



Účinek vybraných procesních kapalin na kvalitu povrchu a rozměrovou stabilitu při frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

David Forró

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže



Effect of chosen process liquids on surface quality and dimensional stability during milling carbon fiber-reinforced composite materials

Bachelor thesis

Study programme:

B2301 Strojní inženýrství

Study branch:

Strojní inženýrství

Author:

David Forró

Supervisor:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Katedra obrábění a montáže



Zadání bakalářské práce

Účinek vybraných procesních kapalin na kvalitu povrchu a rozměrovou stabilitu při frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny

Jméno a příjmení: David Forró
Osobní číslo: S17000029
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra obrábění a montáže
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů a o obrábění těchto materiálů zpevněných (nejen) uhlíkovými vlákny. Shrnutí poznatků o technologii frézování. 2. Volba procesních kapalin, řezného nástroje a řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů. 3. Návrh metodiky experimentů v rámci volby procesních kapalin pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny – studie z hlediska opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeneho povrchu. 4. Realizace experimentů. 5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeneho povrchu. 6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

Obrázky, tabulky a grafy – dle potřeby.
Cca 30 – 40 stran textu.
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. LIDAŘÍK, M. a kol. Epoxidové pryskyřice. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s. 2. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2. 3. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5. 4. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502. 5. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

14. července 2020

David Forró



ANOTACE:

Předkládaná bakalářská práce poskytuje informace o frézování kompozitních materiálů za pomoci procesních kapalin.

Hlavním cílem práce bylo zjistit, zda je vhodné frézovat kompozitní materiál na bázi reaktoplastu zpevněný uhlíkovými vlákny s procesním médiem či nikoliv.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky jsou uvedeny v teoretické části práce. Do této části práce jsou zahrnuty informace o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů, problematika obrábění těchto materiálů a technologii frézování.

Dosažení cíle je věnována celá experimentální část obsahující informace o metodice a realizaci experimentu.

Klíčová slova: kompozitní materiál, uhlíková vlákna, frézování, procesní médium

ANOTATION:

The presented bachelor thesis provides information on the milling of composite materials using process fluids.

The main goal of the work was to determine whether it is appropriate to mill a composite material based on a thermoset reinforced with carbon fibers with a process medium or not.

Necessary basic concepts related to the problem are given in the theoretical part of the work. This part of the work includes information about composite materials based on thermosets, the issue of machining these materials and milling technology.

The whole experimental part containing information about the methodology and implementation of the experiment is devoted to achieving the goal.

Key words: composite materials, carbon fibers, milling, process fluid



Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1307**

Jméno a příjmení: **David Forró**

Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Ph.D. Štěpánka Dvořáčková
Konzultant: Ing. Miloslav Ledvina, Ph.D

Počet stran: 82
Počet příloh: 1
Počet tabulek: 15
Počet obrázků: 36
Počet grafů: 15

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a konzultantům paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. a panu Ing. Miloslavu Ledvinovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1. ÚVOD	11
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2.1 Shrnutí dosavadních poznatků o kompozitních materiálech a obrábění těchto materiálů	12
2.1.1 Struktura kompozitních materiálů.....	13
2.1.2 Kompozitní materiály s matricí na bázi reaktoplastů.....	13
2.1.3 Kompozitní materiály s vláknovou strukturou.....	14
2.1.4 Výroba uhlíkových vláken	15
2.1.5 Problematika obrábění kompozitních materiálů	15
2.1.6 Volba řezných nástrojů	16
2.1.7 Problematika frézování kompozitních materiálů	17
2.2 Shrnutí poznatků o technologii frézování.....	17
2.2.1 Stroje pro frézování.....	19
2.2.2 Nástroje pro frézování.....	20
2.2.3 Upínání obrobků a fréz	21
2.2.4 Opatření frézy	22
2.2.5 Teplo a teplota řezání při frézování	22
2.2.6 Chlazení a mazání při frézování	23
2.2.7 Navlhavost polymerů	24
2.2.8 Řezná síla při frézování.....	24
3. METODIKA EXPERIMENTŮ	26
3.1 Výroba vzorků	26
3.1.1 Matrice	26
3.1.2 Plnivo	27
3.1.3 Vlastní výroba vzorků.....	28
3.1.4 Opracování vzorků na požadované rozměry.....	31
3.2 Použité stroje, nástroje a procesní média.....	32
3.2.1 Použité stroje.....	32
3.2.2 Použité nástroje	33
3.2.3 Použitá procesní média	34
3.3 Měřené parametry	35
3.3.1 Měření řezné síly.....	35
3.3.2 Měření drsnosti povrchu	37
3.3.3 Měření teploty	38

3.3.4 Měření velikosti opotřebení nástroje.....	41
3.3.5 Měření rozměrové stability	43
3.3.6 Měření navlhavosti.....	44
4. REALIZACE EXPERIMENTŮ	47
4.1 Řezná síla při frézování	48
4.1.1 Řezná síla v ose X	48
4.1.2 Řezná síla v ose Z	49
4.2 Drsnost povrchu po frézování.....	50
4.2.1 Střední aritmetická odchylna profilu Ra	51
4.2.2 Největší výška profilu Rz	52
4.2.3 Celková výška profilu Rt	53
4.3 Teplota při frézování	54
4.4 Velikost opotřebení VB	55
4.5 Rozměrová stabilita vzorků při frézování	58
4.6 Tvorba třísky.....	59
4.7 Vliv procesního média na hmotnost vzorku	60
5. DISKUZE.....	66
6. ZÁVĚR.....	74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	79
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	81
SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ	83
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	84
SEZNAM PŘÍLOH	85

1. ÚVOD

Poslední dobou se ve strojním průmyslu rozšiřuje využívání kompozitních materiálů, které v této oblasti přináší nové inovační možnosti. V běžném odvětví strojního inženýrství se dosud využívaly a využívají především kovové materiály (zejména ocel). Kompozitní materiály ovšem přinesly svěží vítr v podobě velmi lehkých konstrukcí při vysoké pevnosti, což z nich dělá nesmírně zajímavý materiál zejména pro letecký průmysl, ale i automobilový a zbrojní. Mezi hlavní výhody kompozitních materiálů patří vysoká pevnost, nízká hustota, odolnost proti korozi, rozměrová stálost a také nízká tepelná a elektrická vodivost.

Oproti těmto výhodám, díky nimž se kompozitní materiály využívají, však stojí problematika požadavků na jejich obrábění, které je odlišné než u kovů a ve většině případů náročnější. Nejčastějšími způsoby třískového obrábění kompozitních dílů jsou vrtání a frézování.

Značný vliv na kvalitu obráběcího procesu kompozitních dílů mají procesní kapaliny, které výrazně mění průběh obrábění. Použití nevhodné procesní kapaliny nebo špatné regulace použitého množství může mít za následek degradaci obráběného materiálu, popřípadě nedostatečným výsledkům z hlediska kvality.

Bakalářská práce je zaměřena na studii účinků procesních kapalin a jejich vlivu na kvalitu a rozměrovou přesnost frézovaných kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny.

Hlavním cílem předkládané práce bylo zjistit, zda je vhodné frézovat kompozitní materiál na bázi reaktoplastu zpevněný uhlíkovými vlákny s procesním médiem či nikoliv, dále zda dochází k výraznému zlepšení či zhoršení kvality povrchu, rozměrové stability a jaký má procesní médium dlouhodobý vliv na vlastnosti materiálu.

K dosažení vytyčeného cíle bylo nutné vytvořit kompletní metodiku pro měření opotřebení rezného nástroje, teplot a sil při obrábění, drsnosti povrchu, rozměrové stability a celkové integrity obroběného povrchu včetně celkového vyhodnocení naměřených výsledků.

Pro dosažení plánovaného cíle jsou nezbytné teoretické znalosti dané problematiky, které jsou uvedeny v teoretické části této práce.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část práce shrnuje dosavadní poznatky o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů vyztužených uhlíkovými vlákny, o problematice obrábění kompozitních materiálů a o technologii frézování.

Uvedené informace v této kapitole jsou obecně známé. Z hlediska řešení předkládané práce je však vhodné je uvést, aby se čtenář lépe zorientoval v řešené problematice.

2.1 Shrnutí dosavadních poznatků o kompozitních materiálech a obrábění těchto materiálů

Kompozitní materiály s matricí na bázi pryskyřice nebo polymeru jsou materiály, které mají unikátní vlastnosti, a jejich využití neustále vzrůstá. Obrábění kompozitních materiálů je obtížné a proto volíme řezné nástroje pečlivě a většinou selektivní metodou. Nejrozšířenější obráběcí operace při zpracování těchto materiálů jsou frézování, soustružení, řezání a hlavně vrtání, které slouží pro výrobu děr různých spojovacích součástí.

Nejvíce se obrábí kompozitní materiály obsahující uhlíková, skelná nebo aramidová vlákna, které se vážou buď organickým polymerem, nebo pryskyřicí epoxidovou či fenolovou.

Kombinací různých maticí a vyztužujících vláken lze dosáhnout různých specifických mechanických vlastností, které nám ovlivňují proces obrábění a je nutno tento fakt zahrnout do volby řezných nástrojů. Například kompozitní materiály zpevněné uhlíkovými vlákny jsou velmi abrazivní, což vyžaduje velmi odolný nástrojový materiál a tytéž materiály ale s aramidovou tkaninou jsou velice měkké a lehce se poddají tlaku nástroje, a proto klademe vysoké nároky pro správnou geometrii břitu. Pro tyto materiály se používají speciální nástroje, které nejprve vlákno předechnou a potom čistě oddělí a odstraní z pracovního prostoru.

Hned po nástroji samotném mají hlavní vliv na kvalitu obrábění kompozitních materiálů řezné podmínky. Jedná se především o správně zvolený posuv, otáčky a zajištění dokonalého řezu, kterého dosáhneme zamezením třením nástroje o povrch obrobku. V případě špatného řezu nástroje dochází k delaminaci materiálu nebo lomu vláken [1].

2.1.1 Struktura kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se skládají minimálně ze dvou výrazně fyzikálně a chemicky odlišných složek. Výsledné složení kompozitu má lepší vlastnosti než jednotlivé složky. V současné době se vyskytuje velké množství kompozitních materiálů, které mají odlišné pojivo, typ a charakter výztuže a způsob výroby [6].

2.1.2 Kompozitní materiály s matricí na bázi reaktoplastů

Kompozitní materiály s matricí na bázi reaktoplastů jsou materiály, které mají matici vytvořenou z organických materiálů, patří sem epoxidové a fenolické pryskyřice, bismaleimidy a polyimidy [2].

Epoxidové pryskyřice jsou poměrně mladý materiál, první obchodní typ uvedla Ciba v roce 1946 a tvoří významnou skupinu pryskyřic, zasahujících do různých aplikačních úseků. Hojně se používají pro pojení uhlíkových a grafitových vláken s využitím v leteckém průmyslu [3]. K vytvrzování dochází při nízkých teplotách a tlacích běžně do 125°C, pro vyšší pracovní teploty 175 až 225°C. Při vytvrzovací reakci nedochází ke vzniku dalších vedlejších produktů, jedná se tedy o polymeraci a dochází jen k malému smrštění a malému vnitřnímu napětí. Vlastnosti po vytvrzení jsou značně ovlivněny výběrem určité kombinace pryskyřice a tvrdidla. Materiál běžně po vytvrzení dosahuje teplotní stálosti do 200°C a chemickou odolností.

Fenolické pryskyřice využívají v případě, že se vyžaduje odolnost proti hoření a vzniku kouře. Oproti epoxidům totiž dosahují nižších mechanických vlastností, ale jejich teplotní stálost za sucha dosahuje až 280°C. Vytvrzování probíhá polykondenzací, jako vedlejší produkt vzniká voda, která má na materiál negativní vliv ve tvaru bublin a mikrotrhlin.

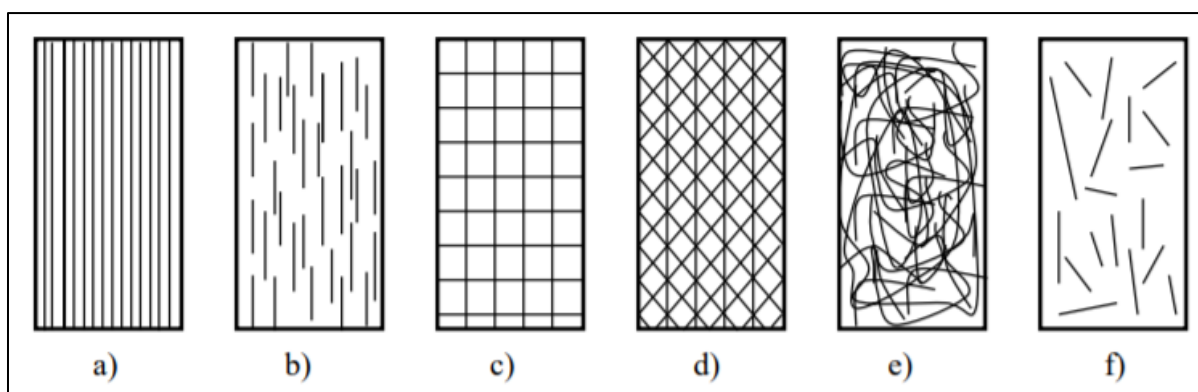
Bismaleimidy mají teplotní stálost za vlhka do 230°C a za sucha do 250°C. Využívají se pro kompozitní součásti s vyššími pracovními teplotami v leteckém průmyslu.

Polyimidy mají nejvyšší teplotní stálost ze všech uvedených materiálů, za sucha až 315°C a za vlhka 250°C. Používají se jako součásti motorů letadel nebo raket, takže jejich cena je neporovnatelně vyšší. Polyimidy mají značnou odolnost proti organickým rozpouštědlům, kyselinám, hydroxidům a uhlovodíkům při zvýšených teplotách. Kondenzační polyimidy mají využití jako vysokoteplotní izolace a části proudových motorů [2].

2.1.3 Kompozitní materiály s vláknovou strukturou

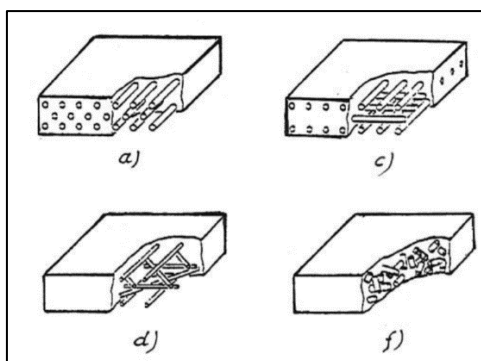
Moderní vláknové kompozity se díky svým specifickým vlastnostem, mezi které lze zařadit efektivitu, nízkou hmotnost a pevnost využívají v celé řadě průmyslových aplikací. Vláknové kompozity se uplatňují, pokud požadujeme vysokou pevnost při nízké hmotnosti [4].

Vláknové kompozitní materiály jsou nejrozšířenější skupina. Jejich výztuž se vyrábí ve formě vláken různých materiálů, díky kterým je ve směru vláken vysoká pevnost, která je dána malým průřezem vláken (desítky mikrometrů), který vylučuje výskyt velkých nečistot a vad vyskytujících se v kompaktních materiálech [5]. Vláknová v matrici mají více typů uspořádání, a to jednosměrné, dvousměrné, víceosé nebo nahodilé. Jednotlivé uspořádání jsou uvedena na obrázku 01. Obrázek prezentuje za a) jednosměrná dlouhá vlákna, b) jednosměrná krátká vlákna, c) dvousměrné vyztužení (křížová tkanina, rohož), d) vícesměrné vyztužení, e) náhodná orientace vláken, f) náhodná orientace krátkých vláken [7].



Obr. 01 Možné způsoby uspořádání vláken krátko/dlouho vláknových kompozitů [5]

Pro lepší představu nám může posloužit obrázek 02, který znázorňuje uspořádání v prostoru.



Obr. 02 Prostorové uspořádání vybraných vláknových kompozitů [7]

2.1.4 Výroba uhlíkových vláken

Výroba kompozitních vláken patří bývá ve většině případů pokročilá výrobní technologie. Výchozí materiál (prvek nebo sloučenina) se často liší od konečného produktu, ale musí obsahovat stejné chemické prvky jako finální produkt.

Uhlíková vlákna vznikají pyrolýzou polyakrylonitrilových vláken PAN. Ta se nejprve zahřejí a protahují pro získání požadované orientaci molekul. Následně se stabilizují v okysličující atmosféře při teplotě 220 až 230°C až 10 hod. Následuje grafitizace v inertní atmosféře při 1000 – 1500°C a po dalším protahování se grafitizuje v inertní atmosféře za teplot 2500 – 3000°C pod napětím. Výsledkem je anizotropie materiálových vlastností [7].

2.1.5 Problematika obrábění kompozitních materiálů

Kompozitní materiály je možné obrábět na běžných obráběcích strojích, ale je nutné při volbě řezných podmínek přihlížet k zvláštnostem těchto materiálů. Mechanické vlastnosti kompozitů vykazují značnou anizotropii (vlastnosti se výrazně liší ve směru vláken oproti směru podél vláken). Vysoká pevnost v tahu výrazně zvyšuje opotřebení řezného nástroje. Vlákná mají na nástroj silný abrazivní účinek a mají největší podíl na opotřebení nástroje, proto pro jejich obrábění volíme nástroje s vysokou odolností proti otěru jako jsou povlakované slinuté karbidy nebo diamant.

Dalším problémem je nízká teplotní odolnost kompozitů, kdy při vyšších teplotách (100 až 300°C) nejsou stálé, takže musíme volit takové řezné podmínky, abychom nepřekročili tzv. kritickou teplotu, kdy dojde k degradaci matrice, což se projeví jako spálená oblast na povrchu.

Velmi nízká tepelná vodivost kompozitů zabraňuje vznikajícímu teplu při obrábění přecházet do obráběného materiálu a třísky, což způsobuje že většinu tepla musí odvádět nástroj, nebo řezná kapalina (v případě, že ji lze použít). Tento fakt výrazně snižuje výdrž řezného nástroje.

Dále mají kompozity oproti kovovým materiálům několikanásobně větší tepelnou roztažnost (pokud se nepoužívají skelná vlákna), která způsobuje změnu rozměrů součástí v procesu obrábění, ale i po jeho dokončení.

Tvoření třísky ovlivňuje integritu obrobené plochy (při nevhodných řezných podmínkách dochází k popraskání povrchu, nebo delaminaci). Při obrábění vznikají drobné částice třísky (zejména z vláken) ve formě prachu, proto je nutná aplikace odsávacích zařízení z důvodu zdravotních a hygienických limitů pracoviště.

Navlhavost kompozitů většinou zabraňuje použití řezné kapaliny. V omezené míře lze aplikovat čistou vodu s inhibitory koroze, olejové emulze se doporučují jen výjimečně. Nevhodná řezná kapalina výrazně snižuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu.

Hodnota měrných řezných sil je mnohem nižší než u kovů, čímž se snižuje potřebný výkon obráběcího stroje [1].

2.1.6 Volba řezných nástrojů

Pro obrábění kompozitních materiálů lze využít nástroje z rychlořezné oceli, ale musíme očekávat nízké hodnoty trvanlivosti, která vede k časté výměně nástroje a jeho přeastřování a to kvůli nízkým hodnotám tvrdosti (menší odolnost proti abrazivnosti vláken)

Dále mají rychlořezné oceli až čtyřikrát nižší tepelnou vodivost, což vede ke špatnému odvodu tepla nástrojem a opotřebení břitu. Tyto negativní vlastnosti lze oddálit nanášením otěruvzdorných povlaků.

Nástroje ze slinutých karbidů už vykazují lepší vlastnosti než z rychlořezné oceli. Mechanické vlastnosti u slinutých karbidů jsou dány především obsahem pojiva (nejčastěji Co) a velikostí zrna. Tvrdost zvyšuje vysoký podíl jemnějších zrn a houževnatost zvyšuje větší podíl pojiva při velkých zrnech. Z toho důvodu jsou pro obrábění kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny vhodné slinuté jemnozrné karbidy, které velkou tvrdostí lépe odolávají opotřebení. Pro další zvýšení trvanlivosti se používají otěruvzdorné povlaky na bázi nitridů, karbidů, oxidů nebo diamantu. V případě výskytu dynamického zatížení břitu je potřeba zohlednit potřebnou houževnatost pro výdrž nástroje a snížit tvrdost.

Nejllepší výsledky při obrábění vláknových kompozitů vykazují nástroje z polykrystalického diamantu díky své vysoké tvrdosti (odolávají abrazivnímu účinku vláken) a skvělé tepelné vodivosti (dobrý odvod tepla z břitu nástroje). Trvanlivost nástrojů může být až stonásobně větší než u slinutých karbidů. Díky lepšímu odvodu tepla lze zvýšit řeznou rychlost, což vede ke zvýšení produktivity až o 100% [1].

2.1.7 Problematika frézování kompozitních materiálů

Při frézování kompozitních materiálů jsou nástroje podrobeny náročným zkouškám. Kvůli heterogennímu spojení vláken a polymerní matrice naráží fréza na proměnný odpor, který je daný vrstevnatým uspořádáním tvrdých abrazivních vláken a měkčí matrice, což zatěžuje mechanismus pohonu nástroje. Navíc dochází k rychlému opotřebení nástroje kvůli vysoké abrazivnosti vláken.

Tajemstvím úspěchu je mít k dispozici soubor nástrojů s různou geometrií a různé nástrojové třídy umožňující vytvoření speciálních řešení vhodných pro použití při frézování kompozitních materiálů.

Vhodné frézovací nástroje

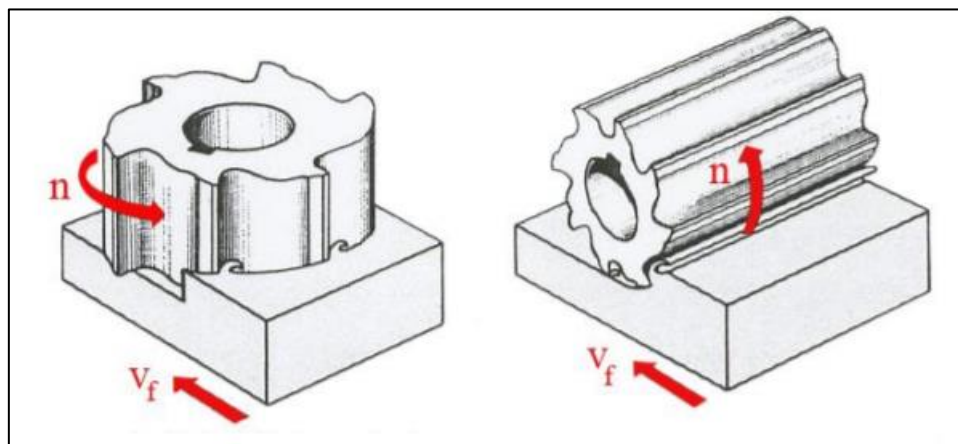
V oblasti leteckého průmyslu je pro výrobce mimořádně důležitá kvalita obrobku, přesnost a vysoká integrita primárních povrchových struktur. Vhodným nástrojovým řešením pro strojní obrábění rovinných i zakřivených povrchů kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny jsou čelní frézy s lehkým řezem opatřené vyměnitelnými břitovými destičkami.

