

Vliv řezných parametrů při obrábění kompozitních materiálů

Bc. Filip Vápeník

Diplomová práce
2023

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Vápeník**
Osobní číslo: **T21429**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Vliv rezných parametrů při obrábění kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování

- teoretická rešerše na dané téma
- příprava experimentu pro frézování vláknově vyztužených kompozitních struktur
- měření rezných sil, vibrací a jakosti obrobeného povrchu
- statistické vyhodnocení naměřených dat a stanovení závislostí

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- BARBERO, Ever J. *Introduction to Composite Materials Design*, Third edition, CRC Press, Taylor CRC Press, Boca Raton. 2018.
EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351 s, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6
TETI, Roberto. Machining of composite materials. *CIRP Annals*, 2002, 51.2: 611-634.
SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. *Machining of polymer composites*. New York: Springer, 2009.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Bilek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce za pomoci dvou experimentů zkoumá a optimalizuje vstupy řezných parametrů při frézování kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny. Kdy popisuje jejich hlavní vliv na řezný odpor a jakost povrchu obrobené plochy. Dochází ke kombinaci množství vstupů v podobě nástrojů a řezných parametrů, dle kterých jsou naměřeny výstupní hodnoty. Ty umožňují pomocí metody DOE statisticky stanovit nejefektivnější závislosti a optimalizovat vstupní parametry.

Klíčová slova: obrábění, kompozitní materiály, řezné parametry, řezné síly, jakost povrchu, nástroje, DOE

ABSTRACT

The thesis uses two experiments to investigate and optimize the cutting parameter inputs for milling carbon fiber reinforced composite materials. It describes their main influence on the cutting resistance and surface finish of the machined surface. A number of inputs in the form of tools and cutting parameters are combined, according to which the output values are measured. These allow the DOE method to statistically determine the most effective dependencies and optimize the input parameters.

Keywords: machining, composite materials, cutting parameters, cutting forces, surface finish, tools, DOE

Mé poděkování patří v první řadě panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za výborný přístup, dokonalé naplánování průběhu, trpělivost, ochotu a odbornou pomoc s tvorbou celé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Ondříkovi za pomoc a spolupráci ve zpracování všech úkonů týkajících se praktické části diplomové práce.

Poděkování patří také paní doc. Ing. Soně Rusnákové Ph.D. za odbornou pomoc při zpracování kompozitních materiálů.

V poslední řadě patří poděkování také mé rodině a blízkým za podporu po celou dobu studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.2 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.3 SLOŽENÍ	16
1.4 ČÁSTICOVÁ VÝZTUŽ.....	17
1.5 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA.....	17
1.5.1 Skleněná vlákna	19
1.5.2 Aramidová vlákna	21
1.5.3 Uhlíková vlákna	23
1.5.4 Přírodní vlákna	27
1.5.5 Vlákna pro vysokoteplotní aplikace.....	27
1.6 PREPREGY	28
1.6.1 Výhody prepregů.....	29
1.6.2 Nevýhody prepregů.....	29
1.7 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	30
2 VÝROBA DÍLŮ Z VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITŮ	31
2.1 RUČNÍ LAMINACE	31
2.2 NÁSTRÍK.....	32
2.3 VAKUOVÉ TECHNOLOGIE	33
2.4 NAVÍJENÍ.....	35
2.5 PULTRUZE	36
2.6 VÝROBA PLÁTŮ	37
3 OBŘÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH VLÁKNOVÝCH STRUKTUR	38
3.1 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY PROCESU ŘEZÁNÍ	38
3.1.1 Mechanismus vzniku třísky.....	40
3.1.2 Chlazení.....	40
3.2 DELAMINACE	41
3.3 FRÉZOVÁNÍ	42
3.3.1 Řezné síly při frézování	42
3.3.2 Řezné podmínky při frézování	44
3.3.3 Frézování vláknově vyztužených kompozitů.....	45
4 METODY MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ EXPERIMENTŮ	47
4.1 ZÁKLADNÍ POJMY STRUKTURY POVRCHU	47

4.1.1	Základní parametry povrchu profilu	48
4.1.2	Základní parametry plošného hodnocení textury povrchu.....	49
4.1.3	Metody měření drsnosti povrchu	50
4.2	PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ	53
4.2.1	Základní rozdělení dynamometrů	54
4.3	NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ.....	56
4.4	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ.....	56
4.4.1	Metoda DOE	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST	59
5	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	60
6	AKTUÁLNÍ STAV VÝZKUMU A VÝVOJE VLIVU ŘEZNÝCH PODMÍNEK NA OBRÁBĚNÍ KOMPOZITŮ CFRP	61
7	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	62
7.1	VÝROBA POLOTOVARU.....	62
7.1.1	Materiál	62
7.1.2	Výrobní postup.....	62
8	VLIV SPECIÁLNÍCH NÁSTROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ CFRP KOMPOZITŮ.....	67
8.1	POUŽITÉ NÁSTROJE.....	67
8.2	POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE	69
8.3	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU.....	71
8.4	PRŮBĚH EXPERIMENTU	72
8.5	VÝSLEDKY EXPERIMENTU	73
8.5.2	Porovnání naměřených drsností povrchu	75
8.5.3	Diskuze výsledků	76
9	VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ PŘI OBRÁBĚNÍ CFRP KOMPOZITŮ.....	77
9.1	POUŽITÉ NÁSTROJE.....	77
9.2	POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE	80
9.3	PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU	82
9.4	VSTUPNÍ DATA EXPERIMENTU	85
9.5	NAMĚŘENÉ HODNOTY	85
9.5.1	Vliv souslednosti a nesouslednosti při frézování CFRP kompozitů	92
9.6	HODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ	93
9.7	OPTIMALIZACE.....	107
9.8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	108
	ZÁVĚR	109
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	111

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	114
SEZNAM OBRÁZKŮ	115
SEZNAM TABULEK.....	119
SEZNAM PŘÍLOH.....	120

ÚVOD

V současné době představují kompozitní materiály a jejich technologie revoluční posun v oblasti konstrukčních materiálů. Použití těchto materiálů překračuje hranice, které byly s klasickými konstrukčními materiály a technologiemi nedosažitelné. Kompozitní materiály se využívají na místech, kde se jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti vyrovnávají s vyššími pořizovacími náklady.

Tato diplomová práce přináší efektivní přehlednost chování CFRP kompozitů při frézování. Dle přiložených grafů a tabulek může programátor, seřizovač či operátor jednoznačně určit ideální řezné parametry při frézovacích operacích a tím zvýšit spolehlivost a účinnost celého obráběcího procesu, přičemž může také efektivně snížit celkové opotřebení nástrojů.

První kapitola od základů obecně popisuje pojmy, druhy, vlastnosti a využití kompozitních materiálů.

Další část popisuje výrobní procesy a technologie zpracování těchto materiálů za různých typů a podmínek.

Zbývající statě teoretické části této práce se zabývají obecné problematice obrábění nejen kompozitních materiálů. V posledních fázích jsou také popsány různé metody měření veličin a vyhodnocení naměřených dat.

Úvodem praktické části budou nejprve stanoveny a popsány její cíle následně budou popsány a citovány podobné výzkumy z vědeckých článků.

V první fázi praktické části bude popsána výroba a příprava polotovaru pro obrábění za pomoci technologického postupu výroby dílů z kompozitních materiálů.

Hlavní části celé diplomové práce budou dva experimenty. První z nich bude porovnávat vliv speciálního nástroje na obrábění CFRP kompozitů s nástrojem na obrábění nízkouhlíkových ocelí. Druhý experiment bude srovnávat frézování za použití 5 druhů nástrojů speciálních pro obrábění CFRP kompozitů. Každý nástroj provede 13 obráběcích cyklů za různých řezných podmínek, přičemž tyto podmínky budou pro každý nástroj stejné.

I. TEORETICKÁ ČÁST

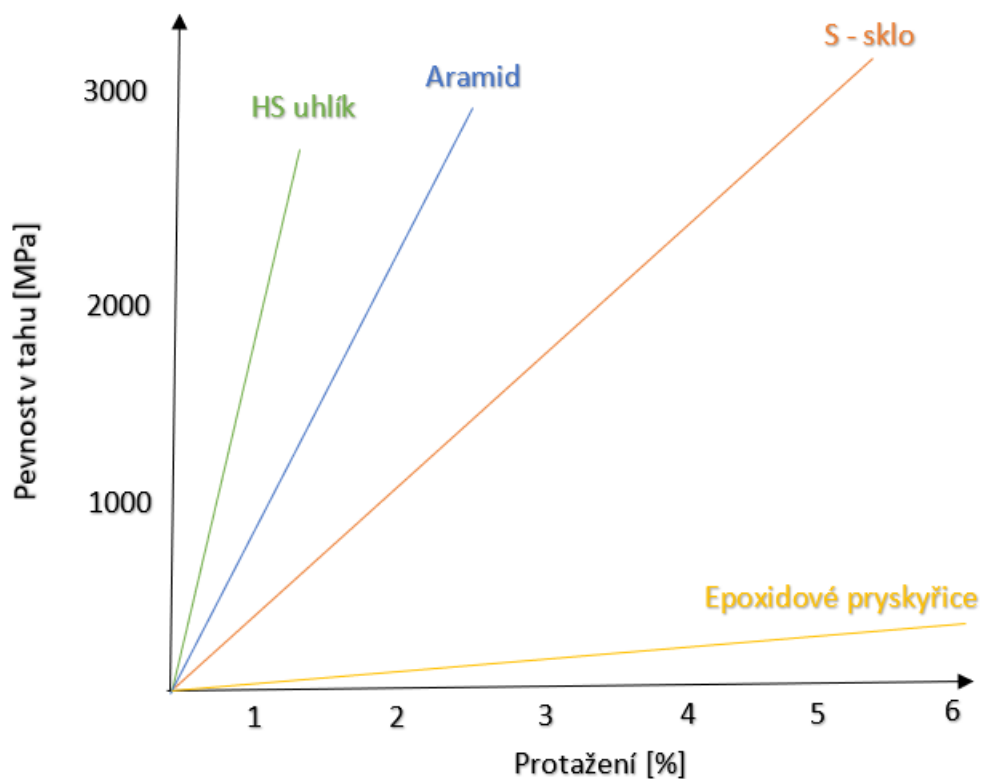
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou definovány jako konstrukční materiály, které vznikají specifickými procesy, mají speciální vlastnosti, a proto mohou být využívány v široké škále aplikací. Jsou tzv. kompozicí dvou a více složek, přičemž nejzásadnějšími jsou matrice a výztuž. Jiné složky dále představují složitější kompozitní struktury.

Pojem kompozity dále skrývá širokou škálu různých látek, resp. jejich kombinací, a nejen na základě toho se dělí do dalších skupin. Podle typu matrice (např. kovová, polymerní, keramická) a dále také dle charakteristiky výztuže (částicové, vláknové apod.), která mají i svá měřítká (makro-, mikro – či nano kompozity) a mnoho dalších [1; 2].

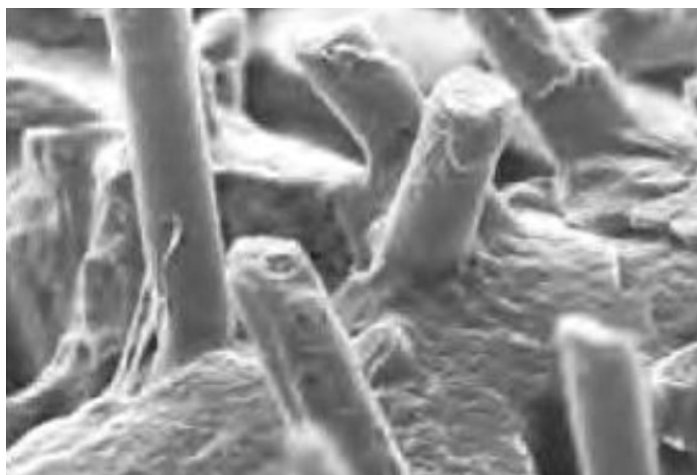
1.1 Vlastnosti kompozitních materiálů

Kombinováním dvou či více různých materiálů s rozdílnými vlastnostmi lze získat materiály nové, jejichž finální vlastnosti jsou lepší, než by dával pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Vzniká tzv. synergický efekt [3].



Obr. 1 - Vlastnosti vybraných složek kompozitů [3]

Obecně platí, že při zvyšování obsahu vyztužující složky na 80% se zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu. Důležitou součástí fungování kompozitního systému je smáčivost pojiva, kterým je obvykle pryskyřice. Aby byla zajištěna vysoká pevnost jednotlivých vláken, je nezbytné zajistit kvalitní adhezi mezi vlákny a matricí, což umožní efektivní přenos síly z matrice na výztuž. Jedním způsobem, jak dosáhnout této ideální situace, je chemické ošetření povrchu vláken, které vytvoří pevné mechanické vazby na fázovém rozhraní [3].



Obr. 2 - Fázové rozhraní vlákno – matrice [3]

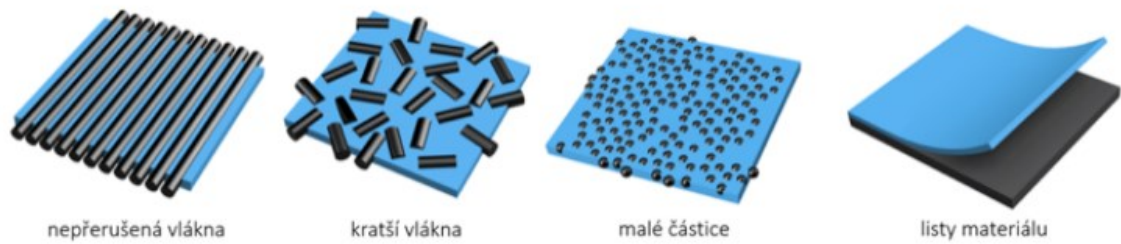
Anizotropní vlastnosti jsou typické pro kompozitní materiály a jejich hlavní závislostí je směr uložení vyztužujících vláken [3].

1.2 Základní rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity lze obecně dělit dle několika kritérií. Každé z nich může ovlivňovat jejich mechanické vlastnosti, cenu a případně i systém jejich recyklace.

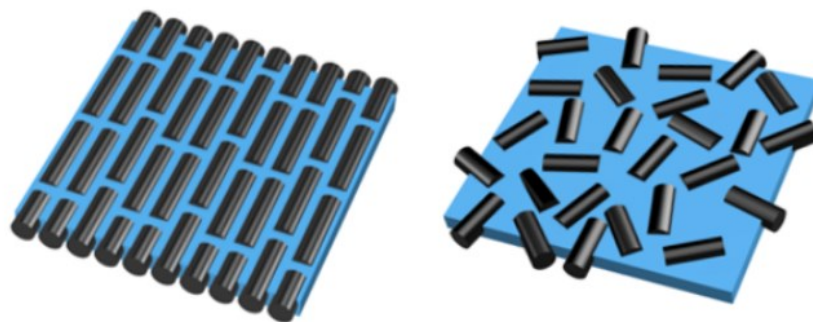
V základním principu se nejprve tyto materiály dělí dle druhu jejich matrice, která udržuje spojení vyztužujícího materiálu. Hlavní funkcí matrice je obalování výztuže a tím poskytování její ochrany před vnějšími vlivy. Další důležitou funkcí je také přenos napětí v materiálu na výztuž.

Dalším typem rozlišení těchto materiálů je dle využívané výztuže. Nejčastější způsob vyztužení je pomocí skleněných vláken, ale v posledních letech vysoce roste využití uhlíkových vláken. Mezi méně využívané se dále řadí další jako jsou čedič, kevlar, konopí nebo len. Každý z těchto materiálů má své přednosti i limitace, a tak ve většině případů vzniká různorodost využití na jednotlivé aplikace [1; 4; 5].



Obr. 3 - Různé způsoby zpevňovacích materiálů v kompozitech [4]

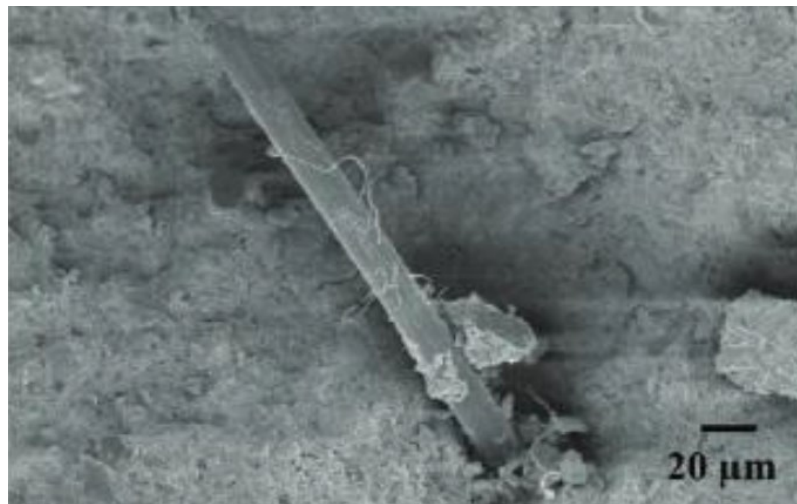
V dalších případech lze kompozit rozdělit podle podoby a délky vyztužujícího materiálu v matrici. Obecně platí, že výsledný materiál vyztužený pomocí celých nepřerušovaných vláken nabývá lepších vlastností než ten, kde jsou k tomuto účelu využity jen malé částice. Výztuže krátkými vlákny můžeme opět dělit také podle orientace zpevňujících vláken. Platí také, že kompozity se sjednocenou orientací kratších vláken mohou poskytnout lepší mechanické vlastnosti než ty s nahodilou orientací kratších vláken [1; 4; 5].



Obr. 4 - Sjednocená orientace vláken a nahodilá orientace vláken [4]

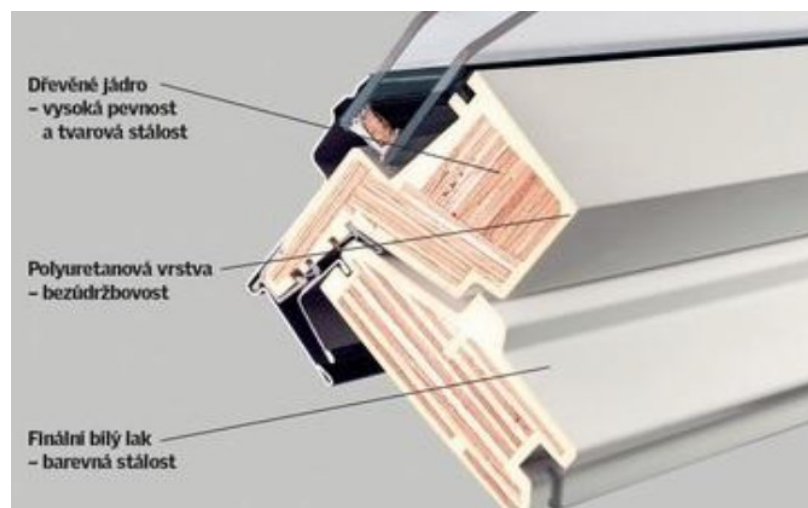
Dle řádů rozměrové stupnice vyztužující fáze se obecně kompozity dělí na:

- **Mikrokompozitní materiály** – v technické praxi představují tyto typy kompozitů nejširší význam. Rozměrový interval zastává hodnoty 1 až 100 μm . Hustota nabývá menších hodnot což zaručuje efektivní poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu [6].



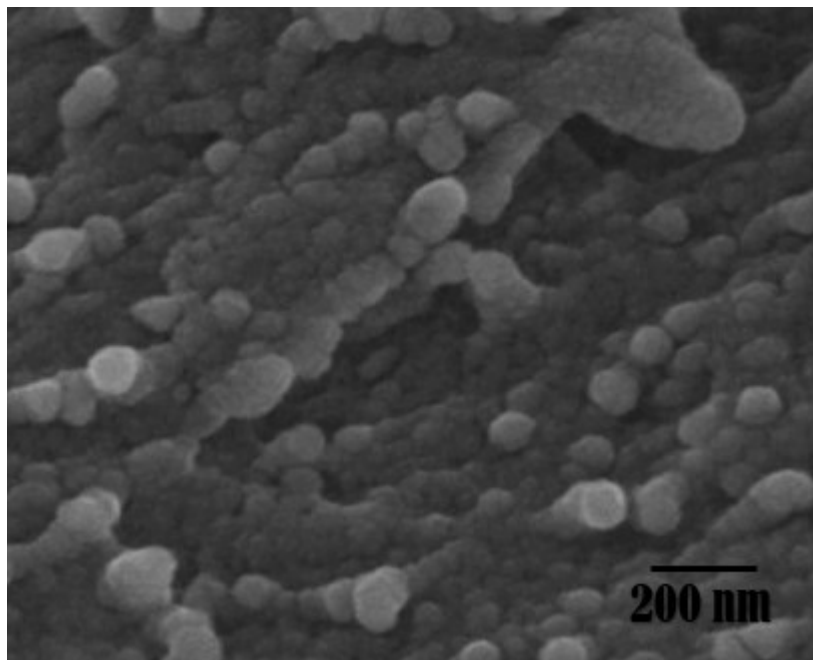
Obr. 5 - Struktura mikrokompozitního materiálu [6]

- **Makrokompozitní materiály** – vyznačují se vysokou hodnotou velikosti vyztužení příčného rozměru nabývajících hodnot až 100 mm. Využití tohoto typu je především ve stavařských aplikacích [7].



Obr. 6 - Praktický příklad makrokompozitního materiálu [8]

Nanokompozitní materiály – zahrnují širokou škálu systémů, kterými mohou být jednorozměrné, dvojrozměrné či trojrozměrné amorfnní materiály, které jsou vyrobeny z výrazně odlišných složek a smíchány v měřítku nanometrů. Nanočástice a nanosféry jsou předmětem velkého vědeckého a průmyslového zájmu, od molekulární biologie a elektronických materiálů až po lékařské zobrazování a fotonické krystaly. Rozměrová škála nabývá jednotek nm.[9].



Obr. 7 - Struktura nanokompozitního materiálu [10]

1.3 Složení

Kompozitní materiál se skládá z dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných fází. Výztuž, která je tužší a pevnější, se nazývá nespojitou složkou, zatímco matrice, která je méně pevná a slouží k pojivu výztuže, je spojitou složkou. Pro klasifikaci jako kompozitní materiál musí vícefázový materiál splnit následující podmínky:

- Je nutné, aby podíl výztuže byl vyšší než 5 %.
- Výztuž a matrice se liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obvykle je výztuž mnohonásobně pevnější v tahu a má větší tuhost než matrice.
- Proces přípravy kompozitu musí obsahovat míšení jednotlivých složek.

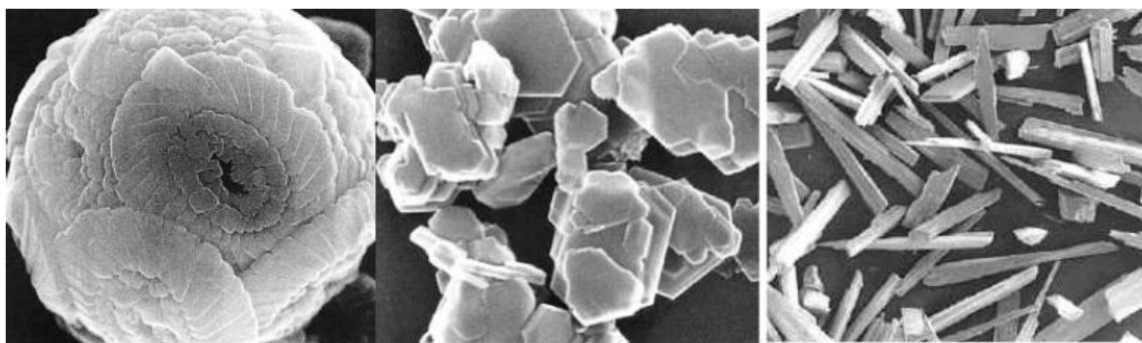
Z geometrického hlediska se kompozity dle typu vyztužení obecně dělí na:

- Kompozity vyztužené částicemi
- Kompozity vyztužené vlákny [1; 2; 11].

1.4 Částicová výztuž

Aby bylo možné kompozit zařadit do skupiny částicových musí charakteristické hodnoty rozměrů částic překročit hodnotu 1 μm . Pokud hodnota nedosáhne tohoto limitu materiál se řadí do skupiny disperzně zpevněných (charakteristický limit rozměru 0,25 μm , resp. do skupiny nanokompozitů).

Obecně se jedná o kompozity s polymerní, kovovou, resp. keramickou maticí [1; 12].



Obr. 8 – Příkladů jednotlivých typů částicových plniv [12]

1.5 Vyztužující vlákna

Materiálová forma vláken se cíleně jako konstrukční prvek využívá pouze zřídka. Jejich zásadní význam se projevuje teprve v kompaktní formě. Této specifikace přednostně využívají kompozitní materiály, které se skládají jednak z vláken s vysokou měrnou pevností případně tuhostí a také z rozmanitě přizpůsobivého úložného materiálu – matrice.

Výztuže dělíme zejména dle jejich materiálu, případně dle použití (např. pro vysokoteplotní aplikace) a také dle původu na anorganická, resp. organická.

Z hlediska mechanických vlastností u vláken sledujeme zejména modul pružnosti, který u aplikovaných konstrukcí ovlivňuje tuhost. Dále také mez pevnosti v tahu či tažnost. Z fyzikálních vlastností je nejdůležitější hustota a také teplotní odolnost.

U vláken se specificky zavádí tzv. „tržná délka“, což je charakteristika, která dává do souvislosti pevnost vlákna s jeho hustotou dle následujícího vztahu:

$$L_R = \frac{R_m}{\rho \cdot g} \quad [\text{m, km}] \quad (1)$$

L_R – tržná délka [m, km]

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

ρ – hustota [kg/m^3]

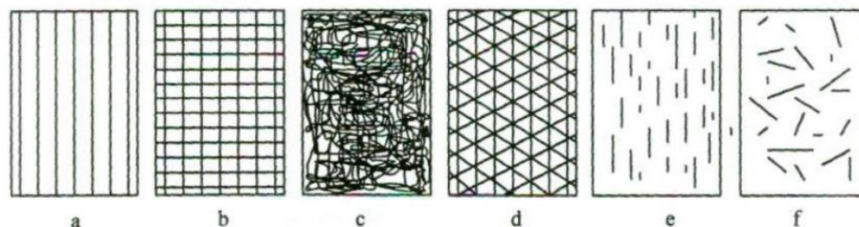
g – gravitační zrychlení [m/s^2]

Tržná délka teoreticky vystihuje hodnotu délky vlákna v okamžiku přetržení jeho vlastní hmotností. Přibližné hodnoty tržné délky udává *Tab. 1* [1; 2; 13].

Materiál	Tržná délka L_R [km]
ocel	6
ocel lanová	20
hliník	3
slitiny hliníku	20
hedvábí	50
UHMWPE	300
aramidové vlákno	260
skelné vlákno	90 - 180
uhlíkové vlákno	200 - 340

Tab. 1 - Orientační hodnoty tržné délky dle vybraných materiálů [2]

Z hlediska uspořádání mohou být vlákna v kompozitu uspořádána několika způsoby a to jednosměrně, dvouose, víceose v rovině, prostorově (třídimenzionální výztuž) a nahodile v rovině dle *Obr. 9* [1].



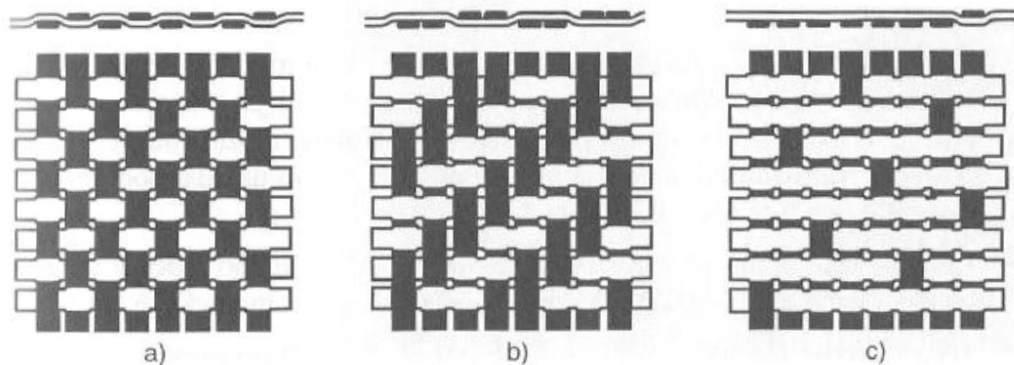
Obr. 9 - Příklady uspořádání rovinného uspořádání vláken [1];

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

Pro zlepšení zpracovatelských vlastností se aplikují speciálně upravené produkty.

Pro veškeré typy vláken bývá využíváno těchto pojmů:

- **Příze** – Vlákna jsou spřádána a zpracována do dalších výrobků.
- **Nitě** – Vznikají z přízí spojením vláken.
- **Roving** (prameneček) – Spojuje rovnoběžně uložená vlákna do 20-60 konců.
- **Rohože z kontinuálních vláken** – Obsahují nekonečná skelná vlákna bez orientace, spojená pojivem do vrstev.
- **Rohože ze sekaných pramenců** – Vyrábějí se z krátkých vláken spojených pojivem a navinutých do rolí pro snadné použití.
- **Tkaniny** – Plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech a mohou mít různé vazby v závislosti na počtu vláken v osnově [1].



Obr. 10 - Druhy vazeb vyztužujících tkanin [1]

a) plátnová vazba b) keprová vazba c) saténová vazba

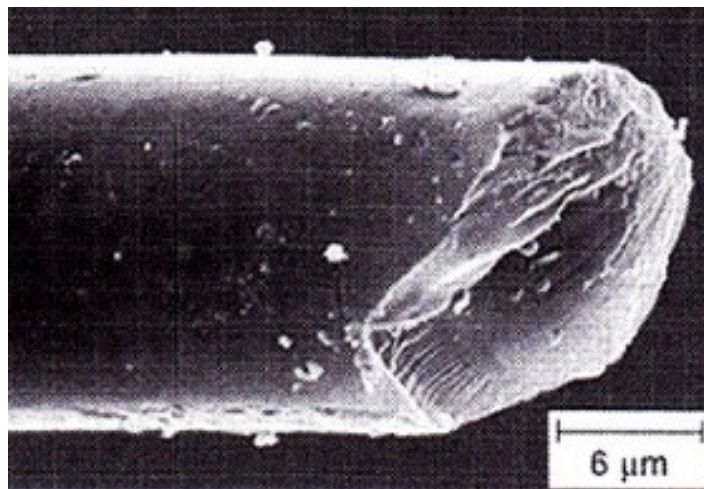
1.5.1 Skleněná vlákna

Obecně se jedná o nejběžnější druh výztuží pro polymerní matrice. Jejich hlavní výhodou jsou především nízké náklady, vysoká pevnost v tahu, vysoká odolnost a vynikající izolační vlastnosti. V opačném případě, ale mají relativně nízkou hodnotu modulu pružnosti v tahu a vysokou hustotu, při jejich manipulaci jsou velmi citlivé na otěr (což obvykle snižuje jejich pevnost v tahu), relativně nízká odolnost proti únavě a vysoká tvrdost (ta způsobuje

nadměrné opotřebení lisovacích forem a řezných nástrojů). Většinou mívají pravidelný kruhový průřez a nabývají velikostí v rozmezí (\varnothing 3,5 až 24 μm).

Skelná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou propustností pro záření. Označují se jako E-vlákna a jejich sklovina jako E-sklovina. Tento typ skloviny se stal standardním a téměř 90 % trhu tvoří jeho výroba. Sklovina s vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 má o 40 až 70 % vyšší pevnost a v Americe se označuje jako S-sklovina a v Evropě jako R-sklovina. K dispozici jsou také C-sklovina s vysokou chemickou odolností a bezboritá ECR-sklovina, která má vyšší dielektrickou konstantu a není vhodná pro desky tištěných obvodů nebo kosmonautiku.

AR-vlákna, která mají jiné složení než E-vlákna, jsou skelná vlákna s vysokou odolností proti alkáliím a používají se jako výztuže betonu [1; 2; 13].

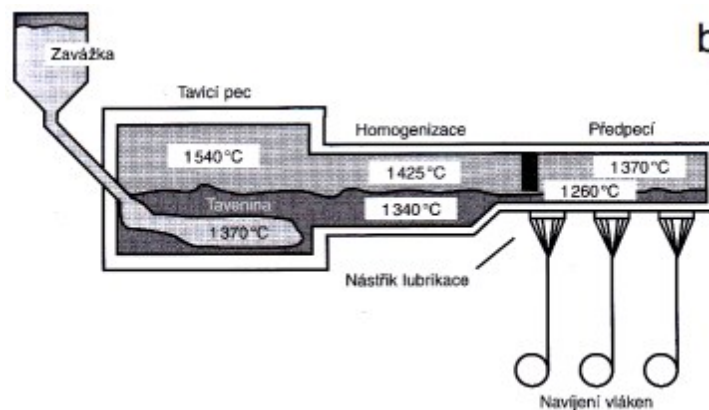


Obr. 11 - Struktura skelného vlákna [1]

Silná kovalentní vazba mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny způsobuje relativně vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti. Síťování struktury a síla jednotlivých vazeb jsou ovlivněny použitými oxidy kovů. Na základě své amorfní struktury jsou skleněná vlákna izotropní, na rozdíl od ostatních typů vláken viz *Obr. 11*. Textilní skla bývají dodávány formou příze, skáné příze, pramencem, rohoží, sekaným pramencem či jako krátká vlákna.

Výrobní proces skelných vláken spočívá v suchém smíchání různých složek sklářské receptury (vápenec, křemičitý písek a kyselina boritá), následně se roztaví v žáruvzdorné

peci při teplotě přibližně 1370 °C. Roztavené sklo se vytlačuje několika otvory obsaženými v platinovém pouzdře a rychle se stahuje do vláken o průměru přibližně 10 μm. Na jednotlivá vlákna se poté nanese ochranný povlak a následně se shromáždí do pramene a navinou na buben. Povlak je směs maziv (který zabraňuje oděru mezi vlákny), antistatických látek (které snižují statické tření mezi vlákny) a pojiva (které spojuje vlákna do pramene). Může také obsahovat malé procento spojovacího činidla, které podporuje adhezi mezi vlákny a specifickou polymerní maticí, pro kterou je vytvořeno [1; 2; 5; 13].



