



## Postup broušení rovinných ploch povrchu kompozitních materiálů

Bakalářská práce

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Kryštof Kučera**

*Vedoucí práce:*

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



## The procedure of grinding flat surfaces of composite materials

Bachelor thesis

*Study programme:* B0715A270008 Engineering  
*Author:* **Kryštof Kučera**  
*Supervisor:* doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.  
Katedra obrábění a montáže



## Zadání bakalářské práce

# Postup broušení rovinných ploch povrchu kompozitních materiálů

*Jméno a příjmení:* **Kryštof Kučera**  
*Osobní číslo:* S19000058  
*Studijní program:* B0715A270008 Strojírenství  
*Studijní obor:* Strojírenství  
*Zadávací katedra:* Katedra obrábění a montáže  
*Akademický rok:* **2021/2022**

### Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o rovinném broušení a dále o problematice broušení ploch povrchu kompozitních materiálů.
2. Volba řezných nástrojů a řezných podmínek.
3. Návrh metodiky experimentů při broušení rovinných ploch povrchu kompozitních materiálů z hlediska celkového postupu opracování, opotřebení řezného nástroje, kvality a rozměrové přesnosti obrobeného povrchu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje, kvality a rozměrové přesnosti obrobeného povrchu při broušení rovinných ploch povrchu kompozitních materiálů.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	dle potřeby
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	30 – 40 stran textu
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

1. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80–214–196–2.
2. 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.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80–7044–539–4.
5. Firemní podklady

*Vedoucí práce:* doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková,  
Ph.D. Katedra obrábění a montáže

*Datum zadání práce:* 3. listopadu 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:* 3. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

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

20. května 2022

Kryštof Kučera

## **Anotace**

Obsahem bakalářské práce je výzkum problematiky broušení rovinných ploch kompozitních materiálů.

Teoretická část obsahuje nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky. Do této části práce jsou zahrnuty informace o technologii broušení, kompozitních materiálech a problematice broušení kompozitních materiálů.

Experimentální část obsahuje informace o použitých strojích, zařízeních a metodice pro jednotlivé experimenty. V závěru práce jsou popsány naměřené hodnoty a zhodnocení experimentu.

Klíčová slova: broušení, kompozitní materiál, epoxidová pryskyřice, uhlíková vlákna, skelná vlákna.

## **Annotation**

The bachelor thesis deals with a research of problematics of grinding flat surfaces of composite materials.

All necessary basic terms concerning researched topic are mentioned in the theoretical part of the thesis. This theoretical chapter includes knowledge of grinding, composite materials and problematics of grinding composite materials.

The experimental part contains information about used machines, devices and methodology for individual experiments. There are reports on measured values and processed results at the end of the thesis.

Key words: grinding, composite material, epoxide resin, carbon fibre, glass fibre.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Arturu Knapovi za jeho cenné rady, doporučení a trpělivost při vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval firmě HOSTR Liberec s.r.o. za poskytnutí pryžových materiálů pro realizaci experimentů.

## Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: KOM 1319

Jméno a příjmení: Kryštof Kučera

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

Konzultant: Ing. Artur Knap

Počet stran: 93

Počet příloh: 2

Počet tabulek: 28

Počet obrázků: 51

Počet grafů: 48



# Obsah

Seznam zkratk.....	11
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>13</b>
2.1 Broušení kompozitních materiálů.....	13
2.1.1 Problematika obrábění.....	13
2.1.2 Matrice a výztuže kompozitních materiálů.....	14
2.1.3 Aplikace uhlíkových a skelných vláken.....	16
2.2 Kompozitní materiály.....	17
2.2.1 Navlhavost.....	17
2.2.2 Prašnost.....	17
2.2.3 Orientace vláken.....	18
2.3 Řezné podmínky.....	19
2.3.1 Deformace vláken.....	19
2.3.2 Řezné síly.....	20
2.4 Rovinné broušení.....	21
2.4.1 Upínání kompozitních materiálů.....	21
2.4.2 Namáhání při upnutí.....	24
2.4.3 Řezný nástroj.....	25
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>28</b>
3.1 Zkušební vzorky.....	28
3.2 Použité stroje, nástroje, pomůcky a měřicí zařízení.....	30
3.2.1 Pásová pila.....	30
3.2.2 Frézka.....	31
3.2.3 Bruska.....	32
3.2.4 Brousicí kotouč.....	32
3.2.5 Diamantový orovnávač.....	33
3.2.6 Strojní svěrák.....	33
3.2.7 Dynamometr.....	34
3.2.8 Bezkontaktní teploměr.....	36
3.2.9 Laboratorní profiloměr.....	36
3.2.10 Konfokální mikroskop.....	37
3.2.11 Ruční refraktometr.....	37
3.3 Řezné podmínky.....	38
3.4 Metodika experimentů.....	38
3.4.1 Příprava vzorků.....	38
3.4.2 Příprava nástroje.....	38
3.4.3 Proces broušení.....	38
3.4.4 Příprava procesní kapaliny.....	39
3.4.5 Řezné síly.....	39
3.4.6 Měření teploty.....	42
3.4.7 Drsnost povrchu.....	42
3.4.8 Snímkování povrchu.....	43
3.5 Vyhodnocení výsledků řezných sil.....	44
3.5.1 CFK upnutý ve strojním svěráku.....	44
3.5.2 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40°ShA.....	46

3.5.3 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70°ShA .....	48
3.5.4 CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny .....	50
3.5.5 GFK upnutý ve strojním svěráku .....	52
3.5.6 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40°ShA .....	54
3.5.7 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70°ShA .....	56
3.5.8 GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny .....	58
<b>3.6 Vyhodnocení teplot po broušení .....</b>	<b>60</b>
3.6.1 CFK upnutý ve strojním svěráku .....	60
3.6.2 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40°ShA .....	61
3.6.3 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70°ShA .....	62
3.6.4 CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny .....	63
3.6.5 GFK upnutý ve strojním svěráku .....	64
3.6.6 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40°ShA .....	65
3.6.7 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70°ShA .....	66
3.6.8 GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny .....	67
<b>3.7 Vyhodnocení drsnosti povrchu .....</b>	<b>67</b>
3.7.1 CFK upnutý ve strojním svěráku .....	68
3.7.2 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40°ShA .....	69
3.7.3 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70°ShA .....	70
3.7.4 CFK upnutý ve strojním svěráku broušený s procesní kapalinou .....	71
3.7.5 GFK upnutý ve strojním svěráku .....	72
3.7.6 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40°ShA .....	73
3.7.7 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70°ShA .....	74
3.7.8 GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny .....	75
<b>3.8 Souhrnné grafy naměřených hodnot .....</b>	<b>76</b>
3.8.1 Řezné síly .....	76
3.8.2 Naměřené teploty po broušení .....	78
3.8.3 Drsnosti povrchu .....	79
<b>4. DISKUZE .....</b>	<b>83</b>
<b>5. ZÁVĚR .....</b>	<b>88</b>
<b>6. ZDROJE .....</b>	<b>91</b>

## Seznam zkratk

Zkratka	Jednotky	Název
$a_p$	[mm]	hloubka záběru
CFK	[-]	carbon fiber composite
$F_s$	[N]	smluvní řezná síla
$F_y$	[N]	posuvová síla
$F_z$	[N]	radiální síla
GFK	[-]	glass fiber composite
K	[-]	draslík
n	[ot.min <sup>-1</sup> ]	otáčky
Na	[-]	sodík
$R_a$	[ $\mu$ m]	parametr drsnosti povrchu – střední aritmetická úchylka profilu
$R_t$	[ $\mu$ m]	parametr drsnosti povrchu – celková výška profilu
$R_z$	[ $\mu$ m]	parametr drsnosti povrchu – největší výška profilu
ShA	[°]	tvrdost podle stupnice Shore A
Si	[-]	křemík
SiO <sub>2</sub>	[-]	oxid křemičitý
T	[°C]	teplota
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$v_f$	[m.min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost

# 1. ÚVOD

V současné době dochází k rozšiřování využití kompozitních materiálů a již se běžně používají nejen v průmyslových odvětvích. Mezi běžně používané technické materiály řadíme kompozity s polymerní matricí a vláknovou výztuží. S rozšířením těchto materiálů se také musí řešit problematika jejich obrábění. [19]

Vláknové kompozitní materiály mají oproti běžně používaným kovovým materiálům řadu výhod, ale také několik nevýhod. Jelikož se jedná o nehomogenní materiál, nejsou při broušení řezné síly konstantní a není snadné dosáhnout předepsaných drsností povrchů.

Kompozitní materiály jsou nemagnetické a poddajné, což komplikuje upínání obrobků při obrábění. Při upínání do běžných strojních svěráků hrozí mechanické poškození obrobku, je tedy třeba použít šetrnější pryžové čelisti, případně upnout obrobek jiným způsobem – např. pomocí vakuové desky, upínacích přípravků.

Hlavním cílem předkládané práce je výzkum v oblasti upínání obrobku a stanovení vhodných řezných podmínek. Byly měřeny síly při obrábění, teploty na povrchu obrobku po obrobení a drsnosti povrchu obrobeného materiálu při broušení kompozitů zpevněných uhlíkovými, nebo skelnými vlákny v závislosti na druhu upnutí obrobku.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou, experimentální a závěrečnou část. Práce je zaměřena na zkoumání vlivu různých druhů upnutí obrobku při zvolené metodě obrábění.

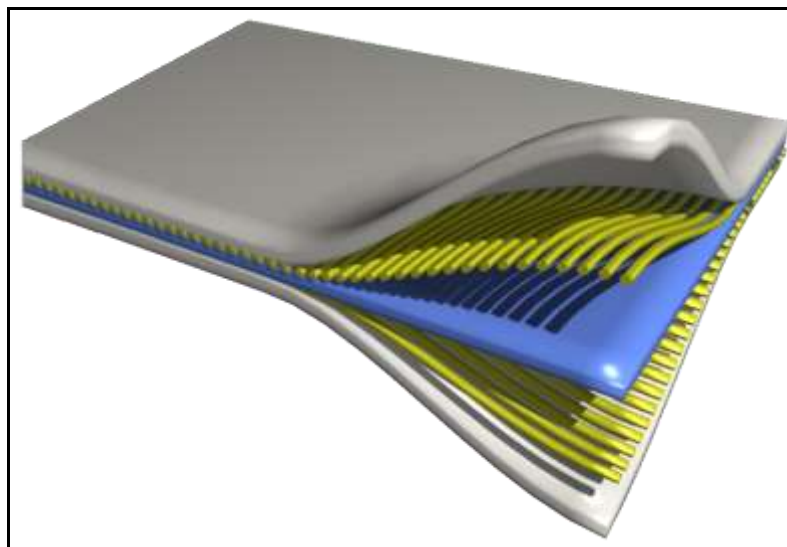
Teoretická část popisuje problematiku týkající se broušení kompozitních materiálu, obsahuje základní informace o kompozitních materiálech a problematice rovinného broušení.

Experimentální část se zabývá přípravou experimentů a jejich realizací. V této části je popsána výroba vzorků, volba řezných podmínek a způsoby možností upnutí vzorků. Dále jsou popsány stroje, pomůcky a měřidla, které byly použity k realizaci experimentu. Závěrečná část bakalářské práce se zaměřuje na diskuzi a zhodnocení výsledků provedených experimentů.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Broušení kompozitních materiálů

Při broušení kompozitních materiálů s vláknovou výztuží není snadné dosáhnout dobré kvality obrobeného povrchu. To je dáno tím, že se jedná o nehomogenní materiál, jehož složky se při obrábění chovají jinak. Na výslednou kvalitu povrchu má vliv orientace vláken, viz obr. 1, vůči směru broušení a řezné podmínky. Mechanismus odstraňování materiálu se zaměřuje na poškození způsobené jedním zrnem brusného kotouče. [9, 11]



Obr. 1 – Kompozitní materiál s vláknovou výztuží s rozlišnou orientací vláken. [8]

#### 2.1.1 Problematika obrábění

V průběhu operace broušení kompozitních materiálů s vláknovou výztuží hraje velkou roli orientace vlákna vůči směru broušení. Vlivem nízké adheze mezi matricí a vlákny dochází k vytrhávání vláken bez ohledu na jejich úhel vůči směru broušení. Z toho důvodu je třeba zavést řezné podmínky tak, aby se podařilo tuto negativní vlastnost co nejvíce eliminovat. [9, 11]

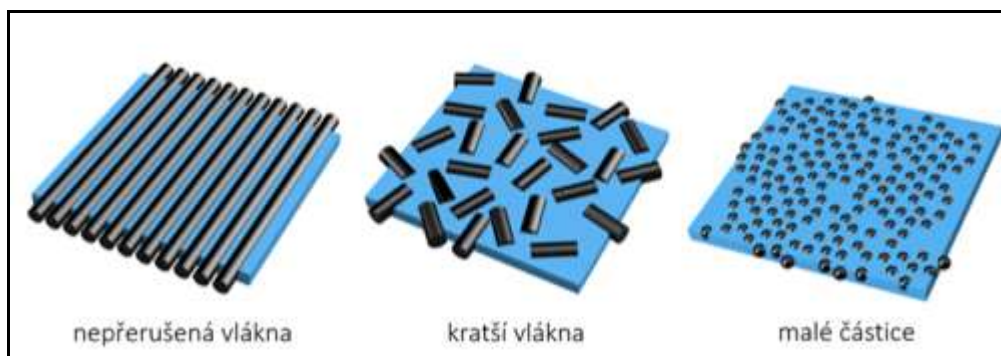
Problematika broušení kompozitních materiálů je také ovlivněna řadou parametrů, které přímo ovlivňují proces broušení. Kompozity jsou měkké, snadno obrobitelné materiály, jejichž nevýhodou jsou vznikající malé prachové částice, které mohou být zdravotně a environmentálně závadné. Při použití procesní kapaliny se sice prachové částice odvádí a nevíří, ale jelikož jsou kompozitní materiály navlhavé, může procesní kapalina negativně ovlivnit rozměrovou přesnost po broušení. Negativním průvodním jevem je také

zanášení pórů brusného kotouče prachovými částicemi bez ohledu na použití procesní kapaliny. [15, 16]

### 2.1.2 Matrice a výztuže kompozitních materiálů

Při vnějším namáhání obrobku z kompozitního materiálu se vlákna deformují méně než matrice. Vznikají tak smykové síly na rozhraní vlákna a matrice, které v případě adheze mezi oběma komponenty umožňují přenos veškerého napětí z matrice do vláken. Deformovatelné pojivo je tedy prakticky bez napětí a vlákna jsou schopna přenést napětí působící na povrch kompozitního materiálu. Matrice plní při obrábění funkci odvodu tepla, její výraznou nevýhodou je však pórovitost, která způsobuje zhutňování a rozmazání povrchu materiálu. [9, 12, 27]

Materiál výztuže kompozitních materiálů může být použit v různých formách, viz obr. 2, v praxi převládá forma vláken. Zatímco při obrábění kompozitu s výztuží ve formě nepřerušovaných vláken dochází k praskání, drolení a vytrhávání vláken, při obrábění materiálu s výztuží z malých částic se částice neporušují, ale při obrábění se rovnou celé oddělují. Z hlediska obrábění jsou tedy lepší malé částice než např. vlákna. [13, 27]



Obr. 2 – Příklady používaných výztuží kompozitních materiálů. [13]

#### Uhlíková vlákna

Výztuže z uhlíkových vláken se používají například ve formě nepřerušovaných vláken, nebo úpletu, viz obr. 3. Uhlíková vlákna mají při poměrně malé hustotě ( $1,8-2 \text{ g.cm}^{-3}$ ) nejširší spektrum mechanických vlastností. [12, 27]

Při styku méně ušlechtilých kovů s uhlíkem dochází k elektromagnetické korozi, při které koroduje kov. Z toho důvodu kompozity s uhlíkovými vlákny musí být odděleny od kovu jiným nevodivým materiálem. [12, 27]



*Obr. 3 – Textilie z uhlíkových vláken, vlevo s uniformní orientací vláken, vpravo úplet. [13]*

Uhlíková vlákna jsou v současnosti vyráběna převážně z polyakrylonitrilových vláken, z vláken novoloidu a z fenol-adehylových vláken (Kynol), z ligninu a ze sulfonovaného polyetyleny. Při výrobě z polyakrylonitrilových vláken je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. [12, 27]

### **Skelná vlákna**

Výztuže ze skelných vláken se mohou používat například ve formě tkaniny, nebo rohože, viz obr. 4. O mikrostruktuře skelných vláken je velmi málo poznatků vzhledem k jejich amorfnímu stavu, který je způsoben nepatrnou krystalizační rychlostí směsí oxidů při ochlazování taveniny. [27]



*Obr. 4 – Skelná vlákna, vlevo skelná rohož, vpravo skelná tkanina. [28]*

Předpokládá se, že na vysoké pevnosti skelných vláken, vedle velikostního faktoru (malý povrch a malé defekty v tenkém vlákně), se podílí také odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. Zatímco jádro má nahodile orientovanou síť atomů, povrch má pravděpodobně semi-orientovanou strukturu. Tím na povrchu vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému rozvoji trhlin. Vlákná mají silikátový základ ( $\text{SiO}_2$ ) a vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. [27]

### **2.1.3 Aplikace uhlíkových a skelných vláken**

Uhlíková vlákna jsou charakteristická vysokou pevností, velkou tepelnou odolností, vysokou únavovou pevností a oproti skelným vláknům mají vyšší modul pružnosti a jsou elektricky vodivá. Nevýhodou je nízká odolnost proti nárazu z důvodu křehkosti vláken. Předností skelných vláken je nízká cena a vyšší houževnatost oproti uhlíkovým vláknům. Nevýhodou je ovšem nízký modul pružnosti a v některých případech také elektrická nevodivost vláken. [12, 27]



## **2.2 Kompozitní materiály**

### **2.2.1 Navlhavost**

Polymery mají oproti kovovým materiálům velkou nevýhodu v podobě navlhavosti, která zabraňuje použití procesní kapaliny nejen pro chlazení obrobku při broušení i dalších technologických operacích. [15]

Navlhavost je obecně schopnost látek přijímat vlhkost z okolního prostředí. Jedná se o dlouhodobý proces, který probíhá do té doby, než je dosaženo tzv. rovnovážného stavu, kdy vlhkost látky, potažmo polymeru, odpovídá relativní vlhkosti okolního prostředí. Nejedná se tedy o materiálovou konstantu. Doba, po kterou bude polymer navlhat, závisí především na jeho chemickém složení, relativní vlhkosti a teplotě okolí i tloušťce polymerního dílu. Příčinou navlhavosti polymerů je především jejich chemická struktura a složení materiálu. [15]

Důsledkem navlhavosti polymerů je například pokles meze pevnosti a modulu pružnosti, zvýšení houževnatosti, tažnosti a zhoršení elektrických izolačních vlastností. Hlavním důsledkem, který významně ovlivňuje operaci broušení je zvětšení rozměrů při navlhnutí obrobku. [15]

### **2.2.2 Prašnost**

Při obrábění, broušení nebo leštění kompozitních materiálů dochází k uvolňování velmi malých, jemných třísek. Vznikají tak prachové částice a často vzniká potenciálně nebezpečný, v některých případech výbušný prach. Prachové částice se víří ve vzduchu vlivem absence procesní kapaliny, viz kap. 2.2.1, která by plnila funkci odvodu těchto malých částic. [16]

Velká koncentrace jemných částic je nebezpečná svou samotnou podstatou. Z důvodu jejich velmi malých rozměrů mohou proniknout až hluboko do plic a způsobit vážná onemocnění a zdravotní problémy – platí to zejména pro skelná vlákna. Prach vznikající jako odpad při zpracování kompozitních materiálů se ale může do těla dostávat i kůží a způsobovat různé kožní problémy a nemoci – např. reakce podobné ekzému. [16]

Tento problém je třeba z hlediska bezpečnosti zdraví řešit. Nejúčinnějším řešením je eliminace rizik přímo u zdroje. Pro eliminaci vzniklého prachu

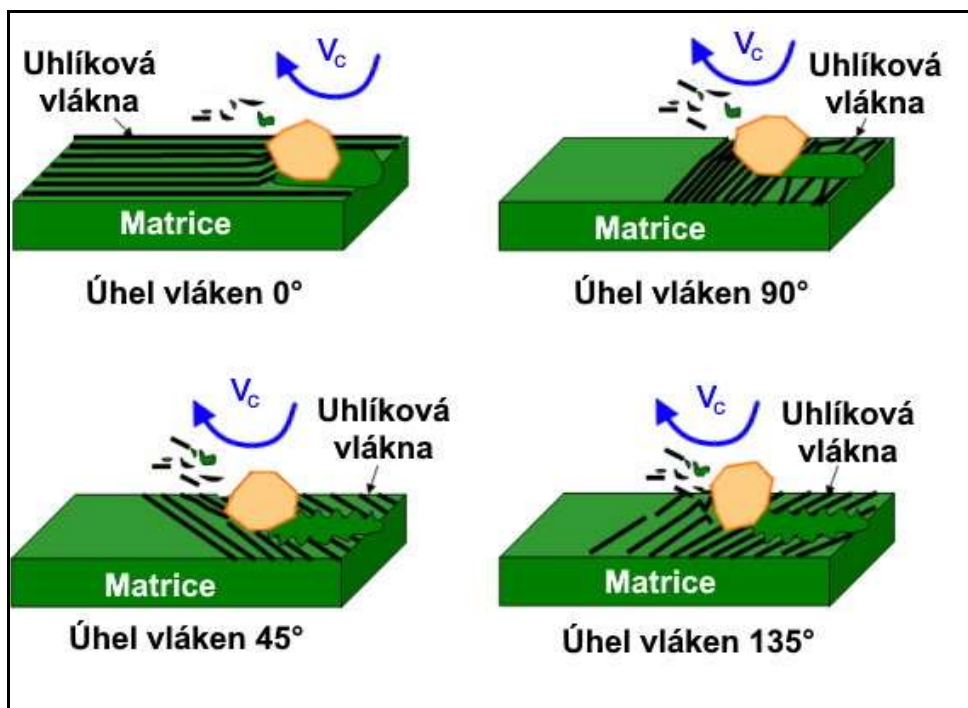
a jemných zbytkových částic při obrábění a zpracování kompozitních materiálů se uplatňují vysavače, speciální odsávací ramena, nebo odsávací a filtrační stoly, viz obr. 5. Tato zařízení jsou obvykle kombinována s pokročilými a vysoce efektivními cyklony a předseparátory, takže tvoří ucelený odsávací systém pro úklid nebezpečného prachu. [16]



Obr. 5 – Odsávací rameno vlevo, odsávací stůl vpravo. [21, 30]

### 2.2.3 Orientace vláken

Kritické úhly broušení jsou  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , respektive broušení probíhá ve směru, nebo kolmo na vlákna. V praxi se běžně používají textilie s uniformní orientací vláken, ale i vrstvení oběma směry (střídání úhlů  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ). U materiálů s kombinovanou orientací vláken není možné úhel broušení určit, převážně z toho důvodu, že většinou probíhá odebrání několika vrstev zároveň. Na obr. 6 je znázorněno chování vláken při technologii broušení s vybranými úhly orientace vláken. Při úhlu vláken  $0^\circ$  dochází k vytrhávání vláken, při úhlu  $90^\circ$  vlákna praskají a přerušují se. U vláken od úhlem  $45^\circ$  a  $135^\circ$  dochází ke kombinaci vytrhávání a praskání vláken. [9, 11]



Obr. 6 – Narušení vláken kompozitního materiálu jedním zrnem brusného kotouče v závislosti na úhlu natočení vláken vůči nástroji. [11]

## 2.3 Řezné podmínky

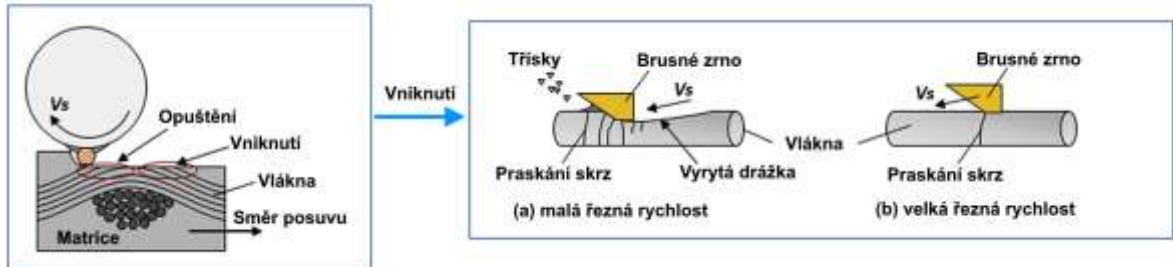
Při stanovení řezných podmínek mají vliv běžně známé parametry ( $v_c$ ,  $v_f$ ,  $a_p$ ) nejen na drsnosti povrchu, ale také na zhutnění a rozmazání povrchu materiálu, které je ovlivněno pórovitostí matrice. Zhutnění a rozmazání materiálu závisí převážně na hloubce záběru  $a_p$  a může být potlačeno zvýšením řezné rychlosti  $v_c$  při broušení. [9, 11]

### 2.3.1 Deformace vláken

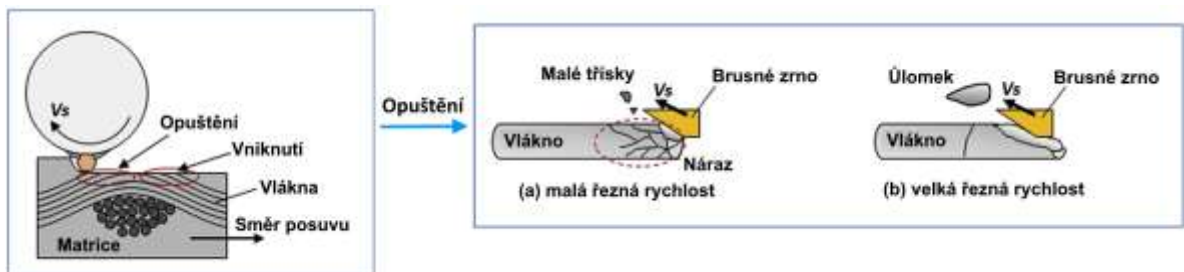
Při broušení ve směru vlákna při nízké rychlosti vznikají ve vláknech rýhy, které se zanášejí třískami matrice. Pokud ale rychlost broušení zvýšíme, začne docházet k praskání vláken a s dalším navyšováním rychlost se zvyšuje i lámavost vláken. [9, 11]

Při vysokorychlostním broušení ( $v_c$  nad  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) jsou vlákna náchylná ke křehkému lomu a vylamují se. Broušení kolmo na směr vláken se zvyšující se rychlostí vede buď k odstranění části, nebo k úplnému odstranění vláken. Vytržení větších částí, nebo celých vláken z matrice má za následek zlepšení povrchu materiálu z hlediska povrchových drsností. [9, 11]

Vlákna nejsou v celém materiálu v dokonale rovných vrstvách, ale dochází ke zvlnění a zhuštění vrstev. Při broušení takového materiálu nezávisí praskání a porušení vláken jen na řezné rychlosti, ale liší se i v oblastech, kdy řezný břit vniká a opouští vláknennou strukturu, viz obr. 7 a 8. [9]



Obr. 7 – Porušení vláken v závislosti na řezné rychlosti při vniknutí do vláknenné struktury. [9]

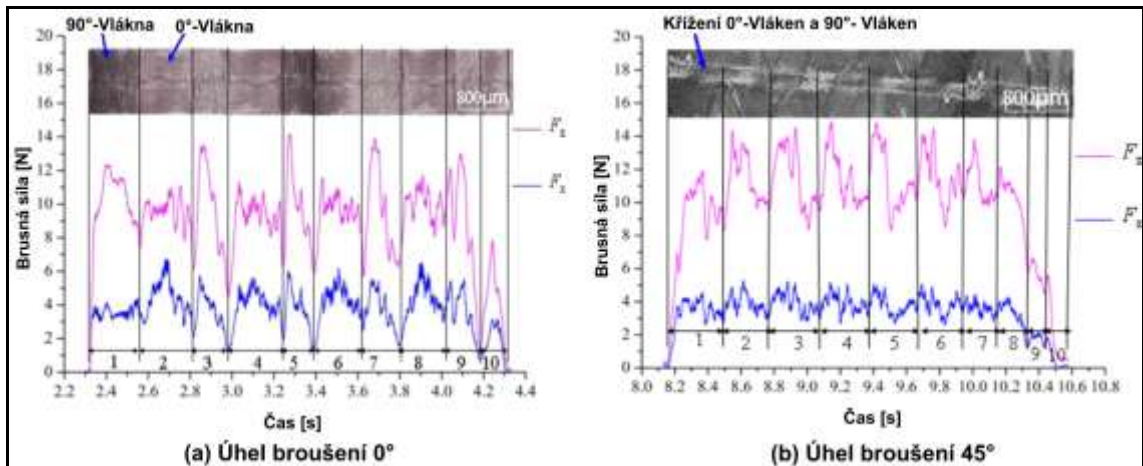


Obr. 8 – Porušení vláken v závislosti na řezné rychlosti při opuštění vláknenné struktury. [9]

### 2.3.2 Řezné síly

V průběhu operace broušení kompozitních materiálů jsou řezné síly více ovlivněny mechanickými vlastnostmi vláken než matrice. Z toho vyplývá, že řezné síly přímo závisí na tom, jestli zrna zrovna obrábí vlákno, nebo matrici. [11]

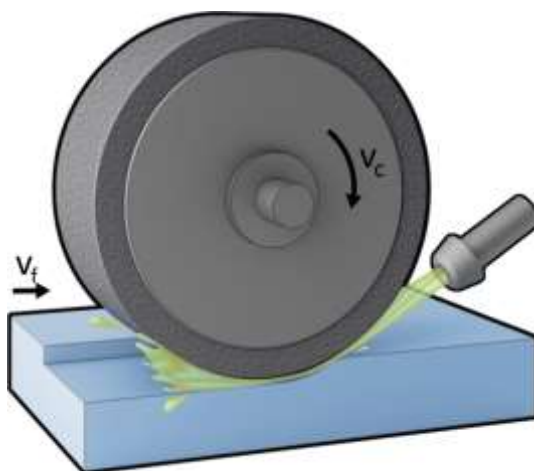
Pokud je orientace vláken pod úhlem  $0^\circ$  vůči směru broušení, řezná síla periodicky kolísá, viz obr. 9a. Pokud bude orientace vláken vůči směru broušení pod úhlem  $45^\circ$ , tak bude síla stabilnější, ale přesto nebude konstantní, viz obr. 9b. Při broušení s vlákny orientovanými pod úhlem  $45^\circ$  tedy dosáhneme stabilnějších řezných sil, jejichž průměrná hodnota je ale vyšší, než pro broušení pod úhlem  $90^\circ$ , viz obr. 9. [11]



Obr. 9 – Porovnání naměřených sil při obrábění vláken pod úhlem  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $45^\circ$ . Vlevo se střídá úhel vláken  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , vpravo je úhel vláken  $45^\circ$ . [11]

## 2.4 Rovinné broušení

K dosažení požadované rozměrové přesnosti a kvality obrobeného povrchu např.  $R_a$  0,2 - 1,6  $\mu\text{m}$ , je třeba dbát na správné upnutí brusného kotouče, jeho vyvážení a orovnění. Proces broušení rovinných ploch, viz obr. 10, je dále ovlivněn volbou upnutí obrobku. [2, 4, 6]

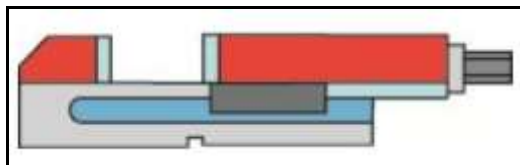


Obr. 10 – Schéma broušení rovinné plochy brusným kotoučem s přívodem procesní kapaliny. [18]

### 2.4.1 Upínání kompozitních materiálů

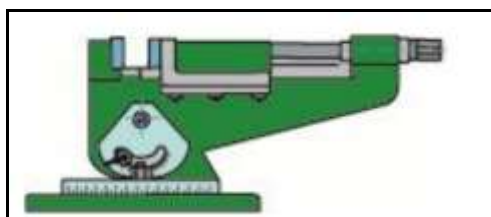
Upínání obrobků musí být dostatečně tuhé, aby zaručilo nehybnost obrobku a odolnost proti vzniku chvění. Obrobek však nesmí být deformován upínací silou. Při upínání kovových obrobků se velmi často využívá magnetických vlastností kovu a obrobek je upnut pomocí elektromagnetické desky. Kompozitní materiály nejsou magnetické tudíž je tento princip upínání nevhodný a je třeba použít jiné metody upnutí obrobku. [6]

Upínání do strojních svěráků se často používá v případě menších, tvarově jednodušších obrobků. Pro snížení deformací měkkých obrobků při upnutí lze použít šetrnější pryžové čelisti strojního svěráku. Svěráky lze použít ploché, otočné, sklopné a prizmatické. Plochý svěrák, viz obr. 11, má pohyblivou čelist posuvnou po tělese svěráku jen ve směru k pevné čelisti. [23]