Strojní dílny by rovněž měly věnovat pozornost frézám, vhodným pro frézování tvarových ploch pomocí mírně skloněného nástroje (metoda Sturtz). Frézování touto metodou může v řadě případů nahradit obrábění pomocí stopkových fréz s kulovým čelem. Tato pokroková metoda spočívá v mírném sklonění osy nástroje vůči povrchu součásti k vytvoření eliptické dráhy nástroje. Výsledná mírně eliptická dráha umožňuje rychlejší postup nástroje bez překročení maximální přípustné výšky nerovnosti na obrobku [15].

2.2 Shrnutí poznatků o technologii frézování

Frézování je metoda obrábění, při které je materiál obrobku odebírán zuby otáčejícího se vícebřitého nástroje, který nazýváme fréza. Tuto metodu řadíme mezi technologie obrábění s definovanou geometrií břitu. Hlavní řezný pohyb je tedy rotační pohyb nástroje. Vedlejší pohyb je pak posuv stolu v podélném, příčném a svislém směru. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odebírá třísku, která mění svou tloušťku. Frézování je přesná metoda s možností mnohostranné aplikace a z tohoto důvodu je její uplatnění v praxi velmi široké. Někdy je dokonce frézování jediný možný způsob obrábění.

Podle způsobu záběru frézy do materiálu obrobku rozlišujeme čelní a obvodové frézování. Pro představu slouží obrázek 03.



a) Čelní frézování

b) Obvodové frézování

Obr. 03 Způsoby frézování podle způsobu záběru frézy [5]

Při obou způsobech je materiál odebrán při dané hloubce řezu h relativním posuvem zubů frézy vzhledem k obrobku o velikost posuvu na zub f_z . Za jednu otáčku vykoná fréza posuv f_n a za jednu minutu posuv f_{min} . Mezi těmito posuvy platí vztah:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm/min]}, \quad (2 - 1)$$

kde

$$f_n = f_z \cdot z \text{ [mm/ot]}. \quad (2 - 2)$$

A řezná rychlost se spočítá vztahem:

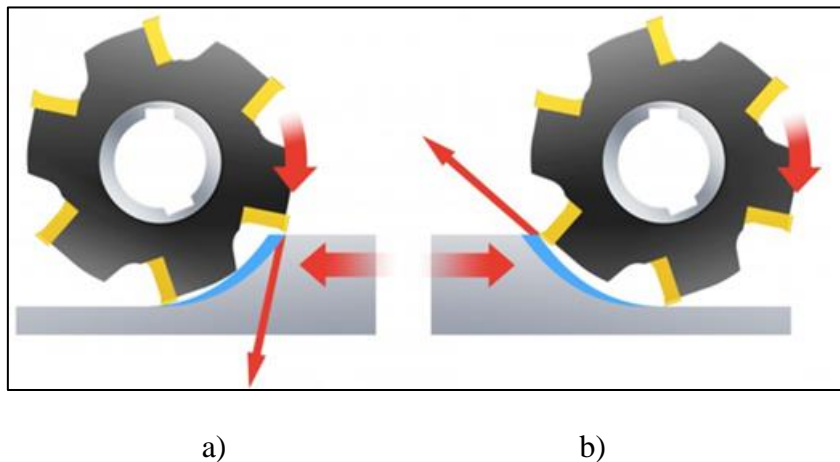
$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [mm/min]}, \quad (2 - 3)$$

kde z je počet zubů frézy [-], n jsou otáčky frézy [min^{-1}] a D je průměr frézy [mm].

Obvodové frézování se používá především při využití válcových nebo tvarových fréz na horizontálních konzolových a stolových frézkách. Zuby frézy se nachází pouze na obvodu nástroje. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. Podle toho, jakým způsobem se nám vytváří tato plocha, dále dělíme obvodové frézování na sousledné a nesousledné.

U nesousledného (obr. 04b) frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Tloušťka řezu postupně roste z nulové hodnoty na hodnotu maximální, při které zub frézy vychází ze záběru. V průběhu vznikají silové účinky a deformace způsobující vlnitý charakter obrobené plochy a větší opotřebení břitu. Výhodou naopak je, že trvanlivost

nástroje nezávisí na okujích a dosahuje se větší produktivity u hrubování. Řezná síla působí směrem nahoru a táhne obrobek od stolu.



Obr. 04 a) Sousedné b) nesousedné frézování [9]

U sousledného frézování (obr. 04a) je smysl rotace ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka řezu vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Řezná síla působí směrem dolů. Výhodou je vyšší trvanlivost břitu, menší sklon ke chvění a tvoření nárustků, menší potřebný řezný výkon a lepší jakost obrobeného povrchu.

U čelního frézování je obrobená plocha kolmá na osu frézy a hloubka třísky h se nastavuje ve směru osy frézy. Při každém otočení nástroje vykoná obrobek posuv na otáčku o velikosti:

$$f_n = f_z \cdot z \text{ [mm} \cdot \text{ot}^{-1}\text{]}. \quad (2 - 4)$$

Tloušťka řezu se zvětšuje směrem ke středu obrobku a zmenšuje se na vstupu a výstupu. Běžně se frézuje na rovinných frézkách, ale využívají se i svislé a vodorovné konzolové a stolové frézky [8].

2.2.1 Stroje pro frézování

Stroje pro frézování se nazývají frézky. Mezi základní druhy patří: konzolové, stolové, rovinné, speciální a dále se dělí na konvenční a NC, CNC, podle typu řízení.

Konzolové frézky jsou nejrozšířenější. Využívají se pro obrábění menších a středních obrobků v kusové, nebo malosériové výrobě. Vyznačují se značnou univerzálností.

Svislé konzolové frézky mají svislé vřeteno, které je uloženo ve vřeteníku, připevněné na horní části stojanu, nebo je uloženo přímo ve stojanu. Hloubka záběru se pak tedy nastavuje výškou vřetena.

Vodorovné konzolové frézky mají vodorovné vřeteno, které je uloženo v horní části stojanu tak, aby bylo rovnoběžné s upínací plochou stolu [10].

2.2.2 Nástroje pro frézování

Nástroje pro frézování se nazývají frézy. Jsou to několikabřité nástroje. Břity jsou uspořádány podle tvaru a typu frézy na válcové, kuželové, čelní nebo tvarové ploše. Převážná část fréz jsou normované podle ČSN 22 2110 až 22 2199.

Frézy se dělí do jednotlivých skupin podle typu členění:

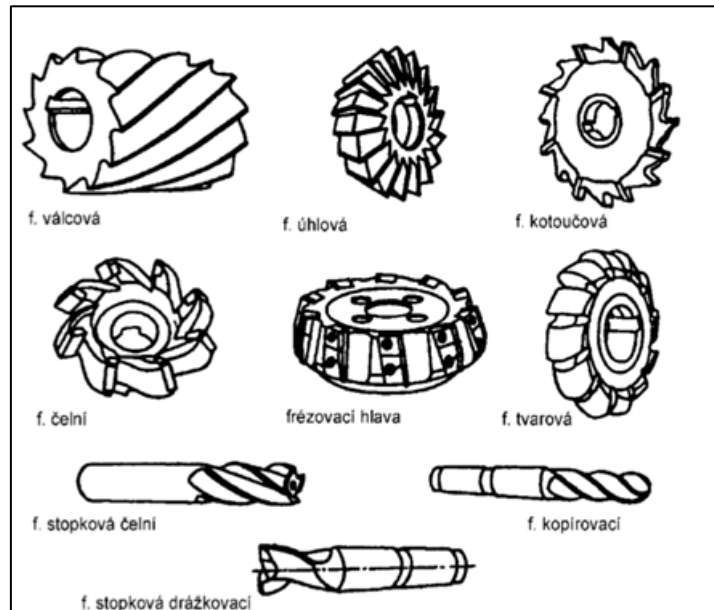
- a) Podle nástrojového materiálu se frézy člení na frézy z rychlořezné oceli a slinutých karbidů. Omezeně se ale dále využívá i řezná keramika, kubický nitrid bóru a technicky diamant.

Frézy z rychlořezné oceli se vyrábějí z kovového nebo válcovaného materiálu, nebo jsou lity metodou vytavitelného modelu. Používají se oceli 19 802, 19 830, 19 824 a 19 856. Na lité frézy se používá ocel 19 824. Výhodou fréz z rychlořezné oceli je snadná výroba, snadné ostření a malé pořizovací náklady. Nevýhodou je malá produktivita a nutnost použití řezné kapaliny.

Frézy ze slinutých karbidů se používají pro větší úběry. Pro frézování ocelí se používají slinuté karbidy typu P, pro materiály s vyšší houževnatostí a pevností typu M a pro frézování litiny a neželezných kovů typu K. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a nákladnější ostření.

- b) Podle provedení zubů se rozlišují frézy se zuby podsoustruženými a frézovanými.
- c) Podle konstrukčního uspořádání se frézy dělí na celistvé, které mají těleso i zuby vyrobené z jednoho kusu rychlořezné oceli, popřípadě ze slinutého karbidu u menších nástrojů. Dále frézy dělené a sdružené, což je větší počet fréz upnutý na jednom trnu, které slouží pro obrábění členitých povrchů jedním záběrem a frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami, které jsou mechanicky upevněné k tělesu nástroje.

- d) Z hlediska geometrického tvaru se frézy dělí na válcové nástrčné nebo se stopkou, které mají zuby pouze na válcové ploše. Dále pak čelní válcové frézy, u nichž jsou zuby i na čelní ploše, kotoučové frézy s přímými zuby nebo zuby ve šroubovici, frézy tvarové, kopírovací, drážkovací, nebo frézovací hlavy (Obr. 05).
- e) Z hlediska technologie na frézy pro rovinné nebo tvarové plochy.
- f) Z hlediska upnutí na frézy nástrčné nebo se stopkou [8].



Obr. 05 Základní druhy fréz [11]

2.2.3 Upínání obrobků a fréz

Obrobek musí být při frézování řádně upnut, protože v procesu působí velké řezné síly, protože je v záběru současně více břitů. Tyto síly, jejichž velikost je proměnná, se snaží vychýlit obrobek z ustavené polohy.

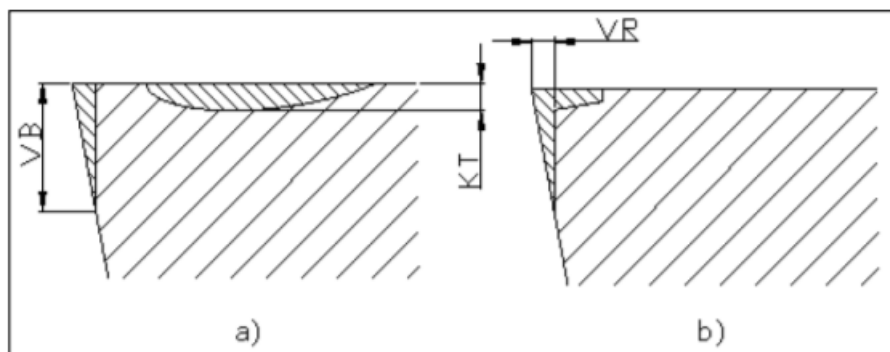
Při upínání je potřeba dodržovat určité zásady:

- Řezné síly musí působit proti tuhým opěrám.
- Obráběná plocha by měla být blízko k upínací ploše. V případě že je vysoko, tak musí být dostatečně zabezpečena.
- Obráběcí i upínací plocha by měly být co nejbližší vřetenu.
- Obrobek nesmí být deformován vlivem upnutí.

Při nesprávném upnutí obrobku nebo frézy mohou řezné síly způsobovat chvění, jenž způsobuje nepřesnost práce, špatnou kvalitu povrchu a rychlejší opotřebení nástroje [10].

2.2.4 Opotřebení frézy

Stejně jako u ostatních nástrojů v oblasti obrábění, bříty frézy jsou při řezání extrémně zatěžovány a v důsledku toho dochází k opotřebení a otupení. Projevem opotřebení je úbytek materiálu na břitu nástroje [11].



Obr. 06 Charakter opotřebení břitu fréz [10]

Otupení má charakter žlábků (Obr. 8a). U malých řezných rychlostí je kritériem opotřebení opotřebení na hřbetu VB , protože velikost KT žlábků je oproti VB zanedbatelná (Obr. 06b). U frézování je ovšem dalším důležitým kritériem rozměrové opotřebení VR , na němž závisí rozměry vyráběného obrobku.

Kvalita obráběné plochy a trvanlivost frézy lze korigovat použitím procesní kapaliny, které se uplatňují především u fréz z rychlořezné oceli a v omezené míře u slinutého karbidu [10].

2.2.5 Teplota a teplota řezání při frézování

Teplota má velký vliv na řezné vlastnosti nástroje, ovlivňuje vlastnosti obráběné plochy jako je tření, zpevnění, petchování materiálu apod. Množství tepla je závislé na velikosti práce potřebné pro odebrání třísky. K odebrání třísky je potřeba překonat vnější tření a způsobit plastickou deformaci obráběného materiálu.

Z důsledku vývinu tepla při frézování dále dochází ke zvýšení teploty v místě zdroje tepla a jeho okolí. Teplota výrazně ovlivňuje intenzitu otupování břitu nástroje. Při překročení mezní teploty řezání se rychle snižuje tvrdost břitu, což má za důsledek ztrátu řezné

schopnosti nástroje a jeho opotřebení prudce vzrůstá [16]. Příпустné hodnoty řezání jsou uvedeny v tab. 01.

Tab. 01 Příпустné hodnoty při obrábění běžnými řeznými materiály [16]

Materiál břitu nástroje	Nejvyšší přípustná teplota řezání [°C]	Přibližná řezná rychlost [m/min]
Slitinová ocel	260	12 až 18
Rychlořezná ocel	560	24 až 36
Slinuté karbidy WC+TiC+Co	900 až 1100	90 až 150
Keramické materiály	1100 až 1200	170 až 300

2.2.6 Chlazení a mazání při frézování

Pro dosažení vyšší trvanlivosti břitu a prevence předčasného otupení důsledkem vysoké teploty je využíván proces chlazení a mazání. Při stejné řezné rychlosti vzniká díky chlazení menší opotřebení nástroje, a naopak při stejné teplotě břitu umožňuje větší řeznou rychlost.

Použitím chlazení a mazání je snaha o:

- odvedení tepla z místa řezu,
- snížení práce vlivem tření,
- snížení intenzity otupení břitu,
- lepší jakost obrobeneé plochy,
- odvedení třísky z místa řezu.

Úkolem chlazení je odvedení tepla z místa řezu. Chladicí schopnost kapaliny je dána jejím výparným teplem, rychlostí vypařování, její tepelnou vodivostí a jejím měrným teplem.

Úkolem mazání je snížení tření na činných plochách nástroje a usnadnění lepší plastické deformace třísky. Dochází ke snížení řezného odporu a lepší jakosti obrobeneé plochy.

Běžnými procesními kapalinami jsou:

- **Řezné oleje**, u kterých převládá mazací účinek a zajišťují vysokou jakost obrobeneé plochy a malé opotřebení nástroje.
- **Emulze** (směs H₂O a mazacích látek), která má velmi dobrý chladicí i mazací účinek.
- **Roztoky H₂O**, které mají pouze chladicí účinek [16].

2.2.7 Navlhavost polymerů

Navlhavost je schopnost materiálu přijímat vlhkost z okolního prostředí. Tento proces je dlouhodobý a probíhá do té doby, než je dosaženo tzv. „rovnovážného stavu“, kdy vlhkost látky odpovídá relativní vlhkosti okolního prostředí. Doba potřebná pro dosažení takového stavu závisí na jeho chemickém složení, relativní vlhkosti a teplotě okolí a tloušťce vzorku. Důsledkem navlhavosti polymerů je:

1. pokles meze pevnosti a modulu pružnosti,
2. zvýšení houževnatosti a tažnosti,
3. zhoršení elektrických izolačních vlastností,
4. zhoršení odolnosti materiálu vyšším teplotám,
5. pokles pevnosti svarového spoje,
6. zvětšení rozměrů výrobku apod [13].

2.2.8 Řezná síla při frézování

Při vnikání nástroje do obrobku vzniká řezný odpor. Řeznou silou se rozumí síla, která je nutná pro překonání řezného odporu. Řezná síla a řezný odpor jsou tedy spolu ve vztahu akce a reakce.

Vektor řezné síly F může být promítnut do kartézských souřadnic x , y a z . Každá složka působí proti jinému faktoru:

- Axiální (posuvová) složka F_x je rovna součtu síly odporu obráběného materiálu proti vřezávání nože ve směru posuvu a sil tření.
- Radiální (přísuvová) složka F_y způsobuje průhyb obráběné součásti, což může snížit přesnost a vyvolat nežádoucí vibrace.
- Tangenciální (hlavní) složka F_z je rovna sumárnímu působení sil odporu kovu.

Vlivy působícími na velikost řezných sil jsou:

1. Materiál obrobku (R_m , HB , stav, struktura, chemické složení) – při stoupající pevnosti v tahu roste řezná síla.
2. Nástrojový materiál (R_m , HB , stav, struktura, chemické složení) – čím je vyšší podíl tvrdých složek nástrojového materiálu, tím je nižší řezná síla.
3. Posuv nebo tloušťka řezu – čím je rychlejší posuv nebo větší tloušťka řezu, tím více roste řezná síla.

4. Hloubka nebo šířka řezu – čím větší je hloubka nebo šířka řezu, tím více roste řezná síla.
5. Úhel čela γ_0 – čím větší bude, tím snadněji odchází tříška a tudíž se snižuje řezná síla, ovšem větší úhel zrychluje opotřebení nástroje.
6. Úhel nastavení χ_r – ovlivňuje řeznou sílu poměrně málo, minimum řezné síly je při $\chi_r = 60^\circ$
7. Řezná rychlost v_c , při vyšších řezných rychlostech nemá řezná rychlost značný vliv na změnu řezné síly, ale při nízkých řezných rychlostech řezná síla výrazně roste.
8. Chlazení a mazání – u běžných ocelí platí, že chlazení a mazání snižuje řeznou sílu obzvláště při obrábění rychlořeznou ocelí. Při obrábění SK nebo řeznou keramikou se obrábí bez chlazení z důvodu náchylnosti k porušení křehkým lomem vyvolaným střídavým teplotním zatížením. Dále se řezná síla může výrazně jinak chovat při obrábění jiných materiálů.
9. Opotřebení břitu nástroje (VB , KT , stav, struktura, chemické složení) – při rostoucím opotřebení břitu nástroje roste řezná síla [17].

3. METODIKA EXPERIMENTŮ

Metodika měření je část práce, která pojednává o přípravě vzorků, jejich obrobení a popisu měření potřebných veličin pro zpracování hodnot podle cíle bakalářské práce.

Materiály byly zkoumány v oblasti z hlediska opotřebení rezného nástroje, teplot a sil při obrábění, drsnosti povrchu, rozměrové stability a celkové integrity obrobeného povrchu.

Všechny stroje, nástroje a zařízení potřebné pro ztvárnění experimentu jsou majetkem laboratoře Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci.

3.1 Výroba vzorků

Pro plánované experimenty byly zvoleny 3 materiálové směsi:

1. čistá epoxidová pryskyřice (tato směs slouží jako referenční),
2. epoxidová pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny,
3. epoxidová pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny.

Materiálové směsi byly vyrobeny dle podkapitoly 3.1.3.

3.1.1 Matrice

Matricí pro výrobu kompozitů byla zvolena dvousložková nízkomolekulární epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 (EPOXY 15), využívaná v oblasti odlévání, impregnací, zalévání a lepení v různých průmyslových oborech (obr. 07). Vlastnosti pryskyřice: lehce nažloutlá barva, viskózní kapalina s hustotou $1,16 - 1,17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$, viskozita $12,0 - 14,5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ při $25 \text{ }^\circ\text{C}$, obsah epoxidových skupin $5,2 - 5,5 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ a epoxidový hmotnostní ekvivalent $182 - 192 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.



Obr. 07 Epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 a tvrdidlo P11 [13]

Vytvrzení epoxidové pryskyřice proběhlo přidáním tvrdidla P11 (obr. 11) v poměru 100:11 při hmotnostním a 100:13,5 při objemovém poměru (pryskyřice : tvrdidlo). Tvrdidlo P11 je rychlé tvrdidlo s krátkou dobou zpracovatelnosti a dolepem na povrchu vzorku. Dolep se poté jednoduše odstraní omytím vzorku v 3 % roztoku kyseliny citronové a dále opláchnutím vodou a osušením.

3.1.2 Plnivo

Jako plnivo byla použita:

1. Recyklovaná uhlíková vlákna Carbiso™ MF. Tato vlákna byla zakoupena u společnosti Easy Composites Ltd., která se specializuje v jejich distribuci. Výrobcem je firma ELG Carbon Fibre Ltd. Zakoupený typ vláken dosahuje následující parametrů: průměr 7 μm , střední délka 100 μm , nízké množství nečistot a dobrá adheze k polymerní matici.
2. Uhlíková vlákna ve formě tkaniny od firmy Havel Composites CZ s.r.o. Vlákna byla označena jako 800 tex 12k. Tkanina byla protkána polyesterovými vlákny s označením 7,6 dtex. Hmotnost tkaniny byla 380 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.1.3 Vlastní výroba vzorků

Forma byla navržena s ohledem na vhodnou velikost a tvar požadovaných vzorků (obr. 08). Pro materiál formy byla zvolena silikonová pryž na základě zkušeností. Tento materiál je totiž snadný na výrobu a snadnou manipulaci.



