

Obrobitelnost kompozitních materiálů

Bc. Jan Solařík

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Solařík**
Osobní číslo: **T13534**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Obrobitelnost kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Literární studie na dané téma
2. Vyhodnocení dosavadního stavu výzkumu v oblasti obrábění kompozitních materiálů
3. Příprava vzorků pro měření obrobitelnosti
4. Frézování připravených vzorků různými nástroji
5. Hodnocení obrobitelnosti materiálů a opotřebení nástrojů
6. Statistické zpracování dat a diskuze výsledků

Rozsah diplomové práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **30. ledna 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2015**

Ve Zlíně dne 9. února 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: SOLARÍK JAN

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.4.2015



.....

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

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

(3) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdávané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

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

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

²⁴ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce je ve dvou experimentech zaměřena na hodnocení nástrojů obrábějící kompozitní materiály mechanickým způsobem obrábění (frézování). Obsahuje rozbor řezných sil, jakosti obrobené plochy, opotřebení nástrojů při frézování kompozitních materiálů, jejich charakteristiku, výrobu a využití.

Klíčová slova: obrobitelnost, frézování, kompozitní materiály, nástroje, řezné síly

ABSTRACT

The thesis is in two experiments focused on assessment tools process composite materials by mechanical means machining (milling). Includes analysis of cutting forces, the quality of the machined surface, tool wear in milling of composite materials, their characteristics, production and use.

Keywords: machinability, milling, composite materials, tools, cutting forces

Mé poděkování patří zejména panu Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za výborný přístup, odbornou pomoc, ochotu a věcné připomínky při vypracování této práce.

„Co slyším, to zapomenu. Co vidím, si pamatuji. Co si vyzkouším, tomu rozumím.“

Confucius

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OBROBITELNOST MATERIÁLU	12
1.1 POJEM OBROBITELNOSTI MATERIÁLU	12
1.2 TŘÍDY A SKUPINY OBROBITELNOSTI	13
1.3 ZKOUŠKY OBROBITELNOSTI	16
1.3.1 Dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti	16
1.3.2 Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti	16
1.4 OBROBITELNOST KOMPOZITŮ	17
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	19
2.1 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	19
2.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	20
2.3 SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	23
2.4 GEOMETRIE VÝZTUŽE.....	23
2.4.1 Částicové kompozity s polymerní maticí.....	23
2.4.2 Částicové kompozity s kovovou nebo keramickou maticí	24
2.4.3 Vláknové kompozity	24
2.4.3.1 Skleněná vlákna	26
2.4.3.2 Aramidová vlákna.....	29
2.4.3.3 Uhlíková vlákna.....	30
2.4.3.4 Přírodní vlákna.....	31
2.4.3.5 Polymerní vlákna	32
2.4.3.6 Keramická vlákna	33
2.4.3.7 Whiskery	33
2.4.4 Matrice	34
2.5 VÝROBA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	38
2.6 VÝHODY-NEVÝHODY A POUŽITÍ	43
3 FRÉZOVÁNÍ	45
3.1 KINEMATIKA ŘEZNÉHO PROCESU	45
3.2 ŘEZNÉ PODMÍNKY	48
3.2.1 Průřez třísky	49
3.2.2 Řezné síly	50
3.3 TRVANLIVOST A ŽIVOTNOST NÁSTROJE	52
4 CNC PROGRAMOVÁNÍ	56
4.1 TVORBA PROGRAMOVÉ DOKUMENTACE A METODY PROGRAMOVÁNÍ	56
5 HODNOCENÍ JAKOSTI OBROBENÉ PLOCHY	59
5.1 ZÁKLADNÍ POJMY A ZNAČENÍ DRSNOSTI PLOCH.....	59
5.2 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	62
II PRAKTICKÁ ČÁST	66
6 CÍLE PRÁCE	67
7 AKTUÁLNÍ STAV VÝZKUMU A VÝVOJE V OBLASTI OBRÁBĚNÍ A ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	68

8	NÁSTROJE PRO OBRÁBĚNÍ.....	69
8.1	NÁSTROJE FIRMY SECO.....	69
8.1.1	JC 860 HONEYCOMB ROUTER.....	69
8.1.2	JC 880 LOW HELIX	70
8.1.3	JC 870 MULTI – FLUTE ROUTERS	71
8.2	POUŽITÉ NÁSTROJE FIRMY WNT.....	72
8.2.1	Monolitní TK fréza na voštinové kompozitní materiály.....	72
8.2.2	Monolitní TK fréza na plasty vyztužené vláknem	72
8.2.3	Monolitní TK fréza	73
8.3	POUŽITÉ NÁSTROJE FIRMY K - TOOLS	74
8.3.1	Univerzální fréza 15002D na obrábění grafitu.....	74
9	FRÉZOVÁNÍ UHLÍKOVÉHO KOMPOZITU	76
9.1	CNC PROGRAMY PRO OBRÁBĚNÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITNÍCH VZORKŮ	77
9.1.1	Řezné podmínky.....	78
9.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL	80
9.3	SROVNÁNÍ JAKOSTI DRÁŽKY POVRCHU PODÉLNÉHO A PŘÍČNÉHO FRÉZOVÁNÍ	84
9.3.1	Srovnání kvality obrobených vzorků	87
9.4	PROMĚŘENÍ A SROVNÁNÍ PRŮMĚRŮ DRÁŽEK	89
9.5	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ PO EXPERIMENTU.....	90
10	FRÉZOVÁNÍ SKLOLAMINÁTOVÉHO KOMPOZITU	92
10.1	CNC PROGRAMY PRO OBRÁBĚNÍ SKLOLAMINÁTOVÉHO KOMPOZITU.....	92
10.1.1	Řezné podmínky.....	92
10.2	SROVNÁNÍ JAKOSTI DRÁŽKY A PŘÍKONU STROJE	94
10.2.1	Srovnání kvality po obrobení sklolaminátového kompozitu	96
10.2.2	Výsledky delaminačního faktoru	97
10.3	PROMĚŘENÍ A SROVNÁNÍ PRŮMĚRU DRÁŽEK	99
10.4	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ PO EXPERIMENTU.....	100
11	CELKOVÉ HODNOCENÍ A POROVNÁNÍ	101
	ZÁVĚR	108
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	111
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	116
	SEZNAM OBRÁZKŮ	117
	SEZNAM TABULEK.....	121
	SEZNAM PŘÍLOH.....	122

ÚVOD

Kompozitní materiály a jejich technologie představují v dnešní době revoluční změnu v oblasti konstrukčních materiálů. Použití těchto materiálů posunuje hranice, které byly při použití klasických konstrukčních materiálů a také technologií nepřekonatelné. Kompozitní materiály se nachází a uplatňují tam, kde se jejich fyzikálně – mechanické vlastnosti uvádí do rovnováhy s poměrně vysokými pořizovacími náklady.

V první kapitole teoretické části je vysvětlen obecný pojem obrobitelnosti, jejich rozdělení do skupin a tříd. Dále potom metody pro určování velikosti obrobitelnosti.

Druhá kapitola teoretické části se věnuje rozdělením, vlastnostmi, složením a výrobou kompozitních materiálů.

Zbývající kapitoly teoretické části se zaměřují na problematiku použití metody frézování pomocí CNC frézky, hodnocení jakosti obrobené plochy a trvanlivosti nástrojů.

Praktická část sestává ze dvou experimentů, kdy v prvním dochází k vyhodnocení řezných sil, drsnosti povrchu a dalších parametrů při obrábění uhlíkových kompozitů. Druhý experiment představuje obrábění sklolaminátového kompozitu, kdy následným spojením s experimentem prvních dojde k vyhodnocení a určení vhodnosti použití nástrojů, které byly pro experiment použity.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBROBITELNOST MATERIÁLU

Obrobitelnost je v technologii obrábění kovů široce rozšířený výraz. Je to systémová vlastnost, která vyjadřuje, jak efektivní může být obrábění při nízkých nákladech a za daných technologických podmínek [1].

1.1 Pojem obrobitelnosti materiálu

Obrobitelnost je technologická vlastnost daného materiálu, která charakterizuje jeho vhodnost k obrábění. Zahrnuje vliv mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, chemického složení, tepelného zpracování, struktury a způsobu výroby polotovaru na kvalitativní, kvantitativní a ekonomické výsledky procesu řezání. Obrobitelnost nelze vztáhnout jen k samotnému obráběnému materiálu, protože závisí i na způsobu obrábění a řezných podmínkách.

Dalším možným kritériem pro hodnocení relativní obrobitelnosti může být:

- Dosažená drsnost obrobené plochy
- Opotřebení břitu nástroje
- Množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu
- Teplota řezání
- Druh a tvar třísek



Obr. 1. Vlastnosti ovlivňující obrobiteľnosť materiálu [1]

Obrobiteľnosť teda není jediná vlastnosť materiálu. Je to systém chování materiálu během řezání. Z podsystému jsou nejvýraznější druh nástrojového materiálu a řezná rychlost. Samozřejmě dalšími významnými složkami, které ovlivňují obrobiteľnosť, jsou tepelné vlastnosti, chemické složení, mechanické vlastnosti atd. viz Obr. 1. Všechny výsledky experimentů musí uvádět podmínky, za kterých byly experimenty prováděny a pro které podmínky platí.

1.2 Třídy a skupiny obrobiteľnosti

Metodika zařazení strojírenských materiálů do určitých tříd obrobiteľnosti je různá – v závislosti na aplikovaných normativních a zkušenostech zejména výrobců řezných nástrojů. Pro potřeby vyhodnocování obrobiteľnosti jsou technické konstrukční materiály rozděleny do devíti základních skupin, označovaných malými písmeny podle CNN 10-0-I/II:

- a – litiny,
- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,

g – vrstvené hmoty,

v – tvrzené litiny pro výrobu válců.

Označení obráběných materiálů v souladu se standardy ISO:

 <p>P Ocel</p>	 <p>M Korozivzdorná ocel</p>	 <p>K Litina</p>
 <p>N Hliník</p>	 <p>S Žárovzdorné slitiny</p>	 <p>H Tvrzená ocel</p>

Obr. 2. Skupiny obráběných materiálů dle standardy ISO [5]

- ISO P – oceli představují největší skupinu materiálů pro oblast obrábění kovů a dále se dělí do skupin od nelegovaných až po vysokolegované, obrobitelnost je obvykle dobrá, ale značně se liší v závislosti na tvrdosti materiálu, obsahu uhlíku atd.
- ISO M – korozivzdorné oceli jsou materiály s přísadou minimálně 12 % chromu, společnou vlastností je, že bříty jsou vystaveny účinkům velkého množství tepla
- ISO K – litina tvořící krátké třísky, obrábění šedé a temperované litiny je skutečně jednoduché, zatímco např. obrábění izotermicky kalené litiny je mnohem obtížnější
- ISO N – neželezné kovy jako např. hliník, měď, mosaz. Obecně je možné předpokládat použití vysokých řezných rychlostí a dlouhou životnost nástroje
- ISO S – žárovzdorné superslitiny zahrnují celou řadu vysokolegovaných ocelí a materiály na bázi niklu, kobaltu a titanu, obrábění je obtížnější a životnost bříty kratší
- ISO H – tato skupina zahrnuje oceli o tvrdosti mezi 45 – 65 HRC a také tvrzené litiny v rozmezí 400 – 600 HB [2,5]

Pro každou skupinu materiálů je stanoven etalonový materiál, ke kterému se vztahuje relativní obrobitelnost ostatních materiálů ve skupině jako např.:

a – ČSN 42 2424

b – ČSN 12 050.1

Součinitel obrobiteľnosti

$$Kv = \frac{\frac{v_{ct}}{VB} \text{ zkoušeného materiálu}}{\frac{v_{ct}}{VB} \text{ etalonového materiálu}} \quad (1)$$

kde:

v_{ct}/vb – rezná rychlost v_c při trvanlivosti T pro opotřebení hřbetu VB

Třídy obrobiteľnosti

Třídy jsou označovány číslem, které je umístěno před písmeno, které určuje skupinu materiálů. Třídy obrobiteľnosti se vztahují k příslušným součinitelům obrobiteľnosti, které jsou odstupňovány podle geometrické řady s kvocientem $q=10^{1/10}=1,2589$. Třída etalonového materiálu má hodnotu $q=1$.

Třída	Kv			Třída	Kv		
	vyjádřeno kvocientem	střední hodnota	rozsah		vyjádřeno kvocientem	střední hodnota	rozsah
1b	$1,26^{-13}$	0,050	0,045-0,054	11b	$1,26^{-3}$	0,50	0,45-0,56
2b	$1,26^{-12}$	0,065	0,055-0,069	12b	$1,26^{-2}$	0,63	0,57-0,71
3b	$1,26^{-11}$	0,080	0,070-0,089	13b	$1,26^{-1}$	0,80	0,72-0,89
4b	$1,26^{-10}$	0,10	0,09-0,11	14b	$1,26^0$	1,00	0,90-1,12
5b	$1,26^{-9}$	0,13	0,12-0,14	15b	$1,26^1$	1,26	1,13-1,41
6b	$1,26^{-8}$	0,16	0,15-0,17	16b	$1,26^2$	1,59	1,42-1,78
7b	$1,26^{-7}$	0,20	0,18-0,22	17b	$1,26^3$	2,00	1,79-2,24
8b	$1,26^{-6}$	0,25	0,23-0,28	18b	$1,26^4$	2,50	2,25-2,82
9b	$1,26^{-5}$	0,32	0,29-0,35	19b	$1,26^5$	3,15	2,83-3,55
10b	$1,26^{-4}$	0,40	0,36-0,44	20b	$1,26^6$	4,00	3,56-4,47

Obr. 3. Hodnoty Kv indexu obrobiteľnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí [4]

Materiály v třídách s nižším číslem, než má třída etalonového materiálu mají horší obrobiteľnosť než etalonový materiál. Relatívne nejhorší obrobiteľnosť v danej skupine má vždy materiál zařazený do třídy s nejnižším číslem. Nejlepší obrobiteľnosť má materiál zařazený do třídy s nejvyšším číslem [2,4].

1.3 Zkoušky obrobiteľnosti

Stupeň obrobiteľnosti určitého materiálu je zpravidla různý při obrábění různými metodami (soustružení, frézování, broušení, apod.). Proto je třeba zkoušky obrobiteľnosti provádět pro jednotlivé způsoby obrábění zvlášť. Z hlediska provádění rozlišujeme zkoušky dlouhodobé a krátkodobé. Dále se dají rozdělit na metody přímé a nepřímé [4].

1.3.1 Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti

Kritériem je zde hodnota řezné rychlosti a provádí se soustružením nebo frézováním dohodnutými konstantními řeznými parametry, druhem řezného nástroje a geometrií více odstupňovanými řeznými rychlostmi až do optimálního otupení břitu. Dlouhodobá zkouška je náročná na čas a spotřebu materiálu, avšak poskytuje nejpřesnější výsledky.

Základní postup při dlouhodobé zkoušce je následující:

- Změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje VB_B pro několik hodnot řezných rychlostí při konstantních řezných parametrech sestrojí se křivka otupení Obr. 31
- Určí se kritérium opotřebení VB_{OPT} , a tím se stanoví pro každou řeznou rychlost odpovídající trvanlivost břitu
- Sestrojí se závislost $T - v_c$ v logaritmických souřadnicích a pro vybranou trvanlivost stanoví index obrobiteľnosti a požadované hodnoty C_T , C_V a exponent m Obr. 32 [4,29]

1.3.2 Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti

Tyto zkoušky jsou méně objektivní, ale mají výhodu v nesrovnatelně kratší době trvání a nižší spotřebě materiálu.

Podle principu a použitého kritéria lze tyto zkušební metody dále rozdělit na přímé a nepřímé. Metody založené na přímém zjišťování intenzity opotřebení za zostřených či jinak smluvně upravených podmínek. Nepřímé metody vycházejí ze známého, respektive

předpokládaného vztahu mezi opotřebením břitu a charakteristickými parametry řezného procesu.

Přímé metody obrobitelnosti:

- Čelní krátkodobá zkouška
- Mikrozkouška trvanlivosti
- Snížení míry opotřebení
- Použití nástroje se sníženou řezivostí
- Zvýšením řezné rychlosti

Nepřímé metody obrobitelnosti:

- Dynamická metoda (měření sil při obrábění)
- Měření tvrdosti obrobku
- Mikrometrická metoda (při stejné hodnotě drsnosti)
- Porovnání tvaru třísky
- Leyensetterova metoda
- Pomocí teploty řezání

1.4 Obrobitelnost kompozitů

Obrábění kompozitních materiálů je obtížné a volba vhodných řezných nástrojů vyžaduje zpravidla selektivní postup a velkou pečlivost. K nejrozšířenějším obráběcím operacím při zpracování těchto materiálů patří řezání, soustružení, frézování a zejména vrtání. Nejčastěji obráběné kompozitní materiály obsahují vlákna uhlíková, skelná nebo aramidová, která jsou vázána organickým polymerem, epoxidovou nebo fenolovou pryskyřicí.

Vzájemnou kombinací matrice a vyztužujících vláken lze dosáhnout rozdílných mechanických vlastností, které je nutno zohlednit při volbě řezného nástroje. Zatímco kompozitní materiály zpevněné uhlíkovými vlákny jsou velmi abrazivní, a tudíž je vyžadován co nejvíce odolný nástrojový materiál, tytéž materiály vyztužené aramidovou tkaninou kladou velké nároky především na správnou geometrii břitu, protože jsou měkké a lehce se poddají tlaku nástroje. Pro tyto materiály byly vyvinuty speciální nástroje, které vlákno nejprve předeprnou a potom čistě oddělí a odstraní z pracovního prostoru. Kromě

nástroje samotného mají hlavní vliv na kvalitu obrábění kompozitních materiálů i řezné podmínky. Záleží na správně zvoleném posuvu, na otáčkách a na zajištění dokonalého řezu, to znamená na zamezení tření nástroje o povrch obrobku. Neřeže-li nástroj správně, dochází k delaminaci materiálu nebo k lomu vláken.

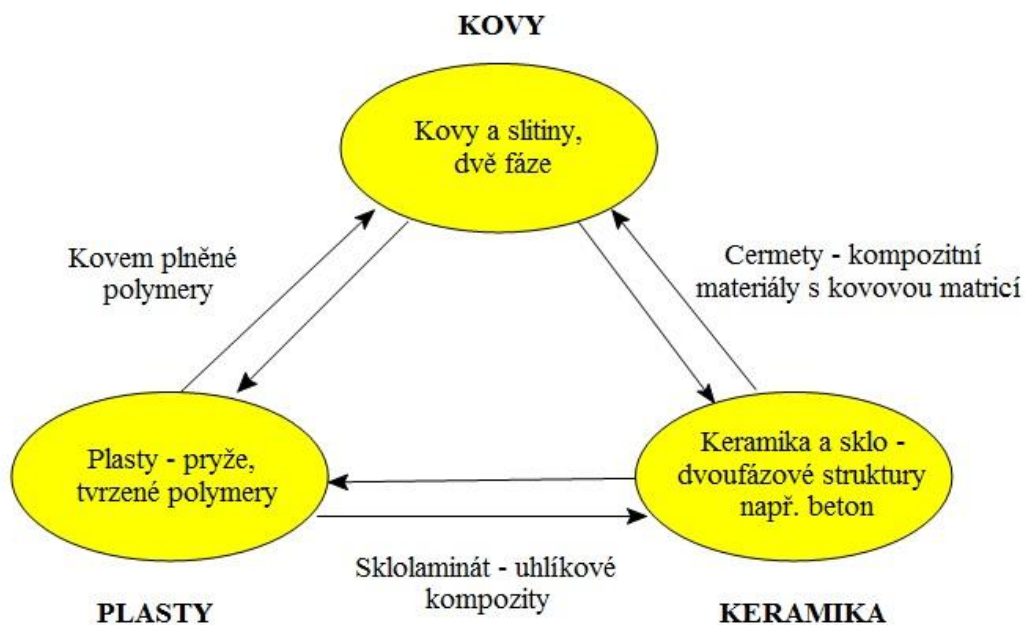
Průběh řezu v kompozitních materiálech je naprosto odlišný, než je tomu u kovů. Když břit vytváří třísku, nedochází ke kluzu jako u většiny kovů, ale kompozitní materiál je roztrháván, mnohdy tak, že přitom dochází k přerézávání matrice, zatímco vyztužující vlákna se během obráběcího procesu lámou. Všeobecným principem, platným pro obrábění kompozitů, je použití ostrých břitů s dostatečně velkým úhlem hřbetu, které umožňují čistý řez a potlačení tendencí k odírání nástroje o obrobek. Snížení opotřebení nástroje na minimum je velice důležité, jelikož geometrické změny řezné hrany mají za následek velice prudkou a nadměrnou tvorbu tepla, lom břitu a problémy s kvalitou součásti [6,7].

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Definice charakterizující kompozitní materiály jsou celá řada. Uveďme si tedy dvě, kdy první klade větší důraz na návrhovou filozofii: „ *Kompozity jsou takové heterogenní materiály, u kterých se po smíšení materiálů se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jediná struktura; jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídavnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy, nebo smíšené dohromady.* ”

Druhou definici kompozitních materiálů můžeme chápat takto:

Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou (fází) samostatně ani prostou sumací [8].

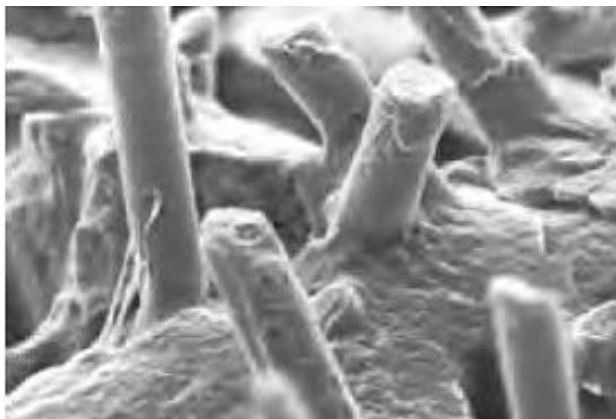


Obr. 4. Vztahy mezi konstrukčními materiály a vývojem kompozitů [10]

2.1 Vlastnosti kompozitních materiálů

Obecně platí, že mechanické vlastnosti kompozitu stoupají se zvyšujícím se obsahem vyztužující složky až do podílu 80 %. Všechna vlákna musejí být totiž dokonale smočena pojivem – pryskyřicí. Aby se využily plně pevnosti vláken, musí se zabezpečit dobrá adheze mezi vlákny a maticí a tím i dokonalý přenos síly z matrice na výztuž. Vlákna se

proto na povrchu chemicky upravují tak, aby se na rozhraní mezi matricí a vláknem tvořily pevné chemické vazby.



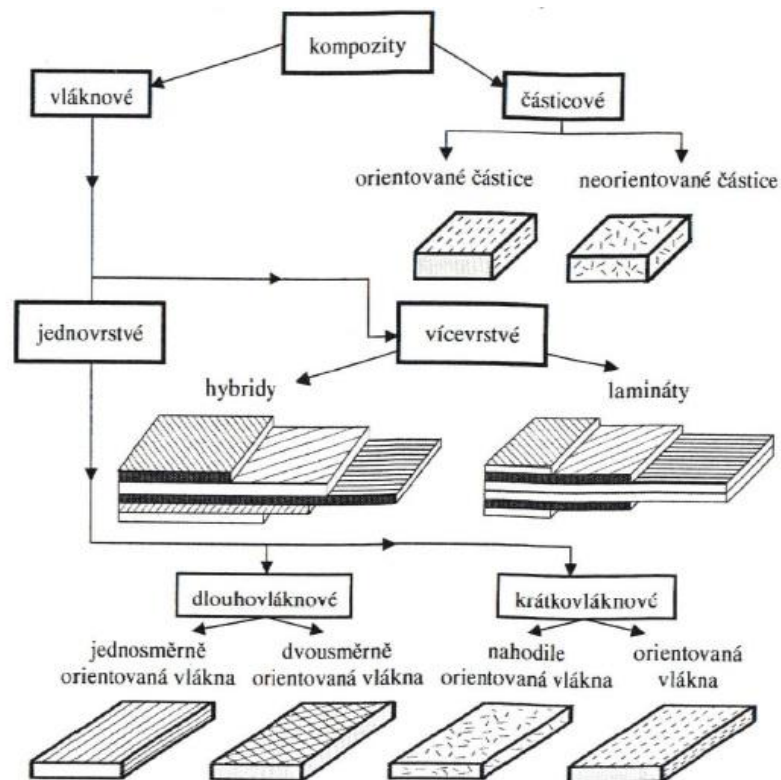
Obr. 5. Fázové rozhraní vlákno – matrice [11]

Charakteristickým rysem kompozitů oproti homogenním materiálům je jejich anizotropie – vlastnosti kompozitu silně závisí na směru uložení (orientaci) výztužných vláken [11].

2.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Rozdělit kompozitní materiály je možno podle různých hledisek (Obr. 6). Podle materiálu matrice, tedy podle základní spojité fáze, rozeznáváme kovové kompozity (slitiny, kovy vyztužené vlákny, kovy vyztužené částicemi, cermety), polymerní kompozity (s termoplastovou, reaktoplastovou nebo elastomerní matricí), keramické kompozity a ostatní anorganické kompozity (např. beton z portlandského cementu impregnovaný polymerem).

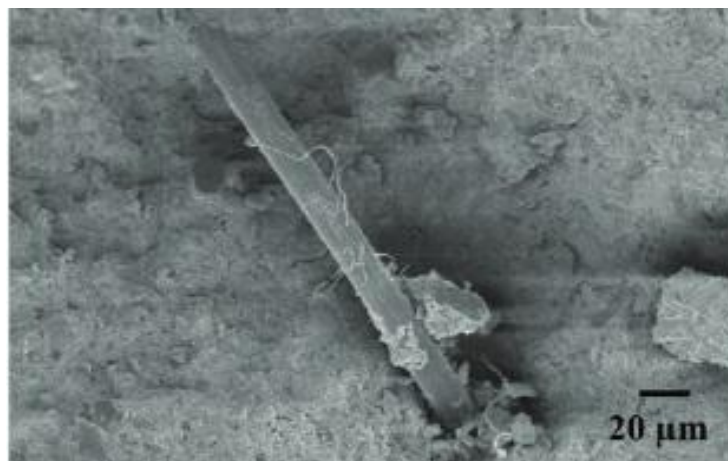
Jiným hlediskem může být struktura nebo geometrická charakteristika dispergované fáze do matrice. Podle toho rozeznáváme disperzní kompozity, částicové kompozity s částicemi pravidelných tvarů (koule, destičky), nebo nepravidelných tvarů nebo s plynnými inkluzemi (lehčené polymery, pěnobeton) a vláknové kompozity s dlouhými, nebo krátkými vlákny. Granulární částice mohou být z látek různého druhu, dlouhá vlákna jsou obvykle skleněná, uhlíková nebo polymerní, krátká také uhlíková, borová, wolframová, azbestová a další [8].



Obr. 6. Rozdělení kompozitních materiálů [19]

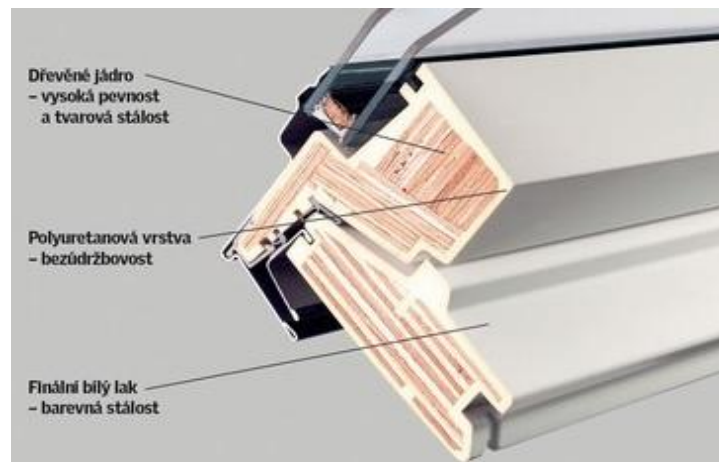
Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Z toho hlediska můžeme opět rozdělit kompozity na:

- **Mikrokompozitní materiály** – v průmyslu mají největší význam, největší příčné rozměry výztuže jsou v rozmezí 1 až 100 μm , mají menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě



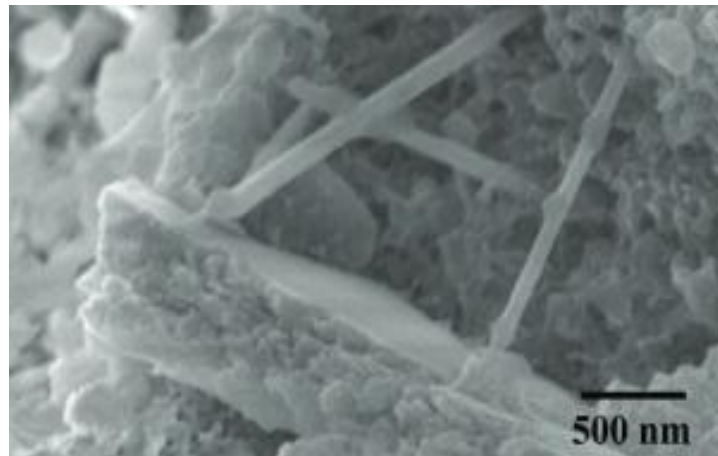
Obr. 7. Struktura mikrokompozitního materiálu [13]

- **Makrokompozitní materiály** – obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru až 100 mm a jsou používány především ve stavebnictví (např. železobeton, tj. beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty, nebo kombinace plastového střešního okna s dřevěným jádrem Obr. 8)



Obr. 8. Příklad makrokompozitního materiálu [14]

- **Nanokompozitní materiály** – jsou kompozitní materiály s polymerní maticí u kterých rozměr částicové výztuže se pohybuje v jednotkách nm [12]



Obr. 9. Struktura nanokompozitního materiálu [13]

2.3 Složení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- Podíl výztuže musí být větší než 5 %
- Vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- Kompozit musí být připraven mísením složek [12]

2.4 Geometrie výztuže

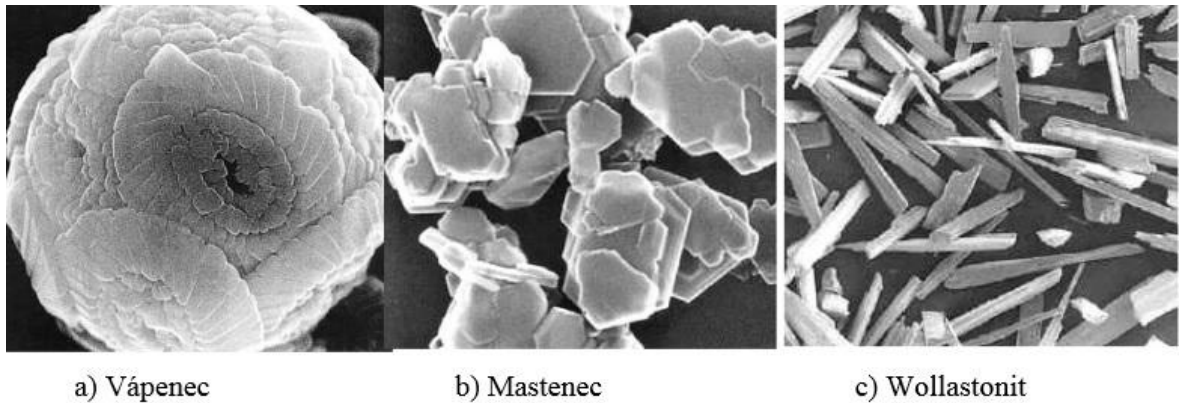
Podle geometrie výztuže dělíme mikrokompozity (dále jen kompozity) na dvě základní skupiny:

- Částicové kompozity
- Vlákňové kompozity

2.4.1 Částicové kompozity s polymerní maticí

Částicové kompozity s polymerní maticí mají nízkou hustotu a větší modul pružnosti v tahu. Mají dobrou krátkodobou chemickou odolnost, ale chybí jim tepelná stabilita. Částice jsou většinou vyrobeny mikromletím anorganických materiálů.

Složením jsou to především hlinitokřemičitany (mstek, kaolin), vrstevnaté hlinitokřemičitany (slídy) a uhličitan (vápeneč a těživec). Částice sférického tvaru by neměly být příliš velké, aby nezmenšovaly pevnost polymeru. Pro zvýšení tuhosti se obvykle používají sférické částice s rozměry 1 až 10 μm , které jsou považovány za „velké“ částice (vápeneč, skleněné kuličky, duté skleněné kuličky) [10,12].



Obr. 10. Příklady sférických (a), destičkových (b) a vláknitých (c) typů částicových plniv [15]

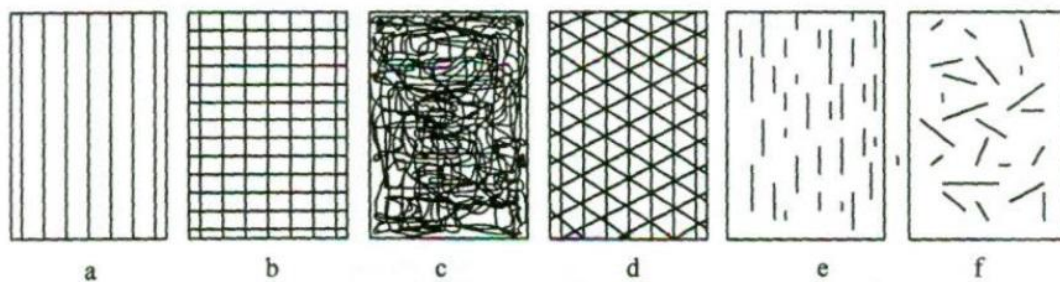
2.4.2 Částicové kompozity s kovovou nebo keramickou maticí

Přítomnost velmi malých tvrdých částic (s rozměry menšími než $0,1 \mu\text{m}$) v kovové matici vede k významnému zvýšení tvrdosti, meze kluzu a pevnosti. Mají užitečné mechanické vlastnosti, vysokou tuhost, dobrou tepelnou stabilitu a mohou být odolné vůči korozi.

Částicové kompozity s keramickou maticí mají velkou tepelnou stabilitu a jsou odolné proti otěru, opotřebení a korozi. Většinou se pro matici používají oxidy, nitridy nebo karbidy různých prvků (nejčastěji Al, Si, Mg), např. Al_2O_3 , ZrO_2 , grafit, sklo [8,10,12].

2.4.3 Vlákenné kompozity

Vlákenná výztuž může být v matici orientována jednosměrně, dvouose, víceosé v rovině, prostorově (třídímenzionální výztuž) a nahodile v rovině. Příklady uspořádání vláknové výztuže v rovině jsou na Obr. 11.



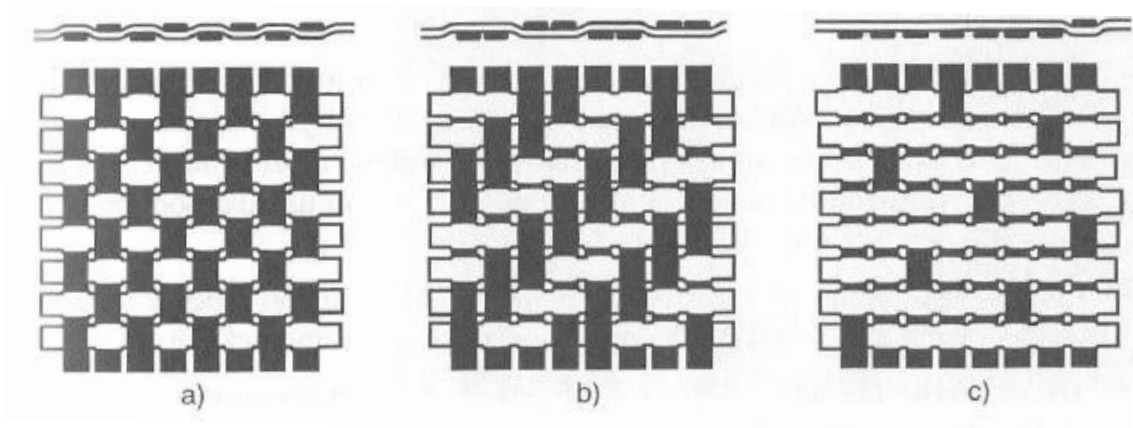
Obr. 11. Příklady uspořádání rovinného uspořádání vláken: a) jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken, b) dvouosá orientace, c) rohož (nahodilá orientace kontinuálních nebo krátkých vláken), d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [12]

Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů většinou aplikují upravené produkty. Vlákna se používají pro textilní zpracování, vyztužování termosetů, pro výrobu povrchových rohoží a papíru atd.

