ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrábění kompozitních materiálů

Autor: **Bc. Tomáš KROUPA**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.
Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: ……. **. . . . . .**
podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a také za jeho rady, inspiraci a diskuze nejen při vypracování této diplomové práce.

Dále pak ZČU v Plzni, potažmo katedře KTO za přípravu během studia a poskytnutí vybavení.

Tato diplomová práce vznikla za podpory GA ZČU při řešení projektu SGS-031-2013 s názvem „Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie – technologie obrábění ".

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Bc. Kroupa	**Jméno** Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004/ Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. Zetek Ph.D.	**Jméno** Miroslav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Obrábění kompozitních materiálů		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KTO		**ROK ODEVZD.**	2014

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	77		**TEXTOVÁ ČÁST**	77		**GRAFICKÁ ČÁST**	0

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Tématem této diplomové práce je rozbor současného stavu Oblasti kompozitních materiálů a jejich obrobitelnosti soustružením, broušením a frézováním, které mají polymerní matrici vyztuženou skelnými nebo uhlíkovými vlákny.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	Kompozitní materiály, výztuž, matrice, vlákno, obrábění kompozitů, řezné nástroje, řezné materiály, nekonvenční metody obrábění

SUMMARY OF DIPLOMA WORK

AUTHOR	**Surname** Bc. Kroupa	**Name** Tomáš	
FIELD OF STUDY	2303T004 Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Ing. Zetek Ph.D.	**Name** Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	Machining of composite materials		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	KTO		**SUBMITTED IN**	2014

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	77		**TEXT PART**	77		**GRAPHICAL PART**	0

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	The topic of this thesis is to analyze the current state of composite materials and their turning machinability, grinding and milling, which have polymeric matrix reinforced with fiber or carbon fiber.
KEY WORDS	Composite materials, reinforcement, matrix, fibers, composites machining, cutting tools, cutting materials, unconventional machining methods

Obsah

Obsah ... 6
Seznam použitých zkratek a symbolů ... 8
1. Úvod ... 9
2. Rozbor současného stavu ... 10
2.1. Charakteristika kompozitních materiálů ... 10
2.2. Synergismus ... 11
2.3. Rozdělení kompozitních materiálů ... 12
2.3.1. Strukturní rozdělení kompozitů ... 13
2.3.2. Částicové kompozity ... 14
2.3.3. Vláknové kompozity ... 14
2.3.4. Výztuž ... 16
2.3.5. Rozdělení vyztužujících vláken kompozitu podle materiálu ... 17
2.3.6. Povrchové úpravy výztuží ... 20
2.3.7. Formy výztuží ... 20
2.3.8. Matrice kompozitních materiálu ... 23
3. Sendviče ... 24
3.1. Vlastnosti sendvičových konstrukcí ... 25
3.2. Tuhost a pevnost v ohybu ... 25
3.3. Tepelná odolnost a odolnost proti ohni ... 25
3.4. Materiálové složení sendvičové struktury ... 26
3.4.1. Vnější vrstvy sendvičové struktury ... 26
3.4.2. Jádra ... 27
4. Obrábění kompozitů ... 30
4.1. Obrábění vláknově vyztužených kompozitů ... 31
4.2. Mechanizmus vzniku třísky ... 32
4.3. Chlazení ... 32
4.4. Ortogonální obrábění ... 32
4.5. Obecné obrábění řezáním ... 35
4.5.1. Soustružení ... 36
4.5.2. Řezné materiály pro soustružení ... 38
4.5.3. Vrtání, vyvrtávání ... 40
4.5.4. Frézování ... 42

4.5.5. Broušení ... 43
4.5.6. Dělení kompozitů ... 44
4.5.7. Tvorba třísky při broušení ... 44
4.5.8. Řezné síly ... 45
4.6. Nekonvenční metody obrábění ... 47
4.6.1. Elektroerozivní obrábění ... 47
4.6.2. Obrábění paprskem fotonů - laserem ... 47
4.6.3. Řezání vodním paprskem s abrazivem ... 49
4.7. Spojování kompozitních materiálů ... 50
4.8. Zdravotní rizika při práci s kompozity ... 52
5. Používané nástroje ... 53
5.1. Nástroje pro soustružení ... 53
5.2. Nástroje pro vrtání ... 54
5.3. Nástroje pro frézování ... 56
5.4. Teplo vzniklé při frézování ... 57
6. Směr budoucího vývoje ... 58
7. Experiment ... 58
7.1. Použité stroje ... 59
7.2. Použité nástroje ... 61
7.3. Popis obráběného předmětu ... 61
7.4. Postup měření experimentu ... 62
7.5. Výsledky ... 64
7.6. Zhodnocení ... 67
7.7. Návrh a řešení ... 70
8. Závěr ... 71
POUŽITÁ LITERATURA: ... 72
SEZNAM OBRÁZKŮ ... 74
SEZNAM GRAFŮ ... 77
SEZNAM TABULEK ... 77

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky použité v textu

PVC Polyvinylchlorid
FRP Vlákny vyztužené plasty
PKD Polykrystalický diamant
GFRP, CFRP, AFRP Glass (Carbon, Aramid) Fibers Reinforcement Plastic
CVD Chemical vapor deposition (metoda povlakování)
PVD Physical vapor deposition (metoda povlakování)
SK Slinutý karbid
EDM Electro discharge machining (elektroerozivní obrábění)
AWJM Abrasive water jet machining (obrábění vodním paprskem s abrazivem)
HSS High speed steel (rychlořezná ocel)
HPL High pressure laminates (vysokotlaké lamináty)

Symboly použité v textu

Značka veličiny, symbol	**Jednotky**	**Popis**
θ	[°]	Úhel orientace vláken
ae_{min}	[mm]	Minimální tloušťka třísky
F	[N]	Síla
v_e	[m/min]	Rychlost řezného pohybu
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[m/min]	Posuvová rychlost
P_{fe}	[1]	Pracovní boční rovina
φ	[°]	Úhel posuvového pohybu
η	[°]	Úhel řezného pohybu
γ_o	[°]	Úhel čela

1. Úvod

Žijeme v době, kdy se technologie a materiály neustále rozvíjejí. Protože měl ve všech fázích lidského vývoje materiál velký vliv, tak se tato závislost stupňovala s rozvojem civilizace až do dnešní doby, kdy se stává omezující veličinou prakticky ve všech odvětvích. Od původního použití ve vojenském průmyslu (námořnictvo) se postupem času využití kompozitních materiálů rozrostlo do dalších odvětví (automobilové, letecké, sportovní, elektronické i spotřební).

Kompozitní materiály jsou hojně využívány téměř ve všech oborech průmyslové výroby a výzkumu především díky svým unikátním a jedinečným vlastnostem. Současný výzkum kompozitních materiálů se neustále vyvíjí a pokračuje v dosud nevyzkoušených kombinacích, proto stále roste množství příležitostí pro jejich uplatnění.

Slovo kompozitní, znamená vytvořený, nebo složený ze dvou, či více odlišných částí. Pod pojmem kompozit si většina lidí představí vlákny vyztužené polymerní matrice, ale do této kategorie spadá široké spektrum materiálu. Materiály dříve používané především pro zbrojní průmysl a speciální odvětví výzkumu se dostávají do styku s produkty používanými v běžném životě. Podstatně novějším materiálem spadajícím mezi kompozitní je železobeton. Materiál veřejností nedoceněný, považovaný za naprosto běžný, ale z technologického hlediska naprosto převratný. A to nejen z hlediska vynikajících vlastností, ale hlavně svojí jednoduchostí zpracování, která umožňuje jeho použití ve stavebnictví. Jen těžko si lze představit stavbu výškových budov z jiného materiálu, který by vykazoval podobné nebo dokonce lepší vlastnosti. Kromě železobetonu byl ve dvacátém století objeven také sklolaminát (skleněná vlákna v pryskyřičné matrici), linoleum nebo také výrobky z pryže vyztužené různými druhy vláken. Aplikace keramických a kovových matricí je využívána dodnes, hlavní místo ve výrobě však zaujaly materiály s polymerní matricí, jelikož vyhovují nárokům na požadované vlastnosti kompozitních materiálu kladené dnešním trhem.

Velice moderními kompozitními materiály jsou vláknité materiály s kompozitní matricí. Jejich mechanické vlastnosti mohou být při správném způsobu zpracování velice dobré a pouhou změnou orientace vláken nebo jejich přidáním je možné významně změnit chování materiálu při zatížení v určitém směru. Výrobek tak může být v jednom místě pružný a v druhém zase velice houževnatý, přestože je vyroben v celku bez spojů, nebo jakékoli chemické úpravy. Také jsou zajímavé z estetického hlediska. V této době je velice módní spojení černého, bílého a stříbrného karbonu (materiál z uhlíkových vláken různého typu, které mají odlišnou barvu) a konečné broušení. Tím lze dosáhnout efektu podobného damascénské oceli. Takové zpracování je ojedinělé a jedná se spíše o zakázkovou výrobu.

Kompozitní materiály se dnes používají v konstrukčních aplikacích a v produktech v mnoha průmyslových oblastech. Jejich využití je především díky vysokým hodnotám specifických vlastností jako pevnosti a pružnosti vztažené na jednotku hmotnosti, kterým nemůže žádný konvenční materiál v porovnání konkurovat. Přestože jsou materiály vyráběny rovnou v konečných tvarech a rozměrech, stále rostou požadavky na jakost, funkčnost a estetické vlastnosti vyžadující použití nejnovější technologie obrábění. Proto se stává práce konstruktérů obtížnější, když společně s konstrukčním návrhem celku je také důležité navrhnout materiál, z něhož budou jednotlivé prvky vyrobeny a zhodnotit technologii výroby s požadovanou životností v daných podmínkách. Obrobitelnost těchto materiálů je problematická, a proto závisí na používaných nástrojových materiálech, geometrii a způsobu provádění obráběcích operací. Navíc řada metod výroby je stále vyvíjena či zdokonalována.

Jak je vidět, současně nabízený sortiment kompozitních materiálu je velice rozsáhlý. Celé oblasti je tedy třeba z důvodu časté aktualizace věnovat náležitou pozornost.

2. Rozbor současného stavu

2.1. Charakteristika kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou vytvořeny, či složeny ze dvou, nebo více částí, které se výrazně liší svými vlastnostmi. Jednotlivé složky se označují jako fáze. Jedná se tedy o složený materiál, který se vyrábí mísením. Pokud je heterogenní materiál složený ze dvou, nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi a tedy i vlastnostmi výsledného složeného materiálu, jsou značně rozdílné od vlastností jednotlivých fází a pokud je mezi jednotlivými fázemi zřetelné rozhraní, označujeme takovýto materiál jako kompozit. Podmínka heterogenity vylučuje z kompozitního materiálu například slitiny kovu. Druhou podmínku nesplňují materiály barvené částečkami pigmentu, které však nemají na výsledné vlastnosti téměř žádný vliv. Vzniklé vlastnosti kompozitu nelze získat z jakéhokoliv materiálu jedné fáze. [8]

Mezi kompozity nelze řadit běžné kovy, protože obvykle obsahují různé nečistoty, popř. legující prvky a nemají ani vlákenný charakter. Jednotlivé složky v kovech mají totožné vlastnosti jako například modul pružnosti. Kompozitem nemohou být ani plasty, jelikož obsahují plniva a malé množství tuhých barviv, pohlcovačů ultrafialového záření a dalších příměsí pro zlehčení výrobních procesů, které mají zanedbatelný vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti. Tyto příměsi se přidávají z důvodu zvýšení houževnatosti, ale nejedná se o výztuž a tak se modul pružnosti naopak zmenší. [8]

Kompozity jsou složené materiály, které se odlišují od slitin tím, že jednotlivé složky si ponechávají své charakteristiky, ale jsou tak vloženy do materiálového systému, kde se uplatní pouze jejich přednosti a potlačí jejich nedostatky, aby se docílilo zlepšení jejich vlastností. Vlastní vznik kompozitu je uskutečňován vložením jedné nebo více nespojitých fází do fáze spojité. Nespojitou fázi nazýváme výztuž, zatímco spojitá fáze je známa pod pojmem matrice. Hlavním účelem výztuže je vyztužení, zpravidla má pevnější a tužší vlastnosti. Je ve tvaru dlouhých vláken, částic, nebo whiskerů. Výztuž zajišťuje vysoké mechanické vlastnosti, tj. určuje pevnost, tuhost, ale i elektrické vlastnosti budoucího kompozitu a posiluje matrici v preferenčních směrech. Podíl výztužné fáze v materiálu musí být větší než 5%, množství výztužné fáze určuje mechanické vlastnosti. Matrice slouží jako pojivo výztuže, její charakter by měl být především poddajný a plastický. Její funkce je chránit zpevňující fázi, rozložit napětí do vyztužujících složek, a dále zajišťovat finální podobu kompozitní součásti. Při spojování matrice s výztuží je třeba zajistit správné rozmístění výztuže v příčném řezu tak, aby byly zajištěny dobré mechanické vlastnosti. Podle druhu matrice je možné získat speciální vlastnosti jako odolnost proti korozi, elektroizolační vlastnosti a odolnost proti vysokým teplotám a ohni.[8]

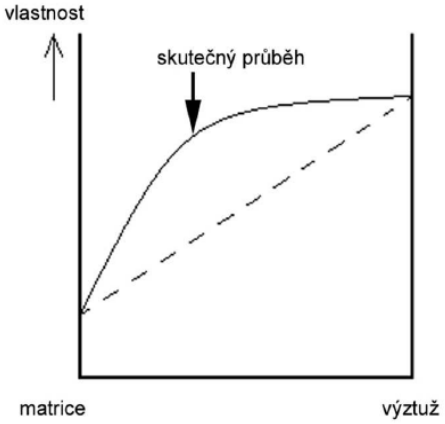
Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Největší význam v průmyslu mají mikrokompozitní materiály, u kterých jsou největší příčné rozměry výztuže vláken nebo částic až 10^2 μm. Kovy a jejich slitiny mají v porovnání s mikrokompozitními materiály větší hustotu a horší poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, celkově tak dosahují menší měrné pevnosti. [25]

Makrokompozity obsahuji výztuž o velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm a jsou používány hlavně ve stavebnictví, jako železobeton, což je beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty, polymerbetony, obsahující drcené kamenivo a pryskyřici. Za makrokompozity lze považovat i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce například chodníky a vozovky. [25]

Nanokompozity jsou to kompozitní materiály, které mají rozměr výztuže (délka částice nebo průměr vlákna) v nano jednotkách. Jedná se o zcela nový unikátní materiál, jehož potenciál lze špatně odhadnout, pouze lze předpokládat, jak ovlivní rozsah použití kompozitních materiálů. Při nízkých teplotách mohou být supravodivé a vodivost je možno ovlivňovat přítomností iontů. [25]

2.2. Synergismus

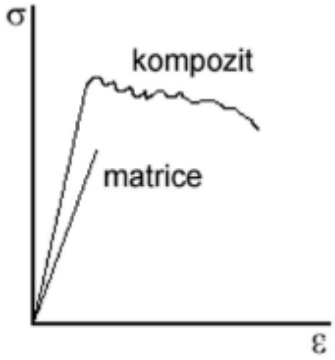
Kompozitní materiály mají široké uplatnění kvůli svým významným vlastnostem převážně v průmyslových oblastech, kde nejsme schopni uspokojit požadavky na materiál vlastnostmi konvenčních slitinových materiálů, keramických nebo polymerních materiálů. Tyto materiály jsou oblíbené v konstrukcích, kvůli svojí nízké hmotnosti a zároveň dosahují vysokých pevnostních hodnot. Většinou od materiálů požadujeme kombinaci vlastností, které splňují právě kompozitní materiály. [26]



Obr. 1 Synergické chování složek kompozitu [20]

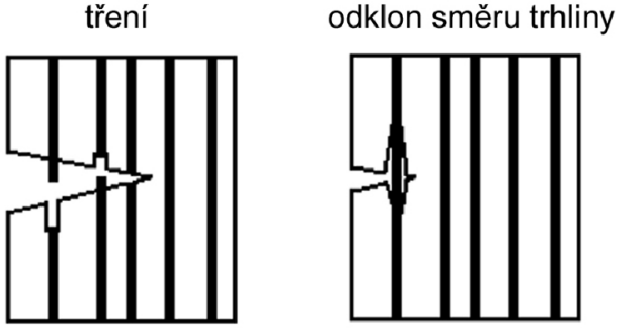
Největší předností kompozitu je tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší než pouze poměrný součet vlastností jednotlivých složek. Kompozity jsou vlastně složené materiály, u kterých se po smíšení materiálů s odlišnými vlastnostmi vytvoří úplně nová, jediná struktura. Pro získání nových vlastností materiálu přispívá synergismus velkou měrou.

Jako příkladem může posloužit kompozit složený z keramické matrice vyztužený keramickými vlákny. I když jsou samostatné matrice i vlákna velmi křehká, výsledný kompozit je typický svou odolností proti křehkému porušení a mírnou houževnatostí. Důkazem je na obrázku 2 porovnání tahových digramů křehké matrice a matrice vyztužené křehkými vlákny (kompozit).



Obr. 2 Porovnání tahových diagramů křehké keramické matrice a kompozitu [20]

Takovéto chování uvedeného keramického kompozitu způsobuje šířící se trhlina lomu, která je brzděna na hranici matrice a výztuže. Zde dochází k odklonění směru šíření trhliny, vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Klíčovou úlohu sehrává tzv. rozhraní mezi matricí a výztužnými vlákny, které zásadně ovlivňuje výslednou kvalitu kompozitu.



Obr. 3 Jevy na rozhraní matrice a výztuhy[20]

Rozložení a interakce mezi jednotlivými složkami zásadně ovlivňují vlastnosti kompozitu. Proto je důležité zohlednit geometrii systému, který určuje tvar, velikost a způsob vrstvení, koncentraci, koncentrační distribuci a orientaci vyztužení.

Koncentrace zobrazuje relativní obsah fází v objemovém nebo hmotnostním podílu. Parametr koncentrace je zásadní hodnotou ovlivňující vlastnosti kompozitu a je dobře kontrolovatelný z hlediska případné úpravy vlastností kompozitu.

Koncentrační distribuce je míra homogenity systému určující rozsah, ve kterém se daný objem materiálu může odlišovat fyzikálními nebo mechanickými vlastnostmi od průměrných vlastností materiálu. Zhoršující vlastnosti v systému způsobují nerovnoměrnosti a jsou způsobené nejslabším článkem. Pokud je materiál nehomogenní, vyhlídka na vznik lomu bude pravděpodobně v oblasti s nejmenší pevností.

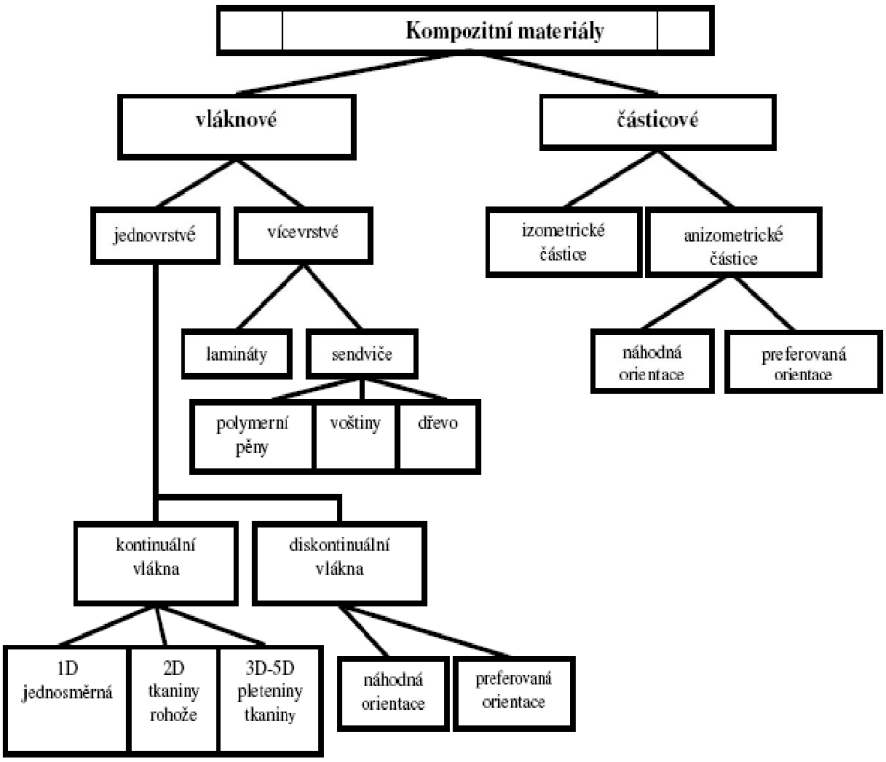
Orientace výztuže ovlivňuje izotropii systému. Jestliže se v kompozitu nacházejí částice podobné tvarově a rozměrově ve všech směrech (rovnoosé), je materiál izotropní – nezávislé vlastnosti na směru. Pokud jsou částice odlišné a náhodně uspořádané, materiál se jeví jako anizotropní. V ostatních případech se materiál chová s anizotropií a může vzniknout lom, pokud bychom působili ve směru s fyzikálně nejhoršími vlastnostmi. Díky tomu můžeme navrhnout konstrukce pevné a extrémně lehké se skvělými mechanickými vlastnostmi, které jsou schopné vzdorovat vysokým namáháním. [13],[20],[24],[25]

2.3. Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity jsou vyráběny za účelem zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tažnost, tuhost či odolnost proti vysokým teplotám. Vlastnosti kompozitu jsou především závislé na charakteru výztuže, povaze matrice, ale hlavně na geometrii vyztužení. Rozdělit kompozitní materiál je možno podle mnoho různých hledisek. Základní rozdělení je podle materiálu matrice, tj. podle základní spojité fáze, rozeznáváme kovové kompozity (slitiny, kovy zpevněné disperzemi, kovy vyztužené částicemi, kovy vyztužené vlákny), dále polymerní kompozity s termoplastovou, reaktoplastovou, nebo elastomerní matricí, zpevněné jinými polymery, partikulárními nebo fibrilárními plnivy, keramické kompozity a ostatní anorganické kompozity (obvykle na silikátové, vápenaté nebo síranové bázi), popř. jejich kombinace, nejčastěji u dvoustrukturních nebo vícestrukturních systému. Podle velikosti

příčného rozměru výztuže jsou rozděleny na mikrokompozity, makrokompozity a nanokompozity.

Z jiného hlediska muže být struktura, či geometrická charakteristika dispergované (vložené) fáze do matrice. Podle toho rozeznáváme disperzní kompozity (disperzní zpevněné kovy), částicové kompozity (partikulární, granulární), s částicemi pravidelných tvaru (koule, destičky) nebo nepravidelných tvaru nebo s plynnými inkluzemi (lehčené polymery, pěnobeton) a vláknové kompozity s dlouhými vlákny (obvykle uspořádanými) nebo s krátkými vlákny (obvykle neuspořádanými nebo jen částečně orientovanými). Granulární částice mohou být z různých druhů látek, dlouhá vlákna jsou obyčejně skleněná, uhlíková nebo polymerní, krátká také uhlíková, borová, wolframová, azbestová a další. Další hledisko muže být např. technologické neboli výrobní hledisko, avšak pro popis základních vlastností a chování kompozitu slouží mechanické hledisko. [24]



Obr. 4 Rozdělení kompozitních materiálů [26]

2.3.1. Strukturní rozdělení kompozitů

Hlavním kriteriální faktor kompozitu jako celku, je jeho superstruktura. Takto označujeme fáze pro odlišení od struktury, ovlivňující situaci hlavně na vnitřním rozhraní. Pokud separujeme při abstrakci jednotlivé tekuté a tuhé fáze, které jsou přítomné, vytvoří tyto fáze svou vlastní oddělenou infrastrukturu, ale pouze při stejné konfiguraci, jakou mají v uvažovaném kompozitním systému. Pojem mikrostruktura slouží pro popis strukturního uspořádání substance, například polykrystalu, jednotlivých minerálů, z nichž je složena některá fáze.

Jako příklad slouží například cementový beton, jeho strukturní uspořádání popisuje superstrukturu, která je složena z infrastruktury pojiva, infrastruktury tekuté fáze a infrastruktury plniva. Pojivo se skládá z mnoha minerálů nacházejících se ve vlastní struktuře a každý materiál má vlastní infrastrukturu. Stejné pravidlo platí i o každém zrnku plniva.

Infrastruktura, což jsou póry, můžou být tvořeny plynem, nebo tekutinou, která může být například roztokem s vlastní strukturou.

Je mnoho typů superstrukturních systémů, od soustav s jednou spojitou fází a s jednou nebo více dispergovanými fázemi (tzv. jednostrukturní systémy) k soustavám se dvěma nebo více spojitými fázemi, z nichž každá může obsahovat jednu nebo více dispergovaných fází (tzv. dvoustrukturní nebo vícestrukturní systémy). Vícestrukturnost přináší struktuře kompozitu většinou mnohem lepší vlastnosti. Dalším určujícím faktorem kompozitu jako celku (kvantitativně i kvalitativně) jsou mezifázové hranice (rozhraní fází), a tedy specifický vnitřní povrch, definovaný celkovou stykovou plochou fází v jednotce objemu. Protože se jedná o systémy, kde při působení chemických a fyzikálních sil na rozhraní zůstává materiál tuhý i při působení vnějších sil, hovoříme o strukturních konjugovaných systémech.

Granulární systém jes ystém, kde částice nemají osové vzdálenosti příliš rozdílné. Pokud je u částic jeden rozměr značně delší než ostatní, jedná se o fibrilární systém, anebo pokud je jeden rozměr oproti ostatní značně menší, je to systém laminární. Základní hledisko pro hodnocení superstruktury je nutno určit, zda druhá dispergovaná fáze, vložená do matrice je segregována. To znamená, jestli není ve vzájemném přímém kontaktu, nevytváří vlastní strukturu, je v některém směru fázově nespojitá, nebo není-li naopak agregována. [25]

2.3.2. Částicové kompozity

Částicové, jinak zvané partikulové kompozity mají výztuž známou jako nevlákenný tvar a nejsou tedy rozměrově dlouhé. Tvar vyztužujících částic může být kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý nebo nepravidelného tvaru. Hodnota velikosti částic určuje míru, jak se výztuž podílí na celkových vlastnostech kompozitu. Jednotlivé částice v kompozitu vlivem své vlastní tvrdosti zamezují rozvoji plastických deformací v matrici a podílejí se na přenosu namáhání, to má za následek zvýšení tuhosti, avšak jsou méně účinné při odolnosti vůči lomu.

Jako činidla se označují přísady, plniva, či aditiva, která se přidávají do matrice kompozitního materiálu. V porovnání jejich účinností je dělíme na přísady snižující cenu, přísady ovlivňující výrobní proces a přísady ovlivňující funkce. [26]

Činidla se používají, aby zlepšila tepelnou a elektrickou vodivost, vysokoteplotní odolnost, obrobitelnost, zvýšení povrchovou tvrdost a odolnost proti opotřebení, používají se hlavně u plastů. Materiál se volí podle požadovaných vlastností, například olovo se obvykle mísí se slitinami mědi a oceli kvůli zlepšení obrobitelnosti, wolfram a molybden se přidávají pro odolnost vůči vysokým teplotám. Pro zvýšení povrchové tvrdosti je výhodné přidat karbid wolfram do kobaltové matrice. [26]

Kompozit se běžně používá pro přesná měřidla, nebo na průvlaky pro tažení drátů. Příklad částicových kovových a keramických kompozitů jsou cermety, což je vlastně spojení keramiky a kovu. Tento materiál je speciální svojí žáruvzdorností, které se docílí spékáním keramických a kovových prášků. Využívá se především při vysokorychlostním obrábění, na pouzdra termočlánků a na vývody pecí. Speciální případ částicových kompozitů je tzv. vločková výztuž, která má ve všech směrech stejnou pevnost a výbornou elektrickou vodivost, ale není příliš používaná z důvodů náročné výroby. [12]

2.3.3. Vláknové kompozity

Vláknové kompozitní materiály se využívají celou řadu let. Příkladem jednoduchých, ale technologicky převratných kompozitů mohou být dříve vyráběné cihly vyztužené celulozovými vlákny, dnes známé jako železobeton. Vláknové kompozity lze dělit na jednovrstvé a vícevrstvé. Kompozity se podle vlákna rozdělují na dlouhovláknové (vlákna -

vyztužená dlouhými neboli spojitými vlákny) a krátko vláknové kompozity (vyztužené diskontinuálními vlákny).

Vlastnosti jsou definovány podle orientace vláken a směrem vyztužení. Orientaci krátkých vláken nelze snadno řídit, protože mají náhodné umístění. Délka krátkých vláken a jejich orientace určují vlastnosti těchto materiálů. V kompozitech vyztužených spojitými vlákny mají vlákna za úkol hlavní nosné složky přebírat působící zatížení přímo na ně. Druh porušení je dán vlastnostmi vláken. Kompozit se vyrábí vložením vláken a následným prosycením pryskyřice, která udržuje vlákna v dané poloze. Formy, které předimpregují vlákna, se nazývají *prepregy*. Princip vláknového vyztužení je, že vyztužující vlákna mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost v porovnání s pojivem, proto se při vnějším namáhání deformují méně oproti polymeru.

Kompozity, kde jsou vlákna vkládaná rovnoběžně v jednom směru, jsou označovány jako jednosměrné. Tyto kompozity se vyznačují vysokou pevností ve směru vláken, ale významně menší pevností ve směru kolmém na vlákna. Proto se prepegy vkládají ve dvou nebo třech kolmých směrech a pevnost je potom ve všech směrech stejná. Počet směrů není nijak omezen. Vlákna jsou navíjena ve formě rovingu, kdy výztuží je nekonečně dlouhé vlákno odvíjené ze špulky, nebo jsou spřádána do pletenin, rohoží, nebo tkanin. Podstatným rysem orientace vláken může být takzvaná specifická pevnost, kdy je předpoklad zatížení pouze v jednom směru, a proto je výztuž pouze jednosměrná. Výsledkem je kombinace vysoké pevnosti kompozitního dílu a malé hmotnosti. Řízená anizotropie znamená záměrné ovlivňování návrhu a výroby kompozitu. [24]

typ kompozitu	vlákna	matrice	objemový podíl vláken [%]	mez pevnosti v tahu	modul pružnosti v tahu [GPa]
B/Al	kontinuální	AlMg1SiCu (6061), T6	50	1500	210
SiC/Al	kontinuální	AlMg1SiCu (6061), T6	50	1450	200
SiC/Al	krátká	AlCu4Mg1.5 (2024), T6	20	650	110
C/Al	kontinuální	AlMg1SiCu (6061), T6	40	550	300
Al_2O_3/Al	krátká	AlMg1SiCu (6061), T6	20	370	97

Tab. 1 Informativní hodnoty mechanických vlastností vláknových kompozitů [20]

2.3.4. Výztuž

Výztuž má za úkol v kompozitním materiálu zabezpečit mechanické vlastnosti materiály, jako je pevnost a tuhost. Také elektrické vlastnosti závisí na výztuži, a proto má typ výztuže hlavní vliv na vlastnosti výrobku. Nejčastěji používaným typem výztuže je skleněné vlákno, uhlíkové a kevlarové vlákno. Skleněné vlákno udává kompozitu univerzální dobré vlastnosti, zatímco uhlíková vlákna jsou charakteristické svojí vysokou tuhostí. Profily z kevlarových vláken skvěle odolávají rázům. Karbonová vlákna propůjčují profilům elektrickou vodivost a profily vyztužené skleněnými vlákny zajišťují elektrickou izolaci i elektromagnetickou transparentnost.