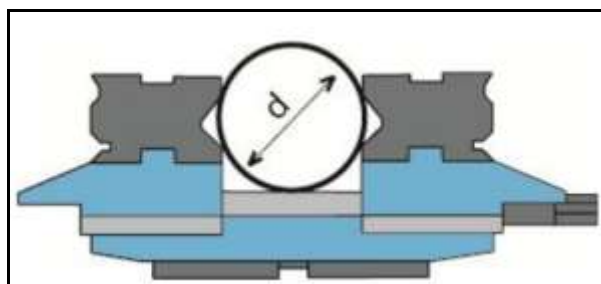
Obr. 11 – Plochý svěrák. [23]

Otočný svěrák je charakteristický spodní kruhovou deskou se stupňovým dělením, která umožňuje otáčet svěrák kolem svislé osy, viz obr. 12. Potřebná poloha svěráku se zabezpečí utažením matic upínacích šroubů. Sklopný svěrák bývá často kombinován se svěrákem otočným. [23]



Obr. 12 – Otočný a sklopný svěrák. [23]

Prizmatický svěrák je vhodný k upínání rotačních obrobků, zabezpečuje vystředění, viz obr. 13. [23]

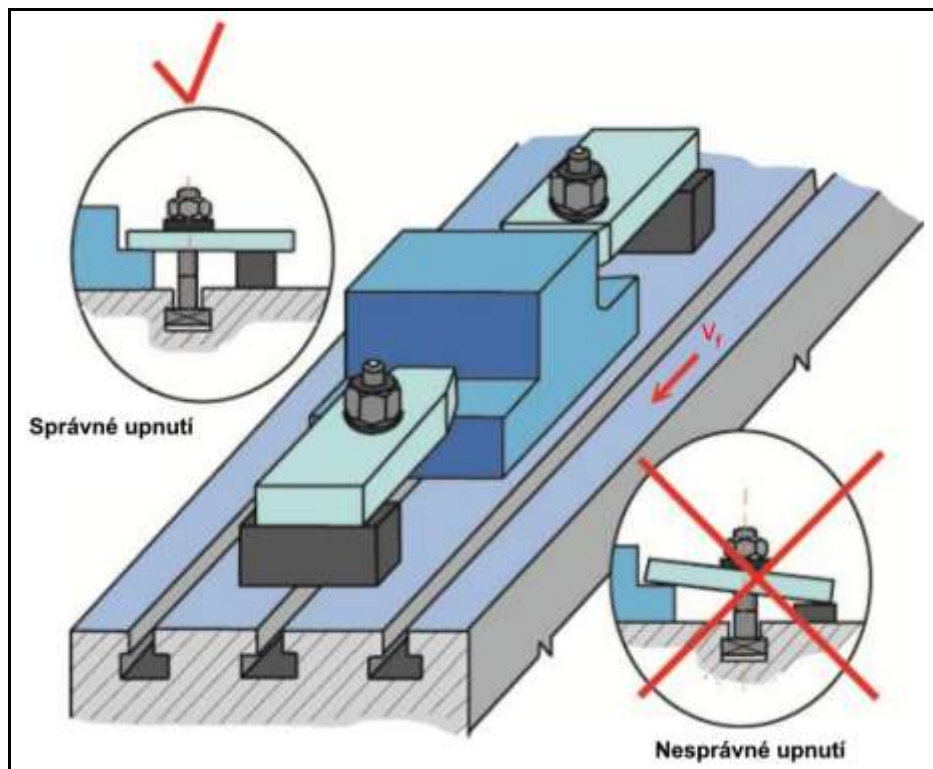


Obr. 13 – Prizmatický svěrák. [23]

## Upínky

Upínání větších, tvarově složitějších součástí se provádí pomocí upínek přímo ke stolu pracovního stroje. Upínky se liší tvarem a rozměrem, ke stolu jsou pak připevněny pomocí matic, různých podložek, podpěr a speciálních

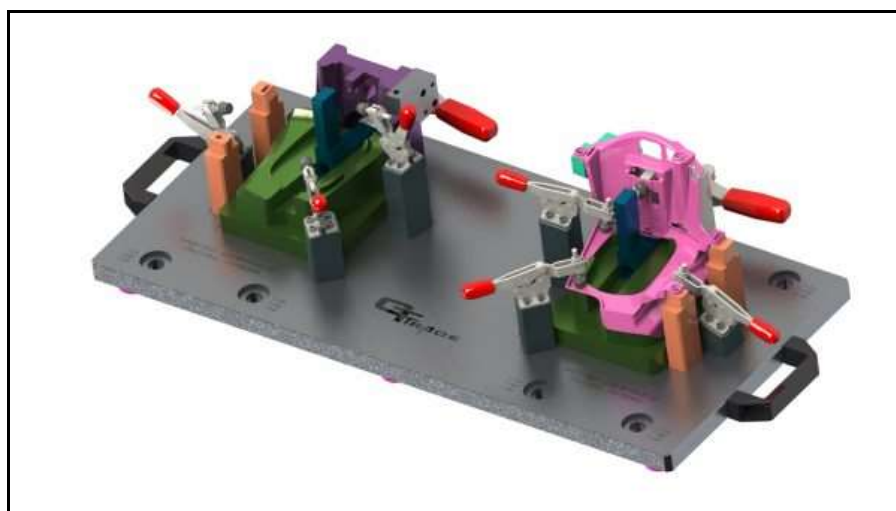
šroubů. Speciální šrouby se volí podle typu drážek ve stole pracovního stroje. Příklad upnutí pomocí upínek viz obr. 14. [23]



Obr. 14 – Schéma upnutí obrobku pomocí upínek. [23]

### Upínací přípravky

Další možností upnutí obrobku mohou být upínací přípravky, viz obr. 15. Jejich výhodou je velmi rychlé a přesné upnutí součástí, které mohou být i složitějších tvarů. Upínací přípravky jsou charakteristické svou jednoúčelovostí a náročností na konstrukci a ustavení. [24]



Obr. 15 – Upnutí pomocí upínacích přípravků. [22]

## Vakuová deska

Další využívaný způsob upínání je pomocí vakuové upínací desky, viz obr. 16. Předpokladem úspěšného upnutí je obrobek s rovnou a přesně obrobenou spodní dosedací plochou. Celý systém se skládá z upínací desky, rozdělovače vakua a vakuové jednotky. Pro upínání mají desky drážky např. čtvercového průřezu o rozměru 5 x 5 mm, v nichž jsou vloženy těsnicí profily tvaru a velikostí odpovídající obrobku, viz obr. 16. Ty jsou základním předpokladem pro kompenzaci nerovností a dosažení vysoké přesnosti výrobku. [26]

Nevýhodou této metody může být vysoká pořizovací cena, nutnost opracování dosedací plochy, pomocí které je obrobek upnut a nutnost umístění těsnících profilů podle tvaru obrobku. [26]



Obr. 16 – Vakuová upínací deska. [25]

### 2.4.2 Namáhání při upnutí

Jelikož se pro upnutí obrobku běžně používají strojní svěráky, hrozí u poddajných obrobků poškození vlivem působení upínací síly. Upínací síla může způsobit elastické deformace, v krajním případě může dojít až k viditelnému poškození obrobku v podobě vzniku prasklin. Deformace obrobku při upnutí má vliv na rozměrovou přesnost po obrábění, čímž zhoršuje přesnost operace. Při použití strojního svěráku můžeme docílit snížení upínací síly působící na obrobek a zmenšení deformací použitím měkkých čelistí. Další metodou, která je šetrná k obrobku, může být např. upnutí pomocí vakua, viz kap. 2.4.1. [24]



### **2.4.3 Řezný nástroj**

Důležité parametry, které udávají vlastnosti brusného kotouče, jsou zrnitost, tvrdost a sloh (struktura). Zrnitost brusného kotouče udává velikost zrn. Kotouče jsou rozděleny podle velikosti zrn dle normy ČSN ISO 525, která udává počet ok síta na jeden anglický palec. [2, 6]

Velikost zrn volíme dle požadované drsnosti povrchu broušeného obrobku. Tvrdost brousicího kotouče je dána odporem, který klade pojivo proti vylomení zrn a je označována písmeny A až Y. Tvrdost brousicího kotouče se volí tím menší, čím je tvrdost obrobku a plocha styku větší. Pro broušení kompozitních materiálů se používá tvrdost K. [2, 6]

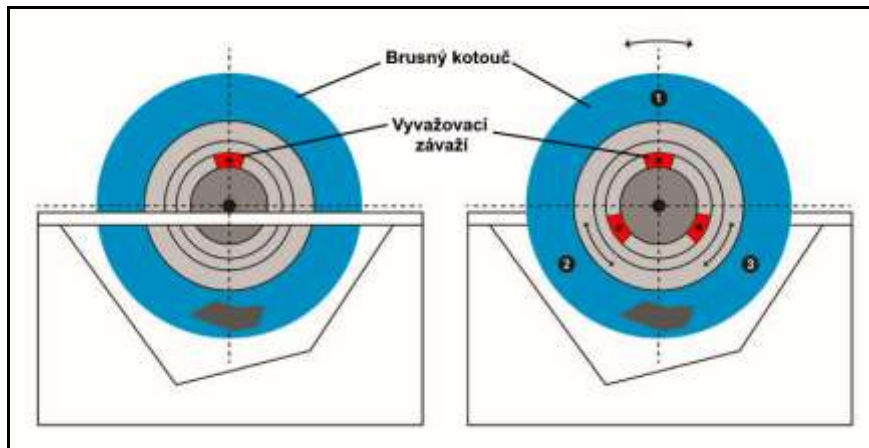
Sloh brousicího kotouče udává poměr zrn brusiva, pojiva a pórů. Označen je číslem, které udává velikost vzdálenosti mezi zrny. S narůstající vzdáleností mezi zrny (pórovitostí) je použito vyšší číslo označení kotouče. Sloh se volí dle podmínek broušení, pro kompozitní materiály se zpravidla používají kotouče s nižší pórovitostí z důvodu zanášení. [2, 6]

### **Upnutí nástroje**

Pro dosažení předepsané geometrické přesnosti a předepsaných parametrů drsnosti povrchu je vyžadováno pečlivé upnutí brusného kotouče. V opačném případě není zaručena bezpečnost práce při broušení a nemusí se podařit dosáhnout požadované geometrické přesnosti, případně požadované drsnosti povrchu. Vysoký důraz je kladen na volbu vhodného řezného materiálu v návaznosti na obráběný materiál a požadované parametry jakosti povrchu. [2]

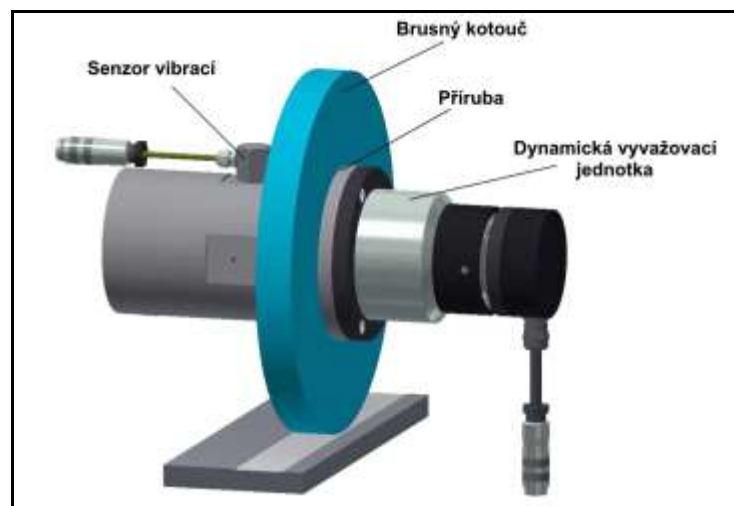
### **Vyvažování nástroje**

Vyvažování brusných kotoučů má výrazný vliv na rovnoměrné opotřebení kotouče a dosažení požadovaných parametrů výsledků při obrábění. Vyvažování rozlišujeme statické a dynamické. Brusné kotouče je vždy třeba před zahájením obrábění staticky vyvážit. Vyvážení, které probíhá na vyvažovacím stojánku, je znázorněno na obr. 17. [2]



Obr. 17 – Schéma statického vyvažování brusného kotouče. [5]

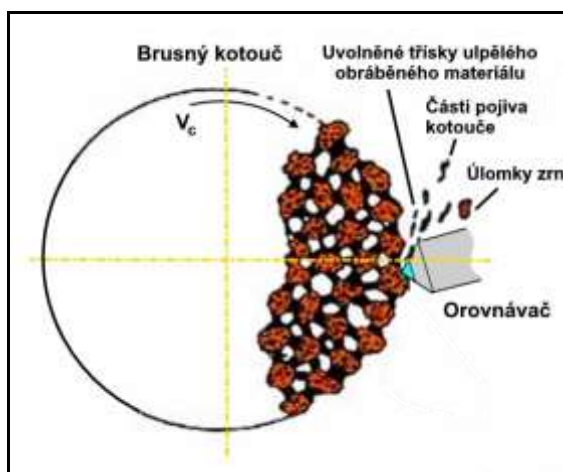
Takto vyvážený kotouč je nutné dynamicky vyvážit, pokud je třeba dosáhnout přesnějších výsledků broušení, nebo vyšší řezné rychlosti nad  $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dynamické vyvážení probíhá automaticky u otáčejícího se broušícího kotouče pomocí dynamické vyvažovací jednotky, viz obr. 18. Vyvažovací systém může být mechanický, nebo hydromechanický a polohu vyvažovacích tělísek určuje řídicí jednotka, která přijímá signály od snímače vibrací. [2]



Obr. 18 – Schéma dynamického vyvažování brusného kotouče. [10]

### Orovnávání nástroje

Před zahájením obrábění, ale zpravidla i v jeho průběhu je třeba provést orovnění brusného kotouče z důvodu docílení požadovaného geometrického tvaru nástroje, odstranění zbylých ulpělých třísek v pórech kotouče z předchozího obrábění a obnovení řezivosti brusného kotouče, viz obr. 19. [2, 17]



Obr. 19 – Schéma orvnání brusného kotouče. [29]

U měkkých materiálů může docházet k výraznějšímu zanášení nástroje a je tedy třeba provést orvnání brusného kotouče mezi záběry. Zanášení brusného kotouče ovlivňuje působící řezné síly a výslednou drsnost povrchu. [2, 17]

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je zaměřena na samotný experiment, který zkoumá vliv způsobů upnutí v kombinaci s hloubkou záběru a použitím procesní kapaliny na proces broušení, řezné síly a drsnost povrchu obrobených ploch. V této kapitole jsou popsány použité vzorky a jejich výroba. Dále jsou popsány použité pomůcky a zařízení použité při experimentu. Následuje samotná metodika experimentu a shrnutí naměřených výsledků při dílčích experimentech. Veškeré přípravy, experimenty a měření probíhali v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci.

#### 3.1 Zkušební vzorky

Pro experimentální část byly vyrobeny dva vzorky o rozměrech 290x80x60 mm viz obr. 20. Tyto vzorky bylo pro potřeby experimentu po odlití vyjmout z formy, zaúhlovat na frézce a nadělit na pásové pile, viz kap. 3.2.1, každý na 12 dílčích vzorků o šířce 22,5 mm viz obr. 20. Řezné podmínky pro broušení kompozitních materiálů byly zvoleny, dle již provedeného experimentu [1] a dle zkušeností s použitým strojem. Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v kapitole 3.3.



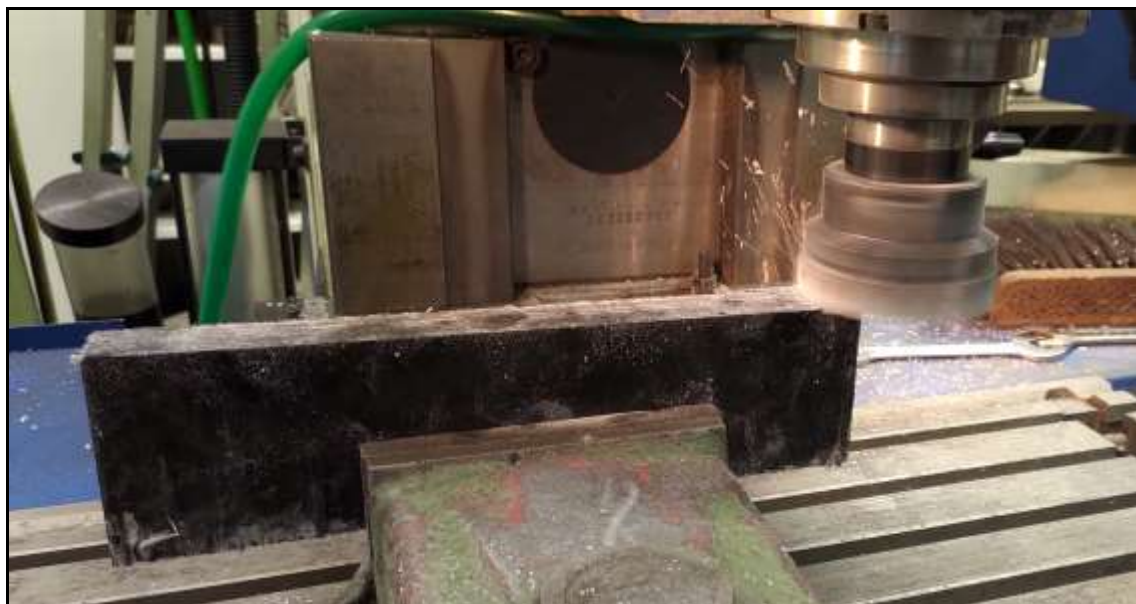
Obr. 20 – Vlevo vzorky po vyjmutí z formy, vpravo dílčí vzorky.

Pro výrobu vzorků z kompozitních materiálů byla použita dvousložková epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY/EPOXY15 (STACHEMA CZ s.r.o.) v kombinaci s tvrdidlem P11 (STACHEMA CZ s.r.o.) pro vytvrzení pryskyřice. Tvrdidlo bylo přidáváno v hmotnostním poměru 100:11 (STACHEMA CZ s.r.o.). Jako výztuž kompozitních materiálů byla použita uhlíková a skelná vlákna.

Uhlíková vlákna byla použita ve formě jednosměrných spojených uhlíkových vláken 50K, měrné hmotnosti  $200 \text{ g.m}^{-2}$ . Vlákna byla dodána v roli o šířce 500 mm, které bylo potřeba nadělit dle rozměrů použité formy.

Skelná vlákna byla použita ve formě skelné tkaniny Interglas 92110, kepr 2/2 o měrné hmotnosti  $163 \text{ g.m}^{-2}$ . Tkanina byla dodána v roli o šířce 1000 mm, kterou bylo třeba nadělit dle rozměrů použité formy. Při výrobě vzorků byly výztuže pokládány na sebe vždy po jedné vrstvě tkaniny, nebo vláken a prosycována epoxidovou pryskyřicí smíšenou s předepsaným množstvím tvrdidla. Vzorky byly po odlití vytvrzeny ve formách při běžné laboratorní teplotě. Po vyjmutí z formy byly vzorky následně dotvrzeny při teplotě  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 10 hodin. Výroba i dotvrzení vzorků nebyla prováděna za zvýšeného tlaku.

Pro potřeby experimentu bylo třeba vzorky po vyjmutí a vytvrzení zaúhlovat, aby bylo možné vzorky upnout do použitého strojního svěráku. Dále bylo třeba vzorky obrobit z důvodu odstranění nerovností na povrchu. Zařízení úkosů bylo prováděno na pásové pile, viz kap. 3.2.1. Následné zaúhlování a obrábění bylo provedeno na frézce FNG 32, viz kap. 3.2.2, pomocí válcové čelní frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami viz obr. 21.



*Obr. 21 – Obrábění a zaúhlování vzorků na frézce.*

### 3.2 Použité stroje, nástroje, pomůcky a měřicí zařízení

V této kapitole je věnována pozornost všem použitým strojům, nástrojům, přípravkům a měřidlům, které byly použity pro realizaci experimentu. Všechny stroje, nástroje, přípravky a měřidla byla k dispozici v laboratoři Katedry obrábění a montáže Technické univerzity v Liberci, kde probíhala veškerá měření.

#### 3.2.1 Pásová pila

Prvotní zarovnání úkosů a vzorků na dílčí části bylo provedeno pomocí pásové pily. Byla použita pásová pila typu ARG 300 Plus H.F. od firmy Pilous, viz obr. 22, technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 22 – Pila Pilous ARG 300 Plus H.F.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Rozměr pilového pásu	3150 x 27 x 0,10	mm
Rychlost pilového pásu	15 - 90	m.min <sup>-1</sup>
Max. rozměr řezu čtvercového průřezu	90°/60°/40° 300/150/230	mm
Max. rozměr řezu kruhového průřezu	90°/60°/40° 300/155/240	mm
Výkon motoru 400 V, 50 Hz	2,2	kW
Rozměr stroje	1700 x 2000 x 2150	mm
Hmotnost stroje	645	kg

Tab. 1 - Parametry pily Pilous ARG 300 Plus H.F. [20]

### 3.2.2 Frézka

Před provedením experimentu bylo nutné odlitky obrobit a zajistit tím jejich rozměrovou přesnost. Všechny obráběcí operace byly provedeny na frézce typu FNG 32 od výrobce TOS Olomouc s.r.o., viz obr. 23, technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 2.



Obr. 23 – Frézka FNG 32 TOS Olomouc s.r.o.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Rozměr pracovní plochy	800 x 400	mm
Počet upínacích drážek	7	-
Pracovní zdvih v ose X	600	mm
Pracovní zdvih v ose Y	400	mm
Pracovní zdvih v ose Z	400	mm
Maximální zatížení stolu	350	kg
Výkon hlavního motoru	4	kW
Výkon posuvového motoru	1,1	kW

Tab. 2 – Parametry frézky FNG 32 TOS Olomouc s.r.o. [3]

### 3.2.3 Bruska

Veškeré broušící operace experimentů byly prováděny na brusce BPH 320 A, viz obr. 24. Bruska je vybavena příslušenstvím pro aplikaci procesní kapaliny. Pro zajištění stabilnějšího procesu obrábění byla bruska vybavena dynamickou vyvažovací jednotkou. Parametry obráběcího stroje jsou uvedeny v tabulce 3.



Obr. 24 – Bruska BPH 320 A

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Upínací plocha stolu	320 x 1000	mm
Maximální délka broušení	1000	mm
Maximální výška obrobku	350	mm
Podélný pohyb stolu	400	mm
Vzdálenost osy vřetena od plochy stolu	75 - 475	mm
Broušící kotouč	250 x 320 x 76	mm
Otáčky broušícího kotouče $\varnothing 250\text{mm}$	2650	$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$
Celkový maximální příkon stroje	15,4	kVA
Hmotnost stroje	3345	kg

Tab. 3 – Parametry brusky BPH 320 A [1]

### 3.2.4 Broušící kotouč

Experimenty broušení kompozitních materiálů byly prováděny plochým broušícím kotoučem typu od firmy TYROLIT, viz obr. 25. Pro potřeby experimentu byl použit nový kotouč, který měl rozměry 250x25x76 mm (vnější



průměr x šířka x vnitřní průměr díry). Kotouč je tvořen zrny z umělého růžového korundu, která jsou spojena keramickým pojivem. Zrnitost odpovídá dle normy ČSN ISO 525 označení 46 (velikost zrn 315 až 400  $\mu\text{m}$ ). Struktura kotouče má dle normy ČSN 22 4501 označení 9, takže se jedná o velmi pórovitý kotouč.



Obr. 25 – Brusný kotouč 98A46K9V30 40 [8]

### 3.2.5 Diamantový orovnávač

Jelikož kompozitní materiály při obrábění značně zanáší brousicí kotouč, bylo třeba před provedení každé série měření orovnat kotouč. Pro orovnávání kotouče byl použit jednokamenový diamantový orovnávač, viz obr. 26. Použitý orovnávač byl vyroben z průmyslového diamantu zasazeného ve stříbrné pájce pro lepší odvod tepla při orovnávání.



Obr. 26 – Jednokamenový diamantový orovnávač

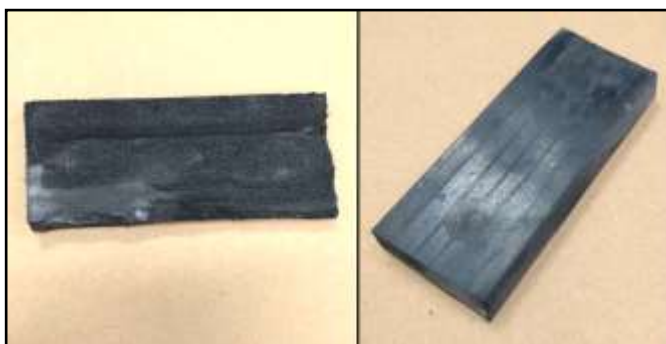
### 3.2.6 Strojní svěrák

Při obrábění nemagnetických vzorků nebylo možné použít elektromagnetickou desku brusky pro upnutí, z toho důvodu byl použit strojní svěrák. V rámci experimentu byly sledovány tři způsoby upnutí vzorku. Byly

použity standardní kovové čelisti, viz obr. 27, dále byly použity čelisti z pryže o tvrdosti 40° ShA (materiál AERSTOP SE29B ČERNÝ EPDM) o tloušťce 10 mm a čelisti z pryže o tvrdosti 70° ShA (materiál SBR/E) také o tloušťce 10 mm, viz obr. 28 a příloha 1. Pryže byly poskytnuty firmou HOSTR Liberec s.r.o. ve formě odřezků z jejich výroby. Z pryží byly vyříznuty segmenty o rozměru 40x100 mm podle rozměru strojního svěráku. Upnutí pomocí pryží bylo realizováno tak, že byl vyříznutý kus pryže vložen mezi standardní ocelovou čelist svěráku a vzorek.



*Obr. 27 – Upnutí vzorku pomocí strojního svěráku.*



*Obr. 28 – Použité pryžové čelisti, vlevo pryž 40° ShA, vpravo pryž 70° ShA.*

### **3.2.7 Dynamometr**

Pro měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B viz obr. 29, s nábojovým zesilovačem 5019 B, viz obr. 30. Tento typ dynamometru je založen na piezoelektrickém jevu (při mechanickém zatížení vzniká elektrický náboj na povrchu některých krystalů, tento náboj je přímo úměrný velikosti působící síly). Na elektromagnetickou desku brusky byl upnut

dynamometr s přišroubovaným strojním svěrákem, do kterého se upínaly jednotlivé vzorky při měření.



*Obr. 29 – Dynamometr upnutý na elektromagnetické desce s připevněným strojním svěrákem.*



*Obr. 30 – Nábojový zesilovač*

Při obrábění s využitím procesní kapaliny bylo nutné dynamometr utěsnit, viz obr. 31, aby přenosové kontakty nebyly vystaveny vlhkosti a nezkreslovaly výsledky měření.



*Obr. 31 – Ochrana dynamometru před procesní kapalinou.*

### 3.2.8 Bezkontaktní teploměr

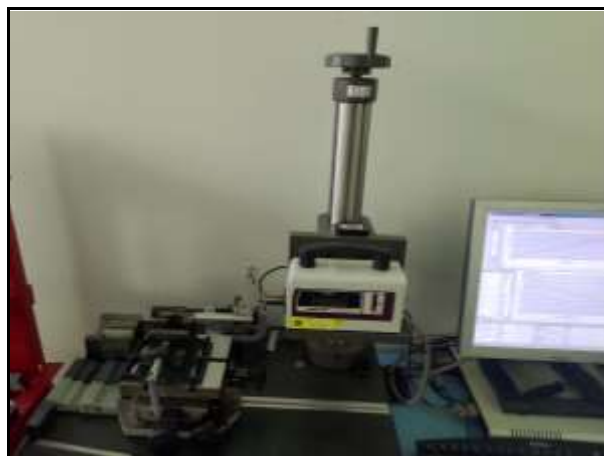
Měření teploty povrchu obrobku po obrobení bylo měřeno pomocí teploměru VOLTCRAFT IR1000-50CAM, viz obr. 32. Tento typ teploměru je bezkontaktní a naměřenou hodnotu teploty zobrazuje přímo na displeji přístroje.



Obr. 32 – Použitý teploměr

### 3.2.9 Laboratorní profiloměr

Pro měření povrchové drsnosti vzorků byl použit kontaktní laboratorní profiloměr Mitutoyo SV-2000 N2, viz obr. 33. Profiloměr snímá drsnost povrchu a získaná data jsou následně vyhodnocena softwarem Surfpack-SV verze 1.100. Tento program vyhodnotí výsledky a dokáže vyexportovat grafickou i textovou formu výsledků. Při měření byly zkoumány vybrané parametry drsnosti povrchu  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$ .



Obr. 33 – Laboratorní profiloměr s pracovní stanicí.

### 3.2.10 Konfokální mikroskop

Pro získání snímků povrchu a map drsností povrchů po obrábění byl použit konfokální mikroskop s 3D laserovým skenováním Keyence VK-X3000, viz obr. 34.



*Obr. 34 – Mikroskop s pracovní stanicí.*

### 3.2.11 Ruční refraktometr

Pro měření koncentrace naředěné procesní kapaliny byl použit ruční refraktometr Brix 0-18% ATC, viz obr. 35.



*Obr. 35 – Ruční refraktometr [3].*

### 3.3 Řezné podmínky

Všechna měření experimentu probíhala za stejných řezných podmínek  $v_c$  a  $v_f$ , proměnným parametrem byla hloubka záběru  $a_p$ . Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 4. Zvolené řezné podmínky byly určeny dle dříve provedeného experimentu [1] a následně byly upraveny dle zkušeností se strojem.

Řezné síly, teplota, drsnost povrchu				
Řezné podmínky				
Nástroj	CFK, GFK			
	Strojní svěrák, + pryž 40°ShA, + pryž 70°ShA, procesní kapalina			
	Otáčky $n$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$a_p$ [mm]	
	Řezná rychlost $v_c$ [m.s <sup>-1</sup> ]			
98A46K9V30 40	$n = 2650$ $v_c = 34,5$	15	$a_{p1}$	0,05
			$a_{p2}$	0,5
			$a_{p3}$	1

Tab. 4 – Zvolené řezné podmínky

### 3.4 Metodika experimentů

#### 3.4.1 Příprava vzorků

Pro výrobu zkušebních vzorků byly odlity dva polotovary o rozměrech 290x80x60 mm, které bylo třeba po vyjmutí z formy zaúhlovat na frézce. Byl vyroben jeden polotovar s uhlíkovými vlákny a jeden polotovar se skelnými vlákny. Tyto polotovary byly následně rozřezány na pásové pile každý na 12 vzorků. Výroba a příprava vzorků jsou detailněji popsány v kapitole 3.1.

#### 3.4.2 Příprava nástroje

Pro potřeby experimentu byl použit nástroj, viz kap. 3.2.3, který bylo nutno před upnutím na brusku staticky vyvážit. Po statickém vyvážení byl nástroj upnut na stroj a byla namontována dynamická vyvažovací jednotka. Brusný kotouč byl po každých deseti měření orovnan.

#### 3.4.3 Proces broušení

Pro broušení byla použita bruska BPH 320 A, viz kap. 3.2.3. Před zahájením každého dílčího experimentu byl použit potřebný způsob upnutí vzorku. Experimenty probíhaly dle podmínek viz kap. 3.3.

### 3.4.4 Příprava procesní kapaliny

Při provádění experimentů broušení s využitím procesní kapaliny byla použita kapalina Blasocut® BC 25 MD, která byla naředěna dle pokynů výrobce. Koncentrace kapaliny byla změřena odebráním vzorku a změřením pomocí ručního refraktometru, viz kap. 3.2.11. Výsledná naměřená koncentrace byla 8 %. Pro aplikování media bylo použito příslušenství, které je součástí brusky BPH 320 A, viz kap. 3.2.3.

### 3.4.5 Řezné síly

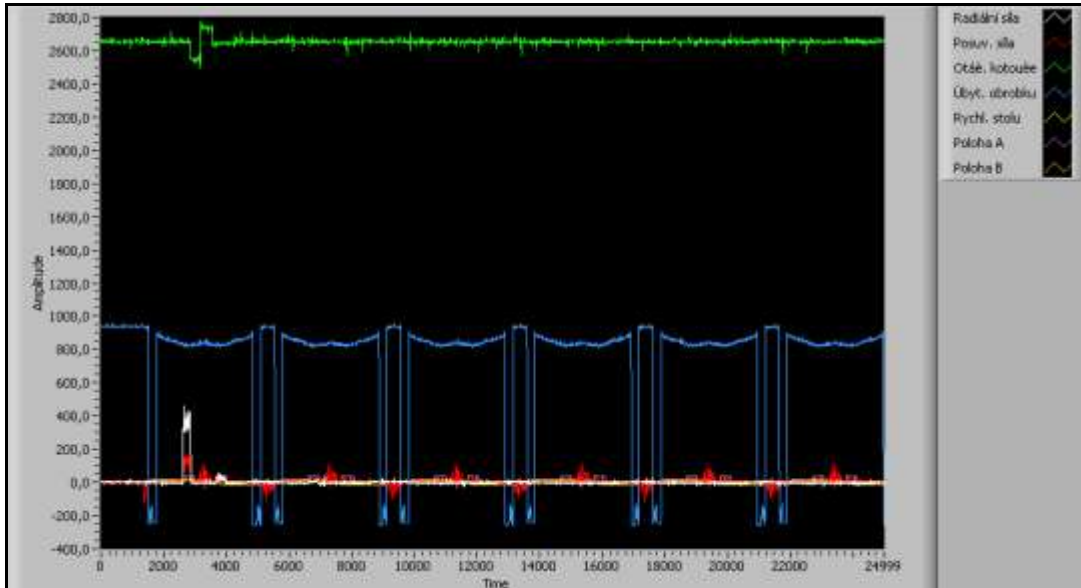
Každý vzorek byl pro potřeby experimentu broušen desetkrát. Broušení bylo prováděno za podmínek uvedených v tabulce 4. Velikost řezných sil byla měřena po každém broušení pomocí vybavení z kapitoly 3.2.7.