Následující pojmy platí pro veškeré typy vláken:

- **Příže** – vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky
- **Nitě** – skládají se z jedné nebo více příží, které jsou společně spředeny
- **Roving (pramenec)** – skládá se z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken, zpracovává se buď sekáním, tkaním, nebo navíjením
- **Rohože z kontinuálních vláken** – skládají se z nekonečných skleněných vláken, která jsou uložena nepravidelně bez jakékoli orientace ve smyčkách v několika vrstvách a jsou vzájemně spojena pojivem
- **Rohože ze sekaných pramenců** – vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených, vlákna jsou uložena do vrstev, postříkaná pojivem a po vysušení v pásové sušárně spojena tak, že je možno vzniklou rohož navíjet do rolí, které jsou připraveny k okamžitému použití
- **Tkaniny** – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech, tkaniny jsou v porovnání

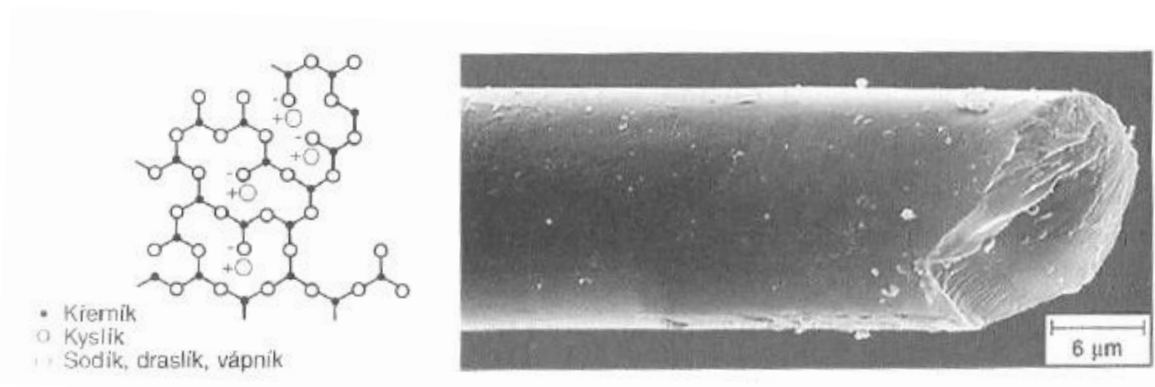
s jednosměrně orientovanou výztuží snáze zpracovatelné, zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby [16]



Obr. 12. Druhy vazeb vyztužujících tkanin a) plátnová vazba b) keprová vazba c) saténová vazba [16]

2.4.3.1 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) je společný název pro tenká vlákna (\varnothing 3,5 až 24 μm) s pravidelným kruhovým průřezem. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou prostupností pro záření, proto se označují jako E – vlákna (elektrická) a jejich sklovina jako E – sklovina. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který postupně jako standardní typ obsadil téměř 90 % trhu.



Obr. 13. Struktura skleněného vlákna [16]

Vlastnosti skleněných vláken:

- Materiálové vlastnosti jsou v podélném a příčném směru totožné = izotropní materiál
- Modul pružnosti v tahu je přibližně stejně velký jako hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli, pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken a je většinou podstatně vyšší než u oceli – vzhledem k porovnatelně nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken zvláště vysoká
- Skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna
- Dlouhodobé trvalé tepelné namáhání při 250 °C snižuje hodnoty mechanických vlastností, tepelná vodivost je naproti tomu vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovů
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá
- Bod měknutí E – skloviny je vyšší než 625 °C
- Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů [16]

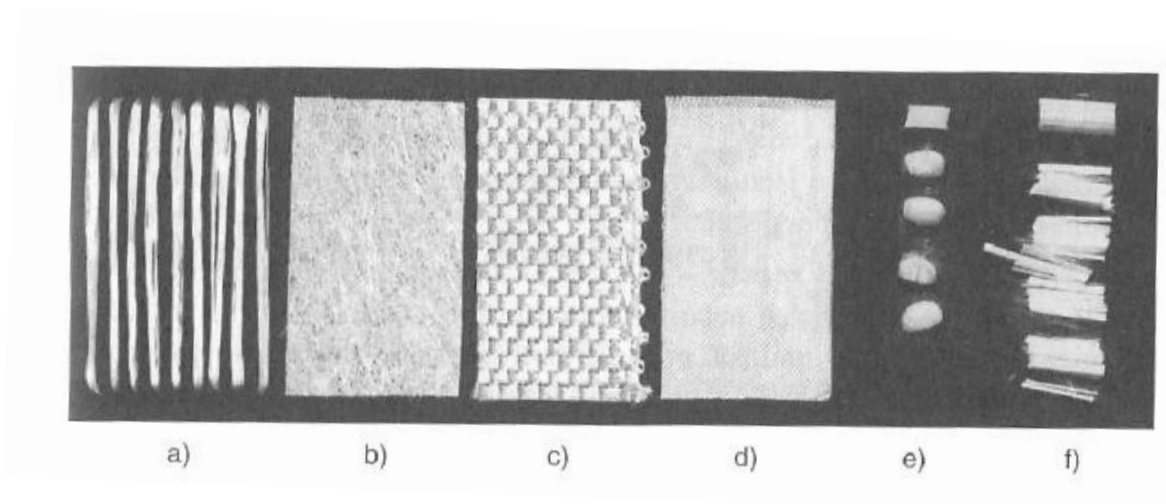
Sklovina s vyšším obsahem SiO₂, MgO a Al₂O₃ má o 40 až 70 % vyšší pevnost a označuje se v USA jako S – sklovina (S - strength), v Evropě jako R – sklovina (R - Resistance). Dále se vyrábí C – sklovina s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám. Bezalkalická skleněná vlákna – AR vlákna, s poněkud odlišným složením oproti E – vláknům, mají vysokou odolnost proti alkáliím a používají se pro vyztužení betonu [8,16].

Tab. 1. Složení skloviny a důležité vlastnosti neupravených vláken [16]

Sklovina	E	R nebo S	C	ECR	AR
Složení %					
SiO ₂	54	60	60 až 65	54 až 62	62
Al ₂ O ₃	14 až 15	25	2 až 6	12 až 13	-
CaO	-	14	14	21	5 až 9
MgO	20 až 24	3	1 až 3	4,5	1 až 4
B ₂ O ₃	6 až 9	< 1	2 až 7	< 0,1	< 0,5
K ₂ O	< 1	< 1	8	0,6	ZrO ₂ :17
Na ₂ O	-	-	-	-	12 až 15
Vlastnosti					
Hustota (g.cm ⁻³)	2,6	2,53	2,52	2,72	2,68
Mez pevnosti v tahu (N.mm ⁻²)	3400	4400	2400	3440	3000
E - modul (N.mm ⁻²)	7300	86000	70000	73000	73000
Poměrné prodloužení při přetržení (%)	< 4,8	< 4,6	< 4,8	< 4,8	< 4,4
Součinitel teplotní roztlačnosti (K ⁻¹)	5,0·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁶	6,3·10 ⁻⁶	5,9·10 ⁻⁶	6,5·10 ⁻⁶
Teplota měknutí (°C)	850	980	750	880	770

Hlavní charakteristikou skleněných vláken je jejich pevnost. Relativně vysoké hodnoty pevnosti a E – modulu jsou důsledkem silné kovalentní vazby mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny.

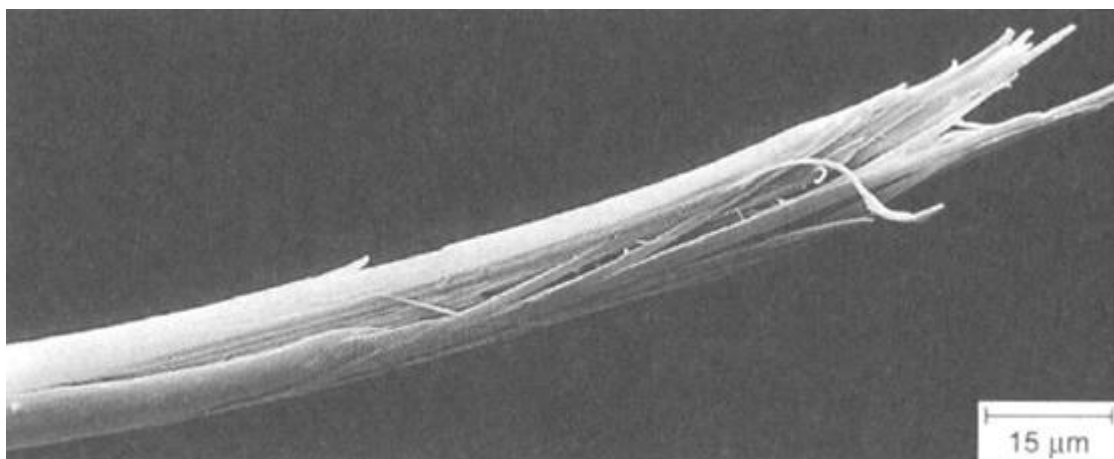
Vlákna jsou vyráběna tažením roztaveného skla do velmi jemných vláken. Najednou je taženo obvykle 204 vláken, která vytvářejí pramenec, který je základní jednotkou pro výroby z vláken (provazce, tkaniny). Ze skleněných vláken je možno vyrobit řadu různých tkanin, používaných k dosažení vysokých pevností a modulů kompozitů. Různé typy výztuží můžeme vidět na Obr. 14 [8,10].



Obr. 14. Nejdůležitější typy sklovláknitých výztuží a) roving b) rohož c) tkanina pramenců d) tkanina z vláken e) krátká vlákna (přibližně délky 0,22 mm) f) dlouhá vlákna (přibližně délky 5 mm) [16]

2.4.3.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost.



Obr. 15. Řez aramidovým vláknem se silným roztřepením v místě lomu [16]

V laminátu lze využít až 70 % jejich skutečné pevnosti, při zvláště tažné matici dokonce ještě více. Hlavními oblastmi použití jsou náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace a světlované kabely.

Vlastnosti aramidových vláken:

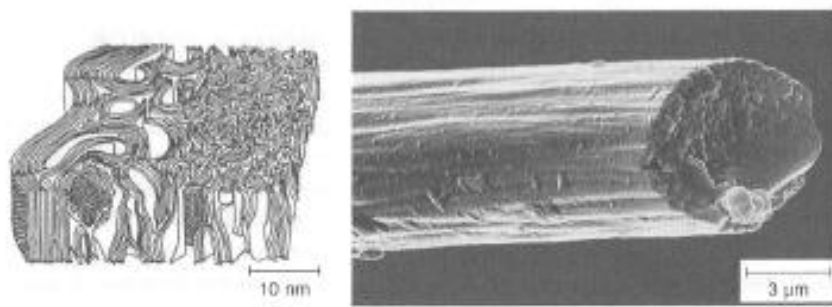
- Nejlehčí vyztužující vlákno, hustota $\rho=1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- Silně anizotropní (viz Tab. 2)
- Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken je výrazně nižší než mez pevnosti v tahu
- Jsou hydrofilní, absorbují vlhkost až do 7 %, proto musí být vlákna před použitím vysušena (20 minut při 120 °C)
- Při expozici zářením s vysokou energií (UV záření) dochází k výraznému poklesu pevnosti
- Adheze aramidových vláken k matrici je často nižší než u ostatních vláken
- Vytvrzené konstrukční prvky z aramidových kompozitů se obtížně obrábějí [16]

Tab. 2. Vlastnosti jednosměrně vyztuženého epoxidového laminátu vyztuženého vysokomodulovým aramidovým vláknem [16]

Vlastnosti	Ve směru vláken		Kolmo na vlákno	
	Tah	Tlak	Tah	Tlak
E · modul ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	80000	80000	6500	5100
Pevnost ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	1800	230	8	53
Tažnost (%)	2,2	0,5	0,16	1,4
Příčné smrštění	0,3	0,3	0,025	0,02
Součinitel teplotní roztažnosti (K^{-1})	$-2\cdot 10^{-6}$		$70\cdot 10^{-6}$	
Vodivost ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	$\sim 2\cdot 10^{-13}$		-	

2.4.3.3 Uhlíková vlákna

Za uhlíková vlákna jsou obvykle považována ta, která vzniknou při teplotě 800 až 1600 °C, zatímco grafitová vlákna jsou vyráběna při teplotě nad 2 200 °C. Jiným kritériem je obsah uhlíku: vlákna s obsahem uhlíku do 92 % hmotnostních jsou označována za uhlíková. S větším obsahem uhlíku za grafitová.



Obr. 16. Mikrostruktura uhlíkového vlákna [16]

Uhlíková vlákna se skládají z více než 90 % z uhlíku, < 7 % dusíku, < % kyslíku a < 0,3 % vodíku. Mají průměr mezi 5 a 10 μm .

Vlastnosti uhlíkových vláken:

- Vysoká pevnost i hodnoty E – modulu až do teploty 500 °C
- Nízká hustota $\rho=1,6$ až 2 g.cm^{-3}
- Mimořádně vysoká korozní odolnost
- Vysoká odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání
- Snášlivost s tělesnými tkáněmi
- Za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou
- Při delším skladování ztrácejí ohebnost
- Jsou silně anizotropní

Použití uhlíkových vláken se využívá zejména v leteckém průmyslu (trupy a křídla letadel), auta (nárazníky, F1), větrné generátory, sportovní vybavení (čluny, golfové hole) a mnoho dalších možností použití. Uhlíkové vlákna jsou neodmyslitelně drahé. Od jejich zavedení, ale jejich cena klesla z několika stovek £ / kg (v roce 1985 74 £) do desítek £ / kg (začátek 21. století 24 £) v závislosti na kvalitě [8,10,16].

2.4.3.4 Přírodní vlákna

Mezi nejrozšířenější druhy přírodních vláken patří len (světová spotřeba 650 000 tun / rok) a juta (2 700 000 tun / rok). Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna, jejímž základem je celulóza zajímavou surovinou pro lehké

konstrukce. Vlastnosti mechanických vlastností vhodných přírodních a skleněných vláken ukazuje Obr. 17.

Vlastnosti \ Vlákn	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
E -modul ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
Mez pevnosti v tahu ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	3 500	600	750	550	600
Tažnost (%)	4	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2,54	1,45	1,48	$\approx 1,4$	1,45

Obr. 17. Porovnání přírodních a skleněných vláken [16]

Výhody přírodních vláken:

- Nízká hustota
- Výhodná likvidace spalováním
- Malá abrazivita při mechanickém opracování

Nevýhody přírodních vláken:

- Citlivost na působení vlhkosti
- Nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování (200 °C)
- Závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu [16]

2.4.3.5 Polymerní vlákna

Vlákna ze syntetických polymerů měla do nedávna velmi nízký modul, např. z polyamidu (silon, nylon) a polyethyltereftalát (tesil, terylen) 1 až 3 GPa. Dnes vyráběná vlákna z vysoce orientovaného aromatického polyamidu (PPT) s průměrem 12 μm (Kevlar) firmy DuPont dosahují však již modulu až 130 GPa, pevnosti až 3 GPa a jsou určeny pro výztuž kompozitů. Nevýhodou všech polymerních vláken je citlivost k vyšším teplotám. Polyamid ztrácí většinu pevnosti již pod 100 °C.

Kevlar je velmi houževnatý, ale vlivem strukturní molekulární konfigurace vláken má slabé tlakové pevnosti. Tento materiál je dobře znám jako složka vest, které chrání před

střelami a ostrými předměty. Pryží potažený Kevlar se používá jako vnitřní obložení pro některé cyklistické pneumatiky, aby se zabránilo propíchnutí. Elastomer potažený kevlarom je možné použít jako bezpečnostní oblečení pro motorkáře [8,17].

2.4.3.6 *Keramická vlákna*

Vlákna byla vyrobena z řady kovových a dalších oxidů a jejich kombinací např. Cr, Al – Cr, Al – Co, Si, Ti, FeO použitelná především jako výztuž kovů a keramiky, mají extrémní odolnost prostředí, vysokou tuhost a pevnost a vysokou tepelnou odolnost 1350 – 1600 °C.

Výborné vlastnosti mají vlákna z nitridu boru v délkách 660 – 1000 mm, vysokou teplotní stabilitu, vysoký elektrický odpor ($10^{14} \Omega \text{ cm}$ při 25 °C), vysokou teplotní vodivost ($28,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ při 300 °C), oxidační stabilitu do 855 °C [8].

2.4.3.7 *Whiskery*

Whiskery jsou vláknité krystaly s průměrem kolem 1 μm a délkou 3 až 4 mm. Tyto monokrystalická vlákna jsou specifická svým vysokým poměrem délky k tloušťce. Mají hexagonální, čtvercový nebo rovnoběžníkový průřez. Povrch je bez trhlinek a rovněž ve vnitřní struktuře nejsou inkluze, trhliny nebo jiné chyby.

Jejich vlastnosti závisí především na podmínkách růstu, dokonalosti povrchu a na průměru. Tlusté whiskery mají již řadu dislokací a jsou poměrně nepevné. Pokud je poměr průměru k délce malý, ale převyšuje 1/20, mluvíme o jednokrystalových destičkách, které mohou mít také vysokou pevnost až 10 GPa.

Mezi whiskery můžeme také zařadit i fosfátová mikrovlákna, která představují novou generaci mikrovláken. Jde o vápníko – sodíkový metafosfát, jehož strukturní páteř tvoří kovalentně vázaný anorganický polymer. Polymetafosfátové řetězce jsou přirozenou složkou živých systémů, a proto jsou při vdechnutí, nebo zažití v organismu metabolizovány. Mikrovlákna mají vysoké pevnosti (2,1 GPa), modul 20 GPa a tají při teplotě 749 °C [8].

2.4.4 Matrice

Funkce matrice:

- Matrice váže a drží dohromady vlákna
- Matrice by měla chránit výztuže vláken před mechanickým poškozením a před vlivem okolí
- Tvárná matrice bude poskytovat prostředky pro zpomalení nebo zastavení trhlin, které by mohly mít původ ve zlomených vláknech
- Matrice díky kvalitě mezifázové pevnosti spoje je důležitým prostředkem pro zvýšení tuhosti kompozitu [10]

Kovové matrice:

Použití kovové matrice pro kompozity má proti nejčastěji používané polymerní matici některé výhody:

- Elektrická vodivost
- Teplotní vodivost
- Nehořlavost
- Smyková pevnost
- Odolnost povrchového poškození

Nejrozšířenější z kovových maticí je hliník a jeho slitiny vyztužované nejčastěji borovými, uhlíkovými popřípadě safírovými vlákny. Dalšími nepoužívanějšími maticemi jsou slitiny titanu. Titanové kompozity poskytují možnost využití do vyšších teplot (1000 až 1200 °C), proti hliníkovým kompozitům s 500 až 600 °C. Kvalita a vlastnosti těchto kompozitů záleží značně na výrobních metodách (póry, poruchy vláken, promíšení, soudržnost).

Výrobní postup je třeba volit tak, aby došlo k dokonalému smíšení matrice s vlákny bez mechanického poškození vláken, bez jejich degradace, zkřehnutí matrice, s dostatečnou soudržností ve styku matrice – vlákna i matrice – matrice [8].

Polymerní matrice:

Podle vlastností i podle výrobního postupu se výrazně liší podle toho, je – li polymer termoplast nebo reaktoplast.

Z termoplastů, které přicházejí v úvahu pro vyztužování vlákn, jsou nejčastější:

- Polyamidy (nylon)
- PE
- PP
- PC
- PSU

K vyztužení jsou vhodná vlákna:

- Skleněná
- Uhlíková
- Aramidová

Termoplastické polymery pro matrici mohou značně redukovat cenu kompozitů (o 25 až 80 % proti reaktoplastovým a o 20 až 50 % proti hliníku).

Vlastnosti těchto kompozitů velmi závisí na výrobním postupu (rozložení vláken, orientace vláken, délka, porušení vláken), na pevnosti a na jiných vlastnostech vláken (např. teplotní vodivosti, houževnatosti), na povrchové úpravě vláken (ovlivňuje soudržnost s matricí) a na viskoelastické chování matrice (v závislosti na teplotě) [8].

Reaktoplasty vyztužené vlákny jsou nesporně nejrozšířenější konstrukční kompozity.

Pro matrici jsou nejrozšířenější:

- Polyesterové pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice
- Fenolické pryskyřice
- Melaminové pryskyřice

Vlákna pro reaktoplastové matrice jsou především vhodné:

- Uhlíková
- Borová

- Keramická
- Kovová

Perspektivní jsou nové speciální polyesterové pryskyřice s menším množstvím adipové kyseliny a místo styrenu obsahující monomer diallyl – ftalát. Tyto pryskyřice umožňují rychlé vytvrzení (asi 2 min. při teplotě 180 °C), mají výbornou odolnost proti vlhkosti, životnosti směsi, neodpařují se a jsou levnější. V Tab. 3. můžeme vidět srovnání polymerních matric a jejich vlastností [8,10].

Tab. 3. Tepelná stabilita některých polymerních matric [10]

Typ a polymer	Symbol	Krystalizace	Teplota skelného přechodu Tg, [°C]	Maximální teplota použití
Reaktoplasty				
Polyesterové	PE	Ne	80 - 100	50
Epoxidové	Ep	Ne	120 - 180	150
Fenolytické	Ph	Ne	130 - 180	200
Bismaleimide	BMI	Ne	180 - 200	220
Polyamidové	PI	Ne	300 - 330	280
Termoplasty				
Polyamidové (Nylon)	PA	Ano	80	125
Polyfenylsulfidová	PPS	Ano	100	260
Polyetherketonová	PEEK	Ano	143	250
Polykarbonáty	PC	Ne	145	125
Polystyrenová	PS	Ne	190	150
Polyetherimidová	PEI	Ne	210	170
Polyethersulfonová	PES	Ne	230	180
Termoplastické polyimidy	TPI	Ne	270	240

Keramické a skleněné matrice:

Keramika je atraktivní materiál, který si zachovává svou pevnost při vysokých teplotách. Většinou se pro matrici (odolnou vysokým teplotám) používají:

- Oxidy
- Nitridy
- Karbidy prvků (Al, Si, Mg)

Pro vlákna je vhodný:

- Molybden
- Kolumbium
- Ocel
- Safírové whiskery
- Wolfram

Je – li součinitel teplotní roztažnosti vláken větší než součinitel teplotní roztažnosti matrice, může dojít k úplnému oddělení, takže adheze podél hranice je nulová. Na druhé straně nesmí být součinitel roztažnosti vláken ani příliš malý, neboť rovnoběžně s vlákny mohou v matrici vzniknout vysoká tahová napětí. Důsledkem vyztužení keramiky vlákny (i když jsou křehká) je vždy značné zvýšení houževnatosti. Vyztužení wolframovými vlákny zvýší podstatně rázovou pevnost (nejméně 10x) při vysokých teplotách až 1300 °C.

Skla a skleněné matrice mají vysokou chemickou stabilitu, ale ztrácí svou mechanickou pevnost při relativně nízkých teplotách a nízká odolnost proti tepelným šokům. Mnoho z těchto problémů může být vyřešeno vyztužením např. uhlíkovými vlákny. Navíc další výhodou by byla úspora hmotnosti.

Největší dosažitelná teplota využívání je různá podle druhu složek: pro C vlákna – matrice ze skla Pyrex 700 až 800 °C, C vlákna – skelná keramika 1300 °C, SiC vlákna – křemík 1410 °C [8,10].

2.5 Výroba vláknových kompozitů

Vlastní výrobní technologie spojení nosné části (vlákna) a pojiva (matrice) závisí do značné míry na materiálu matrice. U kompozitních materiálů s polymerní matricí se používá laminace, tlakové vytlačování, tažení. Při použití kovových matic se používá laminování, válcování, nebo vytlačování.

Určující faktory pro volbu technologie:

- Sériovost dílce
- Velikost a členitost výrobku
- Kvalita povrchu
- Vlastnosti jako pevnost a hmotnost
- Náklady

Technologické výrobní postupy používané u dlouhvláknových a krátkovláknových kompozitů jsou přehledně uvedeny v Tab. 4 [11,18].

Tab. 4. Výrobní technologické postupy kompozitních materiálů [18]

Výrobní technologie	Dlouhé vlákno, organická matrice	Dlouhé vlákno, kovová matrice	Krátké vlákna
Ruční ukládání	x		x
Vakuové zpracování v autoklávu	x		x
Lisování v přípravku	x	x	x
Navíjení	x	x	
Válcování tlakem		x	
Nastříkávání			x
Vytlačování		x	x
Tváření tahem	x	x	
Vstříkování			x
Prášková metalurgie			x

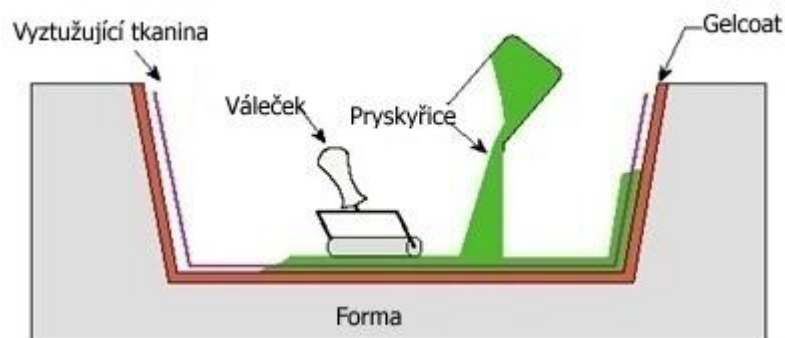
Výroba kompozitních materiálů je velmi široká. Rozděluje se podle způsobu přípravy na několik metod, které se dále větví. Uvedme si alespoň několik základních technologií výroby.

Ruční kladení:

Patří k nejstarším a nejjednodušším metodám a dosud nejrozšířenější technologie, patří mezi tzv. otevřené technologie. Forma se po neseparování obvykle nejprve opatří

gelcoatem. Gelcoat se nanáší ručně, nebo stříkáním o tloušťce 0,3 – 1 mm. Zajišťuje estetickou stránku povrchu dílce a tvoří ochranu vůči okolnímu prostředí.

Po částečném vytvrzení gelcoatu se kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které se prosycují iniciovanou pryskyřicí pomocí štětce, nebo válečkem. Technologie ručního kladení je vhodná pro malé až velkorozměrné výrobky od jednoduchých až po značně složité dílce při nižší až střední sériovosti a vzhledem k nenáročnosti a nízkým nákladům také pro výrobu prototypů [11].

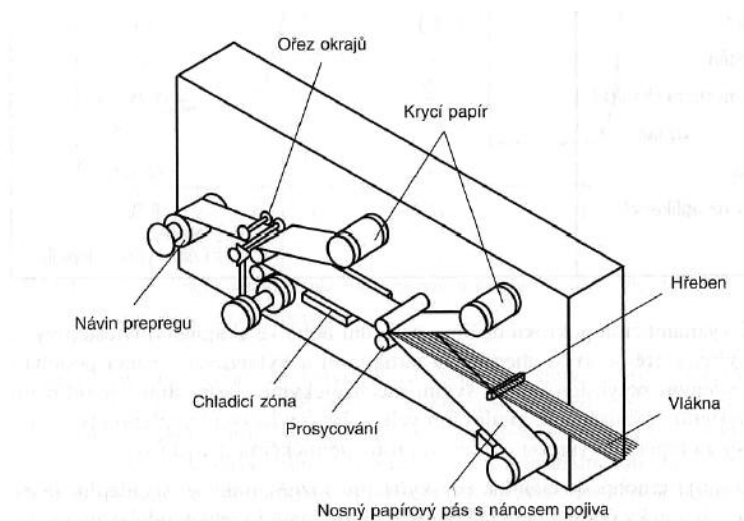


Obr. 18. Proces ručního kladení [19]

Lisování prepregů:

Pro výrobu dílů lisováním nebo v autoklávu se nejčastěji používá předimpregnovaná výztuž, tzv. prepreg. Při výrobě jednosměrně vyztuženého prepregu (Obr. 19) se odvíjejí pramence vláken ze stojanu s cívkami. Takto připravený pás vláken se ukládá na papírový nosič opatřený silikonovou vrstvou, na kterou byla předem nanesena vrstva pryskyřice.

Pás prepregu, prosycený pryskyřicí a oboustranně chráněný nosným pásem, prochází chladicí zónou, kde se zastaví vytvrzovací reakce. Následně putuje přes ořezávací zařízení na návin prepregu.



Obr. 19. Schéma výroby prepregu [16]

Prepreg se při technologii lisování pomocí vakuového vaku přikryje porézní separační folií, na kterou se položí hrubá odsávací tkanina a forma se utěsní pomocí folie a těsnění. Forma se vakuuje připojením k čerpadlu. Zhutnění se provádí atmosférickým tlakem, kdy díky zapojení vakua se laminát zbaví vzduchových bublin. Přebytečná pryskyřice se přitom odvede z odsávací tkaniny i ze žlábků, který je umístěn na obvodu formy. Schéma je totožné jako vidíme na Obr. 19.

Mezi výhody patří kontrolovaný proces zaručující lepší kvalitu a mechanické vlastnosti produktu. Technologie vhodná pro velkorozměrné výrobky, např. aplikace v leteckém průmyslu. Nevýhodami je technologicky složitý proces a zvýšené náklady na pomocný materiál [16,19].

Vakuová infuze:

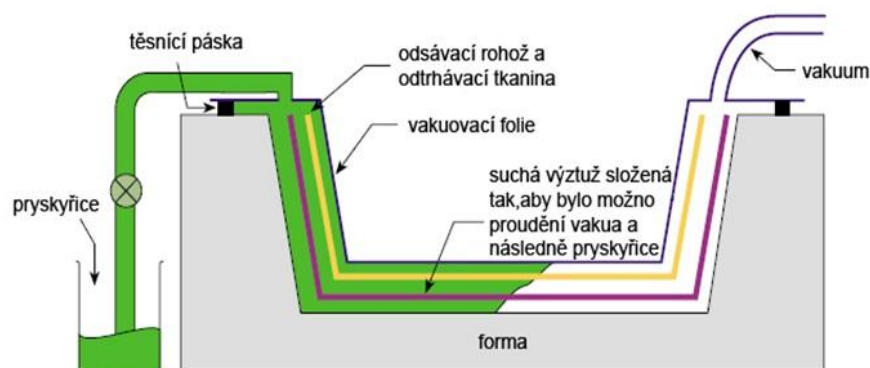
Vakuová infuze využívá podtlak pro distribuci pryskyřice pomocí systémů hadiček do připravené výztuže. Suché výztuže ve formě tkanin, nebo speciálně tkaných rohoží se postupně kladou do dutiny forem. Na tyto naskládané výztuže se postupně kladou další technologicky potřebné materiály, jakými jsou:

- Separací folie – zabezpečuje oddělení výrobku a ostatních pomocných materiálů (např. odsávací rohož)
- Vakuovací folie – pružná vakuovací folie umožňující aplikaci vakua v otevřené formě, tloušťka folie 0,08 mm a méně

- Odsávací rohož – netkaná textilie, která zabezpečuje aplikaci vakua (proudění vzduchu) a rovnoměrný tlak vakua na výztuže, vyráběna z materiálu PES
- Odtrhová tkanina – klade se přímo na výztuže, po odtrhnutí vytváří na výrobku drsný povrch potřebný na další operace (lepení, laminování, povrchové úpravy)

Pomocí vakuovací folie se všechny materiály ve formě zlisují. Pryskyřice se vytvrzuje při standardních atmosférických podmínkách. Jako výztuže se využívají tkaniny na bázi skleněných, uhlíkových, nebo aramidových vláken a pojiva ve formě polyesterových i epoxidových nízkoviskozních pryskyřic.

Metody vakuového prosycování jsou vhodné pro velkorozměrné díly jako trupy a paluby lodí, dílce pro kapotáž lokomotiv, lopatky větrných elektráren apod.[19].

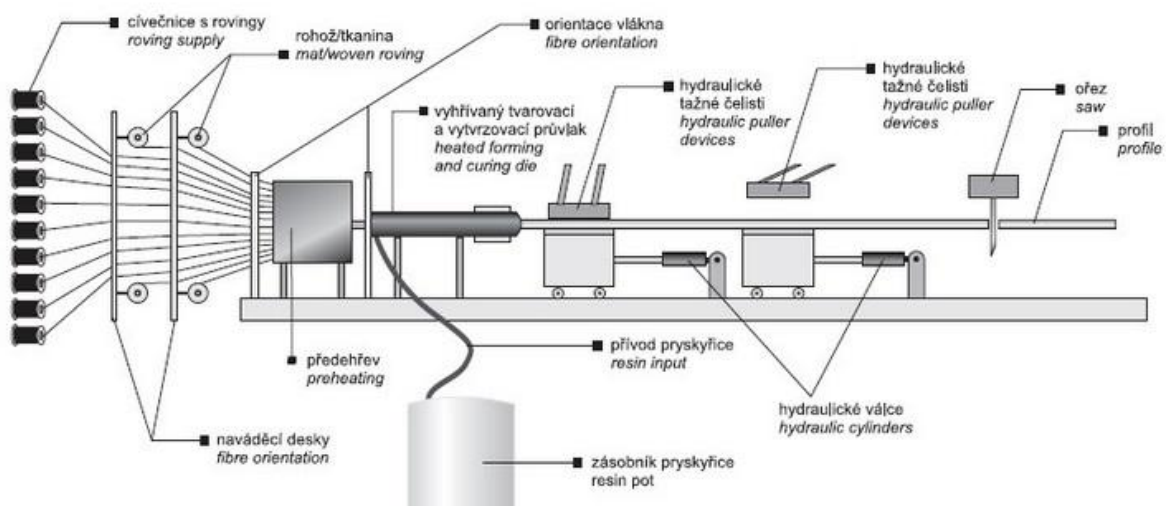


Obr. 20. Ukázka principu vakuové infuze [19]

Tažení (pultruze):

Touto metodou lze vyrábět velmi efektivně kontinuálním způsobem různé plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže až do 80 %. Výztuž se používá nejčastěji skleněná, uhlíková nebo i jiné pramence případně v kombinaci se stuhami z tkanin nebo rohoží pro získání příčného vyztužení.

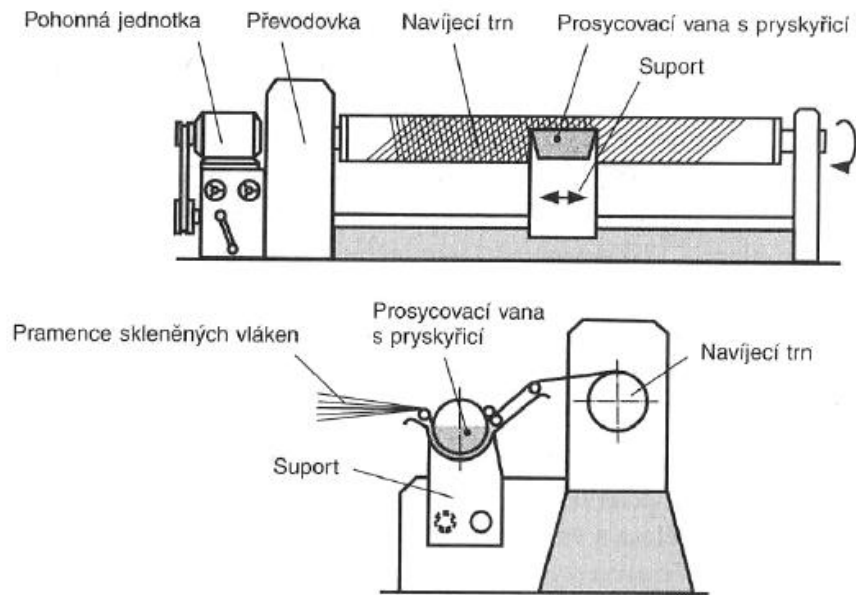
V prosycovací vaně se pramence vláken prosytí pryskyřicí. Vinylesterové, nebo epoxidové pryskyřičné systémy vytvrzující rychle za zvýšených teplot 80 – 160 °C. Tvarování (kalibrace a profilování) a současně i vytvrzování se provádí v průvzlaku. Dotvrzení probíhá v průběžné komoře. Schéma pultruze můžeme vidět na Obr. 21 [11,16].



Obr. 21. Schéma principu tažení (pultruze) [11]

Navíjení:

Technologií navíjení se vyrábějí dutá tělesa symetrické k ose otáčení jako např. nádrže, roury, tlakové zásobníky a další jednoduché prvky. Při navíjení se vzájemně spojují rotační pohyb trnu s dopředným a zpětným pohybem suportu, což umožňuje ukládat pramence prosycené pryskyřicí na trn podle určitého vzoru. Je možné navíjet i tkaniny a rohože [16].



