



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NEŽÁDOUCÍ JEVY PROVÁZEJÍCÍ OBRÁBĚNÍ DŘEVA

NEGATIVE ISSUES ACCOMPANYING WOODWORKING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michaela Zellerová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Michaela Zellerová**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok: 2021/22

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:

Nežádoucí jevy provázející obrábění dřeva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obrábění dřeva jako přírodního materiálu je do značné míry specifická záležitost, ať už jde o masiv či různé verze dřevotřísek včetně laminátových povrchů s potiskem kresby dřeva. Vyskytuje se zde řada nepříjemných jevů, se kterými musí výrobní proces počítat. Toto téma rozebírá určité případy.

Cíle diplomové práce:

- Rozbor dřeva jako přírodního materiálu.
- Strojní a ruční výrobní procesy.
- Výběr několika druhů dřeva pro navazující experimenty.
- Obrábění s měřením a analýzou vibrací.
- Obrábění s měřením a analýzou teploty.
- Vyhodnocení kvality obroběných povrchů u vzorků dřeva.
- Posouzení finálních výrobků z pohledu zákazníků.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PATŘIČNÝ, Martin. Dřevo krásných stromů. 3. vyd. Praha: Grada, 2005. 144 s. ISBN 978-80-247-1193-5.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. P. 730. ISBN 0-07-146271-6.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce vypracovaná v rámci studia strojírenské technologie se zabývá nežádoucími jevy provázejícími obrábění dřeva, pojednává o dřevě a jeho vlastnostech i vhodných výrobních procesech, konkrétněji frézování a potřebné přípravě materiálu. Z negativních jevů probíhajících při obrábění dřeva se diplomová práce dále věnuje vibracím, matematicky popisuje kmity a jejich vznik v sestavě. Následuje rozbor změny teploty v řezném procesu a možné metody měření. V praktické části je řešeno měření vibrací na nástroji pomocí dynamometru a měření změny teploty řezného procesu infračerveným teploměrem.

Klíčová slova

Dřevo, obrábění, frézování, vibrace, teplota

ABSTRACT

Diploma thesis written within the study of mechanical engineering deals with negative aspects of wood machining, describes wood as a material and its properties and also manufacturing process. Specifically milling and preparation of materials for it. From negative aspects of wood machining the thesis is focused on emergence of vibrations, its mathematical description and origin. Then the work describes temperature changes in the machining process and possible methods of temperature measurement. In practical part of the thesis is discussed measuring of tool vibrations. Then the work includes temperature measuring of tool by infrared thermometer.

Key words

Wood, machining, milling, vibrations, temperature

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZELLEROVÁ, M. *Nežádoucí jevy provázející obrábění dřeva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 76 s., 7 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Milana Kalivody. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Brně 18. 5. 2022

Bc. Michaela Zellerová

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Kalivodovi za odborné vedení práce a užitečné konzultace.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR DŘEVA	10
1.1 Stavba	11
1.1.1 Makrostruktura	11
1.1.2 Mikrostruktura	13
1.2 Vlastnosti	14
1.2.1 Fyzikální vlastnosti	14
1.2.2 Mechanické vlastnosti	15
1.3 Vybrané druhy dřeva	16
2 VÝROBNÍ PROCESY	19
2.1 Příprava materiálu	21
2.2 Ruční obrábění	24
2.3 Řezání	25
2.4 Frézování	26
3 NEŽÁDOUCÍ JEVY PŘI OBRÁBĚNÍ DŘEVA	32
3.1 Vibrace při obrábění	33
3.2 Přenos tepla při obrábění	38
4 MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ PŘI OBRÁBĚNÍ	40
4.1 Rozbor řezných sil	42
4.2 Rozbor vibrací	44
5 MĚŘENÍ A ANALÝZA TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ	49
6 VYHODNOCENÍ KVALITY OBROBENÝCH VZORKŮ	51
7 DISKUZE A POSOUZENÍ Z POHLEDU ZÁKAZNÍKA	54
ZÁVĚR	57
Použité zdroje	58
Seznam použitých zkratk a symbolů	63
Slovníček dřevařských a lesnických pojmů	65
Seznam tabulek	66
Seznam příloh	67

ÚVOD

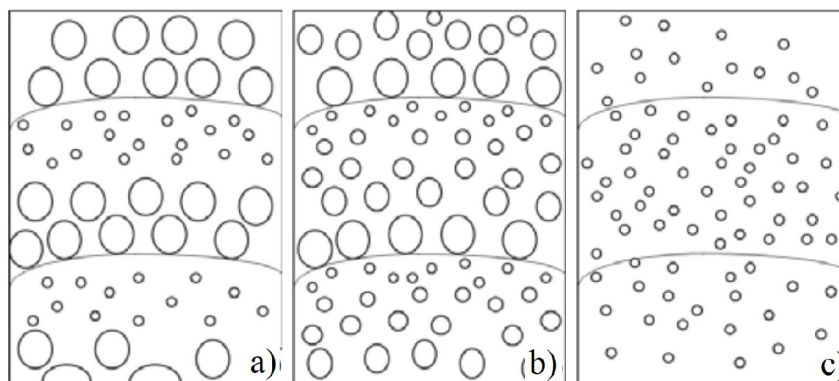
Obráběcí proces provází celá řada jevů, negativních i pozitivních. Ty negativní je třeba kontrolovat a následně optimalizovat řezný proces. Zanedbáním některého z jevů může docházet k poškozování stroje, nástroje, upínače nebo obrobku či vzniku nekvalitní obrobene plochy, nepřesných tvarů a rozměrů výrobku. Dále je zde riziko zranění nebo onemocnění obsluhy strojů či jiných pracovníků provozu. Nežádoucími jevy jsou například vznik vibrací nebo příliš vysoká teplota procesu.

Teoretická část obsahuje popis dřeva, jeho vznik a z toho vycházející vlastnosti. Dále stavbu a strukturu, jeho možné využití, i výhody a nevýhody tohoto materiálu. Následuje konkrétnější popsání smrkového dřeva a uvedení hodnot mechanických vlastností, a to z důvodu jeho využití v experimentální části. Poté se rešerše věnuje výrobním procesům, geometrii nástroje, mechanismu vzniku třísky, nutné přípravě materiálu a obráběcí metodě frézování. Ta se uplatňuje v praktické části.

Cílem vypracování diplomové práce je vytipování negativních jevů provázejících obráběcí proces. Experimentální část zkoumá vznik vibrací při frézování smrkového dřeva na základě nehomogenity materiálu, který je ke vzniku chvění náchylnější. Následuje měření teploty nástroje při frézování. A to z důvodu, že se dřevo považuje za tepelný izolant, což způsobuje, že se teplo kumuluje na nástroji. Tím může docházet k jeho dřívějšímu otupení, případně i ke znehodnocení, spálení materiálu.

1 ROZBOR DŘEVA

Dřevo je materiál organického původu pocházející ze stromů, keřů, lián a polokeřů. Pro průmyslové zpracování je nejvýhodnější použití dřeva ze stromů. Ty se dělí na stromy jehličnaté a listnaté, které se dále třídí na okrasné a ovocné nebo na kruhovitě, polokruhovitě a roztroušeně pórovité dřeviny (obr. 1.1). Kruhově pórovitá struktura je na řezu rozlišitelná podle zřetelně odlišeného jarního dřeva s širokými cévami a letního dřeva s cévami úzkými. Polokruhovitě pórová dřevina se určuje postupným zmenšováním průměru cévy od jarního dřeva k letnímu. Mikrocévy u roztroušeně pórovité struktury jsou rovnoměrně rozprostřeny v celém letokruhu. [1]



Obr. 1.1 Kruhovitě (a), polokruhovitě (b) a roztroušeně pórovité dřeviny (c) [1].

Dřevo je jedním z materiálů s nejširším možným využitím, zároveň má každý druh své specifické vlastnosti a tím se liší vhodnost jejich aplikace. Díky dobré dostupnosti jej člověk využíval už od nejstarších dob jako palivo, pro výrobu nástrojů i stavbu obydlí. V dnešní době se tento materiál dále uplatňuje při výrobě nábytku, papíru a buničiny, uměleckých předmětů, hudebních nástrojů, získává se z něj pryskyřice a přírodní kaučuk. [2]

Výhodou dřeva oproti jiným materiálům je snadná dostupnost, nízká cena i hmotnost a estetický vzhled, který je pro člověka příjemný a uklidňující. Dále také ekologičnost tohoto materiálu, řadí se mezi obnovitelné zdroje a kvůli tomu i dlouhodobě udržitelné. Odpad z výroby i dále nepoužívané výrobky se dají recyklovat na výrobu jiných produktů nebo se jeho spálením přetvoří v energii. Při zpracovávání dřeva pak dochází k úspoře energie. V porovnání s hliníkem až 70krát, s ocelí přibližně 17krát. Sušení a lepení tuto úsporu mírně zmenšují. [3]

Velkým kladem je schopnost materiálu vázat na sebe uhlík, v suchém stavu až 50 % celkové hmotnosti. Stromy během svého života ukládají ze vzduchu oxid uhličitý, který se v nich udrží ještě dlouho po jejich smrti a následně se CO_2 uvolňuje zpět do atmosféry. [3]

Z přírodního původu a snadné recyklace dřeva plyne také jeho velká nevýhoda, a to relativně rychlá degradace vlivem vlhkosti a napadání dřevokazným hmyzem, plísněmi a houhami. Znehodnocení se v praxi zamezuje postřiky a nátěry. Další nevýhodou je vysoká hořlavost, té se také zamezuje ochrannými nátěry. Při obrábění je třeba uvažovat vliv anizotropie, tedy rozdílné vlastnosti v různých směrech, a ohřívání nástroje vlivem špatného odvodu tepla materiálem. Zároveň je velmi náročné chlazení nejběžněji používanými procesními kapalinami, v tomto případě se využívá chlazení plyny. [2]

1.1 Stavba

Struktura materiálu je ovlivněna procesem růstu rostliny. Tento děj probíhá v kambiu, buňky pletiva se dělí, na vnitřní straně je vytvořeno dřevo a na vnější kůra. V mírném podnebném pásu k tomuto procesu dochází pouze ve vegetačním období, tedy od jara do podzimu. Přitom na jaře a v létě roste strom rychleji a tvoří světlejší a lehčí dřevo. Naopak na podzim se buňky dělí pomaleji a produkuje se dřevo tmavší a tvrdší. Výsledky tohoto procesu jsou viditelné na řezu kmenem a nazývají se letokruhy. [4]

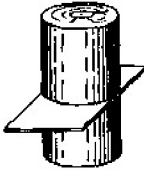





Stavba dřeva se zkoumá na třech úrovních, z každé z nich se o materiálu zjišťují jiné vlastnosti. Podle měřítká zkoumání se dělí na makrostrukturu, mikrostrukturu a submikroskopickou strukturu. Makroskopická struktura je pozorovatelná pouhým okem, popřípadě lupou, zatímco mikrostruktura se sleduje pod mikroskopem. Submikroskopická struktura se zabývá stavbou buněčné stěny a jejím chemickým složením. [5]

1.1.1 Makrostruktura

Makrostruktura je soubor morfoligických znaků, které formují charakteristickou kresbu dřeva. Na této úrovni se také dá určit rodový druh dřeviny, na stanovení druhového jména to již ve většině případech nestačí. Makrostrukturu pozorujeme pomocí tří základních řezů, příčného, radiálního a tangenciálního (tab. 1.1). [6]

Příčný řez je veden kolmo k ose kmene, znázorňuje soustředně probíhající letokruhy. Radiální řez prochází dřevem a je rovnoběžný s osou kmene. Charakteristické jsou pro něj svislé pásy. Tangenciální řez je rovnoběžný s radiálním, ale neprochází osou, dřevem. Letokruhy vyobrazuje jako parabolické útvary. [6]

Tab. 1.1 Základní druhy řezů [6].

Druh řezu	Rovina řezu	Vzhled řezu
Příčný řez		
Radiální řez		
Tangenciální řez		

Makroskopickými znaky jsou také vzhledové vlastnosti, které vytvářejí na povrchu charakteristickou kresbu. Je to například barva, lesk, zvláštnosti textury (obr. 1.2) jako očka, suky, svalovitost, kořenice, lískovcové dřevo a reakční dřevo. [6]

Barva dřeva je jeho charakteristickým znakem. Je značně proměnlivá mezi jednotlivými druhy, mezi jádrem a bělí, mezi jarním a letním dřevem. Proměňuje se také vlivem oxidace, vlhkosti, reakcí na světlo, absorpcí prachu a nečistot. Lesk dřeva je nejvýraznější v radiálním řezu především kvůli dřevným paprskům, které tvoří lesklé plošky. Suky jsou základy živých nebo už odumřelých větví, považují se za vadu dřeva kvůli narušení pravidelnosti textury a změně mechanických vlastností v okolí suku. [6]

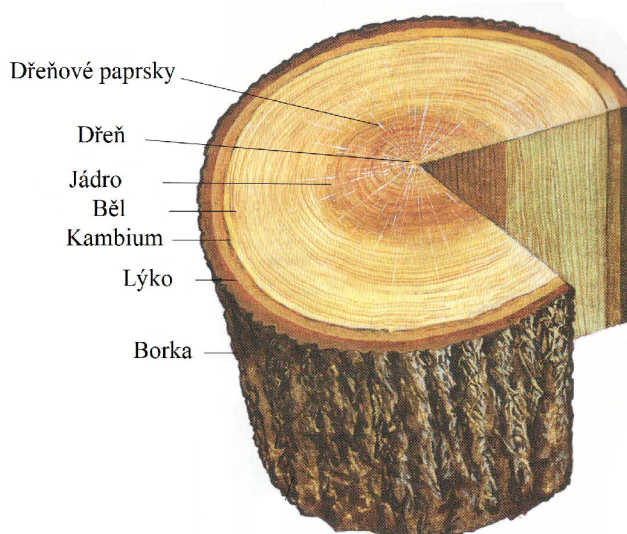


Obr. 1.2 Zvláštnosti textury [1, 7].

Na příčném řezu kmenem stromu (obr. 1.3) je vidět [6, 8]:

- Dřeň – měkká část kruhového nebo oválného tvaru, která se nachází uprostřed kmene. Její funkcí je rozvádění vody a živin. Má nízké mechanické vlastnosti, při vysychání dřeva od ní vznikají nežádoucí dřevné trhliny.
- Dřevné paprsky – odvádí a zásobují živiny z dřeně do dalších částí stromu, jsou orientovány kolmo na osu kmene.
- Letokruhy – tloušťkový přírůstek za vegetační období, skládá se ze dřeva jarního a letního. Jednotlivé druhy dřevin mají rozdílnou tloušťku a stavbu letokruhů. Jejich vzhled je dále ovlivněn také podmínkami, ve kterých strom roste. Šířka letokruhů má vliv na fyzikální i mechanické vlastnosti.
- Jádro – nachází se v centrální části kmene, oproti bělí má tmavší barvu. Jeho funkcí je podpora stability rostliny. Tvoří jej mrtvé pletivo, kterým nemůže protékat voda kvůli přítomnosti jádrových látek (u jehličnanů pryskyřice, u listnáčů gumy, alkaloidy nebo thyly). Z tohoto důvodu je takové dřevo trvanlivější a odolnější proti napadení škůdci. Ne všechny dřeviny jádro tvoří, mezi ty, které ano patří například dub, borovice nebo modřín.

- Běl = xylém – nachází se na vnější části kmene mezi jádrem a kambiem, je světlejší než jádro. Její funkcí je transport a zásobování vodou a minerálními látkami od kořenů směrem k listům. Právě kvůli snadné propustnosti vody je běl náchylná k hnilobě a napadení škůdci. Dřeva neobsahující jádro, pouze běl, se označují jako dřeva bělová. Patří mezi ně například smrk, olše a jedle.
- Lýko = floém – nachází se na vnitřní straně borky. Jeho funkcí je doprava látek vzniklých fotosyntézou do všech částí rostliny. Buňky lýka tvoří provazce, které jsou velmi pevné v tahu, čehož se využívá při jeho zpracování.
- Borka – povrchová část kmene i kořenů, její vzhled je pro každou dřevinu mírně odlišný. Může být hluboká a rýhovatá nebo tenká a hladká. Borka je tvořena odumřelými buňkami, které slouží jako ochrana stromu před vnějším prostředím.



Obr. 1.3 Makroskopická stavba dřeva na příčném řezu [8].

1.1.2 Mikrostruktura

Mikrostruktura je pozorovatelná pod mikroskopem s deseti až stonásobným zvětšením. Na této úrovni je již rozeznatelný rodový druh i druhové jméno dané dřeviny. Mikroskopickou strukturu tvoří rostlinné buňky různých druhů. [9]

Z hlediska buněčného složení se dřevo rozlišuje na jehličnaté a listnaté. Jehličnany jsou vývojově starší a jejich struktura je jednodušší. V největším procentu, 90–94 %, se zde nachází tracheidy. Jsou to buňky protáhlé a uzavřené, orientované vertikálně nebo horizontálně. Zbytek tvoří převážně buňky parenchymatické. Ty mají vodivou, zásobní nebo sekreční funkci. Mikrostruktura listnatých stromů je složitější, obsahuje více druhů buněk, přičemž každý z nich má svoji specifickou funkci. Ve dřevě jsou obsaženy tracheje (cévy), tracheidy (cévice), libriformní buňky (dřevní vlákna) a parenchymatické buňky. [9]

1.2 Vlastnosti

Vlastnosti dřeva vychází z jeho struktury. Mohou být mírně odlišné i v rámci jednoho druhu dřeviny. Způsobeno je to například podmínkami, ve kterých strom roste, nejvýraznější vliv má však anizotropie materiálu. Tedy rozdílné vlastnosti ve směru rovnoběžném s osou kmene a ve směru kolmém na osu. Anizotropie je způsobena 1–6 mm dlouhými rostlinnými buňkami (vlákny) orientovanými rovnoběžně s osou. Základní dělení vlastností je na fyzikální a mechanické. [10]

1.2.1 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti popisují materiál z vnějšího pohledu, například jeho barvu, lesk, texturu a vůni, nebo zevnitř, hustotu. Dále se sem řadí vlastnosti z hlediska reakce na různé fyzikální jevy jako je vlhkost, teplota, elektrická energie a zvuk.

Dřevo je materiál hydroskopický, to znamená, že přijímá nebo odevzdává vlhkost do okolního prostředí. Se změnou obsahu vody dochází ke změně mechanických i fyzikálních vlastností materiálu a oslabuje se odolnost proti houbám a škůdcům. Voda ve dřevě se dá rozlišit do tří kategorií [11]:

- chemicky vázaná – součást chemických sloučenin neodstranitelná sušením,
- vázaná = hydroskopická – nachází se v buněčných stěnách a pro vlastnosti dřeva má zásadní význam,
- volná = kapilární – vyskytuje se v lumenech a mezibuněčných prostorech, ale až po nasycení vodou vázanou, a na vlastnosti materiálu nemá příliš velký význam.

Dřevo nasáváním vody bobtná, zvětšuje svoji hmotnost i objem, naopak sesycháním hmotnost i objem klesají. Voda ve dřevě, jeho vlhkost, se vyjadřuje jako podíl hmotnosti vody ku hmotnosti absolutně suchého dřeva, vyjádřeno v procentech [12]

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%], \quad (1.1)$$

kde m_1 hmotnost mokrého dřeva [kg],
 m_0 hmotnost suchého dřeva [kg].

Další významnou fyzikální vlastností je hustota, která je závislá na vlhkosti a vyjadřuje se jako podíl hmotnosti a objemu při určité vlhkosti. Mezi stromy s nízkou hustotou se řadí například smrk, lípa, borovice a olše. Naopak mezi stromy s vysokou hustotou patří habr, dřín, moruše a akát. [11]

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (1.2)$$

kde m hmotnost [kg],
 V objem [m^3].

Tepelné vlastnosti dřeva jsou důležité kvůli vysoušení, dále se využívají i tepelně-izolační vlastnosti. Ty jsou závislé na směru vláken a obsahu vlhkosti. Například suché

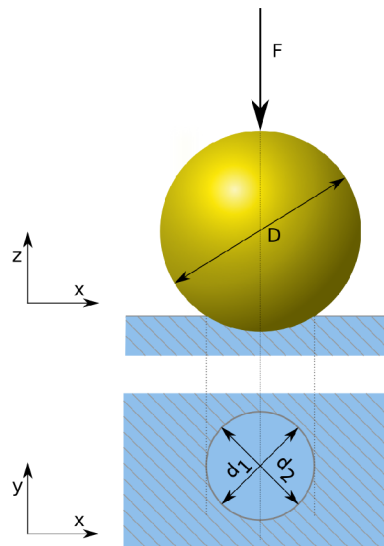
smrkové řezivo tloušťky 8 cm a vlhkosti 10 % izoluje teplo stejně jako cihlová zeď tloušťky 67 cm. [10, 11]

S tepelnými vlastnostmi je spjata i hořlavost, která je závislá na druhu dřeva, hustotě, vlhkosti a chemickém složení. Dřevo vzplane při teplotě 180–275 °C a hoří při 260–290 °C. Spálením 1 kg dřeva se uvolní asi 18 MJ tepla. [13]

Důležitou vlastností pro jedno celé průmyslové odvětví je velmi dobrá akustika materiálu. Sleduje se rychlost šíření zvuku a rezonance ve dřevě. Rezonance je schopnost materiálu zesilovat zvuk bez jeho zkreslení. Těchto vlastností se využívá při výrobě hudebních nástrojů nebo ke zlepšení akustiky koncertních sálů, divadel a kin.

1.2.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti charakterizují chování materiálu vlivem vnějších sil. Řadí se sem pevnost, pružnost, tvrdost a technologické vlastnosti jako ohýbatelnost a štípatelnost. Mechanické vlastnosti jsou závislé na druhu dřeva, směru vláken, vlhkosti, vadách a druhu zpracování. [11]



Obr. 1.4 Zkouška tvrdosti dle Brinella [14].

Velmi významnou charakteristikou je pevnost, definuje se jako míra největšího napětí před trvalým porušením materiálu a uvádí se v MPa. Obecně platí, že se stoupající vlhkostí a teplotou pevnost klesá, kombinací těchto dvou faktorů ještě výrazněji. Naopak zvyšující se hustota zlepšuje pevnost materiálu. Podle druhu namáhání se dělí na pevnost v tlaku, tahu, ohybu a smyku. Největší pevnost dřevo vykazuje při působení tahové síly rovnoběžně s vlákny, průměrná hodnota pro různé dřeviny je 120 MPa. Naopak nejmenší pevnost má materiál působením tahové síly napříč vlákny, přibližně 5 MPa. Je proto dobré se tomuto zatížení v praxi vyhnout. [11]

Pružnost se definuje jako schopnost materiálu vracet se do původního stavu po ukončení působení vnějších sil. Určuje se modulem pružnosti E a uvádí se v MPa, což vyjadřuje podíl napětí vznikajícího v materiálu ke vzniklé deformaci. [11]

Tvrdość vyjadřuje jako velikost odporu materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Určuje se buď testem dle Brinella nebo Janky. Zkouška dle Brinella (obr. 1.4) se uvádí v HB a probíhá vtlačováním ocelové kuličky o průměru 10 mm do vzorku silou 100–1000 N podle druhu dřeva. Tvrdość se potom vypočítá z velikosti zatížení a velikosti plochy vytlačeného důlku podle vzorce [11, 14]

$$H_B = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ [MPa]}, \quad (1.3)$$

kde F síla [N],
 D průměr kuličky [mm],
 d průměr otlaku [mm].