Obr. 12 - Výroba textilních skleněných vláken tažením z trysek [1]

1.5.2 Aramidová vlákna

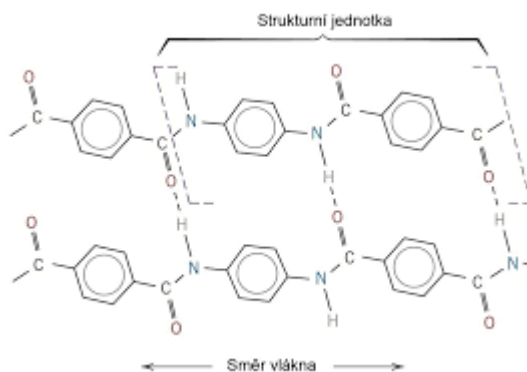
Jedná se o vysoce krystalická aromatická polyamidová vlákna, která mají své specifické vlastnosti. Obecně jsou charakteristická nejnižší hustotou a nejvyšším poměrem pevnosti v tahu mezi současnými odlišnými typy výztuží. Kevlar 49 je obchodní název jednoho z těchto typů běžně dostupných na trhu.

Jako zpevňující materiál mají využití v mnoha námořních a leteckých aplikacích, tam kde je důležitá lehkost, vysoká pevnost v tahu a odolnost proti poškození nárazem (např. při náhodném pádu obecného tělesa). Zpravidla mají také záporný koeficient tepelné roztažnosti v podélném směru, čehož může být využito při navrhování panelů, které vyžadují sníženou hodnotu této vlastnosti. Z hlediska nevýhod těchto kompozitů je kritická jejich nízká pevnost v tlaku a obtížný řez a obrábění.

Z hlediska charakteristiky se jedná o vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle podélné osy.

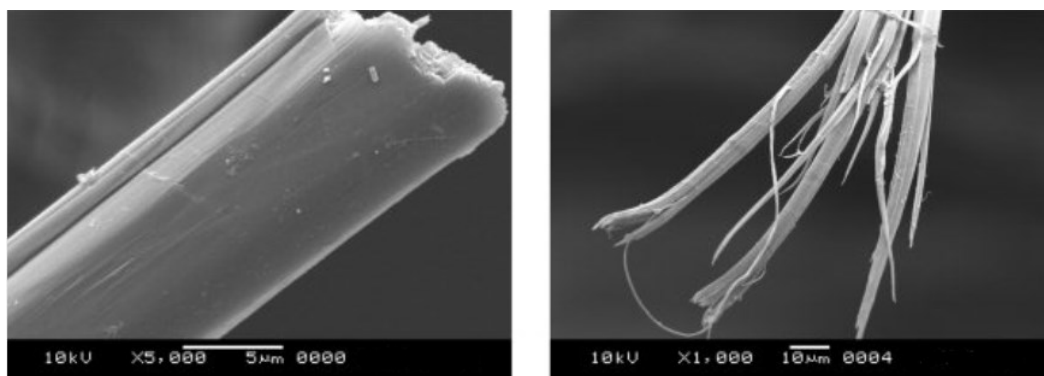
Vzájemné spojení molekul je realizováno vazbami vodíkových můstků. Aromatická jádra v řetězcích jsou nositeli výše zmíněné vysoké tuhosti. Teoretickým odhadem pevnosti je hodnota 200 000 MPa. V případě komerčních vláken jsou jediná svými vlastnostmi

dosažitelná těchto hodnot typy na bázi aromatických polyamidů, která dosahují např. při jejich průměru 12 μm hodnoty pevnosti v tahu 3600 MPa a modulu pružnosti v tahu 125 000 MPa [11; 12; 13; 14].



Obr. 13 - Struktura aramidového vlákna [1]

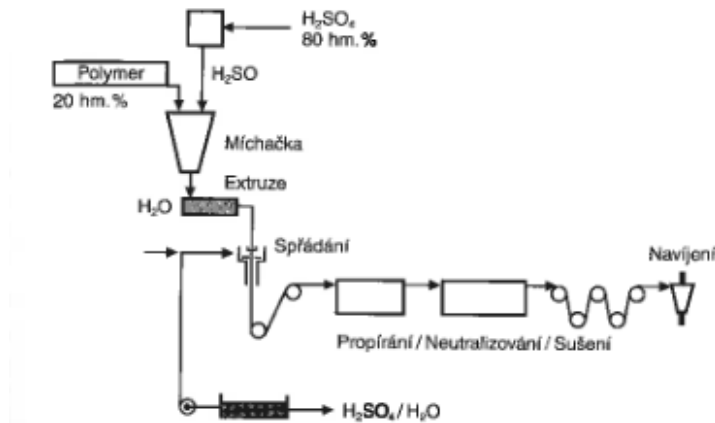
Pravidelnost uspořádání fenylenových jader a aramidových skupin s vazbami vodíkových můstků propůjčuje řetězcům vysokou tuhost a způsobuje současně vysokou hustotu uspořádání struktury. Orientace krystalických nadstruktur a z nich složených fibril kolísá podle modelových představ více nebo méně kolem osy vláken. To odůvodňuje rozdíl hodnot skutečného a teoretického modulu pružnosti v tahu [13].



Obr. 14 - Řez aramidovým vláknem v místě lomu [14]

Polyfenyltereftalamidová vlákna není možné vyrábět technologií spřádání z taveniny, protože teplota tavení je vyšší než teplota rozkladu. Vysoce krystalická vlákna se silně orientovanými molekulami se proto spřádají s vysokoviskózního dvacetiprocentního roztoku v koncentrované kyselině sýrové Obr. 15. Samostatná elementární vlákna se vzájemně spojují a pro zlepšení zpracovatelských vlastností se mnohokrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží (pomocný textilní prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností).

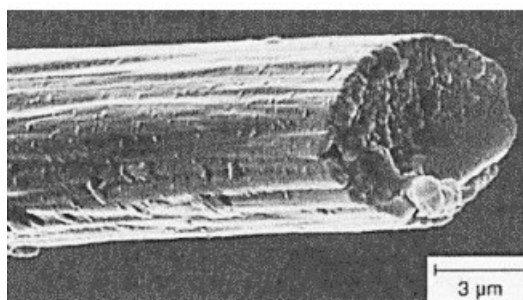
Tyto typy kompozitních výztuží je možné zpracovávat se všemi běžnými reaktoplasty i termoplasty. Laminát může využívat až 70% jejich skutečné pevnosti, při využití zvláště tažné matrice mohou být tyto procenta i vyšší [5; 11; 13].



Obr. 15 - Výroba aramidových vláken [1]

1.5.3 Uhlíková vlákna

Jedná se o technický typ vláken s extrémně vysokou pevností a tuhostí, má ale nízkou tažnost. Obecně dosahují nejvyšší mechanické vlastnosti mezi typy výztuží, nejvýše oceňovaným je jeho modul pružnosti v tahu. Na trhu jsou komerčně dostupná s různými moduly pružnosti v tahu. v rozmezí od 207 GPa až po 1035 GPa Obecně platí, že vlákna s nízkým modulem mají nižší hustotu, nižší cenu, vyšší pevnost v tahu a tlaku a vyšší pevnost [5; 11].



Obr. 16 - Snímek uhlíkového vlákna pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu [1]

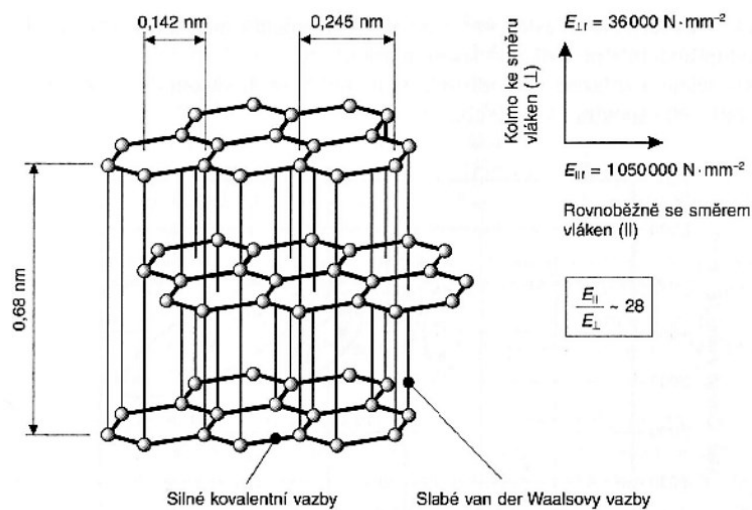
Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přičemž se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Při stoupaní 8 teploty, a tím se zvyšující grafitizací, se zlepšují mechanické vlastnosti. Když nastane teplota 1800 °C je tvorba této struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu.

Uhlíková vlákna bývají vyráběna z těchto tří výchozích surovin:

- celulóza – tyto vyráběná vlákna však mají méně dokonalou strukturu, převážně bývají využívány jako izolační materiál pro vysoké teploty
- polyakrylonitril (PAN) – od roku 1980 bývá využíván čím dál více častěji, vlákna z něj vyrobená bývají brána jako standartní.
- smola, ze které se nákladným způsobem připravují vlákna, jejichž konečná ceny je vzhledem k nižším pořizovacím nákladům suroviny příznivá. Mají vysokou hodnotu modulu pružnosti v tahu a velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Naopak mají nižší pevnost v tahu [2; 5; 13].

Vláknó/Prekuzor	obsah uhlíku [%]	R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]
karbonizovaný PAN	95	5500	250	1,9
grafitizovaný PAN	99	4400	377	1,2
mezifázová smola	99	3800	900	0,4
viskóza	99	1200	100	0,5
nanovláknó 0,2 μm		7000	600	0,5
S - sklo	-	4500	85	5,7

Tab. 2 – Příklady vlastností vybraných vláken dle prekuzoru [2]



Obr. 17 - Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna [1]

Při porovnání se syntetickými vlákny mají tyto typy výztuží progresivní deformační chování – se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota modulu pružnosti v tahu. Vysoká hodnoty pevnosti a E-modulu jsou dosahovány až do teploty 500°C.

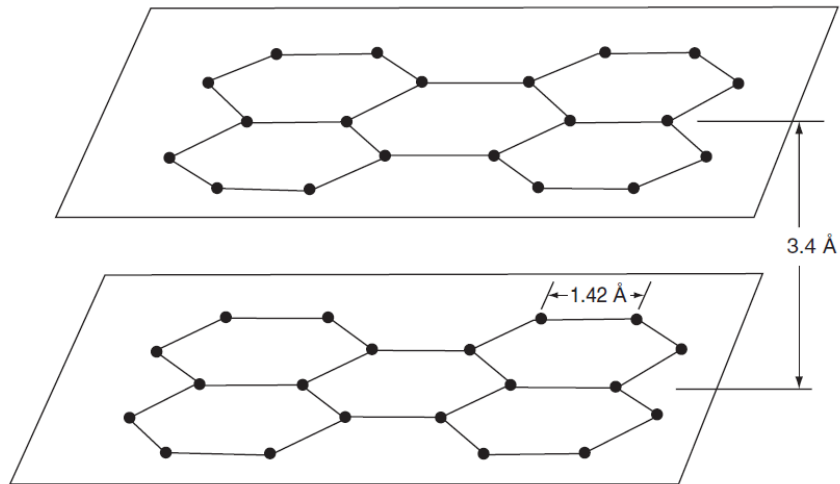
Mezi výhody uhlíkových vláken se řadí jejich mimořádně vysoký poměr pevnosti v tahu a hmotnosti, stejně jako poměr modulu pružnosti v tahu a hmotnosti, velmi nízký součinitel lineární tepelné roztažnosti (což zajišťuje rozměrovou stabilitu v aplikacích, jako jsou vesmírné antény), vysoká únavová pevnost a vysoká tepelná vodivost (která je dokonce vyšší než u mědi).

Nevýhodou je jejich nízká deformační odolnost, nízká odolnost proti nárazu a vysoká elektrická vodivost, která může způsobit „zkrat“ v nechráněných elektrických strojích. Jejich vysoká cena je zatím vylučuje z širokého komerčního využití. Používají se hlavně v leteckém průmyslu, kde je úspora hmotnosti považována za důležitější než cena.

Strukturně obsahují uhlíková vlákna směs amorfního uhlíku a grafitického uhlíku. Jejich vysoký modul pružnosti v tahu je důsledkem grafitické formy, v níž jsou atomy uhlíku v každé rovině uspořádány do krystalografické struktury rovnoběžných rovin nebo vrstev. Atomy uhlíku v každé rovině v rozích propojujících se pravidelných šestiúhelníků *Obr. 19*. Vzdálenost mezi rovinami (3,4 Å) je větší než vzdálenost mezi sousedními atomy v každé rovině (1,42 Å). Mezi atomy uhlíku v každé rovině existují silné kovalentní vazby, ale vazba mezi rovinami je způsobena van der Waalsovými silami, které jsou mnohem slabší. Výsledkem jsou vysoce anizotropní fyzikální a mechanické vlastnosti uhlíkového vlákna [5; 11; 13].

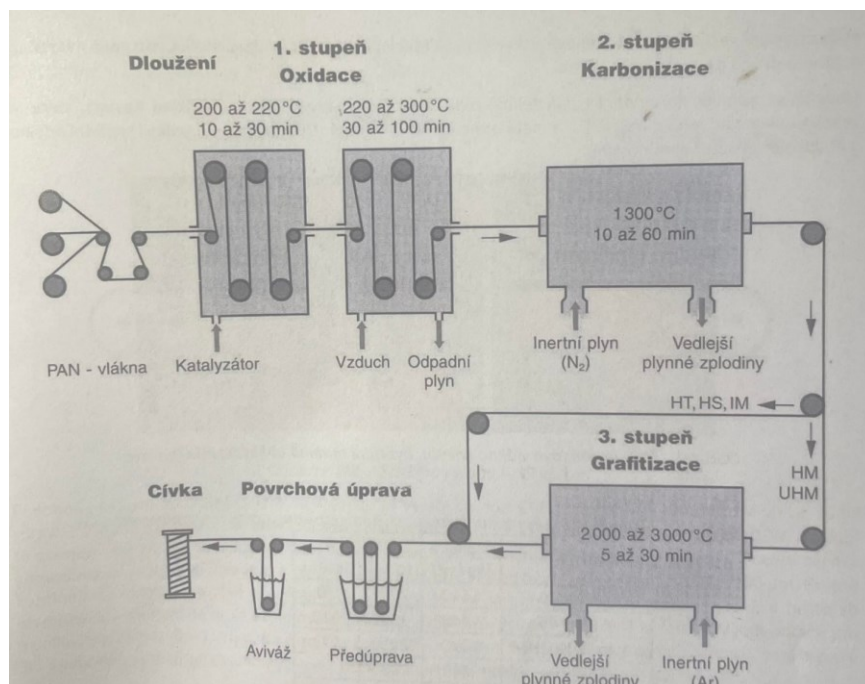


Obr. 18 - Mikrostruktura uhlíkového vlákna [1]



Obr. 19 - Uspořádání atomů uhlíku v krystalu grafitu [13]

Výroba uhlíkových vláken spočívá v karbonizaci oxidovaného prekurzoru za vysoké teploty kolem 1300 °C. V atmosféře inertních plynů (N_2). Během tohoto tepelného zpracování prekurzor ztratí většinu neuhlíkových atomů v řetězcích. Pouhou karbonizací získáme vlákna s nižším modulem pružnosti, ale s vysokou pevností v tahu. Pokud od vlákna požadujeme i vysoký modul pružnosti, je nutné po karbonizaci zařadit ještě grafítizaci, která probíhá za vyšších teplot (2000 - 3000 °C) a atmosféře argonu. Po tepelném zpracování následují povrchové úpravy vlákna, jeho případné sduřování a navíjení viz Obr. 20. Výsledné tloušťky vláken se pohybují v jednotkách μm .



Obr. 20 - Výroba uhlíkových vláken [1]

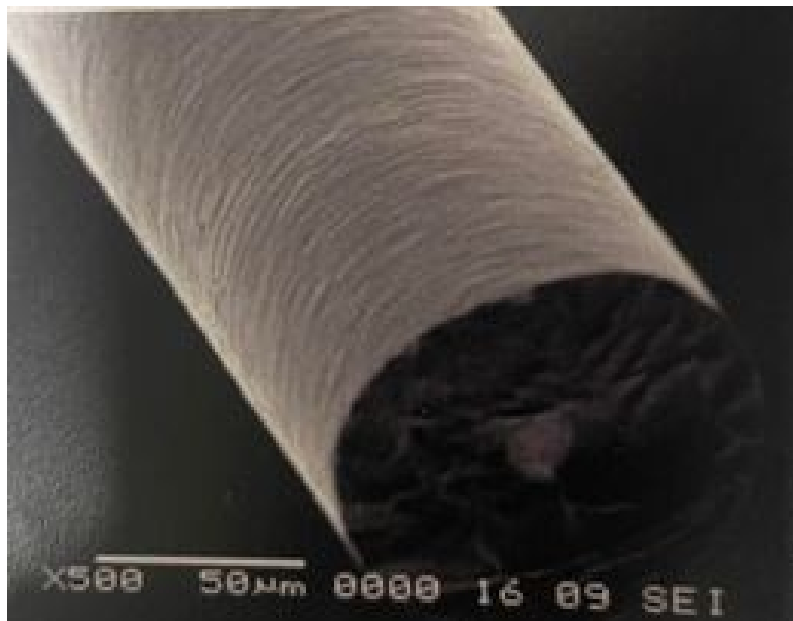
Mimo vláken jako takových, lze dalšími výrobními procesy získat např. diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF), mletá vlákna, dutá vlákna, nanovlákna, nanotrubičky, apod [2; 5; 11].

1.5.4 Přírodní vlákna

K vyztužování polymerů se jako vhodná jeví pouze vlákna rostlinná, jejichž základem je celulóza. Konkrétními typy rostlinných materiálů jsou len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Z hlediska výhod se projevuje odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Za zmínku stojí i pevnosti v tahu. Díky nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce [2; 12].

1.5.5 Vlákna pro vysokoteplotní aplikace

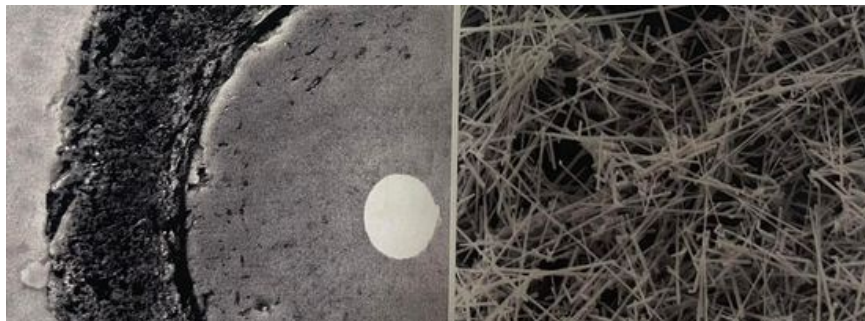
Pro tyto účely se uplatňují vlákna z vysokotavitelných kovů (B, W, Mo, apod.) resp. vlákna keramická (SiC , Al_2O_3), která vyztužují jak kovové, tak keramické nebo sklokeramické matrice [2; 5].



Obr. 21 – Detail bórového vlákna se zřetelným wolframovým jádrem (B/W) [2]

Sám o sobě je bór velmi křehký, a proto se k výrobě těchto vláken využívá wolframového jádra. Terminologicky je proto správné označení B/W vlákno viz Obr. 21. Vzhledem k náchylnosti bóru k oxidaci za zvýšených teplot a k náchylnosti k reakci s hliníkem se pro použití do MMC s hliníkovou matricí vlákno navíc opatřuje povlakem SiC . Výsledný průměr vlákna je v rozmezí 100 - 200 μm .

Podobně i vlákna keramická z karbidu křemíku se vyrábí pomocí CVD nanášením SiC na uhlíkové jádro, tudíž správné označení by mělo být SiC/C. Za vysokých teplot bývají tato vlákna stabilnější než vlákna B/W. Aplikují se zejména do MMC, s matricí ze slitin hliníku nebo titanu, s nimiž oproti bóru nereagují. Použití těchto kompozitů je na tepelně namáhané části. Výsledný průměr vláken bývá také v rozmezí 100 - 200 μm . Kromě kontinuálních vláken se také používají SiC whiskery, jejichž struktura je blízká monokrystalu, a proto se u whiskerů předpokládá nízká až nulová koncentrace defektů. Průměr whiskerů je fázově v jednotkách μm a délka je v rozmezí 1–10 mm. Na rozdíl od kovových whiskerů, které se pěstují na substrátech, se whiskery SiC s výhodou vyrábí spalováním rýžových slupek v inertní atmosféře při teplotách kolem 1600 $^{\circ}\text{C}$ [2; 5; 13].



Obr. 22 - Kontinuální vlákno SiC/C (vlevo) a SiC whiskery (vpravo) [2]

1.6 Prepregy

Prepreg je běžné označení pro výztužnou tkaninu, která byla předem impregnována systémem pryskyřic. Tento pryskyřičný systém (obvykle epoxidový) již obsahuje vhodné vytvrzovací činidlo. Díky tomu je prepreg připraven k položení do formy bez přidání další pryskyřice. Aby laminát vytvrdl, je nutné použít kombinaci tlaku a tepla [15; 16].



Obr. 23 – Prepreg [2]

1.6.1 Výhody prepregů

Použití prepregů má několik výhod oproti tradičnímu ručnímu vrstvení:

- **Maximální pevnostní vlastnosti**

Při ručním vrstvení je obtížné dosáhnout 50% obsahu pryskyřice. To znamená, že hmotnost hotového laminátu tvoří 50 % tkaniny a 50 % pryskyřice. Typické ruční lamináty, i když jsou vakuově balené, končí se značným množstvím přebytečné pryskyřice. Přebytek pryskyřice zvyšuje křehkost a snižuje celkové vlastnosti. Na druhou stranu většina prepregů obsahuje přibližně 35 % pryskyřice. To je ideální hodnota pro dosažení maximálních vytvrzených vlastností, které je obecně nemožné dosáhnout při běžném ručním laminování.

- **Rovnoměrnost a opakovatelnost dílů**

Bez úskalí technik lidského laminování se nevyskytují oblasti bohaté na pryskyřici ani suchá místa. Tloušťka bude rovnoměrná a každý díl, který vyjde z formy, bude s teoretickou pravděpodobností identický. Stále existuje prostor pro chyby v technikách vakuového balení, manipulaci atd., ale prepregy tyto problémy výrazně omezují.

- **Méně nepořádku a méně odpadu**

Prepregy během vytvrzování vypouštějí přebytečnou pryskyřici, ale všechny excesy ručního vrstvení - kelímky s pryskyřicí, špinavé válečky, kapky - nejsou problémem. Kratší doba vytvrzování. Po dokončení cyklu tepelného vytvrzování je díl připraven k provozu. Omezuje se čekání standardních 48 hodin na úplné vytvrzení jako při typické ruční laminaci [2; 15; 16].

1.6.2 Nevýhody prepregů

Použití prepregů má také v opačném slova smyslu značné nevýhody, kterými jsou:

- **Náklady**

Pokud se sečtou náklady na pryskyřici, vytvrzování a tkaninu, jsou prepregy stále značně dražší.

- **Trvanlivost**

Vytvrzování prepregů teplem a skladování při vyšších teplotách zkracuje skladovatelnost. Udržování materiálu v chladnějším prostředí pomůže a zmrazení životnost výrazně prodlouží.

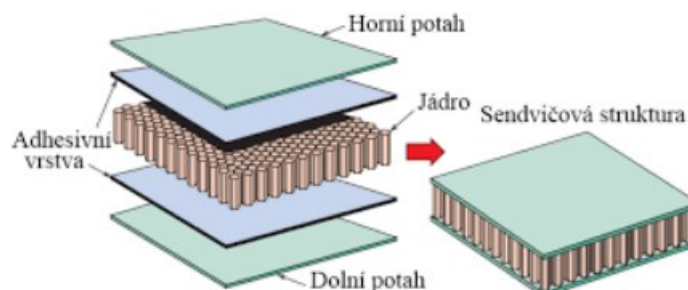
- **Nutné tepelné vytvrzení**

Při zpracování prepregů je nutné mít k dispozici zdroj tepla a minimálně vakuové balení. Je nutné dosáhnout minimálně 270 °C a udržet tuto teplotu po dobu minimálně čtyř hodin. Mnoho pokročilých výrobců používá autoklávy, ale v běžné praxi postačí jakýkoli zdroj tepla [2; 15; 16].

1.7 Sendvičové struktury

Mimo dvě základní fáze – matrice a výztuž, mohou kompozitní díly tvořit také složitější struktury. Pro potřeby např. montáže se do kompozitních dílů při jejich výrobě mohou vkládat různé inserty apod. Typické jsou tzv. sendvičové struktury, kde je mezi vrstvy kompozitu nerozebíratelně umístěna některá z druhů výplní, resp. jader. Tím se vlastnosti výsledné struktury posunou o další stupeň. Cílem návrhu sendvičových struktur bývá nejvíce zvýšení tuhosti při minimálním zvětšení hmotnosti. Základní typy výplní sendvičových struktur jsou:

- voštiny,
- pěny,
- přírodní materiály,
- kompozitní materiály [1; 12; 17].



Obr. 24 - Sendvičová struktura kompozitu [17]

2 VÝROBA DÍLŮ Z VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITŮ

U kompozitů vyztužených krátkými vlákny nebo částicemi lze při zpracování aplikovat běžné metody zpracování polymerů, kterými mohou být vstřikování, vytlačování apod.

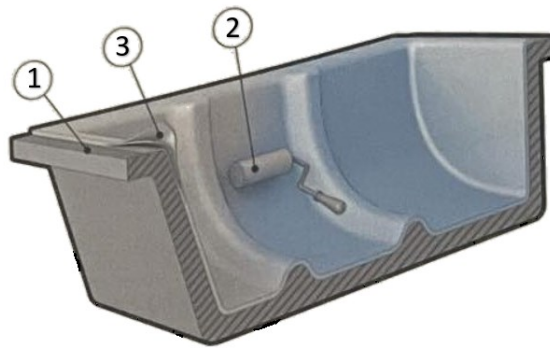
V případě dlouho vláknových výztuží těchto meto nelze využívat musí být využito speciálních zpracovatelských technologií jako například navíjení, různé typy laminování, resp. proces pultruze. Základním faktorem volby těchto technologií je v první řadě charakter výsledného dílu (plošný, rotační, profil atd.) v další řadě jeho velikost. Důležitý je také vztah typu vláknové výztuže k jednotlivým výrobním procesům. V poslední řadě hraje roli i sériovost výroby [12; 18].

2.1 Ruční laminace

Tento proces může být také nazýván jako kontaktní laminace nebo laminace za mokra. Jedná se o nejjednodušší způsob zpracování kompozitních dílů. Tímto způsobem lze vyrábět desky a dle potřeby i díly složitějších tvarů v těchto případech je však nutné mít k dispozici formu s negativním tvarem výrobku. Konstrukční řešení dílu, resp. formy musí obsahovat jednoduché odformování dílu po jeho vytvrzení. Formy mohou být vyráběny z různých materiálů (dřevo, kov, polymer, kompozity a další), mohou být také vyráběny různými způsoby.

Princip výroby pomocí ruční laminace je znázorněn *Obr. 25*. Pro výrobu není kromě formy potřebné žádné jiné speciální zařízení. Vlákna v podobě pramenů tkanin či rohoží jsou pokládána na formu a pomocí štětce nebo válečku se přitlačují na stěnu formy, přičemž se prosycují pryskyřicí. Postup se opakuje tolikrát, dokud nedojde k dosažení požadovaného počtu vrstev, resp. požadované tloušťky dílu. Při nanášení je možné měnit např. směr a uspořádání vláken z důvodů potlačení anizotropie vlastností, nebo opačně k dosažení vlastností v preferovaném směru. V další fázi se díl vytvrdí, a to dle potřeby při pokojové teplotě nebo v peci v závislosti na typu matrice.

Podobně jako ve všech případech ruční výroby i zde vzniká úskalí omezené opakovatelnosti procesu. To se projeví zejména v nepřesné definici obsahu pryskyřice, případně v nerovnoměrné tloušťce stěny. Tento proces je tedy vhodný spíše pro kusovou výrobu nebo opravy [1; 2; 12; 18].

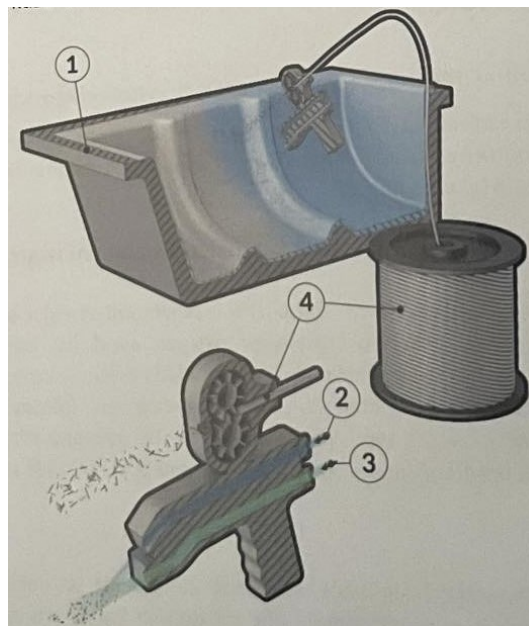


Obr. 25 - Schéma postupu při ruční laminaci [2]

1 – forma, 2 – nanášení pryskyřice, 3 - tkanina

2.2 Nástřik

Způsob výroby kompozitních dílů, pro který je již třeba speciálního zařízení v podobě „pistole“, která umožní sekání vláken odvíjejících se z cívky. Součástí této pistole je též přívod pryskyřice a její unášení stlačením vzduchem pomocí trysek. Vlákno s matricí je pomocí speciálních pohybů pistole nanášeno na formu, kde ulpívá a po dosažení požadované tloušťky se vytvrdí. Podobně jako u ruční laminace nelze u tohoto způsobu výroby zajistit dobrou opakovatelnost a přesnou tloušťku stěny výsledného dílu. Tato technologie je vhodná pro větší díly a pro kusovou či malosériovou výrobu [1; 2; 12; 18].

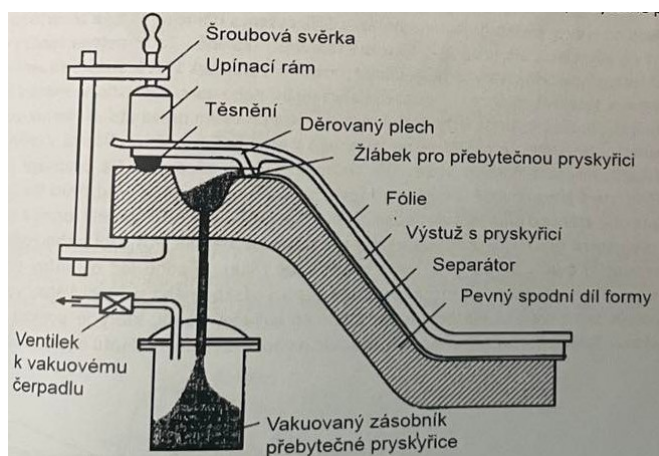


Obr. 26 - Schéma principu nástřiku sekaných vláken [2]

1- forma, 2 – přívod stlačeného vzduchu, 3 – přívod pryskyřice, 4 - pramen vlákna

2.3 Vakuové technologie

Hlavním účelem vývoje těchto technologií je požadavek na vyšší užitné vlastnosti dílů. Proto je vhodné minimalizovat podíl matrice, tak aby splnila svůj účel pojiva, ale zbytečně nezvyšovala výslednou hmotnost dílu. Tyto technologie proto zajistí důkladné prosycení výztuže matricí, jejichž přebytek je následně vakuově odsát. U těchto procesů je již potřebné složitější zařízení a zejména formu, která je těmto technologiím přizpůsobena. To spočívá zejména v možnosti jejího utěsnění a případně k odvodu přebytečné pryskyřice [1; 2; 12; 18].

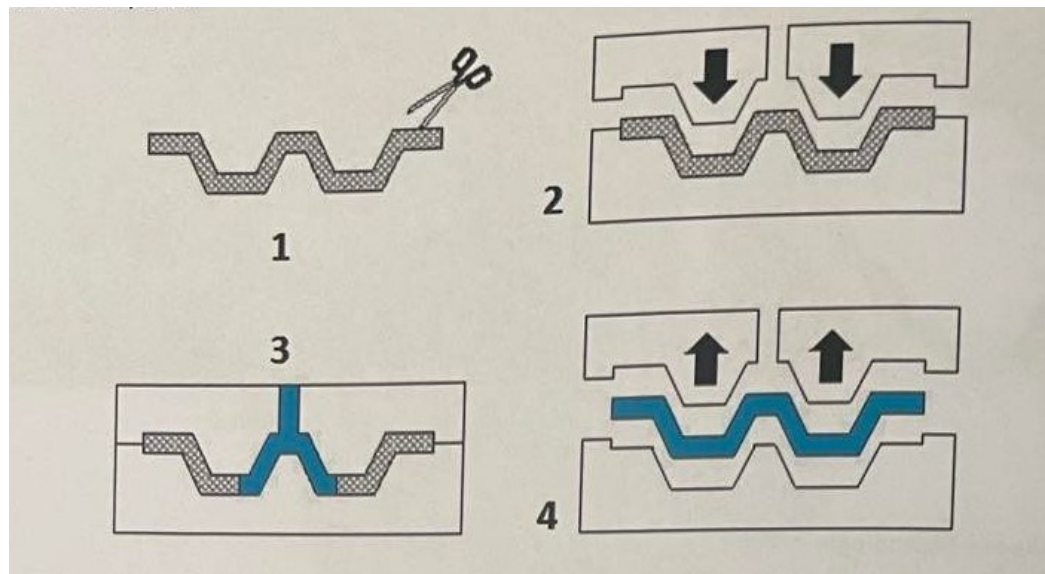


Obr. 27 - Schéma vakuové laminace s odvodem pryskyřice do zásobníku [2]

Další vakuové technologie

Modifikovanější a automatizovatelnější je metoda **VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)**. Tato technologie využívá vícedílné formy s vrchním a spodním dílem, přičemž je opatřena kanálky pro přívod pryskyřice a odvod vakua. Princip výroby těchto dílů spočívá v nastřížení a přetvarování tkaniny, resp. rohože a jejího vyskládání ve vrstvách do formy. Po uzavření formy, které zajistí fixaci tkaniny, je do dutiny pod tlakem přivedena pryskyřice a pomocí vakua rozvedena v celém objemu, tak aby došlo k důkladnému prosycení tkaniny. V další fázi je díl ve formě vytvrzen. U této metody lze zajistit dobrou opakovatelnost a přesnost výroby. Je vhodná pro rozměrné díly spíše jednoduchých tvarů.

