

Výzkum obrobiteľnosti kompozitných materiálov mechanickými spôsobmi obrábění

Bc. Michal Malučký

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal MALUČKÝ**
Osobní číslo: **T10749**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Výzkum obrobitelnosti kompozitních materiálů
mechanickými způsoby obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Definujte obrobitelnost materiálů
2. Uvedte rozdělení a výrobce kompozitních materiálů
3. Proveďte konstrukci dynamometru pro hodnocení řezných sil
4. Experimentálně určete řezné síly při obrábění kompozitních desek
5. Proveďte ekonomické hodnocení projektu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. Praha : SNTL, 1988. 325 s.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D. Vláknové kompozity . Praha : SNTL, 1987. 294 s.
- [3] JANÁČ, A.a kol. Technológia obrábania. Bratislava: STU, 2004
- [4] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. 1. Brno : CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [5] LIEMERT, Gaston. Obrábění. Praha : SNTL, 1972. 351 s.
- [6] PTÁČEK, Luděk . Nauka o materiálu I.. Brno : CERM, 2001. 505 s. ISBN 8072041932.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě

pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, oписy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídáne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce hodnotí obrobitelnost kompozitních materiálů mechanickými způsoby obrábění (frézování), srovnává dané metody a obsahuje návrh konstrukce dynamometru pro určování řezných sil při řezání. Hodnotí velikosti řezných sil v závislosti od technologických podmínek při frézování kompozitních desek.

Klíčová slova: obrobitelnost, kompozit, dynamometr, řezná síla

ABSTRACT

The master thesis evaluates the machinability of composite materials by mechanical methods of processing (milling), compares the methods and the design includes a dynamometer for determining the cutting forces during cutting. It assesses the size of the cutting forces depending on the technological conditions during milling of composite plates.

Keywords: machinability, composite, dynamometer, cutting force

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za odborné vedení, vstřícný přístup a cenné rady v průběhu tvorby diplomové práce a během celého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OBROBITELNOST MATERIÁLU	12
1.1 POJEM OBROBITELNOST MATERIÁLU	12
1.2 TŘÍDY A SKUPINY OBROBITELNOSTI	13
1.3 METODY URČOVÁNÍ OBROBITELNOSTI MATERIÁLŮ	14
1.3.1 Přímé metody	15
1.3.2 Nepřímé metody	16
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	19
2.1 DEFINICE	19
2.2 CHARAKTERISTIKA	19
2.3 IZOTROPIE A ANIZOTROPIE	21
3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	22
3.1 PARTIKULOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	22
3.1.1 Charakteristiky částic	23
3.1.2 Vliv částic v kompozitech s plastovou maticí	24
3.2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	25
3.2.1 Přírodní vlákna	26
3.2.2 Skleněná vlákna	26
3.2.3 Uhlíková vlákna	27
3.2.4 Plastová vlákna	28
3.2.5 Keramická vlákna	29
3.2.6 Kovová vlákna	29
3.2.7 Whiskery	30
4 ZPŮSOBY URČOVÁNÍ ŘEZNÝCH SIL	31
4.1 NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ	33
4.2 PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ	34
4.3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ DYNAMOMETRŮ	35
4.3.1 Elektrické dynamometry	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
5 EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ ŘEZNÝCH SIL	40
5.1 ZKOUŠENÉ MATERIÁLY	41
5.2 POUŽITÉ NÁSTROJE	41
5.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ	42
5.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	43
5.4.1 Frézování vzorku o tloušťce záběru 100% průměru nástroje	43

5.4.2	Frézování vzorku o tloušťce záběru 20%, 30%, 40% a 50% průměru nástroje.....	46
6	KONSTRUKCE DYNAMOMETRU	55
6.1	MECHANISMUS MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL	55
6.2	KONSTRUKČNÍ SCHÉMA DYNAMOMETRU	57
6.2.1	Upínací deska.....	57
6.2.2	Měřicí soustava s tenzometrem	60
6.2.3	Soustava posuvu	62
6.3	EKONOMICKÉ HODNOCENÍ PROJEKTU.....	64
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	70
	SEZNAM TABULEK A GRAFŮ	71
	SEZNAM PŘÍLOH	72

ÚVOD

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou měření řezných sil při procesu obrábění. Konkrétně je zaměřena na měření řezných sil při obrábění kompozitních materiálů.

První kapitola teoretické části je zaměřena na obrobitelnost materiálů. Je zde vysvětlen samotný pojem obrobitelnost, technologické vlastnosti určující hodnotu obrobitelnosti, rozdělení materiálů do tříd a skupin obrobitelnosti (jak pro kovové, tak i nekovové materiály) a metody určování velikosti obrobitelnosti.

Druhá kapitola teoretické části je zaměřena na kompozitní materiály. Jsou uvedeny samotné definice kompozitů, jejich charakteristiky, typické mechanické vlastnosti a základní rozdělení kompozitních materiálů.

Ve třetí kapitole se můžeme seznámit s metodami určování řezných sil a momentů při procesu obrábění. Je zde uvedeno základní rozdělení dynamometrů. Další kapitola je speciálně zaměřena na elektrické odporové dynamometry a popis a rozdělení odporových tenzometrů.

Praktickou část můžeme rozdělit do dvou kapitol. První kapitola praktické části je zaměřena na zpracování a vyhodnocení naměřených řezných sil při obrábění frézováním pomocí dynamometru. V další kapitole je znázorněna konstrukce dynamometru pro obrábění řezáním na okružní pile. Sestava se skládá z upínací části, měřicí části opatřená tenzometry a posuvové tvořená kuličkovým šroubem poháněným elektromotorem s regulací otáček a šnekovou převodovkou. Součástí konstrukce je i ekonomické zhodnocení projektu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBROBITELNOST MATERIÁLU

1.1 Pojem obrobiteľnosť materiálu

Materiál obrobku má niekoľko druhů vlastností. Jsou to vlastnosti geometrické (tvar, rozměry apod.), mechanické (tvrdost, pevnost aj.), fyzikální (elektrická či tepelná vodivost), chemické (korozivzdornost) a technologické, mezi které z hlediska obrábění řadíme i obrobiteľnosť. Obrobiteľnosť materiálu jako technologická vlastnost ještě ani v současnosti není jednoznačně definovaná. Jedna z nejvíce aplikovaných definicí je, že obrobiteľnosť materiálu je vlastnost technologického systému procesu řezání SNOP (stroj, nástroj, obrobek, přípravek) v užším významu je to vlastnost samotného materiálu obrobku.[1]

Obrobiteľnosť však není jen jedna vlastnost. Je to souhrn vlastností obráběného materiálu, sahajících až do samotné (fyzikální) podstaty procesu obrábění, určujících čas, náklady a přesnost obrábění. Zvláštností však je, že vlastnosti obráběného materiálu se v průběhu procesu řezání mění. Proto musíme pro obrobiteľnosť uvažovat aktuální stav, jaký má v zóně řezání v momentu vzniku třísky, řezné a obráběné plochy. Musíme vzít do úvahy i vlastnosti nově vzniklých ploch (řezných a obrobených) a v poslední řadě také východiskový vztah (technologická dědičnost) po předcházejících operacích. Obrobiteľnosť tedy nelze popsat jedním parametrem, je ovlivňována chemickým složením obráběného materiálu, jeho tepelným zpracováním, jeho mechanickými, fyzikálními, chemickými a technologickými vlastnostmi.[2,3]

Komplex technologických vlastností, určujících obrobiteľnosť materiálu při definované metodě procesu řezání a druhu materiálu řezné části nástroje lze vyjádřit těmito faktory:

- Řezná rychlost při požadované trvanlivosti řezné hrany. Úroveň této řezné rychlosti určuje tzv. kinematickou (rychlostní) obrobiteľnosť materiálu.
- Řezná síla, krouticí moment nebo výkon, potřebný na odřezání materiálu. Úroveň řezné síly určuje tzv. dynamickou (silovou) obrobiteľnosť materiálu.
- Kvalita obrobené plochy a přesnost lineárních rozměrů obrobku. Drsnost obrobené plochy určuje tzv. mikrogeometrickou (povrchovou) obrobiteľnosť materiálu.
- Tvar (stupeň drobení) odřezávané třísky.[1]

Obrobitelnost podle řezné rychlosti (kinematická obrobitelnost)

Teoreticky ale i prakticky nejlépe rozpracovaná i proto, že v nejrozšířenějších způsobech obrábění má nejdůležitější místo. Dělí se na čtyři základní skupiny obrobitelnosti.

Obrobitelnost podle měrného řezného odporu (dynamická obrobitelnost)

Bývá uváděna jako obrobitelnost podle řezné síly. Samotná hodnota zjištěného měrného odporu pro zkoumaný materiál je vyjádřením absolutní obrobitelnosti podle měrného řezného odporu. Protože obrobitelnost má větší význam pro porovnávání obráběných materiálů, používá se i u obrobitelnosti podle měrného řezného jako poměr měrného řezného odporu zkoumaného obráběného materiálu k měrnému řeznému odporu etalonového obráběného materiálu (při stejných, na ten účel stanovených řezných podmínkách).

Obrobitelnost podle kvality obrobené plochy (mikroobrobitelnost)

Můžeme ji charakterizovat jako schopnost obráběného materiálu dosahovat při daných podmínkách obrábění vhodné drsnosti obrobené plochy. Může být vyjádřena jako absolutní nebo relativní.

Obrobitelnost podle tvarování třísky

Může být určovaná podle objemového součinitele třísky nebo podle stlačení třísky. Může být vyjádřena jako absolutní nebo relativní.

Obrobitelnost podle stálosti rozměrů

Uplatňuje se jen ve velkosériové a hromadné výrobě, kdy je potřeba zabezpečit dlouhodobou kvalitu produkce.[2]

1.2 Třídy a skupiny obrobitelnosti

Obrobitelnost podle řezné rychlosti dělíme do čtyř skupin:

- skupina „a“ zahrnuje materiály, při kterých vzniká krátká tříska. Hlavním představitelem této skupiny jsou litiny. Etalonem je litina ČSN 42 2425 - litina s lupínkovým grafitem

- skupina „b“ zahrnuje materiály, při kterých vzniká dlouhá tříška. Do této skupiny patří oceli. Etalonem je ocel ČSN 12 050.1
- skupina „c“ zahrnuje neželezné barevné kovy a slitiny. Etalonem je automatová mosaz
- skupina „d“ zahrnuje lehké kovy a jejich slitiny. Stanoveným etalonem je dural.

Každá skupina se dále dělí na tři třídy. Tříd je zpravidla 20. Nejhorší obrobiteľnosť má zpravidla třída 1 a nejlepší má třída 20. Zatrřídování materiálů se děje i s ohledem na způsob obrábění. Zvlášť je třídění materiálů pro soustružení materiálů, zvlášť pro frézování a zvlášť pro vrtání. Ostatní způsoby obrábění se podle podobností přiřazují ke třem základním. Samotné třídění obráběných materiálů do tříd se provádí podle tzn. koeficientu obrobiteľnosti, podle řezné rychlosti k_v

$$k_v = \frac{v_T}{v_{Te}},$$

kde v_T je řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost T u zkoumaného materiálu,

v_{Te} je řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost u etalonového materiálu.

Z uvedeného je zřejmé, že koeficient obrobiteľnosti pro etalonový materiál je $k_v=1$. [2]

1.3 Metody určování obrobiteľnosti materiálů

Metody můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

A) Přímé metody:

- 1) Komplexní obrobiteľnost materiálu
- 2) Relativní obrobiteľnost materiálu

B) Nepřímé metody

Hlavní podstatou přímých metod určování obrobiteľnosti je měření veličin v zóně řezání (např. teplota řezání). Při určování komplexní technologické obrobiteľnosti materiálu se snažíme zjišťovat vliv materiálu na řezné síly, drsnost povrchu a tvar třísky. Tyto vlivy určujeme za podmínek co nejvíce shodných s podmínkami při optimální geometrii pro zvolené posuvy či hloubku řezu.

Důležitou podmínkou při určování relativní obrobiteľnosti materiálu je nutnost dodržení optimální geometrie nože (etalonového i zkoušeného), resp. aby geometrie odpovídala praxi. Toto platí nejen u určení kinematické, dynamické a mikrogeometrické obrobiteľnosti materiálu, ale i o určení obrobiteľnosti z hlediska tvarování (drobení třísky).

Podstatou nepřímých metod je definování kritéria obrobiteľnosti materiálu a to tak, že se navrhuje určitý parametr získaný na zkušebním stroji.

Z hlediska metodiky určování rozdělujeme metody na:

- Konvenční metody pro určování obrobiteľnosti materiálů
- Progresivní metody pro určení obrobiteľnosti materiálu

Z hlediska způsobu určování obrobiteľnosti materiálu rozdělujeme metody na:

- Destruktivní metody pro určování obrobiteľnosti materiálu
- Nedestruktivní metody pro určování obrobiteľnosti materiálu

Destruktivní metody můžeme definovat jako metody, u kterých je potřebné odebrání materiálu (řezáním) pro potřebu zjištění obrobiteľnosti. Při nedestruktivních metodách není potřebné odebrání materiálu, tzn., že je můžeme provádět přímo na zkoušených obrobcích v procesu řezání.

1.3.1 Přímé metody

Z hlediska časové náročnosti rozdělujeme metody určování obrobiteľnosti na:

- dlouhodobé zkoušky
- krátkodobé zkoušky

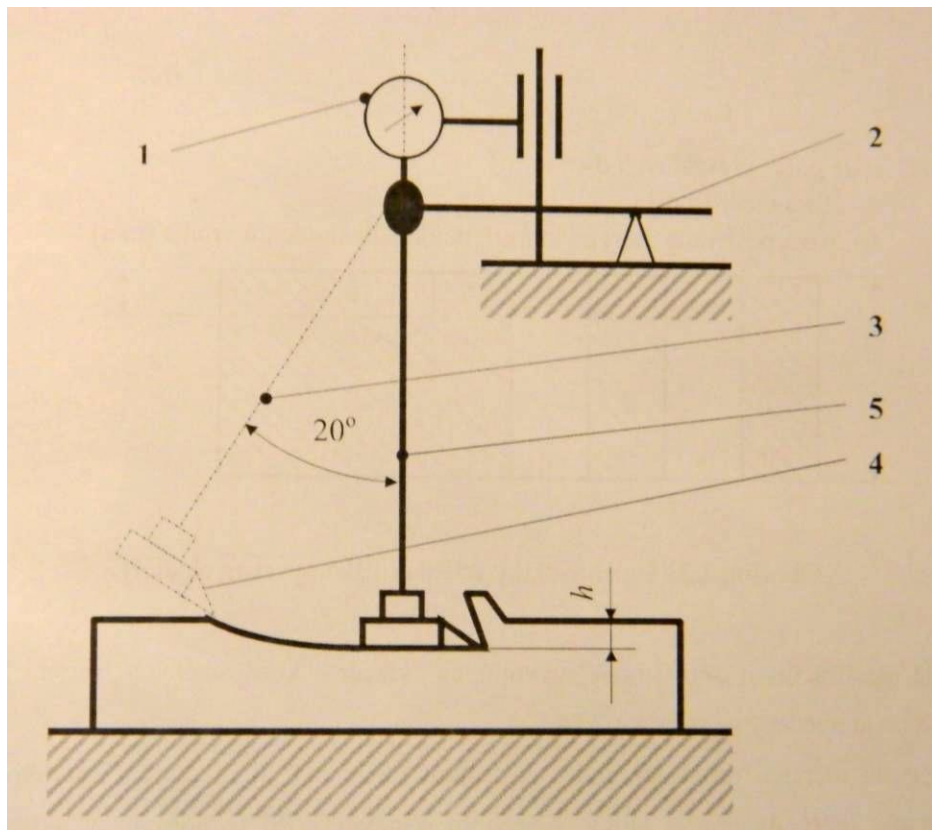
Dlouhodobá zkouška je náročná na čas a spotřebu materiálu, ale dosahuje nejpřesnějších výsledků. Pro získávání dostatečných informací za relativně krátkou dobu a úspoře materiálu si praxe vyžádala použití tzv. krátkodobých zkoušek.[1]

1.3.2 Nepřímé metody

Jsou zde zařazeny hlavně technologické zkoušky, realizované na speciálních strojích a výpočtové metody určení trvanlivosti řezné hrany na základě teploty řezání.

Metoda podle Leyensettera

Princip metody spočívá v měření hloubky vniknutí nože h při pádě z dané výšky. Výsledkem je porovnání hodnoty hloubky vniknutí s hodnotou hloubky pro etalonový materiál h_e .



Obr. 1 Princip metody podle Leyensettera [1]

$$K_L = \frac{h}{h_e}$$

Metoda vrtání za konstantního tlaku

Princip této metody je založený na aplikaci technologické metody vrtání, při které je nástroj – vrták zatížený konstantní osovou silou. Podstata zkoušky spočívá v tom, že opotřebováním vrtáku se zvětšuje tangenciální složka řezné síly F_c . Při určité hodnotě opotřebování vrták přestane vrtat do materiálu. Mírou obrobiteľnosti je délka vrtáku L , kterou porovnááme s délkou pro etalonový materiál L_e .