Metoda dle Janky se uvádí v HJ. Provádí se vtlačováním indentoru s půlkulatou plochou o průměru 11,284 mm do vzorku, kde vytvoří plochu otlaku o velikosti 100 mm². Síla potřebná pro vytvoření otlaku o této ploše přímo udává tvrdość. [14]

$$H_J = \frac{F}{S} \text{ [MPa]}, \quad (1.4)$$

kde F síla [N],
 S plocha otlaku [mm²].

1.3 Vybrané druhy dřeva

Uvažovanými druhy dřeva pro provedení praktické části je dřevo dubové, jedlové a smrkové. Dub je listnatá dřevina rostoucí v podmínkách mírného pásu, má žlutohnědou barvu a jeho výrazným znakem jsou nápadné dřevňové paprsky (obr. 1.5). Má vysokou tvrdość, pevnost, pružnost, houževnatost i trvanlivost. Kromě nábytkářského a stavebního průmyslu je vhodné také pro velmi zatěžované součásti kvůli jeho vysoké odolnosti proti střídání podmínek, například častým změnám vlhkosti nebo povětrnostních podmínek. [15]

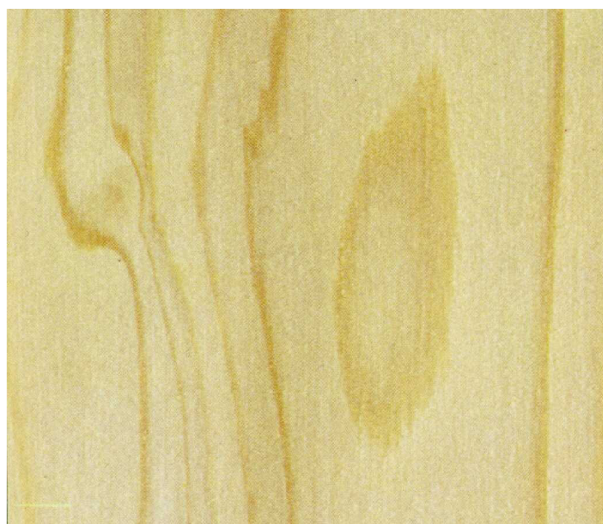


Obr. 1.5 Dubové dřevo [15].

Tab. 1.2 Mechanické vlastnosti dubového dřeva [17].

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota	700	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tah rovnoběžně s vlákny/kolmo na vlákna	108/3,3	MPa
Tlak rovnoběžně s vlákny/kolmo na vlákna	42/11,5	MPa
Mez pevnosti v ohybu/Modul pružnosti v ohybu	116/11600	MPa
Smyk	5,3	MPa
Tvrдость dle Brinella	12,7	MPa

Jedle patří mezi jehličnaté stromy, vizuálně působí velmi podobně, jako dřevo smrkové, má žlutohnědou barvu a výrazné letokruhy (obr. 1.6). Rozdíl je vidět například v nepřítomnosti tmavého jádra, jedlové dřevo obsahuje pouze bělové dřevo. Jeho vhodné použití je například pro výrobu tesařských a truhlářských výrobků, podlah a nábytku. Negativem tohoto materiálu je jeho náchylnost ke vzniku hniloby, tomu se však dá zabránit pomocí ochranných nátěrů. [16]



Obr. 1.6 Jedlové dřevo [16].

Tab. 1.3 Mechanické vlastnosti jedlového dřeva [17].

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota	430	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tah rovnoběžně s vlákny/kolmo na vlákna	78/1,4	MPa
Tlak rovnoběžně s vlákny/kolmo na vlákna	33/4,7	MPa
Mez pevnosti v ohybu/Modul pružnosti v ohybu	67/9600	MPa
Smyk	5,5	MPa
Tvrдость dle Brinella	1,6	MPa

Smrk je jehličnatá dřevina nejdostupnější a nejvyužívanější v mnoha odvětvích, převážně stavebnictví, nábytkářském průmyslu a pro chemické zpracování. Jeho dřevo má žlutobílou až žlutohnědou barvu (obr. 1.7), je lehké, pevné, pružné a měkké. Jeho nevýhodou je malá trvanlivost a nízká odolnost proti škůdcům. Smrkové dřevo, stejně jako ostatní jehličnany, má velký rozdíl tvrdosti jarního a letního dřeva, proto je náchylnější ke vzniku vibrací při obrábění. Dřevo se považuje za tepelný izolant, hodnota tepelné vodivosti smrkového

dřeva při vlhkosti 12 % se uvádí přibližně $\lambda = 0,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Pro srovnání, tepelná vodivost oceli je $\lambda = 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [17]



Obr. 1.7 Smrkové dřevo.

Parametry výběru jsou vysoká rozdílnost tvrdosti jarního oproti letnímu dřevu, kvůli testování vzniku vibrací, a snadná dostupnost. Dubové dřevo splňuje podmínku snadné dostupnosti, ale jakožto dřevo z listnatého stromu má mnohem menší rozdíl tvrdosti jarního a letního dřeva, tudíž je zde menší riziko vzniku vibrací během obráběcího procesu. Dřevo smrkové a jedlové má srovnatelné vlastnosti. Nevýhoda jedlového dřeva, jeho náchylnost je vzniku hniloby, při testování vzorku na vznik vibrací a změnu teploty nijak nevadí. Proto je rozhodujícím parametrem mezi těmito materiály dostupnost. V praktické části bude použito dřevo smrkové, proto jsou dále rozebrány jeho vlastnosti podrobněji.

Mechanické vlastnosti (tab. 1.4) se vždy liší i v rámci jednoho druhu dřeva v závislosti na podmínkách, ve kterých strom rostl. Rozdílné vlastnosti jsou také v závislosti na vlhkosti. Hodnoty z tabulky jsou uvedeny pro vlhkost 12 %, se zvyšující vlhkostí pevnost klesá. Z konkrétních hodnot pevnosti materiálu lze také vyčíst několikanásobně větší pevnost dřeva ve směru vláken než kolmo na ně. [17]

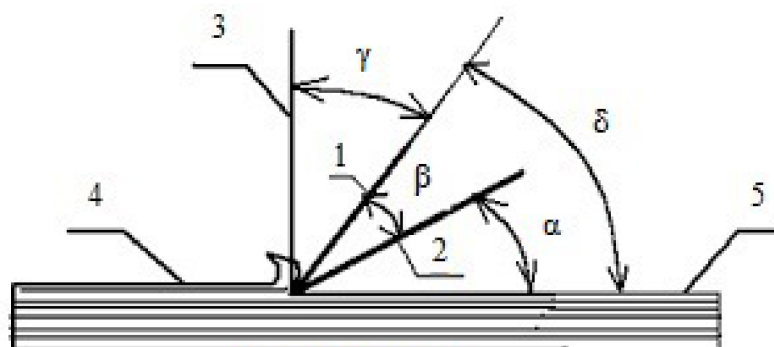
Tab. 1.4 Mechanické vlastnosti smrkového dřeva [17].

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota	440	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tah rovnoběžně s vlákny/kolmo na vlákna	84/1,5	MPa
Tlak rovnoběžně s vlákny/kolmo na vlákna	30/4,1	MPa
Mez pevnosti v ohybu/Modul pružnosti v ohybu	60/9100	MPa
Smyk	5,3	MPa
Tvrdost dle Brinella	1,6	MPa

2 VÝROBNÍ PROCESY

Mezi nejrozšířenější výrobní metody patří tváření, obrábění a odlévání. Pro výrobu dřevěných součástí se nepoužívá odlévání a tváření pouze minimálně. Dochází při něm ke změně tvaru a rozměru, ale neoddělí se žádná část materiálu, nevzniká tedy tříska. Mezi metody tváření používané pro zpracování dřevěných výrobků se řadí [18]:

- ohýbání – vlivem zvýšené teploty a tlaku, používá se například pro výrobu ohýbaných židlí,
- lisování – působením mechanických sil dojde k deformaci, vhodné pro výrobu tvarových překližek a zhušťování dřeva.



- 1 – Rovina čela
- 2 – Rovina hřbetu
- 3 – Základní rovina
- 4 – Obráběná plocha
- 5 – Obrobená plocha
- α – Úhel hřbetu
- β – Úhel břitů
- γ – Úhel čela
- δ – Úhel řezu

Obr. 2.1 Geometrie obráběcího nástroje [19].

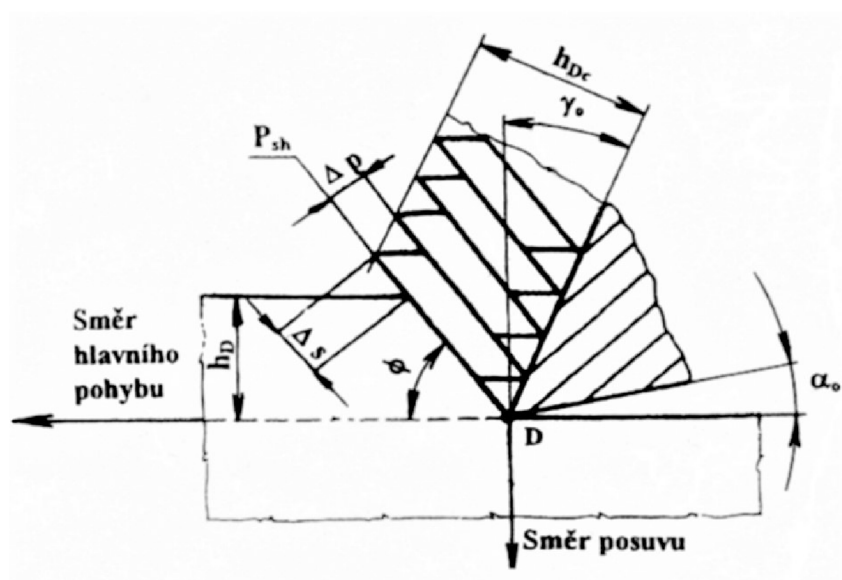
Nejčastěji se potom uplatňuje obrábění, při kterém se nástrojem tvaru řezného klínu odebírá materiál z polotovaru ve formě třísek a pilin. Děj probíhá v soustavě stroj, nástroj, upínání, obrobek a dělí se na obrábění ruční (např. pilování, hoblování) a strojní (např. vrtání, broušení), popřípadě na tradiční (např. frézování, soustružení) a netradiční, nekonvenční, (např. řezání laserem, vodním paprskem). Další možností dělení metod obrábění je na [18]:

- třískové – v řezném procesu vznikají třísky, řadí se sem pilování, hoblování, frézování, soustružení, vrtání, dlabání i broušení a další,
- beztřískové – během obrábění nevzniká tříska, patří sem stříhání, vysekávání a dělení laserem, oddělený materiál je výsledným produktem, vhodné například pro krájení a loupání dýh,

- dělení celé dřevní hmoty – všechny materiál se rozdělí na drobné částičky, provádí se rozsekání na štěpky, třískování na třísky, rozemletí na dřevní moučku nebo rozvláknění na dřevní vlákna.

Geometrie obráběcího nástroje (obr. 2.1) se definuje počtem, tvarem a velikostí břitů. Břit je tvořen rovinou čela a hřbetu, v jejich průřezu se nachází ostří, které se popisuje poloměrem zaoblení.

- Rovina čela – prochází ostřím, s rovinou hřbetu svírá úhel nazývaný úhel břitu.
- Rovina hřbetu – prochází ostřím, s obrobenu plochou svírá úhel hřbetu.
- Základní rovina – rovina kolmá k rovině řezu (obrobené ploše).
- Obráběná plocha – plocha, na které má dojít k obrobení nástrojem.
- Obrobená plocha – plocha, která vznikla odlomením třísky.
- Úhel hřbetu α – volí se mezi 10° a 30° , jeho velikost ovlivňuje tření, se zvětšujícím se úhlem tření klesá.
- Úhel břitu β – každý nástroj má rozdílný úhel břitu, například pro frézy se používá 25° , mezi zuby pily 60° . Jeho velikost ovlivňuje odpor, který klade obráběný materiál nástroji. Čím větší je úhel, tím větší je odpor materiálu. Naopak se zmenšováním úhlu klesá pevnost nástroje.
- Úhel čela γ – odlišný pro různé druhy nástrojů. Závisí na něm velikost deformačního odporu, drsnost obrobené plochy a tvorba třísky. S rostoucím úhlem čela klesá deformační odpor a tříska se utváří lépe.
- Úhel řezu δ – obvykle menší než 90° , velikost se rovná součtu úhlu hřbetu a břitu.



Obr. 2.2 Tvorba třísky [20].

Nástroj vyvíjí na materiál sílu způsobující napětí, které vyvolává nejprve elastickou a následně plastickou deformaci. Na počátku dochází k pěchování materiálu, po překročení

meze pevnosti ke smyku a oddělování částic, tříška následně odchází po čele nástroje z řezu.

Schématické znázornění tvorby třísky (obr. 2.2) znázorňuje odlamování obráběného materiálu v rovině stříhu P_{sh} , kde h_D je jmenovitá tloušťka řezu, h_{Dc} tloušťka třísky, ϕ úhel roviny stříhu, Δp tloušťka elementu třísky a Δs posunutí elementu třísky. [20]

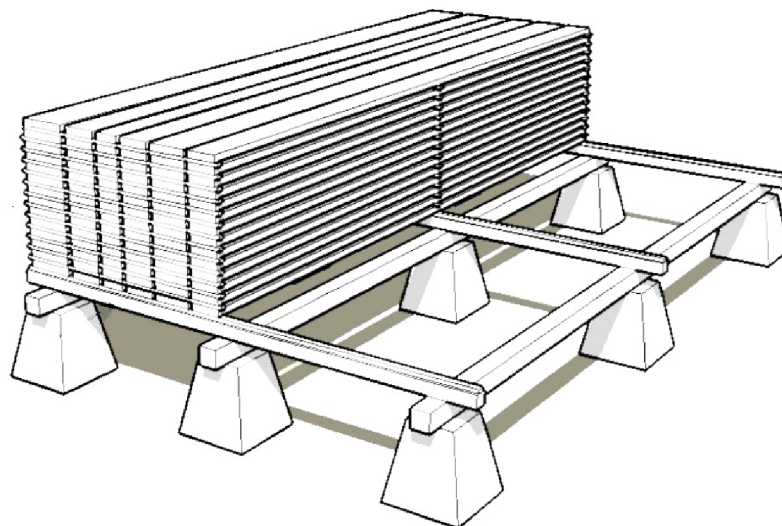
2.1 Příprava materiálu

Před samotným obráběním je potřeba kmen stromu upravit tak, aby byl vhodný pro výrobní proces. Nejprve dojde k třídění a odkorňování, následně se kulatina nařeže na řezivo. To může mít různý formát, vyrábí se prkna, fošny, hranoly, trámy, lišty a další. K nařezání se používá pila pásová, kotoučová nebo rámová.

V této fázi obsahuje dřevo velké množství vody, kvůli které má materiál horší mechanické i fyzikální vlastnosti, je náchylnější na napadení škůdci a houbami. S postupným vysycháním materiál mění své rozměry i tvary a může docházet k praskání. Proto je vhodné jej vysušit, tedy snížit procento vlhkosti obsažené ve dřevě. Přirozená vlhkost dřeva je přibližně 60 %, sušením se snižuje na 15 %. Z 1 m^3 dřeva se sušením odpaří asi 150–200 kg vody. [21]

Snižování vlhkosti dřeva se provádí dvěma základními metodami, přirozeným nebo umělým sušením. Přirozené sušení probíhá pomocí atmosférického vzduchu. Činiteli tohoto procesu jsou teplota a vlhkost okolního vzduchu, rychlost proudění vzduchu. [22, 23]

Řezivo se naskládá podle určitých pravidel do hrání tak, aby mohl vzduch co nejnádhěji proudit mezi materiálem. Je dobré skládat do hrání řezivo stejného druhu, vlhkosti a rozměru, a to kvůli zamezení rozdílného sesychání. Celá sestava se skládá z podstavců (nejčastěji betonové), hranolů, prokladových lišt a řeziva (obr. 2.3). [22, 23]



Obr. 2.3 Hrání řeziva pro přirozené sušení. [22]

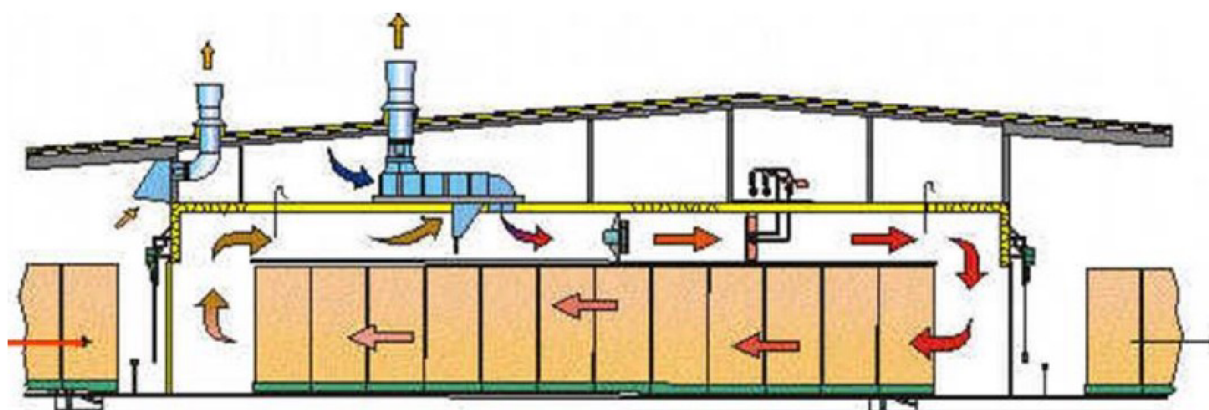
Proudění vzduchu hrání je základní mechanismus vysoušení dřeva, probíhá ve dvou směrech, a to v horizontálním a vertikálním. Vodorovný směr proudění je způsoben větrem,

tedy prouděním vzduchu v okolí způsobeným změnou tlaku. Svislý směr proudění vzduchu způsobuje takzvaný komínový efekt. Ten je způsoben denní dobou, přes den mokré dřevo přijímá teplo z okolí a vlhkost se odpařuje, tím se vzduch stává těžkým a klesá dolů. V noci naopak proudí vzduch nahoru. [23]

Potřebná doba přirozeného sušení dřeva je závislá na druhu materiálu, jeho rozměrech (zejména tloušťce), konečné požadované vlhkosti a podmínkách okolí, tedy vlhkosti a teplotě vzduchu. Obecně by řezivo nemělo být takto uskladněno déle než dva roky. [23]

Výhodou přirozeného sušení je nízká cena a minimální spotřeba energie, metoda je tedy ekonomičtější a ekologičtější. Pomalejší snižování vlhkosti dřeva spolu s opakovaně se měnícím klimatem způsobuje menší zbytková napětí v porovnání s umělým sušením. [23, 24, 25]

Nevýhodou je velká časová náročnost a možnost vysušení pouze na hodnotu přibližně 20 %, což je dostačující pro výrobek používaný v exteriéru, kde je vzdušná vlhkost vyšší než v interiéru. Obecně je snaha přiblížit obsah vody dřeva prostředí, ve kterém se bude používat, aby nedocházelo k pozdějšímu bobtnání nebo sesychání a s tím spojenou změnou tvarů, praskání a vlnění materiálu. [24, 25]



Obr. 2.4 Schéma jednozónové tunelové sušárny řeziva [22].

Umělé sušení je metoda sušení, při které je energie potřebná pro snížení vlhkosti přivedena ze vnějšího zdroje. Provádí pomocí zvýšené teploty, tlaku, řízenou cirkulací vzduchu nebo chemickými látkami. Celý proces je řízený, snadno kontrolovatelný a upravitelný. Sušící prostředí je plynné (vzduch), během procesu přijímá a odvádí vodní páru. [22, 24, 25]

Sušárna na dřevo je zařízení, které je navrženo tak, aby sušení v něm mohlo probíhat podle potřebného sušícího způsobu. Sušící způsob je metoda, která zaručuje, že dojde k potřebnému snížení vlhkosti materiálu. Zohledňuje potřebnou dodávku tepla do procesu, pohyb sušícího prostředí i materiálu a odvod vzniklých vodních par z procesu. Jednotlivé sušící způsoby se od sebe liší šetrností k materiálu, mírou možného rizika vzniku výsušných vad i pořizovacími nebo provozními náklady. Je možné je dělit podle různých parametrů. [23, 25]

Dělení dle teploty prostředí:

- sublimační (30–40 °C),
- nízkoteplotní (40–50 °C),

- teplotovzdušné (50–100 °C),
- vysokoteplotní (100–130 °C).

Dělení dle tlaku prostředí:

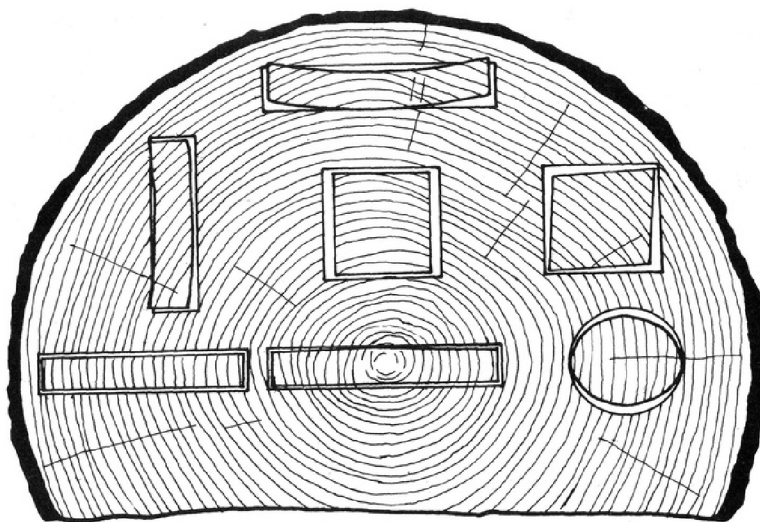
- atmosférický (101,3 kPa),
- snížený (hrubé vakuum, 40 kPa),
- mírně zvýšený (více než 101,3 kPa),
- vysoký (900 kPa).

Dělení dle druhu prostředí:

- směs vzduchu a vodní páry,
- přehřátá vodní pára,
- spaliny,
- chemické látky.

Sušáren existuje mnoho druhů, každá z nich pracuje na jiném principu, příkladem je třeba sušárna kondenzační, solární typu "skleník", komorová, tunelová, mikrovlnná, vakuová nebo radiofrekvenční. Znázorněná tunelová sušárna (obr. 2.4) schématicky zobrazuje cirkulaci vzduchu a jeho ochlazování při průchodu naskládaným řezivem a následné ohřátí v topení. [22, 24, 25]

Dřevo se takto dá vysušit na nižší procenta vlhkosti oproti sušení přirozenému. Další výhodou je i malá časová náročnost procesu za cenu vyšší spotřeby energií, potřeby zařízení (sušárna) a jeho obsluhy. Zároveň je třeba předcházet vzniku výsušných vad právě pomocí správně nastaveného sušicího způsobu. V praxi je možné použití kombinace obou metod, tedy přirozeného předsušení a následně umělého dosušení. [24]



Obr. 2.5 Změna tvaru řeziva vysycháním [26].