Tuto metodu lze aplikovat také bez použití vakua v tomto případě se nazývá **RTM (Resin Transfer Molding)**. Princip značí Obr. 28.



Obr. 28 - Metoda RTM [2]

1 – nástřih a předtvarování tkaniny, 2 – skladba tkaniny do formy,

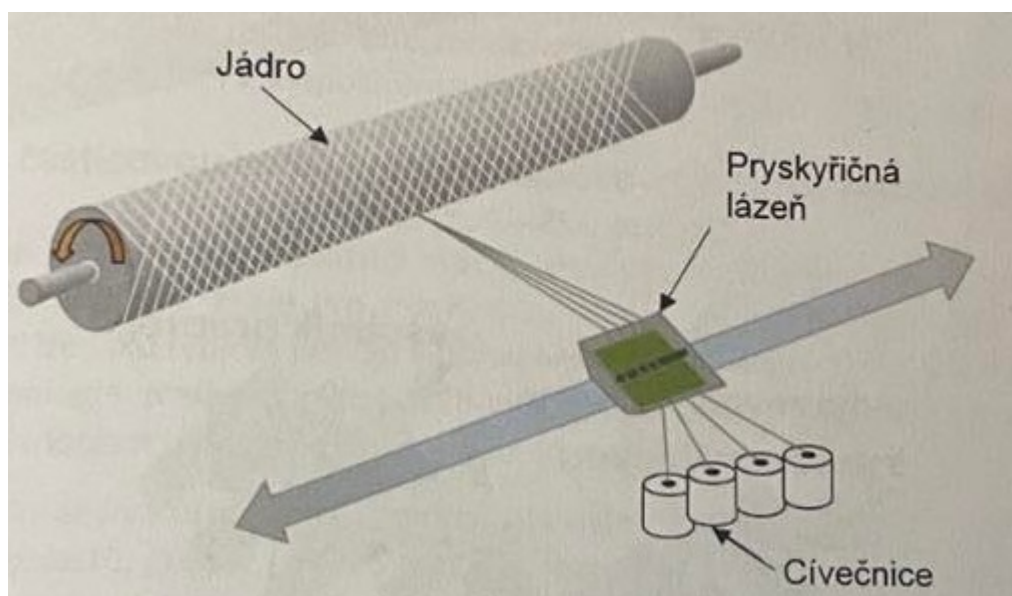
3 – prosycení pryskyřicí, 4 – odformování dílu

Metodou, která je využívána při výrobě špičkových dílů pro leteckou techniku, je metoda **VBM (Vacuum Bag Molding)**. Princip metody je podobný, jako na *Obr. 27*, ovšem s tím rozdílem, že přebytečná pryskyřice není odváděna do zásobníku, ale je zachycena v tzv. rozváděcí tkanině. Tato metoda spočívá v poměrně složité skladbě technologických vrstev na jednodílnou formu – viz *Obr. 28*. Jedná-li se o sériovou výrobu, bývají formy kovové (ocelové, niklové atd.) vyráběné obráběním nebo galvanoplasticky. Jedná-li se o výrobu menšího počtu kusů, může být forma kompozitní, polymerní, z umělého dřeva atd. Líc formy musí být před skladbou separován. Následně se nanáší vrstvy prepregů v potřebném počtu, přičemž v určitých místech může být díl zesílen větším počtem vrstev dle technologického předpisu. Na prepregy je nanášena perforovaná fólie, která je po obvodě utěsněna a přes ni je přehozena rozváděcí/odsávací tkanina. Jedná se o silnou vrstvu textilií, která po připojení vakua zajistí jeho rovnoměrný rozvod po celé formě a zároveň je do ní vsakována přebytečná pryskyřice procházející otvory v perforované fólii. Poslední technologickou vrstvou je plachetka v podobě buď to těsnicí fólie nebo přímo pytle (Bag), případně jde o pružný silikonový kryt vyrobený na míru. Plachetka musí být utěsněna buďto těsnicí páskou nebo pomocí žlábků ve formě, kam přesně kryt pasuje svým tvarem. Plachetkou je prostrčen vakuový ventil, který je pomocí rychlospojky připojen na vývěvu. Takto připravená forma se vyvakuje na požadovanou hodnotu a podstoupí vytvrzovací režim v peci.

Pro určité díly a kombinace materiálů matrice/výztuž je pro vytvrzení kromě vakua vhodné aplikovat i vnější přetlak k minimalizaci vad výrobku, kterými mohou být nedotlačená místa, vzduchové bubliny, přebytek matrice apod. V tomto případě hovoříme o tzv. autoklávové technologii. Autokláv je tlaková nádoba s vybavením možností řízení teploty a tlaku, kam jsou vyvakuované formy zavezeny a podrobeny vytvrzení za zvýšeného tlaku. Režimy zpracování se běžně liší dle použitých materiálů a mohou být vícestupňové [1; 2; 12; 18].

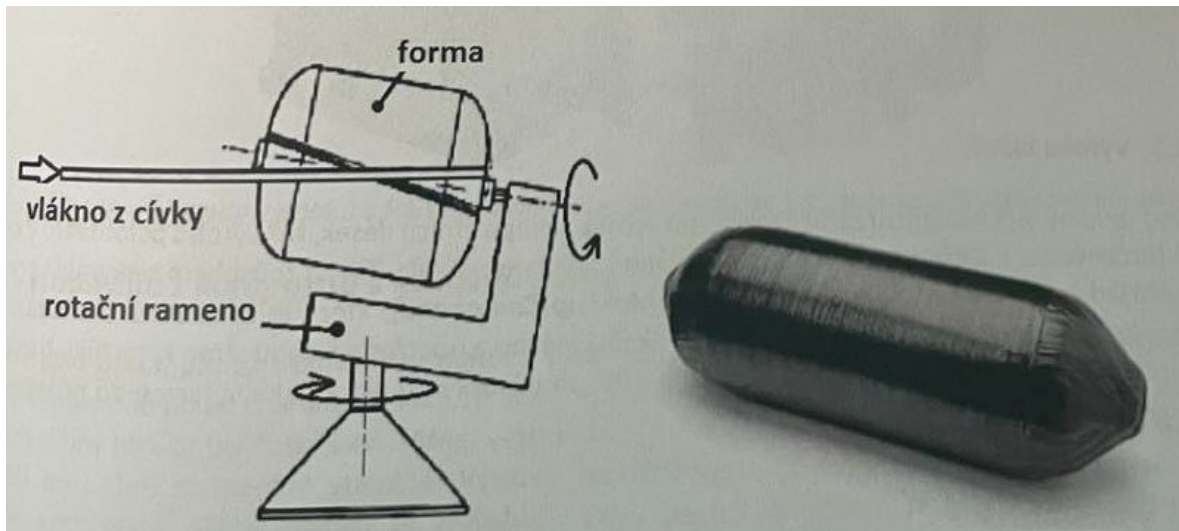
2.4 Navíjení

Pokud se jedná o výrobu trubek či nádob lze z výhodou využít technologie navíjení. Typickým příkladem je navíjení ve formě šroubovice, které je prováděno na speciálním zařízení, které se podobá soustruhu. Na tomto stroji je rotačním způsobem uchycen trn, na který se pomocí kladečního zařízení navíjí vlákno (pramnece nebo rovingy) smočené v pryskyřici. Toto smáčení probíhá buď to pomocí kotouče, který se brodí v pryskyřici a přes jehož hranu jsou vedena vlákna, nebo jsou tyto vlákna vedena přímo přes válce lázni pryskyřice. Vlákna mohou dále také procházet ještě štěrbinou, která odstraní přebytečnou pryskyřici. Vlákna jsou orientována posuvovou rychlostí kladečního zařízení. U menších výrobců se sklopí. Další možností je navinout kompozit na „obětované“ jádro, které vy výrobku zůstane a může např. zajistit tlakotěsnost [1; 2; 12; 18].



Obr. 29 - Princip šroubovicového navíjení [2]

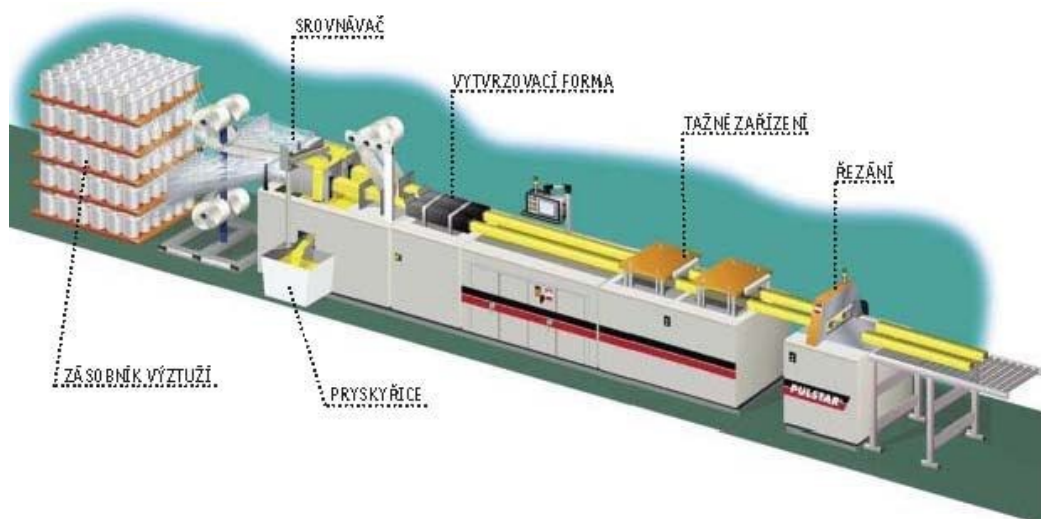
U způsobu šroubovicového navíjení však nelze vyrobit celistvou nádobu – vyrobený profil se pak spojí s víky, která jsou vyrobena zvlášť. Pro výrobu „kompletních“ nádob je vhodné pólové navíjení. Na tenkostěnnou rotačně uloženou formu se pomocí speciálního stroje s rotujícím ramenem navíjí vlákna i na „pólech“ nádoby [1; 2; 12; 18].



Obr. 30 – Princip pólového navíjení (vlevo) a finální výrobek (vpravo) [2]

2.5 Pultruze

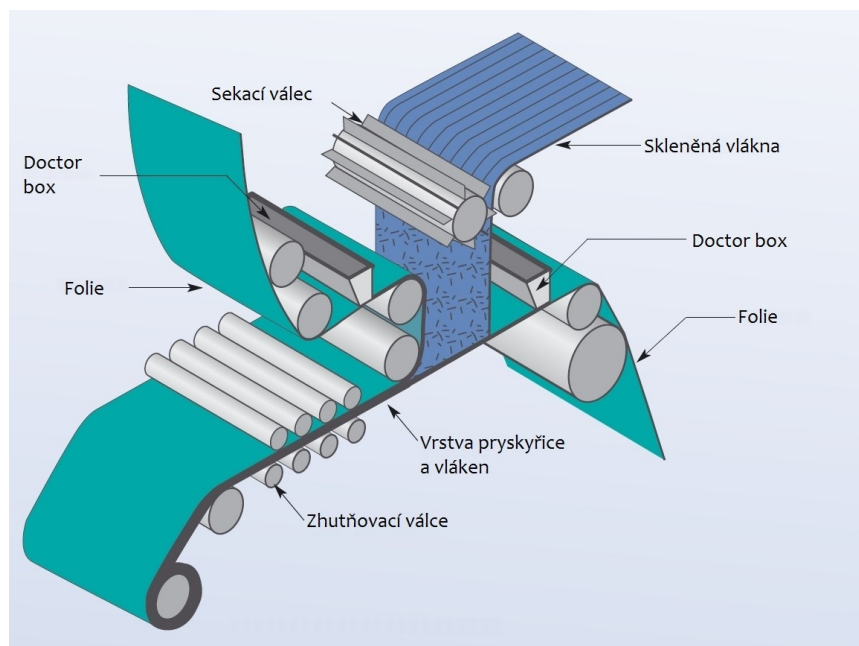
Tento proces je podobný procesu vytlačování polymerů, s tím rozdílem, že nedochází k vytlačování profilů, ale dochází k vytahování z tvarové hlavy. Jedná se o kontinuální proces, kterým vznikají profily různých tvarů. Obecně existují dvě varianty, kde se jedná o vlákna smočené v pryskyřici, nebo varianta přímo s prepregy [1; 2; 12; 18].



Obr. 31 - Pultruzní linka [2]

2.6 Výroba plátů

Do této skupiny technologií lze zařadit jak přímo výrobu kompozitních desek, tak výrobu polotovaru ve tvaru plátů (určených pro další zpracování lisováním apod.) na díly různých tvarů. Tímto způsobem se vyrábí i prepregy. Příkladem lze uvést technologii **SMC (Sheet Molding Compound)**, která je zobrazena na Obr. Reaktoplastická matrice je nanášena na sekané skelné vlákno a opatřena oboustranně krycí fólií. Následně je tento plát řezán dle potřeby, vrství se a dále je v lisu za působení tepla a tlaku vytvrzen do požadovaného tvaru výrobku [1; 2; 12; 18].



Obr. 32 - Schéma výroby plátů technologií SMC [2]

3 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH VLÁKNOVÝCH STRUKTUR

Kompozity s polymerní maticí vyztužené dlouhými vlákny jsou důležitou třídou materiálů v pokročilých konstrukčních aplikacích díky svým specifickým vlastnostem. Tyto materiály se však kvůli své anizotropní a heterogenní povaze obtížně obrábějí. Obráběné kompozitní povrchy často obsahují poškození, jako jsou delaminace, trhliny a dislokace vláken.

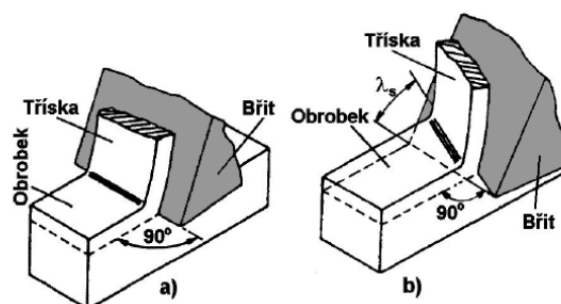
Za účelem zlepšení integrity obrobeneých povrchů a zároveň maximalizace obrobiteľnosti byly provedeny významné výzkumy zaměřené na pochopení mechaniky řezání, vlivu orientace vláken a výrobních podmínek na kvalitu obrobeneých povrchů pomocí různých obráběcích procesů, jako je ortogonální řezání, vrtání a broušení. Z hlediska metodiky studia lze výzkumy obecně rozdělit do tří kategorií, experimentální studie zaměřené na makro/mikroskopické chování, mechanické modelování a numerické simulace, které považují kompozity za makroskopicky anizotropní materiály nebo se zaměřují na interakce vláken s maticí mikroskopicky [19; 20].

3.1 Fyzikální základy procesu řezání

Při řezání obecně působí obráběcí nástroj na obrobek a vyvolává v materiálu napětí, proti kterému klade tento materiál odpor. V těchto důsledcích se ustálí pole řezání, které má výrazné charakteristiky stavu napjatosti, teploty a deformace. Proces řezání bývá realizován jako ortogonální nebo obecné řezání.

V případě **ortogonálního** způsobu řezání je ostří nastaveno kolmo na směr řezného pohybu a tato problematika se řeší v rovině. Typickým příkladem jsou technologie zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování apod.

U případu **obecného** řezání je nutné řešit proces v prostoru. Příkladem jsou podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod [21; 22; 23].

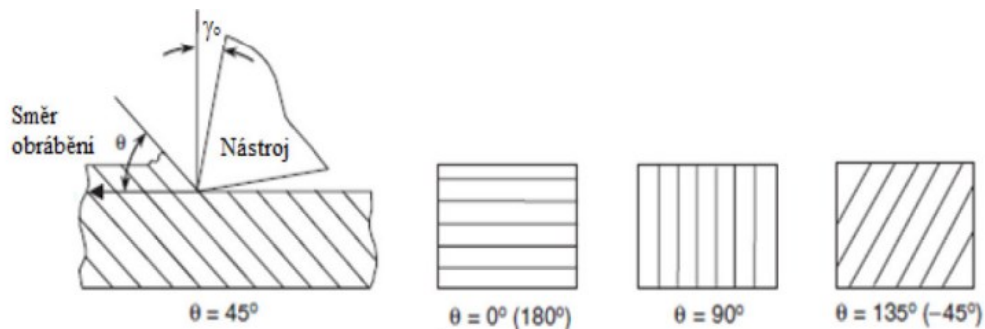


Obr. 33 – Realizace řezného procesu [23]

a – ortogonální řezání, b – obecné řezání

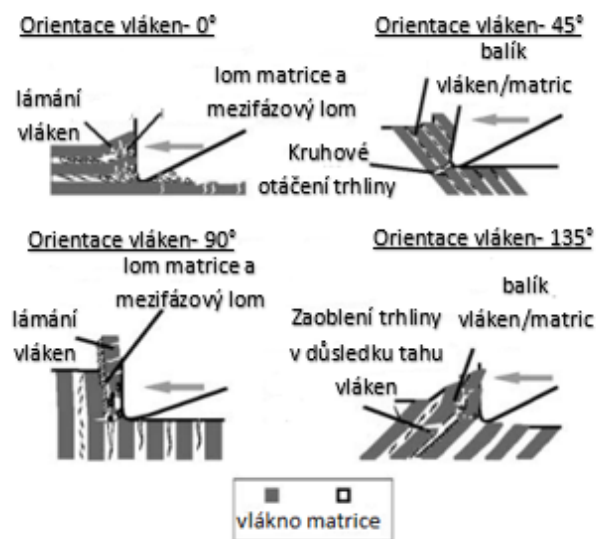
O problematice ortogonálního řezání vláknově vyztužených kompozitů s různou orientací vláken pojednává několik výzkumů, dle těch bylo dokázány následující skutečnosti.

V případě obrábění jednosměrných kompozitů je vlastní úhel orientace vláken důležitým činitelem, je definován směrem vláken ke středu řezu. Efektivní způsob určování tohoto úhlu charakterizuje *Obr. 34*. Kde je tento úhel určován dle směru hodinových ručiček od směru řezu. Další ovlivňující faktor je úhel čela [19; 24; 25].



Obr. 34 - Úhel natočení vláken [24]

Při obrábění pod úhlem 0° k orientaci vláken je laminát vystaven napětí rovnoběžnému s vlákny. Kromě toho je povrch pod řeznou hranou stlačen. Porucha materiálu, ke které dochází před řeznou hranou, je způsobena delaminací, lomem matrice nebo poruchou propletení vláken s matricí, což je rozpoznatelné podle trhliny v kompozitním laminátu před řeznou hranou. Jednotlivé trhliny vyskytující se ve vláknech a v matrici pod řeznou hranou jsou rovněž viditelné a zůstávají na obrobeném povrchu. S rostoucím úhlem mezi směrem řezu a orientací vláken dochází ke stlačování a ohýbání vláken ve směru opačném, než je orientace vláken, což končí lámáním vláken v důsledku ohybu a tlakového zatížení. To může mít za následek porušení rozhraní vláken a matrice, které se rozšiřuje – do neobrobeného povrchu. Tyto směry zatížení, které jsou pro vláknově vyztužené kompozity nejméně příznivé, zejména pod úhlem 30° až 60° ke směru vláken, se projevují špatnou kvalitou povrchu. U kompozitu obráběného pod úhlem 90° ke směru vláken jsou vlákna vystavena ohybu a dochází k jejich stříhu. Na rozdíl od laminátů s 0° vlákny musí být každé vlákno odříznuto zvlášť. Tlaková deformace normálová k vláknům způsobuje problémy, protože mezifázové trhliny zasahují do neobrobeného povrchu. Příznivější podmínky vznikají při orientaci vláken 135° . Vlákna jsou vystavena ohybovému a tahovému namáhání a lámou se ve svazcích. Problémy však vznikají v důsledku toho, že jednotlivá vlákna mohou být vytažena kvůli nedostatečné přilnavosti k matriálu [19; 24; 25].



Obr. 35 - Řezné mechanismy pro vláknově vyztužené kompozity [24]

3.1.1 Mechanismus vzniku třísky

Při obrábění kompozitních materiálů dochází k problémům při vznikání odřezávané vrstvy což je v tomto případě tříška. Základní způsoby její tvorby se zkoumají při ortogonálním řezání. Obecně se zjišťuje tvar a velikost třísky, smykové napětí, deformace třísky, třecí podmínky, řezné síly a teplota v místě řezu. Nejpodstatnějším rozdílem oproti běžnému obrábění např. kovů je, při tomto procesu nevznikají klasické plynulé třísky, ale dochází k odlamování materiálu břitem formou prachu, resp. jemných měkkých třísek. Takto vzniklý odpad musí být z místa řezu odstraněn odsávacím zařízením, které musí splňovat podmínky vysokého výkonu, tak aby nedocházelo k rozvíření prachu do okolí. Při obrábění sklolaminátů je smyslem odsávání především čistota pracoviště, ale důležité je také zajištění zdravotní nezávadnosti. Při obrábění karbonu je odsávání potřebné kvůli silným abrazivním účinkům uhlíkového prachu na styčných plochách, ale také z důvodu elektrické vodivosti. Uhlíkový prach v elektroinstalaci může lehce zapříčinit zkrat, anebo jinak poškodit chod příslušného obráběcího stroje. Tento prach navíc způsobuje karcinogenní účinky [19; 24; 25].

3.1.2 Chlazení

U většiny případů je při obrábění těchto materiálů chlazení vyloučeno, a to především z důvodů hydrofilního chování. Kompozit, jakým je například karbon je vysoce porézní

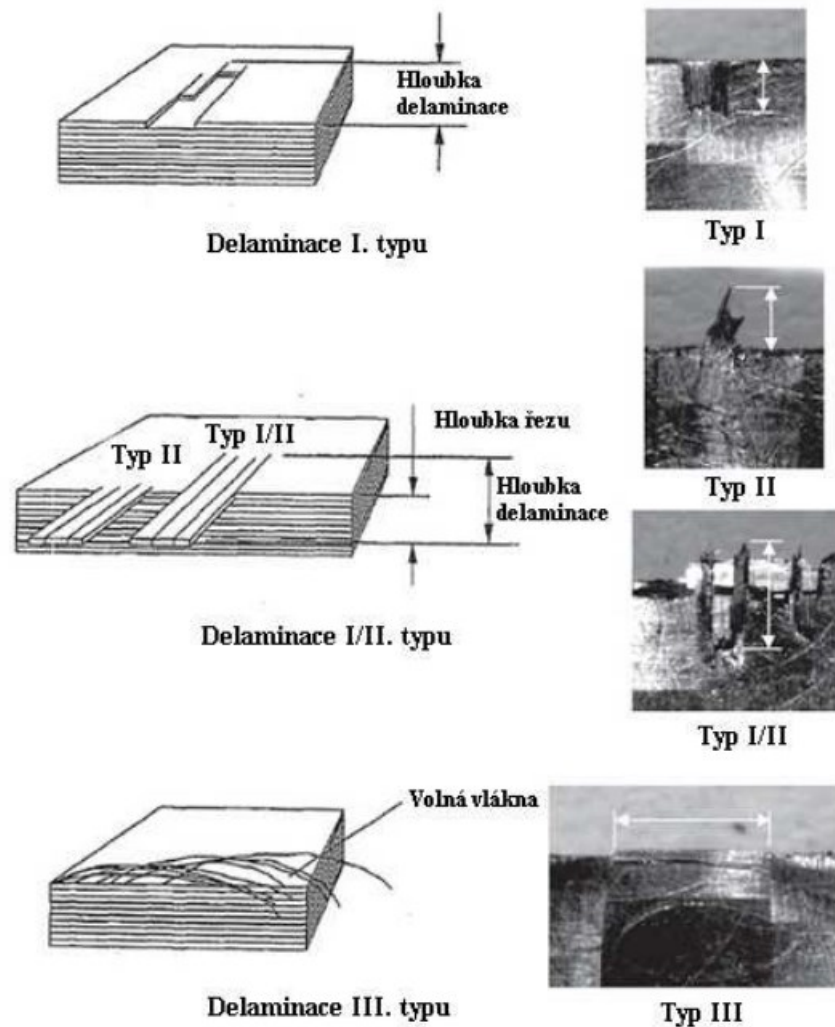
materiál. Pokud bude v tomto případě pro chlazení využívána např. olejová emulze, vzniká zde riziko usazování v pórech materiálu a případné následné lepení pak již nemusí být možné. Při aplikacích chladících kapalin s olejovou příměsí se následná mastnota z tohoto roztoku ve výsledné součásti odstraňuje velmi složitě. Pokud je nezbytně nutné při procesu využívat chlazení v místě řezu, např. ke snížení pevnosti matrice v tomto místě, přichází na řadu možnost využít chlazení vodou, jejími speciálními roztoky nebo vzduchem [19; 24; 25].

3.2 Delaminace

Jedná se o nejvíce diskutovaný problém, který vzniká při obrábění vláknově vyztužených kompozitů. Definicí je odchýlení vrstvy kompozitu od vrstvy přilehlé v důsledku silového působení. Základem úspěšného obrobení dílců z těchto materiálů je předejití tomuto jevu. V místech, kde vznikne delaminace dojde k prudkému poklesu mechanických vlastností a zhoršení jakosti povrchu obrobene plochy.

Úspěšné zvládnutí delaminace je při obrábění komplexním problémem, který v sobě zahrnuje vliv vhodné geometrie používaného nástroje a řezných podmínek. Kombinací těchto podmínek lze řídit směr a velikost působících sil na krajní vrstvy kompozitu.

Delaminace I. typu se projevuje vytržením částí svrchních vrstev, oproti tomu delaminace II. Typu spočívá v neodříznutí vrstvy kompozitu. Tzv. hloubka delaminace u II. typu bývá často shodná s hloubkou řezu. Tyto uvedené typy je také možné pozorovat i v kombinaci (I/II). Delaminace III. typu má obecně vzhled volných vláken nebo odštěpů vznikajících rovnoběžně se směrem posuvu nástroje. II. a III. typ může obsahovat volná vlákna, která jsou připojena k hraně obrobeneho povrchu a tvoří „chlupatý“ vzhled velmi připomínající ořepy známé z obrábění kovových materiálů [19; 24; 25].



Obr. 36 - Typy delaminace při frézování [25]

3.3 Frézování

Technologie obrábění obrábění, kdy se materiál obrobku odstraňuje pomocí rotačních břitů nástroje. Většinou se součást posouvá směrem kolmo k ose nástroje. Moderní frézovací stroje dokážou plynule měnit směr tohoto posuvu, a to ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, přičemž každý zub frézky odebírá krátké třísky s různou tloušťkou.

Jednotlivé typy frézovacích procesů lze dělit podle mnoha charakteristik a faktorů [21; 22; 23].

3.3.1 Řezné síly při frézování

Významnou veličinou frézovacího procesu je síla obrábění (řezání), kterou je nutno chápat

jako veličinu časově proměnnou. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor R , který síla řezání musí při řezném procesu neustále překonávat.

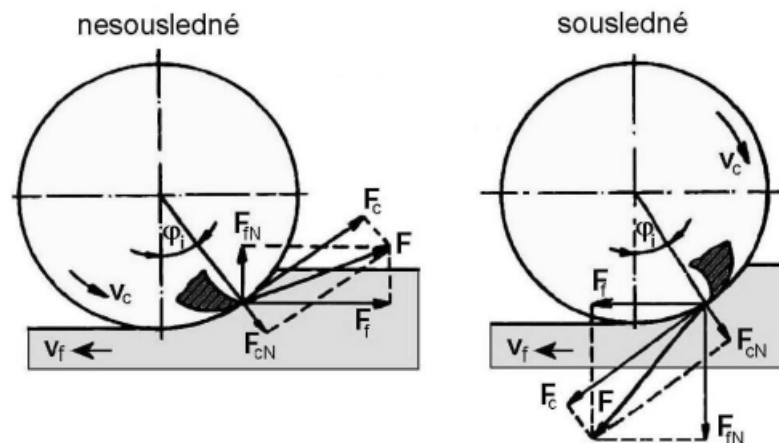
Pro podmínku rovnováhy pak platí:

$$F = -R \text{ [N]} \quad (2)$$

F – síla obrábění [N]

R – řezný odpor [N]

Tyto síly se specifikují dle ze silových poměrů na jednom břitu, který se nachází v poloze určené úhlem φ_i . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu F rozkládá na složky F_c a F_{cN} , resp. na složky F_f a F_{fN} [21; 22; 23]..



Obr. 37 - Schéma rozložení složek síly řezání při frézování; [21]

F – celková řezná síla, F_c – řezná síla, F_{cN} – kolmá řezná síla, F_f – posuvová síla, F_{fN} – kolmá posuvová síla

Řezná síla F_c se vyjádří na základě měrné řezné síly p a průřezu třísky A_D :

$$F_c = p \cdot A_D = p \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (3)$$

Měrná řezná síla k_c se vyjádří jako:

$$k_c = \frac{C_{Fc}}{h^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}}$$

a po dosazení do (3) a úpravě bude:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \text{ [N]} \quad (4)$$

Při čelním frézování se řezná síla F_C vyjádří podobným postupem:

$$F_C = k_C \cdot A_D = k_C \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i$$

$$k_C = \frac{C_{Fc}}{h^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}}$$

$$F_C = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \cdot \sin^x \varphi_i \quad [\text{N}] \quad (5)$$

Hodnoty C_{Fc} a exponentů x se řídí podle experimentálních hodnot stanovených pro různé typy frézování a různé materiály [21; 22; 23].

3.3.2 Řezné podmínky při frézování

Pro daný obráběný materiál a frézovací nástroj patří k základním řezným podmínkám řezná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] a posuv na zub f_z [mm]. V technické praxi se často předepisuje také posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$], pro kterou platí:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (6)$$

z – počet zubů frézy [-]

n – otáčky vřetene [min^{-1}]

Volba řezných podmínek obvykle závisí na druhu práce, použitých frézách a požadované kvalitě obráběných ploch. Při hrubém obrábění se zpravidla zvolí co největší posuv s ohledem na hloubku odstraňované vrstvy, tuhost obrobku a výkon na vřetenu frézy.

Výpočet řezných podmínek pro frézování

Řezná rychlost:

$$v_{cT} = \frac{c_v \cdot D^{x_D}}{(T_{opt})^{\frac{1}{m}} \cdot a_e^{x_e} \cdot a_p^{x_p} \cdot f_z^{y_v} \cdot z^{x_z}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (7)$$

D – průměr frézy [mm]

T_{opt} – trvanlivost nástroje [min]

a_p – hloubka frézování [mm]

a_c – šířka frézování [mm]

f_z – posuv frézy na zub [mm]

z – počet zubů frézy [-] [21; 22; 23].

3.3.3 Frézování vláknově vyztužených kompozitů

Frézovací operace prováděné na dílech z těchto materiálů se na rozdíl od kovových dílů vyznačují nízkým poměrem odebraného materiálu k celkovému objemu dílu. Frézování se zpravidla používá jako korekční operace koncového obrábění nebo k vytvoření definovaných, vysoce kvalitních povrchů.

Typ vlákna, architektura výztuže a objemový podíl matrice jsou nejdůležitějšími faktory, kterými se řídí výběr nástroje a nastavení parametrů obrábění.

V případě výztuže ze skleněných a uhlíkových vláken je to materiál řezného nástroje, který dominuje výběru konečnému výběru nástroje.

V případě výztuže z aramidových vláken je to geometrie řezného nástroje, která určuje výběr řezného nástroje.

Chování při obráběcích operacích je dáno především vlastnostmi vláken vyztužujících kompozit. To má zásadní vliv na výběr parametrů procesu nebo na vhodnost koncepce nástroje [19; 20; 24; 25].

Výběr nástroje

Tvrдость skla a zejména uhlíkových vláken vede k vysokému opotřebení při obrábění. Protože se toto opotřebení projevuje především zaoblením břitu nástroje, měl by mít břit vysoký stupeň odolnosti proti oděru a odštípnutí.

Jako nástrojové materiály jsou proto vhodné jemnozrnné karbidy ze skupiny K 10 nebo lépe PCD. Nevhodné však jsou keramické materiály, protože jejich nízká pevnost a vysoká křehkost je činí velmi citlivými na rázy, což vede k odlamování břitu nástroje, a jejich nízká tepelná vodivost neumožňuje odvod tepla vznikajícího při obrábění vláknově vyztužených kompozitů. Vzhledem k nízké odolnosti proti opotřebení nepředstavuje CBN, který je stejně drahý jako PCD, žádnou výhodu oproti PCD. Pro zajištění čistého řezu skelných a uhlíkových vláken je velmi důležité zajistit vysokou ostrost břitu. Pokud jde o geometrii břitu, je třeba dbát na to, aby zoubkování a poloměr břitu byly co nejmenší. Vzhledem k výrazné náchylnosti těchto vláken ke křehkému lomu odpovídají geometrie nástrojů přibližně geometriím nástrojů používaných při zpracování kovů.

Požadavky na nástroje:

- Konvenční makroskopická geometrie břitu nástroje
- Velmi vysoká odolnost proti opotřebení
- Malý poloměr řezné hrany, $r = 10-15 \mu\text{m}$
- Vysoká kvalita povrchu břitové plochy a boku, $Ra < 1,5 \mu\text{m}$

Při výběru nástrojů lze rozlišovat mezi oblastmi použití na základě typu vláken, délky vláken a objemu vláken [19; 20; 24; 25].

