



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ BIO-KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

MACHINING OF BIO-COMPOSITE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Bogdan Bocek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Bogdan Bocek
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
Akademický rok:	2024/25

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:

Obrábění bio–kompozitních materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá studiem různých metod konvenčního i nekonvenčního obrábění dlouho–vláknových bio kompozitů, zejména lněných tkanin. V práci bude proveden rozbor metod frézování a obrábění pomocí vodního paprsku. Na základě rešerše bude navrhnout vhodný nástroj a provedeny testy obráběním, zejména pro dosažení minimálních ořepů hrany dílce. Testy budou vyhodnoceny vzhledem k využití další technologie vodního paprsku.

Cíle diplomové práce:

- Rešeršní část obrábění bio–kompozitních materiálů.
- Výroba vzorků pomocí různých technologií – návrh technologie obrábění, výběr nástrojů.
- Testování vzorku – obrobiteľnosť, integrita povrchu.
- Ekonomické zhodnocení obrábění bio–kompozitních materiálů.

Seznam doporučené literatury:

DHAKAL, H., ISMAIL, O. S. Sustainable composites for lightweight applications. Cambridge, MA: Woodhead Publishing, 2021. ISBN 978-0-12-818316-8.

CAMPBELL, F. C. Structural Composite Materials. Materials Park: ASM International, 2010. ISBN 9781615030378.

Composite materials handbook. Volume 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. USA: SAE International on behalf of CMH-17, a division of Wichita State University, 2012. 700 s. ISBN 978-0-7680-7811-4.

BOGOLJUBOV, N. N. Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1995. 433 s.

MALLICK, P. K. Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997. 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá obráběním bio-kompozitních materiálů se zaměřením na technologii frézování. Teoretická část přináší přehled bio-kompozitů, jejich složení, výrobních procesů a oblastí využití. Rešeršní část analyzuje současně používané metody obrábění, přičemž důraz je kladen na frézování jako hlavní technologii. V experimentální části je popsána výroba kompozitů vyztužených lněnými vlákny a návrh řezných nástrojů a podmínek. Ty byly testovány z hlediska vlivu na tvorbu otřepů. Naměřená data byla statisticky zpracována za účelem vyhodnocení vztahu mezi řeznými podmínkami a kvalitou obrobeného povrchu.

Klíčová slova

bio-kompozitní materiál, obrábění, frézování, lněné vlákno, tvorba otřepů, kompresní fréza

ABSTRACT

Master's thesis investigates the machining of bio-composite materials, with a particular focus on milling technology. The theoretical part provides an overview of biocomposites, including their composition, manufacturing processes, and applications. The literature review analyzes current machining methods, emphasizing milling as the primary technology of interest. The experimental section describes the fabrication of flax fiber-reinforced composites and presents the selection of cutting tools and machining parameters. These were tested with respect to their influence on burr formation. The collected data were subjected to statistical analysis to assess the relationships between machining conditions and resulting surface quality.

Keywords

bio-composite material, machining, milling, flax fiber, burr formation, compression end mill

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOCEK, Bogdan. *Obrábění bio-kompozitních materiálů*. Online, diplomová práce. Jan ZOUHAR (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165958>. [cit. 2025-05-03].

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Obrábění bio-kompozitních materiálů vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně, 22.05.2025

místo, datum

Bc. Bogdan Bocek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále děkuji panu Jiřímu Čechovi za pomoc při testování. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 Rozbor zadání	11
2 Bio-kompozitní materiály	13
2.1 Přírodní vlákna	14
2.2 Materiál matrice	15
2.3 Technologie výroby bio-kompozitních materiálů	16
2.3.1 Ruční kladení	16
2.3.2 Navíjení	17
2.3.3 Pultruze	17
2.3.4 Vakuová infuze	18
2.4 Bio-kompozitní materiály v praxi	19
3 Obrábění bio-kompozitních materiálů	20
3.1 Delaminace	20
3.2 Tvorba, měření a odstranění otřepů	22
3.3 Soustružení	23
3.4 Vrtání	23
3.5 Frézování	24
3.5.1 Nástroje využívané při frézování dřeva	26
3.5.2 Shrnutí frézování bio-kompozitních materiálů	28
3.5.3 Měření sil a momentů u frézování	29
3.6 Řezání vodním paprskem	31
3.7 Metoda plánování experimentu DOE	33
4 Experimentální část	34
4.1 Výroba materiálu	34
4.2 Použitý stroj	36
4.3 Návrh experimentu	37
4.4 Použité nástroje	38
4.5 Měřicí aparatura	40
4.6 Průběh experimentu	42
4.7 Vyhodnocení experimentu	43
4.7.1 Řezná síla	43
4.7.2 Zrychlení	47
4.7.3 Velikost otřepů	49

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	52
ZÁVĚR.....	54

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

Kompozitní materiály jsou již více než půl století nedílnou součástí světového průmyslu. Díky své nízké váze a vysoké pevnosti se součásti z kompozitů používají v automobilovém, leteckém, stavebním nebo chemickém průmyslu, ale také například při výrobě sportovního náčiní. Kompozitní materiál se skládá z výztuže, která mu dodává unikátní vlastnosti, a základního materiálu – matrice. Úlohou matrice je vázat výztuž a přenášet zatížení mezi jejími vlákny. Matrice je nejčastěji vyráběna z polymerních materiálů – termoplastů nebo termosetů. Materiál výztuže může být dle použití například z uhlíkových, skelných, aramidových nebo přírodních vláken. [1]

Vlivem vzrůstajícího zájmu lidstva o životní prostředí a ekologii, a stále větších nároků na udržitelnost se postupně do popředí dostávají kompozitní materiály s přírodními vlákny. S ohledem na jejich obnovitelnost, recyklovatelnost a možnou biodegradabilitu slibují bio-kompozitní materiály v tomto směru velkou budoucnost. Z ekonomického hlediska představuje jejich nízká cena, malá hustota a dobré mechanické vlastnosti velkou výhodu oproti ostatním materiálům. Běžně používanými přírodními vlákny v bio-kompozitních materiálech jsou len, juta, sisal, konopí, kokosové ořechy, bavlna apod. [2]

Komplikace ovšem nastává při zpracování bio-kompozitů. Problematická je jak jejich zpravidla náročná výroba, tak i následná úprava. Obrábění kompozitních materiálů (obr. 1) se výrazně liší oproti obrábění ostatních materiálů a jejich slitin. Hlavní problémy představuje jejich nehomogenní a anizotropní chování. Nástroj tak najednou řeže dva, často zcela odlišné, materiály a zároveň je chování kompozitu při zatěžování ve směru vláken jiné než při zatěžování kolmo na ně. Charakteristickým jevem obrábění těchto materiálů je výskyt delaminace, tedy oddělení vlákna vlivem silového působení. Dalším problémem je tvorba otřepů po obrábění. S ohledem na tyto skutečnosti je k dosažení kvalitního povrchu po obrábění doporučeno použití speciálních nástrojů.



Obr. 1 Obrábění kompozitního materiálu [3].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

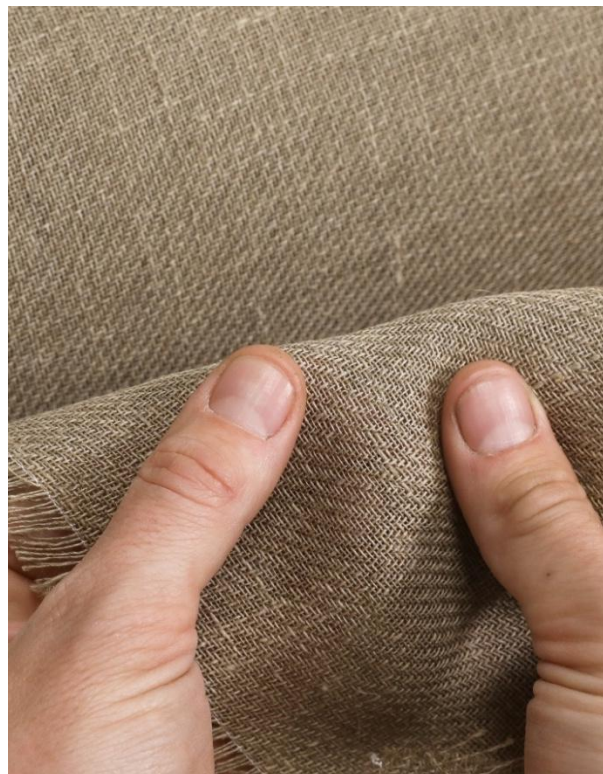
Cílem diplomové práce bylo teoreticky a prakticky prozkoumat metody obrábění bio-kompozitních materiálů, zejména frézování. Po provedení příslušné rešerše byl vyroben zkoušený materiál a následně zvoleny vhodné testované nástroje a řezné podmínky. Následovalo samotné provedení experimentu a jeho vyhodnocení z hlediska technického i ekonomického.

Prvním krokem bylo stanovení vhodného materiálu testovaných vzorků. Těmi byly zvoleny kompozity s dlouhými lněnými vlákny prosycené epoxidovou pryskyřicí. Materiál výztuže byl od výrobce Eco-Technilin, a to konkrétně FlaxDry-BL200, viz obr. 2. Jako matrice byla zvolená epoxidová pryskyřice LG 700 s tužidlem HG 737.

FlaxDry-BL200 jsou ekologická tkaná lněná vlákna ve formě twill 2 x 2. Tato vlákna se nejčastěji používají tam, kde je zaměření na udržitelnost životního prostředí. Zároveň mají vlákna ze lnu vynikající vlastnosti pro tlumení vibrací. Používají se například ve stavebnictví při výrobě nábytku nebo panelů, dále u sportovního příslušenství – kajaky, lyže, skateboardy, nebo jako součásti člunů a jacht. Uvedená tkanina je vhodná pro většinu laminačních postupů, včetně ručního kladení a vakuové infuze. Tkanina se dodává v šířce 1 000 mm a v běžných délkách. Technické údaje FlaxDry-BL200 jsou uvedeny v tab. 1. [4]

Tab. 1 Technické údaje tkaniny FlaxDry-BL200 [4].

Obsah vlhkosti [%]	9 ± 1
Plošná hmotnost [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	220 ± 22
Hustota vlákna ρ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,45
Pevnost v tahu R_m [MPa]	56 – 67
Modul pružnosti E [GPa]	5 – 8
Prodloužení při přetržení [%]	1,3 – 1,9
Tloušťka jedné impregnované vrstvy [mm]	$0,59 \pm 0,02$



Obr. 2 Tkanina FlaxDry-BL200, twill 2 x 2 [4].

Laminační epoxidová pryskyřice LG 700 je pryskyřice s vysokou reaktivitou a pevností spojení, vynikající pružností a dobrou teplotní odolností. Její nízká viskozita umožňuje tvořit lamináty o velmi nízké hmotnosti. Škála jejího použití při výrobních postupech je široká. Vhodná je pro ruční kladení i vakuovou infuzi. Technické parametry epoxidové pryskyřice LG 700 jsou uvedeny v tab. 2. [5; 6]

Tab. 2 Technické parametry laminační epoxidové pryskyřice LG 700 [6].

Hustota ρ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] (25 °C)	1,18 – 1,23
Viskozita [$\text{mPa}\cdot\text{s}$] (25 °C)	500 – 700
Ekvivalent epoxidu [$\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$]	156 – 165
Index epoxidu [-]	0,60 – 0,64

Pryskyřice se používá spolu s tužidlem HG 737, a to v poměru 100:30. Tužidlo HG 737 se vyznačuje vysokou flexibilitou a nízkou viskozitou. Tab. 3 obsahuje technické parametry tužidla HG 737. Tab. 4 uvádí mechanické vlastnosti vytvrzené nevyztužené pryskyřice. [5; 6]

Tab. 3 Technické parametry tužidla HG 737 [6].

Hustota ρ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] (25 °C)	0,98
Viskozita [$\text{mPa}\cdot\text{s}$] (25 °C)	10 – 15
Ekvivalent vodíku [-]	48
Viskozita směsi [$\text{mPa}\cdot\text{s}$] (23 °C)	277 – 285

Tab. 4 Mechanické vlastnosti vytvrzené pryskyřice bez výztuže [6].

Mez pevnosti v ohybu [MPa]	110 – 120
Modul pružnosti E [GPa]	2,7 – 3,3
Pevnost v tahu R_m [MPa]	65 – 75
Pevnost v tlaku [MPa]	120 – 140
Tažnost [%]	6 – 8
Rázová houževnatost [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	38 – 48
Tvrдость podle Shore D [-]	85

Bio-kompozity s lněnými vlákny jsou v oblasti přírodních vláken nejčastěji používanými kompozitními materiály. Z toho důvodu se diplomová práce bude v experimentální části zabývat pouze zkoušením vzorků z výše uvedeného materiálů.

2 BIO-KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Bio-kompozitní materiály jsou v současné době nejvíce se rozvíjejícím materiálem v průmyslu. Díky svým vlastnostem a své šetrnosti k životnímu prostředí se jejich použití v posledních letech výrazně rozšířilo do mnoha různých odvětví. Bio-kompozity (obr. 3), lze nalézt v přírodě ve formě rostlinných, živočišných a minerálních vláken. Přírodní vlákna představují tyto výhody [2]:

- obnovitelnost, dostupnost a hojnost zdroje výrazně snižuje výslednou cenu součástí,
- schopnost biodegradability,
- udržitelnost, možnost recyklace odpadu,
- nízká váha a malá hustota,
- vysoká pevnost v tahu a tuhost,
- přírodní vzhled.



Obr. 3 Příklady bio-kompozitních materiálů [7].

S ohledem na uvedené přednosti se tedy dá očekávat pokračování v nastoleném trendu a bio-kompozity by se měly dále vyvíjet a stále více by je člověk měl vidat v běžném životě. Jako každý materiál sebou však i přírodní vlákna nesou různé nedostatky, kterými se zabývají vědci po celém světě. Mezi hlavní nevýhody bio-kompozitních materiálů patří [2]:

- vysoká absorpce vlhkosti,
- nízký modul pružnosti,
- neodolnost vysokým teplotám,
- hořlavost,
- malá tažnost,
- nízká tvrdost.

2.1 Přírodní vlákna

Jak už bylo zmíněno přírodní vlákna se dělí na rostlinná, živočišná a minerální. V této diplomové práci bude pozornost věnována vláknům rostlinným, která se v přírodě vyskytují ve formě stromů, rostlin a keřů. Jsou tvořeny základními složkami – celulóza, hemicelulóza, lignin a pektin. V tab. 5 jsou uvedeny velikosti hustoty, maximálního prodloužení, pevnosti a pružnosti pro vybraná rostlinná vlákna. Tyto vlákna lze dále dělit podle části rostliny, ze které jsou získávány, například vlákna z plodů, listů, lýka (pletivo pod kůrou stromu), stonků nebo trav. [8]

Tab. 5 Mechanické vlastnosti vybraných rostlinných vláken [2].

Vlákno	Hustota ρ [g·cm ⁻³]	Maximální prodloužení [%]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
Len	1,40	2,7 – 3,2	500 – 1 500	27,6
Juta	1,40	1,5 – 1,8	393 – 773	10,0 – 55,0
Sisal	1,30 – 1,50	2,0 – 2,5	511 – 635	9,4 – 22,0
Kenaf	1,45	1,6	930	53,0
Konopí	1,47	2,0 – 4,0	550 – 1 110	70,0
Ramie	1,47	3,6 – 3,8	400 – 938	61,4 – 128,0
Kokosové vlákno	1,20	30,0	287 – 800	4,0 – 6,0
Bambus	1,41	3,5	593	18,0 – 26,0
Kapok	1,69	0,7	100 – 1 500	3,0 – 5,0
Bagasa	1,20 – 1,30	1,3	300 – 350	12,0
Banán	1,20	1,8	400	13,0 – 24,0
Ananas	1,10 – 1,30	1,2	188 – 308	11,0

Obvykle vlákna s vyšší hustotou nabízí větší tuhost a pevnost. Zpravidla jsou však tyto hodnoty řádově menší než u syntetických vláken. Většina rostlinných vláken má nedostatečné mechanické vlastnosti pro použití v nosných členech. Tyto nedostatky lze minimalizovat pomocí jejich povrchové úpravy. Používají se chemické úpravy pomocí kyselin a zásad, fyzikální úpravy jako je plazmové ošetření nebo biologické modifikace vláken. U některých bio-kompozitů lze změnit jejich povrchovou strukturu vlivem tepla. [2]



a) lněná vlákna [9]



b) jutová vlákna [10]

Obr. 4 Druhy rostlinných vláken.

Tvar a vzhled jednotlivých rostlinných vláken se liší dle jejich původu, viz obr. 4 a 5. Vlastnosti bio-kompozitních materiálů velkou mírou ovlivňují parametry jejich vláken. Velikosti průměru a délky vláken, mají zásadní dopad na výkon kompozitů s přírodní výztuží. Proto je velmi důležité správně materiál vyhodnotit a optimalizovat pro výrobu, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. [8]



a) sisalová vlákna [11]



b) konopná vlákna [12]

Obr. 5 Rostlinná vlákna.

2.2 Materiál matrice

Matrice slouží jako pojivo výztuže a zároveň přenáší zatížení mezi vlákny. Umožňuje bio-kompozitu držet geometrický tvar a drží její vlákna ve správném směru. Mimo jiné matrice chrání vlákna před vnějším okolím a podílí se na výsledném vzhledu materiálu. Základní rozdělení matric je na polymerní, kovové a keramické. Při výrobě bio-kompozitních materiálů lze narazit zejména na polymerní matrice, které se dělí na reaktoplasty (termosety) a termoplasty. Práce se bude dále zabývat pouze reaktoplasty, protože je jejich použití v bio-kompozitních materiálech nejčastější. [1]

Termosety jsou monomery s nízkou molekulární hmotností a nízkou viskozitou. Po vytvrzení se mění na trojrozměrné síťované materiály, které jsou netavitelné a nerozpustné. Oproti termoplastům mají vyšší pevnost v tahu a tepelnou odolnost, na druhou stranu jsou ovšem křehké. Dle typu polymeru se nejčastěji používají polyesterové, epoxidové, vinylesterové a fenolické pryskyřice. V tab. 6 lze nalézt hodnoty hustoty, pevnosti a pružnosti těchto polymerů. [13]

Tab. 6 Mechanické vlastnosti termosetů [14].

Pryskyřice	Hustota ρ [$g \cdot cm^{-3}$]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
Polyesterová	1,10 – 1,43	35 – 103	2,1 – 3,5
Epoxidová	1,20 – 1,30	55 – 130	2,7 – 4,1
Vinylesterová	1,12 – 1,32	73 – 81	3,0 – 3,5
Fenolická	1,00 – 1,25	30 – 50	3,6

Polyesterové pryskyřice se hojně používají v praxi hlavně díky jejich nízké ceně. Mezi další přednosti patří slušné mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi. Tyto pryskyřice jsou tvořeny dlouhými lineárními polymerními řetězci, které jsou rozpouštěny v reaktivním rozpouštědle (obvykle styrenu). Jednou z hlavních výhod polyesterů je, že jejich teplotu vytvrzování lze měnit – pokojová nebo zvýšená teplota. Tato skutečnost umožňuje v jejich zpracování velkou flexibilitu. [13; 14]

Epoxidové pryskyřice jsou využívány v dynamicky zatěžovaných bio-kompozitech díky vynikající kombinaci pevnosti, adheze a nízkého smrštění. Jejich vyšší cena je vynahrazená dobrými tepelnými vlastnostmi, vysokou odolností proti chemikáliím a korozi. Jednoduché epoxidové matrice se skládají pouze z jednoho epoxidu a jednoho tvrdidla. Zpravidla však obsahují hlavní epoxid, další přídavné epoxidy a jedno nebo dvě tvrdidla. Stejně jako u polyesterových pryskyřic může probíhat vytvrzování epoxidů za tepla i za studena. [13; 14]

2.3 Technologie výroby bio-kompozitních materiálů

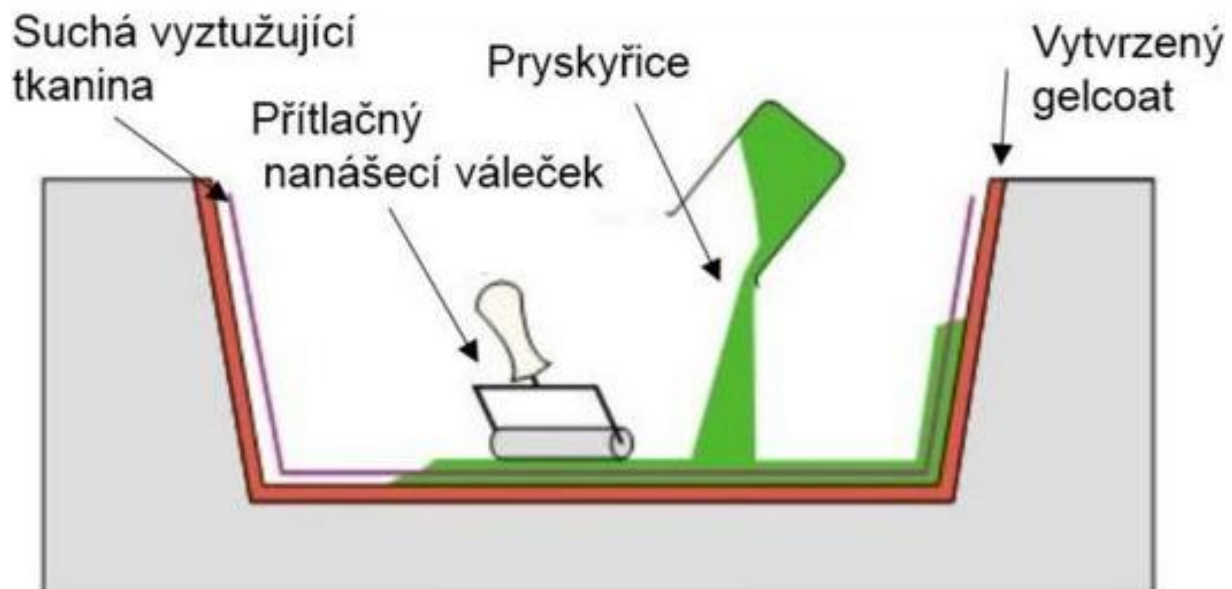
Technologií pro výrobu bio-kompozitních materiálů je dnes mnoho a každá má své pro i proti. Při volbě vhodného procesu musí brát technolog ohled na mnoho parametrů, jako jsou požadované vlastnosti a rozměry, rychlost výroby, sériovost a samozřejmě cenu. Výrobní postupy se rovněž liší dle použitého materiálu matrice. V diplomové práci budou znovu řešeny pouze metody pro termosetové matrice. [8]

Práce s reaktoplasty je snadnější, neboť počáteční pryskyřice je v kapalném stavu, což umožňuje lepší impregnaci a zamezení tvorby pórů a dutin. K jejich vytvrzení je potřeba méně tepla a tlaku, než je tomu u termoplastů, dochází tak k úspoře energie. Na druhou stranu je doba vytvrzení termosetů delší, což způsobuje prodlevy ve výrobě. Dalším značným nedostatkem termosetů je skutečnost, že jejich vytvrzování není opakovatelné. Mezi možné metody výroby bio-kompozitů patří ruční kladení, navíjení, pultruze a vakuová infuze. [1; 15]

2.3.1 Ruční kladení

Ruční (mokré) kladení je jednou z nejjednodušších technologií výroby bio-kompozitních materiálů. Jak už napovídá název, celý proces se odehrává bez pomocných zařízení. Nejprve se do jednodílné formy nanese tenká vrstva tzv. gel coatu. Tato vrstva chrání bio-kompozit před vlivy prostředí a zajišťuje jeho kvalitní povrch. Zároveň je zde možnost gel coat obarvit a získat tak barevný odstín materiálu. Následně pracovník na sebe postupně skládá tkaniny nebo rohože. Po položení jednotlivé vrstvy pak ručně impregnuje pryskyřicí pomocí štětce nebo válečku. Po vytvrzení pryskyřice lze klást další vrstvu výtzuže. [15; 16]

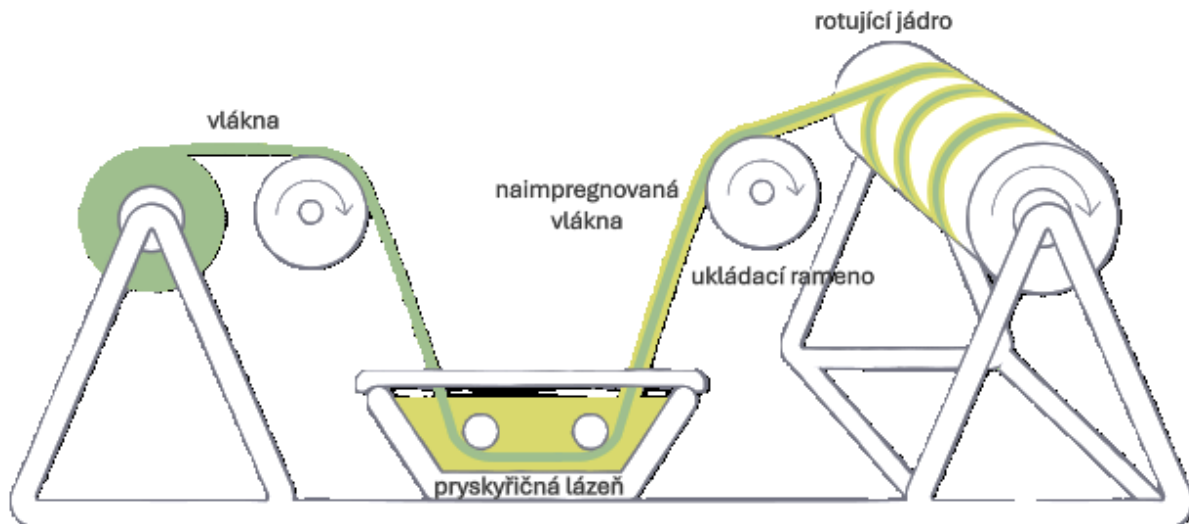
Ruční kladení (obr. 6) je tedy náročnou metodou zejména v ohledu na manuální schopnosti pracovníka, který zodpovídá za konečný vzhled a kvalitu materiálu. Může docházet ke vzniku pórovitosti, protože kompletní prosycení pryskyřicí musí být provedeno před jejím vytvrzením. Z tohoto důvodu se metoda nehodí pro příliš rozměrné součásti. V současnosti se technologie mokrého kladení používá zejména pro výrobu prototypů. [17]



Obr. 6 Schéma technologie ručního kladení [18].