Konstrukční profily jsou často vystaveny zatížení, které působí ve směru kolmo k jejich délce, tj. kolmo ke směru pultruze. Tyto profily musí být způsobilé odolávat tahům a také napětí vyvolané při odstraňování šroubů. Proto se používá nejenom jednosměrně orientovaný roving, ale také roving s příčně orientovanými vlákny. Kromě toho se používají rohože a tkaniny s rozličnou orientací vláken. Rohože a tkaniny s orientací vláken mezi 45° a 90° zásadním způsobem zvyšují odolnost vůči napětí vyvolanému při odstraňování šroubů a zlepšují mechanické vlastnosti v příčném směru. [13]

Rozměry výztuže

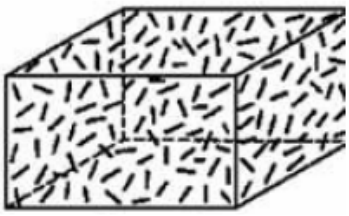
Rozměry vyztužení určují rozsah způsobilosti výztuže přispívat na výsledných vlastnostech kompozitu. Mezi tyto parametry patří:

- Tvar – mohou být zvoleny vlákna nebo částice
- Koncentrace – podíl výztuže v kompozitním materiálu
- Orientace – izotropní, anizotropní

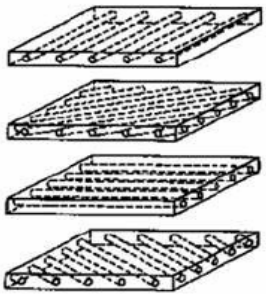
Tvar je tvořen buď koulí, v tomto případě se jedná o částice, nebo válcem (vlákna). Nejvýhodnější tvar výztuže jsou protáhlé, tzn. vlákna, pásky, ale i jiné délkové tvary. Výztuže dlouhých rozměrů je vhodné volit pro jejich vynikající schopnosti brzdění růstu počátečních trhlin kolmých k vyztužení, takto zamezuje počátečnímu vzniku nežádoucích lomů.

Koncentrace vyjadřuje objemový nebo hmotnostní podíl vyztužující fáze. Důležitá je stejně jako tvar výztuže, protože podstatně ovlivňuje parametry budoucího kompozitu.

Poslední pojem je orientace, působící na izotropii kompozitu. Izotropie je jev, kdy nezávisí na směru, v němž se fyzikální vlastnosti měří. Tudíž jsou vlastnosti izotropního materiálu ve všech směrech stejné. Izotropii kompozitního materiálu dosáhneme volbou výztuže, která bude mít ve všech směrech rozměrově stejné částice. Pokud použijeme výztuž ve formě vláken, tak bude mít materiál anizotropní vlastnosti, které jsou v každém směru různé. Anizotropie materiálu je nejvýraznější v jednosměrném uložení dlouhých vláken, ale v případě dvouosého uspořádání bude anizotropie nižší. [20]



Obr. 5 Krátká vlákna[5]



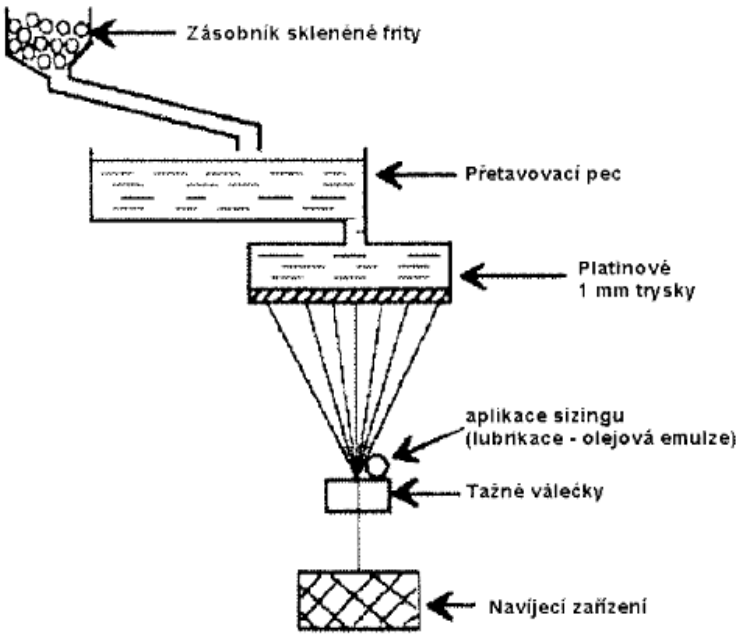
Obr. 6 Dlouhá vlákna[26]

2.3.5. Rozdělení vyztužujících vláken kompozitu podle materiálu

Skleněná vlákna

Používají se zejména při spojení s polymerní matricí. Jsou těžší než vlákna grafitová nebo polymerní, protože jejich hustota je přibližně 2,5 g/cm^3 , ale mají výborný poměr mezi cenou, hmotností a vlastnostmi. Textilní výrobky ze skla se používají jako izolace, anebo ke zpevnění jiných materiálů. Pro sklo je charakteristická vysoká pevnost, odolnost vůči abrazivnímu opotřebení a nízký modul pružnosti. Mezi výhody patří odolnost proti ohni, nebo chemikáliím a malá tepelná roztažnost, což je ve spojení s vhodnou matricí výhodné na výrobu tepelně namáhaných materiálů. Nevýhodou je malá odolnost proti únavě a nízká adheze k matrici. Tu lze zvýšit vhodnou povrchovou úpravou, která ovšem naopak snižuje pevnost kompozitu. V závislosti na obsahu jednotlivých složek a chemických prvků je vyráběno mnoho druhů skelných vláken, lišícími se svými vlastnostmi.

Skleněná vlákna jsou vyráběna z taveniny. Už při výrobě se vlákna impregnují, protože při jejich vzájemném kontaktu by se poškodil povrch, na kterém závisí mechanické vlastnosti vlákna. Pevnost se snižuje také degradací vláken vzdušnou vlhkostí. Už při hloubce trhliny 1,4 μm klesá pevnost na třetinovou hodnotu. [11]



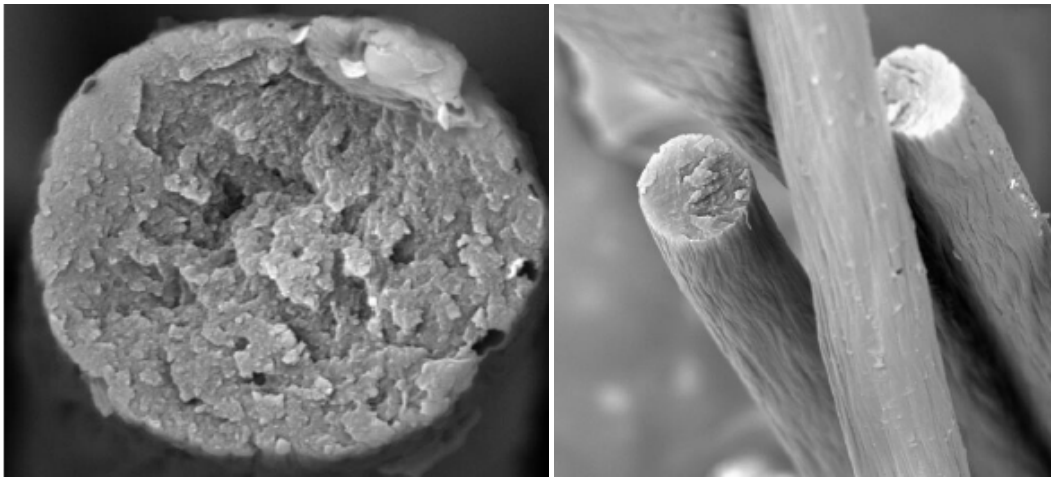
Obr. 7 Schéma výroby skelných vláken [5]

Uhlíková vlákna a grafitová vlákna

Uhlíkové vlákno obsahuje uhlík s různými modifikacemi. Od ostatních textilních vláken se liší hlavně svojí malou ohebností a křehkostí, ale jinak mají široké spektrum mechanických vlastností při zachování malé hustoty. Vlákna s obsahem uhlíku 90–95% mají v porovnání se skelnými vlákny skoro desetinásobnou tuhost, ale nižší pevnost, která neklesá až do 1000°C. Atomy uhlíku jsou orientované paralelně k ose vlákna a zároveň jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly. Mezi jednotlivými mikrokrystaly jsou mikroskopické dutiny, které zajistí, že uhlíkové vlákno je vzhledem ke své tloušťce velice pevné. Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností, modulem pružnosti, abrazivními schopnostmi a odolností vůči únavě. Tato vlákna vykazují jen minimální teplotní roztažnost a za normální teploty jsou chemicky inertní. Hustota je 1,8 – 2 g/cm^3 a jsou tedy lehčí než skleněná vlákna. Vlákna jsou tepelně odolná, do 1000 °C nepotřebují zvláštní ochranu, pokud jsou chráněna vůči oxidaci,

jsou stabilní až do 2000°C. Vyšší obsah uhlíku mají vlákna grafitová, s čímž souvisí jejich lepší elektrická a tepelná vodivost. Elektrická vodivost je díky obsahu uhlíku, uspořádání krystalů určuje tepelnou vodivost a teplotu výroby. Vyšší obsah uhlíku mají jen vlákna grafitová, která mají ještě lepší elektrické a tepelné vlastnosti. Uhlíková vlákna jsou lehčí a mají výraznější adhezi k pryskyřicím, ale nemají takovou pevnost a lehce absorbují vzdušnou vlhkost. Jejich nevýhoda je vysoká cena a při styku s kovem dojde k elektrochemické korozi kovu.

Vyrábět uhlíková a grafitová vlákna lze několika způsoby. V průmyslové výrobě je nejvyužívanější teplotní oxidace organických vláken. Uhlíková a grafitová vlákna jsou si podobná svými vlastnostmi a strukturou. Liší se obsahem uhlíku (grafitová nad 92%), který je dán teplotou zpracování (uhlíková 800 – 1600 °C, grafitová více než 2200 °C). Výroba probíhá ve třech krocích. V prvním kroku jsou organická vlákna oxidována při teplotě 200-400°C. Další dva kroky už probíhají v inertní atmosféře. Karbonizace se provádí při teplotě 1000 – 1500 °C a grafitizace také v inertní atmosféře, avšak při teplotě vyšší jak 2200°C. [11]



Obr. 8 Uhlíkové vlákno [5]

Aramidová vlákna

Mezi největší přednosti polymerních vláken patří nízká hustota a vysoká poměrná pevnost v tahu a ze všech vláken nejsou křehké. Nejznámější produkty polymerních vláken jsou z aromatických polyamidů (aramidy, APA) od společnosti Du Pont, která vyrábí produkty kevlar a nomex. Produkty z kevlaru jsou využívány kvůli svým specifickým vlastnostem, především v armádním, leteckém a lodním průmyslu. Materiál nomex se používá pro výrobu voštin, nehořlavých oděvů a rukavic kvůli odolnosti proti vysokým teplotám, hořlavosti a chemikáliím.

Plastová vlákna

Jsou to polymerní vlákna s nižším obsahem uhlíku. V porovnání s grafitovými vlákny mají nižší pevnost, ale mají lepší poměr mezi pevností a hustotou. Poměr mezi tuhostí a hustotou je také lepší v případě těchto vláken. Jsou schopna vysokého prodloužení před tím, než dosáhnou meze pevnosti. Nevýhodou je při některých aplikacích nízká teplotní odolnost (i jinak velmi odolný kevlar degraduje bez speciální ochrany při 175°C). Také jim škodí UV záření za přítomnosti kyslíku, ale jsou odolná vůči chemikáliím. Pomineme-li fakt, že jsou špatně tepelně odolné, tak jejich lepší ohebnost a nízká tepelná vodivost je předurčuje pro výrobu nehořlavých obleků. Protože jsou nehořlavé obleky vystaveny extrémním teplotám pouze krátký časový úsek, tak jsou schopny bez problému ochránit uživatele, jelikož

k teplotní degradaci vláken dochází až po několika hodinách. Pevnost kevlaru se na rozdíl od ostatních vláken nemění s délkou. Pokud chceme vlákna využívat v tepelně náročném prostředí je nutné je chránit, anebo použít speciální typy. Mezi ně patří aramid, který je schopen krátkodobě odolávat teplotám až 2500°C a dlouhodobě 450°C. [11]

Keramická vlákna

Používají se zejména pro materiály, které jsou vystaveny vysokým teplotám. Jejich mechanické vlastnosti jsou málo závislé na teplotě. Proto je vhodné jejich použití s matricí, která je tepelně odolná (kovová, nebo keramická). V porovnání se skleněnými, grafitovými, nebo polymerními vlákny odolávají vyšším tlakům. Hodnota hustoty se pohybuje mezi hustotou plastu a kovu. Zpracovávají se ve formě prepregu, ve kterém jsou vázána vlákna polymerem, který se po zalití roztavenou kovovou matricí spálí. Výroba materiálu s matricí z hořčíkových a hliníkových slitin je kvůli malé hustotě (vlákna vyplouvají na povrch taveniny) výhodnější použít metodu vysokotlakého lití, nebo lisování za tepla.

Keramická vlákna se vyrábějí vytlačováním vodní suspenze při dostatečné hustotě tryskou, která má většinou kruhový průřez. Po vytlačení vláken se odpaří voda a vlákna se stabilizují vysokou teplotou (obvykle nad 1200°C). Keramická vlákna se příliš nevyužívají ve formě dlouhých vláken, ale spíše ve formě tyčinek. [11]

Kovová vlákna

Disponují vysokou hustotou, která je řadí mezi nevhodné materiály pro výrobu lehkých kompozitů, ale jejich výroba je v porovnání s ostatními vlákny levná. Často se využívají tam, kde váha nerozhoduje, například ve stavebnictví ke zpevnění betonu, nebo hliníkových slitin. Můžou se použít spolu s polymerní matricí. Pro vyztužení tepelně odolných materiálů se využívají wolframová vlákna. Cena kovových vláken je různá. Ocelová vlákna jsou levná a mají široké využití jako zpevněný beton, ale například beryliová vlákna jsou velice drahá.

Běžná kovová vlákna se vyrábí tažením kovového prutu, elektrochemicky a dalšími postupy. Výroba vláken z kovových skel je podobná výrobě skleněných vláken, ale proces chlazení je mnohonásobně rychlejší. To je důležité hlavně kvůli tomu, že by jinak docházelo ke krystalizaci kovu. [11]

Whiskery

Whiskery jsou oproti vláknům kratší. Za vlákna je materiál považován, pokud má délku nejméně 5 mm. Pokud nemá materiál vysoký poměr stran, je nazýván částicí. Částice nejsou považovány za výztuhu ve stejném smyslu, jako vlákna a whiskery. Whisker je tenký krystal, který má průměr 1μm , délku 3 – 4 mm a obsahuje jednu šroubovou dislokaci, jež není schopna kluzu při běžných zatíženích. Tato vlastnost je odděluje od monokrystalických vláken, která mají více schopností dislokačních kluzů. Protože jsou whiskery krátké, pravděpodobnost výskytu vad, je mnohem nižší než u konvenčních vláken. Z toho důvodu mají v průměru jednotlivé whiskery vyšší tahové vlastnosti, než jednotlivá vlákna. Pevnost whiskerů se blíží až k jejich teoretické pevnosti. Po překročení meze pevnosti se začnou objevovat volné dislokace a whisker se začne svým chováním podobat monokrystalickému vláknu. Doposud se deformuje pouze pružně.

Nicméně v kompozitu nejsou lepší vlastnosti často plně realizovány, protože účinky jsou zeslabeny kvůli problémům na koncích vláken. Kromě toho, že jsou whiskery mnohem blíže ke kritické délce, nejsou schopny udržet plný přenos síly z matrice na výztuž na tak dlouhou dobu, jako s délkami konvekčního vláken. Výroba whiskerů je velice komplikovaná, krystaly lze získat například kondenzací par některých látek ve vakuu. Mají velké nebezpečí pro

člověka, protože se nerozkládají v těle a můžou způsobit rakovinu plic. Whiskery jsou prodávány ve dvou různých formách. První z nich jsou válcovaná vlákna prodávané jako volné whiskery. Ty jsou vyrobeny rozřezáním a pak válcováním běžného vlákna. Válcování je operace, kde jsou vlákna umístěna pevně mezi válci a následně jsou válcována za tepla. Válcovaná vlákna jsou často používána k opravě kompozitů, aby vyplnila oblast v rozřezaných částech, které jsou příliš malé nebo úzké pro vhodné umístění vláken. Mnoho výrobců vláken vyrábí whiskery navíjené na cívku. Další způsob prodeje whiskeru jsou vkládané whiskery do matrice pryskyřice. Ty jsou výhodné pro svoji snadnou aplikaci. [16],[11]

2.3.6. Povrchové úpravy výztuží

Povrch je třeba chránit, anebo cíleně upravovat na požadované vlastnosti. To je ovlivněno nestabilitou některých vláken při působení vzduchu. Požaduje se zlepšení tepelné odolnosti a základní vlastnosti kompozitu, což je přenos napětí matrice na vlákno. K tomu potřebuje dobrou adhezi vlákna na matrici. Ochrana proti vnějším vlivům není tolik potřeba, protože vlákna jsou odolná vůči běžným podmínkám a po zalití do matrice jsou chráněna proti oxidaci, nebo mechanickému poškození. Dobrá adheze je důležitá hlavně pro výrobu kvalitních kompozitů, kvůli dobrému přenosu napětí na vlákno, ale také ochraně vláken. Jestliže by přilnavost nebyla dokonalá, mohly by do materiálu difundovat látky z okolního prostředí a vlákna postupně zničit. Pokud se zamezí přístup kyslíku, zvýší se jejich teplotní odolnost. Ideální případ je rozhraní vlákno – matrice je pouze dvou dimenzionální a neobsahuje žádnou mezivrstvu, která by nabývala mechanických vlastností. Ve většině případů tomu tak ale není. Mezivrstvy můžeme dělit podle jejich vzniku na řízené a neřízené.

Neřízené mezivrstvy vznikají při výrobě kompozitu. Jsou to například mezivrstvy vzniklé sorpcí tvrdidel na povrchu vláken a tím vyvolaná změna vytvrzovacího procesu, případně změna orientace krystalických domén, které vznikly při tuhnutí termoplastické matrice za přítomnosti vláken.

Řízené mezivrstvy označujeme jako třídimenzionální rozhraní v kompozitech, které vznikly právě řízeným procesem výroby. Tak mají definované vlastnosti a strukturu, proto lze vlákna upravit chemicky nebo plazmatem. Problematické je chování mezivrstev, kdy hlavně u neřízených mezivrstev je špatně předvídatelné chování. Nejlépe zpracované jsou metody měření jejich vlastností na povrchu vláken skleněných a grafitových. Ani v tomto případě nelze přesně říci, zda je měření přesné. Výsledky, které se dostanou různými způsoby, se liší mnohdy i o několik řádů.

2.3.7. Formy výztuží

Výztuže vláknitých kompozitů jsou kromě whiskerů dodávány nejčastěji ve formě pramenců navinutých na cívce (rovingy). Dále jsou zpracovány do formy určené k finálnímu zpracování. Délka a orientace vláken má podstatný vliv na vlastnosti konečného výrobku, proto si parametry volí výrobce předem pro daný výrobek. Také je důležitý obsah vláken. Druhy výztuží můžeme rozdělit do několika kategorií. [21]

Obr. 9 Prepreg v rolích a řezací plotr Zund [27]

Prepreg

Další metoda, která byla vyvinuta, umožňuje návrhářům optimalizovat orientaci vláken a také jej bez problému vyrobit. Velká většina zpracovatelů využívá vlákna k výrobě ve formě prepregu. Je to polotovar složený z rovingů, které se pojí částečně vytvrzenou pryskyřicí. Výhodný je držící tvar vláken, která dobře přilnou k formě, tím je významně ulehčeno jejich zpracování. Epoxidová matrice, která se nachází v prepregu má omezenou životnost, proto se prepregy skladují za teplot pod bodem mrazu, nejčastěji při -18 ºC. Před použitím se prepregy temperují jeden den v zavřeném obalu na pokojovou teplotu a poté se řežou konkrétní díly na vakuovém stole CNC řezacího plotru. Nástřihy prepregu pro pohledové díly musí být opatřeny fólií z obou stran, protože i mírně lepivý prepreg nalepuje nečistoty, které nesmí být zalisovány do produktů.

Tato moderní vlákna obvykle vyžadují přesnější řízení směru vláken, než lze získat s rohožemi. Například se může jednat o aplikace, kde 80% zatížení je v jednom směru. Proto chce konstruktér orientovat 80% vláken v tomto směru, potom je design efektivní, jak je to jen možné. Tkaniny s 80% svých vláken orientovaných v jednom směru jsou málokdy provedeny, protože nejsou dostatečně stabilní pro praktické aplikace.

Skládání vrstev do formy je nutno provádět v místnosti, kde je kontrolované prostředí. V této místnosti se musí mimo jiné udržovat čistota a konstantní hodnoty relativní vlhkosti, teploty a maximální obsah prachových částí. Vzhledem k tomu, že laminát je křehký (protože je zesítěný), konstrukce je zvláště citlivá na nárazy a střih. Nejkritičtější je skladba první vrstvy, kvůli požadavku absence řezání vrstvy a symetrie vláken. Jestliže první vrstva prochází skrz dva rádiusy, musí být hned na první pokus správně ustavena. Pokud se stane, že by jeden z rádiusů byl špatně pokryt, nelze tkaninu přitlačit a ta se pod tlakem vytáhne z protějšího rádiusu. Nevhodně pokládaná vrstva je tlakem nenávratně zdeformována a dále nepoužitelná. V prostoru nedostatečně vyplněného rádiusu se při vytvrzení nahromadí buď matrice, nebo v prostoru vznikne pór. V obou případech se jedná o zmetek. V reálu se položení provádí pomalým postupným pokládáním vrstvy od jedné strany formy s dotlačováním přechodů. Jestliže mají díly příliš mnoho přechodů, nebo křivost ve více rovinách, nastane případ kdy 2D vrstvy prepregu nelze položit vcelku. Potřebné řezy jsou přesně definovány a spoje jsou prováděny natupo, každý snopec vláken v řezu se přesně napojí. Pokud se spoje provedou špičkově, vizuálně nemusí řezy vadit, natož se dále upravovat. Poté se vrství další vrstvy, které se musí dotlačovat stejným postupem, ale můžou se řezat častěji a napojují se jednoduše s přesahem. Podle funkce výrobku mohou být v dalších vrstvách použity jiné druhy vláken, jen se stejným typem matrice. [16],[27]

Roving

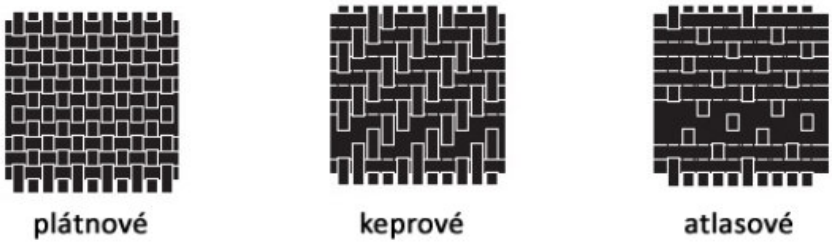
Je to pramenec nekonečných vláken, které jsou navinuté na cívku. Většinou roving obsahuje 12 až 120 vláken. Rovingy jsou určeny buď pro zpracování do jiných forem výztuží, nebo přímo na výrobu kompozitů.

Vyztužující rohož

Z krácených rovingů je vyráběna rohož. Rovingy jsou impregnovány organickými pojivy, jako jsou pryskyřice, nebo termoplast, jejichž obsah je 5 až 30 % hmotnosti a jsou lisovány za zvýšené teploty. Orientace vláken, která je náhodná, způsobuje zvýšení obsahu pryskyřice a má za následek snížení pevnosti a tuhosti. Jejich výhodou jsou kvaziizotropní vlastnosti, z pohledu makrohlediska má výrobek izotropní vlastnosti.

Tkanina

Tkaná výztuž je obdoba běžného textilu, ale při použití speciálních vláken. Tato výztuž má v kompozitu velmi vysoký podíl vláken, a tak má tedy vysokou tuhost a pevnost. Vlastnosti výztuže jsou dány jednak materiálem, ale i orientací vláken a jejich vzájemným vázáním. Tak může výrobek dosahovat vysoké tuhosti v jednom směru, ale ohebnost v jiném směru. Nevýhodou je složité a drahé projektování takovýchto výrobků.



Obr. 10 Základní typy skelných tkanin [28]

Povrchové rohože

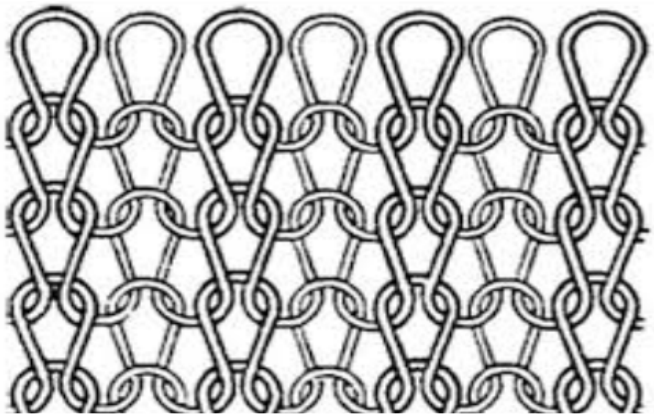
Mají velmi jemnou strukturu a malou plošnou hmotnost. Většinou jsou vyráběny z polyesterových vláken a ty mají minimální vliv na mechanické vlastnosti. Používají se především jako ochrana křehkého kompozitu vůči mechanickému poškození, ochrana proti účinku UV záření, nebo povětrnostním vlivům a také jako estetická úprava materiálu.

Pletené výztuže

Pletení vláknitých výztuží otevírá možnost výrobě komplikovaných dvou i třírozměrných útvarů. Přirozeně je nutno použít jen ohebná vlákna, protože při pletení dochází k jejich deformaci. Nebezpečím použití pletených výztuží je možnost vzniku křehkého lomu materiálu v oblasti s přebytkem pryskyřice. Navíc je v pletených výztužích malá část vláken orientovaných ve směru předpokládaného namáhání. Následkem je snadná deformace ve všech směrech.

Existují dva typy prošíváním laminátu. První se nazývá komplexní šití. To zahrnuje šití stehů po celém laminátu. Obvykle se tento typ provádí pro zlepšení obecných vlastností laminátu, jako je odolnost vůči interlaminárnímu střihu a zvýšení houževnatosti. Je zřejmé, že větší množství počtu šití a vyšívání (stehy na jednotku plochy) zlepšují zmíněné vlastnosti. Bohužel vyšší hustota vyšívání snižuje pevnost v tahu v rovině, čímž se snižuje pevnost v tahu v rovině laminátu. To není překvapující, protože šití vytváří nespojitosti v každé vrstvě laminátu.

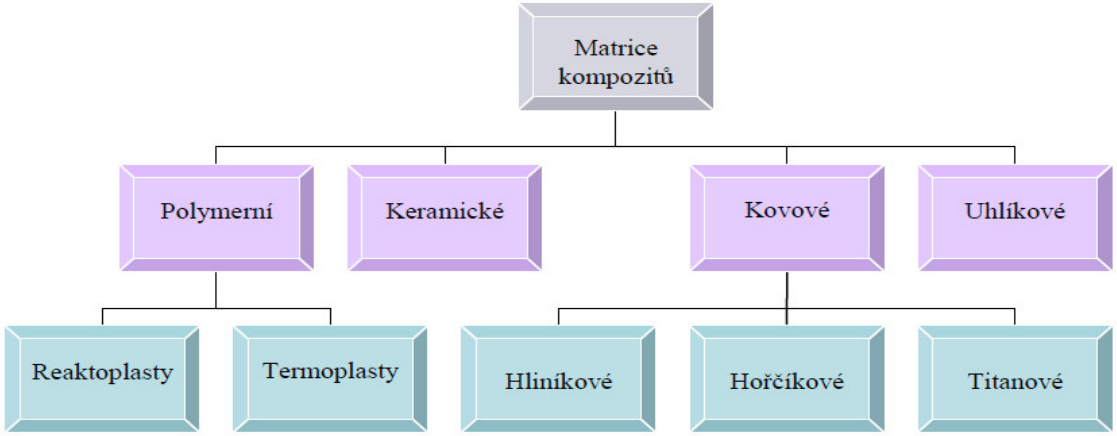
Druhý typ šití se nazývá selektivní šití. Jedná se o šití jen ve vybraných oblastech laminátu. Nejvhodnější oblastí, kde by mohlo dojít k šití je na spoji. V tomto případě je výhodou, že oblast s největší pravděpodobností výskytu smykových sil je šev právě posílen, zatímco další oblasti nejsou ohroženy ve svých vlastnostech. Zlepšení vlastností s prošíváním laminátu jsou zřejmá, protože se vrstvy neposunují a laminát zůstává se stejně poskládanými vrstvami. [16],[21]



Obr. 11 Pletená výztuž [30]

2.3.8. Matrice kompozitních materiálu

Matrice je složka kompozitu tvořící spojité prostředí výztuže. U vláknitých kompozitů určuje tvar výrobku a chrání ho před okolními vlivy. Matrice mají menší pevnost než vlákna. Kdyby to tak nebylo, nesplňoval by materiál podmínku kompozitu, jakou je zlepšení vlastností obou složek. Napětí přenášené na vlákna by je porušilo při nižším zatížení, než je kritické pro matrici bez výztuže. Matrice jsou nejčastěji kovové, polymerní a keramické. Výběr matrice je velmi podstatný pro výsledné vlastnosti materiálu. Například tepelně odolná vlákna v matrici s nízkou teplotou tání nemohou zajistit odolnost materiálu proti vysokým teplotám.



Obr. 12 Druhy matric kompozitních materiálů [20]

Kovové matrice

Mají vyšší hustotu než matrice polymerní, ale obvykle nemají tendenci ke křehkému lomu a mají vyšší teplotu tání. Velice podstatnými kovovými matricemi jsou slitiny hliníku (dural), hořčíku a titanu. Slitiny niklu se řadí mezi jedny z tepelně nejodolnější matric.

Keramické matrice

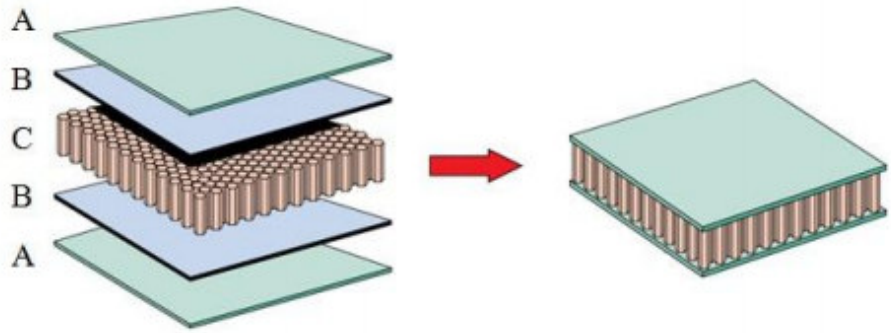
Keramické matrice vynikají v oblasti tepelné odolnosti a to je významné pro využití v kosmickém průmyslu. Významná je také jejich malá tepelná roztažnost a malá ztráta mechanických vlastností do teploty 1000°C, kdy se pevnost v tahu pohybuje kolem 800 MPa. Jsou velice tvrdé, avšak křehké. Běžné zpracování keramiky je za vysokých teplot, což ale není vhodné pro použití u vláken, která jsou špatně tepelně odolná. V případě keramické matrice se používá jiná metoda výroby. Výztuž je prosycována parami chemických látek, které se usazují na povrchu vláken, a chemickou reakcí se vytvoří keramická matrice. Tuto metodu je potřeba několikrát zopakovat, aby se zaplnily póry, které vznikají při růstu první vrstvy. Při výrobě kompozitu s výztuží odolnou vysokým teplotám je nejčastěji využívaná prášková metoda. Matrice ve formě prášku je současně s vlákny lisována za vysoké teploty. Takto vyráběné materiály mají výhodu v tom, že lze navrhovat a vytvářet komplikované tvary.

Polymerní matrice

Mezi nejčastější typy výztuže používané pro polymerní matrice jsou silná a křehká vlákna, zahrnutá do měkké a tvárné polymerní matrice. Polymerní matrice nemají tepelnou odolnost matric jako keramické nebo kovové, ale jsou lehké a můžou se zpracovávat do velice složitých tvarů. Výrobních postupů kompozitních materiálů s polymerní matricí je velké množství a řada výrobců používá své vlastní metody vhodné pro konkrétní použití. Zpracování a použití vláknitých kompozitů s polymerní matricí na bázi pryskyřic lze spojovat navíc lepením, lisováním, nebo mechanicky.