Obr. 22. Schéma principu navíjení [16]

2.6 Výhody-nevýhody a použití

Výhody kompozitních materiálů:

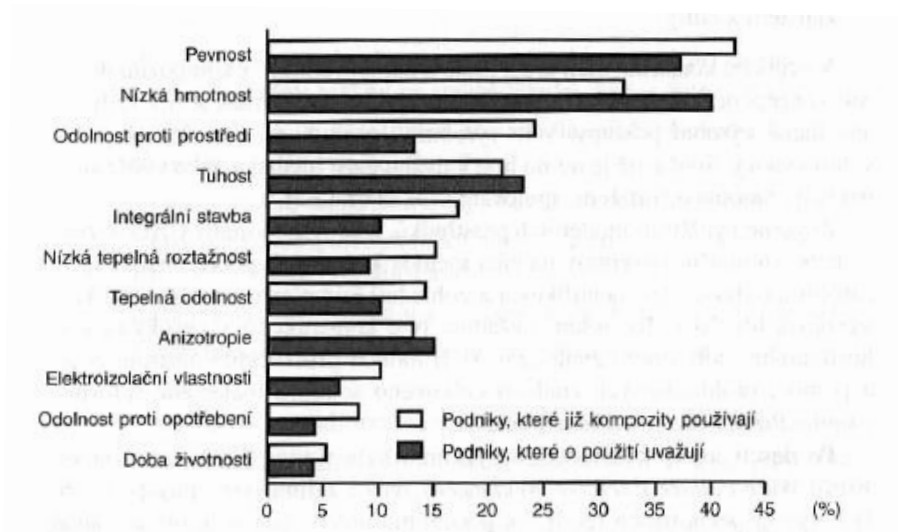
- Vysoká pevnost a tuhost, kterou lze přizpůsobit směru a druhu zatížení
- Velká pružnost při deformaci
- Značná přizpůsobivost každému tvaru
- Mnoho možností kombinace matrice a vláken
- Nízký součinitel teplotní délkové roztažnosti
- Vysoká odolnost proti korozi a stárnutí
- Značná odolnost vůči dynamickému namáhání při vysokém mechanickém tlumení

Nevýhody kompozitních materiálů:

- Nízká mez pevnosti v tahu ve směru kolmo ke směru uložení vláken (tvorba trhlin, oslabení spojení vlákna a matrice)
- Nízká odolnost proti působení vlhkosti za tepla
- Vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí
- Obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu
- Možné katastrofální následky při havárii

Podle oblastí použití lze kompozitní materiály rozdělit do tří skupin:

- Spotřební zboží – charakteristickým znakem je použití rohoží jako výztuže a vysoká kvalita povrchové úpravy
- Průmyslové aplikace – základem je použití pryskyřic se zvláštními užitečnými vlastnostmi, vyztužených převážně skleněnými vlákny
- Výrobky pro speciální aplikace – letectví, kosmonautika, sport – používají se pryskyřice s vynikajícími vlastnostmi (nejčastěji epoxidové) a uhlíková nebo aramidová vlákna [16]



Obr. 23. Vlastnosti polymerních kompozitů z pohledu podniků [16]

3 FRÉZOVÁNÍ

Mezi velmi rozšířené metody obrábění patří zejména frézování. Jeho velkou předností je poměrně velká výkonnost při velmi dobré kvalitě obrábění. Frézování se využívá pro obrábění rovinných, tvarových i rotačních ploch, pro obrábění drážek různých profilů i pro obrábění závitů a ozubení.

Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebrává břitou otáčejícího se nástroje (frézy). Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [2].

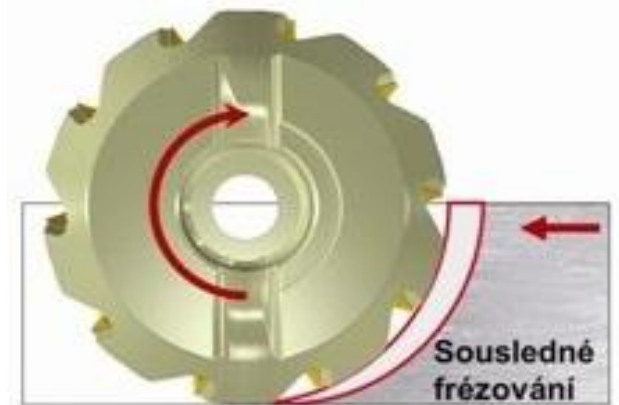
3.1 Kinematika řezného procesu

V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje:

- *Frézování sousledné*

Při sousledném frézování se fréza otáčí ve směru posuvu, kde řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu. Tloušťka třísky se zmenšuje od maximální hodnoty k 0.

Mezi výhody sousledného frézování patří vyšší trvanlivost břitů (použití vyšších řezných rychlostí a posuvů), použití jednodušších upínacích přípravků, menší sklon ke chvění, menší drsnost obrobeného povrchu, vyšší kvalita obrobeného obrobku. Naproti tomu však dochází k větší silové zátěži každého zubu při záběru. Použití sousledného frézování je vhodné pro houževnaté, měkké materiály [2,3].

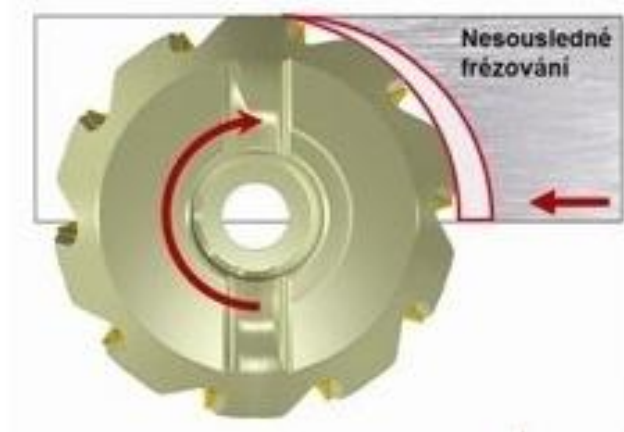


Obr. 24. Princip sousledného frézování [22]

- **Frézování nesousledné**

U nesousledného frézování je průřez třísky tvořen od nulové tloušťky do její maximální hodnoty. Při nesousledném frézování každá řezná hrana při každé otáčce frézy odebírá materiál o nulové tloušťky třísky.

To způsobuje zbytečné opotřebení, kratší životnost nástroje, větší riziko vibrací, větší omezení v upnutí nástroje, horší kvalitu povrchu atd. Nesousledné frézování je doporučováno pro starší či méně udržované frézky. Je také doporučováno pro obrábění komponentů s velmi hrubým či velmi tvrdým povrchem (litina), nebo nestabilních komponentů (tenká stěna). Lze doporučit i při frézování velmi tvrdými řeznými materiály [22].



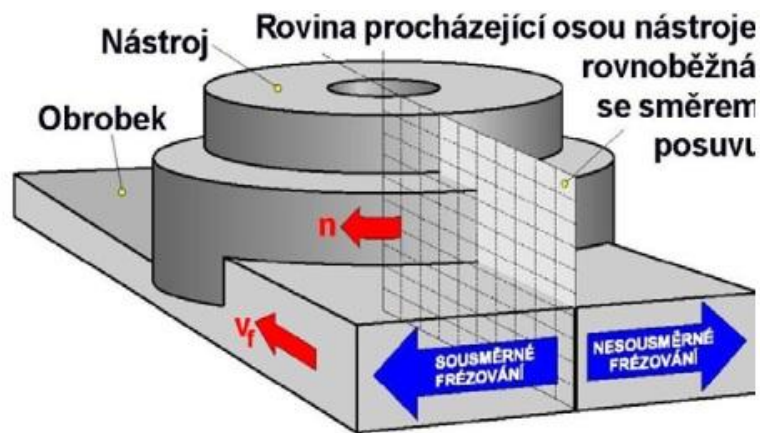
Obr. 25. Princip nesousledného frézování [22]

Mezi další možnosti frézování můžeme zařadit:

- **Čelní frézování**

Při tomto způsobu obrábění je osa rotujícího nástroje kolmá k obrobené ploše. Břity jsou vytvořeny na obvodu i čele nástroje. V závislosti na poměru šířky frézované plochy k průměru frézy a také s ohledem na polohu osy frézy vzhledem k frézované ploše může být frézování symetrické nebo nesymetrické.

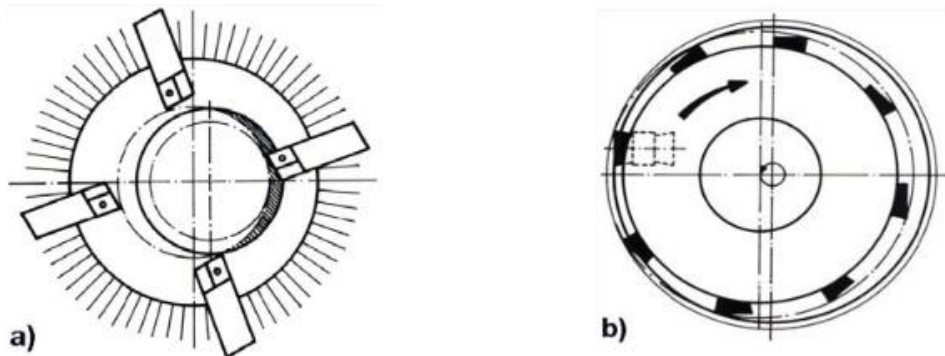
Tohoto způsobu se používá hlavně při výkonném obrábění velkých rovinných ploch frézovacími hlavami, nejčastěji s břitovými destičkami ze slinutého karbidu [2,20].



Obr. 26. Čelní frézování [21]

- **Okružní frézování**

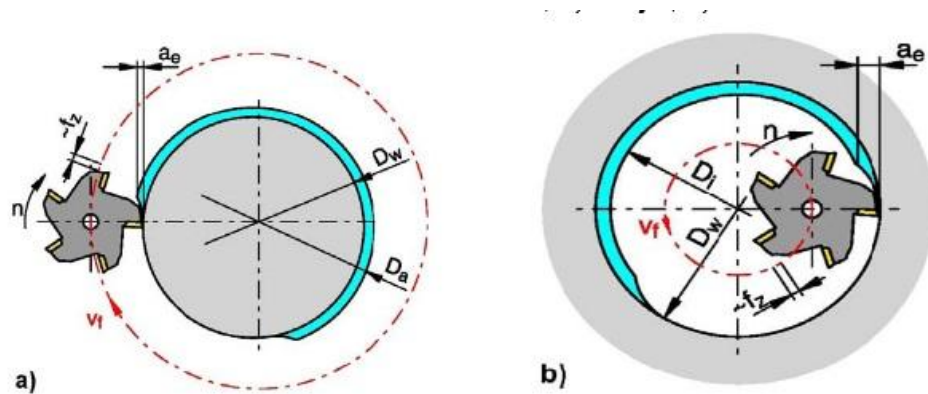
Při okružním frézování se frézuje obvodem rotačního nástroje. Osy nástroje i obrobku jsou obvykle vzájemně skloněné a hloubka řezu se nastavuje ve směru kolmém na osu obrobku. Okružním frézováním lze obrábět vnější i vnitřní válcové plochy [21].



Obr. 27. Okružní frézování a) vnější b) vnitřní [21]

- **Planetové frézování**

Planetové frézování se využívá pro obrábění vnějších i vnitřních válcových ploch, kruhových zaoblení, nebo vnitřních zápchů. Uplatňuje se především u obráběcích center vybavených kruhovou interpolací dráhy nástroje a také u CNC frézek [21].



Obr. 28. Planetové frézování a) vnější b) vnitřní [21]

3.2 Řezné podmínky

Řezné podmínky se volí podle druhu práce, druhu použité frézy a požadované jakosti obrobených ploch. Pro daný obráběný materiál a frézovací nástroj patří k základním řezným podmínkám řezná rychlost v_c a posuv na zub f_z . V technologické praxi se často předepisuje také posuvová rychlost v_f [2].

Pro zjednodušení se za řeznou rychlost v_c pokládá obvodová rychlost nástroje:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

kde:

D – průměr nástroje [mm]

n – otáčky nástroje [min^{-1}]

Posuv na otáčku fn je délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje. Posuv na zub f_z je základní jednotkou posuvového pohybu. Je to délka dráhy obrobku za dobu jedné otáčky nástroje dělená počtem zubů nástroje.

$$f_n = f_z \cdot z \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

kde:

z – počet zubů nástroje [-]

Vzorec pro výpočet posuvové rychlosti v_f :

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4)$$

kde:

n – otáčky nástroje [min^{-1}]

3.2.1 Průřez třísky

Jmenovitá tloušťka třísky h_i je v libovolné fázi odřezávání vyjádřena vztahem:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

kde:

f_z – posuv na zub [mm]

φ_i – úhel posuvového pohybu [$^\circ$]

Úhel posuvového pohybu φ_i se mění nejen v závislosti na poloze řešeného zubu, ale u fréz se šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici, také podél příslušného ostří.

Označení jmenovitého průřezu třísky pro polohu frézy je A_{Di} . Pro poměr naznačený na Obr. 31 se vypočítá ze vztahu:

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2] \quad (6)$$

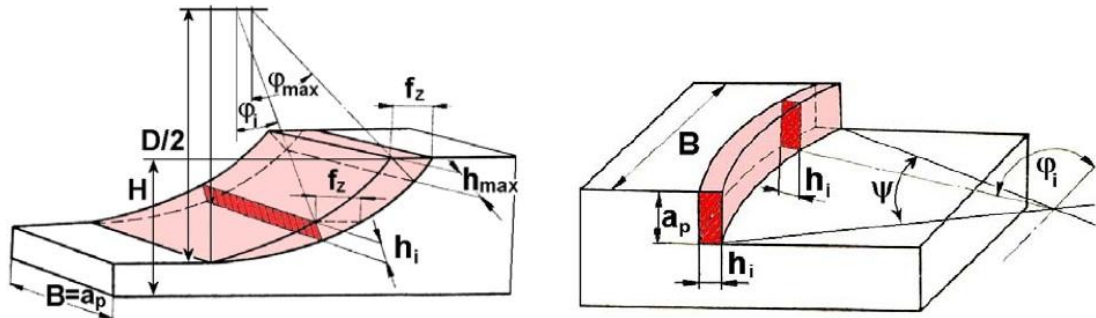
kde:

a_p – hloubka řezu [mm]

Pokud $\varphi_i = \varphi_{\max}$, potom maximální velikost jmenovitého průřezu třísky bude:

$$A_{D\max} = a_p \cdot h_{\max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \quad [\text{mm}^2] \quad (7)$$

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{2}{D} \sqrt{D \cdot H - H^2}$$



Obr. 29. Průřez třísky při válcovém a čelním frézování [21]

U čelního frézování také platí, že se tloušťka třísky mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu φ_i . Má na něj také vliv úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Z hlediska intenzity by měl být použit co nejmenší úhel nastavení. Se zmenšováním tohoto úhlu se však zvětšuje náchylnost na vznik samobuzeného kmitání. Platí tedy zásada použít, co nejnižší úhel nastavení, ale takový, u kterého ještě kmitání nevzniká. Relativně stabilně působí na obráběcí proces již úhel nastavení 60° . Okamžitou hodnotu lze vypočítat ze vztahu [2,21,30]:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

Jmenovitá šířka třísky b_i je pro libovolné φ_i konstantní a vypočítá se ze vztahu:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} pro $\kappa_r=90^\circ$:

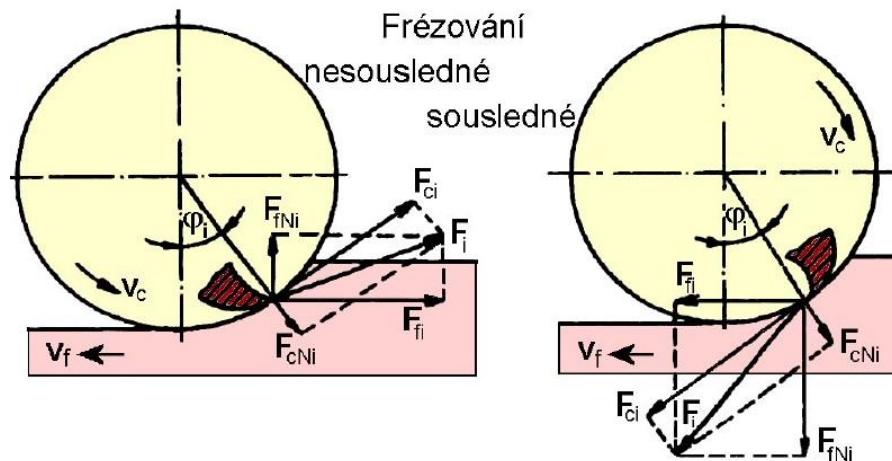
$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2] \quad (10)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky je při $\varphi_i=90^\circ$:

$$A_{Dmax} = a_p \cdot f_z \quad [\text{mm}^2] \quad (11)$$

3.2.2 Řezné síly

Při určování složek síly frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je pod úhlem φ_i [2].



Obr. 30. Rozklad síly řezání na zubu válcové frézy pro nesousledné a sousledné frézování, kde: F_i – celková síla řezání, F_{ci} – řezná složka, F_{cNi} – kolmá posuvová složka síly řezání, F_{fi} – posuvová složka síly řezání, F_{fNi} – kolmá posuvová složka síly řezání [21]

Na řeznou složku síly F_{ci} má vliv měrná řezná síla k_{ci} a průřez třísky A_{Di} :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{N}] \quad (12)$$

Měrnou sílu řezání k_{ci} lze vyjádřit ze vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{FC}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{FC}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

kde:

C_{FC} – konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]

x – exponent vlivu tloušťky třísky [-]

Po dosazení do vztahů (12) a (13):

$$F_{ci} = C_{FC} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad [\text{N}] \quad (14)$$

3.3 Trvanlivost a životnost nástroje

Trvanlivost nástroje je určena intervalem mezi nasazením nástroje do řezného procesu a vznikem poruchy, kterou končí provozuschopný stav nástroje. Je to tedy doba, po kterou je nástroj schopen efektivně plnit požadované funkce, které jsou identifikovatelné příslušnými parametry.

Trvanlivost břitu T je obecně závislá na řezných podmínkách. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti se pro jinak konstantní podmínky popisuje Taylorovým vztahem:

$$T = C_T \cdot v_c^{-m} \text{ [min]} \quad (15)$$

kde:

C_T – konstanta [-]

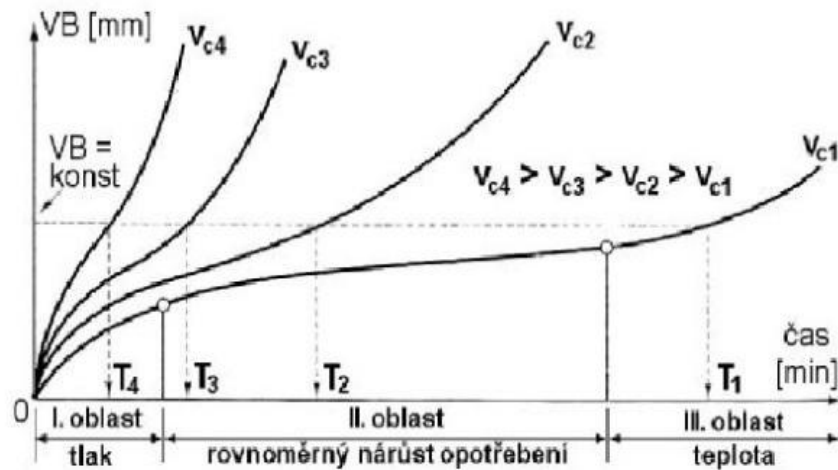
m – exponent [-]

v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Konstanta C_T závisí zejména na materiálu obrobku a nástroje a nabývá hodnot 10^8 až 10^{12} . Velikost exponentu m charakterizuje především vlastnosti řezného nástroje a způsobu obrábění.

- Nástrojové oceli $m = 10 - 8$
- Rychlořezné oceli $m = 8 - 5$
- Slinuté karbidy $m = 5 - 2,5$
- Řezná keramika $m = 2,5 - 1,5$

Postup při stanovování základní $T - v_c$ závislosti pro konkrétní kombinaci řezný nástroj – obráběný materiál vychází z definice trvanlivosti. Za ostatních konstantních řezných podmínek je daný materiál obráběn daným nástrojem minimálně při čtyřech různých řezných rychlostech, přičemž se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje (např. VB), který se vynáší do závislosti $VB = f(t)$, tuto závislost můžeme vidět na Obr. 31.

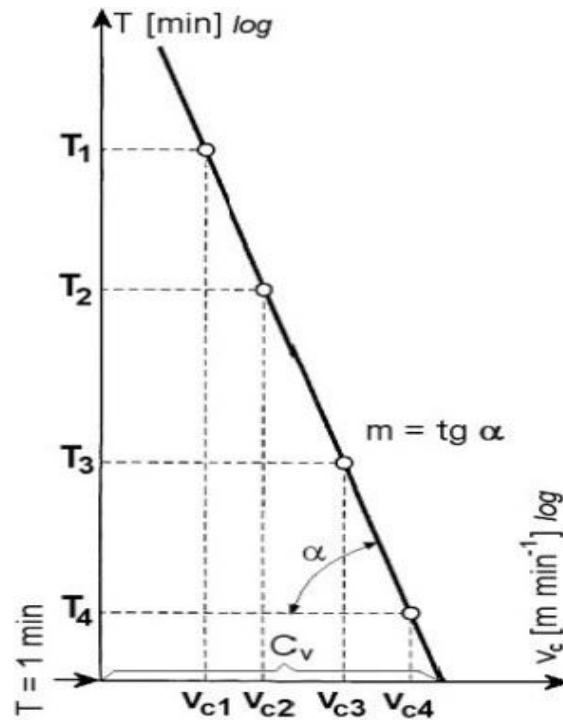


Obr. 31. Závislost opotřebení na čase při různých řezných rychlostech [4]

Při nejvyšší řezné rychlosti nemá trvanlivost klesnout pod hodnotu $T = 5$ minut. Pro obrábění ušlechtilých materiálů se připouští nižší trvanlivost, ne však pod hodnotu $T = 2$ minuty.

Pro předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (např. $VB = \text{konst.} = 0,3 \text{ mm}$) jsou z časových křivek VB odečteny hodnoty trvanlivosti T_1, T_2, T_3, T_4 , které odpovídají zvoleným řezným rychlostem v_{c1}, v_{c2}, v_{c3} a v_{c4} . Body o souřadnicích $v_{c1} - T_1$ atd. jsou pak vyneseny do diagramu (Obr. 32) s logaritmickými souřadnicemi T a v_c , kde tvoří přímku. Tato přímka odpovídá zvolené hodnotě VB . Exponent m vyjadřuje směrnici přímky $m = \text{tg } \alpha$. Nevýhodou uvedených základních vztahů $T - v_c$ závislosti jsou omezení následujícími podmínkami:

- Šířka záběru ostří $a_p = \text{konst.}$
- Posuv na otáčku $f = \text{konst.}$
- Opotřebení $VB = \text{konst.}$

Obr. 32. Zlogaritmovaný diagram $T - v_c$ [4]

V praxi jsou proto často používány rozšířené vztahy pro $T - v_c$ závislost ve tvaru:

$$v_{ct} = \frac{c_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (16)$$

kde:

c_{vT} – konstanta [-]

x_v – exponent, vyjadřující vliv hloubky řezu

y_v – exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku

Experimentální vztah pro výpočet řezné rychlosti pro frézování:

$$v_{cT} = \frac{c_v \cdot D^{x_D}}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_e} \cdot a_p^{x_v} \cdot f_z^{y_v} \cdot z^{x_z}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (17)$$

kde:

D – průměr frézy [mm]

T – trvanlivost nástroje [min]

a_p – hloubka frézování [mm]

a_e – šířka frézování [mm]

f_z – posuv frézy na zub [mm]

z – počet zubů frézy [-]

Životnost nástroje je definována jako součet všech jeho trvanlivostí, nebo též jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení. Nástroje, které lze ostřit jsou vyřazeny v případě, že byla odbroušena celá její funkční část. Vyměnitelné břitové destičky v případě, že byly použity všechny jejich břity. Z tohoto hlediska lze tedy životnost přebrušovaného nástroje vyjádřit vztahem:

$$Z = \sum T_i = (x + 1) \cdot T \quad (18)$$

kde:

T_i – jednotlivé trvanlivosti [min]

T – aritmetický průměr hodnot T_i [min]

x - počet možných ostření nástroje [-]

Pro nástroj s mechanicky upínanými vyměnitelnými břitovými destičkami se životnost stanoví podle vztahu:

$$Z = \sum T_i = q \cdot T \quad (19)$$

kde:

q – počet použitelných ostří destičky [-]

Trvanlivost a životnost břitu nástroje se nejčastěji vyjadřuje jako čas řezného procesu (min), nebo jako dráha řezu (m, km). Pro vrtání, vyhrubování a vystružování děr se trvanlivost nástroje často vyjadřuje jako délka obrobene díry (m, km) [2,4].

4 CNC PROGRAMOVÁNÍ

Číslicově řízené obráběcí stroje starších generací užívaly NC řídicí systémy, zatímco dnes jsou výhradně využívány CNC řídicí systémy. Číslicovým řízením (NC – Numerical Control) rozumíme automatické řízení procesu prostřednictvím zařízení, které využívá zavedená číselná data, zatímco činnost pokračuje. Číslicové řízení počítačem (CNC – Computer Numerical Control) je realizace NC používající počítač k řízení funkcí stroje (CSN EN ISO 2806). Jak z uvedeného plyne, je nutné rozlišovat dva základní pojmy: číslicové (numerické) řízení a CNC (NC) řídicí systém.

Tab. 5. Základní rozdíly NC/CNC [28]

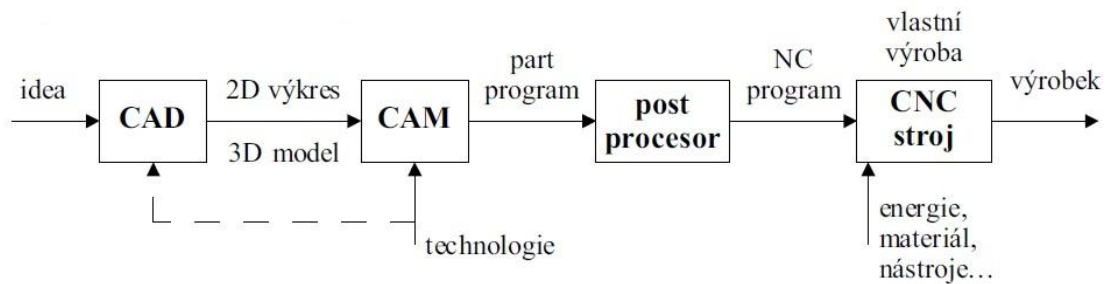
	NC stroj	CNC stroj
CPU	jednoúčelové automaty	mikropočítač s mikroprocesorem
ŘS - software	dán zapojením	software
Výkonové obvody	relé, zapojení	polovodiče, PLC automaty
Program	děrná páska	software - program

Číslicovým řízením (CNC) rozumíme v širším slova smyslu činnost číslicového počítače pro řízení pohybu nástroje nebo obrobku definovanou rychlostí pro dané trajektorii v prostoru nebo rovině. Při číslicovém řízení obráběcích strojů jde konkrétně o řízení procesu obrábění i pomocných funkcí na základě číselných údajů a příkazů. Všechny informace potřebné pro obrobění součásti jsou zaznamenány ve formě řady numerických znaků [25].

4.1 Tvorba programové dokumentace a metody programování

Programová dokumentace obsahuje mimo NC programu i další dokumenty, její obsah závisí na konkrétních požadavcích uživatele stroje. Programová dokumentace musí být kompletní a jednoznačná. Tvorbu programové dokumentace můžeme rozdělit do několika fází:

- Přípravné (návrh)
- Realizační
- Kontrolní



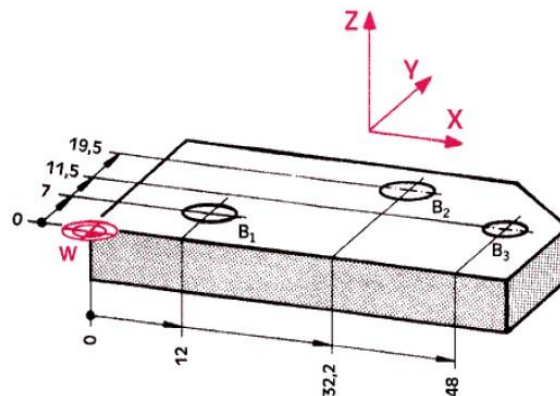
Obr. 33. Schéma procesu CNC programování [28]

Tvorbu programové dokumentace během jednotlivých fází reprezentuje řada činností, které lze shrnout do následující posloupnosti:

- Návrh posloupnosti operací na základě analýzy výkresové dokumentace
- Návrh nulového bodu a výchozího bodu NC programu
- Návrh posloupnosti technologických úkonů realizujících požadovaný výsledek
- Návrh použitých nástrojů
- Zpracování NC programu, seřizovacího listu, tabulky nástrojů, schéma upnutí
- Kontrola NC programu (simulační programy)

1) Absolutní programování

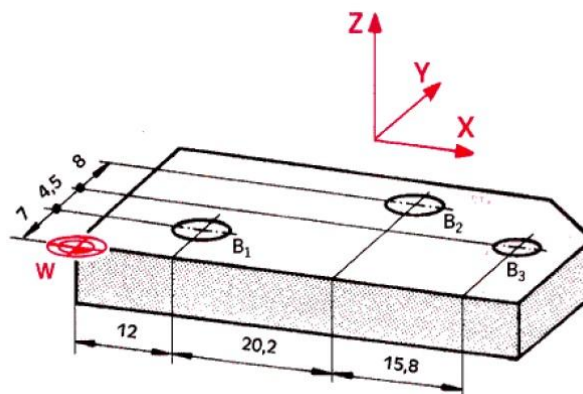
Absolutní programování vychází z principu definice souřadnic v NC programu v absolutních souřadnicích každého bodu vůči počátku souřadnicového systému (nulového bodu). Absolutní programování volíme příkazem G90. Schéma absolutního programování je na Obr. 34.



Obr. 34. Absolutní programování [27]

2) Přírůstkové programování

Přírůstkové programování vychází z principu definice souřadnic v NC programu v přírůstkové (relativní orientaci) vůči předchozímu bodu. Přírůstkové programování volíme příkazem G 91. Schéma přírůstkového programování je na Obr. 35 [26,27].



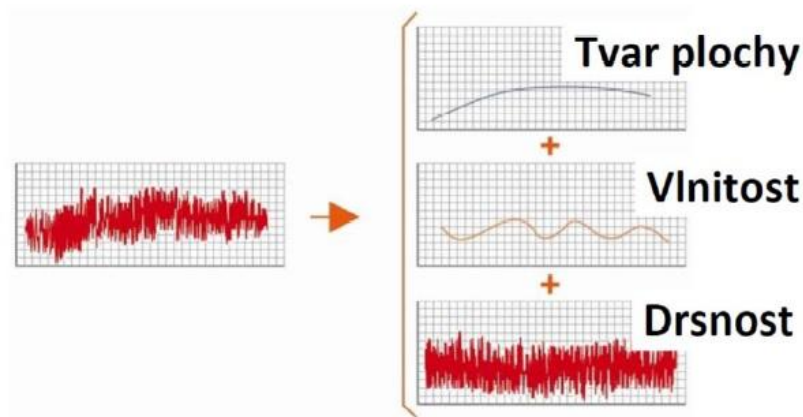
Obr. 35. Přírůstkové programování [27]

5 HODNOCENÍ JAKOSTI OBROBENÉ PLOCHY

Na každý funkční povrch strojní součásti jsou kladeny nejen požadavky na rozměrovou a geometrickou přesnost, ale i na jakost povrchu. Správně předepsaná jakost povrchu zajišťuje dlouhou životnost součásti a tím i spolehlivost celého stroje. Naopak nevhodně zvolená drsnost vede ke zbytečnému zvyšování výrobních nákladů, nebo k poruše.

5.1 Základní pojmy a značení drsnosti ploch

Obecný funkční povrch součásti lze rozdělit na tři části, které odlišuje vlnová délka – viz Obr. 36.



Obr. 36. Obecný povrch a jeho části [23]

Nejčastěji používané parametry drsnosti:

- R_a – střední aritmetická úchylka drsnosti

R_a je střední hodnota vzdálenosti bodu zjišťovaného profilu (y , x) od střední čáry v délce měřeného úseku. Vypovídající schopnost parametru je nízká, protože R_a nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. Hodnota R_a se udává v μm .



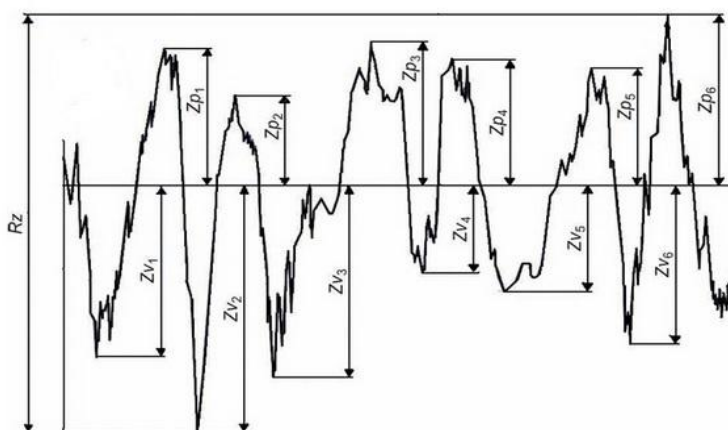
Obr. 37. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a (šedivě) [23]

- R_q – průměrná kvadratická úchylka profilu

Parametr R_q můžeme využít pro výpočet velikosti obsahu prohlubně. Hodnota R_q je citlivější na nežádoucí výstupky a prohlubně kontrolovaného povrchu, a proto zpravidla vykazuje vyšší hodnoty než R_a . Průměrná kvadratická úchylka se využívá především v optickém průmyslu.

- R_z – výška nerovnosti

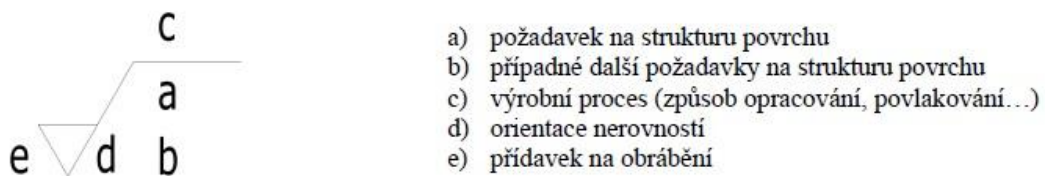
R_z je střední vzdálenost mezi nejvyššími a nejnižšími body zjištěného profilu od jeho střední čáry v délce měřeného úseku. Orientačně lze tuto hodnotu určit jako čtyřnásobek R_a [3,23,24].



Obr. 38. Výška nerovnosti R_z [24]

Značení drsnosti:

Značení drsnosti povrchu v technické dokumentaci určuje norma ISO 1302. Úplné složení značky je uvedeno na Obr. 39.



Obr. 39 Značení drsnosti povrchu [23]



Obr. 40. Základní druhy označení pro drsnost povrchu [23]

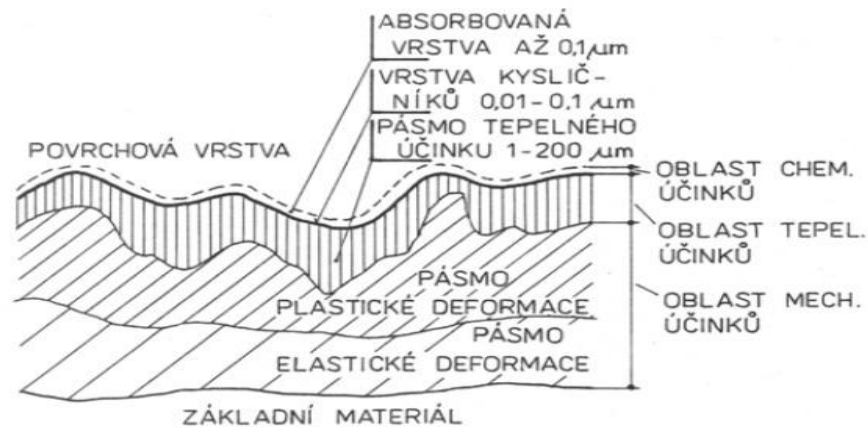
Tab. 6. Přehled dosahované drsnosti při různých typech obrábění [23]

Způsob obrábění	Dosahovaná přesnost povrchu Ra (μm)		
	Hrubování	Obrábění na čisto	Jemné obrábění
Soustružení	12,5 - 100	1,6 - 12,5	0,2 - 1,6
Frézování	6,3 - 25	1,6 - 6,3	0,8 - 1,6
Vrtání	12,5 - 100	1,6 - 6,3	0,4 - 1,6
Hoblování a obrážení	6,3 - 12,5	3,2 - 6,3	1,6 - 3,2
Broušení	0,8 - 6,3	0,2 - 1,6	0,05 - 0,4

Funkční vlastnosti povrchu nejsou závislé jen na vnější vrstvě, která tvoří rozhraní, ale na oblasti směřující pod jeho povrch. Využití charakteristik povrchu směrem do hloubky materiálu je jistým stupněm klasifikace povrchu. Tomu odpovídá i rozdělení oblastí povrchu Tab. 7.