Obr. 08 Silikonová forma na výrobu kompozitních bloků [13]

Příprava směsí a jejich odlévání do silikonových forem pro výrobu zkušebních vzorků – čistá pryskyřice

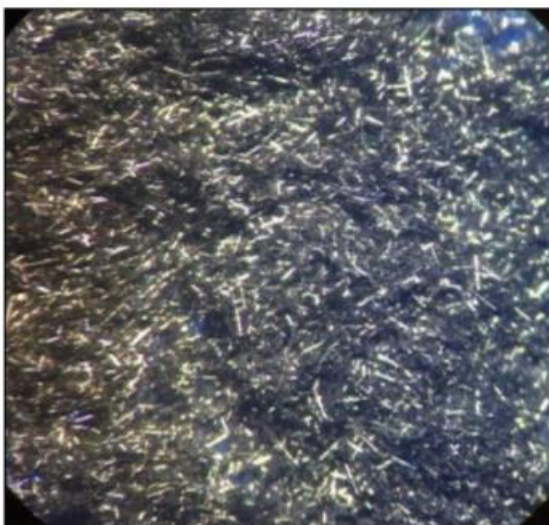
Do odváženého množství epoxidové pryskyřice bylo vmícháno adekvátní množství tvrdidla P11 podle doporučení výrobce. Po přidání tvrdidla byla směs míchána po dobu cca 3 minut.

Příprava směsí a jejich odlévání do silikonových forem pro výrobu zkušebních vzorků – pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny

Do odváženého množství epoxidové pryskyřice byla vlákna vmíchána ručně (obr. 09). Proces míchání trval, dokud nebyla směs homogenní. To zabralo přibližně 5 minut. Poté se směs nechala v nádobě minimálně 24 hodin pro únik bublin, které byly do směsi vneseny mícháním. Do připravené směsi bylo následně vmícháno adekvátní množství tvrdidla P11 dle doporučení výrobce. Po přidání tvrdidla byla směs míchána po dobu cca 3 minut a následně vлита do připravené silikonové formy.

Vzorky byly vyrobeny s plněním 40 dsk. Tato hodnota byla zvolena díky předešlé zkušenosti z výsledků diplomové práce Bc. Lukáše Charváta [14], kde se hodnota 40 dsk projevila jako optimální.

Zkratka dsk značí, že ke 100 g pryskyřice je přidáno 10 g plniva – tedy 10 dsk. Tato jednotka je běžně využívána v gumárenském průmyslu a eliminuje nutnost přepočítávání na hmotnostní procenta.



Obr. 09 Recyklovaná uhlíková vlákna CarbisoTM MF vmíchaná do epoxidové pryskyřice [13]

Příprava směsí a jejich odlévání do silikonových forem pro výrobu zkušebních vzorků – pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny

Do odváženého množství epoxidové pryskyřice bylo vmícháno adekvátní množství tvrdidla P11 dle doporučení výrobce. Po přidání tvrdidla byla směs míchána po dobu cca 3 minut.

Tkanina byla nejprve nastříhána podle délky formy, do které byla kladena. Dále v připravené směsi byla smočena všechna uhlíková vlákna tvořící tkaninu (obr. 10). Počet vrstev tkaniny ve formě byl 10.



Obr. 10 Smočená uhlíková vlákna tvořící tkaninu [13]

Naplněné silikonové formy s připravenou směsí byly vloženy do přetlakové nádoby (obr. 11). Směsi byly ve formách vytvrzovány při přetlaku 0,7 MPa a teplotě 23 ± 2 °C po dobu 24 hodin. Díky využití přetlaku byly eliminovány bubliny v objemu kompozitního vzorku a zároveň bylo dosaženo precizního okopírování povrchu formy.

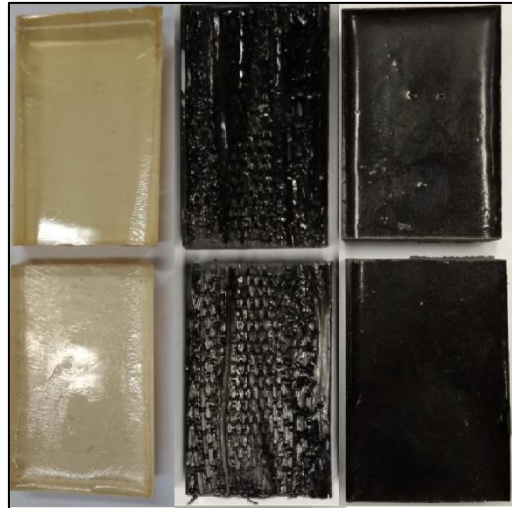


Obr. 11 Přetlaková nádoba [13]

Odlité vzorky byly dále ještě dokonale dotvrzeny. Tento proces probíhal při stálé laboratorní teplotě 23 ± 2 °C po dobu minimálně 10 dní. Dotvrzování epoxidové pryskyřice je možné urychlit také zvýšením teploty, ovšem případě malých vzorků se při chemické reakci mezi epoxidovou pryskyřicí a tvrdidlem, respektive při tvorbě makromolekulární sítě, nevytváří takové množství tepla, které by vlastní proces urychlovalo [13].

3.1.4 Opracování vzorků na požadované rozměry

Z kompozitních bloků vyjmutých z forem byly následně nařezány vzorky o rozměrech 38x12x60 mm (obr. 12). Řezání bylo prováděno ruční pilkou s jemnými zuby, aby nedocházelo k hrubému přetrhání uhlíkových vláken.



a)

b)

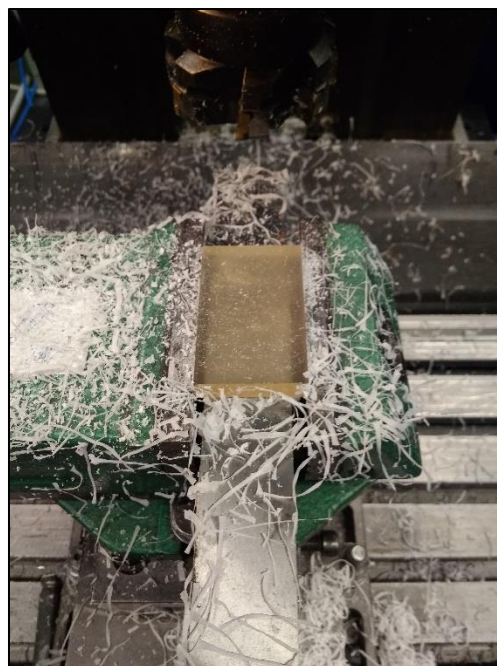
c)

Obr.12 Odlité vzorky pro praktickou část práce a) čistá epoxidová pryskyřice b) epoxidová pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny c) epoxidová pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny

Dále byly z obou stran obrobny čelní frézou s VBD pro zarovnání nerovností a stanovení přesných rozměrů (obr. 13,14). Tato operace probíhala na frézce typu FNG 32.



Obr.13 Zarovnávaní vzorku



Obr. 14 Zarovnaný vzorek

3.2 Použité stroje, nástroje a procesní média

3.2.1 Použité stroje

Veškeré provedené operace při kterých se frézovalo probíhaly na frézce FNG 32 (obr. 15) od výrobce TOS Olomouc s.r.o. Parametry frézky jsou uvedeny v tabulce 02.



Obr. 15 Frézka FNG 32

Tab. 02 Parametry frézky FNG 32

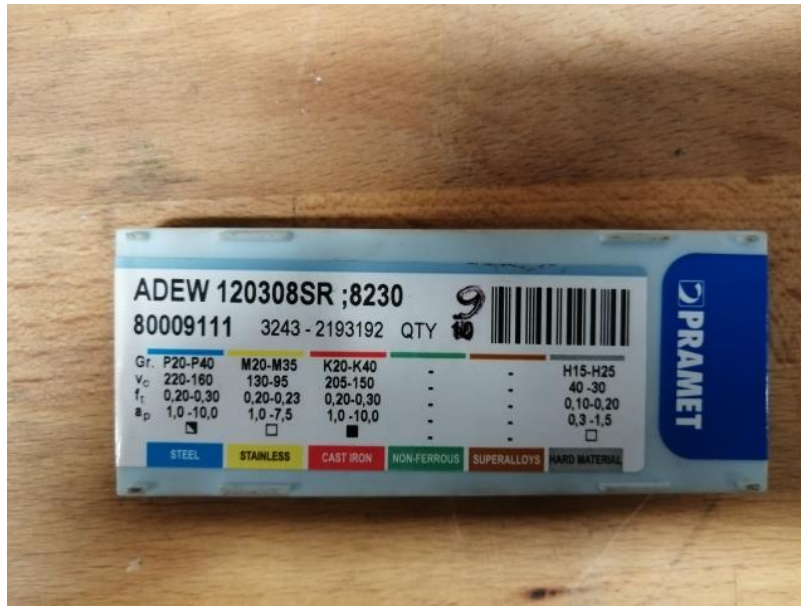
Frézka FNG 32		
Technické údaje	Hodnota	Jednotky
Rozměr pracovní plochy	800 x 400	[mm]
Upínací drážky	7	[-]
Výkon hlavního motoru	4	[kW]
Výkon posuvného motoru	1,1	[kW]
Pracovní zdvih podélný (x)	600	[mm]
Pracovní zdvih příčný (y)	400	[mm]
Pracovní zdvih svislý (z)	400	[mm]
Maximální zatížení stolu	350	[kg]

3.2.2 Použité nástroje

Pro rovnání povrchu byla použita čelní stopková fréza na obrázku 16a. Pro frézování vzorků byla použita válcová stopková fréza (obr. 16b) s vyměnitelnými břitovými destičkami z SK (obr. 17). Použita byla jedna břitová destička pro jednoduchost v ohledu měření sil.



Obr. 16 a) Čelní fréza b) Válcová fréza



Obr. 17 Použité vyměnitelné břitové destičky z SK

3.2.3 Použitá procesní média

Zvoleny byly 3 podmínky při kterých byla zrealizována technologie frézování:

1. za sucha,
2. s H_2O ,
3. s procesní kapalinou – emulzí.

Procesní kapalinou byla emulze, složená z vody a mazací látky Blasocut BC 25 MD, která byla k nástroji přiváděna gravitačním způsobem (obr. 18).



Obr. 18 Nádoba pro přívod procesního média gravitačním způsobem

3.3 Měřené parametry

3.3.1 Měření řezné síly

K měření působících sil byl použit tříoskový piezoelektrický dynamometr KISTLER (obr. 19a). Piezoelektrické dynamometry fungují na principu piezoelektrického jevu, pro který je typický vznik elektrického náboje na povrchu některých krystalů v případě mechanického zatížení. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly. V případě poklesu síly se lineárně snižuje až zcela vymizí v případě nulového zatížení [12].

Náboj z piezoelektrického snímače musí být zesilován. K tomu sloužil připojený nábojový zesilovač (obr. 20a). Signál z nábojového zesilovače vstupuje do počítače, kde se data zpracovávají softwarem LabVIEW (obr. 20b), který zobrazuje výsledky do grafu (obr. 21).

V tomto grafu byl následně vybrán detail pěti míst, ze kterých byly odečteno pět hodnot, jak je ukázáno v obrázku 22.

Před počátkem měření musel být dynamometr patřičně zkalibrován. Toho se docílilo za pomoci siloměru (obr. 19b). Siloměrem se tlačilo na dynamometr ve směru x , y i z určitou silou a software spočítal patřičné kalibrační konstanty. Tato kalibrace musela probíhat pro každou osu zvlášť.



a)

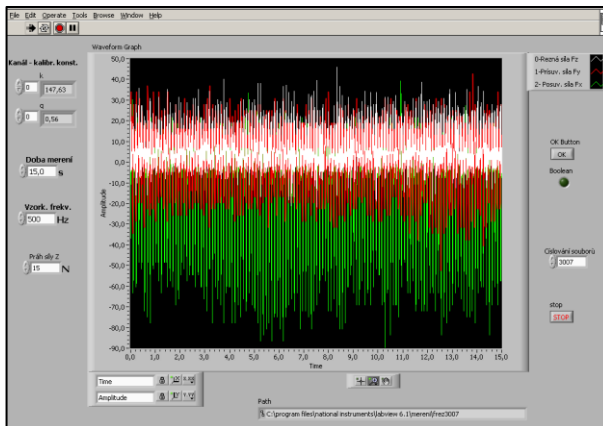


b)

Obr. 19 a) Piezoelektrický dynamometr KISTLER; b) Siloměr

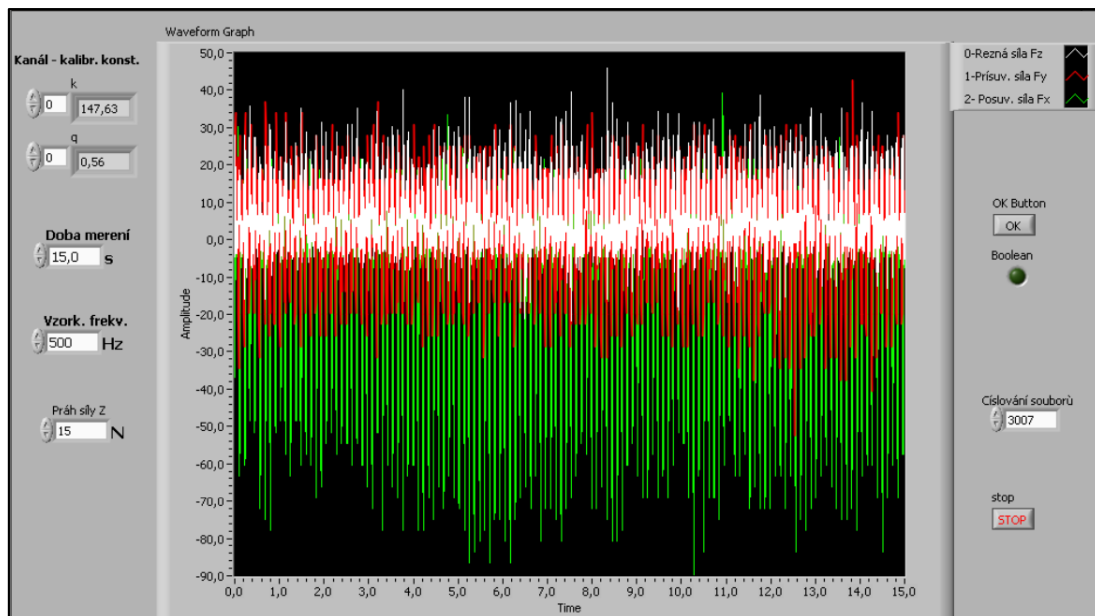


a)

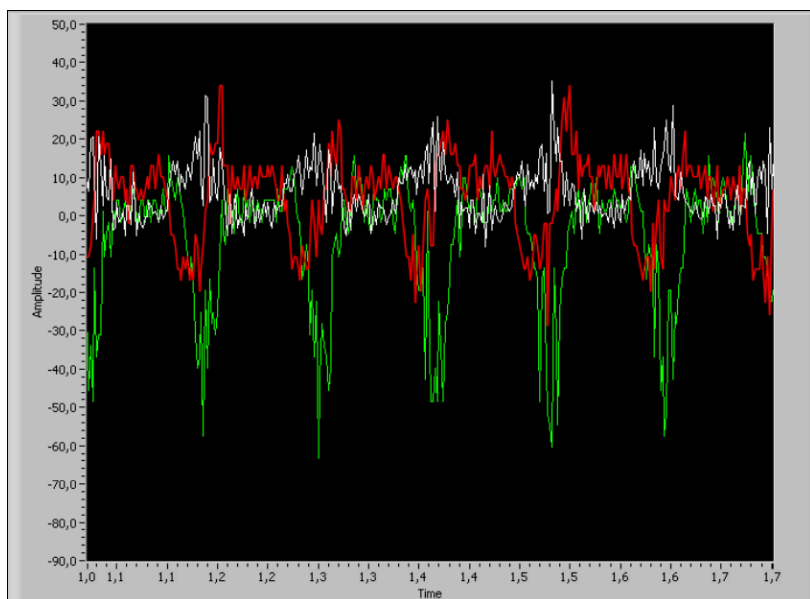


b)

Obr. 20 a) Nábojový zesilovač; b) Software LabVIEW



Obr. 21 Výstup hodnot ze softwaru LabVIEW

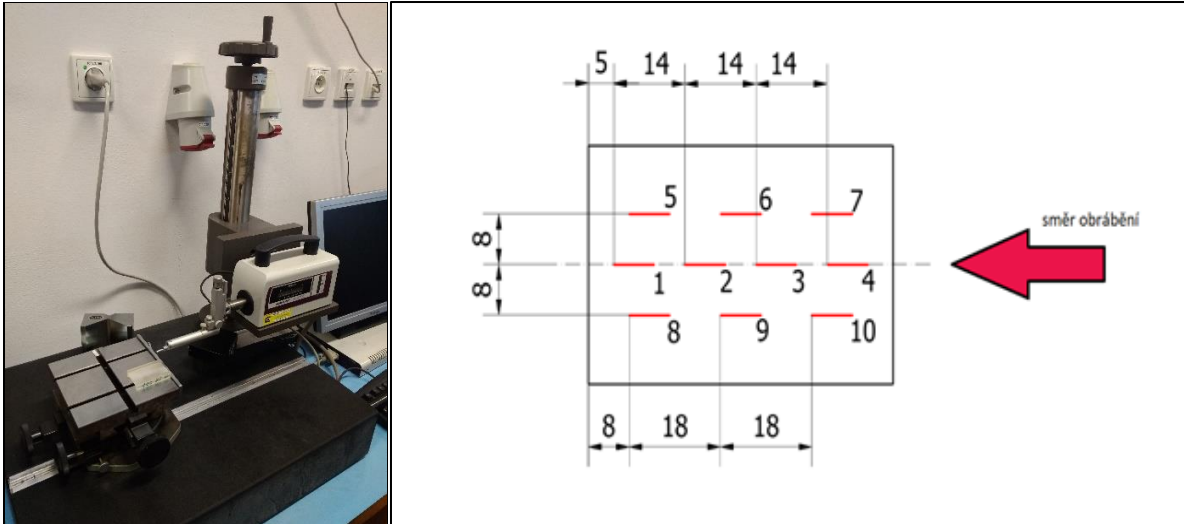


Obr. 22 Detail z grafu výsledných hodnot

3.3.2 Měření drsnosti povrchu

Na obrázku 23 je profilometr MITUTOYO SV-2000N2. Tento přístroj slouží k určení drsnosti povrchu dotykovou metodou. Za pomoci diamantového hrotu je snímán vertikální pohyb, který je dán nerovností povrchu. Tento pohyb je dále transformován na elektrický signál. Signál je zpracováván softwarem Surfpack na počítači, který je připojen k profilometru [12].

Vzorek byl umístěn na ploše tak, aby se opíral o plochu, která byla ve směru posuvu diamantového hrotu. Poloha hrotu byla nastavena pomocí kličky tak, aby byl v kontaktu s obrobenou plochou. Drsnost se měřila na deseti místech rozmístěných po vzorku, jak lze vidět na obrázku 24.



Obr. 23 Profilometr MITUTOYO SV-2000N2 Obr. 24 Náskres měření drsnosti

Profilometr byl použit pro získání 3 typů hodnot drsnosti R_a , R_z a R_t , jejichž definici je možné si přečíst v tabulce 1 [12].

Tab. 03 Definice měřených parametrů [12]

Parametr	Popis parametru
R_a	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_z	Největší výška profilu
R_t	Celková výška profilu

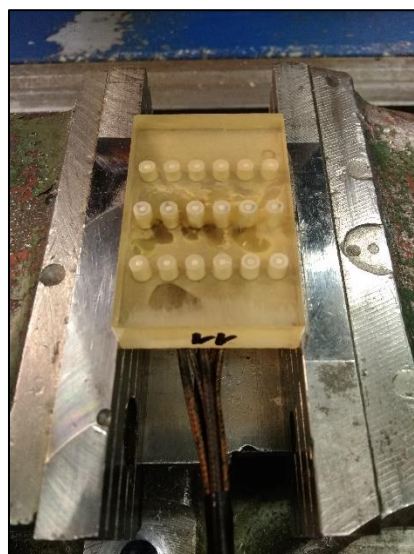
3.3.3 Měření teploty

Pro měření teploty byla využita technologie termočlánků typu K. Termočlánek je tvořen spojením dvou špiček drátů z odlišných slitin (Ni-Cr (+) a Ni-Al (-)) [12].

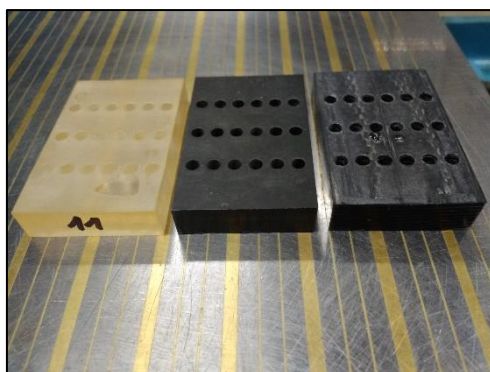
Do každého vzorku bylo zavedeno šest termočlánků pro každou procesní kapalinu. K řádnému ustavení bylo nutné vyvrtání děr (obr. 25), aby byl termočlánek umístěn co nejbližší místu řezu a následné zatavení termočlánků silikonem pomocí tavné pistole, jenž lze pozorovat na obrázku 26. Na obrázku 27 jsou prezentovány vyvrtané vzorky všech tří materiálů. Na obrázku 28 je znázorněno rozmístění děr pro termočlánky, jenž bylo pro každý vzorek tři krát po šesti dírách (pro každou procesní kapalinu jedna řada).



