nástrojům.

Tab. 7 Zvolené posuvy na zub pro experiment.

Pořadí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Posun na zub f_z [mm]	0,055	0,06	0,065	0,07	0,075	0,08	0,085	0,09	0,095	0,1

Z těch posuvů na zub bude vybrán pouze jeden, který bude splňovat určitá kritéria, která budou popsána při praktické realizaci experimentu. Stanovení posuvu bude probíhat podle schématu, které je na obrázku 40.



Obr. 40 Schéma pro stanovení vhodného posuvu na zub při experimentu.

Na schématu je znázorněn horní pohled experimentu, kde je možno vidět řezný nástroj, který má stanovený směr frézování a smysl otáček. Dále je zde znázorněn obrobek o délce b a tloušťce stěny h , který je rozdělen na 10 částí pro 10 mm. Každá část odpovídá dle pořadí konkrétnímu posuvu, kdy nejmenší posuv je na začátku frézování a největší posuv je na konci vzorku. Tento experiment bude proveden frézou JS 413, která dle dostupných informací je více vhodná pro obrábění tenkostěnných součástí (rozsah použití a rozsah

řezných podmínek). Bude se frézovat sousledně po lineární dráze bez použití řezné kapaliny (frézování za sucha).

5.4 Materiál obrobku

Materiál obrobku byl zakoupen ve společnosti ALMS spol. s.r.o., kde byl vybrán profil ve tvaru T o rozměrech 50x50x5 mm z hliníkové slitiny EN AW-6060 T6 (AlMgSi0,5). Tento konkrétní profil byl zvolen, aby při experimentu prezentoval tenkostěnnou součástku, která bude frézovaná konkrétními řeznými podmínkami za účelem změření silového zatížení při obrábění. Tato slitina je precipitačně vytvrditelná a pro svoji dobrou kombinaci dobré tvářitelnosti za tepla a dobré pevnosti ve ztvrzeném stavu se používá při výrobě různých profilů. Použití profilů může ve výrobě ušetřit mnoho úprav (obrábění, svařování) a tím i zlepšit produktivitu práce. Tento materiál má dobrou odolnost vůči korozi a obrobitelnost této slitiny se dá hodnotit jako dobrá. Při obrábění většinou vznikají spirálovité třísky a dosažitelný stav povrchu je dobrý. V následujících tabulkách je uvedeno chemické složení (viz tab. 8) této hliníkové slitiny a některé vybrané mechanické vlastnosti v tabulce 9 [19, 28].

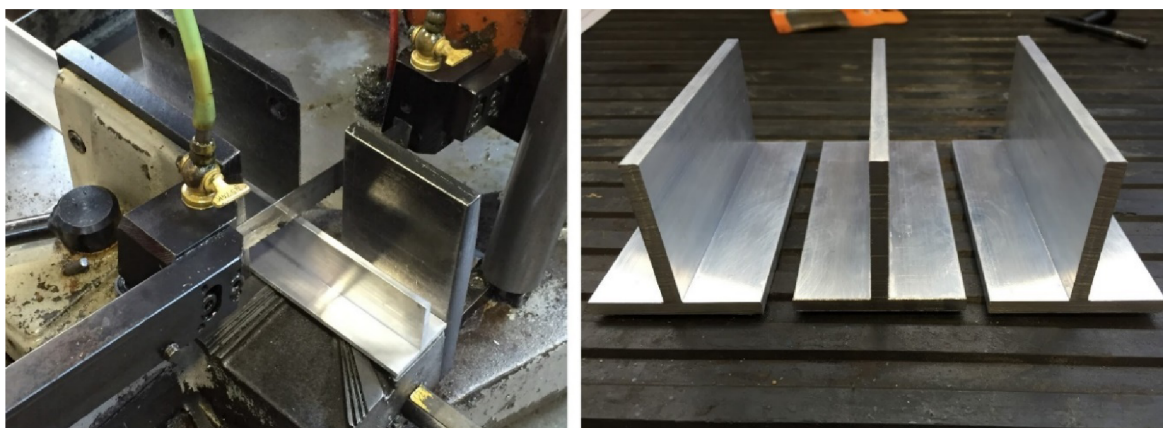
Tab. 8 Chemické vlastnosti hliníkové slitiny 6060 [28].

Označení		Chemické složení [%]							
EN AW	DIN	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6060	AlMgSi0,5	0,30-0,60	0,10-0,30	≤0,10	≤0,10	0,35-0,6	0,05	≤0,15	≤0,1

Tab. 9 Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny 6060 T6 [28] [45].

Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Konstanta měrná řezná síla $k_{c1,1}$ [N.mm ⁻²]	Youngův modul pružnosti E [GPa]	Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Tvrдость HB
215	160	10	400	70	2700	70

Tento profil byl v prostorách dílny nařezán na zkušební vzorky o délce 100 mm pomocí pásové pily Bomar STG220G (viz obr. 46).



a)


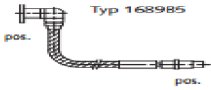
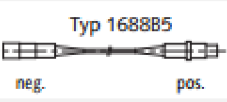



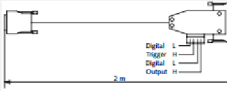
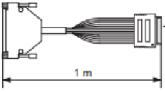


b)

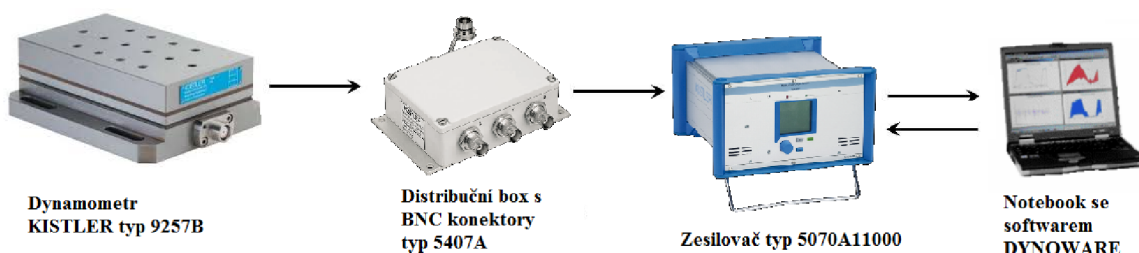
Obr. 41 Ukázka přípravy vzorků. a) dělení vzorků, b) zkušební vzorky.

5.5 Měřicí aparatura silového zatížení

Pro měření silového zatížení při sousledném frézování tenkostěnné součástky byl použit kartézský souřadnicový systém měřicí aparatury Kistler (x, y, z) pro zaznamenání silových složek (F_x , F_y , F_z). Hlavními součástmi této aparatury jsou piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B, distribuční box s BNC konektory, nábojový zesilovač typ 5070A1100, notebook Acer s vyhodnocovacím softwarem Dynoware s ostatním příslušenstvím (viz tab. 10). Tato měřicí aparatura byla zapojena podle schématu, které je znázorněno na obrázku 42.

Tab. 10 Měřicí aparatura Kistler [46, 47].

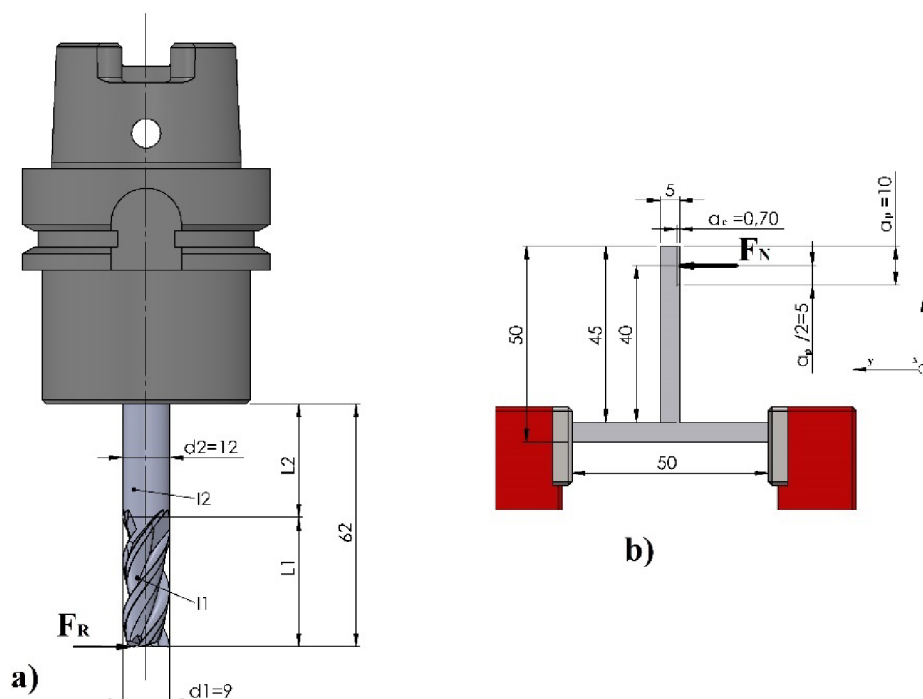
Hardwarové vybavení	Ilustrační obrázek
Dynamometr Kistler typ 9257B	
Propojovací kabel typ 1631C5	
Prodlužovací kabel typ 1688B5	
Distribuční box s BNC konektory typ 5407A	
BNC - BNC kabel na vstup do zesilovače typ 1601B2	
8 - kanálový nábojový zesilovač typ 5070A1100	
Propojovací kabel k A/D převodníku typ 1500A7	
Redukční kabel pro A/D převodník typ 1500B69	
Karta PC-CARD-DAS16/16 typ 2855A5	
Notebook Acer se softwarem Dynoware	



Obr. 42 Zjednodušené schéma zapojení aparatury Kistler.

5.6 Predikce průhybu řezných nástrojů a obrobku

Stanovení predikce průhybu použitých řezných nástrojů a obrobku vychází z kapitoly 4, kde jsou uvedeny základní modely a vztahy pro tuhle problematiku. Pro určení posunutí jsme vycházeli ze dvou zatěžujících sil. První síla $F_{R1} = 118 \text{ N}$ byla stanovena teoreticky pomocí vztahu (1.7), která byla přepočítána pomocí goniometrických funkcí do souřadnicového systému aparatury Kistler (viz obr. 3) vzhledem ke konečným řezným podmínkám. Druhá síla $F_R = 50 \text{ N}$ byla stanovena a zaokrouhlena z konečných výsledků praktické realizace měření sil v průběhu frézování tenkostěnné součástky. Síly označené působící na obrobek F_N jsou opačné vůči silám F_R , které zatěžují nástroj upnutý v upínači. V téhle části pro průhyb obrobku, průhyb jednoduchého válcového nosníku a průhyb válcového nosníku se dvěma průřezy I_1 a I_2 byly použity vztahy (4.2),(4.3),(4.4) a (4.5). Veškeré vypočítané hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 11 a 12. Na obrázku 43 jsou zakótované modely podle reálné situace.



Obr. 43 Zakótované modely podle reálné situace. a) vetknutý nástroj v upínači, b) vetknutý polotovár ve svěráku.

Tab. 11 Predikované průhyby řezných nástrojů dle modelů uvedené v kapitole 4 [48].

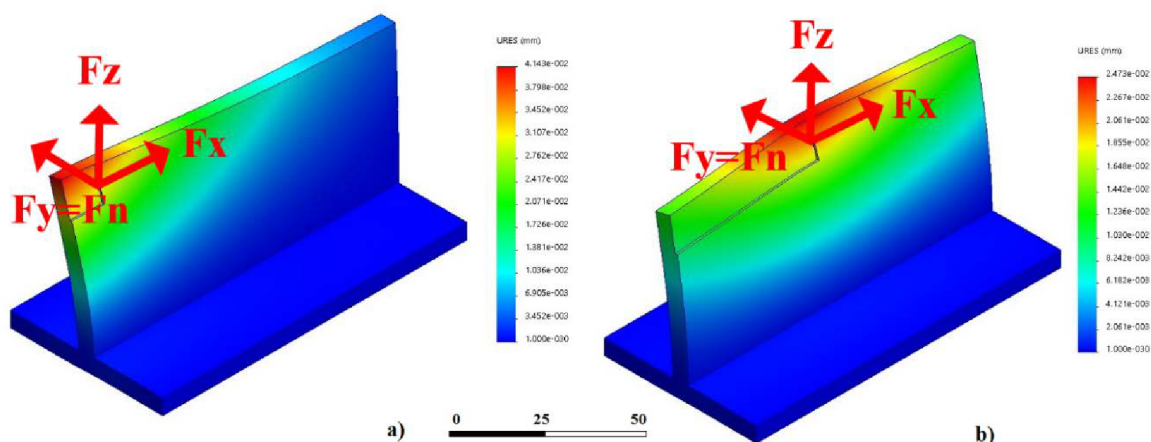
Označení frézy	Rozměry modelu [mm]	Kvadratický moment průřezu [mm ⁴]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Zatěžující síla [N]	Predikovaný průhyb w [mm]	
					Válcový nosník	Dva průřezy
FRAISA AX-V3	d ₁ =12 d ₂ =9 L ₁ =53 L ₂ =9	I ₁ =322,062 I ₂ =1017,876	580	F _{R1} =118 F _{R2} =50	w _{max.1} =0,015 w _{max.2} =0,006	w _{max.1} =0,037 w _{max.2} =0,016
JS 413	d ₁ =12 d ₂ =9 L ₁ =50 L ₂ =12	I ₁ =322,062 I ₂ =1017,876	520	F _{R1} =118 F _{R2} =50	w _{max.1} =0,018 w _{max.2} =0,007	w _{max.1} =0,038 w _{max.2} =0,016

Tab. 12 Predikované průhyby obrobku dle modelů uvedené v kapitole 4.