2.3.2 Navíjení

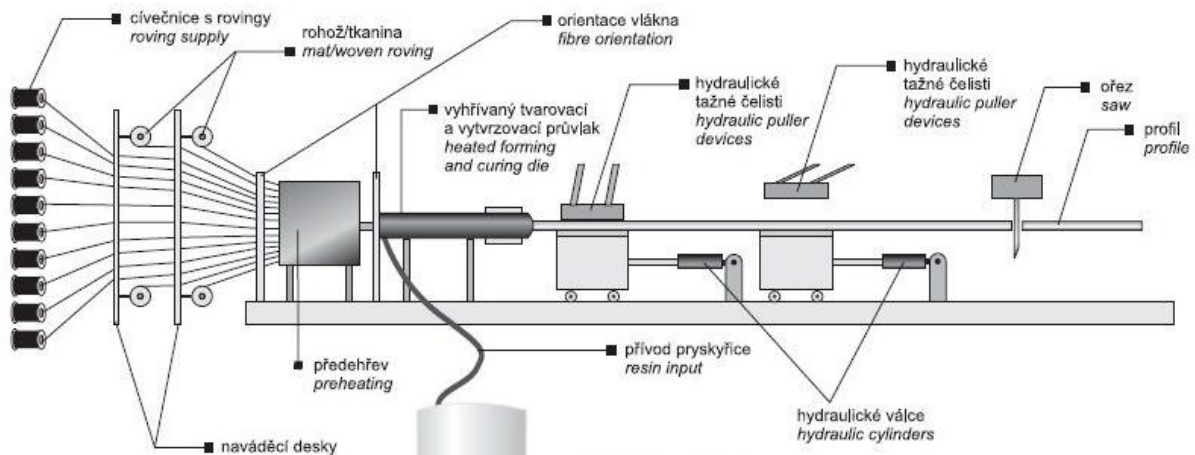
Navíjení, viz obr. 7, je technologicky náročnější metodou, jenž se používá pro výrobu rotačních součástí. Vlákna jsou vedena do pryskyřičné lázně a následně navíjena na rotující jádro, které zároveň slouží jako forma. Je určen specifický úhel navíjení, který zajišťuje ukládací rameno. Jakmile je naneseno dostatečné množství vrstev, materiál se nechá vytvrdit a následně je vyjmut z jádra. Vlákna jsou v době procesu vysoce zatížená, což vede k zisku dobrých mechanických vlastností výsledných součástí. Jedná se o poměrně rychlou metodu výroby trubek, nádrží nebo nádob. Klíčové je zde nastavení výrobních parametrů jako je rychlost navíjení a prosycení, zatížení vláken a viskozita pryskyřice. [15; 19]



Obr. 7 Schéma technologie navíjení [19].

2.3.3 Pultruze

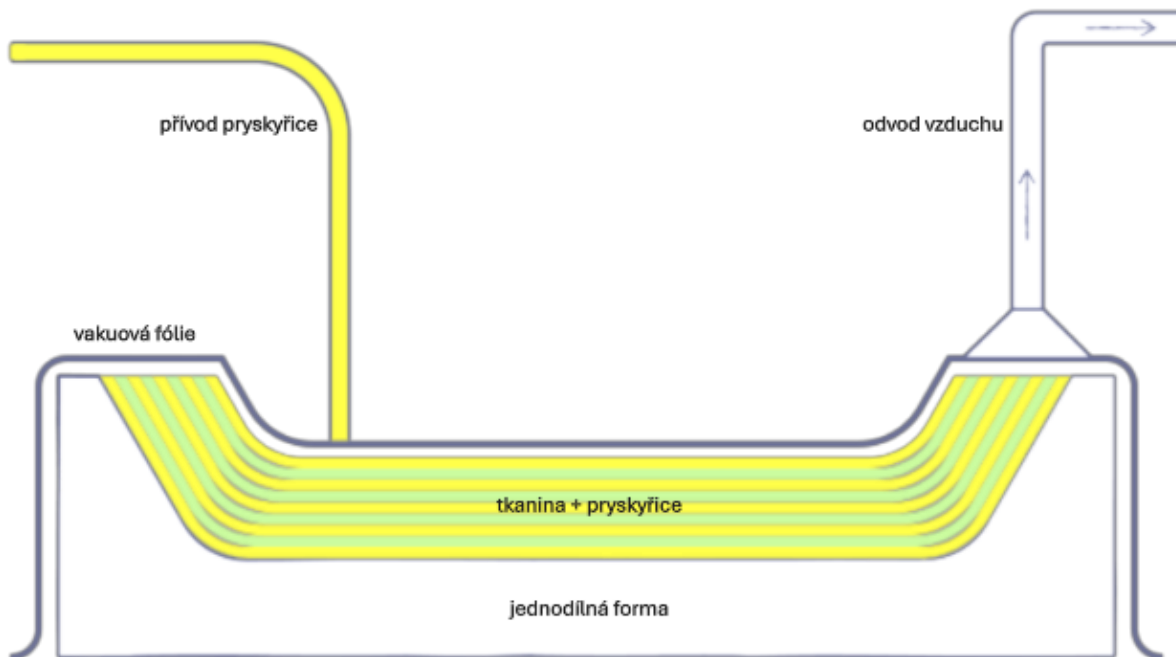
Pultruze je plně automatizovaná technologie, využívající speciální a drahé vybavení. Vlákna prosycena pryskyřicí jsou vedena přes vyhřívanou tvarovanou formu. Vlákna a pryskyřice vstupují do formy jako jedna směs a vystupují jako vytvrzený díl. Výsledné součásti jsou vesměs dlouhé, štíhlé předměty s konzistentním průřezem a vysokou přesností, jako například nosníky nebo profily. Výhodou je levný vstupní materiál a nízká výrobní cena, tudíž se metoda využívá převážně v hromadné výrobě. Hlavním nedostatkem procesu je nutnost konzistentního průřezu součástí a jeho náročné nastavení. Na obr. 8 je znázorněno schéma pultruze. [16; 17]



Obr. 8 Schéma technologie pultruze [20].

2.3.4 Vakuová infuze

Vakuová infuze (obr. 9) je technologie využívána zejména pro kusovou a malosériovou výrobu. Do jednodílné formy se, stejně jako u ručního kladení, nanese vrstva gel coatu. Následně se zde umístí všechny vrstvy výztuže, horní strhávací tkanina, jež umožňuje distribuci vakua a průtokové médium, které slouží k toku pryskyřice. Celý proces probíhá ve vakuové fólii. Z této fólie vedou dvě hadice, z nichž jedna je připojena na vývěvu, která odsává vzduch. Funkcí druhé hadice je přívod pryskyřice z nádoby. Vznikem podtlaku se pryskyřice nasává a tlačí výztuž do formy. Jakmile se pryskyřice dostane k okraji dílu, je její přívod uzavřen. Součást je pod vakuem ponechána k vytvrzení nejčastěji do druhého dne. Metoda není náročná na zařízení, tudíž je její použití možné i v laboratorních podmínkách, viz obr. 10. [16; 21]



Obr. 9 Princip technologie vakuové infuze [21].



Obr. 10 Ukázka vakuové infuze v praxi [22].

2.4 Bio-kompozitní materiály v praxi

Bio-kompozitní materiály se díky svým výjimečným vlastnostem stávají stále více populární napříč mnoha průmysly. Zcela běžné je jejich použití v auto motive, kde nacházejí uplatnění vzhledem k jejich nízké váze, viz obr. 11. Bio-kompozity jsou hojně využívány i v leteckém průmyslu ve formě posilovačů, štítů nebo krytů. Mnoho sportovců používá náčiní jako jsou oštěpy, lyže a surfovací prkna, které jsou na bázi rostlinných vláken. Díky svému přírodnímu vzhledu jsou bio-kompozitní materiály často aplikovány i v architektuře (obr. 12) a stavebním průmyslu. [2; 23]



Obr. 11 Vyplň dveří automobilu [23].



Obr. 12 Bio-kompozity v architektuře [24].

V současnosti jsou v oblasti výzkumu a vývoje bio-kompozitů investovány nemalé sumy peněz. Hlavním cílem je omezit vysoké produkční náklady plastů, které jsou vyráběny z ropných zdrojů škodlivých životnímu prostředí. Náhradou by se měly stát právě kompozitní materiály s přírodní výztuží. Díky jejich možnosti recyklovatelnosti a biodegradability jsou velkým příslibem z pohledu ekologie a udržitelnosti. Obnovitelnost zdrojů rostlinných vláken zároveň dává smysl i z ekonomické stránky. Na obr. 13 jsou zobrazeny současné aplikace bio-kompozitních materiálů ve spotřebním průmyslu. Na základě předložených faktů lze tedy předpokládat, že se tyto materiály budou i nadále velmi rychle vyvíjet a stále více používat napříč všemi průmysly. [2; 23]



a) kufr



b) pouzdro na mobilní telefon

Obr. 13 Aplikace bio-kompozitních materiálů ve spotřebním průmyslu [23].

3 OBRÁBĚNÍ BIO-KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály s přírodními vlákny lze považovat za těžkoobrobitelné. Jak už bylo zmíněno, bio-kompozity se skládají ze dvou složek – matrice a výztuže. Nástroj tak zároveň řeže dva materiály, jejichž chování na obráběcí proces může být v nejhorších případech zcela odlišné. Nehomogenita bio-kompozitu se projevuje ve formě delaminace vláken, jenž může způsobit zhoršení mechanických vlastností. Často se po obrábění objevují otřepy, které způsobují neestetický vzhled. Velkou roli zde hraje i pevné upnutí materiálu. Správné uchycení brání rozvibrování obrobku a umožňuje kontinuální řez. [25]

Obrábění bio-kompozitních materiálů se výrazně liší od obrábění kovů a jejich slitin díky svému anizotropickému chování. Anizotropie materiálu vyjadřuje rozdílné mechanické vlastnosti ve dvou jeho směrech. Znamená to, že materiál reaguje jinak při zatěžování ve směru vláken a jinak kolmo na ně. Důležité je tedy vědět, jaké je uspořádání vláken a jaký je jejich objemový podíl v bio-kompozitu. [8]

Dalším důležitým faktorem při obrábění je abrazivita vláken, tedy jejich lepivost. Ačkoliv lepivost přírodních vláken není tak značná jako u výztuží skelných nebo uhlíkových, je potřeba na tuto skutečnost brát ohled. Abrazivita působí negativně na řezný nástroj, způsobuje jeho postupné opotřebení. To má za následek zvýšení řezných sil, vedoucí k možnému výskytu delaminace. [26]

Bio-kompozitní materiály neodolávají vysokým teplotám. Je tudíž podstatné při obrábění nepřesáhnout teplotu tavení matrice, aby nedošlo k její degradaci a současně ke zničení nástroje. Ke snížení teploty při obráběcích procesech lze aplikovat chlazení. Vzhledem k vysoké absorpci vlhkosti přírodních vláken se ovšem nedoporučují kapaliny jako chladicí médium. Možné je tak chlazení vzduchem, častější je ovšem obrábění na sucho. [25]

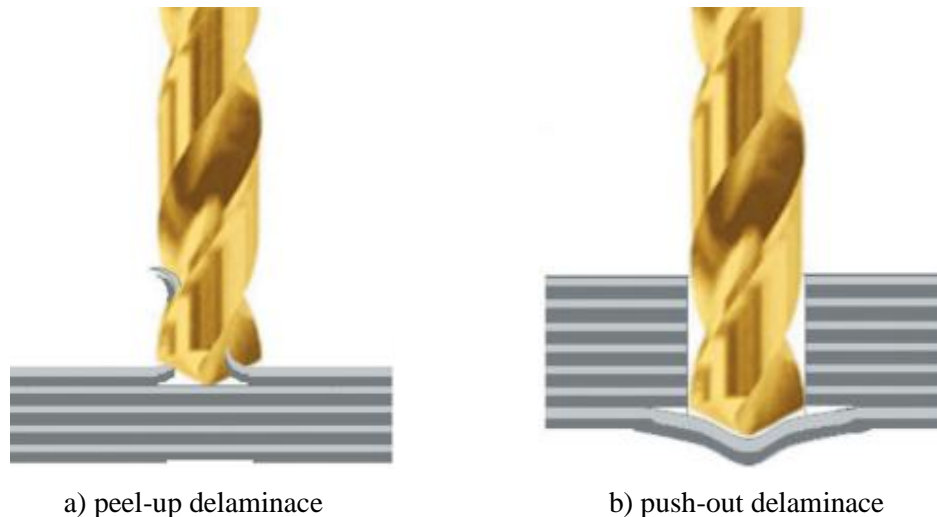
Nejpoužívanějšími technologiemi konvenčního obrábění bio-kompozitů je soustružení, vrtání a frézování. Tyto metody používají pevný nástroj, který vlivem střížné síly odděluje částice materiálu. Břit nástroje musí být ostrý, aby nedocházelo k vylamování nebo vytahování vláken. Zpravidla se používají nástroje s pozitivní geometrií, které lépe odřezávají otřepy. [26] Současně by mezi břitem a obrobkem mělo vznikat co nejmenší tření, aby nedocházelo k zvýšení teploty. Geometrie nástroje musí být speciálně navržena, k zabránění usazování třísek v jeho těle. Z pohledu materiálů se používají nástroje z rychlořezné oceli (HSS), slinutého karbidu (SK) s diamantovým povlakem nebo polykrystalický diamant (PCD) a kubický nitrid bóru (CNB). [27]

V posledních letech roste využití nekonvenčních technologií obrábění, které nepoužívají k řezání pevný nástroj, ale k úběru materiálu dochází účinky tepelnými, mechanickými, elektrickými nebo chemickými. Uplatnění těchto metod, je tam kde je užití konvenčních technologií nemožné nebo komplikované. Z pohledu bio-kompozitních materiálů je nejpřívětivější řezání vodním paprskem, u něhož nevzniká tepelně ovlivněná oblast. [28]

3.1 Delaminace

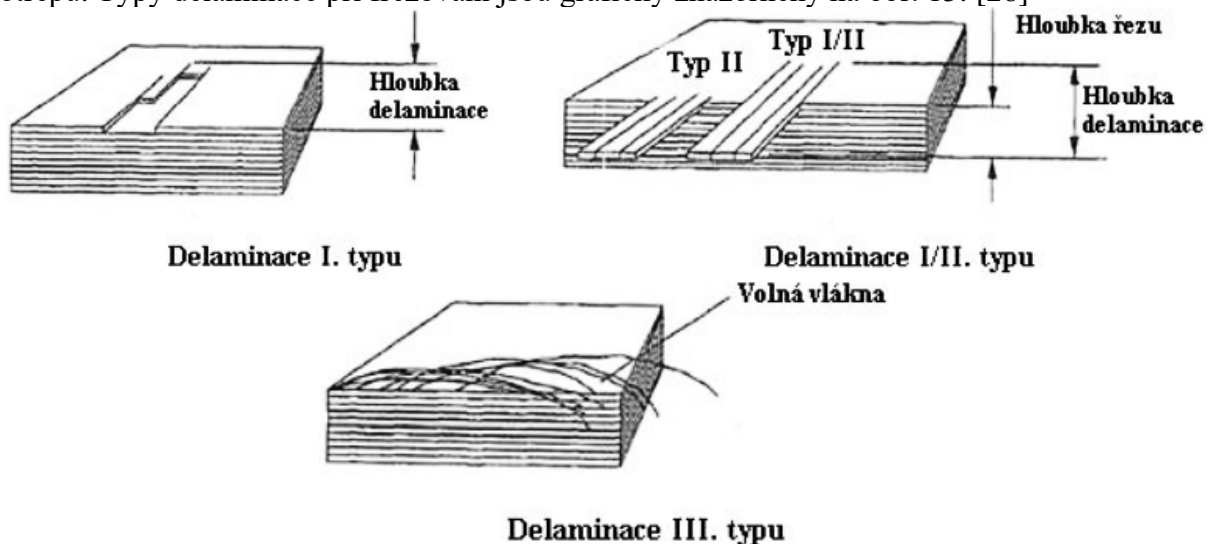
Největší problém při obrábění bio-kompozitů představuje delaminace, která je definována jako oddělení vrstvy kompozitu od vrstvy přilehlé vlivem silového působení [1]. Její přítomnost při zpracování je ovlivněna různými technologickými faktory jako je doba vytvrzování, teplota nebo vlhkost. Hlavními faktory jsou ovšem pevnost rozhraní jednotlivých nanesených vrstev, ale i soudržnost výztuže a matrice. Výskyt delaminace může vést ke snížení tuhosti, stability a pevnosti struktury [29]. Velkou překážkou je delaminace v oblasti obrábění, kdy výrazně ovlivňuje kvalitu a vzhled výsledného dílu. V tomto ohledu lze delaminaci předcházet volbou správné geometrie nástroje a vhodných řezných podmínek. [26]

Delaminace se liší na základě použité technologie obrábění. Při vrtání existují dvě formy, a to peel-up delaminace (odlupování) a push-out delaminace (protlačení). Peel-up delaminace se tvoří na horní vrstvě materiálu, kdy vrták působí odlupovací silou. Vlákná kompozitu jsou během procesu tažena a dochází tak k odlupování. Push-out delaminace vzniká ve spodní vrstvě kompozitu, kdy se tyto vrstvy pod vrtákem prohýbají a dochází k jejich protlačování. Obě formy jsou zobrazeny na obr. 14. [30]



Obr. 14 Delaminace při vrtání [30].

V technologii frézování se rozlišují tři typy delaminace. Delaminace I. typu je popisována jako vytržení části svrchních vrstev. Oproti tomu delaminace II. typu spočívá v neodříznutí vrstvy kompozitu. Lze se setkat i s kombinací obou typů, tedy s delaminací I./II. Delaminace III. typu se tvoří ve směru rovnoběžném se směrem posuvu nástroje a je ve formě volných vláken nebo otřepů. Typy delaminace při frézování jsou graficky znázorněny na obr. 15. [26]



Obr. 15 Delaminace při frézování [26].

Delaminaci lze určit například na základě tzv. faktoru delaminace F_d . To je poměr mezi maximální šířkou delaminace W_{max} a nominální odřezanou šířkou W . Tyto hodnoty jsou pak nejčastěji zjišťovány pomocí mikroskopů. [31]

$$F_d = \frac{W_{max}}{W} \quad (3.1)$$

3.2 Tvorba, měření a odstranění otřepů

Pojem otřep lze charakterizovat jako vyvýšená hrana, jenž vzniká na povrchu obrobku po obráběcích nebo dalších operacích zpracování materiálů. U kovů (obr. 16) mohou otřepy způsobit poranění pracovníků a zároveň jsou problémové z hlediska funkčnosti výrobku. Z pohledu bio-kompozitních materiálů otřepy nepředstavují takové nebezpečí, ale jejich výskyt je stále nežádoucí. Důvodem je nutnost sekundární dokončovací operace, která se obtížně automatizuje. Samozřejmě je další operace i zásahem do nákladů, kdy u přesných dílů může tento proces představovat až 30 % nákladů. [32; 33]

Velikost otřepu se nejčastěji měří na mikroskopech a vypočítá se ze vztahu [32]:

$$h_b = h_c - h \quad (3.2)$$

kde: h_b – velikost otřepu [mm],
 h_c – celková vzdálenost mezi základnou a otřepem [mm],
 h – velikost základny [mm].



Obr. 16 Otřepy na součásti z oceli po vrtání [33].

Metod odstraňování otřepů je velká řada. Při rozhodování hrají roli faktory jako umístění otřepu, jeho typ, materiál součásti, požadovaná kvalita výrobku a v neposlední řadě náklady. Mezi způsoby odstraňování otřepů patří [33; 34]:

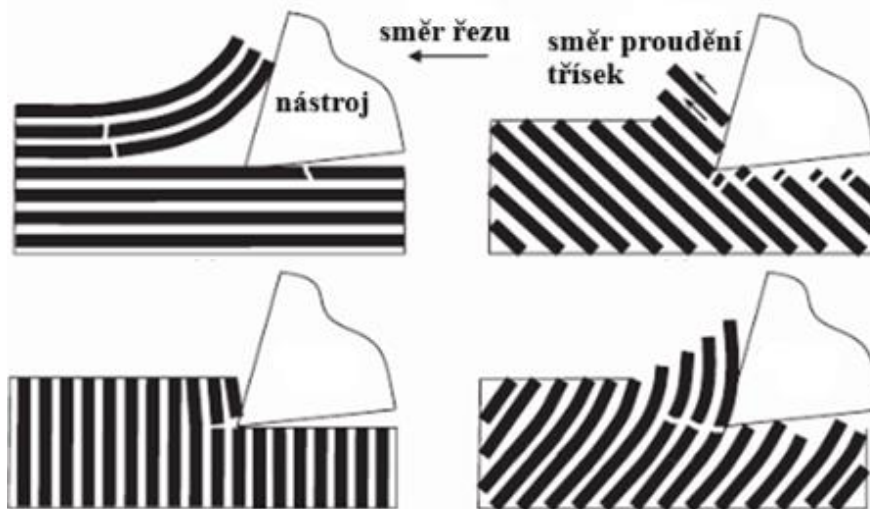
- Mechanické – pomocí řezacích, brusných, frézovacích nástrojů se odstraní otřepy přímým kontaktem.
- Chemické – roztoky na bázi kyseliny fosforečné rozpouštějí otřepy menších velikostí.
- Tepelné – plyn a kyslík se pod tlakem spalují – dojde k explozi, která spálí otřepy.
- Elektrochemické – odstranění pomocí roztoku elektrolytu (slané vody) a elektrického proudu.
- Ruční – časově nejnáročnější a nejpracnější. Provádí obsluha za pomoci pilníku, brusného papíru, ořezávacího nože apod.