Popisy a obrázky těchto nástrojů obsahuje kapitola 9.1 v praktické části této práce.

4 METODY MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ EXPERIMENTŮ

Při výzkumech v oblasti obrábění kompozitních materiálů bývají měřeny definované veličiny, kterými jsou jakosti povrchů, resp. nástrojů, řezné síly, vibrace. V některých případech mohou být zkoumány i veličiny délkové, hmotnostní a další [19].

4.1 Základní pojmy struktury povrchu

Struktura povrchu, dříve nazývaná drsnost, se obecně skládá z geometrických odchylek skutečného povrchu, které mají poměrně malou vzdálenost mezi sousedními nerovnostmi.

Tyto odchylky lze obecně rozdělit na dva typy: mikronerovnost a makronerovnost.

Mikronerovnost

Představuje jemnou nerovnost povrchu, která je způsobena stopami, které zanechá řezný nástroj nebo brusivo.

Makronerovnost

Zahrnuje rozsáhlejší periodické nerovnosti povrchu, které nejčastěji způsobují vibrace soustavy stroj-nástroj-obrobek-prostředí.

Na jednotlivých obrobených plochách se tyto typy nerovností navzájem překrývají. Větší nerovnosti povrchu způsobené náhodným poškozením, jako jsou rýhy, nebo vady materiálu, jako jsou trhliny a póry, se do struktury povrchů nezahrnují.

Při hodnocení kvality povrchů se používají základní pojmy: drsnost, vlnitost a tvar.

Drsnost

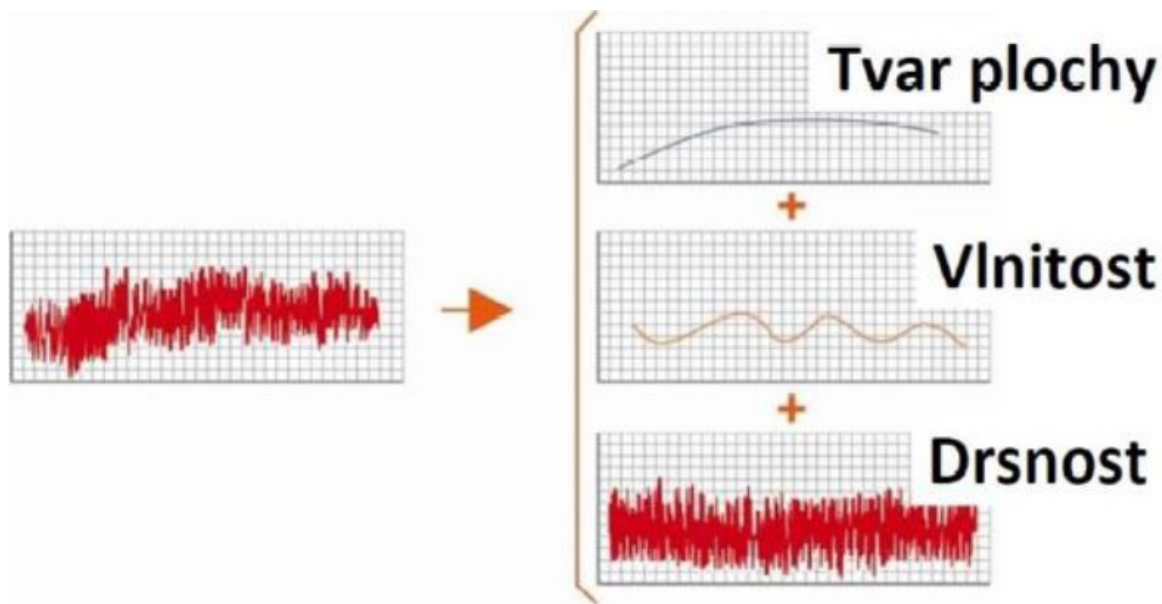
Představuje nepravidelnost povrchu, která je výsledkem výrobního procesu a souvisí s relativním pohybem mezi nástrojem a obrobkem. Mechanismus tvoření třísky také ovlivňuje povrch a může se projevit například vytrháváním částic materiálu, což vytváří náhodný charakter povrchu.

Vlnitost

Představuje část textury, na které je nanесena drsnost, a může být způsobena chvěním, deformací obrobku nebo zpevněním materiálu. Většinou je způsobena vlivem stroje, jako je například nevyváženost nástroje, nepřesnost vodících částí nebo malá tuhost.

Tvar

Se určuje po vyloučení drsnosti a vlnitosti a popisuje úchytky tvaru, které jsou způsobeny nedostatečnou tuhostí, špatnou přímostí vodících ploch nebo tepelným vlivem během výrobního procesu, který může způsobit deformace obrobene plochy. [26; 27].



Obr. 38 - Obecný povrch a jeho součásti [27]

4.1.1 Základní parametry povrchu profilu

Parametry využívané k hodnocení struktury povrchu snímaného materiálu. Jejich opodstatnění je zejména u 2D snímání povrchu [26; 27].

Ra – střední aritmetická úchylka drsnosti

Tento parametr vyjadřuje průměrnou vzdálenost bodů profilu (y , x) od středové čáry měřeného úseku. Nicméně jeho schopnost poskytnout užitečné informace je omezená, neboť je méně citlivý na extrémní výšky profilových hrotů a hloubky rýh. Tento parametr bývá obvykle vyjádřen v μm [26; 27].



Obr. 39 - Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu Ra [26]

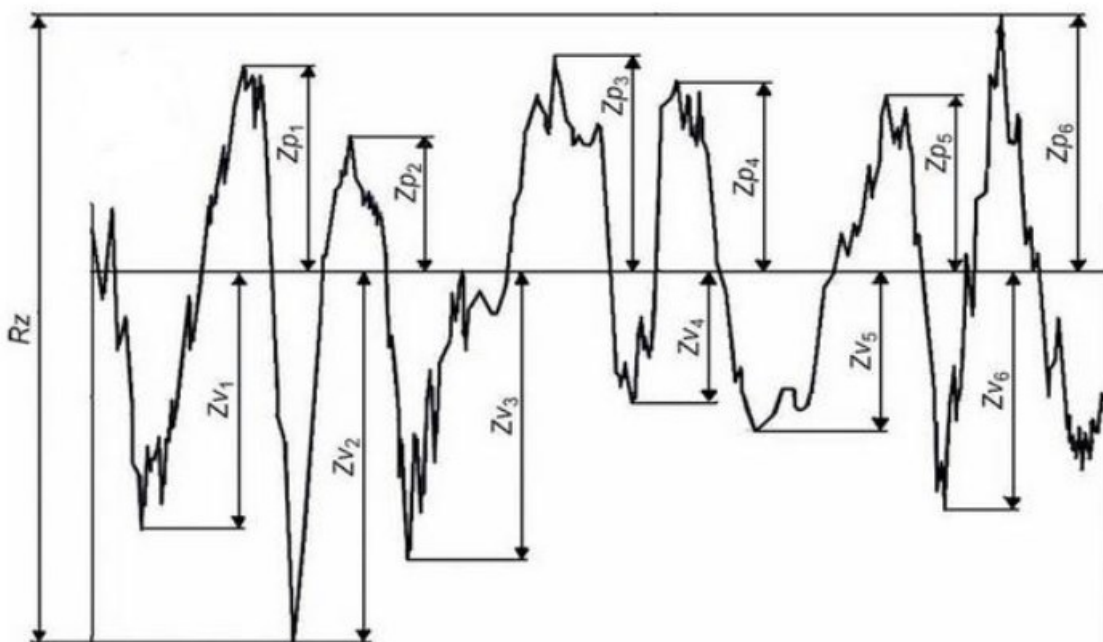
Rq – průměrná kvadratická odchylka profilu

Hlavním účelem tohoto parametru je výpočet velikosti obsahu prohlubní. Je citlivý na nežádoucí výstupky a prohlubně na povrchu, a proto obvykle vykazuje vyšší hodnoty než parametr Ra . V optickém průmyslu je tento parametr nejvíce využíván.

Rz – výška nerovnosti

Tento parametr se nazývá Rz (anglicky "peak-to-valley height") a vyjadřuje maximální vertikální vzdálenost mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou profilu na daném měřeném úseku. Je to citlivější parametr než Ra , protože zahrnuje extrémní výšky a hloubky rýh a výstupků. Obvykle má vyšší hodnotu než Ra .

Orientační vztah mezi Ra a Rz může být často vyjádřen jako $Rz = 4 \cdot Ra$. Tento vztah však závisí na charakteru profilu povrchu a nemusí platit pro všechny případy [26; 27].



Obr. 40 - Znárodnění výšky nerovnosti Rz [26]

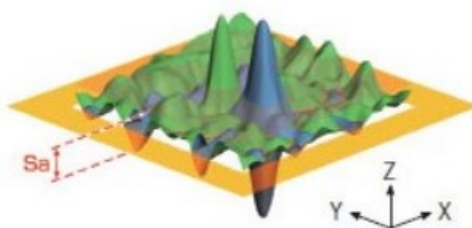
4.1.2 Základní parametry plošného hodnocení textury povrchu

Při hodnocení povrchu pomocí prostorového zobrazování získá kontrolor mnohem detailnější informace o průběhu nerovností na povrchu, než je tomu u klasické 2D analýzy. Tyto informace zahrnují nejen průběh nerovností, ale také dobu životnosti a funkční vlastnosti povrchu. Využitím 3D analýzy textury povrchu se pak kombinují již dříve získané informace s novými pojmy, matematickými a geometrickými postupy a výpočty, což vede k propojení terminologií a popisu struktury povrchu. Tato kombinace analytických metod

umožňuje získat komplexní informace o vlastnostech povrchu a je využívána v široké škále průmyslových aplikací [28].

Sa – parametr výšky (střední amplituda ve směru výšky)

Tento aritmetický 3D parametr, obdobný parametru drsnosti 2D Ra vyjadřuje průměr absolutních hodnot v měřené oblasti. Výhodou je, že malý extrém má jen velmi malý vliv na výsledné údaje [29].



Obr. 41 - Sa – aritmetický průměr výšky [29]

Tak jako u 2D parametrů drsnosti existují další parametry jako jsou např. Sp – maximální výška píku, Sv – maximální hloubka prohlubně, a další [29].

4.1.3 Metody měření drsnosti povrchu

Vzhledem k vysokým nárokům na dokonalost funkčních ploch povrchů bylo vytvořeno několik specifických metod pro měření. Tyto metody vedly k zavedení nových parametrů pro charakterizaci struktury povrchu. V současnosti se nejvíce rozvíjejí systémy pro měření 3D charakteristik těchto struktur, aby bylo možné dosáhnout co nejvyšší přesnosti a spolehlivosti [28; 30].

Měření struktury povrchu jsou rozdělena dle těchto metod:

Metody kvalitativní

Metody kvalitativního hodnocení povrchu se využívají při porovnávání vzorkovnic s reálnými povrchy. Pro tento účel jsou k dispozici standardizované vzorkovnice povrchů, které jsou popsány například na *Obr. 42*. Tato metoda má několik nevýhod, přičemž jednou z hlavních je její zastaralost, jelikož se spoléhá na individuální schopnosti pracovníka, což vede k subjektivnímu hodnocení a použití pouze jednoho parametru drsnosti - obvykle parametru Ra [31].



Obr. 42 - Vzorkovnice drsnosti povrchů [32]

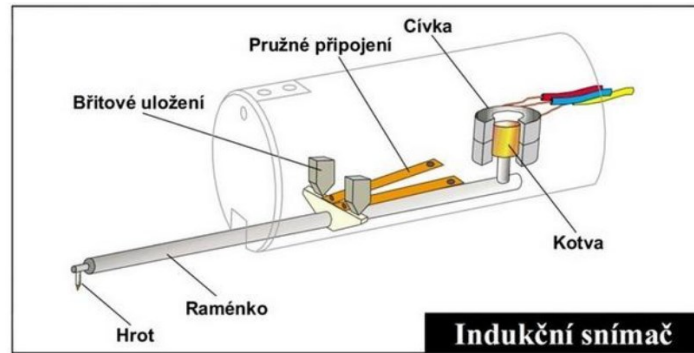
Metody kvantitativní (parametrické)

Základním principem moderního měření parametrů povrchu je využití matematického popisu těchto parametrů, ke kterému se často využívají profilometry. Tyto přístroje umožňují snímání profilu povrchu a jeho následné zpracování za účelem získání různých povrchových charakteristik. Profilometry mohou být využívány při měření povrchů různých materiálů a jsou široce používány v průmyslové výrobě pro kontrolu kvality a optimalizaci výrobních procesů. Díky využití moderních profilometrických technologií je dnes možné měřit mnoho různých parametrů povrchu s vysokou přesností a opakovatelností [31].

Konkrétní přístroje pro hodnocení povrchů se rozdělují na:

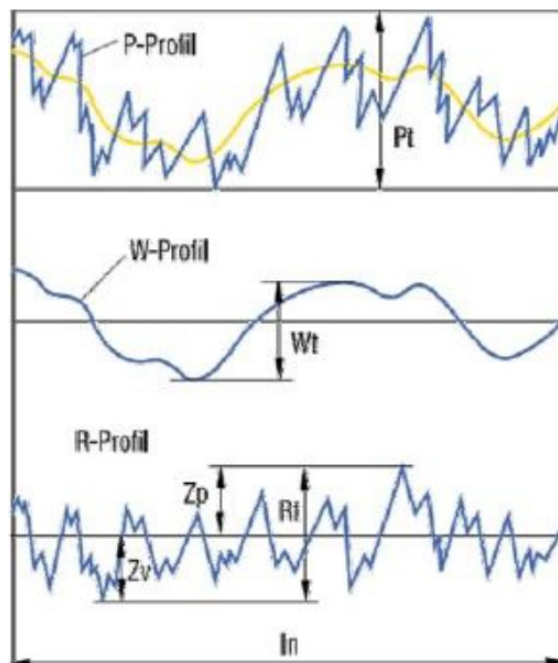
Přístroje kontaktní

Přístroje kontaktního typu se skládají ze dvou částí: mechanické a elektrické. Mechanická část obsahuje stůl, na který se umístí měřený povrch a rameno s přesně pohybujícím se snímacím hrotem, který sleduje nerovnosti povrchu. Elektrická část slouží k přeměně mechanického signálu na elektrický signál. Snímací hrot musí být velmi přesně zpracován a musí být volena vhodná rychlost pohybu, aby se zajistil rovnoměrný a přímý pohyb. Tyto přístroje jsou obvykle vybaveny funkcí pro přenos naměřených dat do počítače pro další analýzu. Jednou z charakteristických vlastností těchto přístrojů je malá měřicí síla, což minimalizuje poškození měřeného povrchu během měření [31].



Obr. 43 - Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [31]

Použitím tohoto snímače lze získat dvourozměrný profil povrchu měřené součásti. Podle normy ISO 16610-21:2011 se z primárního profilu (P-profilu) získají profily drsnosti (R-profil) a vlnitosti (W-profil) po aplikaci filtrů. Celkové hodnocení drsnosti povrchu je složité a zahrnuje několik kroků, jako je proložení a filtrování tvaru a vlnitosti povrchu. Získané profily jsou poté znázorněny na Obr. 44. [30; 31]



Obr. 44 - Příklad výsledků profilu z kontaktního drsnoměru [32]

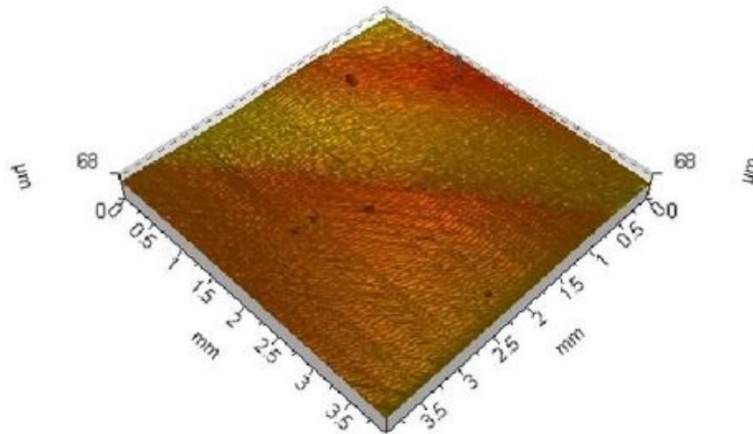
P_t – hloubka profilu, W_t – výška vlnitosti,

R_t – největší hloubka drsnosti, l_n – vyhodnocovaná délka

Měření může být ovlivněno několika faktory, jako je síla, kterou je měření prováděno, poloměr snímacího hrotu, vrcholový úhel a rychlost, kterou se měřící síla mění. Tyto faktory mohou mít vliv na přesnost a opakovatelnost měření. Proto je důležité tyto faktory pečlivě kontrolovat a nastavit podle předepsaných parametrů pro dané měření, aby byly zajištěny správné a konzistentní výsledky [30; 32].

Přístroje bezkontaktní

Bezkontaktní přístroje se často používají v laboratořích a vědeckých aplikacích. Nejčastěji používanými bezkontaktními snímači jsou CLA (Chromatic Length Aberration) a laserové snímače. Laserové snímače mají obvykle vyšší rozlišení než CLA snímače a dosahují rozlišení na úrovni nižší než mikrometr [31].



Obr. 45 - 3D povrch nasnímaný pomocí CLA snímače [31]

Interferometrické metody dnešní doby umožňují přesné, rychlé a bezkontaktní měření topografie povrchů běžně používaných strojních součástí. Jednou z nejvýznamnějších výhod těchto metod je schopnost poskytnout zobrazení drsnosti povrchu na celé funkční ploše součásti, včetně 3D vizualizace [31].

4.2 Přímé měření sil a momentů

Přímé měření složek síly obrábění a jejich momentů se zakládá na určování deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek pomocí dynamometrů. Na tato zařízení bývají kladeny speciální požadavky:

1. **Tuhost** dynamometrů dává velikostí zatěžující síly F , která způsobuje deformaci. Velikost deformace je závislá na tvar deformačního elementu, konstrukci dynamometru a použité měřící metodě.
2. **Citlivost** dynamometrů závisí na přesnosti a citlivosti měřící metody. Dynamometr musí být tak citlivý, aby nejmenší odečítaná jednotka odpovídala celkové hodnotě měřené veličiny.
3. **Stálost** údajů dynamometrů závisí na tuhosti, citlivosti a přesnosti po celou dobu měření.

4. **Reprodukovatelnost** údajů dynamometrů souvisí s výše uvedenými požadavky a charakteristikami.
5. **Setrvačnost** dynamometrů závisí na hmotnosti celé jeho soustavy. Při dynamických měřeních, při kterých je nutné sledovat maximum a minimum hodnoty řezné síly i průběh v čase by měla setrvačnost dosahovat co nejnižších hodnot.
6. **Konstrukce** dynamometrů musí zajistit, vzájemnou neovlivnitelnost složek řezné síly.

Zpravidla se dynamometry sestavují ze tří částí:

- Pružný člen – identifikuje a přebírá vnější zatížení, přičemž překonává změny deformace, polohy aj.
- Snímač – přeměňuje mechanickou veličinu změny pružného členu na hodnotu analogického parametru
- Přijímač – zajišťuje zesílení, zpracovávání signálu snímače a zapisuje velikost zatížení [33].

4.2.1 Základní rozdělení dynamometrů

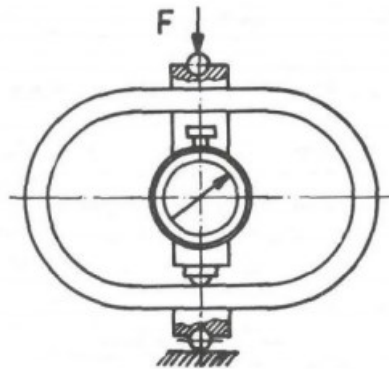
Dynamometry se obecně rozdělují dle následujících hledisek:

1. Dle počtu měřených složek síly řezání:
 - jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření krouticích momentů
2. Dle měřicí metody (dle způsobu přenosu působení síly z pružného členu do přijímače):
 - mechanické, elektrické, hydraulické, pneumatické, piezoelektrické
3. Podle metody obrábění:
 - pro soustružení, frézování, vrtání, broušení apod.

Mechanický dynamometr

Jeho uplatnění je především k seřízení jiných typů dynamometrů. Základní charakteristikou je lineární vztah mezi sledovanou silou a vlastními naměřenými údaji. Přenos sil je zajištěn napřímo nebo vynásoben mechanickým převodem na měřicí přístroj (např. číselníkový úchylkoměr). Jsou spolehlivé a jednoduché se stálou dosahovanou přesností od 0,5 do 2 %. Značnými nevýhodami jsou závislost na správné měřicí teplotě,

nutnost vymezení vůlí v mechanismech, únava materiálu, resp. obtížnost změny rozsahu měření.



Obr. 46 - Mechanický dynamometr prstencový [33]

Hydraulický dynamometr:

Pracuje na principu zachytávání měřených sil na pístu nebo na membráně. Tato změna způsobí změnu tlaku oleje a v závislosti na ní následuje snímání díky manometrům.

Pneumatický dynamometr:

Základní podstatou funkce je využívání vzduchu, který prochází úzkou štěrbinou. Měří se tlak, resp. deformace mezi tryskou a klapkou.

Elektrický dynamometr

Obecně se jedná o nejpoužívanější druh dynamometru. Principem funkce je jednoduchý přenos dálkového signálu s širokou škálou možných úprav. Využívá malých měřících elementů. Umožňuje snadnou možnost regulace signálů [33].

Piezelektrický dynamometr:

Ke snímání je využíváno tzv. piezeelektrického jevu, ten je charakterizován vznikem následného elektrického náboje na povrchu krystalů při mechanickém zatěžování.

Typickými piezeelektrickými materiály jsou křemeny nebo materiály na bázi Seignettovy soli. Správnost měření zaručuje vhodně vyříznutá destička z příslušného krystalu. Při zatěžování piezeelektrického dynamometru je velikost náboje přímo úměrná s velikostí působící síly. S klesajícím zatěžováním se velikost náboje snižuje až k úplné nule.

Výrobce KISTLER v současnosti představil speciálně konstruované moderní dynamometry, díky datům získaným s měření těmito přístroji je možné maximalizovat efektivitu obráběcích nástrojů [33; 34].



Obr. 47 - Dynamometr od firmy KISTLER měřící pomocí piezoelektrického jevu [34]

4.3 Nepřímé měření sil a momentů

Tento typ měření najde své opodstatnění v praxi tam kde není kladen důraz na vysokou přesnost naměřených hodnot řezných sil. Metody určování vychází převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje nebo točivého momentu vřetene, ze kterých jsou dopočítány tangenciální složky řezné síly [33].

4.4 Vyhodnocení experimentů

Experimentování obecně představuje testování kombinací různých hodnot (úrovní) faktorů, které mohou mít vliv na sledovanou charakteristiku. Testování všech možných variant může představovat neúměrně velký počet zkoušek. Proto se pro experimentování využívají zkrácené metody, které zkoumají pouze určitou frakci všech možných kombinací [35; 36].

4.4.1 Metoda DOE

Jedná se o experimentální strategii, při které se najednou vyhodnocují účinky několika faktorů, prostřednictvím jejich testování na různých úrovních.

Charakteristika jakosti, Y

Veličina, za, pomocí které lze vyjádřit určité vlastnosti produktu nebo procesu. V experimentální terminologii představuje charakteristika jakosti závislou proměnnou, pomocí které kvantifikujeme výsledky experimentů.

Faktor (parametr), A

Nezávislá návrhová proměnná, která ovlivňuje charakteristiku jakosti. Faktory se označují velkými tiskacími písmeny, tj. A, B, C atd. a jejich úrovně pro experiment se označují systémem indexů A_1 (faktor A na první úrovni), A_2 (faktor A na druhé úrovni), atd

Obecně se faktory dělí na dvě skupiny:

Spojité – Pro danou úroveň lze nastavit jejich libovolnou hodnotu (ve vymezeném pracovním rozsahu). Např. teplota.

Diskrétní – Pro danou úroveň lze nastavit konkrétní jednu hodnotu nebo status. Např. typ materiálu.

Dle Taguchiho tabulek tzv. ortogonální soustavy, lze provádět pouze malou část z celkového počtu možných experimentů. Pomocí těchto soustav lze provést nejmenší možný počet experimentů s maximálním množstvím informací [35; 36].

Tab. 3 - Znárodnění nejmenší ortogonální soustavy L-4 [36]

Číslo experimentu	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Základní popis *Tab. 3*:

- Označení L vyjadřuje původ soustavy (Eulerovy latinské čtverce).
- Číslice (4) vyjadřuje počet pokusů.
- Číslice v soustavě reprezentují úrovně faktorů (1,2).
- Řádky reprezentují podmínky pro jednotlivé pokusy.
- Sloupce indikují možnost přiřazení faktoru.
- Každá soustava má více možností použití.
- Sloupce soustavy jsou ortogonální.

Celková experimentální procedura obsahuje 5 postupných kroků:

1. **Plánování** experimentů představuje inženýrskou část Taguchiho metody. V tomto kroku musí experimentální tým co nejpřesněji definovat všechny potřebné vstupy pro návrh experimentů. Tzn. Především nadefinovat cíl experimentu, charakteristiku jakosti, faktory, které ji ovlivňují, počet úrovní faktorů a jejich nastavení, aj. Důležitou součástí tohoto kroku je i diskuse.
2. **Navrhování** experimentu probíhá podobným způsobem, jak bylo uvedeno výše u ortogonální soustavy L-4. U složitějších experimentů (interakce, smíšené úrovně, opakované experimenty), je pak nutné využívat některé další postupy.
3. **Provedení** experimentů dle daného návrhu je realizován v aktuálních výrobních podmínkách, laboratoři, při ověřovací výrobě apod. Důležitou podmínkou je provedení experimentů v náhodném pořadí.
4. **Analýza** experimentů zahrnuje 3 standartní kroky:
 - a) Stanovení optimálních podmínek (průměrné a hlavní účinky)
 - b) Procentuální podíl faktorů (ANOVA)
 - c) Odhad hodnoty charakteristiky jakosti při optimálních podmínkách
5. **Ověřovací testy** jsou nedílnou součástí Taguchiho metody, Těmito testy chceme ověřit, že závěry z analýzy jsou správné [35; 36].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Hlavním cílem praktické části diplomové práce je výzkum závislosti řezných podmínek na velikost řezných sil a jakost obrobeneho povrchu při obrábění uhlíkovými vlákny vyztužených kompozitů.

Před započnutím veškerého experimentování bude klíčová výroba polotovaru pro celý postup experimentu. Ta proběhne za pomoci jasných předem definovaných technologií výroby kompozitních.

Prvním z cílů bude zjistit jaký vliv má na obrábění CFRP kompozitů vhodně konstruovaný nástroj na oproti nevhodnému. Výstupem budou naměřené hodnoty složek řezných sil a drsnosti povrchu. Za pomoci základní statistiky bude provedeno srovnání těchto dvou obráběcích procesů.

Hlavní cílem je zjištění vlivu řezných parametrů při obrábění CFRP kompozitů s přesně definovanými nástroji vhodně konstruovanými pro toto obrábění. Experiment proběhne vyhodnocováním pomocí metody DOE. V první fázi se rozplánuje celý experiment a určí se vstupní parametry a počet měření. Následně proběhne CNC programování všech obráběcích procesů. Po tomto kroku bude možné začít obrábět a měřit. Poslední fáze vyhodnotí výstupní data za, pomocí kterých bude možné graficky interpretovat chování celého obráběcího procesu a za pomoci matematického modelu stanovit optimalizaci vstupů do tohoto procesu. Ty budou mít podobu ideálních řezných parametrů a ideálního nástroje z výběru pro tento experiment.

Všechny postupy praktické části proběhnou v prostorách Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

6 AKTUÁLNÍ STAV VÝZKUMU A VÝVOJE VLIVU ŘEZNÝCH PODMÍNEK NA OBRÁBĚNÍ KOMPOZITŮ CFRP

Mali a kolegové [37] zjistili, že při frézování CFRP kompozitů je právě řezná rychlost významným faktorem ovlivňujícím teplotu obrábění. Lepší povrchové úpravy a MRR lze dosáhnout snížením řezné rychlosti, zvětšením radiální hloubky řezu a snížením rychlosti posuvu. Delaminace má tendenci narůstat při zvyšování rychlosti posuvu a řezné rychlosti. Kvalitu povrchu lze zlepšit použitím vyšší řezné rychlosti a nižšího posuvu. Kubický nitrid bóru vykazuje celkově lepší obrábění, než řezné nástroje z karbidu wolframu a keramiky.

Při frézování CFRP lze minimalizovat tvorbu otřepů použitím nástrojů s malou radiální hloubkou řezu a malým poloměrem řezné hrany. Opotřebením nástroje je v chlazených podmínkách nižší než za sucha při vyšší řezné rychlosti. Snížení teploty snižuje drsnost povrchu. Maximum energie se spotřebuje na rozhraní nástroj-tříška. S rostoucím úhlem vláken se energie vynaložená na vytvoření nového povrchu snižuje.

Ozkan a kolegové [38] svým výzkumem potvrzují skutečnost, že frézovací operace aplikované na CFRP kompozity jsou tedy velmi závislé na řezných nástrojích specifikovaných jak cenově, tak kvalitativně. Výběr vhodných řezných nástrojů, řezných parametrů, řezných sil, a dokonce i vhodné tepelné odolnosti hraje při frézování nejzásadnější roli v závislosti na aplikaci.

7 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Před provedením obráběcích experimentů bylo nutné provést několik nezbytných kroků k jejich uskutečnění. Základem byla výroba samotného polotovaru dle zásad zpracování kompozitních materiálů. V dalších fázích byl tento polotovar příslušnými obráběcími metodami upraven, tak aby měl pravidelnější tvar a aby byl přizpůsoben k upnutí do měřicího zařízení.

7.1 Výroba polotovaru

Tato podkapitola popisuje zpracování CFRP kompozitů pomocí vakuové technologie dle podkapitoly 2.3 z teoretické části.

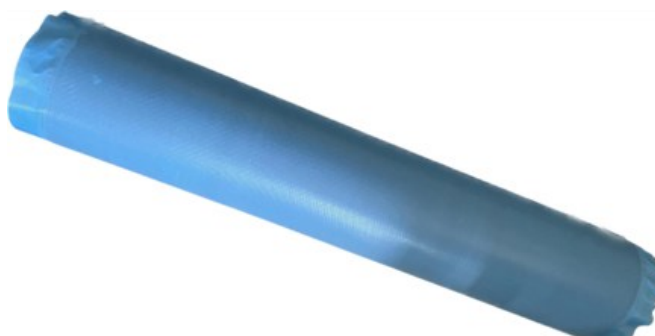
7.1.1 Materiál

Vstupní částí materiálu byla předimpregnovaná uhlíková tkanina. Jejíž matricí byla formulovaná epoxidová pryskyřice ER 78 T od výrobce MEEM, speciálně navržená pro lisování a obrábění dílů s dlouhou životností a krátkým výrobním cyklem. Technický list této matrice lze nalézt v přílohách.

7.1.2 Výrobní postup

- **Řezání na rozměr**

Materiál byl dodán formou navinuté tkaniny. Základem přípravy bylo nařezání tkaniny na čtverce o rozměrech 160x160 mm.



Obr. 48 – Navinutá tkanina



Obr. 49 - Nařezaná tkanina

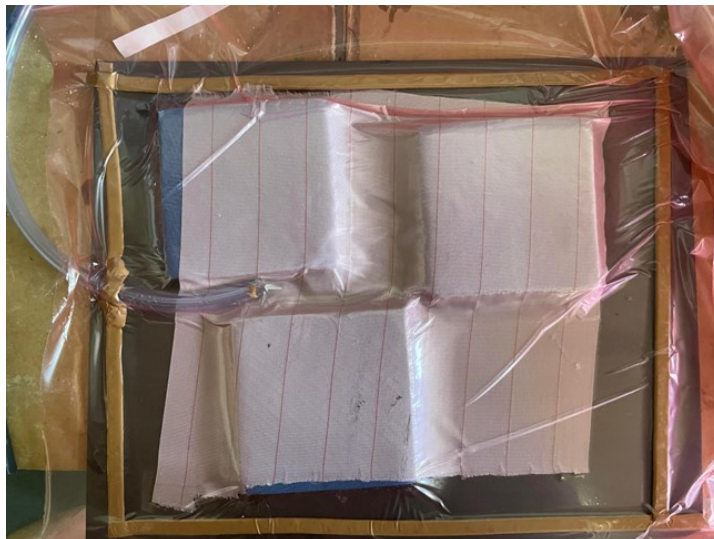
- **Skládání a vakuování**

Takto připravené tkaniny, byli vyskládány na pracovní desku postupně na sebe ve shodném směru dle vyztužení a následně utlačovány pomocí válečku. Celková tloušťka polotovaru byla stanovena na 40 mm.



Obr. 50 - Princip skládání a utlačování

Z důvodu nestandardní tloušťky bylo skládání tkanin rozděleno na čtyři části, které tloušťkou dosahovali přibližně 10 mm. Po naskládání každé z těchto částí byli prepregy přikryty odsávací rohoží k odsání přebytečné pryskyřice. Následně byla do systému přidána hadice s napojením na vývěvu k vytvoření efektivního podtlaku přibližně -0,9 bar, která byla utěsněna speciální těsnicí páskou. Nakonec byl celý systém opatřen vakuovou fólií.



Obr. 51 – Systém vakuového laminování

- **Příprava vytvrzovacího procesu**

Základem přípravy systému pro vytvrzování byla příprava formy, kterou byla skleněná deska. Tuto desku bylo potřebné opatřit speciálními přípravky.

Tmel na formy na bázi rozpouštědla – Zyvax® Sealer GP

Průhledná, pružná fólie s vysokým modulem pružnosti. Tento přípravek slouží k efektivnímu vyčištění povrchu formy. Jako kondicionér je určen k ošetření jak chemického, tak fyzikální místa lepení, která se nacházejí na každém "surovém" povrchu formy. Kromě toho poskytuje základní potřebnou pro prodloužení životnosti separačního povlaku a umožní optimální výkonnost separačního povlaku.