Voda ve dřevě se dělí na volnou, vázanou a chemickou. Procesem sušení se nejprve odpařuje voda volná uložená v buněčných stěnách, v této fázi nedochází ke změnám tvaru

ani rozměrů materiálu. Následně dojde k překročení hranice, tak zvaného bodu nasycení vláken, a začne se odpařovat voda vázaná uložená v mezibuněčných prostorech. V tomto stadiu sušení již dochází ke zmenšování rozměrů dřeva. Voda chemicky vázaná je obsažena v chemických sloučeninách a není možné ji odstranit sušením. [24]

Sušený polotovár mění své rozměry rozdílně ve všech jeho osách v závislosti na směru dřevěných vláken (obr. 2.5), na to je při zpracování potřeba dávat pozor. Zároveň je zde riziko vzniku trhlin v důsledku napětí vytvořeného rozdílnou vlhkostí na povrchu a ve vnitřních vrstvách dřeva.

2.2 Ruční obrábění

Ruční obrábění je vhodné pro menší série a výrobky, kde se nevyžaduje vysoká přesnost. Mezi metody ručního obrábění se řadí například řezání, hoblování, vrtání, dlabání, rašplování, pilování a broušení. Ruční řezání se používá pro dělení materiálu, nástrojem je pila složená z pilového listu a rámu nebo rukojeti (obr. 2.6). Materiál se nejprve upne do pracovního stolu, opakovaným pohybem pilou se vytvoří řez, který se většinou dále dokončuje. [27]

Hoblování se používá k vyrovnávání ploch, obrobení materiálu na potřebnou tloušťku nebo jako dokončování operace. Nástrojem je hoblíkový nůž skládající se z lůžka, klínu, kolíku a želízka (obr. 2.6). Břit želízka odděluje ze dřeva třísku, hoblinu. Některé hoblíky mají v konstrukci přidání další želízko neboli klopku, aby se zamezilo vytrhávání vláken dřeva. [27]

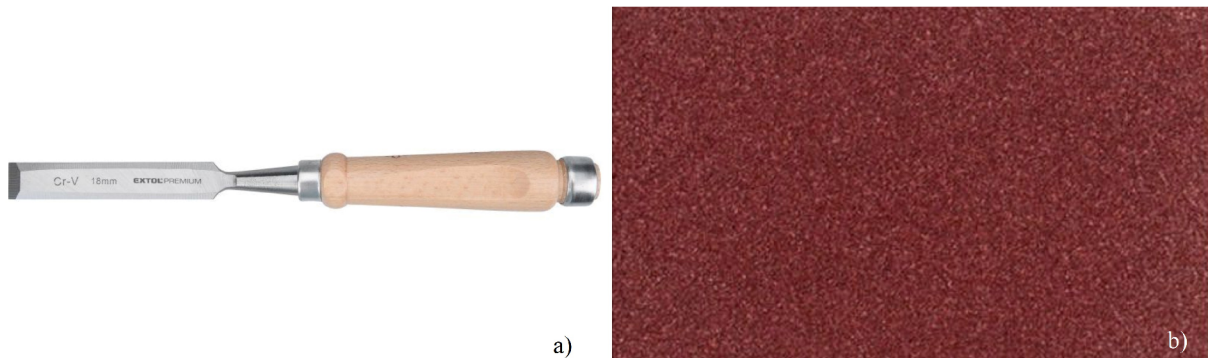


Obr. 2.6 Pila ocaska (a) a hoblíkový nůž (b) [22].

Dlabáním dochází k oddělování podlouhlých hrubých třísek, tato metoda se často používá pro vytvoření otvorů sloužících pro následné spojování dřeva. Nástrojem je dláto, které se skládá z čepele, krku, korunky, trnu a rukojeti (obr. 2.7). Dláto může být ploché, duté, čepovací, často se k dlabání využívá i dřevěná palička, kterou se údery působí na nástroj. Tato metoda je náchylná na vyštípávání dřeva, je proto nutné sledovat směr vláken i mechanické vlastnosti dřeva. [27]

Broušení je plošné škrábání mnoha vedle sebe ležících nožů neboli brousicích zrn. Ty jsou nalepeny buď na plátňovém nebo papírovém nosiči (obr. 2.7). Broušení je dokončovací

metoda, je nutné u ní hlídat směr broušení vůči směru vláken materiálu, při kolmém opracování dochází ke vzniku rýh.

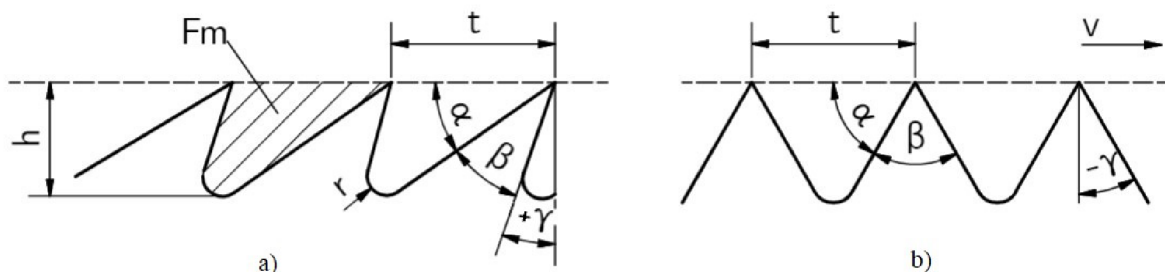


Obr. 2.7 Dláto (a) a broušící papír (b) [22].

Strojní obrábění dřeva je oproti ručnímu využitelné v hromadné a sériové výrobě, kde se vstupní náklady na stroje a nástroje s množstvím výrobků snižují. Další výhodou je snadná optimalizace výrobního procesu, menší podíl lidské práce a tím vyšší bezpečnost provozu. S hromadnou a sériovou strojní výrobou se také pojí robotizace a automatizace, což dále zlevňuje a zrychluje celý proces.

2.3 Řezání

Strojní řezání je metoda třískového obrábění sloužící pro nařezání polotovarů a obrobků. Nejčastěji používanými stroji jsou pily pásové a kotoučové, nástroje pro ně jsou pilové pásy a kotouče. Pily jsou poháněné elektromotorem, který převádí pohyb do nástroje. Ve většině případech koná pohyb nástroj i materiál.



Obr. 2.8 Geometrie zubu pro podélné (a) a příčné řezání (b).

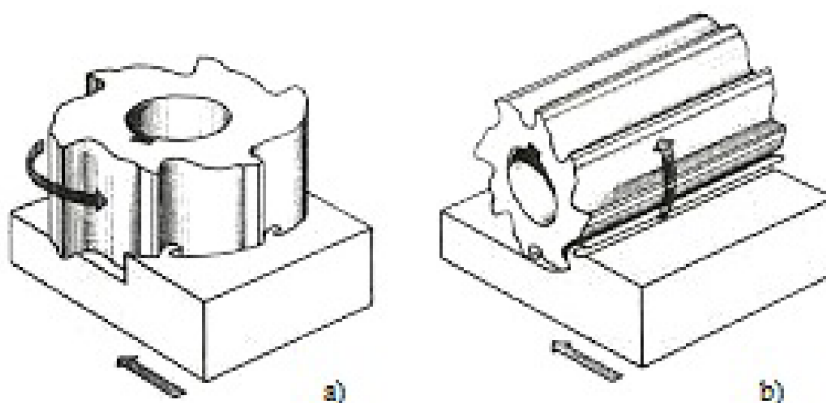
Funkční část řezného nástroje, ozubení, odebírá materiál z řezné mezery a ve formě třísek jej odvádí pryč. Geometrie zubu (obr. 2.8) se liší pro dvě základní metody, řezání podélné, ve směru vláken, a příčné, napříč dřevními vlákny. Značení úhlů zubu z pilového pásu nebo kotouče odpovídá obecnému značení obráběcího nástroje, kde α je úhel hřbetu, β úhel ostří a γ úhel čela. Úhel řezu δ , který je součtem úhlu hřbetu a ostří, ovlivňuje velikost odporu materiálu vůči vniku nástroje. Dále je v řezném procesu důležitá výška zubu t , rozteč t , poloměr zaoblení mezery r a zubová mezera F_m , na obrázku v znázorňuje směr pohybu nástroje. [28]

Při řezání dochází k zahřívání nástroje vlivem jeho tření o materiál, což způsobuje kratší životnost nástroje, k jeho otupení dochází dříve. Tomu se zabráňuje vybočením lichých

zubů na jednu stranu a sudých zubů na druhou. Nevýhodou tohoto vychýlení zubů je potom potřeba vyššího výkonu při obrábění, a to z důvodu odebrání více materiálu a vzniku širší řezné mezery.

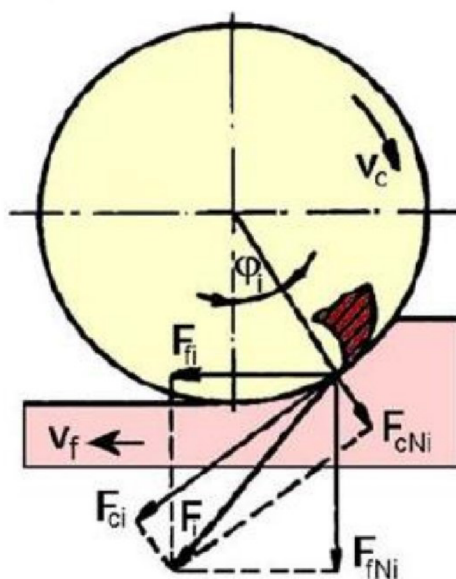
2.4 Frézování

Frézování je metoda třískového obrábění vhodná pro rovinné hranolovité i rotační plochy, pro tvorbu drážek, profilů, závitů a ozubení. Hlavní rotační pohyb je konán nástrojem, frézou, vedlejší posuvný pohyb provádí obrobek. Proces frézování je přerušovaný, protože každý zub nástroje je v záběru pouze krátký časový úsek, tím vznikají krátké třísky většinou proměnlivé tloušťky. Používaným strojem je frézka. [29]



Obr. 2.9 Frézování čelní (a) a válcové (b) [30].

Podle polohy osy nástroje se frézování dělí na válcové a čelní (obr. 2.9), přičemž u válcového je osa rovnoběžně s obráběnou plochou a u čelního je osa nástroje kolmá na tuto plochu. Válcové lze dále v závislosti na směr otáčení nástroje třídit na sousledné a nesousledné.



Obr. 2.10 Frézování válcové sousledné [31].

Při sousledném frézování (obr. 2.10) se nástroj otáčí ve směru posuvu, průřez takto vzniklé třísky se zmenšuje od maximální hodnoty při prvním záběru ostří až po nulovou hodnotu u obrobené plochy. Výhodou je zde kvalitnější povrch, příznivé působení řezné síly a vyšší trvanlivost nástroje. Nevýhodou jsou silové rázy (možnost odstranit šikmými zuby), vymezení vůle u posuvového mechanismu, požadavek na tuhost soustavy a také nevhodnost metody pro polotovary s tvrdou kůrou. [32]

Řezná síla F_i se vyjádřená pomocí měrné řezné síly se zapisuje ve tvaru [31]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin\phi_i \text{ [N]}, \quad (2.1)$$

kde k_{ci} měrná řezná síla [MPa],
 A_{Di} průřez třísky [mm²],
 a_p hloubka řezu [mm],
 f_z posuv na zub [mm].

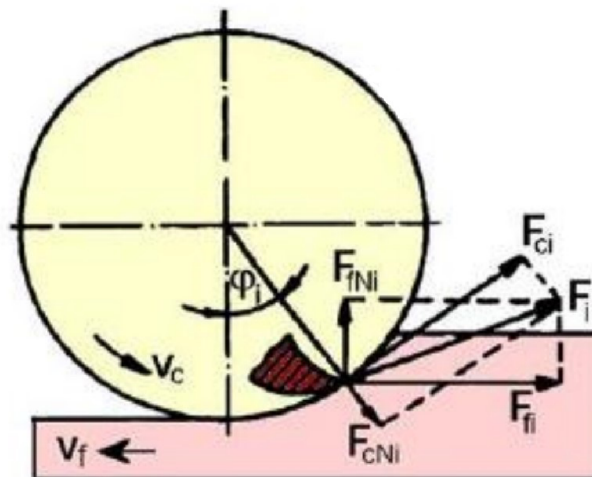
Výsledná síla pro válcové frézování se uvádí ve tvaru [31]:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \phi_i \text{ [N]}, \quad (2.2)$$

kde x exponent vlivu tloušťky třísky [-],
 C_{Fc} materiálová konstanta [-].

Výsledná síla pro čelní frézování se uvádí ve tvaru [31]:

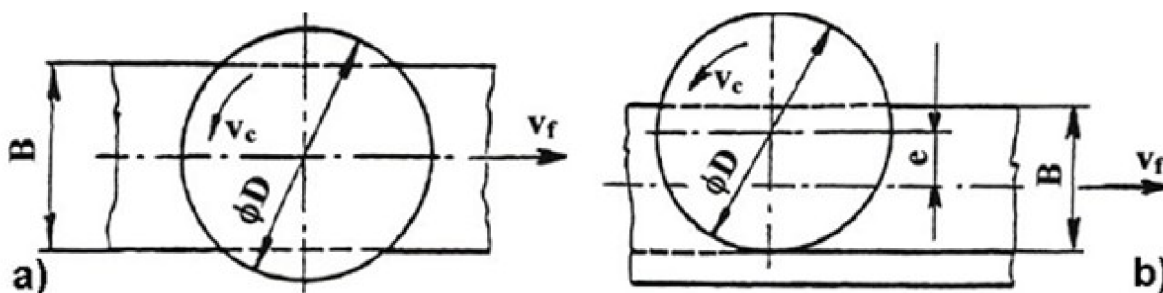
$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \phi_i \text{ [N]}. \quad (2.3)$$



Obr. 2.11 Frézování válcové nesousledné [31].

Proti směru posuvu se otáčí fréza u nesousledného obrábění (obr. 2.11), průřez třísky se zvětšuje od nuly do maxima. Kvůli tomu zde nepůsobí takové rázy a je celkově nižší požadavek na tuhost soustavy, metoda je tedy vhodná i pro polotovary s tvrdou kůrou. Negativy nesousledného frézování jsou nižší kvalita obrobené plochy, nepříznivé působení řezné síly a nižší trvanlivost nástroje. To je způsobené třením frézy o obrobenou plochu a následným zahříváním nástroje. Vztahy rozkladů sil pro sousledné frézování platí ve stejném tvaru i pro nesousledné frézování. [32]

I v rámci čelního frézování dochází k souslednému a nesouslednému chodu nástroje vůči obrobku a to v rámci jednoho záběru. Čelní frézování (obr. 2.12) se dělí na symetrické, osa nástroje prochází středem frézované plochy, a nesymetrické, osa nástroje je mimo střed obráběné plochy. Oproti válcovému zde zabírá více zubů, po obvodu i na čele nástroje, je proto možné docílit většího posuvu, obrábění je kvůli tomu výkonnější. [33]



Obr. 2.12 Frézování čelní symetrické (a) a nesymetrické (b) [33].

Zásadní řezné podmínky pro frézování se stanoví ze vztahů [29]:

- řezná rychlost

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}, \quad (2.4)$$

- kde D průměr obráběné plochy [mm],
 n počet otáček vřetene [min^{-1}],

- rychlost posuvu

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}, \quad (2.5)$$

- kde f_n posuv na otáčku [mm],
 n otáčky nástroje [min^{-1}],
 f_z posuv na zub [mm],
 z počet zubů nástroje [-],

- průřez třísky

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \phi_i \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (2.6)$$

- kde a_p hloubka řezu [mm],
 h_i jmenovitá tloušťka třísky [mm],
 f_z posuv na zub [mm],
 ϕ_i úhel posuvového pohybu [$^\circ$],

Řezná síla se určuje pro jeden břit, který je pod úhlem ϕ_i . Výsledná síla je závislá na měrné řezné síle a průřezu třísky. Pro výpočet se používá vztah [29]:

$$F_{Ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \phi_i \text{ [N]}, \quad (2.7)$$

kde C_{Fc} konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [-],
 a_p hloubka řezu [mm],
 f_z posuv na zub [mm],
 x exponent vlivu tloušťky třísky [-],
 ϕ_i úhel posuvového pohybu [°].

Břity frézy jsou uspořádány na válcové, kuželové nebo jinak tvarové ploše, pro čelní frézy na čele nástroje. Frézy mají široké rozpětí uplatnění a od toho se odvíjí i množství různých typů těchto nástrojů. Je možné je dělit podle mnoha hledisek. [34]

Podle konstrukce na [34]:

- celistvý – řezná část a těleso jsou z jednoho kusu materiálu,
- nerozebíratelně spojený – řezná část je spojena s tělesem pájením, svařováním nebo lepením,
- složený – jedna nebo více řezných částí jsou vyměnitelně upevněny v tělese,
- sadový – sada jednotlivých nástrojů je upnutá do společného nosného prvku.

Podle druhu upnutí na [34]:

- stopkové – používá se pro horní ruční frézky, nástroje mají průměr od 6 do 12 mm a CNC frézky, kde mají nástroje průměr až 25 mm,
- nástrčné – uplatňuje se zejména u spodních frézek, pro průměr frézovacího trnu 30–40 mm, trn je potom spojen s frézku pomocí kuželové stopky s přesuvnou maticí. Použití je vhodné pro tvarovací frézky a CNC stroje.

Podle účelu použití [34]:

- válcové – zuby frézy jsou pouze po obvodě, jsou vhodné pro obrábění rovinných ploch rovnoběžných s osou nástroje,
- čelní – zuby jsou po obvodu i na čelní ploše, používají se pro frézování rovinných ploch rovnoběžných i kolmých na osu nástroje,
- úhlové – používají se pro obrábění úhlových profilů jako jsou úkosy a sražení, dále se mohou dělit na souměrné a nesouměrné nebo jednostranné a oboustranné,
- tvarové – podsoustružením nebo podbroušením tvaru zubu se dosahuje toho, že si zachovávají svůj tvar a úhel břitu i po několika broušeních,
- drážkovací
 - s pevně napájenými SK břity – jsou vhodné pro drážkování nebo předřezávání, řadí se sem i lamelovací frézy, které tvoří vodící drážky pro přesné vedení,
 - s otočnými noži SK – zachovávají konstantní průměr frézy po výměně nožů,

- s břity z PKD – uplatňují se při drážkování silně abrazivních materiálů, PKD zajišťuje vysokou životnost i při extrémních řezných podmínkách,
- srovnávací
 - s otočnými noži SK – používají se pro srovnání hran z masivu nebo dřevotřísky
 - s břity z PKD – vhodné je užití pro srovnávání hran dřevotřískových desek nebo laminátové vrstvy
- polodrážkovací (falcovací) – jejich nejčastější zkonstruování je s otočnými noži.

Tvarové nástroje se dále podle tvaru břitů dělí na [34]:

- rádiusové – využívají se na zaoblení hran nebo obrábění radiusových profilů,
- univerzální – pevně pájené frézy s uniprofilem a různé typy univerzálních nožových hlav s tvarovými noži,
- soupravy na pero a drážku
- frézy na výrobu ozubeného spoje na délku pro nekonečný vlys
- frézy na výrobu ozubeného spoje na šířku
- frézy na softforming (softforming = olepování hran v průběžných olepovačkách dýhou nebo olepovací páskou)
- frézy na postforming (postforming = dodatečné tvarování a olepování plochy a hrany dílce s plynulým přechodem slepovacího materiálu z plochy kolem zaoblené hrany až na spodní plochu)



Obr. 2.13 Univerzální fréza.

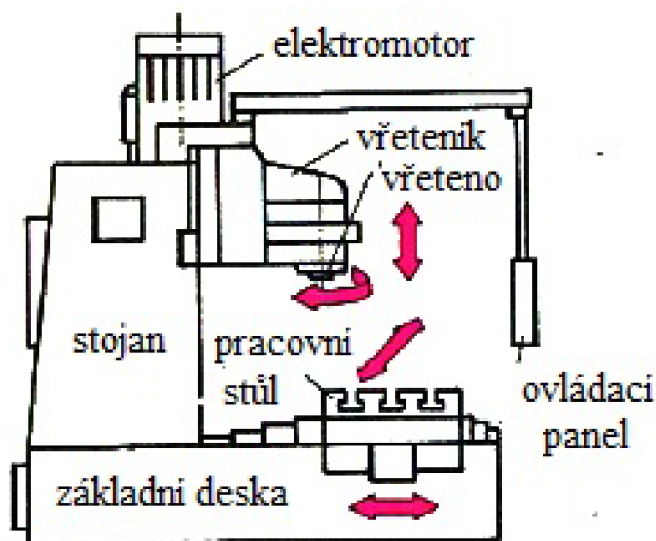
Frézy se nejčastěji vyrábí z rychlořezné oceli nebo slinutých karbidů. Skládají se z z upínací stopky, krčku, zubů frézy a zubových drážek (obr. 2.13). Obvyklý počet zubů nástroje je 4–12, při zvýšení počtu zubů je možné zvýšit rychlost posuvu stolu při zachování stejné

řezné rychlosti a rychlosti posuvu na zub, aniž by docházelo ke zvýšení množství tepla vznikajícího na břitu. Vliv na počet zubů frézy má také potřebný výkon stroje. [35]

Upínací stopka nástroje slouží pro jeho upnutí do stroje a nejčastěji se vyrábí v průměrech 4, 6, 8, 10, 12 a 16 mm. Stopka frézy se upíná do kleštinových upínačů nebo přímo do dutiny vřetena prostřednictvím redukčních pouzder. Na upínací otvor je pomocí výměnné kleštiny možno upnout i nástroj s menším průměrem upínací stopky než je upínací otvor, naopak to však není možné. Dalším způsobem upínání, pro nástrčné frézy, je pomocí trnu, distančního kroužku, péra a matice. [36]

Rozměr frézky je určený velikostí upínací plochy stolu. Stroje existují v různém stupni automatizace, a to pákové frézky bez posuvových mechanismů, konvenční stroje se strojními posuvy v osách x, y, z, programovatelné, číslicově řízené, s automatickou výměnou nástrojů. Frézka se skládá z vřetena, vřeteníku, pracovního stolu, základní desky, stojanu, elektromotoru a ovládacího panelu (obr. 2.14). Je možné dělit podle polohy vřetena na vodorovné (horizontální) a svislé (vertikální) nebo podle konstrukce na [37]:

- konzolové,
- rovinné,
- stolové,
- speciální,
- programovatelné.