	Rozměry modelu [mm]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Zatěžující síla [N]	Predikovaný průhyb w [mm]
Tenkostěnná součástka (hliníkový profil T)	b=100 h=5 v=45 L=40	70	F _{N1} =118	w _{L1} =0,029
			F _{N2} =50	w _{L2} =0,012

Kde rozměr b odpovídá délce polotovaru, rozměr h je tloušťka stěny polotovaru, v je výška stěny od vetknutí a rozměr L je vzdálenost působíště zatěžující síly na obrobek od místa vetknutí. Rozměry modelu tenkostěnné součástky jsou znázorněny na obrázku 34 a 43b.

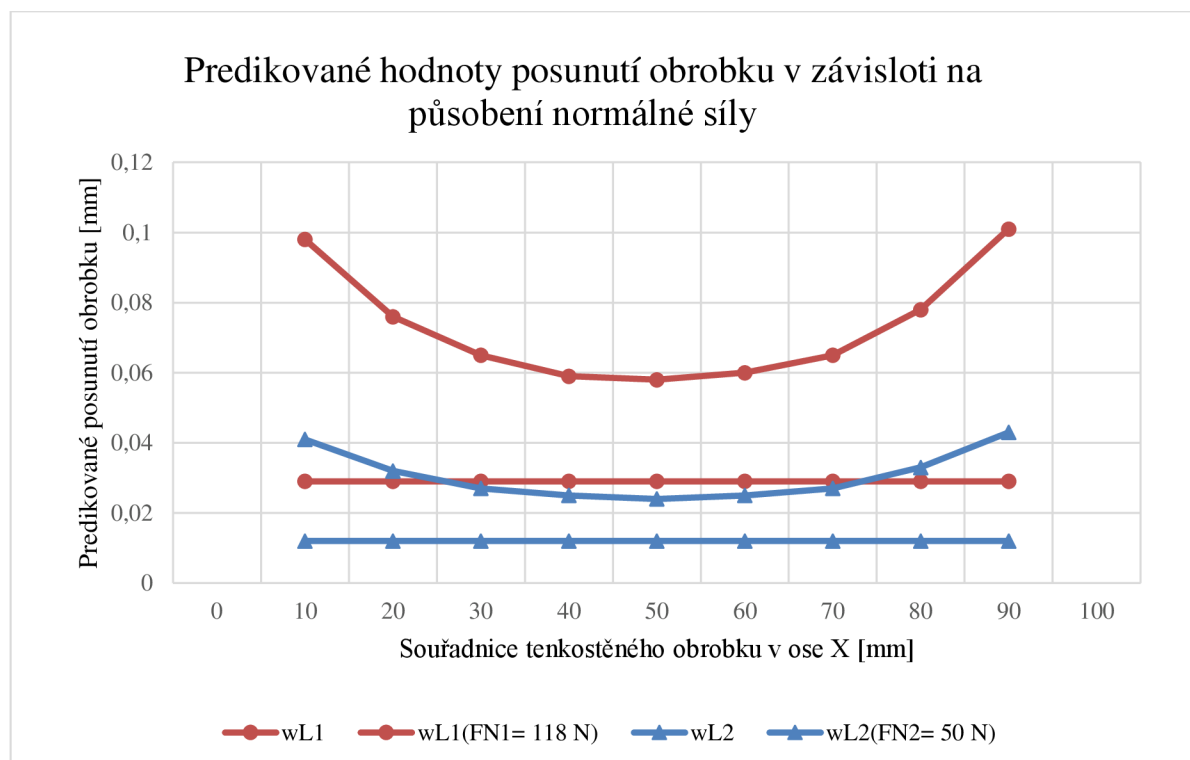
Pro přesnější predikci vychýlení tenkostěnných obrobků se využívá specializovaného software, jako jsou například ANSYS, Inventor Pro nebo jak v téhle diplomové práci SolidWorks 2015. Tento software ve speciálním modulu umožňuje analýzu modelu pomocí metody konečných prvků (MKP) předpovídat například vychýlení tenkostěnné součástky v určitém bodě. Pro tuto přesnější predikce jsme zvolili metodiku, kdy jsme simulovali lineární pohyb frézování při postupném odebrání materiálu z polotovaru při zvolené axiální řezné hloubce $a_p = 10$ mm a radiální hloubce řezu $a_e = 0,7$ mm. Při simulaci byla měněna poloha zatěžující síly od frézy na obrobek, která působí v polovině axiální hloubky řezu a_p . Zatěžující síly byli zvolené jako u predikce vychýlení řezných nástrojů a to síla zvolená na základě výpočtů $F_{N1} = 118$ N a zatěžující síla $F_{N2} = 50$ N. Tímto způsobem byly zaznamenány hodnoty posunutí, které v rozích obrobku dosahovaly mnohem větších hodnot než uprostřed součástí (viz obr. 44). V příloze 4 a 5 jsou ukázky výsledků posunutí pro zatěžující síly pro konkrétní souřadnici x, která se mění v rozmezí od 10 do 90 mm.



Obr. 44 Predikce posunutí v prostředí SolidWorks 2015. a) ukázka průhybu obrobku v rohu b) ukázka průhybu uprostřed obrobku.

Pro co nejvíce realističtější výsledky byly zadány do SolidWorksu 2015 vstupní parametry, jako materiálové vlastnosti hliníkové slitiny 6060 a to Youngův modul pružnosti 70 GPa, Poissonovo číslo 0,33, hustota materiálu $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a další. Teplota prostředí byla stanovena na 22°C .

Na obrázku 45 je znázorněno grafické srovnání průhybu tenkostěnné součástky pomocí vypočtených hodnot z tabulky 12 a hodnot průhybů, které byly určeny pomocí simulace v závislosti na změně polohy zatěžující síly.

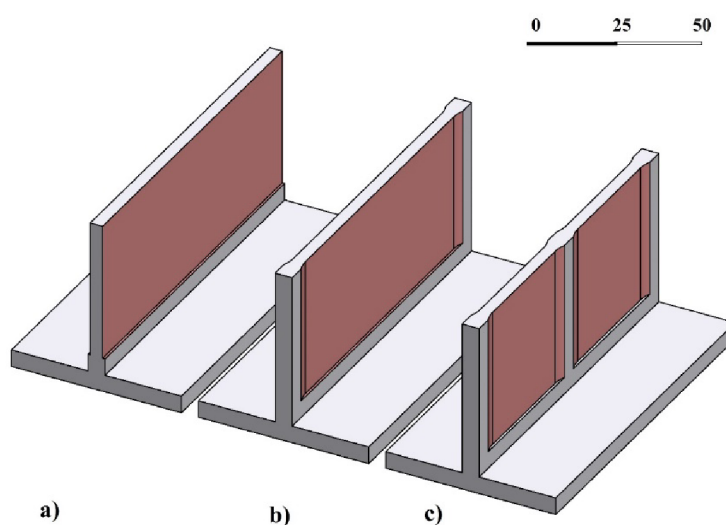


Obr. 45 Predikované hodnoty deformace tenkostěnné součástky v závislosti na poloze.

5.7 Návrh tenkostěnné součástky včetně technologie a strategie frézování

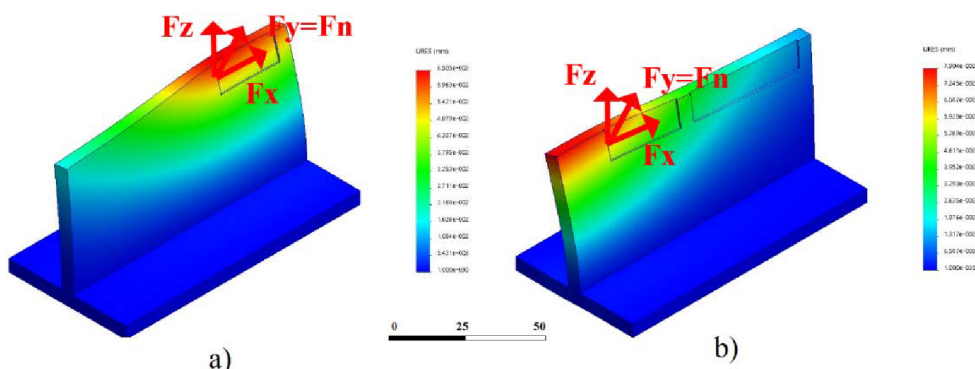
Volba tenkostěnné součástky

Pro experiment byla zvolena jedna ze tří variant tenkostěnné součástky. Vzhledem výchozímu polotovaru profilu T 50x50x5 mm byly navrženy 3 vhodné varianty A, B a C, které jsou na obrázku 46. Varianta A reprezentuje jednoduchou plochou stěnu, varianta B reprezentuje stěnu kde je navrženo zesílení stěny v rozích pro lepší tuhost na krajích obrobku a poslední varianta C je navržena podobně jako varianta B, jen s tím rozdílem, že zesílení stěny se provedlo i uprostřed součástky, pro ještě lepší stabilitu obrobku při frézování. Tyto navržené geometrické tvary mohou být v praxi určitým vzorem pro zlepšení tuhosti obrobku nejen při obrábění.



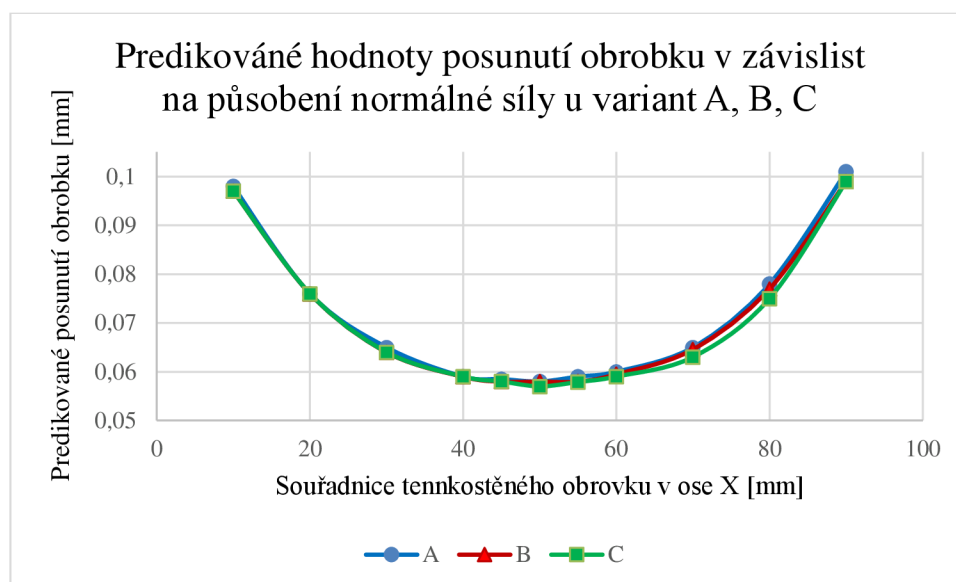
Obr. 46 Varianty modelu tenkostěnné součástky: a) jednoduchá plochá stěna b) stěna zesílená v rozích obrobku c) stěna zesílená v rozích i ve středu obrobku pro lepší tuhost.

Pro zvolení konkrétní varianty byla zvolena stejná metodika jako v předešlé části této diplomové práce, a to že jednotlivé vzorky prošly simulací pomocí softwaru SolidWorks 2015. Byly nastaveny stejné hodnoty jako v předchozí části a zatěžující síla byla zvolena ta vyšší $F_{N1} = 118 \text{ N}$. Na obrázku 47 je znázorněná metodika predikce posunutí pro konkrétní varianty.