Tab. 7. Oblasti povrchu, jejich hloubka a funkční ovlivnění [3]

Oblast	Hloubka	Funkční ovlivnění
horní monovrstva	0,1 nm	adsorpce, chemická reaktivita
tenký film	0,1 nm - 100 nm	odrazivost, tření, koroze, tepelná vodivost
vnější povrch	0,1 - 10 μm	zpevnění, struktura zrn, aerosol
silný film	> 10 μm	antikoroziční vrstvy, nátěry



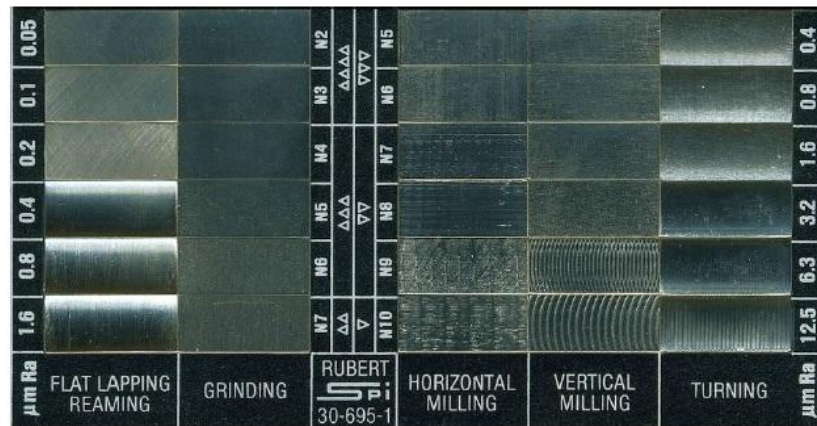
Obr. 41. Ukázka vrstev materiálu [3]

5.2 Měření drsnosti povrchu

V dnešní moderní době, kdy jsou vysoké nároky na struktury povrchu funkčních ploch, bylo vytvořeno mnoho měřících metod. To mělo za následek zavedení řady nových parametrů struktury povrchu. Do budoucna se intenzivně rozvíjí otázky týkající se 3D charakteristik struktury povrchu.

Metody měření povrchu:

- Metody kvalitativní – může se jednat o porovnávání vzorkovnice s reálným povrchem, k čemuž slouží dodnes využívané vzorkovnice povrchů (Obr. 42), jedná se však o již zastaralou metodu založenou na individuálních schopnostech posuzujícího pracovníka, nevýhodou je subjektivní hodnocení a určení pouze jednoho parametru drsnosti – nejčastěji R_a



Obr. 42. Vzorkovnice drsnosti povrchů [23]

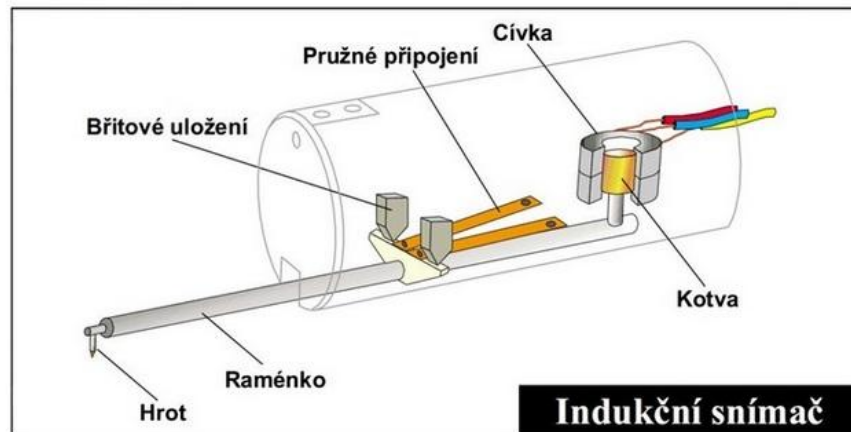
- Metody kvantitativní (parametrické) – využívají matematický popis parametrů povrchu, k čemuž se využívají v dnešní praxi zcela běžně profilometry

Další rozdělení přístrojů pro hodnocení povrchů je na:

1. Přístroje kontaktní

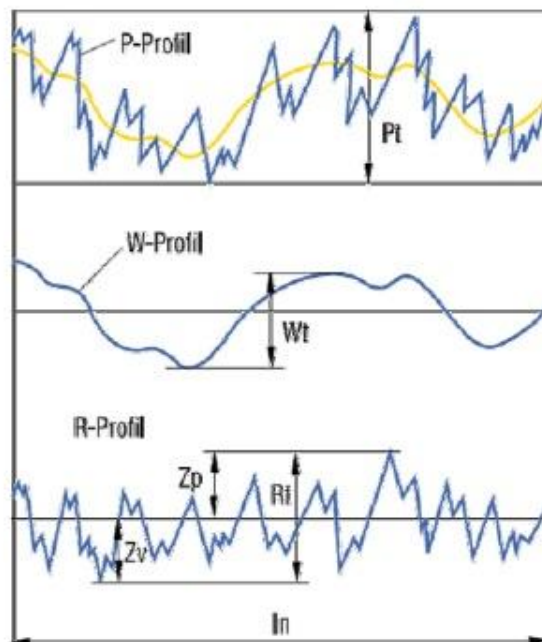
Kontaktní přístroje se skládají ze dvou částí – mechanické a elektronické. Mechanická část se skládá ze stolku, na který se umísťuje měřená část a z ramena se snímacím hrotem. Elektronická část pak slouží k transformaci mechanického signálu generovaného snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál.

Pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný co do přímosti a rovnoměrnosti. Rychlost musí být zvolena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému. Tyto přístroje dále umožňují přenos naměřených dat do PC pro jejich podrobnější analýzu. Pro tento systém snímání je charakteristická malá měřicí síla (tedy malá síla přitlačující hrot k povrchu), což minimalizuje nebezpečí poškození měřeného povrchu.



Obr. 43. Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [24]

Pohybem snímače se získá dvourozměrný profil jako obraz povrchu součásti. Filtrací podle ISO 16610-21:2011 se z nefiltrovaného primárního profilu (P - profil) získá profil drsnosti (R - profil) a profil vlnitosti (W - profil). Hodnocení drsnosti povrchu je tedy více krokový proces, ve kterém je nutné odstranit pomocí proložení a filtrování tvar a vlnitost povrchu. Získané profily můžeme vidět na Obr. 44.



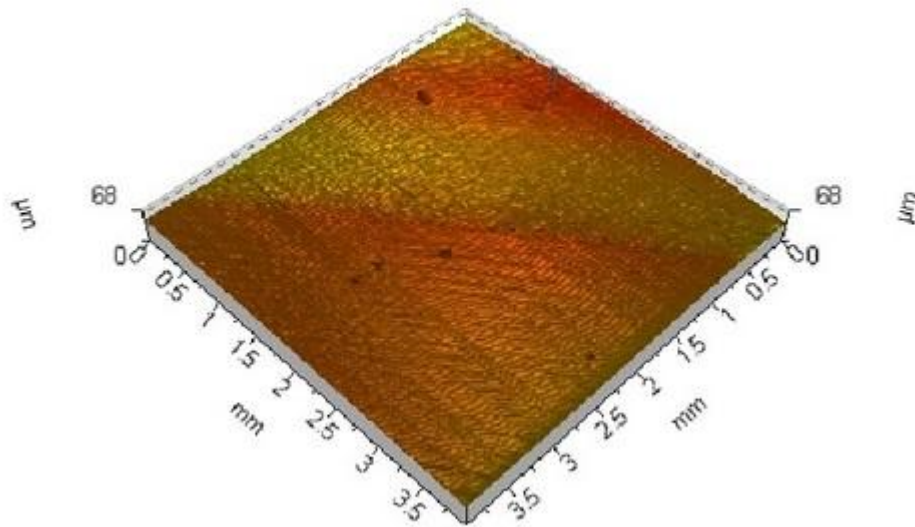
Obr. 44. Příklad výsledků profilu z drsnoměru P_t – hloubka profilu, W_t – výška vlnitosti, R_t – největší hloubka drsnosti, l_n – vyhodnocovaná délka [23]

Správnost výsledků ovlivňuje:

- Měřicí přítlačná síla (cca 0,00075 N)
- Poloměr zaoblení snímacího hrotu (2 μ m, 5 μ m, 10 μ m)
- Vrcholový úhel snímacího hrotu (60°, 90°)
- Rychlost změny měřicí síly

2. Přístroje bezkontaktní

V laboratorní a vědecké praxi se především využívají přístroje na hodnocení povrchů pracující na bezkontaktním principu, a tedy využívajících bezkontaktních snímačů. Z nichž se nejčastěji využívá snímačů CLA (Chromatic Length Aberration) a snímačů laserových. Rozlišitelnost snímačů CLA je v μ m, laserových snímačů je přibližně o řád nižší.



Obr. 45. Nasnímaný 3D povrch pomocí CLA snímače [24]

Moderní interferometrické metody mohou poskytnout rychlé, bezkontaktní a přesné měření topografie povrchů běžných strojních součástí. Např. metoda skenovací interferometrie s využitím bílého světla poskytuje nezbytný vertikální rozsah pro tato měření. Výhodou je zobrazení drsnosti povrchu na celé funkční ploše součásti včetně 3D vizualizace [23,24].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

Cílem praktické části je vyhodnotit a porovnat použití různých druhů fréz pro obrábění kompozitních materiálů. Frézování kompozitních materiálů bude prováděno v prostorách dílny na 3osé CNC frézce C-442 HWT firmy AZK pomocí vytvořených CNC programů. Frézy budou od tří firem v různém provedení řezné geometrie. Těmito nástroji budou obrobena uhlíkové kompozity a kompozit sklolaminátový.

Pro podrobnou analýzu bude zapotřebí praktickou část rozdělit na dva experimenty. V prvním experimentu se bude obrábět již zmíněný uhlíkový kompozit. Hodnotícím kritériem v tomto případě budou řezné síly spolu s průběhem, který je zaznamenám v Příloze PI. Mezi další velmi důležitá kritéria můžeme zařadit kvalitu obroběných ploch a také schopnost nástrojů dodržet požadovaný rozměr drážky. Dále je hodnoceno opotřebení jednotlivých nástrojů a podle velikosti opotřebení nástroje byly voleny odpovídající nástroje pro obrábění ve druhé části experimentu.

V něm bude pozornost zaměřena zejména na delaminační faktor a poškození sklolaminátu s následným srovnáním povrchů. Sledování dodržení požadovaného rozměru drážky spolu se sledováním příkonu stroje a konečné nasnímání opotřebení nástrojů při jednotlivých řezných podmínkách je součástí vyhodnocení.

7 AKTUÁLNÍ STAV VÝZKUMU A VÝVOJE V OBLASTI OBRÁBĚNÍ A ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Současný výzkum se pohybuje na rozhraní zabývající se problematikou kompozitních materiálů, přírodních kompozitů a vzrůstající výrobou kompozitních materiálů. Hlavní důraz je kladen na pochopení vztahů mezi mikrostrukturou a molekulární strukturou těchto materiálů včetně jejich mechanických vlastností [38].

Řada autorů podává zprávy o experimentálních výzkumech v oblasti frézování uhlíkových kompozitů a ukazují, že typ a orientace vlákna, řezných parametrů a geometrie nástroje mají zásadní vliv na obrobitelnost. Pedro Reis a J.P. David uvádí ve svém výzkumu, že dvoubřité nástroje poskytují lepší drsnost Ra než nástroj se šesti břity a také uvádí závislost, kdy dvoubřité nástroje prokázaly menší hodnoty delaminačního faktoru. Dále poukazují na závislost hodnoty Ra , která se zvyšuje s rostoucí rychlostí posuvu a klesá s řeznou rychlostí [37].

Santhanakrishnan, Ramulu a kol. [41] provedli studie na obrábění polymerních kompozitů a potvrdil také závěr, že zvýšení řezné rychlosti vede k lepší kvalitě povrchu. Hintze Wolfgang a kol. [41] zkoumali případ delaminace z horních vrstev v průběhu obrábění a ukázaly, že delaminace závisí do značné míry na orientaci vláken a ostrosti nástroje. Nová studie poukazuje na mechanismy opotřebení. Bylo prokázáno, že maximální opotřebení hřbetu dochází při řezání vláken orientovaných na -45° k břitu. Nedávný výzkum se zabýval vrtáním a měřením sil získaných v rovině ostří a uvádějí, že nejvyšší síly byly zaznamenány při orientaci vláken 60° a 90° [41,42].

Hlavní oblast vývoje kompozitů v současnosti představují konstrukční materiály využívané v letectví, motoristickém sportu a pro výrobu větrných elektráren. Jak dokazuje oficiální zpráva od NASA, tempo rozvoje kompozitních materiálů je vysoké. NASA zveřejnila 2. dubna 2015, že vytvoří partnerství veřejného a soukromého sektoru pěti organizacemi rozvoje znalostí o kompozitních materiálech, které by mohly zlepšit výkon budoucích letadel. Toto partnerství přispěje k udržení vedoucí pozice v leteckém průmyslu [39]. Použití kompozitních materiálů se čím dál více prodírá do oblasti automobilového průmyslu, nebo také do stavebnictví. Stavebnictví využívá přibližně 17 % z kompozitních materiálů podle objemu a rostl tempem 24 % v letech 2011 až 2014. To jen dokazuje, jak kompozitní materiály vstupují do všech průmyslových odvětví závratným tempem [40].

8 NÁSTROJE PRO OBRÁBĚNÍ

Pro zpracování praktické části byly zakoupeny nástroje od firem SECO, WNT a K – TOOLS. Všechny uvedené nástroje (frézy) jsou určeny k obrábění kompozitních materiálů. Všechny uvedené nástroje mají průměr 6 mm s rozdílnou geometrií. Velká většina (7 z 8 nástrojů) jsou opatřeny povlaky. O jaké povlaky se jedná, můžeme vidět v tabulkách u jednotlivých nástrojů. Pouze jediný nástroj a to od firmy SECO byl vybrán bez povlaku.

8.1 Nástroje firmy SECO

Firma SECO uvedla novou komplexní řadu pro obrábění kompozitních materiálů. Z této řady byly použity 4 frézy. Frézy řady JC (Jabro Composite) 800 jsou určeny pro odstranění přerušení vlákna a delaminace. Stejně jako vyšší kvalita hran povrchu [32].

8.1.1 JC 860 HONEYCOMB ROUTER

Nástroj JC 860 (dále SECO 1) slouží především k bočnímu frézování a frézování drážek. Mezi přednosti patří eliminace axiálních sil, menší zatížení vřetena, snížení vibrací a rozvrstvení (tzv. delaminace). Primárně se využívá při frézování sendvičových konstrukcí v leteckém průmyslu.



Obr. 46. Fréza JC 860 HONEYCOMB ROUTER [32]

Tab. 8. Parametry SECO 1 [31,32]

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	Slinutý karbid
Počet břitů	5
Celková délka/řezná část [mm]	70/18
Úhel stoupání šroubovice/ úhel čela	15°/0°
Povlak	DURA
Maloobchodní cena [Kč]	2 780

8.1.2 JC 880 LOW HELIX

JC 880 LOW HELIX (dále SECO 2) poskytuje podle výrobce 5x až 6x vyšší životnost než nepovlakované nástroje. Tento čtyřbřitý nástroj zaručuje prakticky nulovou hodnotu delaminace a tříštění.



Obr. 47. Fréza JC 880 LOW HELIX [32]

Tab. 9. Parametry SECO 2 [31,32]

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	Slinutý karbid
Počet břitů	4
Celková délka/řezná část [mm]	65/18
Úhel stoupání šroubovice/ úhel čela	10°/6°
Povlak	DURA
Maloobchodní cena [Kč]	2 420

8.1.3 JC 870 MULTI – FLUTE ROUTERS

Na Obr. 48 můžeme vidět dvě varianty použitých nástrojů. Na levé straně je nanesen povlak DURA (diamantový CVD povlak). Nástroj s povlakem bude dále označen jako SECO 3 a bez povlaku SECO 4. Zoubkování na průměru nástroje zvyšuje přilnavost povlaku. Obě varianty jsou aplikovatelné pro všechny uhlíkové a skleněné vlákna kompozitu. Typické ostré zuby vychylují řezné síly, což napomáhá i ke snadnějšímu vnikání do materiálu.



Obr. 48. Fréza JC 870 MULTI – FLUTE ROUTERS [32]

Tab. 10. Parametry SECO 3 [31,32]

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	Slinutý karbid
Počet břitů	-
Celková délka/řezná část [mm]	65/18
Úhel stoupání pravé a levé šroubovice/ úhel čela	25° a 27°/7°
Povlak levé frézy/pravé frézy	DURA/bez povlaku
Maloobchodní cena bez povlaku / s povlakem [Kč]	753 / 2 070

8.2 Použité nástroje firmy WNT

8.2.1 Monolitní TK fréza na voštinové kompozitní materiály

Monolitní TK fréza (dále WNT 1) využívající se při obrábění voštinových kompozitních materiálů. Využití pro vysokorychlostní obrábění drážek nebo bočního frézování.



Obr. 49. Monolitní TK fréza na voštinové kompozitní materiály [33]

Tab. 11. Parametry WNT 1 [33]

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	Slinutý karbid W
Počet břitů	-
Celková délka/řezná část [mm]	50/16
Úhel stoupání šroubovice/ úhel čela	47°/10°
Povlak	multivrstvý Ti (HV _{0,05} 2800)
Maloobchodní cena [Kč]	1 525

8.2.2 Monolitní TK fréza na plasty vyztužené vláknem

Na Obr. 50 je monolitní levořezná fréza (dále WNT 2) na plasty vyztužené vláknem. Rovněž se využívá pro vysokorychlostní boční frézování a frézování kapes.



Obr. 50. Monolitní TK fréza levořezná na plasty vyztužené vláknem [33]

Tab. 12. Parametry WNT 2 [33]

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	Slinutý karbid W
Počet břitů	2
Celková délka/řezná část [mm]	50/18
Úhel stoupání šroubovice/ úhel čela	13°/30°
Povlak	multivrstvý Ti (HV _{0,05} 2800)
Maloobchodní cena	2 156

8.2.3 Monolitní TK fréza

Posledním zástupcem od firmy WNT byla použita pravořezná fréza s ozubením do kříže (dále WNT 3). Na rozdíl od předešlých dvou nástrojů je zde použit diamantový povlak.



Obr. 51. Monolitní pravořezná TK fréza [33]

Tab. 13. Parametry WNT 3 [33]

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	Slinutý karbid W
Počet břitů	1
Celková délka/řezná část [mm]	75/35
Úhel stoupání šroubovice/ úhel čela	10°/0°
Povlak	Diamant - monovrstvý (HV _{0,05} 10000)
Maloobchodní cena	3 394

8.3 Použité nástroje firmy K - TOOLS

8.3.1 Univerzální fréza 15002D na obrábění grafitu

Zástupce, který není primárně určen na obrábění kompozitních materiálů. Doporučené použití této univerzální frézy je pro hrubování grafitu. Bude však porovnáno s nástroji výhradně pro obrobiteľnost kompozitních materiálů.

Povlak s označením CC (Cemented Carbide) a jeho upřesněním povlaku BALINIT® DIAMOND DIA slouží především pro frézování grafitu a uhlíkových kompozitů. Tento speciální povlak snese teploty až 850 °C a je extrémně tvrdý a chemicky stabilní [36].



Obr. 52. Univerzální fréza 15002D na obrábění grafitu [34]

Tab. 14. Parametry KTOOLS [34]

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	HM MG10
Počet břitů	3
Celková délka/řezná část [mm]	80/10
Úhel stoupání šroubovice/ úhel čela	15°/30°
Povlak	CC Dia 08
Maloobchodní cena	2 779

Tab. 15. Shrnutí použitých nástrojů

	Označení	SECO 1	SECO 2	SECO 3	SECO 4	WNT 1	WNT 2	WNT 3	KTOOLS
	Výrobce	SECO	SECO	SECO	SECO	WNT	WNT	WNT	KTOOLS
	Obchodní označení	JC 860 HONEYC OMB ROUTER	JC 880 LOW HELIX	JC 870 MULTI - FLUTE ROUTE RS	JC 870 MULTI - FLUTE ROUTE RS	HCC.6,0 .10°.R.H A.Ti28	BFC.6,0.Z 2.30°.R.L. HA.L.Ti2 8	CFK.6,0 .0°.R.H A.DC10	15002D
Parametry	Udávaný průměr řezné části [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
	Skutečný průměr řezné části [mm]	5,81 ±0,07	5,96 ±0,02	5,92 ±0,01	5,91 ±0,02	5,96 ±0,03	5,94 ±0,02	5,97 ±0,02	5,91±0,03
	Úhel šroubovice/čela [°]	15°/0°	10°/6°	25°a27°/ 7°	25°a 27°/7°	47° /10°	13°/30°	10°/0°	15°/30°
	Počet břitů	5	4	-	-	-	2	1	3
	Povrchová úprava	DURA	DURA	DURA	bez povlaku	multi- vrstvý Ti (HV _{0,05} 2800)	multivrst- vý Ti (HV _{0,05} 2800)	Diamant - mono- vrstvý (HV _{0,05} 10000)	CC Dia 09
	Maloobchodní cena [Kč]	2 780	2 420	2 070	753	1 525	2 156	3 394	2 779

9 FRÉZOVÁNÍ UHLÍKOVÉHO KOMPOZITU

První experiment představuje obrábění uhlíkových kompozitů 8 nástroji na 3osé CNC frézce C-442 HWT firmy AZK Obr. 53, jejíž parametry jsou uvedeny v Tab. 16. Obrábění vzorků probíhalo v prvním případě ve směru příčném, což si můžeme představit jako frézování drážky s konstantním úhlem 180° a podélném (bočním) frézováním viz Obr. 56. Schéma frézování můžeme vidět na Obr. 55. Hlavní počítač provede načtení CNC programu a zašle údaje do stroje. Zde pomocí nástrojů dochází k obrobení vzorků. Hodnoty naměřené dynamometrem zachycuje převodník signálu propojený s dalším počítačem. V tomto počítači můžeme sledovat průběh řezných sil a následně vyhodnotit výsledky. Řezné podmínky byly u všech nástrojů konstantní a frézování probíhalo podle zpracovaného CNC programu.



Obr. 53. CNC Frézka C-442 HWT

Tab. 16. Parametry CNC frézky C-442 HWT

Formát NC programů	ISO, APT, HGPL
Motor vřetena	1000 W
Otáčky vřetena	2000 - 25000 ot/min
Programovatelná rychlost posuvu	Max. 3m/min
Programovatelný krok	0,00625 mm
Maximální upínací průměr nástroje	10 mm
Velikost upínací plochy	500 mm x 500 mm - 8 mm T - drážky

V první fázi byly měřeny složky řezných sil, kvalita obrobených ploch a také přesnost rozměru drážky. Následně bylo provedeno vyhodnocení a srovnání kvality obrobených vzorků. V posledním kroku následovalo nasnímání opotřebení nástrojů a jejich případné vyřazení pro další experiment.

9.1 CNC programy pro obrábění uhlíkových kompozitních vzorků

Pro rychlejší, přesnější, snadnější a pohodlnější práci bylo nutné vytvořit CNC programy jak pro příčné frézování, tak i pro podélné frézování. Tyto programy jsou nedílnou součástí experimentu a bylo zapotřebí je vytvořit a použít. V programech můžeme vidět zvolené řezné podmínky spolu se schémata, které najdeme v kapitole 9.1.1.

Příčné frézování:

N01 G00 Y0

N02 M03 S5310 T01 Z0

N05 G01 Z-1.25 F550

N10 G01 Y0 X-150

N15 G00 Z10

N20 G00 X0

N25 M30

Podélné frézování:

N01 G00 X20 Y0 Z30

N02 M03 S5310 T01

N05 G00 Z-12.5

N10 G01 Y2

N15 G01 X-200 F550

N20 G00 Z30

N25 G00 X20

N30 G01 Y-0.4 F550

N35 G01 Z-12.5

N40 G01 X-200

N45 G00 Z30

N50 G00 X20 Y0

N55 M30

9.1.1 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly zvoleny totožné pro obrábění příčné i podélné s ohledem na následné porovnávání.

Tab 17. Řezné podmínky při obou metodách frézování uhlíkových kompozitů

Řezné podmínky pro příčné frézování		Řezné podmínky pro podélné frézování	
Řezná rychlost v_c	100 m/min	Řezná rychlost v_c	100 m/min
Posuvová rychlost v_f	550 [mm/min]	Posuvová rychlost v_f	550 [mm/min]
Otáčky n	5310 [ot. /min]	Otáčky n	5310 [ot. /min]
Šířka záběru a_e	6 mm	Šířka záběru a_e	1 a 2,4 mm
Hloubka řezu a_p	1,25 mm	Hloubka řezu a_p	40 % nástroje
Chlazení	bez chlazení	Chlazení	bez chlazení

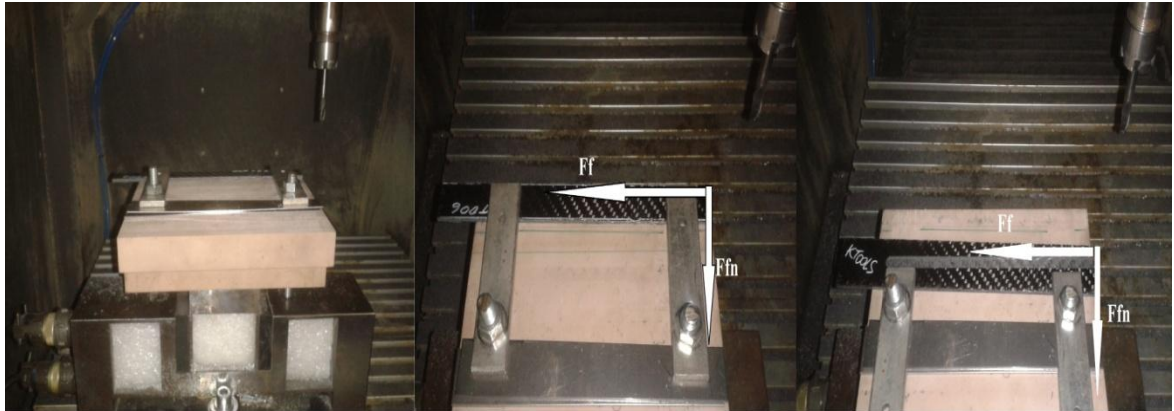
Na Obr. 54 je znázorněn náčrt měřených řezných sil. Zároveň lze vidět upínání vzorků při příčném a podélném frézování.

Použitý materiál:

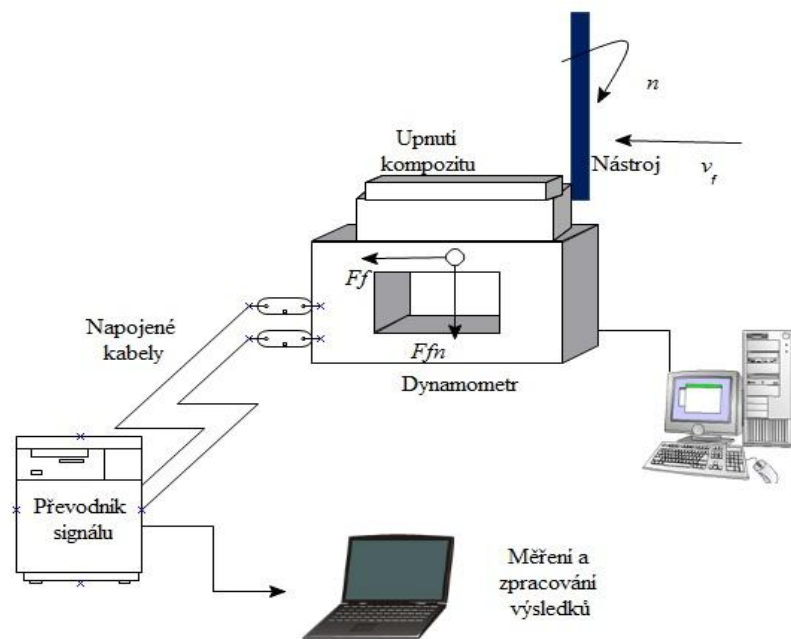
Uhlíkový kompozit: Epoxidová pryskyřice Havel L285 + uhlíková tkanina CC200 KORDCARBON; gramáž 200g/m² s vazbou kepr. Vlákno - Carbon HS 3K 200 tex.

Tab. 18. Mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitu [44]

Modul pružnosti v tahu [GPa]	43 300 ± 5590
Pevnost v ohybu [MPa]	501 ± 71,9
Rázová houževnatost [kJ.m ²]	34,16 ± 2,86
Hustota [g.cm ⁻³]	1,2
Mez pevnosti v tahu [MPa]	378 ± 51
Mez pevnosti v tlaku [MPa]	5010 ± 730

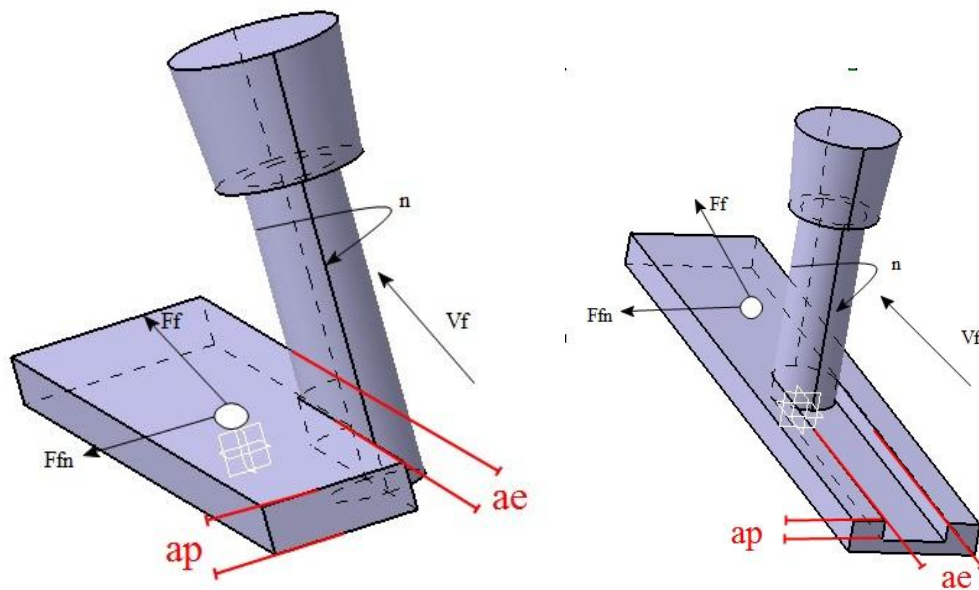


Obr. 54. Dynamometr s náčrtem měřených řezných sil



Obr. 55. Schéma procesu měření řezných sil uhlíkových kompozitů

Hloubka úběru a_p byla při příčném frézování 1,25 mm. Podélným frézováním v první fázi bylo odebráno 40 % průměru nástroje 1 mm kvůli zarovnání a následně 2,4 mm. Při tomto druhém úběru byly měřeny řezné síly.



Obr. 56. Schéma obrábění uhlíkových kompozitů podélným (vlevo) a příčným (vpravo) frézováním v programu Catia V5R18

kde:

F_f – posuvová složka řezné síly [N]

F_{fn} – kolmá složka posuvové síly [N]

a_e – šířka záběru [mm]

a_p – hloubka řezu [mm]

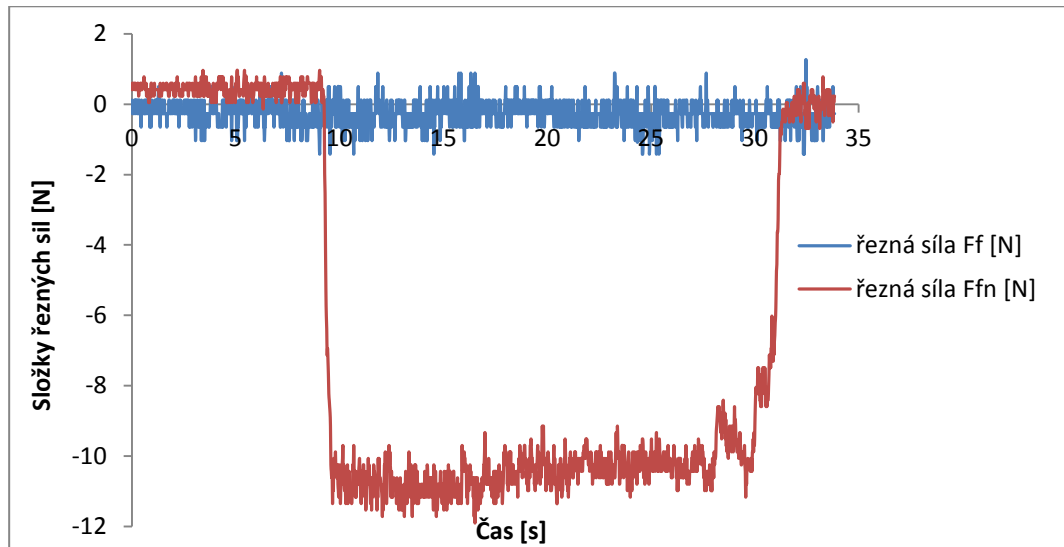
v_f – posuvová rychlost [mm/min]

n – otáčky [ot. /min]

9.2 Výsledky měření řezných sil

Na Obr. 57 vidíme ukázkou záznamu měření složek řezných sil při podélném frézování. Další průběhy řezných sil experimentu jsou uvedeny v Příloze PI. Zpracováním těchto výsledků pro porovnání předcházelo zobrazení pouze činné oblasti. Z této činné oblasti obrábění jsou vytvořeny grafy minimálních a maximálních složek řezných sil. Tyto

grafy byly vytvořeny v programu Minitab 16, který umožnil nejlepší přehlednost. Můžeme je sledovat na Obr. 58-61.