Aby bylo možné indikovat oblast měření, bylo nutné pro potřeby experimentu přemístit indukční čidla, která zaznamenávají průchod obráběného vzorku a spínají měření, viz fialová a oranžová křivka na obr. 38. Jelikož by indukční čidla nezaznamenala nemagnetický vzorek, bylo třeba simulovat obrobek pomocí kovového plechu o stejné šířce jako obráběný vzorek, viz obr. 36.



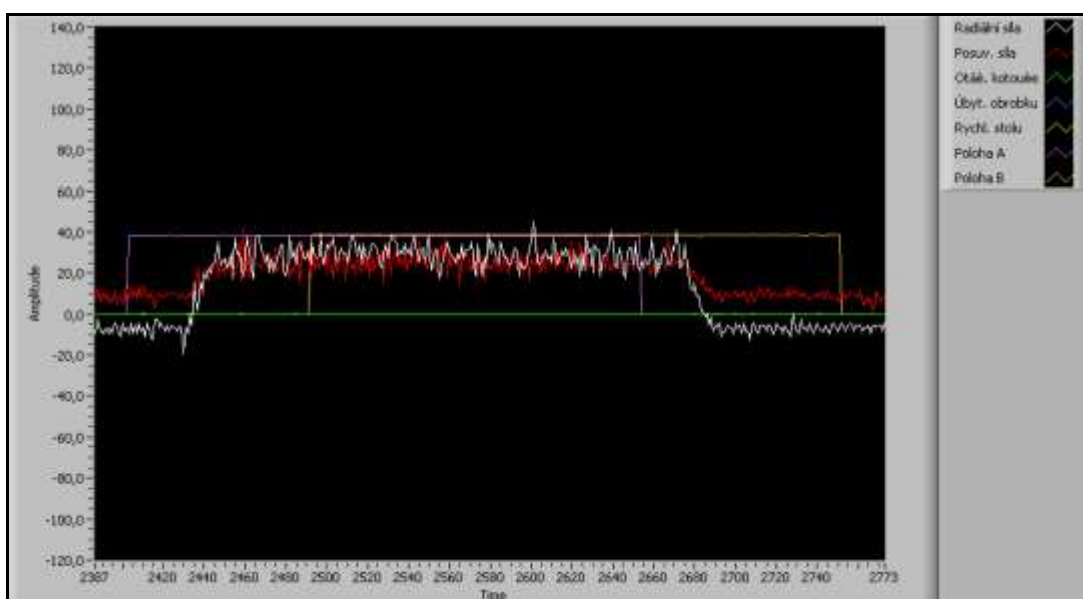
Obr. 36 – Simulování šířky obrobku pomocí kovového plechu.

Byla zkoumána radiální a posuvová síla a dále smluvní vyjiskřovací fáze pomocí smluvní řezné síly. Na obr. 37 jsou znázorněny zaznamenané parametry při technologii broušení pro jedno měření v softwaru LabVIEW 6.1.



Obr. 37 – Naměřené parametry při broušení.

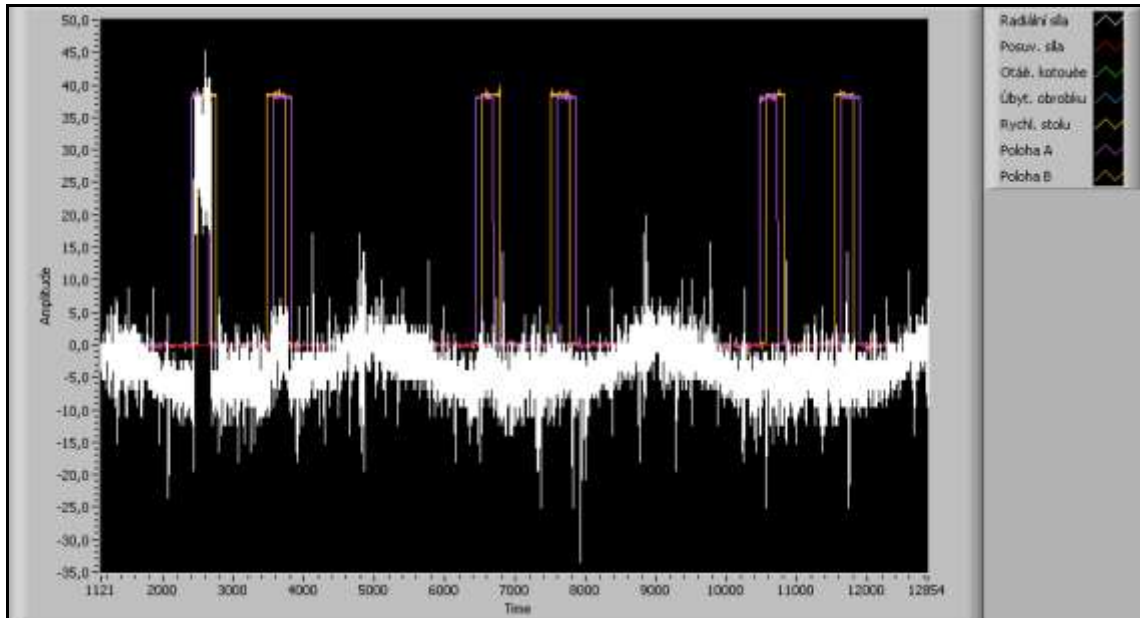
Maximální hodnoty radiální a posuvové síly se vyskytují při prvním záběru kotouče, kdy dochází k úběru asi 90% materiálu. U všech vzorků pro každý způsob upnutí byly síly měřeny desetkrát. K vyhodnocení stanovila střední hodnota z šesti nejvyšších a šesti nejnižších píků prvního záběru při broušení, viz obr 38.



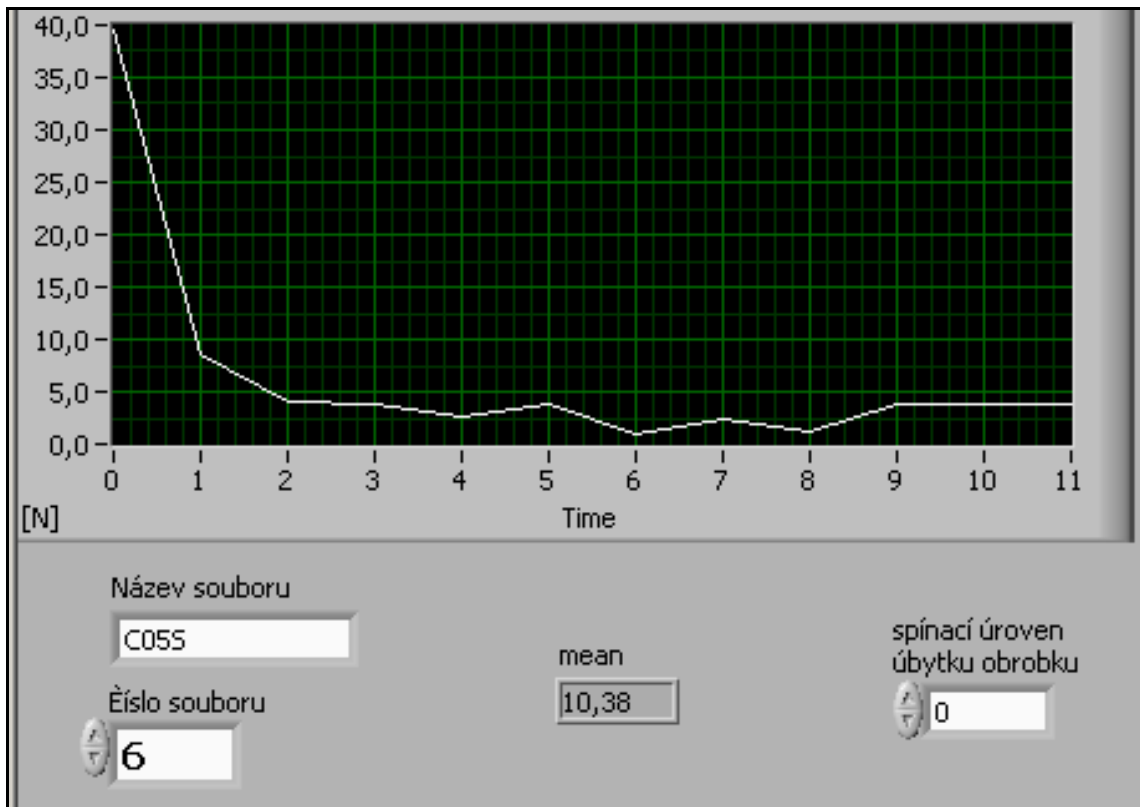
Obr. 38 – Detail prvního záběru broušení.



Smluvní řezná síla byla vyhodnocena pomocí naměřených hodnot z šesti po sobě jdoucích dvoj zdvihů pracovního stolu stroje, viz obr 39. Z těchto hodnot byl sestrojen vyjiskřovací diagram, viz obr 40, a také byla automaticky spočtena smluvní řezná síla. Tato síla byla u každého vzorku také měřena desetkrát.



Obr. 39 – Záznam měření ze šesti dvoj zdvihů pracovního stolu stroje.



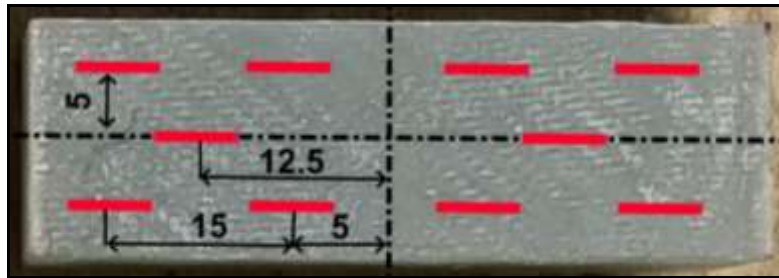
Obr. 40 – Vyjiskřovací diagram.

### 3.4.6 Měření teploty po broušení

Při experimentu bylo prováděno měření teploty povrchu vzorku bezkontaktním teploměrem, viz kap. 3.2.8. Teplota vzorků byla změřena před obráběním a bezprostředně po něm. V případě obrábění s procesní kapalinou byl vzorek po obrábění nejprve zbaven procesní kapaliny otřením a následně byla změřena teplota.

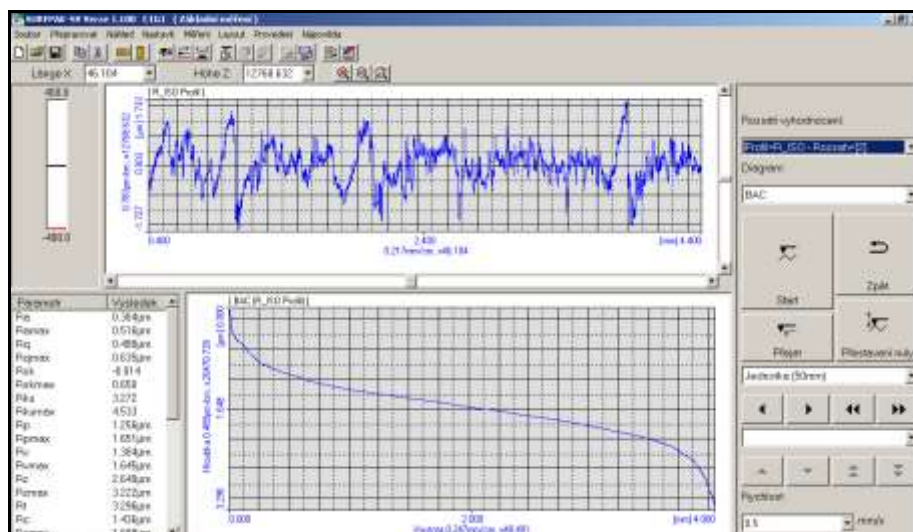
### 3.4.7 Drsnosti povrchu

Měření povrchové drsnosti bylo měřeno na každém obrobku desetkrát na místech, viz obr. 41 a v oblastech mimo výskyt dutin a vytržených vláken. Více měření bylo provedeno z důvodu různorodosti povrchu kompozitního materiálu po broušení.



Obr. 41 – Schéma míst měření drsnosti povrchu na vzorku (rozměry v mm).

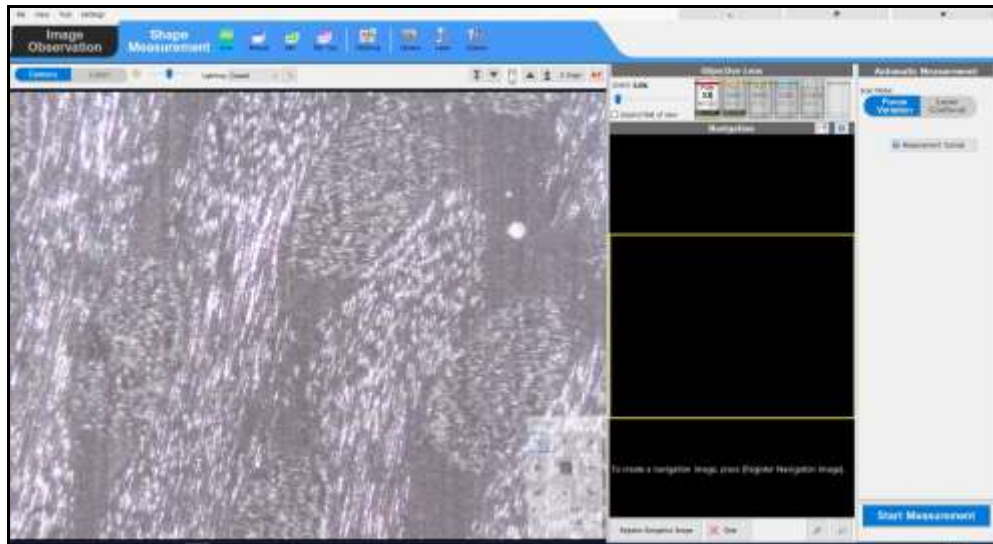
Měřeny byly vybrané parametry profilu  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$ , které byly vyhodnoceny pomocí programu Surfpack-SV verze 1.100, viz obr. 42. Z těchto hodnot byla následně vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.



Obr. 42 – Prostředí programu pro vyhodnocení drsností povrchu materiálu.

### 3.4.8 Snímkování povrchu

Po obrobení a změření drsnosti povrchu byly jednotlivé vzorky vyfoceny pod mikroskopem, viz kap 3.2.10. Následně byly vzorky oskenovány a byla vytvořena 3D mapa profilu nerovností vzorku po broušení v softwaru na počítači, viz obr 43. Pro vzorky CFK bylo použito desetinásobné přiblížení a pro vzorky GFK pětinasobné přiblížení.



Obr. 43 – Prostředí softwaru pro práci s mikroskopem.

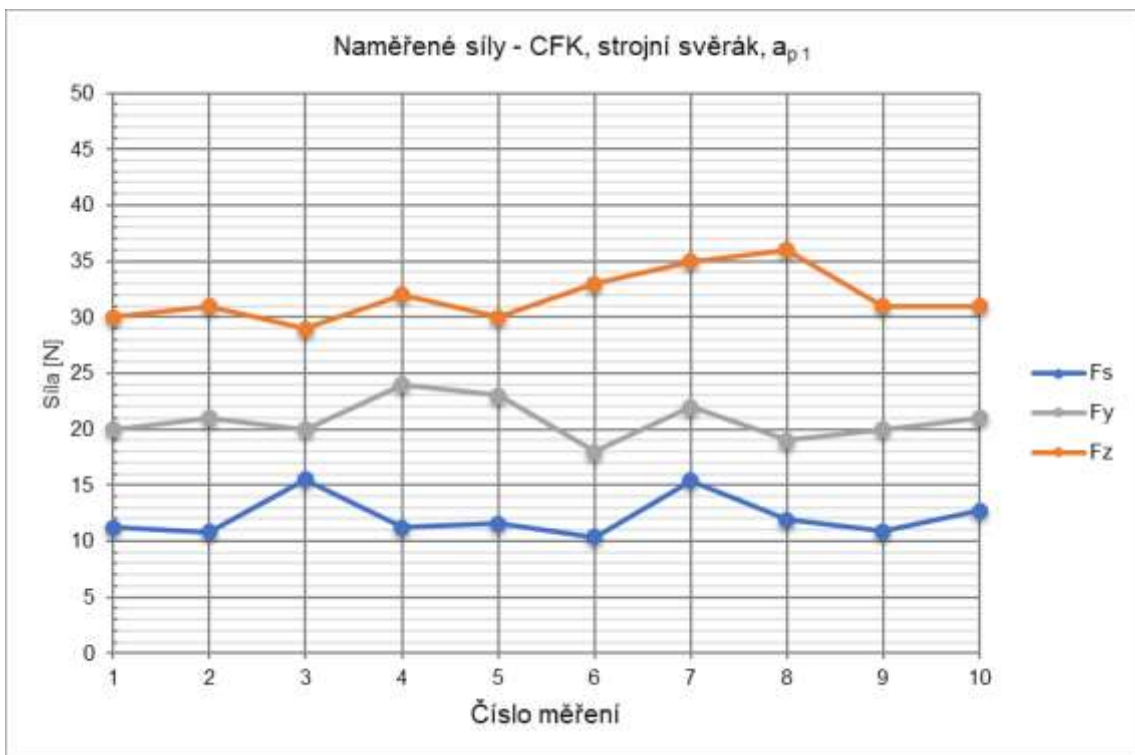
### 3.5 Vyhodnocení výsledků řezných sil

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření posuvové síly  $F_y$ , radiální síly  $F_z$  a smluvní řezné síly  $F_s$ . Experimenty byly prováděny vždy desetkrát za stanovených řezných podmínek, viz kap. 3.3. Měření jsou rozdělena podle materiálů – kompozitní materiály s uhlíkovými vlákny (CFK) a kompozitní materiály se skelnými vlákny (GFK). Dále jsou rozděleny podle způsobu upnutí.

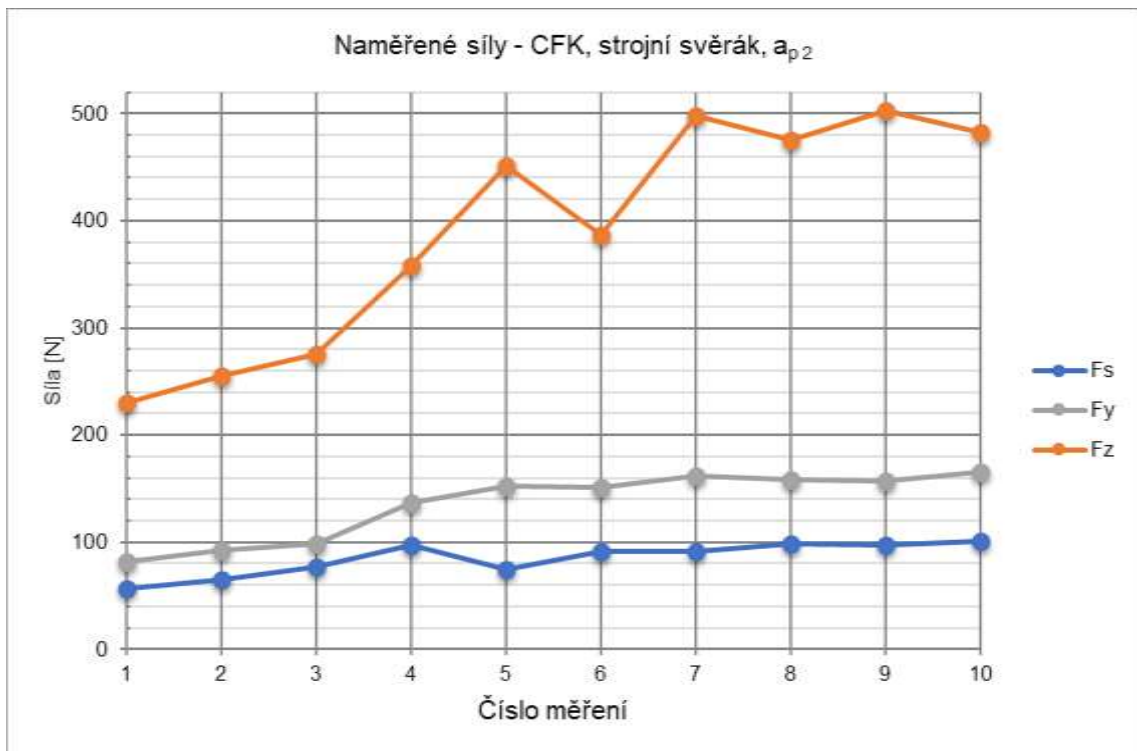
#### 3.5.1 CFK upnutý ve strojním svěráku

Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	12,17	± 1,40	20,8	± 1,4	31,8	± 1,7
$a_{p2}$ [mm]	18,00	± 11,64	135,6	± 23,9	391,5	± 80,3
$a_{p3}$ [mm]	190,55	± 23,56	290,6	± 39,1	955,6	± 159,5

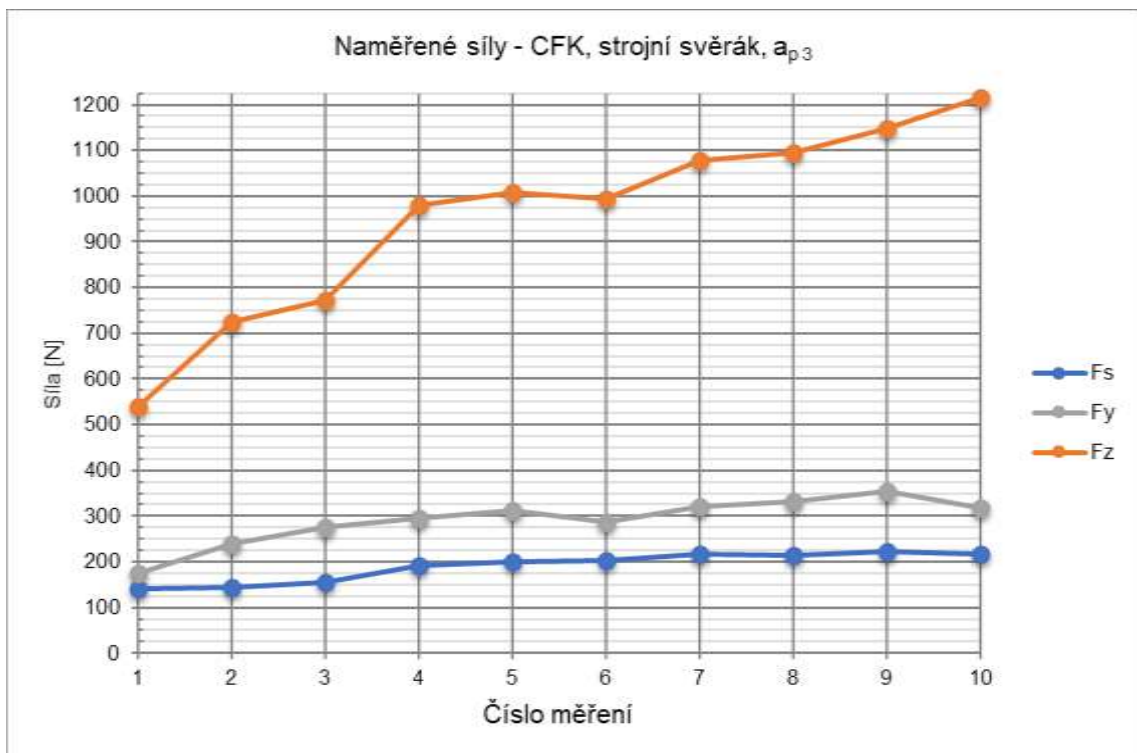
Tab. 5 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro CFK upnutý ve strojním svěráku.



Graf 1 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p1}$ .



Graf 2 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p2}$ .



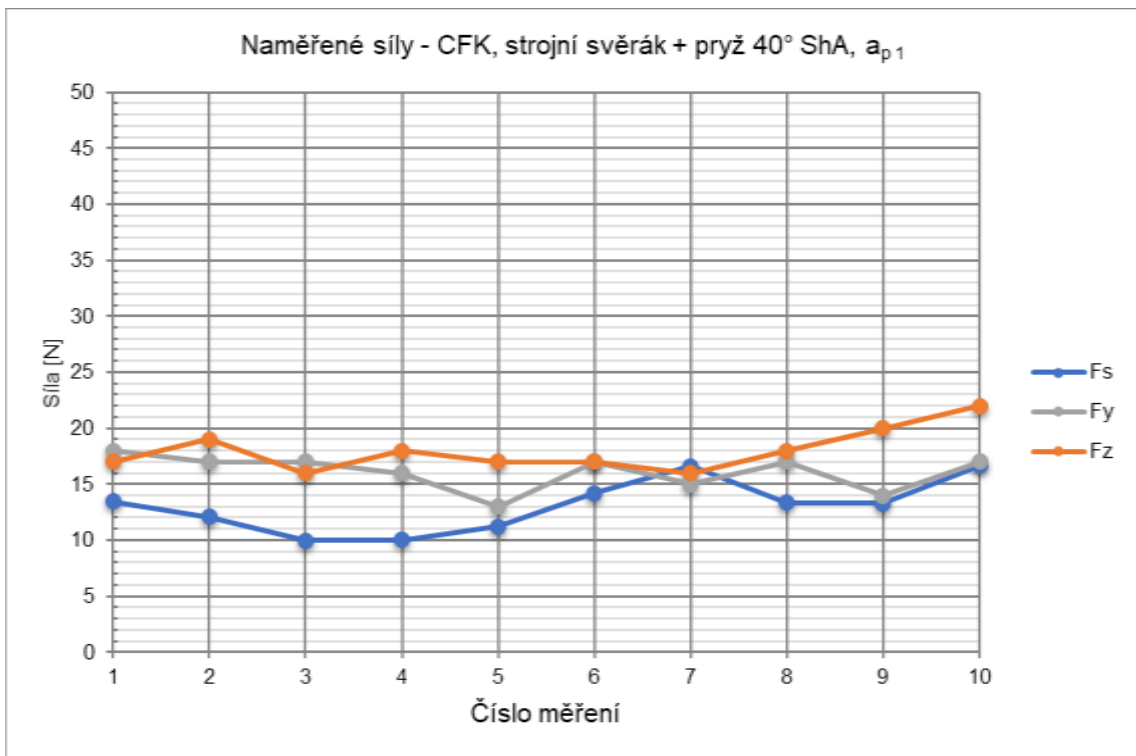
Graf 3 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p3}$ .

Největší řezné síly byly naměřeny pro hloubku záběru  $a_{p3}$ . Nárůst všech sil v závislosti na čísle měření může být způsobený zanášením kotouče.

### 3.5.2 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA

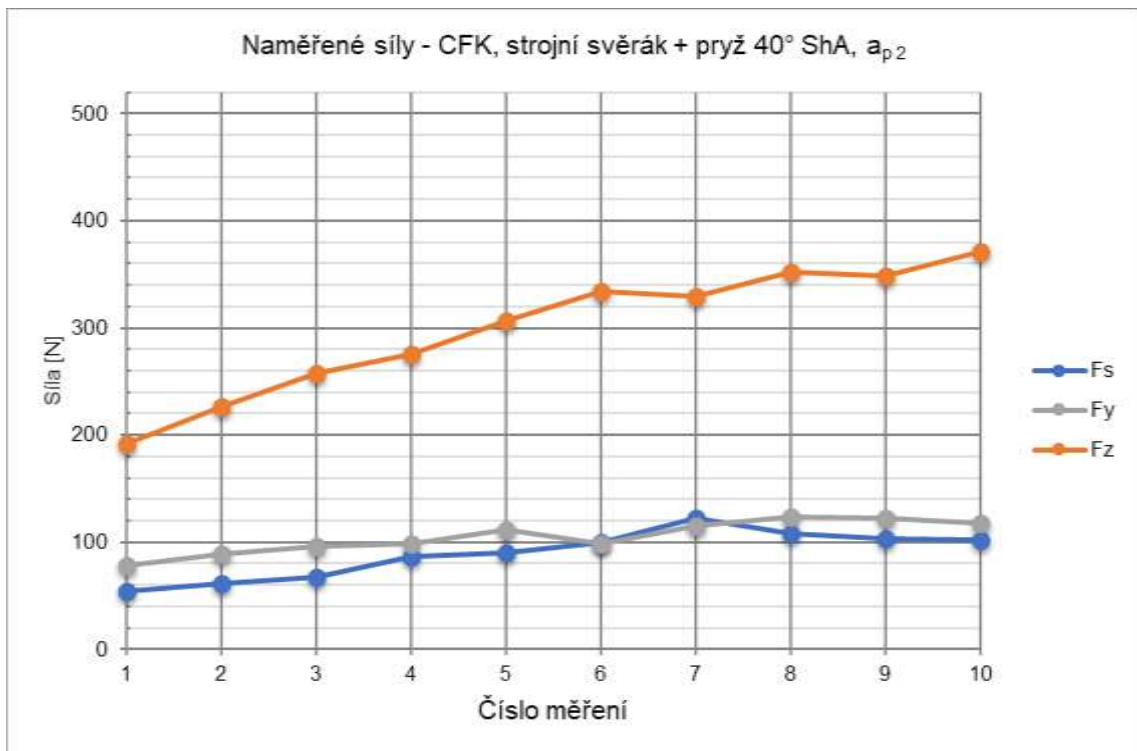
Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 40° ShA					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	13,09	± 1,78	16,1	± 1,2	18,0	± 1,4
$a_{p2}$ [mm]	89,34	± 16,83	104,9	± 11,4	299,3	± 44,6
$a_{p3}$ [mm]	183,09	± 27,46	233,2	± 32,9	694,1	± 105,4

Tab. 6 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.

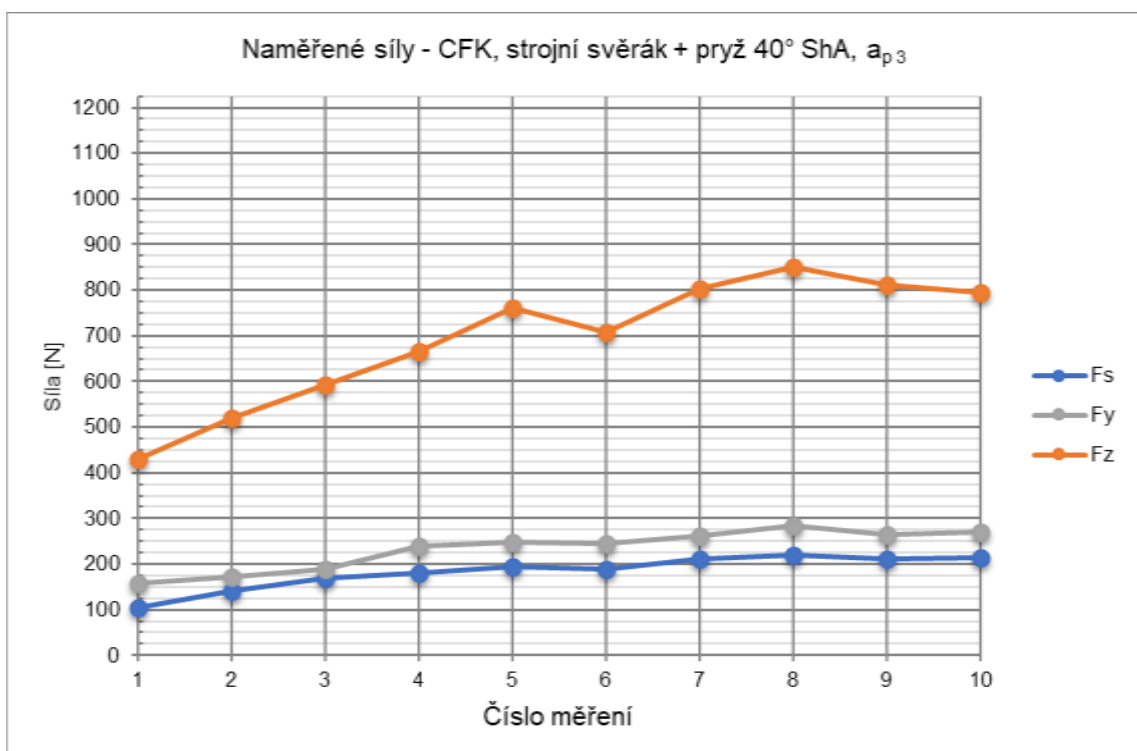


Graf 4 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

U pryžových čelistí byly zaznamenány nižší naměřené hodnoty rezných sil než při upnutí do strojního svěráku. Nevýhodou může být nedokonale pevné upnutí.



Graf 5 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p2}$ .