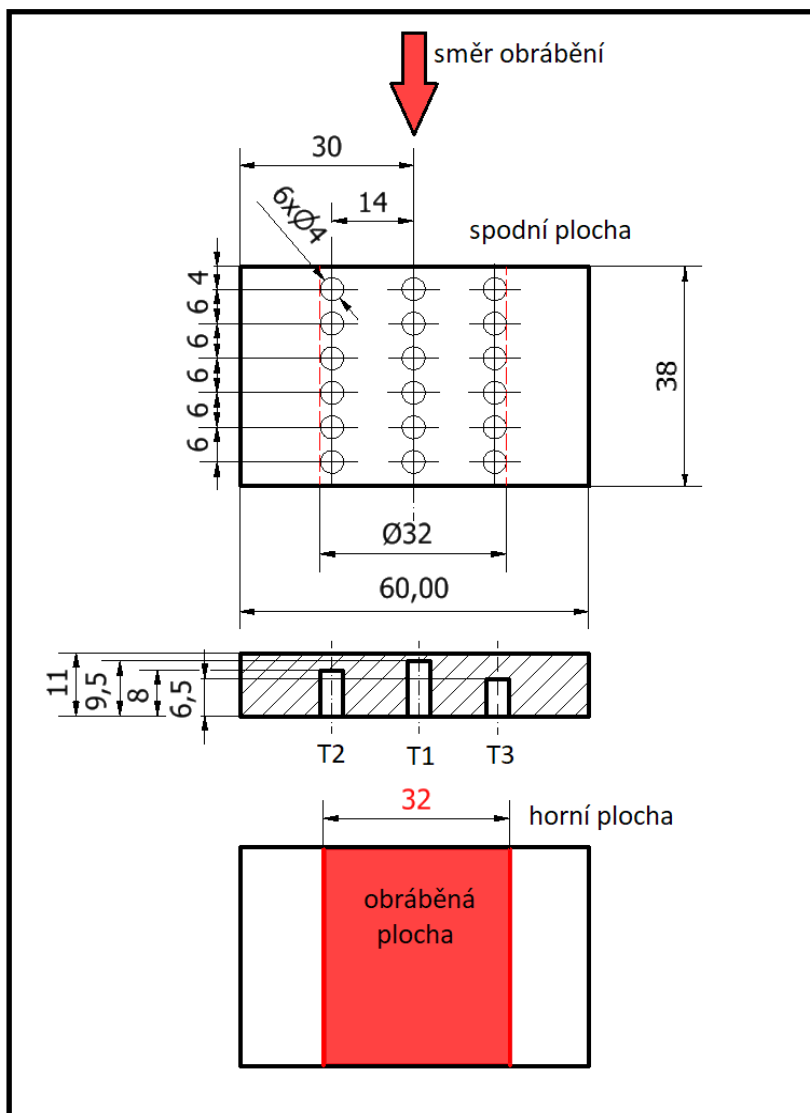
Obr. 25 Vrtání děr pro zavedení termočlánků



Obr. 26 Vzorek připravený pro frézování

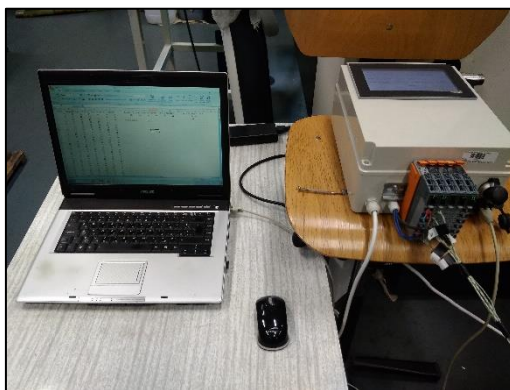


Obr. 27 Vyvrtané díry pro zavedení termočlánků



Obr. 28 Vzorek pro měření teploty na obrobku u technologie frézování

Druhý konec termočlánků byl zapojen do směrnice, která je připojena k řídicí jednotce (obr. 29), a převádí mV na °C. Získaná data byly následně převedeny do počítače a zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel.



Obr. 29 Řídicí jednotka a sběrnice

3.3.4 Měření velikosti opotřebení nástroje

Ke zjištění velikosti opotřebení nástroje byl použit dílenský mikroskop ZEISS (obr. 30a). Stůl mikroskopu vykonává přímočarý posuvný pohyb v osách X a Y pomocí mikrometrických šroubů na vodících lištách. Odčítání hodnot je umožněno mikrometrickými hlavicemi s udávaným rozlišením 0,01 mm. Nitkovým křížem, který se nachází v okuláru, je opticky prováděno polohování měřeného vzorku, na obrázku 30b [12].

Břitová destička byla měřena vždy po ofrézování celé délky obrobku. Celková ujetá dráha frézy se rovnala 22 m. Postup k výpočtu dráhy:

Obvod výseče (1/2 frézy):

$$o = \pi \cdot R = \pi \cdot 16 = 50,265 \text{ mm} \quad (3-1)$$

Posuv na zub:

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} = \frac{50}{500 \cdot 1} = 0,1 \text{ mm} \quad (3-2)$$

Celková ujetá vzdálenost frézy:

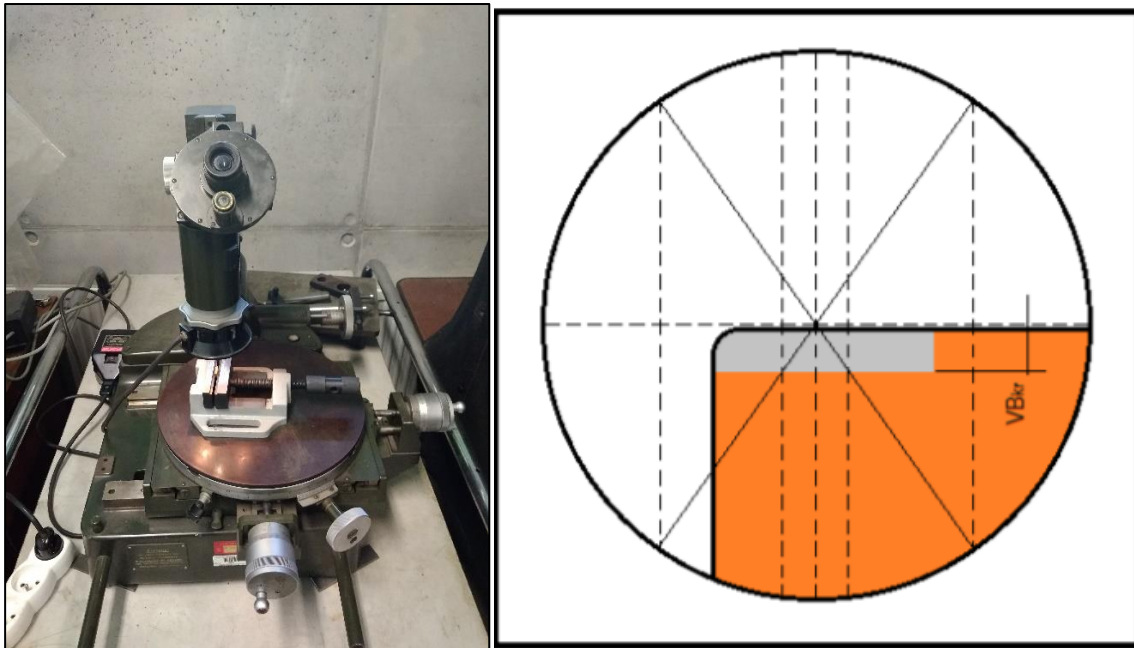
$$L = 44 \text{ mm} \quad (3-3)$$

Ujetá dráha frézy po jednom úseku:

$$s = \frac{o \cdot L}{f_z} = \frac{50,265 \cdot 44}{0,1} = 22166,6 \text{ mm} \cong 22 \text{ m} \quad (3-4)$$

kde π je Ludolfova konstanta [-], R poloměr frézy [mm], v_f rychlost posuvu [mm/min], n otáčky [min^{-1}], z počet zubů frézy [-].

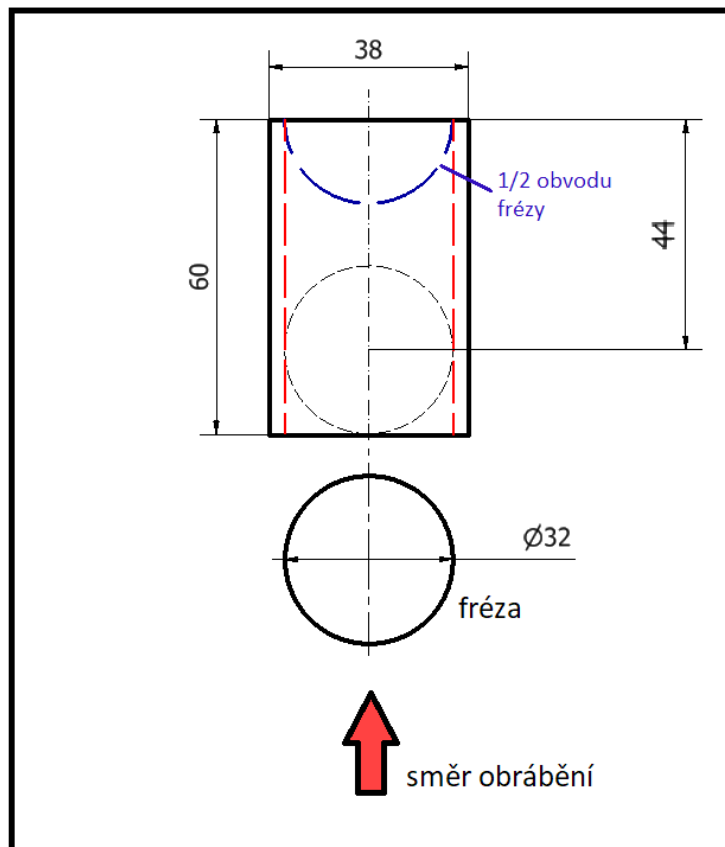
Celková ujetá dráha frézy po jednom úseku byla zaokrouhlena na celé metry pro přehlednější zpracování získaných hodnot. Použité veličiny lze pozorovat na obrázku 31.



a)

b)

Obr. 30 a) Dílenský mikroskop ZEISS b) Nitkový kříž v okuláru [12]



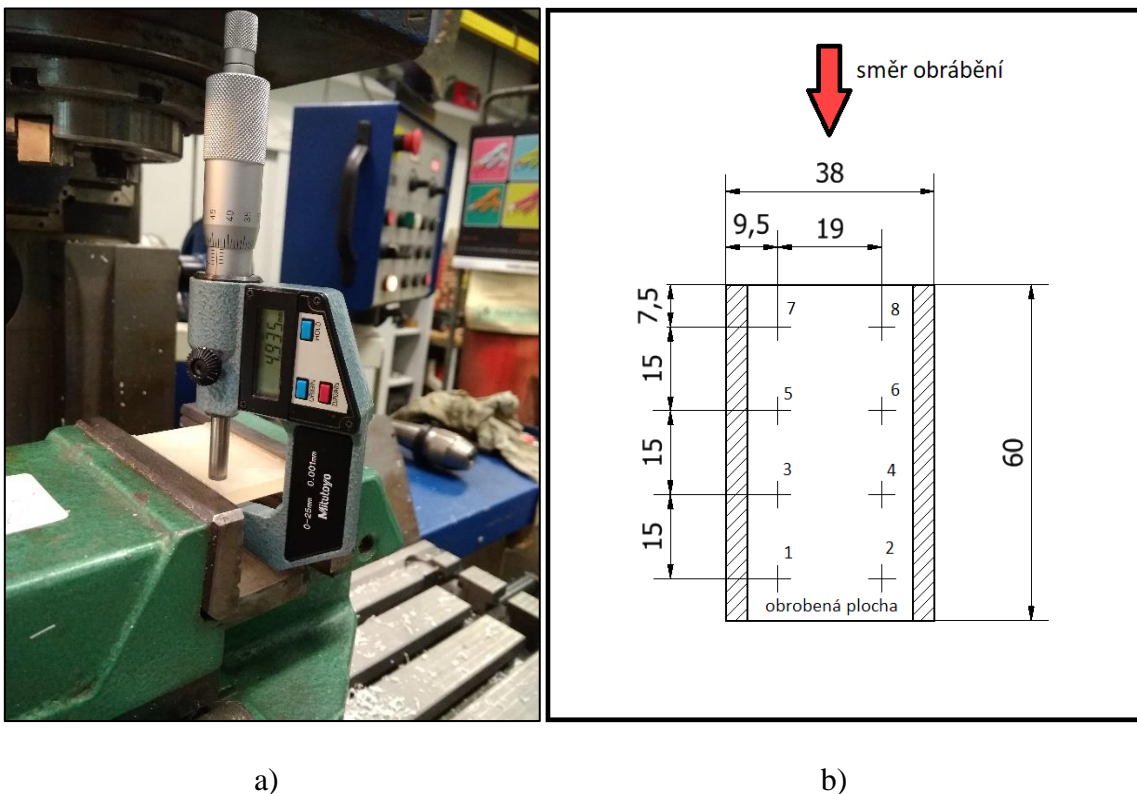
Obr. 31 Dráha frézy při obrábění vzorku

Měření opotřebení bylo tedy provedeno 3x pro každou procesní kapalinu po 5ti úsecích, kde nástroj najel postupně dráhu 22 m, 44 m, 66 m, 88 m, 111 m. Při uražení každého úseku byl nástroj vyjmut ze stroje, upnut do dílenského mikroskopu ZEISS a pomocí nitkového kříže změřen přes okulár.

3.3.5 Měření rozměrové stability

Ideální a skutečná obrobená plocha se značně liší svými rozměry, tvary a vzájemnou polohou. Tato skutečnost poukazuje na to, že žádný obrobek není vytvořen s absolutní přesností. Z tohoto důvodu se pro výrobu předepisují tolerance rozměrů, geometrická tolerance přesnosti a požadovaná drsnost povrchu [12].

Pro měření rozměrové stability byl použit digitální třmenový mikrometr Mitutoyo s rozsahem 0 až 25 mm a rozlišením 0,001 mm, obrázek 32a. Měřila se tloušťka dvou protilehlých obrobených ploch na osmi místech, jejichž rozložení je vidět na obrázku 32b. Toto měření proběhlo čtyřikrát, kdy se postupně obrobil úsek s hloubkou záběru 1 mm. Následně se tyto změřené hodnoty od sebe odečetly a zjišťovala se odchylka od ideální hodnoty 1 mm.



Obr. 32 a) Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo b) Rozložení měřených míst

3.3.6 Měření navlhavosti

Navlhavost je schopnost materiálu přijímat vlhkost z okolního prostředí. Tento proces je dlouhodobý a probíhá do té doby, než je dosaženo tzv. „rovnovážného stavu“, kdy vlhkost látky odpovídá relativní vlhkosti okolního prostředí. Doba potřebná pro dosažení takového stavu závisí na jeho chemickém složení, relativní vlhkosti a teplotě okolí a tloušťce vzorku [13].

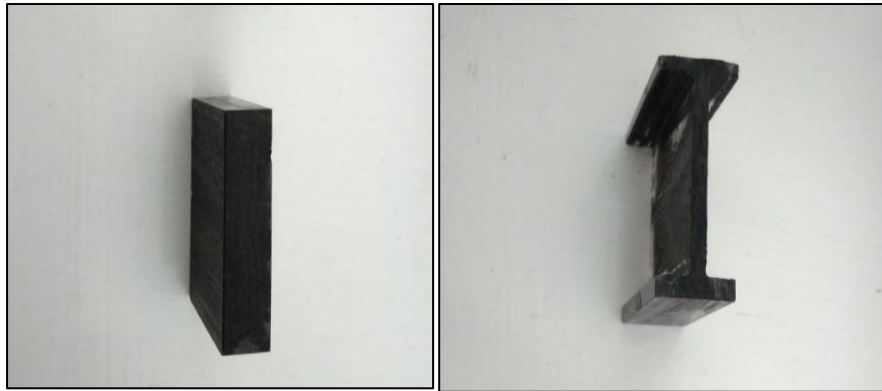
Pro měření navlhavosti byla použita metoda, kdy byly vzorky zváženy před započítím experimentu a následně váženy v určitých časových intervalech pro sestavení křivky, ze které byl zjištěn procentuální vzrůst hmotnosti ve stavu nasycení oproti stavu před experimentem. Dále se stejné vzorky nechaly vysušit na okolním vzduchu a zjišťovalo se, jestli se hmotnost vzorků vrátila do původního stavu.

Pro představu, jaký vliv má tloušťka a tvar vzorku na průběh navlhnutí, byly použity dva typy vzorku, jeden ve tvaru kvádru (obr. 33a), tedy tlustostěnný a jeden ve tvaru H (obr. 33b), tedy tenkostěnný. Dále z důvodu odlišného tvaru navíc u tenkostěnného vzorku působily procesní média na větší plochu, předpokladem tedy bylo, že tenkostěnné vzorky přijmou kapalinu rychleji a větší množství.

Pro experiment byly zvoleny 4 procesní média:

1. procesní kapalina (emulze),
2. H₂O o kyselém ph (ph = 4),
3. H₂O o neutrálním ph (ph = 7),
4. H₂O o zásaditém ph (ph = 10).

Vzorky byly v průběhu experimentu až po stav nasycení ponořeny v jednotlivých procesních médiích (obr. 34) a po následném vyndání a řádném osušení byly váženy na laboratorní váze značky TSCALE (obr. 35) zakoupené od společnosti LESAK s.r.o.



Obr. 33 a) Tlustostěnný vzorek b) Tenkostěnný vzorek



Obr. 34 Vzorky ponořené v procesním médiu



Obr. 35 Laboratorní váhy značky TSCALE

4. REALIZACE EXPERIMENTŮ

Daná kapitola obsahuje informace o naměřených hodnotách týkající se řezné síly, drsnosti povrchu, teploty, velikosti opotřebení nástroje, rozměrové přesnosti a dlouhodobého vlivu procesního média na kompozitní vzorek. Z každého materiálového složení bylo vyrobeno a proměřeno 5 vzorků.

Všechny experimenty týkající se frézování probíhaly za konstantních řezných podmínek uvedených v tabulce 04.

Tab. 04 Konstantní řezné podmínky při frézování

Řezná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	50,3
Rychlost posuvu v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	50
Posuv na zub f_z [mm]	0,1
Otáčky frézy n [min^{-1}]	500

Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 4 až 15 a grafických zobrazeních 1 až 15. Prezentované výsledné hodnoty uvedené v tabulkách a grafických zobrazení jsou váženým aritmetickým průměrem z dílčích naměřených hodnot a jejich spočítaným statistickým intervalem spolehlivosti. Kompletní celkový přehled všech sledovaných parametrů se nachází na přiloženém CD v příloze 01. Vážený aritmetický průměr byl spočítán funkcí PRŮMĚR v softwaru Excel a statistický interval spolehlivosti byl stanoven v softwaru Excel v souladu s matematickými pravidly.

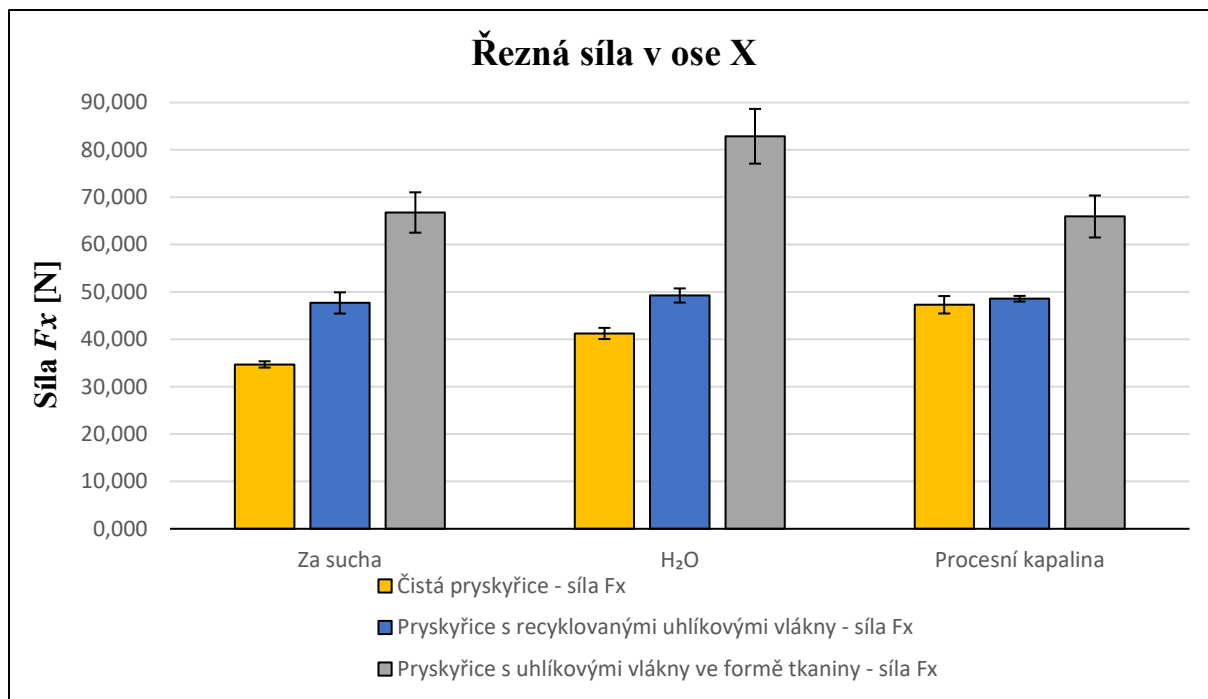
4.1 Řezná síla při frézování

Pro tento experiment byly použity konstantní řezné podmínky uvedené v tabulce 04. V podkapitole 3.2.3 byla uvedena všechna procesní média pro zkoumané vzorky. Materiály vzorků byly uvedeny v kapitole 3.1. Byla měřena řezná síla v osách X a Z . Postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.3.1. Pro každou osu byla zvlášť vytvořena tabulka, kde se nachází vážený aritmetický průměr naměřených hodnot a statistický interval spolehlivosti. Tabulka byla následně zpřehledněna do grafického zobrazení.