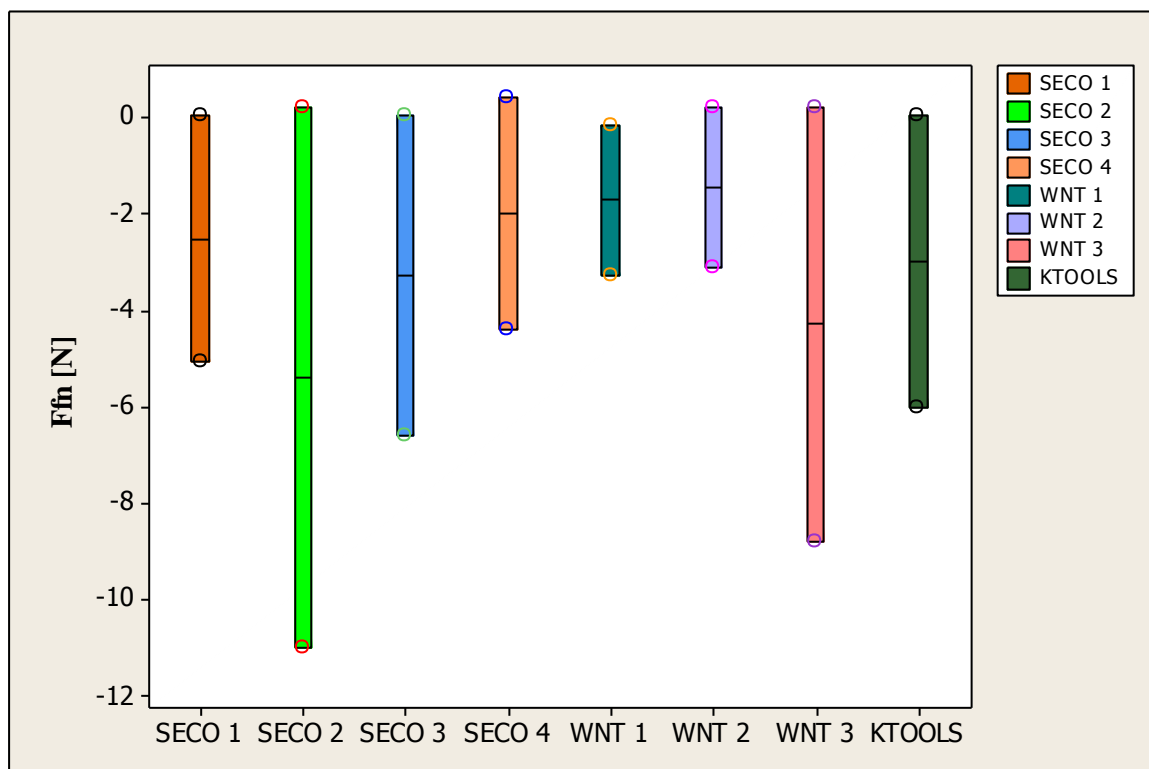


Obr. 57. Celkový průběh naměřených řezných sil

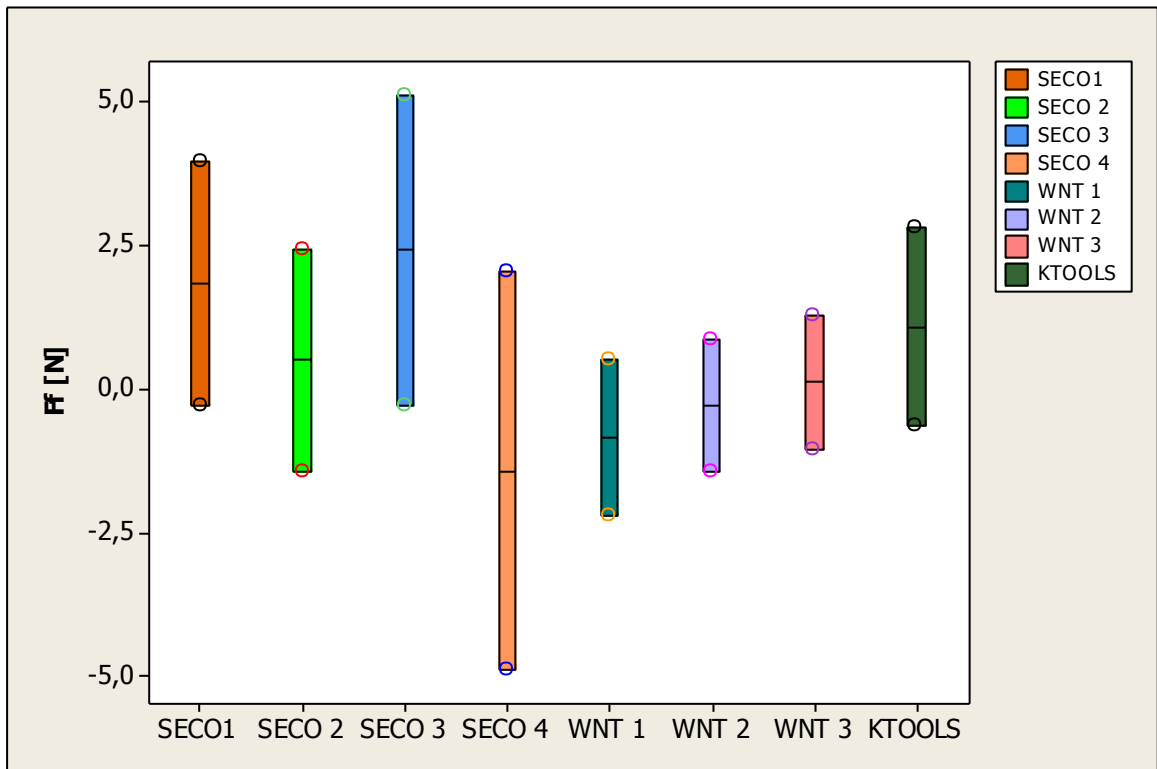
Nejvýraznější minimální síly při příčném frézování byly sledovány u kolmé složky posuvové síly (X) u nástrojů SECO 2 a WNT 3. Maximální síly posuvové složky řezné síly (Y) se projeví u nástrojů SECO 1 a SECO 3.

U podélného frézování byly naměřeny vysoké hodnoty řezných sil zejména u nástroje WNT 2, a to při minimálních řezných silách. Důvodem je nevhodná geometrie nástroje pro tento typ obrábění. Nástroj WNT 2 dle Obr. 72 měl i po nasnímání vůbec nejhorší opotřebení nástroje. Maximální kolmá složka posuvové síly (X) byla zaznamenána u SECO 1. Nejvyšší hodnotu jsme pozorovali i u příčného frézování.

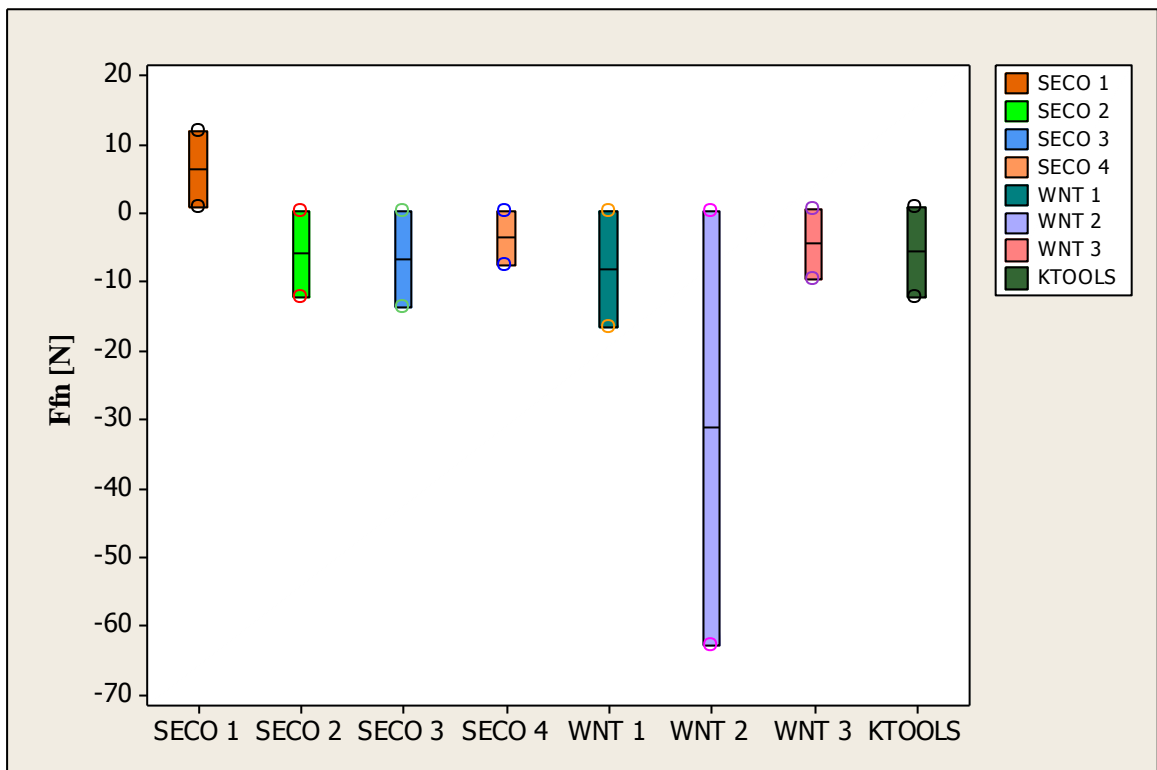
Nejvyrovnanější poměr řezných sil v obou složkách byly vysledovány u příčného frézování u nástrojů firmy WNT 2, WNT 1 a u podélného frézování u nástrojů WNT 3 a SECO 2.



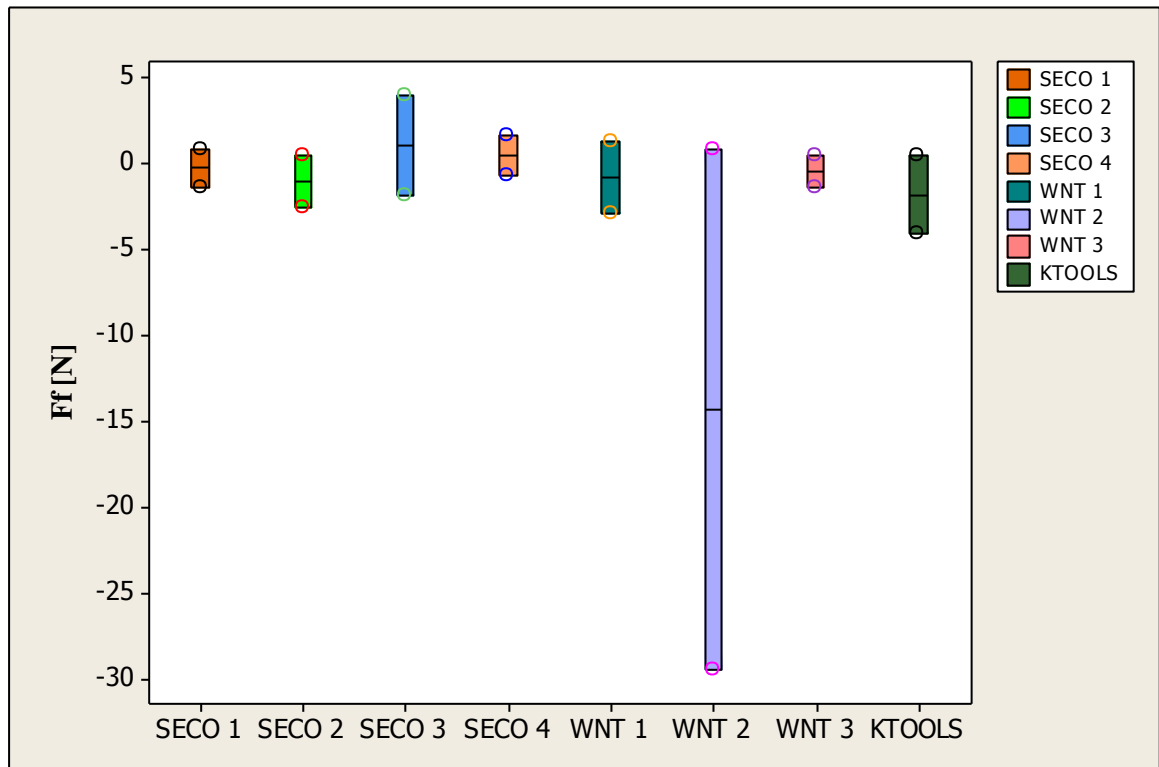
Obr. 58. Srovnání maximálních a minimálních řezných sil F_{fn} pro příčné frézování



Obr. 59. Srovnání maximálních a minimálních řezných sil F_f pro příčné frézování



Obr. 60. Srovnání minimálních a maximálních řezných sil F_{fn} pro podélné frézování



Obr. 61. Srovnání minimálních a maximálních řezných sil F_f pro podélné frézování

9.3 Srovnání jakosti drážky povrchu podélného a příčného frézování

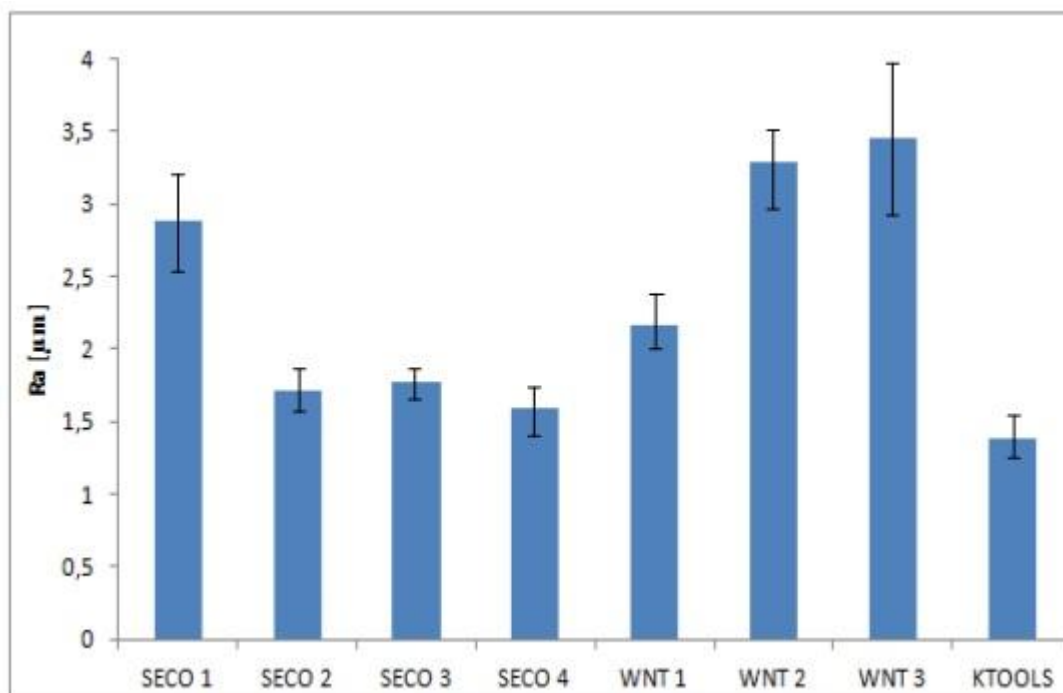
Pro měření drsnosti vyfrézovaných drážek jednotlivými nástroji byl použit drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ 301 viz Obr. 62. Jedná se o mobilní přístroj pro kontrolu jakosti povrchu s protiprachově chráněným, dotykově ovládaným displejem a zabudovanou tiskárnou. Použití pro rychlé, na elektrické síti nezávislé měření přímo ve výrobě. Zobrazení až 37 parametrů. Rozsah osy Z (zdvih) 350 μm . Rozsah osy X (posuv) 12,5 mm a $\lambda_c = 0,8$ mm [35].

Měření probíhalo podle normy ISO 4287 a ISO 4288. Základní délka byla rovna měřené délce, z důvodů malého prostoru pro měření.

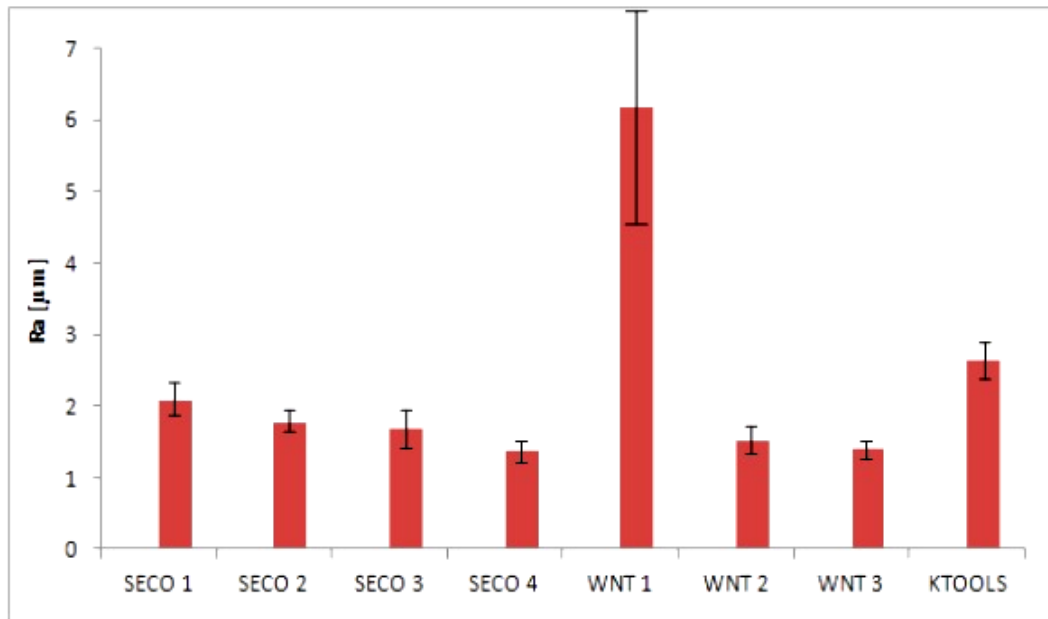


Obr. 62. Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ 301

Každý vzorek byl měřen 15x. Následně bylo zapotřebí statisticky vyloučit hodnoty, které by mohly být chybami hrubými. K tomu bylo využito programu Minitab 16 a funkce Box Plot. Hodnoty označené křížkem byly ze souboru vyloučeny. Některé příklady Box Plotu ukazuje Příloha PVI. Z výsledných hodnot aritmetického průměru se porovnávala drsnost povrchu R_a . Příklady záznamů měřicího protokolu lze vidět v Příloze PV. Obr. 63 a 64 ukazuje porovnání příčného a podélného frézování spolu s vyznačenou směrodatnou odchylkou.



Obr. 63. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro příčné frézování uhlíkového kompozitu



Obr. 64. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro podélné frézování uhlíkového kompozitu

Velmi zajímavé výsledky byly dosaženy ve srovnání drsnosti ploch R_a při podélném a příčném frézování. Po podélném obrábění mělo v 5 případech lepší drsnost povrchu R_a oproti frézování příčném. V podélném frézování vyčnívaly především nástroje WNT 2, 3 a SECO 4.

Naprosto nejlepší a nejvyrovnanější kvalitu v obou variantách frézování dosáhly nástroje SECO 3 a 4. Velmi dobře si vedl nástroj od firmy KTOOLS při příčném frézování.

V Obr. 64 nástroj WNT 1 vykázal neobvykle vysokou hodnotu R_a . Je to způsobeno vůbec nejhorší drsností po podélném frézování. Diamantový hrot na drsnoměru nebyl téměř schopen změřit obrobenou plochu. Z čehož plynuly velké odchylky i průměrný rozměr.

9.3.1 Srovnání kvality obrobených vzorků

Po frézování následovalo naskenování všech vzorků za účelem srovnání kvality obrobené plochy a dále také nasnímání nejhorších míst uhlíkového kompozitu.

Za pomoci ručního mikroskopu ProScope HR firmy Bodelin byly nasnímány všechny vzorky a následně porovnány. Měření vyžadovalo 100násobné zvětšení pro potřebnou analýzu povrchů a ostrost snímků v programu. Fotografie byly zobrazovány a analyzovány v podpůrném programu ProScope.



Obr. 65. Snímání povrchu ručním mikroskopem ProScope HR

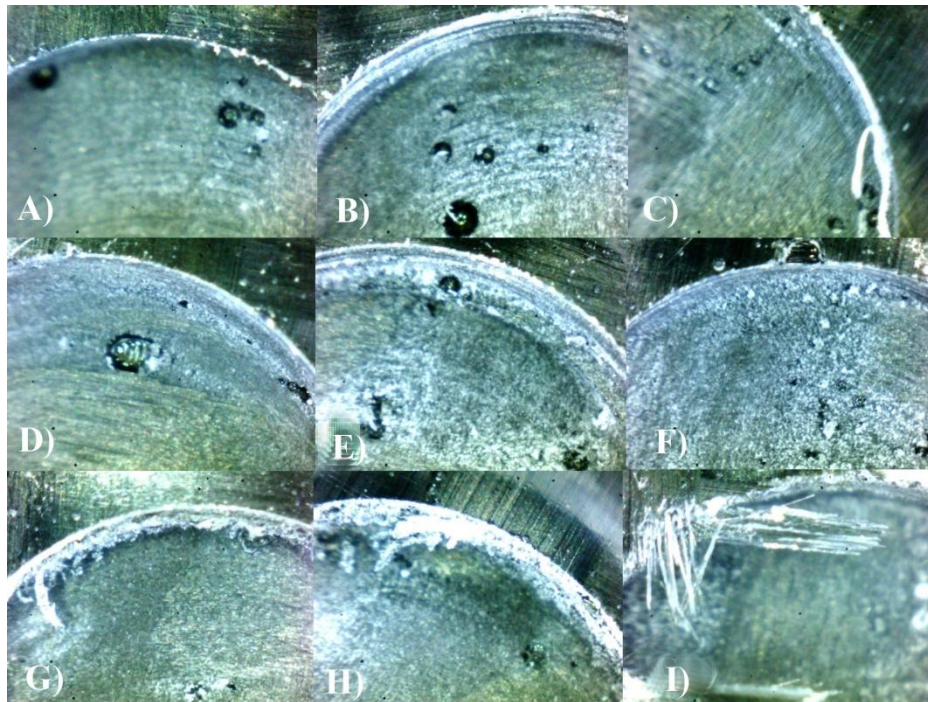
Nejvýraznější otřepy byly znatelné u drážek obrobenými nástroji SECO 3 a 4. Z Obr. 66 uvidíme, že zkušební vzorek má velkou viditelnost uhlíkových vláken a to proto, že nebyla použita speciální fréza pro účely obrobení kompozitních materiálů, ale fréza na obrábění oceli. Byla použita spíše pro kontrolní obrábění daných kompozitních vzorků, proto ani nebyla zahrnuta do srovnání ani do tabulky použitých fréz. Parametry tohoto nástroje vidíme v Tab. 19. To se projevilo i v drsnosti povrchu R_a , která byla zcela nejhorší.

Tab. 19. Parametry referenčního nástroje

Průměr frézy [mm]	6
Materiál	HSSE-PM
Počet břitů	4
Výrobce	ZPS
Úhel stoupání šroubovice/ úhel čela	35°/5°
Povlak	AlTiN
Maloobchodní cena	620 Kč

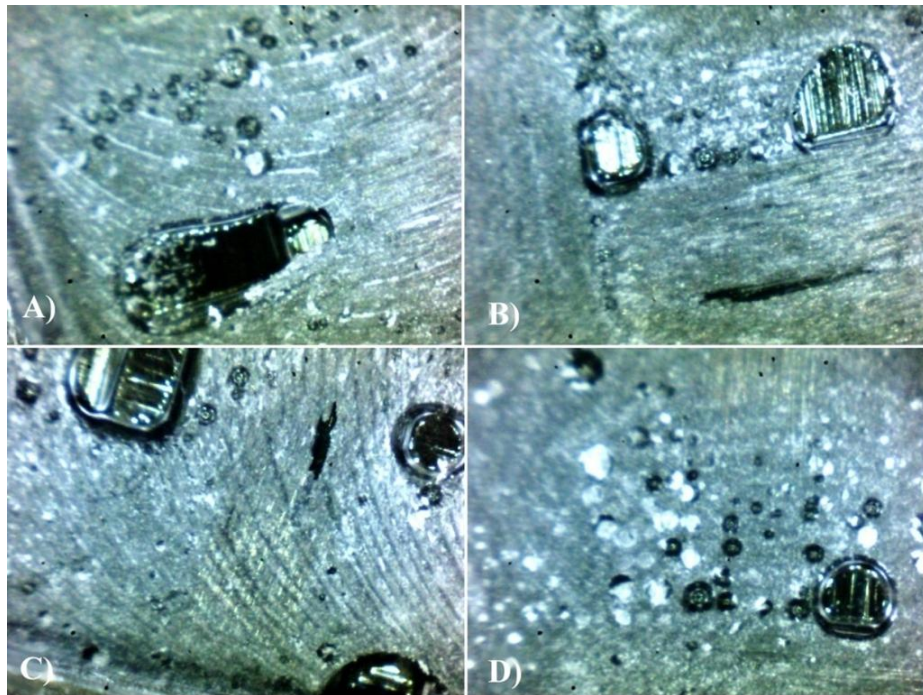
Naopak velmi příznivou kvalitu pozorujeme u nástrojů v Obr. 66 1A – F. Tento výběr obsahuje nástroje a typy firmy WNT, KTOOLS, SECO 1 a 2. Tyto nástroje mají zároveň i jedny z nejlepších výsledků drsnosti R_a .

Zajímavým faktem je, že přes nejvýraznější otřepy mají vůbec nejlepší drsnost povrchu R_a právě nástroje SECO 3 a 4 spolu s výše uvedenými typy. Podrobné srovnání lze najít v kapitole 9.3.

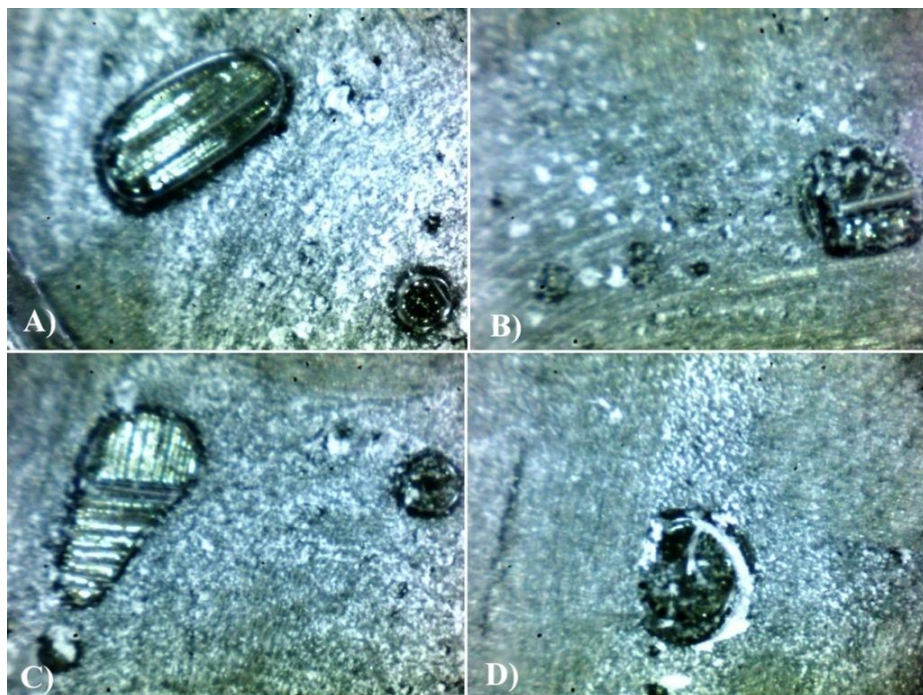


Obr. 66. Srovnání kvality po obrábění uhlíkového kompozitu A) WNT 2 B) WNT 3 C) WNT 1 D) KTOOLS E) SECO 1 F) SECO 2 G) SECO 4 H) SECO 3 I) referenční nástroj

Na Obr. 67 a Obr. 68 byly naskenovány fotografie s nejhoršími místy na obrobených vzorcích. Jedná se však vzduchové bubliny tzv. mikrovruby, které vznikají např. při výrobě kompozitů ručním kladením. Proto se využívá raději technologií využívající podtlaku jako např. vakuová infuze. Bylo tedy nutné se těmto místům v měření vyhnout.



Obr. 67. Porovnání míst A) WNT 1 B) WNT 3 C) WNT 2 D) KTOOLS



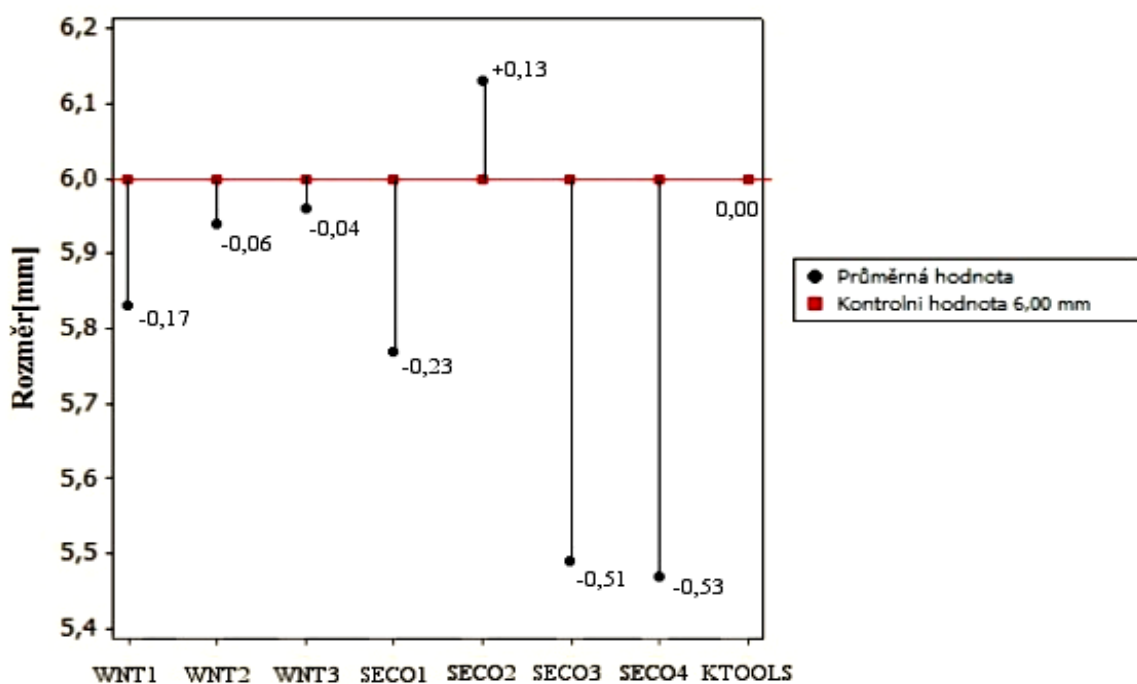
Obr. 68. Porovnání míst nástrojů SECO A) 1 B) 4 C) 2 D) 3

9.4 Proměření a srovnání průměrů drážek

Po vyfrézování uhlíkových kompozitů následovalo proměření průměrů drážek. Vzorky byly měřeny pomocí digitálního posuvného měřidla Mitutoyo. Cílem bylo

vyhodnotit, zda všechny nástroje opravdu obrábí požadovaný rozměr 6 mm. Jak ukazuje Obr. 69, polovina nástrojů obrobila menší rozměr drážky, než bylo žádoucí.

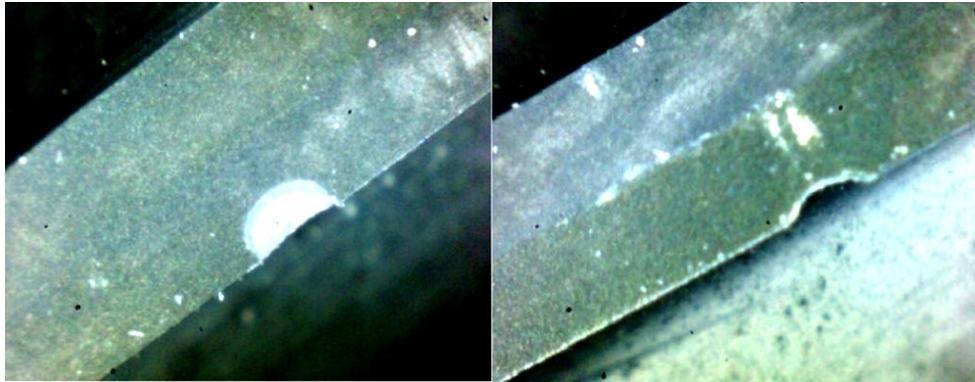
Bylo zjištěno, že nejlepšího výsledku přesnosti průměru drážky dosáhl nástroj od firmy K-TOOLS, jehož průměrná hodnota z deseti měření byla 6,00 mm. Velmi dobré výsledky se zaznamenaly u nástrojů firmy WNT typu 3 a 2. Nástroj SECO 2 vyfrézoval drážku průměru 6,13 mm, což je více než o desetinu větší rozměr. Jak ukazuje Obr. 69, velmi neuspokojivých výsledků jsem zaznamenal u nástrojů SECO 1,3 a 4.



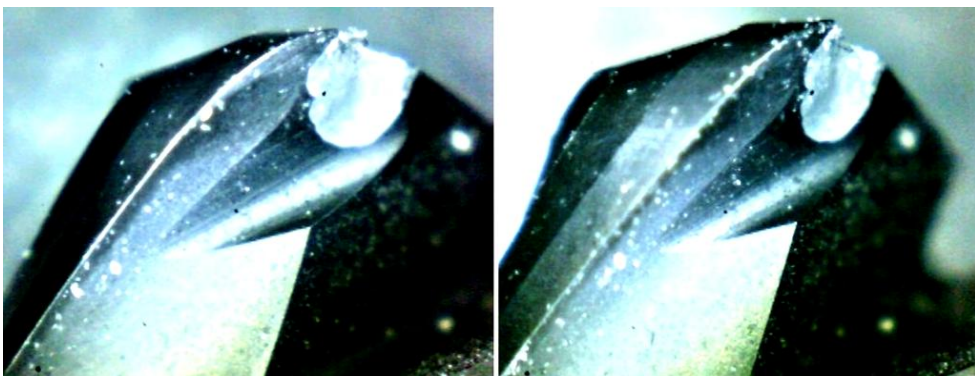
Obr. 69. Přesnost a rozdíly průměrů drážek uhlíkového kompozitu při $n=5310$ ot./min a $v_f = 550$ mm/min

9.5 Opatření nástrojů po experimentu

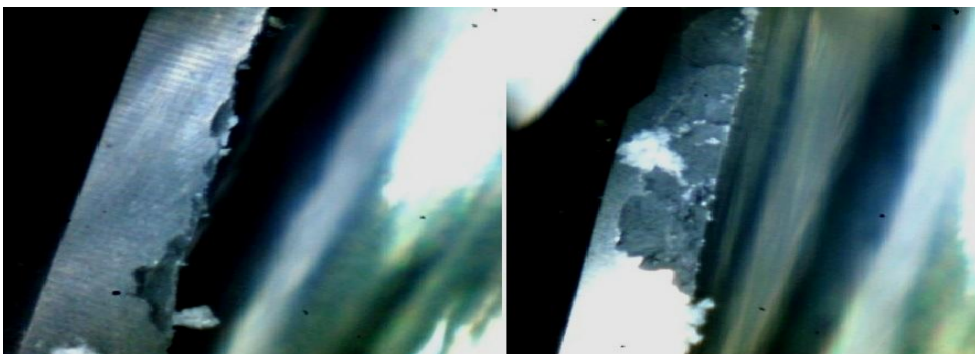
Na níže uvedených obrázcích můžeme vidět poměrně značné opotřebení nástrojů. Zejména Obr. 71 ukazuje vyštípnutí břitu u nástroje KTOOLS. Velmi podobně je tomu i u nástroje SECO 2 (Obr. 70). Z tohoto důvodu již tyto nástroje nebyly použity v dalším experimentu.



Obr. 70. Opotřebení nástroje SECO 2 po podélném a příčném frézování



Obr. 71. Opotřebení nástroje KTOOLS po podélném a příčném frézování



Obr. 72. Opotřebení nástroje WNT 2 po podélném a příčném frézování

10 FRÉZOVÁNÍ SKLOLAMINÁTOVÉHO KOMPOZITU

Cílem druhého experimentu bylo obrobení sklolaminátového kompozitu za použití 4 nástrojů, které dosáhly minimálního opotřebení z předešlého experimentu. Zároveň, aby měli co nejodlišnější geometrii. Z tohoto důvodu byl vyřazen nástroj SECO 4, který je bez povlaku a má stejnou geometrii jako SECO 3, který je navíc s povlakem. Dále porovnání delaminačního faktoru spolu s kvalitou obrobené plochy a také měření velikostí příkonu stroje.

10.1 CNC programy pro obrábění sklolaminátového kompozitu

Podmínky I.

N01 G00 Y0

N02 M03 S 5310 T01 Z0

N05 G00 Z-1

N10 G01 Y0 X-150 F550

N15 G00 Z30 Y0 X0

N20 G00 Z-3

N25 G01 Y0 X-150 F550

N30 G00 Z10 X50 Y20

N35 M30

Podmínky II.