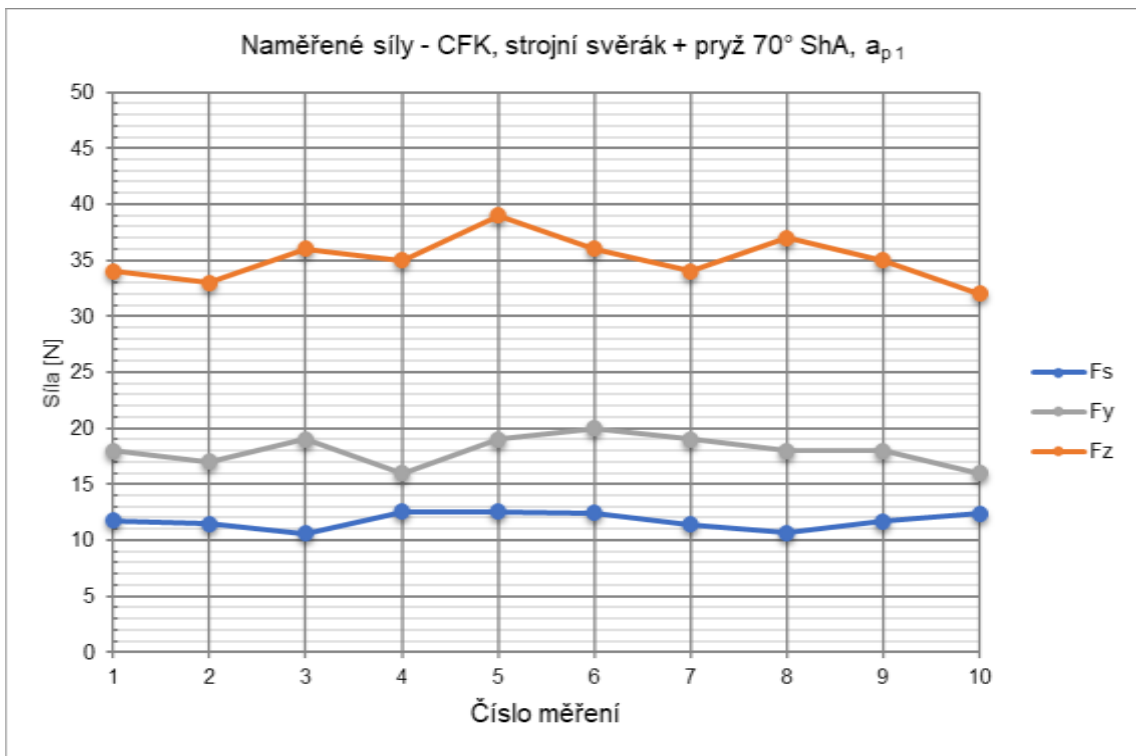


Graf 6 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p3}$ .

### 3.5.3 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 70° ShA					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	11,74	± 0,55	18,0	± 1,0	35,1	± 1,5
$a_{p2}$ [mm]	87,45	± 9,50	95,7	± 6,3	265,2	± 25,0
$a_{p3}$ [mm]	167,03	± 6,07	178,1	± 4,8	515,9	± 16,8

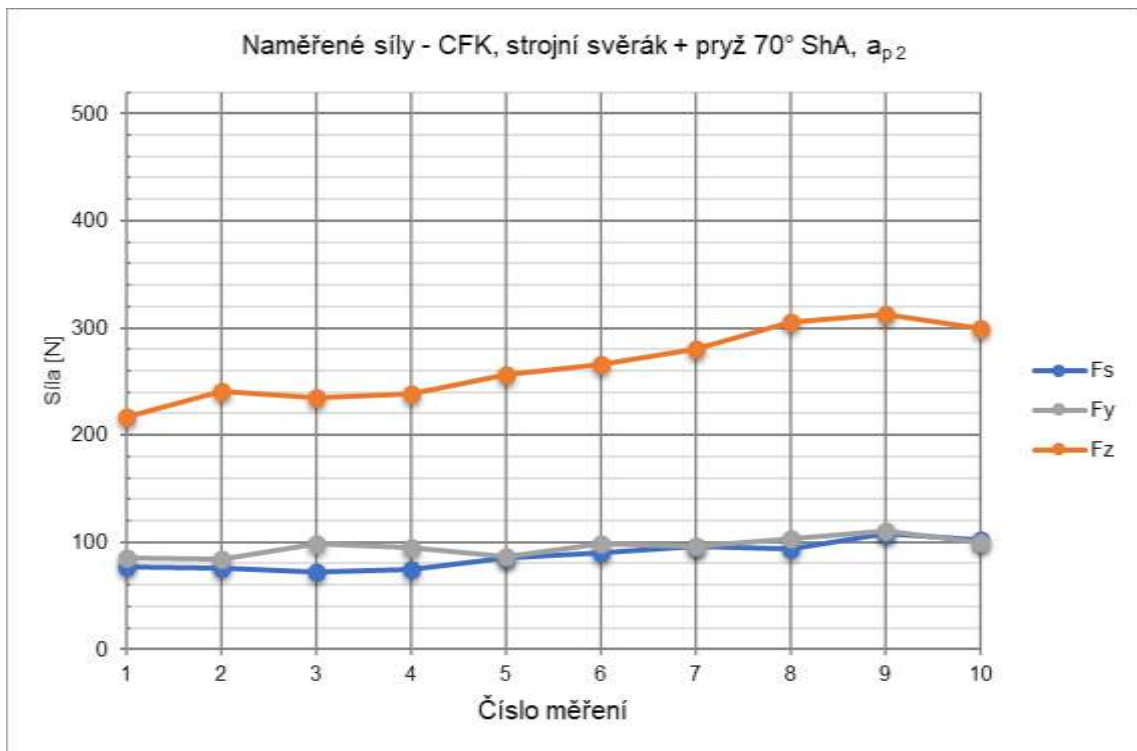
Tab. 7 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.



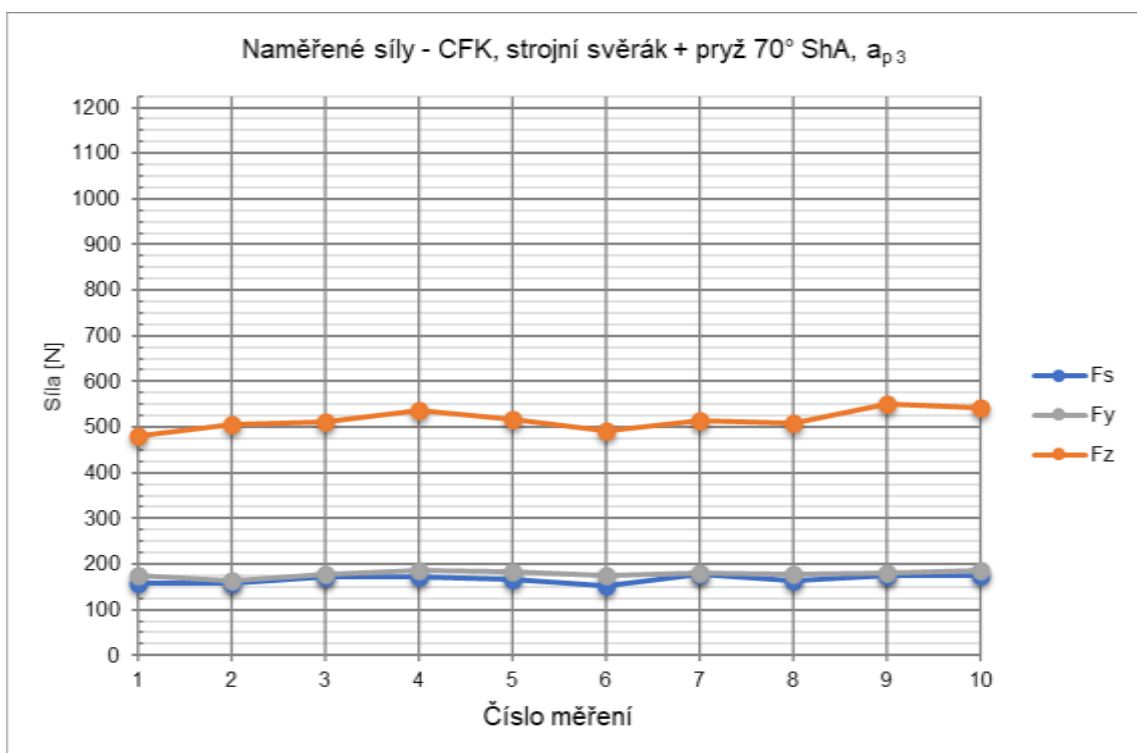
Graf 7 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

U pryžových čelistí byly zaznamenány nižší naměřené hodnoty rezných sil než při upnutí do strojního svěráku. Nevýhodou může být nedokonale pevné upnutí.





Graf 8 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p2}$ .

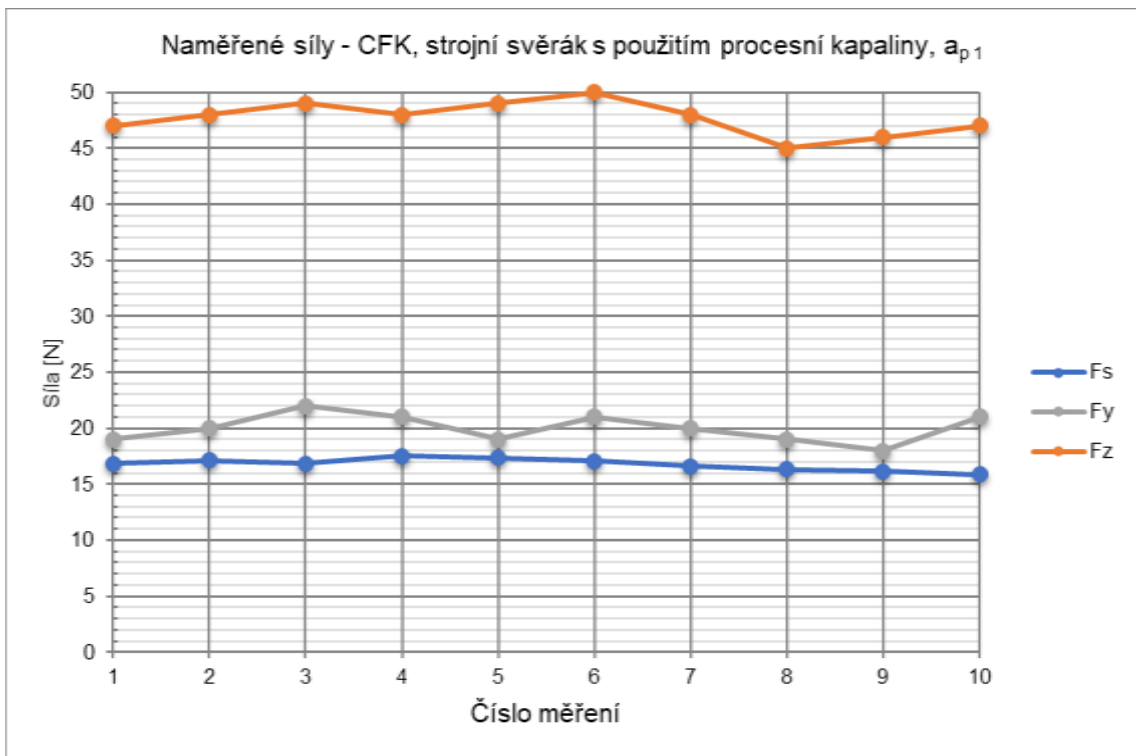


Graf 9 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p3}$ .

### 3.5.4 CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny

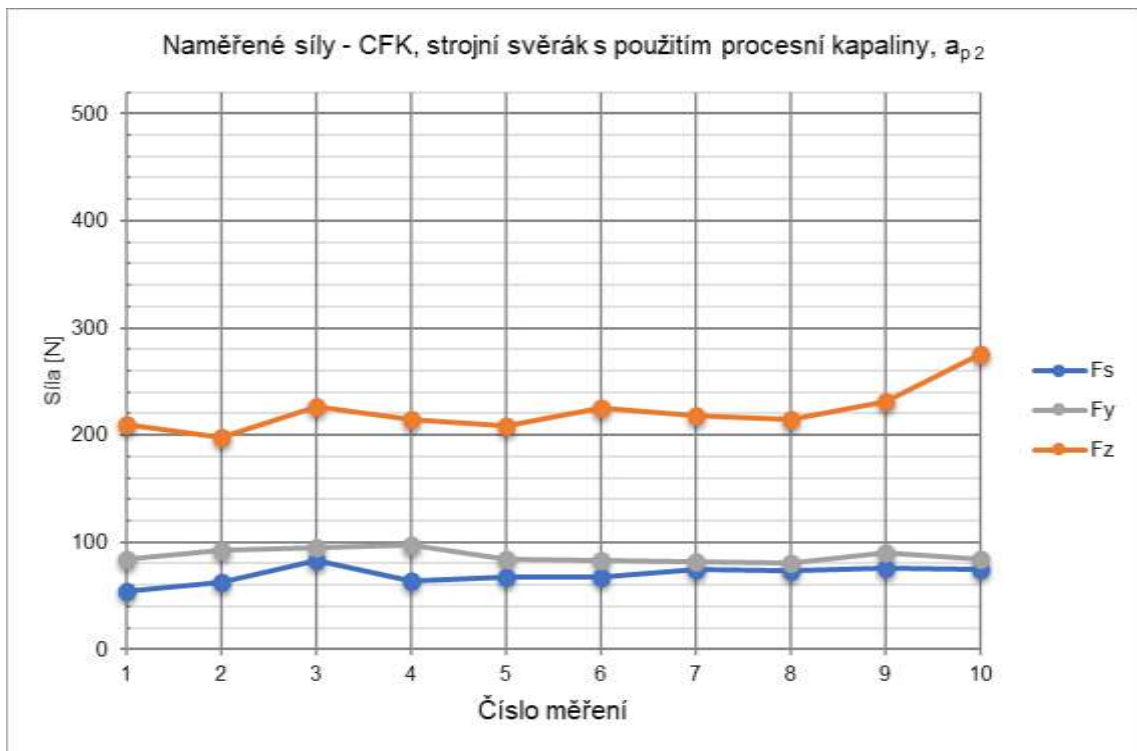
Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	16,76	± 0,41	20,0	± 0,9	47,6	± 1,1
$a_{p2}$ [mm]	69,63	± 6,09	87,2	± 4,5	222,2	± 15,8
$a_{p3}$ [mm]	133,93	± 17,34	162,6	± 11,1	565,5	± 40,0

Tab. 8 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.

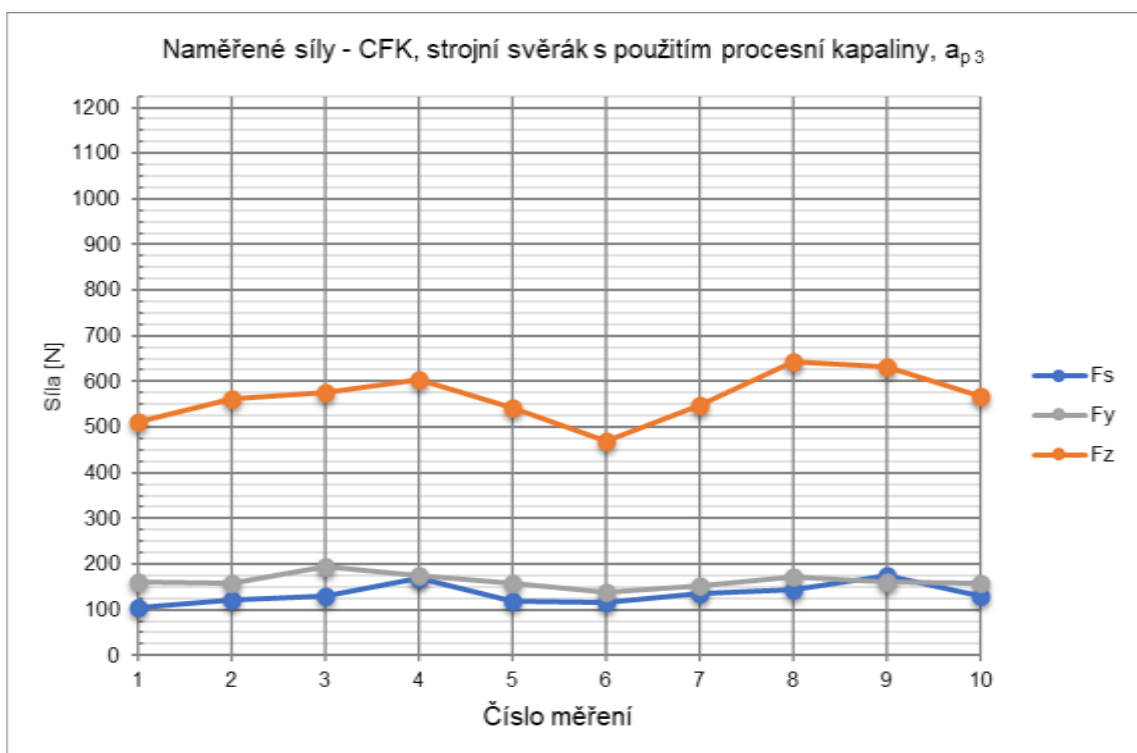


Graf 10 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p1}$  s použitím procesní kapaliny.

Nárůst řezných sil při použití procesní kapaliny oproti strojnímu svěráku může být způsoben odporem, který vytváří procesní kapalina. Tento nárůst je nepatrný u větších hloubek záběru, ale viditelný v grafu u hloubky záběru  $a_{p1}$ , z důvodu malých řezných sil vznikajících u malé hloubky záběru.



Graf 11 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p2}$  s použitím procesní kapaliny.

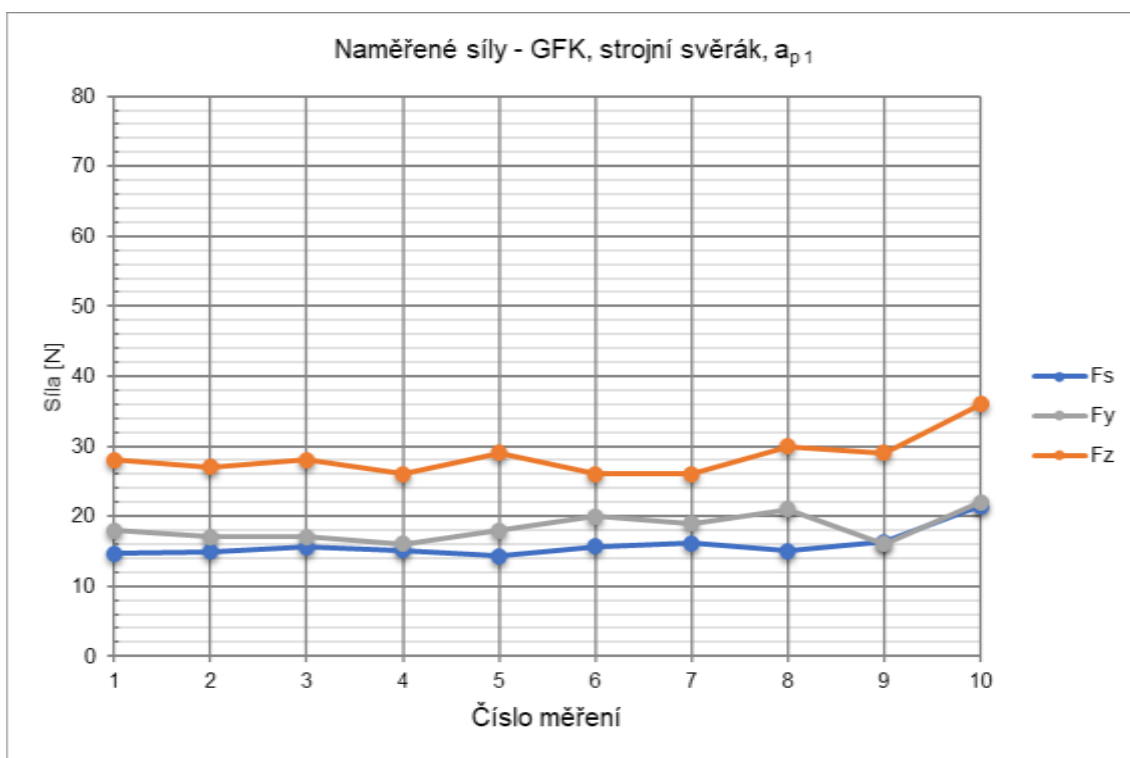


Graf 12 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p3}$  s použitím procesní kapaliny.

### 3.5.5 GFK upnutý ve strojním svěráku

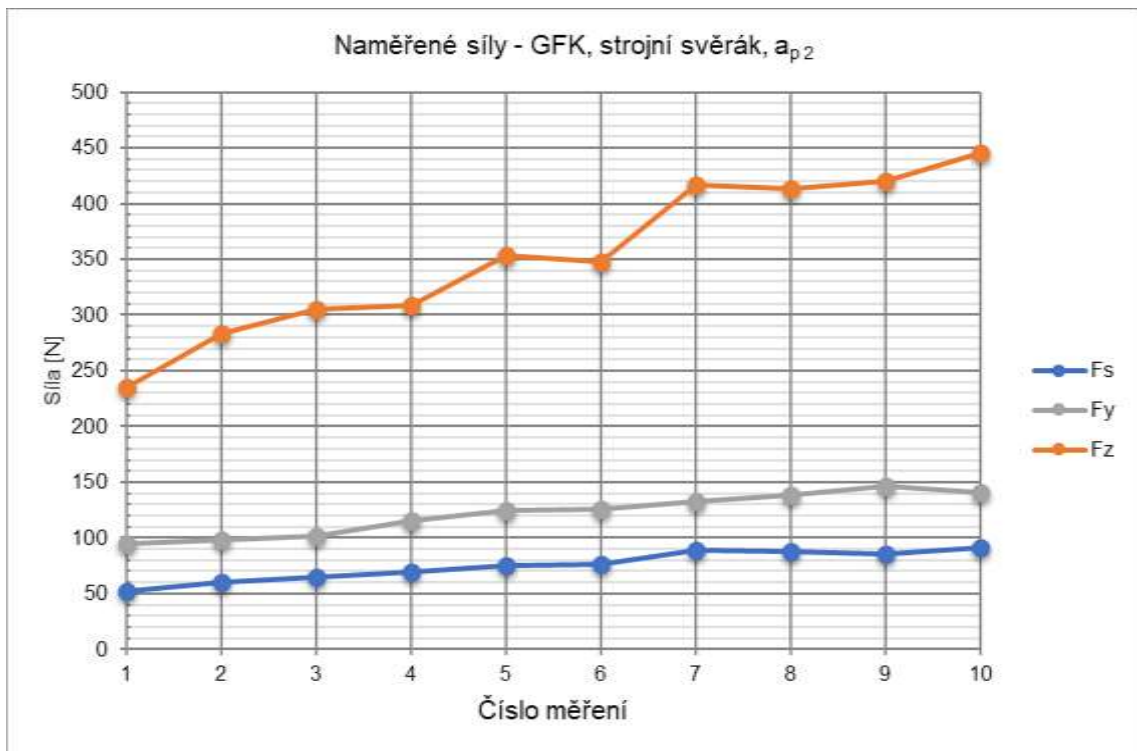
Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	15,90	± 1,53	18,4	± 1,6	28,5	± 2,3
$a_{p2}$ [mm]	75,04	± 10,18	121,8	± 14,0	352,8	± 52,6
$a_{p3}$ [mm]	236,58	± 41,49	348,8	± 55,9	1 212,3	± 208,7

Tab. 9 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro GFK upnutý ve strojním svěráku.

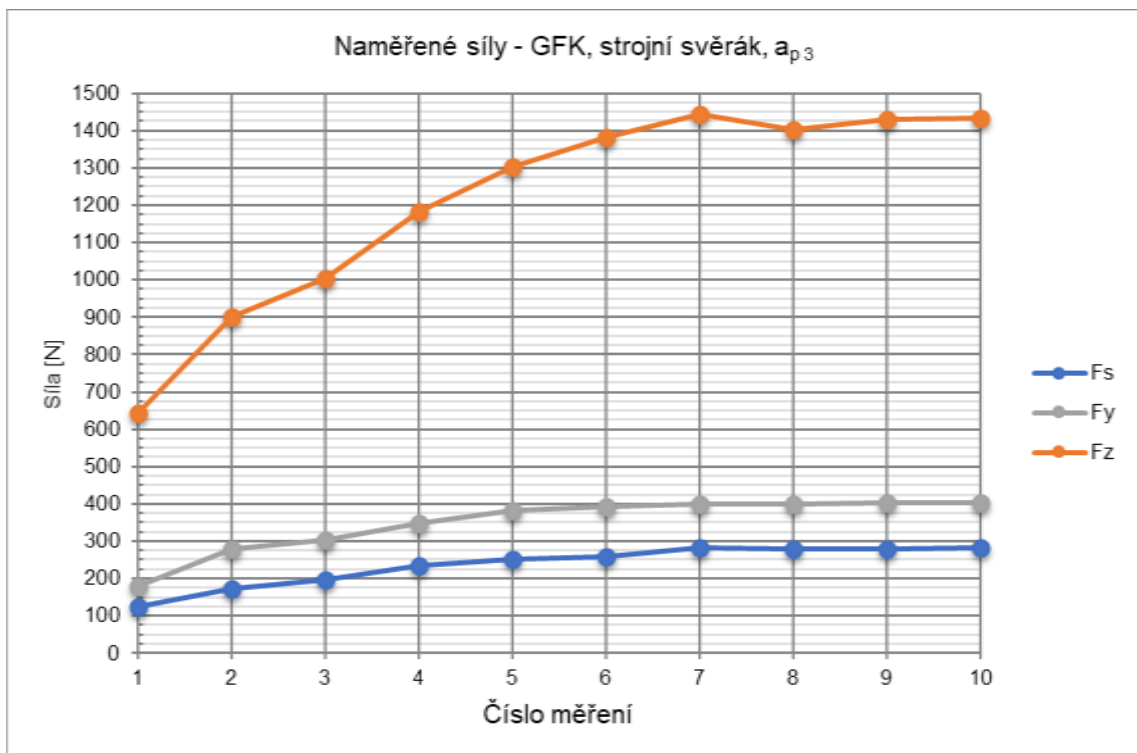


Graf 13 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

Při broušení s nejmenší hloubkou záběru byly řezné síly velmi stabilní, vliv na to mohlo mít malé zanášení kotouče z důvodu malé hloubky záběru  $a_{p1}$ .



Graf 14 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p2}$ .



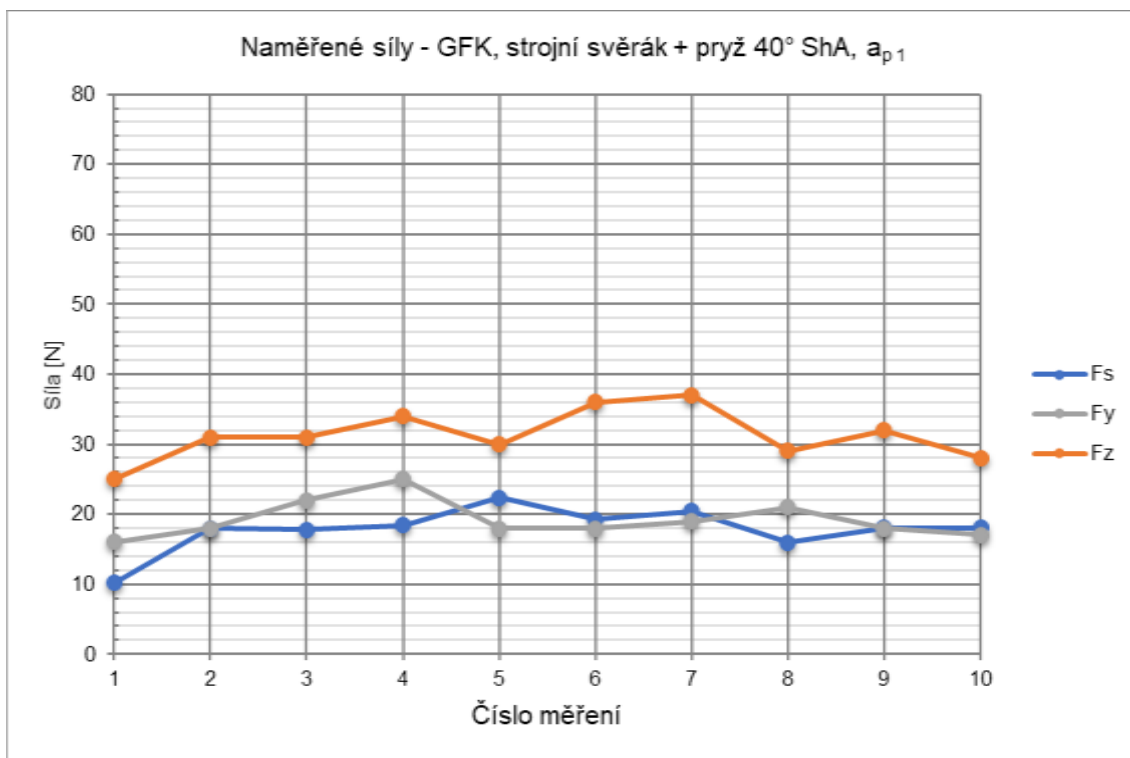
Graf 15 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p3}$ .

Naměřené síly byly největší pro hloubku záběru  $a_{p3}$ . Nárůst všech sil v závislosti na čísle měření může být způsobený zanášením kotouče a postupně zvyšující se teplotou.

### 3.5.6 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA

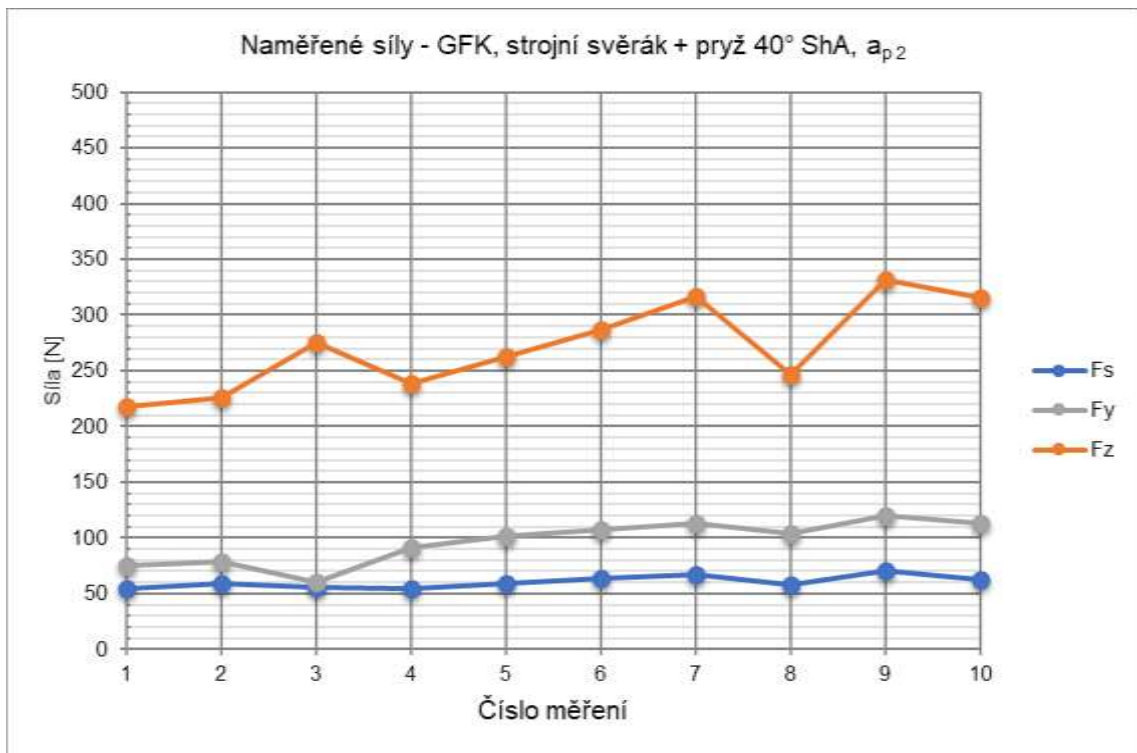
Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 40° ShA					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	17,84	± 2,41	19,2	± 2,0	31,3	± 2,8
$a_{p2}$ [mm]	60,23	± 4,01	96,4	± 14,7	271,9	± 30,3
$a_{p3}$ [mm]	170,01	± 28,20	236,1	± 48,0	693,6	± 166,7

Tab. 10 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.