3. Sendviče

Jsou zvláštním druhem vícevrstvého laminárního kompozitu. Skládá se ze dvou vrstev vnějších (potahů, plášťů), které překrývají jádro ve středu materiálu (mezivrstvu) z lehkého materiálu. Vnější vrstvy jsou tenké, avšak tuhé, oproti tomu je vnitřní část většinou tlustší a obvykle z méně pevné hmoty. Sendvičový panel má v porovnání s jednoduchými lamináty vyšší tuhost, lepší izolační vlastnosti a menší hmotnost. Hlavní funkce jádra spočívá v přenosu smykového zatížení z jedné vnější vrstvy na druhou. Funkce vnější vrstvy je pak zajistit lepší mechanické vlastnosti, například tuhost a pevnost. [17],[29]



Obr. 13 Sendvičový panel (A - vnější vrstva, B – adhezní vrstva, C – voštinové jádro [17]

Sendvičové materiály přiřazujeme k vrstveným konstrukcím. Jsou tvořeny různými jednoduchými či složenými materiály, odlišných vlastností – pevnost, tvrdost, korozní odolnost, vzájemně pevně spojenými. Spojují vlastnosti tuhých povrchových materiálů a jádra

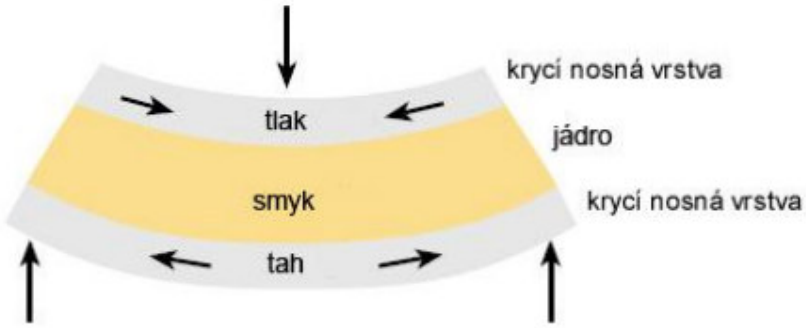
odolného proti smyku. Velmi důležitá je vazba povrchová vrstva – jádro. Nejdůležitější jádra jsou z profilovaných vrstev, voštin nebo pěn. Nejčastější materiály jsou dřevo, plasty nebo kovy. Samostatnou skupinu tvoří sendvičové materiály – laminární kompozity s velmi nízkou hmotností (dvě tenké vnější vrstvy překrývající nízko hmotnostní výplň – polymerní pěnu, voštinu – laminární). [29]

3.1. Vlastnosti sendvičových konstrukcí

Za efektivní strukturu sendviče považujeme takovou, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými vnějšími vrstvami zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím smykové síly mezi potahy. Sendvičové konstrukce se uplatňují z velké části v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich mimořádných vlastností, jako jsou velmi vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Sendviče se však vyskytují i v ostatních průmyslových odvětvích, například stavebnictví. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jediné výhody, patří mezi ně také odolnost proti únavě, šíření trhlin, rázům, vysokým teplotám, také dobře tlumí jako akustická izolace. Tyto vlastnosti závisí převážně na materiálu jádra. [41]

3.2. Tuhost a pevnost v ohybu

Na vnější vrstvy sendviče působí tlakové a tažné síly, proto jsou na vnější vrstvy používány lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky. Mezi velké výhody patří, že se zvětšující se tloušťkou sendviče, nedochází k výraznému navyšování hmotnosti. Vnitřní distanční materiál, tzv. jádro musí snášet smyková napětí a držet si velikost průřezu. Na obrázku 14 je vidět, že na vnější vrstvy sendvičové konstrukce působí tahové a tlakové síly, mezitím co materiál jádra musí udržovat velikost průřezu a odolává tak smykovému zatížení. [27],[41]



Obr. 14 Zatížení sendvičové konstrukce na ohyb [42]

Použitím sendvičového materiálu s vhodnou volbou tloušťky můžeme docílit značného zvýšení tuhosti a pevnosti v ohybu. Sendvičové konstrukce vykazují vysokou tuhost a pevnost v ohybu při zachování nízké hmotnosti.

3.3. Tepelná odolnost a odolnost proti ohni

Stejně jako na ostatní strojírenské výrobky, tak i od sendviče je požadována tepelná odolnost. Zde se však musí brát v úvahu tepelná odolnost všech složek sendviče, tj. potahů, jádra i spojovacího lepidla. U tepelné odolnosti má velký vliv tepelná vodivost použitých materiálů. Při vysoké tepelné vodivosti použitých materiálů je ohřev sendviče nižší, než při nízké tepelné vodivosti (při ohřevu sendviče pouze na jedné straně). Této vlastnosti se využívá při stavbě

kosmických raket, kde se právě z tohoto důvodu používají hliníkové voštiny. Při návrhu sendvičů pro dopravní techniku je nutné vždy respektovat požadavky oborových konstrukčních předpisů na odolnost proti ohni. Všechny použité materiály musí mít atesty, že splňují příslušné předpisy odolnosti proti ohni. [41]

3.4. Materiálové složení sendvičové struktury

3.4.1. Vnější vrstvy sendvičové struktury

Relativně tenké a pevné materiály se používají jako krycí vnější vrstvy sendvičových konstrukcí. Tyto materiály musí zároveň splňovat požadavky kladené na výrobu s ohledem na profilování a ohýbání. Musí vyhovovat i funkčním požadavkům týkající se odolnosti proti povětrnosti, vodě a těsnosti vůči páře případně odolávat zatížení, korozi a ohni. Krycí vnější vrstvy bývají nejčastěji z hliníku, oceli, laminátu, dřeva. [24]

Ocelové a hliníkové plechy

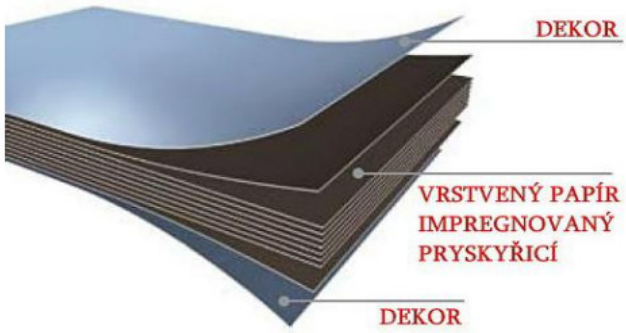
Tyto materiály se nejčastěji vyskytují ve formě tenkých plechů, vyráběných válcováním za studena s ochranou proti korozi. Jako ochrana proti korozi se používá žárové zinkování, nebo použití přímo zinkových hliníkových plechů. Sendvičové panely s vnějšími vrstvami z hliníku se používají, když jsou speciální požadavky na odolnost proti korozi, nebo hygienu, např. ve výrobě nebo skladování potravin. Tloušťka plechů je obvykle v rozmezí 0,7 - 1,2 mm. [24]

Předimpregnované materiály (prepregy)

Prepregy jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je výztuž impregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi, např. epoxidová pryskyřice a fenolová pryskyřice. Prepregy se skládají z tkaniny, rovingy, nebo z rohoží impregnovaných reaktoplastickou (polovytvrzenou) nebo termoplastickou matricí. Prepregové listy se případně vrství do požadované tloušťky, dotvarují ve formách a dotvrdí se působením tepla a tlaku. Výhoda prepregů je velmi nízká hmotnost, vysoká tuhost a trvanlivost. Díky přesně definovanému podílu matrice, či tkaniny lze snížit náklady na výrobu. [41]

Lamináty

Pro vnější vrstvy se používají především lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Na vnější vrstvu kompozitu (např. laminát ze skelných vláken) se nanáší pryskyřice, na kterou se poté pokládá a přitlačí vlastní jádro sendviče. Za několik sekund se pryskyřice rozpustí a následuje napojení horní vnější vrstvy. Aby se dosáhlo optimálního spojení jednotlivých vrstev, prochází kompozit zařízením vybaveným vakuovým vakem, hydraulickým lisem, nebo autoklávem. Dále se používají kompaktní desky z vysokotlakých laminátů (z angl. High Pressure Laminate – HPL). Jedná se o vysokotlaký laminát pro různé vnitřní i vnější aplikace. Desky mají vynikající mechanickou pevnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům. Vyrábí se z vrstveného papíru naimpregnovaným pryskyřicí, který je za žáru a vysokého tlaku slisován v podobě homogenní pevné desky. [44]



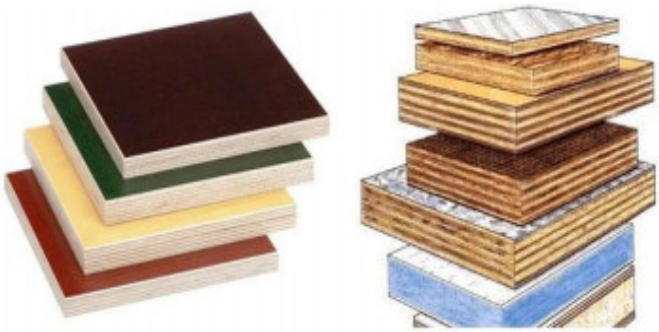
Obr. 15 Struktura HPL desky [44]

3.4.2. Jádra

Jádra pro sendvičové materiály musí mít jako výplňový materiál vhodné vlastnosti s ohledem na mechanickou pevnost, tuhost a hlavně co nejnižší hmotnost. Jejich speciální vlastnosti jako hořlavost a teplotní vodivost závisí na způsobu použití. Použitý materiál jádra může také ovlivňovat zvukovou izolaci. [24]

Dřevo

Spojování několika silných vrstev dřeva dohromady se poprvé objevilo u Egypťanů kolem roku 3500 př. n. l. Důvodem bylo to, že chtěli získat silnou vrstvu a jednak ušetřit drahé dřevo. Proto vrstvy méně kvalitního dřeva obkládali dobrým dřevem. Dřevo může být popsáno jako přírodní voština, protože má strukturu, která je v mikroskopickém měřítku podobná buněčné hexagonální struktuře syntetických voštin. Při použití u sendvičových konstrukcí běží vlákna kolmo k rovině potahu, výsledný komponent má identické vlastnosti jako syntetické nebo umělé voštiny. I přes různé druhy chemických ošetření, které jsou dnes k dispozici, jsou prakticky všechny dřevěné jádra náchylná k absorpci vlhkosti a hnilobě, pokud nejsou dobře uzavřeny v laminátu či v pryskyřici. [43]



Obr. 16 Dřevěné jádro - překližka [43]

Balza

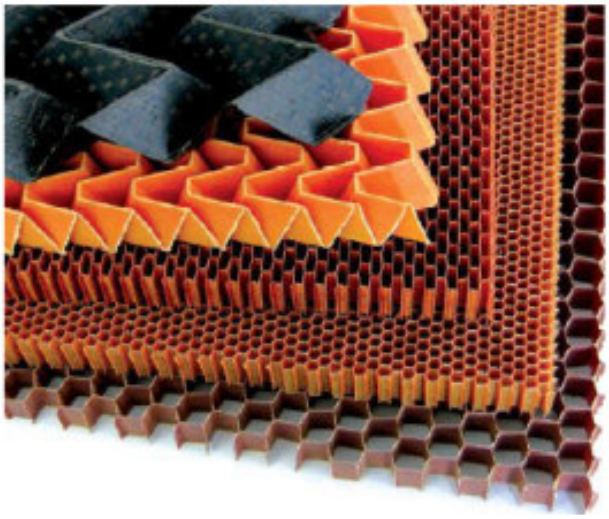
Balzové dřevo je materiál pocházející z rychle rostoucího balzového stromu v Jižní Americe, který je velký až 30 m. Plody jsou malvice. Struktura dřeva je typická velkými buňkami, které jsou vyplněny vodou. Po vysušení buňky obsahují vlákna celulózy v ligninové matrici. Balzové dřevo nehoří, popsat by se dalo spíše pomalým doutnáním. V porovnání s polymerními pěnami, balza teplem neměkne a charakteristická je i menší tepelnou vodivostí. Oproti voštinám jsou buňky uzavřené, takže lze například sendvičové panely vyrábět technikou infůze pryskyřice. [13],[39]

Korek

Korek je vnější část již odumřelé povrchové vrstvy stonku (borky) rostlin. Je nepropustný pro vodu i pro plyny a chrání rostliny. Korek tvořen vrstvou buněk zvanou felogén (korkové kambium). Korek je také materiál získaný odřezáním kůry (borky) dubu korkového. Kůra dubů se odřezává pomocí speciálních nožů. Protože původní kůra stromu je nekvalitní, odstraňuje se ze stromů, když jejich kmeny mají obvod kolem 30 cm. Kůra znovu dorůstá a sklízí se po 9 až 15 letech (nejkvalitnější až 30let), když dosahuje požadované tloušťky. Korek má rozmanité použití především díky výborným izolačním schopnostem, jak zvukové, tak tepelné a je pružný a lehký. Odolává mechanickému tlaku, plísním i chemikáliím a také teplotám do 120 °C. Působí protialergicky a je antistatický. [28],[39]

Voštiny

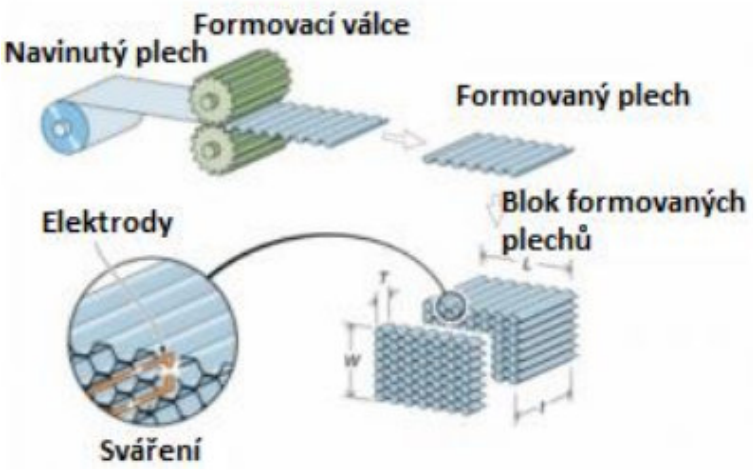
Voština je speciální typ materiálu, který se používá jako jádro s různou výškou, velikostí a tvarem buněk v sendvičových kompozitech. Voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě. Vyrábějí se nejnovějšími technologiemi, kdy se formují z plošného materiálu na šestihranné tenkostěnné plásty. Jako výchozí materiály se používají tenké hliníkové plechy, Nomex – epoxidovou pryskyřicí prosycené aramidové tkaniny, také papír, nebo textilie nasycené polyesterovou či fenolovou pryskyřicí. Voštiny jsou typické šestihrannou nebo pyramidovou strukturou. [24]



Obr. 17 Typy voštin

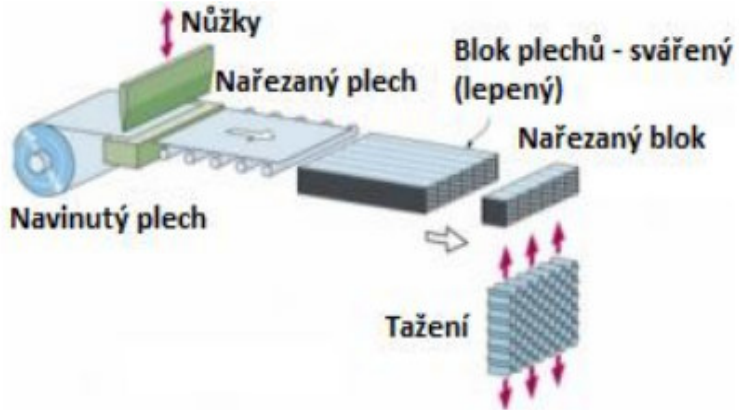
Výroba voštin

Voštiny se formují z plošného materiálu několika různými moderními technologiemi. Jako výchozí materiál se používají skleněná, aramidová, uhlíková fólie nebo textilie a někdy hliníkový plech. Jeden z moderních výrobních postupů sestává z vrapování fólie (příčné vlny), stříhání fólie a spojením dvou listů vzniká panel s šestihrannými dutinami v příčném směru. Poté se nanese pryskyřice a suší se, nařezáním panelů v podélném směru se vytvoří voštinové plásty s určitou tloušťkou. [18]



Obr. 18 Výroba plechové voštiny formováním [45]

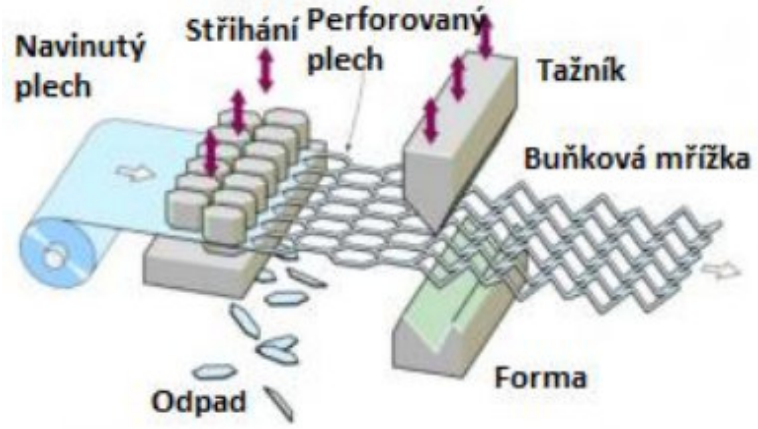
Druhou metodou je tzv. metoda HOBE (z angl. Honeycombe fore expansion). Při této technologii se tenké kovové plechy nejdříve nastříhají a pak se skládají na sebe. Potom se v určitých délkových rozestupech pájí. Takto spojené plochy se nakonec řežou na požadovanou hloubku, kolmo na rovinu, která obsahuje spoje. V tomto směru jsou následně tažené, čímž vznikne hexagonální struktura buněk. Plechy se mohou spojit lepením, laserovým svářením nebo difuzním procesem. [18]



Obr. 19 Výroba plechové voštiny metodou HOBE [45]

Třetí metodou je výroba voštin skládáním pásů, kdy jsou pásy plechů, v kterých jsou vytvořeny štěrbiny, vkládané do sebe. Není potřeba žádného ohýbání plechů, ale buňky mají pouze čtvercový nebo trojúhelníkový tvar, takováto struktura se potom svařuje nebo pájí. Tato metoda se používá i v případě použití křehkých keramických materiálů anebo u kompozitů.

Další metodou je výroba voštin stříháním a ohýbáním (obr. 20) kdy je vzor buňkové mřížky vystřihován, anebo vyřezáván pomocí laseru, nebo vodním paprskem z plechu. Plech je potom ohýbán do požadovaného tvaru. Nevýhodou této metody je velký odpad materiálu. [18]



Obr. 20 Výroba plechové voštiny střiháním a ohýbáním [45]

4. Obrábění kompozitů

Pojem obrobitelnost udává soubor vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součásti konkrétním typem obrábění. Přestože je mnoho výrobků z kompozitních materiálů vyráběno do konečných rozměrů, narůstají požadavky na jakost, funkčnost a estetické vlastnosti vedou k využívání nejnovějších obráběcích technologií.

Při obrábění kompozitních materiálů je nástroj značně opotřebován, hlavně abrazivně. To způsobují mechanické vlastnosti výztuže. Kvůli tomu je doporučeno používat nástroje především z tvrdých, otěruvzdorných materiálů, jako je například slinutý karbid, cermety, řezná keramika a hlavně polykrystalický diamant, popřípadě polykrystalický nitrid bóru. Problematický je též odvod tepla z místa řezu, který je kritický díky vlastnostem matrice. Ta velice špatně vede teplo, vznikající při řezném procesu a teplo se usazuje a převádí na nástroj.

odvod tepla	ocel	termoplast	reaktoplast	FRP
třískou	75	50 – 57	2 – 3	5 – 10
obrobkem	20 - 22	15 – 25	5 – 8	5 - 15
nástrojem	3 - 5	20 – 25	80 - 90	70 – 80
prostředím	(3 – 5) % při suchém prostředí			

Tab2. Odvod tepla při obrábění kompozitních materiálů ve srovnání s ocelí[%] [7]

Od konvenčních kovů a jejich slitin se výrazně liší právě v mnoha oblastech obrábění kompozitních materiálů. Při obrábění kompozitu je chování nehomogenní a anizotropní. Největší rozdíl je, že břit nevytváří při obrábění plynulou třísku střihem, ale materiál odlamuje. Vzniká prach a jemné částečky, které musí být odsáty z místa řezu, proto musí být stroj vybaven odsávacím zařízení. Dalším problémem je, že při obrábění nelze většinou používat řeznou kapalinu. Zejména chlazení olejovými emulzemi je nemožné z důvodu nasákavosti. V některých případech je možno použít vodu nebo ve vodě rozpustné chladicí kapaliny. Břit nástroje v řezu naráží střídavě na matrici a výztuž. To v praxi znamená, že dochází k odřezávání měkké pryskyřice a zároveň k řezání, nebo odlamování tvrdých vláken výztuže. Z pohledu struktury materiálu záleží na druhu výztuže, vlastnostech matrice, ale

zejména na objemovém množství jednotlivých složek. Odezva na obráběcí nástroj může být naprosto odlišná. Při obrábění kompozitu je kladen důraz především na volbu řezné geometrie a odolnost vůči opotřebení nástrojů, což je hledisko pro vytvoření správného řezu za využití správného nástroje. Mírou způsobilosti je tedy ekonomický a kvalitativní výsledek procesu obrábění. [12]

Podle způsobu a velikosti hodnocení rozlišujeme absolutní, relativní a komplexní vyjádření obrobitelnosti:

- absolutní obrobitelnost – vyjádřena absolutní hodnotou ukazatele obrobitelnosti
- relativní obrobitelnost – porovnání vlastností určitého materiálu s vlastnostmi základního nebo etalonového materiálu a vztah vyjádříme pomocí převodového čísla nebo indexem obrobitelnosti.
- komplexní obrobitelnost – jedním číselným ukazatelem vyjadřujeme několik technologických vlastností zkoumaného materiálu

Materiál je tím lépe obrobitelný, čím je:

- vyšší řezná rychlost při dané trvanlivosti břitu
- větší trvanlivost břitu při dané řezné rychlosti
- menší řezný odpor
- měrný řezný odpor a práce řezání menší
- menší drsnost a větší přesnost obrobené plochy
- nižší teplota řezání a menší měrné řezné teplo
  [12]

4.1. Obrábění vláknově vyztužených kompozitů

Většina kompozitních dílců pro obrábění je vyztužena právě skelnými vlákny v různých formách, orientacích a obsahu. Obzvláště maximální obsah skla je velmi podstatným faktorem, který omezuje obráběcí proces. U kompozitních materiálů je třeba starat se, aby byl čistý řez, což vyžaduje neustále ostrý břit. Delaminace materiálu vzniká při nadměrném opotřebení břitu, kdy místo odřezávání materiálu dochází k odlamování vláken. Nejvhodnější materiály pro obrábění kompozitních materiálů jsou jemnozrnné slinuté karbidy a polykrystalický diamant (PKD). Moderní řezné materiály se správnou geometrií a ostrým břitem snižují řezné síly, které umožňují přesné a čisté řezy. Majoritní význam mají právě správné řezné podmínky. Závisí na vhodně zvoleném posuvu na otáčku a na zajištění dokonalého řezu, což znamená zamezit tření nástroje o povrch obrobku. Při určování řezných podmínek je nezbytné zohlednit různé vlastnosti kompozitních materiálů ve srovnání s kovy.

Kompozitní materiály vyráběné ve tvaru plechů, trubek, desek a různých profilů je nutné většinou obrábět. Důležitá je správná kombinace řezných nástrojů a technologie obrábění. Pro obrobení kompozitního materiálu s křehkými vysokopevnostními vlákny je nutné použít pouze diamantové nástroje. Z hlediska jejich životnosti rozlišujeme dva druhy diamantových nástrojů:

a) Nástroje s dlouhou životností. Vyrábí se práškovou metalurgií. Diamantové částice se míchají s kovovým práškem a spékají se do tvaru nástroje.
b) Nástroje s krátkou životností se vyrábějí plátováním tenkých vrstev diamantových částí na ocelový řezný nástroj.

[12]

4.2. Mechanizmus vzniku třísky

Při obrábění kompozitních materiálů vzniká problém s obrobeným materiál, což je tříska. Základní principy tvorby třísky se zkoumají při ortogonálním řezání. Zjišťuje se tvar a velikost třísky, smykové napětí, deformace třísky, třecí podmínky, řezné síly a teplota v místě řezu. Podstatným rozdílem od obrábění kovů je, že při procesu nevznikají klasické plynulé třísky, ale dochází k odlamování materiálu břitem ve formě prachu a jemných měkkých třísek. Vzniklý prachový odpad a třísky musí být z místa řezu odstraněny odsávacím zařízením. Odsávací zařízení musí být vysoce výkonná, aby nedocházelo k rozvíření prachu do okolí. Při obrábění sklolaminátů je důvodem odsávání čistota, ale především je důležité zajištění zdravotní nezávadnosti. Při obrábění karbonu je zase odsávání podstatné kvůli silným abrazivním účinkům uhlíkového prachu na styčných plochách (lože a posuvné plochy), ale také z důvodu elektrické vodivosti. Uhlíkový prach v elektroinstalaci může snadno zapříčinit zkrat, anebo jinak poškodit chod obráběcího stroje.

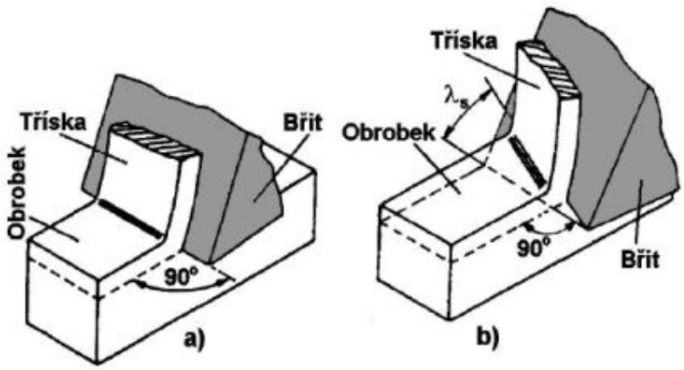
Mechanismy tvoření třísky při obrábění kovů byly již dopodrobna prozkoumány. Obrábění kovů je v nynější době již natolik prozkoumáno, že je možnost předvídat většinu věcí dopředu. Obrábění kompozitních materiálů je ale velice různé, zejména díky nehomogenitě materiálu. Proto se zkušenosti z obrábění kovů dají použít zřídka, anebo jen omezeně.

4.3. Chlazení

Chlazení je při obrábění kompozitu ve většině případů vyloučeno z důvodu nasáklivosti materiálu. Kompozitní materiál, jako například karbon je velice porézní materiál. Pokud použijeme ke chlazení olejovou emulzi, tak se zdržuje v pórech kompozitu a následné lepení je pak nemožné. Při aplikaci chladicí kapaliny s olejovou příměsí při obrábění se následně mastnota z materiálu velice těžce odstraňuje. Jestliže je nezbytně nutné při obráběcím procesu použít chlazení v místě řezu, například z důvodu ke snížení pevnosti matrice v místě řezu, je možno užít chlazení vodou, speciálními roztoky, nebo vzduchem. Obrábění kompozitů s kovovou matricí si přímo vyžaduje chladit při procesu.

4.4. Ortogonální obrábění

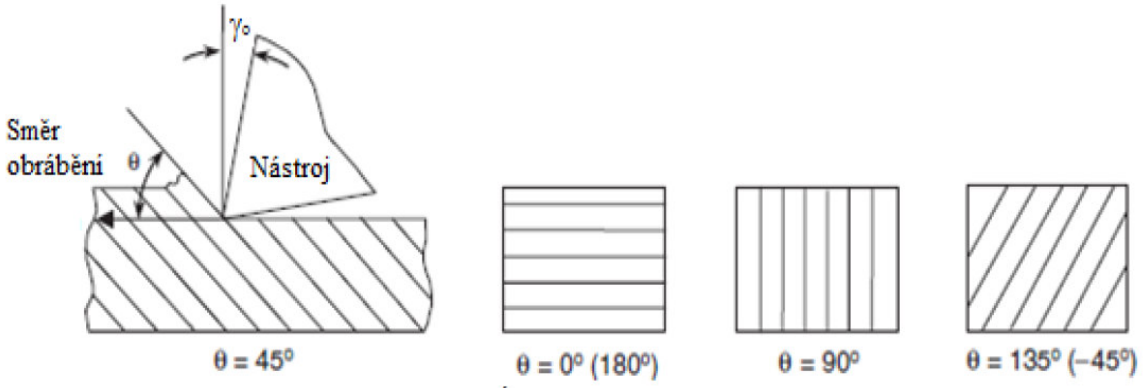
Při ortogonálním obrábění je ostří nastaveno kolmo na směr řezného pohybu a tato problematika se řeší v rovině. Typickým příkladem ortogonálního řezání materiálu je proces zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování apod. Proces je schematicky zobrazen na obrázku 21. [10]



Obr. 21 Realizace řezného procesu: a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [32]

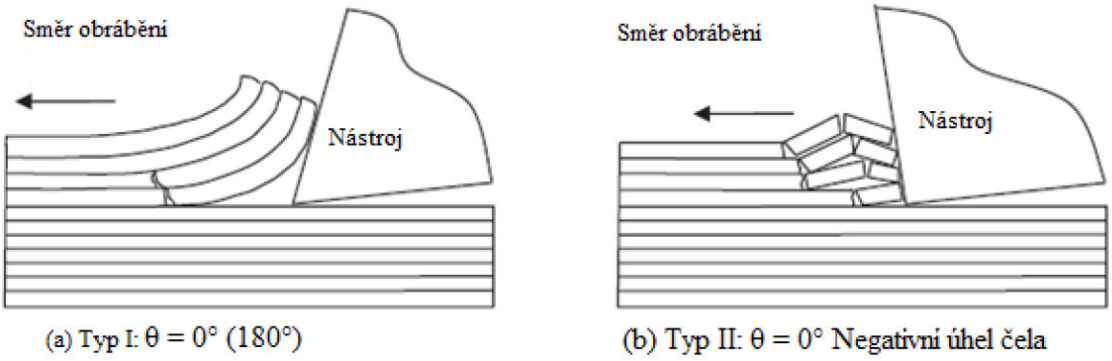
Důležitý činitel při obrábění jednosměrných kompozitů je vlastní úhel orientace vláken, který je definován směrem vláken vzhledem ke směru řezu. Stabilní způsob určování tohoto

úhlu je zobrazen na obrázku 22. kdy se tento úhel určuje ve směru hodinových ručiček od směru řezu. Dalším ovlivňujícím faktorem tvorby třísky je úhel čela. [8],[9]



Obr. 22 Úhel natočení vláken [14]

K oddělování materiálů dochází několika rozdílnými způsoby především v závislosti na úhlu čela a na úhlu orientace vláken. Na obrázku 23 (a)je zobrazen typ oddělování materiálu, kdy dochází k delaminaci vláken, tento typ se označuje jako Typ I. Oddělení třísky vznikne při obrábění materiálu s nulovým úhlem orientace vláken břitem s kladným úhlem čela. Jestliže obrobíme takovýto materiál pomocí břitu se záporným úhlem čela, materiál se poruší vzpěrem. Tento druh je označen jako Typ II a je zobrazen na obrázku 23 (b) [8],[9]

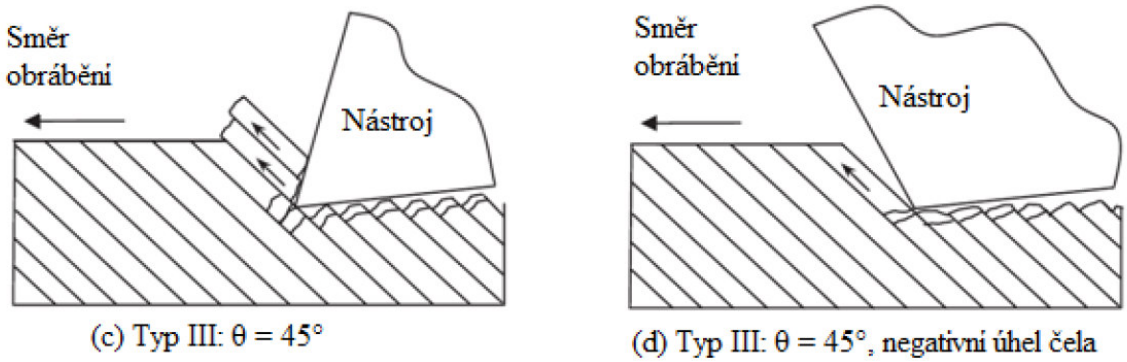


Obr. 23 Způsob oddělování materiálu: Typ I a II [14]

Pokud je orientace vláken pod úhlem 0°, je materiál vystaven napětí rovnoběžnému s vlákny a také je povrch pod ostřím stlačován. K selhání materiálu dochází před ostřím břitu. Dochází k delaminaci a praskání matrice, nebo k praskání na rozhraní mezi vyztužujícími vlákny a matricí před břitem. Viditelné jsou i lomy vláken a matrice na povrchu pod ostřím, které zůstávají i na povrchu opracovaného materiálu. Když se úhel mezi směrem řezání a orientací vláken zvětšuje, vlákna jsou stlačována a namáhána na ohyb. To má za následek praskliny materiálu, které sahají do neobrobeného povrchu. Nejméně příznivé zátěžové směry pro obrábění FRP jsou hlavně kompozity s úhly směru vláken 30° a 60°, což se odráží na špatné kvalitě povrchu. Pro větší kladný úhel čela bude vznik třísek plynulejší. [8],[9]

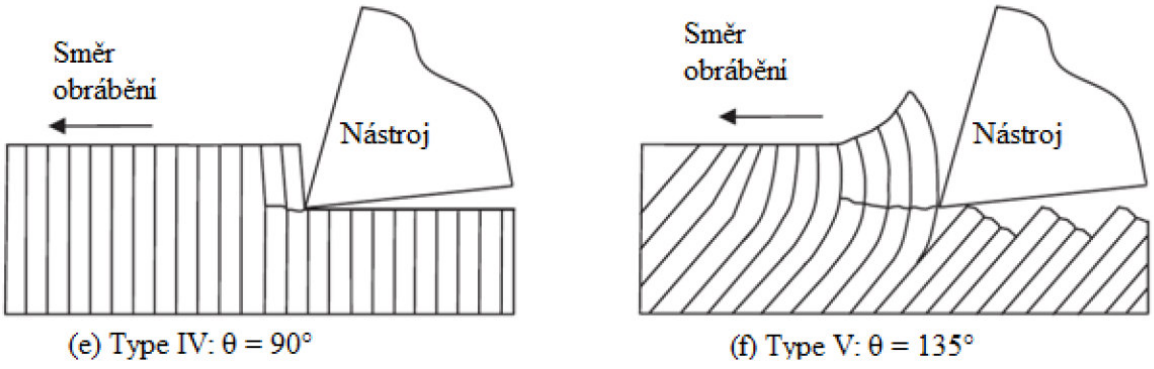
Při obrábění materiálu s úhlem orientace větším než 0° a menším než 90° pro kladný i záporný úhel čela dojde ke střihu vláken. Na rozdíl od materiálů s úhlem 0° je řezáno každé vlákno zvlášť. Při obrábění materiálu s orientací vláken 90° nástrojem s větším kladným úhlem čela dojde k odebrání materiálu střihem, ale nedojde k výraznějšímu lámání, či ohýbání. Vlákno-matricový systém pod rovinou řezu je méně narušen. Vznik lomu skrz vlákna je doprovázen interlaminárním lomem a deformace vzniká i pod rovinou řezu. Odebírání materiálu může být kontinuální – Typ III nebo nekontinuálně – Typ IV.