4.1.1 Řezná síla v ose X

Tab. 05 Průměrná hodnota řezné síly v ose X v průběhu frézování

Řezná síla F_x [N]			
Materiál vzorků	Za sucha	H ₂ O	Procesní kapalina
Čistá pryskyřice	34,704±0,666	41,244±1,180	47,300±1,842
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	47,688±2,244	49,264±1,492	48,576±0,596
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	66,784±4,260	82,880±5,778	65,940±4,429



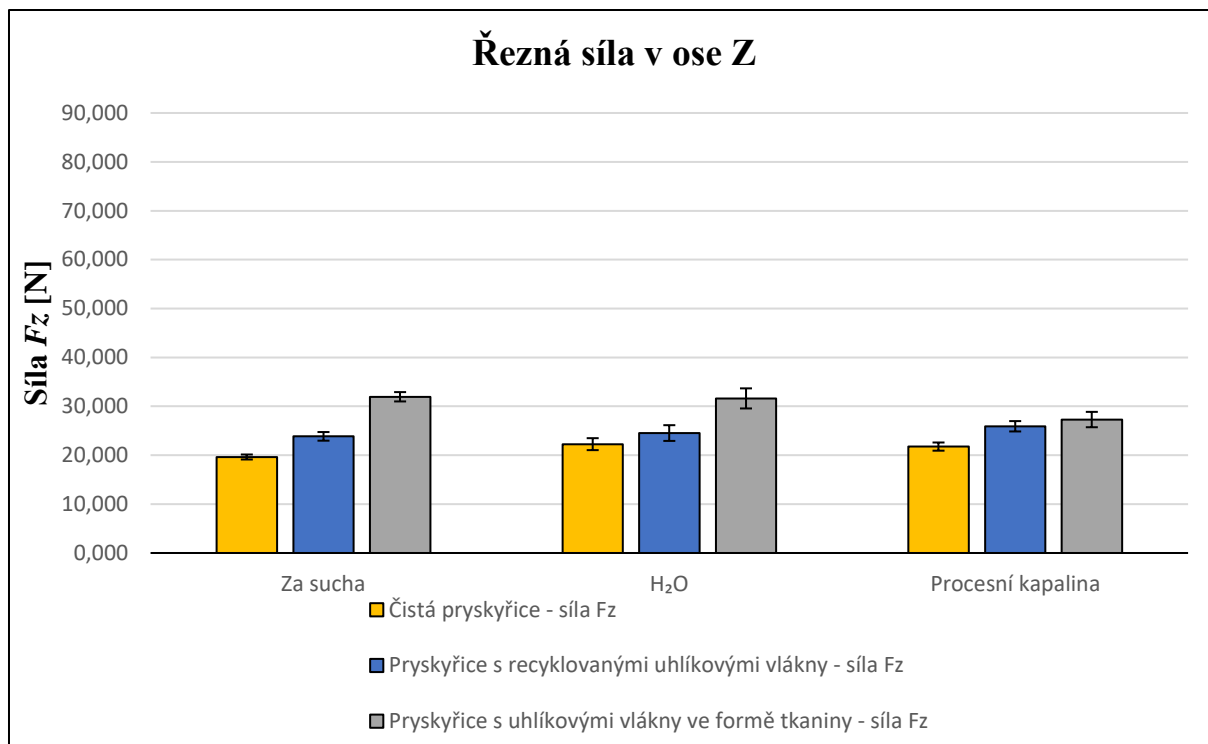
Graf 01 Průměrná hodnota řezné síly v ose X v průběhu frézování

Z tabulky 05 a grafického zobrazení 01 je patrné, že nejnižší řezné síly v ose X bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování za sucha a naopak nejvyšší u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování s H₂O.

4.1.2 Řezná síla v ose Z

Tab. 06 Průměrná hodnota řezné síly v ose Z v průběhu frézování

Řezná síla v F_z [N]			
Materiál vzorků	Za sucha	H₂O	Procesní kapalina
Čistá pryskyřice	19,636±0,510	22,264±1,221	21,764±0,840
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	23,856±0,885	24,532±1,611	25,920±1,060
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	31,956±0,955	31,620±2,055	27,292±1,572



Graf 02 Průměrná hodnota řezné síly v ose Z v průběhu frézování

Z tabulky 06 a grafického zobrazení 02 je patrné, že nejnižší řezné síly v ose Z bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování za sucha a naopak nejvyšší u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování za sucha.

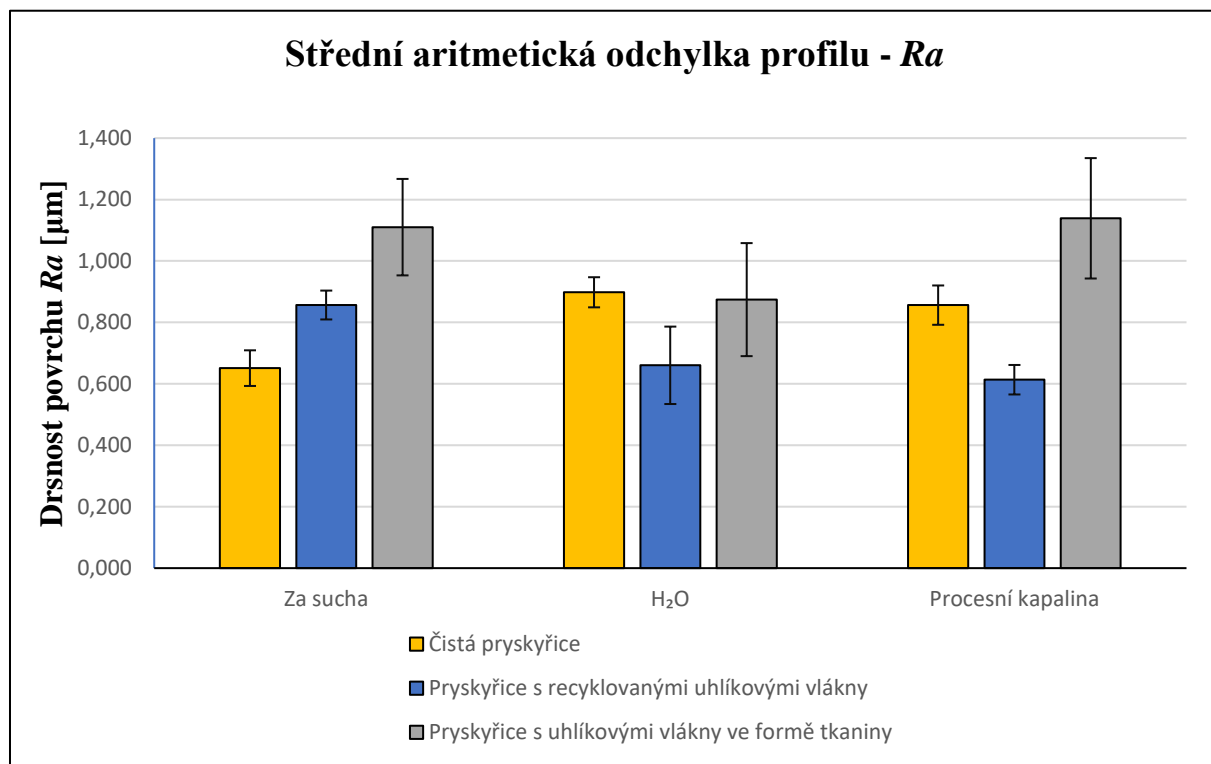
4.2 Drsnost povrchu po frézování

Pro tento experiment byly použity konstantní řezné podmínky uvedené v tabulce 04. V podkapitole 3.2.3 byla uvedena všechna procesní média pro zkoumané vzorky. Materiály vzorků byly uvedeny v kapitole 3.1. Byla měřena drsnost obrobené plochy. Postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.3.2. Pro každý parametr drsnosti (R_a , R_z , R_t) byla zvlášť vytvořena tabulka, kde se nachází vážený aritmetický průměr naměřených hodnot a statistický interval spolehlivosti. Tabulky byla následně zpřehledněny do grafického zobrazení.

4.2.1 Střední aritmetická odchylka profilu R_a

Tab. 07 Průměrná střední aritmetická odchylka profilu R_a po frézování

Střední aritmetická odchylka profilu - R_a [μm]			
Materiál vzorků	Za sucha	H ₂ O	Procesní kapalina
Čistá pryskyřice	0,651±0,058	0,898±0,049	0,856±0,064
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	0,857±0,047	0,660±0,126	0,613±0,048
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	1,110±0,157	0,874±0,184	1,139±0,196



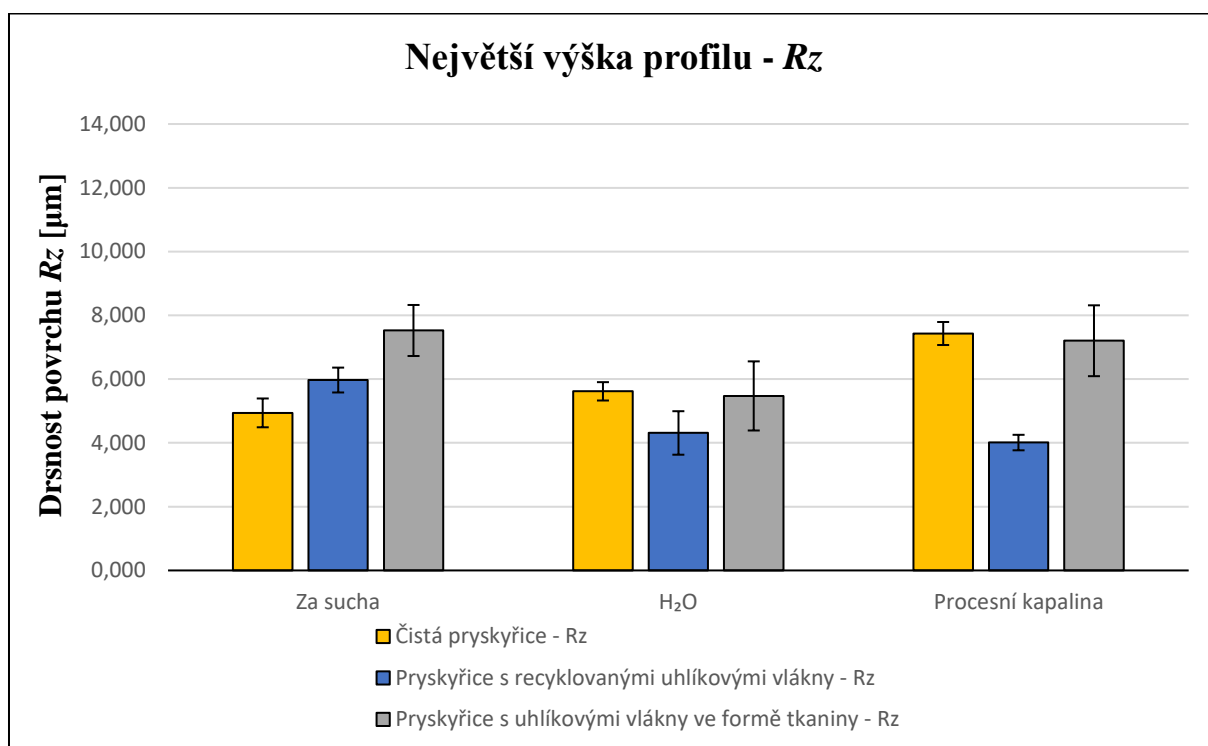
Graf 03 Průměrná střední aritmetická odchylka profilu – R_a po frézování

Z tabulky 07 a grafického zobrazení 03 je patrné, že nejmenší drsnost při parametru R_a byla dosažena u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování s procesní kapalinou a naopak největší u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování s procesní kapalinou.

4.2.2 Největší výška profilu Rz

Tab. 08 Průměrná největší výška profilu Rz po frézování

Největší výška profilu - Rz [μm]			
Materiál vzorků	Za sucha	H ₂ O	Procesní kapalina
Čistá pryskyřice	4,941±0,452	5,617±0,288	7,430±0,361
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	5,971±0,390	4,311±0,682	4,010±0,243
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	7,525±0,800	5,473±1,084	7,203±1,111



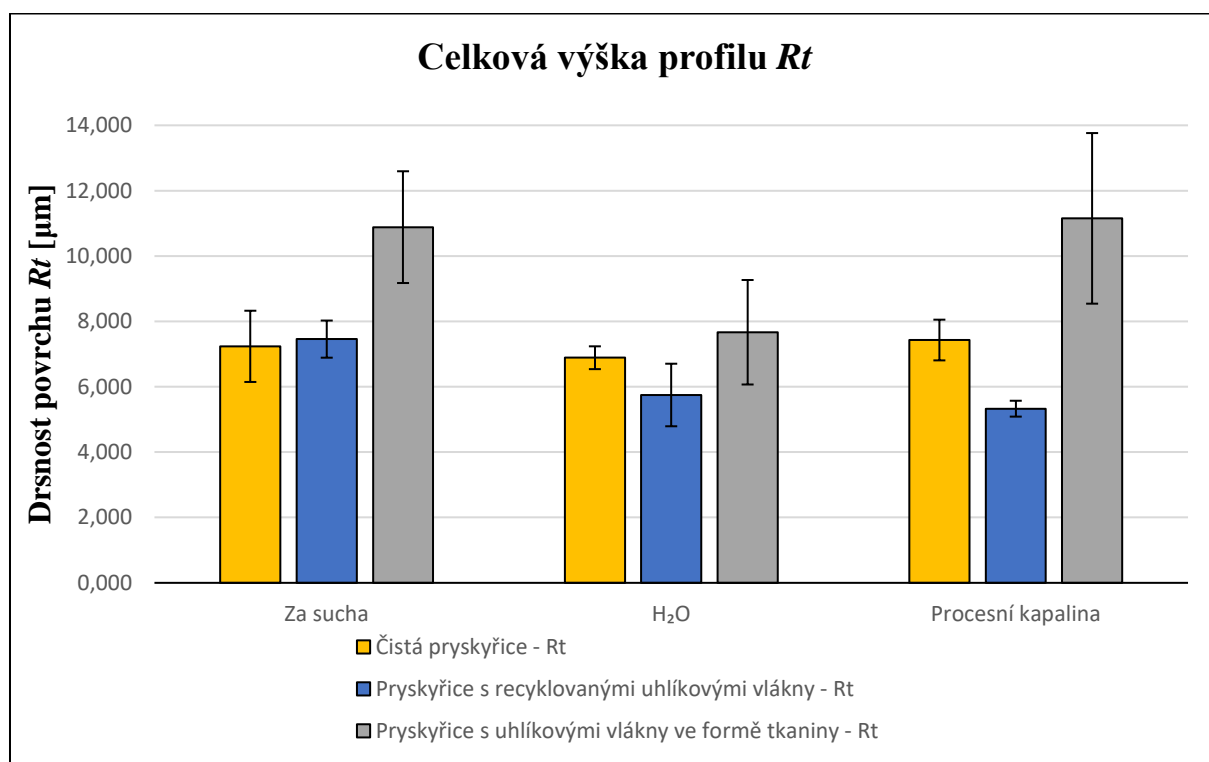
Graf 04 Průměrná největší výška profilu – Rz po frézování

Z tabulky 08 a grafického zobrazení 04 je patrné, že nejmenší drsnost při parametru Rz byla dosažena u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování s procesní kapalinou a naopak největší u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování za sucha.

4.2.3 Celková výška profilu R_t

Tab. 09 Průměrná celková výška profilu R_t po frézování

Celková výška profilu R_t [μm]			
Materiál vzorků	Za sucha	H ₂ O	Procesní kapalina
Čistá pryskyřice	7,236±1,090	6,888±0,349	7,430±0,623
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	7,458±0,568	5,748±0,957	5,329±0,243
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	10,884±1,710	7,668±1,599	11,153±2,610



Graf 05 Celková výška profilu - R_t po frézování

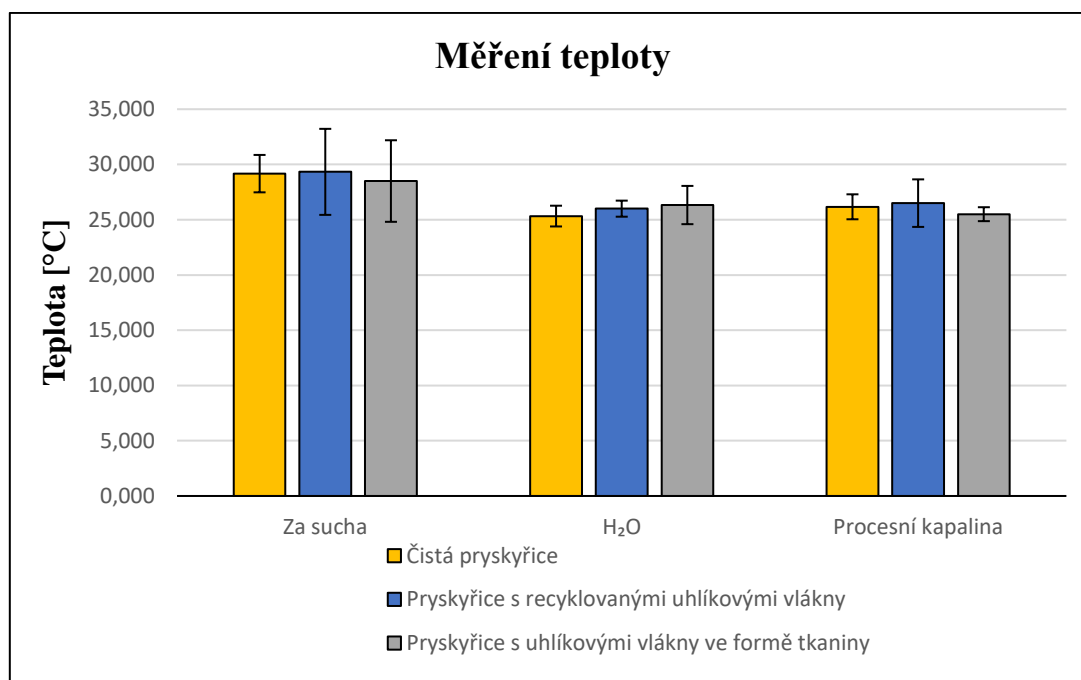
Z tabulky 09 a grafického zobrazení 05 je patrné, že nejmenší drsnost při parametru R_t byla dosažena u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování s procesní kapalinou a naopak největší u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování procesní kapalinou.

4.3 Teplota při frézování

Pro tento experiment byly použity konstantní řezné podmínky uvedené v tabulce 04. V podkapitole 3.2.3 byla uvedena všechna procesní média pro zkoumané vzorky. Materiály vzorků byly uvedeny v kapitole 3.1. Byla měřena teplota termočlánků při frézování. Postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.3.3. Pro změřené hodnoty byla vytvořena tabulka, kde se nachází vážený aritmetický průměr naměřených hodnot a statistický interval spolehlivosti. Tabulka byla následně zpřehledněna do grafického zobrazení.

Tab. 10 Průměrná teplota termočlánku při frézování

Teplota [°C]			
Materiál vzorků	Za sucha	H ₂ O	Procesní kapalina
Čistá pryskyřice	29,170±1,692	25,330±0,939	26,170±1,13
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	29,330±3,893	26,000±0,727	26,500±2,151
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	28,500±3,690	26,330±1,731	25,500±0,630



Graf 06 Průměrná teplota termočlánku při frézování

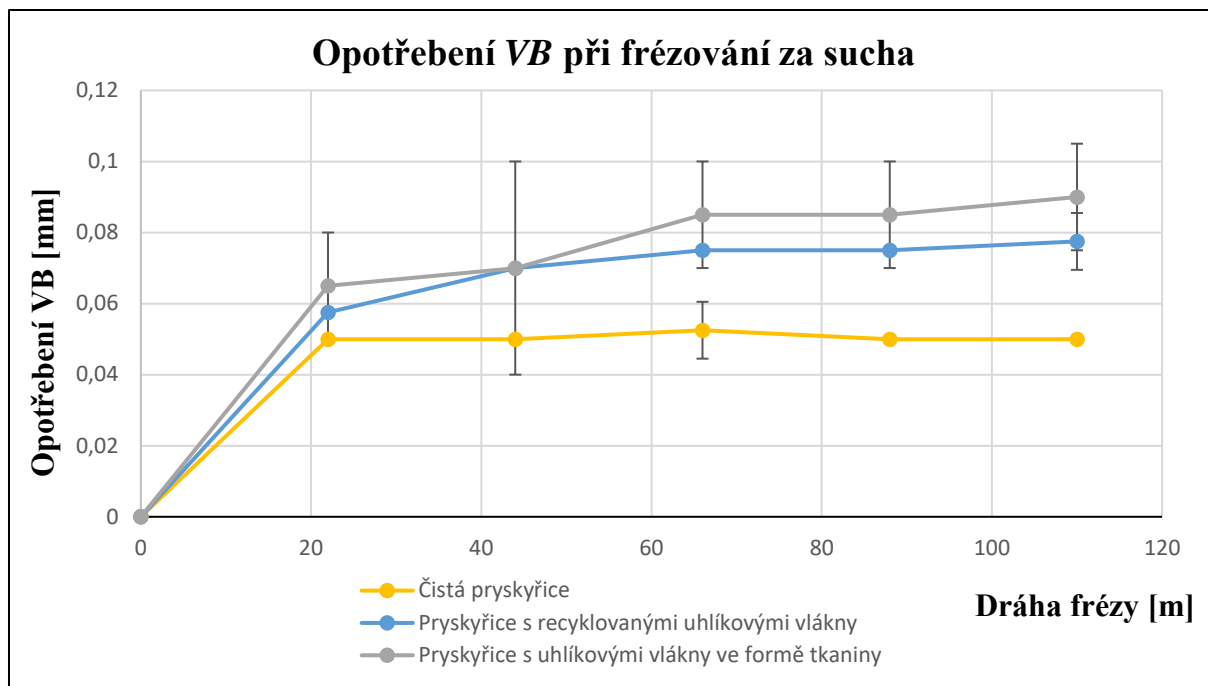
Z tabulky 10 a následného grafického zobrazení 06 je patrné, že nejmenší teploty bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování s H₂O a naopak největší u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování za sucha.

4.4 Velikost opotřebení VB

Pro tento experiment byly použity konstantní řezné podmínky uvedené v tabulce 04. V podkapitole 3.2.3 byla uvedena všechna procesní média pro zkoumané vzorky. Materiály vzorků byly uvedeny v kapitole 3.1. Byla měřena velikost opotřebení nástroje při frézování. Postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.3.4. Pro změřené hodnoty byly vytvořeny tabulky, kde se nachází vážený aritmetický průměr změřených hodnot a statistický interval spolehlivosti. Tabulky byly následně zřehledněny do grafického zobrazení.