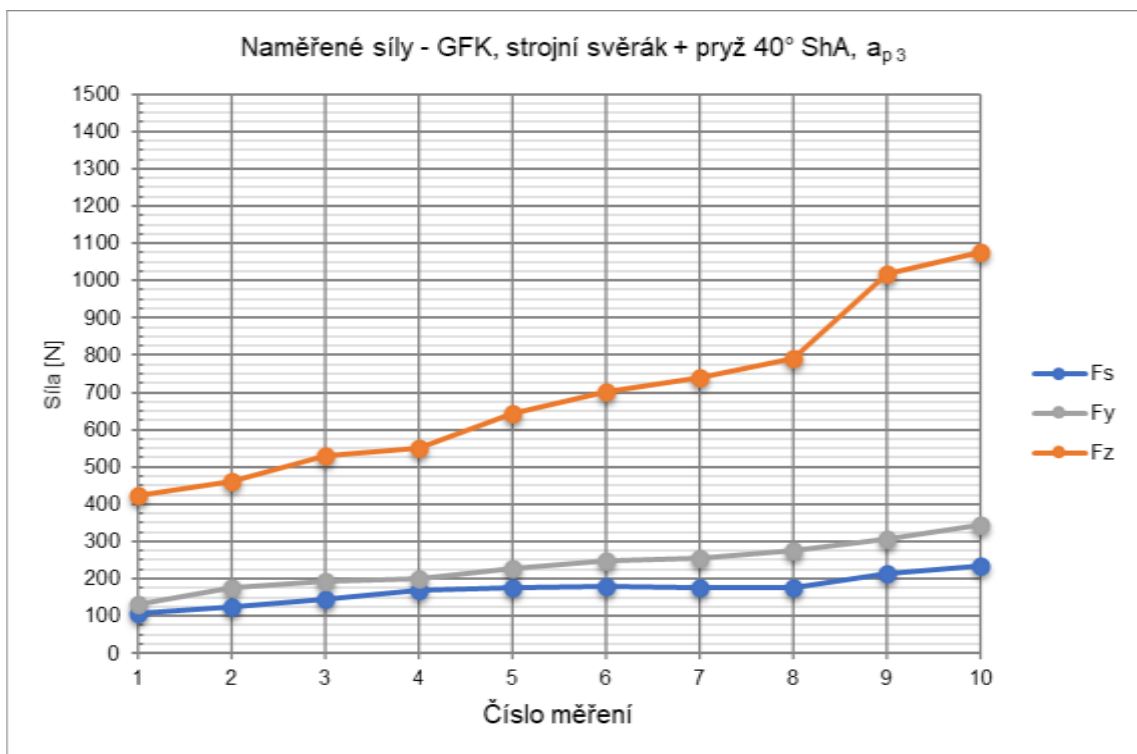


Graf 16 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

U pryžových čelistí byly zaznamenány nižší naměřené hodnoty rezných sil než při upnutí do strojního svěráku. Nevýhodou může být nedokonale pevné upnutí.



Graf 17 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p2}$ .

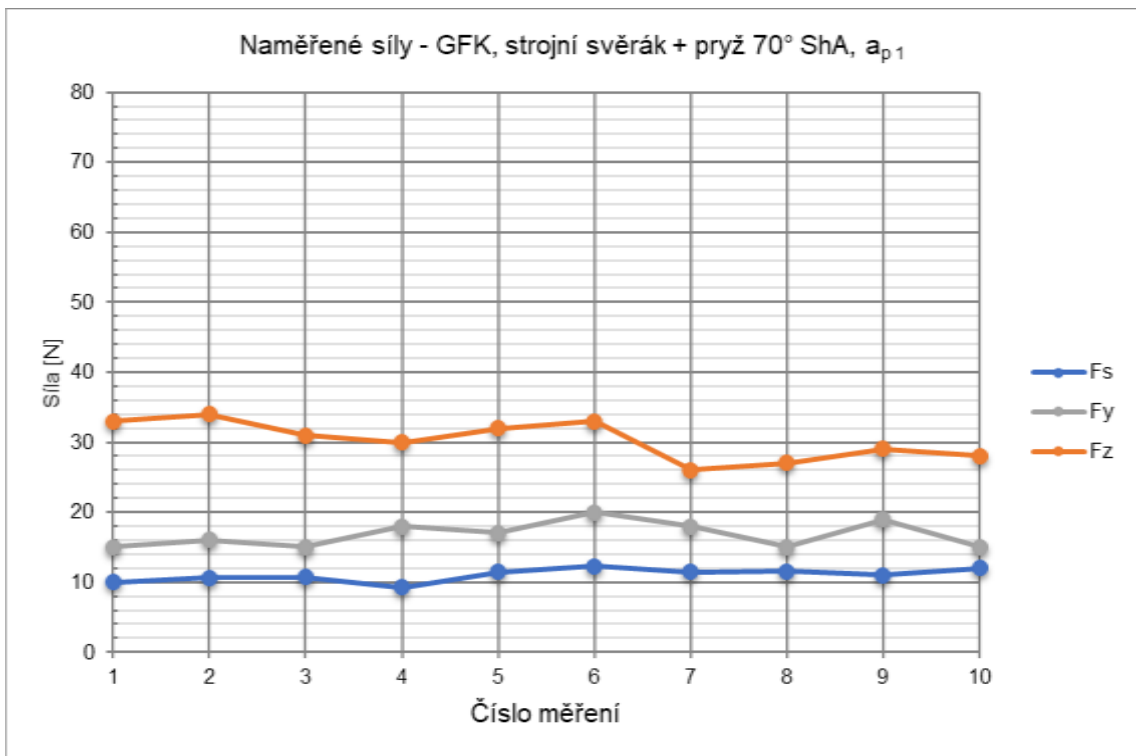


Graf 18 – Naměřené síly pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p3}$ .

### 3.5.7 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 70° ShA					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	11,04	± 0,70	16,8	± 1,4	30,3	± 2,1
$a_{p2}$ [mm]	66,29	± 6,52	90,0	± 7,5	237,7	± 19,1
$a_{p3}$ [mm]	148,92	± 15,35	167,2	± 17,0	523,6	± 55,5

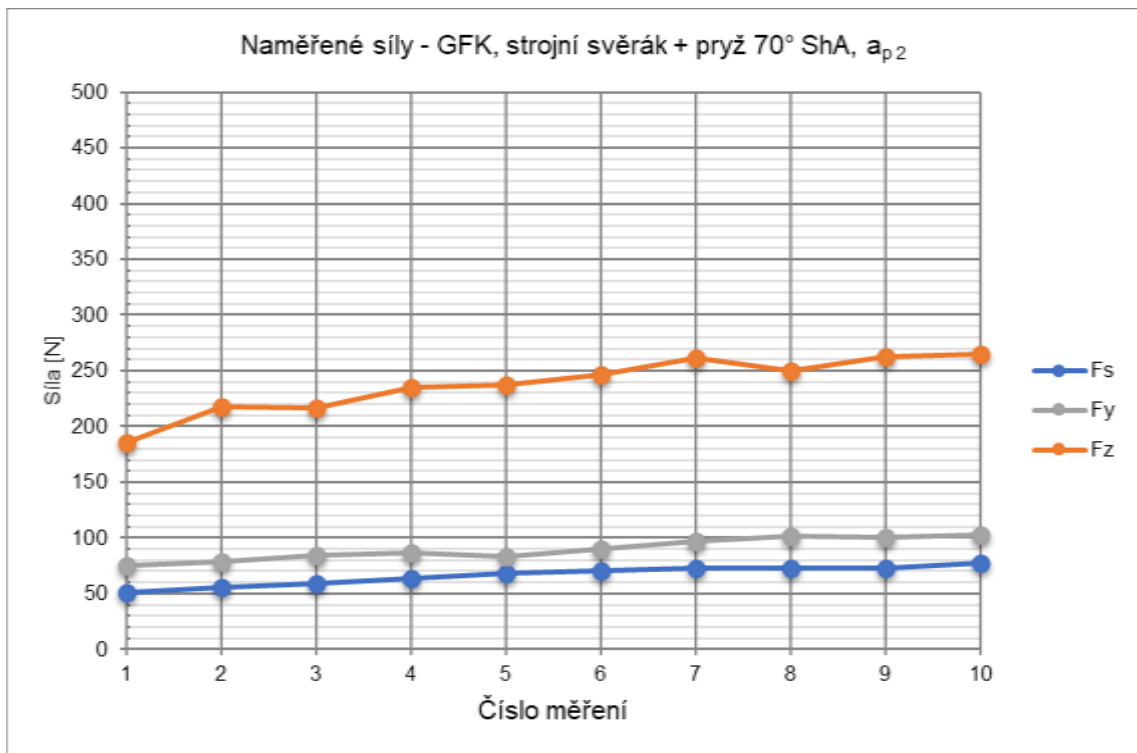
Tab. 11 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.



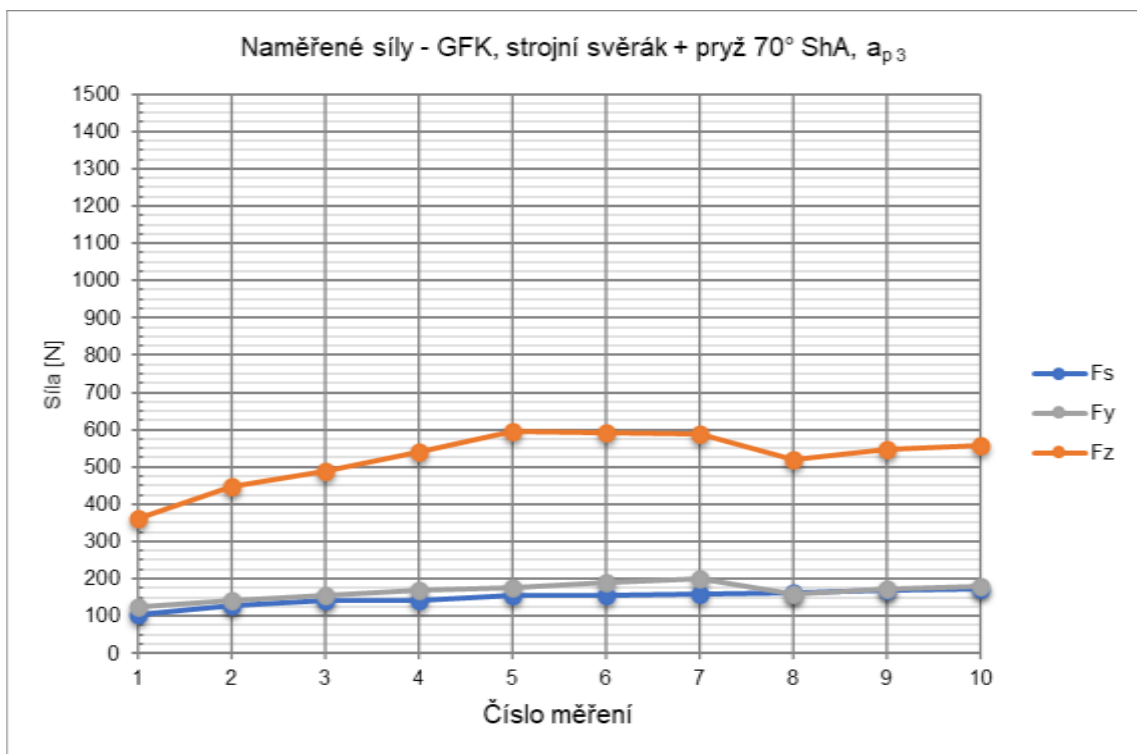
Graf 19 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

U pryžových čelistí byly zaznamenány nižší naměřené hodnoty rezných sil než při upnutí do strojního svěráku. Nevýhodou může být nedokonale pevné upnutí.





Graf 20 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p2}$ .

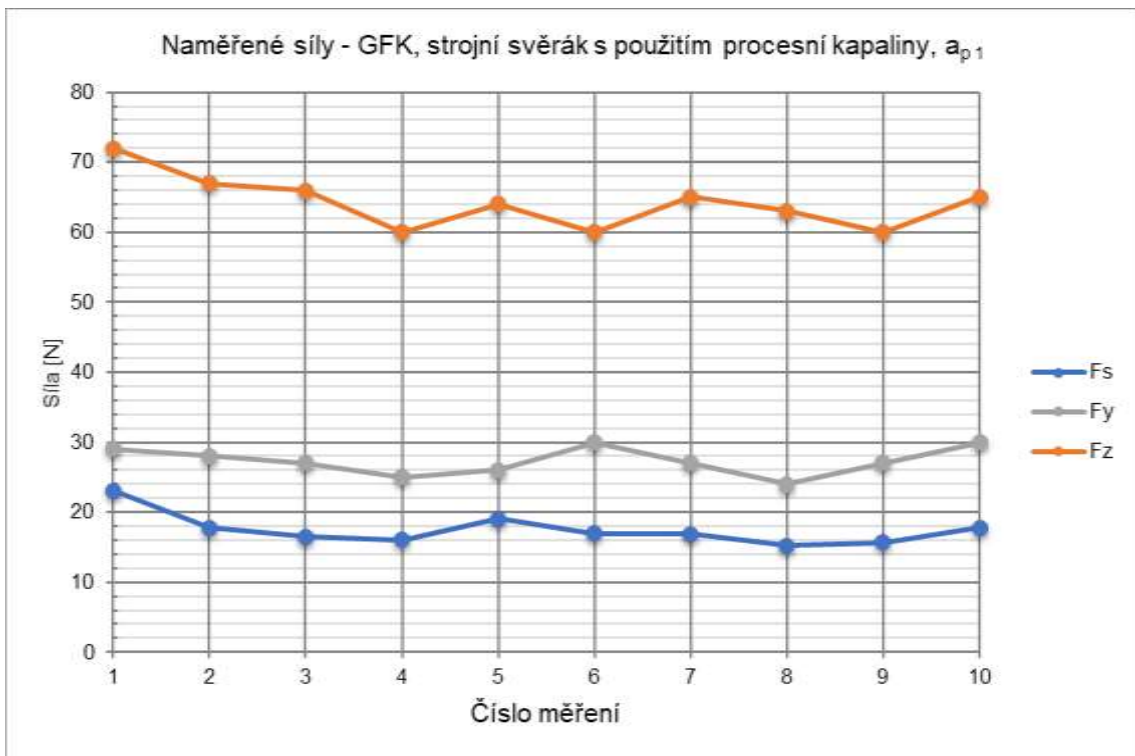


Graf 21 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p3}$ .

### 3.5.8 GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny

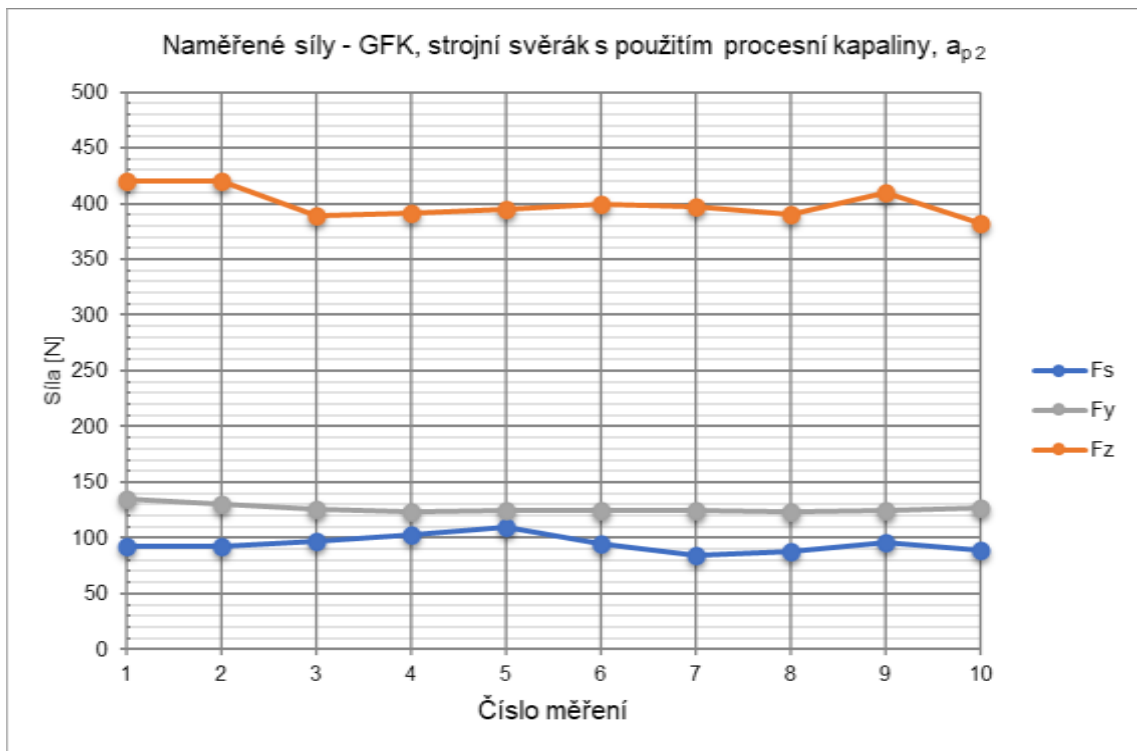
Naměřené síly						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny					
	$F_s$ [N]	Konfidenční interval $F_s$ [N]	$F_y$ [N]	Konfidenční interval $F_y$ [N]	$F_z$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$a_{p1}$ [mm]	17,49	± 1,72	27,3	± 1,5	64,2	± 2,8
$a_{p2}$ [mm]	94,72	± 5,59	126,3	± 2,8	399,5	± 9,9
$a_{p3}$ [mm]	225,90	± 29,93	217,3	± 18,3	961,5	± 126,1

Tab. 12 – Vypočtené průměrné hodnoty sil pro GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.

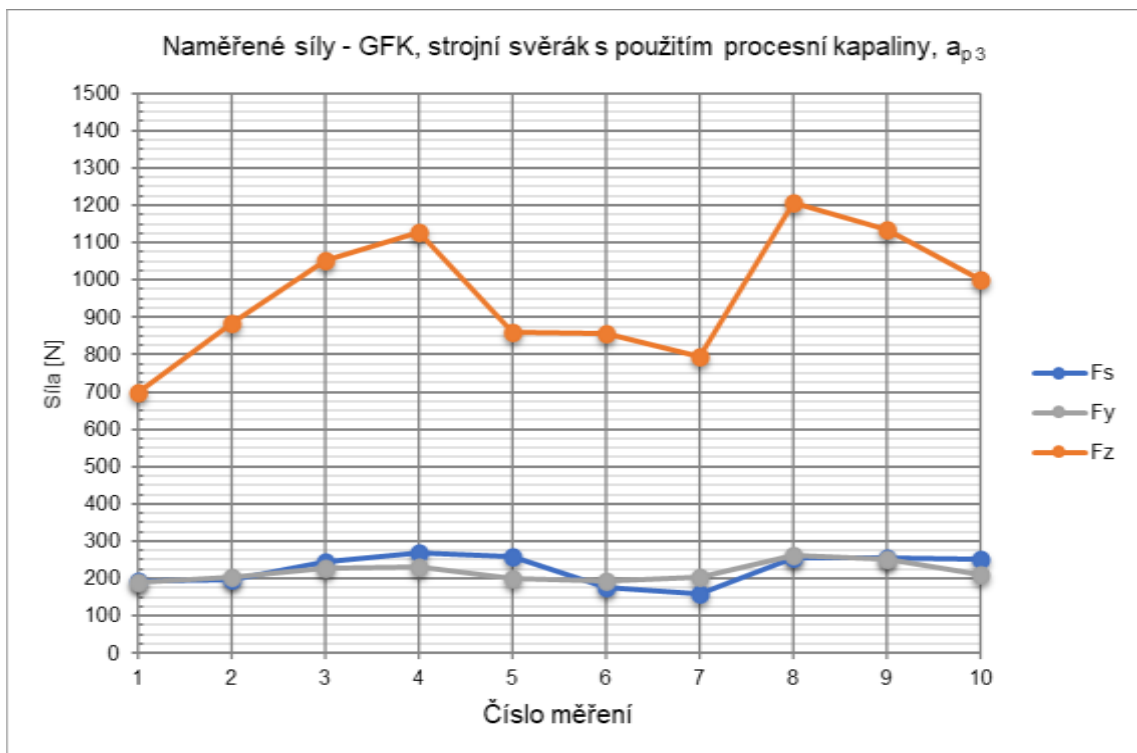


Graf 22 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p1}$  s použitím procesní kapaliny.

Nárůst řezných sil při použití procesní kapaliny oproti strojnímu svěráku může být způsoben odporem, který vytváří procesní kapalina. Tento nárůst je nepatrný u větších hloubek záběru, ale viditelný v grafu u hloubky záběru  $a_{p1}$ , z důvodu malých řezných sil vznikajících u malé hloubky záběru.



Graf 23 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěraku při hloubce záběru  $a_{p2}$  s použitím procesní kapaliny.



Graf 24 – Naměřené síly pro GFK upnutý ve strojním svěraku při hloubce záběru  $a_{p3}$  s použitím procesní kapaliny.

Výrazný propad viditelný v grafu pro hloubku záběru  $a_{p3}$  může být způsoben vadou vzorku, vrstvy skelných vláken mohly být zhuštěny a docházelo tedy převážně k broušení matrice kompozitního materiálu.

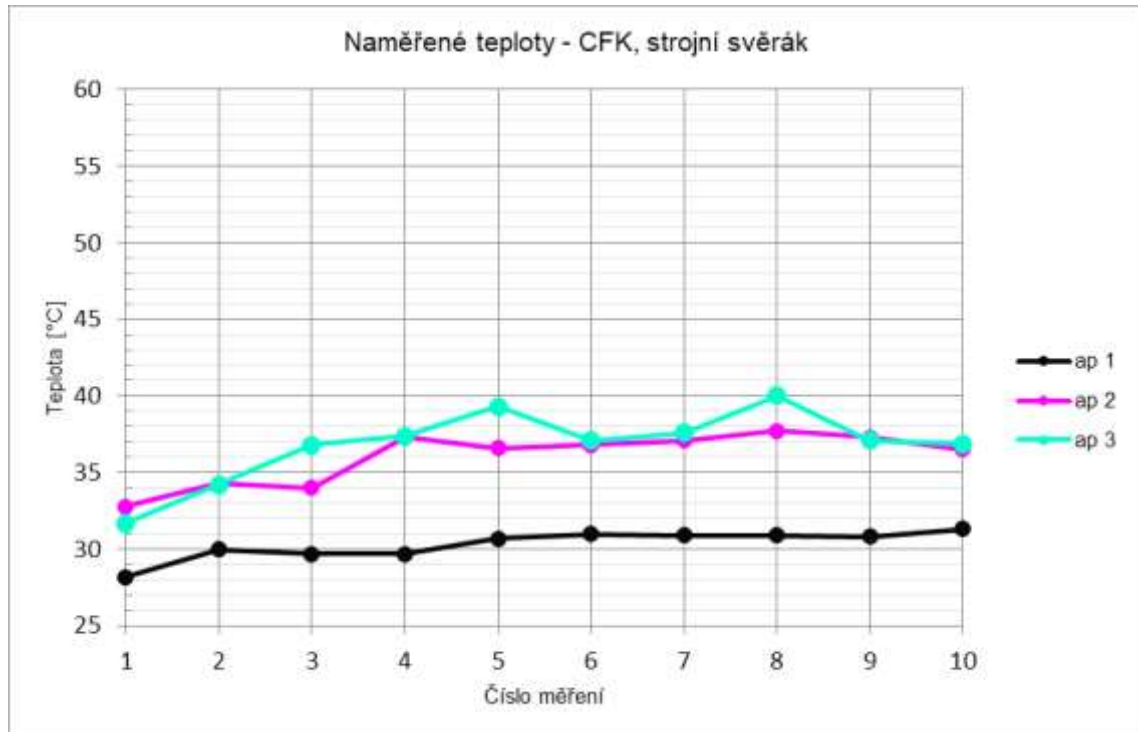
### 3.6 Vyhodnocení teplot po broušení

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření teplot vzorků bezprostředně po obrobení. Teplota všech vzorků na začátku obrábění byla  $24 \pm 1^\circ\text{C}$ . Experimenty byly prováděny za stanovených řezných podmínek, viz kap. 3.3. Teplota byla měřena pomocí teploměru, viz kap 3.2.8.

#### 3.6.1 CFK upnutý ve strojním svěráku

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák	
	T [ $^\circ\text{C}$ ]	Konfidenční interval [ $^\circ\text{C}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	30,32	$\pm 0,70$
$a_{p2}$ [mm]	36,04	$\pm 1,28$
$a_{p3}$ [mm]	36,81	$\pm 1,79$

Tab. 13 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro CFK upnutý ve strojním svěráku.



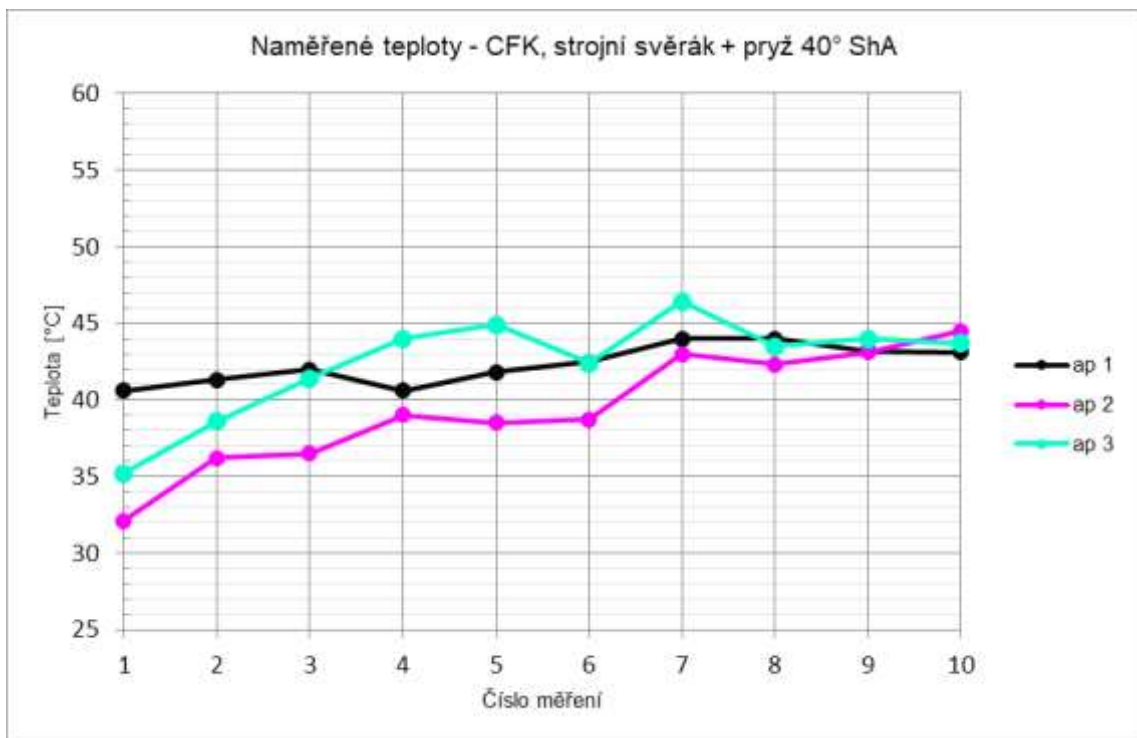
Graf 25 – Naměřené teploty pro CFK upnutý ve strojním svěráku v závislosti na hloubce záběru.

Nejvyšší teploty byly naměřeny při největší hloubce záběru  $a_{p3}$ .

### 3.6.2 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 40° ShA	
	T [°C]	Konfidenční interval [°C]
$a_{p1}$ [mm]	42,31	± 0,95
$a_{p2}$ [mm]	39,03	± 3,27
$a_{p3}$ [mm]	42,41	± 2,48

Tab. 14 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.



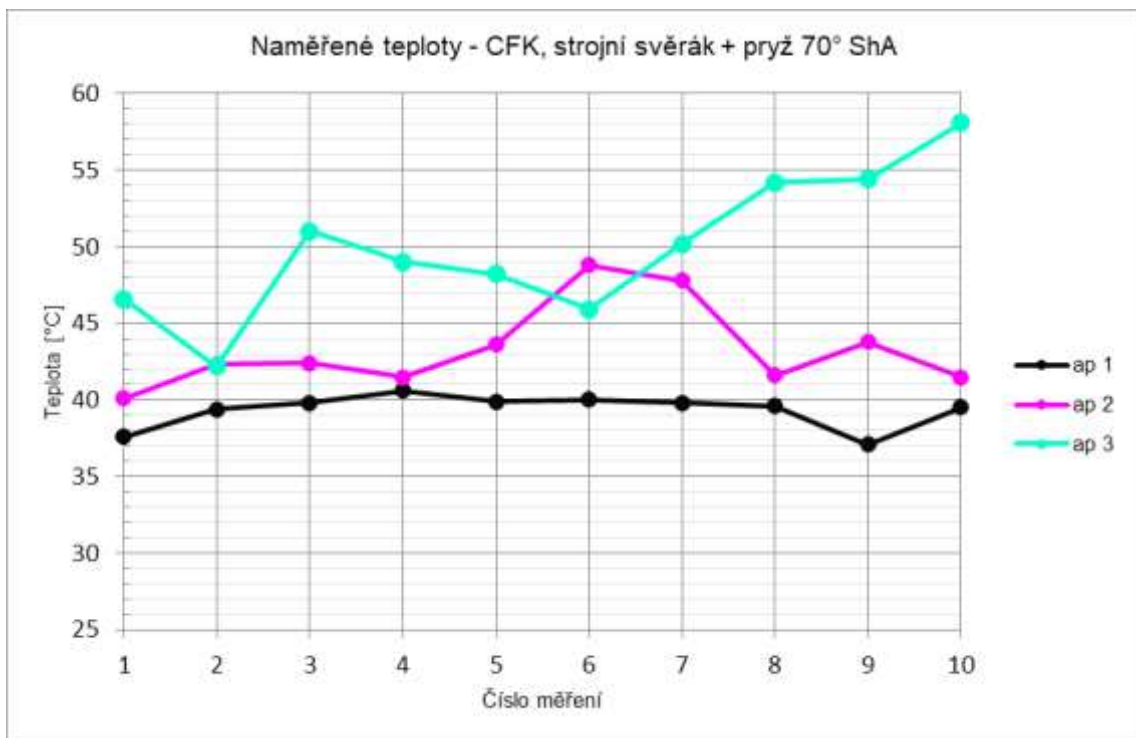
Graf 26 – Naměřené teploty pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA v závislosti na hloubce záběru.

U pryžových materiálů byly naměřeny vyšší teploty než u strojního svěráku, což může být způsobeno nedokonalé pevným upnutím a vznikáním vibrací mezi obrobkem a nástrojem. Nejvyšší teplota byla zaznamenána pro hloubku záběru  $a_{p3}$ .

### 3.6.3 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 70° ShA	
	T [°C]	Konfidenční interval [°C]
$a_{p1}$ [mm]	39,33	± 0,83
$a_{p2}$ [mm]	43,34	± 2,14
$a_{p3}$ [mm]	49,98	± 3,53

Tab. 15 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.



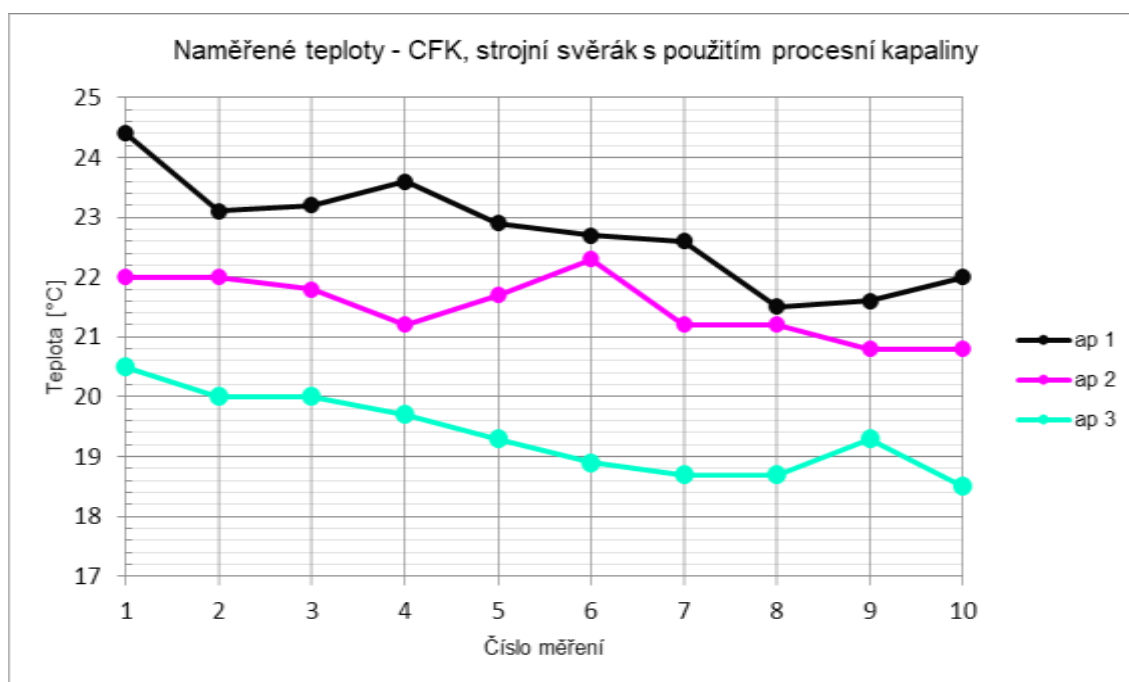
Graf 27 – Naměřené teploty pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA v závislosti na hloubce záběru.

Nejvyšší nárůst teploty byl zaznamenán pro hloubku záběru  $a_{p3}$ . Narůstající hodnota v závislosti na čísle měření může být způsobena zmenšováním obrobku. Větší část obrobku je tedy upnuta mezi pryžovými čelistmi, které zabraňují přenosu tepla do kovových částí svěráku a zmenšuje se část obrobku na svěrákem, která může být chlazena okolním vzduchem.

### 3.6.4 CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny	
	T [°C]	Konfidenční interval [°C]
$a_{p1}$ [mm]	22,76	$\pm 0,68$
$a_{p2}$ [mm]	21,50	$\pm 0,40$
$a_{p3}$ [mm]	19,36	$\pm 0,51$

Tab. 16 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.