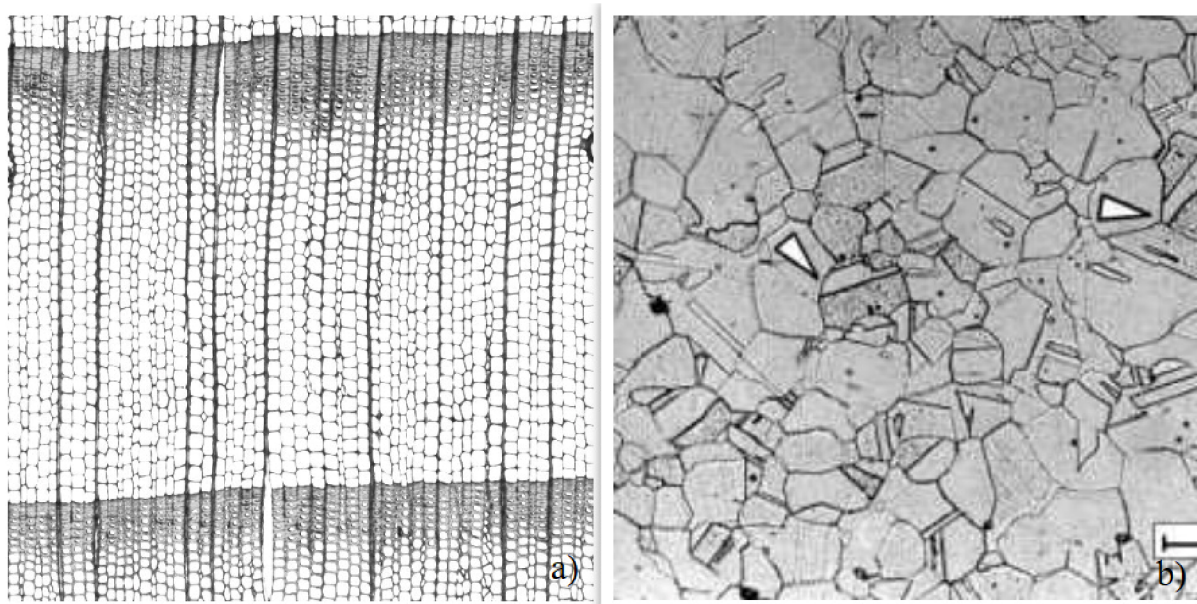


Obr. 2.14 Hlavní části svislé stolové frézky [37].

3 NEŽÁDOUCÍ JEVY PŘI OBRÁBĚNÍ DŘEVA

Rozdíl při obrábění dřeva oproti oceli vychází z rozdílného vzniku a struktury materiálu. Na příčném řezu dřevem lze vidět vláknitá struktura tracheidy, zatímco ocel krystalizuje do zrn (obr. 3.1). Krystalizace je proces výroby oceli kontrolovaný člověkem, je tedy známo přesné složení, a z toho plynoucí mechanické i fyzikální vlastnosti pouze s drobnou odchylkou. Naopak dřevo je přírodní materiál rostoucí v proměnných podmínkách, jeho vlastnosti se proto liší i v rámci jednoho druhu.

Přesnost rozměrů výrobků ze dřeva je menší než výrobků z oceli. To začíná již u nepřesnějších polotovarů, dřevěné se vlivem vzdušné vlhkosti zmenšují nebo naopak bobtnají, může docházet i ke zkřivení a dalším nepřesnostem. Naopak polotovar z oceli je odlitý do formy a udržuje si své rozměry i tvar (mimo drobnou odchylku vlivem změny teploty) během další manipulace s ním.

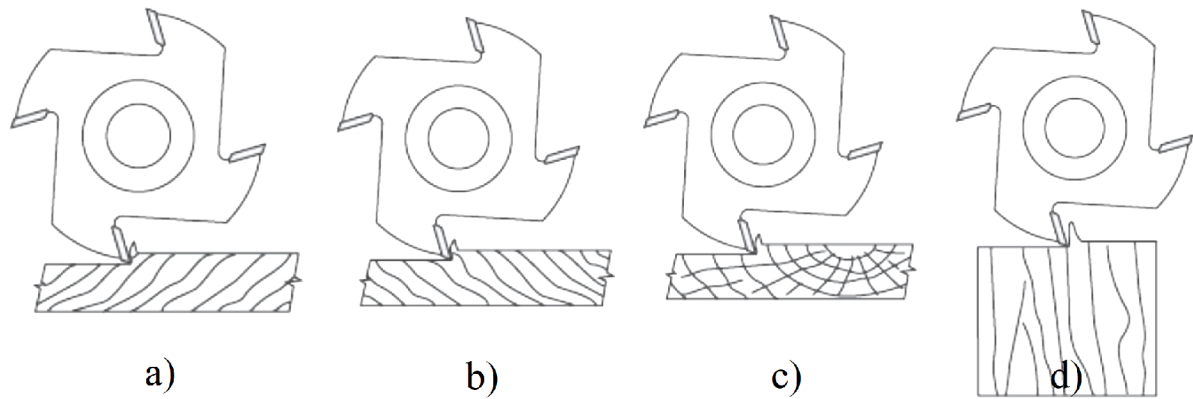


Obr. 3.1 Mikrostruktura dřeva (a) a oceli (b) [38, 39].

Dále je dřevo materiál nehomogenní a anizotropní, při výrobních procesech je třeba uvažovat i směr vláken a přizpůsobit tomu volbu nástroje i metodu obrábění (obr. 3.2). Frézování v závislosti na směru vláken dělí na [40]:

- ve směru vláken – jednoduchý způsob, při kterém je možné dosažení kvalitní obrobené plochy při vysokých řezných rychlostech,
- proti směru vláken – obtížná metoda, kterému je lepší zamezit z důvodu zvedání vláken, a to například směrem otáčení frézy,
- přes vlákna – jednoduchý způsob, avšak povrch tvoří nekvalitní, vlnitý a drsný,
- konců vláken – náročná metoda, při vyjíždění nástroje z materiálu dochází k vyštípávání vláken, jsou možné pouze malé řezné rychlosti.

Stromy v přírodě fungují jako filtry, pohlcují a ukládají prach, oxidy síry, oxidy uhelnaté, přízemní ozón a další škodlivé látky. Tyto látky se potom při zpracování materiálu uvolňují



Obr. 3.2 Frézování ve směru vláken (a), proti směru vláken (b), přes vlákna (c) a konců vláken (d) [40].

do ovzduší a mohou způsobovat spoustu zdravotních problémů, jako třeba bolest hlavy, problémy s dýchacím ústrojím, podráždění očí atd. [41]

Dalším problémem jsou potom prach a třísky vznikající samotným obráběním. Tomu je třeba uzpůsobit stroj, měl by být chráněn vůči prachu z okolí. Také je nutné zajistit bezpečné pracovní podmínky obsluhy strojů a dalším pracovníkům provozu. Toho může být docíleno lokálním odsáváním, používáním ochranných pomůcek jako jsou brýle nebo respirátor, popřípadě omezením času expozice. [42]

3.1 Vibrace při obrábění

Vibrování neboli kmitání je průvodní jev obrábění. Celá soustava stroj-nástroj-upínání-obrobek je velmi komplikovaná, složená z hmotných a pružných těles, která dohromady tvoří výsledné kmitání. Vibrace na stroji způsobené pohonem se mohou zmírnit například úpravou konstrukce. Struktura stroje by měla být tuhá a lehká, s vysokými vlastními frekvencemi a dobrým tlumením. [43, 44]

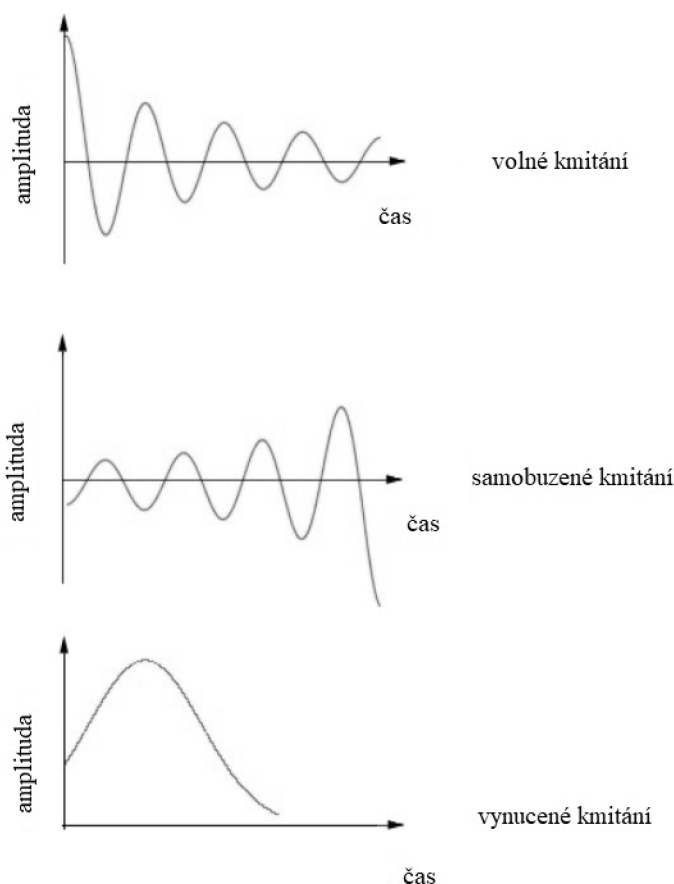
Ve srovnání s nástroji na kov se dřevoobráběcí nástroje nastavují na vyšší otáčky, což zvyšuje riziko vzniku nežádoucích vibrací. Kmitání sestavy se negativně projevuje na obrobku, nástroji i stroji. Dochází k dřívějšímu opotřebení stroje, nástroj se rychleji otupuje, má kratší životnost. Obrobená plocha má větší drsnost a také se snižuje přesnost. Dále vibrace způsobují hluk na pracovišti a tím snižují kvalitu pracovního prostředí. [43]

Kmitání, vibrování, oscilace se definuje jako opakování fyzikální veličiny v čase, kde nabývá střídavé hodnoty kolem své rovnovážné polohy, přitom hodnota nesmí přesáhnout hranici určitého intervalu hodnot. Rovnovážné polohy by soustava dosáhla, pokud by výslednice působících sil byla nulová. Při kmitání dochází k přeměně energie a neustále se mění poloha, rychlost a zrychlení hmotného bodu, právě pomocí těchto veličin se popisuje kmitavý pohyb. Obecná pohybová rovnice popisující kmitavý pohyb lineární soustavy s jedním stupněm volnosti se zapisuje ve tvaru [43]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = mg + F(t), \quad (3.1)$$

kde	m	hmotnost tělesa [kg],
	b	koefficient tlumení [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$],
	k	tuhost [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$],
	mg	tíha [N],
	$F(t)$	budicí síla [N],
	x	obecná souřadnice [m].

Kmitavé systémy se dají dělit podle různých hledisek, podle tvaru dráhy pohybu na rotační a translační nebo přítomnosti tlumení na tlumené a netlumené nebo třeba periodické a neperiodické. Podle existence vnější budicí síly se kmitání člení na volné (vlastní), vynucené a samobuzené (obr. 3.3). [43]



Obr. 3.3 Grafické znázornění volného, vynuceného a samobuzeného kmitání.

Volné kmity vznikají samostatným nárazem, oscilování však po čase ustane samo, a proto nemá velký vliv na obráběcí proces. Pohybová rovnice pro vlastní kmitání tlumené soustavy s jedním stupněm volnosti se zapisuje ve tvaru [43]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0. \quad (3.2)$$

Vynucené kmity se vytvoří působením periodicky se měnících sil v čase, a to na stroji za běhu i pokud zrovna není v provozu. Budicí síla nesouvisející s procesem řezání může vzniknout například od jiného stroje ve výrobě, nevyvážeností rotujících částí soustavy nebo

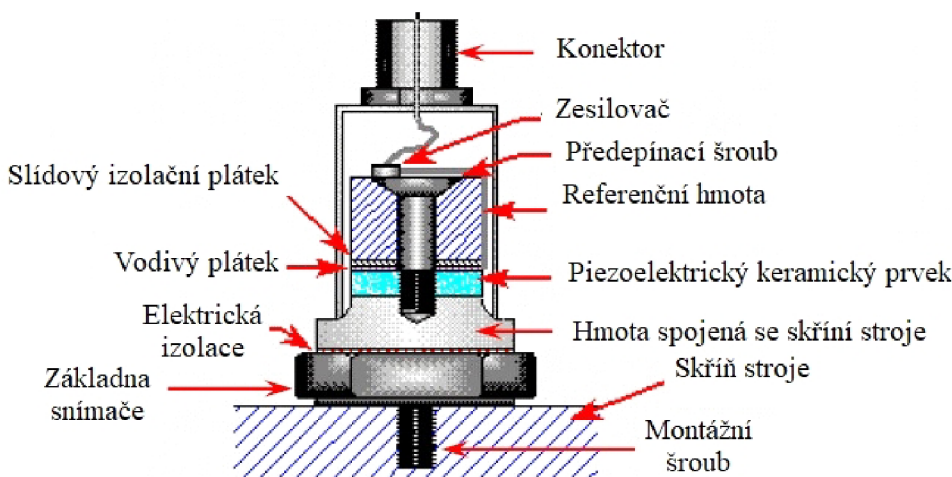
rozdílnou tuhostí částí stroje nebo obrobku. Budicí síla pocházející z řezného procesu je potom proměnlivá síla vznikající nerovnoměrným přídavkem na obrábění a síla vyvolaná charakterem práce stroje. Proměnlivá řezná síla způsobená proměnlivou tloušťkou třísky při každém záběru ostří je charakteristická pro frézování. Frekvence vynucených kmitů při něm je přímo úměrná počtu otáček nástroje. [43]

Kmity vznikající mimo řezný proces nemají velký vliv na kvalitu obrobené plochy, z důvodu malé amplitudy se nepřesnosti projeví jen při dokončování. Naopak oscilace vznikající při obrábění má velkou amplitudu, ovlivňuje řezný proces a obtížně se eliminuje. Pohybová rovnice pro vynucené kmitání se uvádí ve tvaru [43]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F(t). \quad (3.3)$$

Samobuzené kmitání se vytvoří prvním impulzem, vychýlením z rovnovážné polohy, a přetrvává působením síly vznikající kmitáním. Prvním podnětem může být například náraz nástroje na tvrdší část nehomogenního materiálu. Samobuzené kmitání mohou vyvolat síly nezávislé na řezném procesu. Například použití kopírovacího systému se zpětnou vazbou nebo relaxační kmitání vznikající na stroji při malých posuvových rychlostech. Vlivy vzniku oscilace související s řezným procesem jsou potom změna součinitele tření v souvislosti s řeznou rychlostí a reprodukce vlnitosti povrchu z předchozí operace. [43]

Frekvence tohoto druhu kmitání je závislá na vlastnostech oscilujícího systému a zároveň se velmi blíží vlastní frekvenci některého řídicího členu systému. Amplituda kmitů je při neměnných podmínkách stejná. Samobuzené kmitání se při obrábění vyskytuje nejčastěji a zároveň se při něm projevují všechny zmiňovaná negativa jako je výrazná vlnitost obrobeného povrchu nebo hluk na pracovišti. [43]

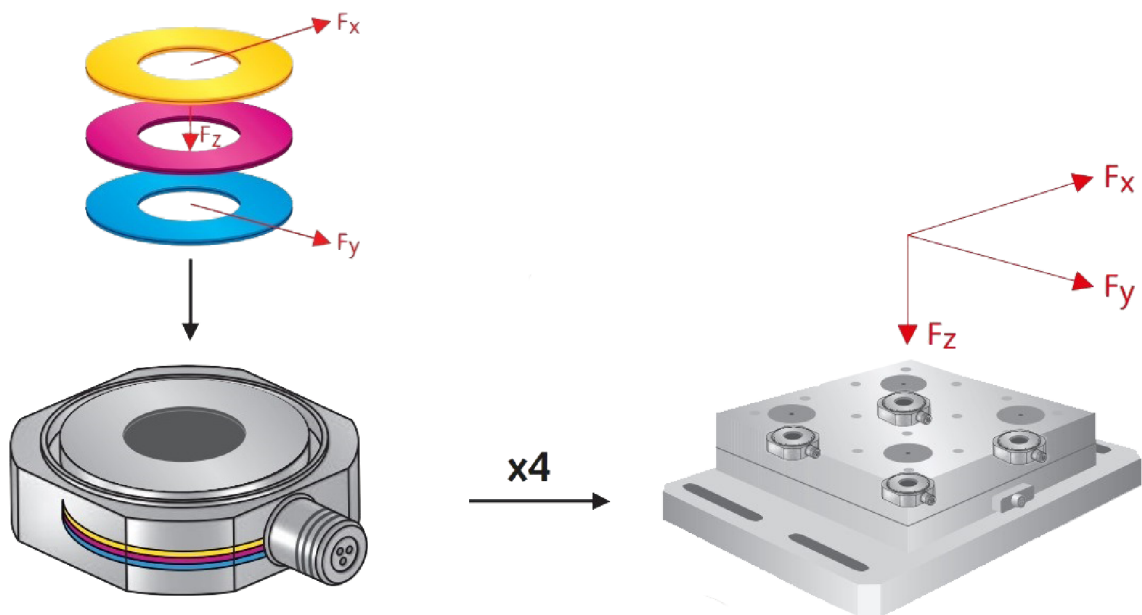


Obr. 3.4 Konstrukce piezoelektrického akcelerometru [45].

Ke snímání vibrací se používají akcelerometry. Jejich konstrukce a princip měření se může lišit, nejčastěji jsou to piezoelektrické snímače (obr. 3.4) založené na piezoelektrickém jevu. Jejich výhodou je široký dynamický i frekvenční rozsah, linearita snímače a chod bez napájení. Síla budící vibrace působí na hmotu snímače, ta stlačuje piezoelektrický prvek, který generuje náboj úměrný stlačení. Elektrický náboj je tedy úměrný zrychlení. [43]

Pro výsledné měření se akcelerometr zapojuje do řetězce se zesilovačem a záznamovou jednotkou. Toto zapojení je nejjednodušší a je schopno měřit kmitání pouze pro jednoduchý harmonický pohyb, který ale v praxi příliš často nenastává.

Další metodou vhodnou pro zjištění vibrací je pomocí dynamometru. Princip spočívá v měření deformací v soustavě stroj, nástroj, upnutí, obrobek. Dynamometr vždy obsahuje člen, který přebírá vnější zatížení a na něj následně reaguje například deformací nebo změnou polohy. Podle tohoto členu se dynamometry dělí na mechanické, pneumatické, hydraulické a elektrické. Do této kategorie patří i nejčastěji používané piezoelektrické, které využívají piezoelektrického jevu. Při stlačení krystalu, například oxidu křemičitého nebo lithium niobátu, se generuje elektrický náboj, který je přímo úměrný velikosti působící síly. [46]

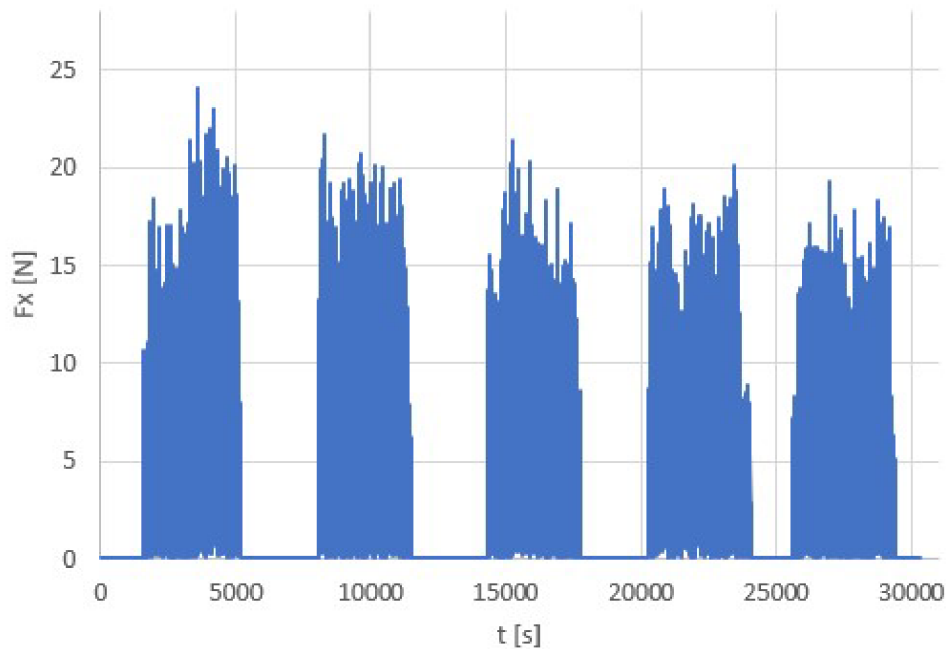
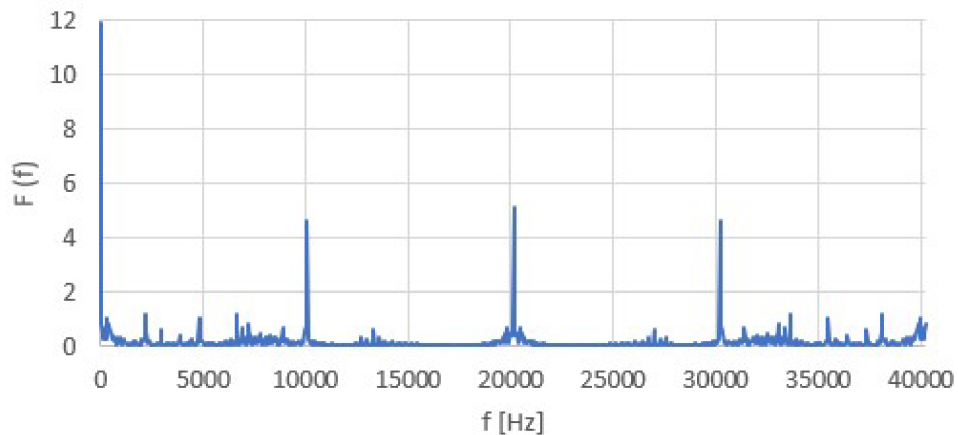


Obr. 3.5 Konstrukce piezoelektrického dynamometru [47].