Tento přípravek byl nanesen na formu v 5 vrstvách, přičemž každá z nich zasychala 15 min. Technický list je doplněn v přílohách.



Obr. 52 - Zyvax® Sealer GP

Polotrvalý kompozitní separační prostředek na vodní bázi Chemlease® 2191W

Jedná se o separační prostředek, který je účinný při lisování kompozitních materiálů, včetně procesů s použitím vakuově baleného epoxidového uhlíku z prepregů. Poskytuje minimální přenos separačního prostředku a vícenásobné uvolnění. Technický list je opět součástí příloh.

Tento přípravek byl nanesen po aplikaci předchozího přípravku v systému 3 vrstev s dobou zasychání 10 min.



Obr. 53 - Chemlease® 2191W

Na takto připravenou formu byl vložen připravený tvar výrobku. Který byl opatřen technickými fóliemi a tkaninami, následně byl připraven k vytvrzování v autoklávu.

- **Vytvrzování v autoklávu**

Moderní výrobní proces zpracování převážně karbonových vláken. Přesně nařezaný prepreg se pokládá a vrství do formy, která je následně s dalšími pomocnými technickými fóliemi zabalena do tzv. vakuového pytle. Tento vakuově stabilní celek se vloží do autoklávu, kde se podle přesně regulovaného programu spustí vytvrzování působením tepla a vysokého tlaku. Výsledkem je velice pevný a lehký produkt.

Autokláv využitý pro výrobu polotovaru je od výrobce OP Panini S.r.l., model G00300572. Maximální možný pracovní přetlak v autoklávu je až 10 bar, přičemž prošel zkouškou, kde byl zatížen 17,1 bar. Byl navržen tak, aby během pracovního cyklu dokázal vyvinout teplotu 0 až 250 °C. Ohřev vzduchu v autoklávu zajišťují elektrické odpory. Ventilátor zajišťuje rychlou recirkulaci vzduchu, čímž je dosaženo rovnoměrnějšího rozložení tepla. Následné chlazení probíhá obdobně pomocí chladicího radiátoru, do kterého je přiváděna studená voda. Řada

pneumatických ventilů zajišťuje regulaci teploty a tlaku uvnitř komory. Během procesu se neustále kontroluje: teplota okolního vzduchu, tlak a teplota v konkrétních bodech uvnitř vakua. Pro případ výpadku kteréhokoli zdroje napájení nebo energie je zařízení vybaveno alarmy a blokováním [39].



Obr. 54 - autokláv OP Panini S.r.l., model G00300572

Podmínky vytvrzování byly stanoveny dle doporučení výrobce, přičemž byla uvažovaná nestandardní tloušťka vytvrzovaného dílce, proto bylo nataveno menšího tlaku a delší doby vytvrzovacího cyklu.



Obr. 55 - Polotovár v autoklávě

V poslední fázi proběhlo samotné odstranění vakuovací fólie, odsávací fólie a separační tkaniny, poté mohl být vytvrzený polotovár odformován.

8 VLIV SPECIÁLNÍCH NÁSTROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ CFRP KOMPOZITŮ

První experiment v této práci srovnává závislost řezných parametrů při frézování CFRP kompozitů při použití dvou obráběcích nástrojů. Cílem je zjistit, jak se změní řezný odpor a jakost povrchu za použití speciálních typů nástrojů vhodných pro obrábění CFRP kompozitů oproti nástrojům nevhodných pro tento typ obrábění.

8.1 Použité nástroje

Jak již bylo uvedeno výše pro tento experiment bylo využito dvou nástrojů následující podkapitola tedy popisuje jejich parametry.

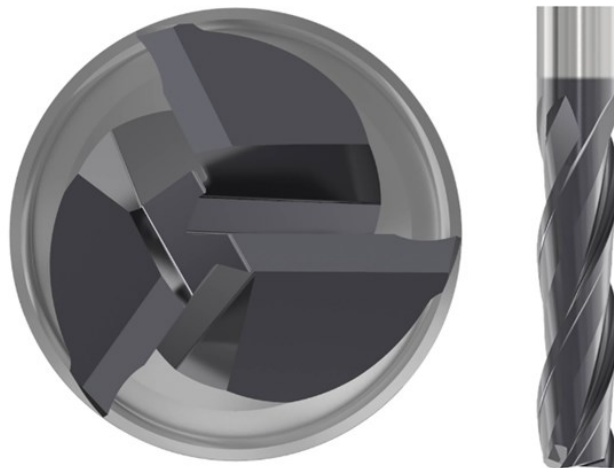
- **JSE513060D3C.0Z3 SIRA**

První z nástrojů je nástroj ze skupiny obrobitelnosti P4 vhodných pro obrábění nízkouhlíkových ocelí s obsahem uhlíku 0,25 – 0,67% hmotnosti. Jedná se o univerzální monolitní karbidovou frézu.

V tomto experimentu bude mít nástroj označení T1E.

Tab. 4 - Základní specifikace nástroje JSE513060D3C.0Z3 SIRA [40]

Název	Hodnota
Břity do středu nástroje	1
Šířka rohového sražení	0,6 mm
Povlak břitů	SIRON-A
Obráběcí průměr	6 mm
Počet obvodových břitů	3
Počet čelních břitů	3
Úhel šroubovice břitů	35 deg
Třída řezného materiálu	SIRA
Celková délka	63 mm
Řezná délka	20 mm



Obr. 56 - JSE513060D3C.0Z3 SIRA [40]

- **JC875060D2.0-DURA**

Druhý nástroj spadá do skupiny obrobitelnosti TS2, která je určena pro obrábění termosetných kompozitů s uhlíkovým vláknem. Jedná se o monolitní karbidovou frézu pro obrábění kompozitů.

V tomto experimentu bude mít nástroj označení T2E.

Tab. 5 – Základní specifikace nástroje JC875060D2.0-DURA [40]

Název	Hodnota
Břity do středu nástroje	0
Šířka rohového sražení	0,06 mm
Povlak břitů	DURA
Obráběcí průměr	6 mm
Počet obvodových břitů	6
Počet čelních břitů	6
Úhel šroubovice břitů	20 deg
Celková délka	65 mm
Řezná délka	18 mm



Obr. 57 - JC875060D2.0-DURA [40]

8.2 Použité stroje a přístroje

K provedení výzkumného experimentu bylo použito několik strojů a přístrojů, které sloužili k obrábění a měření.

- **DMG MORI DMU 50 3. generace**

Pro obráběcí operace bylo využito stroje DMU 50 3. generace od výrobce DMG MORI. Jehož základní parametry znázorňuje Tab. 6.

Tab. 6 - Parametry stroje DMG MORI DMU 50 3. generace [41]

Jednotlivé parametry	Hodnoty
Max. pojezd v ose X [mm]	650
Max. pojezd v ose Y [mm]	520
Max. pojezd v ose Z [mm]	475
Max. průměr obrobku [mm]	630
Max. výška obrobku [mm]	600
Max. hmotnost obrobku [kg]	300
Max kapacita zásobníku [ks]	120
Druh vřetene	SK40
Utahovací síla nástroje [kN]	11,2



Obr. 58 - Stroj DMG MORI DMU 50 3. generace [41]

- **Multikomponentní Dynamometr 9129AA Kistler**

Pro měření složek řezných sil bylo využito dynamometru od společnosti KISTLER. Jehož technický list je uveden v přílohách.

Dynamometr se skládá ze čtyř třísložkových snímačů síly, které jsou namontovány pod vysokým předpětím mezi kryt a dvěma bočními základními deskami. Vzhledem ke speciálnímu upevnění snímačů je minimální tlak na sílu. Každý ze snímačů síly obsahuje tři krystalové destičky, z nichž jedna je citlivá na tlak v prostoru. ve směru y a další dvě na smykovou sílu ve směru x nebo z. Síly se měří prakticky bez posunu. Výstupy ze čtyř vestavěných snímačů síly jsou předávány do devítipólové přírubové zásuvky. Vícesložkový silový moment je možné provádět měření. Čtyři snímače jsou namontovány s izolací od země. Toto se do značné míry vyhýbá problémům se zemní smyčkou. Dynamometr je odolný proti korozi a chráněný proti vniknutí chladicího maziva [34].



Obr. 59 - Dynamometr 9129AA Kistler [34]

- **Drsnoměr Mitutoyo SJ-410**

Pro základní měření drsnosti povrchu bylo využito kontaktního drsnoměru Mitutoyo SJ-410. Jedná se o přenosný měřicí přístroj, které umožňují jednoduché a přesné měření drsnosti povrchu [42].



Obr. 60 - Drsnoměr Mitutoyo SJ-410 [42]

8.3 Příprava experimentu

Před započnutím experimentu bylo nutné připravit polotovar tak, aby ho bylo možné upnout do dynamometru. To vedlo k základním frézovacím operacím formou přibližného zarovnání ploch a vyvrtání děr pro šrouby s válcovou hlavou.



Obr. 61 - Polotovar po přípravných operacích

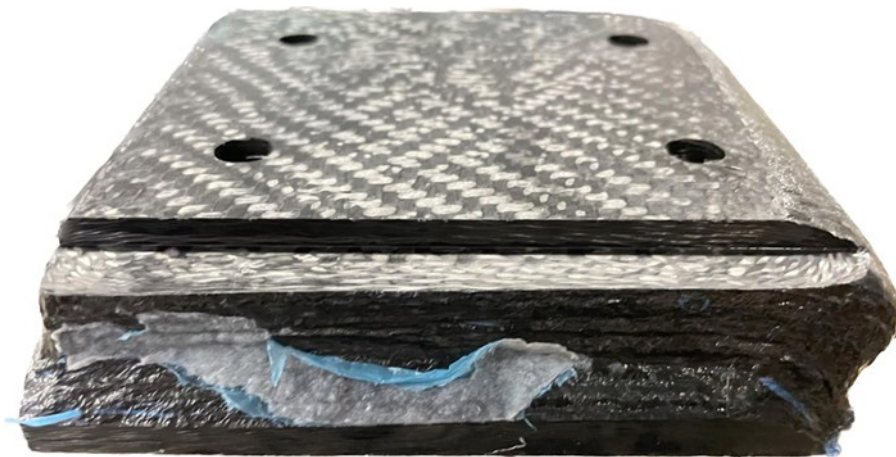
Po tomto kroku bylo možné polotovar upnout a zahájit průběh experimentu.



Obr. 62 - Polotovár upnutý v dynamometru

8.4 Průběh experimentu

Pomocí dílenského programování byl vytvořen program pro obrábění obvodem frézy. Místo obrábění znázorňuje *Obr. 63*.



Obr. 63 – Polotovár po provedení experimentu

Pro oba typy nástrojů byli zvoleny stejné řezné parametry, jež znázorňuje *Tab. 7*. Tyto parametry byly zvoleny dle informací od výrobce nástrojů.

Tab. 7 - Řezné parametry experimentu

Název	Hodnota
Řezná rychlost v_c	200 m/min
Hloubka řezu a_p	0,8 mm
Posuv na zub	0,02mm/zub
Radiální záběr a_e	5 mm

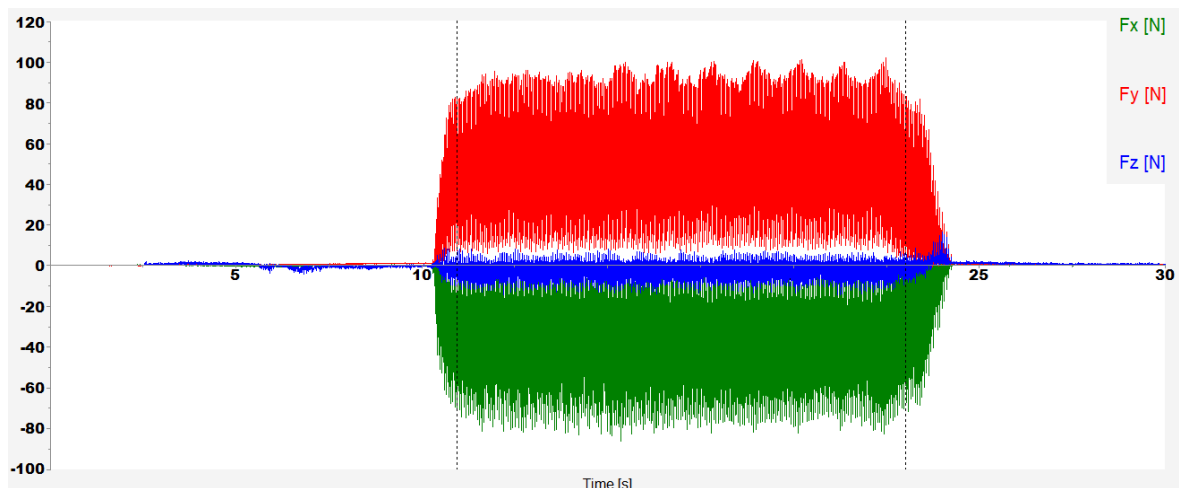
CNC program byl nastaven tak, aby projel celou řeznou délkou dle Obr. 63. Pro oba nástroje nejdříve proběhly testovací experimenty jak s měřením, tak bez měření. Řezná dráha pro jedno měření tedy byla přibližně 150 mm s hloubkou řezu 0,8 mm.

8.5 Výsledky experimentu

Z obráběcího experimentu vzniklo spousta výstupních dat formou řezných sil a drsností povrchu. Tyto data byla dále zpracována a vzájemně porovnávána. Jelikož tento experiment sloužil pouze k porovnání vhodnosti nástrojů byl tento experiment zpracováván pouze základními statistickými metodami.

8.5.1 Porovnání řezných sil

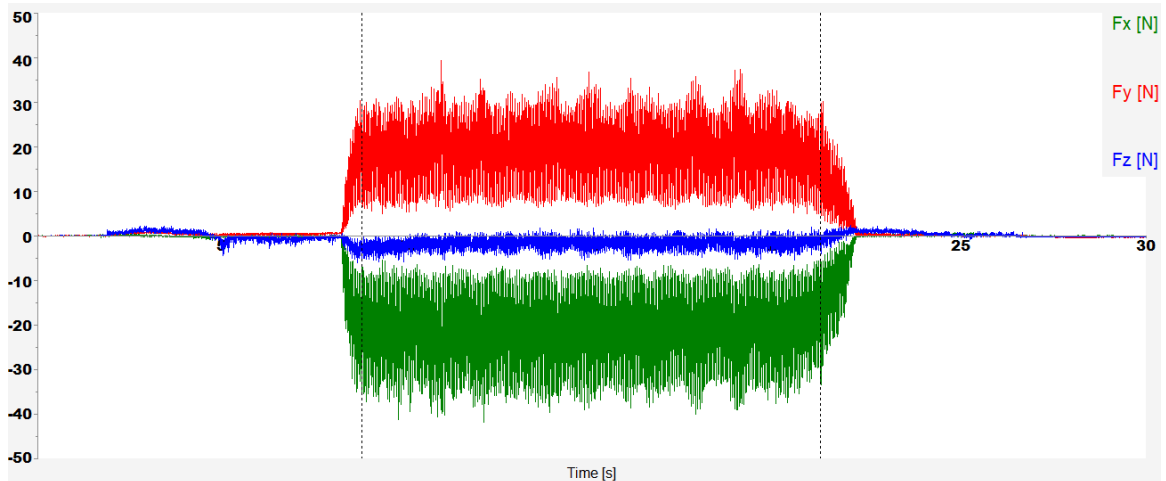
Výsledky měření byli zaznamenávány do software Dynoware od výrobce dynamometru. V softwaru bylo možné vykreslit graf průběhu řezných sil v čase.



Obr. 64 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T1E

Tab. 8 - Hodnoty odečtených řezných sil pro nástroj T1E

Složky sil	$ F_x $ [N]	$ F_y $ [N]	$ F_z $ [N]	F [N]
Průměr	40,57	51,94	2,647	65,96
Max	86,33	102,9	15,66	135,23



Obr. 65 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T2E

Tab. 9 - Hodnoty odečtených řezných sil pro nástroj T2E

Složky sil	$ F_x $ [N]	$ F_y $ [N]	$ F_z $ [N]	F [N]
Průměr	21,98	18,5	1,729	28,78
Max	43,96	41,51	6,773	60,84

Tab. 10 - Procentuální srovnání výhodnosti nástroje T2E

Složky sil	F_x [%]	F_y [%]	F_z [%]	F [%]
Průměr	45,82	64,38	34,68	56,37
Max	49,08	59,66	56,75	55,01

Grafy na Obr. 64 a Obr. 65 znázorňují průběh složek řezných sil v čase, v obou případech byl stanoven obráběcí interval. Z tohoto intervalu byli zjištěny hodnoty zprůměrovaných velikostí a maximum jednotlivých složek řezných sil Tab. 8 a Tab. 9. Všechna velikosti byli uvažovány v absolutní hodnotě.

Z výsledků lze konstatovat, že z hlediska řezného odporu se při obrábění CFRP kompozitů jednoznačně vyplatí použít nástroj k tomu určený. Z Tab. 10 lze vyčíst jednoznačnou procentuální výhodnost nástroje T2E.

8.5.2 Porovnání naměřených drsností povrchu

Drsnost povrchu byla zaznamenána do tabulek a vzájemně porovnávána, měření proběhlo na všech obrobených plochách. Přičemž plocha, kde bylo frézováno čelem frézy je vedena jako horizontální plocha a strana kde bylo frézováno obvodem frézy je vedena jako vertikální plocha. Na každé z nich bylo provedeno 10 měření.

Tab. 11 - Naměřené hodnoty drsnosti povrchu

Horizontální plocha				Horizontální plocha			
T1E	Drsnost povrchu			T2E	Drsnost povrchu		
n	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	n	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
1	1,049	1,258	5,867	1	1,203	1,648	9,443
2	1,089	1,398	7,639	2	1,898	2,253	9,893
3	1,151	1,420	7,260	3	0,895	1,128	6,459
4	1,164	1,628	15,075	4	0,909	1,214	7,765
5	1,566	2,316	12,215	5	1,055	1,371	7,875
6	1,220	1,610	8,900	6	1,509	2,025	11,117
7	1,388	1,724	8,481	7	1,679	2,238	10,323
8	1,339	1,676	8,886	8	1,209	1,612	8,210
9	1,374	1,968	14,935	9	0,953	1,217	6,728
10	1,898	1,898	9,803	10	0,836	1,085	6,915
PRŮMĚR	1,324	1,690	9,906	PRŮMĚR	1,215	1,579	8,473
SMODCH	0,256	0,311	3,160	SMODCH	0,366	0,453	1,627
Vertikální plocha				Vertikální plocha			
T1E	Drsnost povrchu			T2E	Drsnost povrchu		
n	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	n	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
1	1,307	1,778	11,233	1	1,072	1,388	7,961
2	1,410	1,914	12,545	2	1,833	2,571	8,483
3	1,835	2,504	15,169	3	1,364	1,788	9,261
4	1,614	2,062	11,826	4	1,289	1,549	7,808
5	2,021	2,769	17,112	5	1,284	1,664	8,972
6	2,126	3,020	18,760	6	1,126	1,429	8,548
7	2,420	3,098	14,660	7	1,264	1,551	8,609
8	1,733	2,195	11,367	8	1,269	1,725	10,804
9	1,610	2,271	14,902	9	1,182	1,539	9,047
10	1,796	2,319	10,655	10	1,435	1,831	9,601
PRŮMĚR	1,787	2,393	13,823	PRŮMĚR	1,312	1,704	8,909
SMODCH	0,335	0,450	2,734	SMODCH	0,212	0,338	0,865

Z průměrných hodnot naměřených parametrů drsností povrchu byly vypočítány procentuální rozdíly mezi všemi plochami.

Tab. 12 - Procentuální rozdíly naměřených parametrů drsnosti

Rozdíl - hor. T1E x ver. T1E [%]			Rozdíl - hor. T1E x hor. T2E [%]		
Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
25,9	29,4	28,3	8,2	6,5	14,5

Rozdíl - hor. T2E x ver. T2E [%]			Rozdíl - ver. T1E x ver. T2E [%]		
Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
7,4	7,3	4,9	26,6	28,8	35,5

Z prezentovaných výsledků je patrné, že z hlediska jakosti povrchu je nástroj pro obrábění kompozitů ve všech ohledech výhodnější. Z tohoto hlediska má nejhorší vliv frézování čelem nevhodné frézy, což je způsobeno konstrukcí nástroje. Ostatní výsledky se svými hodnotami procentuálně tolik neliší. Za zmínku stojí, že frézování obvodem nevhodného nástroje nemělo velký vliv na jakost povrchu.

8.5.3 Diskuze výsledků

Z experimentu je jasně patrné, že pro obrábění CFRP kompozitů se jednoznačně vyplatí využití nástrojů k tomu určených jak z hlediska řezných sil, tak z hlediska jakosti povrchu. Využití vhodného nástroje dokáže svou konstrukcí také efektivně eliminovat delaminaci, která způsobuje při obrábění kompozitních materiálů největší problém.

9 VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ PŘI OBRÁBĚNÍ CFRP KOMPOZITŮ

Hlavní částí této práce je experiment, který zkoumá vliv nastavení řezných parametrů při obrábění CFRP kompozitů při 5 různých nástrojích vhodných pro obrábění kompozitních materiálů. Vyhodnocení výzkumu proběhl pomocí metody DOE.

9.1 Použité nástroje

Na experiment bylo využito pouze nástroje vhodné pro obrábění CFRP kompozitů. Jedná se o monolitní frézy a všechny tedy spadají do třídy obrobitelnosti TS2.

- **880060R020Z4.0-DURA**

V experimentu bude tento nástroj zastávat označení T1.

Tab. 13 - Základní specifikace nástroje 880060R020Z4.0-DURA [40]

Název	Hodnota
Břity do středu nástroje	1
Šířka rohového sražení	0,6 mm
Povlak břitů	DURA
Obráběcí průměr	6 mm
Počet obvodových břitů	3
Počet čelních břitů	3
Úhel šroubovice břitů	10 deg
Celková délka	65 mm
Řezná délka	18 mm



Obr. 66 - 880060R020Z4.0-DURA [40]

- **JC875060D2.0-DURA**

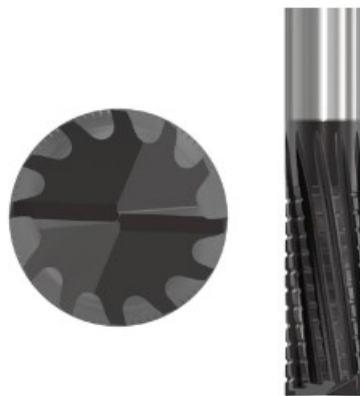
Nástroj již byl specifikován v podkapitole 8.1. V tomto experimentu bude tento nástroj zastávat označení T2.

- **JC876060D2C.0Z10-DURA**

V experimentu bude tento nástroj zastávat označení T3.

Tab. 14 - Základní specifikace nástroje JC876060D2C.0Z10-DURA [40]

Název	Hodnota
Břity do středu nástroje	1
Šířka rohového sražení	0,075 mm
Povlak břitů	DURA
Obráběcí průměr	6 mm
Počet obvodových břitů	10
Počet čelních břitů	2
Úhel šroubovice břitů	10 deg
Celková délka	62 mm
Řezná délka	15 mm



Obr. 67 - JC876060D2C.0Z10-DURA [40]

- **JPD880060G2C.0Z3A**

V experimentu bude tento nástroj zastávat označení T4.

Tab. 15 - Základní specifikace nástroje JPD880060G2C.0Z3A [40]

Název	Hodnota
Břity do středu nástroje	1
Šířka rohového sražení	0,1 mm
Povlak břitů	Uncoated
Obráběcí průměr	6 mm
Počet obvodových břitů	3
Počet čelních břitů	3
Úhel šroubovice břitů	0 deg
Celková délka	64 mm
Řezná délka	13 mm



Obr. 68 - JPD880060G2C.0Z3A [40]

- **880060R020Z4.0-DURA**

V experimentu bude tento nástroj zastávat označení T5.

Tab. 16 - Základní specifikace nástroje 880060R020Z4.0-DURA [40]

Název	Hodnota
Břity do středu nástroje	1
Šířka rohového sražení	0,6 mm
Povlak břitů	DURA
Obráběcí průměr	6 mm
Počet obvodových břitů	4
Počet čelních břitů	4
Úhel šroubovice břitů	10 deg
Třída řezného materiálu	UNSPEC
Celková délka	65 mm
Řezná délka	18 mm



Obr. 69 - 880060R020Z4.0-DURA [40]

9.2 Použité stroje a přístroje

Seznam využitých strojů a nástrojů se téměř shoduje s předchozím experimentem v podkapitole 8.2. Jediný rozdíl bude v metodě měření drsnosti, kdy v tomto experimentu měření proběhlo účinnějším a efektivnějším bezkontaktním měřícím přístrojem.

- **Zygo NewView™ 9000 - kontrola jakosti povrchu**

K účelům měření jakosti povrchu v tomto experimentu bylo využito bezkontaktního měřícího přístroje od výrobce Zygo typu NewView™ 9000. S využitím tohoto profilometru lze snadno a rychle měřit širokou škálu povrchů vícero tvarů.

Klíčové vlastnosti profilometru:

- vysoce citlivý 1.9 MP senzor;
- rychlé bezkontaktní měření;
- ultra vysoká přesnost a schopnost snímání;
- vylepšené optické zobrazení;
- vynikající 3D vizualizace povrchu [43].

Tab. 17 - Parametry Zygo NewView 9000 [43]

Model	NewView 9000™
Konfigurace	Pracovní stanice
Opakovatelnost	až 0,08 nm
Maximální rychlost vertikálního skenování	až 171 $\mu\text{m/s}$
Rozsah výšky skenovaného profilu	od 0,1 nm do 20 mm
Dodatečný optický zoom	3 objektivy
Zorné pole	Od 0,04 do 17,5 mm



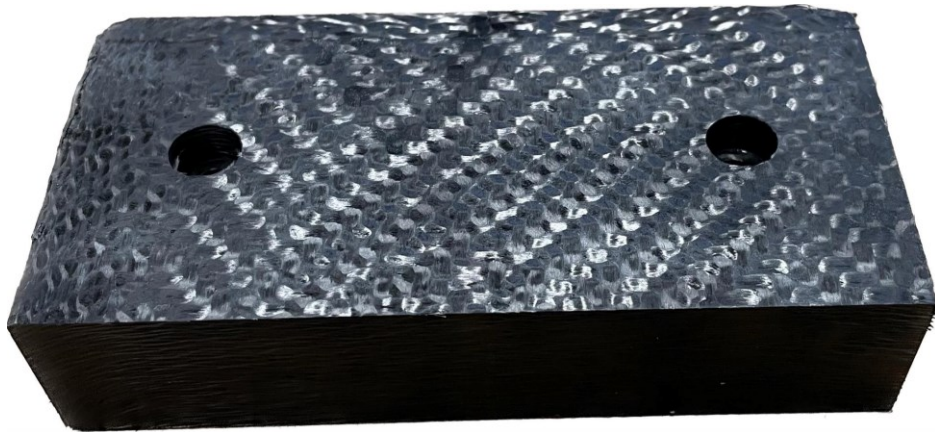
Obr. 70 - Profilometr Zygo NewView™ 9000

9.3 Plánování experimentu

Cílem celé diplomové práce je získání ideální optimalizované závislosti pro frézování CFRP kompozitů. Vstupní parametry experimentu byli tedy řezná rychlost v_c , posuv na zub f_z , a nástroj T. Výstupy byli dva, a to celková řezná síla F a parametr drsnosti povrchu Sa . Dle těchto skutečností byla pro vyhodnocení experimentu zvolena metoda DOE.

Nejdříve byla stanovena vize, jak bude experiment probíhat. Následující obrázky pomocí nákrešů stručně popisují vysvětlení této vize.

Nejprve bylo důležité za pomoci vodního paprsku původní polotovary rozříznout na dvě části což zajistila externí firma. Následně upravit tvary obou polotovarů pro upnutí do dynamometru a zarovnat je na smysluplný rozměr.

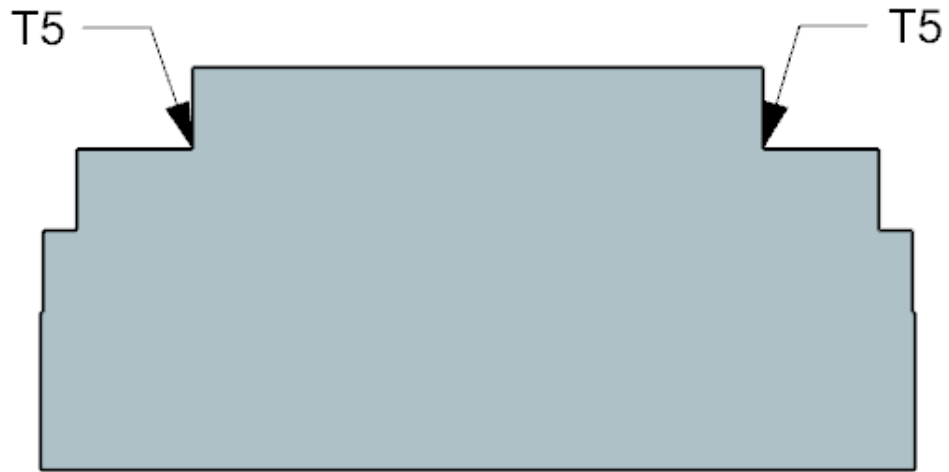


Obr. 71 - Polotovar experimentu

Dále byli sestaveny schémata a podmínky celé strategie experimentu. Kdy na prvním z nich bylo obráběno nástroji T1, T2 a T5 a na druhém T3 a T4, byla stanovena hloubka řezu $a_p = 2,5$ a výška $h = 6$ mm. Tyto parametry obsahovali všechny měření.



Obr. 72 - Strategie experimentu nástroj T1-T4 – pohled zepředu



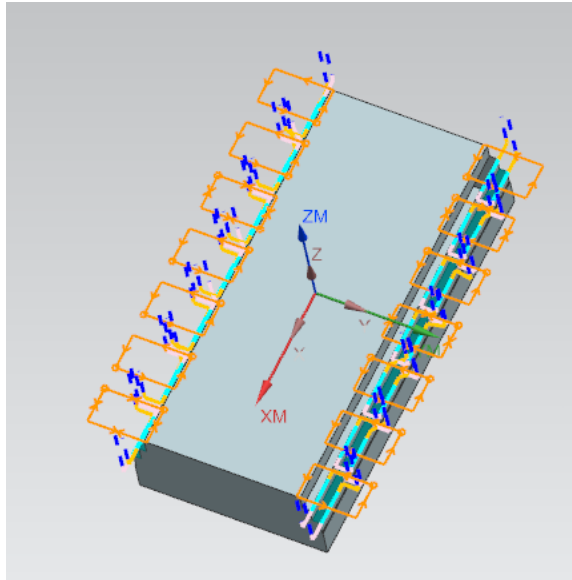
Obr. 73 - Strategie experimentu nástroj T5 – pohled zepředu

	T2;4-13	T2;4-12	T2;4-11	T2;4-10	T2;4-9	T2;4-8
	T1;3-13	T1;3-12	T1;3-11	T1;3-10	T1;3-9	T1;3-8
	T5-13	T5-12	T5-11	T5-10	T5-9	T5-8
T5-7	T5-6	T5-5	T5-4	T5-3	T5-2	T5-1
T1;3-7	T1;3-6	T1;3-5	T1;3-4	T1;3-3	T1;3-2	T1;3-1
T2;4-7	T2;4-6	T2;4-5	T2;4-4	T2;4-3	T2;4-2	T2;4-1

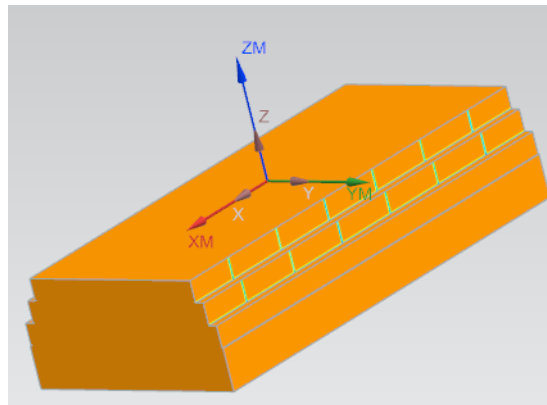
Obr. 74 - Strategie experimentu – pohled shora

Dle výše uvedených obrázku je jednoznačná celá strategie experimentu, kdy *Obr. 74* přesně definuje v jakém místě jaký nástroj obráběl, přičemž neoznačené plochy byly obráběny, ale do experimentu nebyli uvažováni. Tento obrázek je společný pro oba polotovary. Příkladem (T1;3-4 znamená že se jedná o čtvrté měření nástrojů T1 a T3, přičemž nástroj T1 obráběl pouze na prvním polotovaru a nástroj T3 na druhém). Plocha, kde bylo frézováno nástrojem T5 je pouze na jednom polotovaru.

Pro celý experiment byli vytvořeny CNC programy v software SIEMENS NX.



Obr. 75 - Průběh experimentu v NX CAM



Obr. 76 - Analýza obrobeneho povrchu v NX CAM

Výše uvedené obrázky představují vytvořený program pro experiment. Na *Obr. 76* lze vidět malé zbytky po frézování, které dokonale označují místa, na kterých jaký experiment proběhl.



Obr. 77 - Obrobek po měření

9.4 Vstupní data experimentu

Dle specifikace nástrojů byli stanoveny přibližné řezné parametry, které byli zadány do software Minitab, který podporuje řešení metodou DOE. Program následně vygeneroval 13 obráběcích cyklů za příslušných řezných podmínek, které se opakovali u každého nástroje.

n	v_c [m/min]	f_z [mm]
1	160	0,01
2	260	0,01
3	160	0,04
4	260	0,04
5	139,2893	0,025
6	280,7107	0,025
7	210	0,003787
8	210	0,046213
9	210	0,025
10	210	0,025
11	210	0,025
12	210	0,025
13	210	0,025

Obr. 78 - Vstupní řezné parametry

9.5 Naměřené hodnoty

Následující grafy a obrázky budou popisovat nejlepší hodnoty řezných podmínek z hlediska řezných parametrů pro každý nástroj. Výsledky budou demonstrovány pomocí grafů závislosti řezných sil na čase a grafů z měření plošné drsnosti povrchu. U všech grafů z dynamometru bylo vypsáno 50 hodnot složek řezných sil z uklidněné pozice obrábění a z nich vypočítána celková řezná síla F . Kdy *Tab. 18* popisuje výstupní naměřené hodnoty, které byli zadávány do metody DOE.