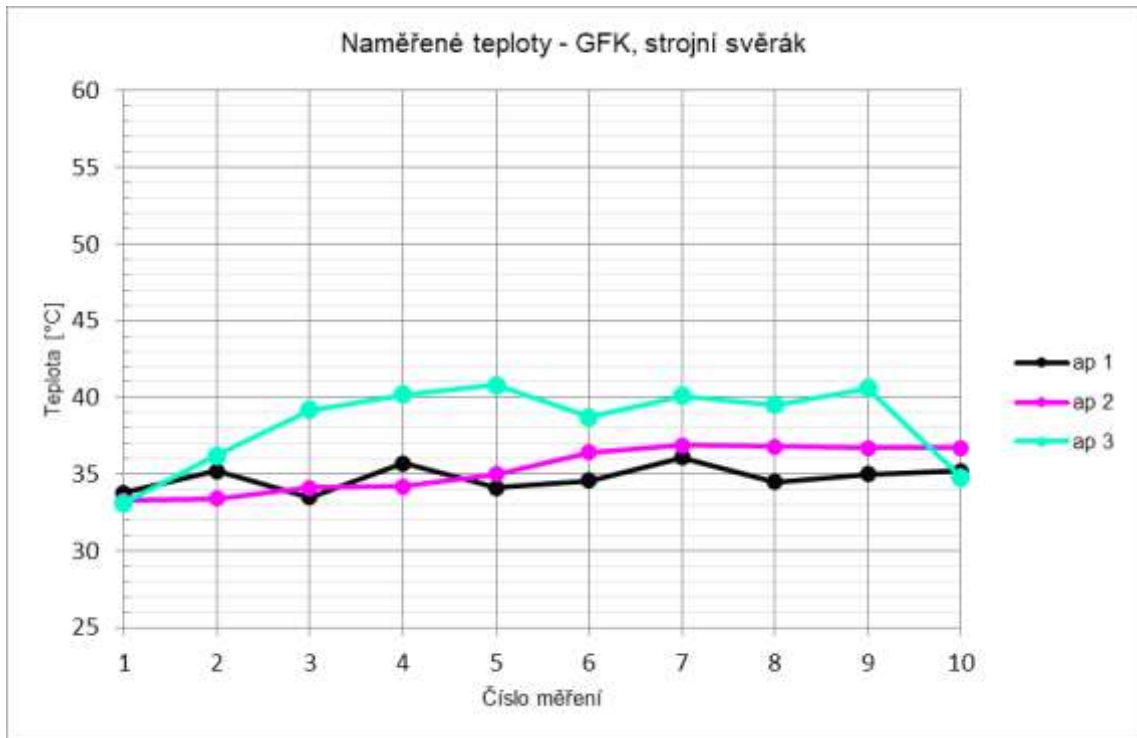
Graf 28 – Naměřené teploty pro CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny v závislosti na hloubce záběru.

Nejnižší teploty byly naměřeny při upnutí so strojního svěráku s použitím procesní kapaliny z důvodu chlazení obrobku a nástroje procesní kapalinou.

### 3.6.5 GFK upnutý ve strojním svěráku

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák	
	T [°C]	Konfidenční interval [°C]
$a_{p1}$ [mm]	34,77	± 0,62
$a_{p2}$ [mm]	35,35	± 1,13
$a_{p3}$ [mm]	38,32	± 2,02

Tab. 17 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro GFK upnutý ve strojním svěráku.



Graf 29 – Naměřené teploty pro GFK upnutý ve strojním svěráku v závislosti na hloubce záběru.

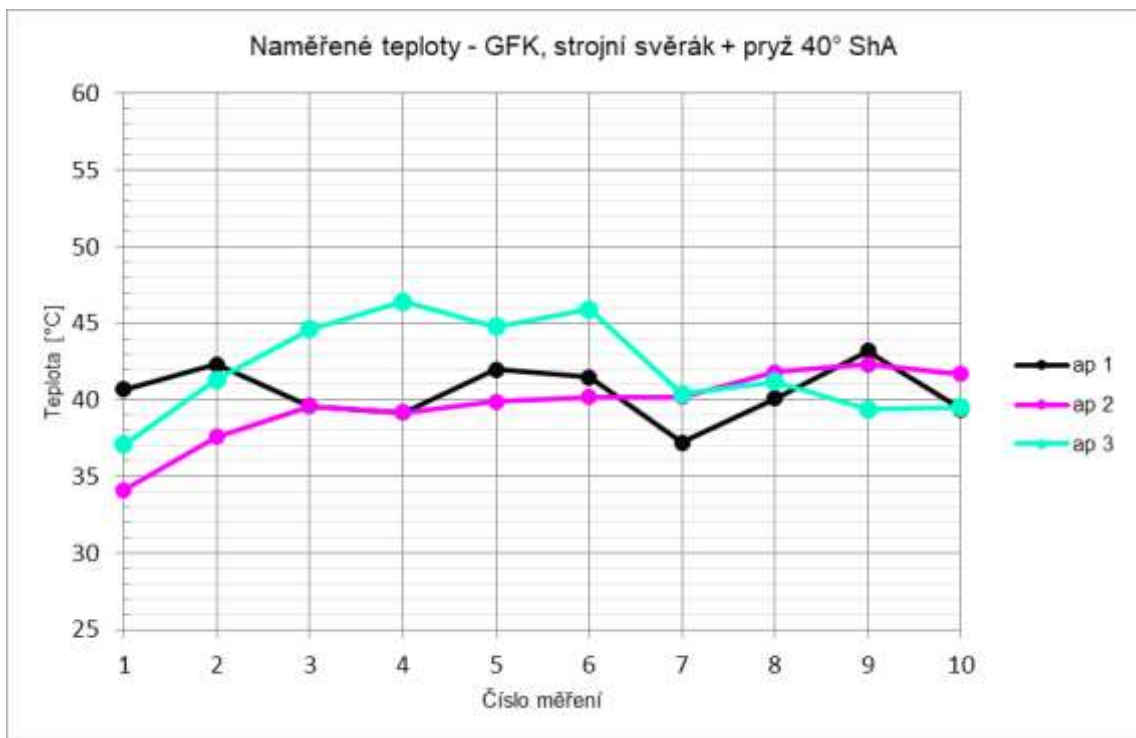
Nejvyšší teploty byly naměřeny při největší hloubce záběru  $a_{p3}$ .



### 3.6.6 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 40° ShA	
	T [°C]	Konfidenční interval [°C]
$a_{p1}$ [mm]	40,52	± 1,34
$a_{p2}$ [mm]	39,66	± 1,81
$a_{p3}$ [mm]	42,06	± 2,38

Tab. 18 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.



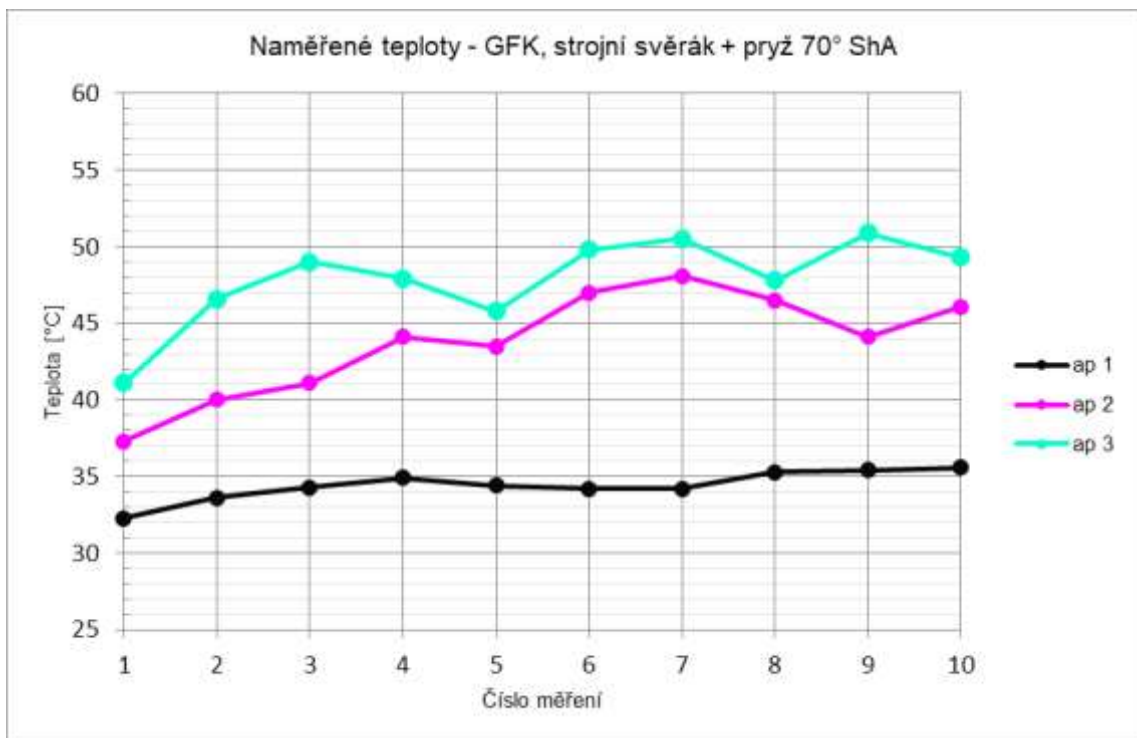
Graf 30 – Naměřené teploty pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA v závislosti na hloubce záběru.

U pryžových materiálů byly naměřeny vyšší teploty než u strojního svěráku, což může být způsobeno nedokonalé pevným upnutím a vznikáním vibrací mezi obrobkem a nástrojem. Nejvyšší teplota byla zaznamenána pro hloubku záběru  $a_{p3}$ .

### 3.6.7 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 70° ShA	
	T [°C]	Konfidenční interval [°C]
$a_{p1}$ [mm]	34,42	± 0,74
$a_{p2}$ [mm]	43,78	± 2,58
$a_{p3}$ [mm]	47,87	± 2,18

Tab. 19 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.



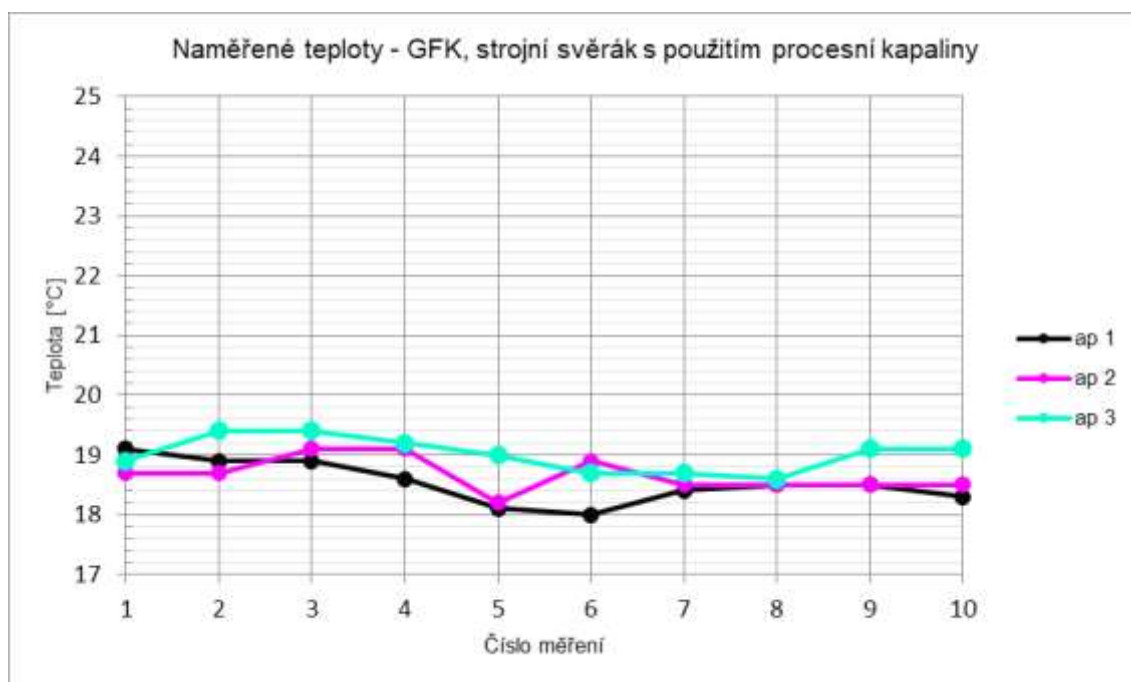
Graf 31 – Naměřené teploty pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA v závislosti na hloubce záběru.

Nejvyšší nárůst teploty byl zaznamenán pro hloubku záběru  $a_{p3}$ . Narůstající hodnota v závislosti na čísle měření může být způsobena zmenšováním obrobku. Větší část obrobku je tedy upnuta mezi pryžovými čelistmi, které zabraňují přenosu tepla do kovových částí svěráku a zmenšuje se část obrobku na svěrákem, která může být chlazena okolním vzduchem.

### 3.6.8 GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny

Naměřené teploty		
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny	
	Upnutí - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny	
	T [°C]	Konfidenční interval [°C]
$a_{p1}$ [mm]	18,53	$\pm 0,27$
$a_{p2}$ [mm]	18,67	$\pm 0,22$
$a_{p3}$ [mm]	19,01	$\pm 0,22$

Tab. 20 – Vypočtené průměrné hodnoty teplot pro GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.



Graf 32 – Naměřené teploty pro GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny v závislosti na hloubce záběru.

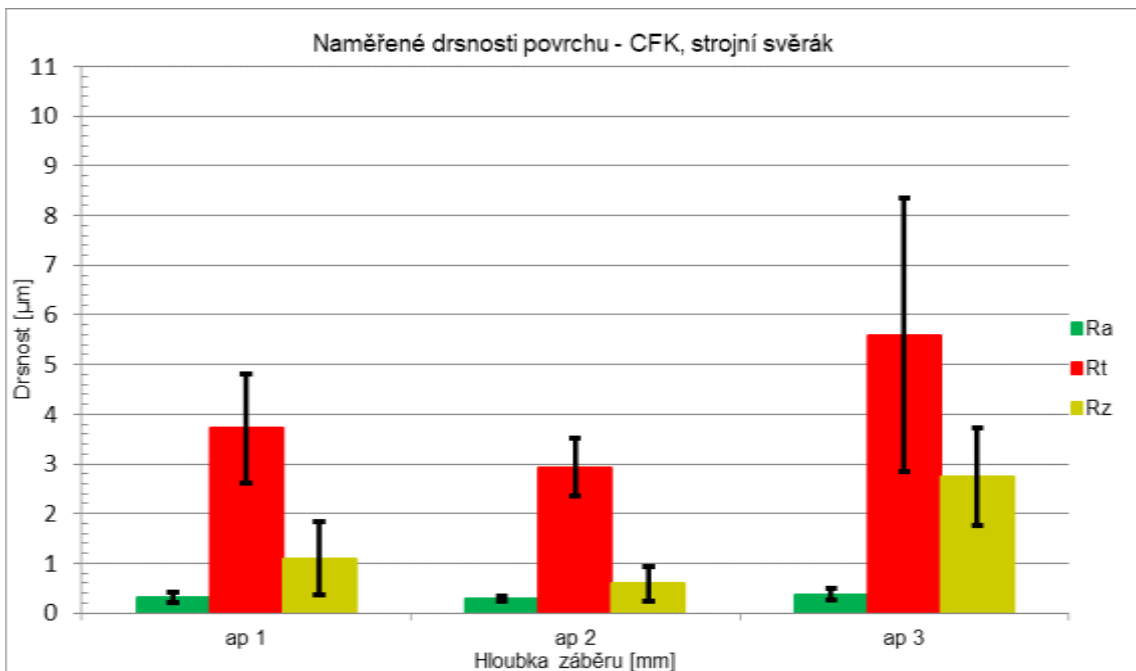
### 3.7 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření povrchových drsností pomocí profiloměru, viz kap 3.2.9. Experimenty byly provedeny vždy desetkrát v místech, viz obr. 37, kap. 3.4.7. Měření byla provedena vždy po posledním obrobení povrchu za stanovených řezných podmínek, viz kap. 3.3. Následně byly pořízeny snímky povrchu a byla nasnímána 3D mapa povrchových nerovností, viz kap 3.4.8, pomocí mikroskopu, viz kap. 3.2.10.

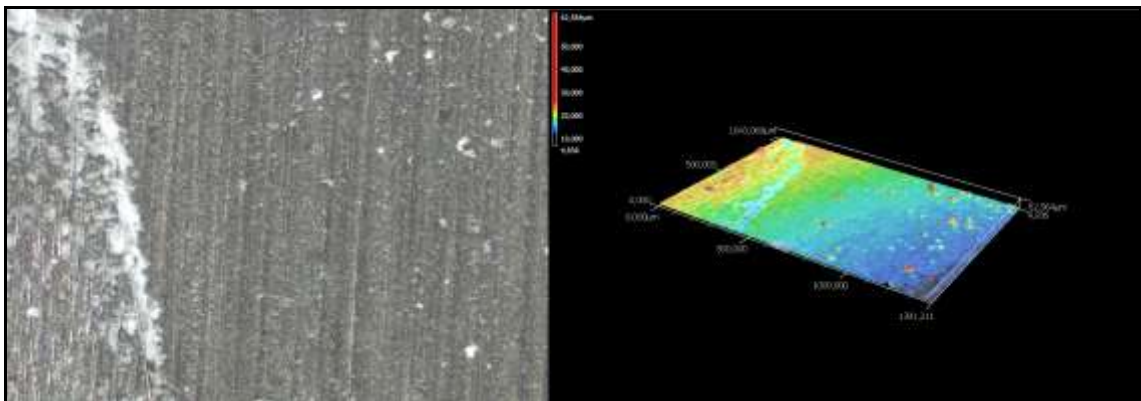
### 3.7.1 CFK upnutý ve strojním svěráku

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,318	$\pm 0,101$	3,716	$\pm 1,098$	2,553	$\pm 0,730$
$a_{p2}$ [mm]	0,290	$\pm 0,048$	2,936	$\pm 0,587$	2,040	$\pm 0,341$
$a_{p3}$ [mm]	0,375	$\pm 0,125$	5,597	$\pm 2,746$	2,978	$\pm 0,978$

Tab. 21 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku.



Graf 33 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku.

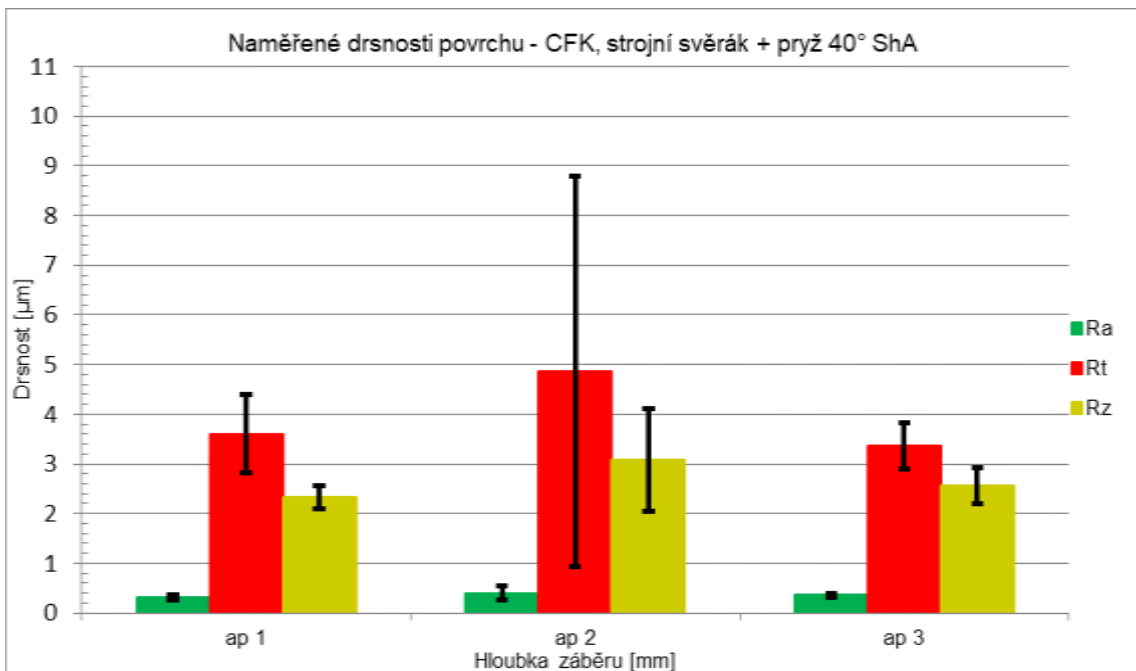


Obr. 44 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce obrábění  $a_{p2}$ .

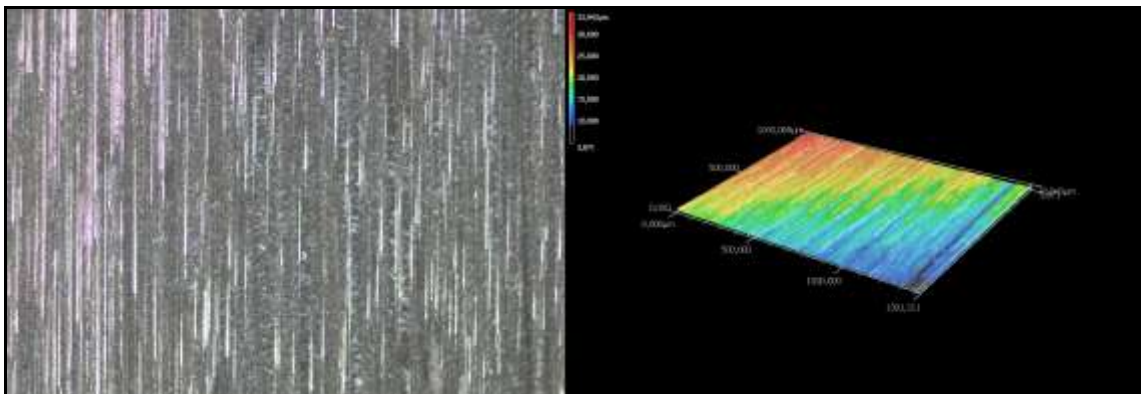
### 3.7.2 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 40° ShA					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,315	$\pm 0,044$	3,608	$\pm 0,799$	2,325	$\pm 0,226$
$a_{p2}$ [mm]	0,402	$\pm 0,148$	4,865	$\pm 3,939$	3,075	$\pm 1,025$
$a_{p3}$ [mm]	0,356	$\pm 0,035$	3,357	$\pm 0,468$	2,567	$\pm 0,355$

Tab. 22 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.



Graf 34 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.

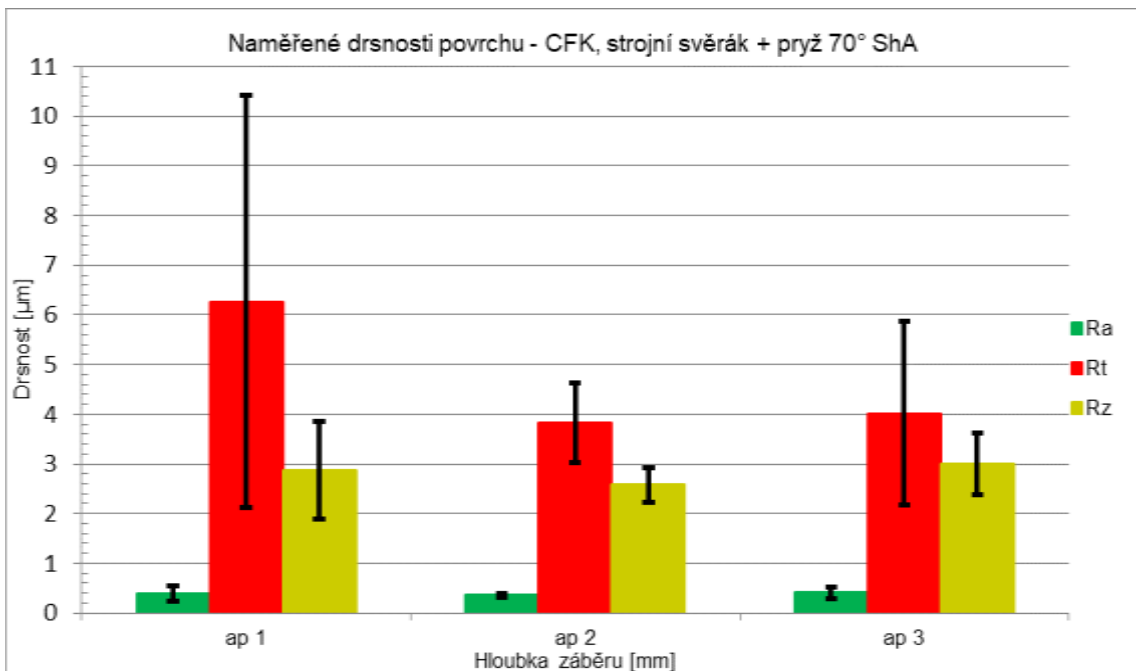


Obr. 45 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce obrábění  $a_{p2}$ .

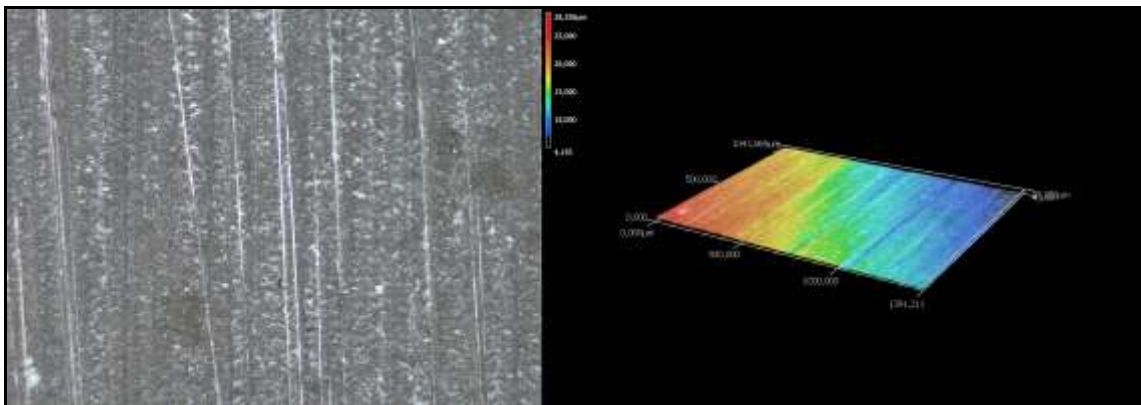
### 3.7.3 CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 70° ShA					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,395	$\pm 0,151$	6,270	$\pm 4,151$	2,882	$\pm 0,980$
$a_{p2}$ [mm]	0,353	$\pm 0,046$	3,831	$\pm 0,811$	2,579	$\pm 0,347$
$a_{p3}$ [mm]	0,404	$\pm 0,112$	4,016	$\pm 1,847$	3,012	$\pm 0,619$

Tab. 23 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.



Graf 35 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.

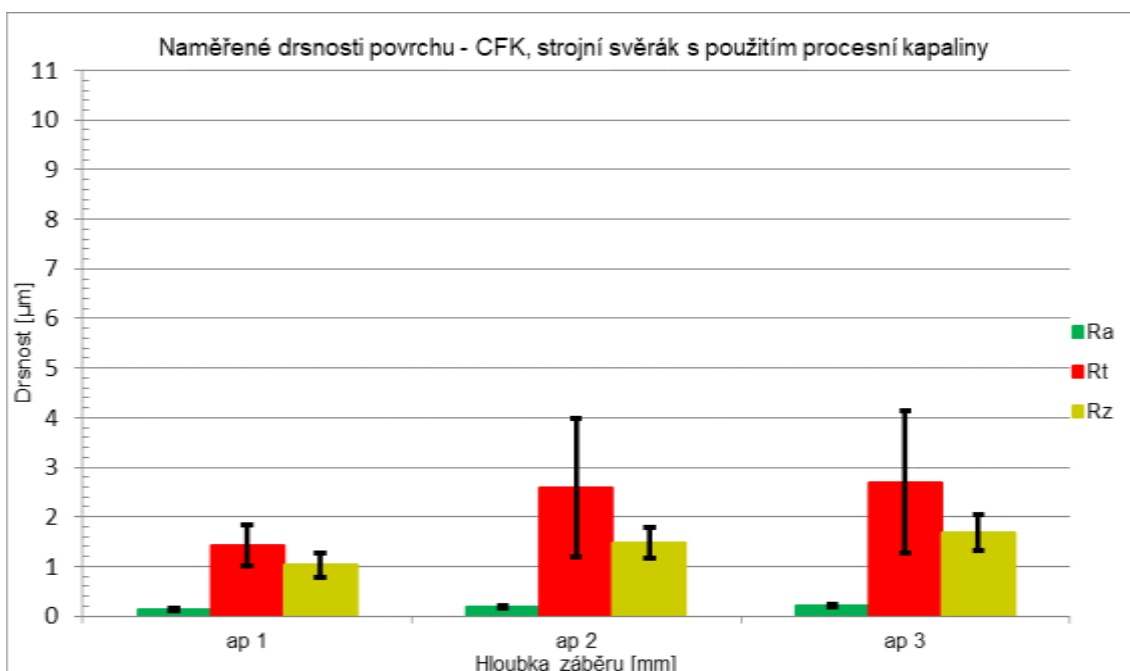


Obr. 46 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce obrábění  $a_{p2}$ .

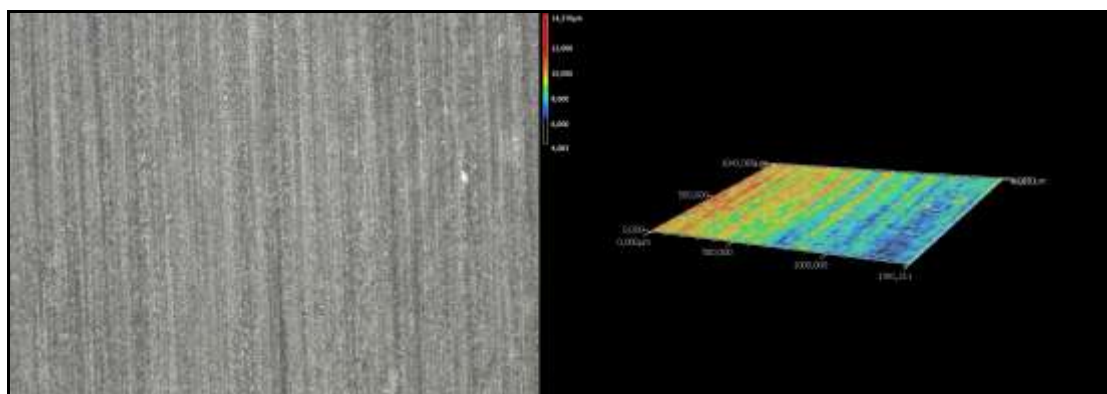
### 3.7.4 CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,133	$\pm 0,029$	1,420	$\pm 0,410$	1,029	$\pm 0,247$
$a_{p2}$ [mm]	0,186	$\pm 0,033$	2,585	$\pm 1,404$	1,476	$\pm 0,307$
$a_{p3}$ [mm]	0,221	$\pm 0,026$	2,697	$\pm 1,430$	1,690	$\pm 0,360$

Tab. 24 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.



Graf 36 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro CFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.

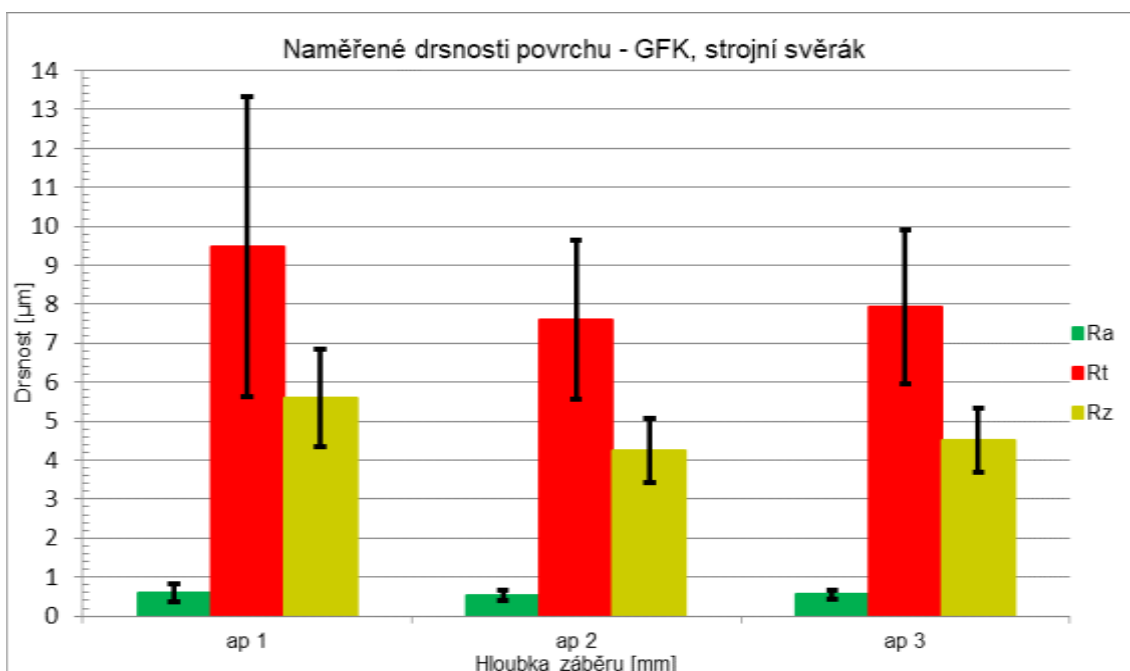


Obr. 47 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro CFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce obrábění  $a_{p2}$  s použitím procesní kapaliny.