V závislosti na množství interlaminární deformace dochází k posouvání jednotlivých vrstev po sobě a po čelu nástroje. Materiál, který je odebírán může držet pospolu a tak vzniká plynulá, nebo článkovitá tříska. Jak dlouho se tříska bude plynule tvarovat před odlomením, záleží na velikosti úhlu orientace vláken. Pokud se zvyšuje úhel orientace vláken, snižuje se míra toho, jak se bude tříska plynule tvarovat. Se zvětšujícím se úhlem orientace vláken roste napětí mezi vrstvami a to může mít za následek poškození vlákno-matricového systému. Vzhled obrobeného povrchu typem deformace III a IV se zřetelně liší od typu I a II. Povrch materiálu je nepravidelný a konce vláken vystupují z povrchu, což je následek přetržení vláken v různých místech i nad rovinou řezu. [8],[9]



Obr. 24 Způsob oddělování materiálu: Typ III [14]

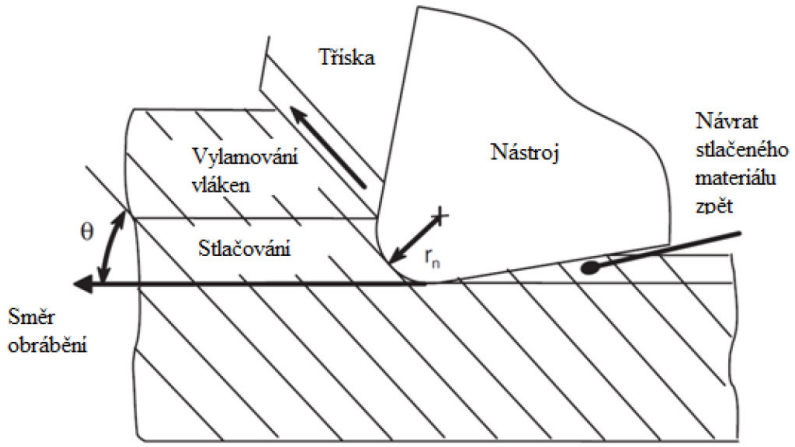
Při obrábění úhlů větších než 90° (105-150°) nástroj vyvolá deformaci vláken, která způsobí delaminaci a interlaminární deformaci. Vrstva namáhána od vedlejší vrstvy je odehnuta, a tak dochází k nápadnému poškození vlákno-matricového systému pod rovinou řezu. Díky tomu se vytváří rozměrnější základní třísky a tento způsob vniku je označován jako Typ V. Tloušťka třísky je většinou větší než hloubka řezu, a tak může dojít k lomu pod rovinou řezu. Když se tříska odlomí, odehnutá předepnutá vrstva se vrátí do své původní pozice, ale při navracení do původní pozice se výrazně odírá hřbet nástroje. Nejvýhodnější způsob obrábění je pod úhlem 135°. Vlákna musí odolávat zatížení na ohyb, tah a praskají ve svazcích. Problémy však vznikají, když jednotlivá vlákna mohou být vytahována z důvodu nedostatečné přilnavosti k matrici. [8],[9]



Obr. 25 Způsob oddělování materiálu: Typ IV a V [14]

S rostoucím úhlem čela se zvyšuje celková kvalita obrobeného povrchu. Úhel hřbetu nemá vliv na tvoření třísky, avšak má vliv na výslednou kvalitu povrchu. Pokud je použit velký úhel hřbetu, pak stlačená vlákna "odskakují". Při malém úhlu čela dojde k zahlazení povrchu a tzv."obroušení" vyčnívajících konců vláken. Vznikají vyšší normálové síly a bude docházet k

většímu opotřebení nástroje. Na obrázku 26 je vyobrazeno schéma procesu tvoření třísky. [8],[9]



Obr. 26 Tvoření třísky [14]

4.5. Obecné obrábění řezáním

Řezání se považuje za jeden ze základních principů oddělování kompozitních materiálů. K řezání se používá kotoučová nebo pásová pila s diamantovými plochami. Pro řezání tenkých materiálů na bázi epox-bórových vláken není nutné použít chladicí kapalinu, ale naopak chladit je třeba u řezání kompozitních materiálů s kovovou matricí. Pásové pily se využívají na hrubších řezech kompozitních materiálů, ale řezy jsou dostatečně přesné, aby se mohly použít na řezání vzorků pro mechanické zkoušky. Řezání navzájem spojených kompozitních materiálů například titanovou slitinou vyžaduje použít při procesu chladicí kapalinu. Výsledná kvalita povrchu řezu slitiny titanu je v porovnání s kompozitním materiálem daleko lepší. Dlouhé řezy se provádí kotoučovou pilou za použití chladicí kapaliny. Průměr kotoučové pily s plátem diamantové vrstvy je 280 až 300 mm. Použití kotoučové pily je ekonomicky výhodné a i pro přesné řezání. [1],[2]

Příklad obecného řezání je podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod. Přestože je FRP obrábění v mnoha případech nežádoucí, nedá se tomu nijak předejít z důvodu finální geometrie, kvality povrchu a rozměrové přesnosti vyráběných dílů. Soustružení, řezání, vrtání a frézování patří neodmyslitelně k nejdůležitějším technologiím obrábění FRP. Soustružení se vyznačuje od frézování a řezání zejména konstantními záběrovými podmínkami. Tyto podmínky však nejsou naprosto konstantní, protože matrice a vyztužující vlákna kladou pokaždé jiný odpor. [1],[2]

Obrobitelnost FRP je dána fyzikálními vlastnostmi vláken a matrice, orientací vláken a poměrným zastoupením jednotlivých fází. Při obrábění skelných a uhlíkových vláken vzniká křehký lom při ohybu v porovnání s aramidovými vlákny, kde vzniká lom houževnatý. Podle délky vláken výztuže je obrobitelnost různá. Výztuž s dlouhými vlákny klade mnohem větší odpor, než výztuž s krátkými vlákny. Je třeba při volbě řezného nástroje zohlednit všechna možná opotřebení. Opotřebení nástrojů závisí hlavně na fyzikálních a mechanických vlastnostech kompozitních materiálů. Pro obrábění FRP je hlavním mechanismem abrazivní opotřebení. Nástroj se při obrábění skelných a uhlíkových vláken silně opotřebovává díky masivním abrazivním vlastnostem. Naproti tomu je obrábění aramidových vláken charakteristické nízkou tepelnou vodivostí a tvárným chováním. Když se na povrch nástrojů usazuje a nanáší karbonizovaná nebo roztavená matrice, dochází k tzv. adhezivnímu opotřebení. Mechanizmy vznikajících opotřebení jsou závislé zejména na fyzikálních a mechanických vlastnostech vlákno-matricových systémů. Opotřebení na čele je menšího

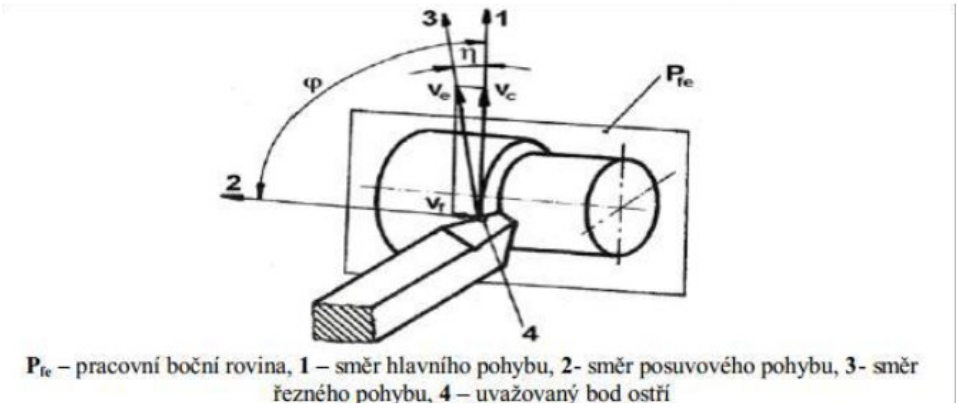
rozsahu v porovnání s opotřebením na hřbetě v podobě trhlinek. Rychlost opotřebení je závislá na obsahu vláken. Při nastavení malého úhlu čela bude docházet k značnému opotřebení, ale výsledná kvalita obrobeného povrchu bude lepší. Je tedy nezbytně nutné zvolit takový úhel, který zajistí kompromis mezi potřebnou kvalitou povrchu a životností nástroje. Další ovlivňují parametr, je pevnost břitu, kdy velký úhel břitu a čela zeslabuje břit. Pro hrubování je lepší použít spíše větší úhel hřbetu a pro dokončování zvolit nástroj s menším úhlem hřbetu. [1],[2]

4.5.1. Soustružení

Soustružení slouží k výrobě rotačních ploch vnější i vnitřních, ale i rovinných a křivých ploch za působení zpravidla jednobřitým nástrojem. Základní kinematický rotační pohyb vykonává obrobek. Soustružení je univerzální metoda obrábění často využívaná ve strojírenství. Lze obrábět vnější a vnitřní válcové plochy, rovinné čelní plochy, kuželové i tvarové plochy nebo zápichy. Také je možno na soustruzích vytvořit vrtáním díry, závity nebo provádět povrchové úpravy na válcové ploše.

Kinematika obráběcího procesu

Hlavní řezný pohyb koná obrobek, je to pohyb rotační, přičemž rychlost pohybu je zároveň řeznou rychlostí **vc.** Řezný nástroj koná posuvný pohyb, který je přímočarý nebo obecný a má rychlost posuvového pohybu **vf**. Řezný pohyb je tvořen po šroubovici, při čelním soustružení se uskutečňuje po Archimédově spirále a při soustružení rotační plochy po obecné prostorové křivce. Rychlost řezného pohybu se označuje **ve**.



P_{fe} – pracovní boční rovina, **1** – směr hlavního pohybu, **2**- směr posuvového pohybu, **3**- směr řezného pohybu, **4** – uvažovaný bod ostří

Obr. 27 Kinematika podélného soustružení válcové plochy [26]

Soustružení kompozitů

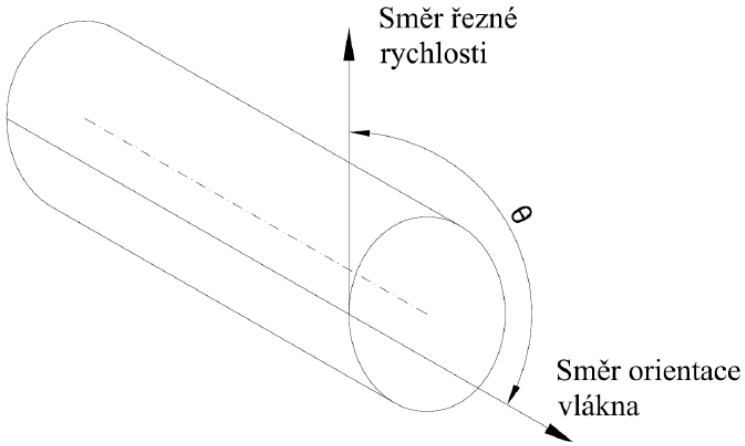
Soustružení se provádí především pro obrábění symetrických rotačních součástí, jako jsou ložiska, vřetena, nebo jiné válcové součásti z kompozitních materiálů. Od frézování se vyznačují téměř konstantním řezáním. Při obrábění FRP vzniká kromě kolísavého napětí způsobeného různým chováním vláken také kvazi-kontinuální střih. Obrobitelnost je hlavně určena fyzikálními vlastnostmi vláken a matrice a také orientací vláken a objemovým podílem jednotlivých fází. Obrábění kompozitu s krátkými vlákny je mnohem snadnější než obrábění jednosměrných dlouhých vláken.

Pro zajištění správných řezných podmínek při soustružení kompozitů je nutné použít vyhovující nástroj, nejčastěji jsou používány nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Vyměnitelné břitové destičky jsou nejčastěji z SK nebo SK povlakované vrstvou z PKD. Pro soustružení jsou nejvýhodnější nástroje s kladnou geometrií s tvrdým a ostrým břitem, aby byl schopen řezat silně abrazivně vyztužená vlákna. Při obrábění CFRP je dobré zajistit

kontinuální řez karbidickým nástrojem, protože u přerušovaného řezu vzniká vyšší opotřebení. Abychom zvýšili životnost nástroje, je třeba najít vhodný kompromis na úhlu břitu. S rostoucím úhlem hřbetu je nástroj ostřejší, ale je zeslabováno ostří (úhel břitu) a nástroj trpí na vznik lomu. Při rázu může dojít až odštípnutí nebo ulomení části břitu.

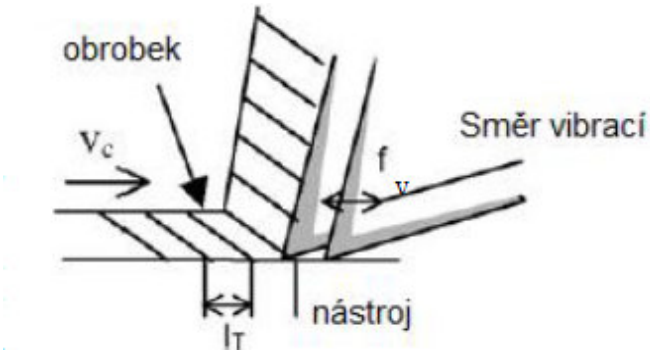
Úhel natočení vláken při soustružení

Při soustružení kompozitních materiálů nemá orientace vláken tolik výrazný vliv na sledované hodnoty drsnosti povrchu. Úhel orientace vláken θ má velký vliv na druh třísky, řezné síly a výsledný povrch. Je definován jako úhel mezi směrem řezné rychlosti a směrem orientace vlákna ve směru hodinových ručiček. Při soustružení má vektor řezné rychlosti stále stejný směr. Úhel natočení vláken tedy záleží pouze na tom, jak jsou vlákna uspořádána na konkrétním obrobku. Obvyklé je navíjet vlákna ve dvou směrech. Absolutní hodnota úhlu se nemění, střídá se kladné a záporné znaménko úhlu orientace vláken pro jednotlivé vrstvy.



Obr. 28 Úhel natočení vláken při soustružení [9]

Pro orientaci vláken 0°, tj. podélně navíjená vlákna, jsou při styku s řeznou špičkou nástroje namáhána kolmo pod úhlem 90°.Vlákna jsou namáhána na ohyb a dochází k přelamování vláken kolmo na vedení. Zde dochází k značné delaminaci, roztřepení a vylamování vláken z povrchu materiálu a tak je obrobený povrch hrubší. Při podélném soustružení dochází k roztřepení na rozhraní mezi obrobeným a neobrobeným povrchem a na přechodech jsou vlákna vytahána do obrobeného povrchu. Soustružením vrstvy s orientací vláken 90° dochází k vyřezávání celých vláken po obvodu obrobku. Vlákna jsou namáhána na tlak a břit podnítí praskání materiálu na rozhraní fází a výsledný povrch je tak ve vroubkované formě. Pokud je obráběna vrstva materiálu s vlákny pod úhlem 45° či 135°, jsou vlákna namáhána na ohyb a tlak. Kvalita povrchu a průběh obrábění šikmo navíjených vláken je zdaleka nejlepší. Protože je obtížné obrábět CFRP s vysokou účinností, je možné obrábět ultrazvukovým vibračním soustružením pomocí nástroje z PKD. Kvalitní povrch u složitě obrobitelných materiálů zajistíme použitím ultrazvukového vibračního řezání. Vibrace dávají možnost vyhnout se nepřetržitému kontaktu mezi obrobkem a břitem nástroje, jejich cílem je dosáhnout střihu samostatně jednotlivých vláken a matrice. To je dáno řeznou vzdáleností během jedné periody vibrace nástroje. Princip postupu ultrazvukového vibračního řezání je na obrázku 29. Povrch po vibračním soustružení je u materiálu s menším průměrem vláken výrazně lepší a u materiálů s většími průměry vláken je drsnost povrchu podobná. [3],[9]



Obr. 29 Mechanizmus ultrazvukového vibračního řezání [10]

4.5.2. Řezné materiály pro soustružení

Nejdůležitější vlastnost, která se u řezných nástrojů posuzuje, je jejich řezivost. Při obrábění kompozitních materiálů jsou na nástroje kladeny zvýšené nároky. Z hlediska nástrojového materiálu zahrnuje tento pojem schopnost při uspokojivé houževnatosti zachovávat pevnostní charakteristiky za vysokých teplot a odolávat opotřebení v místě dotyku nástroje a obrobku a odcházející třískou. Nástroj by měl mít vysokou tvrdost, aby odolal abrazivnímu opotřebení, a zároveň musí být i pevný.

Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli se téměř vůbec nepoužívají, protože nedosahují dostatečných hodnot tvrdosti. Při vysokých teplotách se tvrdost ještě více snižuje metalurgickými změnami uvnitř materiálu. Z těchto důvodů se pro obrábění vláknových kompozitů vůbec nepoužívají.

Slinuté karbidy wolframu

Nástroje ze slinutých karbidů jsou výrobky práškové metalurgie, skládající se z tvrdých zrn karbidů wolframu, spojených k sobě nejčastěji kobaltovým pojivem. Jedná se tedy o slinuté karbidy s kobaltovým pojivem, kdy je rozdílná velikost zrna a obsah pojiva. Výsledné vlastnosti materiálu závisí na podílu pojiva a tvrdé fáze, ale také na velikosti zrn. Takto široké spektrum kombinací mikrostruktury umožňuje různé vlastnosti pro velký rozsah použití. Obecně platí pravidlo, kdy se zvyšující velikostí zrna roste tvrdost, avšak snižuje se ohybová pevnost. Výjimku tvoří zrna menší než 1 μm, pro ně tato závislost neplatí. Materiál se zrnitostí 0,7 μm má vysokou tvrdost a zároveň největší ohybovou pevnost a tím je právě nejvhodnější pro obrábění kompozitních materiálů. Řezný nástroj musí být co nejostřejší, aby vytvořil co nejkvalitnější povrch, proto je nejvhodnější použití slinutého karbidu s velikostí zrna menší než 1 μm. [14]

Povlakované slinuté karbidy

Kvůli zlepšení vlastností jsou slinuté karbidy povlakovány vrstvou s tloušťkou několika mikrometrů. Tyto vrstvy značně zvyšují odolnost vůči opotřebení. Povlaky mohou být vytvořeny metodou chemické depozice z plynné fáze (CVD) nebo modernější metodou fyzikální depozice z plynné fáze (PVD). Také je možné vytvořit jednu, či více vrstev povlaku například z TiC, TiN, TiCN a Al_2O_3. Metodou CVD se nanáší povlak při vysokých teplotách (900-1050°C) a při metodě PVD (400-450°C). Pomocí PVP je vytvořena jemná a houževnatá struktura a po nanesení zůstane v povlaku pnutí v tlaku. Metodou CVD vznikne ve struktuře nevýhodné pnutí v tahu, proto mají PVD povlaky vyšší pevnost a vyšší odolnost proti

vylamování. CVD povlaky mají však lepší přilnavost a odolnost proti opotřebení než u PVD. Porovnáním těchto protikladných vlastností jsou CVD povlaky obecně používanější při soustružení, zatímco PVD se používají tam, kde jsou velké řezné síly, a požaduje se odolnost proti vylamování. Keramické povlaky mají vyšší tvrdost a jsou tepelně stabilnější než karbidy wolframu. Povlaky působí jako tepelná bariéra odolávající při obrábění vysokým řezným rychlostem. Povlaky je obecně vhodné použít vzhledem k tomu, že jednak zvyšují životnost nástroje a zvyšují odolnost proti opotřebení. Nejčastější formy opotřebení jsou vylamování a delaminace povlakové vrstvy. [14]

Keramika

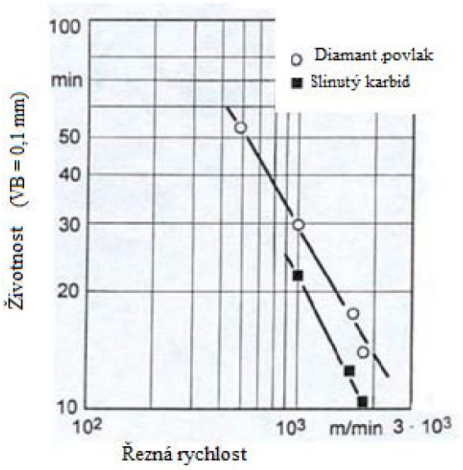
Řezné keramické nástroje jsou obvykle založeny na slinutém korundu (Al_2O_3). Ten se slinuje při vysokých teplotách a tlacích. Řezné nástroje z keramiky se vyznačují nejvyšší tepelnou stabilitou mezi nástrojovými materiály a umožňují tak vynikající výkony při vysokorychlostním obrábění, kdy vznikají vysoké řezné teploty. Nevýhodná je jejich malá tuhost a tendence k vylamování při vyšších řezných silách nebo při přerušovaném řezu. Kvůli zvýšení pevnosti břitu jsou nejčastěji keramické řezné nástroje vyrobeny s negativní geometrií. Tyto nástroje trpí nejvíce na tepelné šoky, kdy nejsou schopné jim odolávat z důvodu špatné tepelné vodivosti. Pevnost se zlepšuje přidáním keramických materiálů, jako jsou Tic a ZrO_2, což má za následek i zlepšení životnosti nástroje. I přesto se na obrábění kompozitních materiálů keramika nehodí, protože pro kvalitní povrch je nutno použít pozitivní úhel čela, ale tím dojde ke snížení pevnosti břitu keramických nástrojů. Mají také nízkou odolnost proti opotřebení vylamováním a jejich možnosti při soustružení jsou značně omezené, protože záběrové podmínky jsou téměř konstantního charakteru. [14]

Polykrystalický diamant

Diamant je známý jako nejtvrdší materiál, vyznačující se vysokou odolností proti otěru. Zajišťuje dobrou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření. Použití monokrystalického krystalu diamantu je omezeno z důvodu náchylnosti k lomu a také vysoké pořizovací ceny. Proto se monokrystalický diamant používá pouze na velice přesné obrábění například optických povrchů. Polykrystalický diamant (PCD) se vyrábí lisováním za vysokých teplot a tlaků PCD s malém množství kovového pojiva, jako je třeba kobalt. Polotovary jsou na menší kusy rozřezány pomocí laseru, vodním paprskem nebo obrobeny elektrickým výbojem na požadovaný tvar.

Po vytvoření požadovaného tvaru jsou připájeny na podklad ze slinutého karbidu. Výhoda PCD oproti monokrystalickým diamantům spočívá ve vyšší odolnosti proti rázům, avšak proti ostatním nástrojům jsou pořád velmi drahé. Výrobní náklady na výrobu diamantu jsou vysoké, především díky drahé technologii slinování a také řezání a ostření je velice obtížné. Mohou být ovšem ekonomicky výhodné v případě použití správných řezných podmínek v závislosti na jejich životnosti a výkonnosti, kdy výkonnost je závislá na velikosti zrn diamantu. Nástroje jsou vyráběny se zrny s velikostí od 2 do 30 μm. S rostoucí velikostí zrna se zvyšuje tvrdost a lomová houževnatost. Jemná zrna zajišťují dobrou odolnost proti otěru a velmi ostrou hranu ostří.

Výkonnost je velmi závislá na velikosti zrn diamantu. Nástroje jsou vyráběny se zrny s velikostí od 2 do 30 µm. Lomová houževnatost a tvrdost se zvyšuje nárůstem velikosti zrna. Jemná zrna (2 až 5µm) poskytují dobrou odolnost proti otěru a velmi ostrou hranu ostří. S nimi lze dosáhnout lepší kvality opracovávaného povrchu. Nástroj s jemnými zrny se používá pro středně abrazivní materiály jako je hliník a plasty. Střední třída (okolo 10µm) je univerzální varianta kombinující výhody jemného a hrubého zrna. Používají se spíše pro abrazivní materiály, jako jsou lamináty, keramika, hliník, skelná vlákna, guma, měď a uhlík. Nástroje s hrubými zrny (25-30µm) mají vysokou rázovou houževnatost a jsou schopny většího zatížení, charakteristické jsou delší životností. Používají se na obrábění vysoce abrazivních materiálů (kompozity s podílem skelných vláken, hliníkové slitiny s podílem křemíku), přerušované řezy a hrubé obrábění. Pro soustružení kompozitních materiálů bude nejlepší zvolit nástroj s hrubou zrnitostí, protože v případě kompozitu se jedná o vysoce abrazivní materiál. Základní doporučení pro řeznou rychlost je 200-1000 m/min, jak je vidět na obrázku 30 a není ani nutné použít chlazení. Nesmí však dojít k překročení teploty 600°C, protože při teplotách okolo 650°C se diamant přeměňuje na grafit. [14]



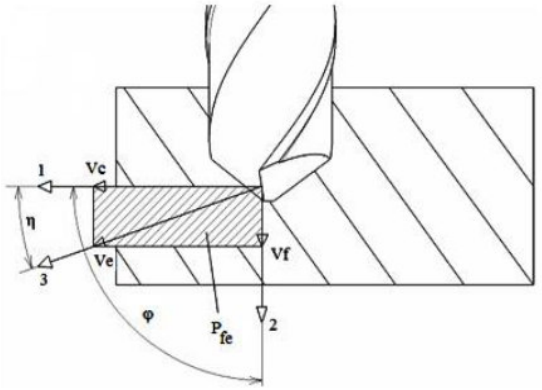
Obr. 30 Závislost životnosti povlaků [14]

4.5.3. Vrtání, vyvrtávání

Vrtání je způsob obrábění, kterým se zhotovují válcové díry do plného materiálu za použití řezných nástrojů. Vrtání slouží k vytvoření válcových, kuželových a tvarových vnitřních ploch, zhotovujeme díry do plného materiálu, nebo zvětšujeme již předvrtané, nebo předlité díry. Kromě vrtání krátkých a dlouhých děr zahrnuje tento způsob také další možnosti obrábění, jako je vystružování, vyhrubování a vyvrtávání. Vrtání se může odehrávat na vrtačkách nebo soustruzích.

Kinematika obráběcího procesu

Hlavní řezný pohyb koná nástroj (vrták), je to pohyb rotační. Vrták vstupuje do materiálu přes vedlejší pohyb (posuv) **vf** ve směru osy. Vrtání se provádí většinou kolmo na materiál, ale může se vyskytovat i případ, kdy se otvor vyvrtává šikmo do materiálu, nebo do křivé plochy.



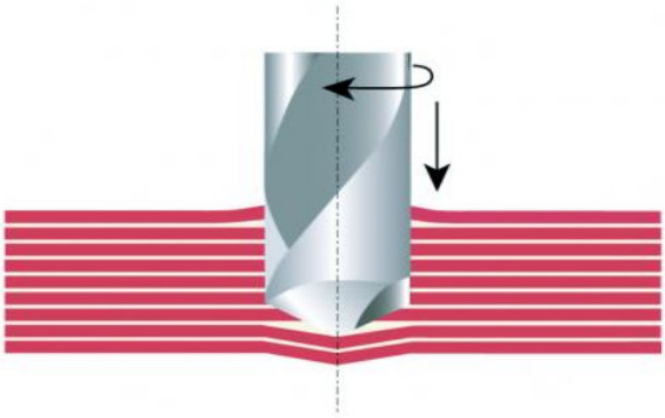
1- směr hlavního pohybu
2 - směr posuvového pohybu
3 - směr řezného pohybu
v_c - řezná rychlost
v_f - posuvová rychlost
v_e - rychlost řezného pohybu
P_{fe} - pracovní boční rovina
φ - úhel posuvového pohybu
η - úhel řezného pohybu

Obr. 31 Kinematika obráběcího procesu vrtání [10]

Vrtání kompozitů

Otvory vyvrtané jsou používány k zavádění jiných částí, spojování částí, nebo pro manipulaci. Často se stává, že části výrobků jsou z různých materiálů, proto se můžou spojovat dohromady například kompozitovou textilií.