Tab. 18 – Naměřené výstupní parametry pro všechny nástroje

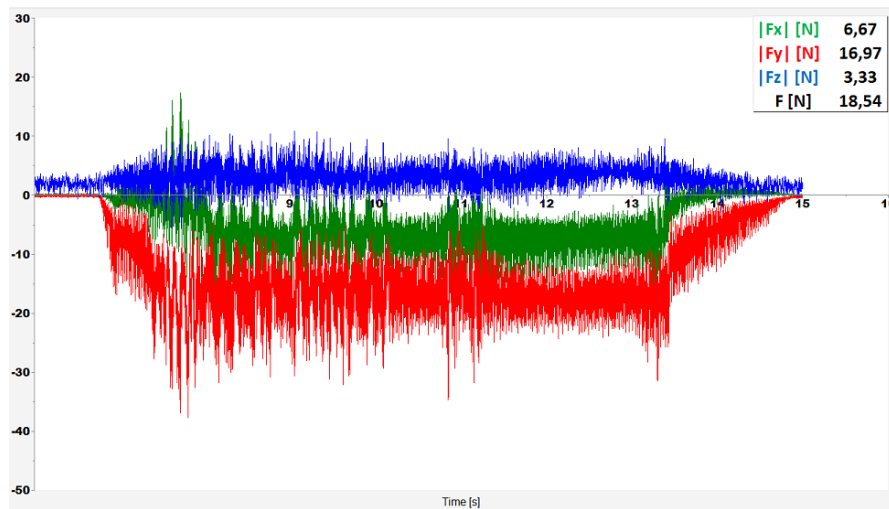
T1	F [N]	Sa [μm]
1	33,854	2,731
2	30,003	3,589
3	65,500	5,142
4	61,843	4,191
5	54,094	3,748
6	48,637	4,889
7	18,542	7,746
8	68,254	6,229
9	50,494	4,62
10	49,747	6,418
11	50,707	7,733
12	50,686	3,738
13	48,618	6,56

T2	F [N]	Sa [μm]
1	54,264	2,252
2	34,510	2,019
3	112,527	3,298
4	98,656	5,244
5	95,808	1,715
6	73,400	3,972
7	33,791	2,166
8	135,917	2,832
9	89,767	3,438
10	91,180	4,127
11	87,851	3,266
12	70,658	1,836
13	107,654	2,311

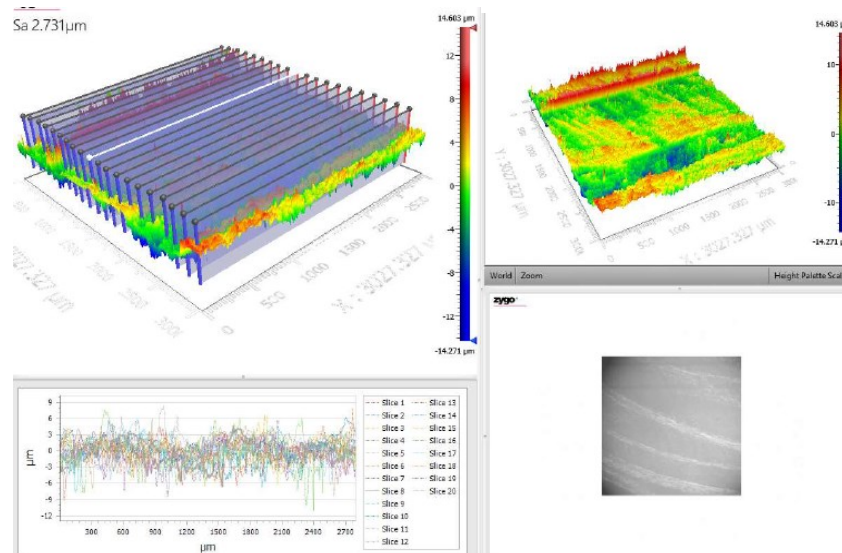
T3	F [N]	Sa [μm]
1	56,883	2,949
2	29,880	3,587
3	84,902	4,848
4	77,342	3,903
5	82,263	2,41
6	52,278	3,637
7	21,833	2,991
8	101,781	3,568
9	75,273	3,493
10	77,230	3,473
11	77,878	3,25
12	78,444	4,185
13	72,538	2,314

T4	F [N]	Sa [μm]
1	53,868	1,198
2	28,663	1,276
3	62,451	1,529
4	77,460	1,737
5	53,548	1,422
6	53,280	1,507
7	37,057	1,462
8	84,976	2,064
9	76,515	1,919
10	75,966	1,899
11	78,000	1,957
12	82,584	1,742
13	82,993	1,777

T5	F [N]	Sa [μm]
1	27,094	3,504
2	25,560	3,371
3	71,207	3,227
4	69,308	7,757
5	58,526	2,808
6	51,802	4,435
7	15,241	1,924
8	83,978	2,191
9	61,708	2,45
10	65,985	2,387
11	66,707	1,692
12	68,263	2,124
13	68,284	2,129

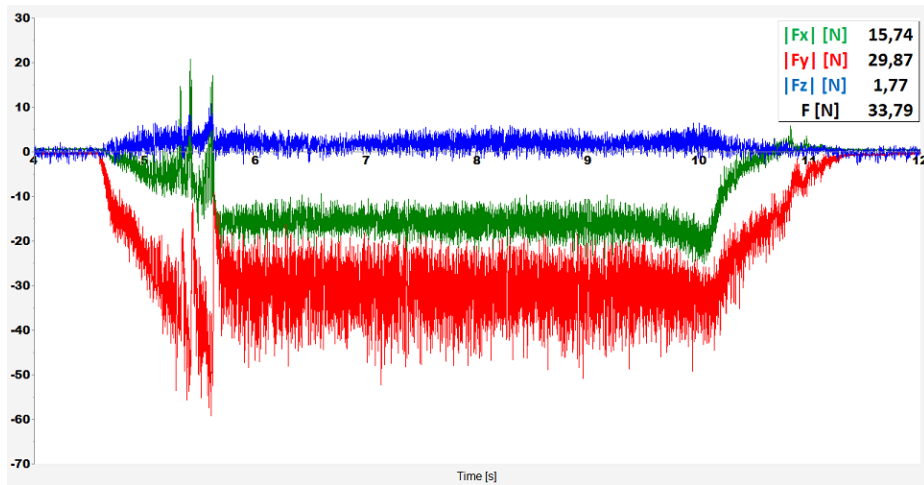


Obr. 79 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T1 a měření 007

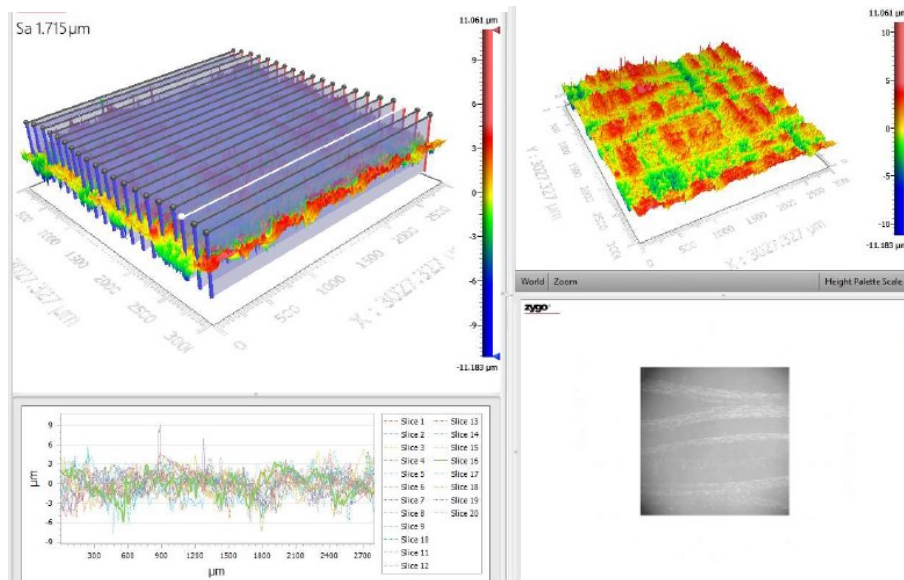


Obr. 80 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T1 a měření 001

Dle Obr. 79 lze vyčíst, že nejlepší výstupní data z měření řezného odporu u nástroje T1 nabídlo měření 7 kdy se průměrná hodnota F rovnala 18,54 N. Jedná se o velmi účinnou a spolehlivou hodnotu. Z hlediska jakosti povrchu Obr. 80 se hodnota Sa nepohybovala v nejkvalitnějších rozměrech, kdy nejlepší byla dosažena při měření 1 přičemž hodnota nabývala rozměrů 2,731 μm . Lze tedy konstatovat, že nástroj T1 dosáhl výborných hodnot, co se řezného odporu týče, ale naopak vliv na jakost povrchu nebyl příznivý.

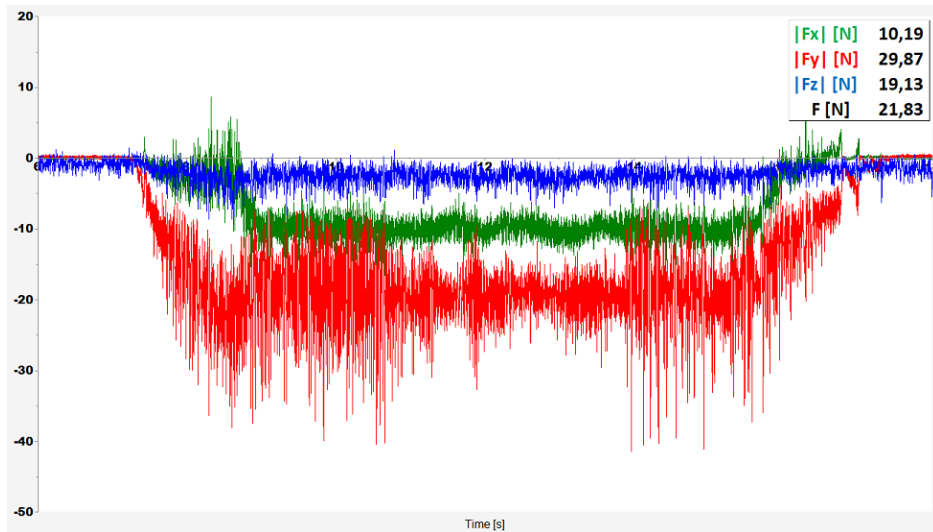


Obr. 81 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T2 a měření 007

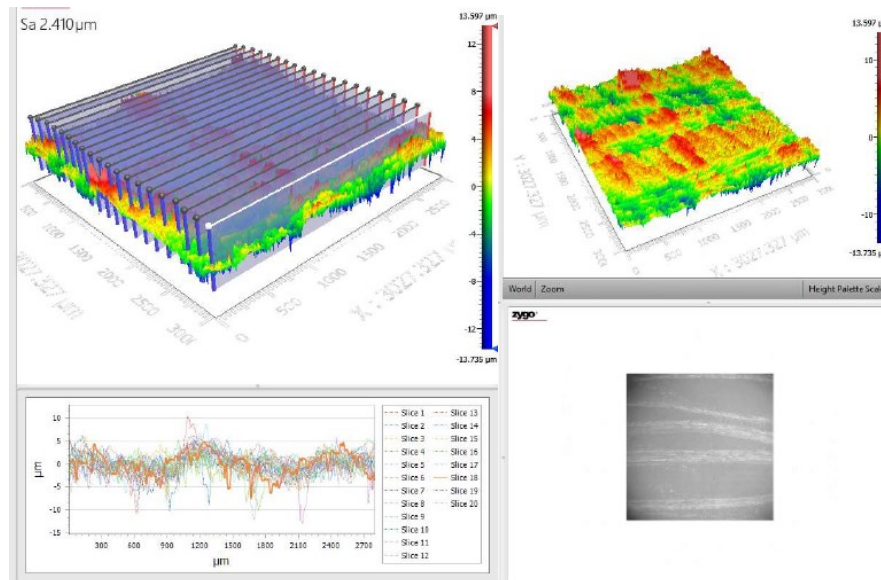


Obr. 82 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T2 a měření 005

Nástroj T2 dle Obr. 81 dosahuje v porovnání s ostatními nástroji pro obrábění CFRP kompozitů vyšších hodnot řezného odporu nejlepší hodnoty dosáhl v měření 7 a to konkrétně 33,79 N. V problematice jakosti povrchu dle Obr. 82 se nejlepší hodnota S_a z měření 5 řadí do skupiny průměrných s hodnotou 1,715 μm .

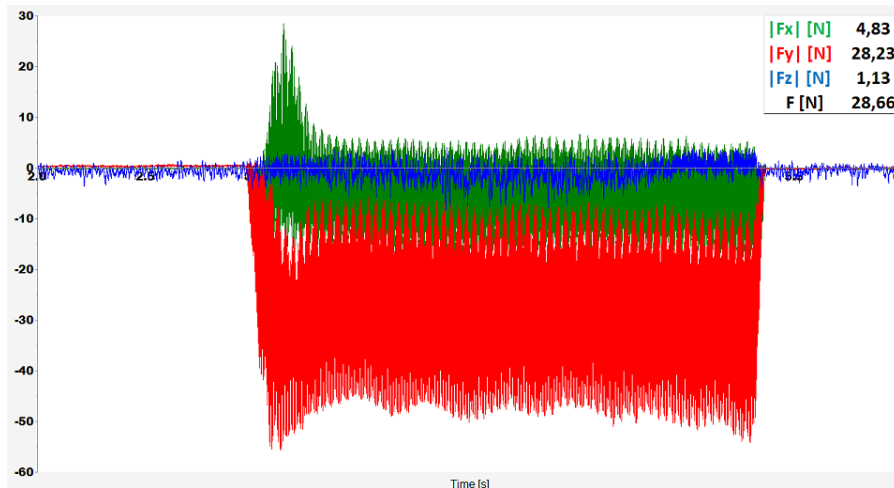


Obr. 83 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T3 a měření 007

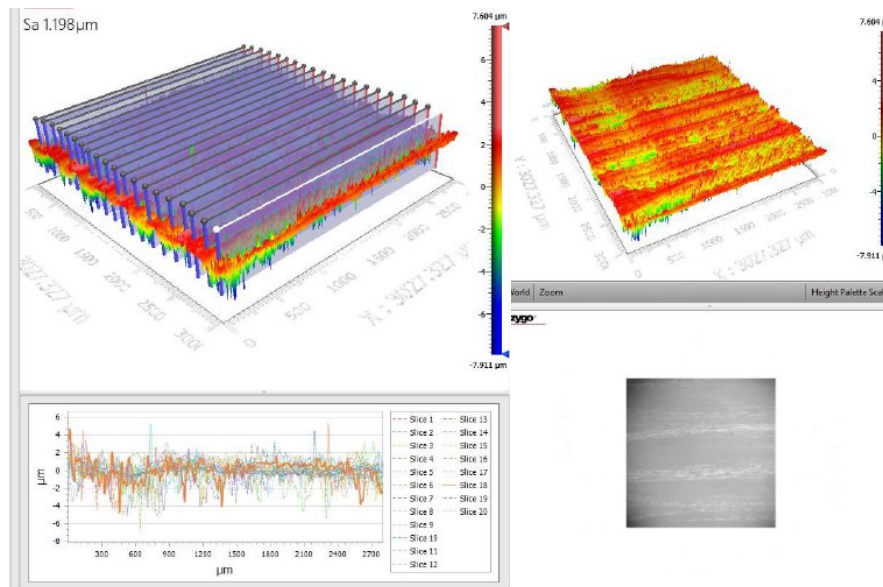


Obr. 84 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T3 a měření 005

Nástroj T3 nabízí solidní spolehlivost z hlediska řezného odporu Obr. 83 hodnota F se pohybuje v příznivé hodnotě a to 21,83 N. Z hlediska jakosti povrchu se tento nástroj neřadí do skupiny výhodných, protože hodnota Sa nabízí nejlepší hodnotu z měření 5 a to 2,43 μm .

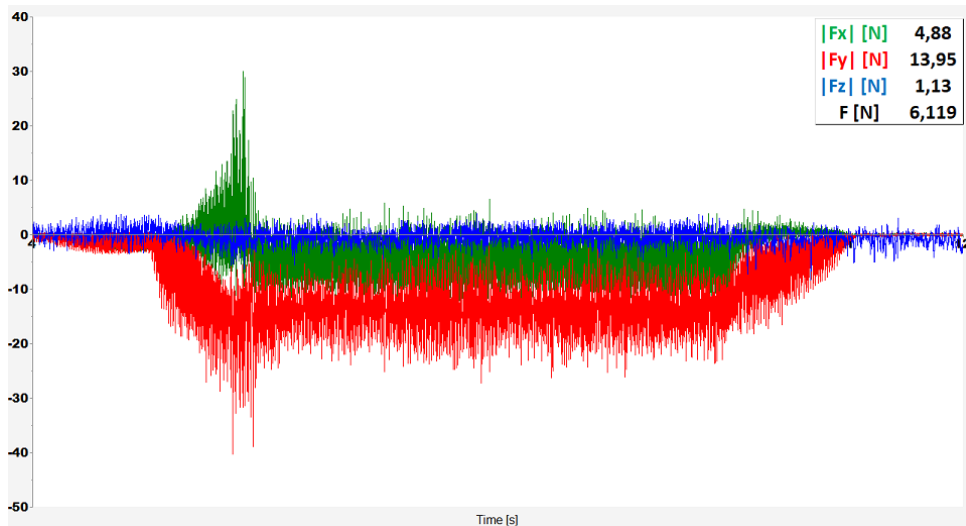


Obr. 85 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T4 a měření 002

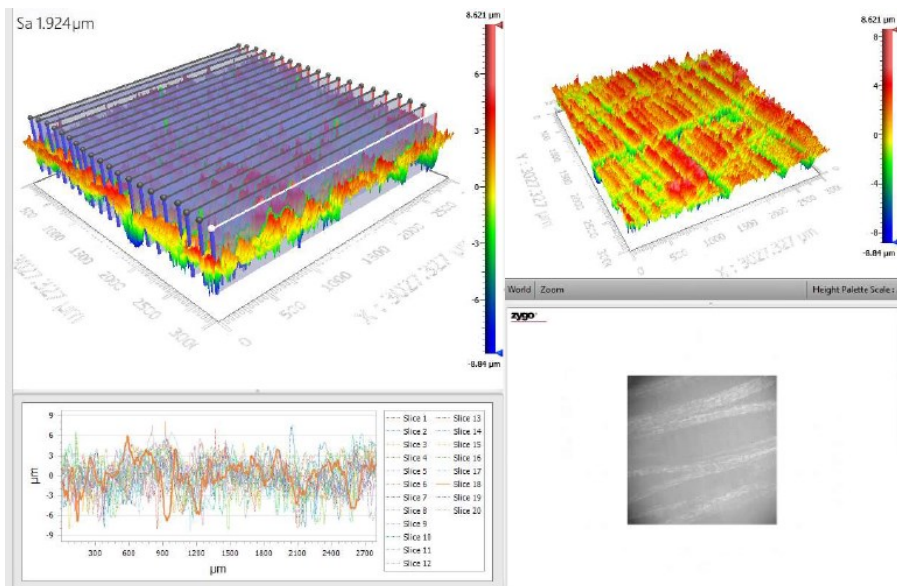


Obr. 86 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T4 a měření 001

Dle grafu na Obr. 85 lze vidět nejstabilnější řezný proces z pohledu plynulosti složek řezných sil, kdy byla zaznamenána nejlepší hodnota celkové řezné síly při měření 002 ta však nabídl hodnotu 28,66 N, která patří spíše do souboru vyšších. Tento nástroj však představoval velmi kvalitní vliv na jakost povrchu, kdy dle Obr. 86 lze zaznamenat stabilní rozložení jakosti po celé ploše nejvyššího výsledku bylo dosaženo v měření 1 kdy S_a nabývala hodnot 1,198 μm .



Obr. 87 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T5 a měření 007

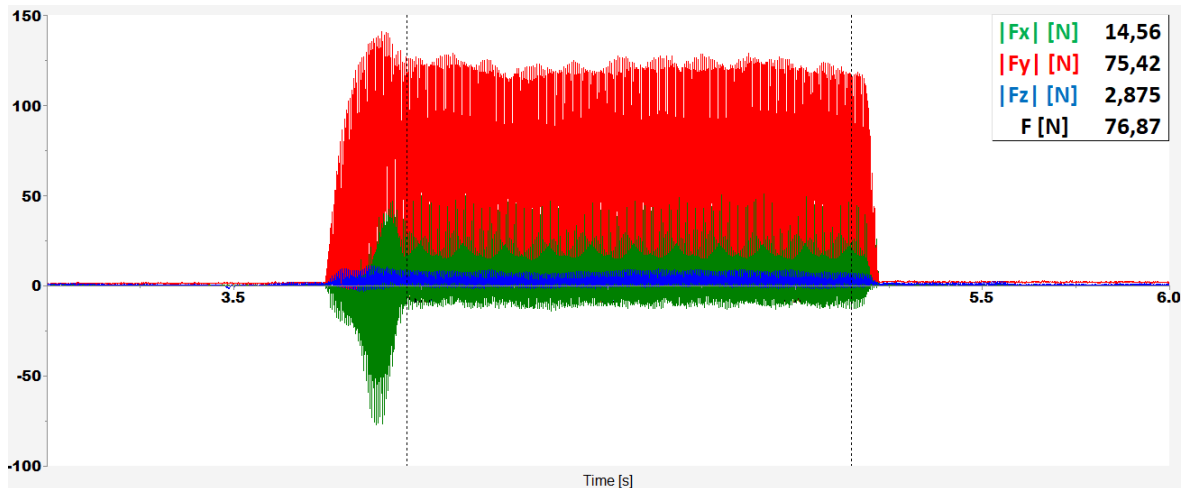


Obr. 88 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T5 a měření 007

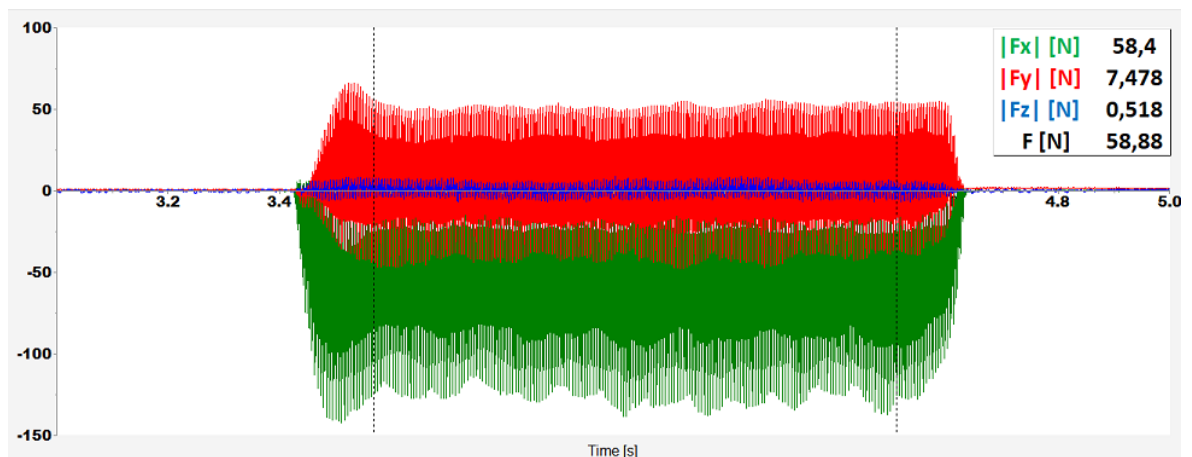
Z výběru všech nástrojů bylo při měření složek řezných sil nástrojem T5 dle Obr. 87 dosaženo velmi kvalitních výsledků, kdy hodnota F z měření 7 byla 6,119 N. Jakost povrchu dle Obr. 88 svou hodnotou S_a nabývá rozměrů 1,924 μm, čímž spadá do lehce podprůměrných hodnot.

9.5.1 Vliv souslednosti a nesouslednosti při frézování CFRP kompozitů

Pro nástroj T4 byli výstupní parametry vyměřeny také porovnáním sousledného a nesousledného frézování za stejných podmínek.



Obr. 89 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T4 a měření 009 – frézování sousledné



Obr. 90 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T4 a měření 009 – frézování nesousledné

Z výše uvedených grafů lze vyčíst, že z pohledu velikosti řezných sil se při podmínkách $v_c = 210$ m/min a $f_z = 0,025$ mm jeví jako lepší využití nesousledného frézování.

Nesousledné frézování taktéž nabídlo lepší hodnotu drsnosti povrchu S_a a to $1,34$ μm oproti $1,919$ μm .

9.6 Hodnocení a diskuze výsledků

Jak již bylo uvedeno k interpretaci výsledků bude sloužit optimalizační metoda DOE v programu Minitab. Za pomoci této metody bylo možno stanovit spoustu klíčových funkcí a závislostí.

Centrální konstrukce DOE:

Základní běhy: 65 Celkem běhů: 65

Základní bloky: 1 Celkem bloků: 1

Dvouúrovňový faktoriál: Plný faktoriál

Kostkové body: 20

Středové body v kostce: 25

Osové body: 20

Středové body v kostce: 0

$\alpha = 1,41421$.

Regrese povrchu odezvy: F vs vc; fz; nástroj - Analysis of Variance (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	34949,4	2055,8	39,11	0,000
Linear	6	30109,4	5018,2	95,47	0,000
vc	1	819,3	819,3	15,59	0,000
fz	1	20222,6	20222,6	384,74	0,000
nastroj	4	9067,5	2266,9	43,13	0,000
Square	2	2510,0	1255,0	23,88	0,000
vc*vc	1	1169,4	1169,4	22,25	0,000
fz*fz	1	1661,5	1661,5	31,61	0,000
2-Way Interaction	9	2330,0	258,9	4,93	0,000
vc*fz	1	213,6	213,6	4,06	0,050
vc*nastroj	4	518,4	129,6	2,47	0,058
fz*nastroj	4	1597,9	399,5	7,60	0,000
Error	47	2470,4	52,6		
Lack-of-Fit	27	1679,9	62,2	1,57	0,149
Pure Error	20	790,5	39,5		
Total	64	37419,7			

Regrese povrchu odezvy: Sa vs vc; fz; nástroj - Analysis of Variance (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	101,150	5,9500	4,33	0,000
Linear	6	94,863	15,8106	11,49	0,000
vc	1	5,593	5,5934	4,07	0,049
fz	1	5,808	5,8076	4,22	0,045
nastroj	4	83,462	20,8656	15,17	0,000
Square	2	0,375	0,1873	0,14	0,873
vc*vc	1	0,068	0,0678	0,05	0,825
fz*fz	1	0,265	0,2653	0,19	0,663
2-Way Interaction	9	5,912	0,6569	0,48	0,882
vc*fz	1	0,641	0,6408	0,47	0,498
vc*nastroj	4	3,586	0,8966	0,65	0,629
fz*nastroj	4	1,685	0,4214	0,31	0,872
Error	47	64,652	1,3756		
Lack-of-Fit	27	48,743	1,8053	2,27	0,031
Pure Error	20	15,909	0,7955		
Total	64	165,803			

Analýza ANOVA určuje pružnost matematického modelu – matematický podíl faktorů. Hodnota P-Value by neměla přesahovat hodnotu 0,05 což dokonale splňuje model s řeznou silou F . Vzhledem k „divokým“ hodnotám Sa dle Tab. Není tento model vysoce přesný tak jak u hodnot řezných sil.

Modely chování nástrojů při frézování CFRP kompozitů

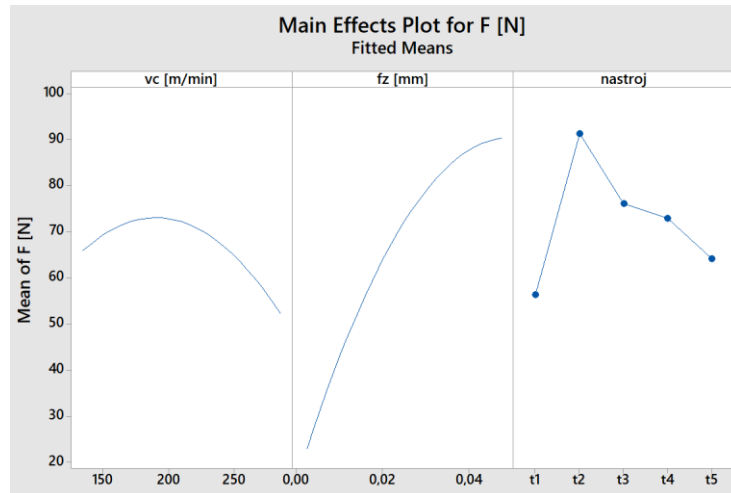
Software Minitab umožnil také výpočet závislostí, dle kterých lze podle vstupních řezných parametrů funkčně vypočítat výstupy v podobě F a Sa .

```
nastroj
t1      F [N] = -62,1 + 0,827 vc + 1736 fz - 0,002319 vc*vc - 30718 fz*fz + 4,36 vc*fz
t2      F [N] = -28,5 + 0,702 vc + 2844 fz - 0,002319 vc*vc - 30718 fz*fz + 4,36 vc*fz
t3      F [N] = -21,3 + 0,673 vc + 2192 fz - 0,002319 vc*vc - 30718 fz*fz + 4,36 vc*fz
t4      F [N] = -46,1 + 0,839 vc + 1664 fz - 0,002319 vc*vc - 30718 fz*fz + 4,36 vc*fz
t5      F [N] = -66,1 + 0,833 vc + 2163 fz - 0,002319 vc*vc - 30718 fz*fz + 4,36 vc*fz
```

```
nastroj
t1      Sa [µm] = 4,89 + 0,0053 vc - 62,3 fz - 0,000018 vc*vc + 388 fz*fz + 0,239 vc*fz
t2      Sa [µm] = -0,01 + 0,0137 vc - 26,1 fz - 0,000018 vc*vc + 388 fz*fz + 0,239 vc*fz
t3      Sa [µm] = 2,74 + 0,0050 vc - 44,3 fz - 0,000018 vc*vc + 388 fz*fz + 0,239 vc*fz
t4      Sa [µm] = 1,79 + 0,0025 vc - 55,8 fz - 0,000018 vc*vc + 388 fz*fz + 0,239 vc*fz
t5      Sa [µm] = -0,68 + 0,0182 vc - 32,1 fz - 0,000018 vc*vc + 388 fz*fz + 0,239 vc*fz
```

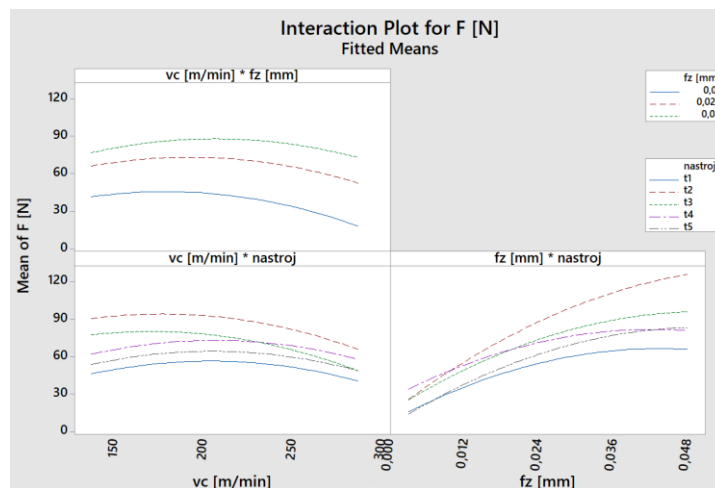
Factorial plots (hlavní efekty)

Z grafů hlavních efektorů lze vypočítat hlavní vlivy vstupních parametrů na finální výstupy, tyto grafy tedy zobrazují výsledky chování výstupů vzhledem k hodnotám vstupů.



Obr. 91 - Grafy závislosti řezné síly na samostatné vstupní parametry

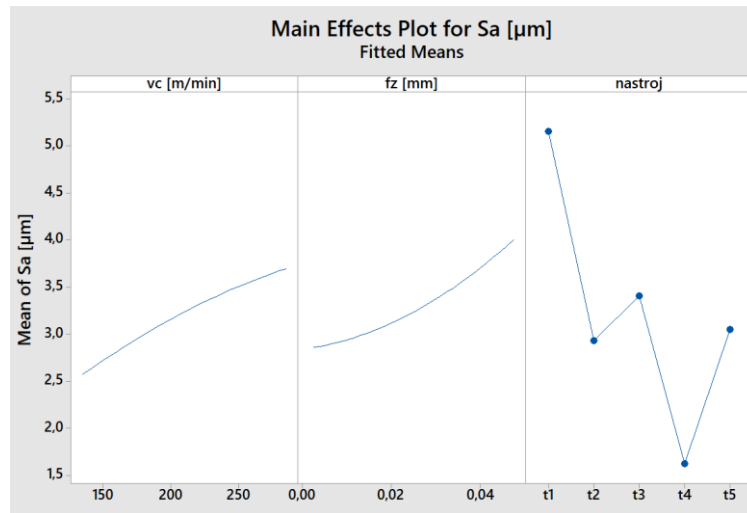
Grafy na Obr. 91 vystihují průběhy změny řezného odporu na vstupních řezných parametrech a nástrojích samostatně. Jedná se o obecné znázornění, které uvažuje celý soubor hodnot. Lze si povšimnout, že se zvyšující se řeznou rychlostí v_c do určitého bodu překmitu roste také řezný odpor, který po překonání tohoto překmitu o přibližné hodnotě 190 m/min poklesne. Naopak se zvyšujícím se posuvem na zub f_z , tento odpor exponenciálně stoupá. Poslední z grafů poukazuje na velikost odporu z hlediska nástroje.