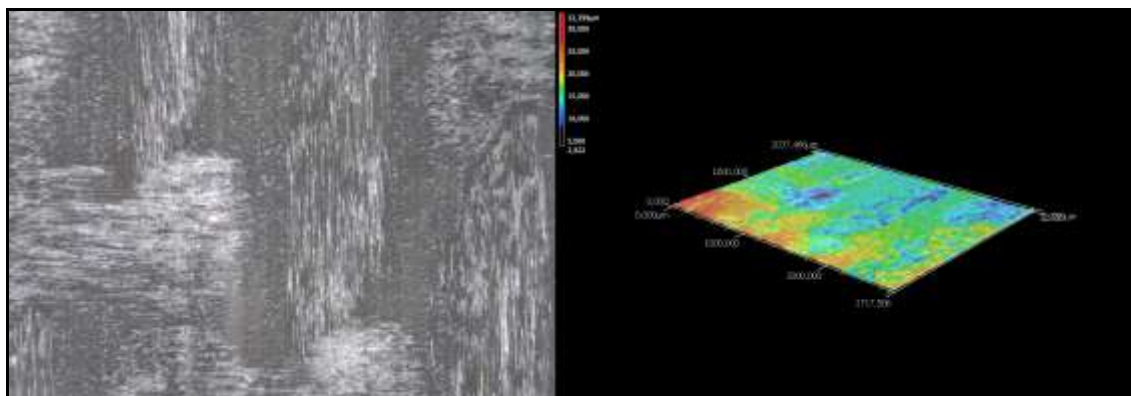
### 3.7.5 GFK upnutý ve strojním svěráku

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,599	$\pm 0,222$	9,490	$\pm 3,846$	5,591	$\pm 1,257$
$a_{p2}$ [mm]	0,543	$\pm 0,134$	7,608	$\pm 2,036$	4,244	$\pm 0,823$
$a_{p3}$ [mm]	0,549	$\pm 0,109$	7,940	$\pm 1,976$	4,499	$\pm 0,820$

Tab. 25 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku.



Graf 37 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku.



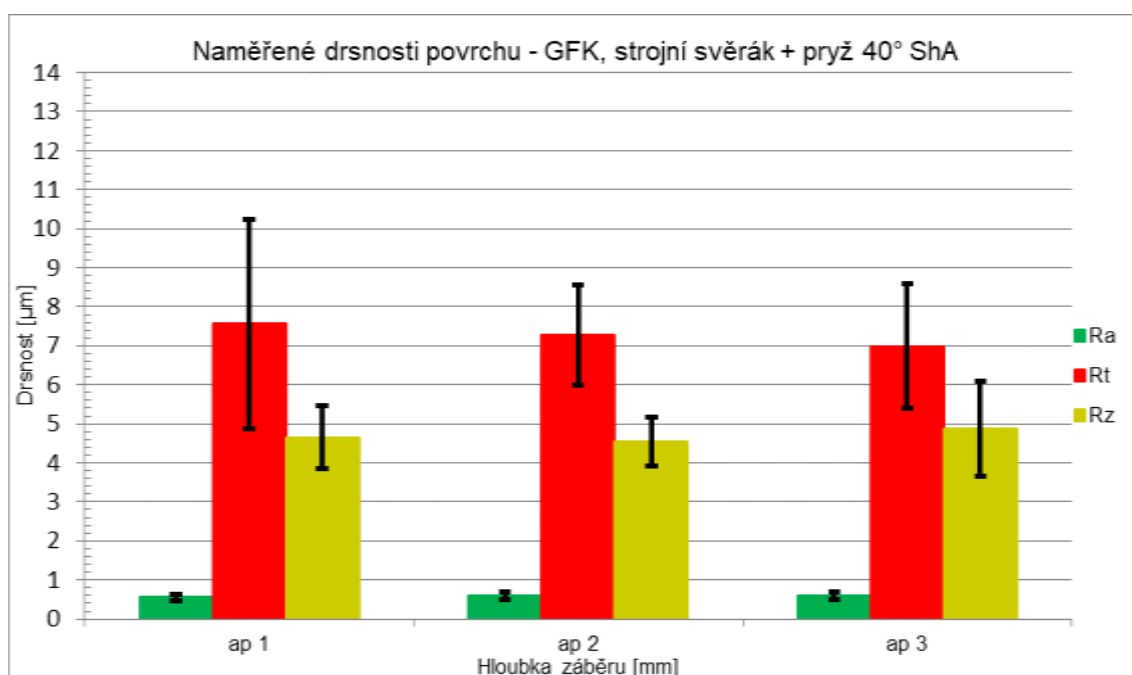
Obr. 48 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro GFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce obrábění  $a_{p2}$ .



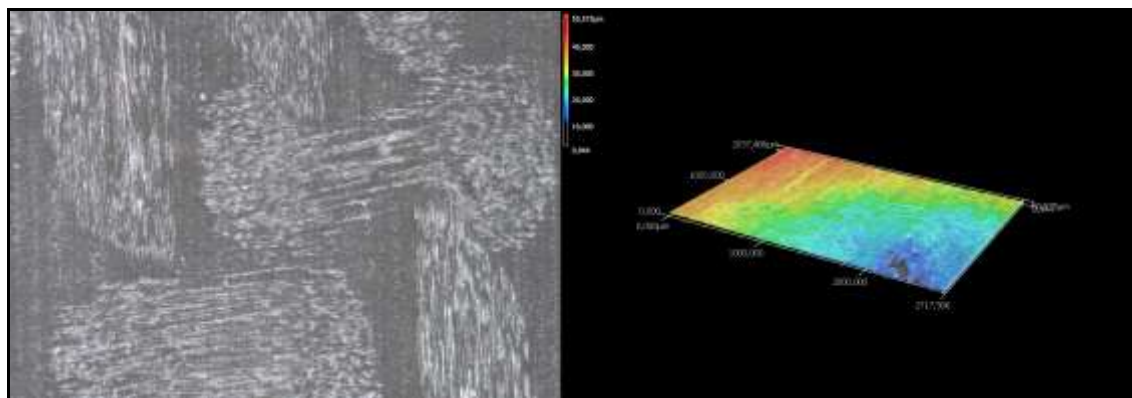
### 3.7.6 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 40° ShA					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,549	$\pm 0,088$	7,554	$\pm 2,678$	4,653	$\pm 0,800$
$a_{p2}$ [mm]	0,584	$\pm 0,102$	7,282	$\pm 1,278$	4,532	$\pm 0,630$
$a_{p3}$ [mm]	0,595	$\pm 0,112$	6,991	$\pm 1,593$	4,877	$\pm 1,216$

Tab. 26 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.



Graf 38 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA.

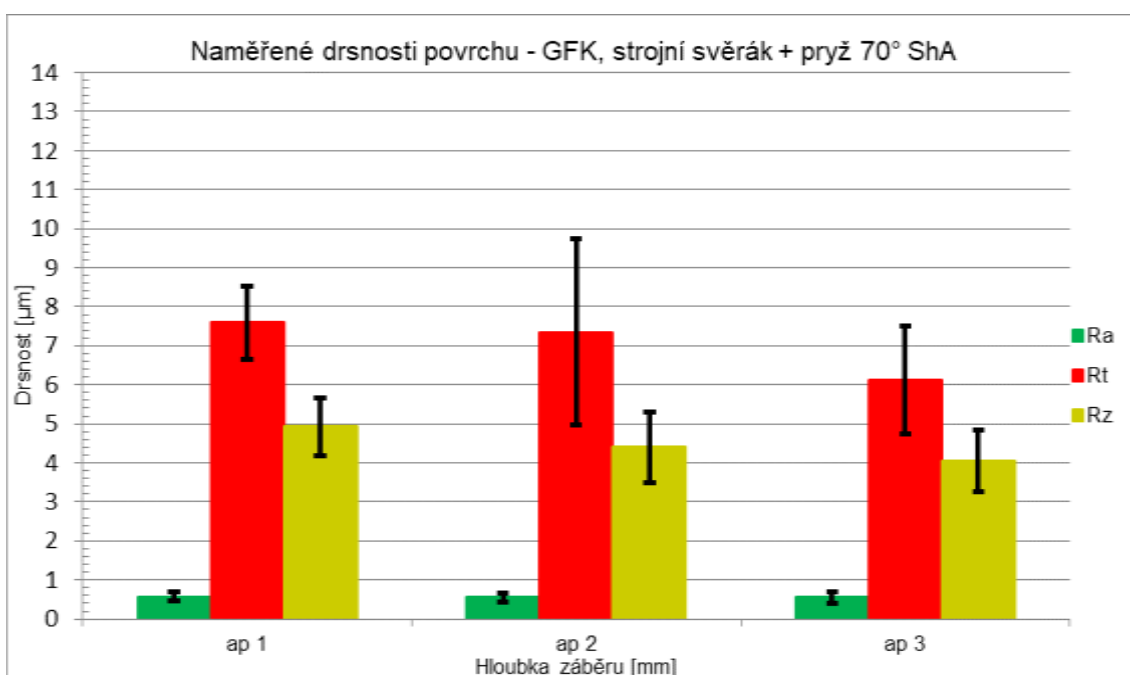


Obr. 49 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 40° ShA při hloubce obrábění  $a_{p2}$ .

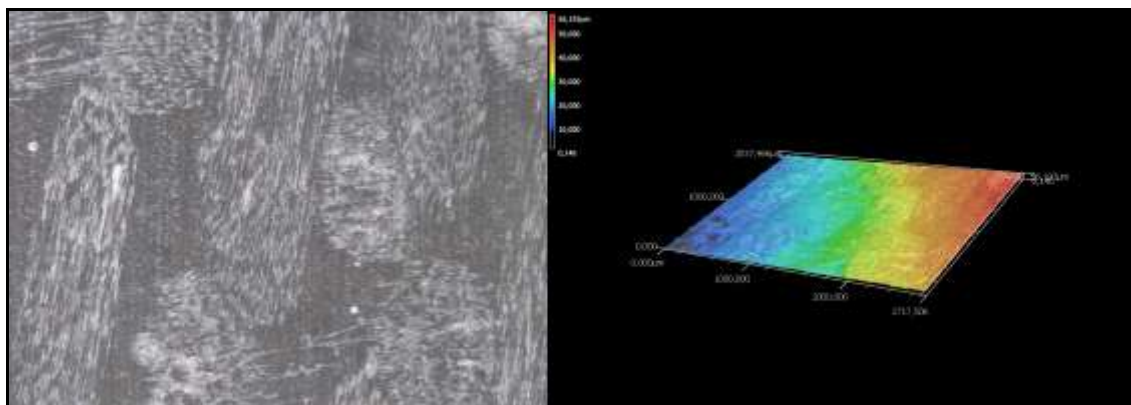
### 3.7.7 GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák + pryž 70° ShA					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,578	$\pm 0,115$	7,595	$\pm 0,942$	4,935	$\pm 0,743$
$a_{p2}$ [mm]	0,555	$\pm 0,121$	7,346	$\pm 2,387$	4,405	$\pm 0,903$
$a_{p3}$ [mm]	0,554	$\pm 0,154$	6,123	$\pm 1,388$	4,055	$\pm 0,789$

Tab. 27 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.



Graf 39 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA.

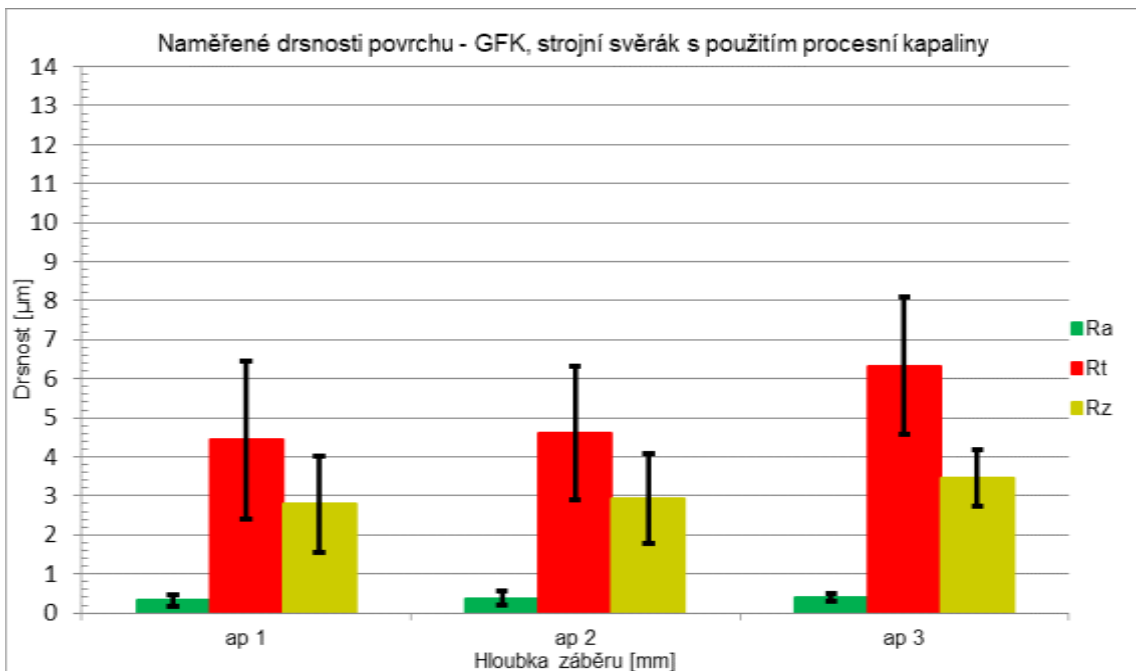


Obr. 50 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro GFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže 70° ShA při hloubce obrábění  $a_{p2}$ .

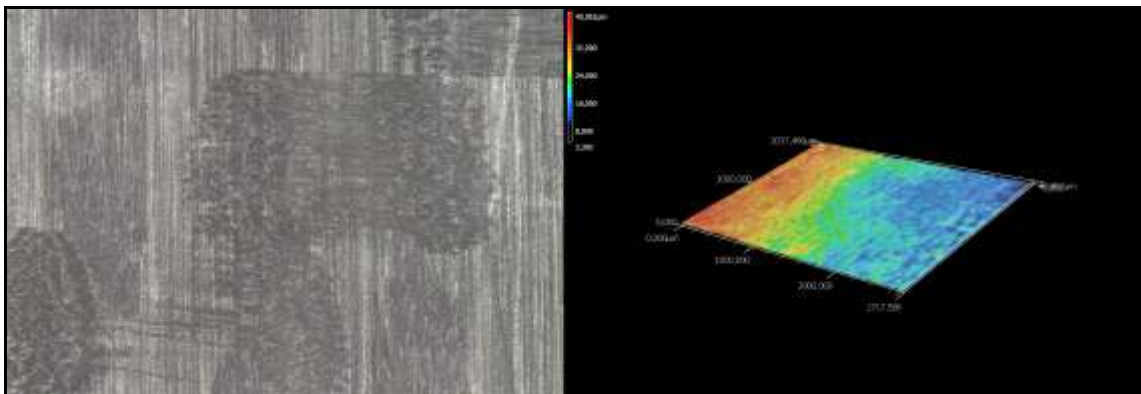
### 3.7.8 GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny

Naměřené parametry drsnosti povrchu						
Hloubka záběru	Kompozitní materiál se skelnými vlákny					
	Upnutí - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny					
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$a_{p1}$ [mm]	0,318	$\pm 0,159$	4,434	$\pm 2,021$	2,793	$\pm 1,236$
$a_{p2}$ [mm]	0,372	$\pm 0,178$	4,614	$\pm 1,716$	2,931	$\pm 1,165$
$a_{p3}$ [mm]	0,412	$\pm 0,099$	6,331	$\pm 1,770$	3,452	$\pm 0,721$

Tab. 28 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.



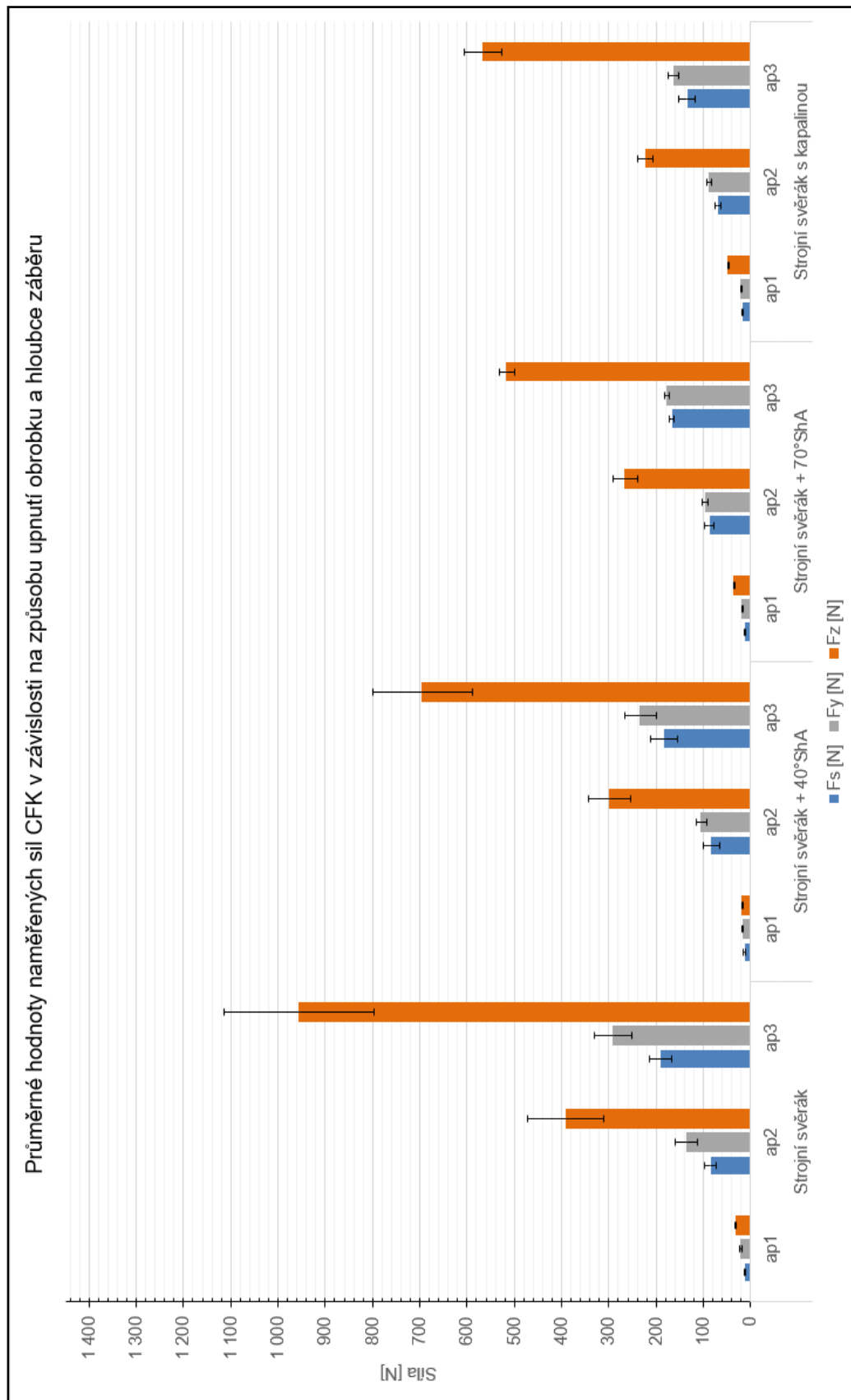
Graf 40 – Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsností pro GFK upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny.



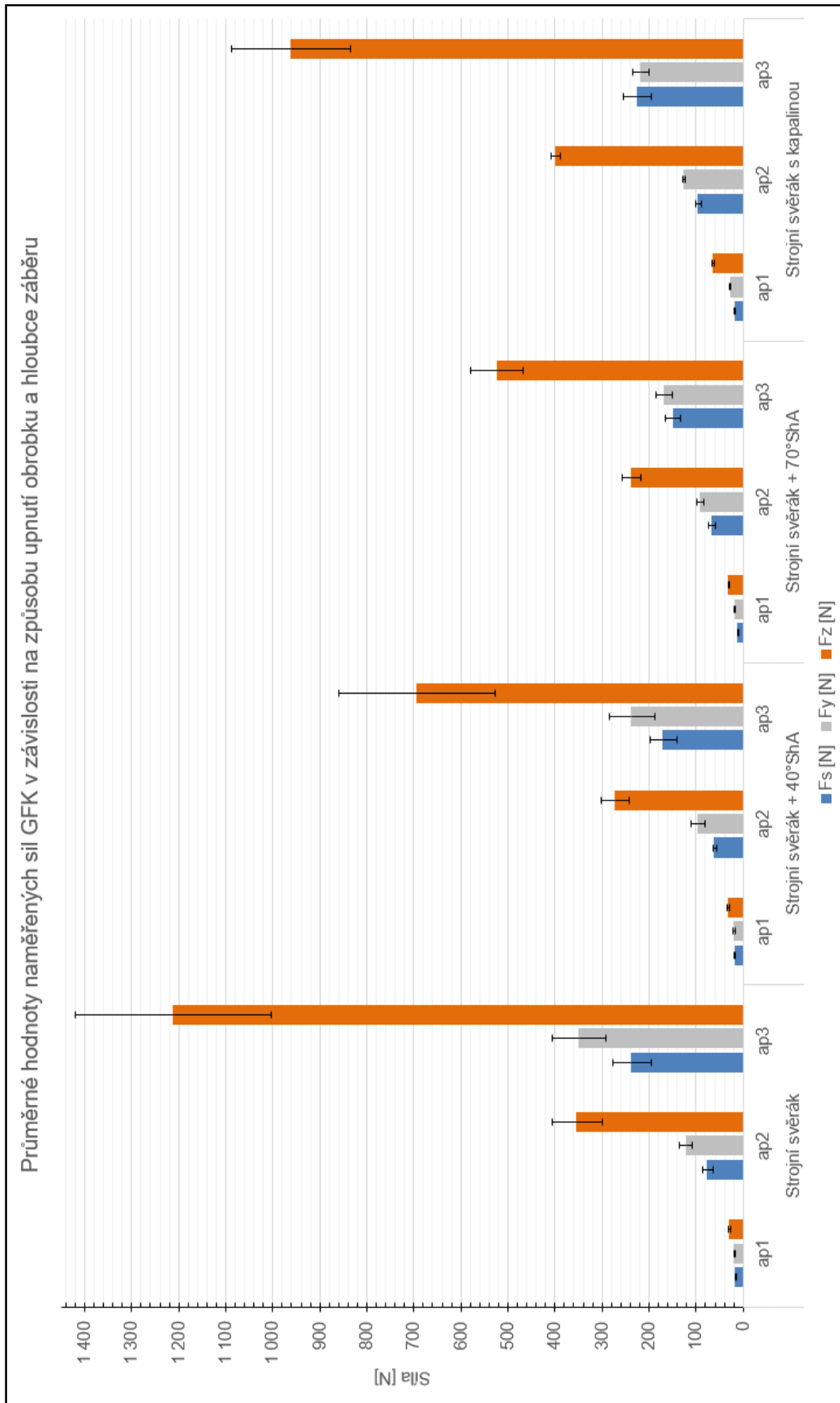
Obr. 51 – Snímek povrchu a mapa nerovností povrchu pro GFK upnutý ve strojním svěráku při hloubce obrábění  $a_{p2}$  s použitím procesní kapaliny.

### 3.8 Souhrnné grafy naměřených hodnot

#### 3.8.1 Řezné síly

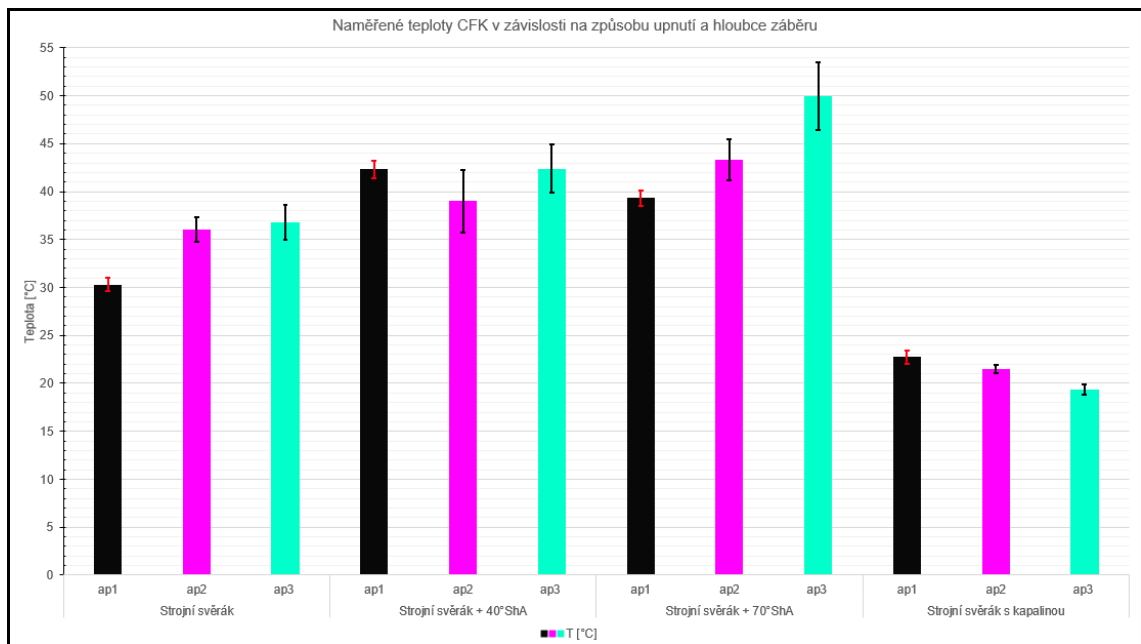


Graf 41 – Souhrnný graf vypočtených sil pro CFK v závislosti na způsobu upnutí.

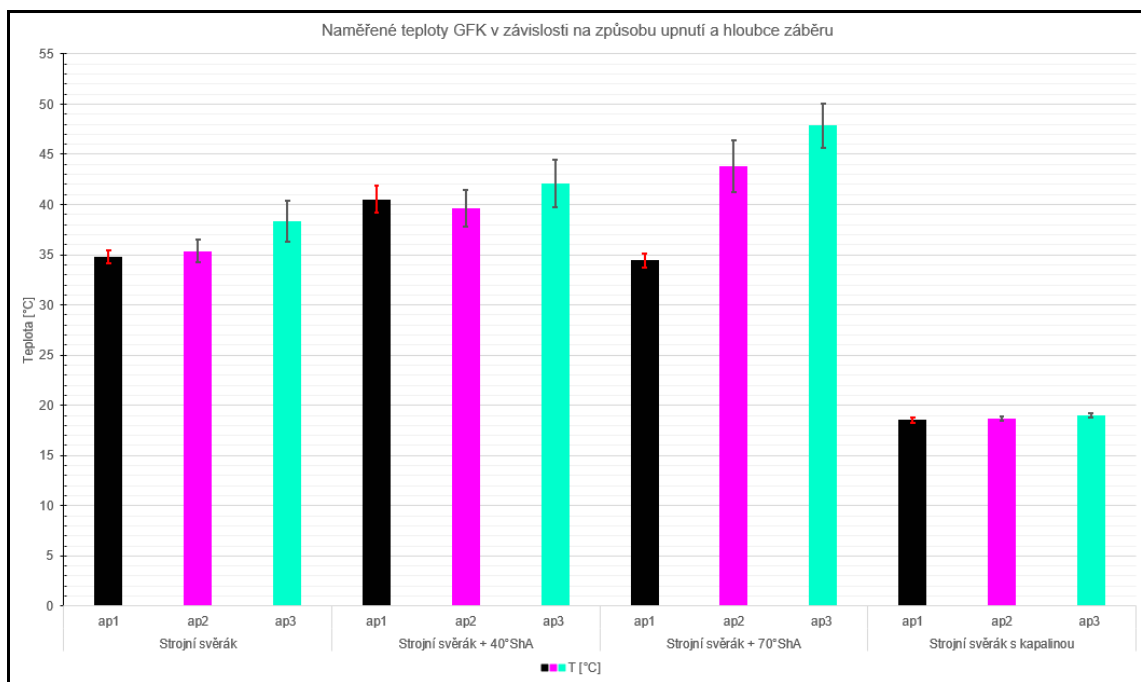


Graf 42 – Souhrnný graf vypočtených sil pro GFK v závislosti na způsobu upnutí.

### 3.8.2 Naměřené teploty po broušení

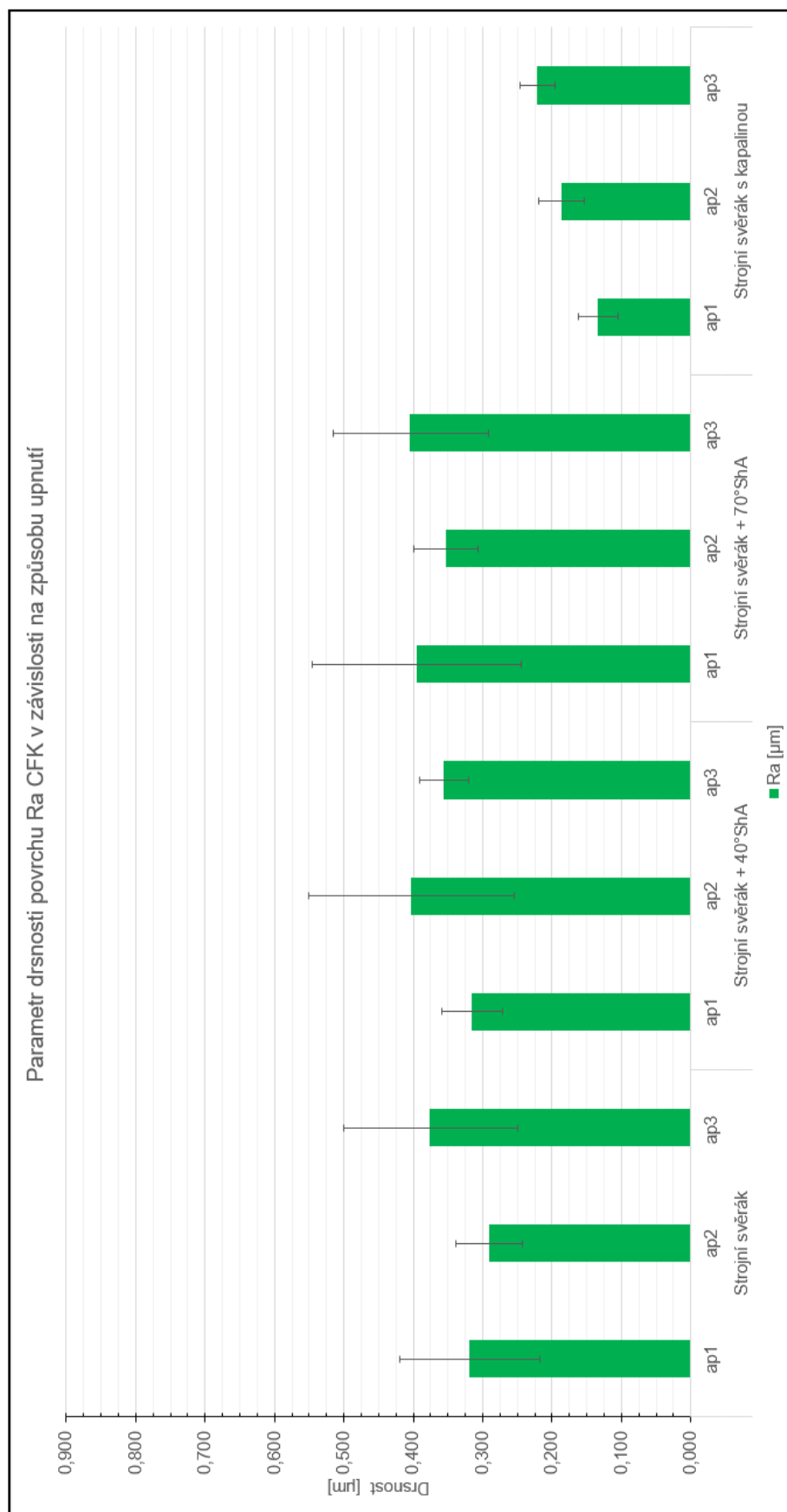


Graf 43 – Souhrnný graf naměřených teplot pro CFK v závislosti na způsobu upnutí.