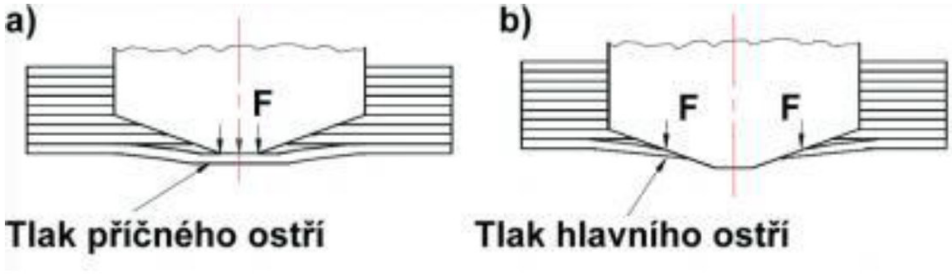
Proces vrtání způsobuje při obrábění vláknových kompozitů největší problémy, v literatuře se to odborně nazývá delaminace. Delaminace je charakterizována jako odlupování povrchové vrstvy při vstupu do materiálu a při výstupu ve formě odlupování neobrobené vrstvy pod nástrojem, kterou nástroj vytlačuje. Tento jev způsobuje tlaková síla od špičky ostří nástroje (vlivem posuvu) a otáčivým momentem (otáčkami) nástroje. Proto je nezbytně nutné navrhnout optimalizované řezné podmínky, protože vlákna v kompozitu jsou silně abrazivní, tak narůstá opotřebení nástroje. Současně stoupá i odpor materiálu působící proti přítlačné síle a otáčkám, což má následek vzrůstající teplotu v místě řezu. Proto je vhodné použít řezné materiály s dobrou tepelnou vodivostí, kvůli zabránění abrazi.



Obr. 32 Princip delaminace [33]

Analýza delaminace

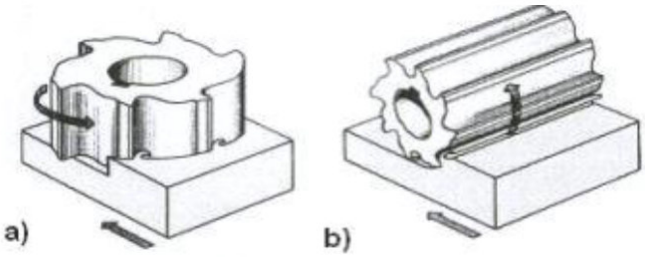
Delaminace probíhá mezi jednotlivými vrstvami laminátu. Její průběh probíhá ve dvou etapách. Jestliže budeme vrtat klasickým šroubovitým vrtákem, delaminace probíhá v první fázi na příčném ostří, které působí silou tlakovou na doposud neobrobený materiál, kde nabude kritických hodnot. Na této hodnotě vytrvá, do té doby než pronikne příčné ostří opět ven. Deformace nastávají malým vydutím v okolí osy vrtání a nadále se šíří ve směru vláken v povrchové vrstvě. V momentě kdy ve vyboulení nastane kritická hodnota, vrstva se rozevře, poté co pronikne příčné ostří ven, nastává druhá etapa. V důsledku otáčení hlavního ostří a tlaku se dále podporuje rozvoj delaminace. Hlavní vinu při procesu má velký negativní úhel na příčném ostří, který se zařezává do materiálu obrobku a tvoří až polovinu posuvové síly. V okamžiku, kdy příčné ostří projde materiálem ven, dosáhne delaminace své konečné velikosti. [22]



Obr. 33 Fáze vzniku delaminace [33]

4.5.4. Frézování

Frézování je strojní třískové obrábění zpravidla vícebřitým nástrojem, kdy se otáčí nástroj (fréza) a odebírá břitem třísky z obrobku. Posuv koná obvykle obrobek ve směru kolmém na nástroj. U moderních frézovacích strojů je možné plynule měnit posuvy ve všech směrech najednou. Řezný proces je to přerušovaný, kdy každý zub frézy odřezává postupně malé třísky s proměnnou tloušťkou. Z technologického hlediska nástroje rozlišujeme frézování válcové (obvodem) a čelní frézování (čelem frézy).



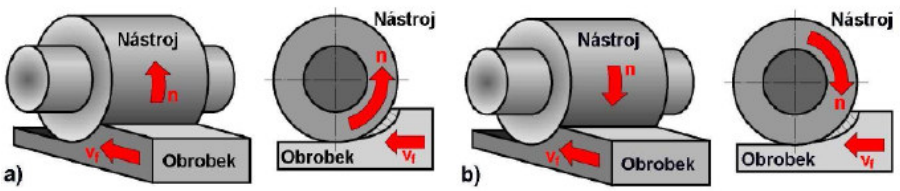
a) čelní frézou, b) válcovou frézou

Obr. 34 Způsoby frézování [33]

Kinematika a řezné síly obráběcího procesu

Podle kinematiky obráběcího procesu rozdělujeme frézování na sousledné a nesousledné. Při sousledném frézování se nástroj otáčí ve směru posuvu obrobku. Při vnikání zubů frézy do obrobku zabírá břit maximální tloušťku třísky a obrobená plocha vznikne na výstupu zubu ze záběru. Řezné síly působí směrem dolů do stolu stroje. Výhodami sousledného frézování jsou vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů, menší potřebný řezný výkon, jednodušší upínání obrobků (řezné síly působí do stolu), menší sklon k tvorbě nárůstku a také menší drsnost obrobené plochy.

Při nesousledném frézování se nástroj otáčí proti směru posuvu obrobku. Při obrábění se tloušťka třísky v záběru mění střídavě z minimální na maximální hodnotu. Velmi horké třísky jsou odváděny mimo obrobený povrch a je tedy menší šance styku mezi obrobenou plochou a třískami, které by mohly způsobit připékání k matrici. K oddělení třísky dochází po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Při tomto procesu vznikají silové účinky a deformace, způsobující zvýšené opotřebení břitu. Řezná síla působí směrem nahoru a má tendenci odtahovat obrobek od stolu stroje. Výhodami jsou lepší záběr zubů frézy při jejich zařezávání na hloubce řezu a menší opotřebení šroubů a matice. Navíc trvanlivost nástroje nezávisí na povrchu obrobku (okuje, písčitý povrch). Pro frézování FRP kompozitů je doporučeno právě nesousledné frézování. Z důvodů trhlin, kdy při nesousledném frézování vznikají spíše horizontální trhliny, které nezasahují do již obrobeného povrchu.



Obr. 35 Válcové frézování a) nesousledné b) sousledné [33]

Frézování kompozitů

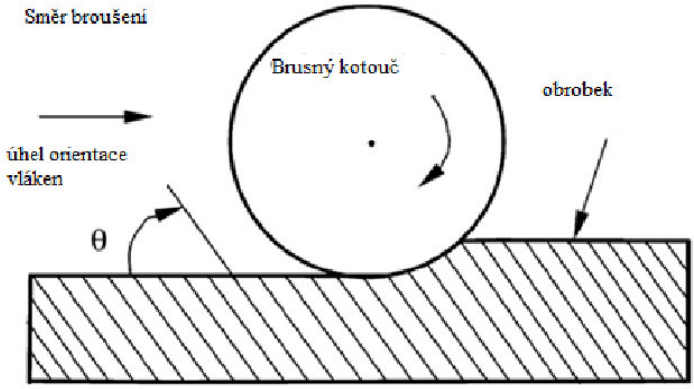
Frézovací operace na vláknových kompozitech, se na rozdíl od kovových materiálů vyznačují nízkým poměrem odebíraného materiálu z celkové části objemu. Frézování se používá zpravidla jako dokončovací operace, nebo jako finální obrábění pro zvýšení kvality povrchu jako je například odjehlování, nebo odstraňování modelovací směsi. Občas je nezbytné vyhotovit do obrobku různé prvky, jako jsou třeba drážky, sloužící ke spojení, nebo ustavení obrobku. Nejdůležitějšími faktory, které ovlivňují výběr nástroje a nastavení obráběcích parametrů, jsou typ vláken výztuže, struktura a objemový podíl matrice. Výběr nástrojového řezného materiálu v případě skleněných a uhlíkových vláken se volí s ohledem na abrazi, kdy nástroj musí vykazovat vyšší tvrdost a pevnostní vlastnosti pro řezání tvrdých vláken. Volba nástroje pro případ obrábění aramidových vláken určuje geometrie nástroje, protože aramidová vlákna musí být řezána za současného předpětí vláken. Jednotlivé chování materiálů při frézování kompozitů závisí zejména na vlastnostech vláken výztuže. Vzhledem k tomu, že při frézování dochází k obrábění více směrů vláken najednou, je potřeba vhodně zvolit řezné podmínky.

Vliv natočení vláken na jakost obrobené plochy

Na výsledek obrábění má důležitý vliv také velikost úhlu čela nástroje. Pokud je úhel břitu roven nule a úhel čela má kladné hodnoty, vytvoří nástroj tlak na vlákna ve směru jejich os. Vlákna jsou tak vytrhávána a ohýbána z matrice skluzem po čele nástroje. Pokud bude úhel čela záporný, dojde ke vzpěru vláken, tím jak tlačí nástroj na vlákna ve směru jejich podélné osy a ke vzniku malých trhlinek na rozhraní matrice před ostřím nástroje a vyztuženými vlákny. Řezné síly mají kolísavý charakter vlivem střídání delaminace, ohybu a praskání vláken. Pozitivní úhel čela způsobuje nekvalitní povrch, protože část matrice se odtrhne a část nadále chrání vlákna, která ještě nebyla vlivem elastické deformace oddělena. Při použití negativního úhlu čela dochází ke vzpěru vláken těsně před řeznou hranou nástroje a tím vznikají velmi malé třísky. Vlákna se lámou kolmo k jejich podélné ose vlivem tlaku ostří na obráběný povrch.

4.5.5. Broušení

Broušení je další způsob jak lze obrábět vnější i vnitřní válcové plochy. Obrábění broušením se používá stejně tak, jako u broušení kovových částí k získání hladšího povrchu, nebo lepší rozměrové přesnosti. K broušení se používají klasické brusné papíry, kotoučové brusky, nebo různé brusné elementy. Dalším důvodem broušení je kvůli získání hladkého povrchu před nanesením barvy, nebo jemné broušení již nanesené barvy před následným lakováním. Pro brusný proces se používají rotační brusné kartáče, jednotlivé kartáče jsou vsazeny do brusné hlavy, která vykonává rotační pohyb. Kartáče se s výhodou používají kvůli stejnoměrnosti vybroušených tvarových profilů, kartáč se totiž chová podobně jako brusivo ručně přitlačované. Trvanlivost brusiva je vyšší než u konvenčních postupů. Na výsledek při broušení má velký vliv úhel orientace vláken. Tento úhel je mezi směrem řezné síly a směrem orientace vláken. [14]



Obr. 36 Úhel natočení vláken [33]

Pro broušení je charakteristická malá hloubka řezu za vysoké řezné rychlosti, která je několikanásobně vyšší než posuvová rychlost. Vniká tak malá tříska, která je oddělována každým brusným zrnem. Záběrový úhel je v případě broušení velmi malý, proto je úhel natočení vláken téměř konstantní, ale díky tomu se mechanismus tvoření třísky a velikost řezné síly mění pouze jako funkce tloušťky třísky. Úhel orientace je dán materiálem a směrem broušení. Vzhledem k tomu že při broušení používají mnohanásobně vyšší řezné rychlosti oproti posuvu, tak vznikají malé třísky, které mohou být dokonce menší než průměr vlákna. Samozřejmě díky vysokým řezným rychlostem vznikají při broušení vysoké teploty, proto je vhodné použít chladiva, což je vzhledem k nasákavosti matrice značně problematické. Řezná rychlost tak bude omezena vznikáním tepla, aby nedocházelo k tepelnému poškození obrobku. [33]

4.5.6. Dělení kompozitů

Pro dělení kompozitních materiálů je doporučeno používat rozbrusné kotoučové nástroje, především kvůli přebroušení (přeřezání) vyztužujících vláken. Tak se dosáhne čistého řezu bez delaminace, trhlin, či jiných vad v koncové části materiálu. Z tohoto důvodu nejsou vhodné střihací nástroje, jako jsou nůžky, nebo kleště, protože rozdrtí konce v místě oddělení materiálu. Další typy oddělení materiálu, jimiž oddělíme materiál na požadovaný počet, jsou například upichování, frézování, nebo jiné metody konvenčního obrábění.

4.5.7. Tvorba třísky při broušení

Při broušení zrna brusiva vnikají postupně do materiálu. V první fázi dojde nejprve k rázu zrna do obráběné plochy, následně klouže zrno po povrchu a třením vzniká teplo. V druhé fázi dochází k lokálnímu zvýšení teploty a také zde vznikají lokální plastické deformace. Zrno brusiva vytvoří rýhu a na okrajích vzniká val. Materiál je odebírán až ve třetí fázi, kdy se zrno dostává do hloubky, ve které je překročena hranice pro minimální tloušťku třísky a_{emin}.

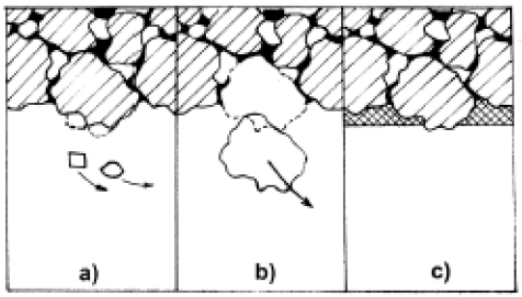
Při odebírání tenkých třísek roste měrný odpor zároveň s hloubkou řezu až do tzv. mezní tloušťky třísky. S rostoucí hloubkou třísky nad tuto mez se měrný odpor snižuje, to proto, že se snižuje podíl odtlačování a dojde dříve k odebírání materiálu. Řezný odpor se snižuje při zvětšení tloušťky třísky při větší tloušťce než tzv. mezní tloušťce třísky, což souvisí s vynaložením práce na přerušení spojení materiálu tuhého tělesa. Pokud se navyšuje kolmá řezná síla, dojde nejprve k plastické deformaci vlivem působení brusného zrna a pak až k odebrání třísky.

Poměr mezi délkou kluzu a řezu je závislý na geometrii zrna, poměru poloměru zaoblení zrna brusiva a tloušťky odebírané třísky a na opotřebení zrn, jejich otupení a zanesení. Menší délku dráhy kluzu mají zrna s malým poloměrem zaoblení. Pro zvýšení obrobitelnosti

materiálu při broušení se musí zvýšit ostrost zrn a zlepšit geometrii zrn. Ke lepšení dojde vytvořením rovinného tvaru čela ve směru kolmém na vektor rychlosti, což se dá dobře uplatnit při výrobě brousicích pásů.

Dynamické působící síly způsobují při oddělování třísek plastickou deformaci vrstvy pod obrobeným povrchem, což má za následek vznik dalšího množství velkého tepla. Může se stát, že dojde dokonce k roztavení oddělovaných třísek. Obrobená vrstva je ovlivňována plastickou deformací a teplem vznikajícím při řezání.

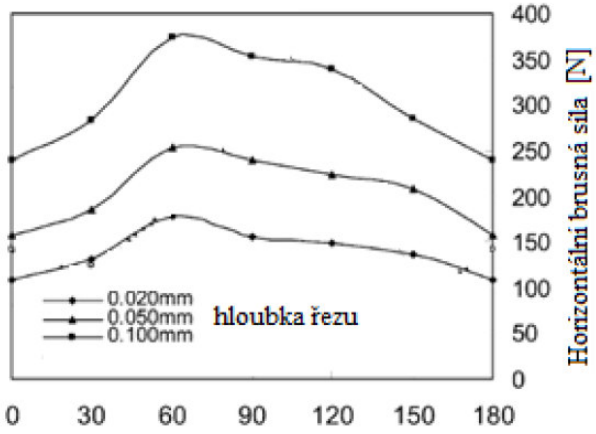
Současně s růstem pevnosti obráběného materiálu a tloušťkou třísky se zvyšuje i potřebná řezná a kolmá řezná síla, která je vždy vyšší než řezná síla v tangenciálním směru. Plastické vlastnosti kovu jsou ovlivňovány rychlostí deformace, když dojde ke zvýšení rychlosti i k dostatečnému zvýšení teploty, vzroste plasticita. [14]



Obr. 37 Princip opotřebení [14]

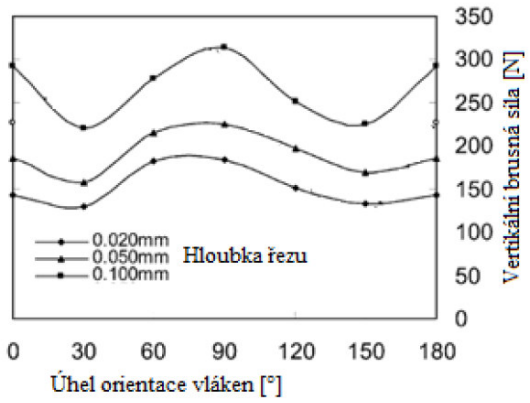
4.5.8. Řezné síly

Řezné síly závisí především na hloubce řezu a na úhlu orientace vláken. Na grafu 1 je zobrazena závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken pro různé hloubky řezu. Hodnota horizontální brusné síly narůstá společně s úhlem orientace vláken, až dokud není dosaženo hodnoty 60°, kde horizontální síla dosahuje svého maxima. S dalším nárůstem úhlu orientace vláken nepatrně klesá až do hodnoty 180°. [33]



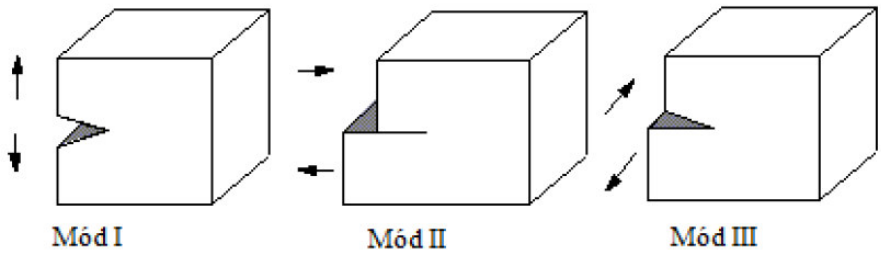
Graf 1 Závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken [33]

Na grafu 2 je zobrazena závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken pro různé hloubky řezu. Vysokých hodnot této síly je dosaženo v úhlech okolo 0° anebo 90°. Nejmenší vertikální síla se objevuje při úhlu natočení vláken okolo 30° a 150°. Z obou grafů je zřejmé, že při větší hloubce řezu jsou větší i brusné síly. [33]



Graf 2 Závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken [33]

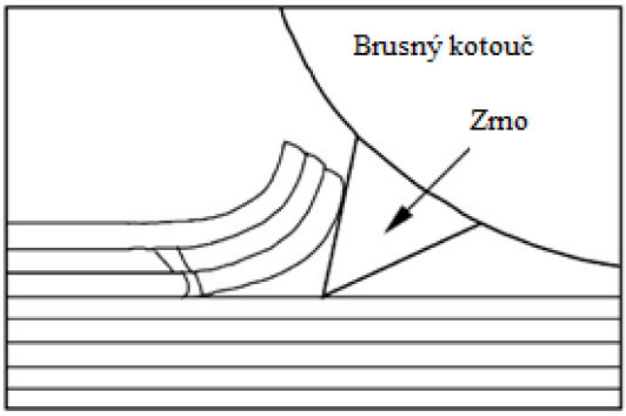
Změna velikosti řezné síly pro různé úhly natočení je způsobena různými druhy namáhání vláken, hlavní je způsob, jakým jsou zatěžovány obě plochy trhliny. Zatěžování může být charakterizováno třemi základními módy, jak je vidět na obrázku 31. [33]



Obr. 38 Módy zatěžování [33]

- Mód I – rozevírání, tah
- Mód II – střih
- Mód III – příčný smyk

Při obrábění kompozitu, který má úhel natočení vláken θ = 0° je materiál odebírán zejména napětím, které odpovídá módu I a II na rozhraní vláken, jak je vyobrazeno na obrázku 39. Síla potřebná k oddělení vlákna od matrice je nižší, bude i nižší brusná síla. [33]



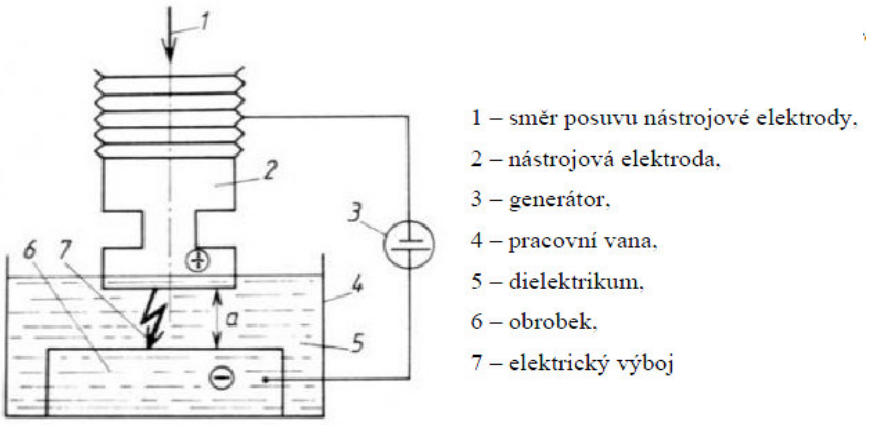
Obr. 39 Odebírání materiálu při θ = 0° [33]

4.6. Nekonvenční metody obrábění

Neustále rostoucí podíl těžkoobrobitelných materiálů vyžaduje stále inovaci a rozšiřování dosavadních technologií. Nekonvenční metody jsou metody, kde se využívá fyzikálních vlastností a používají se tam, kde již není možné použít standardních metod k obrábění. V tomto se liší od klasického třískového obrábění, kde probíhá úběr materiálu prostřednictvím mechanické práce. To hlavně platí pro obrábění tvarově složitých, nepravidelných, nebo rozměrově přesných dílů, obrobků z těžkoobrobitelných materiálů, či přesných mikro součástek. Vláknové kompozity s polymerní matricí není možné obrábět některými metodami pracující za vysokých teplot z důvodů jejich malé tepelné odolnosti. Vzhledem k nasáklivosti kompozitů a následnému snížení vlastností je obrábění kompozitů chemickými způsoby značně obtížné. Netradičními metodami se obrábějí zejména materiály s kovovou nebo keramickou matricí anebo sendvičové kompozity. [34]

4.6.1. Elektroerozivní obrábění

Materiál je ubírán pomocí elektroeroze, což je vysoká koncentrace energie zaměřená do bodu, až materiál začne tát a odpařovat se. I přes nízké elektrické vodivosti a vysoké tepelné odolnosti některých částic v kompozitu je možné kompozity obrábět metodou elektroerozivního obrábění – EDM (electro discharge machining). Tento proces je zdlouhavý a taky se vyznačuje malým úběrem. Z obráběného materiálu se tavením a odpařováním oddělují velmi malé částice, které jsou odplavovány dialektrickou kapalinou. Jedná se tedy o tzv. elektrickou erozi, založenou na odebírání částic z povrchové vrstvy materiálů díky současného účinku tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. Úběr se může zvýšit rostoucím vybíjecím proudem a zvýšením trvání impulsů na optimální hodnotu. Tato hodnota je však rozdílná z důvodu různého chemického složení kompozitů. Dobře obrobený povrch materiálu vznikne pouze malým množstvím dílčích poškození na povrchu řezné plochy. [34]



Obr. 40 Princip elektroerozivního obrábění [34]

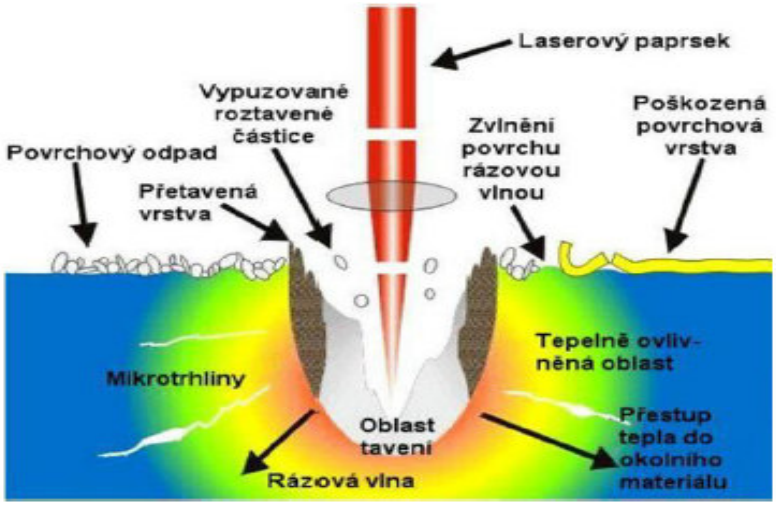
4.6.2. Obrábění paprskem fotonů - laserem

Využití laserů k rozdělování kompozitů rapidně roste také v těch aplikacích, kde problémy spojené s laserem nejsou závažné. Tato metoda je založena na přeměně energie světelné na tepelnou energii. Světlo je zaměřeno na obrobek a pak spaluje nebo odtavuje materiál pryč. V porovnání s elektroerozivním obráběním, které je pomalé, se jeví obrábění laserem jako možná alternativa. Protože nepůsobí žádná řezná síla, právě křehké kousky lze často řezat nejlépe pomocí laseru. Lasery je možno spustit na libovolném místě v obrobku a jsou schopné

řezat složité vzory. Vhodné jsou k vyvrtání otvorů, které jsou příliš malé, aby se daly efektivně vrtat mechanicky. Proto jsou široce využívány při výrobě desek s plošnými spoji.

Řezání je rychlé, ale kvalita výsledného povrchu obrobeného laserem je většinou relativně špatná. V průběhu procesu řezání se vyskytuje negativní jev, tzv. povrchové pruhování, ke kterému dochází z důsledku přerušovaného toku roztaveného materiálu. Tyto vznikající otřepy na výstupu a změny v mikrostruktuře vlivem indukování vysoké teploty jsou značně nevýhodné. Laser se skládá z:

- Laserová hlavice
  - Laserové medium – slouží k určení délky vlny záření
  - Rezonátor – slouží k zformování a zesílení záření
- Budící zařízení – ovlivňuje pracovní režim laseru
  - Laserové médium určuje způsob buzení, záleží na tom, zda je laserové médium pevné nebo plynné
- Zdroj energie buzení – speciální druh síťového napáječe
- Chladicí systém – odvádí nevyužitou energii, která se přemění v tepelnou energii
  - Nejčastěji se používá voda



Obr. 41 Obrábění laserem [34]

Tepelné účinky laserového řezání však významně ovlivňují vhodnost použití. V některých případech může nastat obtížně řešitelný problém, kdy se tvoří roztavený nebo zuhelnatělý okraj, či tepelně ovlivněné oblasti obklopující řez, z důvodu dobré tepelné vodivosti uhlíkových vláken. Problém s teplem může být horší, například u skleněných vláken, protože je třeba je ohřát na vysokou teplotu, aby došlo k jejich roztavení. Řezání tlustých dílů laserem je obvykle problematické, protože je příliš obtížné odstranit vznikající odpadový materiál, který může zůstávat v řezu, a tak rozptylovat příchozí světelnou energii, čímž blokuje další dělení. Z tohoto důvodu je řezání laserem obecně omezeno na řezání tenčích části, kde laser může bez problému proniknout do dostatečné roztaveného materiálu a nehromadilo se teplo, které by způsobovalo další nežádoucí dělení. Řezné rychlosti závisí na tloušťce obrobku, druhu materiálu a síle laseru.

Vysoce výkonné lasery jsou poměrně velké stroje, které vyžadují pečlivé sladění různých zrcadel a zaměřovacích zařízení. Tyto stroje jsou obvykle nepřenosné. Proto je obvyklé

pravidlo při použití laserů nutnost přesunout obrobek pod laser, nebo posunout laserovou hlavu. [16]

4.6.3. Řezání vodním paprskem s abrazivem

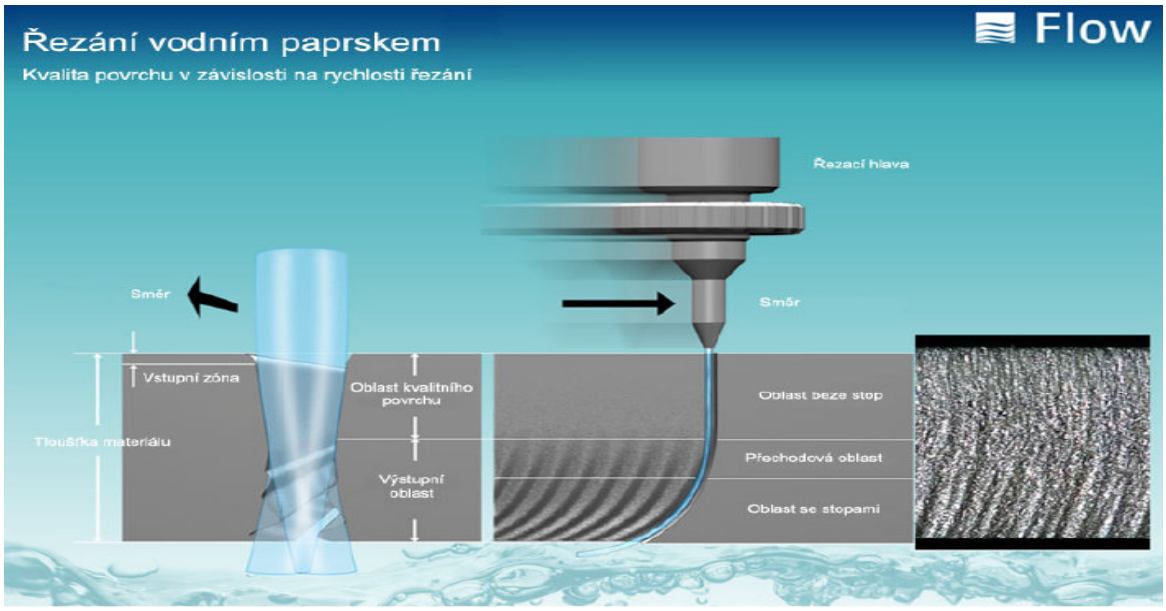
Řezání vodním paprskem získává stále silnější podporu jako způsob, jak oddělit kompozitní materiály. Podstata této metody je přeměna kinetické energie molekul kapaliny na mechanickou práci, přičemž musí platit, že při přeměně energií působí současně kavitace. V tomto procesu čerpadla zvyšují tlak filtrované vody na vysoké hodnoty (400 MPa). Voda se čerpá při nízkých objemech (4 - 8 l/min) otvorem, který má průměr od 0,1 do 0,25 mm, přímo na řezanou část. Mohou být přidány brusné přísady, které jsou unášeny v proudu vody od otvoru, čímž se získají další řezací schopnosti. Ty jsou zvláště užitečné pro řezání sendvičových materiálů. Řezání vodním paprskem lze zahájit prakticky na jakémkoli místě. Tak můžeme řezat složité vzory a lze je numericky řídit pro přesné a rychlé řezání, tím snížíme strojní čas, pokud je opakovaně řezán stejný tvar.

Nicméně z důvodu delaminace, která může vzniknout v oblasti počátečního průniku se řezání obvykle zahajuje na hraně nebo na obrobeném povrchu a pak postupně pronikat do požadované oblasti. Obrábění vodním paprskem s abrazivem – AWJM (abrasive water jet machining) má mnoho výhod vůči jiným technologiím obrábění. Ve srovnání s tepelným obráběním nevznikají při tomto obráběcím procesu vysoké teploty, a tak v místě řezu nevzniká tepelně ovlivněná oblast ani žádné tepelné deformování. Stejně jako laser je vodní paprsek vhodný pro hrubý střih a také lze díky vysoké posuvové rychlosti považovat tento způsob obrábění za efektivní. Řezání vodním paprskem je výhodné pro obrábění kompozitů s polymerní matricí.

Při řezání vodním paprskem vznikají menší řezné síly než u většiny mechanických metod a obecně vyžaduje pouze upnutí na přidržení součásti. Nedochází ke znatelně tepelně ovlivněné oblasti v blízkosti řezu a paprsek může setrvat na jednom místě, aniž by docházelo k rozšíření šířky řezu.

Proces řezání vodním paprskem je poměrně hlučný (vyžaduje ochranu sluchu), také vyžaduje filtrační zařízení na vodu, a musí se sledovat opotřebení trysky. Průnik vody mezi vrstvami vláken je potenciální problém v případě, že laminát má póry, nebo pokud se tlak vody hromadí v jednom místě a nemá kam pronikat. Toto je obzvlášť problematické v případě nadměrných tlaků vody.