Stejně jako delaminaci je i tvorbu otřepů možné potlačit výběrem vhodné geometrie nástroje a odpovídajících rezných podmínek.

3.3 Soustružení

Soustružení je tradiční technologií obrábění válcových a kuželových součástí. Nástrojem je soustružnický nůž, nejčastěji s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD), který působí v jednom bodě na rotující obrobek. Tento nástroj je prakticky neustále v kontaktu s materiálem, což umožňuje téměř kontinuální řez. Mezi hlavní parametry ovlivňující kvalitu obrobenej plochy se řadí řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, geometrie a materiál VBD. Platí, že materiály VBD by měly mít vysokou tvrdost, která vede k delší životnosti nástroje, a zároveň dobrou tepelnou vodivost. [25; 35]

Dle Sheikha-Ahmada a Davima [35] opotřebení nástroje roste s rostoucí řeznou rychlostí, která má tak na průběh soustružení klíčový vliv. V tomto ohledu je velmi důležitý materiál nástroje, kdy VBD z CNB, PCD a destičky s diamantovým povlakem vykazovaly mnohem delší životnost a nižší opotřebení než nástroje ze SK. Nejčastějšími mechanikami opotřebení nástroje je opotřebení čela a zaoblení řezné hrany. Z pohledu výsledné drsnosti povrchu je důležitá orientace vláken, kdy bylo zjištěno, že drsnost povrchu roste s vyšším úhlem vinutí. Orientace vláken pak společně s geometrií nástroje určuje způsob tvorby třísky, viz obr. 17.



Obr. 17 Způsoby tvorby třísky při soustružení bio-kompozitních materiálů [35].

3.4 Vrtání

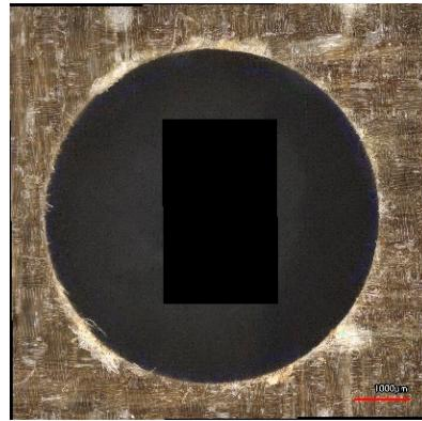
Vrtání je metoda třískového obrábění, kterou se tvoří průchozí nebo neprůchozí válcové díry. Nástroj se nazývá vrták a vykonává jak hlavní rotační pohyb, tak i posuv. Z hlediska obrábění bio-kompozitních materiálů je vrtání jednou z nejpoužívanějších technologií, jelikož se obvykle používá jako operace pro následné mechanické spojování. I zde je hlavním úskalím výskyt delaminace. Ten je ovlivněn posuvem na otáčku, geometrií vrtáku, jeho opotřebením, řeznou rychlostí a průměrem nástroje. Obecně platí, že posuv na otáčku nejvíce ovlivňuje mechanismus delaminace. [36; 37]

Váňa, Dvořáčková, Knápek a Kroisová [36] zkoumali delaminaci v bio-kompozitu s lněnými vlákny. V experimentu použili dva nástroje s úhlem špičky 118° z materiálu HSS a SK. Zjistili, že při posuvu na otáčku 0,05 mm dochází k menšímu opotřebení nástroje, a tím zároveň k menší drsnosti povrchu než u posuvu na otáčku 0,10 mm. Opotřebení vrtáků se objevovalo po 20 až 30 vyvrtaných dírách. Menší hodnoty opotřebení byly naměřeny na vrtáku ze SK. Značnější byla push-out delaminace, tedy na spodní vrstvě, kde byly její hodnoty až třikrát větší než na horní vrstvě a dosahovaly hodnot přes 3 000 μm u HSS vrtáku.

Pro dosažení lepší integrity povrchu byl poté vzorek umístěn mezi dvě dřevěné opěrné desky, které zajišťovaly jeho stabilitu. Použití opěrných desek výrazně snížilo vibrace a naměřené hodnoty delaminace byly až pětikrát menší, viz obr. 18. Po vyvrtání 50 děr při otáčkách $1\,500\text{ min}^{-1}$ a posuvu na otáčku $0,05\text{ mm}$ byla pro HSS vrták naměřená delaminace $611\text{ }\mu\text{m}$ a pro vrták ze SK to bylo $228\text{ }\mu\text{m}$. [36]



a) bez použití opěrných desek



b) s použitím opěrných desek

Obr. 18 Rozdíl kvality vyvrtaných děr [36].

Diaz-Alvarez A., Diaz-Alvarez J., Feito-Sánchez a Santiuste [37] se rovněž zabývali vrtáním bio-kompozitního materiálu s lněnými vlákny. Ve své studii použili HSS vrtáky s úhlem špičky 118° a 80° . Z experimentu vyplývá, že zvýšením řezné rychlosti dojde ke snížení drsnosti povrchu. Zároveň se však generuje vyšší teplota, což u bio-kompozitů může být problematické. Dále bylo zjištěno, že vrták s úhlem špičky 118° vykazoval vyšší řezné síly. Ovšem s ohledem na jakost povrchu byl vliv úhlu špičky vrtáku zanedbatelný. Studie také ukázala že tloušťka vzorku má rovněž vliv na kvalitu povrchu, kdy s vyšší tloušťkou klesá poškození.

3.5 Frézování

Při frézování se vícebřitý nástroj – fréza otáčí kolem své osy, čímž koná hlavní pohyb. Stůl s obrobkem pak vykonává posuv. Technologie se používá k obrábění rovinných, šikmých i tvarových ploch. Frézování lze rozdělit na sousledné a nesousledné. Sousledné frézování se vyznačuje tím, že se obrobek posouvá ve stejném směru jako je pohyb zubů nástroje. U nesousledného frézování je tento pohyb opačný. Z pohledu obrábění bio-kompozitních materiálů je vhodnější použití sousledného frézování. Tloušťka třísky je zde na začátku řezu největší a postupně se snižuje, což vede k lepší kvalitě povrchu. Zároveň je zde předpoklad menší tvorby otřepů, jelikož na materiál působí menší síly. [35; 38]

Obrobitelnost kompozitu s přírodními vlákny závisí na jeho struktuře, uspořádání vláken a mechanických vlastnostech. Důležitá je geometrie nástroje a jeho materiál. Velký vliv mají rovněž řezné podmínky, z nichž nejpodstatnější je posuv na zub, následovaný řeznou rychlostí a šířkou záběru ostří. Posuv na zub, stejně jako u vrtání, má nejvýznamnější dopad na delaminaci a tvorbu otřepů. [31]

Přepočítání otáček na řeznou rychlost je dán následujícím vztahem [39]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.3)$$

kde: v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 D – průměr nástroje [mm],
 n – otáčky vřetene [min^{-1}].

Posuv na otáčku frézy se určí ze vztahu [39]:

$$f_n = f_z \cdot z \quad (3.4)$$

kde: f_n – posuv na otáčku [mm],
 f_z – posuv na zub [mm],
 z – počet zubů frézy [-].

Çelik, Kilickap E., Kilickap A. [40] ve své studii na frézování kompozitu s jutovými vlákny bádali, jaký dopad má počet břitů na výslednou drsnost povrchu. Byly použity karbidové frézy s dvěma, třemi a čtyřmi břitů s úhlem šroubovice 30° . Fréza se čtyřmi břitů dosahovala menších faktorů delaminace, ovšem rozdíly byly nepatrné. Zároveň bylo konstatováno, že při orientaci vláken $0^\circ/90^\circ$ byla naměřená nižší drsnost povrchu než u kompozitu s orientací vláken $\pm 45^\circ$. Ze všech provedených experimentů vyplývá, že navýšení posuvu na otáčku vede ke zvýšení řezné síly a zhoršení integrity povrchu.

Chegdani a El Mansori [41] zkoumali použití frézy s dvojitě kříženou šroubovicí (obr. 19) při obrábění kompozitu s lněnými vlákny a matricí z polypropylenu. Fréza se skládá ze šesti řezných hran, přičemž každá hrana má dvě orientace šroubovitě drážky. Na břitů byl nanesen povlak PVD-TiAlN, k dosažení delší životnosti.

V experimentu byly použity řezné rychlosti (100; 200; 300) $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a hodnoty posuvu na zub (0,04; 0,06; 0,08; 0,10) mm. Šířka záběru ostří byla ve všech případech stejná, a to 1 mm. Při použití speciálního nástroje byla nejmenší naměřená delaminace za řezných podmínek $f_z = 0,1$ mm a $v_c = 300$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Vyšší hodnoty řezné rychlosti vedly k nižší delaminaci, ovšem také k většímu tření mezi frézou a obrobkem. To mělo za důsledek zvýšení teploty v místě řezu, což vedlo k většímu a rychlejšímu opotřebením frézy. [41]



Obr. 19 Fréza s dvojitě kříženou šroubovicí [41].

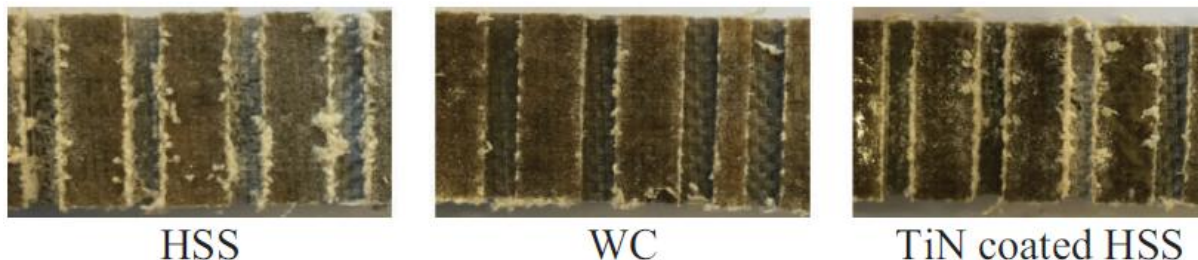
Problematikou frézování polypropylenového kompozitu vyztuženého kenafem a rýžovými slupkami se zabývali Raveen, Lin, Jayaraman a Bhattacharyya [42]. Jejich hlavní zájem byl soustředěn na tvorbu třísky při různých velikostech řezné rychlosti. Nástroj byl zvolen z HSS s úhlem čela 12° a úhlem hřbetu 16° . Kompozity vyztužené rýžovými slupkami byly mnohem více náchylné na lámání a vytrhávání vláken. Zároveň zde bylo zjištěno větší opotřebením nástroje vlivem abraze než u vzorku s výztuží z kenafu. Ze studie vyplývá, že s rostoucí řeznou rychlostí dochází k menší deformaci třísek a snižuje se koeficient redukce třísky. Zároveň se zvětšuje úhel stříhu a teplota mezi nástrojem a třískou.

Další z experimentů provedli Çelik a Alp [31] jejichž cílem bylo zjistit vliv řezných parametrů na řeznou sílu, amplitudu vibrací, tvorbu otřepů a drsnost povrchu. Jako vzorky využili kompozity s lněnými a jutovými vlákny. Při studii byly použity tři dokončovací frézy – HSS, HSS s povlakem TiN, z karbidu wolframu (WC). Nastavovaly se rozdílné hodnoty otáček (2 500; 5 000; 7 500) min^{-1} a posuvu na zub (0,010; 0,015; 0,020) mm.

Pomocí dynamometru bylo zjištěno, že řezná síla je závislá na materiálu nástroje a obrobku, otáčkách a posuvu na zub. Řezná síla byla větší u HSS fréz a u kompozitu s jutovými vlákny. Zároveň se ukázalo, že se zvětšujícími se otáčkami řezná síla klesá, ale, jak už bylo konstatováno i dalšími autory, zároveň stoupá teplota procesu. Nakonec, se zvyšujícím se posuvem rovněž roste i řezná síla. Její nejnižší hodnota tak byla naměřena při otáčkách $n = 7\,500\ \text{min}^{-1}$ a posuvem na zub $f_z = 0,01\ \text{mm}$. [31]

Dále byla měřena amplituda vibrací jednotlivých fréz. Vibrace se tvoří z důvodu tření mezi nástrojem a obrobkem a na základě jejich zkoumání lze určit míru opotřebení nástroje. Obráběný materiál měl zanedbatelný vliv na vibrace v nástroji. Hlavní dopad na amplitudu vibrací měly otáčky vřetene a materiál nástroje. HSS frézy vykazovaly tuto amplitudu menší než WC fréza. Z experimentu lze také konstatovat, že zvýšení otáček vřetene mělo za následek značné navýšení jeho amplitudy vibrací. [31]

Výskyt otřepů byl mírně značnější u kompozitů s lněnými vlákny. Zároveň nebyla zjištěna žádná spojitost mezi tvorbou otřepů a řeznou silou nebo amplitudou vibrací. Shodně s dalšími vědeckými studiemi byla četnost otřepů větší s rostoucím posuvem na zub. Obdobné chování lze pozorovat i při zvyšujících se otáčkách vřetene. Velký vliv měl rovněž použitý nástroj, kdy WC fréza ilustrovala menší výskyt otřepů než HSS frézy, viz obr. 20. Nejmenší faktor delaminace $F_d = 1,024$ byl u kompozitu s lněnými vlákny naměřen za řezných podmínek $n = 2\,500\ \text{min}^{-1}$ a $f_z = 0,01\ \text{mm}$. [31]



Obr. 20 Tvorba otřepů u kompozitu s lněnými vlákny při frézování různými nástroji [31].

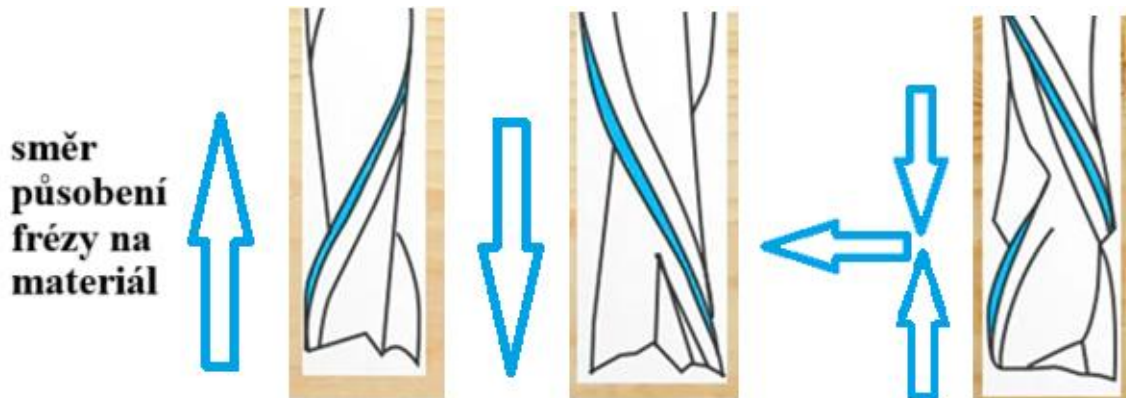
Měření drsnosti povrchu R_a ukazovalo téměř stejné výsledky, jaké byly zjištěny při měření delaminace. Větší R_a bylo naměřeno u materiálu s lněnými vlákny. Stejně tak byly větší hodnoty drsnosti povrchu zjištěny u HSS fréz. Obdobně, vyšší hodnoty f_z znamenaly nárůst R_a . Jedinou výjimkou byl vliv otáček vřetene, kdy jejich navýšení způsobilo lepší jakost povrchu. Hodnoty drsnosti povrchu se pohybovaly od 5,02 do 6,45 μm . [31]

3.5.1 Nástroje využívané při frézování dřeva

Frézování dřeva, melaminu, překližek apod. má své speciální požadavky a v mnoha ohledech je podobné frézování bio-kompozitních materiálů. Mezi společné faktory patří jejich podobná vláknitá struktura, kde použití nesprávného nástroje vede v třepení vláken. Zároveň mají tyto materiály podobně nízkou hustotu a tvrdost a nejčastěji se obrábějí na sucho. Je tedy zde možnost, že nástroje, které se běžně využívají při obrábění dřeva by mohly být správnou volbou i pro obrábění kompozitů s přírodními vlákny.

Hlavním předpokladem pro dřevoobráběcí nástroje je požadavek na jejich vysokou ostrot. Tupé nástroje způsobují třepení vláken a delaminaci. Zcela běžné je už používání spirálových fréz, které materiál neodsekávají, ale řezou. Díky tomu se v místě řezu nehromadí třísky, lépe se odvádí teplo a samotný řez je čistší. Frézy se liší směrem šroubovitě drážky, viz obr. 21, a to na frézy s drážkou pozitivní (up-cut), negativní (down-cut) a kompresní drážkou. [43]

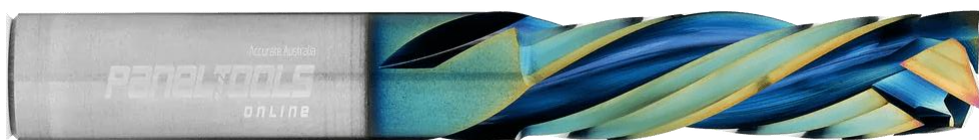
Frézy s pozitivní šroubovitou drážkou se používají pro většinu běžných aplikací. Při frézování je materiál tažen směrem nahoru a pryč z místa řezu. Tyto frézy jsou tak účinné pro odvádění třísek na spodní straně řezu, kde zanechávají čistý a hladký povrch. Na horní hraně ovšem může docházet k třepení. Oproti tomu frézy s negativní drážkou tlačí materiál směrem dolů. Horní hrana je tudíž hladká, ovšem na spodní hraně zůstávají neodříznutá vlákna. [43; 44]



a) s pozitivní drážkou b) s negativní drážkou c) s kompresní drážkou

Obr. 21 Druhy fréz dle směru šroubovitě drážky [43].

Tato problematika je řešena pomocí nástrojů s kompresní šroubovitou drážkou (obr. 22), které jsou kombinací up-cut a down-cut technologie. V praxi to znamená, že je fréza rozdělená na dvě části, má dvojitě lomenou šroubovici. Ostří s horním řezem je na špičce frézy a hrana s dolním řezem je blíže k dřívku nástroje. Horní část nástroje tak tlačí třísky dolů, zatímco spodní část je vytahuje nahoru. Následkem je, že jsou vlákna stlačena do středu materiálu, čímž je zabráněno jejich třepení na horní a spodní hraně. Použitím kompresní spirálové frézy je tedy možno minimalizovat tvorbu ořepů a získat hladké hrany na obou stranách řezu. [43; 44]



a) fréza z karbidu titanu výrobce Xtreme Blue [44]



b) WC fréza výrobce Sandvik Coromant [45]



c) PCD frézy výrobce Fraiser [46]
Obr. 22 PCD kompresní spirálové frézy.

3.5.2 Shrnutí frézování bio-kompozitních materiálů

Z provedené rešerše vyplývá, že delaminace a tvorba otřepů je hlavním problémem při obrábění bio-kompozitů. Aby byl výskyt otřepů co nejvíce minimalizován je zapotřebí zvolit správný nástroj a vhodné řezné podmínky. Z pohledu praktické části této diplomové práce, která se zabývá zejména technologií frézování, je tak důležité brát ohled na tyto skutečnosti:

- sousledné frézování je vhodnější s ohledem na jakost povrchu,
- posuv na zub f_z nejvíce ovlivňuje tvorbu otřepů, doporučují se tedy nižší hodnoty,
- řezná rychlost v_c nemá významný vliv, ovšem čím je větší, tím se zvyšuje tření a teplota mezi nástrojem a obrobkem,
- frézy s pozitivním úhlem čela a úhlem hřbetu lépe odřezávají otřepy,
- doporučuje se nižší úhel šroubovice 10° až 20° ,
- materiál břitů nejlépe PCD, CNB z důvodu lepší odolnosti proti opotřebení, s ohledem na cenu však lze využít i SK nebo HSS frézy,
- počet břitů nemá významný vliv, jejich větší počet je ovšem kladný z pohledu integrity povrchu,
- vzhledem k určitým podobnostem u frézování dřeva a bio-kompozitů lze využít nástroje používané v dřevoobrábění, například spirálové frézy pozitivní či kompresní.

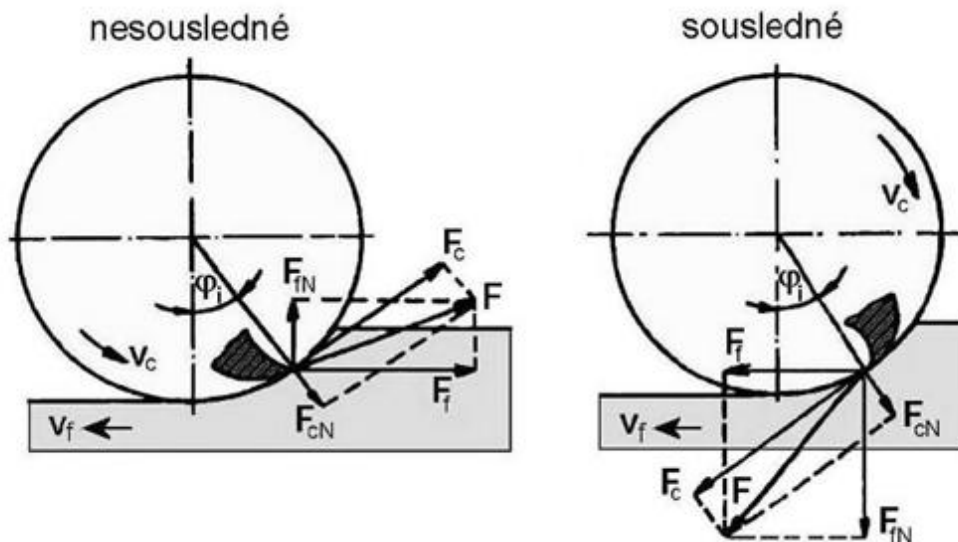
3.5.3 Měření sil a momentů u frézování

Poznání silových poměrů procesu řezání umožňuje dostat představu o mechanickém namáhání soustavy obrábění. Tyto informace dále poskytují podklady s ohledem na dynamickou stabilitu řezného procesu. Síla řezání \mathbf{F} je dynamickým jevem a je výslednicí aktivní složky \mathbf{F}_a a pasivní složky \mathbf{F}_p . Schéma rozložení složek síly řezání při frézování sousledném a nesousledném je zobrazeno na obr. 23. Na velikost síly řezání má vliv zejména posuv a hloubka řezu, ale také řezná rychlost, geometrie a opotřebení břitu nebo pevnost a tvrdost materiálů. [47]

Celková síla řezání se pak vypočítá ze vztahu [47]:

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + F_{cN}^2 + F_p^2} \quad (3.5)$$

kde: F – celková síla řezání [N],
 F_a – aktivní síla [N],
 F_p – pasivní síla [N],
 F_c – řezná síla [N],
 F_{cN} – kolmá řezná síla [N].



Obr. 23 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování [47].