Dráhu L určíme podle rovnice:

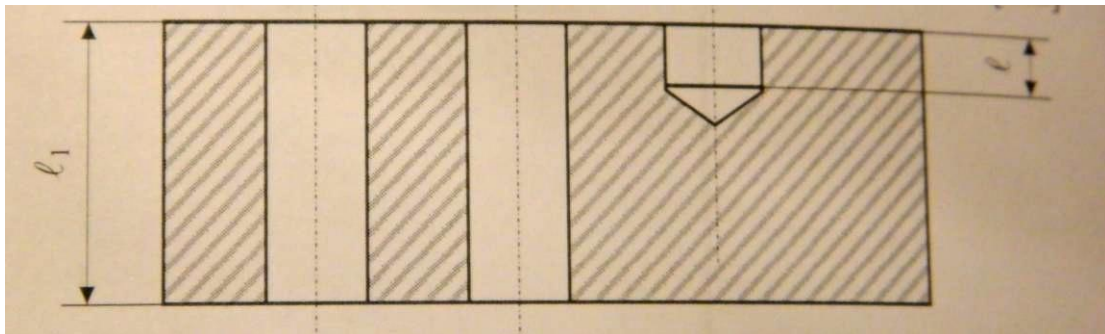
$$L = n \cdot l + l_1$$

$$K_{vr} = \frac{L}{L_e}$$

kde n – je počet předvrtaných děr

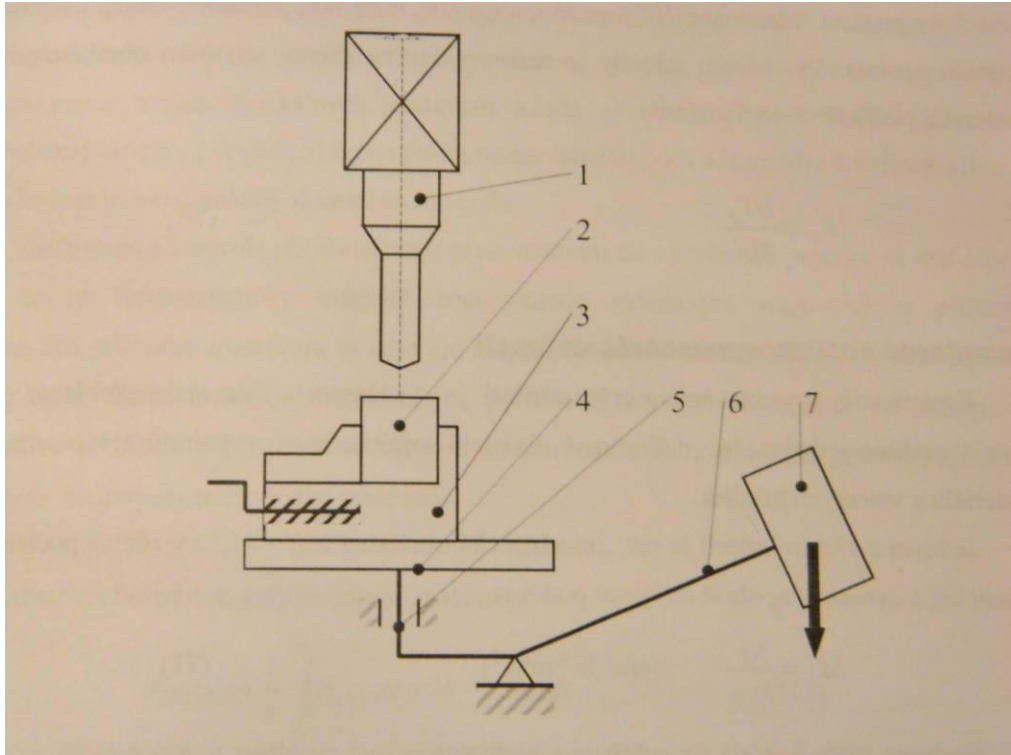
l – je délka díry [mm]

l_1 – je délka poslední díry, ve které dojde k poškození vrtáku [mm]



Obr. 2 Určení délky vrtání [1]

Na realizaci metody bylo vyvinuto více konstrukčních řešení, princip jednoho z nich, založený na vrtání při konstantní řezné síle je uveden na obrázku níže. Tato metoda je dostatečně citlivá pro určení relativní obrobiteľnosti materiálů.



Obr. 3 Schéma zařízení pro metodu vrtání při konstantní řezné síle [1]

Metoda měření tvrdosti obrobku

Při této metodě využíváme znalosti ze zkoušek měření tvrdosti. Porovnáváme průměr vtisku kuželu (90°) ze spékaného karbidu v etalonovém materiálu (d_e) a na zkoušeném materiálu (d). Výsledkem metody je definování koeficientu relativní obrobiteľnosti materiálu podle rovnice

$$K_t = \left(\frac{d_e}{d} \right)^2 [1]$$

Existuje také metoda měření obrobiteľnosti, která využívá poznatky mikrotvrdosti měřením podle Vickerse.

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

2.1 Definice

Všeobecná jasná definice pro kompozitní materiály neexistuje. Za zmínku však stojí definice používaná v USA, vytvořená ve spolupráci s NASA a amerických vývojových center, používaná v Composite Metals Handbooku [4]:

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišící se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.

Slovo „kompozitní“ znamená složený, vytvořený či kombinovaný z více prvků. Materiál složený ze dvou či více různých materiálů můžeme nazývat kompozitem jen tehdy, mají-li tyto materiály od sebe navzájem fyzikálně, chemicky či mechanicky značně rozdílné vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností jeho složek. Příkladem mohou být např. běžné kovy, které mnohdy obsahují nežádoucí nečistoty nebo slitinové prvky; plasty obsahují malá množství plniv, nadouvadec apod., avšak nejsou považovány za kompozity. V kovech mají jednotlivé složky často téměř stejné vlastnosti, nemají však obvykle vlákenný charakter a bývají obsaženy v malém množství. Plasty obsahující z cenových důvodů plniva a malá množství příměsí jsou složenými materiály, nesmíme je pokládat za kompozitní materiály, pokud tyto příměsí podstatně neovlivňují fyzikální vlastnosti materiálu. [5]

2.2 Charakteristika

Kompozitní materiály jsou v zásadě tvořeny z jedné či více nespojitých fází, ponořených ve spojitě fázi. Nespojitá fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazýváme jej *vyztužovací materiál*, zatímco spojitá fáze se nazývá *matrice*.

Vlastnosti kompozitních materiálů jsou silně ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových složek, jejich rozdělením a vzájemným působením mezi nimi. Proto při popisu kompozitu je

potřeba kromě specifikace materiálů složek a jejich vlastností specifikovat i geometrii vyztužení vzhledem k systému. Geometrie vyztužení může být popsána tvarem, velikostí a distribucí velikostí. Systémy s vyztužením o stejné geometrii se však mohou od sebe v mnoha směrech lišit, např. v koncentraci či orientaci vyztužení.

Obecně při popisu kompozitu pracujeme s těmito parametry vyztužení:

- **Tvar** jednotlivých částic nespojitě fáze lze často přibližně uvažovat jako kouli nebo válec. Jsou materiály, jejichž částice vystihují nejlépe hranoly s pravoúhlým průřezem nebo destičky. Velikost a distribuce velikostí řídí texturu materiálu
- **Koncentrace** se obvykle udává v objemovém či hustotním podílu. Koncentrace je často považována za jediný důležitý parametr ovlivňující vlastnosti kompozitu. Je také snadno kontrolovatelnou veličinou ve výrobním procesu
- **Homogenita** je důležitou charakteristikou, která určuje rozsah, ve kterém se může daný objem materiálu lišit ve fyzikálních a mechanických vlastnostech od průměrných vlastností materiálu.
- **Orientace** vyztužení ovlivňuje izotropii systému. Mají-li vyztužovací částice tvar a rozměry ve všech směrech přibližně stejné, chová se materiál jako izotropní. Naopak když jsou rozměry reprezentativních vyztužovacích částic značně odlišné, může se kompozit chovat jako anizotropní. V kompozitech vyztužovaných spojitými vlákny, např. ve vrstevných kompozitech, může být anizotropie žádoucí. Více v kapitole 2.3.
- **Koncentrační distribuce** informuje o jejich vzájemných prostorových vztazích. Částice mohou být v materiálu rovnoměrně rozloženy tak, aby se navzájem nedotýkaly, či naopak mohou tvořit síť umožňující spojitě propojení všech částic. Taková síť může významně ovlivnit elektrické vlastnosti materiálu. [5]

2.3 Izotropie a anizotropie

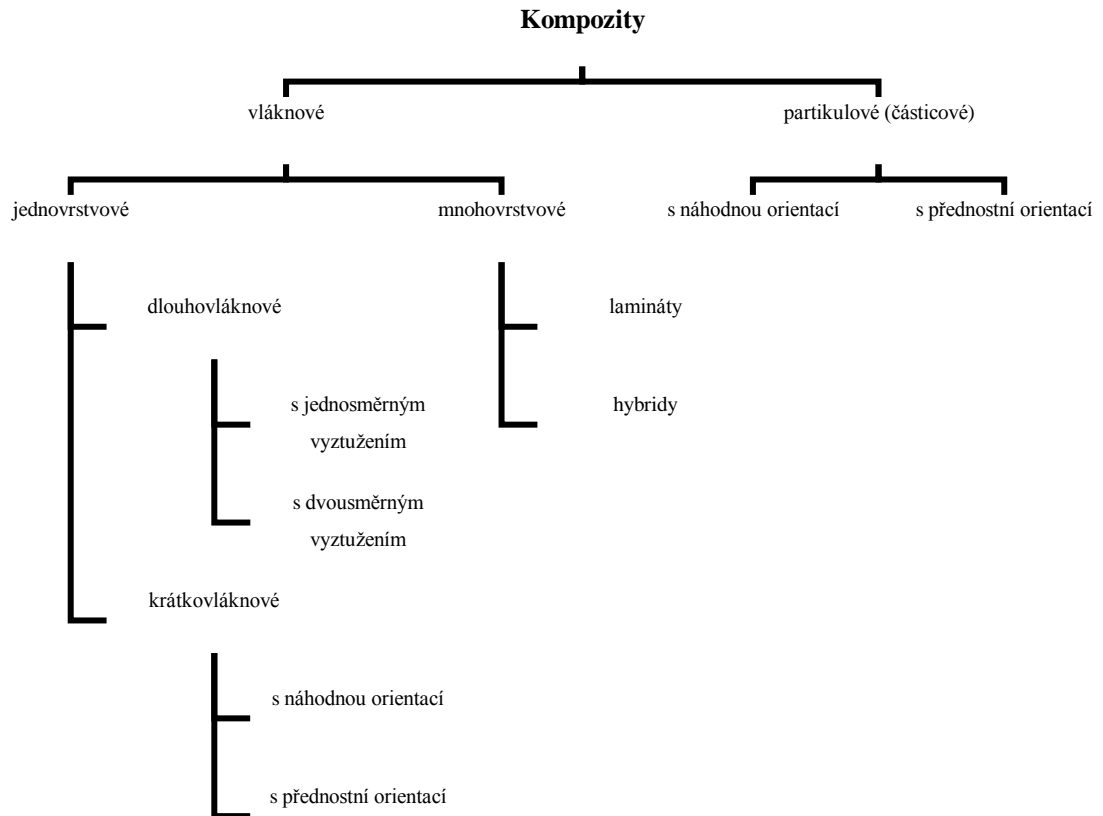
Běžné klasické technické materiály jsou zcela izotropní, nebo jeví se jen velmi malou anizotropií (např. za studena tažený drát). Pro kompozitní materiály je typické, že řada z nich je typická svou silnou anizotropií. V některých případech se jejich fyzikální vlastnosti (pevnost, tuhost) mohou lišit až o několik řádů.

Základní typy materiálů z hlediska symetrie jeho vlastností jsou:

- **Izotropní materiál** má ve všech směrech stejné vlastnosti.
- Zcela **anizotropní materiál** má vlastnosti v každém směru jiné.
- **Pseudoizotropní materiál** má vlastnosti stejné ve směru tří kolmých základních os a jsou symetrické podle tří rovin tvořených těmito osami.
- **Ortotropní materiál** má vlastnosti symetrické podle tří vzájemně kolmých rovin. Ve třech kolmých směrech tvořených průsečnicemi těchto rovin má vlastnosti různé, ale bez typických efektů anizotropie.
- **Příčně izotropní materiál** má vlastnosti izotropní v určité rovině. Vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i sebe vzájemně kolmých. Průsečnice těchto dvou rovin je hlavní osa.

Pro kompozitní materiály je typická hlavně příčná izotropie. [4]

3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ



3.1 Partikulové kompozitní materiály

Za partikulový kompozit považujeme kompozit, jehož plnění je klasifikováno jako částicové. Částice definujeme jako nevláknový útvar nemající žádný dlouhý rozměr s výjimkou destiček. Rozměry vyztužení určují schopnost přizpůsobit se vlastnostem kompozitu. Částice v partikulovém kompozitu omezují rozvoj plastických deformací v materiálu, rovněž se podílejí na přenosu namáhání. Částice jsou tedy účinné při zlepšování tuhosti kompozitů, ale nenabízejí možnost podstatného zvýšení tahové pevnosti.

Materiál částic a matrice může být v partikulovém kompozitu v podstatě jakákoliv kombinace kovových či nekovových materiálů. Volba určité kombinace závisí na žádaných konečných vlastnostech kompozitu. [5]

3.1.1 Charakteristiky částic

O způsobu soudržnosti částicové disperze ve velké míře rozhoduje mnoho parametrů.

- **Velikost částic** – zpravidla není možné určit velikost částic přímým měřením, nejjednodušším, zároveň nejpoužívanějším způsobem je tzv. síťový rozbor, kdy je velikost částice charakterizována průměrem otvoru síta, kterým částice propadne.
- **Tvar částic** – zpravidla určujeme dvě základní charakteristiky:
 - Sféricitu částice S – poměr povrchu kuličky o stejném objemu jako má částice k povrchu krychle. Pro kulové částice je $S=1$, jinak je vždy menší než 1 (pro krychlové částice $S=0,52$).
 - Izometrie částice I – schopnost nemít žádnou výraznou orientaci, vyjadřuje se z řezu částice na metalografickém výbrusu. Určuje se dvěma způsoby:
 - $I_1=(\text{obsah řezu částice})/(\text{obvod řezu částice})$. Pro kouli je $I_1=1$ (pro krychli je $I_1=\pi/4$).
 - $I_2=(\text{poloměr vepsané kružnice})/(\text{poloměr opsané kružnice})$. Pro kouli opět $I_2=1$ (pro krychli $I_2=1/\sqrt{2}$).
- **Složitost povrchu částic** – pokud je povrch částic výrazně složitý, více se na spojení částic se substrátem bude podílet mechanické zaklínění částic. Určuje se pomocí koeficientu nebo z rovinného řezu.

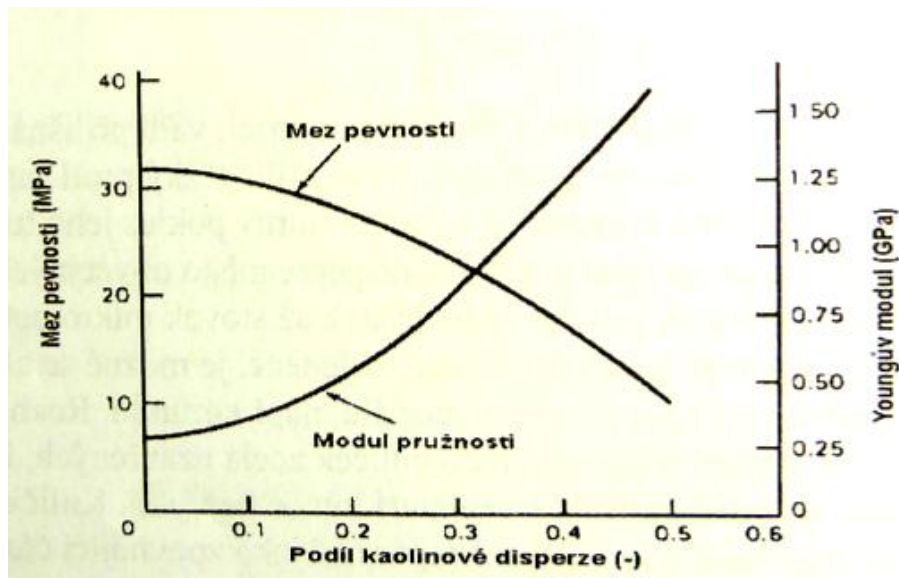
Duté částice

Velká hustota částic oproti hustotě samotné matrice často vadí. Proto tam, kde je rozhodující hmotnost kompozitu a nevadí mírný pokles jeho tuhosti a pevnosti, se začínají používat tzv. duté částice. Zpravidla mají větší průměr, nejčastěji se používají skleněné částice. [4]

3.1.2 Vliv částic v kompozitech s plastovou matricí

Částice plniva v polymeru nemají zpevňující účinek, jsou-li jejich rozměry menší než jsou rozměry strukturální nehomogenity polymeru, to je zpravidla 10 až 100nm. Částice nad 10 nm pak v plastovém kompozitu přestávají zpevňovat kompozit, navíc stávají koncentrátoři napětí a snižují jeho pevnost.

Částice v kompozitu zpravidla zvyšují tuhost kompozitu (často až o jeden řád). Mez kluzu však nezvyšují a mez pevnosti často i snižují.[4]



Obr. 4 Částicový kompozit s plastovou matricí [3]

Částice v elastomerech

V elastomerech můžeme použít velmi malé částice, které je disperzně zpevní, jelikož elastomery jsou velmi homogenní. Příkladem může být výroba pneumatik, kde se do základní pryže přidává 10 až 20% křemenného prášku či sazí.

Částice v termoplastech

Používají se částice větší než 10 mikrometrů, jejich účinky jsou:

- snížení smrštění a dosmrštění plastů
- zvýšení tuhosti (ve všech směrech stejné)
- potlačení viskoelastického chování
- potlačení vibrací

Částice v reaktoplastech

Stejně jako u termoplastů používají se větší částice. Základní účinky:

- zvýšení tuhosti kompozitu
- tlumení růstu trhlin
- zvýšení elektroizolačních schopností
- snížení hořlavosti

3.2 Vláknové kompozitní materiály

Základní rozdělení vláknových kompozitů je:

- jednovrstvové
- mnohovrstvové
- popř. - krátkovláknové
- dlouhovláknové

Krátkovláknové kompozity se používají výhradně pro injektované výlisky nebo pro extrudované plastové výrobky.

Dlouhovláknové kompozity se nejčastěji používají při výrobě velkých konstrukcí jako jsou lodě, tlakové nádoby, křídla větrných turbín apod.

Největší výhodou vláknových kompozitních materiálů je fakt, že vyztužující vlákna, mající o několiknásobně vyšší pevnost a tuhost než pojivo (polymerní matrice), se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákna a polymeru, kde se v případě adheze mezi oběma komponentami umožňuje přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí. [6]

Vláknové kompozitní materiály můžeme rozlišit dle druhu materiálu vláken:

- přírodní
- skleněná
- uhlíková

- aramidová
- keramická
- kovová
- whiskery

Dalším rozdělením může být dle průměru vlákna. Průměr vláken se pohybuje v širokém rozmezí.

- do průměru 100 nanometrů – tzv. nanovlákná
- 0,1 až 1 mikrometrů – mikrovlákná (whiskery)
- 1 až 10 mikrometrů – střední vlákná (uhlíková, skleněná)
- nad 10 mikrometrů – hrubá vlákná

Pro naše účely budeme používat rozdělení dle druhu materiálu vláken. [7]

3.2.1 Přírodní vlákná

Mohou mít velmi dobré vlastnosti. Často mají přírodní vlákná složitou strukturu. Základem vláken je celulóza.