Vysoká všestrannost, produktivita, flexibilita a malé řezné síly odhaluje velký potenciál k používání právě této metody. Mezi nevýhody patří drsný povrch způsobený vlivem vroubkovaného povrchu na horní části řezané plochy a hrany. Pokud chceme povrch hladší, musí se snížit rychlost posuvu. Kvalita řezu, zejména drsnost závisí na tvrdosti a pevnosti vlákna. Například řez borových vláken je mnohem drsnější, než třeba měkčích aramidových vláken. [16],[40]



Obr. 42 Řezání vodním paprskem [40]

4.7. Spojování kompozitních materiálů

Kompozitní materiály s kovovou matricí mají lepší mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách než materiály s matricí z plastu. V praktickém použití je třeba je sloučit dohromady nebo spojit s klasickými konstrukčními materiály. Problematika spojování kompozitních materiálů s kovovou matricí je složitá a v praxi se setkáváme s následujícími problémy:

a) Mnohé druhy zpevňujících vláken používaných v kompozitních materiálech jako je Al_20_3 jsou neslučitelné s přídavným kovem, potřebným na jejich spojení

b) Při spojení se porušuje kontinuita vláken, což se nedá kompenzovat jiným způsobem spojení

c) Vznikající koncentrace napětí v přeplátovaném spoji, nebo okolo díry způsobuje pokles pevnosti kompozitního materiálu

d) Při tavném svařování roztavením matrice kompozitního materiálu výrazně klesá pevnost zpevňujících vláken

e) Vlivem tepelné energie dodané do spoje klesá celková pevnost kompozitu

f) V případě použití klasické deformace při spojování kompozitního materiálu vzniká nebezpečí porušení křehkých vláken

V současné době je možné použít pro spojení kompozitních materiálů několik způsobů spojování, jako je difůzní svařování, pájení, odporové svařování, lepení, mechanické spojování šrouby, či nýty. Pro určité typy kompozitních materiálů je nutné volit vhodnou technologii spojování. [12]

- **Odporové bodové svařování**

Vzdálenost dobových svarů se volí stejně jako při svařování klasických materiálů. Vzniklý spoj je citlivý na střihovou pevnost, jehož hodnota je jen jedna desetina tahové pevnosti.

- **Difúzní svařování**

Difůzní svařování kompozitních materiálů s kovovou matricí s klasickými konstrukčními materiály se provádí při zvýšené teplotě tlakem většinou ve vakuu nebo v ochranné atmosféře. Způsoby difúzního spojování:

- jednoduché přeplátování
- dvojité přeplátování
- stupňovité přeplátování
- tupý spoj s příložkami
- šikmý spoj

- **Lepení**

Tato metoda se používá často i přesto, že je účinná jen do určitých pracovních teplot. Lepení se používá zejména v leteckém průmyslu. Hmotnost konstrukce se zvyšuje kvůli nevyhnutelnosti velkého přeplátování. S výhodou se dá použít na spojení kompozitních materiálů s nižší pevností, kde se dosahuje účinnost spojení výš jak 70%. Spojení kompozitních materiálů lepením navzájem nebo s klasickými konstrukčními materiály je spolehlivé a jednoduché. Způsoby lepení:

- jednoduché přeplátování
- dvojité
- stupňovité přeložení
- šikmý spoj

- **Pájení**

Při přeplátovaném způsobu spojení je možno využít i pájení, kde pájka je ve tvaru tenké folie a má nižší bod tavení než oba spojované materiály. Při pájení je nutné dodržovat obecné zásady, které platí pro pájení klasických konstrukčních materiálů. Pájecí materiály jsou nejčastěji slitiny na bázi křemíku s hliníkem s teplotou tavení 590°C a slitiny na bázi zinku, hliníku a mědi s teplotou tavení 380°C, které se používají jako měkké pájky. Ty mají o 10% nižší hodnotu pevnosti jako tvrdé pájky. Pájení se může provádět na vzduchu, ve vakuu nebo v nejrůznějších ochranných atmosférách jako je například argon.

- **Tavné svařování**

Hlavní problém při spojování kompozitních materiálů tímto způsobem je, že v ohraničeném prostoru je nutné roztavit jednu složku kompozitního materiálu bez poškození druhé složky. Vysoká koncentrace teploty obyčejně v místě spojení porušuje, nebo snižuje pevnost vláken. Touto technologií se úspěšně svařuje například kompozitní materiál na bázi Ti-W. Na konci obou spojovaných míst se chemicky odleptá matrice tak, aby vlákna vyčnívali asi 0,25mm. Vlákna se navzájem přeloží a udělá se tavný svár natupo s přídavným materiálem. Účinnost spojení je téměř 100%. Pro tavné spojení se používá svařování v ochranné atmosféře argonu wolframovou elektrodou a jako přídavný materiál se používají slitiny na bázi křemíku s hliníkem, které dobře smáčí bórová vlákna. Vynikající vlastnosti spojení dosahují kompozitní materiály i elektronovým paprskem.

- **Mechanické způsoby**

Kompozitní materiály se mechanicky spojují šrouby, nýty, nebo čepy. Porušení v místě spojení může vzniknout tahem, střihem, nebo kombinovaným způsobem. Účinnost

spojení kompozitního materiálu spojeného tímto způsobem je 1,2krát větší než u materiálu s vícesměnovým uložením vláken než u jednosměrně uložených vláken. Velice často se používá kombinace lepení s nýtováním kvůli mírnému zvýšení účinnosti spojení. Mechanické spoje disponují relativně nízkou pevností, ale i přes nízké účinnosti spoje se tento způsob v praxi používá často. V neposlední řadě je také nevýhodný kvůli zvyšování hmotnosti z důvodu nutného přeplátování a použití spojovacích prvků. [12]

- svařování elektronovým paprskem
- kombinované spoje
- bodové spojování

4.8. Zdravotní rizika při práci s kompozity

Každá výroba týkající se obrábění a následného zpracování materiálů má svá zdravotní rizika a obrábění kompozitních materiálů není výjimkou. I při výrobě nejmodernějších materiálů se musí dbát zvýšené opatrnosti na pracovišti a dodržovat striktně bezpečnost práce související s použitím ochranných pomůcek.

Pryskyřice

Ve výrobě se pracuje s pryskyřičnou matricí v tekutém stavu, kdy je pryskyřice v tomto stavu velmi jedovatá už ve formě výparů. Je třeba s ní zacházet opatrně v ochranných rukavicích a dýchací cesty chránit respirátory, či pracovat v odvětrávaných prostorech. Pryskyřice při kontaktu s kůží způsobuje dlouhodobé kožní problémy vlivem poleptání a alergie. Při vdechnutí výparů naleptává dýchací cesty.

Pokud řežeme, nebo brousíme kompozity, dochází k roztřepení konců vláken, které se snadno lámou a drobné částečky se ve formě prachu rozptylují do vzduchu. Vznikají tak miniaturní jehličky, které se snadno zapichují do kůže, nebo vnikají do očí, či je vdechujeme do plic. Proto je nezbytné používat při práci s nimi ochranné pomůcky, jako jsou brýle, rukavice a respirátory.

Uhlíková vlákna

Není znám významný negativní dopad na člověka při opakovaném působení uhlíku. Rizika jsou v případě působení prachu na oči, kdy způsobuje podráždění a v horším případě způsobit mechanické poranění rohovky jako u každých jiných typů třísek. Vdechování prachu z uhlíku může zapříčinit podráždění horních dýchacích cest. Nikdy bychom se neměli dotýkat rukou broušené plochy, například zkoumat hladkost povrchu, protože konce vláken jsou dostatečně pevné na to, aby pronikly do kůže. Na kůži může ojediněle uhlíkový prach způsobit alergii, ale většinou dochází k poranění mechanickou cestou. Vstřebání drobných částeček kompozitu do kůže je prakticky nemožné vzhledem k fyzikálním vlastnostem materiálu.

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se dříve používaly jako skelná vata na zateplování budov. Při špatném zacházení jsou velice zdravotně negativní, a proto je na mnoha místech používání skelných vláken zcela zakázáno včetně jejich obrábění. Platí pro ně velmi přísné bezpečnostní opatření o tom, jak s nimi zacházet. Miniaturní jehličky skleněných vláken se při kontaktu s kůží zapichují a vyvolávají nežádoucí účinky, jako jsou různé záněty kůže vlivem mechanického poranění, alergické reakce nebo podráždění očí, či zánět spojivek. Při práci se skelnými

vlákny jsou ochranné pomůcky nezbytně nutné. Je třeba brát v úvahu, pokud inhalovaná vlákna překračují stanové meze, podstupuje člověk vznik rakoviny. Při vdechování skleněného prachu se zvyšuje riziko vzniku zánětů v dýchacím ústrojí, pokles plicních funkcí, astmatu, alergie, dráždivého kašle a také celé řadě nádorových onemocnění.

5. Používané nástroje

Nároky kladené na výrobu a spotřebu moderních pokrokových materiálů stále díky silné poptávce vzrůstají, především díky leteckému, lodnímu, automobilovému a medicínskému průmyslu. Také jsou zvyšovány požadavky kladené na nové výrobní metody zaručující vysokou produktivitu výroby s požadovanou kvalitou. Při obrábění kompozitních materiálů je problém s odvodem vzniklého tepla z místa řezu, protože většina kompozitů je silně abrazivní. U nástroje na vstupu a výstupu je zase problém s delaminací.

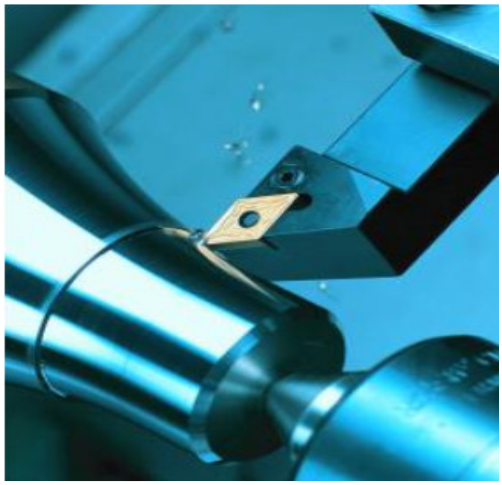
Pro obrábění kompozitních materiálů se používají právě dva typy nástrojových materiálů. Nejlevnější variantou jsou nástroje, nebo vyměnitelné břity z jemnozrnných slinutých karbidů. Cena destiček ze slinutého karbidu je až pětinásobně menší než u polykrystalického diamantu. Nástroje ze slinutého karbidu jsou charakteristické dostatečnou tvrdostí, ale abrazivní účinky skla a uhlíku rapidně snižují trvanlivost těchto nástrojů. Je možné použít i nástroje ze slinutého karbidu pokryté tenkou otěruvzdornou vrstvou polykrystalického diamantu nebo břity z polykrystalického diamantu připevněné nebo připájené přímo na tuhém nástroji. Polykrystalický diamant je typický svojí dlouhou životností, především díky vysoké tvrdosti a odolnosti vůči abrazi. Lze ho použít i za vyšších řezných rychlostí díky jeho tepelné vodivosti, tuto rychlost snižuje jen tepelná odolnost substrátu. Nevýhodou polykrystalických diamantů je, že při přerušovaném řezu vznikají rázy a při uštípnutí části řezné hrany je škoda mnohem nákladnější než u levnějších variant břitů. Volba nástroje je i přes vysokou pořizovací cenu z ekonomického hlediska lepší varianta volit nástroj z polykrystalického diamantu, zejména kvůli vyšší trvanlivosti a tvrdosti.

Obr. 43 Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami z PKD [35]

5.1. Nástroje pro soustružení

Moderní trendy soustružení FRP umožňují stále vyvíjet a vylepšovat řezné nástroje. Nejčastější opotřebení nástroje je prostřednictvím abraze a adheze obráběného materiálu, či poškození povrchu nástroje. S opotřebením souvisí fyzikální a mechanické vlastnosti vlákno matricových soustav. Sklo a uhlík jsou už v přírodním stavu extrémně drsné a jejich typické

chování je s přirozeně silnými abrazivními účinky. Z tohoto důvodu se vyměnitelné břitové destičky vyrábějí především ze slinutých karbidů a ještě více se používají destičky ze slinutého karbidu pokrytého substrátem tenké vrstvy otěruvzdorného polykrystalického diamantu. Jiné materiály se v dnešní době pro soustružení kompozitů prakticky nepoužívají. Pro obrobení tvrdých abrazivních vláken je nutné použít odolné nástroje s povrchovou úpravou polykrystalického diamantu. Geometrie řezné hrany by měla být pozitivní a velmi ostrá, tím zajistíme čistý řez třísky z materiálu a zároveň zamezíme zvyšování teploty v místě řezu. Zvyšování úhlu hřbetu je pro obrábění kompozitů výhodnější. Břit se do materiálu lépe zařezává, ale na druhé straně zase snižováním úhlu břitu je břit tenčí a náchylnější na zlomení.



Obr. 44 Soustružení s vyměnitelnými břitovými destičkami [36]

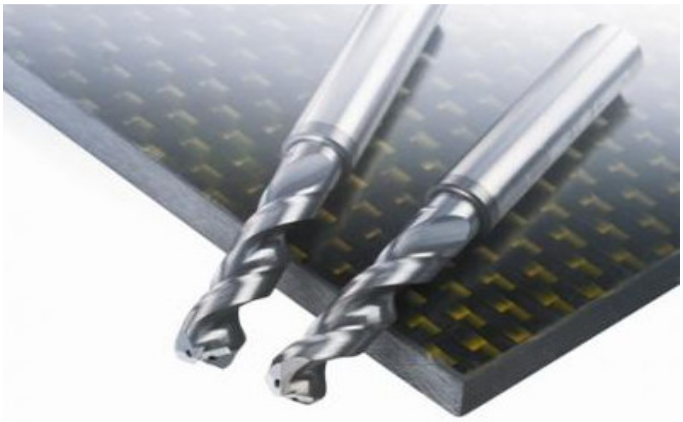
Aramidová vlákna vzhledem k nízké tepelné vodivosti a tvárnému chování poškozují obráběcí nástroje. Vlákna praskají až při velmi vysokém tlaku a deformaci v ohybu. Proto je nutné se zaměřit na optimalizaci nástroje, zejména na geometrii a ostrosti řezných hran, abychom snížili zbytečné tření špičky o obráběný materiál a následnému vzniku vysokých teplot v místě řezu. Ve vysokých teplotách při soustružení dochází k nalepování materiálu na čelo břitu a se snižujícími se parametry řezných hodnot dochází k nedokonalému řezu. Při zvětšování řezných sil dochází intenzivněji k porušení řezné části až k samému odštípnutí řezné části hrany.

5.2. Nástroje pro vrtání

Nástroje pro vrtání je nutno volit s ohledem na možnost vzniku tzv. delaminace, což je odlupování první a poslední vrstvy. V dnešní době se používají hlavně nástroje z PKD se speciální geometrií přizpůsobenou právě pro vrtání do kompozitních materiálů. Jako další možná varianta je použití bimetalických korunek se středícím šroubovitým vrtákem z HSS. Z hlediska životnosti nástroje je nejvhodnější použít PKD vrtáky, kde ochranný povlak zajišťuje diamantová vrstva. Kromě ochrany proti abrazivním účinkům zajišťuje diamantová vrstva také ochranu proti teplotním účinkům. Životnost se zvyšuje použitím vyšších řezných rychlostí, které si však nemůžeme dovolit kvůli tepelnému selhání karbidového substrátu materiálu. Snížení adheze diamantové vrstvy má za následek zvýšení teploty řezání, které způsobují neoptimální řezné podmínky a tudíž zvýšení řezného odporu. Zvyšování řezných sil zabraňuje čistému řezu a zvyšuje se riziko delaminace ve výstupní vrstvě laminátu. Vrtáky z SK mají nižší trvanlivost a jsou několikanásobně levnější než povlakované vrtáky z PKD, přesto jsou však z hlediska ekonomického a kvalitativního PKD vrtáky výhodnější variantou.

Hlavní činitel pro zamezení vzniku delaminace a otřepů je geometrie řezného nástroje. Důležité je velmi ostré ostří umožňující plynulé řezání tvrdých vyztužujících vláken a lepší

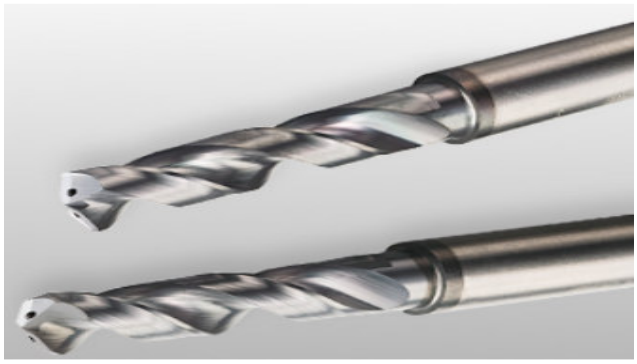
kvalitu řezané díry. Pokud vhodně zvolíme vrták tak, aby vyrobil díru v požadované kvalitě povrchu a jen na jednu operaci, zkrátí se, nebo odpadnou následující operace. Tím se prodlužuje trvanlivost břitů nástroje a zkracuje čas neprovedených operací. Obvykle se k vrtání používají speciálně optimalizované negativní geometrie vrtáku s velice ostrým ostřím. Tyto geometrie odřezávají materiál po obvodu vrtané díry. Pro vrtání FRP se také používají čelní frézy, vrtací hlavy s vyměnitelnými PKD břity, nebo vrtáky se speciální geometrií pro jednotlivé materiály. [38]



Obr. 45 Kompozit a vrtáky CoroDrill od firmy Sandvik [37]

Levnější alternativou jsou vrtáky s bimetalickými korunkami. Záměr správného vyvrtání díry je, aby vlákna na obvodu otvoru byla přeřezána a zamezilo se tak roztřepení a vylamování částí vláken. Vrtací nástroj je tvořen několika částmi, jako jsou držáku, vodícího vrtáku z RO a řezné korunky. Vodicí vrták je většinou malého průměru, vyroben z rychlořezné oceli a je upnut do držáku. V tomto případě je nástroj určen výlučně pro vyvrtávání průchozích děr. Průměr korunky určuje průměr vrtané díry.

Pro výrobu děr do materiálu s velkým podílem polymerní matrice spojené s delaminací a třepením jsou navrženy vrtáky CoroDrill se speciální geometrií. Tyto vrtáky jsou navrženy se zřetelem na zvýšení kvality opracování na vstupu a výstupu díry u materiálu s velkým objemovým podílem uhlíkových vláken. Ke zvýšení kvality díry a snížení axiálních řezných sil přispívá malý úhel špičky a velký úhel čela, protože zejména u tenkostěnných součástí dosahují axiální síly mnohdy až kritických hodnot. [38]



Obr. 46 Vrtáky CoroDrill 854/856 [38]

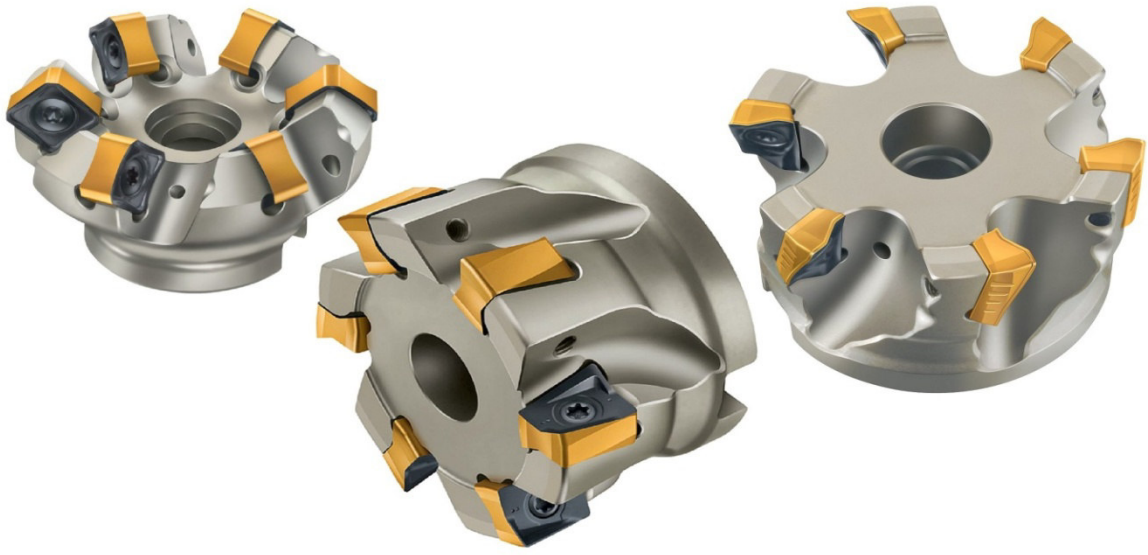
Vrták CoroDrill 854 – vrták s diamantovým povlakem se speciální navrženou geometrií špičky tak, aby bránila vzniku třepení a vyštipování. Vhodný je k vrtání do CFRP materiálů s vysokým podílem vláken a vrstvené materiály CFRP/hliník. [39]

Vrták CoroDrill 856 – tento vrták s diamantovým povlakem je vhodný hlavně na vrtání CFRP materiálů s vysokým objemovým podílem matrice, pro materiály odolné proti vysokým teplotám a kompozity vyztužené skleněnými tkaninami. Konstrukční řešení tohoto vrtáku je navržené s ohledem na zamezení vzniku delaminace. [38]

Obr. 47 Úhly na vrtácích CoroDrill 854/855/856 [38]

5.3. Nástroje pro frézování

Nejčastěji se používají nástroje s vyměnitelnými destičkami. Tvrdost uhlíkových vláken během obrábění má za následek vysokou úroveň opotřebení. Protože se opotřebení projevuje hlavně na ostří nástroje zaoblováním řezné špičky, musí mít nástrojový materiál vysoký stupeň odolnosti vůči otěru a celkovou pevnost proti odštípnutí. Tyto požadované vlastnosti splňují jemnozrnné SK a PKD materiály, například keramické materiály nejsou vhodné, protože při obrábění FRP materiálů jejich nízká tepelná vodivost neumožňuje ideální odvod vznikajícího tepla. Výjimkou nejsou ani KBN materiály, které mají nízkou odolnost vůči opotřebení a tak nepředstavují žádnou výhodu vůči PKD břitům i přes srovnatelnou cenu. Protože obrábění FRP kompozitů vyžaduje použití vysoké řezné rychlosti, musí být nástroje dokonale vyvážené, používají se frézy jak s přímými zuby, tak se zuby do šroubovice, přičemž počet zubů není nijak limitován. Pro obrábění CFRP kompozitů je doporučeno použít výhradně nástroje se zuby do šroubovice. Tyto nástroje vytvoří lepší povrch než nástroje s přímými zuby, které se rychleji ucpou, díky horšímu odvodu třísek z místa řezu. To má za následek stlačení povrchu a také zhoršení jeho jakosti. Nástroje se zuby do šroubovice vyvíjí axiální sílu, která může způsobit delaminaci vrstvy, která však není nijak podepřena proti směru, kam axiální síla působí. Tento nepříznivý úkaz byl vyřešen použitím zubů do protiběžných šroubovic. Na kvalitu obrobené plochy má také významný vliv opotřebení nástroje. [9],[39]

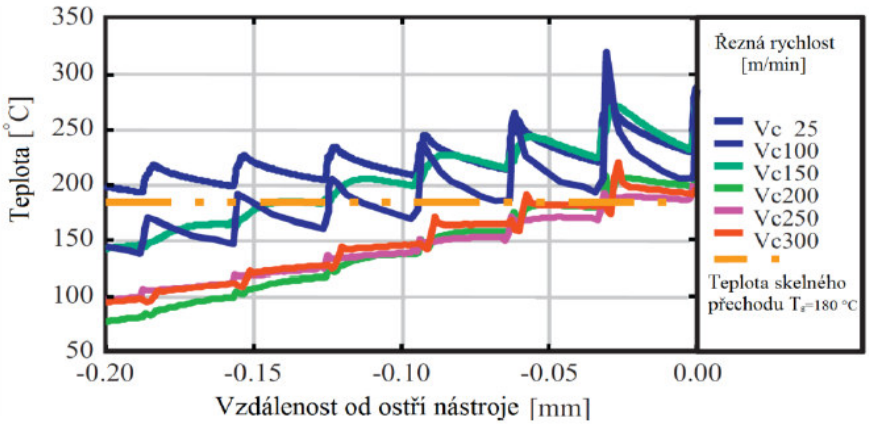


Obr. 48 Frézy s vyměnitelnými PKD břity [39]

Důležité je zvolit optimální řezné podmínky, protože při frézování dochází k přerušování vláken ve všech směrech najednou. Aby se zabezpečilo přerušování skleněných a uhlíkových vláken čistým řezem, je podstatné, aby byla zajištěna velmi vysoká ostrost břitu. Vzhledem k výrazné náchylnosti křehkého lámání vláken, geometrie nástroje je podobná jako při obrábění konvenčních kovů. Geometrie řezné špičky a řezné hrany by měla být pokud možno s co možná nejmenším rádiusem. Pokud chceme zabránit třepení při delaminaci v horní vrstvě, lze tomu zabránit použitím nástrojů se spirálou v protisměru hodinových ručiček, především u laminátů jsou účinné protisměrné spirály. Síly se tak uvolňují z okrajových vrstev směrem ke středu obrobku. Standardní geometrii nástroje však nelze použít pro obrábění kompozitů, které jsou vyztuženy aramidovými vlákny, protože jednotlivá vlákna mohou být oddělena jedině čistým řezem za současného předpětí. Geometrie nástroje proto musí umožnit předpětí vláken před začátkem řezného procesu a dále jsou kladeny požadavky na vysokou ostrost, malé utvářeče třísek a malý rádius řezné špičky. [9],[39]

5.4. Teplo vzniklé při frézování

Při obrábění FRP kompozitů nastává zásadní problém s odvodem tepla z místa řezu, především díky nízké tepelné vodivosti polymerních matric. Při obrábění polymerů vzniká smykem teplo v oblasti primární a sekundární plastické deformace vlivem tření třísky o čelo nástroje. V oblasti terciální plastické deformace vzniká tření obrobené plochy o břit nástroje vlivem elastické deformace. Ve srovnání s obráběním kovů, kde je až 70% vzniklého tepla odváděno třískou, kvůli vysoké řezné rychlosti, je při obrábění polymerů 90% tepla odvedeno třískou, především díky tomu, že teplo se nedostane téměř k nástroji. Kvůli tomuto faktu může matrice termosetického materiálu díky lokálnímu ohřevu začít hořet, termoplastická se může zase nalepovat na již obrobený povrch. V porovnání jsou vlákna z uhlíku schopna odvádět teplo ve směru jejich os lépe než aramidová, nebo skelná vlákna, což vede k lepšímu odvodu tepla z místa řezu. Přesto má však spojení s polymerní matricí výsledný CFRP kompozit velmi nízkou tepelnou vodivost, je proto třeba sledovat hodnotu teploty skelného přechodu matrice a teplotu v těsné blízkosti ostří nástroje. Teplota se se zvyšující vzdáleností od ostří rapidně snižuje díky nízké vodivosti matrice. Při překročení teploty skelného přechodu dojde k nenávratné ztrátě pevnosti matrice a ke zhoršení kvality obrobené plochy. V grafu 3 je možné vidět závislost teploty na vzdálenosti od ostří nástroje. Chlazení je problematické kvůli nasákavosti matrice a olejové emulze se z těchto materiálů velice špatně odstraňují. Rozdílné teplotní koeficienty roztažnosti mohou přispívat k pnutí materiálu, které můžou i obrobek poškodit. [9],[15]



Graf 3 Závislost teploty vzorku na vzdálenosti od oblasti primární plastické deformace [15]

6. Směr budoucího vývoje

Přestože se kompozitní materiály neustále vyvíjejí, zlepšují a inovují, jedná se stále o celkem nové moderní materiály, jejichž vývoj vede k vyvíjení supermateriálů s velmi vysokými hodnotami vlastností.

Hlavní příčinou, proč se kompozitní materiály neustále vyvíjejí, je otevření trhu s uhlíkovými vlákny. Donedávna nebylo možné do tuzemska dovážet tyto materiály, kvůli jejich unikátním vlastnostem, využívaným zejména v armádním průmyslu. I přesto se v dnešní době monitoruje dovoz těchto vláken a firmy zpracovávající karbonové vlákno musí mít na zpracování uhlíku speciální povolení. Kompozitní materiály se v průmyslu rozvíjejí do stále běžnějších předmětů pro denní užívání. V porovnání s ostatními materiály jsou natolik výjimečné, že je nelze nahradit jinými konvenčními materiály, jsou stále kompozity brány jako materiály budoucnosti.

Protože se kompozitní materiály musí zpracovávat a upravovat do požadovaného tvaru, souvisí tak i vývoj obráběcích nástrojů. Stále více firem je zainteresováno do vývoje nástrojů, které by byly dostatečně odolné pro obrábění kompozitů s požadovanou kvalitou, přesností materiálu a trvanlivostí nástroje. Důležitými faktory pro správné obrábění jsou vysoká pevnost materiálu, dobrá tepelná vodivost, optimalizovaná geometrie a vysoká ostrost břitu. Jinými slovy, nástroje vykazující trvanlivost, produktivitu a ekonomičnost výroby.

Spousta součástí je vyráběna přímo do finálních rozměrů a tvarů. Tím odpadají veškeré obráběcí operace a náklady spojené s obráběním. Přesto je třeba některé rozměrové přesnosti a tvary, do kterých spadají díry a náboje, souměrnost a kruhovitost, dokončit obráběcím procesem do požadované tolerance. Další možností budoucí výroby může být přizpůsobení výroby vkládáním vláken do materiálu tak, aby po následném soustružení nebyla na povrchu materiálu přeřezaná vlákna, která snižují celkovou pevnost celé součásti. Vlákna by byla kladena v materiálu s ohledem na budoucí tvar.

7. Experiment

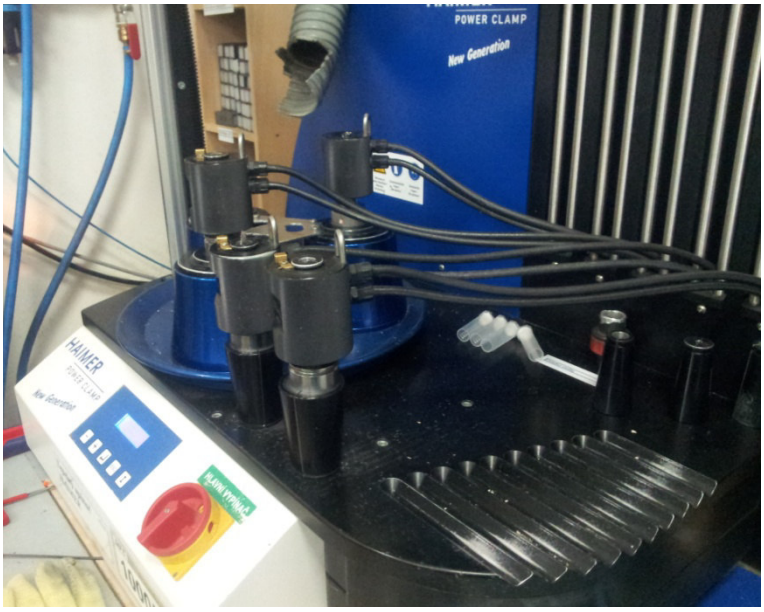
Ve firmě Novem Car v Touškově byly provedeny experimenty v podobě frézování sendvičového materiálu interiérových částí do osobních aut. Vyráběny byly tři části, dva kryty popelníku a jeden rámeček okolo klimatizace. Cílem bylo zjistit, kolik kusů jsou schopny frézy obrobit v takovém stavu, aby nevznikaly groty, či nenatavovala fréza plast. Jinými slovy, trvanlivost frézy, při kterém začne vytvářet zmetky, nebo nijak jinak produkovat velmi špatně obrobené kusy, především na vizuální vzhled je kladen u interiérové části vozu kladen velký důraz.