Obr. 47 Predikce posunutí v prostředí SolidWorks 2015. a) varianta B b) varianta C.

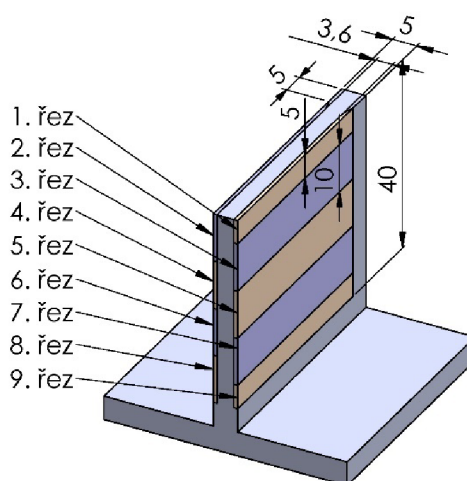
Tyto jednotlivé vzorky byly porovnány (viz obr. 48) a bylo rozhodnuto, že pro experiment se použije varianta B. Jelikož v rozích vykazovala o něco menší posunutí, kdy průhyb u varianty A je 0,098 mm a průhyb u varianty B je 0,097 mm, přičemž varianta C se přibližně rovná s variantou B. Tyto úpravy vzorků jsou vhodné, zejména u konstrukcí kde dochází k velkým úběrům materiálů nebo tam kde se chce docílit bezpečného a plynulého obrábění (omezení vzniku vibrací). Výkres varianty B je v příloze 6.



Obr. 48 Predikované hodnoty deformace jednotlivých variant v závislosti na poloze.

Volba strategie frézování

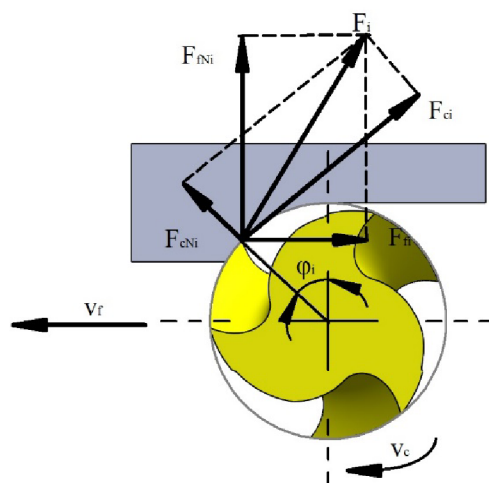
Podle navržených řezných podmínek, poměru výšky ke konečné tloušťce stěny, výchozímu polotovaru byla zvolena strategie nazývaná jako překrývané frézování, která je popsána v kapitole 4. Na obrázku 49 je znázorněná tato strategie přímo pro daný experiment. Součástka bude frézována na 9 řezů, kdy první a poslední (9. řez) řez bude probíhat při axiální hloubce 5 mm a další řezy budou probíhat při 10 mm.



Obr. 49 Schéma překrývaného frézování v řezu.

Volba technologie frézování

Pro frézování tenkostěnných součástí je preferováno sousledné frézování, které se vyznačuje řadou výhod. Takovou hlavní výhodou je, že splňuje požadavek na vysokou jakost obrobenej plochy. U sousledného frézování dochází k náhlému vstupu břitu do materiálu obrobku, tudíž obrábění začíná velkou tloušťkou třísky a postupně se zmenšuje až k nulové hodnotě (viz obr. 50). Velká tloušťka třísky je pro tento způsob frézování příznivá a řezné síly mají tendenci přitahovat obrobek směrem k fríze a udržovat tak břit v řezu.



Obr. 50 Sousledné frézování [1].

Hlavní výhody sousledného frézování [4]:

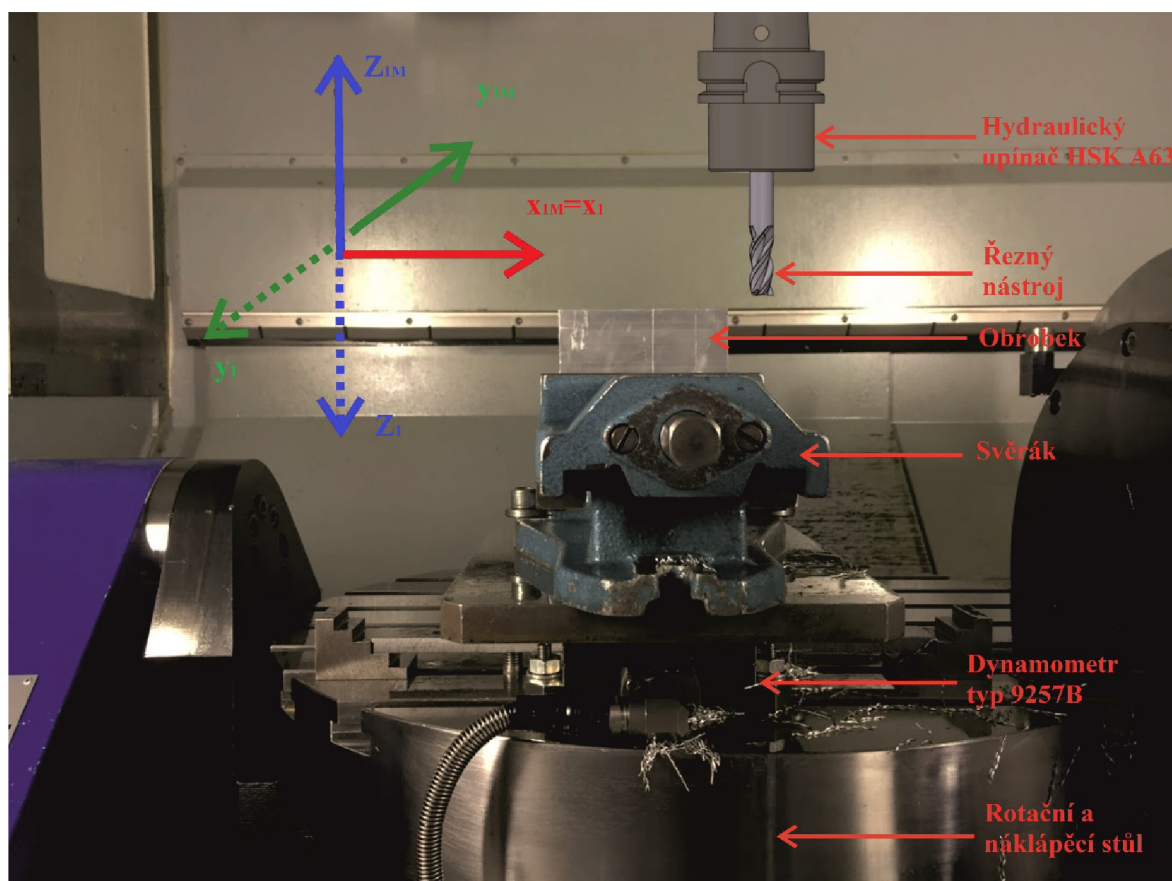
- vyšší trvanlivost břitu. Což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, takže lze použít jednodušší upínání,
- menší sklon ke chvění,
- menší potřebný řezný výkon,
- menší drsnost obrobenej povrchu,
- menší sklon k tvorbě nárůstku.

Nevýhody sousledného frézování [4]:

- nevhodné při obrábění polotovarů s tvrdým a znečištěným povrchem,
- silová zátěž každého zubu při záběru.

6 PRAKTICKÁ REALIZACE EXPERIMENTU

Praktická realizace experimentu probíhala v dílnách Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojního inženýrství v Brně za přítomnosti kvalifikovaného a vyškoleného zaměstnance. Tento experiment probíhal podle návrhu autora této práce. Na obrázku 51 je ukázka pracovního prostoru zvoleného moderního CNC stroje MCV 1210 a upnutí obrobku do strojního svěráku, který byl uchycen na horní desku dynamometru Kistler typ 9257B.



Obr. 51 Pracovní prostor s obrobkem určen kartézským souřadnicovým systémem frézky a dynamometru.

Praktická realizace byla rozdělena do těchto částí:

- stanovení vhodného posuvu pro experiment,
- ověření zvoleného posuvu oběma frézami,
- měření sílivého zatížení při frézování tenkostěnné součástky oběma frézami,
- vyhodnocení praktické části.

6.1 Stanovení řezných podmínek

Tato část experimentu je jedna z nejdůležitějších, jelikož zde je určen optimální posuv na zub pro praktickou realizaci experimentu při konkrétních podmínkách, které jsou zmíněné výše. Posuv na zub (f_z) je klíčovou hodnotou a odpovídá dráze, kterou urazí řezný nástroj během záběru jednoho zubu (pohyb frézy vůči obrobku). Tento parametr ovlivňuje tloušťku třísky, která je určujícím faktorem pro opotřebení frézy, řezné síly, teploty během procesu obrábění a utváření třísky. Příliš malý posuv znamená malá tloušťka třísky, která

může způsobit snížení životnosti nástroje (zvýšení tření a tepla při frézování), naopak velký posuv znamená velkou tloušťku třísky, která způsobuje velké zatížení a může tak dojít k vylovení ostří. Dále definuje hodnotu posuvné rychlosti (v_f) pro nástroj, která je důležitá pro programování stroje. Z toho všeho plyne, že správné nastavení posuvu, a tím i správné tloušťky třísky je pro frézování velice zásadní.

Určení vhodného posuvu probíhalo podle navržené metodiky zmíněné v kapitole 5. Kdy z 10 zvolených posuvů se určil právě jeden konkrétní. Při experimentu se postupovalo vylučovací metodou a to tak, že se hodnotil zvukový projev při frézování, kvalita povrchu na základě vizuálního dojmu a zkušenost obsluhy. Nejzásadnější byl zvukový projev, který určoval stabilitu procesu soustavy N-O. Experiment odhalil, že při zvyšování posuvu se zvětšovala tloušťka třísky, která byla doprovázena nepříjemnými zvukovými projevy. Posuvy určené pořadím 1, 2, 3, 4, 8, 9 a 10 byly z experimentu vyloučeny na základě zkoušky, která prokázala, že hodnoty těchto posuvů pro konkrétní řezné podmínky jsou doprovázeny nepřijatelnými rysy a to se projevilo špatným zvukovým projevem (vznik vibrací). Vyšší posuvy byly na tom mnohem hůře a působily velice nepříjemně pro bezpečnost frézování. Kdežto posuvy určené pořadím 5, 6 a 7 působily velice stabilně. Tento fakt byl určitě ovlivněn tím, že byli uprostřed součástky, ale vylučovací metodou, která spočívá v tom, pokud nějaká hodnota posuvu působí nestabilně na soustavu N-O tak je vyřazena a naopak hodnota, které působí stabilně se dá použít pro praktickou realizaci. Pomocí zkušenosti vyškoleného pracovníka byl určen posuv č. 6 ve vzdálenosti 50 mm od rohu obrobku a to na 0,08 mm, kterému odpovídá posuvová rychlost $3600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tento posuv nejevil známky vzniku vibrací, a tudíž by mohl splňovat kritéria pro obrábění tenkostěnné součástky. Dále splňuje požadavky na kvalitu povrchu a i na dobu záběru frézy, kde se chce docílit co nejmenší doby záběru a tím zkrácení působení vzniklých silových zatížení, které nám nepříznivě ovlivňují tenkostěnný obrobek a nástroj (viz kapitola 4).

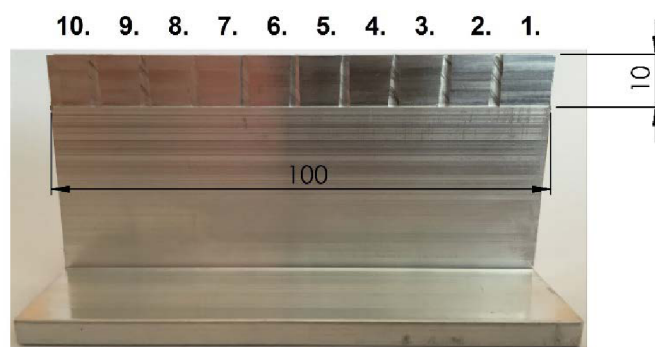
V tabulce 13 jsou uvedeny veškeré související hodnoty. Zvolené hodnoty byly navrženy autorem a vycházely z různých publikací a katalogů. Hodnoty určené výpočtem jako průřez třísky (A_d) a řezná síla (F_c) byly spočteny na základě vztahů (1.3) a (1.7). Hodnota posuvové rychlosti (v_f) byla určena posuvem na zub, který je vynásoben počtem efektivních zubů a počtem otáček stroje za časovou jednotku. Radiální síla působící na obrobek byla vypočítána pomocí řezné síly, která se přepočítala pomocí goniometrických funkcí. Naměřené parametry drsnosti R_a (střední aritmetická hodnota drsnosti) a R_z (největší výška profilu) byly změřeny až po experimentu a slouží jako orientační hodnoty, protože nesplňují náležitosti měření drsnosti. Grafy příslušných drsností najdeme v příloze 7. Měření drsnosti povrchu součásti bylo provedeno přístrojem na měření drsnosti povrchu od společnosti Taylor Hobson.