Tabulka 1 Základní vlastnosti přírodních vláken [4]

Vláknó	Hustota (g/cm ³)	Mez pevnosti (MPa)	Youngův modul (GPa)	Tažnost (%)
Konopí	1,5	460	70	1,7
Juta	1,3	440	60	2,0
Len	1,5	340	100	1,8
Bavlna	1,5	300	27	10

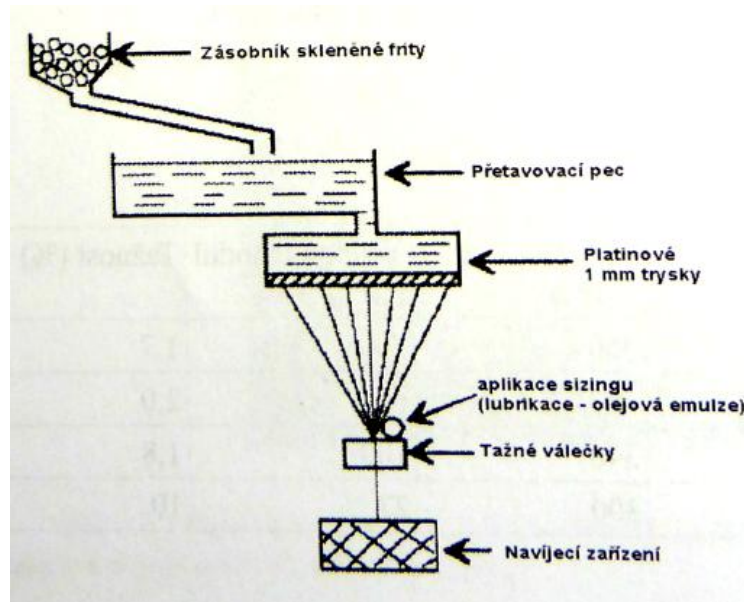
3.2.2 Skleněná vlákná

Používají se především v kompozitech s plastovou maticí.

Základní vlastnosti:

- Hustota cca 2,5 g/cm³

- Tuhost $E = 80$ až 100 GPa (podobně jako hliník)
- malá odolnost vláken vůči únavě
- často nutnost vlákna lubrikovat = snižování pevnosti vláken [4]

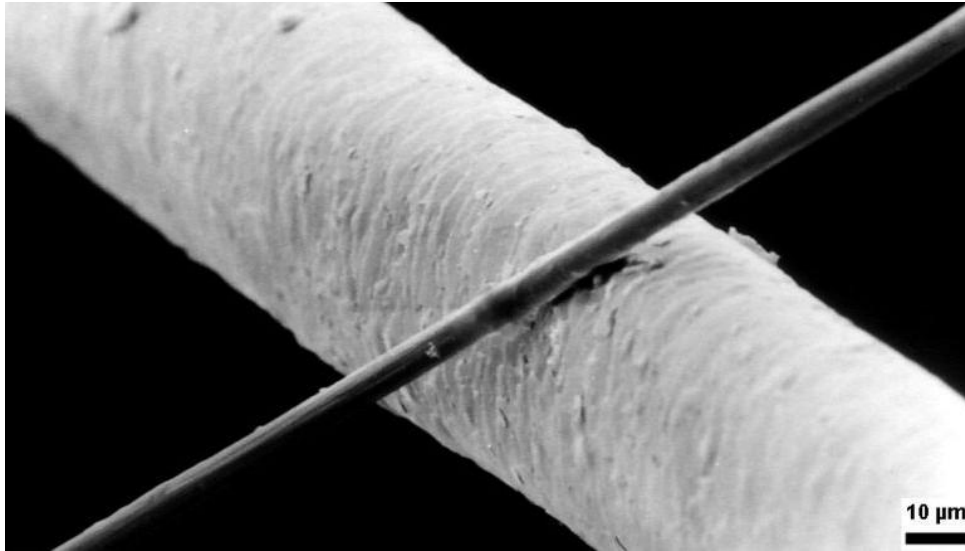


Obr. 5 Výroba skleněných vláken [4]

3.2.3 Uhlíková vlákna

Vlastnosti:

- 10x větší tuhost oproti skleněným vláknům
- průměr vlákna 5 až 8 mikrometrů
- hustota $1,8$ až 2g/cm^3
- vynikající tepelné vlastnosti
- minimální teplotní roztažnost
- vlákna jsou silně anizotropní
- velká odolnost únavě
- oproti skleněným vláknům má vysoké náklady [4]



Obr. 6 Průměr uhlíkového vlákna (černé) v porovnání s lidským vlasem

3.2.4 Plastová vlákna

Typickým představitelem plastových vláken je **kevlar**.

Základní vlastnosti:

- nízká hustota (cca $1,4 \text{ g/cm}^3$)
- poměrně vysoká pevnost
- malá tuhost
- pevnost okolo 2,8 GPa
- chemicky odolná [4]

Tabulka 2 Základní vlastnosti vláken v porovnání s ocelí a sklem [4]

Vlákno	Hustota (g/cm^3)	Pevnost (GPa)	Youngův modul (GPa)	Prodloužení při lomu(%)
Nylon	1,14	1,0	5,62	18
Kevlar	1,44	2,8	63,3	4
Sklo	2,54	3,4	72	3
Ocel	7,8	2	205	2

3.2.5 Keramická vlákna

Základní vlastnosti:

- velká teplotní odolnost a stabilita
- vysoká tuhost
- malá tepelná roztažnost
- malá závislost pevnosti na hustotě

Tabulka 3 Přehled základních vlastností keramických vláken [4]

Vlákno	Hustota (g/cm^3)	Pevnost (GPa)	Youngův modul (GPa)	Deformace při přetržení (%)
Křemen	2,19	5,8	72,5	11
Karborundum	2,55	2,8	240	-
Korund	3,9	1,4	385	-
Spinel	3,2	2,5	240	-

3.2.6 Kovová vlákna

Základní vlastnosti:

- jsou nejlevnější
- mají největší hustotu
- v posledních letech se provádí výzkum nových kov. materiálů (kovová skla, borová vlákna)

Tabulka 4 Vlastnosti základních typů kovových vláken [4]

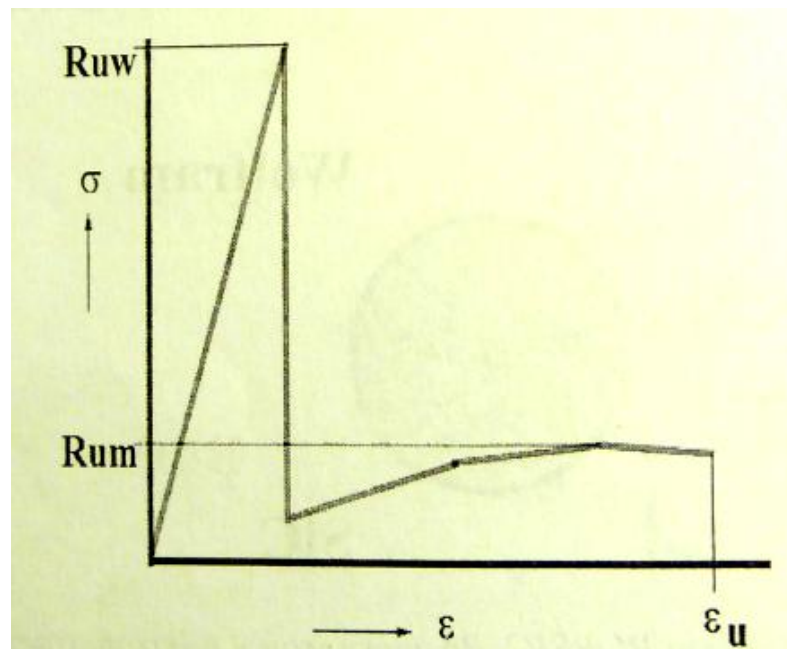
Vlákno	Hustota (g/cm^3)	Pevnost (GPa)	Youngův modul (GPa)
Bor	2,63	2,8	385
Wolfram	19,3	4,2	414
Beryllium	1,83	1,4	240
Ocel	7,8	1,5	210

3.2.7 Whiskery

Jedná se o speciální tenké krystaly. Základním materiálem je nejčastěji grafit či karbid křemíku (SiC).

Základní vlastnosti:

- průměr vláken je menší než 1 mikrometr, délka je 3 až 4 mm
- obsahují jednu šroubovou dislokaci uprostřed = speciální pěstování
- lze získat z různých látek kondenzací par ve vakuu
- vyskytují se i přírodní whiskery – asbest = kancerogenní [4]



Obr. 7 Tahový diagram whiskeru [4]

4 ZPŮSOBY URČOVÁNÍ ŘEZNÝCH SIL

V průběhu procesu obrábění dochází při oddělování třísky od obrobku ke tvorbě plastických a elastických deformací. Kromě těchto deformačních jevů se při tomto procesu prosazují i poměry silové.

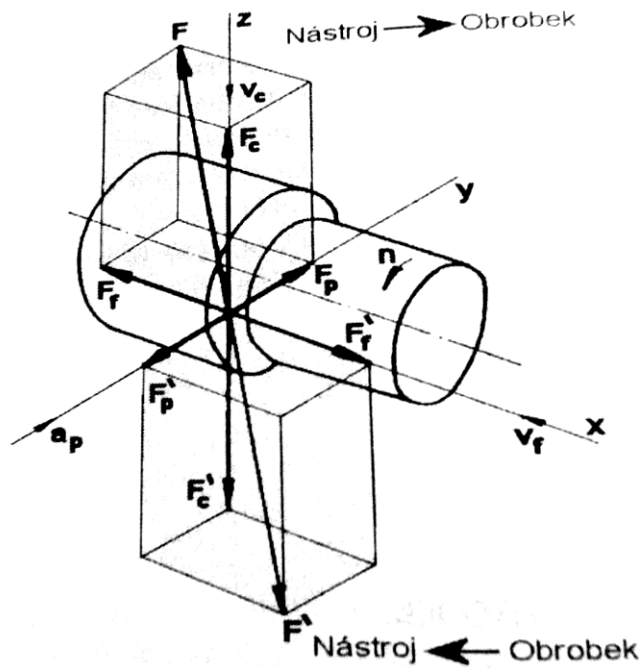
Získání těchto silových poměrů procesu obrábění umožňuje získat přehled o mechanickém namáhání celé soustavy obrábění včetně podkladů pro řešení celé technologické soustavy, jak z hlediska pevnosti, tak i její tuhosti.

Významnou veličinou je zde síla obrábění (řezání) F , která je veličinou proměnnou. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor R , který musí síla obrábění při řezném procesu překonat. Pro podmínku rovnováhy platí:

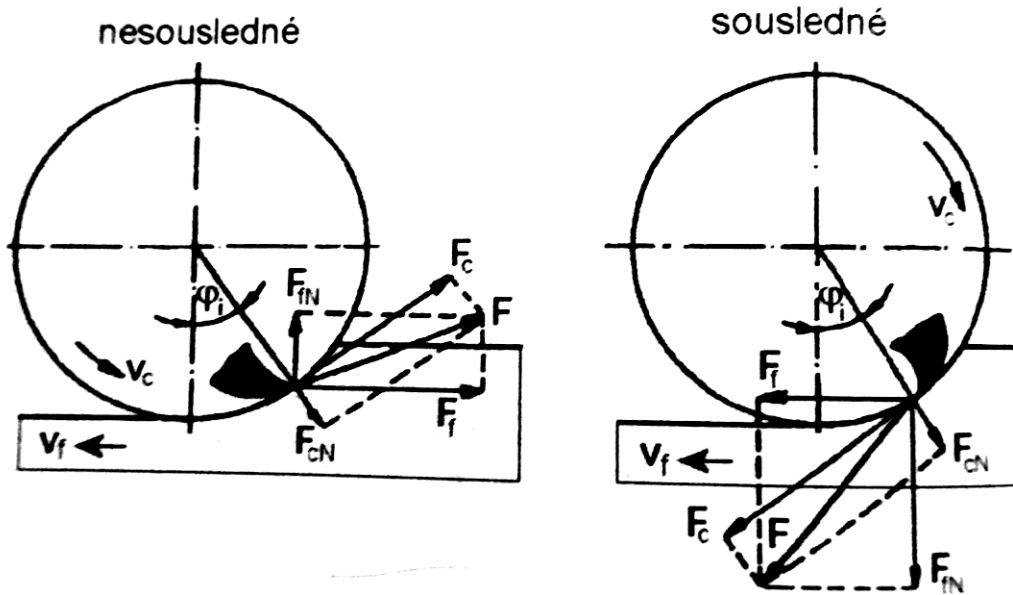
$$F = -R \quad [\text{N}]$$

Síla vznikající při obrábění je jevem dynamickým. Při obrábění se tato síla v závislosti mění (až o 20%) a to i při stejných řezných podmínkách. To je způsobeno zejména rozptylem mechanických vlastností obráběného materiálu a mechanikou tvorby třísky. Z tohoto důvodu je nutné experimentální měření několikrát opakovat a vyhodnocovat jako průměry ze všech měření.

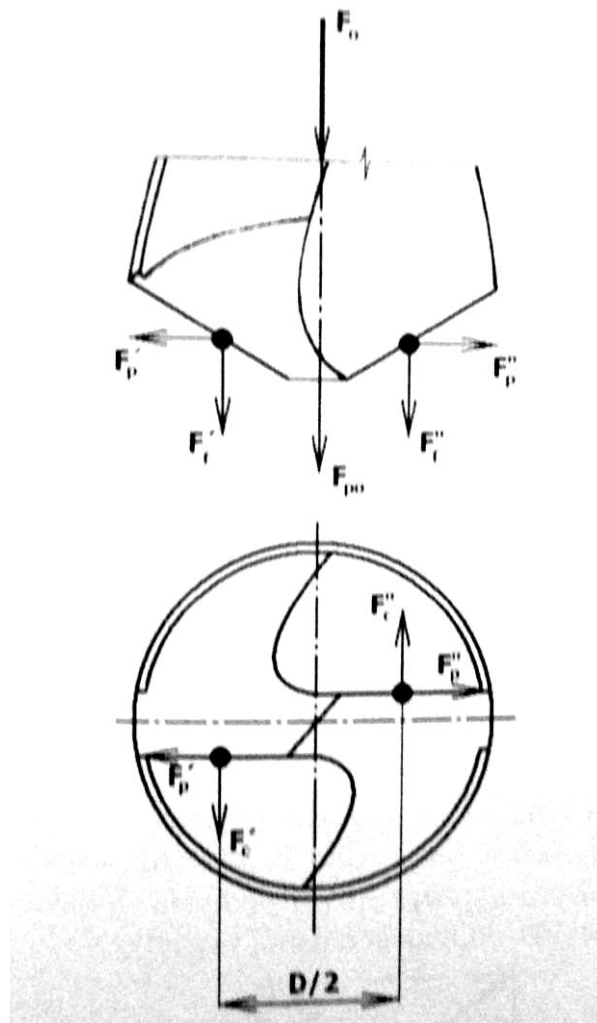
Síla obrábění F je výslednicí dvou složek, a to složky aktivní a pasivní. Aktivní složku lze dále rozložit na složku síly obrábění F_C a složku posuvu F_f . Poměr velikostí jednotlivých složek je dán zejména danou technologií obrábění a geometrií nástroje. Největší význam má řezná síla F_C . [8]



Obr. 8 Schéma rozložení složek síly řezání při soustružení [8]



Obr. 9 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování [8]



Obr. 10 Schéma rozložení složek síly řezání při vrtání [8]

Experimentální měření sil a momentů lze rozdělit na přímé a nepřímé stanovení řezné síly a momentů působících v řezném procesu.

4.1 Nepřímé měření sil a momentů

Nepřímé měření sil a momentů se poměrně často využívá v praxi při měřeních, kde nepotřebujeme znát hodnoty řezných sil s velkou přesností. Metody určování vychází převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje nebo točivého momentu vřetene. Z těchto hodnot se dopočítávají tangenciální složky řezné síly.

4.2 Přímé měření sil a momentů

Přímé měření složek síly obrábění a jejich momentů se zakládá na určování deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek pomocí dynamometrů. Základní požadavky kladené na dynamometry:

1. **Tuhost** dynamometrů je dána velikostí zatěžující síly F , která způsobuje deformaci. Velikost této deformace závisí na tvaru deformačního elementu, na celkové konstrukci dynamometru a na použité měřící metodě.
2. **Citlivost** dynamometrů závisí na citlivosti měřící metody. Dynamometr musí mít takovou citlivost, že nejmenší odečítaná jednotka musí odpovídat celkové hodnotě měřené veličiny.
3. **Stálost údajů** dynamometrů závisí na tuhosti, citlivosti a přesnosti po celou dobu měření.
4. **Reprodukovatelnost údajů** dynamometrů souvisí s výše uvedenými požadavky a charakteristikami.
5. **Setrvačnost** dynamometrů závisí na hmotnosti celé soustavy. Při dynamických měřeních, kdy je nutné sledovat maximální a minimální hodnoty řezné síly i časový průběh by měla být setrvačnost co nejmenší.
6. **Konstrukce** dynamometrů musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly.

Dynamometr se zpravidla skládá ze tří částí:

- Pružný člen – přebírá vnější zatížení a překonává změny deformace, polohy apod.
- Snímač – mění mechanickou veličinu změny pružného členu na hodnotu analogického parametru
- Přijímač – zesiluje a zpracovává signál snímače a zapisuje velikost zatížení

4.3 Základní rozdělení dynamometrů

Dynamometry můžeme rozdělit podle následujících hledisek:

1. Podle počtu měřených složek síly řezání:
 - jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření krouticích momentů
2. Podle měřicí metody (dle způsobu přenosu působení síly z pružného členu do přijímače):
 - mechanické, elektrické, hydraulické, pneumatické, optické
3. Podle metody obrábění:
 - pro soustružení, frézování, vrtání, broušení apod.

V praktické části diplomové práce se pracuje s elektrickými dynamometry, proto jsou následující kapitoly zaměřeny výhradně na tuto skupinu dynamometrů. [8]

4.3.1 Elektrické dynamometry

Patří mezi nejrozšířenější dynamometry v technické praxi. Můžeme je rozlišit dle měřicí metody na indukční, kapacitní a odporové. Mezi největší přednosti elektrických dynamometrů patří:

- snadný přenos signálu s možností řady úprav
- využití miniaturních měřicích elementů
- snadná dostupnost napájecích zdrojů
- možnost snímání signálu i u rotujících a pohyblivých součástí

Podle způsobu mechanicko-elektrické transformace je možné rozlišit dva základní systémy elektrických dynamometrů:

- systémy parametrické jsou založeny na změně jednoho či více parametrů elektrického obvodu (indukčnost L , kapacita C a odpor R).
- Systémy generátorové, které jsou založeny na vzniku napětí nebo proudu při deformaci elementů.

