



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra techniky a kybernetiky

Bakalářská práce

Kompozitní materiály a jejich užití v dopravní technice

Autor práce: Tobiáš Zeman

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Tupý, DiS.

České Budějovice
2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....

Tobiáš Zeman

Abstrakt

Tato bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se zabývá samotnými kompozitními materiály, jejich typy, výrobními technologiemi a zejména pak jejich použitím v dopravní technice. V praktické části byla u vzorků z uhlíkových vláken provedena experimentální zkouška pevnosti v tahu a ohybu, jejíž cílem bylo porovnat výsledné hodnoty. Bylo zjištěno, že pevnost v tahu je mnohonásobně vyšší než pevnost v ohybu.

Klíčová slova: kompozitní materiály; uhlíková vlákna; tahová zkouška; ohybová zkouška

Abstract

This bachelor thesis is divided into theoretical and practical parts. The theoretical part deals with composite materials themselves, their types, production technologies and especially their use in transport technology. In the practical part, an experimental test of tensile and flexural strength was carried out on carbon fibre samples in order to compare the resulting values. The tensile strength was found to be many times higher than the flexural strength.

Keywords: composite materials; carbon fibers; tensile test; bend test

Poděkování

Velmi rád bych poděkoval vedoucímu této práce, panu Ing. Ondřeji Tupému, DiS. za konzultace a věcné rady. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Tomáši Zoubkovi za odbornou pomoc a dohled při tahové zkoušce a Ing. Petru Ambrožovi z VOŠ, SPŠ, automobilní a technické za provedení zkoušky ohybem. V neposlední řadě patří poděkování i mé rodině za podporu.

Obsah

Úvod	7
1 Literární přehled	9
1.1 Základní rozdělení a charakteristiky kompozitů	9
1.2 Charakteristika a materiály matric	10
1.2.1 Materiály matric	10
1.3 Orientace vláknových výztuží	11
1.4 Rozvoj kompozitních materiálů	12
1.5 Technologie výroby kompozitních materiálů	14
1.5.1 Volba výrobní technologie	14
1.5.2 Výroba modelů a forem	14
1.5.3 Technologie výroby polymerních kompozitů	16
1.6 Příklady aplikací kompozitních materiálů v dopravní technice	27
1.6.1 Karbon-keramické brzdové kotouče	27
1.6.2 Karbonový monokok	30
1.6.3 Kovaný karbon	33
1.6.4 Ráfky z kompozitních materiálů	34
2 Cíl práce	38
3 Materiál a metody	39
3.1 Zkušební materiál	39
3.1.1 Výroba vzorků	39
3.2 Zkouška tahem	43
3.3 Zkouška ohybem	45
4 Výsledky	46
4.1 Výsledky tahové zkoušky	46
4.2 Výsledky ohybové zkoušky	48
4.3 Porovnání	49
5 Diskuse	51
Závěr	52
Seznam použitých zdrojů	53
Seznam obrázků	57

Seznam tabulek

59

Úvod

Kompozitní materiály jsou dnes velice rozšířenou alternativou k běžně používaným, avšak levnějším materiálům, jako jsou hliník, plech a další a to hlavně pro jejich jedinečné vlastnosti, kterými výrazně překonávají materiály používané v minulosti.

V dnešní době jsou kompozity velmi vyhledávanými materiály, jelikož žijeme ve společnosti, která klade důraz na co nejnižší zatěžování životního prostředí a emise skleníkových plynů, od čehož se odvíjí i požadavek na nízkou spotřebu paliva. Tudíž kompozitní materiály hrají obrovskou roli. Nejen, že jsou odolné proti korozi a že jejich hmotnost bývá několikanásobně nižší, což výrazně napomáhá snižovat spotřebu paliva a od ní se odvíjející emise skleníkových plynů, ale jsou i pevnější, což zlepšuje bezpečnost, která je také velice přísně sledovaným faktorem.

S ochranou životního prostředí souvisí také elektromobilita, která se stále potýká s vysokou hmotností vozů a tím zvýšenou spotřebou, která zapříčiňuje snížený dojezd. To je způsobeno zejména těžkými akumulátory a elektromotory. Kompozity jsou i v tomto případě ideálním materiálem na odlehčování. Lze je použít například v konstrukci elektromotorů, kde mohou nahradit běžně používané kovy, nebo jako materiál panelů karoserie. I tam se dnes stále nejvíce využívá karosářský plech či hliník.