Tab. 11 Velikost opotřebení VB při frézování za sucha

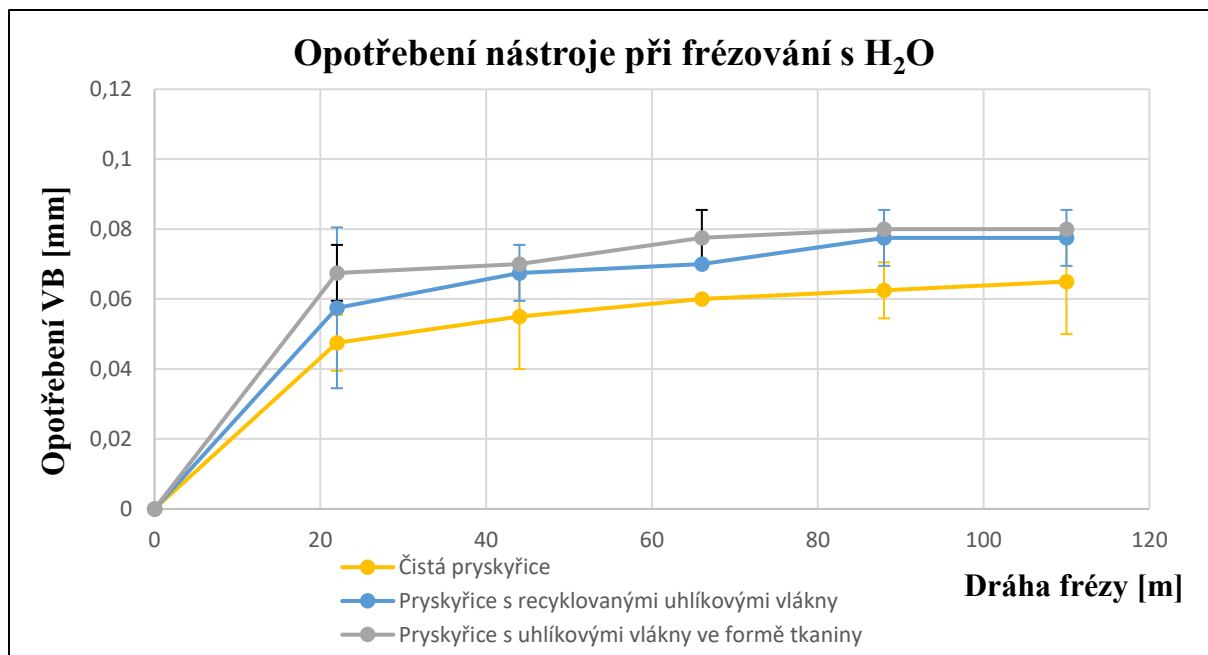
Opotřebení VB při frézování za sucha [mm]			
Materiál vzorků	Čistá pryskyřice	Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny
Dráha frézy [m]	VB [mm]		
22,000	0,050±0,000	0,058±0,008	0,065±0,015
44,000	0,050±0,000	0,070±0,000	0,070±0,030
66,000	0,053±0,008	0,075±0,000	0,085±0,015
88,000	0,050±0,000	0,075±0,000	0,085±0,015
110,000	0,050±0,000	0,078±0,008	0,090±0,015



Graf 07 Průměrné opotřebení VB při frézování za sucha

Tab. 12 Velikost opotřebení VB při frézování s H₂O

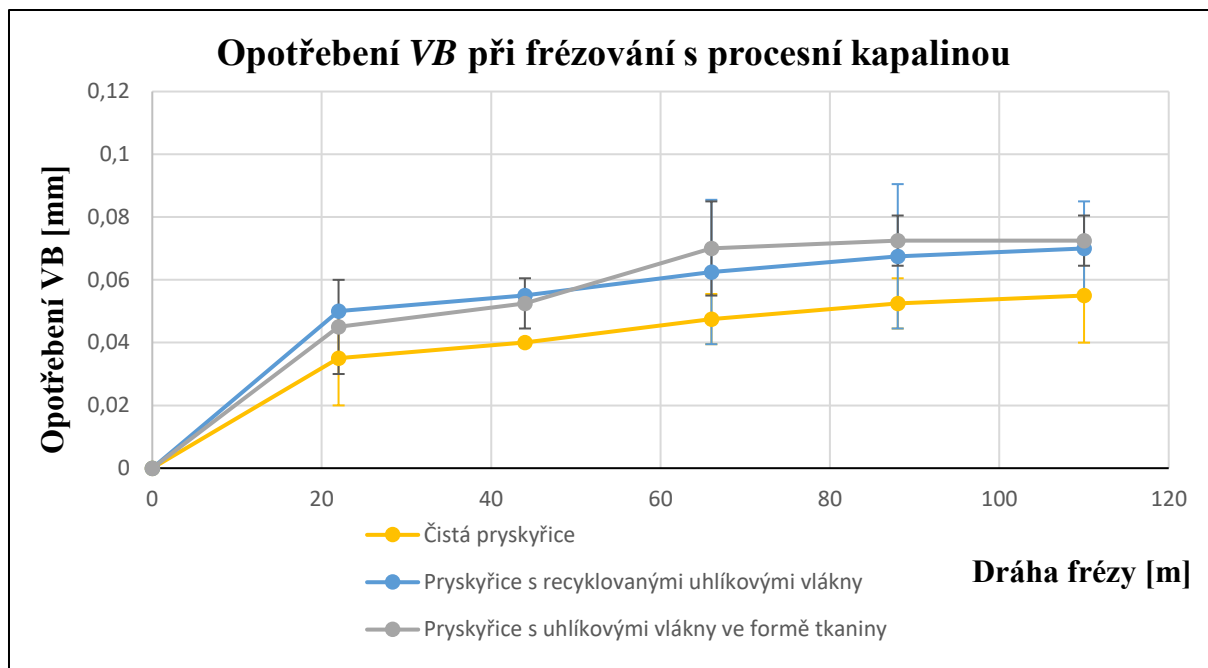
Opotřebení VB při frézování za H ₂ O [mm]			
Materiál vzorků	Čistá pryskyřice	Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny
Dráha frézy [m]	VB [mm]		
22,000	0,048±0,008	0,058±0,023	0,068±0,008
44,000	0,055±0,015	0,068±0,008	0,070±0,000
66,000	0,06±0,000	0,070±0,000	0,078±0,008
88,000	0,063±0,008	0,078±0,008	0,080±0,000
110,000	0,065±0,015	0,078±0,008	0,080±0,000



Graf 08 Průměrné opotřebení VB při frézování s H₂O

Tab. 13 Velikost opotřebení VB při frézování s procesní kapalinou

Opotřebení VB při frézování s procesní kapalinou [mm]			
Materiál vzorků	Čistá pryskyřice	Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny
Dráha frézy [m]	VB [mm]		
22,000	0,035±0,015	0,050±0,000	0,045±0,015
44,000	0,04±0,000	0,055±0,000	0,053±0,008
66,000	0,048±0,008	0,063±0,023	0,070±0,015
88,000	0,053±0,008	0,068±0,023	0,073±0,008
110,000	0,055±0,015	0,070±0,015	0,073±0,008



Graf 09 Průměrné opotřebení VB při frézování s procesní kapalinou

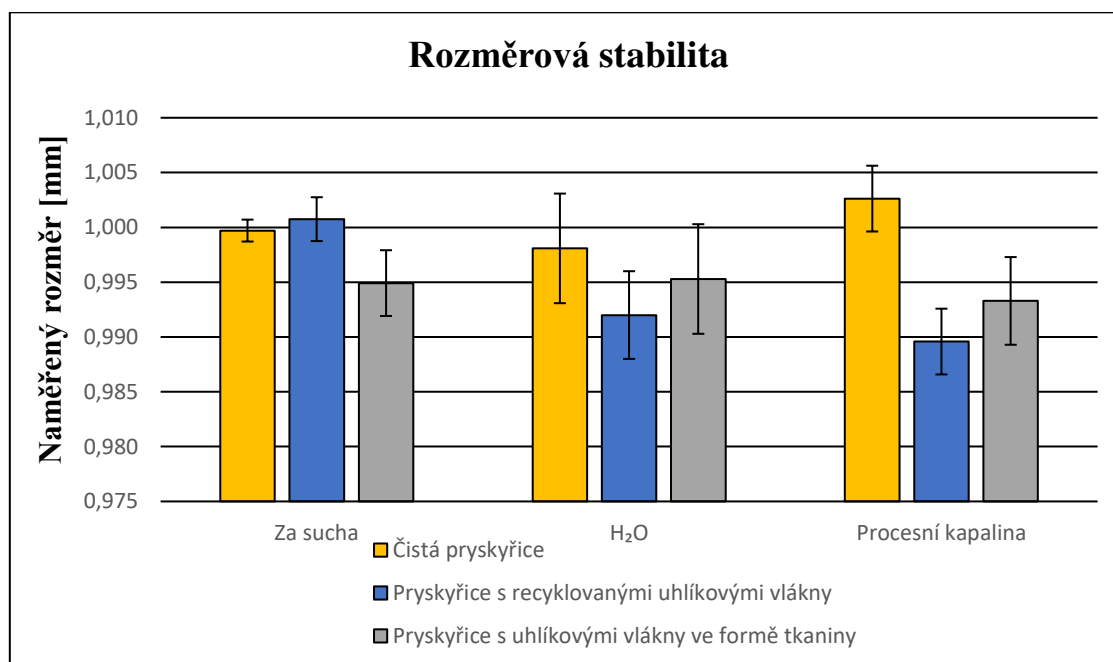
Z tabulek 11 až 13 a grafických zobrazení 07 až 09 je patrné, že nejmenší opotřebení nástroje bylo zjištěno u čisté pryskyřice při frézování za sucha a naopak největší u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při obrábění za sucha.

4.5 Rozměrová stabilita vzorků při frézování

Pro tento experiment byly použity konstantní řezné podmínky uvedené v tabulce 04. V podkapitole 3.2.3 byla uvedena všechna procesní média pro zkoumané vzorky. Materiály vzorků byly uvedeny v kapitole 3.1. Byla měřena přesnost rozměrů během procesu frézování. Celkový postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.3.5. Pro změřené hodnoty byla vytvořena tabulka, kde se nachází vážený aritmetický průměr změřených hodnot a statistický interval spolehlivosti. Tabulka byla následně zřehledněna do grafického zobrazení.

Tab. 14 Průměrná rozměrová stabilita vzorků po frézování

Rozměrová stabilita [mm]			
Materiál vzorků	Za sucha	H ₂ O	Procesní kapalina
Čistá pryskyřice	1,000±0,001	0,998±0,005	1,003±0,003
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	1,001±0,002	0,922±0,004	0,990±0,003
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	0,995±0,003	0,995±0,005	0,993±0,004



Graf 10 Průměrná rozměrová přesnost vzorků po frézování

Z tabulky 14 a následného grafického zobrazení 10 je patrné, že největší rozměrová stability dosáhla čistá pryskyřice při frézování za sucha a naopak nejnižší pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování procesní kapalinou.

4.6 Tvorba třísky

Tvorba třísky vznikala za konstantních řezných podmínek uvedených v tabulce 04. Obr. 36 prezentuje vzhled třísky každého druhu materiálu.



Obr. 36 a) Čistá pryskyřice

b) Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny



c) Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny

4.7 Vliv procesního média na hmotnost vzorku

Tento experiment sloužil ke zjištění, jestli má dlouhodobé vystavení vzorku procesnímu médiu značný vliv na změnu hmotnosti vzorku, tudíž i na změnu jeho vlastností. Jak se mohou měnit vlastnosti kompozitního dílu v případě vystavení procesní kapaliny je uvedeno v teoretické části v podkapitole 2.2.7. V podkapitole 3.3.6 byla uvedena všechna procesní média pro zkoumané vzorky. Materiály vzorků byly uvedeny v kapitole 3.1. Byl měřen procentuální nárůst hmotnosti v závislosti na době vystavení vzorku procesnímu médiu. Celkový postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.3.6. Pro změřené hodnoty byly vytvořeny grafické zobrazení (graf 11 až 15), které porovnály vliv navlhavosti všech druhů materiálů podle procesního média, kterému byly vystaveny. Následně byla vytvořena tabulka

Grafy závislosti nárůstu hmotnosti na době vystavení procesnímu médiu

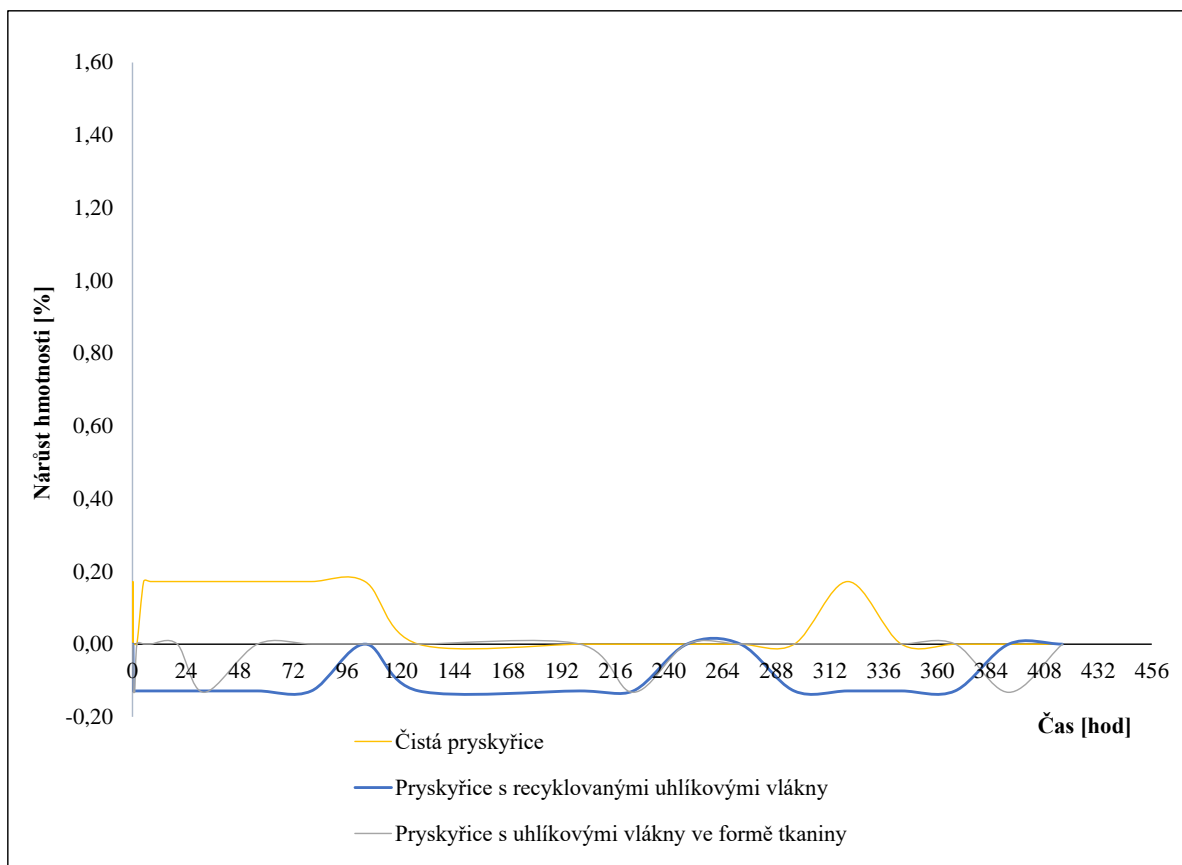
Graf 11 zobrazuje závislost nárůstu hmotnosti na době vystavení **okolnímu vzduchu**. Tento graf slouží pouze pro představu, jaký má vliv vlhkost vzduchu na nárůst či pokles hmotnosti. Lze tvrdit, že u všech materiálů se křivka podobá konstantě s výchyly do 0,17%, které mohou ovlivňovat změřené hodnoty a zvyšovat chybu měření. Tento jev je způsoben již zmíněnou proměnnou vlhkostí vzduchu.

Graf 12 zobrazuje závislost nárůstu hmotnosti na době vystavení **procesní kapalině**. Z tohoto grafu je patrné, že nejmenší nárůst hmotnosti byl zaznamenán u tlustostěnného vzorku čisté pryskyřice a pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny a naopak největší u tenkostěnného vzorku čisté pryskyřice. Dále lze pozorovat, že značné množství hmotnosti po sušení zůstalo ve vzorcích.

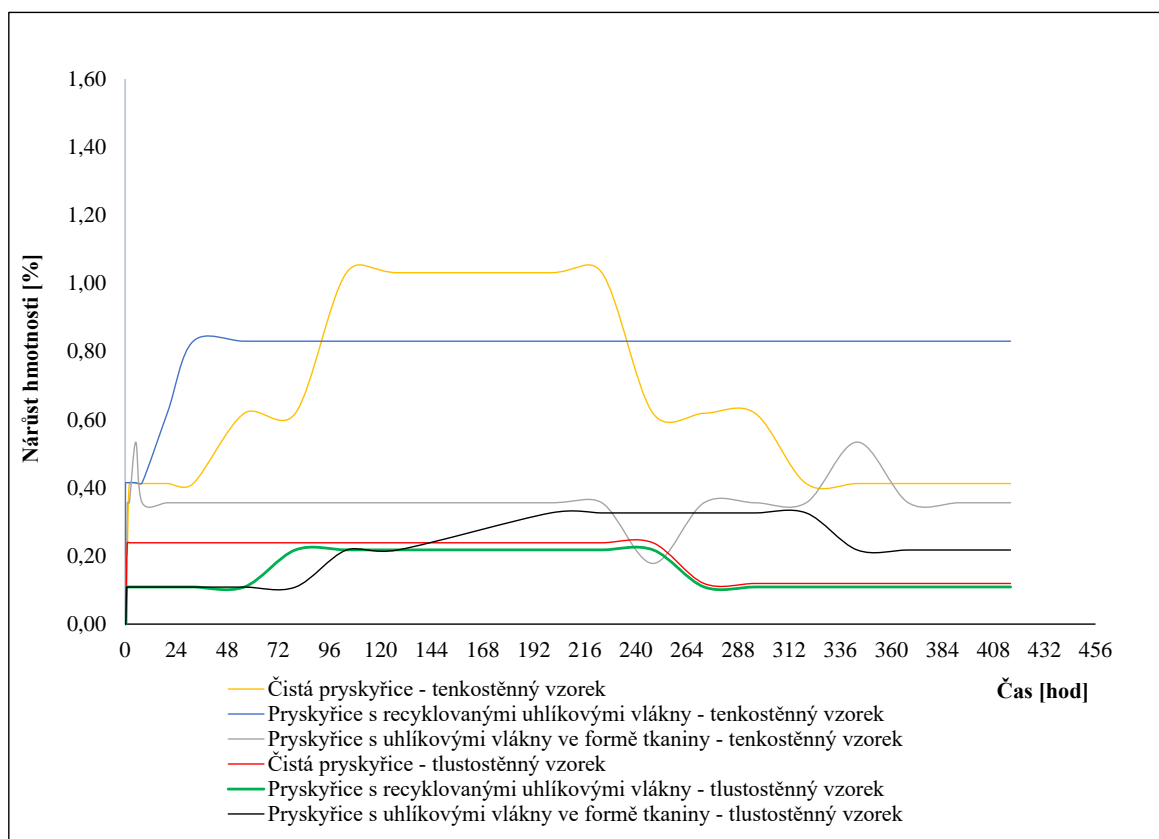
Graf 13 zobrazuje závislost nárůstu hmotnosti na době vystavení **neutrální H₂O**. Z tohoto grafu je patrné, že nejmenší nárůst hmotnosti byl zaznamenán přibližně u všech materiálů tlustostěnného vzorku a naopak největší u tenkostěnného vzorku čisté pryskyřice. Dále lze pozorovat, že hmotnost všech typů vzorku se vrátila na původní hodnotu.

Graf 14 zobrazuje závislost nárůstu hmotnosti na době vystavení **kyselé H₂O**. Z tohoto grafu je patrné, že nejmenší nárůst hmotnosti byl zaznamenán u tlustostěnného vzorku čisté pryskyřice a naopak největší u tlustostěnného vzorku pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny. Dále lze pozorovat, že hmotnost se vrátila na původní hodnotu pouze u tlustostěnného vzorku čisté pryskyřice a tenkostěnného vzorku pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny.

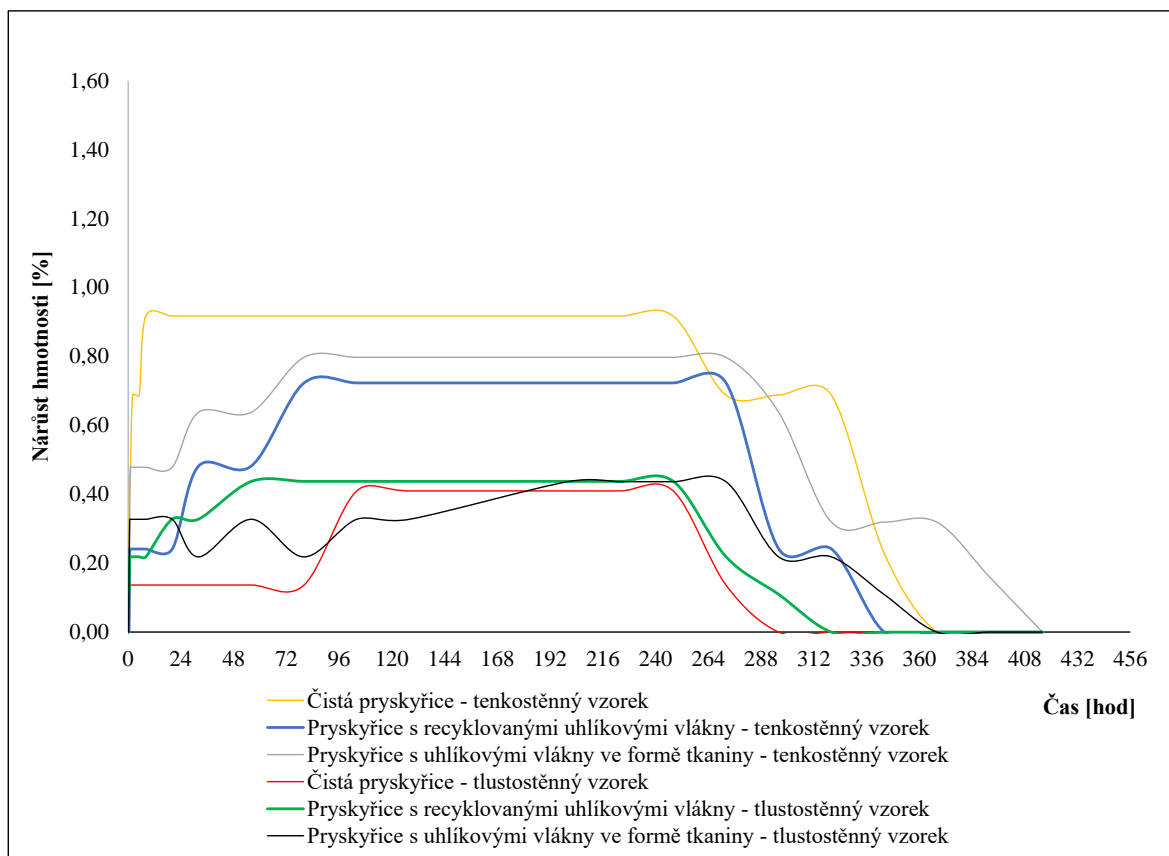
Graf 15 zobrazuje závislost nárůstu hmotnosti na době vystavení **zásadité H₂O**. Z tohoto grafu je patrné, že nejmenší nárůst hmotnosti byl zaznamenán u tlustostěnného vzorku pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny a naopak největší u tlustostěnného vzorku pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny. Dále lze pozorovat, že hmotnost se vrátila na původní hodnotu u obou typů vzorku pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny a u tenkostěnného vzorku čisté pryskyřice.