Elektrické odporové dynamometry

Pro měření velikosti deformace se využívá změna odporu snímačů. Nejpoužívanějšími odporovými snímači jsou odporové tenzometry. Tenzometr je pevně spojen s pružným členem, a proto se s ním deformuje společně. Změna odporu vodiče je přímo úměrná deformaci, která vzniká deformačním elementu v důsledku působení síly obrábění nebo krouticího momentu. Při deformaci vodiče dochází také ke změně délky a průřezu vodiče a ke změně odporu materiálu vodiče. [8]

Odporový tenzometr

Tenzometr je odporový senzor, kde je změna odporu závislá na změnách způsobených deformací tenzometru, tedy na změnách geometrických rozměrů. Vzhledem k malým rozměrům tenzometrů můžeme obecně deformaci omezit na deformaci způsobenou tahem či tlakem v mezích Hookova zákona. [9]

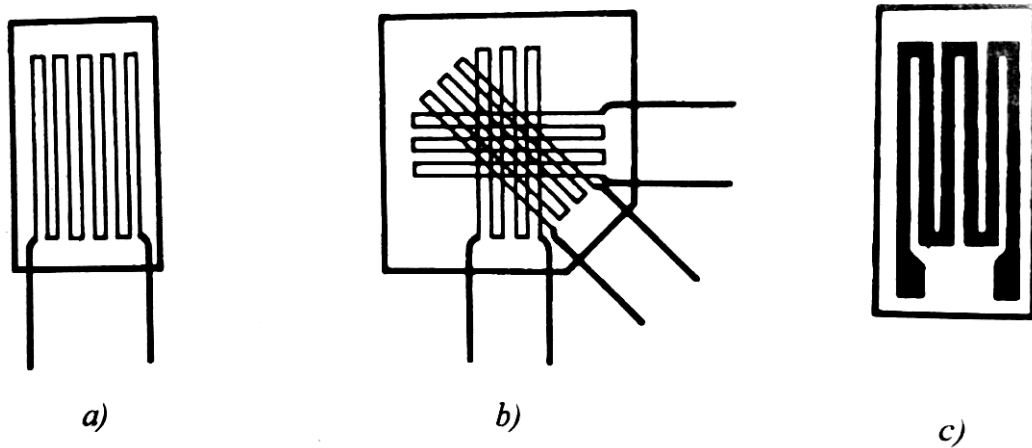
Tenzometry můžeme rozdělit dle použitého materiálu na tenzometry:

- kovové
- polovodičové

Kovové odporové tenzometry

Můžeme je rozdělit dle způsobu provedení na drátkové a fóliové. Drátkový tenzometr je tvořen z drátku o průměru 0,01 až 0,03 mm. Fóliové tenzometry jsou tvořeny měřicí mřížkou z odleptané fólie o tloušťce 5 až 10 μm . Fóliový tenzometr má výhodnější tepelné vlastnosti a ekonomičtější výrobu. Při měření deformací v různých směrech se využívají tenzometrické růžice složené z různého počtu tenzometrů svírající mezi sebou různé úhly.

Drátky nebo fólie jsou přitmeleny k podložce z tenkého papíru nebo plastu. Takovýto tenzometr se připevní na měřené místo. [10]

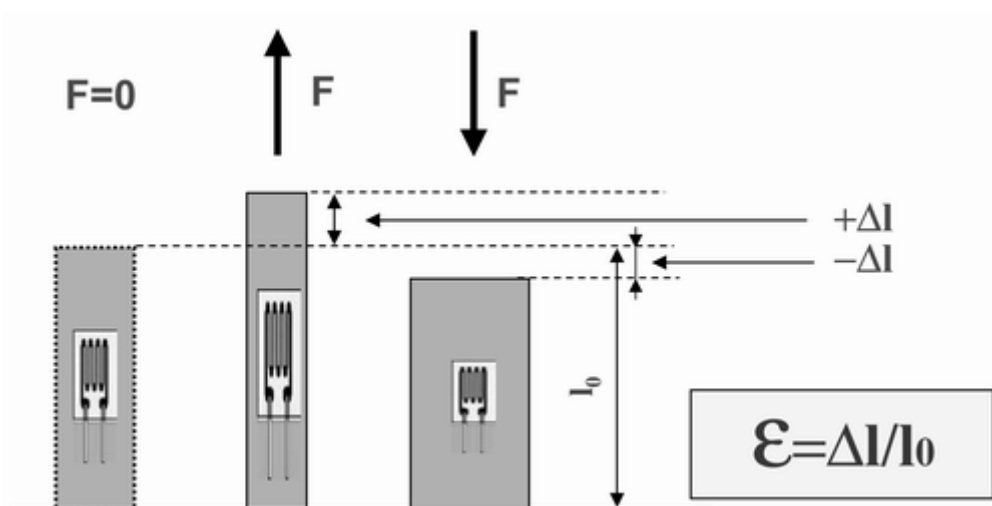


Obr. 11 Odporové kovové tenzometry

a) drátkový, b) drátková tenzometrická růžice, c) fóliový tenzometr [10]

Princip fóliových tenzometrů

V případě odporových tenzometrů je využita změna odporu mechanicky namáhaného vodiče, průřezu S a rezistivitou ρ . Tento jev objevil v roce 1843 pan Wheatstone. Změny odporu jsou nejčastěji dány změnou parametru délky vodiče o Δl . Tenzometr je proto nejcitlivější na deformaci (natažení, prohnutí apod.) právě ve směru delší strany (obr. 12.). [11]



Obr. 12 Princip fóliového tenzometru [11]

V případě použití jednoho tenzometru je třeba vzít v úvahu, že odpor tenzometru se mění se změnou délky, ale také s jeho teplotou. Proto je nutné v některých případech použít tzv. kompenzační tenzometr. [12].

Druhou možností je použití tzv. samokompenzačního tenzometru.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ ŘEZNÝCH SIL

V této kapitole je cílem určit velikost řezných sil při frézování s pomocí dynamometru. Měření bylo prováděno na 3osé CNC frézce C-442 HWT. Kapitola přímo souvisí s následující kapitolou konstrukce dynamometru pro obrábění řezáním na okružní pile. Experimentální měření nám může pomoci odhadnout velikosti řezných sil při daném způsobu obrábění pro další srovnání.



Obr. 13 Třiosá frézka

5.1 Zkoušené materiály

Měření bylo prováděno na dvou odlišných materiálech. Prvním materiálem je kompozitní deska složená ze dvou laminátových vrstev. Vzorek obsahuje vrstvu gelcoatu tloušťky 0,5 mm s průmyslovým označením RAL 9010, laminátovou vrstvu složenou z pěti skleněných tkanin Aeroglass tloušťky 1,1 mm a s hustotou 220 g/cm^2 , vrstvu PVC pěny o tloušťce 16 mm, laminátovou vrstvu složenou z šesti skleněných tkanin Aeroglass tloušťky 1,4 mm a s hustotou 220 g/cm^2 , orthoftalovou pryskyřici Aropol M105TB a tužidlo Butanox.

Druhým materiálem je kompozitní deska složená ze tří laminátových vrstev. Vzorek obsahuje vrstvu gelcoatu tloušťky 0,5 mm s průmyslovým označením RAL 9010, laminátovou vrstvu složenou ze sedmi skleněných tkanin Aeroglass tloušťky 1,5 mm a s hustotou 220 g/cm^2 , vrstvu PVC pěny o tloušťce 5 mm, laminátovou vrstvu složenou ze sedmi skleněných tkanin Aeroglass tloušťky 1,5 mm a s hustotou 220 g/cm^2 , vrstvu PVC pěny o tloušťce 5 mm, laminátovou vrstvu složenou ze sedmi skleněných tkanin Aeroglass tloušťky 1,5 mm a s hustotou 220 g/cm^2 , orthoftalovou pryskyřici Aropol M105TB a tužidlo Butanox.

5.2 Použité nástroje

Při experimentálním měření byly použity tři druhy nástrojů.

Tím prvním je tvrdokovová fréza s diamantovým povlakem s průměrem 8 mm od výrobce Nuova Cumet. Typové označení frézy je 5010.080.

Druhým nástrojem je čtyřzubá tvrdokovová fréza povlakovaná s průměrem 8 mm od výrobce Nuova Cumet. Typové označení frézy je 400T.080.

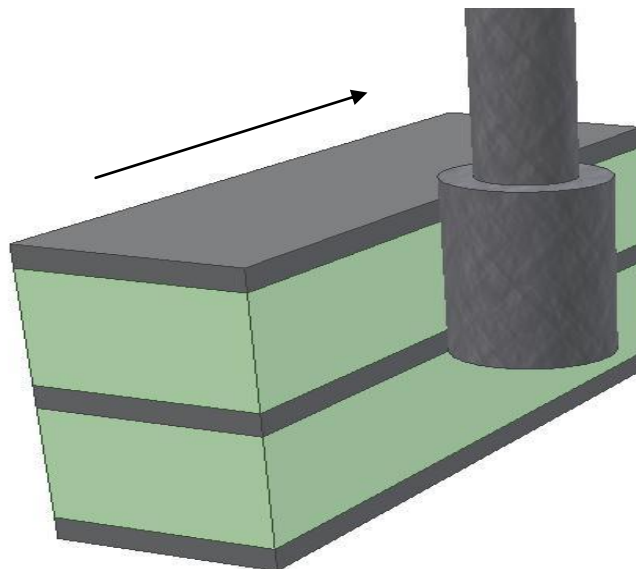
Posledním použitým nástrojem je dvouzubá nepovlakovaná tvrdokovová fréza od výrobce Nuova Cumet. Typové označení frézy je 700.080.

5.3 Průběh měření

Cílem měření je zjistit maximální řezné síly vznikající v průběhu obrábění, a to jak v ose X, tak v ose Y. V tomto měření se jedná o podélné frézování.

Měření probíhalo při podélném obrábění frézou (obr. 13) o tloušťce drážky 8 mm, tedy 100% průměru nástroje (kapitola 5.4.1). Dále při obrábění o tloušťce drážky 20%, 30%, 40% a 50% průměru nástroje (kapitola 5.4.2).

Otáčky nástroje jsou ve všech měřeních stejné, a to 8 000 otáček / minutu.



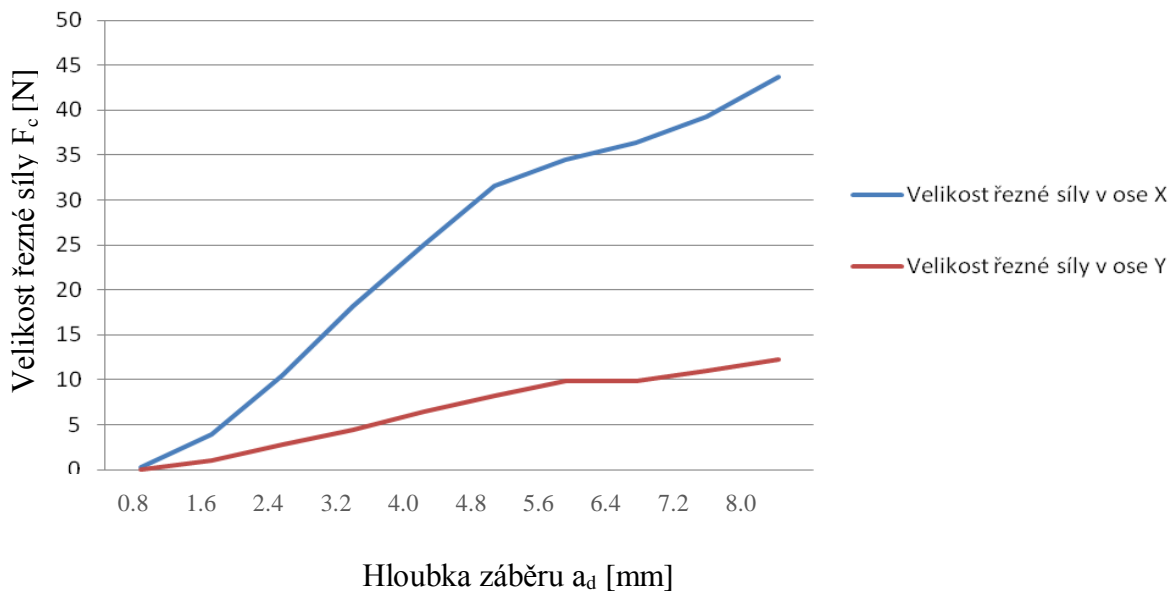
Obr. 14 Schéma podélného frézování

5.4 Výsledky měření

5.4.1 Frézování vzorku o tloušťce záběru 100% průměru nástroje

Grafy znázorňují závislost velikosti řezné síly na hloubce záběru. Maximální řezné síly jsou naměřeny při 100% průměru nástroje, tedy 8mm.

Graf 1: Průběh velikostí řezných sil při frézování



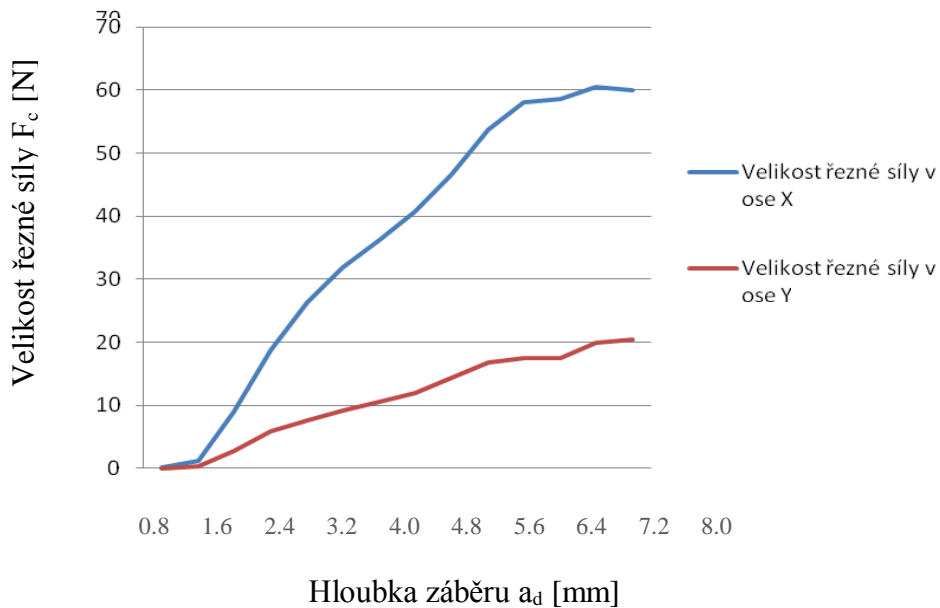
Nástroj: tvrdokovová fréza s diamantovým povlakem s průměrem 8 mm.

Vzorek: kompozitní deska složená ze dvou laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a jedné vrstvy PET pěny o tloušťce 16 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F=43,675$ N

Maximální řezná síla v ose Y: $F=12,311$ N

Graf 2: Průběh velikostí řezných sil při frézování



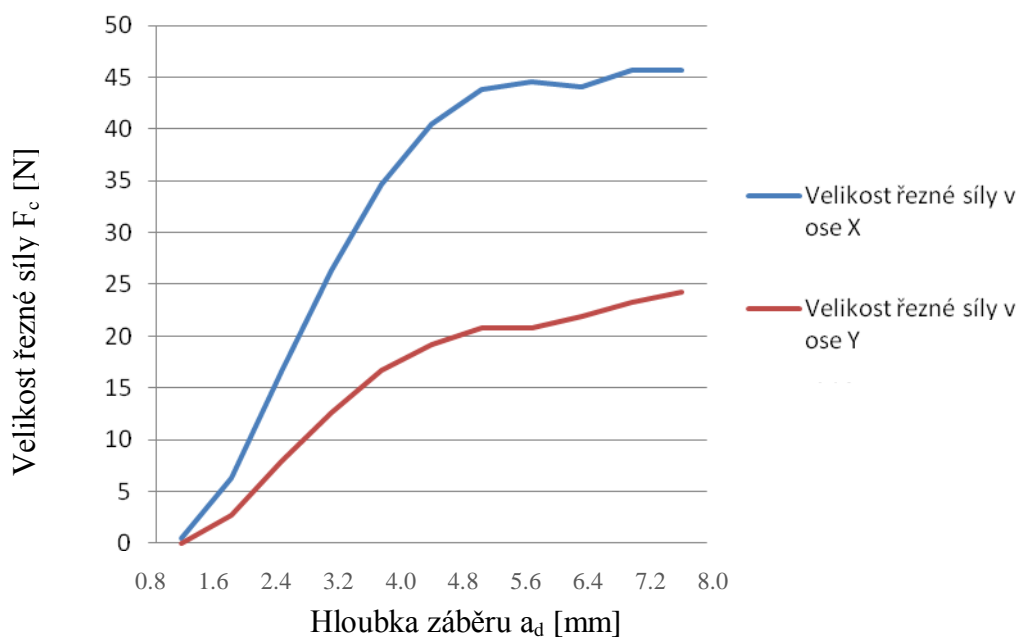
Nástroj: tvrdokovová fréza s diamantovým povlakem s průměrem 8 mm.

Vzorek: kompozitní deska složená ze tří laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a dvou vrstvách PET pěny o tloušťce 10 mm a 6 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F=60,515$ N

Maximální řezná síla v ose Y: $F=20,516$ N

Graf 3: Průběh velikostí řezných sil při frézování



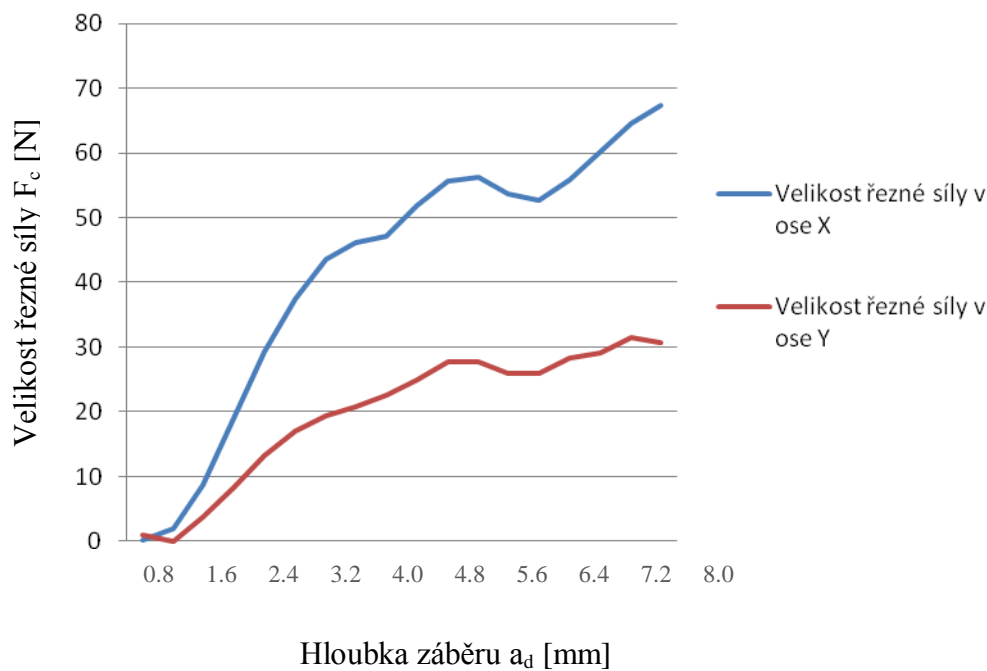
Nástroj: čtyřzubá tvrdokovová fréza povlakovaná s průměrem 8 mm

Vzorek: kompozitní deska složená ze dvou laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a jedné vrstvy PET pěny o tloušťce 16 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F=45,625$ N

Maximální řezná síla v ose Y: $F=24,266$ N

Graf 4: Průběh velikostí řezných sil při frézování



Nástroj: čtyřzubá tvrdokovová fréza povlakovaná s průměrem 8 mm

Vzorek: kompozitní deska složená ze tří laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a dvou vrstvách PET pěny o tloušťce 10 mm a 6 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F=67,428$ N

Maximální řezná síla v ose Y: $F=31,445$ N

Z výše uvedených grafů je zřejmé, že počet laminátových vrstev v obráběném materiálu má vliv na velikost řezných sil. Velikosti řezných sil v ose X jsou u materiálu ze tří vrstev laminátu cca o 1/3 větší než u materiálu ze dvou laminátových vrstev.