N01 G00 Y0

N02 M03 S 2610 T01 Z0

N05 G00 Z-1

N10 G01 Y0 X-150 F240

N15 G00 Z30 Y0 X0

N20 G00 Z-3

N25 G01 Y0 X-150 F240

N30 G00 Z10 X50 Y20

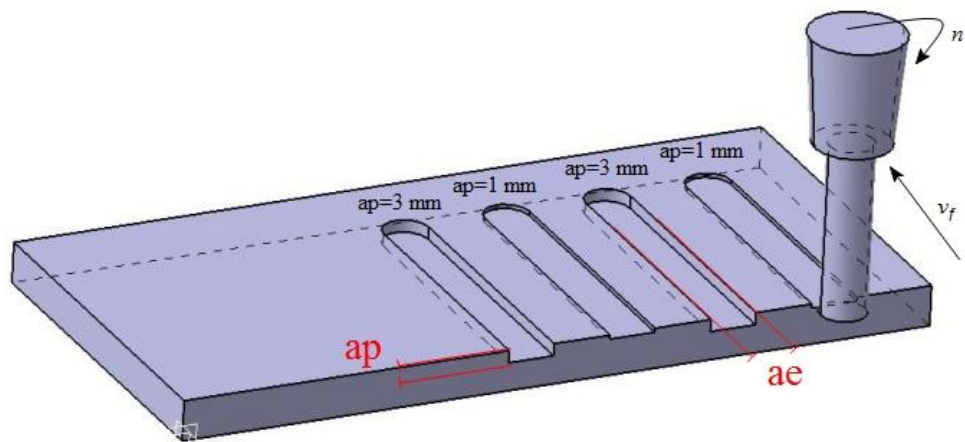
N35 M30

10.1.1 Řezné podmínky

Řezné podmínky se změnily po vyfrézování drážky 4 nástroji. Tyto změny můžeme sledovat v Tab. 20. Otáčky a posuvy se snížily, abychom mohli vysledovat případné změny v kvalitě povrchu a delaminačního faktoru. Snížení nastalo z 5310 ot. /min na 2610 ot. /min a z posuvu 550 mm/min na 240 mm/min. Nejprve byla podle CNC programu vyfrézována drážka 1 mm a následně 3 mm. Z důvodu nedostatku místa kvůli upnutí vzorku nebyl do srovnání za nízkých otáček a posuvu zařazen nástroj WNT 3.

Tab. 20. Řezné podmínky při obrábění sklolaminátu

Podmínky I.		Podmínky II.	
Řezná rychlost v_c	100 m/min	Řezná rychlost v_c	50 m/min
Posuvová rychlost v_f	550 [mm/min]	Posuvová rychlost v_f	240 [mm/min]
Otáčky n	5310 [ot. /min]	Otáčky n	2610 [ot. /min]
Šířka záběru a_e	6 mm	Šířka záběru a_e	6 mm
Hloubka řezu a_p	1 a 3 mm	Hloubka řezu a_p	1 a 3 mm
Chlazení	bez chlazení	Chlazení	bez chlazení



Obr. 73. Ukázka principu frézování sklolaminátového kompozitu

Použitý materiál:

Sklolaminátový vodící pás SMC (UP GF25) – vyztuženo 25 % skelných vláken nenasyčených polyesterových lisovacích směsí.

Tab. 21. Mechanické vlastnosti sklolaminátu [43]

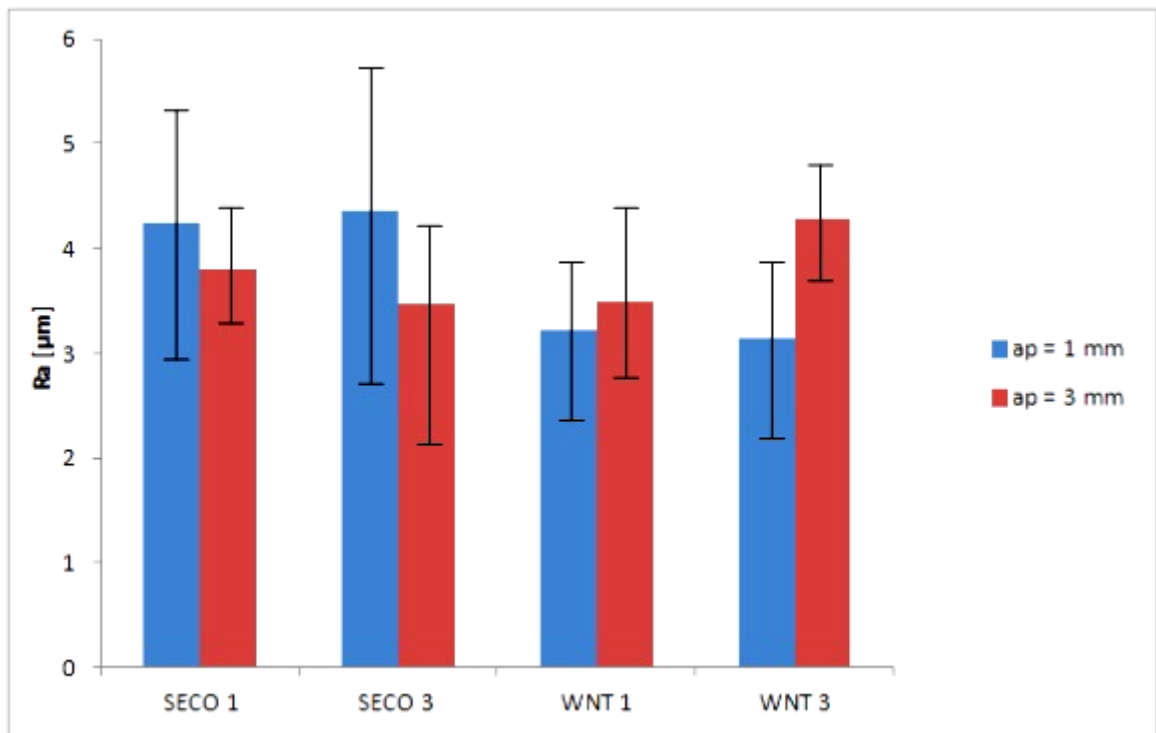
Modul pružnosti v tahu [MPa]	12 500
Pevnost v ohybu [MPa]	200
Rázová houževnatost [J.cm ⁻¹]	90
Hustota [kg.m ⁻³]	2000
Tepelná roztažnost [K ⁻¹]	18.10 ⁻⁶

10.2 Srovnání jakosti drážky a příkonu stroje

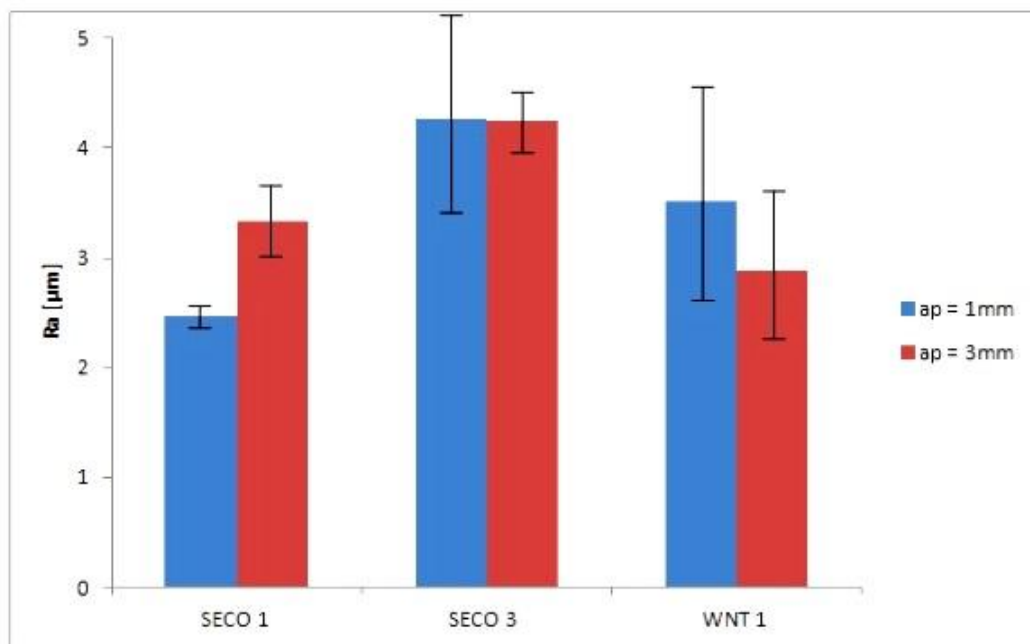
Drsnosti povrchu u sklolaminátového kompozitního materiálu byly hodnoceny podle dvou rozdílných řezných podmínek. Obecně z výsledků nelze říci, zdali je při vysokých řezných podmínkách lepší drsnost povrchu.

Zřetelné ovšem je, že nástroj SECO 3 dosáhl neuspokojivých výsledků drsnosti R_a při obou variantách řezných podmínek. Tento nástroj neprokázal zlepšení ani v jeho rozměru, velikosti příkonu a delaminační faktor také nebyl příznivý. Jediným pozitivem je kvalita drážky po skenování obrobeného kompozitu v kapitole 10.2.1.

SECO 1 při nízkých otáčkách a posuvu prokazoval nejnižší hodnotu drsnosti R_a a v tomto srovnání patřil spolu s WNT 1 mezi nejvhodnější k obrábění tohoto druhu kompozitu.



Obr. 74. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro příčné frézování sklolaminátového kompozitu při 5310 ot. /min a $v_f = 550 \text{ mm/min}$



Obr. 75. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro příčné frézování sklolaminátového kompozitu při 2610ot./min a $v_f=240\text{ mm/min}$

Příkon frézky při klidovém režimu bez puštěného vřetena byla 78 W. Se zapnutím vřetena se příkon zvýšil na 180 W. Velikost průměrných hodnot příkonu při obrábění znázorňuje Tab. 22.

Tab. 22. Hodnoty příkonů při obrábění sklolaminátu

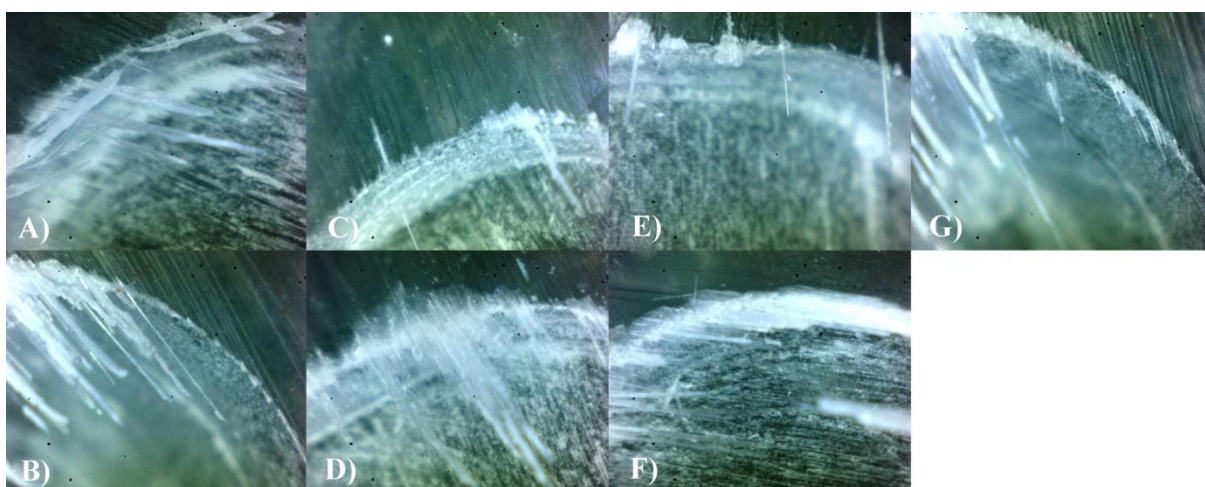
[W]	Podmínky I.			
	WNT 1	SECO 1	SECO 3	WNT 3
1 mm	240	155	230	190
3 mm	205	315	465	270
[W]	Podmínky II.			
	WNT 1	SECO 1	SECO 3	-
1 mm	113	210	120	-
3 mm	145	250	170	-

Celkově vyšší hodnoty příkonu byly vysledovány při vyšším posuvu a otáčkách. Předpokládaný výsledek se potvrdil i v případě zvýšení příkonu při změně hloubky řezu z 1 mm na 3 mm.

10.2.1 Srovnání kvality po obrobení sklolaminátového kompozitu

Podle Obr. 76 můžeme porovnat výslednou kvalitu obrobené plochy se 100násobným zvětšením. Z toho obrázku vidíme, že podstatně vyšší kvalita povrchu se vyskytla při vyšších otáčkách a posuvu. Nejvíce je to patrné u nástroje SECO 3. Tuto skutečnost zaznamenáváme i na Obr. 76, kde lze velmi zřetelně poznat dobrou kvalitu bez výrazných delaminací, a to nástrojem WNT 1 a SECO 3.

Nejhorší kvalitu registrujeme u nástroje SECO 1 při obou variantách řezných podmínek. Tento fakt se odrazil i na hodnotě delaminačního faktoru, který patřil mezi nejvyšší.

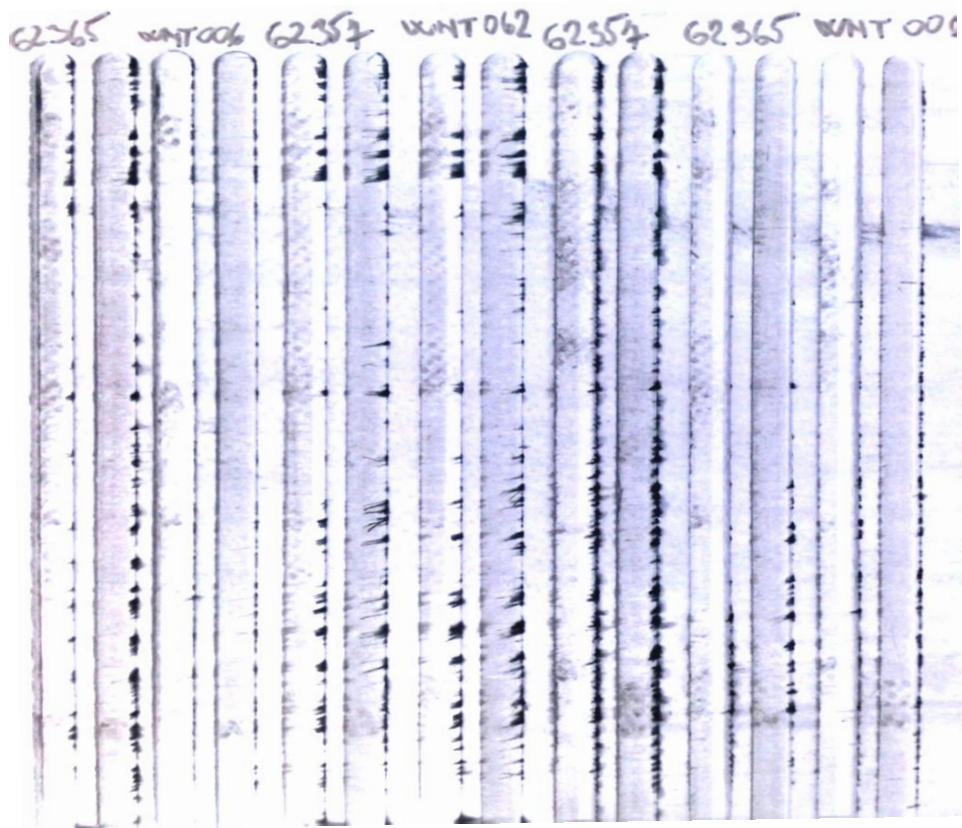


Obr. 76. Srovnání kvality po obrábění sklolaminátového kompozitu nástroji A) SECO 1 B) SECO 1 (nízké otáčky a posuv) C) SECO 3 D) SECO 3 (nízké otáčky a posuv) E) WNT 1 F) WNT 1 (nízké otáčky a posuv) G) WNT 3

Pohled na vyfrézované drážky sklolaminátového kompozitu ukazuje Obr. 77. Velmi pěkně jde vidět a porovnat kvalitu obrobené plochy a delaminaci. Značení v horní části Obr. 77 je podle označení na krabičkách nástrojů (objednací číslo), aby nedošlo k jejich záměně při experimentech.

Tab. 23. Označení nástrojů při obrábění sklolaminátového kompozitu

Objednací číslo	Nástroj
62 365	SECO 3
62 357	SECO 1
WNT 062	WNT 3
WNT 006	WNT 1

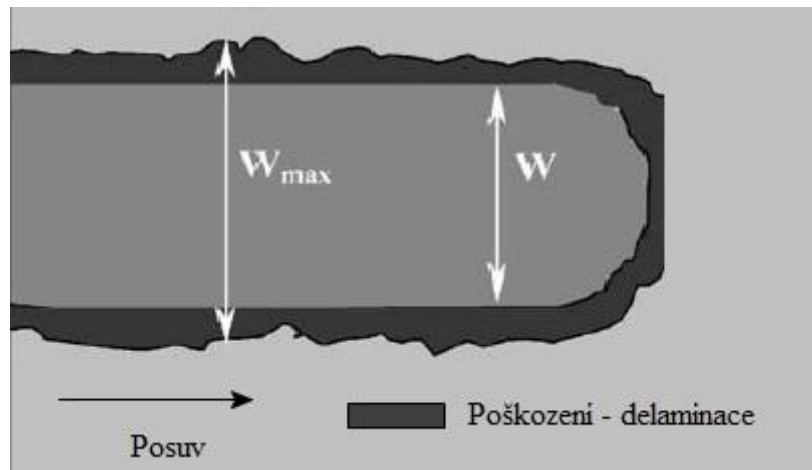


Obr. 77. Kompletní pohled na obrobenu plochu sklolaminátového kompozitu

10.2.2 Výsledky delaminačního faktoru

Delaminační faktor byl měřen pomocí digitálního posuvného měřidla Mitutoyo. Měření se provádělo z toho důvodu, aby byl zhodnocen delaminační faktor. Tento faktor je definován jako podíl mezi maximální šířkou poškození a šířkou řezu. Hodnotu faktoru lze získat z následující rovnice [37].

$$Fd = \frac{W_{max}}{W}$$



Obr. 78 Ukázka metodiky delaminačního faktoru [37]

kde:

W_{max} – šířka maximálního poškození [mm]

W – šířka řezu 6 mm

Výsledky měření Tab. 24 delaminačního faktoru jednoznačně neukazují, zdali při nižších otáčkách, menšího posuvu a rozdílných úběrech je delaminační faktor menší. Avšak v Tab. 24 vidíme, že při snížení řezných podmínek dosahujeme ve dvou případech lepších hodnot delaminačního faktoru.

Nejvyšší delaminační faktor 1,65 byl naměřen při úběru 1 mm u nástroje SECO 1. Naopak nejnižší hodnotu 1,16 vykazoval nástroj WNT 1 při úběru 1 mm a snížených řezných podmínkách.

Tab. 24. Výsledky delaminačního faktoru při různých řezných podmínkách

Obrábění sklolaminátu					
Nástroj	Hloubka drážky [mm]	Podmínky I. - W_{max} [mm]	Podmínky II. W_{max} [mm]	W [mm]	F_d [-]
WNT 1	1	7,28	6,97	6,00	1,21 1,16
	3	7,05	7,34	6,00	1,18 1,22
SECO 3	1	7,04	8,06	6,00	1,17 1,34
	3	8,80	7,31	6,00	1,47 1,22
SECO 1	1	9,88	8,23	6,00	1,65 1,37
	3	8,94	7,04	6,00	1,49 1,17
WNT 3	1	7,91	neměřeno	6,00	1,32
	3	8,29	neměřeno	6,00	1,38

10.3 Proměření a srovnání průměru drážek

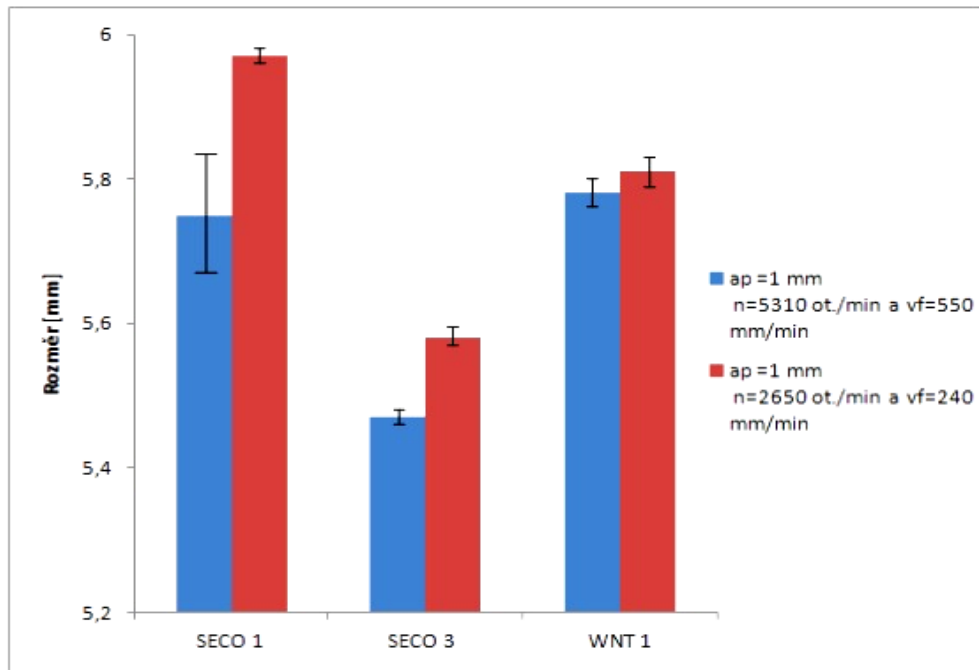
U obrobeného sklolaminátového kompozitního materiálu byl zjištěn nejpřesnější rozměr průměru drážky u nástroje WNT 3.

Zcela nejhorší výsledek byl sledován u nástroje SECO 3, kde hodnota průměru drážky byla pouze 5,47 mm.

Tab. 25. Výsledky rozměrů drážek při různých řezných podmínkách a úběru

Podmínky I.				
[mm]	SECO 1	SECO 3	WNT 1	WNT 3
$a_p = 1 \text{ mm}$	5,75 ±0,08	5,47 ±0,01	5,78 ±0,02	6,00 ±0,01
$a_p = 3 \text{ mm}$	5,96 ±0,05	5,53 ±0,09	5,78 ±0,02	5,97 ±0,04
Podmínky II.				
[mm]	SECO 1	SECO 3	WNT 1	-
$a_p = 1 \text{ mm}$	5,97 ±0,01	5,58 ±0,01	5,81 ±0,02	-
$a_p = 3 \text{ mm}$	5,96 ±0,01	5,94 ±0,04	5,78 ±0,02	-

Srovnání dat ukazuje Obr. 79, kde při snížení řezné rychlosti a posuvové rychlosti byly rozměry drážek u nástrojů SECO 1, SECO 3 a WNT 1 přesnější. U zbývajících nástrojů při různých řezných podmínkách a velikostech úběru nebyly pozorovány velké změny. Celkové srovnání můžeme najít v Příloze PII.

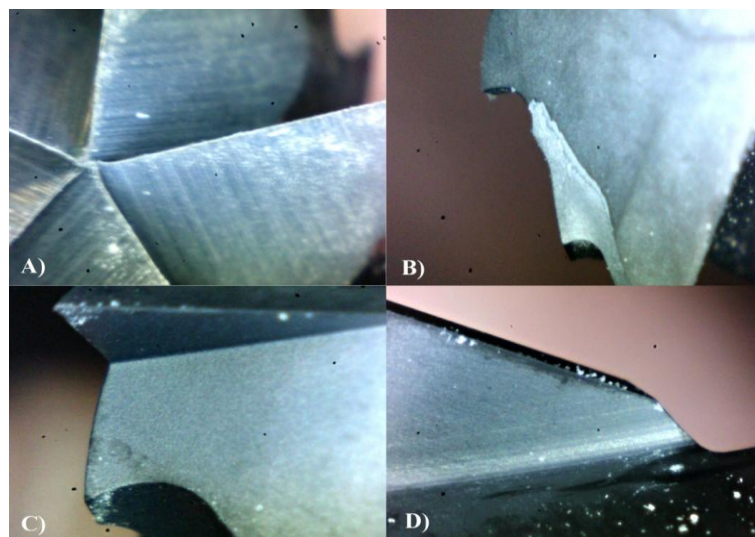


Obr. 79. Rozměry drážek sklolaminátu při různých otáčkách, posuvech a úběru materiálu 1 mm

10.4 Opatření nástrojů po experimentu

Opatření použitých nástrojů bylo největší u nástroje SECO 3. Zde došlo k vylomení břitu nástroje. Menší opotřebení vykázal nástroj 1 od stejného výrobce.

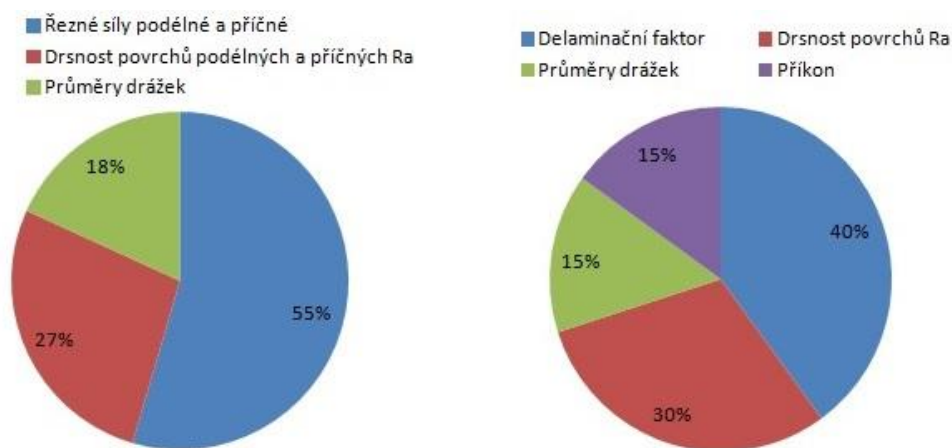
Zdaleka nejlepší životnost po obou experimentech prokázaly nástroje od firmy WNT a to konkrétně typ 1 a 3, čímž se můžeme přesvědčit v Obr. 80.



Obr. 80. Srovnání opotřebení nástrojů A) WNT 1 B) SECO 3 C) SECO 1 D) WNT 3

11 CELKOVÉ HODNOCENÍ A POROVNÁNÍ

Celkové hodnocení vhodnosti a porovnání nejlepších a nejhorších nástrojů bylo prováděno pomocí tzv. výkonového kritéria. Každé sledované operaci v experimentu byla přiřazena určitá váha viz Obr. 81. Tato váha vycházela z určení priorit pro sledování určených parametrů. U uhlíkových kompozitů to byly zejména řezné síly a drsnost povrchu. U sklolaminátového kompozitu potom delaminační faktor a také drsnost povrchů. Přiřazení těchto vah důležitosti byla taková, protože se domnívám, že právě tyto parametry patří mezi velmi důležité ukazatele obrobitelnosti kompozitních materiálů a řezivosti použitých nástrojů.



Obr. 81. Procentuální vyjádření zvolené váhy podle sledovaných veličin u uhlíkového (vlevo) a sklolaminátového (vpravo) kompozitu

Jako první však bylo nutné zpracovat koeficienty podle nejhůře a nejlépe dosažených výsledků v dané sledované operaci (řezné síly, delaminace, drsnost povrchu atd.). Získané koeficienty, kdy nejlepší hodnotě (nástroji) byl přiřazen koeficient 1 a od které se další horší výsledky počítaly, následovalo vynásobení těchto koeficientů váhou důležitosti podle příslušných sledovaných parametrů. Dané výsledky jsou uváděny v Tab. 26 a 27 jako získané body, které se následně přepočítaly na procentuální vyjádření.

Opotřebení nástrojů bude pro přehlednost v tabulce hodnoceno barevným kolečkem kde:



Minimální opotřebení nástroje



Mírné opotřebení – nikoliv výrazné



Značné opotřebení – ulomení břitu atd.

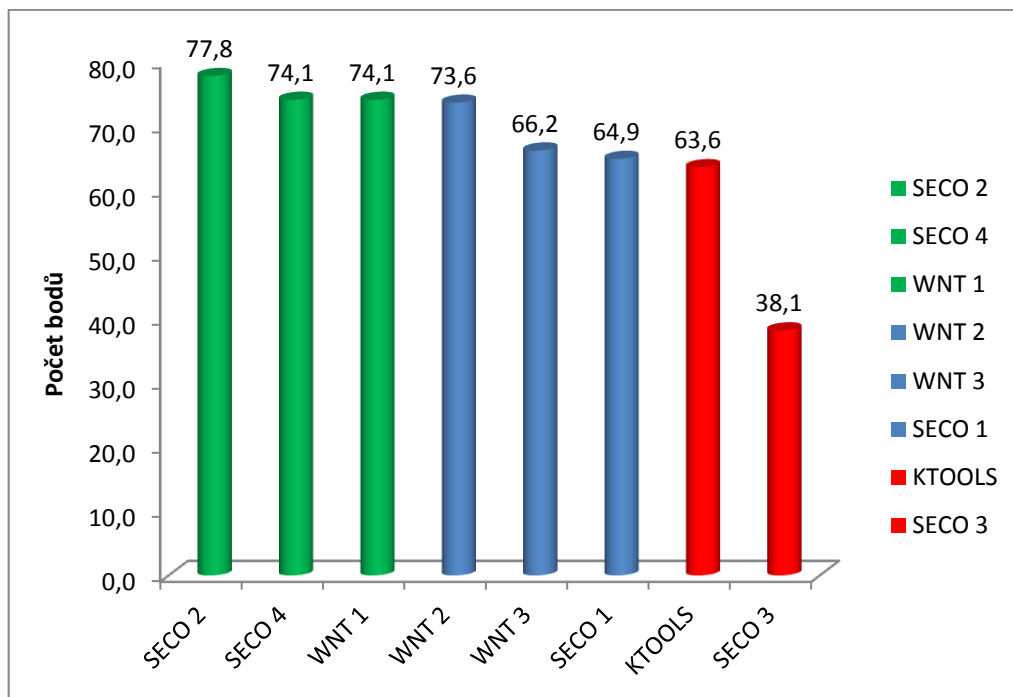
Tab. 26. Parametry použitých nástrojů pro experimenty

Parametry	Označení	SECO 1	SECO 2	SECO 3	SECO 4	WNT 1	WNT 2	WNT 3	KTOO LS
	Výrobce	SECO	SECO	SECO	SECO	WNT	WNT	WNT	KTOO LS
	Obchodní označení	JC 860 HONEYC OMB ROUTER	JC 880 LOW HELIX	JC 870 MULTI – FLUTE ROUTER S	JC 870 MULTI – FLUTE ROUTER S	HCC.6,0 .10°.R.H A.Ti28	BFC.6,0. Z2.30°.R .L.HA.L. Ti28	CFK.6,0. 0°.R.HA. DC10	15002D
	Udávaný průměr řezné části [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
	Skutečný průměr řezné části [mm]	5,81 ±0,07	5,96 ±0,02	5,92 ±0,01	5,91 ±0,02	5,96 ±0,03	5,94 ±0,02	5,97 ±0,02	5,91±0,03
	Úhel šroubovice/čela [°]	15°/0°	10°/6°	25°a27°/7°	25°a 27°/7°	47° /10°	13°/30°	10°/0°	15°/30°
	Počet břitů	5	4	-	-	-	2	1	3
	Povrchová úprava	DURA	DURA	DURA	bez povlaku	multivrstvý Ti (HV _{0,05} 2800)	multivrstvý Ti (HV _{0,05} 2800)	Diamant - mono- vrstvý (HV _{0,05} 10000)	CC Dia 09
	Maloobchodní cena [Kč]	2 780	2 420	2 070	753	1 525	2 156	3 394	2 779

Tab. 27. Výsledky experimentů uhlíkových kompozitů

Frézování příčné	R_a [μm]	2,88 $\pm 0,72$	1,71 $\pm 0,35$	1,77 $\pm 0,24$	1,59 $\pm 0,42$	2,16 $\pm 0,43$	3,28 $\pm 0,61$	3,45 $\pm 1,30$	1,38 $\pm 0,29$
	R_z [μm]	15,57 $\pm 3,79$	10,13 $\pm 2,53$	11,27 $\pm 2,42$	10,71 $\pm 2,91$	13,55 $\pm 4,10$	17,91 $\pm 2,98$	20,94 $\pm 7,19$	8,65 $\pm 2,32$
	F_{fn} min. /max. [N]	-5,66 /0,04	-10,98 /0,22	-6,57 /0,04	-4,37 /0,41	-3,27 /-0,14	-3,08 /0,22	-8,78 /0,22	-6,02 /0,04
	F_f min. /max. [N]	-0,27 /3,95	-1,42 /2,42	-0,27 /5,10	-4,87 /2,03	-2,19 /0,5	-1,42 /0,88	-1,04 /1,27	-0,65 /2,8
	Šířka drážky [mm]	5,77 $\pm 0,03$	6,13 $\pm 0,06$	5,49 $\pm 0,02$	5,47 $\pm 0,01$	5,83 $\pm 0,01$	5,94 $\pm 0,01$	5,96 $\pm 0,01$	6,00 $\pm 0,04$
Frézování podélné	R_a [mm]	2,08 $\pm 0,72$	1,77 $\pm 0,45$	1,67 $\pm 0,64$	1,38 $\pm 0,40$	6,19 $\pm 1,57$	1,51 $\pm 0,39$	1,39 $\pm 0,36$	2,64 $\pm 0,53$
	R_z [μm]	14,03 $\pm 0,65$	13,11 $\pm 5,81$	10,65 $\pm 3,55$	10,17 $\pm 6,09$	39,04 $\pm 14,12$	8,76 $\pm 2,24$	8,16 $\pm 2,68$	14,21 $\pm 2,89$
	F_{fn} min./max. [N]	0,96 /11,9	-12,09 /0,22	-13,74 /0,41	-7,49 /0,41	-16,5 /0,22	-62,8 /0,41	-9,51 /0,59	-12,09 /0,78
	F_f min./max. [N]	-1,42 /0,88	-2,57 /0,5	-1,80 /3,95	-0,65 /1,65	-2,95 /1,27	-29,41 /0,88	-1,42 /0,5	-4,1 /0,5

Výkonové kritérium - počet bodů	64,9	77,8	38,1	74,1	74,1	73,6	66,2	63,6
Procentuální vyjádření	83,4 %	100 %	49 %	95 %	95 %	94,7	85%	81,7 %
Poměr cena / výkon	39,4 %	69,3 %	42,3 %	100 %	82 %	70,6 %	19,6 %	52 %
Opatření nástroje								







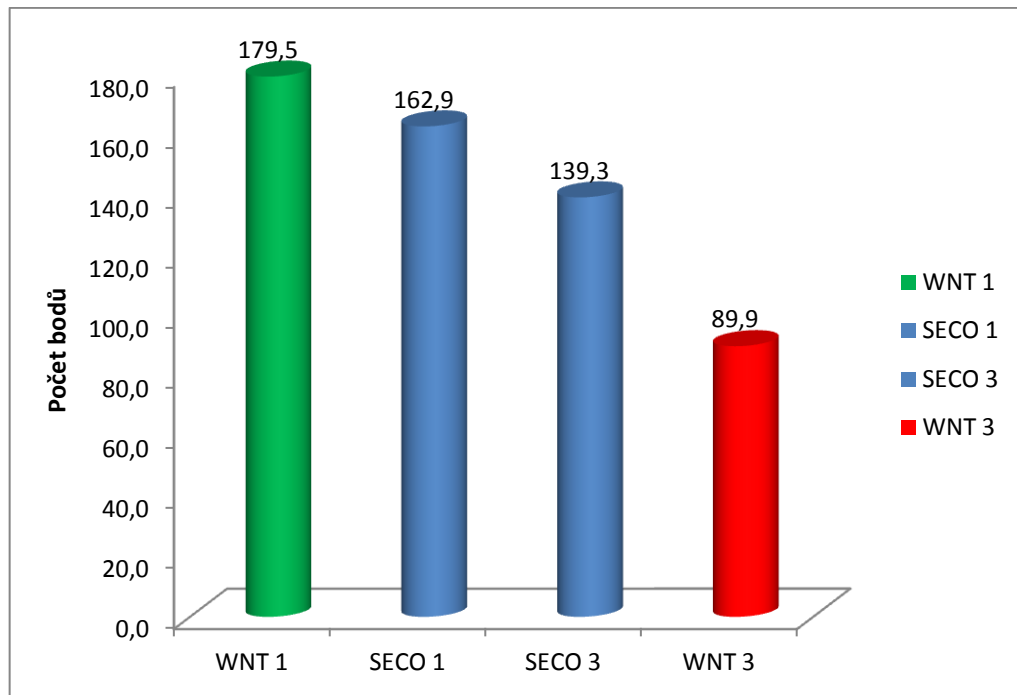
Obr. 82. Sestupné seřazení nejvhodnějších nástrojů (zeleně) pro obrobitelnost uhlíkového kompozitu

Tab. 28. Výsledky experimentů sklolaminátového kompozitu

Vysoké otáčky a posuv	Ra 1 mm [μm]	4,24 ±1,03	-	4,80 ±1,62	-	3,23 ±0,65	-	3,15 ±0,73	-
	Rz 1 mm [μm]	26,18 ±7,60	-	30,44 ±10,02	-	20,76 ±6,95	-	23,21 ±6,72	-
	Ra 3 mm [μm]	3,81 ±0,48	-	3,47 ±0,91	-	3,50 ±0,70	-	4,90 ±1,32	-
	Rz 3 mm [μm]	24,55 ±1,44	-	21,75 ±6,11	-	23,25 ±7,43	-	26,58 ±10,47	-
	Šířka drážky 1 mm [mm]	5,75 ±0,08	-	5,47 ±0,01	-	5,78 ±0,02	-	6,00 ±0,01	-
	Šířka drážky 3 mm [mm]	5,96 ±0,05	-	5,53 ±0,09	-	5,78 ±0,02	-	5,97 ±0,04	-
Nížší otáčky a posuv	Ra 1 mm [μm]	2,47 ±0,06	-	4,26 ±0,89	-	3,51 ±0,99	-	-	-
	Rz 1 mm [μm]	16,27 ±4,65	-	25,49 ±4,94	-	26,03 ±11,01	-	-	-
	Ra 3 mm [μm]	3,34 ±0,34	-	4,25 ±0,28	-	3,71 ±1,76	-	-	-
	Rz 3 mm [μm]	19,10 ±2,55	-	23,28 ±3,68	-	22,33 ±9,69	-	-	-

	Šířka drážky 1 mm [mm]	5,97 ±0,01	-	5,58 ±0,01	-	5,81 ±0,02	-	-	-
	Šířka drážky 3 mm [mm]	5,96 ±0,01	-	5,94 ±0,04	-	5,78 ±0,02	-	-	-
Vysoké otáčky a posuv	Delaminační faktor 1 mm	1,65	-	1,17	-	1,21	-	1,32	-
	Delaminační faktor 3 mm	1,49	-	1,47	-	1,18	-	1,38	-
	Příkon 1 mm [W]	155 ± 0,71	-	230 ±0,69	-	240 ±1,34	-	190 ±0,98	-
	Příkon 3 mm [W]	315 ±0,61	-	465 ±1,26	-	205 ±0,86	-	270 ±1,65	-
Nižší otáčky a posuv	Delaminační faktor 1 mm	1,37	-	1,34	-	1,16	-	-	-
	Delaminační faktor 3 mm	1,17	-	1,22	-	1,22	-	-	-
	Příkon 1 mm [W]	210 ±0,52	-	120 ±1,83	-	113 ± 0,62	-	-	-
	Příkon 3 mm [W]	250 ±0,68	-	170 ±1,61	-	145 ±1,23	-	-	-

Výkonové kritérium - počet bodů	162,9	-	139,3	-	179,5	-	89,9	-
Procentuální vyjádření	90,7%	-	77,6%	-	100%	-	50,0%	-
Poměr cena / výkon	49,9%	-	77,6%	-	100%	-	13,5%	-
Opotřebení nástroje		-		-		-		-



Obr. 83. Sestupné seřazení nejvhodnějších nástrojů pro obrobitelnost sklolaminátového kompozitu

Na Obr. 83 a 84 můžeme vidět nástroje, které vykazovaly zcela nejlepší (zeleně) a nejhorší (červeně) výsledky v daném experimentu. Je s podivem, že nástroj SECO 3 vykazoval při obrábění uhlíkového kompozitu velmi neuspokojivé hodnoty. Při obrábění sklolaminátového kompozitu byla situace velmi podobná a nástroj SECO 3 neprokázal ani zde dobrou kvalitu ve sledovaných parametrech.