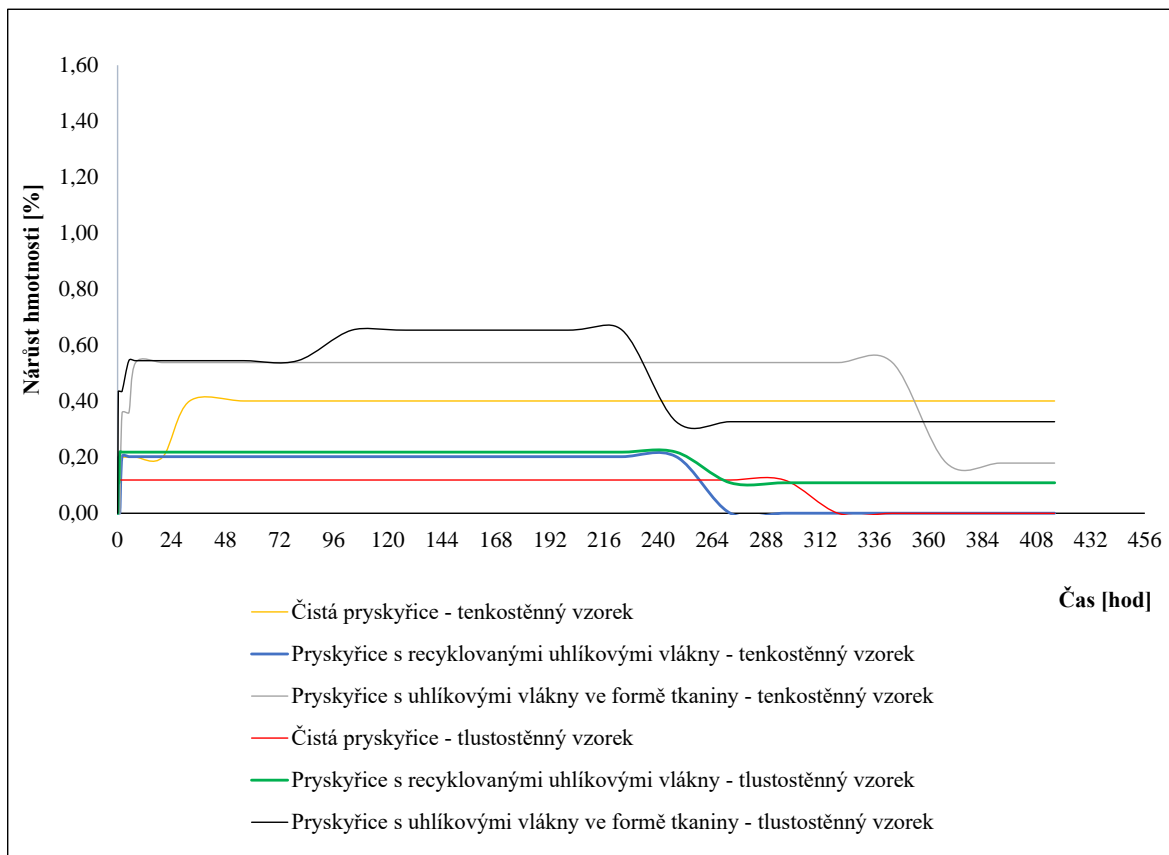
Graf 11 Vliv navlhavosti na hmotnost vzorku vystaveného okolnímu vzduchu



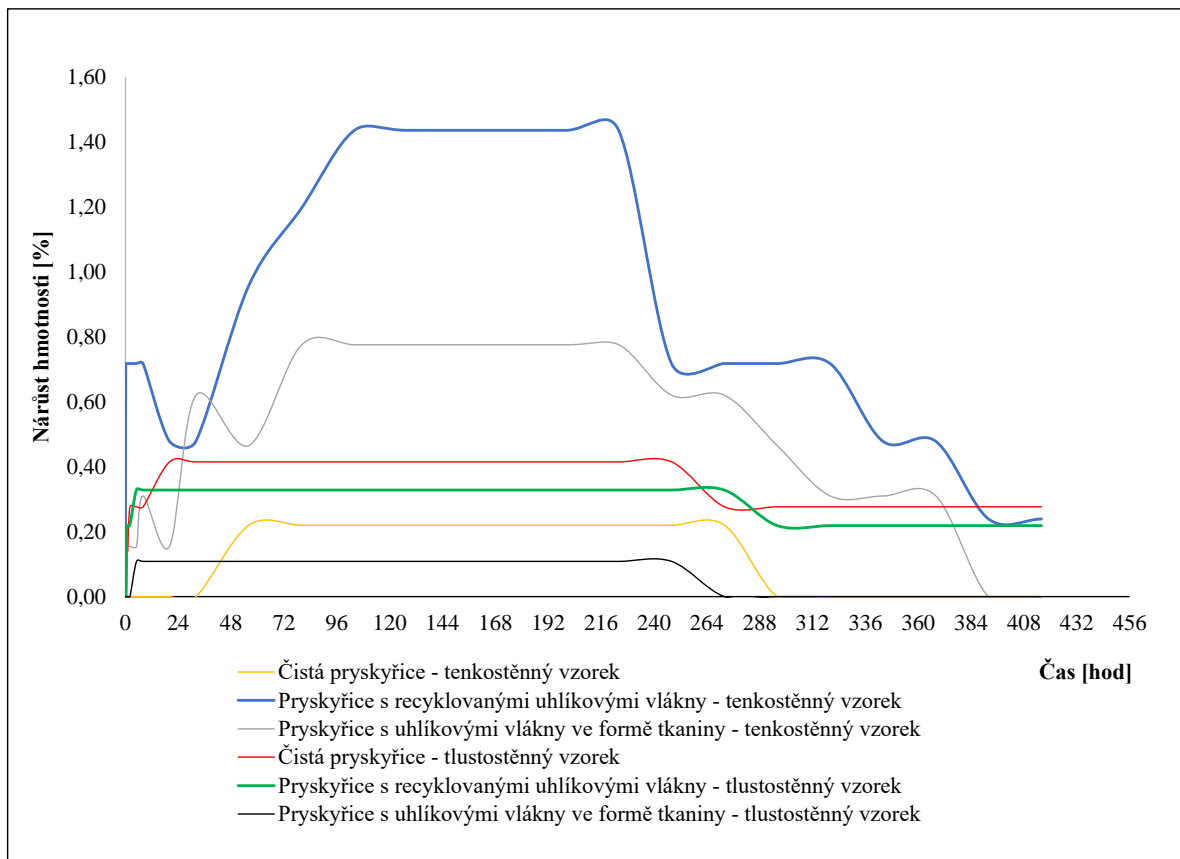
Graf 12 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného procesní kapalině



Graf 13 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného neutrálnímu prostředí ($ph=7$)



Graf 14 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného kyselému prostředí ($ph=4$)



Graf 15 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného zásaditému prostředí (pH=10)

Tab. 15 Porovnání procentuálního nárůstu a zůstatku hmotnosti vzorku

Procentuální nárůst hmotnosti do bodu nasycení [%]				
Tenkostěnný vzorek	Procesní kapalina	H ₂ O pH7	H ₂ O pH4	H ₂ O pH10
Čistá pryskyřice	1,03	0,92	0,40	0,22
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	0,83	0,72	0,20	1,44
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	0,53	0,80	0,54	0,78
Tlustostěnný vzorek				
Čistá pryskyřice	0,24	0,41	0,12	0,41
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	0,22	0,44	0,22	0,33
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	0,33	0,44	0,65	0,11
Procentuální zůstatek hmotnosti po sušení [%]				
Tenkostěnný vzorek	Procesní kapalina	H ₂ O pH7	H ₂ O pH4	H ₂ O pH10
Čistá pryskyřice	0,41	0,00	0,40	0,00
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	0,83	0,00	0,00	0,24
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	0,18	0,00	0,00	0,24
Tlustostěnný vzorek				
Čistá pryskyřice	0,12	0,00	0,00	0,28
Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny	0,11	0,00	0,11	0,22
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny	0,22	0,00	0,33	0,00

Z tabulky 15 a grafických zobrazení 11 až 15 je patrné, že nejmenší nárůst hmotnosti dosáhl tlustostěnný vzorek pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny vystavený zásadité H₂O a naopak největší u tenkostěnného vzorku pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny vystaveného zásadité H₂O. Největší zůstatek hmotnosti byl zaznamenán u tlustostěnného vzorku pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny vystavené procesní kapalině.

5. DISKUZE

Hlavním cílem předkládané práce bylo zjistit, zda je vhodné frézovat kompozitní materiál na bázi reaktoplastu zpevněný uhlíkovými vlákny s procesním médiem či nikoliv, a dále zda dochází k výraznému zlepšení či zhoršení kvality povrchu, rozměrové stability a jaký má procesní médium dlouhodobý vliv na vlastnosti materiálu.

Základní informace ohledně problematiky obrábění kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů zpevněných uhlíkovými vlákny jsou uvedeny v kapitole 2. V kapitole je shrnutí dosavadních poznatků týkajících se charakteristiky, zpracování, obrábění a volby řezných nástrojů kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů (podkapitola 2.1) a dále také pojednává o technologii frézování (podkapitola 2.2).

Přípravě a popisu metodiky potřebné pro dosažení plánovaného cíle práce je věnována celá kapitola 3. Kapitola obsahuje celkový popis výroby vzorků (podkapitola 3.1), volby strojů, nástrojů a vhodného procesního média (podkapitola 3.2). Daná kapitola dále popisuje postup všech experimentů a použitých zařízení (podkapitola 3.3).

Z kapitoly 3 a jejích podkapitol je vhodné zdůraznit následující:

- **Zvolené materiálové směsi:**

1. čistá epoxidová pryskyřice (tato směs slouží jako referenční),
2. epoxidová pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny,
3. epoxidová pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny.

Čistá pryskyřice sloužila pro možnost porovnávání. Množství recyklovaných vláken v materiálové směsi bylo 40 ds. Uhlíková vlákna ve formě tkaniny byla do formy nakladena v 10ti vrstvách.

- **Zvolené procesní média:**

Zvoleny byly 3 podmínky při kterých byla zrealizována technologie frézování:

- a. za sucha,
- b. s H₂O,
- c. s procesní kapalinou – emulzí.

Procesní kapalinou byla emulze, složená z vody a mazací látky Blasocut BC 25 MD.

- **Měřené parametry:**

1. řezná síla,

2. drsnost povrchu,
3. teplota,
4. velikost opotřebení nástroje,
5. rozměrová stabilita,
6. navlhavost.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků uvedených v kapitole 4 je možno poukázat na následující:

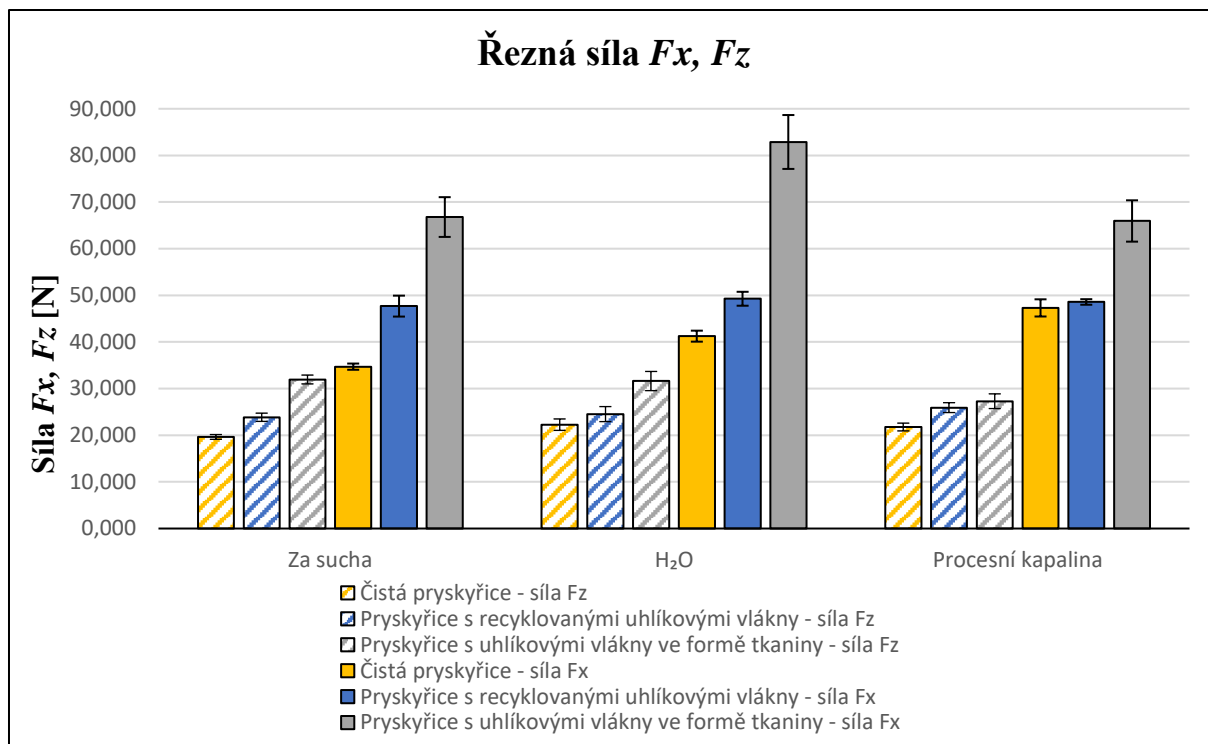
- **Řezná síla**

Řezná síla byla měřena piezoelektrickým dynamometrem (obr. 22a). Stručný princip měření a zpracování dat je uveden v podkapitole 3.3.1.

Hodnoty řezné síly v ose X se pohybovaly v rozmezí 34,704 – 82,880 N, podle prostředí frézování a frézovaného materiálu. **Nejnižší řezné síly v ose X** (obr. 76), bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování za sucha – 34,704 N. **Nejvyšší řezné síly v ose X** bylo dosaženo u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování s H_2O – 82,880 N.

Hodnoty řezné síly v ose Z se pohybovaly v rozmezí 19,636 – 31,956 N, podle prostředí frézování a frézovaného materiálu. **Nejnižší řezné síly v ose Z** (obr. 76), bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování za sucha – 19,636 N. **Nejvyšší řezné síly v ose Z** bylo dosaženo u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování za sucha – 31,956 N.

Z obr. 76 lze vidět, že **procesní kapalina** nijak **výrazně nesnižuje řeznou sílu** a H_2O ji naopak **výrazně zvyšuje**. Naměření vysokých řezných sil v ose X při frézování s H_2O je možné vysvětlit tak, že kvůli chladicímu účinku H_2O se zvyšuje řezný odpor a proto je potřeba vyvodit větší řeznou sílu pro odebrání třísky. Dále lze uvažovat, že mazací účinek procesní kapaliny sice pomohl nástroji překonat uhlíková vlákna, ovšem kvůli chladicímu účinku byl tento fakt vyrušen.



Graf 16 Přehled řezné síly F_x , F_z

- **Drsnost povrchu**

Drsnost plochy frézovaného povrchu byla měřena pomocí profilometru MITUTOYO SV-2000N2, zobrazeného na obr. 26. Profilometr je zařízení určené pro měření drsnosti povrchu dotykovou metodou. Měření probíhalo za konstantních řezných podmínek.

Nejlepší drsnosti pro parametr R_a , R_z a R_t frézované plochy bylo dosaženo u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování s procesní kapalinou – 0,613 μm , 4,010 μm a 5,329 μm .

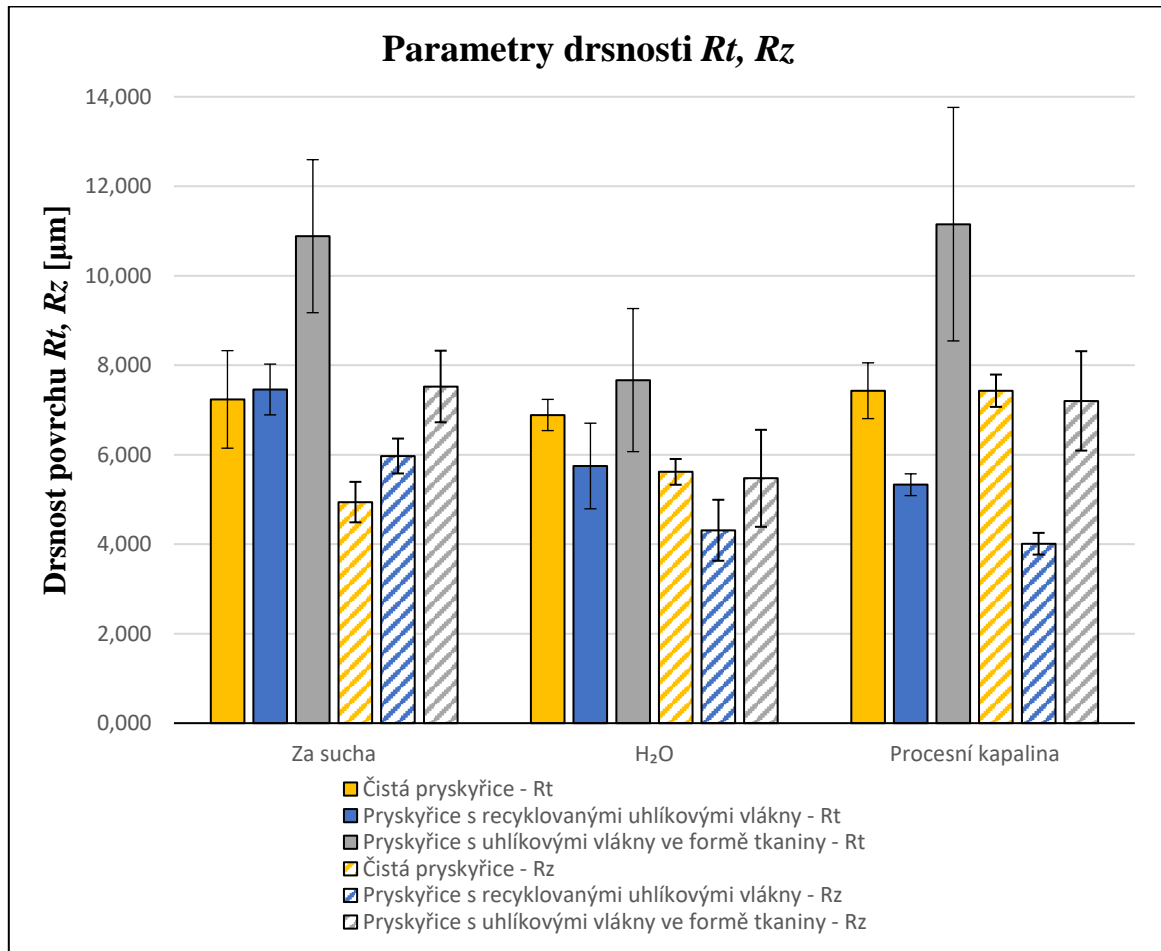
Nejhorší drsnosti pro parametr R_a frézované plochy bylo dosaženo u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování s procesní kapalinou – 1,139 μm .

Nejhorší drsnosti pro parametr R_z frézované plochy bylo dosaženo u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování za sucha – 7,525 μm .

Nejhorší drsnosti pro parametr R_t frézované plochy bylo dosaženo u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování s procesní kapalinou – 11,153 μm .

Lze tedy tvrdit, že pro pryskyřici s recyklovanými uhlíkovými vlákny má procesní kapalina **příznivý vliv** a naopak pro pryskyřici s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny a čistou

pryskyřici **nepříznivý**, na což poukazuje i graf 17. Při frézování s H₂O má procesní médium příznivý vliv pro všechny materiály.



Graf 17 Přehled naměřených hodnot parametrů drsností Rt a Rz

- **Teplota**

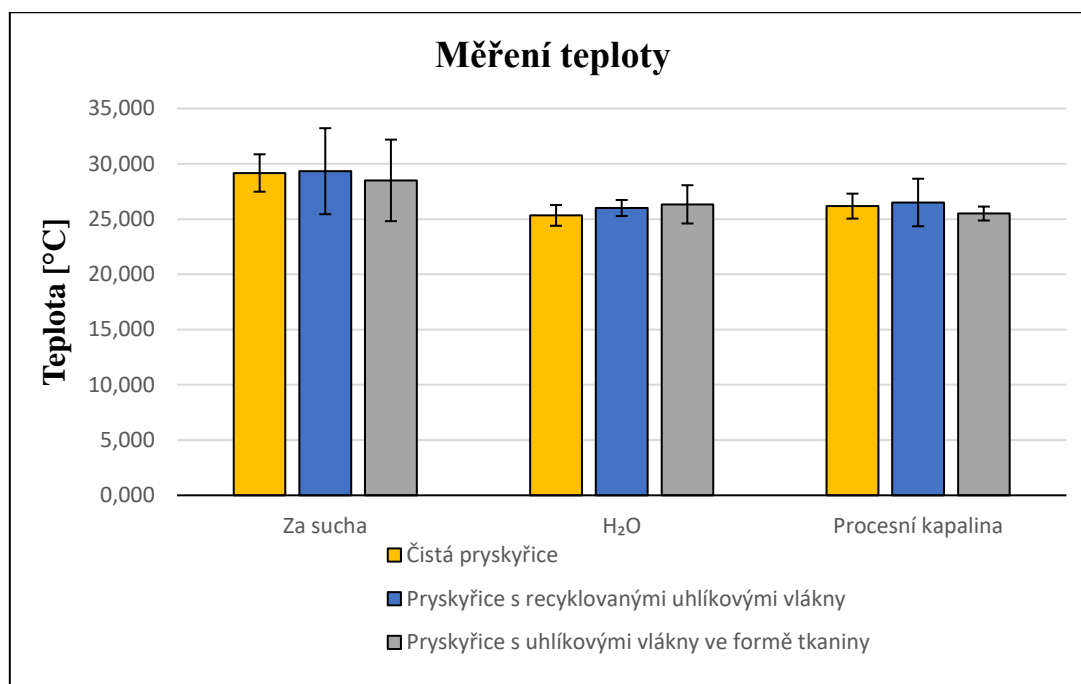
Pro měření teplot při procesu frézování bylo použito umělých termočlánků typu K. Tyto termočlánky snímají teploty od -270°C až do teplot 1372°C (vodiče byly vytvořeny z materiálů Ni-Cr (+) a Ni-Al (-)). Měření probíhalo za konstantních řezných podmínek. Teplota prostředí se pohybovala průměrně okolo 25,83°C, vlhkost vzduchu 31,13% a tlak 962,9 hPa.

Vyprodukované teploty se pohybovaly v intervalu 25,330 – 29,330°C.