Piezoelektrický dynamometr se skládá ze čtyř senzorů na měření síly, které jsou pod vysokým předpětím upnuty mezi krytem a dvěma základními deskami. Přičemž každý senzor obsahuje tři plátky krystalu, pro každý směr síly jeden, popřípadě i čtvrtý pro měření momentu (obr. 3.5). Dynamometr se upne přímo do jednotky obráběcího stroje a data z něj se převádí do zapisovací jednotky, počítače, odkud se dále zpracovávají, dále se do soustavy zapojí zesilovač. Výhody těchto snímačů jsou vysoká citlivost, lineární závislost, vysoký rozsah měřených sil a snadná obsluha aparatury. Naopak nevýhodami nutné použití zesilovačů a vysoká pořizovací cena. [47]

Výstupy z dynamometru jsou složky řezné síly a momentu při obrábění, které se následně pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) převedou na amplitudu kmitů v závislosti na frekvenci (obr. 3.6). [46]

Metodou pro vyhodnocení dat frekvenční analýzy je Fourierova transformace sloužící pro přeměnu spojité funkce z časové funkce do frekvenční. Ve vzniklém spektru je potom možné odhalit známé frekvence, závady na stroji, nástroji nebo upnutí, zubovou

Závislost řezné síly F_x na čase t

 FFT F_x


Obr. 3.6 Závislost řezné síly na čase a z toho provedená FFT.

frekvenci a další. Vychází z předpokladu, že každou spojitou funkci lze zapsat jako součet nekonečné řady. Spojitá Fourierova transformace se formuluje vztahem:

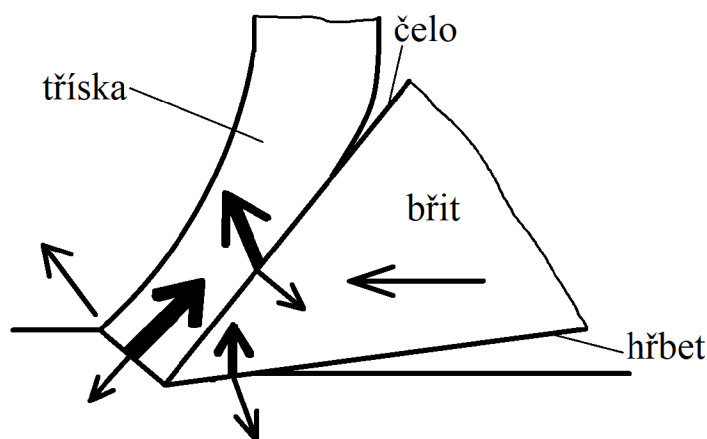
$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (3.4)$$

Tato metoda zpracování dat však není vhodná pro zpracování číslicových signálů (pouze pro dané funkce času), proto byla vyvinuta metoda diskrétní Fourierova transformace (DFT). Ta byla založena na myšlence, že pro vzorkovaný periodický signál musí vytvořit

stejný výsledek jako pro původní nevzorkovaný signál. Tato metoda se využívá pro zpracování signálu v reálném čase na pomalých procesorech. Její nevýhodou je vysoký počet operací při zvyšujícím se počtu koeficientů. Proto se velmi často používá redukovaná metoda, která se nazývá rychlá Fourierova transformace. Metoda DFT vyžaduje $O(N^2)$ operací, FFT pouze $O(N \log N)$. V současné době již existuje více programů schopných tato data vyhodnotit.

3.2 Přenos tepla při obrábění

Břit nástroje působí silou na materiál a deformuje ho elasticky i plasticky. Mechanická práce potřebná pro trvalou deformaci se potom mění na teplo, celkově se jí přetvoří na teplo až 98 %. Ke vzniku dochází ve střižné rovině v primární oblasti řezu, v oblasti, kde se tříska tře o čelo nástroje a hřbet nástroje o obrobek (obr. 3.7). Šířka šipky na obrázku znázorňuje množství tepla vzniklého v dané oblasti. Dále se šíří do nástroje, třísky, obrobku a prostředí. [43]



Obr. 3.7 Vznik tepla při obrábění.

Teplo má kumulativní charakter, to znamená, že se hromadí, při frézování v obrobku. Přičemž dřevo je tepelný izolant, teplo tedy neproudí tolik do obrobku a třísky, zůstává na nástroji. Což ovlivňuje řezné vlastnosti frézy, způsobuje její dřívější otupení, mechanické vlastnosti obrobku se zhoršují, může dojít k napalování až spálení.

Kritickou teplotou procesu je bod vzplanutí, nejnižší teplota materiálu, při které se zahříváním vytvoří takové množství plynů, že přiblížením plaménku materiál vzplane a zase zhasne. Pro dřevo je to teplota 180–275 °C. Další hodnotou je potom bod zápalnosti, to je nejnižší teplota, na kterou je materiál potřeba zahřát, aby se sám vznítil a udržoval hoření i po odstranění zdroje tepla. Bod zápalnosti dřeva se uvádí 330–470 °C. [48]

I z tohoto důvodu je třeba proces chladit. Běžně se používají procesní kapaliny, které mají mimo chlazení funkci mazací, odvádí třísku z řezu, snižují tření. To však u obrábění dřeva není možné z důvodu možné degradace materiálu. Řešením je chlazení plyny, které mají menší chladicí účinek, třísku z řezu odvádějí podstatně hůř a k mazání nedochází vůbec. Plyn je do procesu přiváděn přídavným zařízením nebo vnitřním chlazením, otvorem v nástroji, často je pro větší výkon natlakován. [49]

Pro měření tepla při obrábění se běžně používá kalorimetr. Tato metoda spočívá v ponoření měřeného objektu do izolované nádoby naplněné kapalinou do určité výše, do které je integrovaný přesný teploměr. Teplo je vedeno z měřeného objektu do kapaliny až do vyrovnání teplot. Množství odevzdaného tepla obrobku nebo třísky se potom rovná přijatému teplu kapaliny a právě tato hodnota se měří a vyhodnocuje. Použití kalorimetru pro dřevěné obrobky však není možné kvůli hygroskopicitě materiálu. Celkové množství tepla vznikajícího při obrábění se dá vypočítat ze vztahu [43]:

$$Q = F_c \cdot v_c = Q_o \cdot Q_n \cdot Q_t \cdot Q_{pr} \text{ [J]}, \quad (3.5)$$

kde F_c řezná složka obráběcí síly [N],
 v_c řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 Q_o teplo na obrobku [J],
 Q_n teplo na nástroji [J],
 Q_t teplo třísky [J],
 Q_{pr} teplo prostředí [J].

Měření teploty obráběcího procesu se provádí jak na tříse a obrobku, tak na stroji a nástroji. Kvůli náročnosti a specifičnosti řezného procesu některé jinak běžně používané metody nejsou vhodné. V praxi se proto využívá převážně těchto jevů pro zjištění teploty [43]:

- termoelektrický jev – termočlánky,
- změna elektrického odporu – termistory,
- tepelné záření – pyrometry, termovize, fotometrie,
- změna struktury – tepelné křídly a barvy.

Každé těleso s nenulovou absolutní teplotou (více než -273°C) vyzařuje do okolí elektromagnetické záření, tedy tepelné a světelné záření o vlnové délce od 1 nm do 1 mm. Bezdotyková metoda měření teploty vychází z teorie absolutně černého tělesa (těleso, které má 100 % vyzařovací schopnost) a Kirchhoffova, Stefan-Boltzmanova, Planckova i Wienova zákona. Podle Stefan-Boltzmanova zákona se hustota zářivého toku vyjadřuje vztahem [50, 51]:

$$E_0 = \epsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}, \quad (3.6)$$

kde ϵ emisivita zářiče, $\epsilon \in (0; 1)$, [-]
 $\epsilon = 0$ pro absolutně nedokonalé zářiče (bílé těleso),
 $\epsilon = 1$ pro absolutně dokonalé zářiče (černá těleso),
 $\epsilon = 0,95$ pro dřevo,
 σ_0 Stefan-Boltzmanova konstanta numprint $\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}\text{]}$,
 T termodynamická teplota [K].

Konstrukce infračerveného teploměru se skládá z optiky, snímače, elektronických obvodů a displeje. Důležitým parametrem je optická charakteristika, značí se jako D:S a vyjadřuje, z jaké vzdálenosti D lze měřit teplotu plochy o průměru S. Teploměry jsou schopny měřit teplotu od asi -30°C do několika set nebo i tisíc stupňů Celsia, jejich přesnost se uvádí $\pm (1-2)\%$ z měřené hodnoty. [52]

4 MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ PŘI OBRÁBĚNÍ

Pro měření vibrací při obrábění dřeva bylo vybráno dřevo smrkové, a to kvůli jeho výrazným rozdílům tvrdosti jarního a letního dřeva a snadné dostupnosti. Výraznější heterogenita materiálu je rizikovější pro vznik vibrací při frézování. Polotovar dostupný v Uni Hobby má tvar hranolu o rozměrech 120x120x3000 mm. Takto zakoupený polotovar je třeba následně nařezat na potřebný rozměr. V tomto experimentu je jediným omezujícím parametrem rozměr stolu frézky a možnost upnutí materiálu. Hranol se nařeže formátovací pilou na dřevo Holzmann TS 315VF 2000 400V (příloha 1) na krychli s délkou hrany 120 mm (obr. 4.1). Dále se materiál ručně brousí brousicím papírem pro zmírnění křivosti a drsnosti povrchu a zpřesnění měření vibrací.



Obr. 4.1 Polotovar ze smrkového dřeva.

Takto připravený polotovar se upne do svěráku připevněného do stroje, vertikální frézky CNC OSO Olomouc FV 25 CNC A (příloha 2). Volba stroje je odůvodněna dostupností ve fakultní dílně. Do vřezena frézky se pomocí kleštinového upínače upne nástroj, univerzální dlouhá fréza E4S L SUMA (příloha 3). Nástroj byl vybrán také na základě dostupnosti, dále kompatibility se strojem a vhodnosti pro obráběný materiál. Tato fréza není určena speciálně pro dřevo, je však univerzální a je tedy proto vhodná i pro tento materiál. Při přebroušení tohoto nástroje došlo ke změně počtu zubů na čele nástroje, původní výrobcem udávané čtyři zuby byly zbroušeny na dva. Pro testování vibrací vznikajících při frézování materiálů se ideálně používá nástroj pouze s jedním břitem, aby se zamezilo prolínání signálů od jednotlivých břitů a tím zkreslování výsledků.

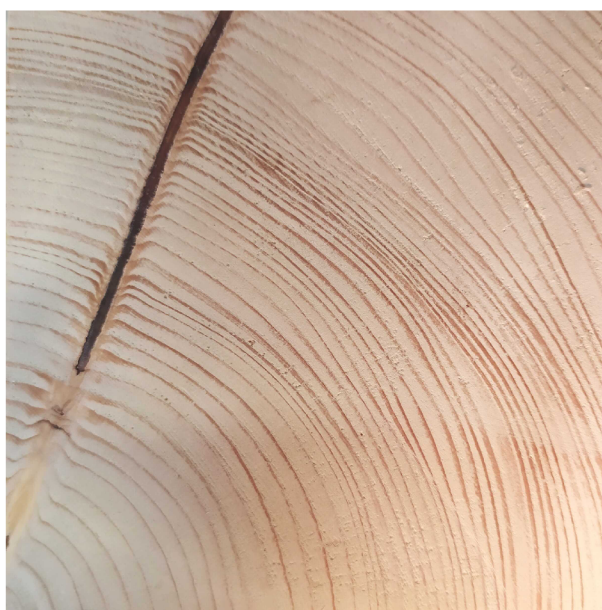
Volba otáček je závislá na maximálních možných otáčkách stroje. Doporučená hodnota otáček pro dřevo se uvádí přibližně $n = 10\,000 \text{ min}^{-1}$, dostupná frézka je však schopna vyvodit otáčky pouze asi $n = 6\,000 \text{ min}^{-1}$. Nabízí se možnost použití zrychlovací hlavy, která je schopna zrychlení v převodu 1:5 a maximální hodnoty i $n = 40\,000 \text{ min}^{-1}$, v přepočtu pro použitou frézu by to znamenalo možné vyvinutí až $n = 30\,000 \text{ min}^{-1}$. Použití této hlavy pro konkrétní experiment však není vhodné z důvodu možného zkreslení vý-

sledných vibrací, a tím znehodnocení výsledků. Volba nižších otáček v důsledku způsobí nižší jakost obrobenej plochy. Další řezná podmínka, rychlost posuvu, se v závislosti na posuvu, počtu zubů a otáčkách se vyjádří:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,07 \cdot 2 \cdot 6000 = 840 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, \quad (4.1)$$

kde $f_z = 0,07 \text{ mm}$, z katalogu nástroje,
 $n = 6000 \text{ min}^{-1}$, hodnota nastavená na stroji,
 $z = 2$.

Dále bylo zvoleno, že pro větší zatížení se frézuje do plného materiálu, z toho plyne, že $a_e = 12 \text{ mm}$, což odpovídá průměru nástroje. Hodnota $a_p = 5 \text{ mm}$ je závislá na hloubce přebroušení frézy, do této hodnoty má nástroj pouze dva zuby.



Obr. 4.2 Vada dřeva na vzorku pro čtvrté měření.

Měření vibrací při frézování se provádí ve třech směrech, nástroj rovnoběžně s osou kmene, nástroj kolmo, směr obrábění podél a proti vláknům. Čtvrté měření se vykoná opět rovnoběžně s osou kmene, avšak na řezu je vada dřeva (obr. 4.2) V každém směru se provede pět měření. Do soustavy stroj, nástroj, upnutí a obrobek se upne sestava pro měření řezných sil dynamometrem.

Dynamometr KISTLER 5070A (příloha 4) je upnut pod svěrák na desce stolu, data získaná z něj jsou přes zesilovač převedena do počítače, do kterého se v programu DynoWare zaznamenávají. Dynamometr je situován tak, že kladná osa x je rovnoběžná s pohybem frézy a jejich směry jsou totožné. Osa y je potom rovnoběžná se stolem frézy a kladná část směřuje do popředí, kladná část osy z míří dolů.

Před samotným měřením je nutné nastavit vzorkovací frekvenci dynamometru. Ta vyjadřuje, kolikrát se odečte signál měřené veličiny za 1 s. Pro naměření přesnějších hodnot se pomocí laserového otáčkoměru Voltcraft DT-10LN/A (příloha 5) ověří nastavené

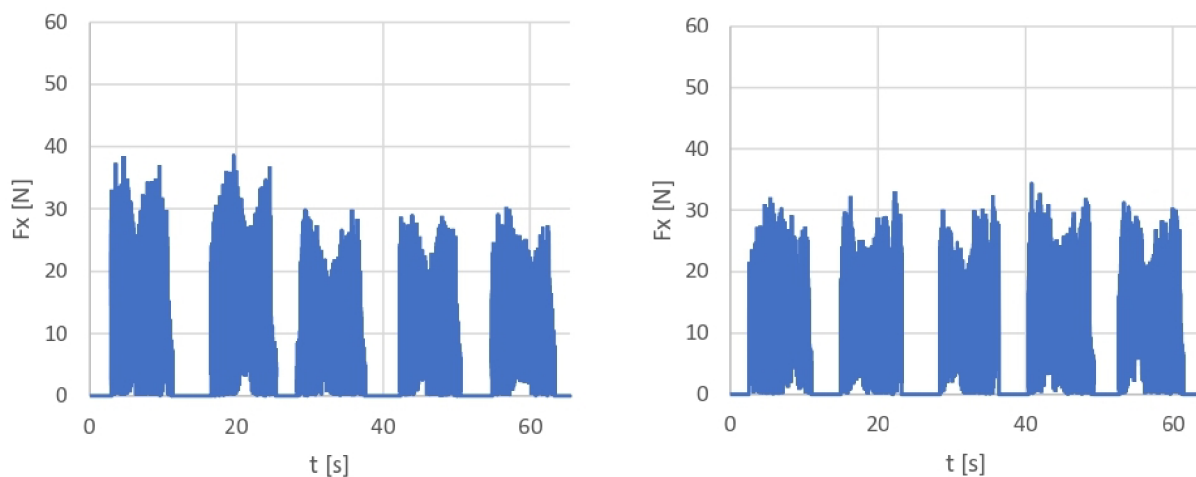
otáčky, v tomto případě otáčkoměr naměřil $n = 6\,046 \text{ min}^{-1}$. Tato hodnota se dále využije na výpočet vzorkovací frekvence:

$$f = \frac{n}{60} \cdot \frac{360}{x} = \frac{6046}{60} \cdot \frac{360}{9} = 4\,031 \text{ Hz}, \quad (4.2)$$

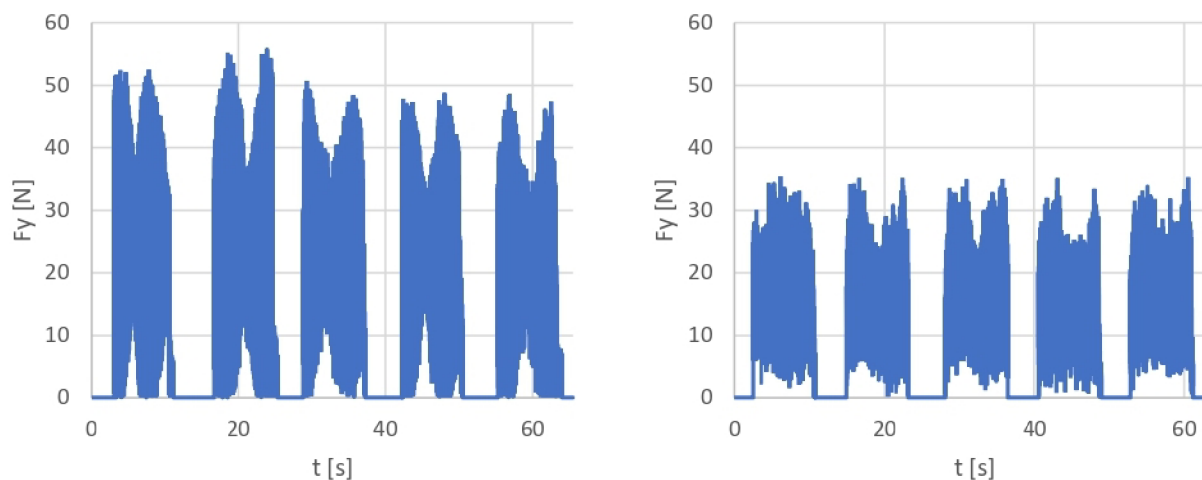
kde x úhel snímaného úseku.

4.1 Rozbor řezných sil

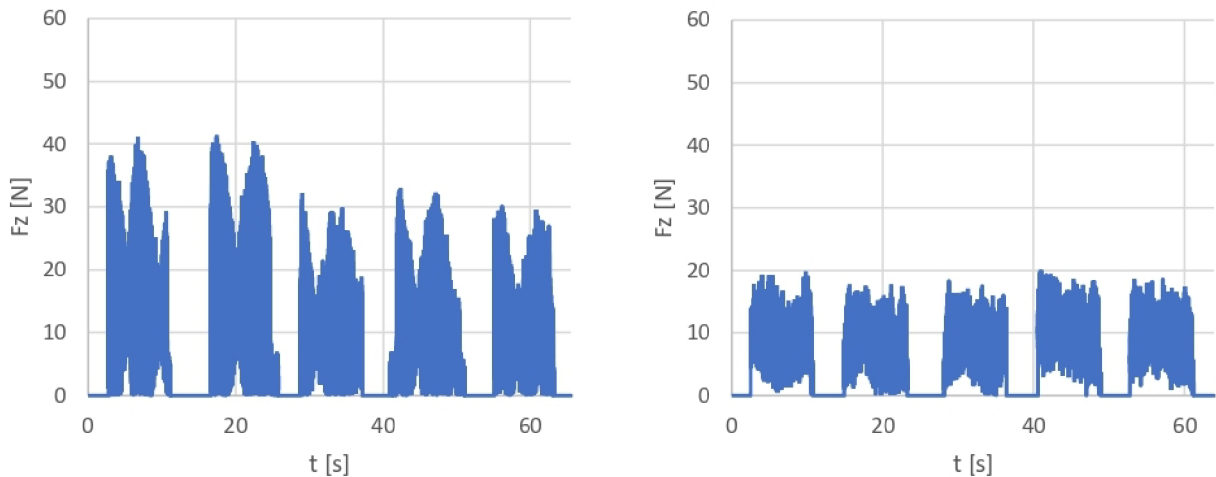
Obecně pro všechny směry měření platí, že řezná síla je proměnná v jednotlivých řezech i v rámci jedné dráhy. Hodnoty se pohybují v rozmezí 10–50 N, takto nízké síly v obráběcím procesu nezpůsobují žádné problémy. Při orientaci nástroje kolmo na osu kmene, pro frézování podél vláken, je síla ve směru y větší než v ostatních směrech, což je způsobeno narážením zubů na tvrdší zinní dřevo právě v tomto směru. Naopak při frézování proti vláknům jsou síly v ose x a y srovnatelné, ale síla v ose z je síla znatelně nižší (obr. 4.3, 4.4, 4.5).



Obr. 4.3 Průběh řezné síly frézování po (vlevo) a proti (vpravo) směru vláken v ose x .

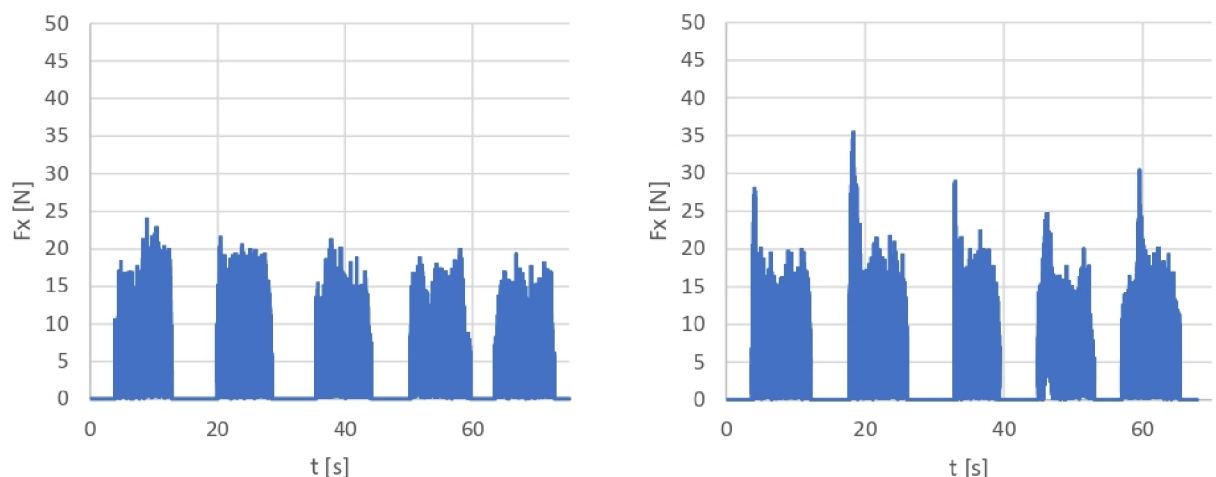


Obr. 4.4 Průběh řezné síly frézování po (vlevo) a proti (vpravo) směru vláken v ose y .



Obr. 4.5 Průběh řezné síly frézování po (vlevo) a proti (vpravo) směru vláken v ose z.