Tab. 13 Zvolené, spočítané a naměřené hodnoty pro zvolení optimálního posuvu na zub.

Pořadí	Zvolené hodnoty		Spočítané hodnoty				Naměřené hodnoty	
	Vzdálenost x [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Posuvová rychlost v_f [mm.min ⁻¹]	Průřez třísky A_d [mm ²]	Řezná síla F_c [N]	Radiální síla F_r [N]	R_a [μm]	R_z [μm]
1.	100	0,055	2475	0,198	179,784	84,403	0,2072	1,1139
2.	90	0,06	2700	0,214	194,312	91,224	0,2384	1,1945

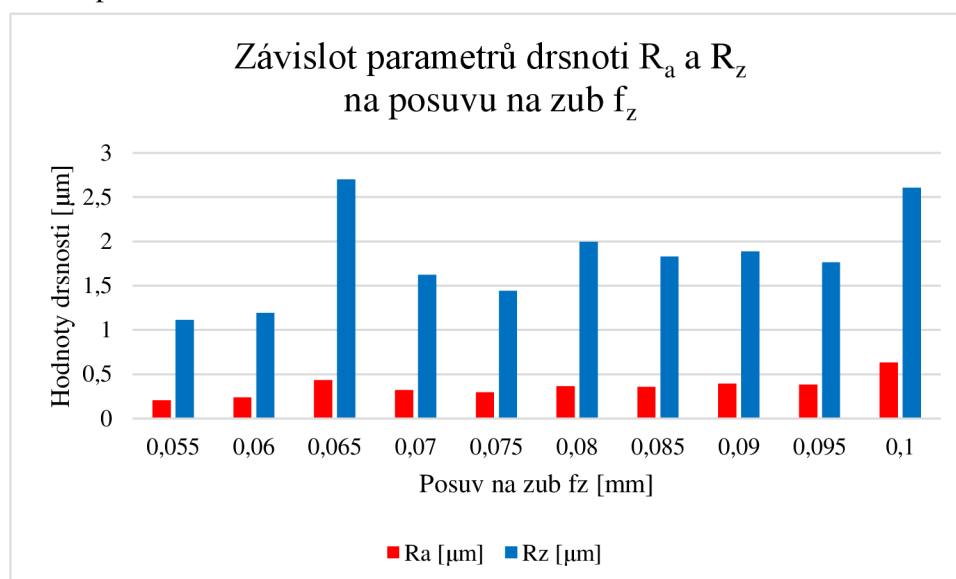
3.	80	0,065	2925	0,23	208,84	98,044	0,4349	2,6986
4.	70	0,07	3150	0,246	223,368	104,865	0,3218	1,6242
5.	60	0,075	3375	0,262	237,896	111,685	0,2975	1,4408
6.	50	0,08	3600	0,278	252,424	118,506	0,365	1,9941
7.	40	0,085	3825	0,294	266,952	125,326	0,3584	1,8292
8.	30	0,09	4050	0,31	281,48	132,147	0,3951	1,8871
9.	20	0,095	4275	0,326	296,008	138,967	0,3822	1,7639
10.	10	0,1	4500	0,342	310,536	145,788	0,6317	2,6067

Na obrázku 52 vidíme výsledky experimentu stanovení optimálního posuvu. Je zde zkušební vzorek o délce 100 mm, na kterém je 10 různých částí, kde byly použity posuvy z tabulky 13.



Obr. 52 Ukázka zkušební vzorku pro stanovení optimálního posuvu na zub.

Na obrázku 53 je grafické vyjádření drsnosti povrchu (parametry drsnosti R_a a R_z) v závislosti na posuvu.



Obr. 53 Graf parametrů drsnosti R_a a R_z závislé na posuvu na zub f_z .

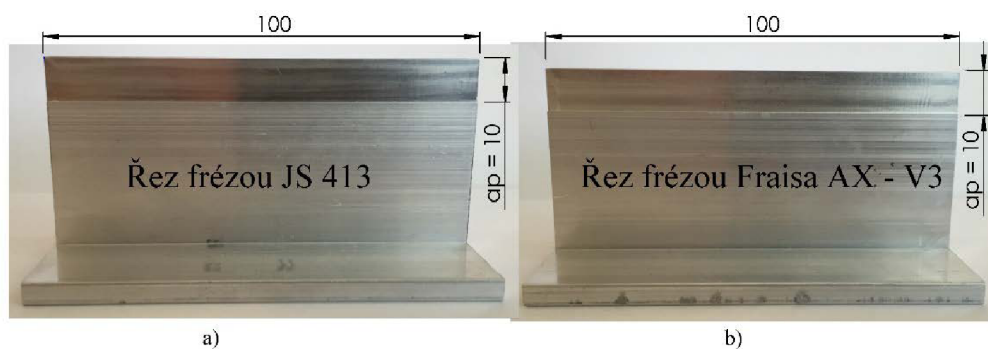
Pro stanovení vhodného posuvu na zub bylo zapotřebí vytvořit NC program, kde jeho část je prezentovaná v tabulce 14. Celý zápis NC programu lze nalézt v příloze 8.

Tab. 14 Část NC programu pro stanovení vhodného posuvu.

Č. bloku	Programový kód	Komentář
N10	G54	; Nastavitelné posunutí nulového bodu
N20	G64	; Režim řízení pohybu po dráze
N30	SOFT	; Zrychlení po dráze s omezením ryvu
N40	T="A"	; Vyvolání nástroje
N50	M6	; Výměna nástroje
N60	G1 Z10 F10000	; Lineární interpolace s pracovním posuvem, nastavitelný identifikátor, hodnota posuvu
N70	G1 X120 F10000	
N80	G1 Y-5.3 F10000	
N90	G1 Z-10 F1000	
N100	M3 S15000	; Vřeteno se otáčí vpravo, otáčky vřetene,
N110	M0	; Programovatelné zastavení
N120	G1 X90 F2475	
N130	M0	
N140	G1 X80 F2700	
...		
N280	G1 X10 F4275	
N290	M0	
N300	G1 X-20 F4500	
N310	M5	; Zastavení vřetena
N320	M30	; Konec programu

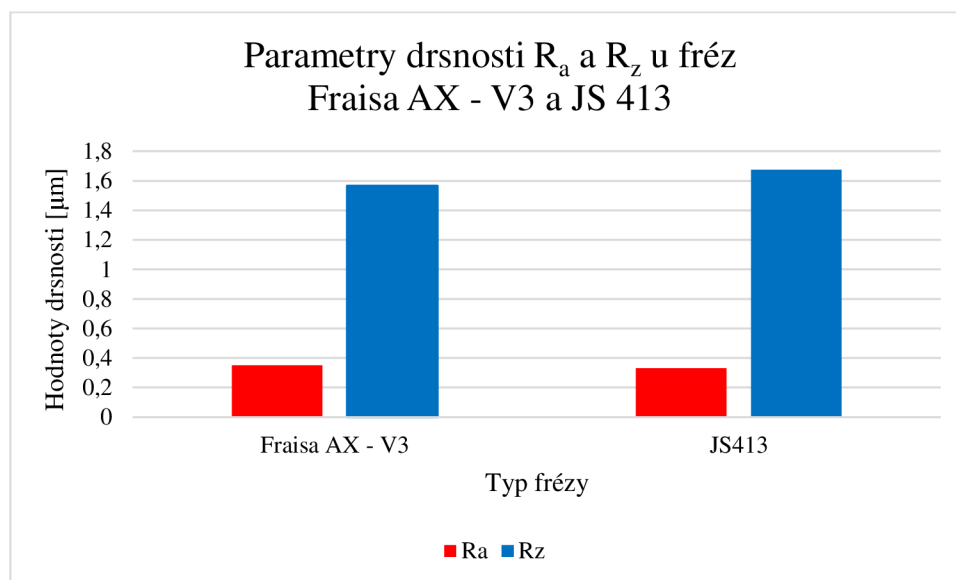
Ověření volby posuvu na zub f_z

Pro ověření vhodnosti posuvu na zub ($f_z = 0,08$ mm) pro experiment se provedla zkouška následujícím způsobem. Ověření probíhalo na zkušebním vzorku, kde byly provedeny dva lineární řezy (viz obr. 56) frézou JS 413 a frézou AX - V3. U těchto řezů se zaznamenávalo silové zatížení během frézování a sledovala se stabilita procesu, která prokázala, že při frézování nedochází k nijak výraznému zvukovému projevu, který by značil vznik vibrací.



Obr. 54 Lineární řez. a) frézou JS 413, b) frézou Fraisa AX – V3.

Následně se provedla kontrola drsnosti povrchu zkušebních řezů a výsledky jsou zobrazeny na obrázku 55. Hodnoty drsnosti u těchto fréz se přibližně rovnaly. Naměřené hodnoty pro frézu JS 413 jsou $R_a = 0,3312 \mu\text{m}$ a $R_z = 1,6757 \mu\text{m}$ a hodnoty pro frézu Fraisa AX - V3 jsou $R_a = 0,3495 \mu\text{m}$ a $R_z = 1,5664 \mu\text{m}$. V příloze 8 lze najít výsledky drsnosti vyhodnocené měřicí aparaturou od společnosti Taylor Hobson.



Obr. 55 Graf parametrů drsnosti R_a a R_z pro frézu JS 413 a frézu Fraisa AX – V3.

6.2 Praktická realizace tenkostěnné součástky

Tenkostěnná součástka byla frézována na moderním frézovacím CNC centru. Jako materiál pro polotovár byla použita hliníková slitina AlMgSi0,5 z profilu T o rozměrech 50 x 50 x 5 mm délky 100 mm. Tenkostěnný obrobek byl obráběn zmíněnými frézami ze slinutého karbidu, jednalo se o prodloužené verze těchto nástrojů o průměru $\phi 12$ mm. Během experimentu frézování tenkostěnné součástky (viz obr. 56) byly zaznamenávány jednotlivé složky silového zatížení (F_x , F_y , F_z) v kartézském souřadném systému dynamometru (x, y, z), které se vyhodnocovaly. V tabulce 15 jsou uvedeny klíčové hlavní parametry experimentu.

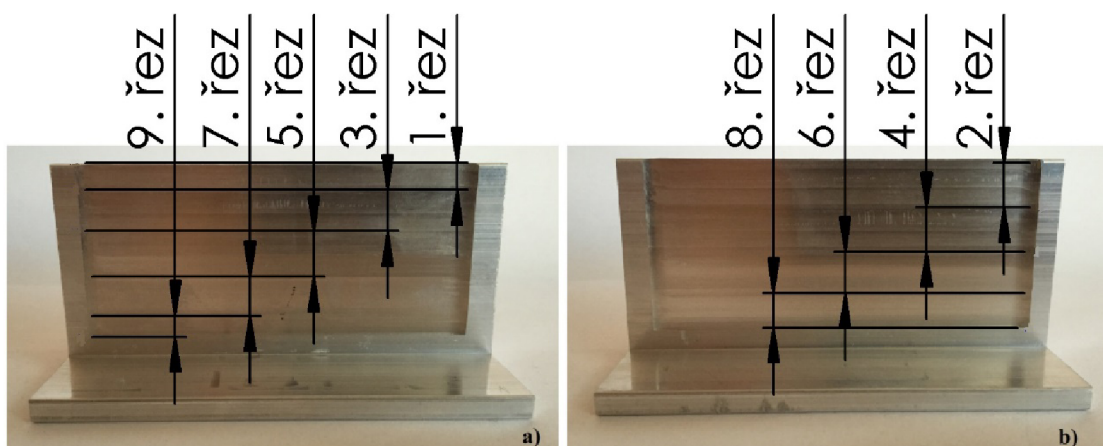
Tab. 15 Shrnutí klíčových parametrů experimentu.