U celkového srovnání v poměru cena / výkon mohou být výsledky mírně zkresleny, protože nástrojem WNT 3 nebylo provedeno frézování za nižších otáček a posuvu a tím pádem chyběly údaje k započítání do výkonového kritéria. Doporučení by spadalo spíše pro nástroj WNT 3 u obrábění sklolaminátového kompozitu, ale jeho cena je bohužel nejvyšší. Proto v tomto srovnání lépe vychází, i když za výrazně horší kvality právě nástroj SECO 3. Ve srovnání poměru cena / výkon bude porovnání a doporučení nástrojů vymezeno pro uhlíkový a sklolaminátový kompozit zvlášť.

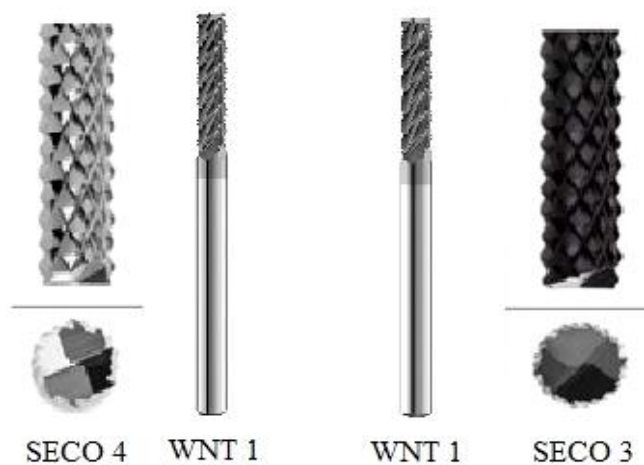
Celkově vůbec nejlepší výsledky byly zaznamenány (Obr. 85) u nástroje WNT 1, který je naprosto bezkonkurenčním vítězem i co se týká poměru cena / výkon (Obr. 86). Jako druhý nástroj, který může být doporučen a byl schopen obrábět v dobré kvalitě oba typy

kompozitních materiálů je nástroj SECO 1. Naopak nástroj od firmy KTOOLS patří do skupiny méně vhodných spolu s nástrojem SECO 3.



Obr. 84. Nejvhodnější (vlevo) a méně vhodné (vpravo) nástroje pro obrobitelnost obou typů kompozitních materiálů

V poměru cena / výkon by byl z výsledného hodnocení doporučen nástroj SECO 4 a WNT 1 pro obrobitelnost uhlíkových kompozitů a pro sklolaminátový kompozit pak nástroj opět WNT 1 a již zmiňovaný nástroj SECO 3, který si však nevedl moc dobře u obrábění uhlíkového kompozitu ani u sklolaminátového kompozitu, ale jeho poměr cena / výkon je ve srovnání lepší. Ovšem pokud chceme raději vyšší kvalitu sledovaných parametrů i za cenu nejvyšší, potom by bylo vhodné zvolit místo SECO 3 nástroj WNT 3.



Obr. 85. Nejlépe hodnocené nástroje pro uhlíkové (vlevo) a sklolaminátové (vpravo) kompozity podle poměru cena / výkon

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vyhodnocení a určení vhodnosti vybraných nástrojů obrábět kompozitní materiály. Práce byla rozložena na dva experimenty, z nichž v každém se sledovaly jiné parametry obrobitelnosti. Konkrétně šlo v prvním experimentu o uhlíkový a ve druhém o sklolaminátový kompozit.

V prvním experimentu při obrábění uhlíkového kompozitu byl zaznamenán u řezných sil nejvyrovnanější poměr v obou složkách u příčného frézování nástroje od firmy WNT 2, WNT 1 a u podélného frézování WNT 3 a SECO 2.

Při měření drsnosti obrobených povrchů bylo vysledováno, že v podélném směru byla drsnost v 5 případech z 8 lepší oproti frézování příčném. Nástroj KTOOLS vykázal zcela nejnižší hodnotou R_a u příčného frézování. V podélném pak nástroj SECO 4. Pokud bychom chtěli zvolit nejvhodnější nástroje pro obojí frézování k dosažení nejlepší drsnosti u uhlíkových kompozitů byly by to nástroje SECO 3 a 4. Naopak nástroj WNT 1 prokázal jedinou slabinu a to při frézování podélném, kdy nebylo možné změřit drsnost z důvodu trhlin a diamantový hrot drsnoměru se zasekával právě do těchto mezer.

Při vyhodnocení drsnosti byla zjištěna závislost, kdy při zvyšujícím se úhlu čela rostla i hodnota drsnosti R_a . Nejnižších hodnot drsnosti R_a při příčném i podélném frézování se dosáhlo při nízkých úhlech čela 6° a 7° . Další závislost se ukázala u počtu břitů při podélném frézování, kdy s vyšším počtem břitů se dosahovalo vyšších hodnot drsnosti R_a . Úhel šroubovice neměl na výsledky podstatný vliv.

Posledním sledovaným parametrem byly rozměry drážek po příčném frézování. Nástroje SECO 3 a 4 vyfrézovaly drážku s neuspokojivým výsledkem a to rozměru $5,49 \pm 0,02$ a $5,47 \pm 0,01$ mm. Nejpřesnější rozměr drážky byl zaznamenán u nástroje KTOOLS $6,00 \pm 0,04$ mm.

Úhel šroubovice a úhel čela nástroje neměl vliv na rozměr drážky. Naopak při počtu 1 – 3 břitů byl rozměr drážky nejpřesnější. Konkrétně u nástrojů KTOOLS, WNT 3 a WNT 2.

Ve druhém experimentu byla pozornost upřena na delaminační faktor. Bylo vyzorováno, že při snížení řezných podmínek se dosahovalo ve dvou případech lepších hodnot delaminačního faktoru. Nejvyšší delaminační faktor 1,65 byl naměřen při úběru 1 mm u

nástroje SECO 1. Naopak nejnižší hodnotu 1,16 vykazoval nástroj WNT 1 při úběru 1 mm a snížených řezných podmínkách.

Snížení delaminačního faktoru bylo pozorováno u frézování hloubky drážky 1 mm při úhlu čela 7° a 10° . Domnívám se, že úhel šroubovice a počet břitů nemá výrazný vliv na delaminační faktor.

Dalším významným sledovaným parametrem byla drsnost povrchu Ra . SECO 1 při nízkých otáčkách a posuvu prokazoval nejnižší hodnotu drsnosti Ra a v tomto srovnání patřil spolu s WNT 1 mezi nejvhodnější k obrábění tohoto druhu kompozitu. Naopak výsledky nástroje SECO 3 patřily k nejhorším a pro obrábění sklolaminátového kompozitu zřejmě nebude vhodnou variantou.

Úhel šroubovice a počet břítu nijak výrazně neovlivňovaly výsledky drsnosti Ra . Bylo však zjištěno, že u SECO 1 a WNT 1 při úhlech čela 7° a 10° zvýšila hodnota Ra . Tento poznatek byl vysledován při nízkém posuvu a úběru 1 mm.

Rozměr přesnosti drážek prokázaly následující výsledky. Nástroj WNT 3 zaznamenal nejpřesnější výsledky a naopak nástroj SECO 3 neméně přesné a to při obou řezných podmínkách.

Úhel šroubovice a počet břitů neměl výrazný vliv na rozměry drážky. Nástroje s úhlem čela 0° měly nižší hodnoty rozměru drážky. Jako nejvhodnější se zdá úhel čela 7° a 10° . Při těchto úhlech byl rozměr drážky přesnější, může tedy mít úhel čela jistý vliv na přesnost vyfrézovaných drážek.

Méně významným sledovaným parametrem v experimentu byl příkon stroje. Celkově vyšší hodnoty příkonu byly vysledovány při vyšším posuvu a otáčkách. Předpokládaný výsledek se potvrdil i v případě zvýšení příkonu při změně hloubky řezu z 1 mm na 3 mm.

Zcela nejlepším nástrojem ze všech sledovaných parametrů u obou experimentů, který převládá i ve srovnání poměru cena / výkon a směřuje k němu jednoznačné doporučení pro obrábění uhlíkového i sklolaminátového kompozitu je WNT 1. Naopak neméně vhodným nástroj KTOOLS, který je navíc primárně zaměřen spíše na obrábění grafitu, což se také potvrdilo a SECO 3, byť má příznivý poměr cena / výkon. Na základě všech poznatků z této práce bych však v tomto kritériu raději volil i za nejvyšší cenu nástroj WNT 3.

Jak výzkumná práce od Pedro Reis a J.P. Davim v kap. 6 uvádí, že dvoubřité nástroje dosahují lepší drsnosti Ra než nástroje šestibřité a rovněž i dvoubřité nástroje dosahují lepšího delaminačního faktoru [37].

Tento poznatek můžeme potvrdit i v této práci, kdy u uhlíkového kompozitu se pouze při podélném frézování prokázalo skutečně lepších hodnot drsnosti Ra . Nástroje s 1, 2 a 3 břity vykazovaly mírně lepší drsnost Ra než nástroje se 4 - 5 břity. Dosažené hodnoty drsnosti Ra v této práci se pohybuje v rozmezí IT 7 až 13. Naopak u delaminačního faktoru se to již nepotvrdilo. Zřejmě by bylo zapotřebí širšího rozboru a zaměření právě na tuto problematiku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Příručka pro technology - obrobitelnost. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost.html>
- [2] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. První. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání*. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta strojního inženýrství, 2005, 125 s.
- [4] Scribd.com. *Technologie II*. [online]. [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/51935268/skripta-Technologie-II-1dil>
- [5] SANDVIK Coromant. Skupiny obráběných materiálů [online]. [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx
- [6] Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. SEDLÁČEK, Jan. VUT V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [7] Změny v obrábění kompozitních materiálů. BENEŠOVÁ, Dana. SANDVIK COROMANT. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zmeny-v-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [8] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. SNTL - Praha 1: Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-734-88.
- [9] Charakterizace kompozitů. In: *Kompozity* [online]. 2005 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/15%20KAPITOLA%2013.pdf>
- [10] Harris, Bryan (1999). *Engineering Composite Materials (2nd Edition)*. Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining. Online version available at:

<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpECME0001/engineering-composite/engineering-composite>

- [11] Havel - Composites. *Technologie výroby kompozitů* [online]. [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [12] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [13] METAXA, Z.S., KONSTA-GDOUTO a SHAH. Crack Free Concrete Made with Nanofiber Reinforcement. *Mechanical Properties and Nanostructure of Cement-Based Materials Reinforced with Carbon Nanofibers and Polyvinyl Alcohol (PVA) Microfibers* [online]. [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: http://bwg.iti.northwestern.edu/publications/utc/safetea-lu/FR-3-Shah-Crack_Free_Concrete_Made_With_Nanofiber_Reinforcement.pdf
- [14] Tzbinfo. REJL, Oldřich. *Kompozitní materiály ve stavebnictví* [online]. 2013 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [15] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol ALEXYS, Ernest GONDÁR a Viera KHUNOVÁ. *Polymérne konštrukčné materiály: Odborná publikace* [online]. 2012 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
- [16] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [17] Akovali, Güneri (2012). *Advances in Polymer Coated Textiles*. Smithers Rapra Technology. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAPCT0001/advances-in-polymer-coated/advances-in-polymer-coated>
- [18] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008, 94 s.
- [19] RUSNÁKOVÁ, Soňa. UČEBNÍ TEXT - VÝUKA. *Kompozitní materiály*. Zlín, 2014.
- [20] Frézování. *Techstroj* [online]. [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/T/T16.pdf>

- [21] Technologie II. 2 díl. *Technologie třískového obrábění* [online]. [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [22] Příručka pro technology: Kompenzační přístup při frézování - poloha frézy. DE VOS, Patrick. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-kompenzacni-pristup-pri-frezovani-poloha-frezy.html>
- [23] Drsnost povrchu. *Měření drsnosti povrchu* [online]. 2002 [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf
- [24] PATA, Vladimír. Měření jakosti povrchu. *Učíme v prostoru* [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=1985
- [25] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 420 s. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [26] JANDEČKA, Karel. *Postprocesory a programování NC strojů*. Vyd. 1. Ústí nad Labem: UJEP, FVTM, 2007, 244 s. Knihnice strojírenské technologie. ISBN 978-80-7044-870-0.
- [27] CNC příručka. *Vitralab* [online]. 2009 [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/upload/CNC%20prirucka_CZ.pdf
- [28] KELLER, Petr. Programování CNC strojů. *Technická univerzita v Liberci: Katedra výrobních systémů* [online]. 2005 [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf
- [29] JURKO, Jozef a Imrich LUKOVICS. *Obrábatel'nosť materiálů*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2008, 142 s. ISBN 978-80-7318-736-1.
- [30] KAROL VASILKO, Jan Mádl. *Teorie obrábění. 1. díl* 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012, 298 s. ISBN 978-807-4144-592.
- [31] SECOTOOLS. *JC800 composite range* [online]. 2015 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/en/Global/Products/Milling/Solid-carbide-end-mills/JC800-composite-range/>
- [32] SECOTOOLS. *Composite catalogue* [online]. 2015 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: http://www.secotools.com/static/composite_catalogue/

- [33] WNT Online shop - katalog. *Monolitní TK frézy s povlakem* [online]. 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: [https://www.toolingcenter.com/CS/category/Hlavní katalog/Frézování/Monilitní TK frézy](https://www.toolingcenter.com/CS/category/Hlavní_katalog/Frézování/Monilitní_TK_frézy)
- [34] K - TOOLS. *Nástroje pro obrábění grafitu* [online]. 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.k-tools.cz/index.php?url=cs/katalog/15002d>
- [35] Mitutoyo. In: *Měření jakosti povrchu* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2005 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2609_Mitutoyo_Drsnomery.pdf
- [36] Cutting overview lowres. In: *Oerlikon* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://1url.cz/T0Iv>
- [37] DAVIM, J.Paulo a Pedro REIS. *Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments*. Campus Santiago, Portugal, 2004. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.proxy.k.utb.cz/science/article/pii/S0924013604008453>. University of Aveiro.
- [38] THE UNIVERSITY OF MANCHESTER. *School of Materials: Composite Materials* [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.materials.manchester.ac.uk/our-research/research-groupings/polymers-composites-and-carbon/research-themes/composite-materials/>
- [39] NASA. *NASA Creates Partnership to Advance Composite Materials for Aircraft of the Future* [online]. April 2, 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.nasa.gov/press/2015/april/nasa-creates-partnership-to-advance-composite-materials-for-aircraft-of-the-future/>
- [40] SANDVIK COROMANT. *Composite Machining: Composites in construction* [online]. November 25, 2014 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://1url.cz/N0Pt>
- [41] INTERNATIONAL JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING. *Cutting forces in Milling of Carbon Fibre Reinforced Plastics* [online]. 2014 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://1url.cz/N0PL>

- [42] SANDVIK COROMANT. *Literature Review – Composite Machining 2014 0* [online]. February 18, 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://compositemachining.org/2015/02/literature-review-composite-machining-2014/>
- [43] MATBASE: Natural & Synthetic Composites. [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-composites/polymer-matrix-composites-pmc/reinforced-polymers/material-properties-of-unsaturated-polyester-resin-25-percent-glass-fiber-reinforced-sheet-mouldi.html#optical-properties>
- [44] LECIÁN, Bc. Václav. *Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kord-carbon tkaniny*. Zlín, 2014. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CNC	Computer Numerical Control
NC	Numerical Control
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ČSN	Česká technická norma
PC	Personal Computer
CLA	Chromatic Length Aberration
JC	Jabro Composite
CC	Cemented Carbide
PES	Polyethersulfone
Ff	Posuvová složka řezné síly
Ffn	Kolmá složka posuvové síly
Ra	Střední aritmetická úchylka drsnosti
Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu
Rz	Výška nerovnosti
v_c	Řezná rychlost
v_f	Posuvová rychlost
f_z	Posuv na zub
f_n	Posuv na otáčku
a_p	Hloubka řezu
n	Otáčky
a_e	Šířka záběru
konst.	Konstantní

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Vlastnosti ovlivňující obrobiteľnosť materiálu [1].....</i>	13
<i>Obr. 2. Skupiny obráběných materiálů dle standardy ISO [5].....</i>	14
<i>Obr. 3. Hodnoty Kv indexu obrobiteľnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí [4].....</i>	15
<i>Obr. 4. Vztahy mezi konstrukčními materiály a vývojem kompozitů [10].....</i>	19
<i>Obr. 5. Fázové rozhraní vlákno – matrice [11].....</i>	20
<i>Obr. 6. Rozdělení kompozitních materiálů [19].....</i>	21
<i>Obr. 7. Struktura mikrokompozitního materiálu [13].....</i>	21
<i>Obr. 8. Příklad makrokompozitního materiálu [14].....</i>	22
<i>Obr. 9. Struktura nanokompozitního materiálu [13].....</i>	22
<i>Obr. 10. Příklady sférických (a), destičkových (b) a vláknitých (c) typů částicových plniv [15].....</i>	24
<i>Obr. 11. Příklady uspořádání rovinného uspořádání vláken: a) jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken, b) dvouosá orientace, c) rohož (nahodilá orientace kontinuálních nebo krátkých vláken), d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [12].....</i>	25
<i>Obr. 12. Druhy vazeb vyztužujících tkanin a) plátňová vazba b) keprová vazba c) saténová vazba [16].....</i>	26
<i>Obr. 13. Struktura skleněného vlákna [16].....</i>	26
<i>Obr. 14. Nejdůležitější typy sklovláknitých výztuží a) roving b) rohož c) tkanina pramenců d) tkanina z vláken e) krátká vlákna (přibližně délky 0,22 mm) f) dlouhá vlákna (přibližně délky 5 mm) [16].....</i>	29
<i>Obr. 15. Řez aramidovým vláknem se silným roztřepením v místě lomu [16].....</i>	29
<i>Obr. 16. Mikrostruktura uhlíkového vlákna [16].....</i>	31
<i>Obr. 17. Porovnání přírodních a skleněných vláken [16].....</i>	32
<i>Obr. 18. Proces ručního kladení [19].....</i>	39
<i>Obr. 19. Schéma výroby prepregu [16].....</i>	40
<i>Obr. 20. Ukázka principu vakuové infuze [19].....</i>	41
<i>Obr. 21. Schéma principu tažení (pultruze) [11].....</i>	42
<i>Obr. 22. Schéma principu navíjení [16].....</i>	43
<i>Obr. 23. Vlastnosti polymerních kompozitů z pohledu podniků [16].....</i>	44
<i>Obr. 24. Princip sousledného frézování [22].....</i>	46

<i>Obr. 25. Princip nesousledného frézování [22]</i>	46
<i>Obr. 26. Čelní frézování [21]</i>	47
<i>Obr. 27. Okružní frézování a) vnější b) vnitřní [21]</i>	47
<i>Obr. 28. Planetové frézování a) vnější b) vnitřní [21]</i>	48
<i>Obr. 29. Průřez třísky při válcovém a čelním frézování [21]</i>	50
<i>Obr. 30. Rozklad síly řezání na zubu válcové frézy pro nesousledné a sousledné frézování, kde: F_i – celková síla řezání, F_{ci} – řezná složka, F_{cNi} – kolmá posuvová složka síly řezání, F_{fi} – posuvová složka síly řezání, F_{fNi} – kolmá posuvová složka síly řezání [21]</i>	51
<i>Obr. 31. Závislost opotřebení na čase při různých řezných rychlostech [4]</i>	53
<i>Obr. 32. Zlogaritmovaný diagram $T - v_c$ [4]</i>	54
<i>Obr. 33. Schéma procesu CNC programování [28]</i>	57
<i>Obr. 34. Absolutní programování [27]</i>	58
<i>Obr. 35. Přírůstkové programování [27]</i>	58
<i>Obr. 36. Obecný povrch a jeho části [23]</i>	59
<i>Obr. 37. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a (šedivě) [23]</i>	60
<i>Obr. 38. Výška nerovnosti R_z [24]</i>	60
<i>Obr. 39. Značení drsnosti povrchu [23]</i>	61
<i>Obr. 40. Základní druhy označení pro drsnost povrchu [23]</i>	61
<i>Obr. 41. Ukázka vrstev materiálu [3]</i>	62
<i>Obr. 42. Vzorkovnice drsnosti povrchů [23]</i>	63
<i>Obr. 43. Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [24]</i>	64
<i>Obr. 44. Příklad výsledků profilu z drsnoměru P_t – hloubka profilu, W_t – výška vlnitosti, R_t – největší hloubka drsnosti, l_n – vyhodnocovaná délka [23]</i>	64
<i>Obr. 45. Nasnímaný 3D povrch pomocí CLA snímače [24]</i>	65
<i>Obr. 46. Fréza JC 860 HONEYCOMB ROUTER [32]</i>	69
<i>Obr. 47. Fréza JC 880 LOW HELIX [32]</i>	70
<i>Obr. 48. Fréza JC 870 MULTI – FLUTE ROUTERS [32]</i>	71
<i>Obr. 49. Monolitní TK fréza na voštinové kompozitní materiály [33]</i>	72
<i>Obr. 50. Monolitní TK fréza levořezná na plasty vyztužené vláknem [33]</i>	72
<i>Obr. 51. Monolitní pravořezná TK fréza [33]</i>	73
<i>Obr. 52. Univerzální fréza 15002D na obrábění grafitu [34]</i>	74
<i>Obr. 53. CNC Frézka C-422 HWT</i>	76

Obr. 54. Dynamometr s náčrtem měřených řezných sil.....	79
Obr. 55. Schéma procesu měření řezných sil uhlíkových kompozitů	79
Obr. 56. Schéma obrábění uhlíkových kompozitů podélným (vlevo) a příčným (vpravo) frézováním v programu Catia V5R18.....	80
Obr. 57. Celkový průběh naměřených řezných sil	81
Obr. 58. Srovnání maximálních a minimálních řezných sil F_{fn} pro příčné frézování	82
Obr. 59. Srovnání maximálních a minimálních řezných sil F_f pro příčné frézování	83
Obr. 60. Srovnání minimálních a maximálních řezných sil F_{fn} pro podélné frézování	83
Obr. 61. Srovnání minimálních a maximálních řezných sil F_f pro podélné frézování	84
Obr. 62. Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ 301	85
Obr. 63. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro příčné frézování uhlíkového kompozitu	85
Obr. 64. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro podélné frézování uhlíkového kompozitu.....	86
Obr. 65. Snímání povrchu ručním mikroskopem ProScope HR	87
Obr. 66. Srovnání kvality po obrábění uhlíkového kompozitu A) WNT 2 B) WNT 3 C) WNT 1 D) KTOOLS E) SECO 1 F) SECO 2 G) SECO 4 H) SECO 3 I) referenční nástroj	88
Obr. 67. Porovnání míst A) WNT 1 B) WNT 3 C) WNT 2 D) KTOOLS.....	89
Obr. 68. Porovnání míst nástroji SECO A) 1 B) 4 C) 2 D) 3	89
Obr. 69. Přesnost a rozdíly průměrů drážek uhlíkového kompozitu při $n=5310$ ot. /min a $v_f = 550$ mm/min.....	90
Obr. 70. Opatření nástroje SECO 2 po podélném a příčném frézování	91
Obr. 71. Opatření nástroje KTOOLS po podélném a příčném frézování	91
Obr. 72. Opatření nástroje WNT 2 po podélném a příčném frézování.....	91
Obr. 73. Ukázka principu frézování sklolaminátového kompozitu	93
Obr. 74. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro příčné frézování sklolaminátového kompozitu při 5310 ot. /min a $v_f=550$ mm/min	94
Obr. 75. Porovnání drsnosti povrchu R_a pro příčné frézování sklolaminátového kompozitu při 2610 ot. /min a $v_f=240$ mm/min	95
Obr. 76. Srovnání kvality po obrábění sklolaminátového kompozitu nástroji A) SECO 1 B) SECO 1 (nízké otáčky a posuv) C) SECO 3 D) SECO 3 (nízké otáčky a posuv) E) WNT 1 F) WNT 1 (nízké otáčky a posuv) G) WNT 3	96
Obr. 77. Kompletní pohled na obrobenou plochu sklolaminátového kompozitu.....	97
Obr. 78 Ukázka metodiky delaminačního faktoru [37].....	98

<i>Obr. 79. Rozměry drážek sklolaminátu při různých otáčkách, posuvech a úběru materiálu 1 mm.....</i>	100
<i>Obr. 80. Srovnání opotřebení nástrojů A) WNT 1 B) SECO 3 C) SECO 1 D) WNT 3.....</i>	100
<i>Obr. 81. Procentuální vyjádření zvolené váhy podle sledovaných veličin u uhlíkového (vlevo) a sklolaminátového (vpravo) kompozitu</i>	101
<i>Obr. 82. Sestupné seřazení nejvhodnějších nástrojů (zeleně) pro obrobitelnost uhlíkového kompozitu</i>	104
<i>Obr. 83. Sestupné seřazení nejvhodnějších nástrojů pro obrobitelnost sklolaminátového kompozitu</i>	106
<i>Obr. 84. Nejvhodnější (vlevo) a méně vhodné (vpravo) nástroje pro obrobitelnost obou typů kompozitních materiálů</i>	107
<i>Obr. 85. Nejlépe hodnocené nástroje pro uhlíkové (vlevo) a sklolaminátové (vpravo) kompozity podle poměru cena / výkon.....</i>	107

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Složení skloviny a důležité vlastnosti neupravených vláken [16]</i>	28
<i>Tab. 2. Vlastnosti jednosměrně vyztuženého epoxidového laminátu vyztuženého vysokomodulovým aramidovým vláknem [16]</i>	30
<i>Tab. 3. Tepelná stabilita některých polymerních matric [10]</i>	36
<i>Tab. 4. Výrobní technologické postupy kompozitních materiálů [18]</i>	38
<i>Tab. 5. Základní rozdíly NC/CNC [28]</i>	56
<i>Tab. 6. Přehled dosahované drsnosti při různých typech obrábění [23]</i>	61
<i>Tab. 7. Oblasti povrchu, jejich hloubka a funkční ovlivnění [3]</i>	62
<i>Tab. 8. Parametry SECO 1 [31,32]</i>	70
<i>Tab. 9. Parametry SECO 2 [31,32]</i>	70
<i>Tab. 10. Parametry SECO 3 [31,32]</i>	71
<i>Tab. 11. Parametry WNT 1 [33]</i>	72
<i>Tab. 12. Parametry WNT 2 [33]</i>	73
<i>Tab. 13. Parametry WNT 3 [33]</i>	73
<i>Tab. 14. Parametry KTOOLS [34]</i>	74
<i>Tab. 15. Shrnutí použitých nástrojů</i>	75
<i>Tab. 16. Parametry CNC frézky C-442 HWT</i>	76
<i>Tab 17. Řezné podmínky při obou metodách frézování uhlíkových kompozitů</i>	78
<i>Tab. 18. Mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitu [44]</i>	78
<i>Tab. 19. Parametry referenčního nástroje</i>	87
<i>Tab. 20. Řezné podmínky při obrábění sklolaminátu</i>	93
<i>Tab. 21. Mechanické vlastnosti sklolaminátu [43]</i>	93
<i>Tab. 22. Hodnoty příkonů při obrábění sklolaminátu</i>	95
<i>Tab. 23. Označení nástrojů při obrábění sklolaminátového kompozitu</i>	96
<i>Tab. 24. Výsledky delaminačního faktoru při různých řezných podmínkách</i>	98
<i>Tab. 25. Výsledky rozměrů drážek při různých řezných podmínkách a úběru</i>	99
<i>Tab. 26. Parametry použitých nástrojů pro experimenty</i>	102
<i>Tab. 27. Výsledky experimentů uhlíkových kompozitů</i>	103
<i>Tab. 28. Výsledky experimentů sklolaminátového kompozitu</i>	104

SEZNAM PŘÍLOH

PI: Záznam z měření – složky řezných sil

PII: Srovnání hodnot průměrů drážek u sklolaminátového kompozitu

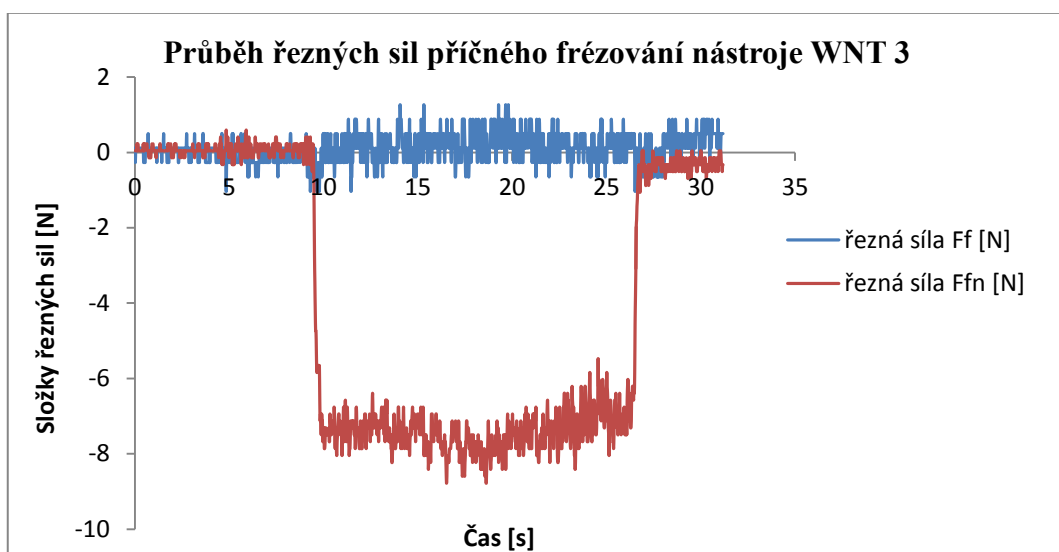
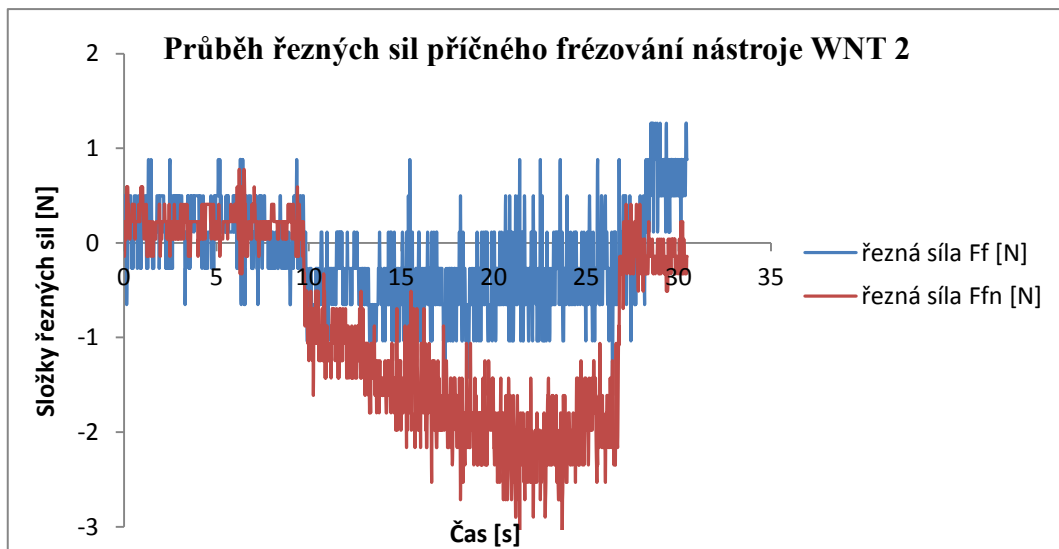
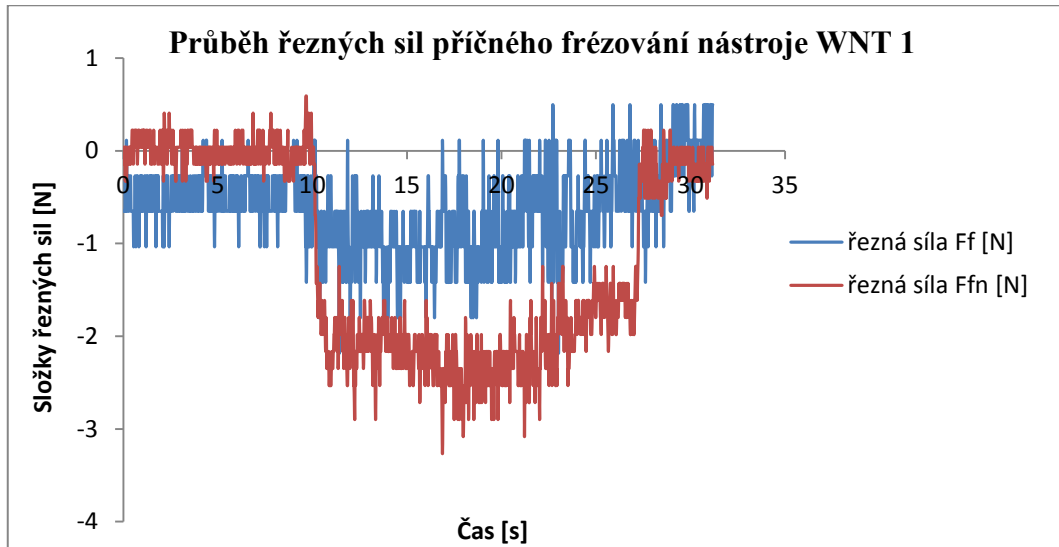
PIII: Srovnání jakosti povrchu u sklolaminátového kompozitu