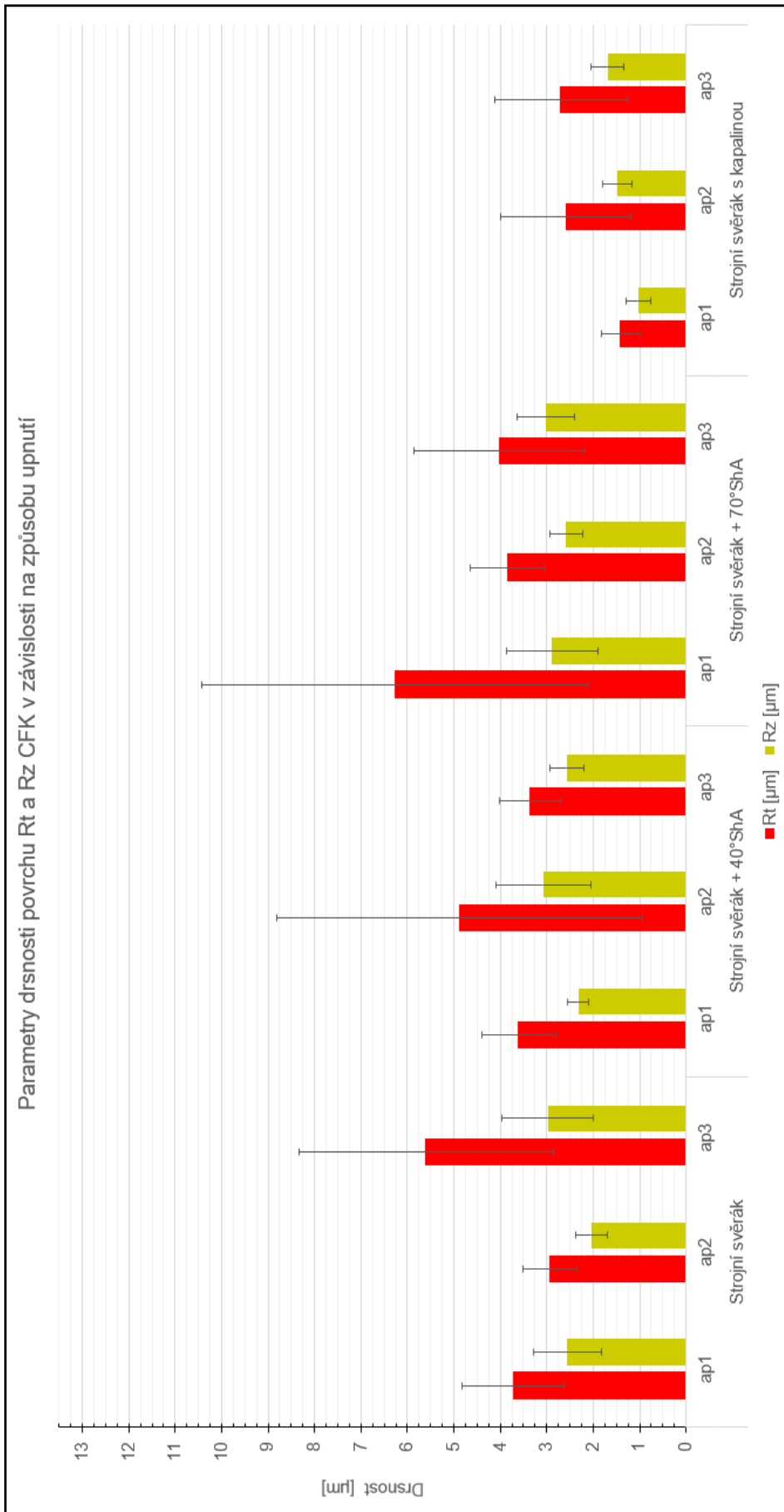


Graf 44 – Souhrnný graf naměřených teplot pro CFK v závislosti na způsobu upnutí.

### 3.8.3 Drsnosti povrchu

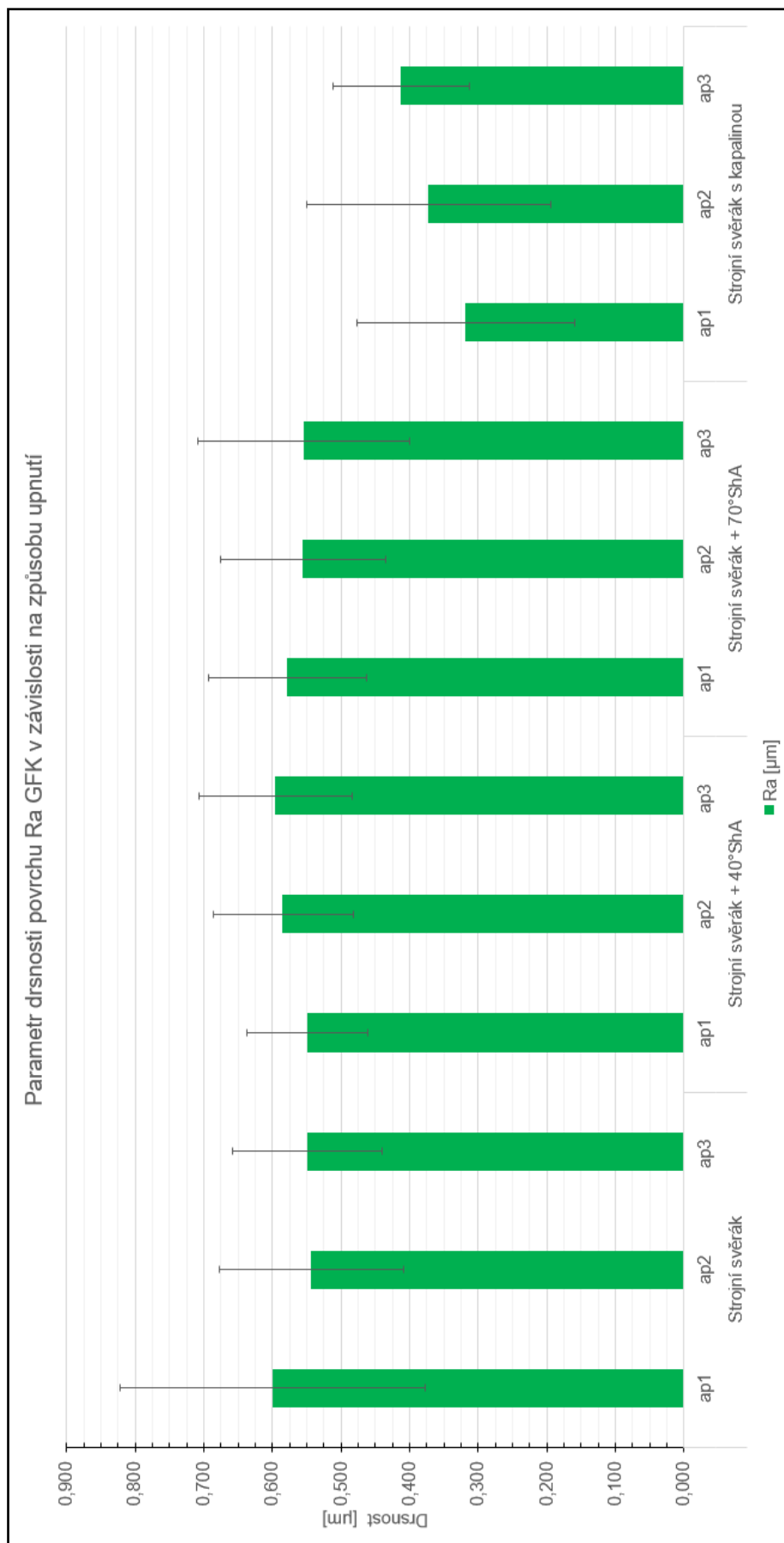


Graf 45 – Souhrnný graf naměřených parametrů drsnosti  $R_a$  pro CFK v závislosti na způsobu upnutí.

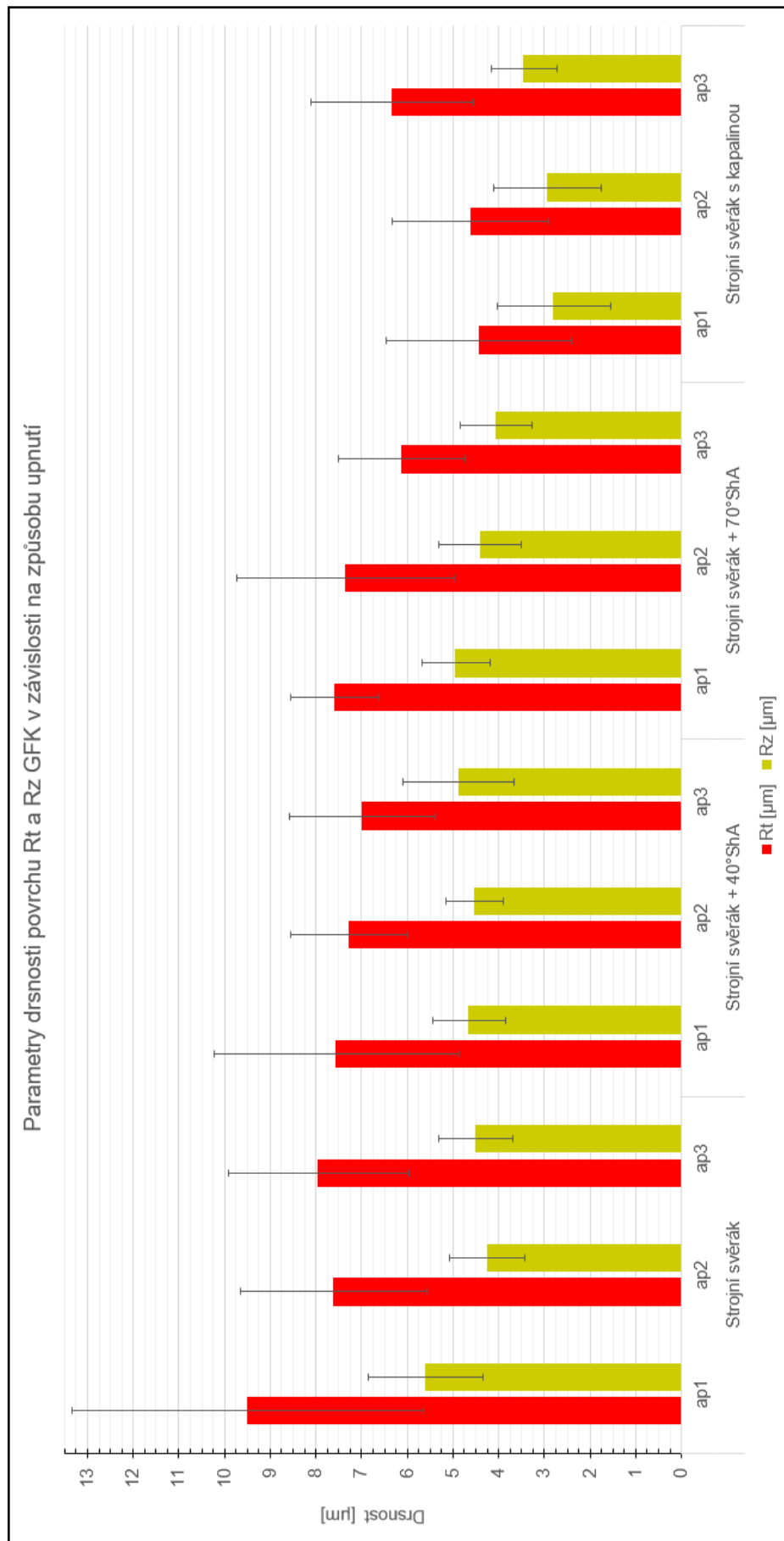


Graf 46 – Souhrnný graf naměřených parametrů drsnosti  $R_t$  a  $R_z$  pro CFK v závislosti na způsobu upnutí.





Graf 47 – Souhrnný graf naměřených parametrů drsnosti  $R_a$  pro GFK v závislosti na způsobu upnutí.



Graf 48 – Souhrnný graf naměřených parametrů drsnosti  $R_t$  a  $R_z$  pro GFK v závislosti na způsobu upnutí.

## 4. DISKUZE

Bakalářské práce je zaměřena na problematiku broušení rovinných ploch kompozitních materiálů. Hlavním cílem předkládané práce bylo zjištění působení sil při obrábění, měření teplot obrobeného povrchu a parametrů drsnosti povrchu při broušení kompozitních materiálů v závislosti na způsobu upnutí obrobku. Pro potřeby experimentů byl použit kompozitní materiál zpevněný uhlíkovými vlákny a kompozitní materiál zpevněný skelnými vlákny.

Pro zpracování a vyhodnocení experimentů bakalářské práce bylo třeba připravit vzorky, stanovit řezné podmínky a metodiku pro měření výstupních hodnot na použitých přístrojích.

Základní informace týkající se řešené problematiky jsou uvedeny v kapitole 2. V této části jsou uvedeny informace o složení kompozitních materiálů a jejich problematice broušení v podkapitole 2.1 a 2.4. Dále je zde uvedena problematika upínání obrobků z kompozitních materiálů v podkapitole 2.2 a nedílnou součástí jsou také informace o rovinném broušení v podkapitole 2.3.

Popisu dosažení cíle bakalářské práce je věnována celá kapitola 3. Kapitola obsahuje veškeré informace o přípravě vzorků, jednotlivých etapách přípravy a popisu řezných podmínek. Dále se kapitola věnuje popisu použitých strojů, nástrojů a zařízení pro měření a vyhodnocení získaných naměřených dat.

### Řezné síly

Řezné síly byly měřeny s využitím piezoelektrického dynamometru, který je popsán v kapitole 3.2.5. Princip měření a zpracování výsledků je uveden v kapitole 3.4.5. Naměřené hodnoty byly zpracovány softwarem LabVIEW 6.1 a následně vyhodnoceny v softwaru Excel.

$F_z$ :

Největší radiální síla byla naměřena u vzorku z CFK a GFK při upnutí s využitím strojního svěráku pro hloubku záběru  $a_{p3}$  a to  $F_z = 955,6 \pm 159,5$  N pro CFK a  $F_z = 1212,3 \pm 208,7$  N pro GFK.

Nejmenší radiální síla  $F_z = 18,0 \pm 1,4$  N byla naměřena pro vzorek CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

Nejmenší radiální síla byla u GFK naměřena při hloubce záběru  $a_{p1}$  pro obrobek upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA, kdy  $F_z = 30,3 \pm 2,1$  N.

Nejnižší radiální síla CFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny
- $a_{p3}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

Nejnižší radiální síla GFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák
- $a_{p2}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA
- $a_{p3}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

$F_y$ :

Největší posuvová síla byla u CFK i u GFK naměřena pro obrobek upnutý ve strojním svěráku pro hloubku záběru  $a_{p3}$  a to  $F_y = 290,6 \pm 39,1$  N pro CFK a  $F_y = 348,8 \pm 55,9$  N pro GFK.

Nejmenší posuvová síla  $F_y = 16,1 \pm 1,2$  N byla naměřena pro vzorek CFK upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

Nejmenší posuvová síla byla u GFK naměřena při hloubce záběru  $a_{p1}$  pro obrobek upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA, kdy  $F_y = 16,8 \pm 1,4$  N.

Nejnižší posuvová síla CFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny
- $a_{p3}$  - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny

Nejnižší posuvová síla GFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA
- $a_{p3}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

$F_s$ :

Největší smluvní síla byla u CFK i u GFK naměřena pro obrobek upnutý ve strojním svěráku pro hloubku záběru  $a_{p3}$  a to  $F_s = 190,55 \pm 23,56$  N pro CFK a  $F_s = 236,58 \pm 41,49$  N pro GFK.

Nejmenší smluvní síla  $F_s = 11,74 \pm 0,55$  N byla u CFK naměřena pro obrobek upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

Nejmenší smluvní síla byla u GFK naměřena při hloubce záběru  $a_{p1}$  pro obrobek upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA, kdy  $F_s = 11,04 \pm 0,70$  N.

Nejnižší smluvní síla CFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny
- $a_{p3}$  - strojní svěrák s použitím procesní kapaliny

Nejnižší smluvní síla GFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA
- $a_{p3}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA

### **Teploty po broušení**

Teploty byly měřeny bezdotykovým teploměrem popsáním v kapitole 3.2.8, princip měření je uveden v kapitole 3.4.6. Naměřená data byla vyhodnocena v programu Excel. Všechny vzorky měly před obráběním teplotu  $24 \pm 1$  °C.

Nejnižší průměrné teploty po obrábění byly naměřeny u CFK i u GFK pro obrobek upnutý ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny. V obou případech procesní kapalina ochladila vzorky na teplotu nižší, než byla teplota

na začátku obrábění. Nejnižší teplota  $T = 19,36 \pm 0,51$  °C byla naměřena pro vzorek z CFK a hloubku záběru  $a_{p3}$ . Nejnižší teplota GFK  $T = 18,53 \pm 0,27$  °C byla naměřena pro hloubku záběru  $a_{p1}$ .

$T = 30,32 \pm 0,70$  °C byla nejnižší teplota vzorku CFK bez použití procesní kapaliny, která byla naměřena pro obrobek upnutý ve strojním svěráku při hloubce záběru  $a_{p1}$ .

Nejnižší teplota pro GFK bez použití procesní kapaliny  $T = 34,42 \pm 0,74$  °C byla naměřena pro hloubku záběru  $a_{p1}$  a obrobek upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA.

$T = 49,98 \pm 3,53$  °C byla nejvyšší teplota vzorku CFK naměřená pro obrobek upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p3}$ .

Nejvyšší teplota pro GFK byla také naměřena pro obrobek upnutý ve strojním svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p3}$ , kdy  $T = 47,87 \pm 2,18$  °C.

Souhrn nejnižších naměřených teplot na povrchu po broušení bez použití procesní kapaliny:

Nejnižší teplota CFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák
- $a_{p2}$  - strojní svěrák
- $a_{p3}$  - strojní svěrák

Nejnižší teplota GFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák
- $a_{p3}$  - strojní svěrák

### **Drsnosti povrchu**

Drsnost povrchu vzorků byla měřena dotykovým laboratorním profiloměrem, který je popsán v kapitole 3.2.9. Princip měření a zpracování výsledků je uveden v kapitole 3.4.7. Naměřené hodnoty byly zpracovány softwarem Surfpack-SV verze 1.100 a následně vyhodnoceny v softwaru Excel.

Zkoumané parametry drsnosti byly  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$ . K vyhodnocení výsledků byl vybrán parametr  $R_a$ , jelikož se jedná o nejpoužívanější parametr drsnosti povrchu v České republice.

Ze čtyř použitých způsobů upnutí vykazují oba materiály nejnižší drsnosti při upnutí vzorku do strojního svěráku s použitím procesní kapaliny. Nejmenší hodnoty drsnosti povrchu byly naměřeny v obou případech pro hloubku záběru  $a_{p1}$ , kdy  $R_a = 0,133 \pm 0,029 \mu\text{m}$  pro CFK a  $R_a = 0,318 \pm 0,159 \mu\text{m}$  pro GFK.

Největší drsnost po broušení vzorku CFK byla naměřena při upnutí do strojního svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA při hloubce záběru  $a_{p3}$ , a to  $R_a = 0,404 \pm 0,046 \mu\text{m}$ .

Největší hodnota drsnosti byla naměřena při upnutí vzorku z GFK do strojního svěráku a při hloubce záběru  $a_{p1}$ , kdy  $R_a = 0,599 \pm 0,222 \mu\text{m}$ . Takto velká hodnota drsnosti povrchu při broušení s hloubkou záběru  $a_{p1}$  může být způsobena odebráním malé vrstvy matrice, v některých místech měření mohlo dojít k odhalení tkaniny výztuže, aniž by došlo k jejímu porušení nebo vytrhnutí jednotlivých vláken.

Druhá největší drsnost povrchu  $R_a = 0,595 \pm 0,112 \mu\text{m}$  byla naměřena u vzorku GFK při hloubce záběru  $a_{p3}$  a upnutí do strojního svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA.

Shrnutí nejnižších dosažených drsností povrchu bez použití procesní kapaliny:

Nejnižší parametr drsnosti povrchu  $R_a$  CFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák
- $a_{p3}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA

Nejnižší parametr drsnosti povrchu  $R_a$  GFK:

- $a_{p1}$  - strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA
- $a_{p2}$  - strojní svěrák
- $a_{p3}$  - strojní svěrák

## 5. ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce zpracovává téma postup broušení rovinných ploch kompozitních materiálů. Práce byla rozdělena do dvou hlavních částí.

V teoretické části práce byla věnována pozornost problematice rovinného broušení, kompozitním materiálům, volbě řezných podmínek a samotné problematice broušení kompozitních materiálů.

Experimentální část práce se věnuje metodice experimentu, jeho provedení a zpracování naměřených dat. V metodice jsou popsány použité stroje a nástroje. Dále jsou v této kapitole uvedeny měřené parametry a potřebná měřidla k provedení experimentu.

Nedílnou součástí bakalářské práce je diskuze. Z rozsáhlého souboru naměřených dat a získaných výsledků uvedených v kapitolách 3.5 - 3.8 lze shrnout následující poznatky:

### **Porovnání způsobů upnutí:**

Pro potřeby experimentů byly použity 4 způsoby upnutí: strojní svěrák, strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA, strojní svěrák s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA a strojní svěrák s použitím procesní kapaliny. Pryžové čelisti byly použity převážně z důvodu snížení upínací síly. Nevýhodou však bylo nedokonale pevné upnutí obrobku a možnosti vzniku chvění mezi obrobkem a nástrojem. Při použití pryžových čelistí byly pozorovány nižší řezné síly, ale vyšší teploty než u strojního svěráku. Broušení s procesní kapalinou mělo výrazní vliv na chlazení obrobku a snížení parametrů povrchové drsnosti.

### **Řezné síly pro hloubku záběru $a_p$ 1:**

Pro hloubku záběru  $a_p$  1 byly u vzorků z obou materiálů naměřeny nejvyšší řezné síly při upnutí ve strojním svěráku s použitím procesní kapaliny, která zvyšovala odpor prostředí při obrábění. Síly byly naměřeny o 26 % vyšší u vzorku z CFK a o 61% vyšší u vzorku z GFK oproti upnutí do strojního svěráku. Při použití procesní kapaliny byl zaznamenán nárůst řezných sil, ale docházelo k lepšímu odvodu třísek, vyplachování pórů nástroje a chlazení obrobku i nástroje.



Při použití pryžových čelistí o tvrdosti 40° ShA byly u vzorků z CFK naměřeny nejmenší hodnoty řezných sil, které byly v porovnání se strojním svěrákem o 32 % nižší. Rozdíl může být způsoben schopností pryžového materiálu pohlcovat působící síly. Tento jev je patrný i ve zpracovaných výsledcích měření a grafech viz kap. 3.8. Vzorek z GFK vykazoval nejnižší hodnoty řezných sil pro strojní svěrák s pryžovými čelistmi o tvrdosti 70° ShA, které byly o 15 % nižší než při použití strojního svěráku.

### **Řezné síly pro hloubky záběru $a_{p2}$ a $a_{p3}$ :**

Obrobky z obou materiálů vykazovaly nejvyšší hodnoty řezných sil pro hloubky záběru  $a_{p2}$  a  $a_{p3}$  upnuté do strojního svěráku. U vzorku CFK při použití procesní kapaliny byly zaznamenány nižší řezné síly o 57 %, než při upnutí do strojního svěráku, protože docházelo k lepšímu odvodu třísek, vyplachování pórů nástroje a chlazení obrobku a nástroje. U vzorku GFK s použitím procesní kapaliny byly pro hloubku záběru  $a_{p2}$  naměřeny síly o 14 % vyšší a pro  $a_{p3}$  o 30 % nižší než při použití strojního svěráku.

Pro strojní svěrák s pryžovými čelistmi (40° ShA a 70° ShA) byly pozorovány nižší hodnoty naměřených řezných sil než pro strojní svěrák. Lepších výsledků bylo dosaženo s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA, kdy byly naměřeny řezné síly o 16% nižší než s čelistmi z pryže o tvrdosti 40° ShA a o 53 % nižší než při použití strojního svěráku.

### **Teploty po broušení:**

Nejvyšší teploty po obrábění byly naměřeny pro vzorky z CFK, které byly upnuty ve strojním svěráku s pryžovými čelistmi obou zvolených tvrdostí. To může být způsobeno izolačními vlastnostmi pryží, které zamezily přestupu tepla do kovových částí strojního svěráku. U vzorků z GFK platí totéž, co u vzorků z CFK. Jedinou výjimkou byla nejnižší naměřená teplota pro hloubku záběru  $a_{p1}$  při použití strojního svěráku s čelistmi z pryže o tvrdosti 70° ShA.

Nejnižší teploty pro oba materiály byly naměřeny pro vzorky broušené s použitím procesní kapaliny. Z důvodu chlazení nástroje i obrobku procesní kapalinou se vzorky ochladily na teplotu nižší, než byla teplota před broušením.

**Drsnosti povrchu:**

Nejmenší parametry drsnosti povrchu  $R_a$  byly naměřeny u obou materiálů při obrábění s použitím procesní kapaliny. Její aplikací docházelo k lepšímu odvodu třísek a vyplachování pórů nástroje, což výrazně napomohlo ke snížení parametrů drsnosti. Při broušení bez použití procesní kapaliny bylo nejnižších hodnot drsnosti povrchu dosaženo při různých způsobech upnutí v závislosti na hloubce záběru a použitém kompozitním materiálu, viz grafy v kap. 3.8.

## 6. ZDROJE

- [1] JUNEK, Adam. *Chování kompozitních materiálů různého materiálového složení na bázi reaktoplastů při vybraných technologiích obrábění*. Liberec. 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.
- [2] Katedra obrábění a montáže. *Broušení, speciální dokončovací metody* [přednáška]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 17. listopadu 2021
- [3] KNAP, Artur. *Problematika vrtání do kompozitních materiálů*. Liberec. 2021. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.
- [4] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2005. ISBN 978-80-7183-337-6.
- [5] *Balancing of grinding wheels*. [online]. [cit. 10. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.grinding.ch/en/united-grinding/motion/motion-blog/article/news/mounting-and-balancing-grinding-wheels-1/>
- [6] *Broušení*. [online]. [cit. 3. 1. 2022]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1059>
- [7] *Brusné kotouče*. [online]. [cit. 10. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/kotouc-t1-175x20x20-98a60k9v40-418906-tyrolit>
- [8] *Composite material*. [online]. [cit. 21. 4. 2022]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Composite\\_material#/media/File:Composite\\_3d.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material#/media/File:Composite_3d.png)
- [9] *Effects of grinding speed on the material removal mechanism in single grain grinding of SiC<sub>f</sub>/SiC ceramic matrix composite*. [online]. [cit. 15. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221001620#fig1>
- [10] *How to make Static balance of the grinding wheel*. [online]. [cit. 10. 5. 2022]. Dostupné z: <https://fortune.tools.com/how-to-make-static-balance-of-the-grinding-wheel/>
- [11] *Influence of grinding fiber angles on grinding of the 2D-C<sub>f</sub>/C-SiC composites*. [online]. [cit. 20. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218309532>
- [12] *Kompozitní materiály*. [online]. [cit. 2. 1. 2022]. Dostupné z: [http://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](http://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf)
- [13] *Kompozity na konci svého života* [online]. [cit. 23. 4. 2022]. [cit. 10. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/materialy/kompozity/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>
- [14] *Matrice*. [online]. Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. [cit. 2. 1. 2022]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz>

- [15] *Navlhavost polymerů*. [online]. [cit. 10. 1. 2022]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/07.html>
- [16] *Obrábění kompozitů*. [online]. [cit. 10. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2456>
- [17] *Orovnávání brusných keramických kotoučů*. [online]. [cit. 29. 4. 2022]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/orovnavani-brusnych-keramickych-kotoucu/>
- [18] *Plane grinding*. [online]. [cit. 25. 4. 2022]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/plane-grinding>
- [19] *Produktivní a hospodárné obrábění vláknových kompozitů*. [online]. [cit. 9. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/produktivni-a-hospodarne-obrabeni-vlaknovych-kompozitu>
- [20] *Produktový list Pilous spol. s. r.o. Pilous ARG 300 – pásová pila na kov*. [online]. [cit. 7. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.pilous.cz/metal/pasove-pily-na-kov/hydraulicko-gravitacni/arg-300-plus-h-f>
- [21] *Průmyslové odsávání v brusárnách*. [online]. [cit. 16. 5. 2022]. Dostupné z: <https://tigemma-engineering.cz/odsavani/dle-odvetvi/brusirny>
- [22] *Přípravky*. [online]. [cit. 16. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.gttrade.cz/pripravky/>
- [23] *Upínání obrobků*. [online]. [cit. 30. 4. 2022]. Dostupné z: [https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/\\_sablony/Praxe\\_II\\_a\\_III/VY\\_52\\_INOVACE\\_H-02-25.pdf](https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-25.pdf)
- [24] *Upínání rotačních obrobků*. [online]. [cit. 14. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/upinani-rotacnich-obrobku-2-cast-7>
- [25] *Vacuum clamping systems*. [online]. [cit. 9. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.amf.de/en/products/clamping-technology/vacuum-clamping-systems.html>
- [26] *Vakuové upínací desky pro obrábění*. [online]. [cit. 30. 4. 2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vakuove-upinaci-desky-pro-obrabeni>
- [27] *Vlákna*. [online]. Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. [cit. 2. 1. 2022]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz>
- [28] *Výztuže pro výrobu kompozitů*. [online]. [cit. 25. 4. 2022]. Dostupné z: <https://www.koral.biz/produkty/vyztuze/>

[29] *What's the self-sharpening of the grinding wheels.* [online]. [cit. 29. 4. 2022]. Dostupné z: <https://fortune.tools.com/whats-the-self-sharpening-of-the-grinding-wheels/>

[30] *Odsávací rameno MiniMan 100.* [online]. [cit. 15. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.filtrace-vzduchu.cz/odsavaci-ramena/934-odsavaci-rameno-miniman-100.html>

# PŘÍLOHY

**AERSTOP SE29B ČERNÝ EPDM**

Expandované EPDM, 1x2 m

22051

**Barva:** Černá**Specifická hmotnost:** 1,10 g/cm<sup>3</sup> (110 kg/m<sup>3</sup> +/-25)**Tvrdość:** 25-45° Shore 00 ASTM D2240**Tažnost:** 160 % (max.)**Pevnost:** STLAČENÍ 50%: 97 kPa (80-160%)**Teplotní odolnost:** -40°C až +100°C, krátkodobě +120°C

**Popis:** Desky z expandovaného EPDM mají podobné použití a fyzikální vlastnosti jako mikroporézní SBR. Desky z lehcené pryže určené pro různé druhy použití - těsnění, vibrace a výrobky z nich vysekávané. Desky mohou přijít do styku s těmito látkami - vzduch, voda, dřevo, kov, pryž, sklo, textil. Hlavní předností těchto desek je odolnost vůči stárnutí, chemická odolnost. Tolerance tloušťky: 2–10 mm (+/- 0,25 mm), 10–25 mm (+/- 0,50 mm), 25–50 mm (+/- 1 mm).

**Deska se prodává pouze na kusy. 1 m x 2 m = 1 ks.**

TLouŠTKA (mm)	ŠÍRKA (mm)	DÉLKA (mm)	HMOTNOST (kg/ks)	JEDNOTKA (m)	OBJEDNACÍ KÓD
1,5	1000	2000	0,46	ks	1,5/1X2-D0022-124
2	1000	2000	0,60	ks	002/1X2-D0022-124
2	1000	10 000	5,00	ks	002/100-D0022-124
3	1000	2000	1,13	ks	003/1X2-D0022-124
4	1000	2000	1,28	ks	004/1X2-D0022-124
5	1000	2000	1,60	ks	005/1X2-D0022-124
6	1000	2000	1,90	ks	006/1X2-D0022-124
8	1000	2000	2,55	ks	008/1X2-D0022-124
10	1000	2000	3,20	ks	010/1X2-D0022-124
12	1000	2000	3,85	ks	012/1X2-D0022-124
15	1000	2000	4,80	ks	015/1X2-D0022-124
20	1000	2000	6,40	ks	020/1X2-D0022-124
25	1000	2000	8,00	ks	025/1X2-D0022-124
30	1000	2000	9,60	ks	030/1X2-D0022-124
35	1000	2000	11,20	ks	035/1X2-D0022-124
40	1000	2000	12,80	ks	040/1X2-D0022-124
45	1000	2000	14,40	ks	045/1X2-D0022-124
50	1000	2000	16,00	ks	050/1X2-D0022-124



**Barva:** Černá

**Specifická hmotnost:** 1,50 g/cm<sup>3</sup>

**Tvrdość:** 70° Shore A

**Tažnost:** 100 %

**Pevnost:** 40 kg/cm<sup>2</sup> (4 MPa)

**Teplotní odolnost:** -20°C až +70°C

**Popis:** Těsnící desky ze základní pryžové směsi SBR (Styren - Butadien kaučuk).

Tato kvalita pryže je určena pro všeobecné použití v místech, kde na materiál nejsou kladeny žádné zvýšené nároky, jako je teplota, chemická odolnost, mechanické vlastnosti, stárnutí a bobtnavost. Ekonomická verze pro nejzákladnější aplikace - těsnění a těsnící prvky, průmyslové podlahoviny, ochranné zástěrky atd.

TLOUŠŤKA (mm)	VLOŽKY (ks)	ŠÍŘKA (mm)	DÉLKA (mm)	BALENÍ (m <sup>2</sup> )	JEDNOTKA (mj)	OBJEDNACÍ KÓD
1	0	1200	10 000	12	kg	001/120-50070-171
2	0	1200	10 000	12	kg	002/120-50070-171
3	0	1200	10 000	12	kg	003/120-50070-171
4	0	1200	10 000	12	kg	004/120-50070-171
5	0	1200	10 000	12	kg	005/120-50070-171
6	0	1200	10 000	12	kg	006/120-50070-171
8	0	1200	10 000	12	kg	008/120-50070-171
10	0	1200	10 000	12	kg	010/120-50070-171
12	0	1200	10 000	12	kg	012/120-50070-171



Příloha č. 2 – CD