Popis	Parametry
Typ CNC stroje/řídící systém	MCV 1210/ Sinumerik 840D (Tajmac - ZPS a.s.)
Řezné nástroje	JS413120D3SZ3.0 (Jabro Solid) 15561.501 (Fraisa SA)
Upnutí	Hydraulický upínač HSK 63A - CC2 (Pramet Tools s.r.o.) Redukční kleštiny RS 2012 (Pramet Tools s.r.o.)
Procesní kapalina	Cimstar 597
Řezná rychlost a otáčky	$v_c = 565 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $n = 15\,000 \text{ min}^{-1}$
Axiální řezná hloubka	$a_p = 5 - 10 \text{ mm}$
Radiální řezná hloubka	$a_c = 0,7 \text{ mm}$
Materiál obrobku	AlMgSi0,5 (EN AW - 6060 T6)

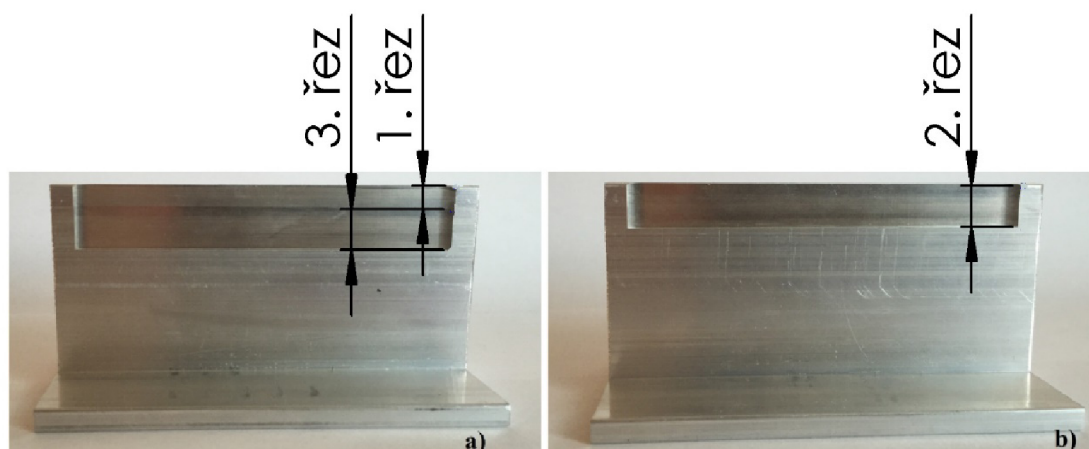


Obr. 56 Prostor stroje při frézování tenkostěnné součástky.

Pro praktický experiment byly frézovány dva polotovary dle výkresu tenkostěnné součástí (viz příloha 6), každá se frézovala jinou frézou. Obrobek č. 1 (viz obr. 57) byl frézován frézou JS 413 a frézování se provedlo kompletně. Obrobek č.2 (viz obr. 58) byl frézován frézou Fraisa AX - V3, ale z časové dotace na obrábění se provedly 3. řezy. Frézování probíhalo dle navrženého experimentu a to souledně se strategií překrývaného frézování. Pro tyto obrobky byly vytvořeny programy pro obrábění pomocí systému ShopMill a jeho programovacího nástroje (Editor pracovních psotupů). Byly vytvořené dvě kontrury, každá pro jednu stranu obrobku dle zadání tenkostěnné součástky. Ukázka těchto programů včetně fotodokumentace ze ShopMillu je v příloze 10.



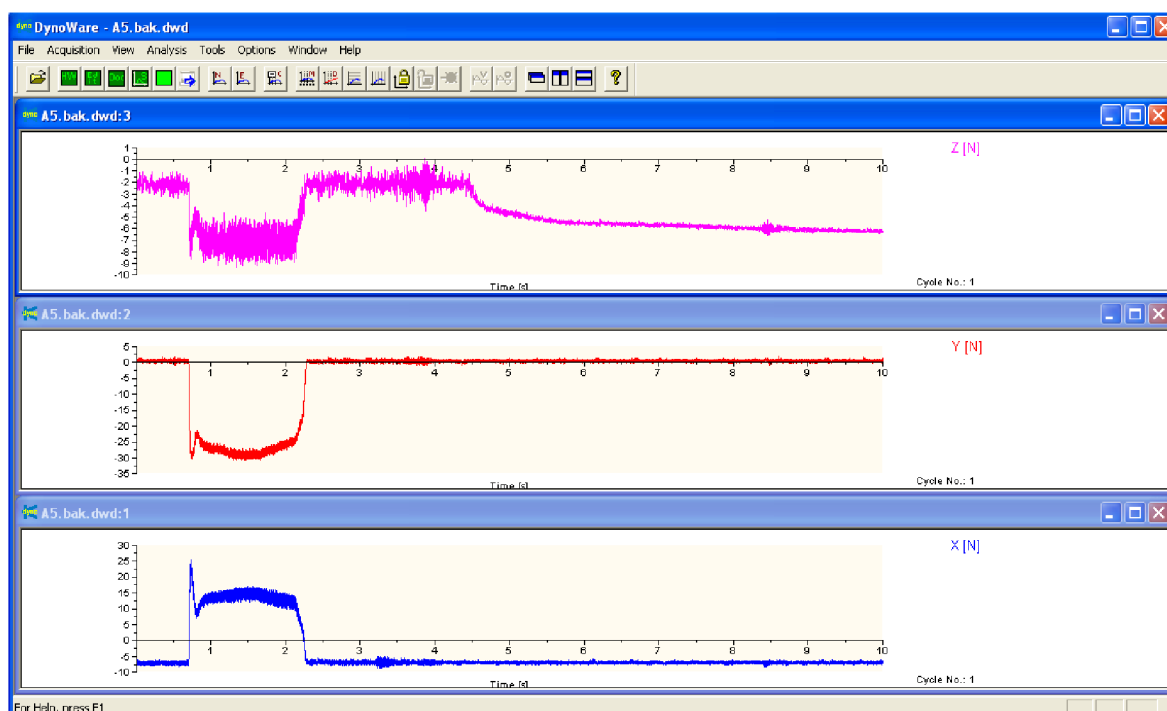
Obr. 57 Praktická ukázka překrývaného frézování na obrobku č.1. a) přední strana, b) zadní strana.



Obr. 58 Praktická ukázka překrývaného frézování na obrobku č.2. a) přední strana, b) zadní strana.

6.3 Vyhodnocení silového zatížení při frézování

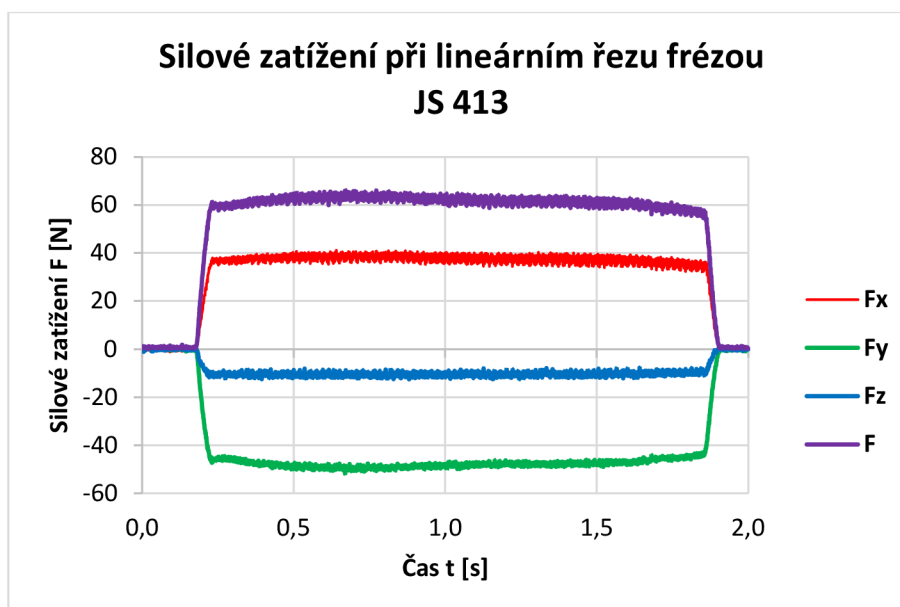
Silové zatížení bylo měřeno u posouzení volby optimálního posuvu na zub a u frézování tenkostěnné součástky zvolenými reznými nástroji. Toto zatížení bylo pečlivě zaznamenáváno měřicí aparaturou Kistler. Naměřená data u patřičných řezů byla pomocí PC a specializovaného softwaru Dynoware (viz obr. 59) ukládána do textového souboru v ASCII kód k dalšímu a snadnějšímu zpracování. Vzhledem k tomu, že výstupem měření z dynamometru je velké množství dat, obsahující informace o jednotlivých složkách silového zatížení (F_x , F_y , F_z), je nezbytné provést matematickou transformaci dat a jejich filtraci. Tato filtrace a transformace probíhala pomocí MS Excelu, kde byly zpracovány jednotlivé složky silového zatížení F_x , F_y a F_z v závislosti na průběhu a doby frézování. Následně tyto upravené hodnoty byly vyneseny do grafů níže uvedených.



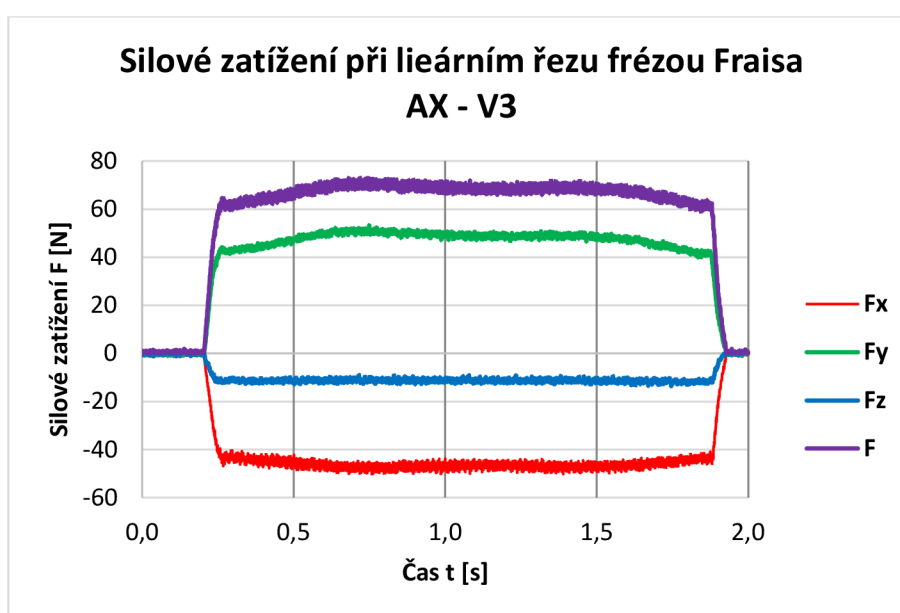
Obr. 59 Ukázka ze softwaru Dynowaru.

Vyhodnocení silového záznamu při posouzení volby optimálního posuvu na zub

Na obrázcích 60 a 61 je graficky znázorněn průběh silového zatížení pro jednotlivé řezné nástroje v závislosti na čase. Na každém silovém záznamu lze sponzorovat 4 specifické řezné fáze během frézování (vstupní, stacionární, výstupní a fáze uvolnění). Každá z těchto fází má vliv na řezný nástroj a obrobek (opotřebení nástroje, vliv na průhyb nástroje a obrobku). Při vstupní fázi, kdy řezný nástroj začíná odebírat materiál, se silové zatížení začne z nulové hodnoty zvyšovat a trvá do té doby, dokud se zatížení neustálí kolem průměrné úrovně stacionární fáze. Další je řezná fáze, ve které silové zatížení osciluje kolem stacionární hodnoty zatížení. Po řezné fázi následuje výstupní, u které dochází ke snižování silového zatížení.



Obr. 60 Silové zatížení při lineárním řezu frézou JS 413.



Obr. 61 Silové zatížení při lineárním řezu frézou Fraisa AX – V3.

Při tomto experimentu je nejdůležitější silové zatížení u složky F_y , která působí na nástroj jako síla radiální (F_R) a její opačný ekvivalent je normálová síla (F_N), která působí na obrobek (tenkostěnná součástka). Podle grafických vyjádření je zřejmé, že pro lineární dráhu řezného nástroje jsou průběhy (fáze) silového zatížení pro jednotlivé nástroje velice podobné. V tabulce 16 jsou uvedeny maximální hodnoty jednotlivých složek včetně výsledné síly F .