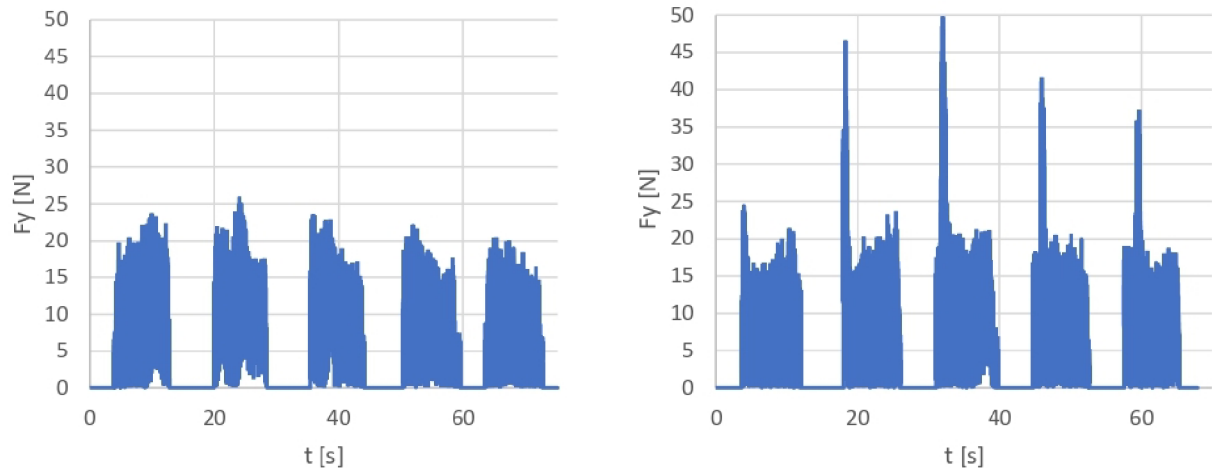
Pro frézování rovnoběžně s osou kmene platí, že řezné síly jsou nižší než v předchozích případech, a opět je zde síla v ose z nižší oproti ostatním. V posledním měření rovnoběžně s osou, pouze s vadou dřeva o větší tvrdosti protínající všechny řezy, je znatelný peak ve velikosti síly, a to ve všech směrech. Běžně se hodnoty pohybují kolem 10–20 N, v oblasti vady i 50 N. Zároveň je v grafu závislosti řezné síly na čase (obr. 4.6, 4.7, 4.8) vidět, že velikost a poloha peaku odpovídá tvaru a umístění vady v polotovaru dřeva (obr. 4.2).



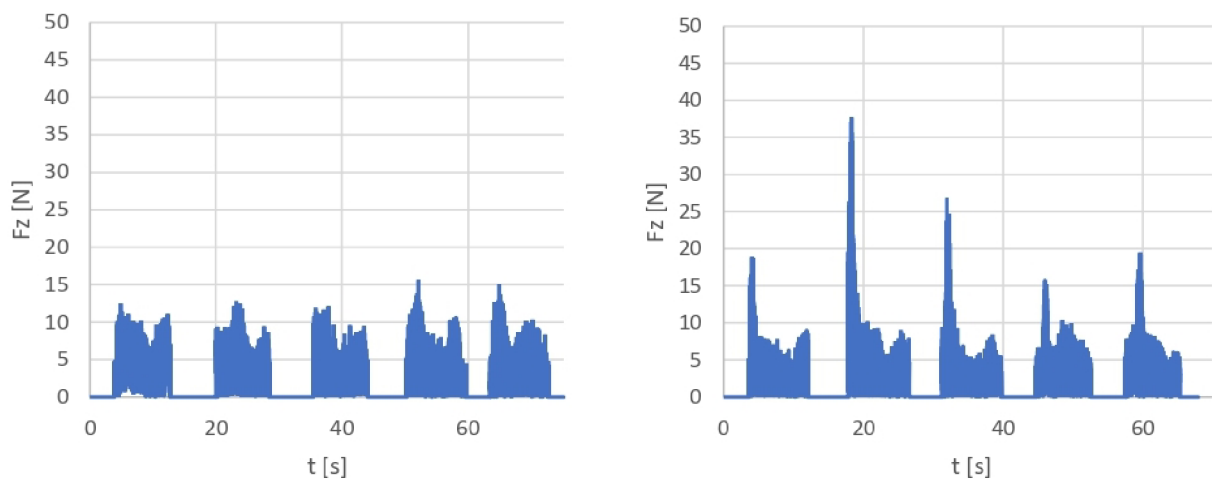
Obr. 4.6 Průběh řezné síly obrábění čela bez vady (vlevo) a s vadou (vpravo) v ose x.

Na velikosti řezných sil závisí výsledná spotřeba energie a také velikost výkonu, přičemž použitelný výkon je vždy omezen. Dále příliš vysoké řezné síly způsobují větší deformace nástrojů i obrobků, což v důsledku způsobuje vznik vibrací a tím i nekvalitní obrobenou plochu. U takto zatíženého nástroje může dojít i k vylomení řezné hrany, čímž se výrazně sníží životnost nástroje. [53]

Průběh řezných sil je ovlivněn zejména materiálem obrobku, geometrií nástroje a použitými řeznými podmínkami. Se vzrůstající tvrdostí roste i řezná síla. Dřevo je obecně měkký materiál v porovnání s ostatními běžně používanými materiály pro obrábění. Konkrétně smrkové dřevo se řadí mezi měkká dřeva, proto řezné síly nedosahují vysokých hodnot a není třeba měnit podmínky řezného procesu. [53]



Obr. 4.7 Průběh řezné síly obrábění čela bez vady (vlevo) a s vadou (vpravo) v ose y.



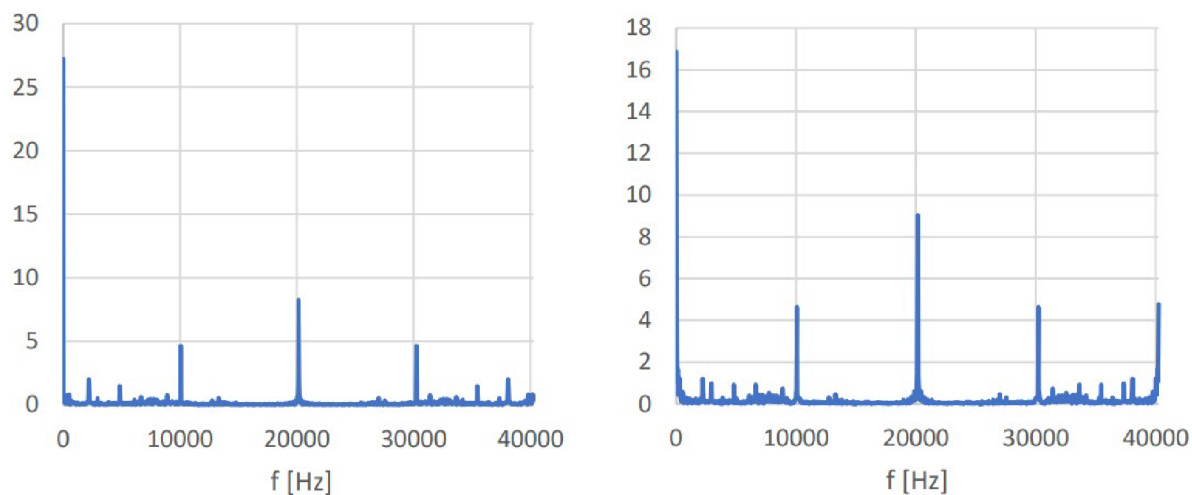
Obr. 4.8 Průběh řezné síly obrábění čela bez vady (vlevo) a s vadou (vpravo) v ose z.

4.2 Rozbor vibrací

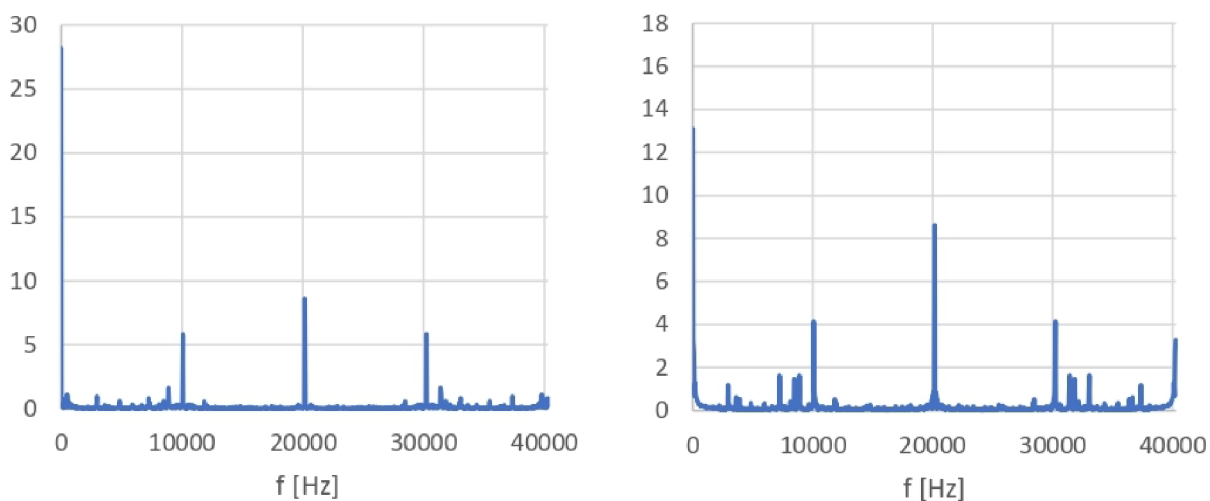
Pro rozbor vibrací provázejících frézování dřeva v jednotlivých směrech se využívá metoda rychlá Fourierova transformace. Časové hodnoty se v programu Excel převedou na data kmitočtová, která se potom zaznamenají do grafu. Takto získané hodnoty je složité vyhodnotit, protože během obráběcího procesu vzniká několik druhů kmitání (od stroje, nástroje, nedostatečné upnutí nebo nárazy frézy do materiálu), které se potom sčítají a tvoří výsledné kmitání.

V grafech (obr. 4.9, 4.10, 4.11) je vidět pravidelně se opakující peak u hodnoty 0 Hz, 10 000 Hz, 20 000 Hz, atd., který pravděpodobně vznikl od nárazu zubu nástroje do materiálu. Dřevo se považuje za tlumič, kmitání se jím šíří rychlostí přibližně $1\,100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve směru podélném a $4\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve směru příčném (oproti oceli, kde se kmity šíří rychlostí $5\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), hodnoty amplitudy kmitů pro něj jsou v grafu čitelné při nižších frekvencích.

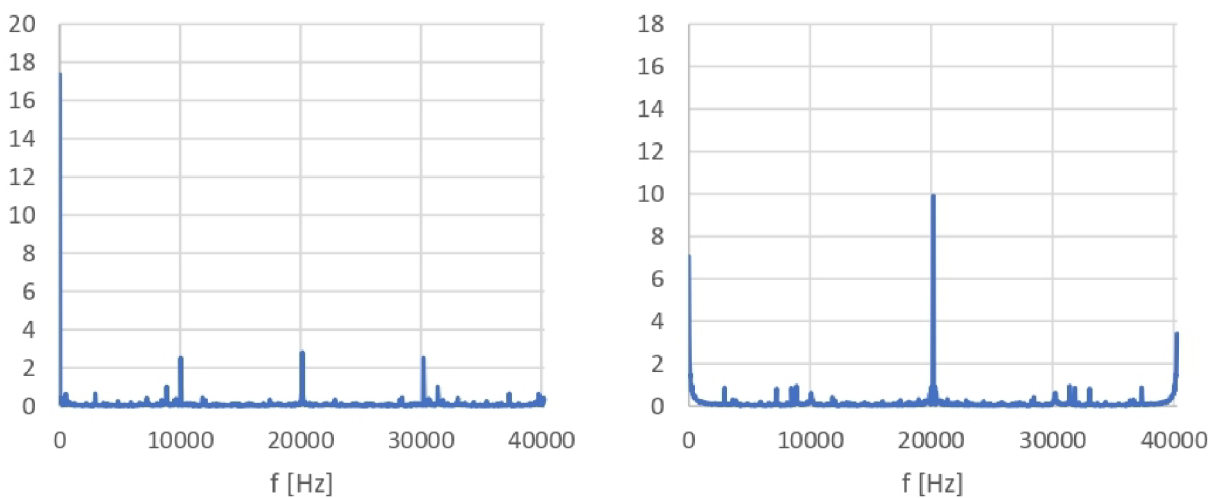
Jelikož jsou výsledné FFT diagramy velmi podobné pro všechny směry jak ve velikosti amplitud, tak tvarem křivky, v práci jsou uvedeny pouze grafy pro frézování proti vláknům dřeva a přes vadu materiálu. Zbylé dva směry jsou vloženy do přílohy (příloha 6).



Obr. 4.9 FFT pro frézování proti vláknům (vlevo) a přes vadu (vpravo) dřeva pro osu x.



Obr. 4.10 FFT pro frézování proti vláknům (vlevo) a přes vadu (vpravo) dřeva pro osu y.



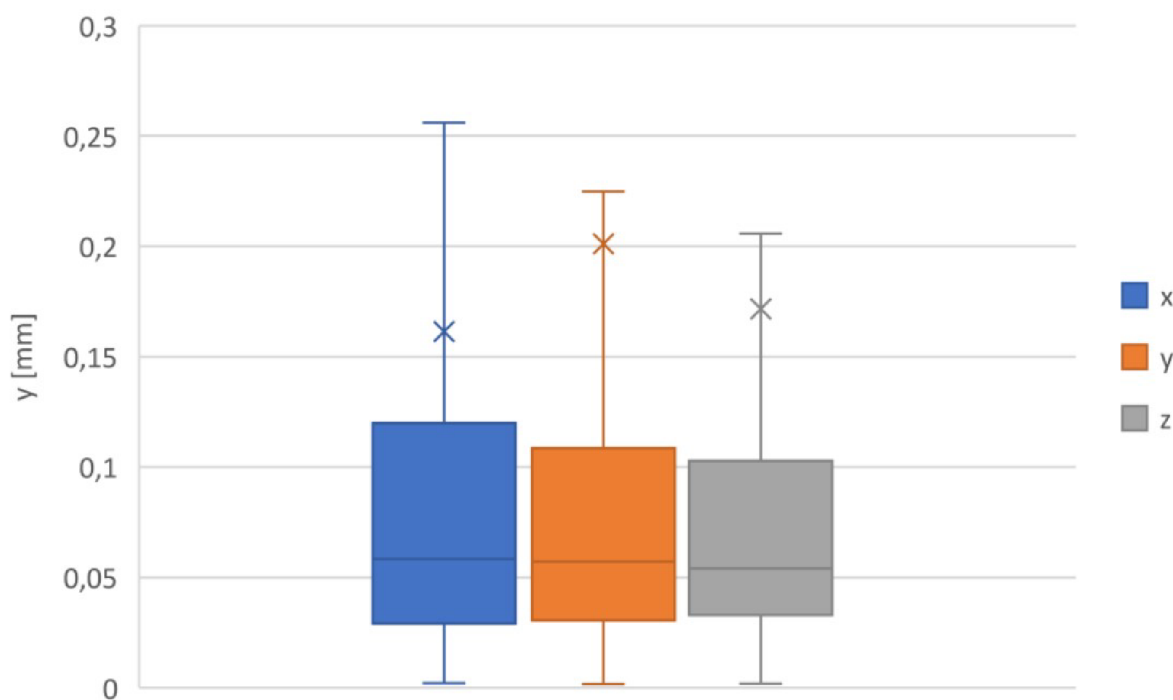
Obr. 4.11 FFT pro frézování proti vláknům (vlevo) a přes vadu (vpravo) dřeva pro osu z.

Pro nedostatek informací získaných z Fourierovy transformace vynesené do grafu se data dále zpracují do boxplotu neboli krabicového grafu, který se využívá ve statistice pro grafické znázornění dat pomocí kvartilů. Tři kvartily rozdělují data na čtvrtiny, dolní kvartil se označuje jako Q_1 , prostřední (medián) Q_2 a horní Q_3 . [54]

Krabicová část grafu je zespodu ohraničená Q_1 a shora Q_3 . Q_2 je v grafu zobrazeno jako horizontální linka v krabici. Křížek znázorňuje průměrnou hodnotu. Horizontální linie vycházející z krabice, tzv. vousy, vyjadřují variabilitu dat pod dolním kvartálem a nad horním kvartálem. Na jejich koncích jsou zaznačeny odlehlé hodnoty, tedy nejvyšší a nejvyšší hodnota ze souboru. [54]

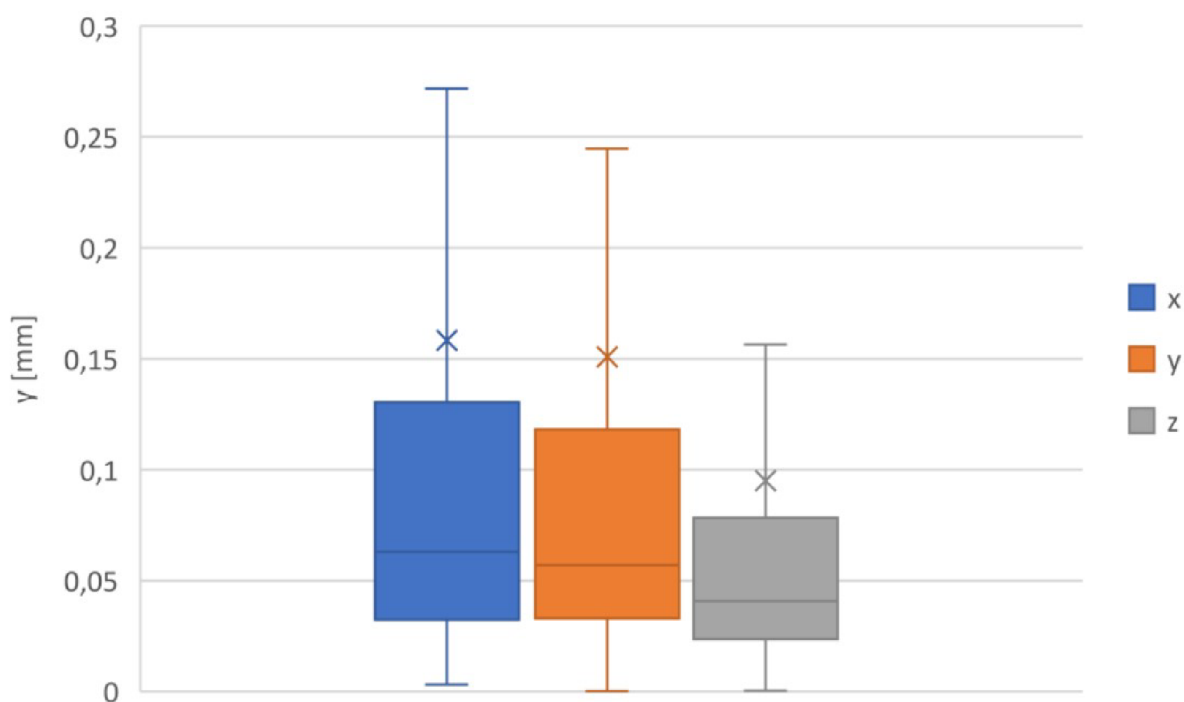
Pro všechny směry obrábění platí, že amplituda ve směru osy x, tedy ve směru obrábění drážky, má větší rozpětí. Naopak ve směru osy z, rovnoběžně s nástrojem, je amplituda nejmenší. Zároveň pro všechny směry dosahují amplitudy přibližně stejných hodnot.

Frézováním po vláknech dřeva (obr. 4.12) vznikají kmity o velmi podobné amplitudě jako frézováním proti vláknům (obr. 4.13). Rozdílem je zde výrazně vysoká průměrná hodnota amplitudy pro obrábění po vláknech ve směru osy y a z. Což znázorňuje, že v těchto směrech bylo více hodnot s vysokými amplitudami.

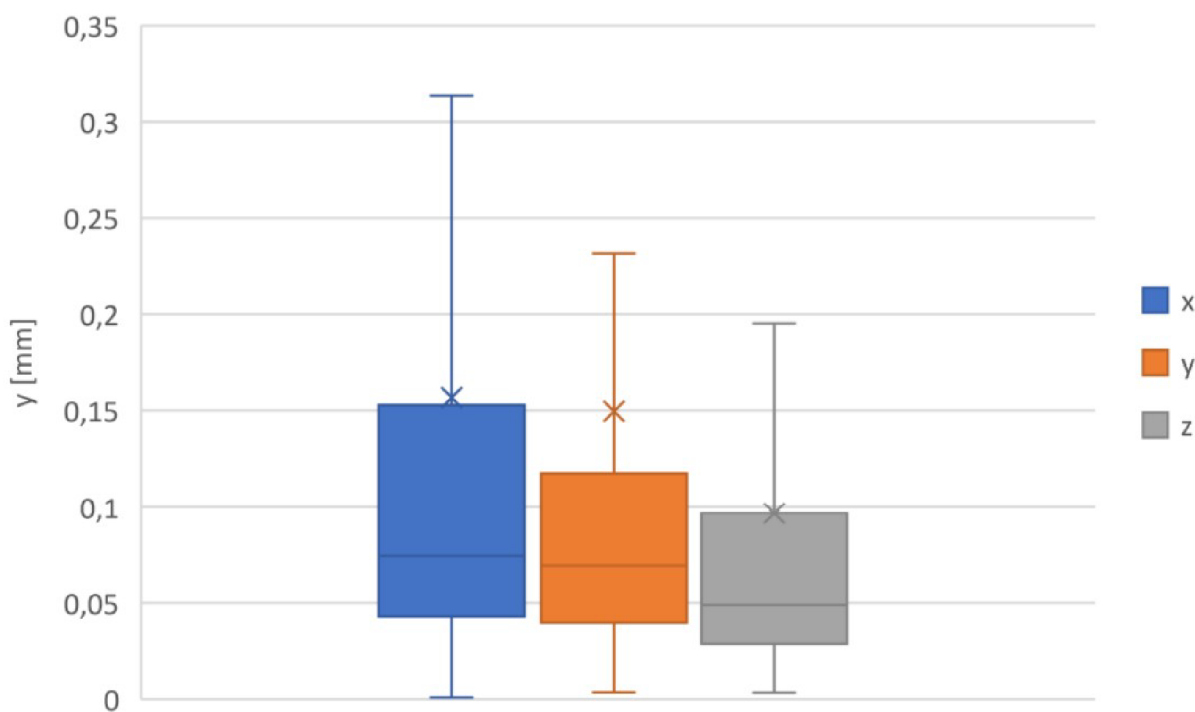


Obr. 4.12 Boxplot pro frézování po vláknech

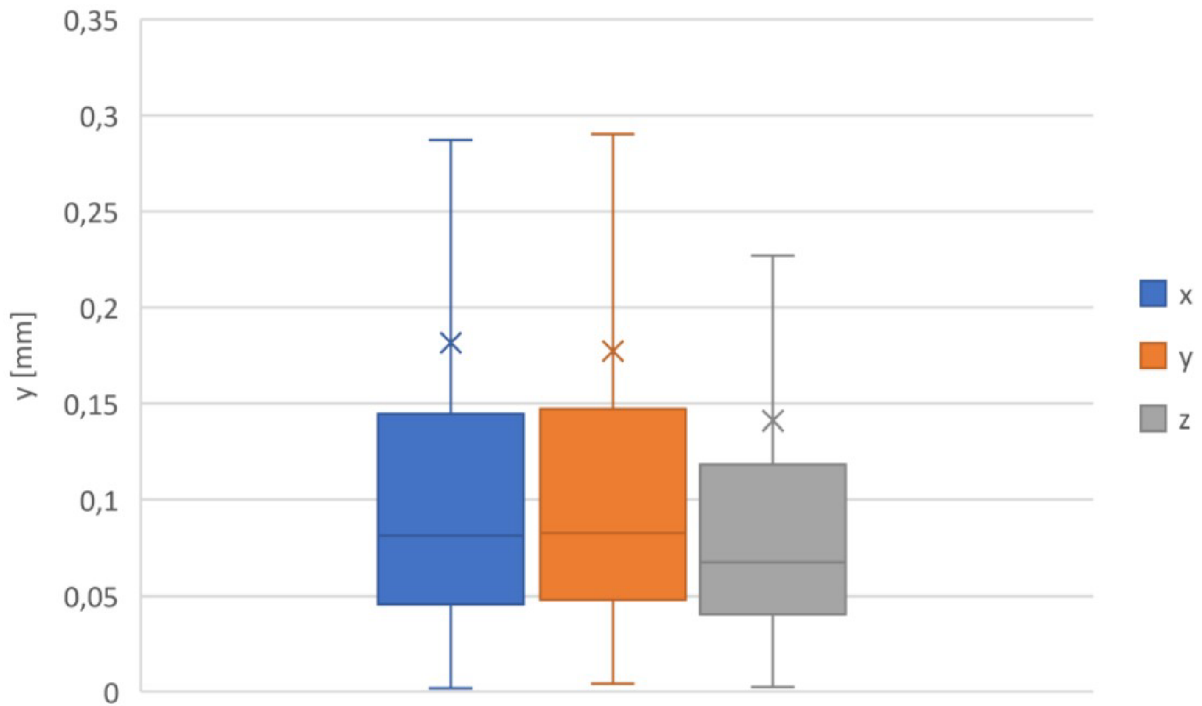
Frézováním, kde je nástroj rovnoběžně s osou kmene se dosahuje nejvyšší amplitudy ze všech měření, a to v ose x, tedy ve směru obráběné drážky (obr. 4.14). Zároveň porovnáním tohoto směru obrábění s frézováním ve stejném směru, pouze s vadou obsaženou ve všech řezech, je vidět zvýšená amplituda v y-ovém směru (obr. 4.15). Při průjezdu nástroje materiálem se právě v tomto směru jeho zuby zařezávají do tvrdší části materiálu s vadou. Tím potom dochází k mírnému nárůstu kmitání.