Existují dva způsoby měření sil a momentů u technologie frézování, a to:

- Přímé měření sil a momentů

Principem je měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během frézování. Měření je prováděno pomocí dynamometrů, na něž jsou kladeny důležité požadavky. Dynamometry musí mít dostatečnou tuhost a zároveň citlivost k zajištění přesnosti měření. Dále je požadována vysoká přesnost, stálost naměřených parametrů po celou dobu měření a opakovatelnost měření. Zároveň by jejich konstrukce měla zajišťovat, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování jednotlivých složek řezné síly. [47]

Dynamometry se zpravidla skládají ze tří částí – z pružného členu, snímače a přijímače. Na pružný člen jsou přenášeny vnější zatížení, čímž v něm nastávají jisté změny – dochází k deformaci nebo ke změně polohy. Snímač má za úkol rozpoznávat změny na pružném členu a mechanickou veličinu této změny přeměnit na odpovídající hodnotu, jakou má tento parametr v měřicí soustavě. Nakonec je signál snímače zesilován a zpracováván pomocí přijímače, který následně zapisuje velikost zatížení. [47]

Rozdělit dynamometry lze dle počtu měřených složek na jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření kroutících momentů. Další možností je dělení podle způsobu měření, a to na mechanické, elektrické, hydraulické, pneumatické nebo optické. V neposlední řadě se dynamometry liší na základě použité technologie obrábění. Na obr. 24 je příklad dynamometru používaného při frézování. [47]

Dynamometry se musí správně cejchovat, aby měřily reálné údaje. Jde o proces, kdy se porovnávají naměřené parametry dynamometru se skutečnými hodnotami sledované veličiny. Cejchování se obvykle provádí přímo na obráběcích strojích, kdy se dynamometr zatěžuje měnící se, předem známou, silou a na úchylkoměru se odečítá odpovídající výchylka. Výstupem je sestavení cejchovní křivky, jež graficky ukazuje vztah mezi měřenou složkou řezné síly a příslušnou veličinou. [47]

Pomocí dynamometru se měří řezné síly v osách, u frézování je to konkrétně v osách x, y, z. Celková řezná síla se poté vypočítá z následujícího vztahu [47]:

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.6)$$

kde: F_x – řezná síla v ose x [N],
 F_y – řezná síla v ose y [N],
 F_z – řezná síla v ose z [N].



Obr. 24 Třísložkový dynamometr Kistler 91119AA2 [48].

- Nepřímé měření sil a momentů

Tato metoda využívá k měření sil parametry obráběcího stroje. Pomocí wattmetru se změří výkon elektromotoru, na jehož základě lze stanovit tangenciální složku síly řezání z následujícího vztahu [47]:

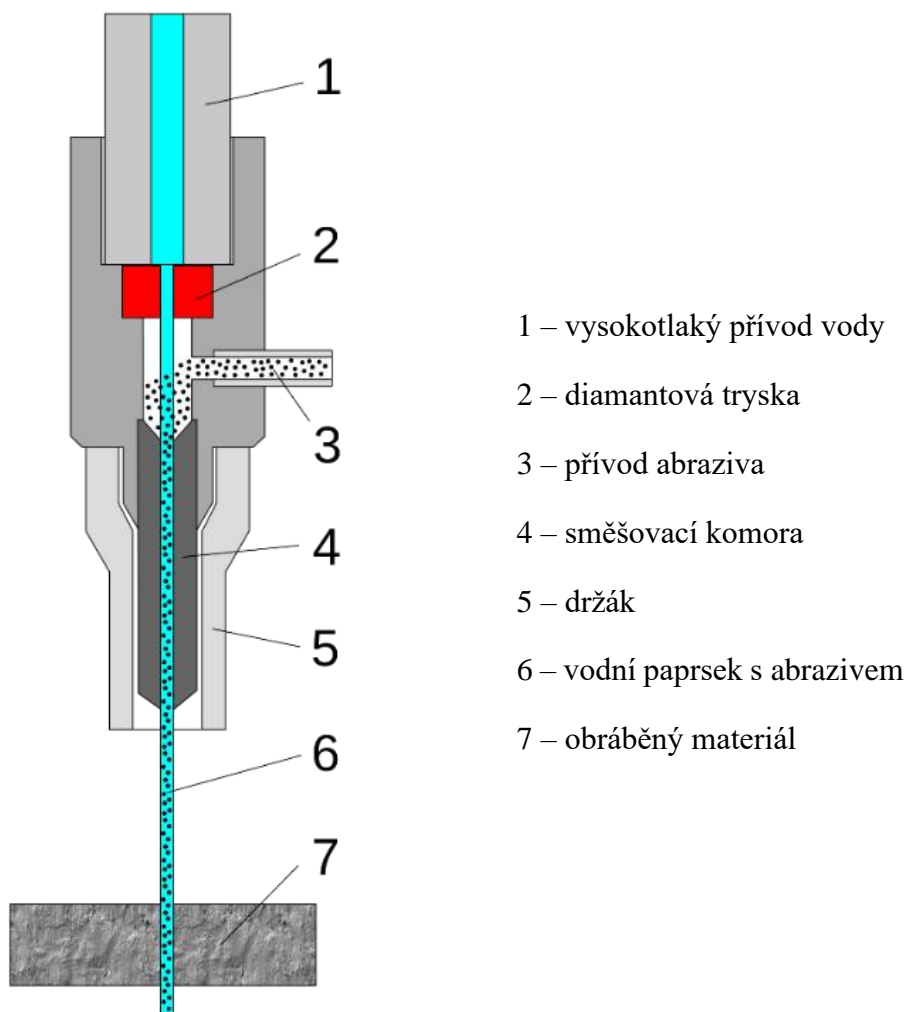
$$F_t = \frac{P_{u\check{z}}}{v_c} \quad (3.7)$$

kde: F_t – tangenciální složka síly řezání [N],
 $P_{u\check{z}}$ – užitečný výkon [W],
 $P_{u\check{z}} = P_c - P_o$
 kde: P_c – celkový výkon obráběcího stroje [W],
 P_o – výkon při chodu naprázdno [W].

U této metody je výhodou, že je oproti přímému měření jednodušší a nevyžaduje žádné speciální měřidla. Zároveň je aplikovatelná na všechny technologie obrábění. Nevýhodou je ovšem menší přesnost měření, způsobená jinou účinností stroje při zatížení a jinou při chodu naprázdno. Metoda nebere v potaz vliv dalších složek síly řezání na výkon elektromotoru. [47]

3.6 Řezání vodním paprskem

Nekonvenční technologie obrábění jsou stále více používány pro svou vysokou produktivitu a flexibilitu. Jednou z takových technologií je řezání vodním paprskem (obr. 25), kde je pevný nástroj nahrazen vysokotlakým vodním paprskem s abrazivem. Abrazivní částice, nejčastěji granátu, dopadají pod vysokým tlakem na povrch obrobku a řezou skrz něj. [35; 49]



Obr. 25 Princip technologie řezání vodním paprskem [50]

Použití technologie je téměř neomezené, lze řezat i těžko obrobitelné materiály. Velmi měkké materiály, jako je guma, dřevo apod., jsou řezány samotným vodním paprskem, pro obrábění tvrdších materiálů je potřeba užití abraziva. Během procesu nedochází k tvorbě tepelně ovlivněné oblasti, čímž je metoda velmi vhodná pro obrábění kompozitních materiálů. [35; 49] Murthy, Makki, Potti, Hiremath, Bolar et al [51] se zabývali řezáním vodním paprskem kompozitu s jutovými vlákny, viz obr. 26. Zejména pak tím, jak byla drsnost povrchu ovlivněna dílčími reznými parametry. Největší vliv měla rychlost posuvu, vzdálenost trysky od obrobku a hmotnostní průtok abraziva. Zároveň se ukázalo, že je velmi důležitá orientace vláken. U kompozitů s orientací vláken 45° měl největší dopad na drsnost povrchu hmotnostní průtok abraziva, kdežto pro orientaci vláken 90° to byla vzdálenost trysky od obrobku.

V průměru byla naměřená hodnota R_a pro vlákna s orientací 45° menší o $0,85 \mu\text{m}$. V obou případech nebyla velikost rychlosti posuvu tak značná. Z experimentu lze konstatovat, že lepší drsnost povrchu se dosáhne zvýšením hmotnostního průtoku abraziva a snížením vzdálenosti mezi tryskou a obrobkem.



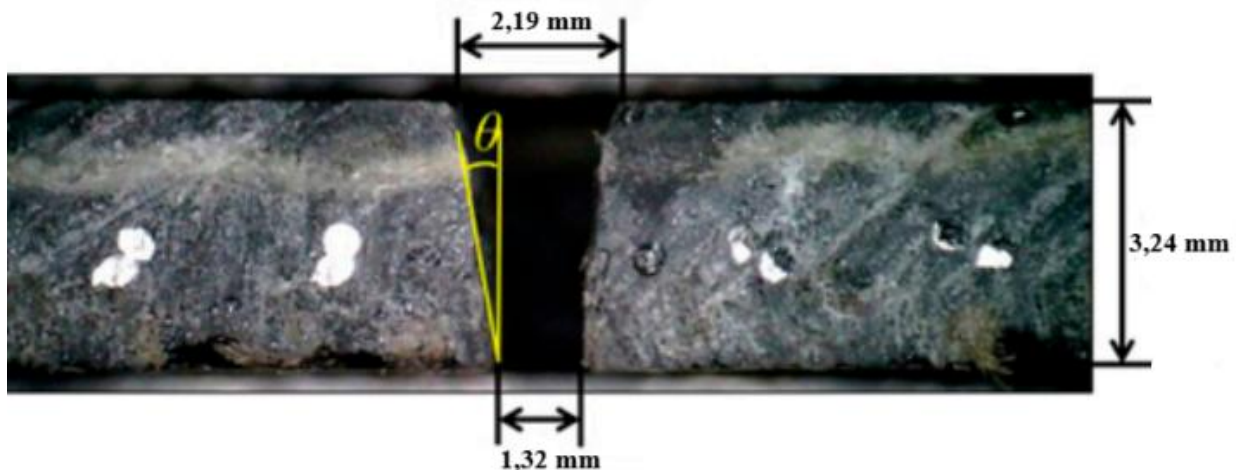
a) obráběcí stroj

b) průběh obrábění

c) testovaný vzorek po obrábění

Obr. 26 Řezání vodním paprskem kompozitu s jutovými vlákny [51].

Singh a Rajamurugan [52] ve své studii zkoumali obrábění kompozitu s lněnými a konopnými vlákny spolu s recyklovanými uhlíkovými vlákny. Dosáhli podobných výsledků jako Murthy et al, kdy hmotnostní průtok abraziva měl rozhodující vliv na drsnost povrchu (83,4 %), následovaný vzdáleností trysky od povrchu obrobku (15,1 %). S ohledem na dopad na úhel řezu θ je to však přesně opačně. Ve všech případech byla šířka řezu na horní hraně větší než šířka řezu na spodní hraně, viz obr. 27. Nejmenší R_a bylo dosaženo při hmotnostním průtoku $750 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ a vzdáleností trysky od obrobku 1 mm.



Obr. 27 Rozměry řezu vodního paprsku u provedeného experimentu [52].

Dhakar, Ismail, Ojo, Paggi a Smith [53] se ve své práci více zabývali posuvovou rychlostí a jejím vlivem na delaminaci. Byly testovány tři materiály, a to kompozity s uhlíkovými vlákny, s lněnými vlákny a jejich kombinace. Ukázalo se, že u všech třech materiálů zvýšení posuvové rychlosti výrazně zvětšilo delaminaci. Překvapivě se jevila skutečnost, že delaminace byla značnější na vrchních vrstvách než na spodních, což bylo způsobeno elastickou deformací prvních vrstev.

3.7 Metoda plánování experimentu DOE

Metoda DOE (design of experiments) neboli plánování experimentu je založená na statistických a matematických principech. Jejím úkolem je z co nejméně provedených testů získat maximální počet informací o zkoumaném procesu či produktu. Cílem DOE je zkoumat, jak vstupní proměnné (faktory) ovlivňují výstupní proměnné (odezvu). Vstupní faktory mají více úrovní, tedy více konkrétních hodnot, které se v průběhu experimentu mění. Tuto metodu lze využít při zkoumání důležitosti vstupních faktorů nebo pro jejich optimalizaci.[54]

Proces DOE se skládá ze čtyř kroků – plánování, promítání, optimalizace a ověření. V prvním kroku je zapotřebí si plně uvědomit charakter zkoumaného procesu, určit vstupní faktory a odezvy. V části promítání dochází k zmenšení počtu vstupních faktorů tím, že se proměnné, které nemají významný vliv na výslednou odezvu, neberou v potaz. Tato fáze je velmi důležitá, jelikož počet zkoumaných vstupních faktorů určuje požadované množství provedených experimentů. Získaná data se dále dají použít k vytvoření regresního modelu, který pomáhá optimalizovat vstupní faktory a výslednou odezvu. Poslední fází je ověření, kde se zkoumá, zda určené optimální vstupní proměnné mají požadovaný vliv na odezvu. [54]

Existuje několik typů experimentálních návrhů [54]:

- Úplný faktoriální návrh – testuje všechny možné kombinace faktorů, poskytuje podrobné informace. Je aplikován pro menší počet vstupních faktorů z důvodu nutnosti vysokého počtu provedených experimentů.
- Částečný faktoriální návrh – k vyhodnocení používá pouze část možných kombinací. Používán při větším počtu vstupních proměnných z důvodu úspory času a získání klíčových informací.
- Plackett-Burmanovy návrhy – promítací návrh, jenž slouží k rychlému posouzení o tom, které faktory mají největší vliv.
- Taguchiho metoda – obdobně jako částečný faktoriální návrh se i Taguchiho metoda snaží minimalizovat počet provedených experimentů a zároveň získat co nejdůležitější a nejkonkrétnější informace. Tento proces spoléhá na testování dvojic kombinací, čímž rychleji a levněji zjišťuje, které faktory mají největší dopad na výsledek. Metoda se používá při velkém počtu proměnných, kdy se tyto faktory navzájem ovlivňují pouze v malém rozsahu.

Statistická metoda ANOVA (analysis of variance) neboli analýza rozptylu je test sloužící k posouzení rozdílů mezi průměrnými hodnotami dvou a více skupin. Tato metoda umožňuje porovnat aritmetické průměry jednotlivých skupin a stanovit, jestli jsou výsledné rozdíly náhodné nebo odpovídají skutečnosti. ANOVA zohledňuje více faktorů a jejich interakce, proto je její využití velmi rozšířené v mnoha odvětvích. Lze ji využít například při hodnocení experimentu pro zjištění, zda má nezávislá proměnná vliv na změny v závislé proměnné a jak velký tento vliv je. [55]

Rozlišují se dvě analýzy rozptylu [55]:

- Jednofaktorová ANOVA – hodnotí vliv jednoho faktoru na jednu závislou proměnnou. Slouží k zjištění, jestli jsou všechny skupiny stejné. Je používána k určení, zda se průměry tří nebo více nezávislých skupin statisticky liší.
- Dvoufaktorová ANOVA – hodnotí dopad dvou nezávislých faktorů na jednu závislou proměnnou. Používá se k hodnocení interakce mezi těmito dvěma faktory a zároveň k testování vlivu obou faktorů současně.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Po vypracování příslušné rešerše bylo dalším krokem provedení experimentální části, která byla zaměřena na obrábění bio-kompozitních vzorků materiálu. V této části byl vyroben materiál, vybrán stroj a byla popsána měřicí aparatura. Na základě provedené teoretické části byly zvoleny nástroje a řezné podmínky. Poté byl hodnocen jejich vliv na výsledné hodnoty řezných sil, zrychlení a velikosti otřepů.

4.1 Výroba materiálu

Nejprve bylo zapotřebí materiál vyrobit. Jak už bylo zmíněno v první kapitole diplomové práce, jako materiál výztuže byly zvoleny lněná vlákna výrobce Eco-Technilin, a to konkrétně tkaná lněná vlákna FlaxDry-BL200, twill 2 x 2. Použitá matrice byla epoxidová pryskyřice LG 700. Objemové složení výsledných kompozitních materiálů tvoří zhruba 60 % pryskyřice a 40 % výztužných vláken. Vzorky byly vyrobeny v laboratoři na půdě Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Jako výrobní technologie byla zvolena vakuová infuze.

Ze všeho nejdříve bylo nutné nastříhat vrstvy výztuže. Byly nachystány čtyři vrstvy o rozměrech 300 x 300 mm, viz obr. 28. Vrstvy tkaniny FlaxDry-BL200 byly následně umístěny na formu pod úhly 0°, -45°, 45° a 90°.

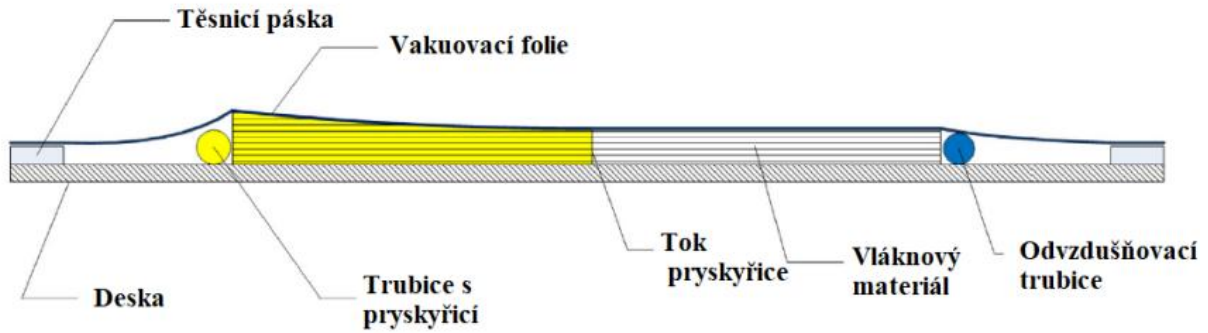


Obr. 28 Vrstva materiálu o rozměrech 300 x 300 mm.

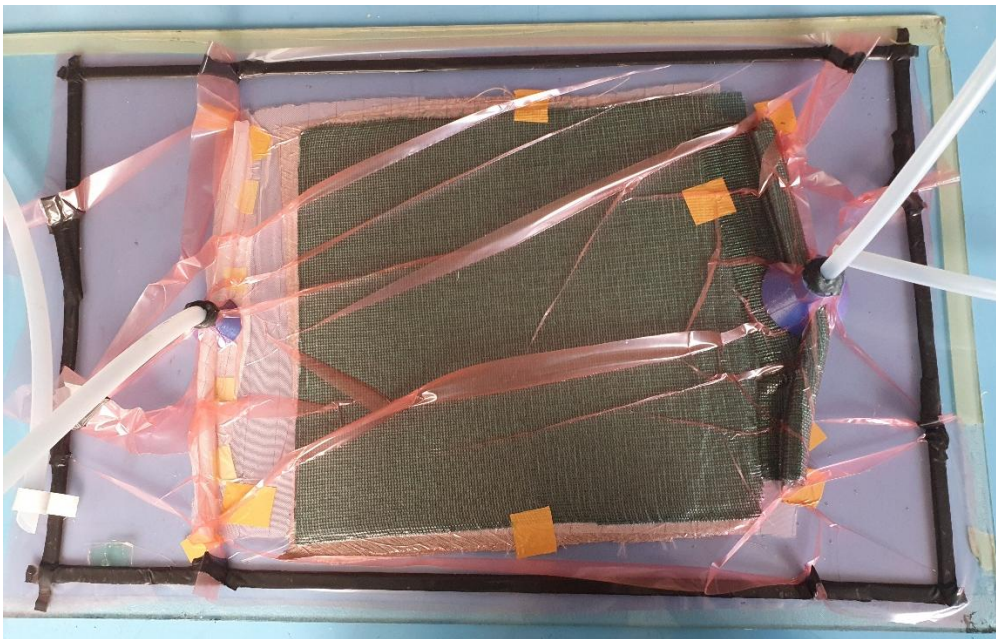
Princip vakuové infuze byl probrán v teoretické části. Výroba probíhala za atmosférického tlaku 0,99 atm. Schéma vakuové infuze je zobrazeno na obr. 29. Podrobný postup výroby bio-kompozitních vzorků byl následující:

- očištění, separace a příprava formy (skleněné desky),
- naskládání vrstev materiálu, strhávání vrstvy a separační fólie,
- přiložení odvětrávací trubice a trubice pro přívod pryskyřice,
- zajištění těsnosti formy pomocí vakuovací fólie a těsnicí pásky,
- vakuování,
- příprava pryskyřice – smíchání epoxidové pryskyřice a tužidla,
- infuze pryskyřice,
- vytvrzování.

Po celou dobu infuze pryskyřice je potřeba důkladně kontrolovat těsnost formy a pozorovat, zda se nevytváří vzduchové bubliny, které by v konečném důsledku způsobily porozitu vzorku. Aparatura technologie vakuové infuze je ilustrována na obr. 30.

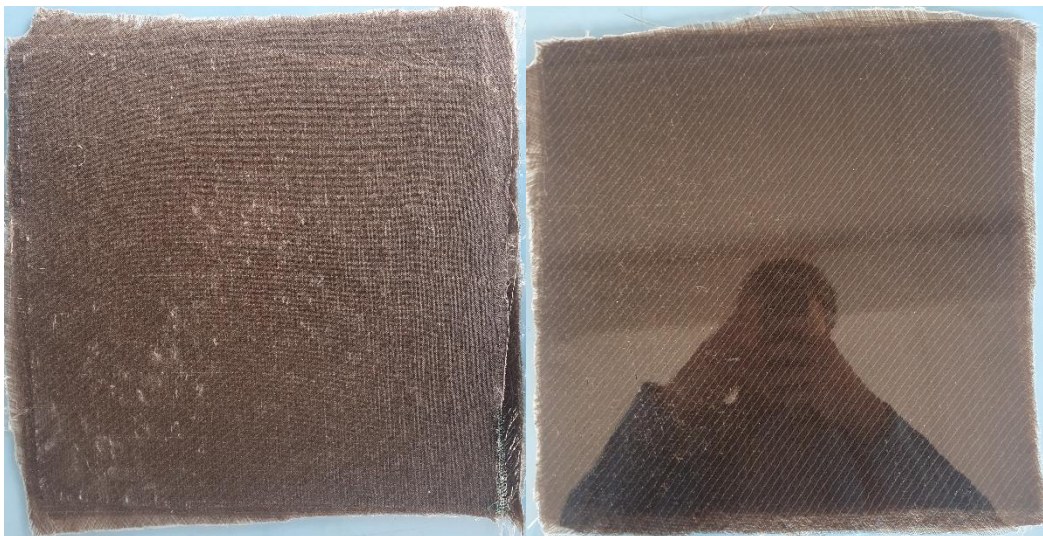


Obr. 29 Schéma vakuové infuze [56].



Obr. 30 Aparatura vakuové infuze.

Po více než 36 hodinách vytvrzování, byly vzorky odpojeny od vakua a byla odstraněna strhávací folie. Výsledek lze vidět na obr. 31. Na pile byly následně z materiálů ořezány boční hrany, jež nebyly vhodné pro testování. Materiály pak byly rozděleny na čtyři podobné vzorky ve tvaru obdélníku o rozměrech 130 x 150 mm, které byly použity jako polotovar.



Obr. 31 Bio-kompozitní materiál po vytvrzení.

4.2 Použitý stroj

Zvoleným strojem byla CNC frézka FV 25 CNC A (obr. 32) výrobce OSO Olomouc. Stroj používá řídicí systém Heidenhain TNC 530 a držák nástrojů ISO 40. Maximální rychlost vřetene je $6\,000\text{ min}^{-1}$ a maximální posuv stolu je $7\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Technické parametry vybraného stroje jsou uvedeny v tab. 7. [57]

Tab. 7 Technické parametry frézky FV 25 CNC A [57].