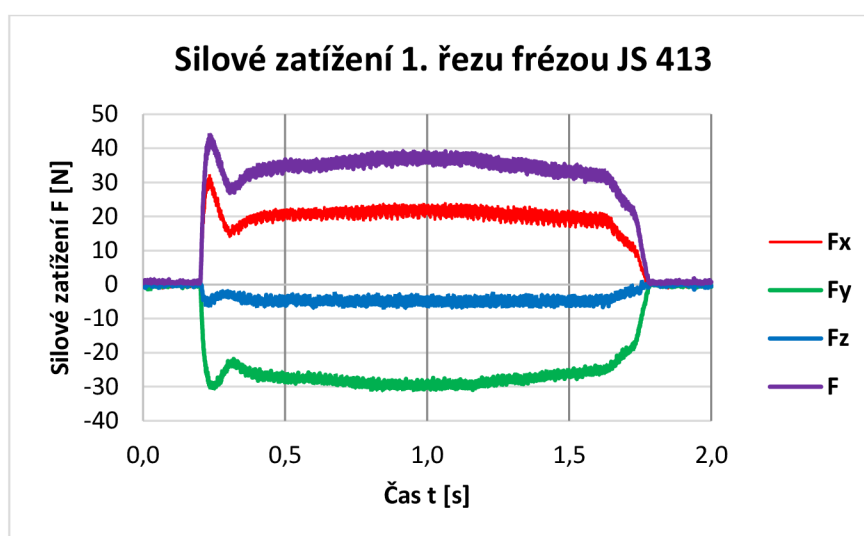
Tab. 16 Maximální hodnoty zatížení u jednotlivých složek.

Označení frézy	Silové zatížení			
	$F_{x\max.}$ [N]	$F_{y\max.}$ [N]	$F_{z\max.}$ [N]	$F_{\max.}$ [N]
JS 413	41,19	-52,02	-12,68	66,22
Fraisa AX - V3	-50,5	53,47	-13,67	73,23

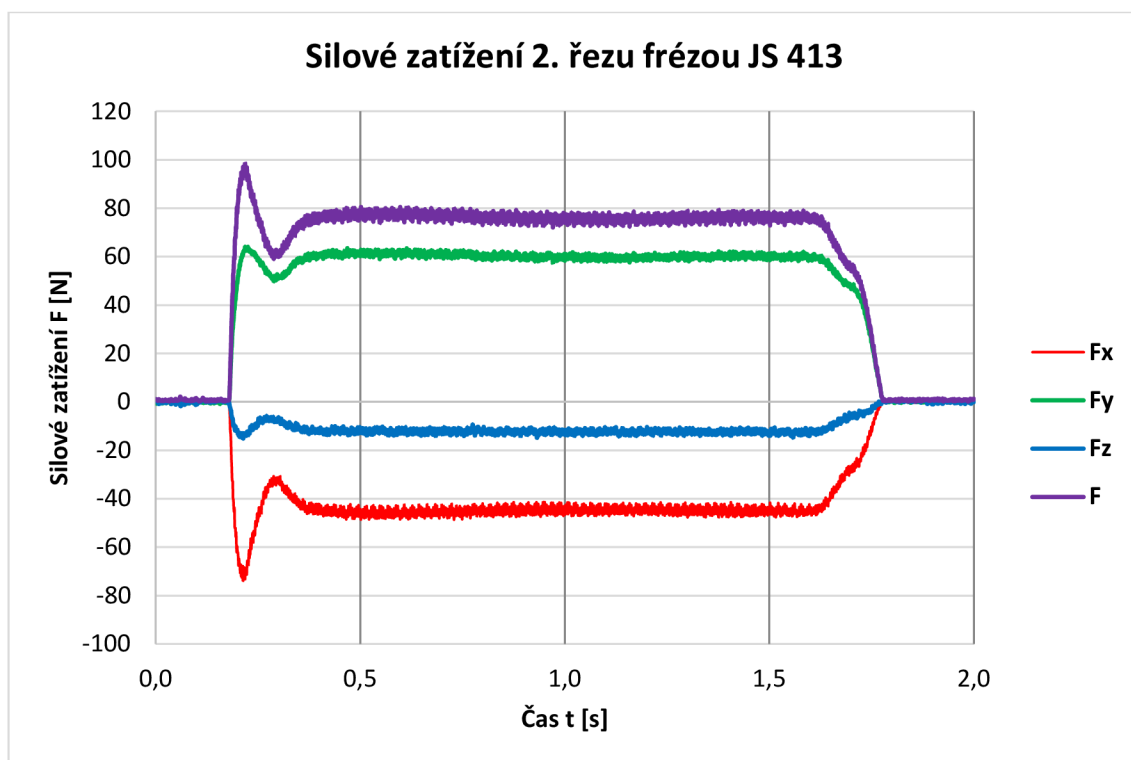
Z této silové analýzy byla i určena síla 50 N, která vychází ze silového zatížení v ose y frézami JS 413 a Fraisa AX - V3. Tato hodnota byla zaokrouhlena pro názornější výpočty.

Vyhodnocení silového záznamu při frézování tenkostěnné součástky

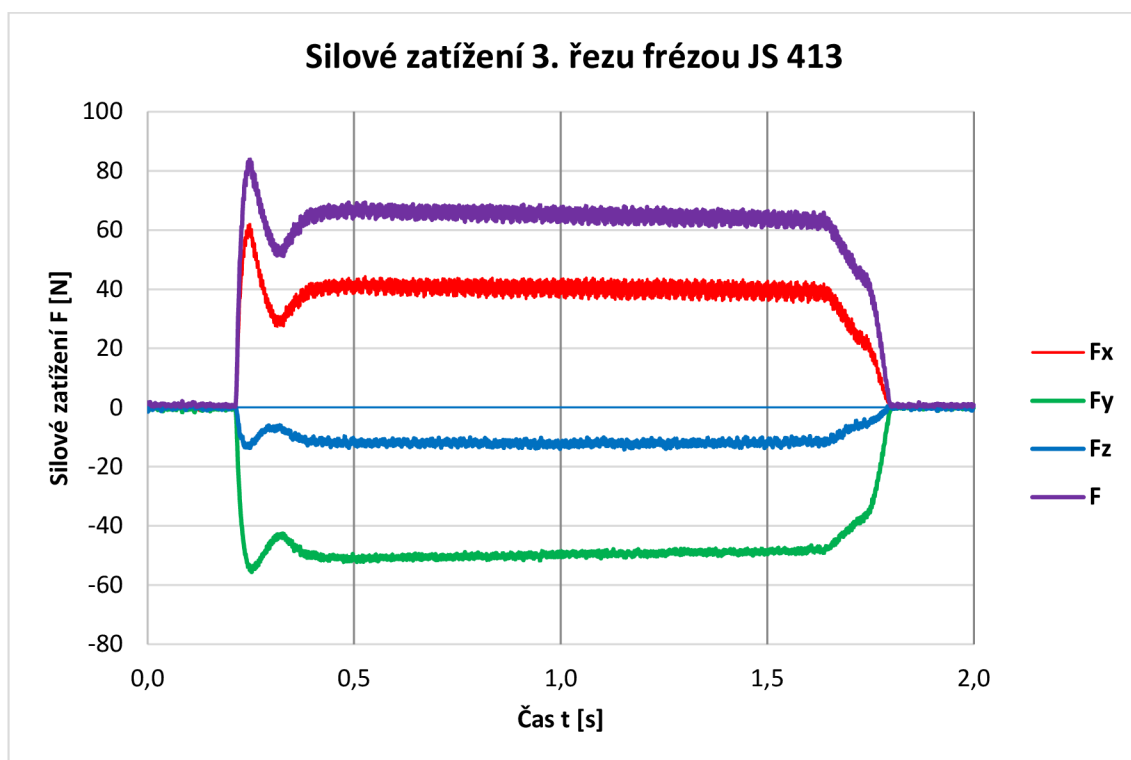
Na obrázcích 62 až 67 graficky znázorněno silové zatížení pro 3 řezy pro každou frézu. Tyto řezy vychází z geometrie obrobku a zvolené strategie frézování, kde první řez měl poloviční hodnotu axiální hloubky řezu ($a_p = 5$ mm) a následující řezy byly provedeny s axiální hloubkou 10 mm. Na první pohled jde vidět, že průběh silového zatížení je úplně odlišný od předchozích zatížení. Nejvýraznější rozdíl průběhu je ve vstupní a výstupní fázi, řezná fáze a fáze uvolnění vykazuje stejný průběh jako u předchozích. Výrazný rozdíl je způsoben geometrií obrobku, kdy pro zvýšení tuhosti tenkostěnné součástky bylo navrženo zesílení stěny v rozích, které ovlivnilo způsob nájezdu a výjezd frézy ze součástky. Nájezd a výjezd frézy byl řešen radiálním obloukem, kdy frézování bylo naprogramováno pomocí kruhové interpolace. Při vstupní fázi lze vidět též nárůst silového zatížení z nulové hodnoty, protože dochází k opásání frézy a tento efekt způsobí zvětšení a následně snížení silového zatížení do začátku druhé fáze, kde zatížení má podobný průběh jako lineárního frézování. Naopak u fáze výstupní lze pozorovat výrazné a postupné zmenšování silového zatížení, které je způsobeno výjezdem po kruhové interpolaci nástroje z obrobku.



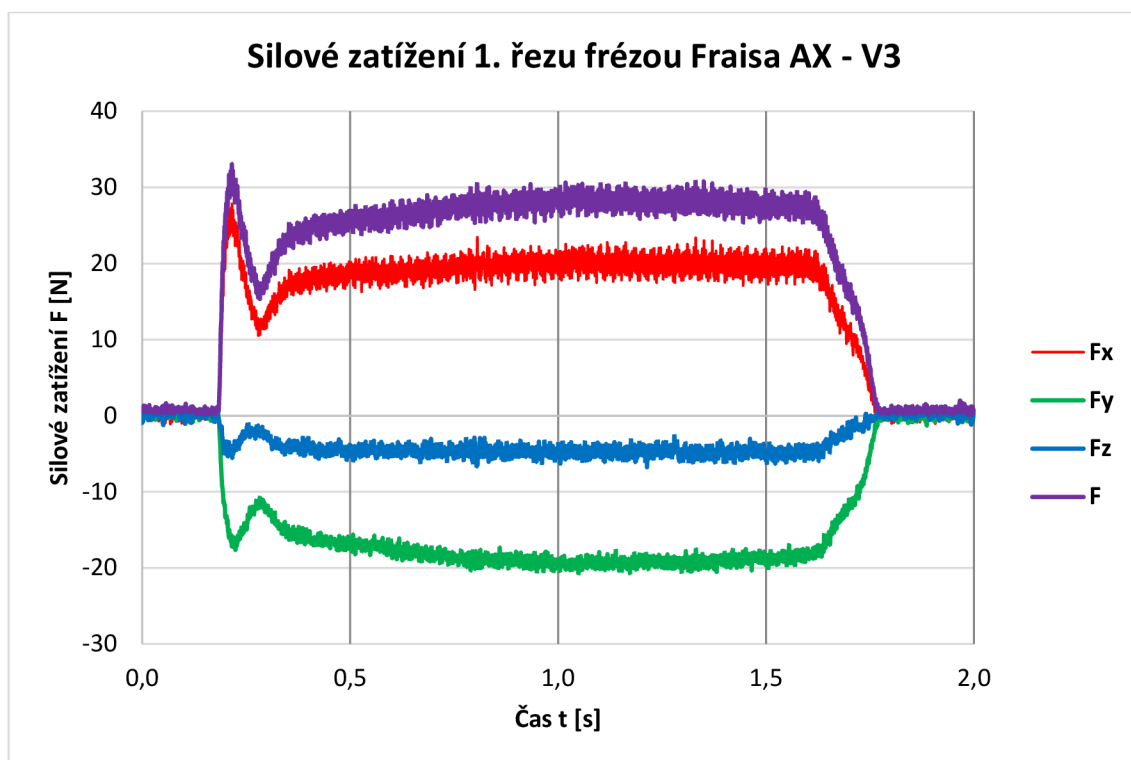
Obr. 62 Silové zatížení 1. řezu frézou JS 413.