Protože zákazníci požadují tu nejšpičkovější kvalitu u vozu vyšších tříd, firma Novem Car musí zajistit obrábění na takové úrovni, aby vyhověla v maximální míře svým zákazníkům. Vhodná metodika obrábění byla zkoumána experimentálně, aby se zvolil nejvhodnější nástroj, který by zaručoval stále vysokou kvalitu řezu v závislosti na vysoké trvanlivosti. Proto firma neustále testuje frézy s různými povlaky, včetně tenkých vrstev a různou geometrií, aby dosáhla požadovaných kvalit na méně upnutí fréz, které je potřeba po určitých kusech měnit a ostřit. Výsledky experimentu mohou sloužit nejen jako informační hodnoty pro vylepšení dosavadní technologie, ale také jako základ pro další rozvoj zpřesňování výroby.

7.1. Použité stroje

Heimer Power Clamp

Pro upnutí fréz se použilo tepelné upnutí pomocí přístroje Heimer Power-Clamp, který je vybaven integrovaným nastavováním délky nástrojů a garantuje přesnost 0,05 mm. Obsluha stroje nastaví na stupnici délku a poté najede indukční cívkou na tepelný držák a zahřeje jej. Ihned po ohřátí držáku vloží frézu do držáku, vyklopí doraz nad nástroj a dotkne se nástrojem dorazu. Během několika málo sekund se držák zchladí natolik, že fréza nyní pevně drží. Poté lze odklopit doraz zpět a nástrojový držák zchladit pomocí chladicího adaptéru. Tímto způsobem lze velmi přesně nastavit frézu na přesnost 0,05 mm. Tepelné upínání se označuje jako štrumfování fréz.



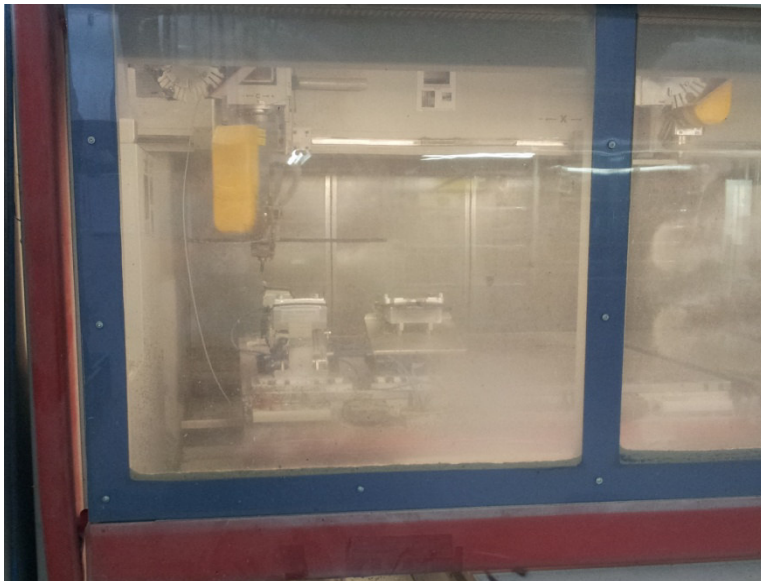
Obr. 49 Tepelně upínací stroj Heimer

Siemens 5-ti osé obráběcí centrum MA21043408

Jednotlivé obráběné součásti jsou různě tvarově zakřivené a je třeba je vyrábět velice přesně, proto je vhodné použít moderní přesné víceosé obráběcí centrum. Složitější součásti, jako je panel okolo klimatizace, se obrábí na dvě upnutí. Nejdříve se kontura obrobí nahrubo, poté na čisto, nakonec se frézou ⌀6 mm obrobí na čisto vnitřní kapsy. Po přeupnutí se obrobí zbylá kontura na čisto. Frézování nahrubo je nesousledné a načisto v 90 % případech sousledné.

V závislosti na stavu frézy a povrchu se program mění, aby byly podmínky pro danou situaci nejlepší, a tak se nedá jednoznačně říci, zda se jedná o sousledné, nebo nesousledné frézování. Sousledné frézování je výhodnější hlavně kvůli úsporám času, proto se volí především u frézování na čisto. Při rychlostním frézování se doporučuje téměř výhradně sousledné frézování, které je charakterizováno minimalizací trhavých pohybů. Je výhodnější ze silového hlediska než nesousledné. Dále zde dochází k menšímu opotřebení nástroje, což je dáno tím, že při nesousledném frézování dojde ke vniknutí zubu frézy do materiálu, až když tloušťka obráběného materiálu před zubem frézy přesáhne velikost poloměru ostří. Do té doby dochází vlivem poloměru ostří k deformaci obráběného povrchu i k jeho zpevňování, které tímto znesnadňuje obrábění. Dále se jedná o snahu vytvořit tzv. kontinuální obrábění bez přerušení (žádné chody naprázdno). Těmto předpokladům vyhovuje sousledné (souhlasné) frézování.

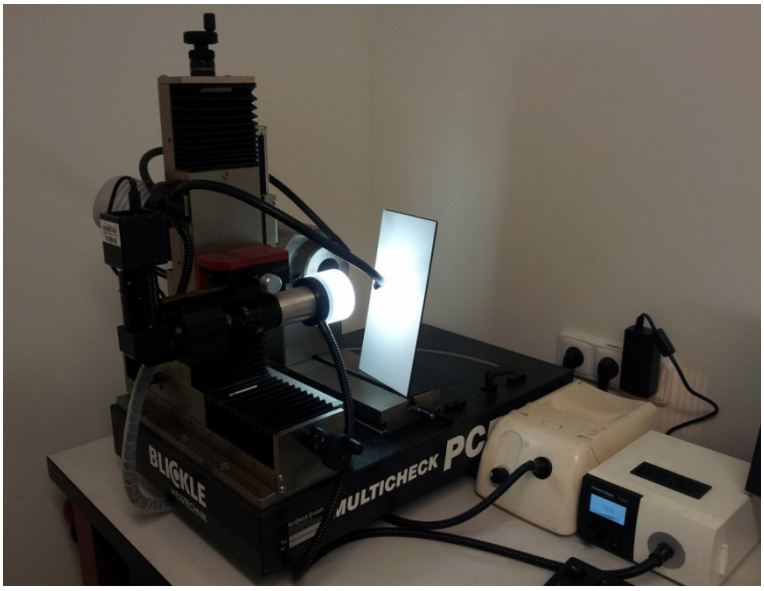
Díky použití pětiosé technologie s obrobkem s nízkou tvarovou rozmanitostí lze optimalizací vlastního obráběcího procesu docílit značných časových i finančních úspor, popř. docílit vyšší kvality obrobeného povrchu. Důležité je hlídat si a vyvarovat se dokončování tupým nástrojem, což se negativně projeví jak na průběhu obrábění, tak na výsledné kvalitě povrchu. Klasická odzkoušená hrubovací technologie zaručuje hladký povrch a tichý chod, ale to se odráží na délce strojního času. Obrábění přímo načisto do plného materiálu dosahuje mnohonásobně nižší strojní čas oproti klasické technologie nahrubo a poté načisto, za použití stejných řezných podmínek. Neodmyslitelně však dochází však k vyššímu opotřebení nástroje.



Obr. 50 Obráběcí centrum Siemens

Optický mikroskop Multicheck PC500

K měření byl použit optický mikroskop pro měření řezných nástrojů.



Obr. 51 Mikroskop Multicheck PC500

7.2. Použité nástroje

Byly použity čtyři varianty nástrojů, které byly každý jinak upraveny, jak povrchovou úpravou, tak typem tenké vrstvy. Nástroje byly v upínači označeny bílou speciální barvou, aby nedošlo k pomíchání testovaných nástrojů a zamezilo se omylu ve výsledcích. Zkoumané nástroje byly úplně nové, nikdy nenasazeny v provozu.

Obr. 52 Testované frézovací nástroje

7.3. Popis obráběného předmětu

Panel okolo klimatizace

Tento panel se obrábí na dvě upnutí, aby došlo k dokonalému obrobení z obou stran. Vnitřní kapsy se nejdříve obrobí nahrubo a poté se v zásobníku vymění fréza za dokončovací frézu ⌀ 6 mm, která objede jedním směrem konturu obou kapes podle vyznačeného směru. Nakonec je celá vnější kontura objeta načisto. Po přeupnutí se obrobí zbylá kontura také na čisto. Po konci obrábění je celá boční obrobená plocha nastříkána lesklou černou barvou, aby řez nekazil celkový dojem panelu, kdy jsou vidět jednotlivé vrstvy z kterého je sendvič tvořen. Finální operace je proces leštění povrchu panelu, především aby byl povrch lesklý a na omak jemný.

Obr. 53 Směr frézy na panelu při prvním upnutí

Obr. 54 Směr frézy na panelu při druhém upnutí

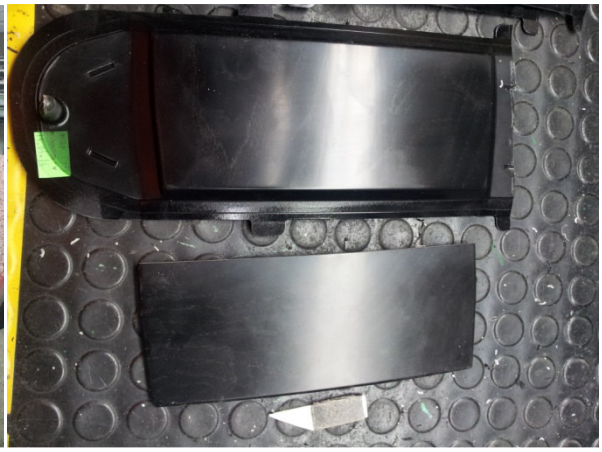
Kryty okolo popelníku

Tyto součásti jsou dodávány z lisovny ve dvou kusech na jednom platu. První operací je rozřezání na pásové pile na jednotlivé díly, což je vidět na obrázku 58, poté je kryt jednotlivě vložen do přípravku a na jedno upnutí je obroben. Nejdříve se v jednom směru obrobí tak, aby odpadl přebytečný materiál, zpětně je pak kontura frézována načisto. Větší popelník je složitější obrobit kvůli spodní drážce, kdy se musí nástroj natáčet skoro až do vodorovné polohy.

Obr. 55 Směr frézy na krytu okolo popelníku I

Obr. 56 Směr frézy na krytu okolo popelníku II

Obr. 57 Upnutí panelů v přípravcích

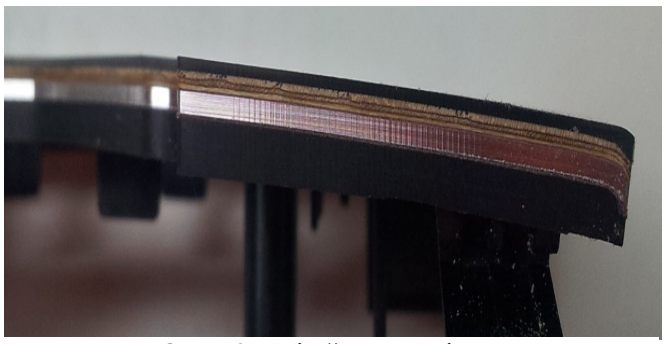


Obr. 58 Porovnání panelu z lisovny a hotového výrobku

7.4. Postup měření experimentu

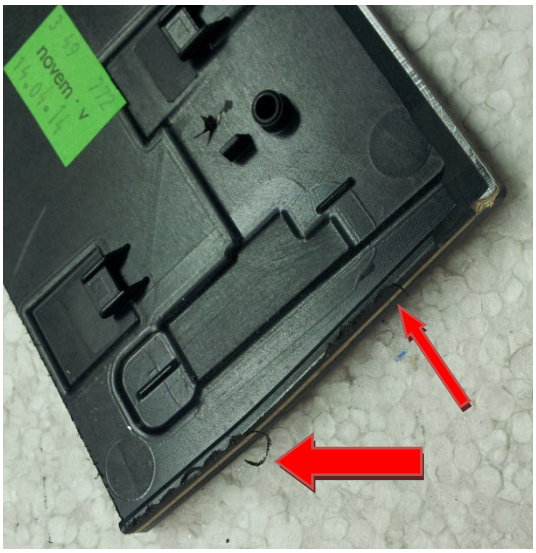
Nejprve byly vybrány zkušební frézy, které se na mikroskopu zkoumaly, jestli nejsou už předem s vruby, aby nedošlo k předčasnému ukončení experimentu ve formě lomu nástroje. Byl určen levý břit, který je důležitý si pečlivě označit, aby se celý zbytek měření prováděl na stejném ostří, protože tím by se do experimentu mohla zanést veliká chyba. Zkoumala se struktura nástroje na ostří po 1mm na všech frézách, které byly nové a nikdy nepoužité. Fréza se musí důkladně očistit plastelínou před měřením, aby se odstranily různé nečistoty, které se na břitu usazují a zkreslují jak vizuální vzhled, tak přesnost měření.

Po naměření nových fréz byly vystaveny běžnému provozu ve firmě Novem Car, kde každá fréza obrobila svých prvních dvacet kusů. Následně byly vyjmuty a opět se zkoumala jejich struktura na mikroskopu. Byly určeny kritické body s malými vruby, kde by mohlo napětí vzrůstat a narůstat tak hloubka vrubů. Co se týče vizuálního stavu obrobených kusů, tak nebylo vidět žádné známky opotřebení, řez byl naprosto ideální a fréza netvořila groty, nebo nenatavovala okolní plast, viz obrázek 59.

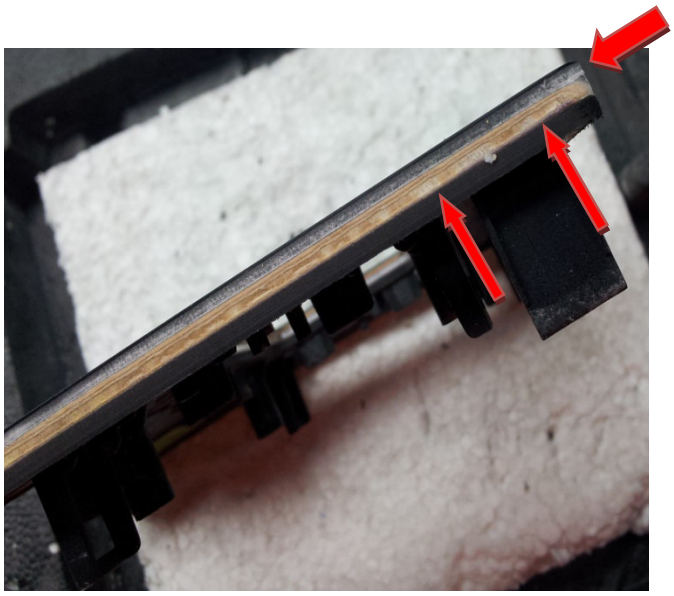


Obr. 59 Ideálně obrobený kus

Frézy se opět tepelně upnuly (našrumfovaly) a byly nasazeny do provozu, aby mohly frézovat další kusy. Tentokrát se obrábělo 30 kusů, celkově tedy 50 obrobených kusů. Nástroj č. 1 praská téměř okamžitě po pěti obrobených kusech a další nástroj č. 2 vydrží dvacet kusů a také praská. Zbývající nástroje se nelámou, avšak začínají jevit známky opotřebení což je vidno na obráběných kusech. Po hlubším zkoumání na mikroskopu nástrojů č. 3 a 4, už jsou nástroje značně opotřebené a vytváří se na břitech opotřebení, nebo nárůstky. Tvoří se také nové vruby, nebo se zvětšují, či lokálně rozmnožují. Na některých částech břitu se nalepuje materiál, který zde vázne nebo se tvoří natavené kapičky, protože se jedná o obrábění za sucha, bez chladící řezné kapaliny. Na obráběných kusech se začínají tvořit jemné groty (obrázek 60), které se dají lehce odstranit, ale zbytečně to zaměstnává obsluhu. Lehce se natavuje struktura materiálu, to je vizuálně možno sledovat bílými čárami, které se tvoří uprostřed a hlavně na rozích, kde je zaoblení, které není tak dokonalé a kvalitní jako u předchozích dvaceti kusů.



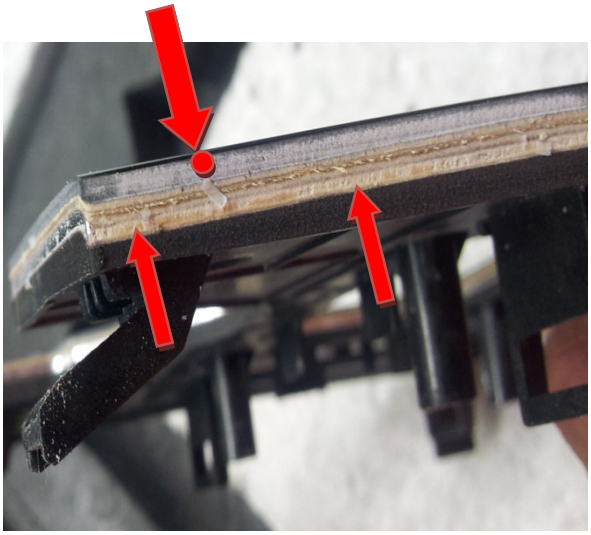
Obr. 60 Jemné groty na panelu



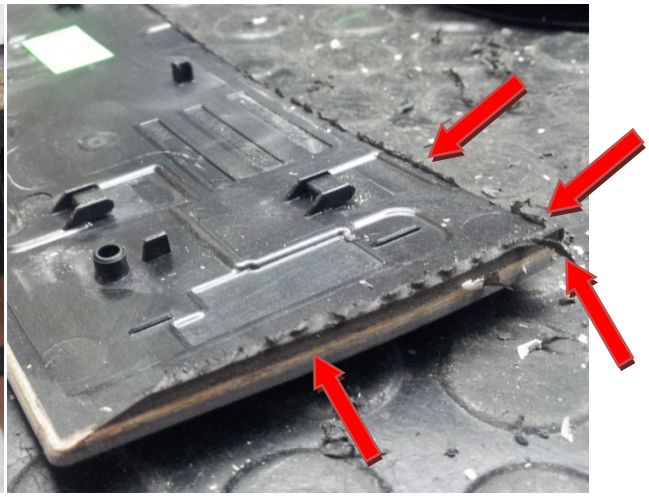
Obr. 61 Začínající natavování a vytrhávání plastu

Nakonec byly frézy nasazeny na odjetí plánovaných 50 kusů, celkově se počítalo s obrobením 100 kusů. Norma stanovuje 110 kusů, ale v našem případě se netestovalo naráz, ale po určitých kusech. Samozřejmě tepelné nandávaní a vyndávání příliš nástroji nesvědčí a podepsalo se to z mále části také na trvanlivosti nástroje. Protože byly nástroje značně opotřebované už po předchozích 50 kusech, obsluha stroje se rozhodla, že se nedodrží stanovený počet, ale vyrobí se tolik kusů, dokud se nebudou tvořit až příliš nekvalitní výrobky, které si nemůže firma dovolit. Nakonec se odjelo 30 kusů, celkově tedy 80, oproti plánovaným 100 kusů. Frézy jevily známky velkého opotřebení a ve výsledku tvořily tak na obrobcích otřepy, nebo materiál rovnou vytrhávaly. Výrobky už se tvořily natolik nekvalitní, že se musely často odstraňovat přebytečně otřepy, kterých bylo příliš, prakticky na každé

obráběné kontuře. Přerušovaný řez nástrojům nesvědčí, rozhodně by bylo lepší frézovat rovnou 100 kusů právě z důvodu velkého tepelného zatížení.



Obr. 62 Natavený plast, otřepy



Obr. 63 Příliš mnoho grotů na panelu

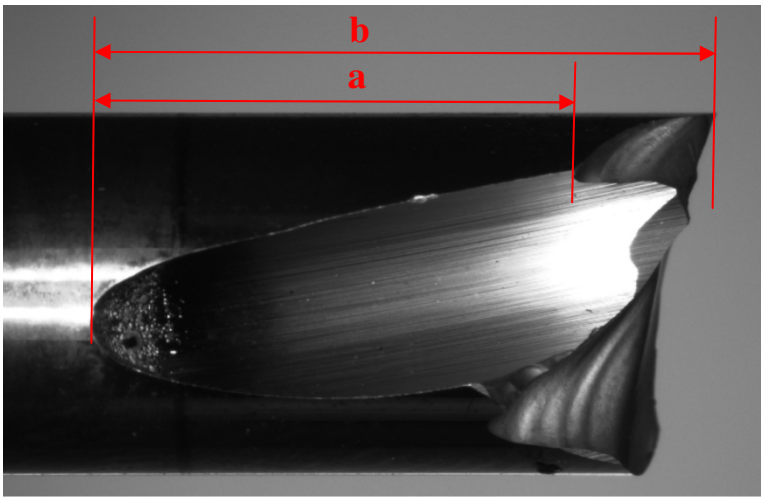
7.5. Výsledky

Nástroje byly měřeny po obrobených 20, 50 a 80 kusech. Zkoumala se struktura, která se s počtem odfrézovaných kusů měnila a porovnávala se na jednotlivých nástrojích. Po zohlednění vzniklých vad na břitech nástrojů se podle podobnosti vad a opotřebení zvolilo kritické místo (ve vzdálenosti 15 mm od špičky) a toto místo se dále porovnávalo vždy po odjetí počtu příslušných kusů. Opotřebení se může zdát, že s počtem kusů narůstá, což však není úplně pravda, což dokazují naměřené hodnoty z tabulky č. 3.

Počet kusů	Nástroj 1 [µm]	Nástroj 2 [µm]	Nástroj 3 [µm]	Nástroj 4 [µm]
20	18	27	19	28
50	-	-	20	26
80	-	-	24	37

Tab. 3 Výsledky opotřebení na nástrojích v kritickém místě

Nástroje č. 1 a 2 mají změřeno opotřebení jen po dvaceti kusech, protože poté praskly a nelze na nich již dále měřit. Zkoumat na nich lze délku lomu viz obrázek 64. Měřilo se od výběhu brusného kotouče do začátku lomu (a) a pak až do konce nejvyššího bodu lomu nástroje (b).

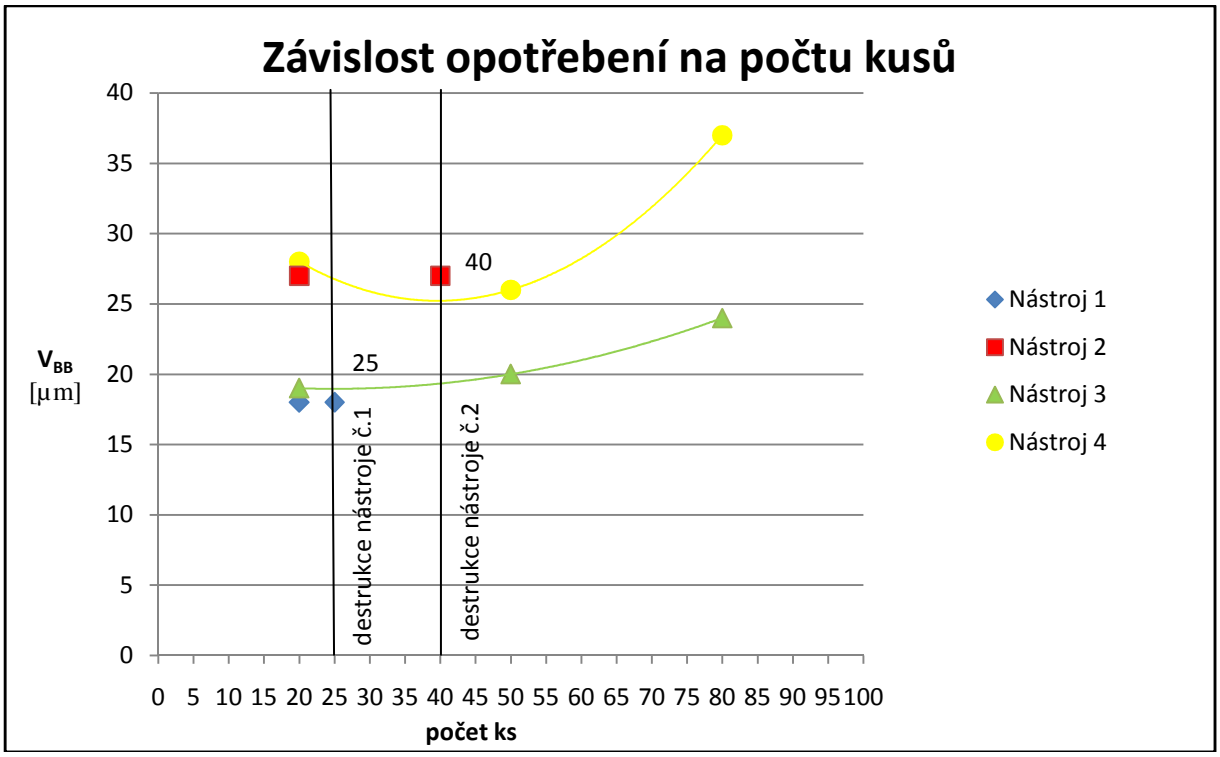


Obr. 64 Vzdálenosti lomu nástroje

Vzdálenost	Nástroj 1 [µm]	Nástroj 2 [µm]
a	13,006	15,169
b	12,432	15,792

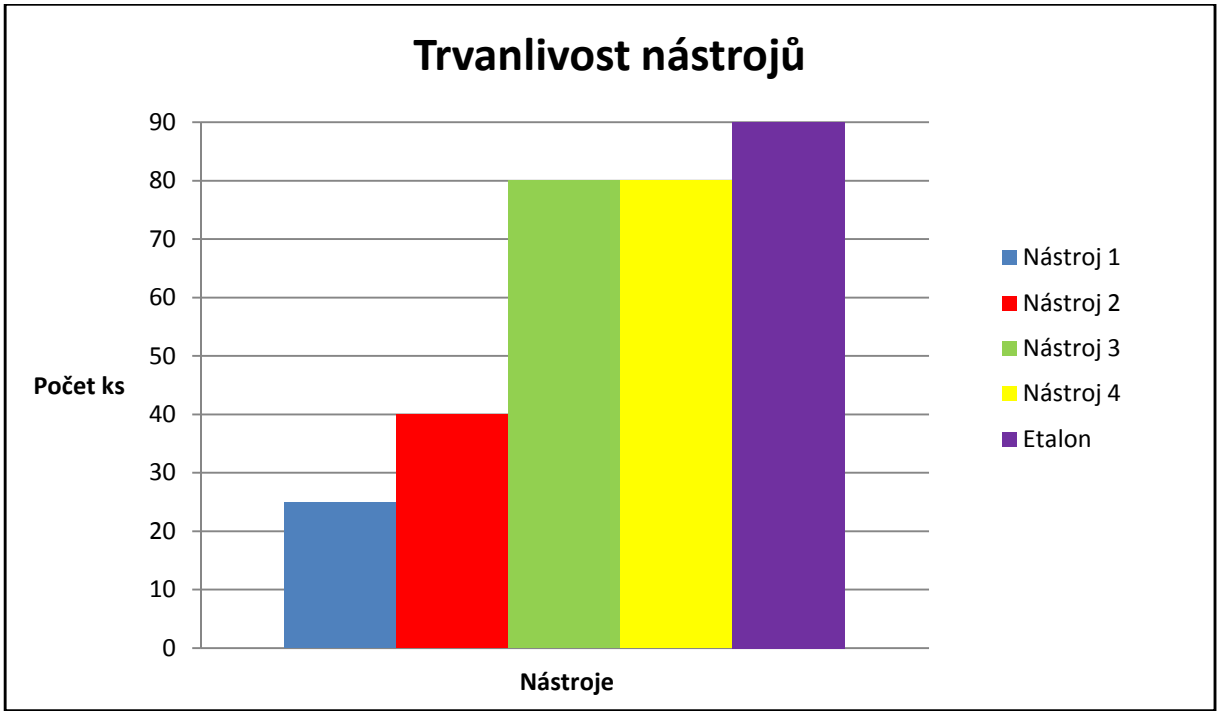
Tab. 4 Naměřené hodnoty lomu nástrojů č. 1 a č. 2

Výsledky jsou sumarizované do průběhu trvanlivost opotřebování v závislosti na počtu v kusech. Pro lepší představu jednotlivého opotřebování slouží graf č. 4.



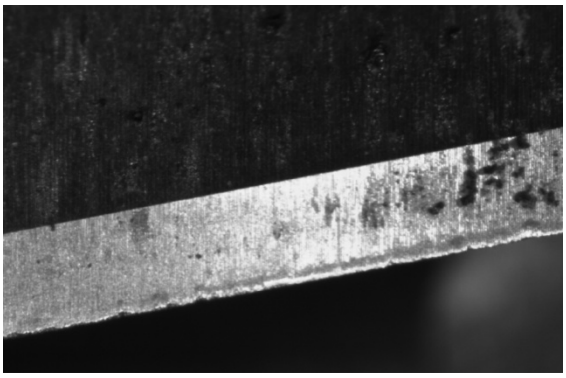
Graf 4 Závislost opotřebení počtu kusů

Bylo provedeno testování různých variant s cílem zvýšení trvanlivosti vůči etalonovému nástroji. V rámci experimentu těchto variant, které byly použity, nebylo však docíleno zvýšení.

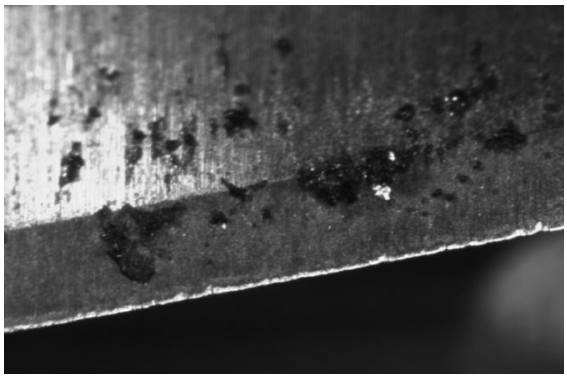


Graf 5 Trvanlivost nástrojů

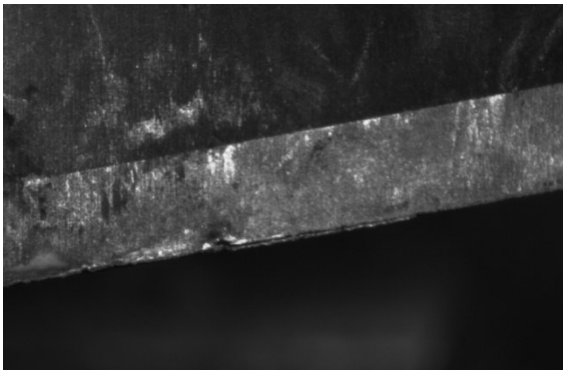
Nástroje č. 3 a 4 dosáhly maximální testované trvanlivosti a to obrobených 80 kusů. Nástroje č. 1 a 2 dosahují 25, respektive 40 kusů. Nicméně z dostupných naměřených hodnot po dvaceti kusech, které absolvovaly všechny nástroje, jsou patrné rozdíly. Uvedené obrázky 65 až 68 zobrazují stanovené kritické místo (15 až 20 mm od břitu), kde je vidět, že nástroje č. 1 a 2 mají rovnoměrné opotřebení oproti nástrojům č. 3 a 4, které mají opotřebení střídavě s nárůstky a vruby. V tabulce č. 3 je vidět srovnání opotřebení jednotlivých nástrojů a nástroj č. 2 má hned druhou nejvyšší hodnotu otupení, avšak rovnoměrně s přibývající vzdáleností klesá hodnota opotřebení, což se nedá říci u ostatních testovaných nástrojů. Opotřebení na nástroji č. 1 roste i za měřeným kritickým místem a vyskytují se na něm i velmi malé vruby, kdežto na nástroji č. 2 nebyl nalezen žádný. Z tohoto důvodu nelze prohlásit, že by díky grafu 5, byly nástroje č. 3 a 4 vhodnější oproti zbytku, protože nebyl proveden kompletní porovnávací test, kde by bylo možné porovnat přesněji všechny nástroje po stejných kusech. Při porovnání po dvaceti kusech jednoznačně vychází svojí rovnoměrnou strukturou opotřebení nástroj č. 2, a proto by bylo vhodné identický nástroj otestovat znovu s tím, že by vydržel 80 kusů a tím by byly docíleny adekvátní vypovídající hodnoty vhodné k porovnání s ostatními nástroji.