Rozměry stroje (délka x šířka x výška) [mm]	2 750 x 2 600 x 2 030
Podélný pohyb stolu – osa x [mm]	760
Příčný pohyb stolu – osa y [mm]	355
Vertikální pohyb stolu – osa z [mm]	152
Maximální rychlost vřetene [min^{-1}]	6 000
Rozměry stolu (délka x šířka) [mm]	1 300 x 305
Hmotnost stroje [kg]	1 500
Výkon motoru [kW]	5,5
Maximální nosnost stolu [kg]	200
Posuv stolu [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	7 000

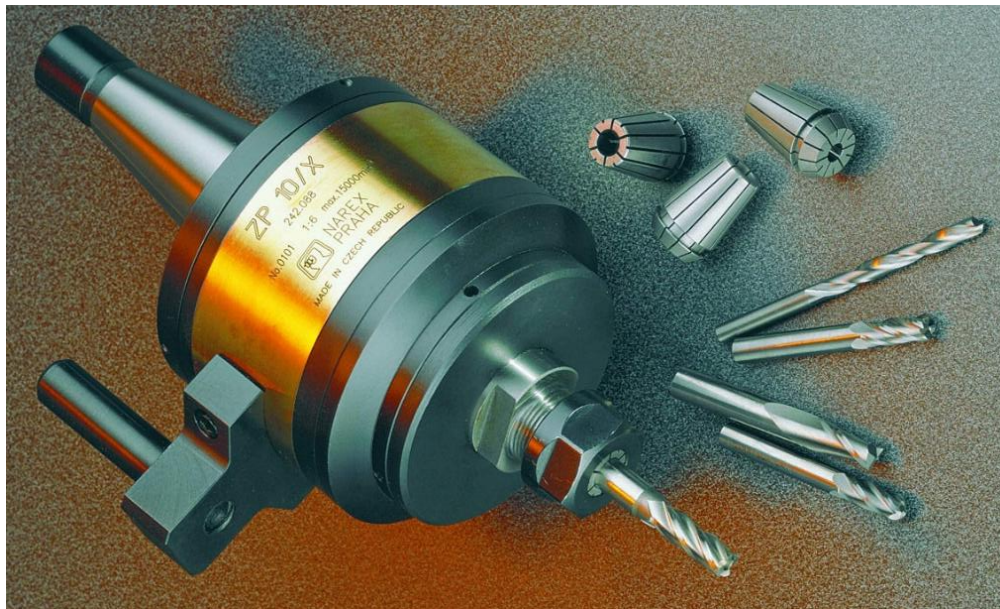


Obr. 32 Frézka FV 25 CNC A.

Vzhledem k tomu, že zvolený stroj neposkytuje dostatečné otáčky vřetene k uskutečnění experimentu, bylo nutné použít zrychlovací přístroj ZP-10/X od NAREX MTE, viz obr. 33. Technické parametry zrychlovacího přístroje uvádí tab. 8. Přístroj je vybavený mechanickou planetovou převodovkou s převodem 1:6. Spolu v kombinaci se strojem je tedy možné dosáhnout otáček až $18\,000\text{ min}^{-1}$, což je pro měření dostatečné. [58]

Tab. 8 Technické parametry ZP-10/X [58].

Převodový poměr [-]	1:6
Maximální přenášený výkon [kW]	4,5
Maximální otáčky [min^{-1}]	20 000
Maximální otáčky v kombinaci se strojem [min^{-1}]	18 000
Rozsah průměru nástroje [mm]	1 – 13



Obr. 33 Zrychlovací přístroj ZP-10/X [58].

4.3 Návrh experimentu

Před provedením experimentu bylo zapotřebí provést jeho samotný návrh. K realizaci bylo využito metody DOE ve statistickém programu Minitab. Hlavním cílem bylo určit vliv jednotlivých vstupních faktorů – použitého nástroje, rychlosti otáček vřetene a velikosti posuvu na zub frézy. Celkem byly testovány čtyři spirálové frézy, dvě pozitivní a dvě kompresní. Dle rešerše byly navrženy hodnoty rychlosti otáček vřetene a velikosti posuvu na zub. Vzhledem ke skutečnosti, že posuv na zub má výraznější vliv na průběh frézování byly testovány tři jeho různé velikosti. Všechny použité parametry jsou uvedeny v tab. 9. K návrhu experimentu byl zvolen úplný faktorový experiment, byly tedy testovány všechny možné kombinace zvolených vstupních faktorů. Aby nedošlo k náhodné chybě, měření bylo provedeno dvakrát pro každou možnou kombinaci parametrů. Celkem tedy bylo naplánováno 48 měření pro jeden materiál. Parametry všech měření jsou vypsány v Příloze 1. Jelikož měla fréza č. 4 větší průměr než zbylé nástroje, musely být upraveny její otáčky dle vzorce (3.3) na 9 000 a 10 500 min^{-1} . Tím byla zachována stejná řezná rychlost pro všechny frézy. Výstupními proměnnými jsou jednotlivé složky řezné síly a zrychlení a velikost ořepů.

Tab. 9 Použité vstupní parametry a jejich hodnoty.

Číslo nástroje [-]	Otáčky vřetene n [min^{-1}]	Posuv na zub f_z [mm]
1	12 000	0,050
2	14 000	0,075
3	-	0,100
4	-	-

4.4 Použité nástroje

Nástroje byly zvoleny na základě provedené rešerše. Jednalo se celkově o čtyři spirálové frézy, z nichž dvě byly s pozitivní drážkou a dvě s kompresní drážkou. Nástroje byly zakoupeny od výrobců IGM nástroje a stroje a ITA Tools, a konkrétně jsou to tyto:

- Nástroj č. 1

Jako první nástroj byla zvolena dokončovací spirálová fréza pozitivní značky ITA Tools, viz obr. 34. Jedná se o frézu se dvěma břity, která má vybroušené ostří v pozitivním směru. Nástroj je určen pro frézování masivního dřeva na CNC obráběcích centrech a frézkách. [59]

Parametry frézy stanovené výrobcem [59]:

- materiál: slinutý karbid
- průměr: 6 mm
- počet břitů: 2
- úhel šroubovice: 46°
- délka řezné hrany: 17 mm
- celková délka: 50 mm
- kód produktu: SB01.06.017.050.06R
- cena bez DPH: 591,50 Kč



Obr. 34 Dokončovací spirálová fréza pozitivní od ITA Tools [59].

- Nástroj č. 2

Druhým nástrojem byla kompresní dokončovací spirálová fréza od ITA Tools, viz obr. 35. Nástroj je určen pro řezání, kopírování a frézování masivního dřeva, dřevěných kompozitů, plastových materiálů a laminátů. [60]

Parametry nástroje dle výrobce [60]:

- materiál: slinutý karbid
- povlak: TiAlN
- průměr: 6 mm
- počet břitů: 2+2
- úhel šroubovice: 46°
- délka řezné hrany: 22 mm
- celková délka: 60 mm
- kód produktu: SM01.06.022.060.06R
- cena bez DPH: 608 Kč



Obr. 35 Kompresní dokončovací spirálová fréza od ITA Tools [60].

▪ Nástroj č. 3

Dalším zkoušeným nástrojem byla kompresní drážkovací spirálová fréza (obr. 36) výrobce IGM nástroje a stroje. Fréza má kombinovanou (pozitivně-negativní) drážku, která zajišťuje hladký povrch na horní a dolní vrstvě obroběného materiálu. Stejně jako předešlé nástroje se používá v dřevoobrábění. [61]

Výrobce udává tyto parametry [61]:

- materiál: slinutý karbid
- průměr: 6 mm
- počet břitů: 1+1
- úhel šroubovice: 45°
- délka řezné hrany: 22 mm
- celková délka: 60 mm
- kód produktu: C19006011
- cena bez DPH: 605 Kč



Obr. 36 Drážkovací spirálová fréza kompresní od IGM nástroje a stroje [61].

▪ Nástroj č. 4

Posledním testovaným nástrojem byla drážková spirálová fréza pozitivní (obr. 37) od IGM nástroje a stroje. Je určena zejména k obrábění tvrdého dřeva, melaminu a OSB desek. [62]

Výrobce jsou specifikovány tyto parametry [62]:

- materiál: slinutý karbid
- průměr: 8 mm
- počet břitů: 3
- úhel šroubovice: 38°
- délka řezné hrany: 32 mm
- celková délka: 80 mm
- kód produktu: C19308111
- cena bez DPH: 848,00 Kč



Obr. 37 Drážková spirálová fréza pozitivní od IGM nástroje a stroje [62].

4.5 Měřicí aparatura

Ke správnému provedení experimentu a jeho vyhodnocení bylo zapotřebí použití měřících přístrojů. Konkrétně byla použita tato aparatura:

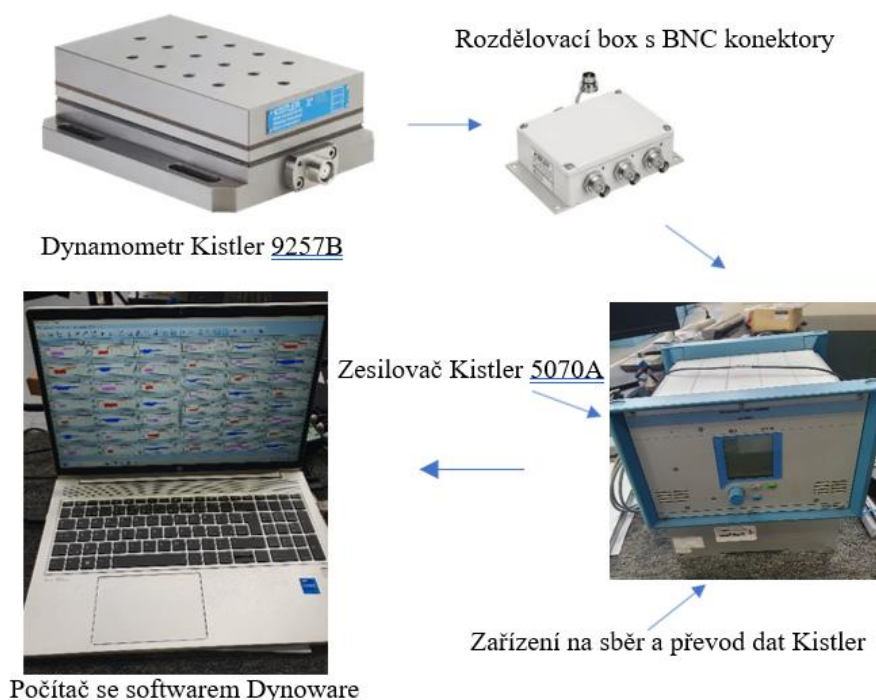
- Dynamometr Kistler 9257B

Piezelektrický vícesložkový dynamometr značky Kistler 9257B (obr. 38) byl vybrán k měření rezných sil v osách x, y, z. Dynamometr se skládá ze tří křemíkových desek, přičemž každá z nich je citlivá na tlak ve směru jedné osy. Přístroj je odolný proti korozi a pronikání chladicí kapaliny. Jeho rozměry jsou 100 x 170 mm a maximální rozsah měření sil od -5 až 10 kN. Kompletní technické parametry jsou uvedeny v Příloze 2. [63]



Obr. 38 Dynamometr Kistler 9257B [63].

Jak už bylo zmíněno v rešerši, dynamometry nedokážou samostatně zpracovat a analyzovat data, proto se využívají další zařízení. Pomocí prodlužovacích a propojovacích kabelů je dynamometr zapojen k rozdělovacímu boxu s BNC konektory. Ten je propojen s přístrojem na sběr a převod dat značky Kistler. Zároveň byl použit osmi kanálový zesilovač Kistler 5070A a A/D převodník. Nakonec už je zapotřebí pouze počítač se softwarem DynoWare, kde se zobrazí naměřená data. Celé zapojení dynamometru Kistler je zobrazeno na obr. 39.

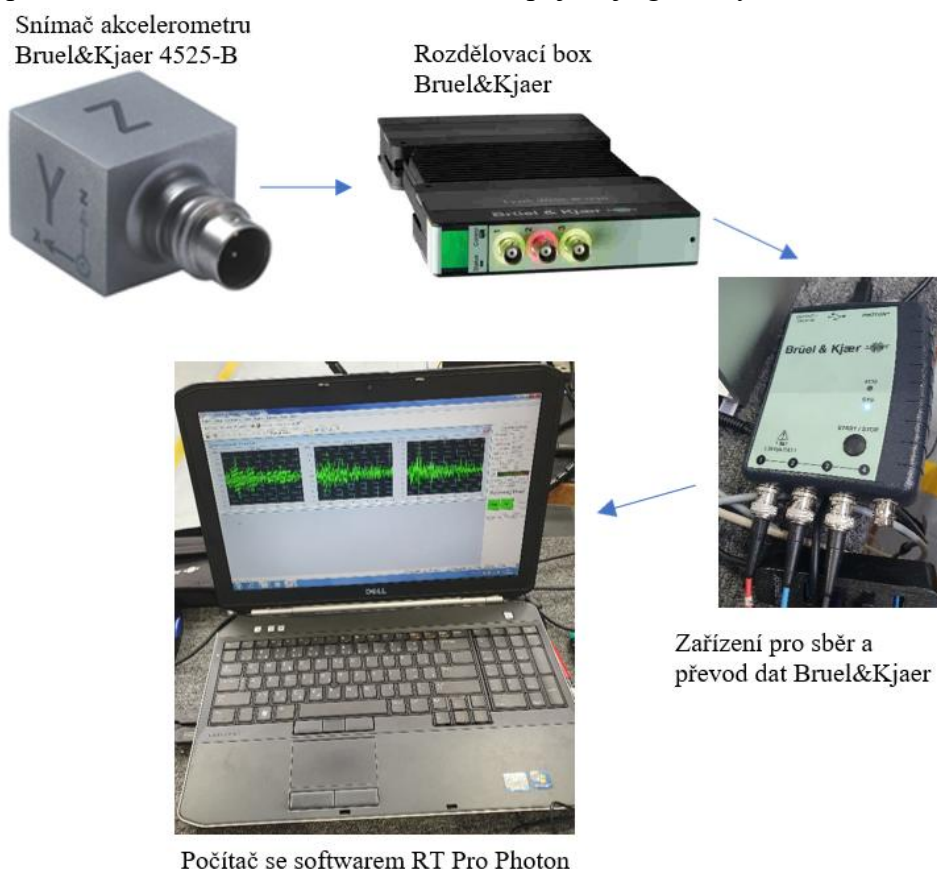


Obr. 39 Zapojení dynamometru Kistler 9257B.

- Akcelerometr Bruel&Kjaer 4525-B

Piezelektrický akcelerometr Bruel&Kjaer 4525-B se používá k měření zrychlení v souřadnicích x, y, z. Drobný titanový snímač umožňuje měření téměř v každém prostředí. Uchycení senzoru je zajištěno magneticky. Rozsah měřicí frekvence je od 5 do 10 000 Hz. Citlivost akcelerometru je až $10 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$. Jeho konstrukce zahrnuje tři vestavěné předzesilovače s individuálním napájením. Detailní technické parametry akcelerometru jsou uvedeny v Příloze 3. [64]

Stejně jako u dynamometru i zde je nutná aplikace dalších přístrojů, aby bylo možné získat naměřená data. Snímač akcelerometru je pomocí kabelů propojen s rozdělovacím boxem. K tomu je dále připojeno zařízení pro sběr a převod dat značky Bruel&Kjaer. Znovu je zapotřebí počítač se softwarem RT Pro Photon. Zapojení je graficky znázorněno na obr. 40.



Obr. 40 Zapojení akcelerometru Bruel&Kjaer 4525-B [64].

- Stereomikroskop Schut SSM-3E

Stereo zvětšovací mikroskop Schut SSM-3E (obr. 41) slouží k detailnímu pozorování povrchů. Model je vybaven USB kamerovým spojením, jenž umožňuje vyhodnocování snímků na počítači. Mikroskop disponuje otočnou hlavici, která umožňuje rotaci 360°. Horní a spodní osvětlení usnadňuje průběh měření. Technické parametry stereomikroskopu uvádí tab. 10. [65]

Tab. 10 Technické parametry stereomikroskopu Schut SSM-3E [65].

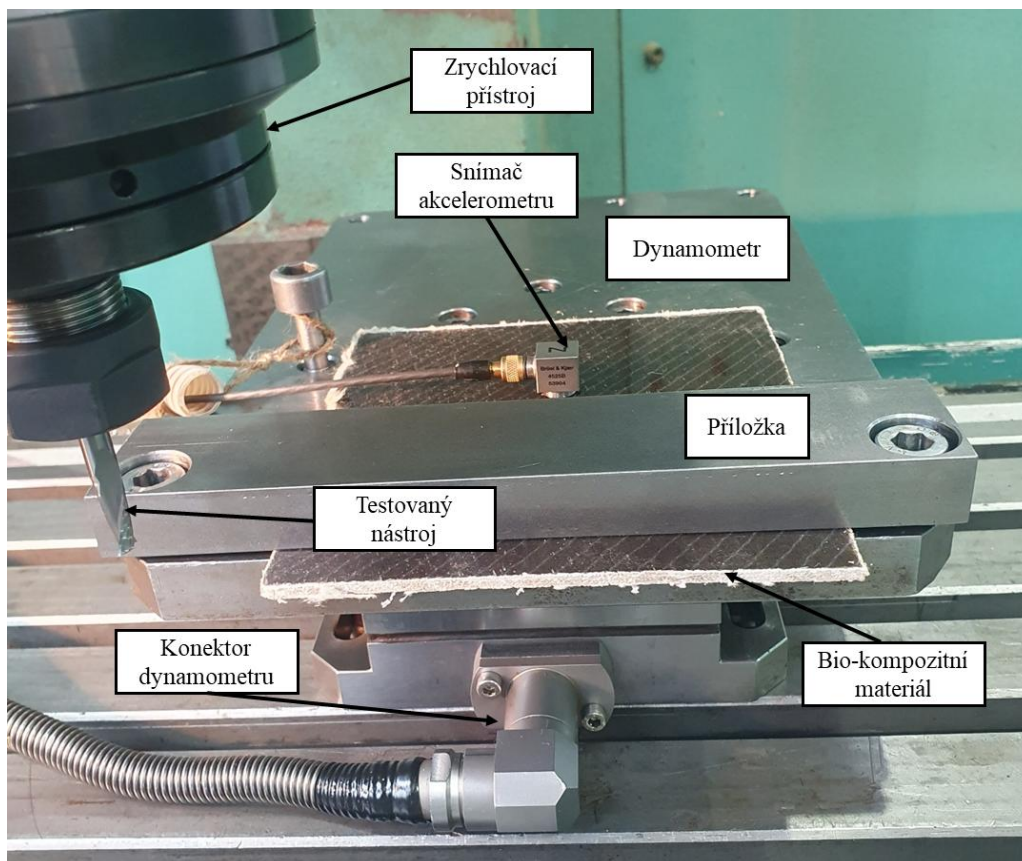
Rozsah zvětšení [-]	10x – 40x
Pracovní vzdálenost [mm]	85
Přídavné objektivy [-]	0,5x; 0,75x; 1,5x; 2x
Zorné pole – zvětšení 10x [mm]	23
Zorné pole – zvětšení 40x [mm]	5,5
Hmotnost [kg]	6,55



Obr. 41 Stereomikroskop Schut SSM-3E [65].

4.6 Průběh experimentu

Experiment probíhal v dílně Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojního inženýrství na CNC frézce FV 25 CNC A. Do vřetene stroje byl upnut zrychlovací přístroj ZP-10/X, aby bylo dosaženo potřebných otáček nástroje. V urychlovací hlavě byly postupně upínány nástroje. Na pracovní stůl stroje byl nainstalován dynamometr Kistler 9257B, jenž byl zapojen dle obr. 38. Na dynamometru byly upínány vzorky rozměrů 130 x 150 mm pomocí příložky a šroubů. Pevné upnutí bylo důležité, protože zamezovalo rozvibrování materiálu. Na povrch polotovaru byl umístěn snímač akcelerometru Bruel&Kjaer 4525-B a byl propojen dle obr. 39. Vzhledem k tomu, že bio-kompozitní materiály nemají magnetické vlastnosti, byl k přilepení na jejich povrch použit vosk, aby byl minimalizován nežádoucí pohyb snímače. Kompletní schéma měření je zobrazeno na obr. 42.



Obr. 42 Schéma provedeného experimentu.

Před začátkem testování byl proveden zkušební průjezd, kdy bylo zarovnáno čelo polotovaru a došlo ke kontrolnímu měření, kdy se zjišťovala správná kalibrace měřících přístrojů. Pomocí jednotlivých nástrojů, pak byl polotovar dělen na vzorky o rozměrech 130 x 5 x 2,4 mm, viz obr. 43. Dynamometr zaznamenával data se snímkovací frekvencí 4 000 Hz. Na akcelerometru byla nastavená snímkovací frekvence 8 192 Hz. Postupně byly měněny nástroje a nastavovány řezné podmínky dle Přílohy 1. Obráběno bylo vždy sousledně. Při každém vysunutí polotovaru a jeho přeupnutí, byly provedeny dva průjezdy a zároveň musela být pozměněna poloha snímače akcelerometru. Z důvodu nedostatku materiálu při testování nástroje č. 4 nedošlo k měření č. 47 a 48. Všechny vzorky byly následně zkoumány pod mikroskopem, aby byla zkoumána velikost otřepů po frézování.



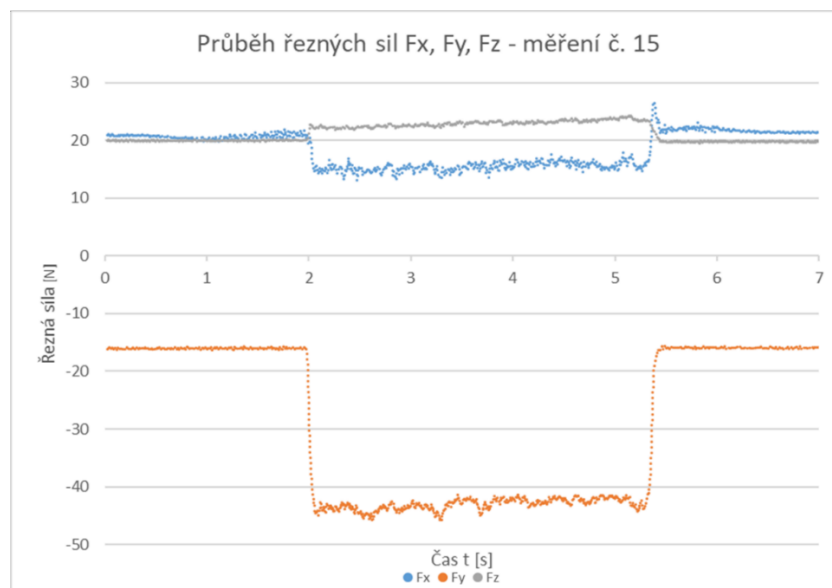
Obr. 43 Vzorek materiálu.

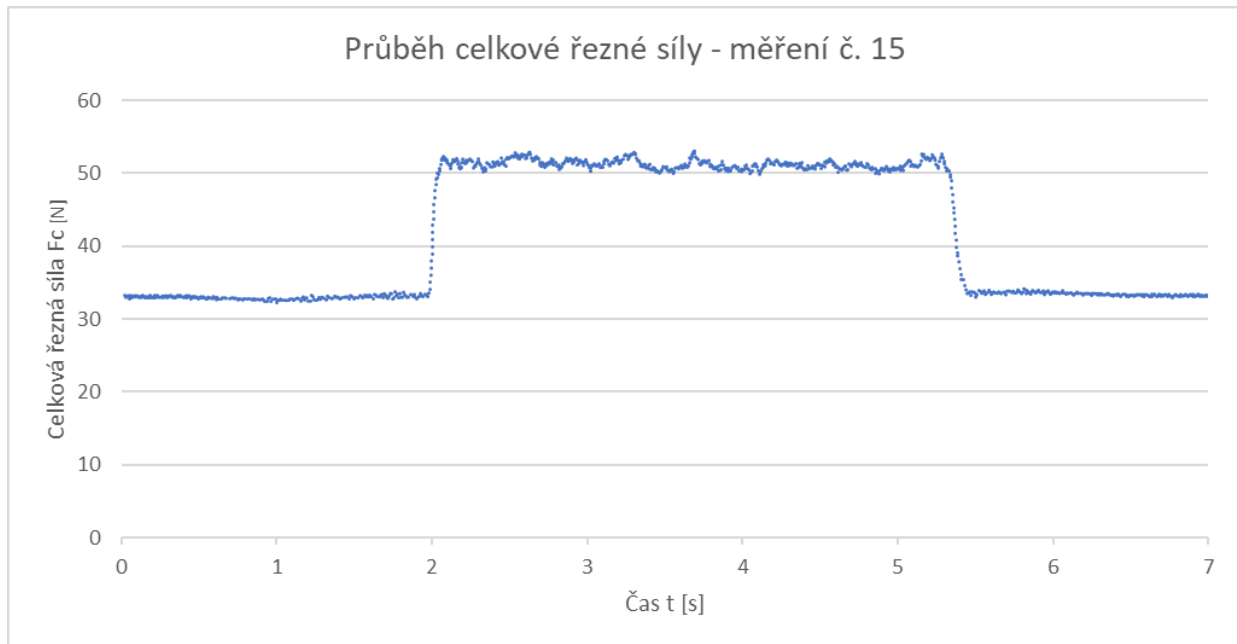
4.7 Vyhodnocení experimentu

Zaznamenaná data byla z dynamometru a akcelerometru byla exportována do formátu .txt. Velikosti řezných sil a zrychlení byly následně vyhodnoceny v softwaru Microsoft Excel. Pomocí programu Minitab hodnoty řezných sil analyzovaly a byly určeny faktory, jenž na ně mají největší vliv. Obdobným způsobem byly zkoumány i naměřené velikosti otřepů.