Kompozity lze vyrábět mnoha způsoby a každý jeden z nich s sebou nese určité výhody či nevýhody. Samotná podstata kompozitů spočívá v tom, že jsou složeny ze dvou nebo více materiálů odlišných vlastností, a tím vytváří materiál nový s vlastnostmi jedinečnými. Volit pak lze z několika materiálů matric a výztuže, které se mohou u vláknitých výztuží lišit i orientací vláken. Právě kombinace materiálu matrice, materiálů výztuže a výrobního procesu výrazně ovlivňuje finální vlastnosti vyráběného dílce.

S použitím těchto materiálů se lze setkat v každém odvětví dopravní techniky, tedy v silničních vozidlech, zemědělských strojích i v leteckém a kosmickém průmyslu, kromě dopravní techniky navíc i ve stavebnictví a stále se objevují na nových místech. Jejich nevýhodou, je ovšem stále vysoká cena, která je limitující pro výrobce běžných automobilů.

Toto vše vypovídá o tom, že kompozitní materiály mají obrovskou budoucnost, jelikož se používají téměř v každém z technologických odvětví. Výzkum kompozitních materiálů jeden proto z nejrychleji se rozvíjejících oblastí materiálového inženýrství a jejich studium je velice důležité například pro nalezení nových materiálů a výrobních způsobů, což může vést ke snížení ceny a tím ještě většího rozšíření.

Tato bakalářská práce se bude zabývat právě kompozitními materiály a jejich využitím v dopravní technice. V teoretické části se práce zaměřuje na základní rozdělení a charakteristiky kompozitních materiálů, dále na samotné matrice, na což přímo navazují vláknité výztuže, jako druhá nedílná součást kompozitů, používaných v dopravní technice. Dále se práce zaměří stručně na rozvoj kompozitů a následně na výrobu jako takovou se všemi náležitostmi, od výroby forem a matric, až po jednotlivé výrobní technologie. Po-

slední kapitolou v teoretické části jsou konkrétní příklady použití kompozitních materiálů v dopravní technice.

V praktické části této bakalářské práce jsou provedeny tahové a ohybové zkoušky s následným vyhodnocením výsledků a jejich porovnáním. Vzorky pro tyto zkoušky byly vyrobeny dle normy ČSN EN ISO 527-2 Type 1A z 1,2 mm silné desky. Zkoušky ohybem byly provedeny na Vyšší odborné škole, střední průmyslové škole automobilní a technické v Českých Budějovicích pod vedením Ing. Petra Ambrože. Zkoušky tahem vedl pak Mgr. Tomáš Zoubek na Fakultě zemědělské a technologické Jihočeské univerzity.

1 Literární přehled

1.1 Základní rozdělení a charakteristiky kompozitů

Aby byl materiál považován za kompozitní, je nezbytně nutné, aby byl složen ze dvou nebo více odlišných složek, a to jak po fyzikální, tak chemické stránce. Z těchto složek si pak materiál převezme důležité vlastnosti a vznikne tak materiál nový, s jedinečnými vlastnostmi, což je samotnou podstatou kompozitů. Obecně jsou kompozity složeny ze dvou materiálů, výztuže a matrice (pojiva), které od sebe odlišují následující vlastnosti. Výztuž je vždy tvrdší, tužší a nespojitá, zatímco matrice je tekutá, poddajná složka, která spojuje výztuž jakožto pojivo. Pro prohlášení materiálu kompozitním je nutno splnit tři důležité vlastnosti (Ptáček, 2002):

- podíl výztuže musí být vyšší než 5 %
- výztuž musí být výrazně pevnější a tužší, než matrice (vlastnosti se musí lišit)
- kompozit musí být zhotoven mícháním složek

Tyto podmínky určují, že za kompozit nelze považovat např. plasty, jelikož neobsahují tuhou výztuž a ani slitiny kovu, kde během slinutí došlo k vyloučení tvrdé fáze. Naproti tomu existují slitiny, které se za kompozitní považovat dají. Mezi nimi je např. nerezová ocel, hořčíkové slitiny, titanové slitiny, hliníkové slitiny atd (Ptáček, 2002).

Výztuže mohou mít v kompozitních materiálech různé rozměry. Mezi nejvíce používané kompozity výrobci dopravní techniky patří tzv. mikrokompozitní materiály. Mikrokompozitní materiály se vyznačují tím, že průměr jejich výztuže, ať už vláken či částic je mezi jednotkami až stovkami mikrometrů. Největší výhodou mikrokompozitů je jejich nízká hustota ve srovnání se slinutými kovy, a díky tomu mají velice dobrý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti, při nízké hmotnosti (Ptáček, 2002).