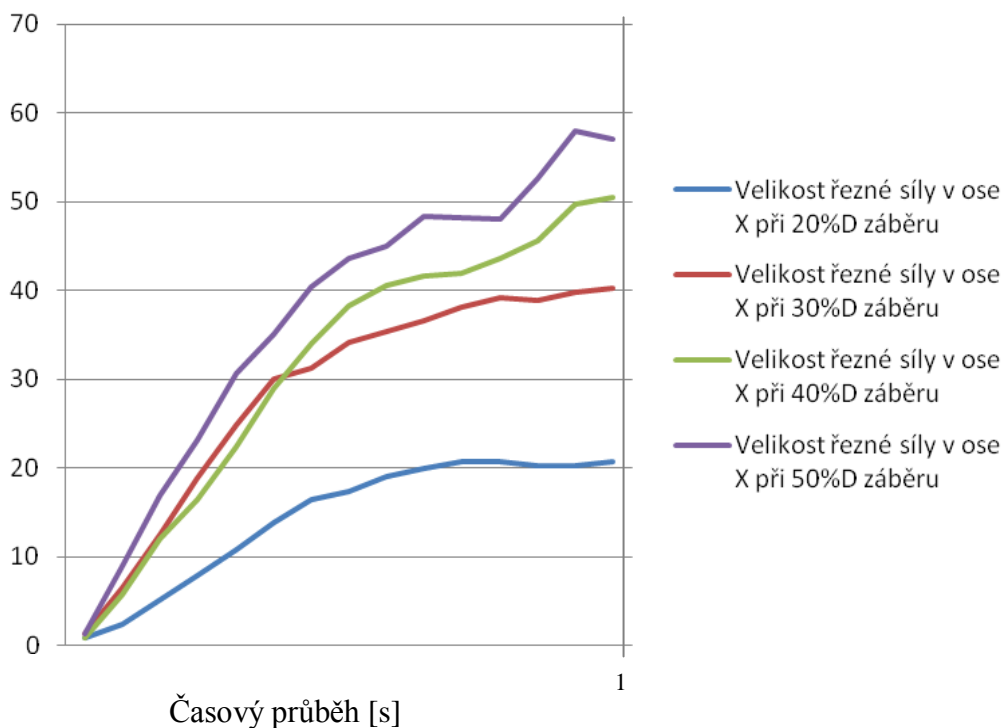
Velikosti řezných sil u materiálu se třemi laminátovými vrstvami v ose Y jsou dvojnásobné.

Porovnáním dvojic grafů se stejným obráběným materiálem a různým nástrojem je zřejmé, že vliv nástroje na velikost řezných sil v ose X není příliš velký, naopak rozdíl velikostí řezných sil v ose Y je téměř dvojnásobný.

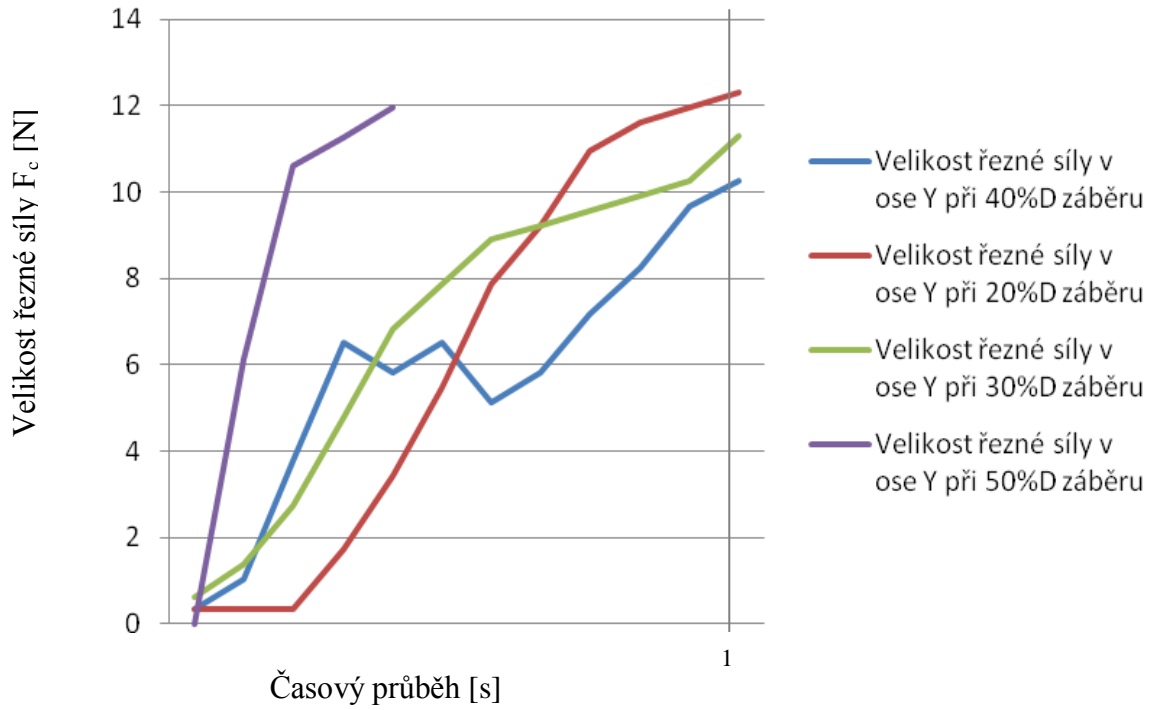
5.4.2 Frézování vzorku o tloušťce záběru 20%, 30%, 40% a 50% průměru nástroje

Následující grafy zobrazují závislost velikosti řezných sil při určitých konstantních velikostech hloubky záběru na čase.

Graf 5: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X



Graf 6: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y



Nástroj: 2zubá tvrdokovová fréza nepovlakovaná s průměrem 8 mm.

Vzorek: kompozitní deska složená ze tří laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a dvou vrstvách PET pěny o tloušťce 10 mm a 6 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F_{20\%}=20,671$ N

$F_{30\%}=40,169$ N

$F_{40\%}=50,451$ N

$F_{50\%}=57,896$ N

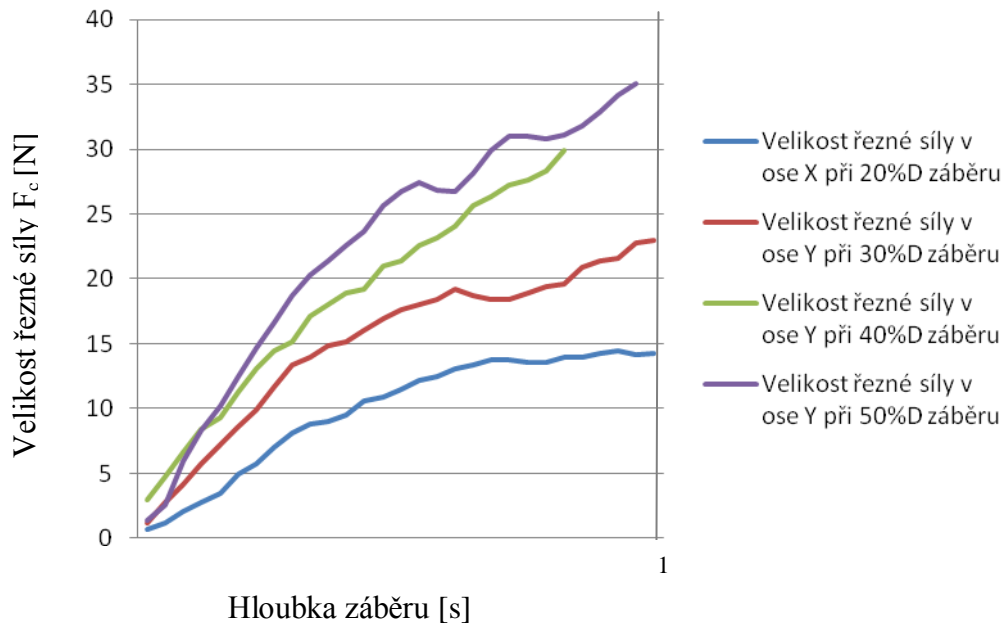
Maximální řezná síla v ose Y: $F_{20\%}=12,311$ N

$F_{30\%}=11,286$ N

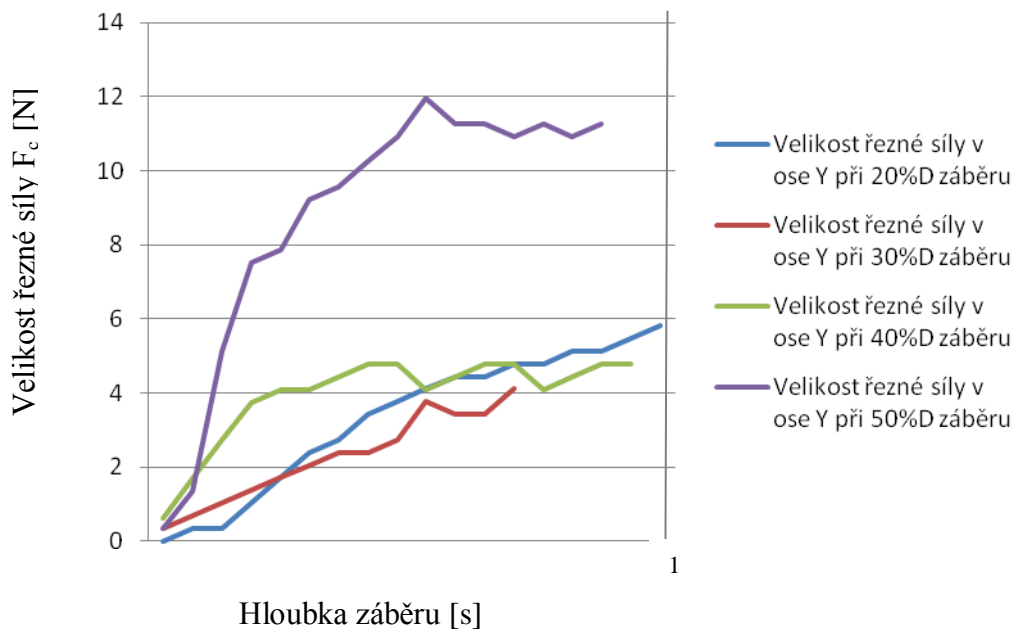
$F_{40\%}=10,260$ N

$F_{50\%}=11,960$ N

Graf 7: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X



Graf 8: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y



Nástroj: 2zubá tvrdokovová fréza nepovlakovaná s průměrem 8 mm.

Vzorek: kompozitní deska složená ze dvou laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a jedné vrstvě PET pěny o tloušťce 16 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F_{20\%}=14,466$ N

$F_{30\%}=22,975$ N

$F_{40\%}=29,888$ N

$F_{50\%}=35,029$ N

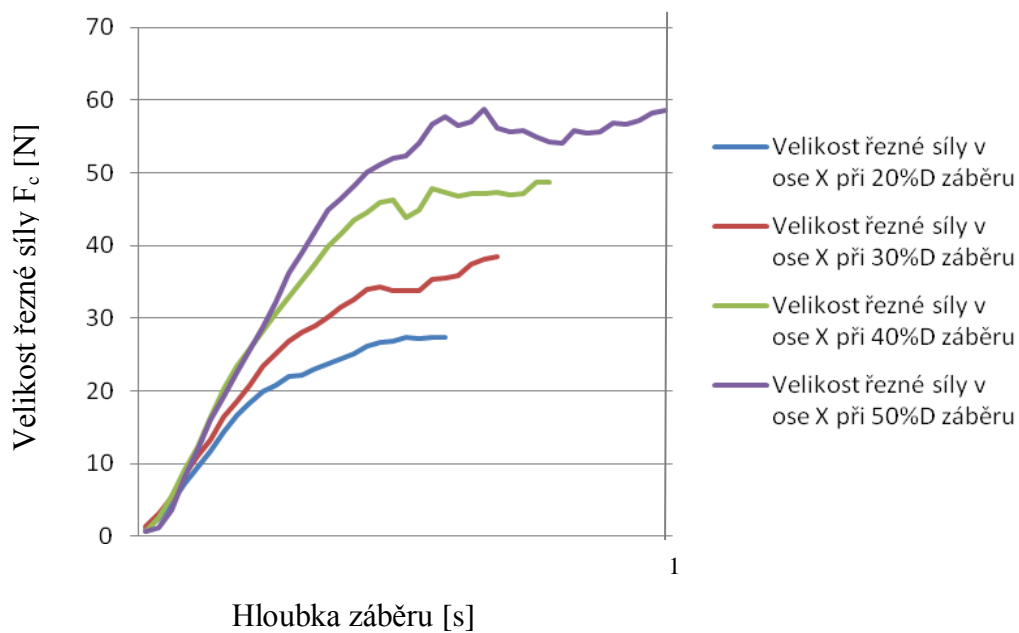
Maximální řezná síla v ose Y: $F_{20\%}= 5,816$ N

$F_{30\%}= 4,107$ N

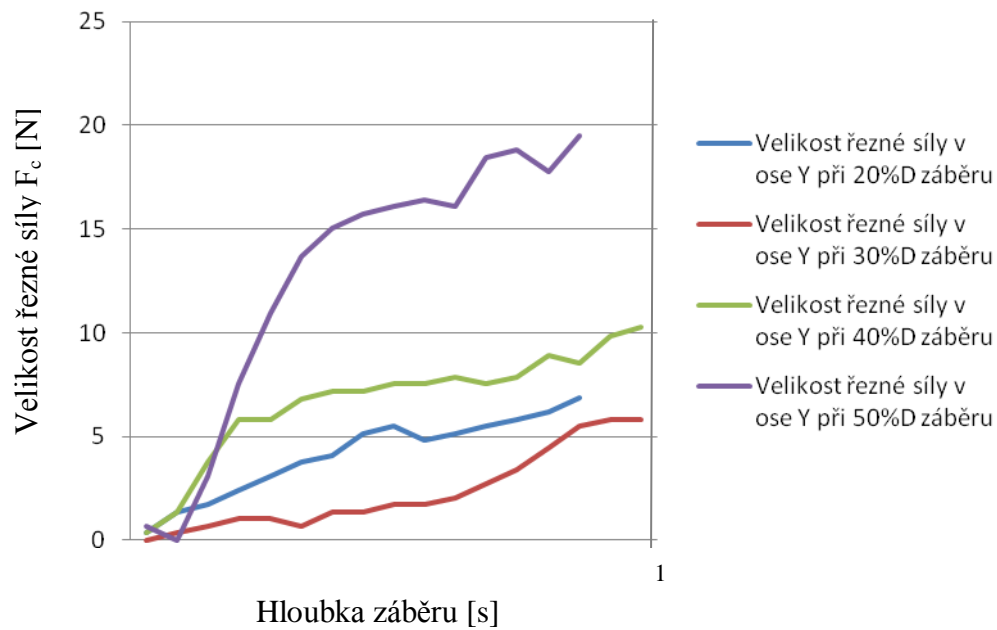
$F_{40\%}= 4,781$ N

$F_{50\%}=11,276$ N

Graf 9: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X



Graf 10: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y



Nástroj: čtyřzubá tvrdokovová fréza povlakovaná s průměrem 8 mm

Vzorek: kompozitní deska složená ze tří laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a dvou vrstvách PET pěny o tloušťce 10 mm a 6 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F_{20\%}=27,407$ N

$F_{30\%}=38,397$ N

$F_{40\%}=48,678$ N

$F_{50\%}=58,605$ N

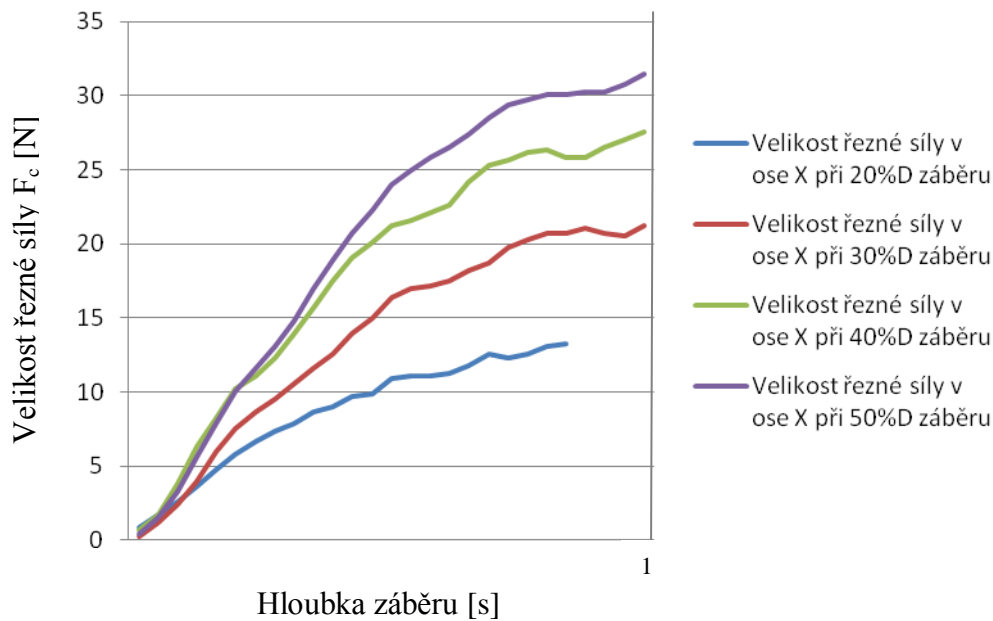
Maximální řezná síla v ose Y: $F_{20\%}= 6,842$ N

$F_{30\%}= 5,816$ N

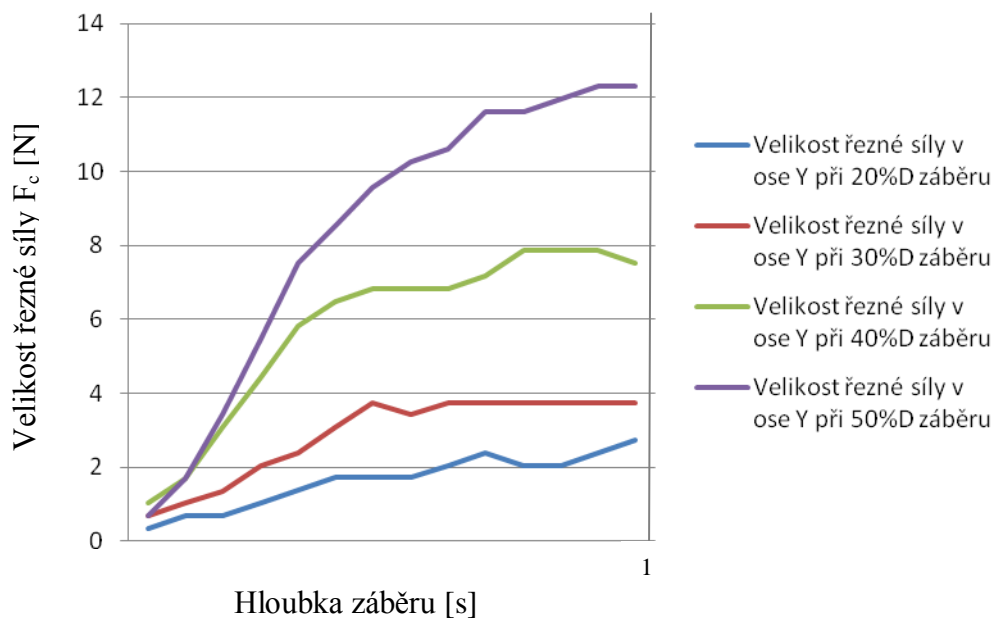
$F_{40\%}=10,250$ N

$F_{50\%}=19,480$ N

Graf 11: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X



Graf 12: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y



Nástroj: čtyřzubá tvrdokovová fréza povlakovaná s průměrem 8 mm

Vzorek: kompozitní deska složená ze dvou laminátových vrstev POLYREY o tloušťce jedné vrstvy 1,2 mm a jedné vrstvy PET pěny o tloušťce 16 mm.