4.7.1 Řezná síla

Systém DynoWare zaznamenával průběh řezné síly F_x , F_y a F_z po dobu 12 s se snímkovací frekvencí 4 000 Hz, viz obr. 44. Pro každou složku řezné síly tedy zapsal 48 000 hodnot. Dle vztahu (3.6) byla dopočítána celková řezná síla F_c , jejíž průběh lze vidět na obr. 45. Nejvyšší řezná síla ($F = 59,06$ N) byla zaznamenána v měření č. 15 (nástroj č. 2, $n = 12\ 000$ min^{-1} , $f_z = 0,1$ mm), pro které byly vytvořeny grafy průběhu řezných sil. Nejvyšší hodnoty řezných sil F_c , F_x , F_y a F_z pro jednotlivá měření jsou uvedeny v Příloze 4.

Obr. 44 Graf průběhu řezných sil F_x , F_y , F_z u měření č. 15 získaných ze softwaru DynoWare.



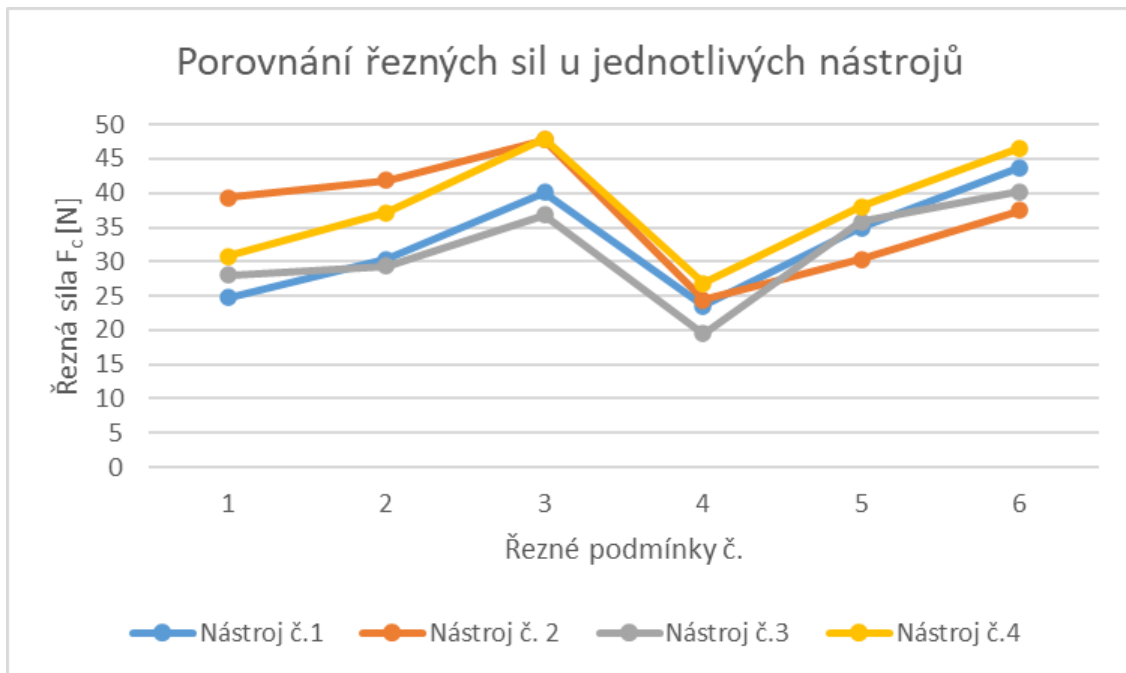
Obr. 45 Graf průběhu celkové řezné síly u měření č. 15.

Pro testování vzorků a nástrojů bylo celkově použito šest kombinací řezných podmínek. Měnily se velikosti otáček včetně a posuvu na zub. Všechny kombinace znázorňuje tab. 11. Pomocí počítačového programu Microsoft Excel byla pak porovnána naměřená data nejvyšších řezných sil pro dílčí nástroje za těchto řezných podmínek. Jelikož byly téměř pro každý nástroj za určitých řezných podmínek provedeny dvě měření, tak se tyto měření srovnaly a vytvořily se z naměřených hodnot aritmetické průměry, s nimiž se následně pracovalo.

Tab. 11 Kombinace řezných podmínek pro každý nástroj.

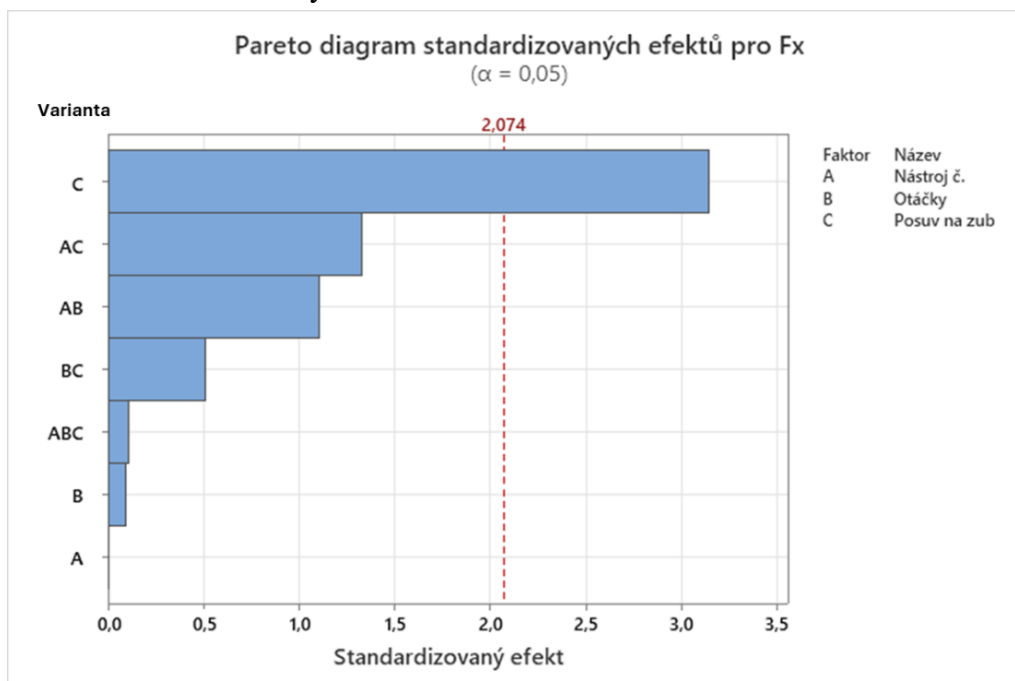
Řezné podmínky č. [-]	Otáčky včetně n (pro nástroj č. 4) [min^{-1}]	Posuv na zub f_z [mm]
1	12 000 (9 000)	0,050
2	12 000 (9 000)	0,075
3	12 000 (9 000)	0,100
4	14 000 (10 500)	0,050
5	14 000 (10 500)	0,075
6	14 000 (10 500)	0,100

Nejprve byly porovnány celkové řezné síly F_c pro jednotlivé nástroje za daných řezných podmínek, viz obr. 46. Z obrázku je patrné, že nejmenších hodnot řezných sil dosahovaly nástroje č. 1 a č. 3. Lze konstatovat, že řezná síla roste s rostoucím posuvem na zub. Tuto skutečnost graficky znázorňuje příložený graf.

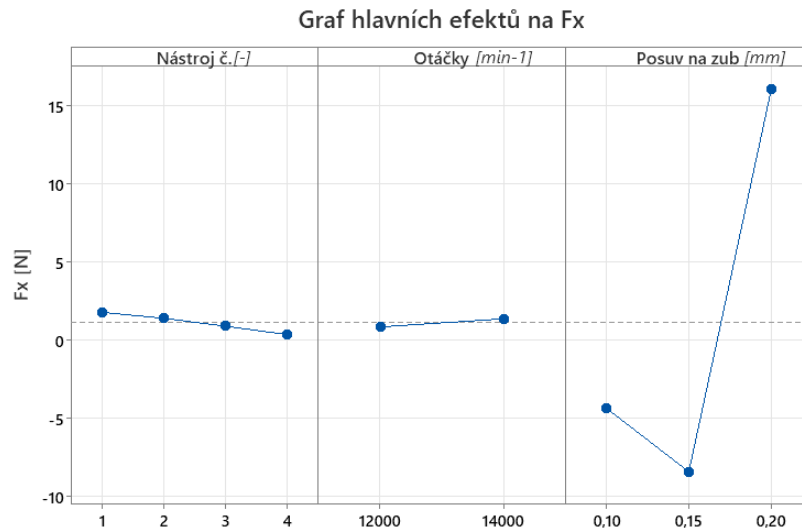


Obr. 46 Graf porovnání celkových řezných sil u jednotlivých nástrojů.

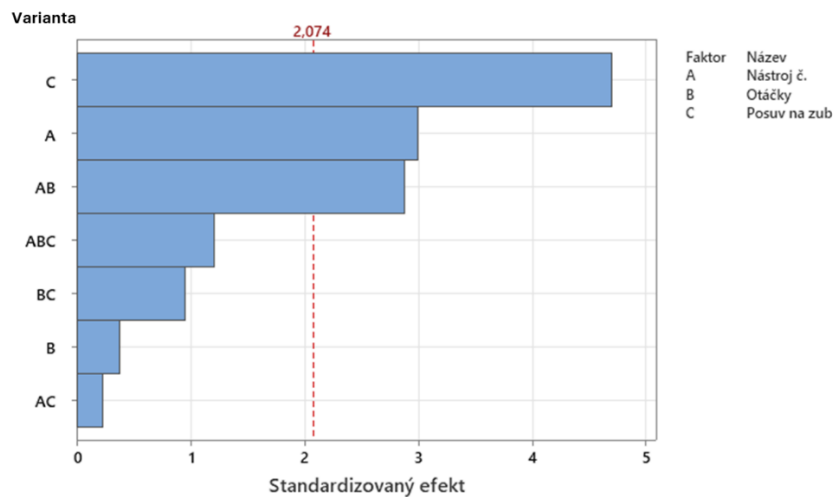
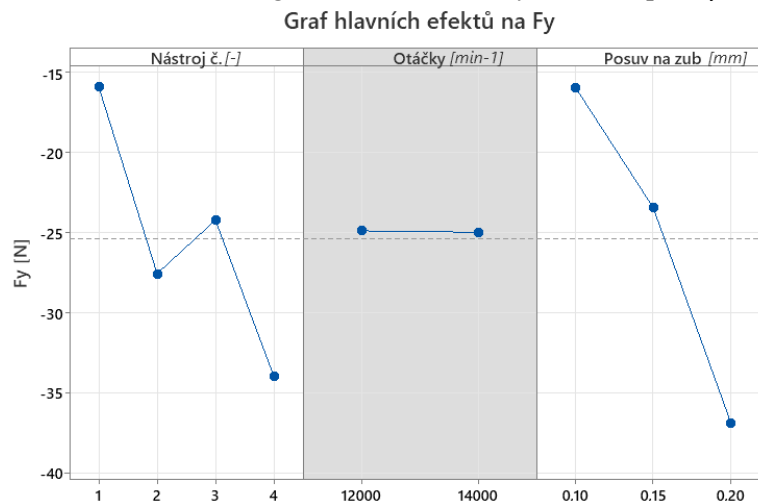
Pomocí programu Minitab pak byla zkoumána závislost jednotlivých složek řezné síly na jednotlivých faktorech. Pomocí metody ANOVA byl vyhodnocen vliv použitého nástroje, velikosti otáček a posuvu na zub na velikosti řezné síly. Z pareto diagramu pro sílu F_x (obr. 47) vyplývá, že jediným faktorem, který má statisticky prokazatelný vliv je posuv na zub. Hladina významnosti α byla standardně stanovena na 0,05. Na obr. 48 jsou graficky rozebrány souvislosti mezi dílčími faktory a silou F_x . Lze konstatovat, že zvolený nástroj a otáčky jsou irelevantní k velikosti řezné síly v ose x.



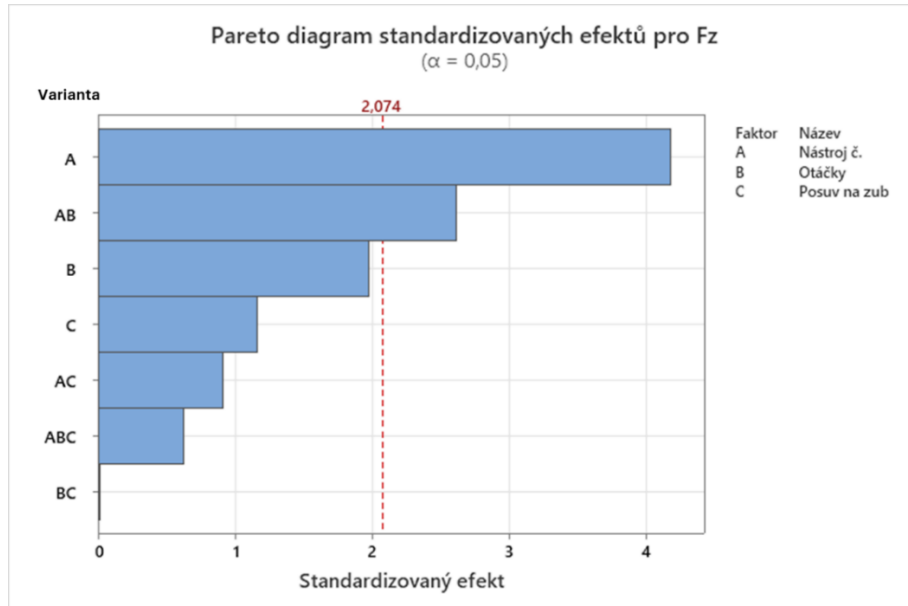
Obr. 47 Pareto diagram standardizovaných efektů pro F_x .


 Obr. 48 Graf hlavních efektů na F_x .

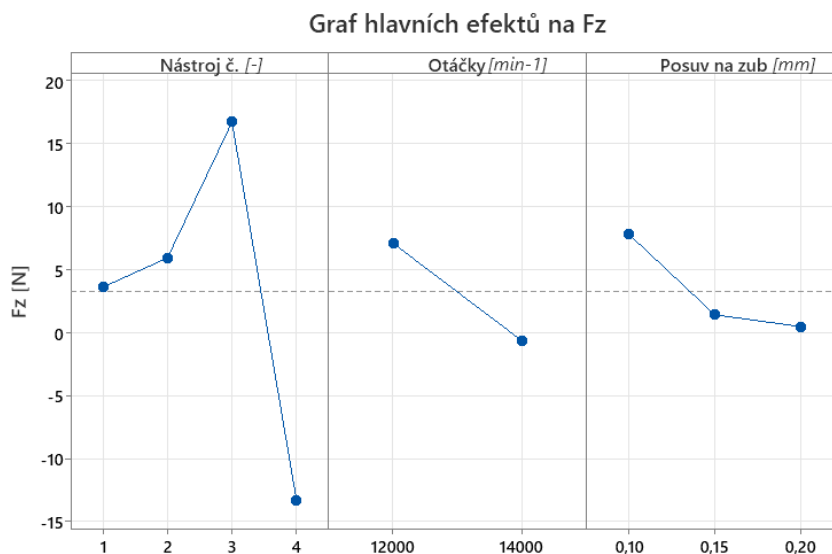
ANOVA analýza byla použita i při zkoumání síly F_y . Zde už se objevil vliv více faktorů, viz obr. 49. Největší dopad měl znovu posuv na zub, ovšem byla zjištěná i závislost na použitém nástroji. Z obr. 50 je patrné, že čím menší je posuv na zub, tím menší je velikost řezné síly v ose y. Současně lze prohlásit, že při použití nástroje č. 1 dosahuje síla F_y nejmenších hodnot.

 Pareto diagram standardizovaných efektů pro F_y
 $\alpha = 0,05$)

 Obr. 49 Pareto diagram standardizovaných efektů pro F_y .

 Obr. 50 Graf hlavních efektů na F_y .

Nakonec byla stejným způsobem zhodnocena řezná síla F_z . Zde se na obr. 51 ukázal dopad posuvu na zub jako statisticky neprůkazný, naopak jednoznačně byl vidět vliv použitého nástroje. Velikost otáček byla významnější než u předchozích sil a v kombinaci s nástrojem byl její význam patrný. Opět bylo nejmenších řezných sil dosaženo při frézování nástrojem č. 1, viz obr. 52.



Obr. 51 Pareto diagram standardizovaných efektů pro F_z .



Obr. 52 Graf hlavních efektů na F_z .

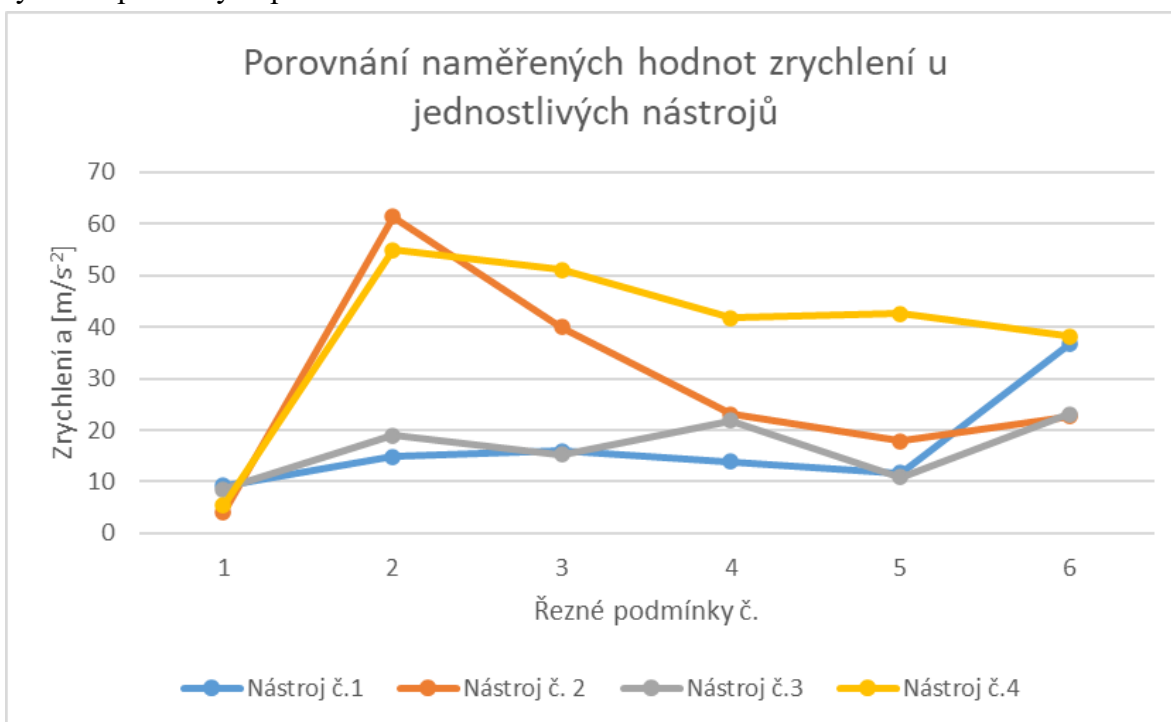
4.7.2 Zrychlení

Software RT Pro Photon zapisoval průběh zrychlení \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y , \mathbf{a}_z se snímkovací frekvencí 8 192 Hz. Čím větší naměřené zrychlení, tím větší jsou vibrace na obrobku. Snímač akcelerometru byl při prvních šesti měřeních každého nástroje umístěn na povrchu obrobku. U dalších šesti měření, kde se opakovaly řezné podmínky, musel být snímač akcelerometru umístěn na plochu dynamometru z důvodu nedostatku materiálu. Při vyhodnocování dat zrychlení byly tedy v úvahu brány pouze hodnoty z měření č. 1. – 6.; 13. – 18.; 25. – 30.; 37. – 42. Z naměřených hodnot byla dopočítáno celkové zrychlení \mathbf{a} , jehož průběh je znázorněn na obr. 53. Z uvedených měření bylo největší zrychlení ($a = 61,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) zjištěno u měření č. 13 (nástroj č. 2, $n = 12\,000 \text{ min}^{-1}$, $f_z = 0,05 \text{ mm}$).



Obr. 53 Graf průběhu zrychlení u měření č. 13.

Obdobně jako při vyhodnocování dat řezných sil i zde byly pomocí programu Microsoft Excel porovnány maximální hodnoty zrychlení za stejných řezných podmínek, které jsou uvedeny v tab. 11. Toto porovnání je zobrazeno na obr. 54. Z grafu vyplývá, že nejnižší hodnoty zrychlení byly naměřeny při testování nástrojů č. 1 a č. 3. Tyto nástroje dopadly nejlépe i při vyhodnocování řezných sil. U nástrojů č. 2 a č. 4 došlo k výraznému nárůstu celkového zrychlení při řezných podmínkách č. 2.



Obr. 54 Graf porovnání celkového zrychlení u jednotlivých nástrojů.

4.7.3 Velikost otřepů

Nejdůležitějším parametrem, který byl zkoumán v diplomové práci byla velikost a výskyt otřepů. Tato velikost byla klíčová pro vyhodnocení experimentu. Měření bylo provedeno na stereomikroskopu Schut SSM-3E (obr. 55), kdy byl nejprve zaznamenán snímek. Pomocí počítačového programu DinoCapture 2.0 byla poté určena šířka vzorku a další nezbytné parametry, viz obr. 56. Dle vztahu (3.2) se pak dopočítala velikost otřepu h_b . Všechny změřené a dopočítané hodnoty jsou v Příloze 6.

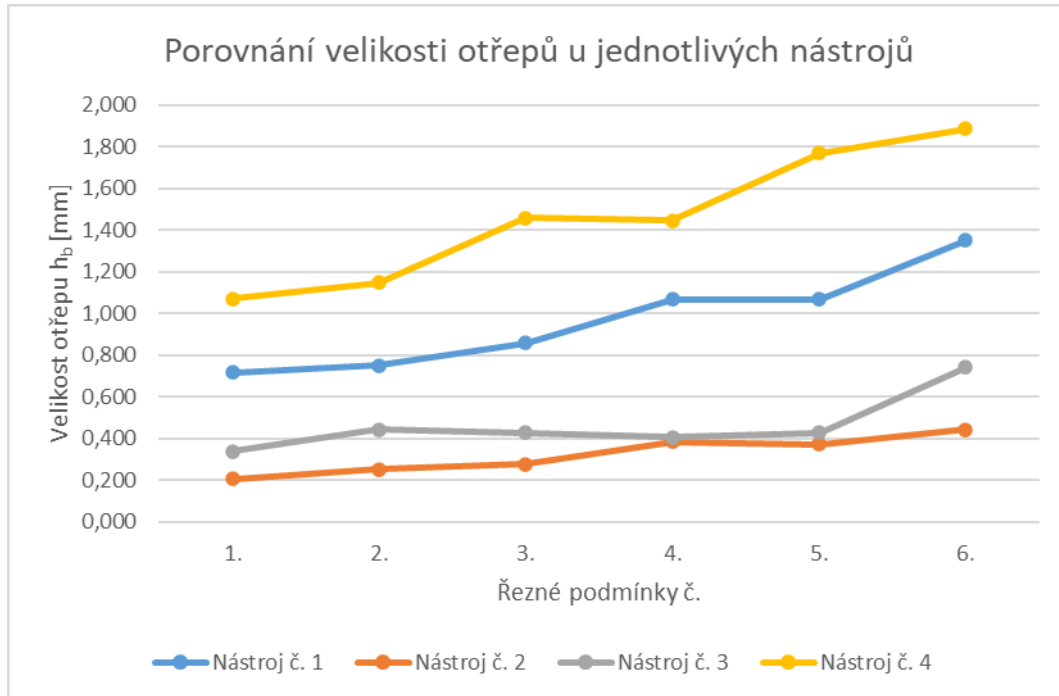


Obr. 55 Měření otřepů na stereomikroskopu Schut SSM-3E.