Obr. 4.13 Boxplot pro frézování proti vláknům.



Obr. 4.14 Boxplot pro frézování rovnoběžně s osou kmene.



Obr. 4.15 Boxplot pro frézování rovnoběžně s osou kmene s vadou dřeva.

Hodnoty amplitud dosažené při frézování dřeva nejsou nijak vysoké, což souvisí s nízkými řeznými silami. Smrkové dřevo je velmi měkký materiál, proto nedochází k výraznému kmitání ani při heterogenitě materiálu, tedy střídání tvrdšího jarního a měkčího letního dřeva. Vzniklé kmity jsou velmi rychle utlumeny, a na obrobene ploše nejsou viditelné žádné stopy kmitání nástroje.

5 MĚŘENÍ A ANALÝZA TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ

Měření teploty obráběcího procesu se provádí souběžně s měřením vibrací. Polotovarem je tedy smrkové dřevo tvaru krychle s délkou hrany 120 mm, které se upne do svěráku vertikální frézky CNC OSO Olomouc FV 25 CNC A. Do vřetena stroje se upevní nástroj univerzální dlouhá fréza E4S L SUMA. Řezné podmínky jsou tedy stejné jako při měření vibrací:

$$\begin{aligned}n &= 6\,046 \text{ min}^{-1}, \\v_f &= 840 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, \\a_e &= 12 \text{ mm}, \\a_p &= 5 \text{ mm}.\end{aligned}$$

Pro měření teploty se využívá infračervený teploměr Raytek Raynger MX kvůli jeho dostupnosti a snadné obsluze. Nejprve je potřeba na teploměru nastavit emisivitu materiálu, v tomto případě oceli. Pro ni se udává hodnota $\epsilon = 0,85$. Metoda měření infračerveným teploměrem je bezdotyková, obsluha drží měřidlo v rukou a paprskem míří na měřený povrch, čímž do měření vnáší určitou nepřesnost.

Frézování se provádí ve třech směrech, nástroj rovnoběžně s osou kmene, kolmo na osu kmene po vláknech a proti vláknům. Další obrábění probíhá opět rovnoběžně s dřevěnými vlákny, nástroj však v každé dráze prochází vadou materiálu, která má větší tvrdost. V každém směru byly provedeny tři měření pro zjištění směrodatných hodnot. Následně jsou uvedeny výsledky měření (tab. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4):

- Fréza kolmo na osu, po vláknech:

Tab. 5.1 Měření po vláknech.

Číslo měření	Hodnota [°C]
1.	26,7
2.	28,4
3.	30,2
Průměr	28,4

- Fréza kolmo na osu, proti vláknům:

Tab. 5.2 Měření proti vláknům.

Číslo měření	Hodnota [°C]
1.	31,3
2.	33,7
3.	27,8
Průměr	30,9

- Fréza rovnoběžně s osou kmene

Tab. 5.3 Měření proti vláknům.

Číslo měření	Hodnota [°C]
1.	27,9
2.	30,3
3.	29,3
Průměr	29,2

- Fréza rovnoběžně s osou kmene s vadou materiálu

Tab. 5.4 Měření proti vláknům s vadou dřeva.

Číslo měření	Hodnota [°C]
1.	28,6
2.	27,9
3.	27,2
Průměr	27,9

Výsledné hodnoty teplot se dají považovat za shodné při různých směrech frézování dřeva, tudíž je možné tvrdit, že směr vláken v tomto případě nemá vliv na zvyšování teploty nástroje. Odchytky v rámci desetín i celých stupňů mohou být způsobeny ruční obsluhou teploměru a nepřesným měřením. Zároveň záběr frézy nebyl dostatečně dlouhý pro vznik kumulace tepla na nástroji, průměrně byl nástroj v záběru přibližně 8 sekund, po nichž nastala krátká pauza a proces se opakoval.

Nejnižší teplotou, která je potřeba třeba sledovat je kritický bod, pro dřevo přibližně 180–275 °C. Při dosažení této teploty se vytvoří v řezném procesu tolik plynů, že zde nastane riziko vzplanutí materiálu. Této hodnoty však v experimentu dosaženo nebylo, proto se může prohlásit řezný proces za bezpečný, nedochází k rychlejšímu otupování nástroje vlivem přehřátí ani znehodnocení materiálu.

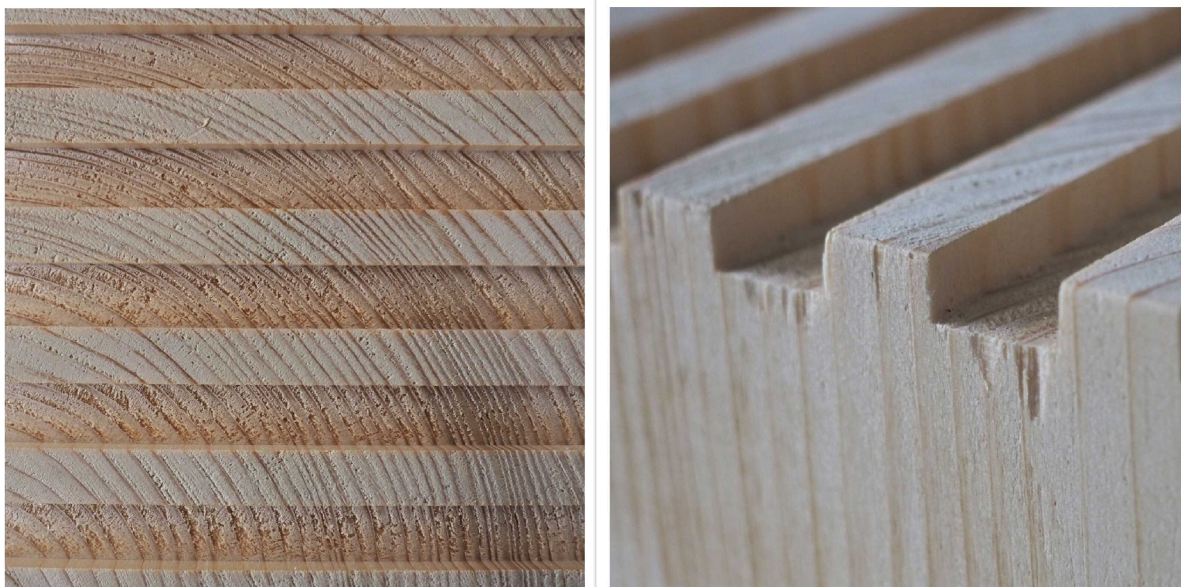
6 VYHODNOCENÍ KVALITY OBROBENÝCH VZORKŮ

Frézováním je možné vytvořit kvalitní plochy dobré jakosti i bez následného broušení, které se však provádí často jako dokončovací operace. Jakost obrobenej plochy je závislá na mnoha faktorech vyskytujících se v řezném procesu, například statické a dynamické tuhosti sestavy stroj, nástroj, upnutí, obrobek, materiálu nástroje i obrobku, otupení nástroje, geometrii nástroje nebo řezných podmínkách. [55]

Otupení nástroje lze sledovat i na řezné síle, která s otupením stoupá, a tím roste i výkon potřebný na vřetení. Opotřebením frézy dochází k výrobě obrobků s nepřesnými rozměry, pokud se nástroj dále udržuje v záběru, může dojít i ke křehkému lomu nástroje. K otupení přispívá i zahřívání nástroje, je proto třeba tento jev sledovat, popřípadě použít chlazení plynem, protože použití procesních kapalin v případě obrábění dřeva není vhodné z důvodu jeho možné degradace. [55]

Volba řezných podmínek je důležitá kvůli správnému využití stroje a nástroje, i pro výslednou kvalitu povrchu, zejména tedy řezná rychlost, posuv a hloubka řezu. Řezná rychlost je závislá na zvolených otáčkách vřetena, ty byly nastaveny na maximální hodnotu, kterou byla použita fréza schopna vyvodit. To však nebylo dostačující pro vytvoření kvalitní obrobenej plochy ve všech směrech měření. V praxi je snaha o nastavení nejnižších možných otáček, které vytvoří kvalitní povrch, z důvodu prodloužení životnosti nástroje. [55]

U anizotropního materiálu, kterým je dřevo, je směr obrábění vůči jeho vláknům a letokruhům velmi důležitý. Obecně při konstrukci výrobku je třeba je brát v úvahu právě tyto rozdílnosti. V praxi se výrobky málokdy obrábí jen v jednom směru, naopak dochází i ke kombinaci základních směrů, obrábí se vnitřní i vnější tvarové a rovinné plochy, složité tvary a drážky.



Obr. 6.1 Kvalita obrobenej povrchu na příčném řezu.

Frézování smrkového dřeva probíhalo při stejných řezných podmínkách, i ostatní podmínky procesu byly zachovány. Obráběním na příčném řezu, tedy rovnoběžně s osou

kmene, vznikl nejkvalitnější povrch. Nedochozí zde ke vzniku otřepů, vzniklé drážky mají přesné rozměry, hrany drážek zůstávají ostré. Pouze v místě výjezdu frézy z materiálu dochází k vytrhávání vláken (obr. 6.1).



Obr. 6.2 Kvalita obrobeného povrchu na příčném řezu s vadou.

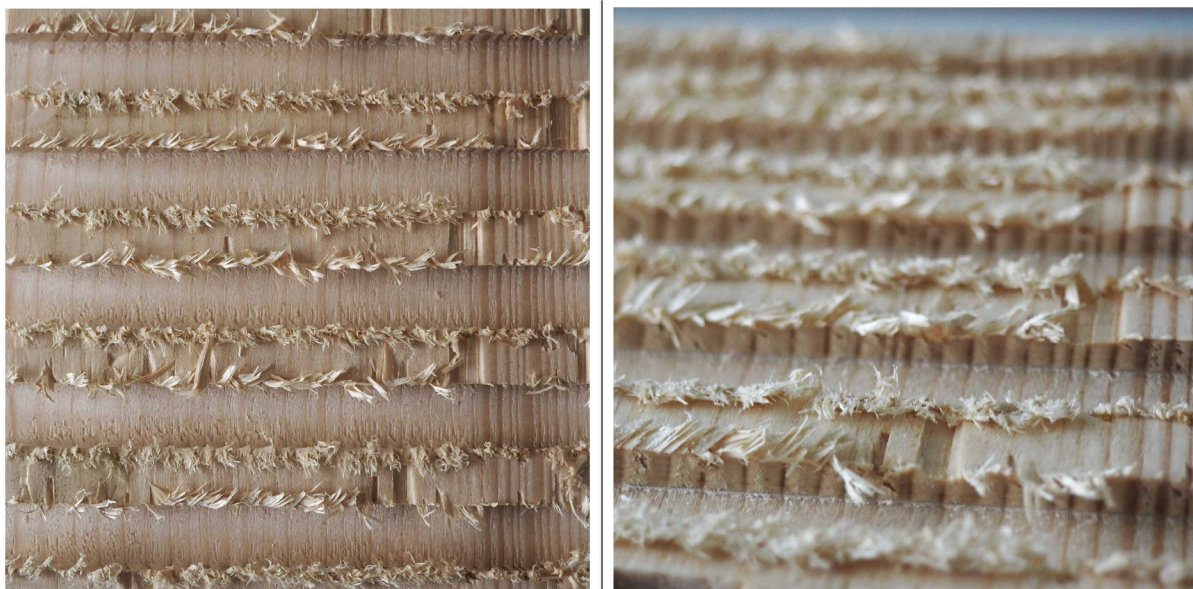
Obráběním ve stejném směru, tedy přes letokruhy, pouze s rozdílem, že dráha nástroje vedla přes vadu dřeva, vznikl také velmi kvalitní řez. Povrch pod čelem frézy i boční strany drážek mají přesné a rovné hrany. K otřepu při výjezdu nástroje dochází i zde. V okolí vady nedochozí ke snížení kvality, kromě malého otřepu v oblasti prvního a druhého řezu (obr. 6.2).



Obr. 6.3 Kvalita obrobeného povrchu podél vláken.

Frézováním po směru vláken dřeva již vznikl méně kvalitní povrch, než v předchozích případech. Nájezdem a výjezdem do materiálu nevzniká otřep, ale plocha pod čelem nástroje

má nižší jakost. Nejhorší otřep potom vzniká na horních hranách drážek. Odlupují se celá vlákna, která za sebou zanechávají nepřesné hrany. V jednom případě došlo i k ulomení celé přepážky mezi prvním a druhým řezem, kde byla ponechána užší mezera mezi řezy. Při zvětšení mezery z 5 mm na 10 mm už k tomuto jevu nedošlo. Právě v tomto směru obrábění by kvůli kvalitě povrchu nejvíce pomohlo zvýšení otáček nástroje, ale výroba kvalitního obrobeného povrchu nebyla cílem měření (obr. 6.3).



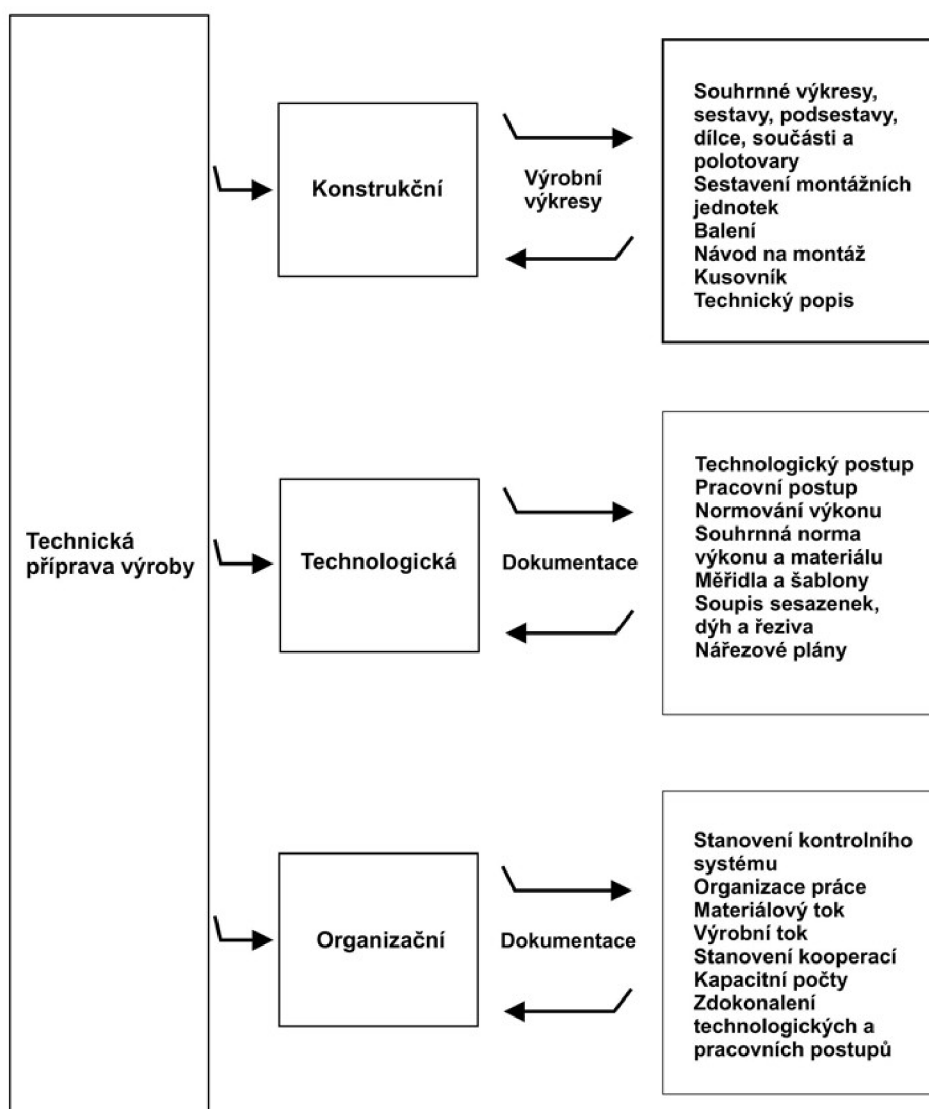
Obr. 6.4 Kvalita obrobeného povrchu napříč vlákny.

Posledním testovaným směrem při obrábění dřeva je frézování přes vlákna. Vzniklý povrch má jednoznačně nejnižší jakost. Nedochozí k vyštípávání vláken při nájezdu a výjezdu z materiálu, plocha pod čelem nástroje má relativně dobrou kvalitu. Avšak na horní hraně drážky vznikají veliké otřepy, které je velmi obtížné následně obrousit. Dále zde dochází k vytrhávání vláken mezi řezy. Tomuto směru by se proto mělo při návrhu součásti vyhýbat, popřípadě v tomto směru obrábět pouze povrchy, u kterých není vyžadována příliš vysoká kvalita povrchu a přesnost rozměrů (obr. 6.4).

7 DISKUZE A POSOUZENÍ Z POHLEDU ZÁKAZNÍKA

Obrábění dřeva provází, stejně jako obrábění jiného materiálu nebo použití jiné výrobní metody, celá řada negativních i pozitivních jevů. Důležité je, aby výhody použití materiálu nakonec převážily nevýhody. Proto je vhodné nalezená negativa uvažovat a optimalizovat, tím se zmenší jejich vliv na výsledný proces. Naopak zanedbáním některého z jevů může dojít k poškození stroje nebo nástroje, výrobě nepřesného a nekvalitního obrobku, zranění nebo onemocnění pracovníků provozu.

Člověk se dřevem obklopoval odjakživa, zpracování dřeva se tedy vyvíjí již stovky let. Obrábění v dnešní době směřuje k sériové a hromadné výrobě. Hromadná se vyznačuje výrobou malého množství dílů ve velké produkci, v sériové se vyrábí stovky i tisíce kusů v jedné sérii, výrobky jsou vzájemně zaměnitelné a standardizované. Je zde vyžadováno přesné řízení a plánování výroby, využívá se CNC obráběcích center, automatů, robotů, montážních linek.



Obr. 7.1 Schéma technické přípravy výroby. [56]

Celkově je snaha o nahrazení lidské práce, což je v důsledku levnější, omezuje se lidská chyba, a zároveň se tím redukuje několik negativ spojených s obráběním dřeva. Tedy zdravotní problémy pracovníků provozu způsobené dlouhodobým vystavováním náročným pracovním podmínkám, jako je prach, třísky a další látky uvolňující se při zpracování tohoto materiálu. Dalšími výhodami sériové výroby je vysoká produktivita výroby a tím i nízký čas výroby jednoho dílu. S velkou kontrolou nad celým procesem a jeho postupnou optimalizací se pojí vysoké využití materiálu a efektivita práce.

Nevýhodami jsou vysoké pořizovací náklady na veškerou techniku a časově náročná příprava celé výroby (obr. 7.1). Z toho také plyne horší flexibilita při nalezení chyby v procesu, změně výrobku, jednotlivé úseky se náročněji přestavují a přizpůsobují novým podmínkám. Náročné je také zrušení celé takové výroby. Další nevýhodou je potom vyšší energetická náročnost takto automatizovaného systému.



Obr. 7.2 Ukázka ručního obrábění a výrobku [57].

Výraznou výhodou dřeva je jeho vliv na lidskou psychiku, proto se jím člověk obklopuje již několik set let. Sériová výroba však nedokáže nahradit kusovou neboli zakázkovou výrobu. Tedy lidskou práci, ze které vznikají výrobky, které jsou každý originálem. Toho se využívá například při výrobě nábytku, dekorace, nádobí, uměleckých předmětů a stavbě roubenek a srubů. Ovšem zapojením lidí opět vyvstává problém s prachem, třískami a dalšími látkami ve výrobě. Proto je vhodné, aby pracovníci používali ochranné pomůcky jako jsou rukavice, brýle a respirátory (obr. 7.3). Dále je potřeba dobré odvětrávání pracovního prostoru a častější kontroly lékařem.



Obr. 7.3 Ochranné pomůcky [58].

Během manipulace s dřevěným polotovarem by se měl brát zřetel na riziko navlhnutí materiálu, jeho vlivem by mohlo dojít ke změně tvaru a rozměru materiálu, dále se zvyšuje riziko napadení materiálu houbami nebo jinými škůdci. Proto je třeba zvolit vhodné uskladnění. Navlhnutí konečného výrobku se potom zamezuje ochrannými nátěry.

Pravděpodobně nejvýznamnější vlastností dřeva je jeho anizotropie. Ta je potřeba uvažovat již při návrhu konstrukce součásti. Ideálně by se mělo úplně vyhnout obrábění přes vlákna dřeva, v tomto směru dochází k přetrhávání vláken řezným nástrojem a tvorbě velmi nekvalitního povrchu. Zbylé dva směry jsou pro vznik kvalitní obrobenej plochy v pořádku, případný vznik otřepů je možno v dokončovací operaci brousit.

Průběh řezných sil a měření kmitání při frézování prokázalo, že vlivem heterogenity dřeva nevznikají vibrace nebezpečné obráběcímu procesu, ani nevzniká nekvalitní obrobena plocha. Pokud by tedy docházelo k některému z těchto jevů, je potřeba zkontrolovat správnost upnutí nástroje a obrobku, popřípadě ověřit tuhost stroje a jeho tlumení.