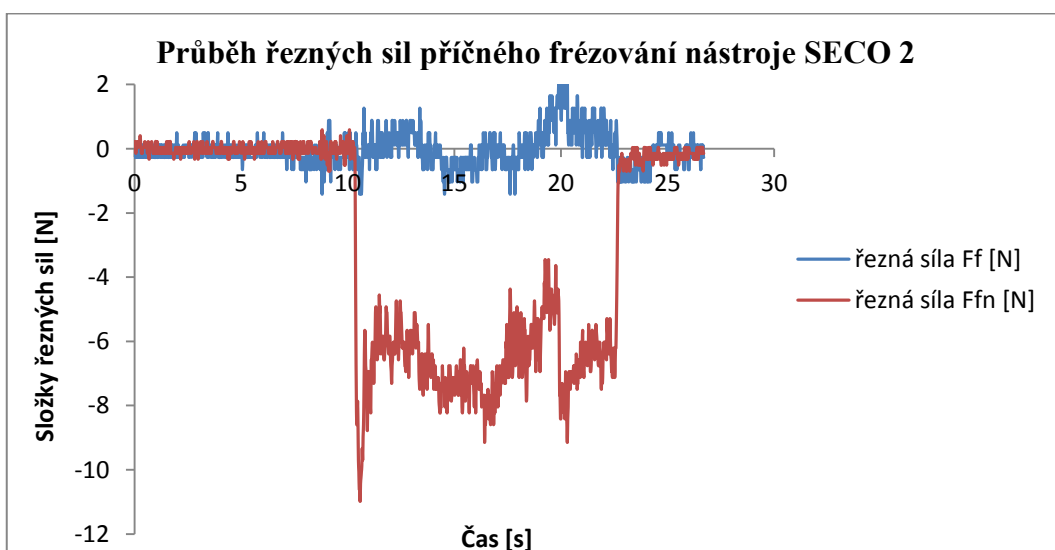
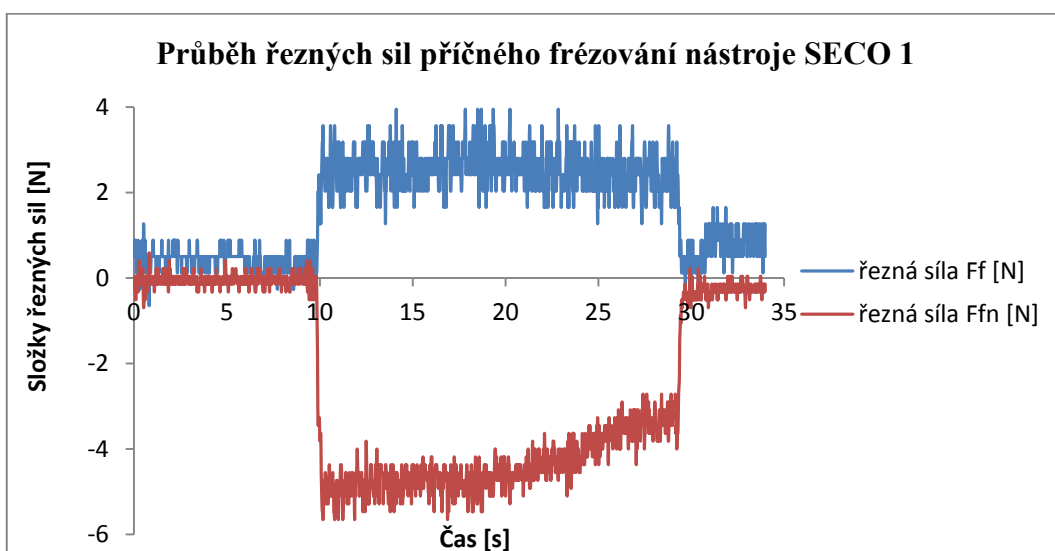
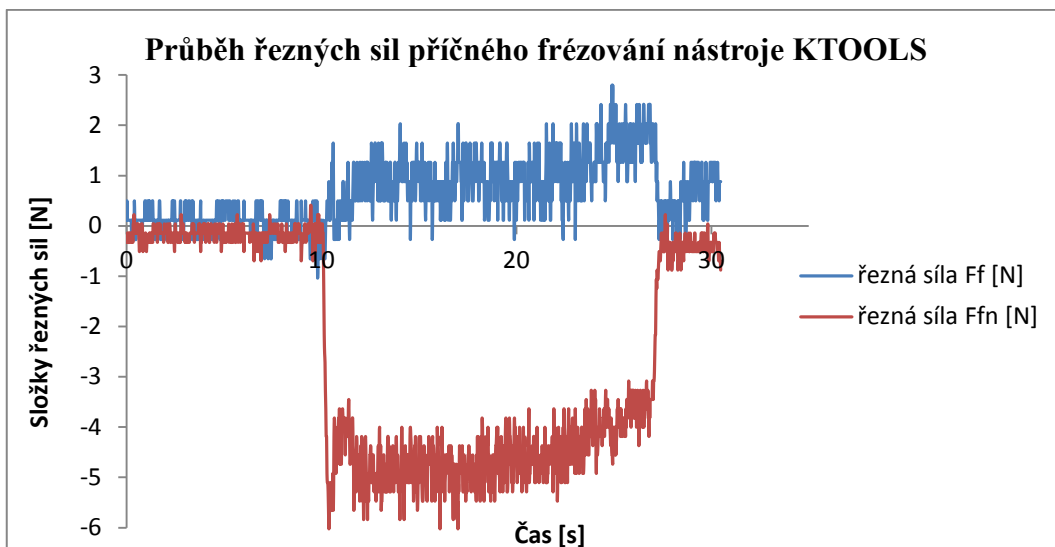
PIV: Srovnání jakosti povrchu u uhlíkového kompozitu

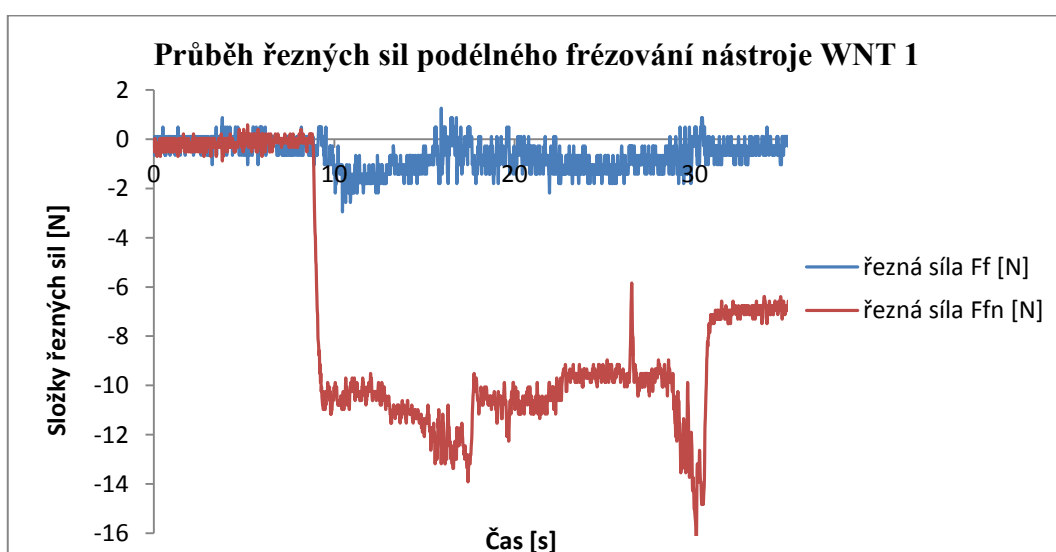
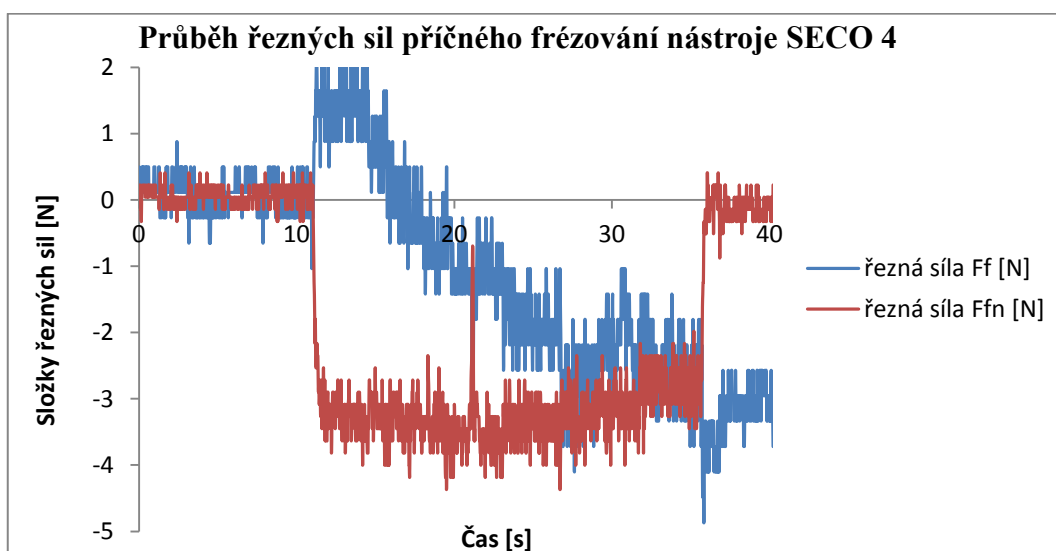
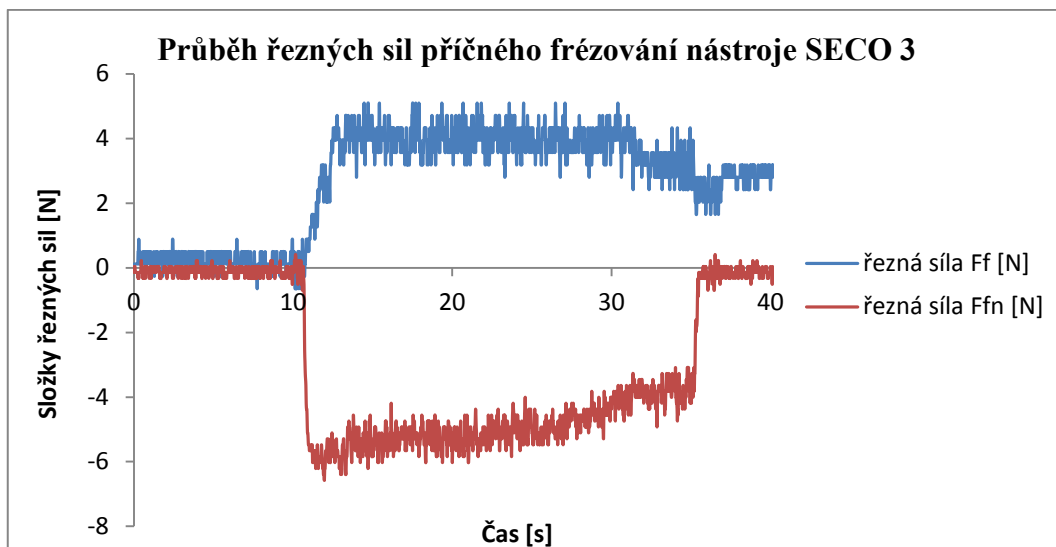
PV: Ukázka záznamu měření drsnoměrem Mitutoyo

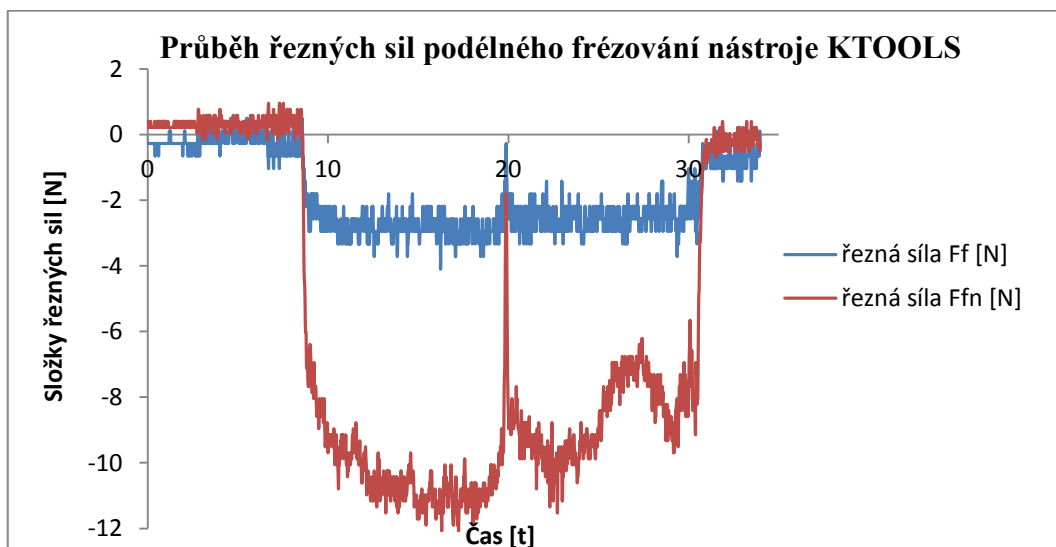
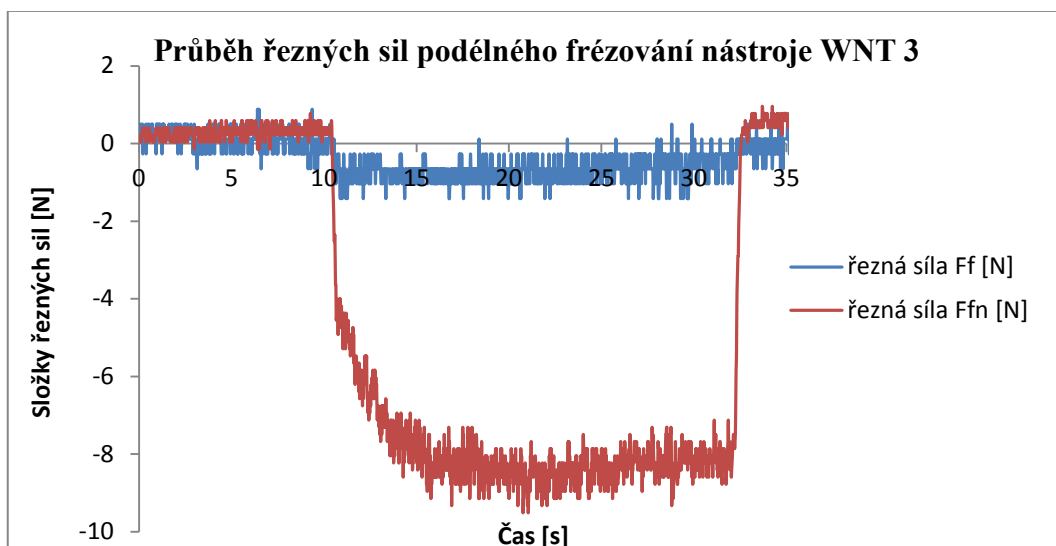
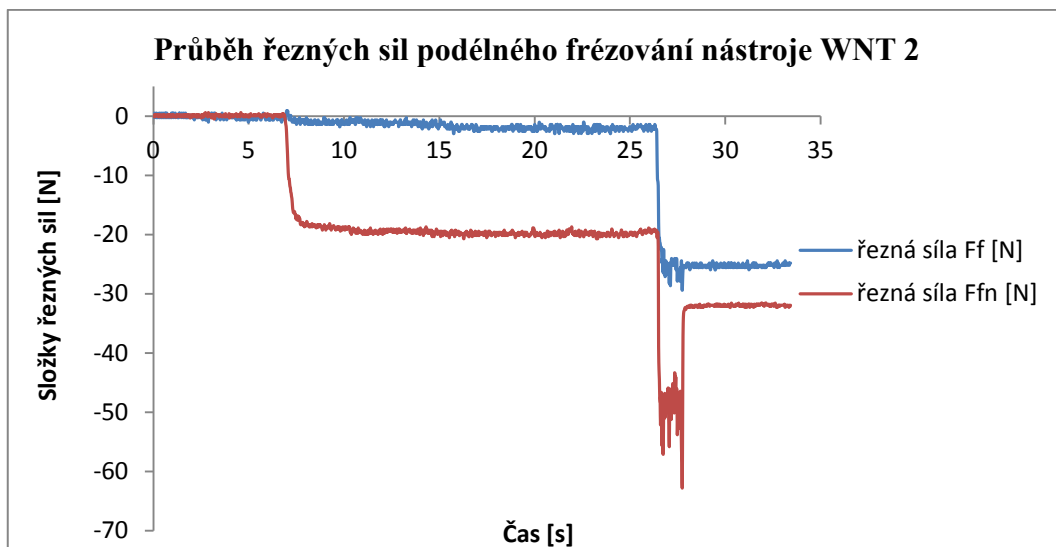
PVI: Příklady vyhodnocení dat – Box Plot v programu Minitab 16

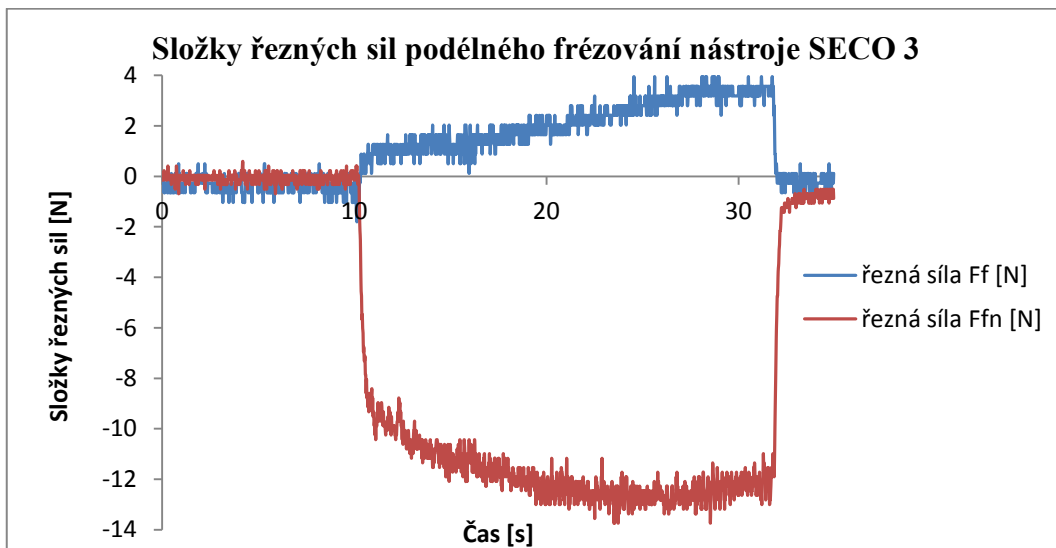
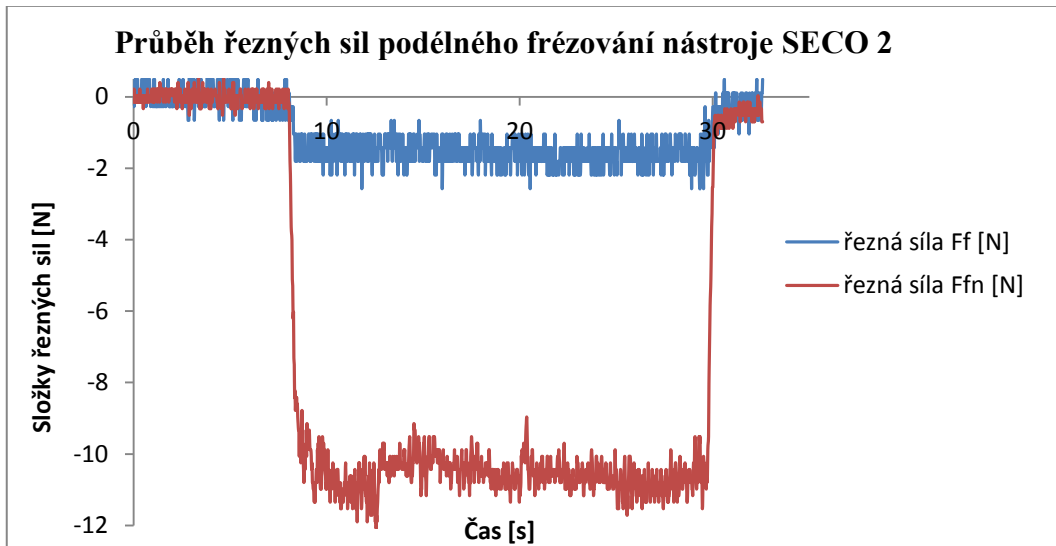
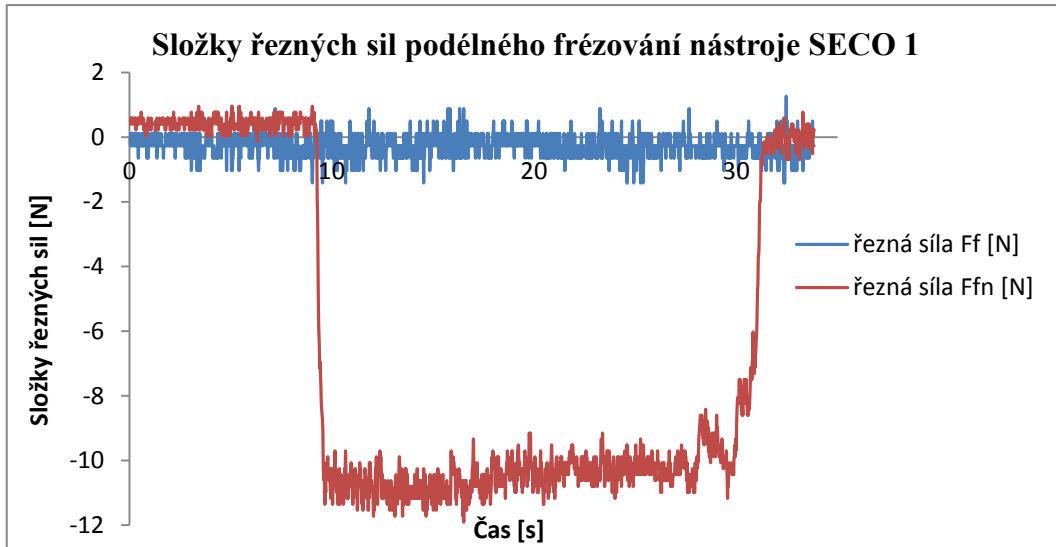
PŘÍLOHA PI: ZÁZNAM Z MĚŘENÍ – SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL



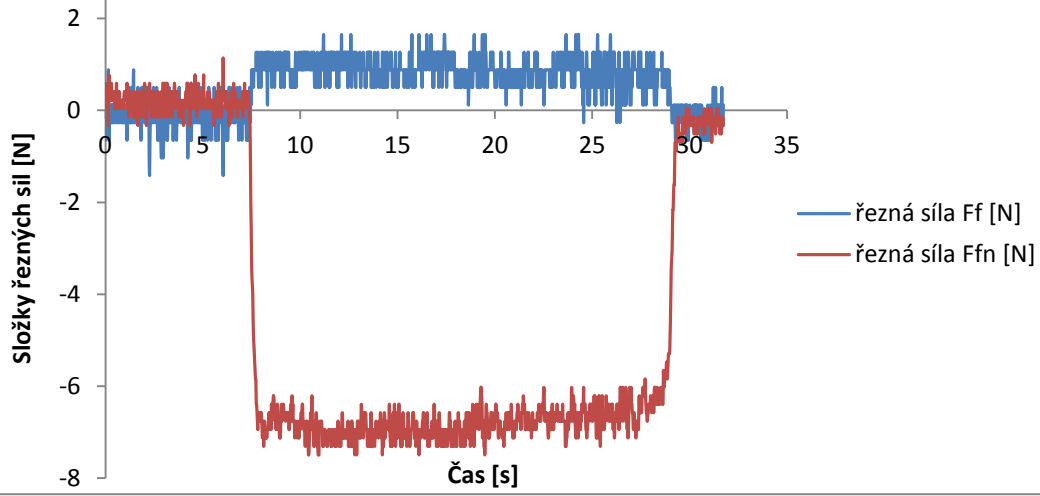




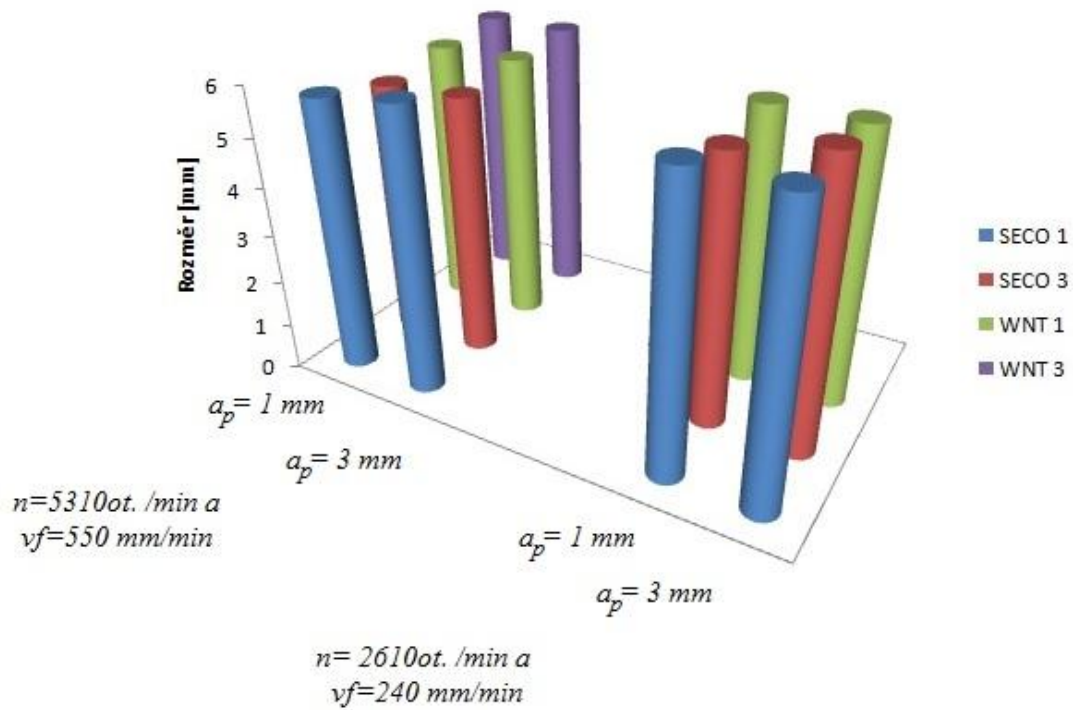




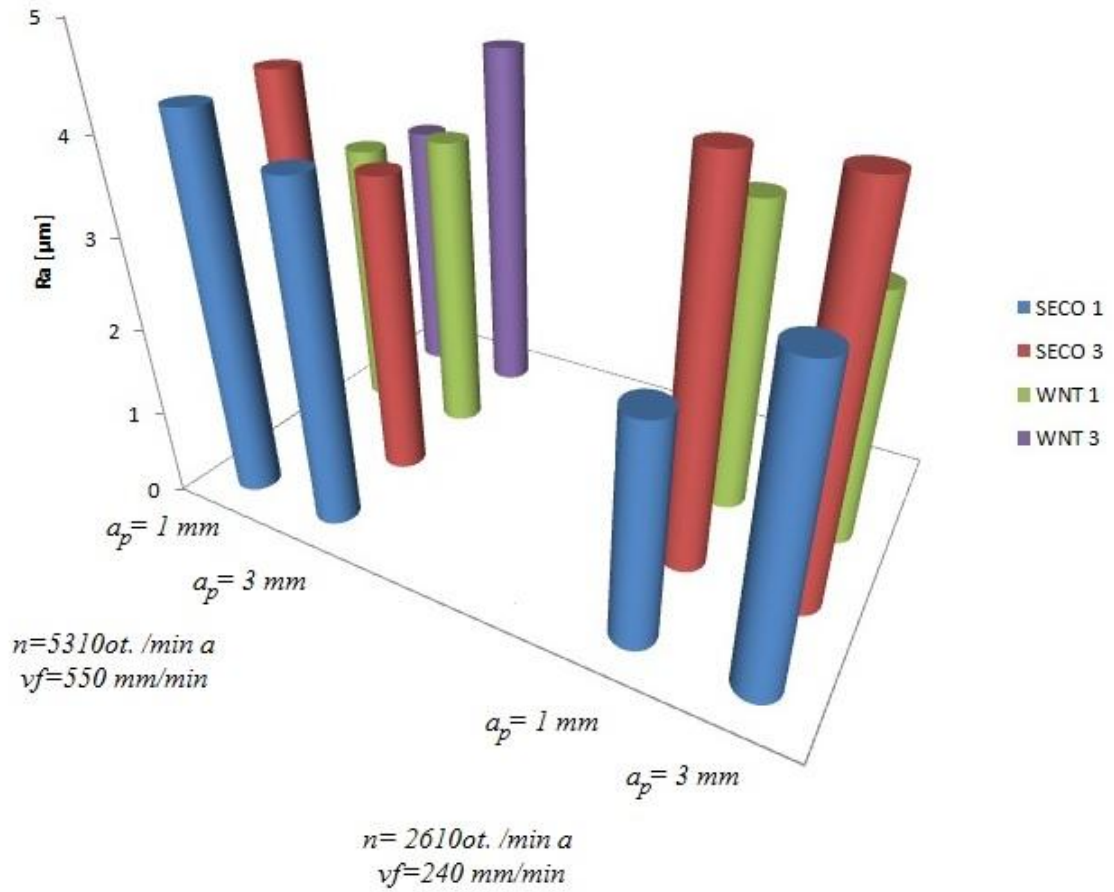
Průběh řezných sil podélného frézování nástroje SECO 4



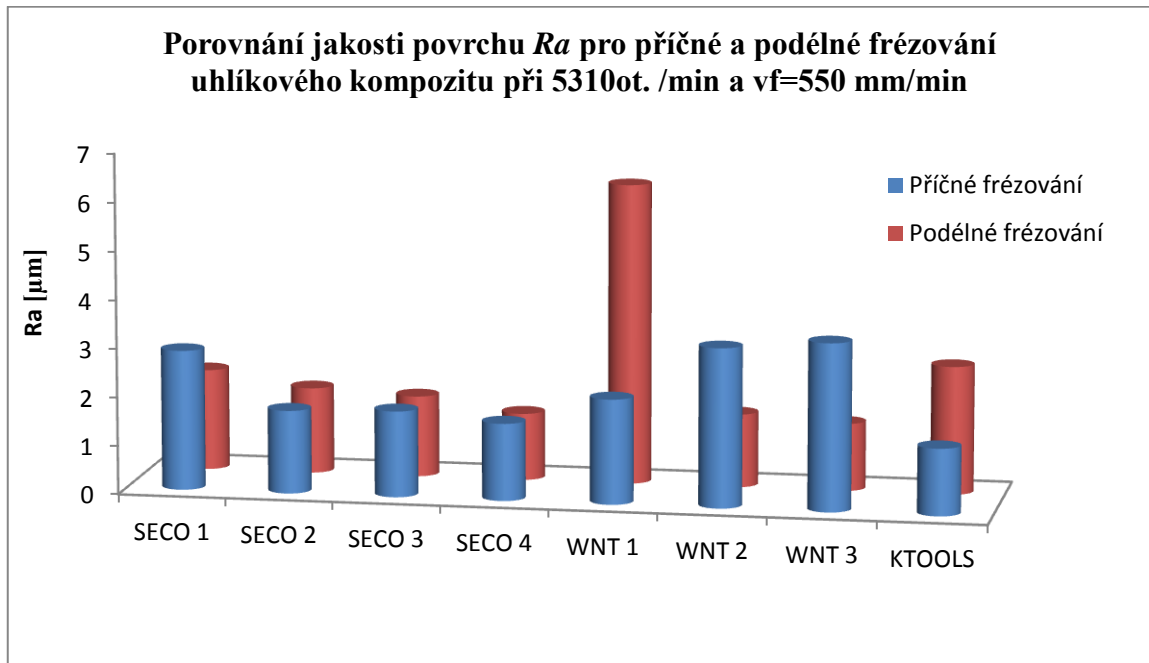
PŘÍLOHA PII: SROVNÁNÍ HODNOT PRŮMĚRŮ DRÁŽEK U SKLOLAMINÁTOVÉHO KOMPOZITU



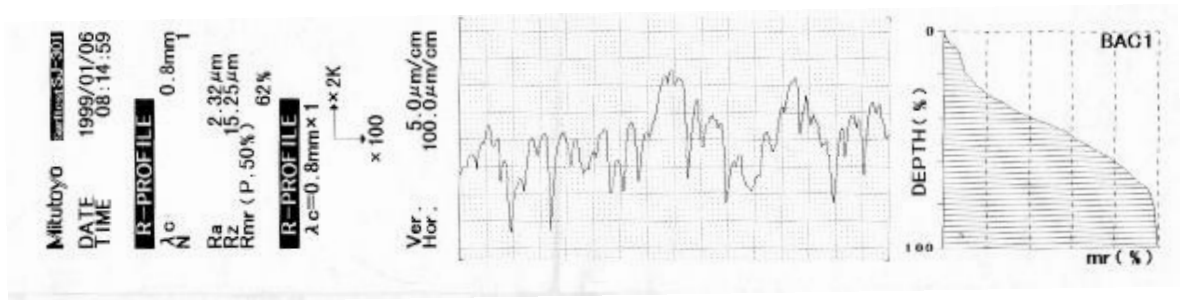
PŘÍLOHA PIII: SROVNÁNÍ JAKOSTI POVRCHU U SKLOLAMINÁTOVÉHO KOMPOZITU



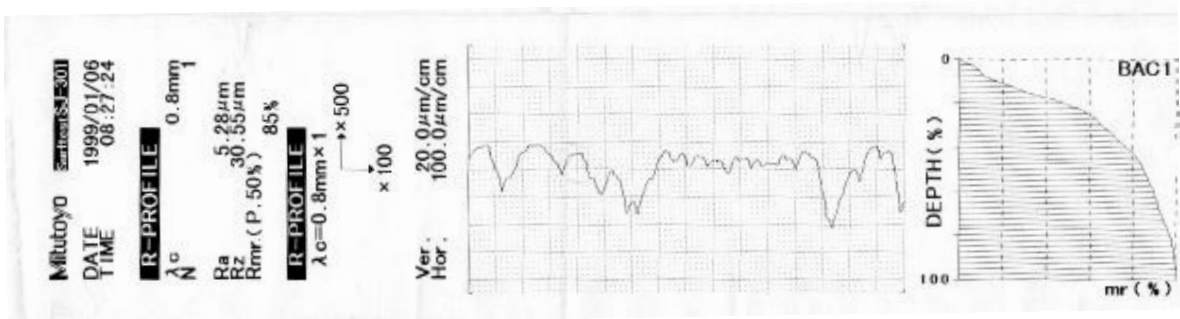
PŘÍLOHA PIV: SROVNÁNÍ JAKOSTI POVRCHU U UHLÍKOVÉHO KOMPOZITU



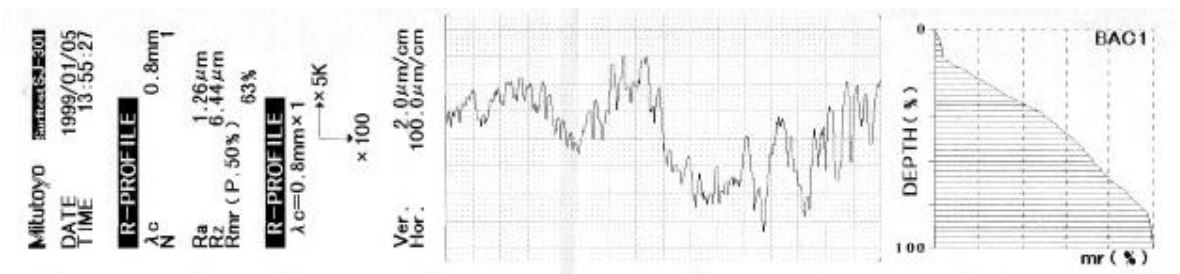
PŘÍLOHA PV: UKÁZKA ZÁZNAMU MĚŘENÍ DRSNOMĚREM MITUTOYO



Záznam měření drsnosti povrchu sklolaminátu nástrojem WNT 1



Záznam měření drsnosti povrchu sklolaminátu nástrojem SECO 3



Záznam měření drsnosti povrchu uhlíkového kompozitu nástrojem WNT 2

PŘÍLOHA PVI: PŘÍKLADY VYHODNOCENÍ DAT – BOX PLOT V PROGRAMU MINITAB 16