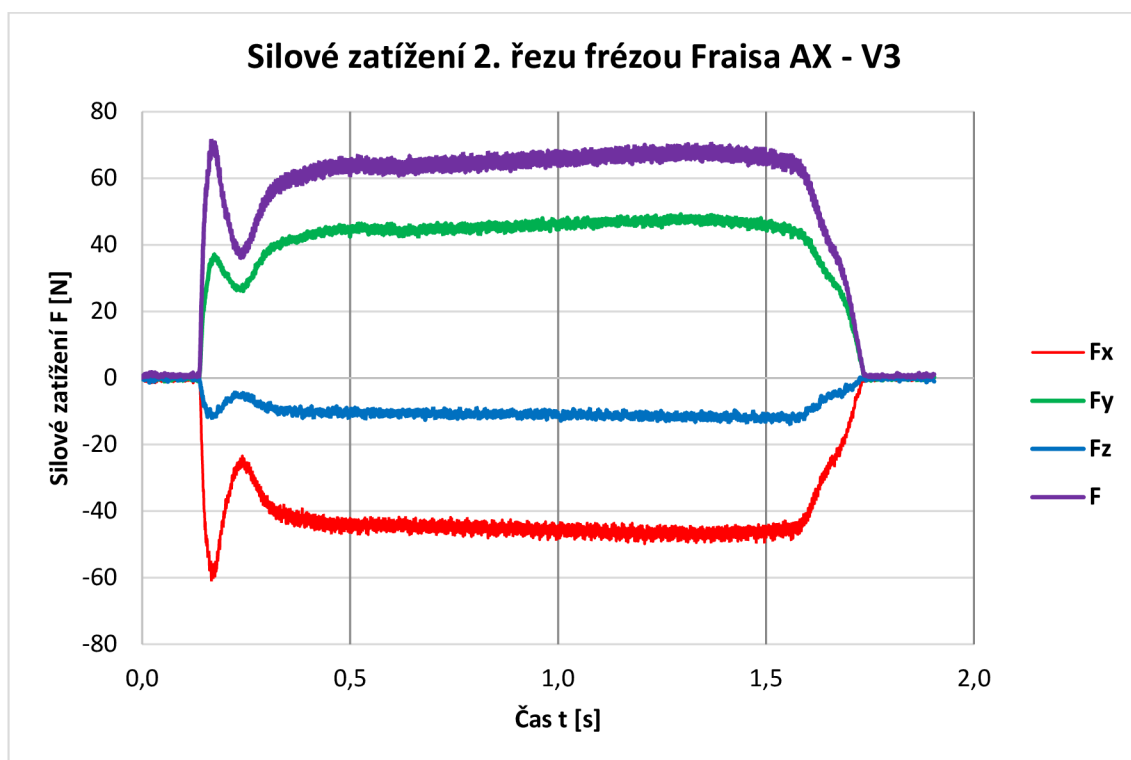
Obr. 63 Silové zatížení 2. řezu frézou JS 413.



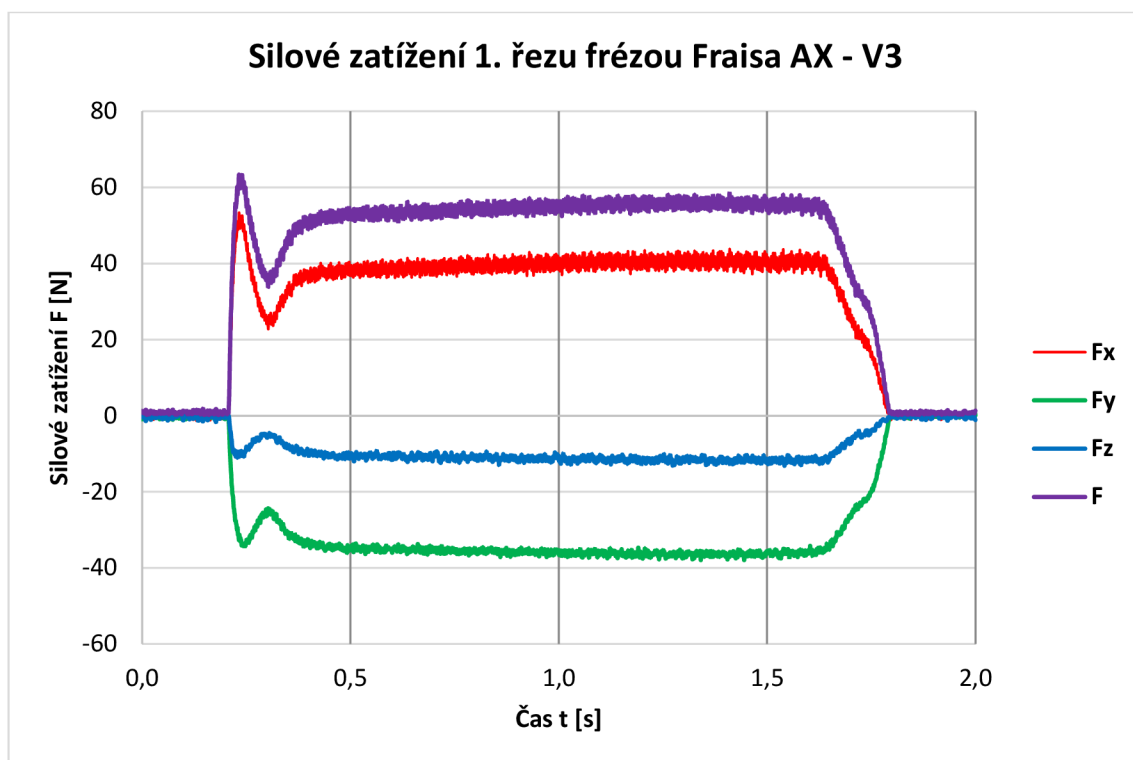
Obr. 64 Silové zatížení 3. řezu frézou JS 413.



Obr. 65 Silové zatížení 1. řezu frézou Fraisa AX – V3.



Obr. 66 Silové zatížení 1. řezu frézou Fraisa AX – V3.



Obr. 67 Silové zatížení 1. řezu frézou Fraisa AX – V3.

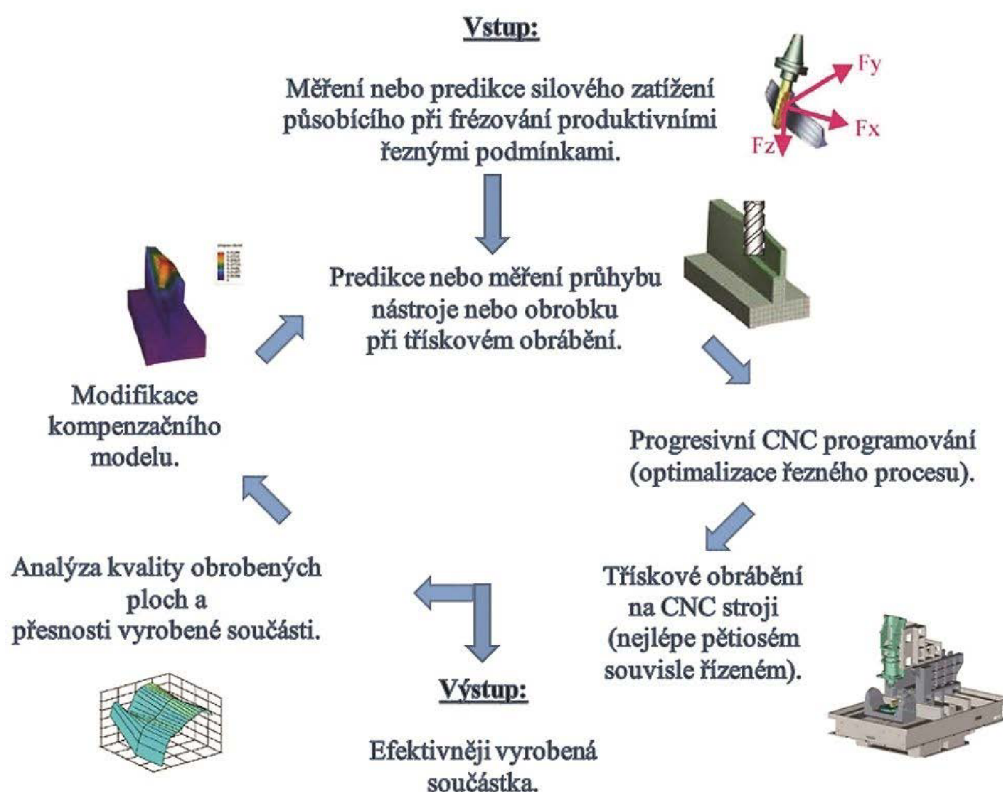
Z grafického hlediska lze zpozorovat, že průběhy silového zatížení pro obě frézy jsou velice podobné, i když při stejných řezných podmínkách vykazují odlišné hodnoty silového zatížení. Tyto odlišnosti mohly být způsobeny například tím, že každá fréza je od jiného výrobce a i přes specifické společné parametry (počet zubů, úhel čela, úhel sklonu šroubovice) se odlišují ve výrobní technologii, řezném materiálu nebo třeba v ostrosti břitů nástroje. V tabulce 16 jsou uvedeny maximální hodnoty jednotlivých složek včetně výsledné síly F.

Tab. 17 Maximální hodnoty zatížení u jednotlivých složek.

Fréza	Řez	Silové zatížení			
		F _{xmax.} [N]	F _{ymax.} [N]	F _{zmax.} [N]	F _{max.} [N]
JS 413	1.	32,3	-31,19	-7,03	44,15
	2.	-73,92	64,2	-15,18	98,56
	3.	62,1	-55,64	-14,29	83,95
Fraisa AX - V3	1.	27,93	-20,8	-6,77	33,08
	2.	-60,97	49,15	-13,96	71,51
	3.	53,39	-37,97	-13,12	63,37

DISKUZE

Neustálý tlak na snižování nákladů při obrábění a zkracování dodacích lhůt vyrobených dílů, tlačí na výrobce i na jejich konkurenceschopnost. Vysoce přesné obrábění složitých dílů (např. tenkostěnných dílů) je klíčovým faktorem současné moderní doby. Pro dosažení co možná nejlepšího výsledku se využívá CAD/CAE/CAM systémů, které nám pomáhají například optimalizovat výrobní proces, volbu vhodné strategie obrábění a dráhy nástroje. Většina konvenčních přístupů k řešení procesu obrábění je založena na ideálních stavech, které neberou v úvahu některé důležité faktory, jako je třeba změna velikosti (směru) silového zatížení při obrábění nebo pružnou deformaci nástroje a obrobku. Obrábění se zkoumá již řadu desítek let, kdy bylo vymyšleno, popsáno a odzkoušeno mnoho modelů, které se zabývaly určitými specifickými problémy - jako například opotřebení řezných nástrojů, vliv řezných materiálů při obrábění a další. Problematika obrábění tenkostěnných dílů je poměrně „mladá“, proto tu je velký prostor pro další zkoumání. Dnes je již několik zpracovaných studií, ve kterých lze nalézt nové a přesnější postupy a výsledky, které prohlubují dosavadní znalosti této problematiky. Správné pochopení a následná aplikace těchto nových poznatků jsou zárukou dobrých výsledků. Takový vhodný způsob je znázorněn na obrázku 68.



Obr. 68 Schéma modelu přístupu k progresivnímu frézování [35].

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo uskutečnění experimentu měření silového zatížení monolitními stopkovými frézami ze SK při obrábění tenkostěnné součástky. V teoretické části byly řešeny dílčí body této práce. Popsání technologie frézování se zaměřením na rozbor sil vznikajících při frézování, možnostmi měření silového zatížení, včetně rozdělení a s jejich stručnou charakteristikou. V této části je i kapitola věnovaná hliníku a jeho slitinám se zaměřením na využití včetně definování jejich obrobitelnosti. Poslední kapitola teoretické části je věnována tenkostěnným součástkám.

V praktické části byl proveden návrh experimentu, který by měl ukázat a rozšířit znalosti o tom, jak postupovat při řešení tohoto úkolu. Zde byla navržena technologie a strategie frézování pro konkrétní soustavu nástroj-obrobek, která se nazývá překrývané frézování. Návrh řezných podmínek, které musely být prakticky ověřeny. Byl navržen geometrický tvar tenkostěnné součástky (varianta B), která zohledňuje tuhost obrobku při frézování vycházející z části, kde byla provedena predikce. Cílem predikce bylo znázornění deformací obrobků a nástrojů, působením vypočítané teoretické síly $F = 118 \text{ N}$ a síly, která byla stanovená z výsledků experimentu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 11, kde je vidět že řezné nástroje vykazují větší průhyb jak tenkostěnná součástka. U této tenkostěnné součástky byla provedena simulace pomocí MKP v softwaru SolidWorks, která ukázala, že průhyb v rozích je větší jak průhyb součástky v jejím středu pro zmíněné zatížení. Hodnoty průhybu při simulaci by měly reprezentovat reálnější výsledky jak hodnoty vypočítané, tento rozdíl je graficky vyjádřen na obrázku 45. Zavedením těchto hodnot průhybu stěny do programu CNC stroje umožní redukcí těchto průhybu a tím zlepšit výsledky obrobeného povrchu.