Během frézování smrkového dřeva nedocházelo k přehřívání nástroje. Podmínky měření však nedovolovaly otestování krajních podmínek obrábění. Nástroj byl tak v záběru pouze krátkou dobu, nedošlo tedy k velké kumulaci tepla na něm. Zároveň nebyly nastaveny vysoké otáčky, kvůli omezení strojem. Pokud by se při výrobě dílu projevilo přehřívání nástroje, je možné do sestavy přidat chlazení vzduchem.

ZÁVĚR

Úvodní teoretické kapitoly diplomové práce se zabývaly dřevem, jeho původem a vznikem, vlastnostmi, strukturou, jeho vhodným využitím i výhodami a nevýhodami. Následně bylo konkrétněji popsáno smrkové dřevo, které bylo využito v praktické části. Poté byla rozebrána potřebná příprava materiálu před obráběním, výrobní procesy, geometrie nástroje, mechanismus vzniku třísky. Detailněji se potom diplomová práce zaměřuje na frézování, které bylo použito v rámci experimentální části.

Praktická část diplomové práce se věnuje vytipování nežádoucích jevů, které provázejících obrábění dřeva. Patří mezi ně například nehomogenita, anizotropie a hygroskopicitu materiálu, jeho náchylnost k napadení škůdci a houbami při nesprávném skladování a povrchové úpravě. Z anizotropie dřeva také vyplývá omezení možnost obrábění z některých směrů, a tím náročnější konstrukce některých výrobků. Dalším jevem ovlivňujícím výrobu dřevěných dílů je prach, oxidy síry a oxidy uhelnaté, uvolňující se ze stromů při jejich obrábění. Dále dochází k uvolňování třísek a prachu do prostředí, kde může způsobovat zdravotní problémy pracovníkům provozu.

V experimentální části diplomové práce se testoval vznik vibrací a růst teploty při obrábění dřeva ve třech směrech nástroje vůči obrobku. Výsledkem této zkoušky bylo, že nehomogenita a rozdílná tvrdost jednotlivých částí materiálu nemají výrazný vliv na vznik vibrací. Převážně proto, že je dřevo velmi měkký materiál. Amplituda kmitů dosahuje ve směru osy x hodnot 0,256–0,314 mm, v ose y 0,225–0,290 mm a v ose z 0,156–0,227 mm.

Pro otestování vlivu izolace materiálu na obráběcí proces nebyly vytvořeny vhodné podmínky, výsledkem tedy je, že při nastavení nízkých otáček a obrábění pouze v krátkém časovém úseku s dostatečnými pauzami nedochází ke kumulaci tepla na nástroji ani k degradaci materiálu. Jednotlivé směry obrábění neovlivňovaly růst teploty, jejich průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí 27,9–30,9 °C.

Po provedení experimentu byla vyhodnocena kvalita obrobené plochy a porovnány jednotlivé směry. Závěrem bylo, že frézování přes vlákna je nevhodné pro vytvoření kvalitní plochy, frézování rovnoběžně s osou kmene a po vláknech dřeva vytvořilo kvalitní povrch, který je možné dále brousit pro zvýšení jakosti.

Použité zdroje

- [1] PAN, Shen a Mineich KUDO. Recognition of Wood Porosity Based on Direction Insensitive Feature Set [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: http://www.ibai-publishing.org/journal/issue_mldm/2012_july/mldm_5_1_45-62.pdf
- [2] Využití dřeva napříč odvětvími. In: MeziStromy.cz [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/oblasti-vyuziti-dreva/vyuziti-dreva>
- [3] Výhody dřeva z hlediska životního prostředí. MeziStromy.cz [online]. [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/drevo-z-hlediska-zivotniho-prostredi/vyhody-dreva-z-hlediska-zivotniho-prostredi/odborny>
- [4] Stavba dřeva: část 1/2. MeziStromy.cz [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/stavba-dreva-cast-1-2/odborny>
- [5] Dřevo. Wikipedi [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/D%C5%99evo#Stavba_d%C5%99eva
- [6] Výuka anatomické stavby dřeva: Makroskopická stavba dřeva. LDF Mendelu [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: http://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/\stavba_dreva/vyuka/makro/uvod.htm
- [7] JV Dýhy [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.dyhy.cz/>
- [8] Truhlárna v zahradě [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://truhlarna-v-zahrade.cz/material/druhy-dreva/>
- [9] Stavba dřeva: část 2/2. MeziStromy.cz [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/stavba-dreva-cast-2-2/odborny>
- [10] Vlastnosti dřeva. MeziStromy.cz [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/vlastnosti-dreva/odborny>
- [11] HEŘMÁNKOVÁ, Věra. AI01 STAVEBNÍ LÁTKY A GEOLOGIE: Dřevo a dřevěné výrobky [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/164810565-Ai01-stavebni-latky-a-geologie-drevo-a-drevene-vyrobky-ing-vera-hermankova-ph-d.html>. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] Dřevo a dřevěné výrobky. Vysoké učení technické: Fakulta stavební [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/AI001/AI001%20%C5%99evo%202013.pdf>
- [13] Vlastnosti dřeva. Oknotherm [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.oknotherm.cz/vlastnosti-dreva/#fyz>

-
- [14] Tvrdost dřeva. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tvrdost_d%C5%99eva
- [15] Charakteristika listnatých dřevin. In: NIS [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/charakteristika-listnatych-drevin/page/320/>
- [16] Charakteristika jehličnatých dřevin. In: NIS [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/charakteristika-jehlicnatych-drevin/page/319/>
- [17] Mechanické vlastnosti dřeva domácích dřevin. Dřevostavitel [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/mechanicke-vlastnosti-dreva-domacich-drevin>
- [18] Základní technologické pojmy [online]. In: . [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/163/01.html>
- [19] Úvod do technologie zpracování materiálu. MUNI IS [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2014/TE2BP_MTDR/um/Prednaska_MTDR_tema_10-22_.pdf?lang=en
- [20] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie výroby II: Řešené příklady [online]. Brno, 2002 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TechnVyroby_II.pdf. Vysoké učení technické v Brně.
- [21] Sušení dřeva: část 1/2. MeziStromy.cz [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/ochrana-a-uprava-dreva/suseni-dreva-cast-1-2/odborny>
- [22] SUŠENÍ A MODIFIKACE DŘEVA [online]. In: . [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_BC/Povinne_predmety/Hydrotermicka_uprava_dreva/HUD%20MOD%20obr%20pril%202017.pdf
- [23] Sušení dřeva [online]. In: . [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/163/06.html>
- [24] Sušení dřeva: část 2/2. MeziStromy.cz [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/ochrana-a-uprava-dreva/suseni-dreva-cast-2-2/odborny>
- [25] Sušení dřeva. AGRO Journal [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://www.agrojournals.cz/clanky/suseni-dreva-91>
- [26] Jaké vady může mít stavební řezivo vlivem růstu dřeva a sesychání?. ESTAV.cz [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/6458.jake-vady-muze-mit-stavebni-rezivo-vlivem-rustu-dreva-a-sesychani>
- [27] Ruční opracování dřeva [online]. In: . [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/163/09.html>
- [28] Dřevo a jeho obrábění: Průvodce truhláře. Praha: Grada, 2010. Průvodce truhláře. ISBN 978-80-247-2961-9.
-

-
- [29] Technologie třískového obrábění [online]. [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [30] Frézování [online]. In: . [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/13818/mod_resource/content/1/FR%C3%89ZOV%C3%81N%C3%8D.pdf
- [31] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_T0-1cast.pdf. VysokéučenítechnickévBrně.
- [32] Teorie frézování [online]. In: . [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://adoc.pub/teorie-frezovani.html>
- [33] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ: 1 Frézování [online]. In: . [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%202%20Fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD.pdf
- [34] KOPECKÝ, Z., Řezné materiály pro frézování dřeva. přednášky z MLDU v Brně. 2008.
- [35] Jak zvolit zubovou rozteč frézy. In: SANDVIK Coromant [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/how-to-choose-cutter-pitch.aspx>
- [36] Upínání nástrojů fréz [online]. In: . [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-24.pdf
- [37] Stroje pro frézování. In: ELUC [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1227>
- [38] Smrk. Mikroskopický atlas dřevin [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas_drev/obrazekdae2.jpg?soubor=JEHLICNANY/SMRK/SM_pr_4x.jpg
- [39] University of Cambridge [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/images/ausmall.jpg>
- [40] Frézování v závislosti na směru vláken ve dřevě. Růžička [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.aruzicka.cz/frezovani-v-zavislosti-na-smeru-vlaken-ve-dreve>
- [41] Stromy a zdraví. Arnika [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://arnika.org/stromy/nase-temata/co-umi-strom/stromy-a-zdravi>
- [42] Hygienická problematika na pracovištích truhlářských dílen z pohledu ochrany zdraví při práci. Státní zdravotní ústav [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/szu/akce/materialy/truhlarke_dilny.pdf
-

-
- [43] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. Experimentální metody v obrábění. Projekty s podporou EU [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf
- [44] Jak potlačovat vibrace obráběcích strojů. Technický týdeník [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/jak-potlacovat-vibrace-obrabecich-stroju_21946.html
- [45] VOJÁČEK, Antonín. Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů. Automatizace.hw.cz [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [46] PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ [online]. In: . [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EM0_kapitola_09.pdf
- [47] Force sensors. In: KISTLER [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/download/960-262e.pdf?callee=frontend>
- [48] Požární odolnost dřeva. NIS [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/pozarni-odolnost-dreva/page/493/>
- [49] Chlazení a mazání při obrábění. ELUC [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1200>
- [50] Metody bezdotykového měření teploty. MM Spektrum [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/metody-bezdotykoveho-mereni-teploty>
- [51] STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON. Energetický ústav: Fakulta strojíního inženýrství [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0204.htm>
- [52] DÍTĚ, Ivan. Bezkontaktní infračervené teploměry. In: Elektro: Časopis pro elektrotechniku [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bezkontaktni-infracervene-teplomery--14006>
- [53] Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami?. In: MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>
- [54] Boxplot – krabicový graf [online]. In: . [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://exceltown.com/navody/grafy-v-excelu/boxplot-krabicovy-graf/>
- [55] Ovlivnění kvality a jakosti obrobene plochy při frézování. In: MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani>
- [56] TRÁVNÍK, Arnošt; SVOBODA, Jaroslav. 2007. Technologické procesy výroby nábytku. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-056-5.
-

-
- [57] Jak vyřezávat z a do dřeva [online]. In: . [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://blog.cistedrevo.cz/2021/11/11/jak-vyrezavat-z-a-do-dreva/>
- [58] Pracovní pomůcky [online]. In: . [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.pracovnipomucky.cz/uvod-1>
- [59] Výkladový slovník. Agromanual.cz [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/atlas/vykladovy-slovník/lumen&asort=L>
- [60] Latex [online]. In: . [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Latex>
- [61] Holzmann TS 315VF 2000 400V formátovací pila na dřevo. In: Karas [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.karas.cz/catalog/drevoobrabeci-stroje/kotoucove-pily-na-drevo/formatovaci-pily/holzmann-ts-315vf-2000-400v-formatovaci-pila-na-drevo-ts315vf2000_400v?gclid=Cj0KCQjwxtSSBhDYARIsAEn0thS8DWBDD38qFXa5TrzTuswK-KdFCFu1n\SGOD4qJ3A7CJV_TRCL6qYUaArplEALw_wcB
- [62] Frézka cnc vertikální Oso Olomouc FV 25 CNC A. EXA PRO [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/oso-olomouc-fv-25-cnc-a-p90228003/#prettyPhoto>
- [63] In: MV [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: https://katalog.mav.cz/data/pramet2/files/e4s_1_suma.pdf125
- [64] Multicomponent Dynamometer [online]. In: . [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/000-151e.pdf?callee=frontend>
- [65] Multichannel Charge Amplifier [online]. In: . [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/000-485e.pdf>
- [66] Laserový otáčkoměr DT-10L [online]. In: . [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: http://www.voltcraft.cz/laserovy-otackomer-dt-10l.k122624?fbclid=IwAR1ciJzak_dqxhXlrbooHuo_vfJSTytSLMRSVTq12aQw5V8ps1rHa5C_CEk
- [67] Raytek Raynger MX2 Infrared Thermometer. INSTRUMATR [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.instrumart.com/products/721/raytek-raynger-mx2-infrared-thermometer>
-

Seznam použitých zkratk a symbolů

A_{Di}	průřez třísky [mm^2]
a_p	hloubka řezu [mm]
b	koeficient tlumení [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$]
C_{Fc}	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]
D	průměr [mm]
F	síla [N]
f_n	posuv na otáčku [mm]
f_z	posuv na zub [mm]
H_B	tvrdost dle Brinella [MPa]
H_J	tvrdost dle Janky [MPa]
h_i	jmenovitá tloušťka třísky [mm]
k	tuhost [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]
m_i	hmotnost [kg]
n	počet otáček [min^{-1}]
Q_x	teplo [J]
S	plocha [mm^2]
V	objem [m^3]
v_c	řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_f	rychlost posuvu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
x	exponent vlivu tloušťky třísky [-]
x	obecná souřadnice [m]
z	počet zubů nástroje [-]
α	úhel hřbetu [$^\circ$]
β	úhel břitu [$^\circ$]
δ	úhel řezu [$^\circ$]
π	Ludolfovo číslo [-]
ρ	hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

ϕ_i	úhel posuvového pohybu [°]
ω	vlhkost [%]
ω	úhel čela [°]

Slovníček dřevařských a lesnických pojmů

buničina	materiál používaný pro výrobu papíru
druhové jméno	základní kategorie hierarchické klasifikace organismů
hráň	uložení řeziva do vrstev proložených prokladovými latěmi
korek	vnější část borky rostlin
kulatina	kmen stromu splňující určité rozměrové parametry
lumen	dutina buňky [59]
odkorňování	zbavování se kůry stromu nebo keře
pryskyřice	teče ve dřevní hmotě pryskyřičnými kanálky, chrání stromy při narušení kůry nebo dřeva
přírodní kaučuk	elastomer, vyrábí se z latexu získaného z kaučukovníku [60]
rodový druh	základní kategorie hierarchické klasifikace organismů, nadruhová systematická jednotka

Seznam tabulek

1.1	Základní druhy řezů [6].	11
1.2	Mechanické vlastnosti dubového dřeva [17].	17
1.3	Mechanické vlastnosti jedlového dřeva [17].	17
1.4	Mechanické vlastnosti smrkového dřeva [17].	18
5.1	Měření po vláknech.	49
5.2	Měření proti vláknům.	49
5.3	Měření proti vláknům.	50
5.4	Měření proti vláknům s vadou dřeva.	50

Seznam příloh

Příloha 1	Holzmann TS 315VF 2000 400V formátovací pila na dřevo
Příloha 2	Frézka CNC vertikální OSO Olomouc FV 25 CNC A
Příloha 3	Univerzální fréza dlouhá E4S L SUMA
Příloha 4	Dynamometr KISTLER 5070A
Příloha 5	Laserový otáčkoměr DT-10L
Příloha 6	FFT diagramy pro frézování po vláknech a rovnoběžně s osou kmene
Příloha 7	Infračervený teploměr Raytek Raynger MX

Příloha 1

Holzmann TS 315VF 2000 400V formátovací pila na dřevo [61].



Parametry:

Hmotnost	263 kg
Napájecí napětí	400 V
Průměr pilového kotouče	315 mm
Výkon	3/4 kW
Otáčky vřetena	4000 min ⁻¹
Prořez 45°/90°	80/100 mm
Řezná délka	1900 mm
Šířka řezu	1250 mm
Rozměry stolu	800x820 mm
Výška stolu	870 mm

Příloha 2

Frézka CNC vertikální OSO Olomouc FV 25 CNC A [62].

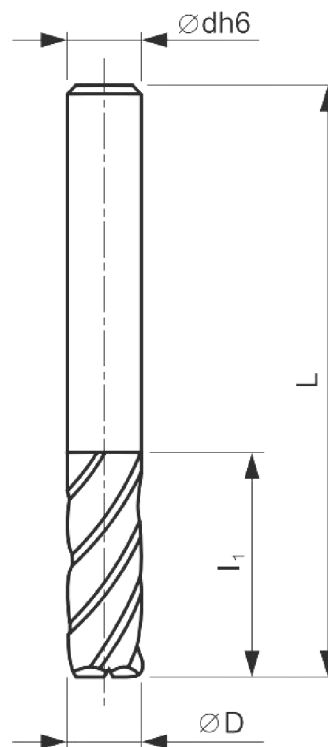


Parametry:

Osa X (podélná)	760 mm
Osa Y (pricna)	355 mm
Osa Z (vertikální)	152 mm
Typ CNC	Heidenhain iTNC 530
Maximální rychlost vřetene	2500 rpm
Délka stolu	1300 mm
Šířka stolu	350 mm
Max. nosnost stolu	200 kg
Délka x šířka x výška stroje	2750x2600x2030 mm
Hmotnost	1500 kg

Příloha 3

Univerzální fréza dlouhá E4S L SUMA [63].



Označení 12E4S100-50A12 SUMA

Rozměry:

D 12 mm




Z (počet zubů) 4

dh6 12 mm

L 100 mm

l_1 50 mm

Řezné podmínky:

									
D	Z	v_c	f_z	n	v_f	a_p	a_e	a_p	a_e
3,0	4	200	0,023	21231	1953	4,5	1,00	1,5	3,00
4,0	4	200	0,030	15924	1911	6,0	1,30	2,0	4,00
5,0	4	200	0,040	12739	2038	7,5	1,60	2,5	5,00
6,0	4	200	0,045	10616	1911	9,0	2,00	3,0	6,00
8,0	4	200	0,060	7962	1911	12,0	2,50	4,0	8,00
10,0	4	200	0,065	6369	1656	15,0	3,20	5,0	10,00
12,0	4	200	0,070	5308	1486	18,0	3,60	6,0	12,00
16,0	4	200	0,070	3981	1115	24,0	5,10	8,0	16,00
20,0	4	200	0,070	3185	892	30,0	6,40	10,0	20,00

Příloha 4.1/3

Dynamometr 9257B a zesilovač 5070A KISTLER [64, 65].



Příloha 4.2/3

Dynamometr 9257B a zesilovač 5070A KISTLER [64]

Technical data

Range	F_x, F_y, F_z	kN	$-5 \dots 5^{1)}$
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	$-5 \dots 10^{2)}$
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_z	N	0 ... 1 000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_z	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	$-7,5/7,5$
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	$-7,5/15$
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	$\approx -7,5$
	F_z	pC/N	$\approx -3,7$
Linearity, all ranges		%FSO	$\leq \pm 1$
Hysteresis, all ranges		%FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 2$
Rigidity	c_x, c_y	kN/ μ m	>1
	c_z	kN/ μ m	>2
Natural frequency	$f_n(x, y, z)$	kHz	$\approx 3,5^{4)}$
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n(x, y)$	kHz	$\approx 2,3^{4)}$
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 3,5^{4)}$
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈ 220
Insulation resistance (20 °C)		Ω	$>10^{13}$
Ground insulation		Ω	$>10^8$
Protection class EN60529		–	IP67 ³⁾
Weight		kg	7,3
Clamping area	mm	100x170	
Connection		Fischer flange, 9 pol. neg.	

Příloha 4.3/3

Dynamometr 9257B a zesilovač 5070A KISTLER [64]

Technical Data

Charge Amplifier

Number of channels		4
Option		8
Connector type		BNC neg.
Option		Fischer 9-pole neg.
Measuring range FS	pC	±200 ... 200 000
Option	pC	±600 ... 600 000
Measurement uncertainty (0 ... 50 °C) typ./max.	%	<±0,3/<±1
Drift, measuring mode DC (Long) at 25 °C, max. relative humidity RH of 60 % (non-condensing)	pC/s	<±0,05 (typ. <±0,03)
at 25 °C, max. relative humidity RH of 70 % (non-condensing)	pC/s	typ. <±0,05
at 50 °C, max. relative humidity RH of 50 % (non-condensing)	pC/s	<±0,2
Frequency range (20 Vpp)	kHz	≈0 ... >45
Group delay	μs	<9

Voltage Output

Connector type		D-Sub 15f
Output voltage	V	±10
Output current	mA	<±2
Output resistance	Ω	10
Reset-measure transition	pC	<±2
Zero point error (Reset)	mV	<±10
Output interference signal (0,1 Hz ... 1 MHz)	mVpp	<10

Příloha 5

Laserový otáčkoměr DT-10L [66].

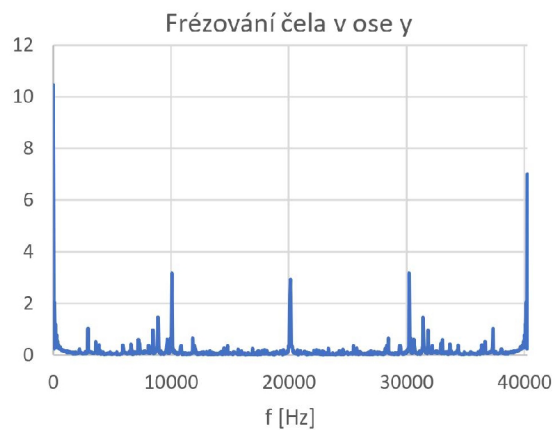
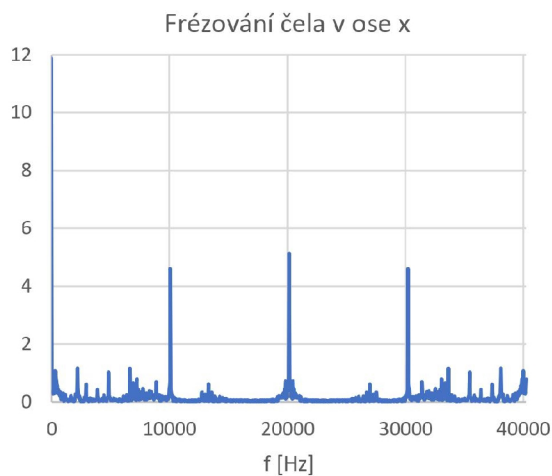


Technické parametry

Rozměry	(Š x V x H) 58 x 160 x 39 mm
Kalibrace (dle normy)	ISO/DKD
Kalibrace možná podle	ISO/DKD
Product Specifications	Rozsah měření otáček: 1 až 99 999
Rozsah měření otáček, bez kontaktu	2 až 99 999 ot./min
Přesnost měření otáček	$\pm 0,05\%$ + 1 digit
Zobrazení	LCD
Rozsah měření otáček	-
Teplotní rozsah	0 až 50 °C
Odstup měření	5 až 50 cm
Rozlišení otáček	0,1
Provozní napětí (text)	Baterie 9 V
Hmotnost	151 g

Příloha 6

FFT diagramy pro frézování po vláknech a rovnoběžně s osou kmene.



Příloha 7

Infračervený teploměr Raytek Raynger MX [67].



Parametry:

Rozsah teplot - 30–900 °C

Přesnost $\pm 0,75\%$

Doba odezvy 250 ms

Optická charakteristika (D:S) 50:1

Nastavitelná emisivita

Zobrazení sloupcového grafu