Obr. 56 Určení velikosti šířky vzorku a otřepu v programu DinoCapture 2.0 – měření č. 7.

Pomocí softwaru Microsoft Excel byly znovu vyhodnoceny naměřené parametry. Opět byly porovnány dílčí nástroje za stejných řezných podmínek dle tab. 11. Velikost otřepu byla nejmenší ($h_b = 0,207 \text{ mm}$) u nástroje č. 2 při $n = 12\,000 \text{ min}^{-1}$, $f_z = 0,05 \text{ mm}$. Z grafu (obr. 57) je dále patrné, že rozdíly mezi nástrojem č. 4 a zbytkem jsou zcela značné. Zároveň je možné u všech nástrojů sledovat závislost velikosti otřepu na posuvu na zub a otáčkách vřetene.



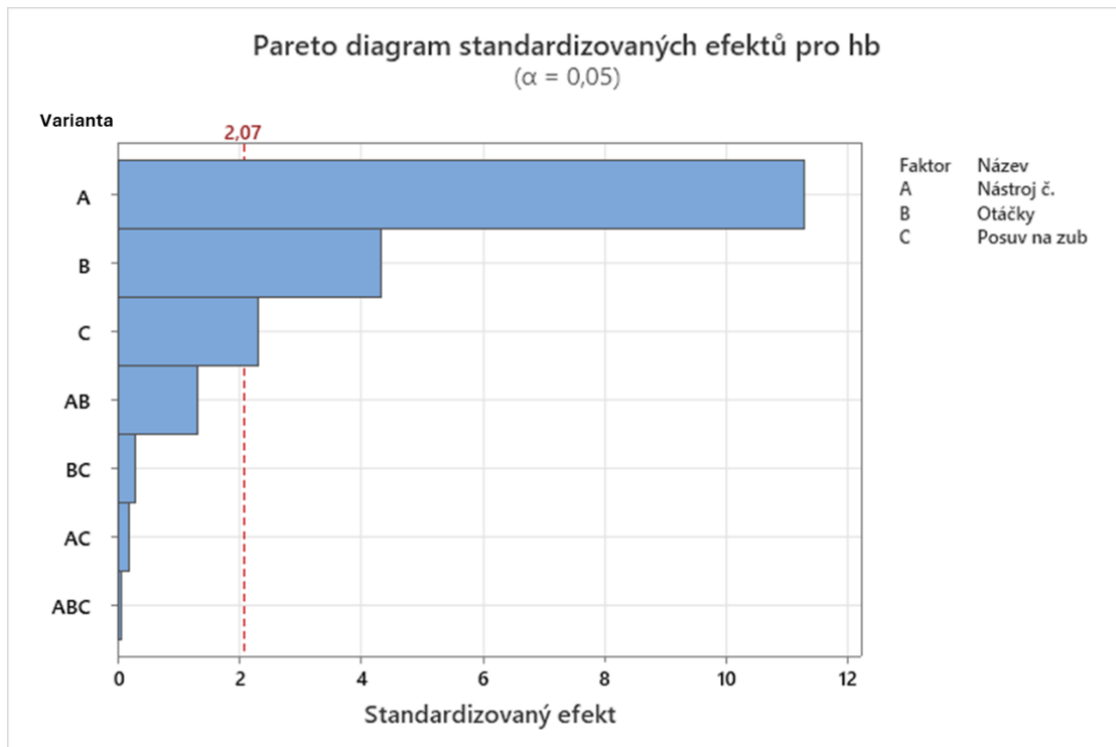
Obr. 57 Graf srovnání velikosti otřepů u jednotlivých nástrojů.

Ještě výstižněji znázorňuje rozdíly mezi četností a velikostí otřepů obr. 58, kde je jasně vidět, jak se liší vzorky, které byly frézovány za stejných řezných podmínek, ale jiným nástrojem. U všech nástrojů lze pozorovat tvorbu otřepů na horní hraně vzorku. U nástroje č. 3 se místy objevují otřepy i na spodní hraně. Z obrázku je jednoznačné, že nejkvalitněji obroběný povrch je po nástroji č. 2, kde otřepy téměř nelze pozorovat pouhým okem.

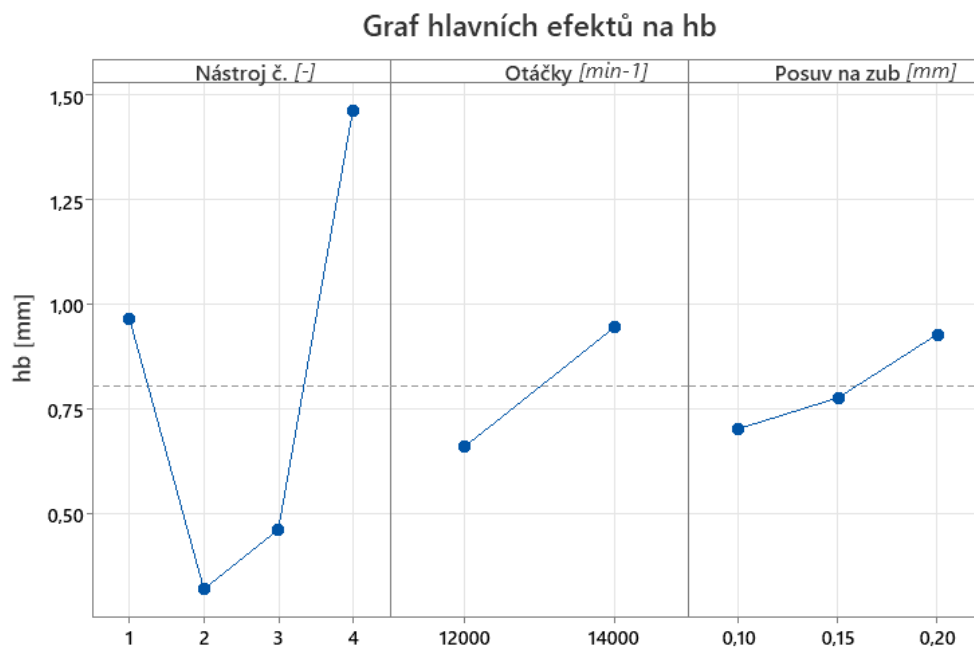


Obr. 58 Otřepy vzorků při frézování za stejných řezných podmínek – měření č. 4, 16, 28, 40.

Aby bylo zjištěno, jak velký význam mají dílčí faktory na velikost otřepu h_b byla provedena ANOVA analýza. Z pareto diagramu (obr. 59) lze pozorovat závislost na všech třech vstupních faktorech. Z daleka největší je však vliv použitého nástroje. Graf na obr. 60 potvrzuje, že velikost otřepů byla zjištěna nejmenší po obrábění nástrojem č. 2.



Obr. 59 Pareto diagram standardizovaných efektů pro h_b .



Obr. 60 Graf hlavních efektů na h_b .

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole byly vybrané nástroje porovnány z pohledu všech naměřených parametrů, aby bylo možné stanovit ten nejvíce vyhovující. Zvolené řezné podmínky měly při testování rovněž svůj zřetelný význam. Složky řezné síly F_x a F_y byly nejvíce ovlivněny velikostí posuvu na zub. Oproti tomu hodnota řezné síly F_z závisela hlavně na použitém nástroji. Celkově byly nejmenší řezné síly změřeny na nástroji č. 1, naopak nejvyšších řezných sil bylo dosaženo při použití nástroje č. 4. Rozdíly však nebyly nijak značné a maximální hodnoty se pohybovaly v nižších desítkách newtonů.

Pomocí akcelerometru se poté určila velikost zrychlení na obrobku, které určovalo míru vibrací. Z naměřených dat vyplývá, že nejmenší vibrace byly objeveny při obrábění nástrojem č. 1. Nejhůře opět dopadla fréza č. 4, kde byly vibrace nejpatrnější. Obdobně jako u řezných sil, ani zde však nedosahovaly hodnoty zrychlení kritických hodnot. Odchylka mezi dílčími nástroji při stejných řezných podmínkách nebyla, až na jednu výjimku (řezné podmínky č. 2), nijak významně velká.

Dalším krokem bylo hodnocení výskytu a velikosti otřepů po obrábění. Pomocí ANOVA analýzy bylo zjištěno, že vliv na výskyt otřepů měl primárně použitý nástroj. Rozdíly byly patrné už při pohledu pouhým okem. Nejvyššího povrchu bylo dosaženo po obrábění kompresními frézami, tedy nástroji č. 2 a č. 3. Oproti tomu frézy s pozitivní geometrií, nástroje č. 1 a č. 4, vykazovaly velké množství otřepů. Nejmenších velikostí otřepů bylo naměřeno při použití nástroje č. 2 a řezných podmínek $n = 12\,000\text{ min}^{-1}$, $f_z = 0,05\text{ mm}$. U těchto řezných podmínek ovšem frézování trvá nejdéle. Z ekonomického pohledu je tedy vhodnější zvolit vyšší otáčky a posuv na zub, jelikož při použití kompresních fréz nebyl nárůst velikosti otřepu mezi zvolenými řeznými podmínkami tak markantní.

Vzhledem ke skutečnosti, že odstraňování otřepů sebou nese další náklady, je minimalizace jejich tvorby v průmyslu velmi důležitá. Z tohoto důvodu v této diplomové práci představuje tvorba a velikost otřepů rozhodující faktor při hodnocení vybraných nástrojů. Na základě dříve uvedených výsledků z testování vyšel nejlépe nástroj č. 2, jehož cena je 608 Kč. Doporučené je i použití nástroje č. 3, kde byla míra velikosti a výskytu otřepů jenom mírně větší a jeho cena je 605 Kč. Na základě ceny nástrojů a odhadovaných nákladů na odstranění otřepů byly spočítány celkové náklady na nástroj na 1 metr řezu. Tyto náklady byly určeny pro jednotnou řeznou rychlost, a to $v_c = 226\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Tato hodnota odpovídá otáčkám $12\,000\text{ min}^{-1}$ prvních třech nástrojů, respektive $9\,000\text{ min}^{-1}$ pro nástroj č. 4. Zvolená trvanlivost nástrojů byla pro všechny stejná, konkrétně 15 minut. Náklady na odstranění otřepů byly určeny dle četnosti otřepů po obrábění dílčími nástroji. Zvolené a vypočítané hodnoty jsou v tab. 12. Níže jsou uvedeny vztahy a příklad výpočtu pro nástroj č. 1.

$$\begin{aligned}
 L_c &= v_c \cdot T \\
 &= 226 \cdot 15 = 3\,390\text{ m} \\
 \text{kde: } L_c &\text{ – celková délka řezu [m],} \\
 T &\text{ – trvanlivost nástroje [min].}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}
 C_{n1} &= \frac{C_n}{L_c} \\
 &= \frac{591,5}{3\,390} = 0,174\text{ Kč} \\
 \text{kde: } C_{n1} &\text{ – cena nástroje na 1 metr řezu [Kč],} \\
 C_n &\text{ – cena nástroje [Kč].}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

$$N_c = C_{n1} \cdot N_o \quad (5.3)$$

$$= 0,174 \cdot 9 = 1,566 \text{ Kč}$$

kde: N_c – celkové náklady na 1 metr řezu [Kč],
 N_o – náklady na odstranění otřepů [Kč·m¹].

Tab. 12 Zvolené a vypočítané hodnoty pro jednotlivé nástroje.

	Nástroj č. 1	Nástroj č. 2	Nástroj č. 3	Nástroj č. 4
Řezná rychlost v_c [m·min ⁻¹]	226	226	226	226
Trvanlivost nástroje T [min]	15	15	15	15
Cena nástroje C_n [Kč]	591,5	608,0	605,0	848,0
Cena nástroje na 1 metr řezu C_{n1} [Kč]	0,174	0,179	0,178	0,250
Náklady na odstranění otřepů N_o [Kč·m ¹]	9	3	6	15
Celkové náklady na 1 metr řezu N_c [Kč]	1,566	0,537	1,071	3,752

Z provedených výpočtů vyplývá, že nejlevnější je obrábění nástrojem č. 2, u kterého vychází celkové náklady na 1 metr řezu 0,537 Kč. U nástroje č. 3 tyto náklady činí 1,071 Kč a z ekonomického hlediska by se i tato fréza vyplatila. Naopak při obrábění nástrojem č. 4 jsou náklady nejvyšší, a to 3,752 Kč na jeden metr řezu.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala obráběním bio-kompozitních materiálů se zaměřením na technologii frézování. V rešerši byly popsány bio-kompozity, jejich použití, výroba a zpracování. Teoretická část se dále zaměřila na jednotlivé technologie obrábění a na konkrétní výsledky již dříve provedených experimentů. Na jejich základě byly navrženy řezné podmínky a zvoleny testované nástroje.

Celkem byly vybrány čtyři frézy, které se používají v dřevoobrábění. Jednalo se konkrétně o dvě frézy s pozitivní geometrií a dvě frézy kompresní, jenž má kombinovanou (pozitivně-negativní) geometrii. Cílem bylo zjistit, zda kompresní frézy dokážou při frézování kompozitu s přírodními vlákny dosáhnout stejně dobrých výsledků jako při obrábění dřeva. Hodnoty otáček vřetene byly zvoleny pouze dvě, a to 12 000 a 14 000 min^{-1} . Posuv na zub, který se ve všech studiích jevil jako nejdůležitější a nejvlivnější parametr, měl pak tři velikosti (0,050; 0,075; 0,100 mm).

Tyto nástroje za uvedených řezných podmínek byly testovány při obrábění kompozitu s lněnými vlákny FlaxDry-BL200, twill 2 x 2. Experiment byl proveden na CNC frézce FV 25 CNC A. Během frézování byly zaznamenávány působící síly pomocí dynamometru Kistler 9257B a průběh zrychlení byl měřen pomocí akcelerometru Bruel&Kjaer 4525-B. Po dokončení obrábění byly dílčí vzorky zkoumány pod stereomikroskopem Schut SSM-3E, aby byla zjištěna velikost otřepů.

Naměřené složky řezných sil F_x , F_y a F_z byly použity k výpočtu celkové řezné síly F_c . Nejvyšší hodnota ($F_c = 59,06 \text{ N}$) byla zjištěna při použití nástroje č. 2, otáčkách 12 000 min^{-1} a posuvu na zub 0,1 mm. Z ANOVA analýzy bylo zjištěno, že největší vliv na síly F_x a F_y měl posuv na zub, kdy z její rostoucí velikostí rostly i řezné síly. Naopak síla F_z byla nejvíce závislá na použitém nástroji.

Analýza změřených dat zrychlení ukázala, že nejnižších vibrací bylo získáno v průběhu obrábění nástrojem č. 1. Nejvyšší hodnoty zrychlení ($a = 61,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) bylo naopak dosaženo frézováním nástrojem č. 2 při otáčkách 12 000 min^{-1} a posuvu na zub 0,05 mm. Vzhledem k tomu, že hodnoty řezných sil a zrychlení dosahovaly nižších hodnot, nebyly tyto data tak důležité při konečném hodnocení jednotlivých nástrojů.

Největší rozdíly ve výkonu vybraných nástrojů byly pozorovány u měření velikosti otřepů zbylých po frézování. Na první pohled byla vidět odlišnost v kvalitě povrchu, kdy vzorky obráběné frézami s pozitivní geometrií (nástroje č. 1 a č. 4) vykazovaly vysokou četnost otřepů. Naopak po obrobení kompresními frézami (nástroje č. 2 a č. 3) byly měřené velikosti otřepů značně menší. Vůbec nejmenší byla tato velikost $h_b = 0,207 \text{ mm}$ dosažena nástrojem č. 2 při otáčkách 12 000 min^{-1} a posuvu na zub 0,05 mm. ANOVA analýza pak potvrdila, že největší vliv na velikost a tvorbu otřepů na bio-kompozitním vzorku měl použitý nástroj.

Z provedeného ekonomického hodnocení byl vyvozen závěr, že odstraňování otřepů by vyžadovalo další dokončovací operaci, která by ještě zvýšila náklady. Proto byly jako nejvhodnější nástroje určeny kompresní frézy. Nejlépe vyšla z testování fréza SM01.06.022.060.06R výrobce ITA Tools, u níž byly náklady na 1 metr řezu 0,537 Kč. Doporučené je i použití frézy C19308111 od IGM nástroje a stroje, kde tyto náklady činily 1,071 Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
 - [2] KUMAR, Brajesh (ed.). *Biocomposites*. Online. London: IntechOpen, 2022. ISBN 9781839690815. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.92504>. [cit. 2025-01-23].
 - [3] *Composite CNC Machining: A Detailed Overview*. Online. In: AT PRECISION MACHINING. AT-Machining. 2024. Dostupné z: <https://at-machining.com/composite-cnc-machining/>. [cit. 2025-01-23].
 - [4] EASY COMPOSITES EU. *200g 2x2 Twill Flax Fibre Cloth (1000mm)*. Online. EASY COMPOSITES EU. Easy Composites. C2025. Dostupné z: <https://www.easycomposites.eu/200g-22-twill-flax-fibre-cloth>. [cit. 2025-04-05].
 - [5] GRM SYSTEMS S.R.O. *Pryskyřice a tužidla*. Online. GRM SYSTEMS S.R.O. GRM Systems. C2025. Dostupné z: http://www.grm-systems.cz/pryskyrice-tuzidla#epoxidove_pryskyrice. [cit. 2025-04-05].
 - [6] GOFROJ, Zbyněk. *TECHNICAL DATA SHEET*. Online. In: ROMAR-VOSS COMPOSITES. Romar-Voss. 2021, 2023. Dostupné z: <https://romar-voss.nl/downloads/tds/tds---lg-700---hg-700-m,-700-f,700,-737,-hg-700-s.pdf>. [cit. 2025-04-05].
 - [7] *Biocomposites*. Online. In: MaterialDistrict. 2020. Dostupné z: <https://materialdistrict.com/material/biocomposites/>. [cit. 2025-01-24].
 - [8] JEFFERSON ANDREW, J. a DHAKAL, H.N. Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review. Online. *Composites Part C: Open Access*. 2022, roč. 7, č. 100220, s. 1-20. ISSN 2666-6820. Dostupné z: Elsevier, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>. [cit. 2025-01-23].
 - [9] *Surové lněné vlákno stock fotografie*. Online. In: IStockphoto LP. 2017. Dostupné z: <https://www.istockphoto.com/cs/fotografie/surov%C3%A9-ln%C4%9Bn%C3%A9-vm%C3%A1lno-gm646167566-117200491>. [cit. 2025-01-24].
 - [10] *Rostlinná přírodní vlákna, jutové vlákno bílé prané 300g*. Online. In: Floristik24. C2025. Dostupné z: <https://www.floristik24.cz/roslinna-prirodni-vlakna-jutove-vlakno-bile-prane-300g>. [cit. 2025-01-24].
 - [11] *Sisálové vlákno 30g přírodní (bílé)*. Online. In: Zahrádkářské potřeby e-shop. C2010. Dostupné z: <https://www.zahradkarske-potreby.cz/sisalove-vlakno-30g-prirodni-bile-ean004947-skup988259.php>. [cit. 2025-01-24].
 - [12] *KONOPNÉ VLÁKNO*. Online. In: Farma Lapka. C2020. Dostupné z: <https://www.farmalapka.cz/home/konopne-vlakno/>. [cit. 2025-01-24].
 - [13] CAMPBELL, F.C. a CAMPBELL, F.C. Matrix Resin System. Online. In: *Structural Composite Materials Display Table of Contents*. Ohio: ASM International, 2010, s. 63-99. ISBN 978-1-61344-124-4. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpSCM00001/cid:kt008N7IW2/viewerType:khtml/root_slug:structural-composite/url_slug:matrix-resin-systems?&b-toc-cid=kpSCM00001&b-toc-root-slug=structural-composite&b-toc-title=Structural%20Composite%20Materials&b-toc-url-slug=introduction-composite&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=1. [cit. 2025-01-29].
-

-
- [14] KAR, Kamal K. (ed.). *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*. Online. Berlin: Springer Books, 2017. ISBN 978-3-662-49512-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8>. [cit. 2025-01-29].
- [15] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493-0585-3.
- [16] ZOUHAR, Jan. *Kompozitní materiály*. Online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2021. [cit. 2025-01-23].
- [17] *Composite Manufacturing Process: How are Composites Manufactured?* Online. In: Piran Advanced Composites. 26 September 2023. Dostupné z: <https://pirancomposites.com/news/composite-manufacturing-process/>. [cit. 2025-01-29].
- [18] ŠINDELÁŘ, Martin. *Výroba součástí z kompozitních materiálů*. Online. In: SlidePlayer. C2025. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/17340210/>. [cit. 2025-01-30].
- [19] *Filament Winding*. Online. In: AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION. CompositesLab. C2025. Dostupné z: <https://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/filament-winding/index.html>. [cit. 2025-01-30].
- [20] *Pultruze (tažení)*. Online. In: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. C2025. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>. [cit. 2025-01-30].
- [21] *Vacuum Infusion Processing*. Online. In: AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION. CompositesLab. C2025. Dostupné z: <https://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/vacuum-infusion-processing/index.html>. [cit. 2025-01-30].
- [22] ROGERS, Chris. *Composite Manufacturing Methods*. Online. In: Explore Composites! articles, videos, photos. C2024, 2021. Dostupné z: <https://explorecomposites.com/articles/design-for-composites/basics-manufacturing-methods/>. [cit. 2025-01-29].
- [23] *Biocomposite*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2025. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Biocomposite>. [cit. 2025-02-04].
- [24] *Future Materials: The Architecture of Biocomposites*. Online. In: ArchDaily. 4 August, 2022. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/986111/future-materials-the-architecture-of-biocomposites>. [cit. 2025-02-04].
- [25] TETI, R. Machining of Composite Materials. Online. *CIRP Annals*. 2002, roč. 51, č. 2, s. 611-634. ISSN 0007-8506. Dostupné z: Elsevier, [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X). [cit. 2025-01-23].
- [26] MAŠEK, Petr. *Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí*. Online, Disertační práce, vedoucí František Holešovský. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2019. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/82082>. [cit. 2025-01-23].
- [27] Obrábět kompozity je umění. Online. *Technický týdeník*. 2013. Dostupné z: Technický týdeník, https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/obrabet-kompozity-je-umeni_20078.html. [cit. 2025-01-23].
-