Praktická realizace experimentu byla rozdělena do dvou etap. První etapa byla stanovena vhodný posuv na zub, který byl vybrán z 10 navržených posuvů – optimální posuv na zub $f_z = 0,08 \text{ mm}$. Tímto krokem bylo řešeno konečné stanovení řezných podmínek pro praktickou ukázkou výroby tenkostěnné součástky. Ve druhé etapě vybranými řeznými nástroji ze SK od společnosti SECO TOOLS s.r.o. a společnosti FRAISA AS byla provedena výroba tenkostěnné součástky podle výkresu. Při frézování bylo pečlivě zaznamenáváno silové zatížení aparaturou od společnosti KISTLER. Následná analýza tohoto zatížení byla zaznamenána do grafů v poslední části kapitoly 6, kde je vidět specifický průběh silového zatížení při frézování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění - 1.část*. Brno, 2003. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT -FSI, Ústav strojírenské technologie.
- [2] SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [3] FOREJT, M, PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] BRYCHTA, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [5] BUDAK, E. Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, 46(12-13), 1478-1488. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009. ISSN 08906955. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002622>
- [6] ZOUHAR, J. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýza mechanismu tvorby třísky*. Brno, 2009. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [7] MACEK, K., ZUNA, P. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- [8] FIALA, Z. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie*. Brno, 2014. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [9] STAHL, Jan-Eric. *Metal cutting: theories and models*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012. ISBN 978-91-637-1336-1.
- [10] TLUSTY, J. *Manufacturing processes and equipment*. 1 st edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, c2000. ISBN 02-014-9865-0.
- [11] *Frézování III: odborná konference FSI VUT v Brně Ústavu strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o., ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE, a.s., Zlín a dalšími společnostmi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. ISBN 80-214-2436-2.
- [12] HUMÁR, A. *Měření řezných sil a odporů*. Brno, 2012. Přednášky. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] *Metal cutting: theories and models*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012. ISBN 978-91-637-1336-1.
- [14] CHILDS, T. *Metal machining: theory and applications*. New York: Wiley, 2000. ISBN 04-703-9245-2.
- [15] VAŠÍČEK, J. *Silové zatížení řezných nástrojů při frézování*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 ., příloh 2. Vedoucí práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [16] HAVELKA, O. SCHMACHTL CZ. *Síla bude změřena* [online]. MM průmyslové spektrum, 2008 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena.html>
- [17] VTS ZLÍN: *Snímače* [online]. b.r. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/snimace.php#snimace-foliove>
- [18] MICHNA, Š., MICHNOVÁ, L. *Neželezné kovy*. Vyd. 1. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 978-80-260-7132-7.

- [19] *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [20] ŠMEJKALOVÁ, J. Jak na hliník?. *MM Průmyslové spektrum: výroba a zpracování* : [příloha časopisu *MM průmyslové spektrum*]. Praha: Vogel Publishing, 1997-2015, (12), 2. ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/151213>
- [21] WORLD ALUMINIUM: IMAGE GALLERY. *WORLD ALUMINIUM* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.world-aluminium.org/images/>
- [22] *CHEMICAL HERITAGE FOUNDATION: Paul Héroult, Charles M. Hall, and Julia Brainerd Hall* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.chemheritage.org/discover/online-resources/chemistry-in-history/themes/electrochemistry/heroult-hall-hall.aspx>
- [23] PRIMARY ALUMINIUM PRODUCTION. In: *World Aluminium* [online]. 2016 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.world-aluminium.org/statistics/>
- [24] *SPOTREBA hliníku 2016* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.statista.com/statistics/280983/share-of-aluminum-consumption-by-sector/>
- [25] Aluminum: Periodic Table Element. *Inorganic Ventures* [online]. 2013 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.inorganicventures.com/element/aluminum>
- [26] NĚMEC, M., PROVAZNÍK, J. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [27] NOVOTNÝ, M. *Technologie CNC výroby součástí z hliníkové slitiny*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [28] BIZARRE, I. *Alucad bohemia: technické udaje*. 1. 2009. Dostupné také z: http://www.alucad.cz/public/var/files/file_109.pdf
- [29] SANTOS, Mário C., Alisson R. MACHADO, Wisley F. SALES, Marcos A. S. BARROZO a Emmanuel O. EZUGWU Machining of aluminum alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, , -. DOI: 10.1007/s00170-016-8431-9. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-8431-9>
- [30] KOVÁČ, Martin. Počítačová podpora výroby frézování tenkostěnných součástek v PowerMILLu. In: *CAD.cz* [online]. b.r. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/4164-pocitacova-podpora-vyroby-frezovani-tenkostennych-soucetek-v-powermillu.html>
- [31] KOVÁČ, M a I BURANSKÝ. Experimental determination of milling model for thin-walled parts. In: *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*. 2013, s. 123-126. ISSN 2067-3809.
- [32] SMITH, S. a D. DVORAK Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs. *Mechatronics*. 1998, **8**(4), 291-300. DOI: 10.1016/S0957-4158(97)00058-5. ISSN 09574158. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415897000585>
- [33] Frézování do rohu v případě tenkých a poddajných stěn. In: *SANDVIK Coromant* [online]. b.r. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/shoulder_milling/shoulder_milling_thin_walls/
- [34] RUSINEK, R a K. ZALESKI. Dynamics of thin-walled element milling expressed by recurrence analysis. *Meccanica*. b.r., , -. DOI: 10.1007/s11012-015-0293-y. ISSN 0025-6455. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11012-015-0293-y>
- [35] POLZER, A. Deformace stopkových frézovacích nástrojů při obrábění. *MM Průmyslové spektrum*. 2015, **2015**(5). ISSN 1212-2572.

- [36] POLZER, A, K DUFKOVÁ a P POKORNÝ. *ON THE MODERN CNC MILLING WITH A COMPENSATION OF CUTTING TOOLS AND THIN- WALLED WORKPIECE DEFLECTIONS*. Journal of Machine Engineering, 2015. č.3. ISSN 1895-7595.
- [37] POPMA, M. *Computer aided process planning for high-speed milling of thin-walled parts: Strategy-based support*. Enschede, 2010. Dostupné také z: http://doc.utwente.nl/71548/1/thesis_M_Popma.pdf. PHD Thesis. University of Twente. Vedoucí práce Prof. Dr. Ir. F.J.A.M. van Houten.
- [38] TLUSTY, J., S. SMITH a W.R. WINFOUGH *Techniques for the Use of Long Slender End Mills in High-speed Milling*. b.r., , -. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63088-1. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607630881>
- [39] OUWERKERK, G. Van. *For use in CAPP for high-speed milling of thin-walled product (OPM-719)*. Eschede, 2003. M.Sc. Thesis. University of Twente.
- [40] IZAMSHAH R.A., R., John P.T. MO a Song Lin DING. Finite Element Analysis of Machining Thin-Wall Parts. *Key Engineering Materials*. 2010, **458**, 283-288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.458.283. ISSN 1662-9795. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/KEM.458.283>
- [41] Portálové obráběcí centrum MCV 1210. *TAJMAC - ZPS* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.tajmac-zps.cz/cs/MCV-1210>
- [42] Customer Zone: Seco Guide. *Seco Tools* [online]. 2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <https://secure.secotools.com/mypages/portal/#dashboard/Portal/ProductSearch>
- [43] HASTLER, R. *High-performance milling tools: passion for precision*. 1. FRAISA SA, 2014.
- [44] ECatalog Pramet Tool. *Pramet Tools* [online]. 2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/default.aspx>
- [45] ISO N Neželezné materiály: MC kódy pro materiály typu N. In: *Sandvik Coromant* [online]. Sandvik Coromant, 2014 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_non_ferrous_materials/pages/default.aspx
- [46] *ROZVOJ INFORMAČNÍCH A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ PODPORUJÍCÍCH AKREDITOVANÉ STUDIJNÍ PROGRAMY A ŘÍZENÍ VYSOKÉ ŠKOLY: Dílčí zpráva k projektu č. 456*. Vysoké učení technické v Brně, 2006. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Vybaveni_CNC_KISTLER_JC.pdf
- [47] *Kistler: Kistler – Measuring Systems and Sensors* [online]. Kistler Holding AG, 2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/cz/en/>
- [48] HUMÁR, A. *MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE: Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI*. Brno, 2006. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

Způsoby citací jednotlivých zdrojů, členění, odkazy v textu, příklady, uvádí norma ČSN ISO 690 v aktualizovaném vydání ze dne 1. března 2011, dostupná k nahlédnutí v areálové knihovně FSI VUT v Brně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	průřez třísky
$A_{5(10)}$	[%]	tažnost
C	[F]	kapacita
D_c	[mm]	průměr frézovacího nástroje
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
F	[N]	celková řezná síla
F_1	[N]	celková síla vyvolaná řeznou částí jednoho břitu
F_{c1}	[N]	řezná síla působící na jeden břit frézy
F_{cN1}	[N]	kolmá řezná síla působící na jeden břit frézy
F_{f1}	[N]	posuvová síla působící na jeden břit frézy
F_{h1}	[N]	horizontální síla působící v ortogonální rovině na jeden břit
F_{p1}	[N]	pasivní síla působící na jeden břit frézy
F_x	[N]	silová složka dynamometru pro měření zatížení v ose X
F_{x1M}	[N]	síla působící v ose X stroje a snímače a na jeden břit frézy
F_y	[N]	silová složka dynamometru pro měření zatížení v ose Y
F_{y1M}	[N]	síla působící v ose Y stroje a snímače a na jeden břit frézy
F_z	[N]	silová složka dynamometru pro měření zatížení v ose Z
F_{z1M}	[N]	síla působící v ose Z stroje a snímače a na jeden břit frézy
I	[mm ⁴]	kvadratický moment setrvačnosti
K_t	[-]	konstanta
K_r	[-]	konstanta
L	[H]	indukčnost
M_k	[N.m]	hodnota řezného momentu
M_{kb}	[N.m]	užitečný výkon stroje
$P_{už}$	[W]	užitečný výkon
R	[N]	řezny odpor
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_m	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mezi kluzu
R_z	[μm]	největší výška profilu
a	[nm]	parameter mřížky
a_e	[mm]	radiální šířka řezu
a_p	[mm]	axiální šířka řezu
b	[mm]	šířka tenké stěny
b_i	[mm]	okamžitá šířka třísky
f_z	[mm]	posuv na zub
h	[mm]	tloušťka tenké stěny
h_i	[mm]	okamžitá tloušťka třísky
h_m	[mm]	tloušťka třísky
k_C	[MPa]	měrná řezná síla

Symbol	Jednotka	Popis
k_{CI}	[N.mm ⁻²]	měrná řezná síla potřebná k oddělení třísky o ploše 1 mm ² a tloušťce 1 mm
m_c	[-]	koeficient zahrnující vliv obráběného materiálu
n	[min ⁻¹]	otáčky nástroje
s_s	[mm]	Stoupání šroubovice
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost
w	[mm]	průhyb
x, y, z	[mm]	souřadnice kartézského souřadného systému
z	[-]	Počet zubů
z_z	[-]	Počet zubů v záběru
γ	[°]	úhel sklonu fazetky
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
λ_s	[°]	úhel sklonu ostří
π	[-]	Ludolfovo číslo
φ_i	[°]	úhel záběru
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota

Zkratky	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Computer Aided Desing
CAE	[-]	Computer Aided Engineering
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
CNC	[-]	Computer Numerical Control
HB	[-]	tvrdost podle Brinela
HSS	[-]	rychlořezná ocel
MQL	[-]	Minimum Quantity Lubrication
SK	[-]	slinutý karbid

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Portálové obráběcí centrum MCV 1210 – technická data
Příloha 2	Technické informace o fréze JABRO® - Solid ² – JS413
Příloha 3	Technické informace o fréze FRAISA AX – V3
Příloha 4	Ukázka predikce pro sílu $F_N = 50$ N v prostředí SolidWorks 2015
Příloha 5	Ukázka predikce pro sílu $F_N = 118$ N v prostředí SolidWorks 2015
Příloha 6	Výkres tenkostěnné součástky (varianta B)
Příloha 7	Tabulky naměřených drsností povrchu u stanovení vhodného posuvu na zub
Příloha 8	NC program pro stanovení vhodného posuvu na zub
Příloha 9	Tabulky naměřených drsností při lineárním řezu
Příloha 10	Ukázka ze ShopMillu včetně NC programu
Příloha 11	Silové zatížení při frézování tenkostěnné součástky frézou JS 413