Maximální řezná síla v ose X: $F_{20\%}=13,226$ N

$F_{30\%}=21,202$ N

$$F_{40\%}=27,584 \text{ N}$$

$$F_{50\%}=31,484 \text{ N}$$

Maximální řezná síla v ose Y: $F_{20\%}= 2,740 \text{ N}$

$$F_{30\%}= 3,755 \text{ N}$$

$$F_{40\%}= 7,857 \text{ N}$$

$$F_{50\%}=12,301 \text{ N}$$

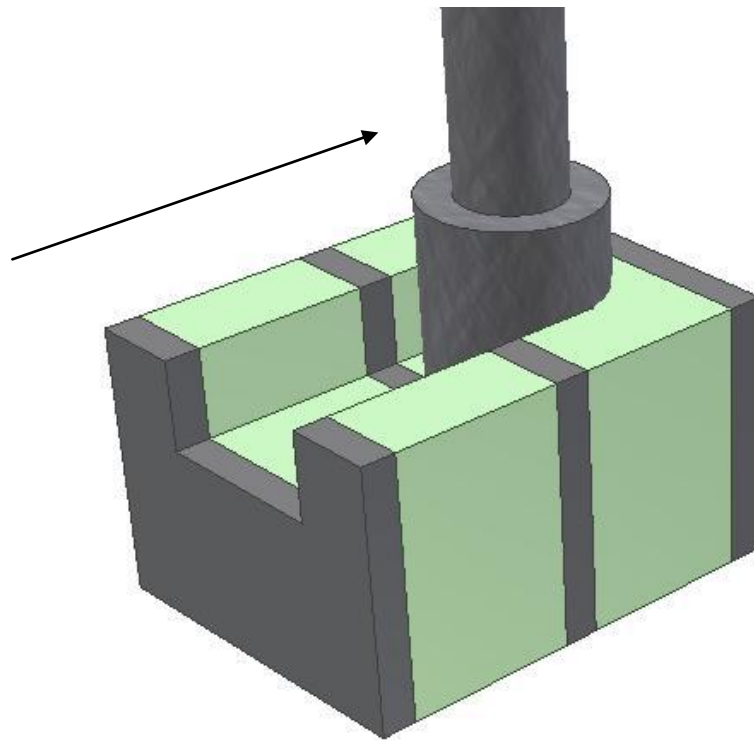
Z výsledků je zřejmé, že velikosti řezných sil jak v ose X, tak i v ose Y jsou závislé na velikosti záběru nástroje při obrábění. Se zvětšujícím se záběrem nástroje se zvětšuje i velikost sil.

V této kapitole jsou porovnávány dva druhy nástrojů. Prvním je fréza z tvrdokovu s povlakem, druhá je z tvrdokovu bez povlaku. Povlak na nástroji na velikost řezných sil však nemá téměř žádný vliv.

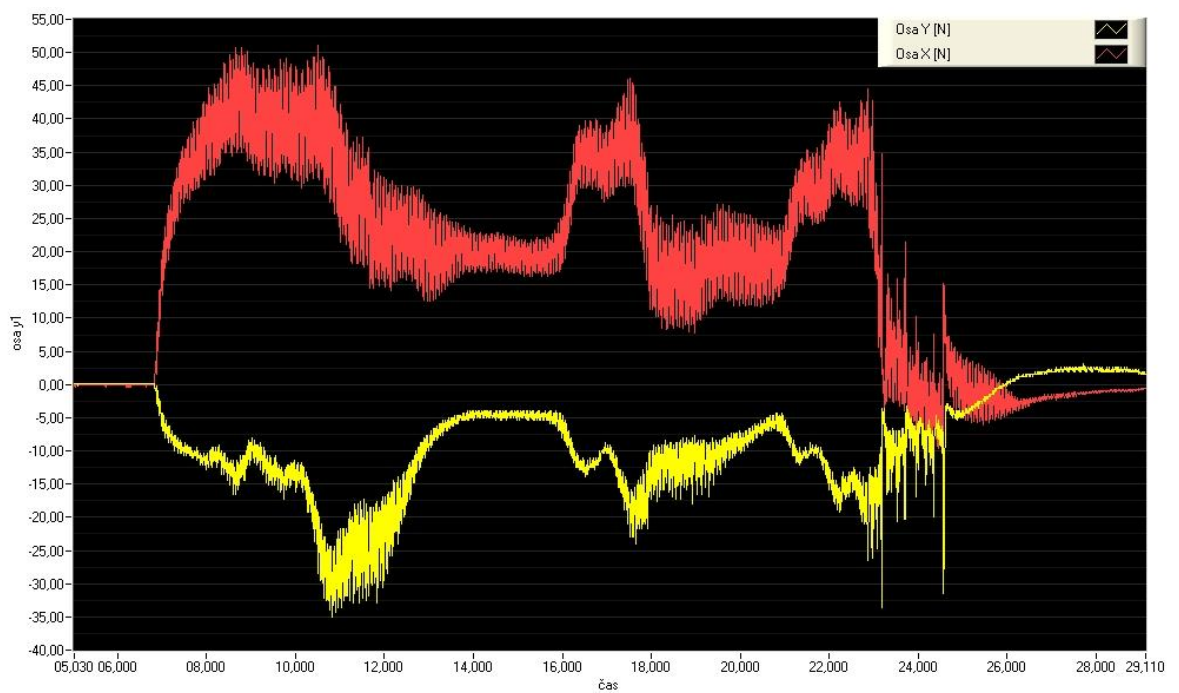
Příčné frézování

Kromě měření řezných sil podélným frézováním byly měřeny řezné síly i při příčném frézování (obr. 13). Z grafů (obr. 14 a 15) je zřejmé, že velikost řezných sil se výrazně zvyšuje při obrábění laminátové vrstvy.

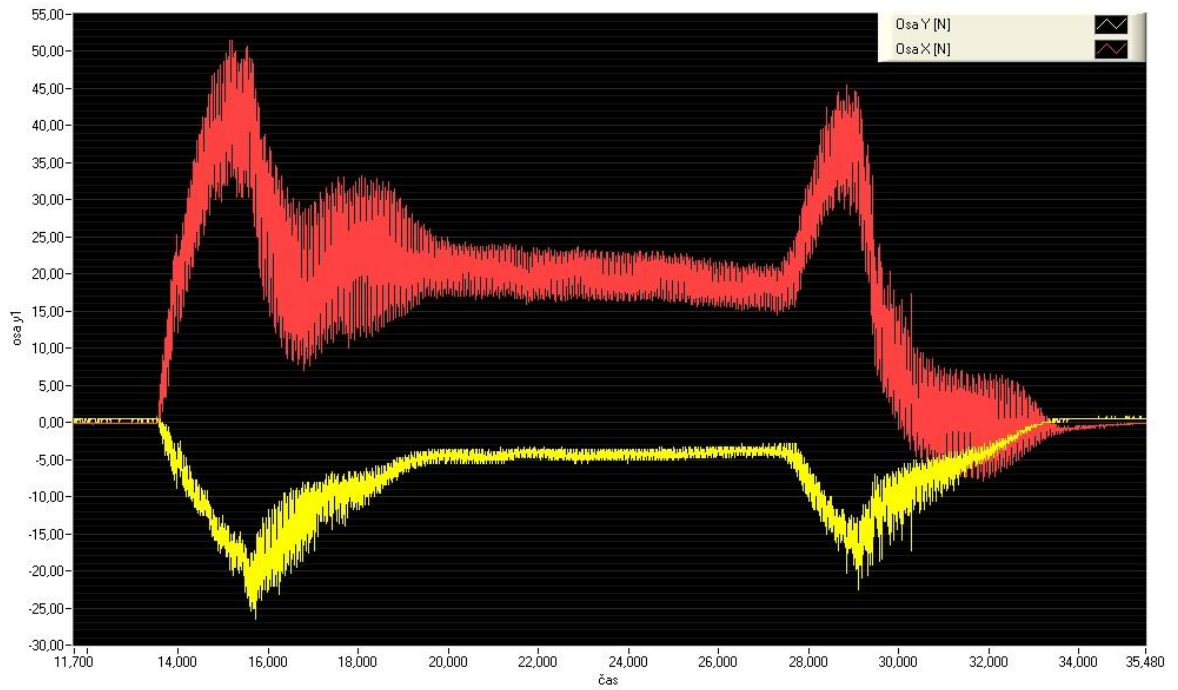
Na obrázku 14 je znázorněn průběh řezných sil při frézování kompozitní desky se třemi laminátovými vrstvami, na obrázku 15 se jedná o kompozitní desku se dvěma laminátovými vrstvami.



Obr. 15 Schéma příčného frézování



Obr. 16 Průběh řezných sil příčným frézováním 1



Obr. 17 Průběh řezných sil příčným frézováním 2

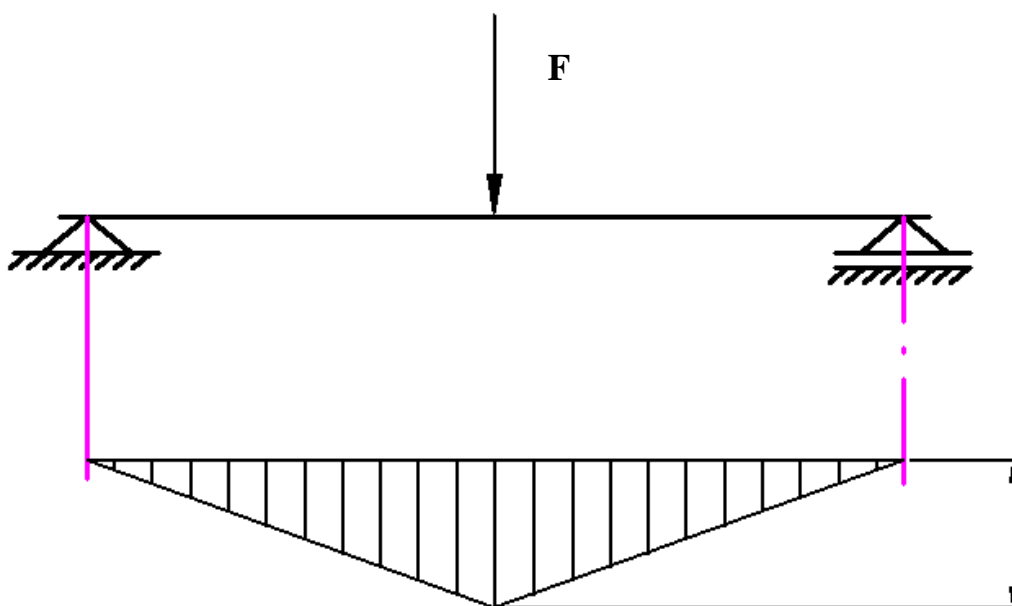
6 KONSTRUKCE DYNAMOMETRU

Druhou kapitolou praktické části je konstrukce dynamometru určeného k měření řezných sil při řezání okružní pilou. Součástí dynamometru je i upínací přípravek pro vzorky kompozitních desek různých materiálů, posuvný mechanismus skládající se z kuličkového šroubu a kolejnicového vedení. Celý mechanismus je poháněn elektromotorem s regulací otáček a čelní převodovkou. Sestava je konstruována v programu Autodesk Inventor 11.

Konstrukce bude sloužit k měření řezných sil při obrábění řezáním na okružní pile. Výsledky měření budou sloužit k vyhodnocování efektivnosti a ekonomičnosti vybraného způsobu obrábění.

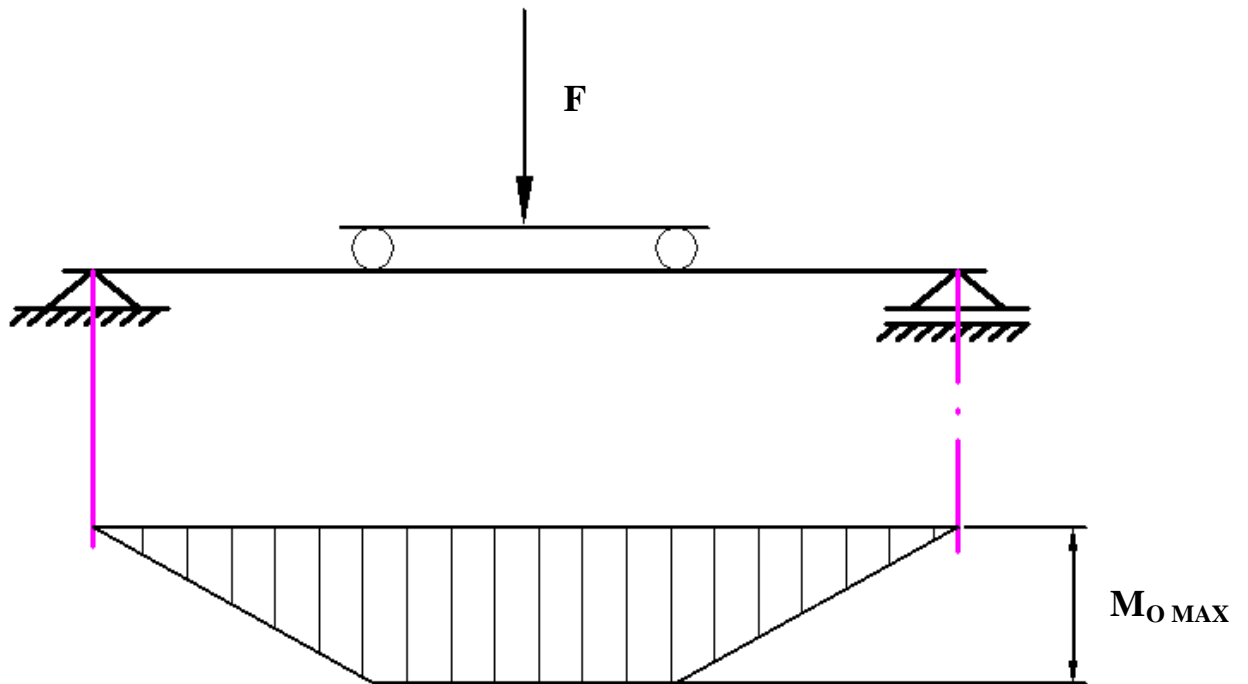
6.1 Mechanismus měření řezných sil

Dynamometr je konstruován pro měření řezných sil pomocí elektrických odporových tenzometrů. Před samotným měřením musíme tenzometr zatížit přesným závažím, změříme velikost deformace, podle které odměřujeme hodnoty při samotném měření. Tenzometr určuje velikost řezných sil pomocí deformace prvku, na který je připojen. Tímto prvkem je malý nosník, který se přes dva opěrné body dotýká přímo obráběného vzorku (kompozitní desky). Pokud bychom opěrné body nepoužili, museli bychom umístit tenzometr přesně doprostřed nosníku (obr. 18).



Obr. 18 Schéma ohybového momentu bez opěrných bodů

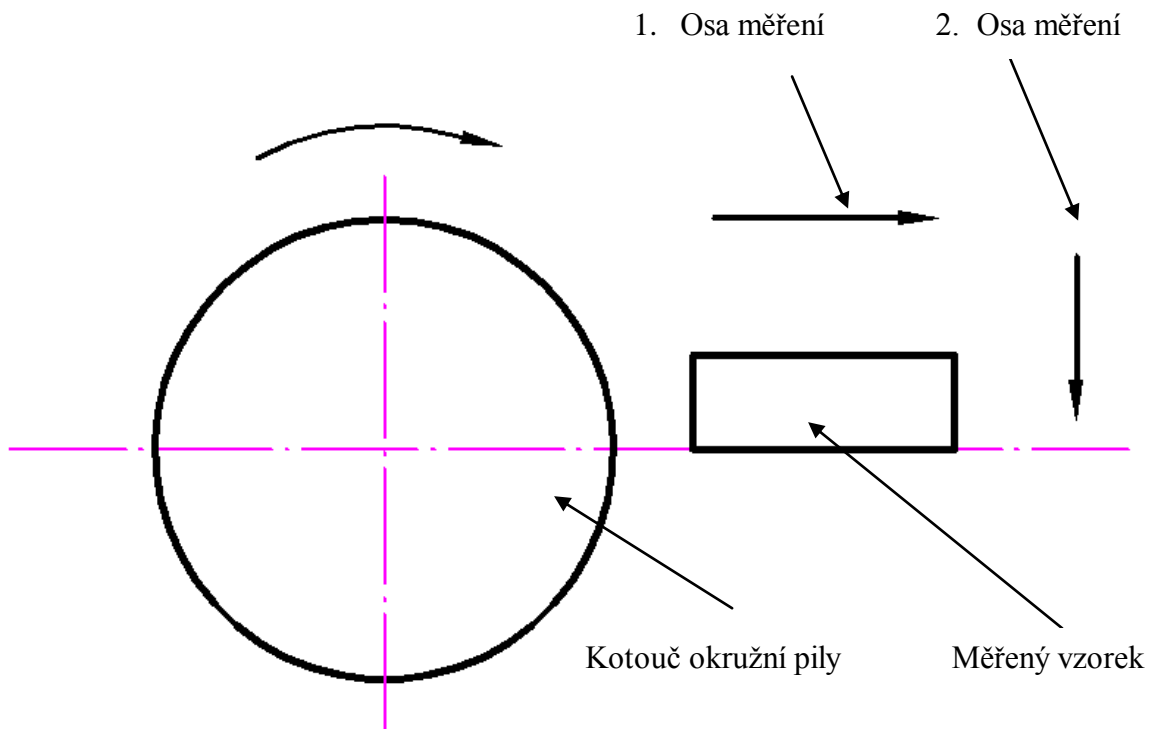
Použitím opěrných bodů dosáhneme toho, že velikost řezných sil mezi nimi je vždy konstantní.