Nejnižší vyprodukovaná teplota vzniklá při procesu frézování byla změřena při chlazení s H₂O u čisté pryskyřice –25,330°C.

Nejvyšší vyprodukovaná teplota vzniklá při procesu frézování byla změřena bez chlazení u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny $-29,330^{\circ}\text{C}$.

Jak bylo předpokladem, u vybraných materiálů vznikaly velmi nízké teploty při frézování (graf 06), které nepřesáhly ani 30°C . Dále z výsledků vyplívá, že chladicí média **snížily** teploty až pod teplotu okolního vzduchu.



Graf 06 Průměrná teplota termočlánku při frézování

- **Velikost opotřebení VB**

Měření velikosti opotřebení VB bylo provedeno pomocí dílenského mikroskopu ZEISS. Měření bylo prováděno postupně vždy po ofrézování dráhy 22 m, 44 m, 66 m, 88 m, 111 m. Měření probíhalo za konstantních řezných podmínek.

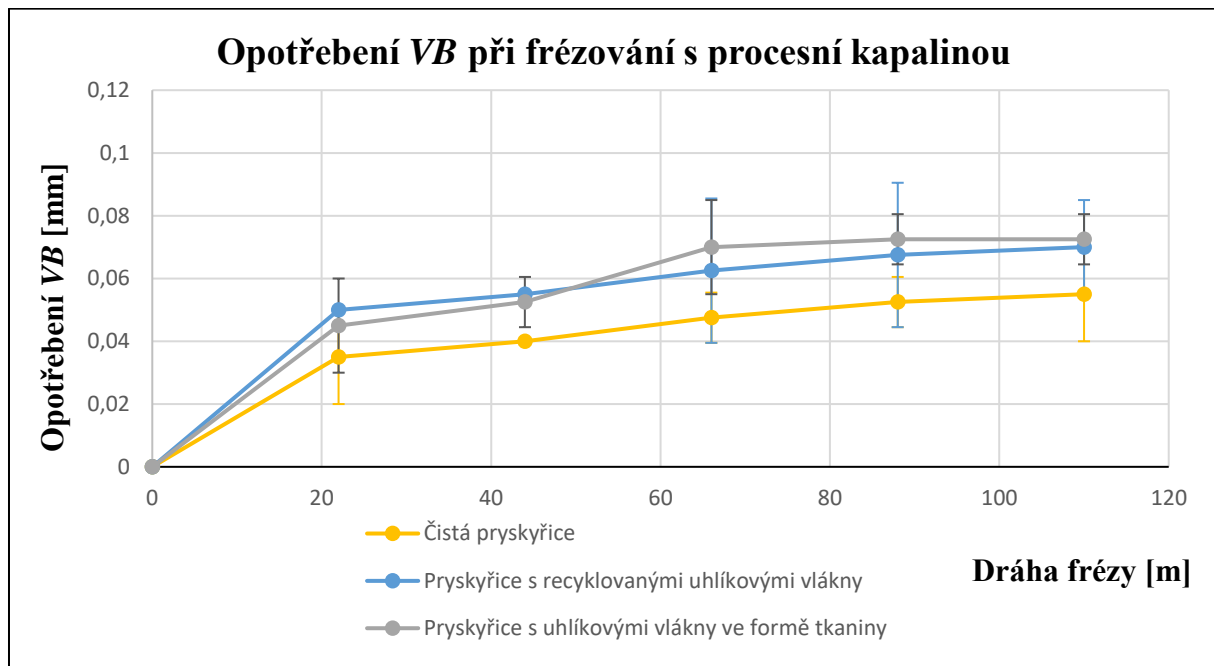
Velikost opotřebení VB po ujetí 111 m se pohybovala v intervalu 0,05 – 0,09 mm.

Nejmenší opotřebení bylo změřeno podle předpokladů u čisté pryskyřice, avšak překvapivě u frézování za sucha $-0,05$ mm.

Největší opotřebení bylo změřeno podle předpokladů u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování za sucha $-0,09$ mm.

I přes to, že nejmenší opotřebení bylo změřeno u čisté pryskyřice při frézování za sucha, nelze to považovat za optimální výsledek, protože hodnota 0,05 mm byla naměřena již

po ujetí nástroje 22 m. Jako lepší výsledek se tedy jeví čistá pryskyřice při frézování procesní kapalinou. Jak lze vidět na grafu 09, pro všechny materiály měla procesní kapalina **pozitivní účinek** a výrazné zlepšení opotřebení VB hlavně pro materiály obsahující uhlíková vlákna.



Graf 09 Průměrné opotřebení VB při frézování s procesní kapalinou

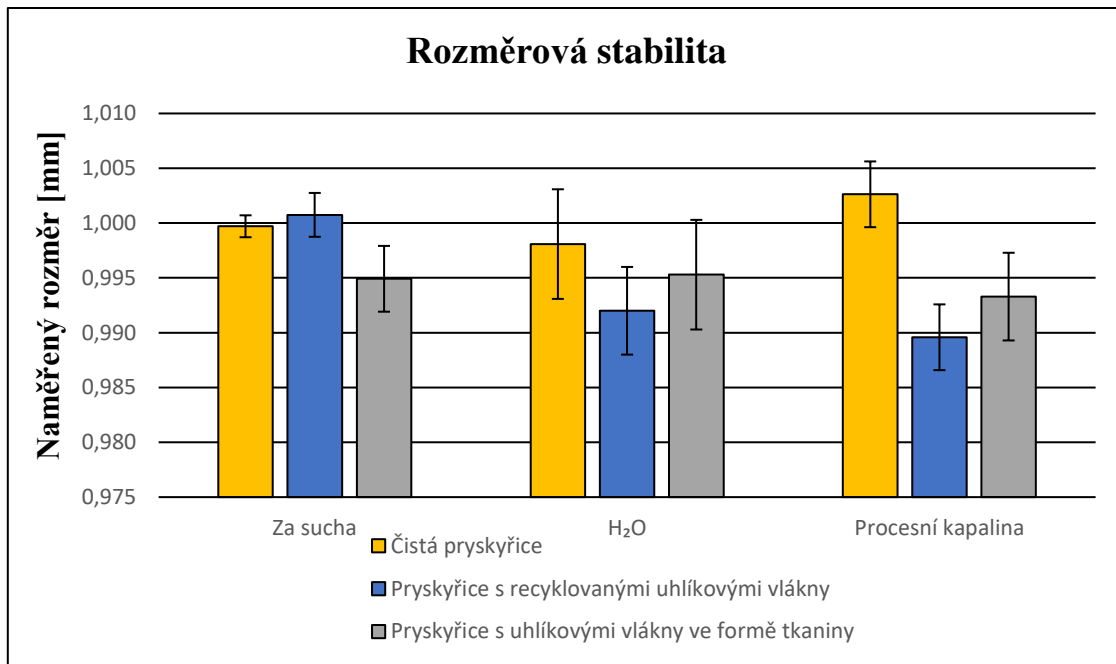
- **Rozměrová stabilita**

Pro měření rozměrové stability ofrézované plochy byl použit digitální třmenový mikrometr Mitutoyo (obr. 35a).

Nejlepší rozměrové stability bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování za sucha – 1,000 mm, ale téměř totožná hodnota byla dosažena u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny – 1,001 mm.

Nejhorší rozměrové stability bylo dosaženo u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování procesní kapalinou – 0,990 mm.

Ze získaných výsledků lze tvrdit, že procesní médium má **negativní vliv** na rozměrovou stabilitu. Pro představu znovu uveden graf 10.



Graf 10 Průměrná rozměrová přesnost vzorků po frézování

- **Tvorba třísky**

Při procesu frézování u čisté pryskyřice vznikala vinutá a elementární tříska (obr. 39a), zatímco u obou typů pryskyřice s uhlíkovými vlákny vznikala elementární až jemná drobná tříska formy prášku (obr. 39a, 39b).

- **Vliv procesního média na hmotnost vzorku**

Pro měření nárůstu hmotnosti vzorku byla použita laboratorní váha značky TSCALE (obr. 38).

Nejmenší nárůst hmotnosti byl zaznamenán u tlustostěnného vzorku pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny vystaveného zásadité H₂O –0,11% po cca 5 hod.

Největší nárůst hmotnosti byl zaznamenán u tenkostěnného vzorku pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny vystaveného zásadité H₂O –1,44% po cca 96 hod.

Největší zůstatek hmotnosti byl zaznamenán tlustostěnného u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny vystavené procesní kapalině –0,83%

Z naměřených výsledků lze vyvodit několik závěrů:

1. Proměnná vlhkost vzduchu mohla ovlivnit výsledky maximálně do hodnoty 0,17%.

2. Jak bylo očekáváno, u procesní kapaliny vždy zůstalo určité množství hmotnosti ve vzorku, z důvodu pevných substancí obsažené v mazací látce, která byla součástí emulze. Naopak u neutrální H_2O se vždy hmotnost vrátila na původní hodnotu.
3. Příznivým výsledkem je, že nárůst hmotnosti dosahoval velmi malých hodnot při velmi dlouhé době vystavení procesnímu médiu.
4. U kyselého prostředí bylo dosaženo malých maximálních nárůstů hmotnosti a naopak u zásaditého prostředí byla naměřena největší hodnota.

6. ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce je zaměřena na studii účinků procesních kapalin a jejich vlivu na kvalitu a rozměrovou přesnost frézovaných kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny.

Hlavním cílem předkládané práce bylo zjistit, zda je vhodné využít procesní médium při frézování kompozitů na bázi reaktoplastu zpevněných uhlíkovými vlákny.

Práce byla rozdělena do tří hlavních částí.

Teoretická část sloužila pro seznámení s kompozitními materiály na bázi reaktoplastu s uhlíkovými vlákny, jejich vlastnostmi, výrobou a problematikou jejich obrábění.

Druhá část se zabývala metodikou experimentů sloužících pro zjištění cíle práce.

Třetí část práce je věnovaná samotnému experimentu a jeho zpracování do tabulek a grafického zobrazení. Nedílnou součástí je diskuze a závěr, kde jsou prezentovány poznatky a výsledky práce.

Z rozsáhlého souboru měření lze shrnout následující poznatky:

1. Nejlepších výsledků (nejnižších hodnot) řezných sil v ose X i Z bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování za sucha – 34,704 N. Nejvyšší hodnoty řezných sil v ose X i Z byly naměřeny u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování s H_2O – 82,880 N. Z naměřených výsledků lze vyvodit závěr, že použitá procesní média **neměla pozitivní vliv na řeznou sílu**.
2. Nejlepších výsledků (nejnižších hodnot) drsnosti bylo dosaženo u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování s procesní kapalinou, kde byly naměřeny parametry R_a , R_z a R_t v hodnotě – 0,613 μm , 4,010 μm a 5,329 μm . Nejvyšší hodnoty drsnosti byly naměřeny u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování s procesní kapalinou u parametrů R_a a R_t – 1,139 μm , 11,153 μm a za sucha u parametru R_z – 7,525 μm . Z naměřených výsledků lze vyvodit závěr, že použitá procesní kapalina **měla pozitivní vliv** pouze na pryskyřici s recyklovanými uhlíkovými vlákny a H_2O měla **pozitivní vliv** na všechny materiály.

3. Nejlepších výsledků (nejnižších hodnot) bylo dosaženo u čisté pryskyřice při frézování s H₂O tj. 25,330°C a překvapivě také u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny, která při frézování s procesní kapalinou dosáhla hodnoty jen 25,500°C. Nejvyšší vyprodukovaná teplota tj. 29,330°C byla změřena při frézování za sucha u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny. Při frézování s procesní kapalinou došlo ke snížení teploty tohoto materiálu o 9,65% a u H₂O o 11,350%. Z naměřených výsledků lze vyvodit závěr, že použitá procesní média **měla pozitivní vliv na velikost teploty**, je ovšem nutné poznamenat, že i při frézování za sucha teploty dosahovaly nízkých hodnot tj. pod 30°C.
4. Nejmenší konečné opotřebení tj. 0,05 mm bylo zaznamenáno u čisté pryskyřice při frézování za sucha, nicméně nejlepší průběh opotřebení byl zaznamenán u čisté pryskyřice při frézování s procesní kapalinou kde při 22 m bylo opotřebení 0,035 mm a na konci při 111 m bylo 0,055 mm. Nejvyšší opotřebení tj. 0,09 mm bylo zaznamenáno u pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny při frézování za sucha. Z naměřených výsledků lze vyvodit závěr, že použitá procesní média **měla pozitivní vliv na opotřebení nástroje**.
5. Nejlepší výsledek rozměrové stability byl zaznamenán u čisté pryskyřice při frézování za sucha tj. 1,000 mm a u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny za sucha tj. 1,001 mm. Nevhodná rozměrová stabilita tj. 0,990 mm byla zaznamenána u pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny při frézování s procesní kapalinou. Z naměřených výsledků lze vyvodit závěr, že použitá procesní média **neměla pozitivní vliv na rozměrovou stabilitu** obrobenej plochy.
6. Při procesu frézování u čisté pryskyřice vznikala vinutá a elementární tříška, zatímco u obou typů pryskyřice s uhlíkovými vlákny vznikala elementární až jemná drobná tříška formy prášku.
7. Nejlepší výsledek při měření nárůstu hmotnosti tj. 0,11% po cca 5 hod byl zaznamenán u tlustostěnného vzorku pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny vystaveného zásadité H₂O. Největší nárůst hmotnosti tj. 1,44% po cca 96 hod byl zaznamenán u tenkostěnného vzorku pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny vystaveného zásadité H₂O. A největší zůstatek

hmotnosti tj. 0,83% byl zaznamenán tlustostěnného vzorku pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny vystaveného procesní kapalině. U neutrální H₂O nebyly naopak naměřeny žádné zůstatky. Z naměřených výsledků lze vyvodit závěr, že použitá procesní média **neměla na nárůst hmotnosti veliký vliv** vzhledem k tomu, že největší nárůst byl zaznamenán 1,44% po cca 96 hod, takže by materiál musel být vystaven médiu velmi dlouhou dobu.

Jak již bylo zmíněno, hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjistit, zda je vhodné využít procesní médium při frézování kompozitů na bázi reaktoplastu zpevněných uhlíkovými vlákny.

Ze získaných výsledků je zřejmé, že procesní média měla pozitivní vliv jen v případě měření teploty, opotřebení nástroje, u H₂O na drsnost povrchu a v případě pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny i u procesní kapaliny. Je ovšem dobré zmínit, že při frézování za sucha se teploty pohybovaly v podobných teplotách jako při užití procesního média. Lze tedy tvrdit, že procesní médium se vyplatí použít pouze v případech, kdy je vysoký požadavek na trvanlivost nástroje nebo jakost obrobené plochy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů* [online]. [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [2] *Index of /libor.benes/vyuka/matlet* [online]. [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/>
- [3] LIDAŘÍK, Miloslav. *Epoxidové pryskyřice*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [4] *Produktivní nástroje pro letecký průmysl a kosmonautiku* [online]. [vid. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/produktivni-nastroje-pro-letecky-prumysl-a-kosmonautiku-13480.html>
- [5] *Vliv směru vláken dlouhovláknového kompozitu v okolí díry na napětí* [online]. [vid. 2019-11-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126475
- [6] *Obrábění nekovových materiálů* [online]. [vid. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/obr-nekovu.pdf>
- [7] *Mechanika kompozitů* [online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [8] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění a montáží*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990.
- [9] Sousedné frézování nebo nesousedné frézování. In: *Sandvik Coromant* [online] [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com:443/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
- [10] DOLANSKÝ, Pavel. Účinek procesních plynů a kapalin na technologii frézování a kvalitu obrobených součástí [*Diplomová práce*]. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Dvořáčková, Štěpánka.
- [11] JERSÁK, Jan. *Základní konvenční technologie obrábění*. Liberec, 2016. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/download/tob_pod.zip
- [12] LEDVINA, Miloslav. *Výzkum vlivů progresivních způsobů chlazení vybraných technologií obrábění*. Liberec, 2017. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.

[13] Navlhavost polymerů. In: [cit. 03.07.2020]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/07.html>

[14] NEJMAN, Dominik. *Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.

[15] Obrábění kompozitních materiálů. In: [cit. 12.07.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kompozitnich-materialu.html>

[16] Teorie obrábění. In: [cit. 12.07.2020]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep19.pdf>

[17] DRÁB, Vojtěch. *Technologie*. Sv. 1. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1979.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PAN – polyakrylonitrilová vlákna

NC – numeric control

CNC – computer numeric control

ČSN – československá norma

VB – opotřebení břitu

KT – opotřebení nástroje ve tvaru žlábků

VR – rozměrové opotřebení

WC – karbid wolframu

TiC – karbid titanu

Co – kobalt

H₂O – voda

R_m – pevnost v tahu

HB – pevnost podle Brinella

VBD – vyměnitelná břitová destička

Ni – nikl

Cr – chrom

Al – hliník

SK – slinutý karbid

ph – power of hydrogen

f_{min} posuv za minutu [mm · min⁻¹]

f_n posuv za otáčku [mm · ot⁻¹]

f_z posuv na zub [mm]

v_c řezná rychlost [m · min⁻¹]

v_f Rychlost posuvu [mm/min]

π	Ludolfovo číslo	[-]
z	počet zubů	[-]
n	otáčky frézy	[min ⁻¹]
D	průměr frézy	[mm]
R	poloměr frézy	[mm]
F_x	řezná síla v axiálním směru	[N]
F_y	řezná síla v radiálním směru	[N]
F_z	řezná síla v tangenciálním směru	[N]
γ_o	úhel čela	[°]
χ_r	úhel nastavení	[°]
R_a	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R_z	Největší výška profilu	[μm]
R_t	Celková výška profilu	[μm]
o	½ Obvodu frézy	[mm]
L	Celková ujetá vzdálenost frézy	[mm]
s	Ujetá dráha frézy po jednom úseku	[mm]

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

- Obr. 01 Možné způsoby uspořádání vláken krátko/dlouho vláknových kompozitů [5]
- Obr. 02 Prostorové uspořádání vybraných vláknových kompozitů [7]
- Obr. 03 Způsoby frézování podle způsobu záběru frézy [5]
- Obr. 04 Sousedné a nesousedné frézování [9]
- Obr. 05 Základní druhy fréz [11]
- Obr. 06 Charakter opotřebení břitu fréz [10]
- Obr. 07 Epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 a tvrdidlo P11 [13]
- Obr. 08 Silikonová forma na výrobu kompozitních bloků [13]
- Obr. 09 Recyklovaná uhlíková vlákna Carbiso™ MF vmíchaná do epoxidové pryskyřice [13]
- Obr. 10 Smočená uhlíková vlákna tvořící tkaninu [13]
- Obr. 11 Přetlaková nádoba [13]
- Obr. 12 Odlité vzorky pro praktickou část práce
- Obr. 13 Zarovnávaný vzorek
- Obr. 14 Zarovnaný vzorek
- Obr. 15 Frézka FNG 32
- Obr. 16 Čelní fréza a válcová fréza
- Obr. 17 Použité vyměnitelné břitové destičky z SK
- Obr. 18 Nádoba pro přívod procesního média gravitačním způsobem
- Obr. 19 Piezoelektrický dynamometr KISTLER a siloměr
- Obr. 20 Nábojový zesilovač a software LabVIEW
- Obr. 21 Výstup hodnot ze softwaru LabVIEW
- Obr. 22 Detail z grafu výsledných hodnot
- Obr. 23 Profilometr MITUTOYO SV-2000N2
- Obr. 24 Nákres měření drsnosti
- Obr. 25 Vrtání děr pro zavedení termočlánků

- Obr. 26 Vzorek připravený pro frézování
- Obr. 27 Vyvrtané díry pro zavedení termočlánků
- Obr. 28 Vzorek pro měření teploty na obrobku u technologie frézování
- Obr. 29 Řídící jednotka a sběrnice
- Obr. 30 Dílenský mikroskop ZEISS a nitkový kříž v okuláru [12]
- Obr. 31 Dráha frézy při obrábění vzorku
- Obr. 32 Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo a rozložení měřených míst
- Obr. 33 Tlustostěnný a tenkostěnný vzorek
- Obr. 34 Vzorky ponořené v procesním médiu
- Obr. 35 Laboratorní váhy značky TSCALE
- Obr. 36 Vzhled třísky každého druhu materiálu

SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

- Graf 01 Průměrná hodnota řezné síly v ose X v průběhu frézování
- Graf 02 Průměrná hodnota řezné síly v ose Z v průběhu frézování
- Graf 03 Průměrná střední aritmetická odchylka profilu – Ra po frézování
- Graf 04 Průměrná největší výška profilu – Rz po frézování
- Graf 05 Celková výška profilu - Rt po frézování
- Graf 06 Průměrná teplota termočlánku při frézování
- Graf 07 Průměrné opotřebení VB při frézování za sucha
- Graf 08 Průměrné opotřebení VB při frézování s H₂O
- Graf 09 Průměrné opotřebení VB při frézování s procesní kapalinou
- Graf 10 Průměrná rozměrová přesnost vzorků po frézování
- Graf 11 Vliv navlhavosti na hmotnost vzorku vystaveného okolnímu vzduchu
- Graf 12 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného procesní kapalině
- Graf 13 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného neutrálnímu prostředí (ph=7)
- Graf 14 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného kyselému prostředí (ph=4)
- Graf 15 Nárůst hmotnosti vzorku vystaveného zásaditému prostředí (ph=10)

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 01	Přípustné hodnoty při obrábění běžnými reznými materiály [16]
Tab. 02	Parametry frézky FNG 32
Tab. 03	Definice měřených parametrů [12]
Tab. 04	Konstantní rezné podmínky při frézování
Tab. 05	Průměrná hodnota rezné síly v ose X v průběhu frézování
Tab. 06	Průměrná hodnota rezné síly v ose Z v průběhu frézování
Tab. 07	Průměrná střední aritmetická odchylka profilu Ra po frézování
Tab. 08	Průměrná největší výška profilu Rz po frézování
Tab. 09	Průměrná celková výška profilu Rt po frézování
Tab. 10	Průměrná teplota termočlánku při frézování
Tab. 11	Velikost opotřebení VB při frézování za sucha
Tab. 12	Velikost opotřebení VB při frézování s H_2O
Tab. 13	Velikost opotřebení VB při frézování s procesní kapalinou
Tab. 14	Průměrná rozměrová stabilita vzorků po frézování
Tab. 15	Porovnání procentuálního nárůstu a zůstatku hmotnosti vzorku

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 01 Seznam všech naměřených hodnot (tabulky, grafy)