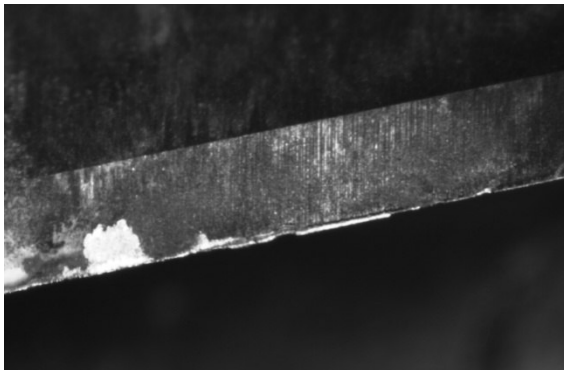
Obr. 65 Struktura nástroje č. 1



Obr. 66 Struktura nástroje č. 2

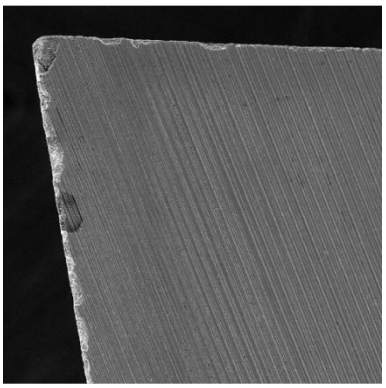


Obr. 67 Struktura nástroje č. 3

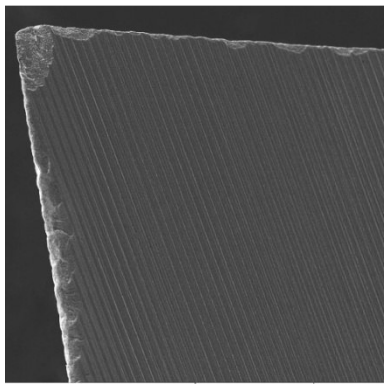


Obr. 68 Struktura nástroje č. 4

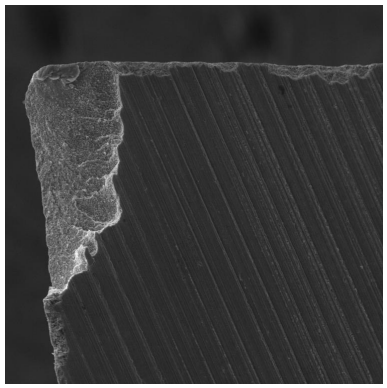
Porovnáním struktur nástrojů na elektronovém mikroskopu je zřejmé, že nejméně vyštípaný břit má nástroj etalonový o něco více má nástroj č. 1 a nástroj č. 2 má velké vyštípnutí na břitu. Etalonový nástroj má také rovnoměrnou strukturu, podobně jako nástroj č. 2. Z tohoto důvodu je nepochybné, že etalonový nástroj je schopný dosáhnout trvanlivosti 100 kusů, oproti ostatním nástrojům, které už jsou nějakým způsobem ze začátku poškozeny ať už více, či méně.



Obr. 69 Břit Etalonu



Obr. 70 Břit nástroje č. 1

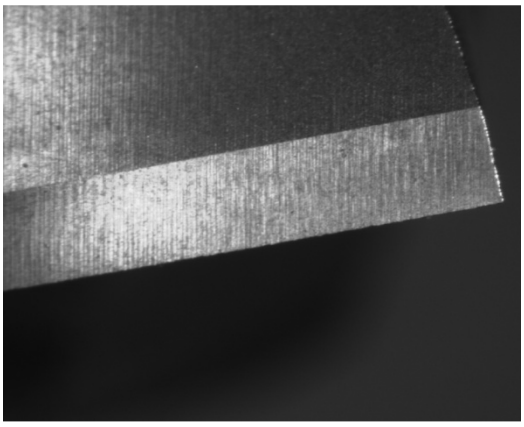


Obr. 71 Břit nástroje č. 2

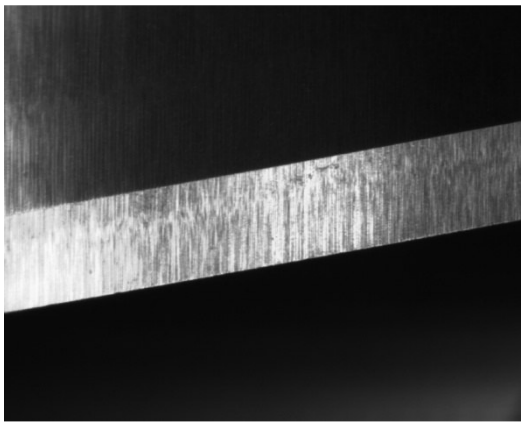
7.6. Zhodnocení

Frézy byly zkoumány prakticky od jejich počátku, ještě před započetím obráběcího procesu. Bylo zkoumáno, jestli na povrchu není nějaké opotřebení, lom, nebo cokoli, co by

znemožňovalo nasazení fréz do provozu. Nic takového však nenastalo, a tak se frézy po detailním prozkoumání struktury na povrchu nasadily do provozu.

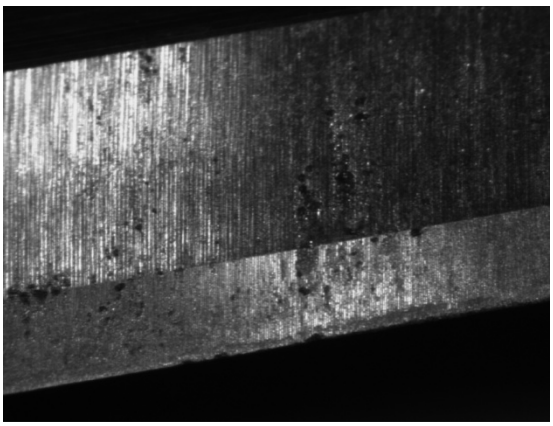


Obr. 72 Nový nástroj

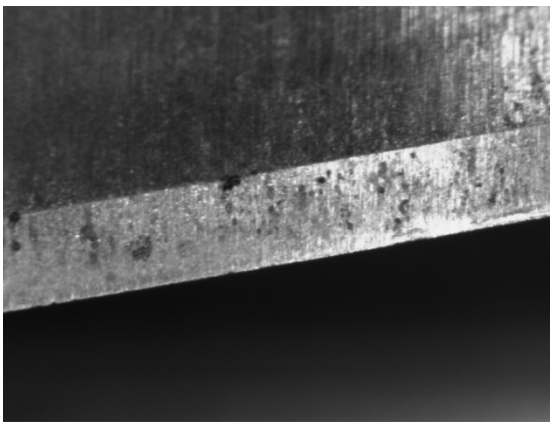


Obr. 73 Břit nového nástroje

Po dvaceti obrobených kusech se však povrch břitu značně změnil. Břit nezabírá špičkou, nebo jen vyjímečně v ojedinělých případech, proto se na něm netvoří žádné změny. Dále však po celém břitu už se změny odehrávaly. Nástroje č. 3 a 4 mají opotřebení nepatrně menší, rovnoměrné a bez vrubů avšak pro změnu mají ve vzdálenosti 15mm nárůstky, které zbylé nástroje nemají nikde na svém břitu. Nástroje č. 1 a 2 mají na svém povrchu nalepený materiál, nebo jinak natavený materiál, či drobné kapičky roztekléhо materiálu. Vruby se zde tvoří až ve vzdálenosti 25mm od břitu, sice malé, ale i v těchto malých rozměrech se zde tříska pěchuje a tak vzniká velmi negativní geometrie čela.



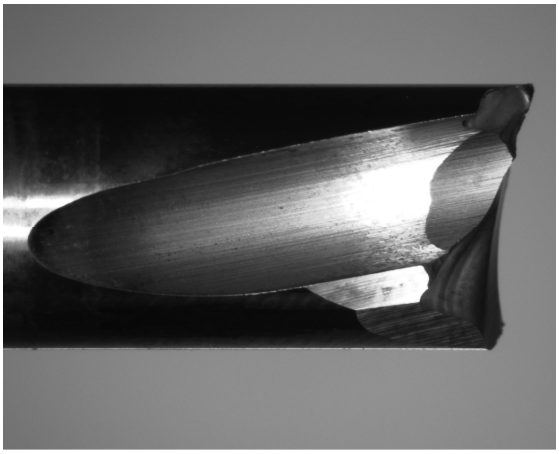
Obr. 74 Drobné vruby na nástroji č. 1



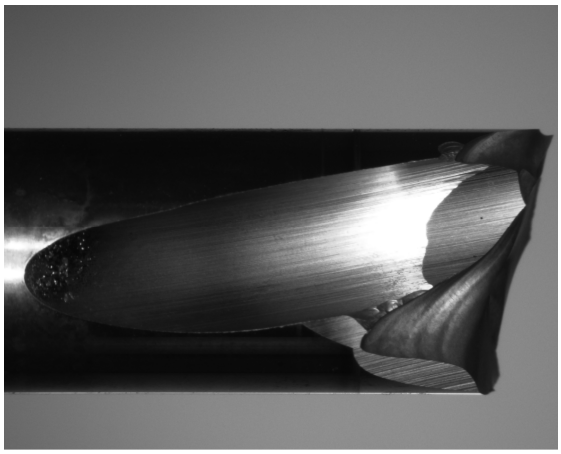
Obr. 75 Rovnoměrné opotřebení nástroje č. 2

Je zajímavé, že i přes malý počet, relativně malých vrubů nástroj č.1 praská a nástroj č. 2, který má rovnoměrné opotřebení bez vrubů praská také. Pro nástroj č.1 se stává kritické místo mezi 35 a 42 mm, kde je nejvyšší opotřebení 20µm v kombinaci s třemi za sebou jdoucími vruby. Nástroje praskají téměř v identickém místě a dokonce i charakter a strukturu lomu mají stejnou, což dokazují obrázky 76 a 77. Není možné aby frézy praskaly úplně identicky a proto lze říci že lom materiálu byl způsoben už nějakým vnitřním pnutím, které se do nástroje zaneslo při jeho broušení. Problém však spočívá v dopravě fréz do dílny, kdy vlivem transportu a různému nešetrnému zacházení, což je například pohození, klepnutí, se vnitřní napětí umocní natolik, že způsobí při nepatrném nárazu okamžitý lom. V tomto případě se

zřejmě jedná a tento typ problému, protože tyto nástroje vydržely čtvrtinu provozu, vůči ostatním a opotřebení nenasvědčovalo přílišnému opotřebení. Začátek lomu nastává od výběhu brusného kotouče v délce 13 mm a konec lomu je 15,169 mm, respektive 15,792mm v případě nástroje č. 2

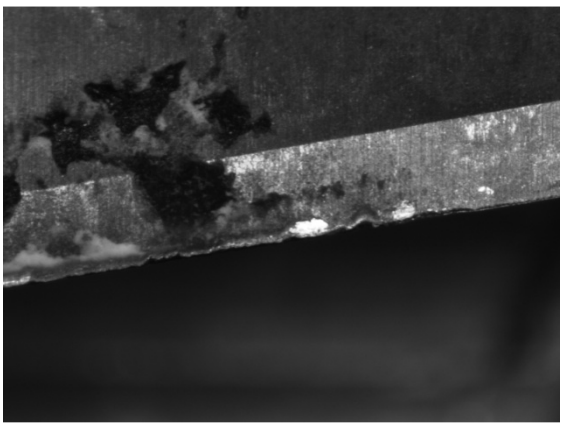


Obr. 76 Lom nástroje č. 1

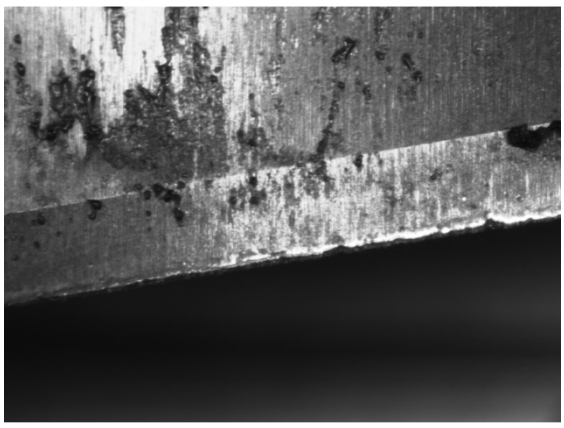


Obr. 77 Lom nástroje č. 2

Nyní zbývají nástroje jen č.3 a č.4 . Po 50 kusech má nástroj č.3 lepší struktury i míru opotřebení. Vruby se však na obou nástrojích tvoří na identických vzdálenostech, což je 3 mm a 7 mm, kde jsou vruby větší (hloubky až 36 resp. 48 µm). V obou případech jsou nástroje lehce nataveny obráběným materiálem, protože není při procesu použita chladicí technologická kapalina, která by se nasákla do struktury a byla by špatně leštitelná. Z tohoto důvodu je pravěpodobně, že v těchto místech naráží nástroj na rozhraní matrice a výztuže. Což znamená že dochází k odřezávání měkkého hliníku a zároveň k řezání, nebo odlamování tvrdých vláken výztuže plastu.



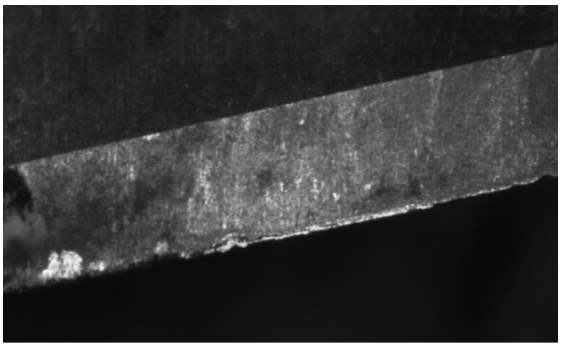
Obr. 78 Kritické vruby nástroje č. 3



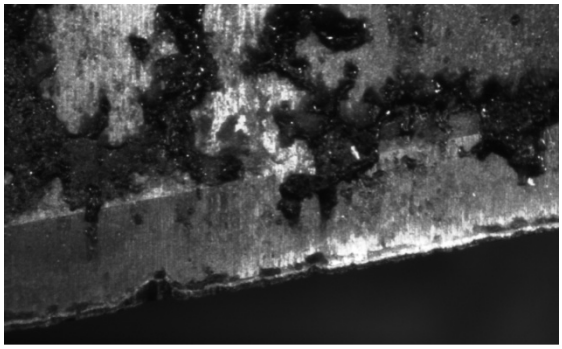
Obr. 79 Kritické vruby nástroje č. 4

V tomto bodě se dá říci, že jsou nástroje značně opotřebovány a už nevytvářejí tak kvalitní třísku a teplo vznikající při procesu převádějí více do obrobku. Takto vzniká nerovnoměrný řez a různé otřepy. Nástroje však absolvovaly další výrobní várku až do 80ks. Nyní už jsou oba nástroje opotřebovány natolik, že nejsou schopny dále fungovat a je nutné je přeostřit. Oba nástroje jsou od špičky značně opotřebovány a vruby se tvoří hned na pěti milimetrech, nástroj č. 3 má ale opět lepší strukturu (obrázek 80 a 81). Nástroj č. 4 je značně otupen a má

na sobě i větší množství nataveného materiálu. Vruby však nenarůstají v porovnání s předchozím měřením po 50 kusů, ale spíše mizí, protože se nástroje otupují příliš, v některých místech až 37 µm a tím vruby zanikají. Nástroj č. 3 má ve vzdálenosti 300 mm od špičky otupení 16 µm a tato hodnota pozvolně klesá, kdežto nástroj č. 4 má otupení ještě ve vzdálenosti 400 mm 21µm. Oba nástroje jsou na konci břitu lehce opáleny.



Obr. 80 Struktura nástroje č. 3 po 80 ks



Obr. 81 Struktura nástroje č. 4 po 80 ks

Hodnotícím kritériem je kvalita obrobené plochy, což jsou otřepy, vytrhaný povrch, nebo natavený plast. Pokud se na nástroji vytvoří vrub, tříska se zde hromadí, nebo se láme, netvoří se rovnoměrně, tak jak by měla. Tříska se může i napěchovat, protože otupení má tvar malé plošky na čele a tím vzniká z pozitivní geometrie čela negativní. Takto může například vytahávat otřepy.

7.7. Návrh a řešení

Nejčastější příčinou ukončení testů bylo náhlé prasknutí nástroje v řezu. Nástroj se pravděpodobně láme z důvodu špatného transportu. I přesto, že je zásilka označena jako křehká, může se někde klepnout, nebo upadnout. Nástroje jsou přepravovány na dlouhých trasách jen v plastovém pouzdře, které zřejmě nezajišťuje dostatečnou odolnost vůči nárazům, nebo jen minimálně. Technologie broušení nástroje je patrně na hranici únosnosti pro tento typ substrátu z hlediska daných řezných podmínek. Takto se do povrchu nástroje může vnést při obrobení velké množství vnitřního pnutí, na které je nástroj velice náchylný při transportu a jen nepatrné upadnutí může mít za následek rapidní nárůst vnitřního lomu. Dá se předpokládat, že při transportu vznikají postupně mikrotrhlinky, které mají pozdější vliv při obráběcím procesu na celkovou trvanlivost nástroje. Tak podle všeho dochází k předčasnému praskání nástrojů.

Protože toto téma je stěžejním problémem firmy, bylo by vhodné soustředit se na stav povrchu po broušení. Poté navrhnout cyklické zkoušky, které by nasimulovali proces transportu a sledovat tak chování povrchu a hlavně pnutí, jak se vyvíjí v povrchových vrstvách. V dnešní době existuje plno firem, zabývající se touto problematikou, které by dokázaly nadefinovat přesné podmínky, aby se dalo v budoucnu těmto problémům s přepravou vyhnout.

8. Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na obrábění kompozitních materiálů. Cílem bylo charakterizovat kompozitní materiály a popsat přehled dostupných informací týkající se této problematiky z hlediska základních vlastností, kterými se tyto materiály vyznačují. Jsou popsány nejrůznější faktory, které mají vliv na kvalitu obrobené plochy, použitelných řezných podmínek, nástrojů a materiálů, ze kterých mohou být vyrobeny.

První část této práce se zaměřuje na shrnutí dostupných informací ohledně kompozitních materiálů. Práce v této části pojednává o materiálech používaných na výrobu matric a výztuží. Jsou zde popsány druhy, charakteristika vláken a výztuží.

Základem teoretického výzkumu obrábění je ortogonální obrábění. Proto jsou v druhé kapitole popsány technologie obrábění kompozitů, zahrnující i nekonvenční metody obrábění, které se mohou také použít. Tato kapitola zahrnuje i porovnání jednotlivých materiálů z hledisek, která jsou zásadní pro výrobu a obrábění kompozitních materiálů. Dále je popsán vliv natočení vláken vůči směru obrábění na kvalitu obrobené plochy, včetně popisu mechanismu vzniku třísky. Vliv řezných parametrů pro dosažení dobré kvality povrchu a další informace, které by mohly mít vliv na obrábění kompozitních materiálů. Práce se v této části zaměřuje dále na použitelné řezné materiály, na jejich vlastnosti a porovnání z hlediska odolnosti proti opotřebení. Důležité je také zohlednit spojování kompozitních materiálů a tak jsou popsány základní druhy, jako je pájení, lepení a svařování. Závěr kapitoly patří zdravotním rizikům při práci s kompozity.

Následující kapitola popisuje používané nástroje pro soustružení, vrtání a frézování. Pro různé technologie obrábění byla porovnána vhodnost jednotlivých nástrojů. Vliv řezných parametrů pro dosažení dobré kvality povrchu. Důležité je zmínit problematiku s odvodem tepla z místa řezu při frézování.

Předposlední kapitola je věnována směru budoucího vývoje. Protože se kompozitní materiály neustále vyvíjejí, zlepšují a inovují, jedná se pořád o celkem nové, moderní materiály, kdy jejich vývoj vede k vyvíjení nových materiálů s novými vlastnostmi.

Poslední kapitola popisuje experiment provedený ve firmě Novem Car. Jsou zde popsány experimenty týkající se obrábění sendvičového materiálu, kdy se frézy po obrábění zkoumaly na mikroskopu Multicheck PC500. Jsou popsány stroje, na kterých byl experiment proveden i samotný postup měření. Výsledky jsou zpracovány do přehledných tabulek a grafů pro jednoznačnost. Na konec byl experiment zhodnocen. Tato kapitola obsahuje vyhodnocení opotřebování a trvanlivost testovaných nástrojů

V závěru řešení práce se však došlo k sendvičovým materiálům a proto je diplomová práce v rovině kompozitních materiálů, nicméně mnoho poznatků této problematiky se dá převést na sendvičové materiály.

POUŽITÁ LITERATURA:

Knižní publikace:

[1] R.BAREŠ*, Kompozitní materiály : SNTL Praha*., 1988

[2] M. Motyčka, *Technologie výroby kompozitních materiálů,* ZČU v Plzni, 2007

[3] R. Šebela, *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*, VUT v Brně, 2012

[5] K. DAĎOUREK, *Kompozitní materiály - druhy a jejich využití,* TU V Liberci, 2007.

[6] AGARWAL, Bhagwan D - BROUTMAN, Lawrence J.: *Vláknové kompozity*. Praha : SNTL, 1987.

[7] A.Humár, *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů*, Brno, 2004

[8] Teti, R., *Machining of Composite Materials*, University of Naples Federico II, Italy <*http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060761703X*>

[9] Schorník, Václav, *Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu*. Plzeň, 2012/2013. 47 s. Bakalářská práce. ZČU Plzeň.

[10] SÝKORA, Radek, *Obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň, 2011/2012. 73 s. Bakalářská práce. ZČU Plzeň.

[11] JIRÁSEK, Jiří, *Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů*. Zlín, 2009/2010. 73 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

[12] BLAŽEK, Rostislav, *Technologický projekt provozu pro mechanické zpracování vláknových kompozitů*. Zlín, 2006/2007. 50 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

[13] ŠAFAŘÍKOVÁ, Alena, *Výzkum trhu kompozitních materiálů v ČR*. Liberec, 2010/2011. 66 s. Bakalářská práce. Textilní Univerzita v Liberci.

[14] MAŠEK, Otakar, *Přesné obrábění vnějších válcových ploch z kompozitních materiálů*. Plzeň, 2012/2013. 73 s. Bakalářská práce. ZČU Plzeň.

[15] TAKESHI YASHIRO, TAKAYUKI OGAWA, HIROYUKI SSAHARA, *Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, [cit. 2014-6-02] <*http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695513000503*>

[16] A. BRENT STRONG, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, Michigan 2008, USA

[17] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur Vakuovou infuzí pod pružnou folií*. 2011. 124 s. Diplomová práce.

[18] SUONG V. HOA, *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*, Canada Quebec, 2009, USA

Publikace na internetu

[20] Doc. Ing. Štefan Michna PhD. Fakulta materiálového inženýrství [cit. 2013-10-9] <*http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf*>

[21] MM Průmyslové spektrum [cit. 2013-12-9] Nová generace lisů pro kompozitní materiály <*http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-lisu-pro-vlaknite-kompozitni-materialy.html*>

[22] MM Průmyslové spektrum [cit. 2013-12-9]Problémy při obrábění kompozitních materiálů <*http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html*>

[23] MM Průmyslové spektrum [cit. 2013-12-9] Kompozitní materiály v letectví <*http://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-v-letectvi.html*>

[24] Doc.Ing. Zdeněk Kořínek , Kompozity [cit. 2013-10-9] <*http://www.volny.cz/zkorinek/*>

[25] Ústav fyzikálního inženýrství [online]. [obr. 2013-13-9]. VUT Brno <*http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf*>

[26] Ing. MILAN VNOUČEK, Ph.D. Ateam.[Citace: 12. září 2013]*Kompozitní materiály.* <*http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf*>

[27] MM Průmyslové spektrum [cit. 2013-2-10] Výroba pohledových dílů z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny <*http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-pohledovych-dilu-z-polymeru-vyztuzenych-uhlikovymi-vlakny.html*>

[28] PC tuning [cit. 2013-9-10] Casemodding – kompozitní zázrak - laminát <*http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni_zazrak-laminat*>

[29] Havel composites [cit. 2013-9-10] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů <*http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html*>

[30] Ing. Ondřej Louda [cit. 2013-9-10]Mechanickévlastnosti plošných kompozitů s pletenou výztuží <*www.sjf.tuke.sk*>

[31] Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity [cit. 2013-9-10] Keramika, kompozity, polymery <*http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm*>

[32] INNET V INNET | VŠB - Technická univerzita Ostrava[cit. 2013-9-11] < *http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_02.pdf*>

[33] N.S.hu, L.C. Zhang, *Someobservations in grinding uni directional carbon fibre-reinforced plastics,* [cit. 2013-13-12]The University of Sydney, Sydney 2006, NSW, Australia <*http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604007514*>

[34] Internetový portál Mechatronika[cit. 2014-22-01]
<*http://coptel.comptkm.cz/index.php?=2&doc=33788&docGroup=4931&cmd=0&instance=2*>

[35] Pilsentools [cit. 2014-24-01]<*http://www.pilsentools.cz/naradi/hlavni-nar.htm*>

[36] MM Průmyslové spektrum[cit. 2014-24-01] Řezné materiály, povlaky a břitové destičky <*http://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-nastroje-na-imts-2006-chicago.html*>

[37] INI net Kolaborativní platforma pro inovační inženýrství [cit. 2014-5-02]
<*http://vyuka.pslib.cz/ininet/index.php?option=com_content&view=article&id=132:obrabni-cfrp-kompozitnich-material&catid=7:clanky&Itemid=14*>

[38] Sandvik Coromant Monolitní karbidové vrtáky pro vrtání děr v kompozitních materiálech [cit. 2014-5-02]
<*http://www.sandvik.coromant.com/cs-CZ/products/corodrill_854_856/Pages/default.aspx*>

[39] Vysoké učení technické v Brně - Základní metody obrábění [cit. 2014-5-02]
<*http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1*>

[40] Flow International Corporation [cit. 2014-5-02]*Technologie řezání vodním paprskem*
<*http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology.aspx*>

[41] MM Průmyslové spektrum[cit. 2014-18-05] Sendvičové konstrukce.:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>

[42] Gurit.com [online]. [cit. 2014-18-05]. Guide to Composites.:
<http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites.pdf>

[43] Netcomposites.com [online]. [cit. 2014-18-05]. Wood Cores.:
<http://www.netcomposites.com/guide/wood-cores/47>

[44] Kaplan. Dřevo výrobky pro stavebnictví, interiéry, otvorové prvky a drobné truhlářské materiály [online]. [cit. 2014-18-05]. <http://www.kaplanpraha.cz/nabidka/kompaktne-desky.htm>

[45] Posterus. Buňkové tělesa [online]. [cit. 2014-18-05]. <http://www.posterus.sk/?p=7871>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Synergické chování složek kompozitu [20]

Obr. 2 Porovnání tahových diagramů křehké keramické matrice a kompozitu [20]

Obr. 3 Jevy na rozhraní matrice a výztuhy [20]

Obr. 4 Rozdělení kompozitních materiálů [26]

Obr. 5 Krátká vlákna [5]

Obr. 6 Dlouhá vlákna [26]

Obr. 7 Schéma výroby skelných vláken [5]

Obr. 8 Uhlíkové vlákno [5]

Obr. 9 Prepreg v rolích a řezací plotr Zund [27]

Obr. 10 Základní typy skelných tkanin [28]

Obr. 11 Pletená výztuž [30]

Obr. 12 Druhy matric kompozitních materiálů [20]

Obr. 13 Sendvičový panel (A - vnější vrstva, B – adhezní vrstva, C – voštinové jádro [17]

Obr. 14 Zatížení sendvičové konstrukce na ohyb [42]

Obr. 15 Struktura HPL desky [44]

Obr. 16 Dřevěné jádro - překližka [43]

Obr. 17 Typy voštin

Obr. 18 Výroba plechové voštiny formováním [45]

Obr. 19 Výroba plechové voštiny metodou HOBE [45]

Obr. 20 Výroba plechové voštiny střiháním a ohýbáním [45]

Obr. 21 Realizace řezného procesu: a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [32]

Obr. 22 Úhel natočení vláken [14]

Obr. 23 Způsob oddělování materiálu: Typ I a II [14]

Obr. 24 Způsob oddělování materiálu: Typ III [14]

Obr. 25 Způsob oddělování materiálu: Typ IV a V [14]

Obr. 26 Tvoření třísky [14]

Obr. 27 Kinematika podélného soustružení válcové plochy [26]

Obr. 28 Úhel natočení vláken při soustružení [9]

Obr. 29 Mechanizmus ultrazvukového vibračního řezání [10]

Obr. 30 Závislost životnosti povlaků [14]

Obr. 31 Kinematika obráběcího procesu vrtání [10]

Obr. 32 Princip delaminace [33]

Obr. 33 Fáze vzniku delaminace [33]

Obr. 34 Způsoby frézování [33]

Obr. 35 Válcové frézování a) nesousledné b) sousledné [33]

Obr. 36 Úhel natočení vláken [21]

Obr. 37 Princip opotřebení [14]

Obr. 38 Módy zatěžování [33]

Obr. 39 Odebírání materiálu při $\theta = 0°$ [33]

Obr. 40 Princip elektroerozivního obrábění [34]

Obr. 41 Obrábění laserem [34]
Obr. 42 Řezání vodním paprskem [40]
Obr. 43 Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami z PKD [35]
Obr. 44 Soustružení s vyměnitelnými břitovými destičkami [36]
Obr. 45 Kompozit a vrtáky CoroDrill od firmy Sandvik [37]
Obr. 46 Vrtáky CoroDrill 854/856 [38]
Obr. 47 Úhly na vrtácích CoroDrill 854/855/856 [38]
Obr. 48 Frézy s vyměnitelnými PKD břity [40]
Obr. 49 Tepelně upínací stroj Heimer
Obr. 50 Obráběcí centrum Siemens
Obr. 51 Mikroskop Multicheck PC500
Obr. 52 Testované frézovací nástroje
Obr. 53 Směr frézy na panelu při prvním upnutí
Obr. 54 Směr frézy na panelu při druhém upnutí
Obr. 55 Směr frézy na krytu okolo popelníku I
Obr. 56 Směr frézy na krytu okolo popelníku II
Obr. 57 Upnutí panelů v přípravcích
Obr. 58 Porovnání panelu z lisovny a hotového výrobku
Obr. 59 Ideálně obrobený kus
Obr. 60 Jemné groty
Obr. 61 Začínající natavování a vytrhávání plastu
Obr. 62 Natavený plast, otřepy
Obr. 63 Příliš mnoho grotů na panelu
Obr. 64 Vzdálenosti lomu nástroje
Obr. 65 Struktura nástroje č. 1
Obr. 66 Struktura nástroje č. 2
Obr. 67 Struktura nástroje č. 3
Obr. 68 Struktura nástroje č. 4
Obr. 68 Rovnoměrné opotřebení nástroje č. 2
Obr. 69 Břit Etalonu
Obr. 70 Břit nástroje č. 1
Obr. 71 Břit nástroje č. 2
Obr. 72 Nový nástroj
Obr. 73 Břit nového nástroje
Obr. 74 Drobné vruby na nástroji č. 1

Obr. 75 Rovnoměrné opotřebení nástroje č. 2

Obr. 76 Lom nástroje č. 1

Obr. 77 Lom nástroje č. 2

Obr. 78 Kritické vruby nástroje č. 3

Obr. 79 Kritické vruby nástroje č. 4

Obr. 80 Struktura nástroje č. 3 po 80 ks

Obr. 81 Struktura nástroje č. 4 po 80 ks

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken [33]

Graf 2 Závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken [33]

Graf 3 Závislost teploty vzorku na vzdálenosti od oblasti primární plastické deformace [15]

Graf 4 Závislost opotřebení počtu kusů

Graf 5 Trvanlivost nástrojů

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Informativní hodnoty mechanických vlastností vláknových kompozitů [20]

Tab. 2 Odvod tepla při obrábění kompozitních materiálů ve srovnání s ocelí [%] [7]

Tab. 3 Výsledky opotřebení na nástrojích v kritickém místě

Tab. 4 Naměřené hodnoty lomu nástrojů č. 1 a č. 2