Obr. 92 - Grafy závislosti řezné síly na kombinované vstupní parametry

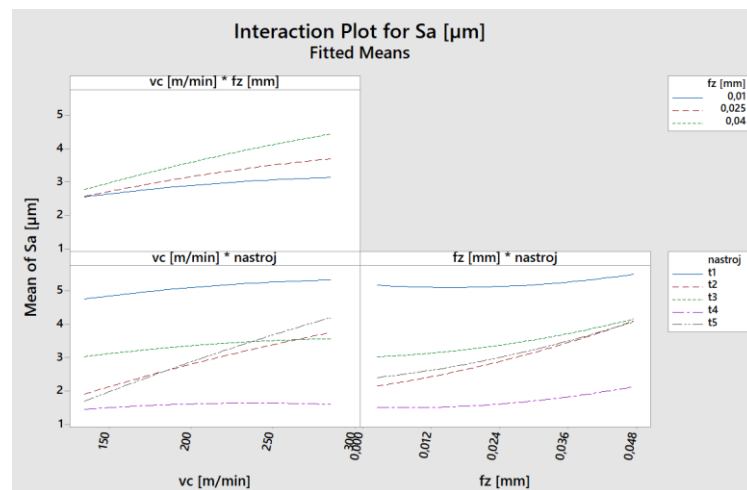
Grafy na Obr. 92 znázorňují kombinované závislosti různých vstupů na řezný odpor. Lze prohlásit, že odpor klesá s hodnotou posuvu na zub $f_z = 0,01\text{mm}$ a zvyšující se řeznou

rychlostí v_c . Další grafy znázorňují kombinace volby nástrojů a jednotlivých řezných parametrů. V tomto případě je nejlepší volba nástroje T1.



Obr. 93 - Grafy závislosti drsnosti povrchu na samostatné vstupní parametry

Grafy na Obr. 93 popisují samostatné změny jakosti povrchu na vstupních řezných parametrech a nástrojích. Lze konstatovat že kvalita povrchu se zhoršuje za použití vyšších hodnot v_c a f_z . Z grafu jsou také patrné vlivy jednotlivých nástrojů na finální hodnotu S_a .

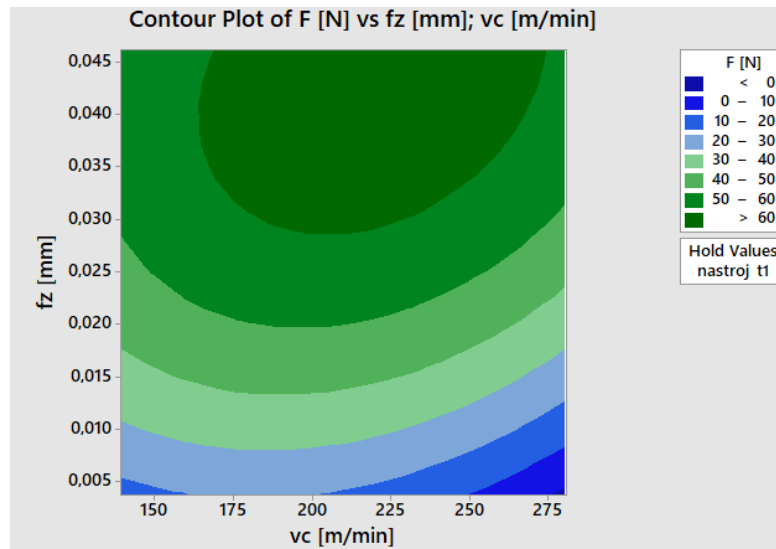


Obr. 94 - Grafy závislosti drsnosti povrchu na kombinované vstupní parametry

Z grafů na Obr. 94 lze prohlásit, že jakost povrchu se zhoršuje při zvyšující se řezné rychlosti v_c , která ale naopak klesá se zvyšujícím se posuvem. Další grafy znázorňují kombinace volby nástrojů a jednotlivých řezných parametrů. V tomto případě je nejlepší volba nástroje T4.

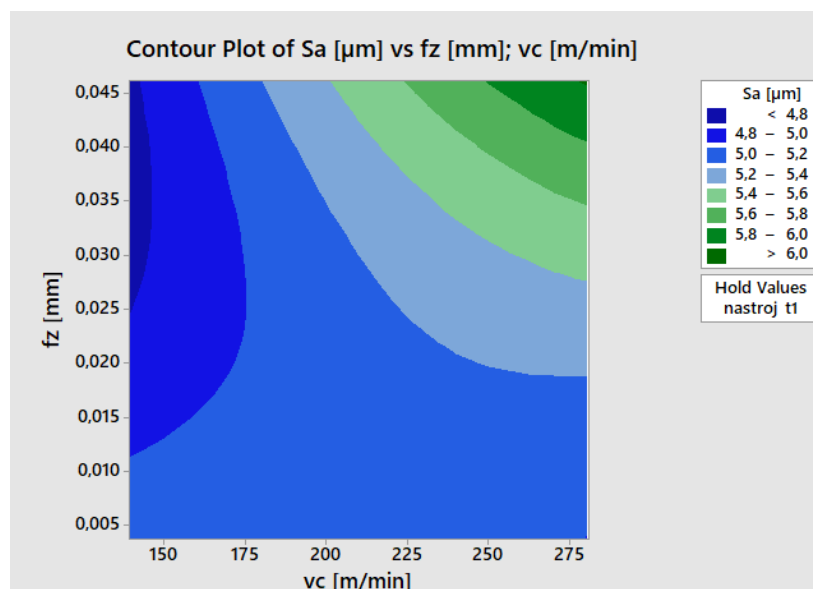
Contour plot (obrysový plošný graf)

Následující grafy budou vystihovat plošné závislosti na vstupů na výstupy formou vrstevnic a lze podle nich definovat další závislosti.



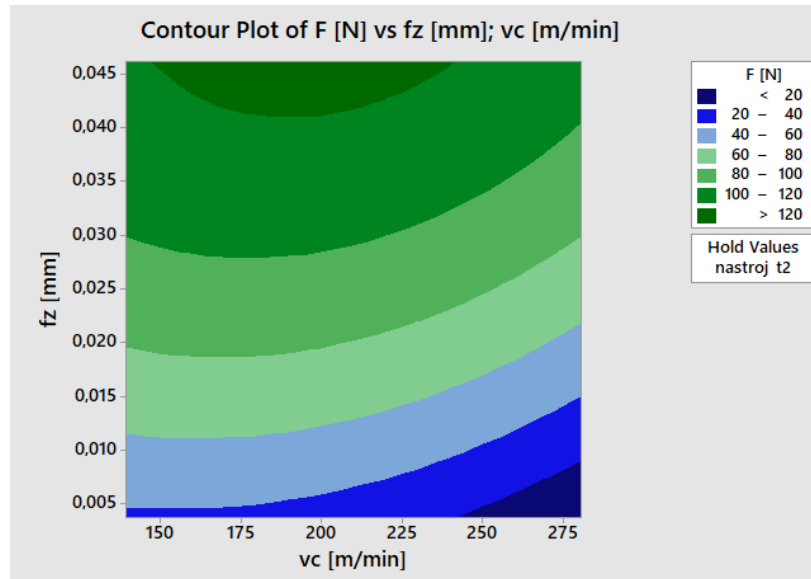
Obr. 95 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T1

Graf na Obr. 95 znázorňuje že, při použití nástroje T1 budou nejmenší hodnoty řezného odporu za podmínek v_c pohybující se okolo 260 m/min a f_z přibližně 0,005 mm.



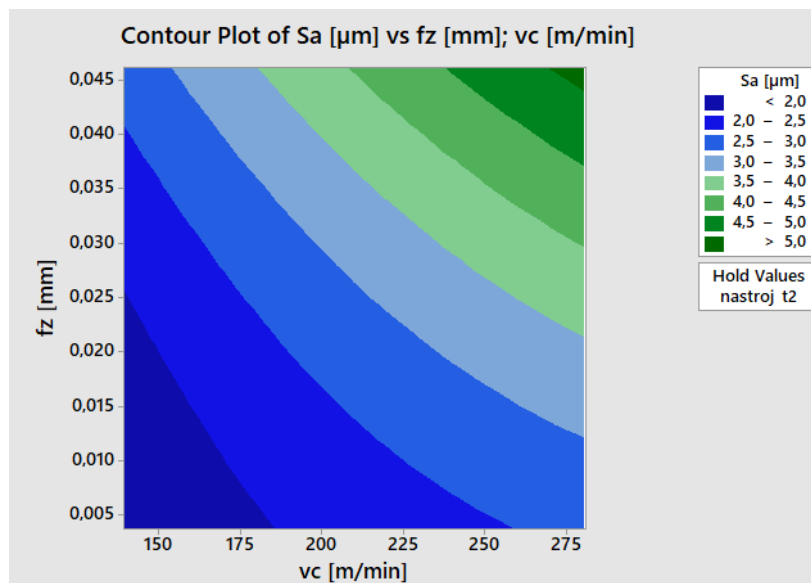
Obr. 96 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T1

Graf na Obr. 96 znázorňuje že, při použití nástroje T1 budou nejmenší hodnoty jakosti povrchu za podmínek v_c pohybující se okolo 100 m/min a f_z přibližně 0,035 mm.



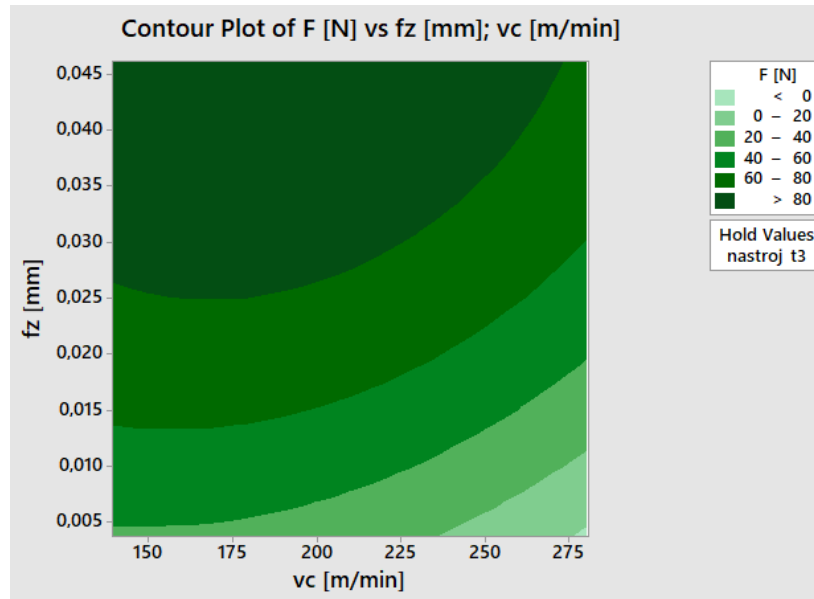
Obr. 97 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T2

Graf na Obr. 97 znázorňuje, že při použití nástroje T2 budou nejmenší hodnoty řezného odporu za podmínek v_c pohybující se okolo 260 m/min a f_z přibližně 0,005 mm.



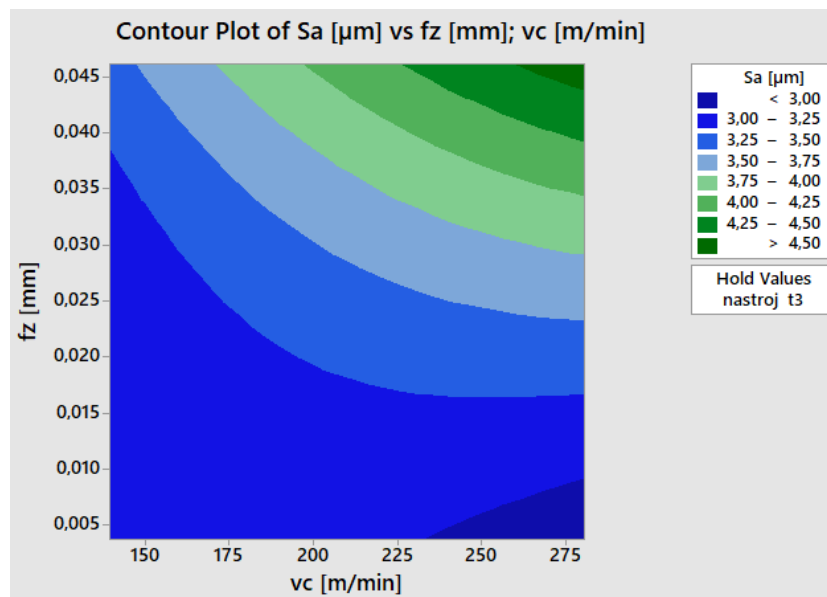
Obr. 98 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T2

Graf na Obr. 98 znázorňuje, že při použití nástroje T2 budou nejmenší hodnoty jakosti povrchu za podmínek v_c pohybující se okolo 100 m/min a f_z přibližně 0,015 mm.



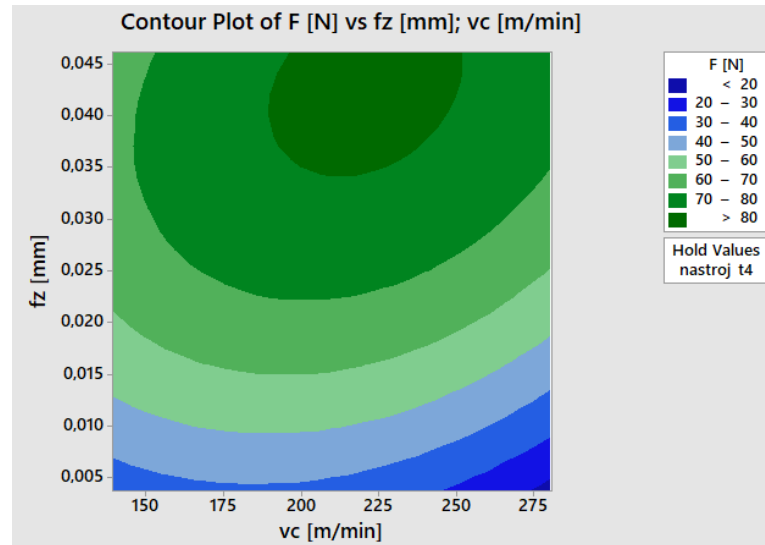
Obr. 99 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T3

Graf na Obr. 99 znázorňuje, že při použití nástroje T3 budou nejmenší hodnoty řezného odporu za podmínek v_c pohybující se okolo 280 m/min a f_z přibližně 0,002 mm.

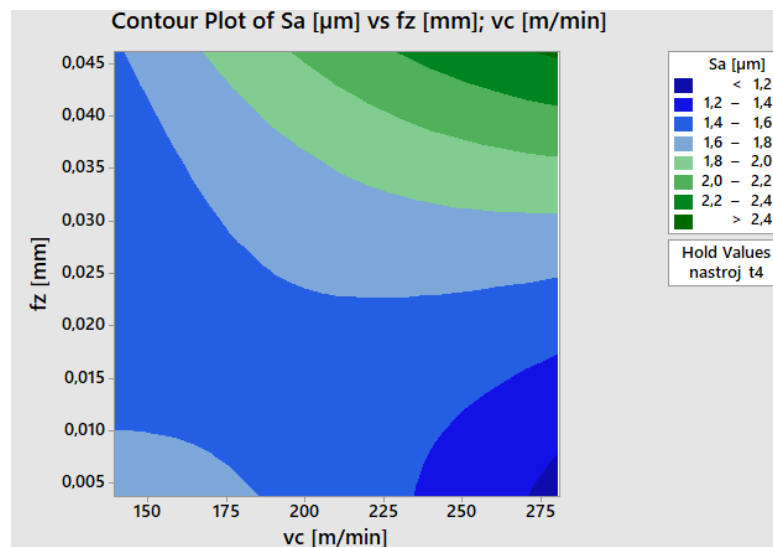


Obr. 100 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T3

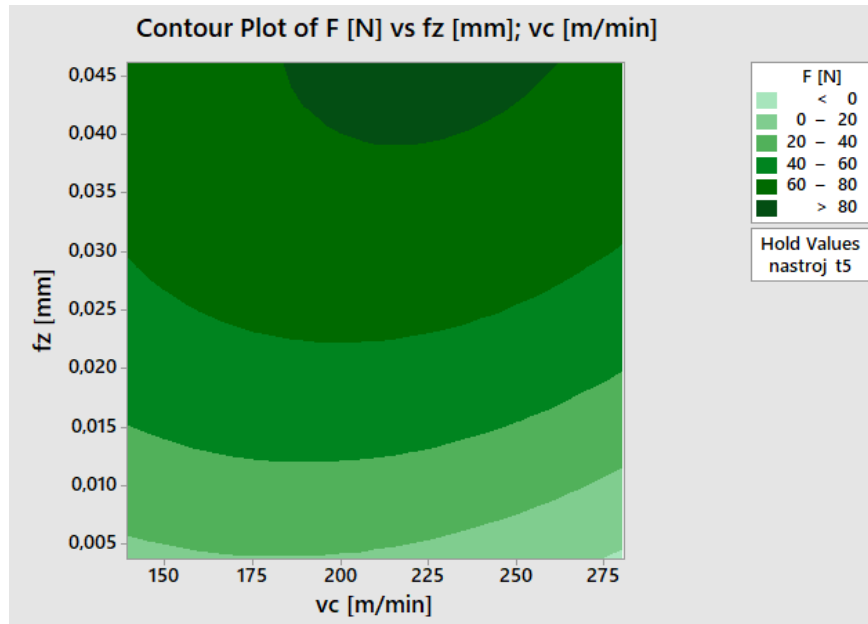
Graf na Obr. 100 znázorňuje, že při použití nástroje T3 budou nejmenší hodnoty jakosti povrchu za podmínek v_c pohybující se okolo 275 m/min a f_z přibližně 0,005 mm.



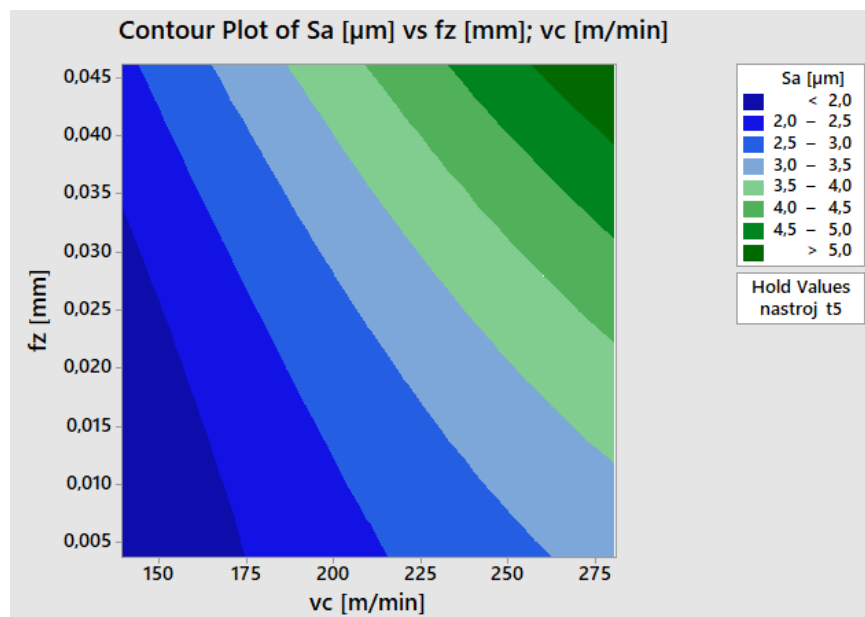
Obr. 101 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T4
Graf na Obr. 101 znázorňuje, že při použití nástroje T4 budou nejmenší hodnoty řezného odporu za podmínek v_c pohybující se okolo 280 m/min a f_z přibližně 0,001 mm.



Obr. 102 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T3
Graf na Obr. 102 znázorňuje, že při použití nástroje T4 budou nejmenší hodnoty jakosti povrchu za podmínek v_c pohybující se okolo 275 m/min a f_z přibližně 0,005 mm. Tento nástroj nabízí široké spektrum využití řezných parametrů k dosažení výborné jakosti povrchu.



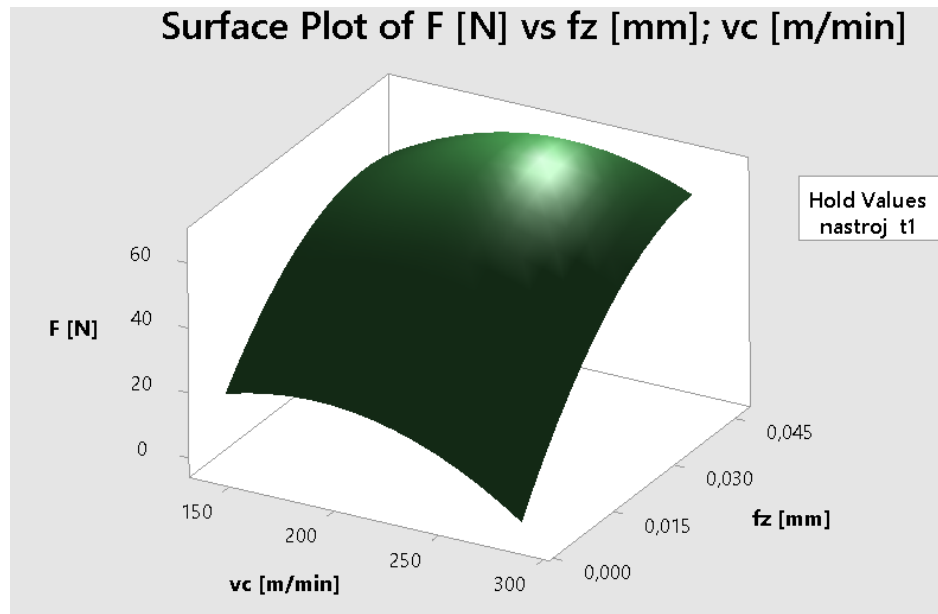
Obr. 103 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T5
Graf na Obr. 103 znázorňuje, že při použití nástroje T5 budou nejmenší hodnoty řezného odporu za podmínek v_c pohybující se okolo 280 m/min a f_z přibližně 0,001 mm.



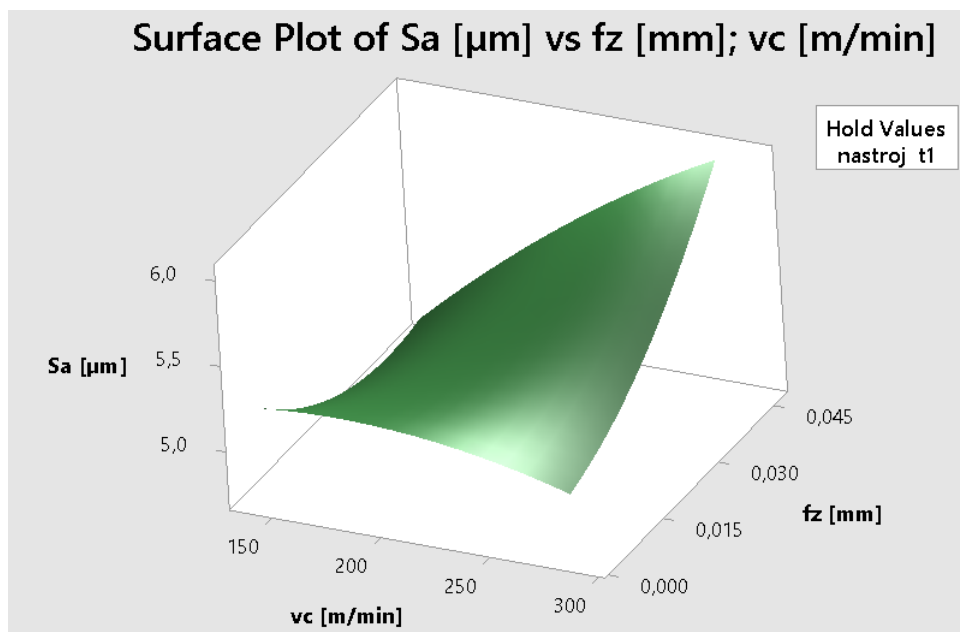
Obr. 104 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T5
Graf na Obr. 104 znázorňuje, že při použití nástroje T3 budou nejmenší hodnoty jakosti povrchu za podmínek v_c pohybující se okolo 100 m/min a f_z přibližně 0,02 mm.

Surface plot (graf povrchové plochy)

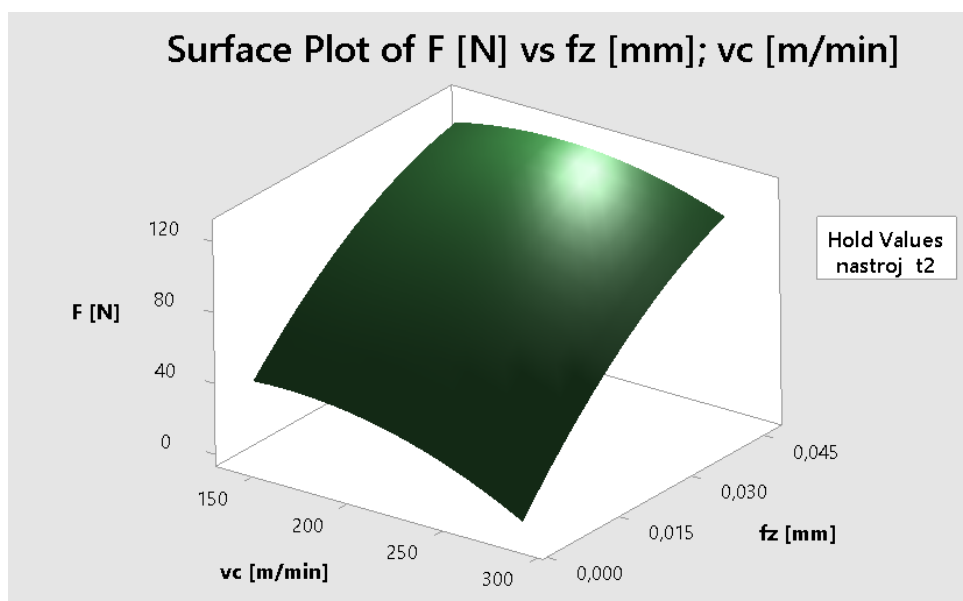
Následující grafy interpretují stejné závislosti v prostorovém prostředí lze dle nich přesněji zobrazovat požadované závislosti dle sklonů plochy. Jelikož tyto grafy popisují stejné skutečnosti jako ty na předešlých stranách, nebudou proto blíže specifikovány slouží pouze k přesnější ilustraci jasně získaných závislostí.



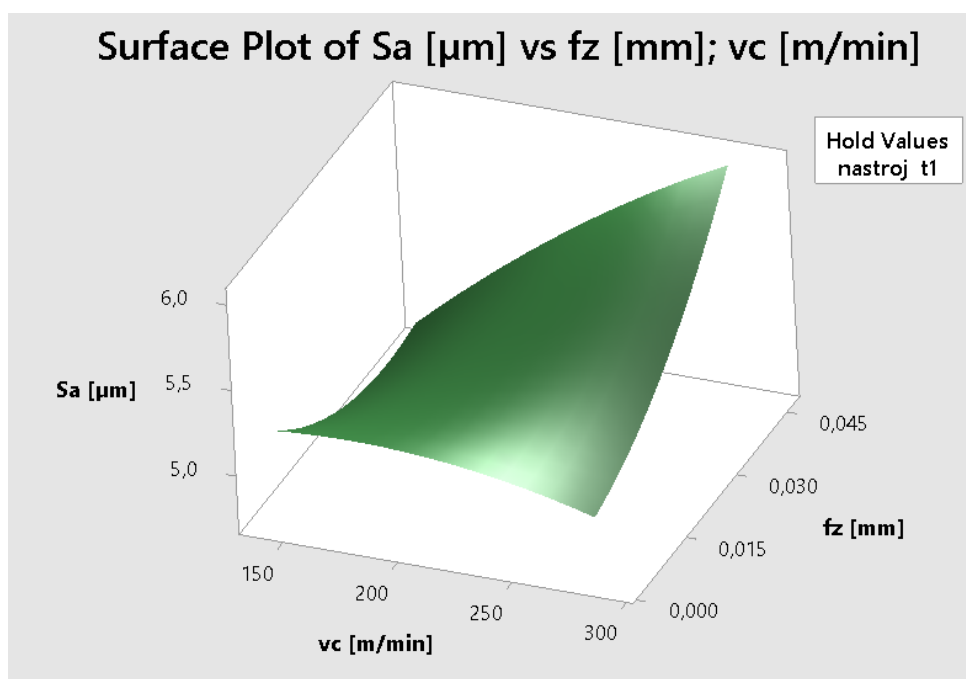
Obr. 105 – Prostorový graf závislostí řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T1



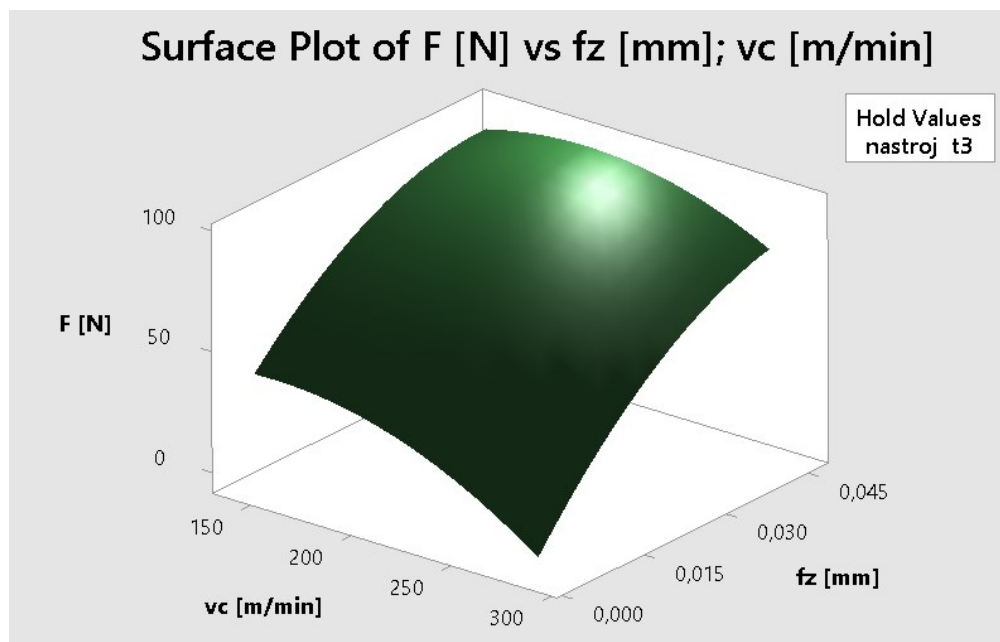
Obr. 106 - Prostorový graf závislostí řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T1



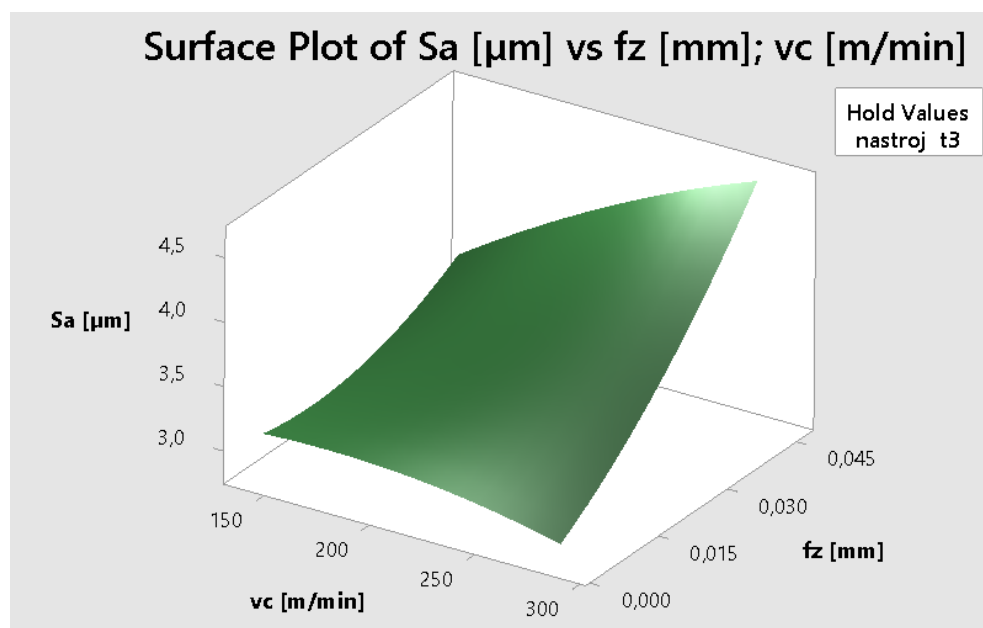
Obr. 107 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T2



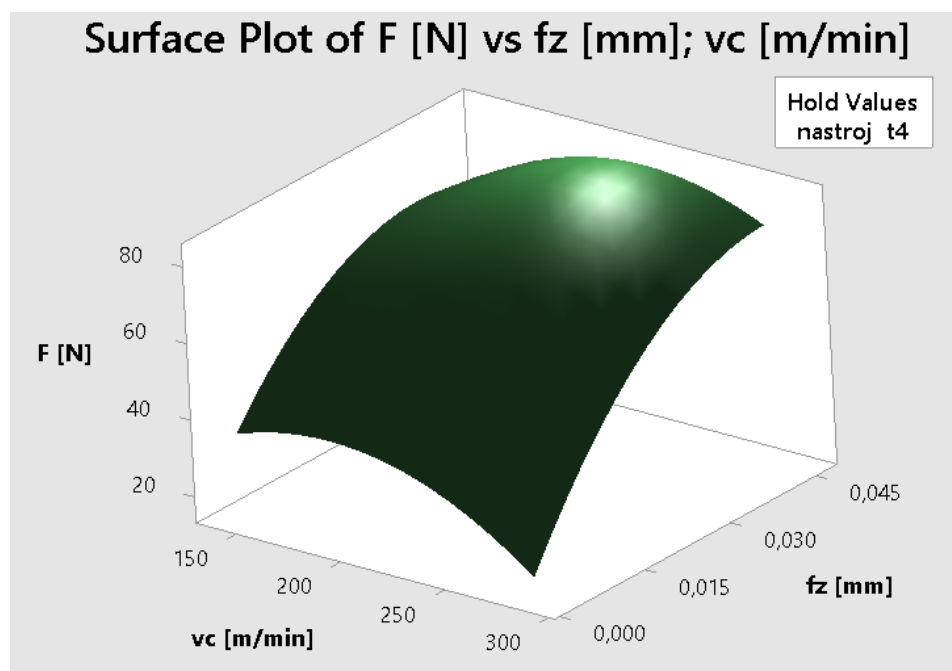
Obr. 108 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T2