-
- [28] SLANÝ, Martin; DVOŘÁKOVÁ, Jana a DVOŘÁK, Jaromír. Nekonvenční technologie obrábění. Online. *TechMagazín*. C2010-2025. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2332>. [cit. 2025-02-07].
- [29] HUANG, Tao a BOBYR, Mykola. A Review of Delamination Damage of Composite Materials. Online. *Journal of Composites Science*. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jcs7110468>. [cit. 2025-02-07].
- [30] RATHOD, Dhruv; RATHOD, Mihir a PATEL, Ronak. A review on strengthening, delamination formation and suppression techniques during drilling of CFRP composites. Online. *Cogent Engineering*. 2021, s. 1-24. Licence: CC BY 4.0. ISSN 2331-1916. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1941588>. [cit. 2025-02-18].
- [31] ÇELIK, Yahya Hışman a ALP, Mehmet Suat. Determination of Milling Performance of Jute and Flax Fiber Reinforced Composites. Online. *Journal of Natural Fibers*. 2022, roč. 19, č. 2, s. 782–796. Dostupné z: Taylor and Francis Online, <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764435>. [cit. 2025-01-23].
- [32] *Metoda okamžitého a přesného měření otřepů*. Online. In: KEYENCE CORPORATION. KEYENCE INTERNATIONAL. C2025. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/measurement-solutions/metal-burr.jsp>. [cit. 2025-05-14].
- [33] *Jak vyřešit otřepy?* Online. In: Shenyang Elite Machinery and Equipment. 6 April 2021. Dostupné z: <https://cz.eltcncmachine.com/info/how-to-solve-burr-71508014.html>. [cit. 2025-05-14].
- [34] *Běžné metody odstraňování otřepů*. Online. In: SUGINO CORP. Sugino Corp. C2025. Dostupné z: <https://cs.suginocorp.com/blog/common-deburring-methods/>. [cit. 2025-05-14].
- [35] SHEIKH-AHMAD, Jamal a DAVIM, Paulo J. Cutting and Machining of Polymer Composites. Online. *Encyclopedia of Composites*. 2012. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc061>. [cit. 2025-02-18].
- [36] VÁŇA, Martin; DVOŘÁČKOVÁ, Štěpánka; KNÁPEK, Tomáš a KROISOVÁ, Dora. Elimination of Delamination during the Drilling of Biocomposite Materials with Flax Fibers. Online. *Polymers 2024*. 2024, vol. 16, no. 18, article 2620. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym16182620>. [cit. 2025-02-21].
- [37] DIAZ-ALVAREZ, A.; DIAZ-ALVAREZ, J.; FEITO-SÁNCHEZ, N. a SANTIUSTE, C. Drilling of biocomposite materials: Modelling and experimental validation. Online. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2021, vol. 106, article 102203, s. 1-15. ISSN 1569-190X. Dostupné z: Elsevier, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102203>. [cit. 2025-02-21].
- [38] *Sousledné frézování nebo nesousledné frézování*. Online. In: SANDVIK CZ S.R.O. Sandvik Coromant. C2025. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>. [cit. 2025-02-25].
- [39] *Řezné podmínky při frézování*. Online. In: Elektronická učebnice. C2025. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/rezne-podminky-pri-frezovani>. [cit. 2025-02-27].
- [40] ÇELIK, Yahya H; KILICKAP, Erol a KILICKAP, Ali Imran. An experimental study on milling of natural fiber (jute)- reinforced polymer composites. Online. *Journal of Composite Materials*. 2019, vol. 53, no. 22, s. 3127-3137. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0021998319826373>. [cit. 2025-02-25].
-

-
- [41] CHEGDANI, Faissal a EL MANSORI, Mohamed. Tribo-functional effects of double-crossed helix on surface finish, cutting friction and tool wear mechanisms during the milling process of natural fiber composites. Online. *Wear*. 2019, roč. 426-427, s. 1507-1514. ISSN 0043-1648. Dostupné z: Elsevier, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.026>. [cit. 2025-01-23].
- [42] RAVEEN, John; LIN, Richard; JAYARAMAN, Krishnan a BHATTACHARYYA, Debes. Effect of reinforcements in chip forming mechanisms of discontinuous natural fiber composites while milling. Online. *Composites Communications*. 2022, roč. 31, č. 101099, s. 1507-1514. ISSN 2452-2139. Dostupné z: Elsevier, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101099>. [cit. 2025-01-23].
- [43] CAMERON, Jim. *Choosing the Ultimate Spiral Router Bit: Up-cut vs Down-cut vs Compression*. Online. In: FINDBUYTOOL. FindBuyTool Woodworking Tools. 22 March 2024. Dostupné z: <https://www.findbuytool.com/en-cz/blogs/university/choosing-the-ultimate-spiral-router-bit-up-cut-vs-down-cut-vs-compression>. [cit. 2025-04-08].
- [44] *Compression Cutters: A Comprehensive Guide*. Online. In: PANEL TOOLS. CNC Tools. 26 July 2023. Dostupné z: <https://paneltools.com.au/compression-cutters-guide/#:~:text=Compression%20cutters%20are%20primarily%20used,soft%20to%20medium%2Dhard%20materials..> [cit. 2025-04-08].
- [45] *2P350-0600-OA OI2M: Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura pro frézování hran a obrysů*. Online. In: SANDVIK CZ S.R.O. Sandvik Coromant. C2025. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/product-details?c=2P350-0600-OA%20%20%20%20%20%20%20%20OI2M&m=7254438>. [cit. 2025-04-09].
- [46] *Diamond Router Bits for NESTING*. Online. In: FRAISER S.R.L. Fraiser tools. C2025. Dostupné z: <https://www.fraiser tools.com/en/diamond-router-bits-for-nesting.html>. [cit. 2025-04-09].
- [47] BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; SADÍLEK, Marek; PETŘKOVSKÁ, Lenka a NOVÁKOVÁ, Jana. *Nové směry v progresivním obrábění*. Online, učební text. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>. [cit. 2025-05-06].
- [48] *Praktika experimentálních metod v obrábění*. Online. In: ZČU. Fakulta strojní. C1991-2025. Dostupné z: <https://www.kto.zcu.cz/cs/Department/Utilities/Praktika/index.html>. [cit. 2025-05-06].
- [49] PERIYAPPILLAI, Gopi; SUBBARAYAN, Sathiyamurthy a SENGOTTAIYAN, Saravanakumar. Advanced ensemble machine learning prediction to enhance the accuracy of abrasive waterjet machining for biocomposites. Online. *Materials Chemistry and Physics*. 2025, roč. 333, č. 130175, s. 1-23. ISSN 0254-0584. Dostupné z: Elsevier, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130175>. [cit. 2025-01-23].
- [50] *Řezání vodním paprskem*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2025. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98ez%C3%A1n%C3%AD_vodn%C3%ADm_paprskem. [cit. 2025-02-28].
- [51] MURTHY, B.R.N.; MAKKI, Emad; POTTI, Srinivasa Rao; HIREMATH, Anupama; BOLAR, Gururaj et al. Optimization of Process Parameters to Minimize the Surface Roughness of Abrasive Water Jet Machined Jute/Epoxy Composites for Different Fiber Inclinations. Online. *Journal of Composites Science*. 2023, vol. 7, no. 12, s. 498-516. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jcs7120498>. [cit. 2025-02-28].
-

-
- [52] SINGH, Quiberk Jeeva a RAJAMURUGAN, G. Experimental study on abrasive water jet machining of WCFC reinforced flax/wire mesh/hemp composite. Online. *Journal of Industrial Textiles*. 2022, roč. 52, s. 1-19. Dostupné z: Sage Journals, <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/15280837221121961>. [cit. 2025-01-23].
- [53] DHAKAL, Hom Nath; ISMAIL, Sikiru Oluwarotimi; OJO, Saheed Olalekan; PAGGI, Marco a SMITH, James R. Abrasive water jet drilling of advanced sustainable bio-fibre-reinforced polymer/hybrid composites: a comprehensive analysis of machining-induced damage responses. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 99, č. 9-12, s. 2833-2847. Dostupné z: ProQuest, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2670-x>. [cit. 2025-01-23].
- [54] *Design of Experiments - DoE*. Online. In: DATATAB E.U. DATAtab: Online Statistics Calculator. Graz, Austria, 2025. Dostupné z: <https://datatab.net/tutorial/design-of-experiments>. [cit. 2025-04-24].
- [55] KENTON, Will. *What Is Analysis of Variance (ANOVA)?: How To Use This Statistical Analysis Tool*. Online. In: Investopedia. C2025, 30 July, 2024. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/a/anova.asp>. [cit. 2025-04-24].
- [56] MAJCHRÁK, Aleš. *Výroba kompozitu pro balistické účely*. Online, Diplomová práce, vedoucí Jan Zouhar. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145747>. [cit. 2025-04-05].
- [57] *Tos Olomouc FV 25 CNC A*. Online. EXAPRO S.A.R.L. Exapro. C2004-2025. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/sp/tosolomouc-fv25cnca-26483/>. [cit. 2025-05-05].
- [58] *ZP-10/X - zrychlovací přístroj*. Online. NAREX MTE S.R.O. NAREX MTE. C2016. Dostupné z: https://www.narexmte.cz/system/czMTE_vcc2C3_01BB.htm. [cit. 2025-05-05].
- [59] *ITA 191|SB01 Z2 dokončovací pozitivní (D=6; l=17; L=50; S=6; Pos.; Z2; RH)*. Online. In: ITA TOOLS. ITA TOOLS. C2025. Dostupné z: <https://www.itatools.cz/ita-191-sb01-z2-dokoncovaci-pozitivni--d-6--l-17--l-50--s-6--pos-z2--rh/>. [cit. 2025-04-17].
- [60] *ITA 190/SL/SM/SN Standard (D=6; l=22; L=60; S=6; lmin=5; Pos./Neg.; Z2+2; RH)*. Online. In: ITA TOOLS. ITA TOOLS. C2025. Dostupné z: <https://www.itatools.cz/ita-190-sl-sm-sn-standard--d-6--l-22--l-60--s-6--lmin-5--pos--neg-z2-2--rh/>. [cit. 2025-04-18].
- [61] *IGM 190 Drážkovací spirálová fréza pozitivně-negativní HWM - D6x22 L60 S=6 Z1+1*. Online. In: IGM NÁSTROJE A STROJE S.R.O. IGM nástroje a stroje. C2025. Dostupné z: <https://igm.cz/igm-190-drazkovaci-spiralova-freza-pozitivne-negativni-hwm--d6x22-l60-s-6-z1-1/>. [cit. 2025-04-18].
- [62] *IGM 193 Drážkovací spirálová fréza pozitivní HWM Z3 - D6x32 L80 S=8*. Online. In: IGM NÁSTROJE A STROJE S.R.O. IGM nástroje a stroje. C2025. Dostupné z: <https://igm.cz/igm-193-drazkovaci-spiralova-freza-pozitivni-hwm-z3--d8x32-l80-s-8/>. [cit. 2025-04-17].
- [63] *Multicomponent dynamometers, maximum forces up to 10 kN, cover plate 100x170 mm / 9257B*. Online. In: KISTLER GROUP. Kistler. C2025. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/multicomponent-dynamometers-9257b/P0000675>. [cit. 2025-05-08].
- [64] *PRODUCT DATA: Triaxial DeltaTron® Accelerometers with TEDS Types 4525-B and 4525-B-001*. Online. In: BRÜEL & KJÆR. Brüel & Kjær. C2025. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/bp2203.pdf>. [cit. 2025-05-08].
-

- [65] *Stereomikroskop SSM-3EC2 10 až 40× / adaptér pro usb kameru ano*. Online. In: WHP TECHNIK. C2025. Dostupné z: <https://www.topmeridla.cz/mikroskopy/stereomikroskop-ssm-3ec2-10-az-40---adapter-pro-usb-kameru-ano/>. [cit. 2025-05-13].

Pomoc s překladem angličtiny a parafrázováním prostřednictvím umělé inteligence ChatGPT.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a	celkové zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
a_x	zrychlení v ose x	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
a_y	zrychlení v ose y	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
a_z	zrychlení v ose z	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
C_n	cena nástroje	[Kč]
C_{n1}	cena nástroje na 1 metr řezu	[Kč]
D	průměr nástroje	[mm]
F_d	faktor delaminace	[-]
F	síla řezání	[N]
F_a	aktivní síla	[N]
F_c	celková řezná síla	[N]
F_{cN}	kolmá řezná síla	[N]
F_p	pasivní síla	[N]
F_t	tangenciální složka síly řezání	[N]
F_x	řezná síla v ose x	[N]
F_y	řezná síla v ose y	[N]
F_z	řezná síla v ose z	[N]
f_n	posuv na otáčku	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
h	velikost základny	[mm]
h_b	velikost otřepu	[mm]
h_c	celková vzdálenost mezi základnou a otřepem	[mm]
L_c	celková délka řezu	[m]
N_c	celkové náklady na 1 metr řezu	[Kč]
N_o	náklady na odstranění otřepů	$[\text{Kč}\cdot\text{m}^{-1}]$
n	otáčky nástroje	$[\text{min}^{-1}]$
P_c	celkový výkon obráběcího stroje	[W]
P_o	výkon při chodu naprázdno	[W]
$P_{už}$	užitkový výkon	[W]
R_a	průměrná drsnost	$[\mu\text{m}]$
T	trvanlivost nástroje	[min]
v_c	řezná rychlost	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$
W	nominální odřezaná šířka	[mm]
W_{\max}	maximální šířka delaminace	[mm]
z	počet zubů frézy	[-]
α	hladina významnosti	[-]
θ	úhel řezu	[°]

Zkratky

Označení	Legenda
ANOVA	analysis of variance
CNB	kubický nitrid bóru
DOE	design of experiments
HSS	rychlořezná ocel
PCD	polykrystalický diamant
PVD	Physical vapour deposition
SK	slinutý karbid
WC	karbid wolframu

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Seznam a vstupní parametry všech měření
 - Příloha 2 Technické parametry dynamometru Kistler 9257B
 - Příloha 3 Technické parametry akcelerometru Bruel&Kjaer 4525-B
 - Příloha 4 Naměřené maximální hodnoty řezných sil u jednotlivých měření
 - Příloha 5 Naměřené maximální hodnoty zrychlení u vybraných měření
 - Příloha 6 Naměřené a vypočítané hodnoty v oblasti hodnocení otřepů
-

Seznam a vstupní parametry všech měření

Měření č.	Číslo nástroje [-]	Otáčky vřetene n [min ⁻¹]	Posuv na zub f _z [mm]
1	1	12 000	0,050
2	1	12 000	0,075
3	1	12 000	0,100
4	1	14 000	0,050
5	1	14 000	0,075
6	1	14 000	0,100
7	1	12 000	0,050
8	1	12 000	0,075
9	1	12 000	0,100
10	1	14 000	0,050
11	1	14 000	0,075
12	1	14 000	0,100
13	2	12 000	0,050
14	2	12 000	0,075
15	2	12 000	0,100
16	2	14 000	0,050
17	2	14 000	0,075
18	2	14 000	0,100
19	2	12 000	0,050
20	2	12 000	0,075
21	2	12 000	0,100
22	2	14 000	0,050
23	2	14 000	0,075
24	2	14 000	0,100
25	3	12 000	0,050
26	3	12 000	0,075
27	3	12 000	0,100
28	3	14 000	0,050
29	3	14 000	0,075
30	3	14 000	0,100
31	3	12 000	0,050
32	3	12 000	0,075
33	3	12 000	0,100
34	3	14 000	0,050
35	3	14 000	0,075
36	3	14 000	0,100
37	4	9 000	0,050
38	4	9 000	0,075
39	4	9 000	0,100
40	4	10 500	0,050
41	4	10 500	0,075
42	4	10 500	0,100
43	4	9 000	0,050
44	4	9 000	0,075
45	4	9 000	0,100

Seznam a vstupní parametry všech měření

Měření č.	Číslo nástroje [-]	Otáčky vřetene n [min ⁻¹]	Posuv na zub f _z [mm]
46	4	10 500	0,050
47	4	10 500	0,075
48	4	10 500	0,100

Technical data

Range	F_x, F_y, F_z	kN	-5 ... 5 ¹⁾
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	-5 ... 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.	

¹⁾ Application of force inside and max. 25 mm above top plate area

²⁾ Range for turning, application of force at point A

³⁾ With connecting cable Types 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

⁴⁾ Without tool holder Type 9403

Specifications – Triaxial Deltatron® Accelerometers Types 4525-B and 4525-B-001

		Units	4525-B	4525-B-001
Dynamic Characteristics				
Voltage Sensitivity (@ 159.2 Hz)		mV/ms ⁻² (mV/g)	1 + 12/-8% (10 ± 10%)	10 + 12/-8% (100 ± 10%)
Measuring Range		ms ⁻² (g)	±5000 (±500)	±500 (±50)
Mounted Resonance Frequency [1]		kHz	x, y, z: 30	
Amplitude Response ±10% [1]		Hz	x, y, z: 1 to 10000	
Amplitude Response ±10% [2]		Hz	z: 1 to 10000 x, y: 1 to 5500	
Amplitude Response ±10% with REq-X [3]		Hz	z: 1 to 15000 x, y: 1 to 10000	
Residual Noise		mg	x, y, z: 0.8	x, y, z: 0.5
Transverse Sensitivity		%	<5	
Electrical Characteristics				
DC Output	At room temperature	V _{DC}	12.5 ± 10%	
Bias Voltage	In specified temp. range	V _{DC}	8 to 16	
Output Impedance		Ω	<40	
Grounding			Case grounded	
Power Requirements				
Supply Voltage		V _{DC}	18 to 30	
Supply Current		mA	2 to 20	
Warm-up Time		s	<10	
Environmental Characteristics				
Temperature Range		°C (°F)	-54 to +121 (-65 to +250)	-54 to +110 (-65 to +230)
Humidity			Hermetic sealed	
Shock Limit		ms ⁻² (g)	50000 (5000)	
Base Strain Sensitivity		Equiv. g/μ strain	0.01	
Magnetic Sensitivity		g/T	0.75	0.5
Temperature Sensitivity		%/°C	0.16	
Thermal Transient Sensitivity		g/°C	0.01	
Physical Characteristics				
Dimensions			See outline drawing	
Weight		gram	6	
Case Material			Titanium	
Connector			Hermetic 4-pin receptacle 1/4"-28 UNF	
Mounting			M3 tapped hole or adhesive	

Note: All values are typical at 25°C (77°F) unless measurement uncertainty is specified

[1] Mounted on intended surface (z-direction perpendicular to mounting surface)

[2] Verified amplitude response during calibration with reduced useful frequency response on x- and y-axes due to mounting on non-intended mounting surface

[3] REq-X applied on z-axis; applying REq-X on x- and y-axes is not recommended

Naměřené maximální hodnoty řezných sil u jednotlivých měření

Měření č.	F_x max [N]	F_y max [N]	F_z max [N]	F max [N]
1	-14,65	18,52	18,52	25,45
2	-21,23	-20,52	-24,48	31,94
3	25,48	-30,49	-21,03	40,26
4	-8,97	-13,21	8,36	13,93
5	13,60	-26,63	-13,31	29,60
6	32,33	-34,24	20,48	44,65
7	-12,73	15,55	18,37	24,08
8	-27,37	16,25	10,62	28,66
9	27,13	-35,49	12,70	39,88
10	11,25	-27,71	26,89	33,11
11	-36,30	-26,14	7,48	40,38
12	32,88	-26,83	-21,03	42,80
13	34,94	-23,18	30,43	44,72
14	-14,25	-34,07	18,74	37,30
15	32,87	-51,42	28,69	59,06
16	10,45	-18,37	9,09	19,20
17	-24,95	17,87	-13,43	27,64
18	-16,25	-32,87	-19,47	38,34
19	-29,79	-22,42	7,87	34,01
20	-13,43	-41,89	23,77	46,48
21	17,36	-34,00	18,77	36,50
22	-23,30	-23,21	-5,10	29,61
23	22,06	-31,77	-13,76	32,94
24	21,13	-35,37	-14,34	36,52
25	18,57	-16,33	20,02	27,14
26	-10,76	-17,67	22,95	27,85
27	16,34	-29,97	20,75	35,67
28	-10,50	-17,64	13,18	21,23
29	-30,59	-30,20	16,85	41,42
30	16,07	-43,55	24,78	50,15
31	13,24	-14,14	25,91	29,00
32	-9,75	-27,30	15,38	30,75
33	21,47	-34,55	10,56	37,97
34	11,60	-16,20	-11,84	17,62
35	-10,48	-17,36	25,88	30,22
36	-14,42	-25,76	16,14	30,37
37	-10,47	-26,54	-16,39	30,18
38	11,72	-34,03	-11,78	35,93
39	-14,94	-44,45	-12,42	46,27
40	-20,36	-18,62	9,80	23,51
41	16,77	-35,16	-14,22	38,05
42	22,31	-42,48	-18,34	46,63

Naměřené maximální hodnoty řezných sil u jednotlivých měření

Měření č.	F_x max [N]	F_y max [N]	F_z max [N]	F max [N]
43	-18,10	-27,40	-13,89	31,38
44	-16,27	-36,58	-13,52	38,36
45	15,09	-45,21	-20,02	49,52
46	-20,55	-24,08	-15,99	30,24

Naměřené maximální hodnoty zrychlení u vybraných měření

Měření č.	a_x max [m·s ⁻²]	a_y max [m·s ⁻²]	a_z max [m·s ⁻²]	a max [m·s ⁻²]
1	7,74	-7,55	6,01	9,16
2	-13,40	-8,21	9,10	14,90
3	-15,60	-9,64	-8,71	16,00
4	5,06	-13,80	-3,65	13,90
5	9,51	-6,39	4,97	11,70
6	9,73	33,30	19,80	36,70
13	51,70	11,00	-37,6	61,30
14	37,00	7,92	24,30	39,90
15	-20,00	13,80	14,70	23,10
16	13,10	10,80	14,20	17,90
17	2,93	6,33	21,90	22,60
18	2,54	5,47	17,10	17,90
25	-18,20	8,41	7,57	18,90
26	-15,0	-7,46	11,80	15,20
27	-11,70	-20,80	-12,10	21,90
28	10,20	6,78	-5,08	10,90
29	-13,20	-21,70	10,40	23,10
30	10,40	31,70	-11,40	32,10
37	46,40	12,80	35,40	54,90
38	-42,70	15,20	37,40	51,00
39	35,70	-29,70	29,30	41,70
40	-40,30	17,20	26,00	42,50
41	24,00	11,70	30,60	38,10
42	-31,10	-16,10	-30,00	44,20

Naměřené a vypočítané hodnoty v oblasti hodnocení otřepů

Měření č.	Šířka vzorku [mm]	Vzdálenost mezi základnou a otřepem [mm]	Velikost otřepu h_b [mm]
1.	5,071	5,716	0,645
2.	5,000	5,618	0,618
3.	5,057	5,451	0,394
4.	5,016	6,031	1,015
5.	5,007	5,744	0,737
6.	4,987	6,242	1,255
7.	5,036	5,823	0,787
8.	5,049	5,934	0,885
9.	5,085	6,404	1,319
10.	5,016	6,137	1,121
11.	5,008	6,404	1,396
12.	5,016	6,458	1,442
13.	5,008	5,253	0,245
14.	5,071	5,323	0,252
15.	5,008	5,400	0,392
16.	5,028	5,482	0,454
17.	5,028	5,425	0,397
18.	5,000	5,492	0,492
19.	5,015	5,183	0,168
20.	5,070	5,324	0,254
21.	5,070	5,232	0,162
22.	5,043	5,358	0,315
23.	5,035	5,382	0,347
24.	5,036	5,426	0,390
25.	5,035	5,274	0,239
26.	5,036	5,440	0,404
27.	5,063	5,682	0,619
28.	5,086	5,330	0,244
29.	5,008	5,701	0,693
30.	4,985	5,728	0,743
31.	5,043	5,481	0,438
32.	5,043	5,523	0,480
33.	5,043	5,281	0,238
34.	5,070	5,639	0,569
35.	5,043	5,204	0,161
36.	5,001	5,741	0,740
37.	5,029	6,084	1,055
38.	4,996	6,123	1,127
39.	4,988	6,459	1,471
40.	5,057	6,496	1,439
41.	5,057	6,824	1,767

Naměřené a vypočítané hodnoty v oblasti hodnocení otřepů

Měření č.	Šířka vzorku [mm]	Vzdálenost mezi základnou a otřepem [mm]	Velikost otřepu h_b [mm]
42.	5,035	6,921	1,886
43.	5,011	6,097	1,086
44.	5,032	6,201	1,169
45.	5,029	6,473	1,444
46.	5,031	6,485	1,454