Obr. 19 Schéma ohybového momentu s opěrnými body

V sestavě malých nosníků jsem volil jako opěrný bod válečky proto, aby mezi měřeným vzorkem a nosníkem s připojeným tenzometrem docházelo pouze k tečnému dotyku a tím minimalizoval případné měřicí odchylky.

Měření řezných sil probíhá ve dvou směrech, ve kterých je počítáno s největšími silami vzhledem ke směru otáčení řezného kotouče.



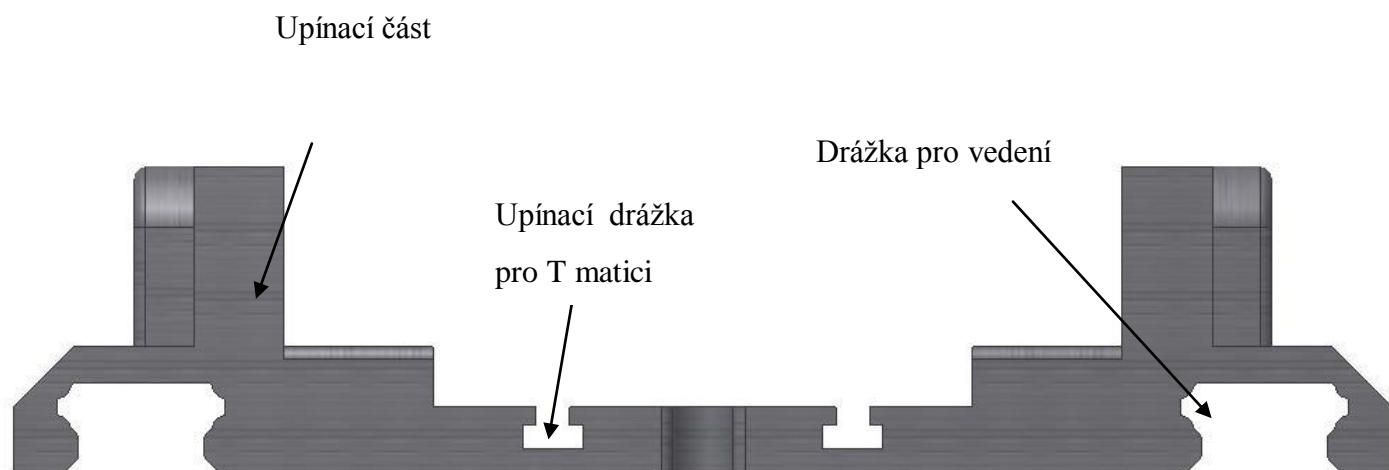
Obr. 20 Schéma směrů měřených sil

6.2 Konstrukční schéma dynamometru

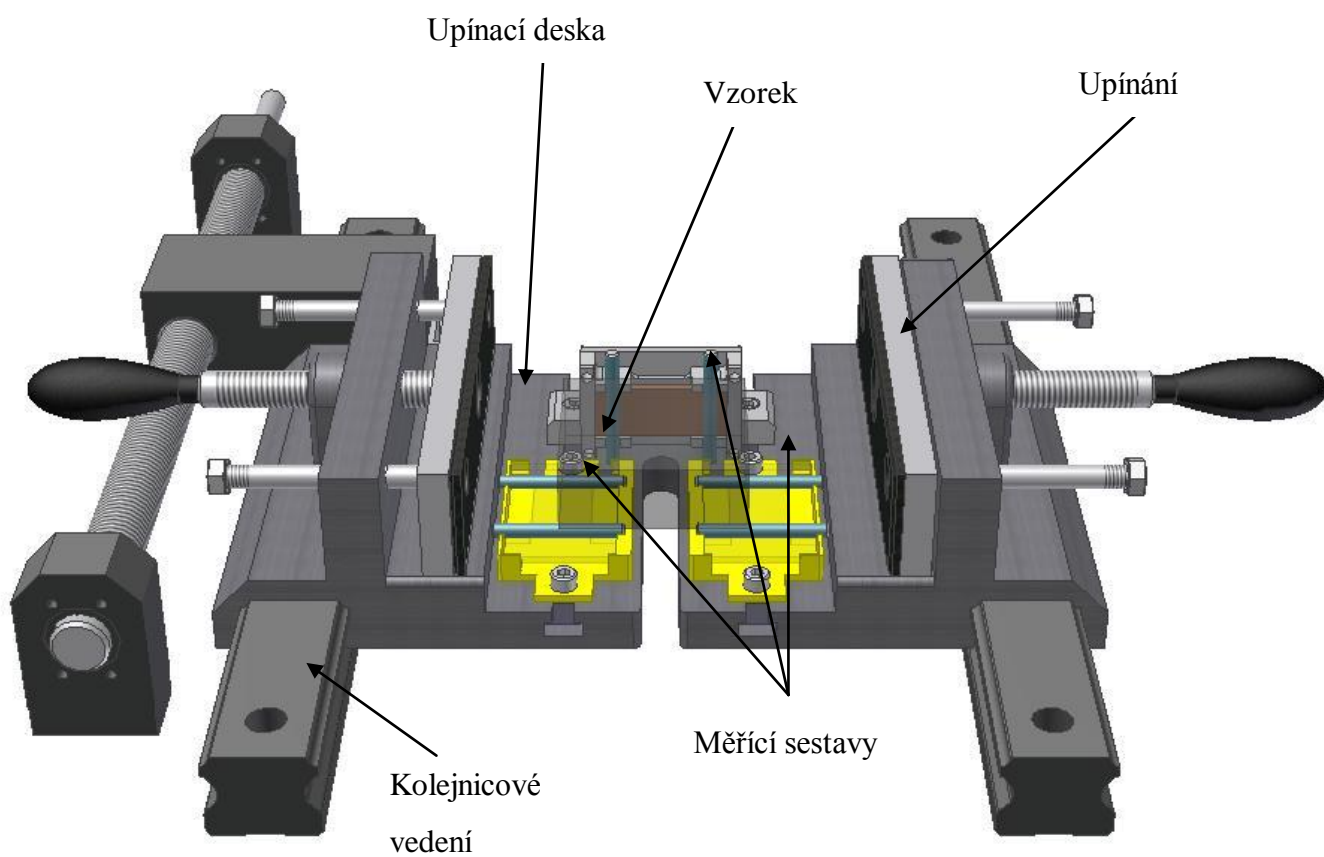
Samotný konstrukční návrh dynamometru je navržen pro řezání kompozitních desek o rozměrech od 50mm x 50mm až po desky o rozměrech 100mm x 100mm. Tloušťka desek byla vždy konstantní, a to 18mm.

6.2.1 Upínací deska

Základním konstrukčním prvkem je upínací deska, která slouží jak k upnutí samotného vzorku, tak i k upnutí sestavy měřících prvků s tenzometry. Upínací deska je uložena ve vedení umožňující pohyb soustavy vůči kotouči okružní pily – posuv.



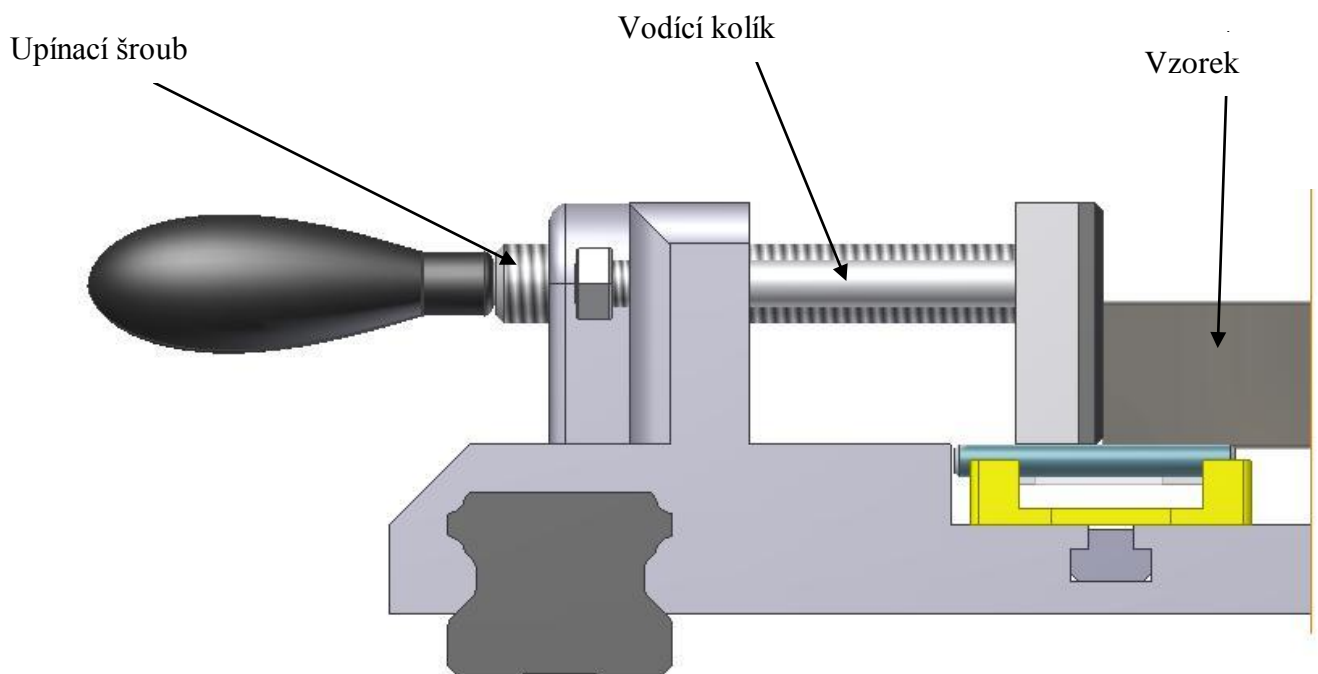
Obr. 21 Upínací deska dynamometru z profilu



Obr. 22 Upínací deska dynamometru

Prioritou při návrhu upínací desky byla dostatečná tuhost vzhledem k přesnosti naměřených hodnot při řezání. Snahou také bylo implementovat co nejvíce funkčních částí do upínací desky kvůli jednoduchosti celého systému.

Upínací deska má několik odlišných funkcí. První a hlavní je samotné upnutí vzorku. Upnutí je realizováno párem upínacích kleštin. Upnutí a samotný pohyb kleštin je dosažen pomocí šroubů. Otáčením šroubu dosáhneme upnutí vzorku, respektive jeho uvolnění. Pro větší stabilitu kleštin je sestava opatřena také dvojicí vodících kolíků s maticemi na koncích sloužících také jako doraz.



Obr. 23 Upínání vzorku

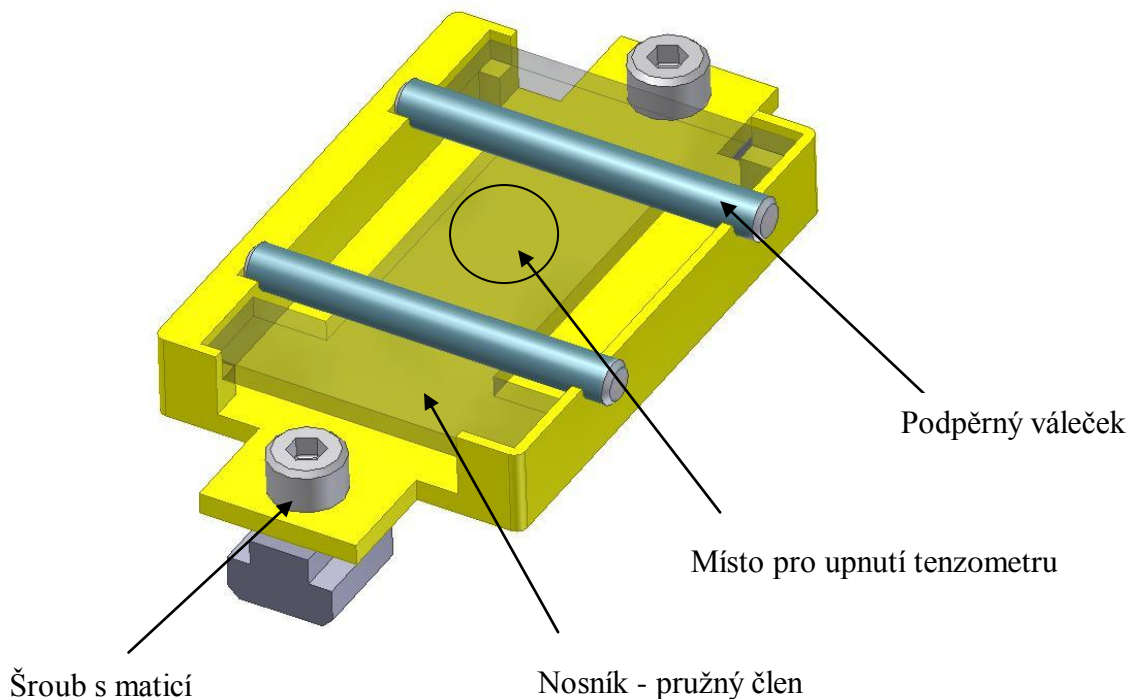
Další funkční částí jsou T drážky pro upnutí měřicí sestavy. Výhodou drážek je možnost libovolného posouvání měřicí sestavy po celé délce desky. Měřicí sestava je v upínací desce upnuta pomocí šroubů a T matic.

Poslední funkční částí jsou drážky pro kolejnicové vedení. Umožňuje lineární posuv celé soustavy pomocí kuličkového šroubu s pohonem motoru s převodovkou.

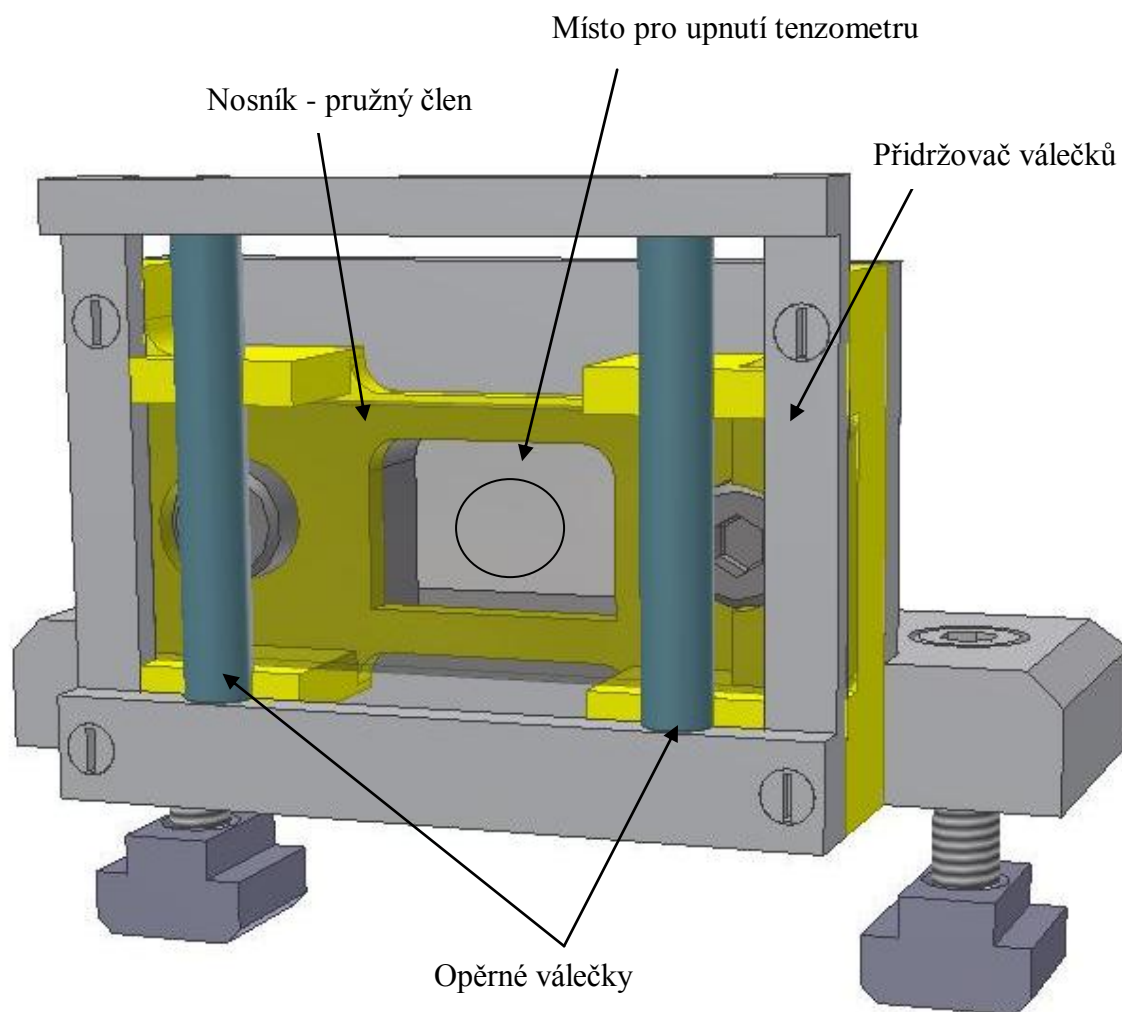
6.2.2 Měřicí soustava s tenzometrem

Jak již bylo v kapitole 5.1 uvedeno, dynamometr měří řezné síly pomocí odporového tenzometru, který měří deformaci pružného členu a přepočítává jej na velikost řezné síly. V následujících dvou obrázcích jsou znázorněny měřicí sestavy, způsob upnutí nosníku a fixace opěrných válečků.