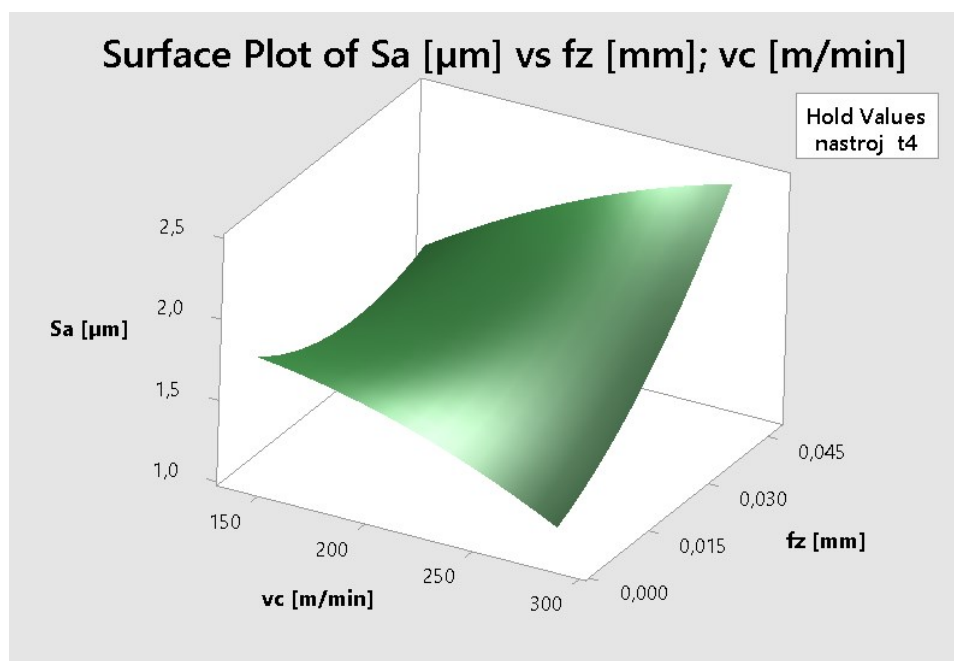
Obr. 109 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T3



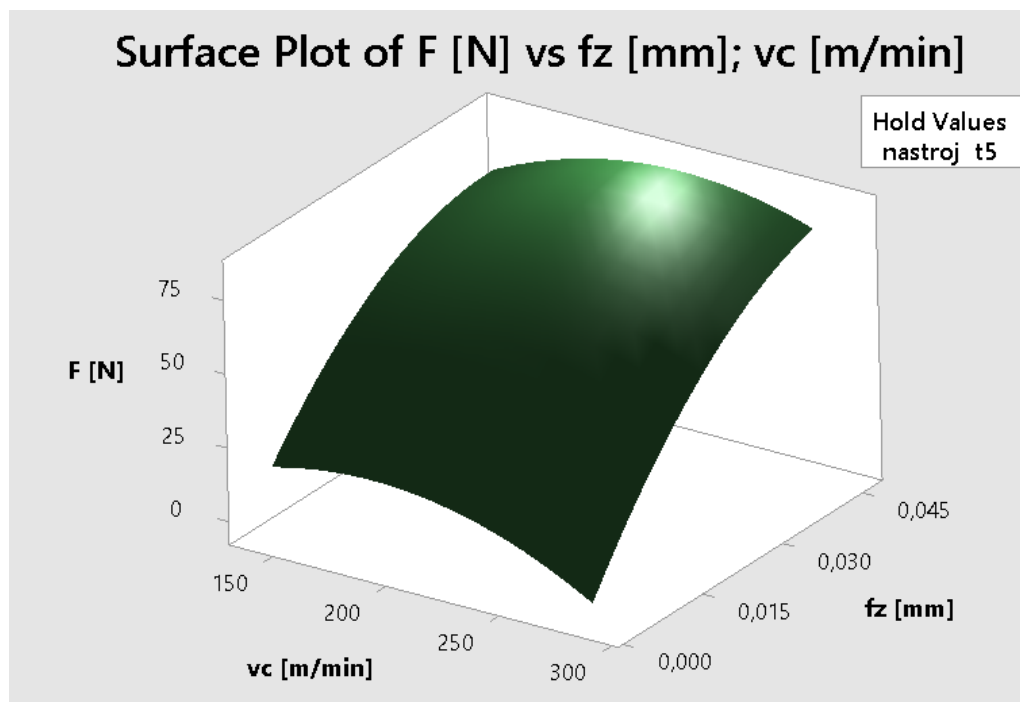
Obr. 110 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T3



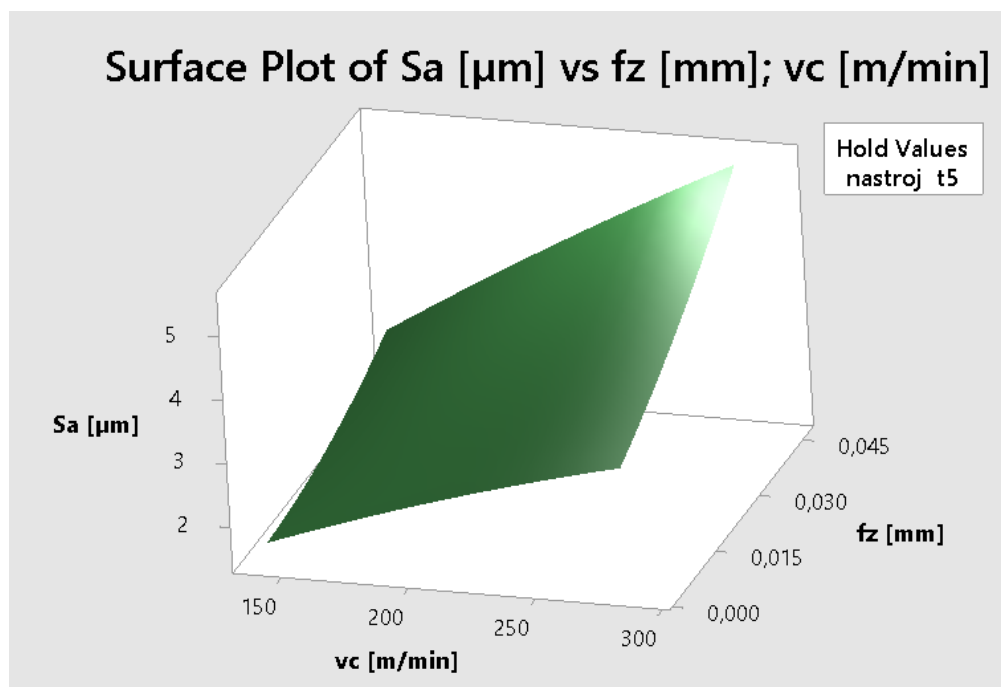
Obr. 111 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T4



Obr. 112 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T4



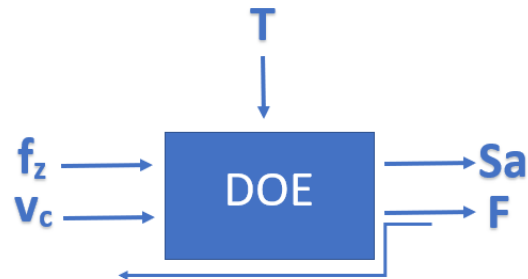
Obr. 113 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T5



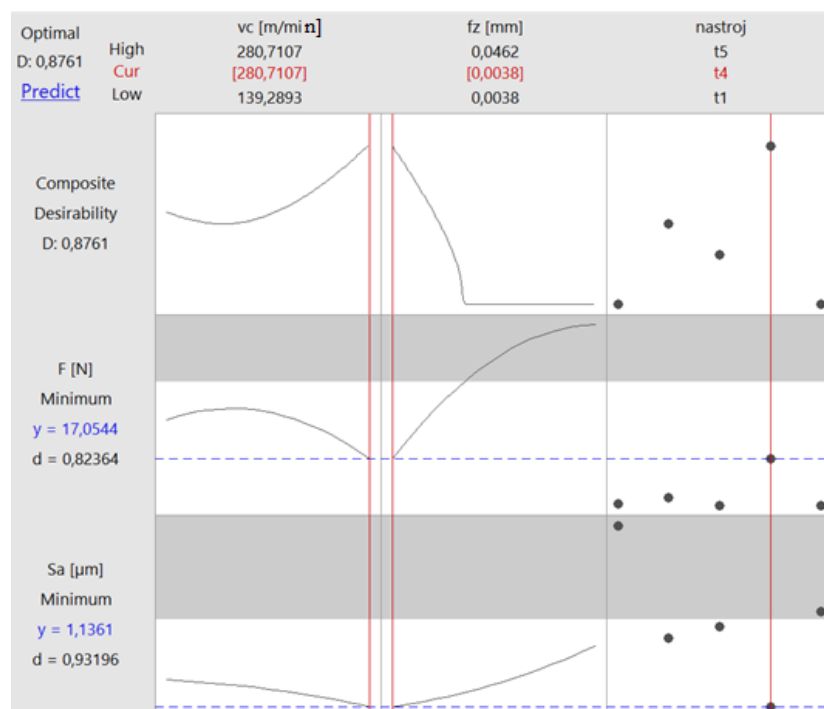
Obr. 114 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T4

9.7 Optimalizace

Do metody DOE byli zadána vstupní data, díky kterým bylo možné sestavit optimalizační matematický model.



Obr. 115 - Základní schéma metody DOE



Obr. 116 - Optimalizační model experimentu

Z Obr. 116 lze vyčíst optimalizovanou hodnotu ze všech řezných podmínek. Software při vyhodnocování bral v úvahu všechny vstupní data dle, kterých zvolil nejvhodnější podmínky pro obrábění CFRP kompozitů.

9.8 Diskuze výsledků

V experimentu proběhlo zhodnocení a porovnání 5 nástrojů pro obrábění CFRP kompozitů dle výzkumu lze tyto nástroje efektivně charakterizovat a porovnat mezi sebou.

Za pomoci nástroje T1 lze dosáhnout nejmenšího řezného odporu, avšak z hlediska jakosti povrchu se zdaleka neřadí do skupiny výhodných. Může být tedy vhodný na obrábění při zvýšených řezných rychlostech, přičemž díky větší odolnosti řezného procesu může být také méně opotřebován. Naopak pokud budou kladeny zvýšené požadavky na kvalitu povrchu nebude tento nástroj připadat v úvahu.

Nástroj T2 je z hlediska řezného odporu klasifikován velmi nepříznivě a z pohledu na jakost povrchu se pohybuje mezi průměrem. Z těchto důvodů tento nástroj neprokazuje velkou výhodnost využití.

Na nástroj T3 se lze poohlížet jako na průměrný z obou hledisek. Může představovat solidní výsledky v případě obráběcích výstupů.

Za vyzdvižení stojí nástroj T4, díky kterému lze dosáhnout velmi efektivního a hladkého povrchu. Z pohledu řezného odporu patří mezi průměrné hodnoty. Dle záznamu složek řezných sil však způsobil nejplynulejší řezný proces. Tento nástroj se jeví jako jednoznačně nejlepší k frézování CFRP kompozitů.

Z celkového souboru nástrojů se nástroj T5 jeví jako druhý nejlepší pro tento typ frézování. Představuje spolehlivé hodnoty z obou typů výstupů.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo připravit experiment pro frézování vláknově vyztužených kompozitních struktur a následně pomocí experimentálních metod naměřit řezné síly, vibrace a jakost obrobeneho povrchu. Dále bylo nutné získaná data statisticky zpracovat a stanovit požadované závislosti.

První z experimentů porovnával nástroje vhodné a nevhodné pro toto frézování. Po provedení experimentu bylo možné prohlásit tyto výstupy.

Nástroj JC875060D2.0-DURA je vhodný pro obrábění CFRP kompozitů z důvodů nižšího řezného odporu a dosažení účinnější jakosti povrchu s efektivní eliminací delaminace. Všechny tyto skutečnosti jasně popisují grafy a tabulky v podkapitole 8.5.

Druhý experiment sloužil ke stanovení závislostí celkového chování obráběcího procesu a jeho optimalizaci. K vyhodnocování sloužila metoda DOE. Její vstupy byli řezné parametry v podobě řezné rychlosti v_c a posuvu na zub f_z a také 5 různých typů nástrojů speciálně konstruovaných pro frézování CFRP kompozitů. Průběh experimentu popisuje podkapitola 9.3.

Částí experimentu bylo také srovnání vlivu souslednosti a nesouslednosti při tomto frézování. Srovnání proběhlo pomocí nástroje JPD880060G2C.0Z3A za stejných řezných podmínek. Dle výsledků lze konstatovat, že frézování nesousledné nabídlo lehce menší hodnoty řezných sil i jakosti povrchu. V technické praxi však velmi častěji dochází k využití sousledného frézování, a proto pro většinu výzkumu bylo využíváno ve většině případů celého výzkumu.

Statistická metoda DOE umožnila získání spousty závislostí, které popisují grafy a obrázky v podkapitole 9.6. Z hlediska matematického modelování se větší spolehlivostí prezentují hodnoty naměřených řezných sil což je dle naměřených hodnot jasně patrné. Lze tedy konstatovat, že jakost povrchu přímo neovlivňují jen správně zvolené řezné parametry a nástroje.

Výsledkem celého experimentu je optimalizovaná hodnota, dle které lze prohlásit, že pro frézování CFRP kompozitů je optimální využití nástroje JPD880060G2C.0Z3A za řezných podmínek $v_c=280,7107$ m/min a $f_z=0,0038$ mm.

Celý proces praktické diplomové práce začínal přípravou polotovaru pro obrábění za využití speciálních technologií pro zpracování CFRP kompozitů. Dále proběhl orientační výzkum vlivu vhodnosti speciálně konstruovaného nástroje pro obrábění tohoto typu materiálu. Bylo provedeno celkem 8 měření řezného odporu pomocí dynamometru, kdy 6 měření bylo pouze ověřovacích a kontrolních. Z dvou měření byly uvažovány výstupy. Na obrobeném povrchu byla dále měřena jeho jakost. Ta proběhla kontaktním způsobem a celkem proběhlo 40 měření. Hlavní experiment obsahoval porovnání 5 typů nástrojů vhodných pro frézování CFRP kompozitů. Dle předem naplánované definice proběhlo celkem 65 měření jak řezného odporu, tak i jakosti povrchu při sousledném frézování. U některých nástrojů byl měřen také vliv nesousledného frézování. Celé měření bylo naprogramováno v software NX. Následně došlo k statistickému vyhodnocení pomocí metody DOE v prostředí software Minitab.

V přílohách lze nalézt technické listy, které se týkají materiálů a přípravků pro výrobu polotovaru. CNC programy včetně G-kódů vykonaného experimentu. Množství naměřených a zpracovávaných dat v programu Excel. A v poslední řadě celý optimalizovaný matematický model v programu Minitab.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKŠÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [3] *AltimBohemia: Vlastnosti kompozitních materiálů* [online]. 2012 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <http://www.altimbohemia.cz/vlastnosti-kompozitnich-materialu.html>
- [4] *MATERIALTIMES: Kompozity na konci svého života* [online]. 2021 [cit. 2023-30-01]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/tema/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>
- [5] BIRON, Michel. *Thermoplastics and thermoplastic composites*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. *Plastics design library* (Elsevier). ISBN 978-1-4557-7898-0.
- [6] METAXA, Z., M. KONSTA-GDOUTOS a S. SHAH. *Mechanical Properties and Nanostructure of Cement-Based Materials Reinforced with Carbon Nanofibers and Polyvinyl Alcohol (PVA) Microfibers* [online]. 2009 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://arch.library.northwestern.edu/downloads/zk51vg83r?locale=en>
- [7] MINSTER, Jiří. *ÚSTAV TEORETICKÉ A APLIKOVANÉ MECHANIKY AV ČR. Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví* [online]. Praha, 2007 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/stav.pdf>
- [8] REJL, Oldřich. *Tzbinfo: Kompozitní materiály ve stavebnictví* [online]. 2013 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [9] DAVIM, J. a Constantinos CHARITIDIS, ed. *Nanocomposites: materials, manufacturing and engineering*. Berlin: De Gruyter, 2013. *Advanced composites*. ISBN 978-3-11-026644-3.
- [10] PASHAPOURYEGANEH, Farzad, Ghasem ZARGAR, Ahmad RABIEE, Ali KADKHODAIE a Mohammad TAKASSI. Design and synthesis of cationic copolymer synergized with metal nanoparticles as polymeric hybrid nanocomposite for carbonate reservoir applications. *Polymer Bulletin* [online]. [cit. 2023-01-17]. ISSN 0170-0839. Dostupné z: [doi:10.1007/s00289-022-04405-w](https://doi.org/10.1007/s00289-022-04405-w)
- [11] BHATTACHARYA, Debes a Stokyo FAKIROV. *Synthetic Polymer - Polymer Composites*. Munich: Hanser Publishers, 2012. ISBN 978-1-56990-510-4.
- [12] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol ALEXI a Ernest GONDÁR. *Polymérne konštrukčné materiály: Odborná publikace* [online]. In: . 2012 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
- [13] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 978-084-9342-059.
- [14] XING, Yanjun a Xin DING. UV photo-stabilization of tetrabutyl titanate for aramid fibers via sol-gel surface modification. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2007, **103**(5), 3113-3119 [cit. 2023-04-20]. ISSN 00218995. Dostupné z: [doi:10.1002/app.25463](https://doi.org/10.1002/app.25463)
- [15] MCKEEN, Laurence W. *The Effect of Radiation on Properties of Polymers*. 1st ed. Norwich: William Andrew, 2020. ISBN 978-0-12-819729-5.
- [16] NAWAB, Yasir, S.M. SAPUAN a Khubab SHAKER. *Composite Solutions for Ballistics*. 1st ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2021. ISBN 978-0-12-821984-3.

- [17] CALLISTER, William a David RETHWISCH. *Materials science and engineering: an introduction*. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-41997-7.
- [18] GERDEEN, James a Ronald RORRER. *Engineering design with polymers and composites*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. ISBN 9781439860526.
- [19] DAVIM, J. Paulo. *Machining Composites Materials*. Hoboken, New Jersey, USA: WILEY, 2009. ISBN 978-1-848-21170-4.
- [20] KOLÁŘ, P., P. MAŠEK, P. ZEMAN a M. VRABEC. Vývoj nástrojů pro obrábění vláknových kompozitů s termoplastickou maticí. *TRANSFER - VZLÚ* [online]. 2015, **2015**(24), 6-9 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/87418/Kolar_Masek_Zeman_et_al_Vyvoj_nastroju_pro_obrazeni_vlaknovych_kompozitu_s_termoplastickou_matici_%282015%29_PUBV_306698.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [21] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788072047222.
- [22] ŠTULPA, Miloslav. *Technologie obrábění: CNC soustružení, frézování, vrtání : pro praxi*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2022. ISBN 978-80-271-2883-9.
- [23] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Úvod do teorie obrábění* [online]. OSTRAVA, 2013 [cit. 2023-02-23]. ISBN 978-80-248-3013-1. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A1vod%20do%20teorie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%A1vod%20do%20teorie%20obrabeni%2003%20Tvorba%20a%20tvarov%C3%A1n%C3%AD%20t%C5%99%C3%ADsky.pdf
- [24] TETI, R. Machining of Composite Materials. *CIRP Annals* [online]. 2002, 51(2), 611-634 [cit. 2023-04-23]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)61703-X
- [25] SHEIKH-AHMAD, J. Y. *Machining of polymer composites*. New York: Springer Science + Business Media, 2009. ISBN 978-0-387-35539-9.
- [26] ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS). Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999.
- [27] ŠPERKA, Petr. *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. Brno, 2009 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10442189-Struktura-povrchu-vybranych-strojnich-soucasti.html>
- [28] ČSN EN ISO 25178-2: *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut. 2012.
- [29] OLYMPUS CORPORATION: *Roughness (3D) parameter* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=areal-method](https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=areal-method)
- [30] ČSN EN ISO 4288: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS). Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1999.
- [31] ELUC: *Měření drsnosti povrchu* [online]. 2020 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [32] ELUC: *Kontrola drsnosti povrchu* [online]. 2020 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1102>
- [33] PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ: *Homel.vsb* [online]. In: . [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf

- [34] *Dynamometers-for-cutting-force-measurement. Measurement Systems and Sensors | Kistler* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/measurement-technology-for-machining/C00000037>
- [35] JAROŠOVÁ, Eva. *Návrhy a vyhodnocení průmyslových experimentů*. První vydání. [Průhonice]: Professional Publishing, 2021. ISBN 978-80-88260-54-7.
- [36] MICHÁLEK, Jiří. *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE): Učební texty k semináři* [online]. Brno, 2010 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_05_1012_2.PDF
- [37] MALI, H. S. a P. SHARMA. Machinability of High-Strength Fiber-Reinforced Polymer Textile Composites: A Review. *Mechanics of Composite Materials* [online]. 2023, 59(1), 1-28 [cit. 2023-05-10]. ISSN 0191-5665. Dostupné z: doi:10.1007/s11029-023-10078-x
- [38] OZKAN, Dervis, Mustafa SABRI GOK, Mecit OGE a Abdullah CAHIT KARAOGLANLI. Milling Behavior Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2019, 11, 526-533 [cit. 2023-05-10]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.01.024
- [39] *Panini S.r.l.,: Uživatelský návod: Autokláv Formula 1, Autokláv pro polymerizaci kompozitních materiálů*. 2014.
- [40] *SECO: Monolitní frézy* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/m_6892
- [41] *DMG MORI: DMU 50 3. generace* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50>
- [42] *Mitutoyo: Série 178 - Přenosné přístroje na měření drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/1292249401020/Surftest%20SJ-410/index.xhtml?jsessionid=681FB058AC1A629775C62A35234FAEEF
- [43] *Zygo: NewView™ 9000* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.zygo.com/products/metrology-systems/3d-optical-profilers/newview-9000>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MMC	Kompozitní materiály s kovovou maticí
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
DOE	Navrhování a analýza experimentů
FRP	Kompozitní materiál vyztužený vlákny
CFRP	Kompozitní materiál vyztužený uhlíkovými vlákny
GFRP	Kompozitní materiál vyztužený skelnými vlákny
AFRP	Kompozitní materiál vyztužený aramidovými vlákny
MRR	Rychlost úběru materiálu
CNC	Stroje řízené počítačem (Computer numerical control)
v_c	Řezná rychlost
f	Posuv
f_z	Posuv na zub
R_a	Střední aritmetická odchylka profilu
S_a	Průměrná aritmetická výška posuzované plochy

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 - Vlastnosti vybraných složek kompozitů [3]</i>	12
<i>Obr. 2 - Fázové rozhraní vlákno – matrice [3]</i>	13
<i>Obr. 3 - Různé způsoby zpevňovacích materiálů v kompozitech [4]</i>	14
<i>Obr. 4 - Sjednocená orientace vláken a nahodilá orientace vláken [4]</i>	14
<i>Obr. 5 - Struktura mikrokompozitního materiálu [6]</i>	15
<i>Obr. 6 - Praktický příklad makrokompozitního materiálu [8]</i>	15
<i>Obr. 7 - Struktura nanokompozitního materiálu [10]</i>	16
<i>Obr. 8 – Příklady jednotlivých typů částicových plniv [12]</i>	17
<i>Obr. 9 - Příklady uspořádání rovinného uspořádání vláken [1];</i>	18
<i>Obr. 10 - Druhy vazeb vyztužujících tkanin [1]</i>	19
<i>Obr. 11 - Struktura skelného vlákna [1]</i>	20
<i>Obr. 12 - Výroba textilních skleněných vláken tažením z trysek [1]</i>	21
<i>Obr. 13 - Struktura aramidového vlákna [1]</i>	22
<i>Obr. 14 - Řez aramidovým vláknem v místě lomu [14]</i>	22
<i>Obr. 15 - Výroba aramidových vláken [1]</i>	23
<i>Obr. 16 - Snímek uhlíkového vlákna pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu [1]</i>	23
<i>Obr. 17 - Ideální grafitová struktura uhlíkového vlákna [1]</i>	24
<i>Obr. 18 - Mikrostruktura uhlíkového vlákna [1]</i>	25
<i>Obr. 19 - Uspořádání atomů uhlíku v krystalu grafitu [13]</i>	26
<i>Obr. 20 - Výroba uhlíkových vláken [1]</i>	26
<i>Obr. 21 – Detail bórového vlákna se zřetelným wolframovým jádrem (B/W) [2]</i>	27
<i>Obr. 22 - Kontinuální vlákno SiC/C (vlevo) a SiC whiskery (vpravo) [2]</i>	28
<i>Obr. 23 – Prepreg [2]</i>	28
<i>Obr. 24 - Sendvičová struktura kompozitu [17]</i>	30
<i>Obr. 25 - Schéma postupu při ruční laminaci [2]</i>	32
<i>Obr. 26 - Schéma principu nástřiku sekaných vláken [2]</i>	32
<i>Obr. 27 - Schéma vakuové laminace s odvodem pryskyřice do zásobníku [2]</i>	33
<i>Obr. 28 - Metoda RTM [2]</i>	34
<i>Obr. 29 - Princip šroubovicového navíjení [2]</i>	35
<i>Obr. 30 – Princip pólového navíjení (vlevo) a finální výrobek (vpravo) [2]</i>	36
<i>Obr. 31 - Pultruzní linka [2]</i>	36
<i>Obr. 32 - Schéma výroby plátů technologií SMC [2]</i>	37
<i>Obr. 33 – Realizace řezného procesu [23]</i>	38
<i>Obr. 34 - Úhel natočení vláken [24]</i>	39

<i>Obr. 35 - Řezné mechanismy pro vláknově vyztužené kompozity [24]</i>	40
<i>Obr. 36 - Typy delaminace při frézování [25]</i>	42
<i>Obr. 37 - Schéma rozložení složek síly řezání při frézování; [21]</i>	43
<i>Obr. 38 - Obecný povrch a jeho součásti [27]</i>	48
<i>Obr. 39 - Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu Ra [26]</i>	48
<i>Obr. 40 - Znázornění výšky nerovnosti Rz [26]</i>	49
<i>Obr. 41 - Sa – aritmetický průměr výšky [29]</i>	50
<i>Obr. 42 - Vzorkovnice drsnosti povrchů [32]</i>	51
<i>Obr. 43 - Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [31]</i>	52
<i>Obr. 44 - Příklad výsledků profilu z kontaktního drsnoměru [32]</i>	52
<i>Obr. 45 - 3D povrch nasnímaný pomocí CLA snímače [31]</i>	53
<i>Obr. 46 - Mechanický dynamometr prstencový [33]</i>	55
<i>Obr. 47 - Dynamometr od firmy KISTLER měřící pomocí piezoelektrického jevu [34]</i>	56
<i>Obr. 48 – Navinutá tkanina</i>	62
<i>Obr. 49 - Nařezaná tkanina</i>	63
<i>Obr. 50 - Princip skládání a utlačování</i>	63
<i>Obr. 51 – Systém vakuového laminování</i>	64
<i>Obr. 52 - Zyvax® Sealer GP</i>	64
<i>Obr. 53 - Chemlease® 2191W</i>	65
<i>Obr. 54 - autokláv OP Panini S.r.l., model G00300572</i>	66
<i>Obr. 55 - Polotovar v autoklávu</i>	66
<i>Obr. 56 - JSE513060D3C.0Z3 SIRA [40]</i>	68
<i>Obr. 57 - JC875060D2.0-DURA [40]</i>	69
<i>Obr. 58 - Stroj DMG MORI DMU 50 3. generace [41]</i>	70
<i>Obr. 59 - Dynamometr 9129AA Kistler [34]</i>	70
<i>Obr. 60 - Drsnoměr Mitutoyo SJ-410 [42]</i>	71
<i>Obr. 61 - Polotovar po přípravných operacích</i>	71
<i>Obr. 62 - Polotovar upnutý v dynamometru</i>	72
<i>Obr. 63 – Polotovar po provedení experimentu</i>	72
<i>Obr. 64 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T1E</i>	73
<i>Obr. 65 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T2E</i>	74
<i>Obr. 66 - 880060R020Z4.0-DURA [40]</i>	77
<i>Obr. 67 - JC876060D2C.0Z10-DURA [40]</i>	78
<i>Obr. 68 - JPD880060G2C.0Z3A [40]</i>	79
<i>Obr. 69 - 880060R020Z4.0-DURA [40]</i>	80

<i>Obr. 70 - Profilometr Zygo NewView™ 9000</i>	81
<i>Obr. 71 - Polotovar experimentu</i>	82
<i>Obr. 72 - Strategie experimentu nástroj T1-T4 – pohled zepředu</i>	82
<i>Obr. 73 - Strategie experimentu nástroj T5 – pohled zepředu</i>	83
<i>Obr. 74 - Strategie experimentu – pohled shora</i>	83
<i>Obr. 75 - Průběh experimentu v NX CAM</i>	84
<i>Obr. 76 - Analýza obrobeného povrchu v NX CAM</i>	84
<i>Obr. 77 - Obrobek po měření</i>	84
<i>Obr. 78 - Vstupní řezné parametry</i>	85
<i>Obr. 79 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T1 a měření 007</i>	87
<i>Obr. 80 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T1 a měření 001</i>	87
<i>Obr. 81 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T2 a měření 007</i>	88
<i>Obr. 82 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T2 a měření 005</i>	88
<i>Obr. 83 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T3 a měření 007</i>	89
<i>Obr. 84 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T3 a měření 005</i>	89
<i>Obr. 85 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T4 a měření 002</i>	90
<i>Obr. 86 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T4 a měření 001</i>	90
<i>Obr. 87 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T5 a měření 007</i>	91
<i>Obr. 88 - Výstupní data snímání povrchu pro nástroj T5 a měření 007</i>	91
<i>Obr. 89 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T4 a měření 009 – frézování sousledné</i>	92
<i>Obr. 90 - Graf závislosti složek řezných sil na čase pro nástroj T4 a měření 009 – frézování nesousledné</i>	92
<i>Obr. 91 - Grafy závislosti řezné síly na samostatné vstupní parametry</i>	95
<i>Obr. 92 - Grafy závislosti řezné síly na kombinované vstupní parametry</i>	95
<i>Obr. 93 - Grafy závislosti drsnosti povrchu na samostatné vstupní parametry</i>	96
<i>Obr. 94 - Grafy závislosti drsnosti povrchu na kombinované vstupní parametry</i>	96
<i>Obr. 95 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T1</i>	97
<i>Obr. 96 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T1</i>	97
<i>Obr. 97 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T2</i>	98
<i>Obr. 98 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T2</i>	98
<i>Obr. 99 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T3</i>	99
<i>Obr. 100 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T3</i> ..	99
<i>Obr. 101 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T4</i>	100
<i>Obr. 102 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T3</i>	100
<i>Obr. 103 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T5</i>	101

<i>Obr. 104 - Plošný graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T5</i>	101
<i>Obr. 105 – Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T1</i>	102
<i>Obr. 106 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T1</i>	102
<i>Obr. 107 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T2</i>	103
<i>Obr. 108 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T2</i>	103
<i>Obr. 109 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T3</i>	104
<i>Obr. 110 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T3</i>	104
<i>Obr. 111 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T4</i>	105
<i>Obr. 112 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T4</i>	105
<i>Obr. 113 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na řeznou sílu pro nástroj T5</i>	106
<i>Obr. 114 - Prostorový graf závislosti řezných parametrů na drsnost povrchu pro nástroj T4</i>	106
<i>Obr. 115 - Základní schéma metody DOE</i>	107
<i>Obr. 116 - Optimalizační model experimentu</i>	107

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 - Orientační hodnoty tržné délky dle vybraných materiálů [2]</i>	18
<i>Tab. 2 – Příklady vlastností vybraných vláken dle prekurzoru [2]</i>	24
<i>Tab. 3 - Znázornění nejmenší ortogonální soustavy L-4 [36]</i>	57
<i>Tab. 4 - Základní specifikace nástroje JSE513060D3C.0Z3 SIRA [40]</i>	67
<i>Tab. 5 – Základní specifikace nástroje JC875060D2.0-DURA [40]</i>	68
<i>Tab. 6 - Parametry stroje DMG MORI DMU 50 3. generace [41]</i>	69
<i>Tab. 7 - Řezné parametry experimentu</i>	73
<i>Tab. 8 - Hodnoty odečtených řezných sil pro nástroj T1E</i>	74
<i>Tab. 9 - Hodnoty odečtených řezných sil pro nástroj T2E</i>	74
<i>Tab. 10 - Procentuální srovnání výhodnosti nástroje T2E</i>	74
<i>Tab. 11 - Naměřené hodnoty drsnosti povrchu</i>	75
<i>Tab. 12 - Procentuální rozdíly naměřených parametrů drsnosti</i>	76
<i>Tab. 13 - Základní specifikace nástroje 880060R020Z4.0-DURA [40]</i>	77
<i>Tab. 14 - Základní specifikace nástroje JC876060D2C.0Z10-DURA [40]</i>	78
<i>Tab. 15 - Základní specifikace nástroje JPD880060G2C.0Z3A [40]</i>	79
<i>Tab. 16 - Základní specifikace nástroje 880060R020Z4.0-DURA [40]</i>	79
<i>Tab. 17 - Parametry Zygo NewView 9000 [43]</i>	81
<i>Tab. 18 – Naměřené výstupní parametry pro všechny nástroje</i>	86

SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy budou součástí diplomové práce formou CD.

Příloha P I: Technický list ER 78 T

Příloha P II: Technický list Zyvox® Sealer GP

Příloha P III: Technický list Chemlease® 2191W

Příloha P IV: CNC programy v softwaru NX a G – kódy pro frézování v experimentu II

Příloha P V: Naměřená data v programu Excel

Příloha P V: Statistické vyhodnocení experimentu v programu Minitab