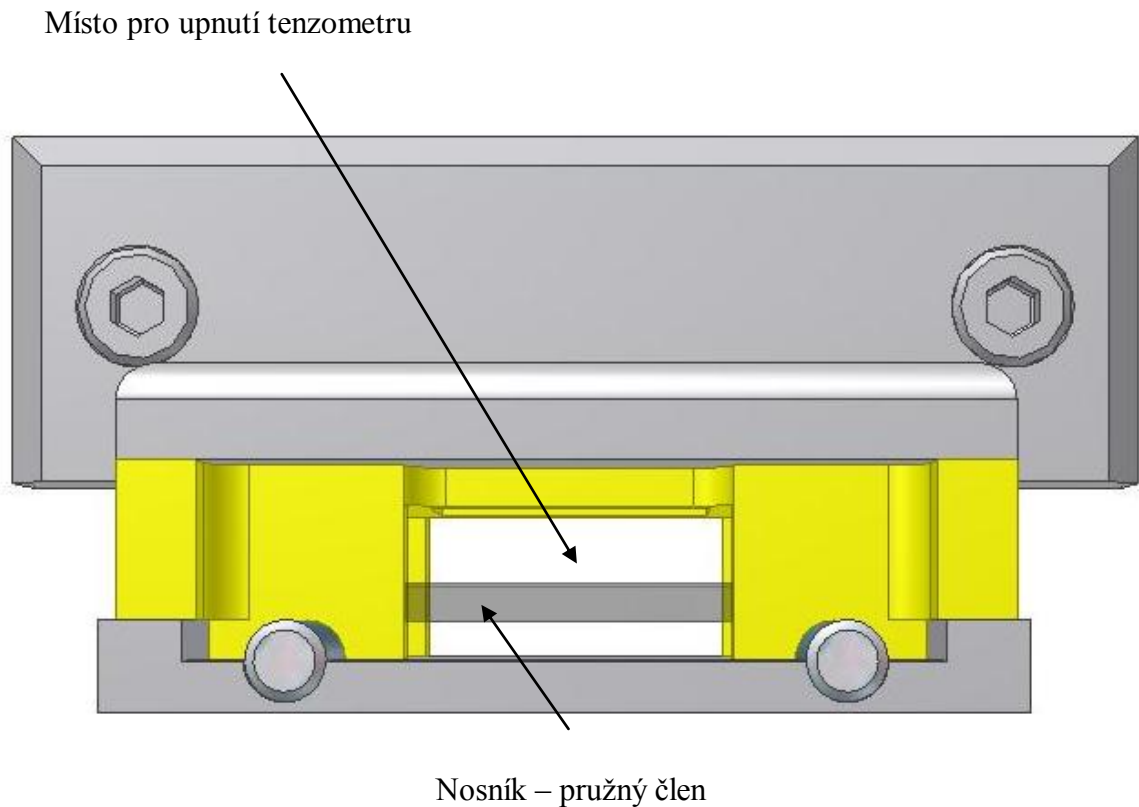
Vzorek je v tečném styku s opěrnými válečky na měřících soustavách. Při řezání dochází ke vzniku řezných sil, které působí na opěrné válečky. Válečky přenášejí síly na nosník, na kterém jsou připevněny tenzometry. Ty vyhodnocují velikosti deformací a přepočítávají je na velikost řezných sil.



Obr. 24 Sestava spodního dynamometru



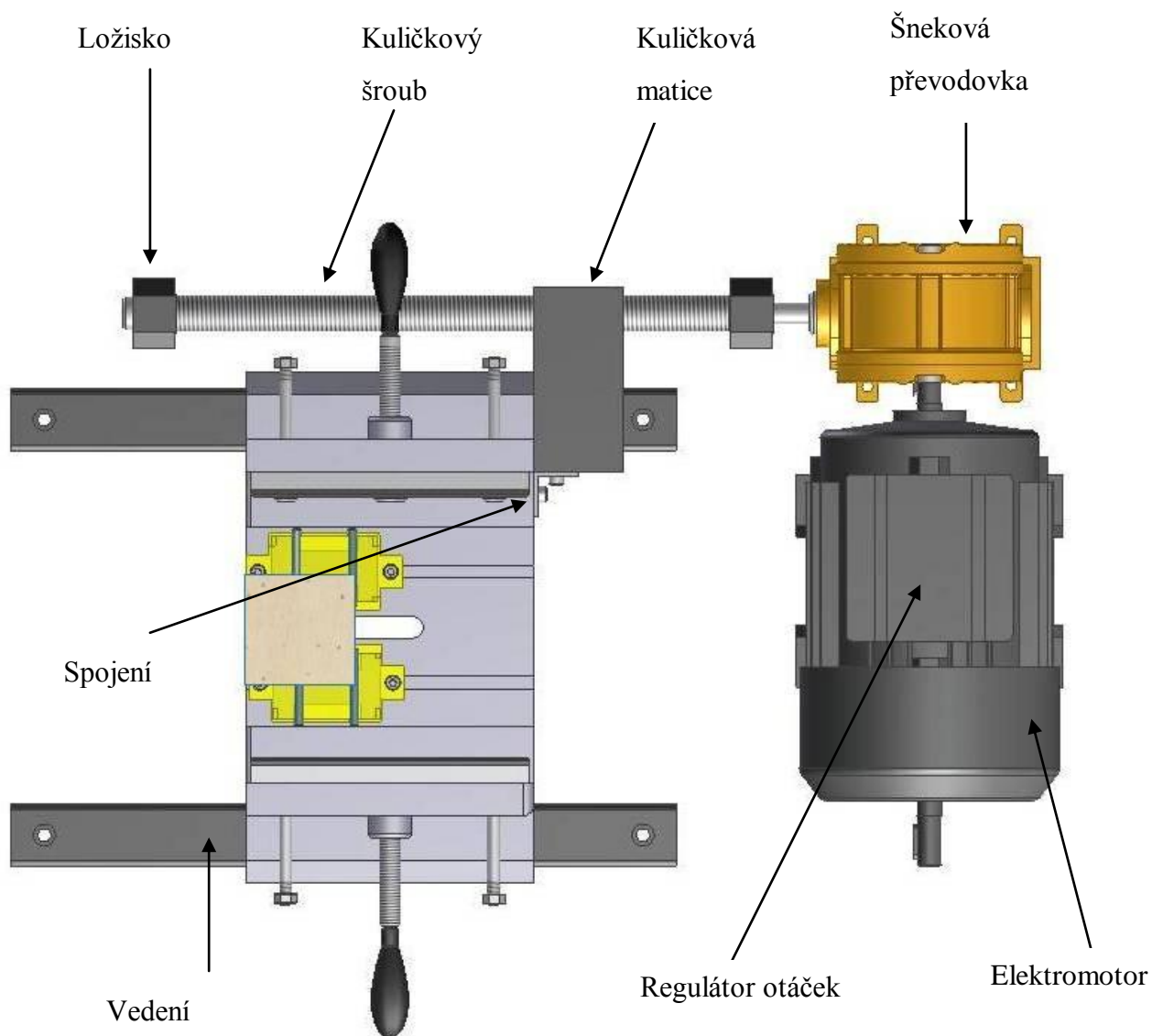
Obr. 25 Sestava zadního dynamometru 1



Obr. 26 Sestava zadního dynamometru 2

6.2.3 Soustava posuvu

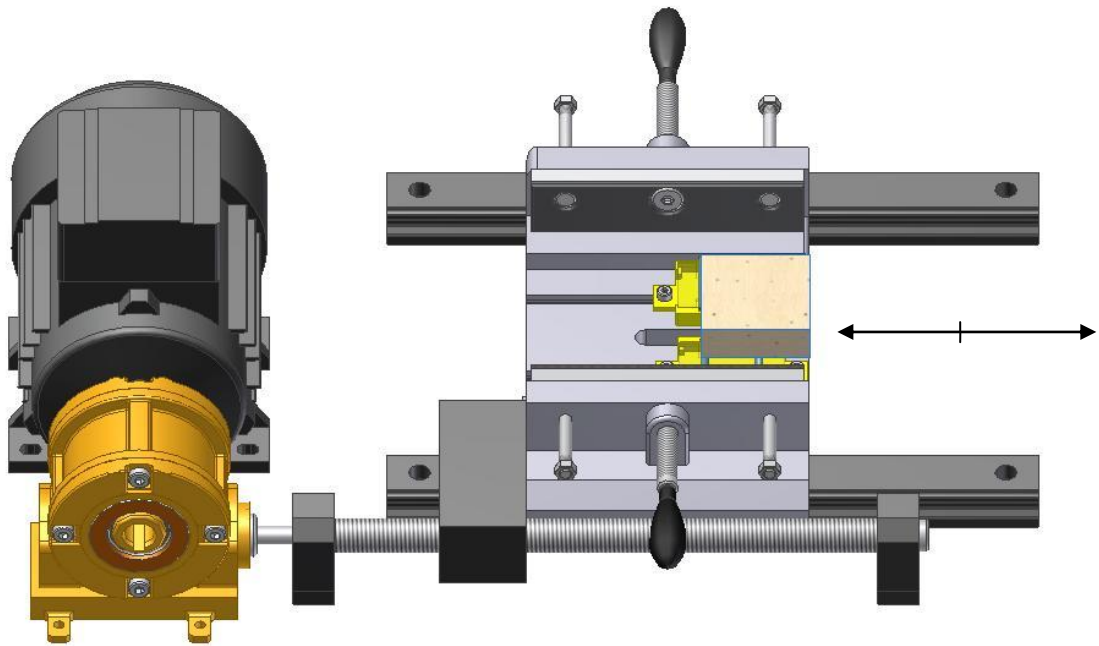
Posuv dynamometru je realizován pomocí válcovaného kuličkového šroubu uloženého v ložiskových domečcích. Pohybujícím členem je příruba - kuličková matice, která je pevně spojena s upínací deskou pomocí plechu ve tvaru L. Otáčením kuličkového šroubu dochází k lineárnímu posuvu celé soustavy dynamometru. Sestava je poháněna elektromotorem s regulací otáček a šnekovou převodovkou.



Obr. 27 Soustava posuvu

Určení typu elektromotoru a převodovky

Rozsah rychlosti posuvu byl stanoven v rozmezí od 20 do 200 mm/minutu. Zvolený typ kuličkového šroubu má stoupání závitu 5mm/otáčku. Tzn., že rychlost otáčení kuličkového šroubu má být v rozmezí od 4 do 40 otáček/minutu. V sestavě je zvolena šneková převodovka o převodovém poměru 1:60. Elektromotor má mít tedy otáčky v rozmezí od 240 do 2400 otáček/minutu.



Obr. 28 Celkový pohled

Volil jsem elektromotor od firmy SIEMENS 1LA7050-2AA o výkonu 0,09kW a maximálních otáčkách 2800 min^{-1} . Elektromotor je opatřen regulací otáček (frekvenčním měničem).

6.3 Ekonomické hodnocení projektu

Uvedené ceny slouží jako přehled ekonomické náročnosti při realizaci projektu.

- Elektromotor značky SIEMENS, typ 1LA7050-2AA, výkon 0,09kW, cena 1.900 Kč. [13]
- Šneková převodovka, typ MR25, přev. poměr 1:60, cena 1.900 Kč. [14]
- Frekvenční měnič řady E2, typ E2 - 2P2 - H1F, cena 5.900 Kč. [15]
- Kuličkový šroub, válcovaný, typ SF 1605-300, průměr 16 mm, cena 550 Kč. [16]
- Elektrický odporový tenzometr, typ SGD-1.5/120-LY11, 3 kusy, cena 4.200 Kč. [17]
- Příslušenství (šrouby, matice, podložky, těsnící kroužky apod.), cena cca 500 Kč
- Materiál (široká ocel, desky, tyče apod.) cena celkem cca 5.000 Kč.

- Práce na CNC stroji včetně vytvoření programu, odhad časové náročnosti cca 12 hodin, cena 1 200 Kč/hod, celková cena 15.000 Kč.

Celková cena projektu je odhadnuta na 35.000 Kč.

Při konstrukci dynamometru bylo dbáno na použití výhradně normalizovaných dílů. Důvodem je vysoká cena za práci na obráběcích strojích, návrh CNC programu a ceny materiálů. Celková cena projektu může být výrazně snížena výrobou nenormalizovaných částí např. na univerzitních strojích.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s problematikou obrobiteľnosti materiálů, její rozdělení a zjišťování velikostí řezných sil. Diplomová práce je zaměřena na zjišťování obrobiteľnosti u kompozitních materiálů, tudíž je zde také uvedeno základní rozdělení kompozitních materiálů. Poslední kapitolou teoretické části je úvod do problematiky zjišťování řezných sil s důrazem na přímé metody zjišťování pomocí dynamometru.

Praktická část slouží jako podklad k výzkumu závislosti druhu obrábění, typu obráběného materiálu a druhu použitého nástroje při obrábění na obrobiteľnost kompozitních desek. Experimentální měření řezných sil dynamometrem při frézování je důležité z hlediska porovnání velikostí řezných sil při různých technologických podmínkách obrábění. Výsledky měření nám prokázaly, že největší vliv na velikost sil má počet laminátových vrstev v obráběném materiálu. Naopak vliv druhu použitého nástroje nemá tak velký vliv na velikost řezných sil jak se očekávalo. Povrchová úprava nástroje dokonce neprokázala téměř žádný vliv na velikost sil.

Další kapitolou je návrh konstrukce dynamometru pro obrábění řezáním okružní pilou. Zadáním bylo, navrhnou a vykreslit sestavu dynamometru s posuvem, na kterém by bylo možné měřit řezné síly ve dvou hlavních směrech obrábění. Sestava byla konstruována v programu Autodesk Inventor 2011. Součástí konstrukce je také kalkulace nákladů na realizaci projektu. Celková cena projektu byla odhadnuta na 35.000 Kč.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JURKO, Jozef a Imrich LUKOVICS. *Obrábatel'nosť materiálov*. prvé. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008. ISBN 978-80-7318-736-1.
- [2] JANÁČ, Alexander, Bohumil BÁTORA, Ivan BARÁNEK a Zdenko LIPA. *Technológia obrábania*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2004. ISBN 80-227-2031-3.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [4] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-807-3722-791.
- [5] AGARWAL, Bhagwan D. *Vláknové kompozity*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1987, 114 s.
- [6] Co jsou to kompozitní materiály. *GDP KORAL, s. r. o.* [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz>
- [7] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL, 1988.
- [8] NESLUŠAN, Miroslav, Stanislav TUREK, Jozef BRYCHTA, Robert ČEP a Marián TABAČEK. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilinská Univerzita: EDIS, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [9] LIEMERT, Gaston. *Obrábění*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1972.
- [10] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *Technická měření*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Strojní fakulta, 2000, 212 s. ISBN 80-010-2138-6.
- [11] VOJÁČEK, Antonín. Fóliové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART195-foliove-tenzometry--princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [12] HAASZ, Vladimír. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 337 s. ISBN 80-010-2731-7.
- [13] Elektromotory SIEMENS. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.elektromotory.net/siemens/1la7-3000-otacek.html>

- [14] Šneková převodovka MR25. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.prevodovky-elektromotory.cz/mr/snekova-prevodovka-mr25.html>
- [15] Frekvenční měnič E2. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.konzult.cz/rada-e2-0-2-2-2-kw/>
- [16] Kuličkový šroub. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/kulickove-srouby_c
- [17] Tenzometrický snímač. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=SGD_LINEAR1-AXIS&Nav=pree02

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

k_v	Koeficient obrobitelnosti materiálu
v_T	Řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost T u zkoumaného materiálu
v_{Te}	Řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost u etalonového materiálu.
h_e	Hloubka vniknutí nože pro etalonový materiál
h	Hloubka vniknutí nože pro zkoušený materiál
F_c	Tangenciální složka řezné síly
L	Délka vrtáku pro zkoušený materiál
L_e	Délka vrtáku pro etalonový materiál
n	Počet předvrtaných děr
l	Délka díry
l_1	Délka poslední díry, ve které dojde k poškození vrtáku
d_e	Průměr vtisku kuželu pro etalonový materiál
d	Průměr vtisku kuželu pro zkoušený materiál
S	Sféricita částice
I	Izometrie částice
R_{uw}	Pevnost whiskeru v tahu
R_{um}	Mez lomu whiskeru
ε_u	Deformace při lomu
R	Řezný odpor
F_c	Složka řezné síly
F_f	Posuvová síla
F_p	Pasivní složka síly obrábění
$M_{O\ Max}$	Maximální ohybový moment
a_d	Hloubka záběru

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip metody podle Leyensettera [1]	16
Obr. 2 Určení délky vrtání [1]	17
Obr. 3 Schéma zařízení pro metodu vrtání při konstantní řezné síle [1]	18
Obr. 4 Částicový kompozit s platovou maticí [3]	24
Obr. 5 Výroba skleněných vláken [4]	27
Obr. 6 Průměr uhlíkového vlákna (černé) v porovnání s lidským vlasem.....	28
Obr. 7 Tahový diagram whiskeru [4].....	30
Obr. 8 Schéma rozložení složek síly řezání při soustružení [8]	32
Obr. 9 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování [8]	32
Obr. 10 Schéma rozložení složek síly řezání při vrtání [8].....	33
Obr. 11 Odporové kovové tenzometry	37
Obr. 12 Princip fóliového tenzometru [11]	37
Obr. 13 Třísá frézka.....	40
Obr. 14 Schéma podélného frézování	42
Obr. 15 Schéma příčného frézování.....	53
Obr. 16 Průběh řezných sil příčným frézováním 1	53
Obr. 17 Průběh řezných sil příčným frézováním 2	54
Obr. 18 Schéma ohybového momentu bez opěrných bodů	55
Obr. 19 Schéma ohybového momentu s opěrnými body.....	56
Obr. 20 Schéma směrů měřených sil.....	57
Obr. 21 Upínací deska dynamometru z profilu.....	58
Obr. 22 Upínací deska dynamometru	58
Obr. 23 Upínání vzorku	59
Obr. 24 Sestava spodního dynamometru	60
Obr. 25 Sestava zadního dynamometru 1	61
Obr. 26 Sestava zadního dynamometru 2	62
Obr. 27 Soustava posuvu	63
Obr. 28 Celkový pohled	64

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tabulka 1 Základní vlastnosti přírodních vláken [3].....	26
Tabulka 2 Základní vlastnosti vláken v porovnání s ocelí a sklem [3].....	28
Tabulka 3 Přehled základních vlastností keramických vláken [3]	29
Tabulka 4 Vlastnosti základních typů kovových vláken [3].....	29
Graf 1: Průběh velikostí řezných sil při frézování.....	43
Graf 2: Průběh velikostí řezných sil při frézování.....	44
Graf 3: Průběh velikostí řezných sil při frézování.....	44
Graf 4: Průběh velikostí řezných sil při frézování.....	45
Graf 5: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X.....	46
Graf 6: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y.....	47
Graf 7: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X.....	48
Graf 8: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y.....	48
Graf 9: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X.....	49
Graf 10: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y.....	50
Graf 11: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose X.....	51
Graf 12: Průběh velikostí řezných sil při frézování v ose Y	51

SEZNAM PŘÍLOH

Výkres 01: Upínací deska

Výkres 02: Držák desky 1

Výkres 03: Držák desky 2

Výkres 04: Šroub držáku

Výkres 05: Kolík držáku

Výkres 06: Kuličková matice

Výkres 07: Držák tenzometru zadní

Výkres 08: Pásek tenzometru zadní

Výkres 09: Nosník zadní

Výkres 10: Držák nosníku zadní

Výkres 11: Nosník dolní

Výkres 12: Držák nosníku dolní

Výkres 13: Spojka