Největší částice obsahují makrokompozity. S nimi se lze setkat ve stavebnictví. Za makrokompozit je totiž označován beton, asfalt, železobeton (beton zpevněný ocelovými armaturami), polymerbetony atd. Jako makrokompozit se také také označit i např. chodník nebo silnice, jelikož v řezu jsou složeny z jednotlivých vrstev a tvoří tak funkční celek (Ptáček, 2002).

Naopak nejmenší částice obsahují nanokompozity. U nich se velikost výztuže pohybuje v řádu několika málo nanometrů a obsahují vždy polymerní matici (Ptáček, 2002).

1.2 Charakteristika a materiály matric

Úlohou matrice, též pojiva, je spojovat výztuže tak, aby vytvořily požadovaný tvar. Její úlohou však není nést silové působení na dílec, ale pouze ho přenášet na výztuž. Matrice má ovšem velký vliv na pevnost vrstev ve smyku, a také pevnost mezi lamelami. Pokud by tato pevnost byla špatná, mohlo by dojít k oddělení jednotlivých vrstev laminátu od sebe, případně k oddělení výztuže od matrice. Významným úkolem matrice je také podpora jednotlivých vláken, aby se nehroutily pod tlakem, čímž velkou měrou napomáhá tlakové pevnosti dílce. Materiál matrice je mimo jiné důležitý také pro zlepšení zpracovatelnosti a pravděpodobnosti defektů. Volbou správného materiálu matrice lze pravděpodobnost defektu minimalizovat. Určujícími faktory jsou například viskozita nebo bod tání, v případě použití ve vysokých teplotách (Balasubramanian, 2014). Dle Ptáčka (2002) musí být poměrné prodloužení matrice při přetržení větší, než poměrné prodloužení výztuže.

1.2.1 Materiály matric

Jak uvádí Ptáček (2002) existují tři hlavní materiály používané jako matrice. Zaprvé rozlišuje polymerní matrice, které se vyznačují svou houževnatostí. Ta je dána silnými vazbami mezi molekulami, které jsou spojeny do velice dlouhých řetězců. Organické polymerní materiály bývají označovány jako plasty a elastomery. Plasty vydrží obrovské plastické deformace a elastomery jsou schopné bez úhony podstoupit silné elastické deformace, přičemž se poté vrátí do původního stavu. V automobilovém průmyslu se z polymerních matric využívají hlavně polyesterové a vinylové pryskyřice v kombinaci s vláknitou výztuží (Balasubramanian, 2014).

Dále se za kompozity s kovovou maticí považují všechny kovové slitiny, kde podle Ptáčka (2002) při tuhnutí nebyla vyloučena z výsledné slitiny pevná složka. Uplatnění mají zejména v aplikacích, kde je dosahováno vysokých teplot a jsou kladeny velké nároky na pevnost a zejména v automotive i na nízkou hmotnost (Balasubramanian, 2014).

Jako poslední Ptáček (2002) rozlišuje keramické matrice. Ty jsou známy svou vysokou tepelnou odolností, kdy si při vysokých teplotách zachovávají své původní vlastnosti. Keramické materiály jsou buď krystalické nebo nekrystalické. Mezi nekrystalické patří skla, ostatní keramické materiály jsou pak krystalické. Kompozity s keramickou maticí jsou v dopravní technice používány hlavně na brzděné elementy, zejména kvůli své teplotní odolnosti. Díky ní jsou schopny brzdit z vysokých rychlostí a to opakovaně (Balasubramanian, 2014).

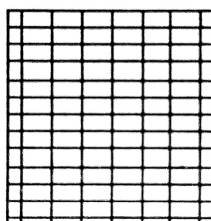
1.3 Orientace vláknových výztuží

Jak ilustruje Ptáček (2002) ve své knize *Nauka o materiálech II*, existuje šest způsobů orientace vláknových výztuží:

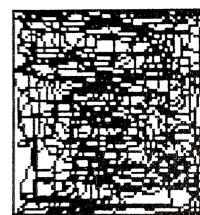
1. Jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken
2. Dvouosá orientace kontinuálních vláken (twill)
3. Rohož, neboli nahodilé uspořádání kontinuálních nebo krátkých vláken (netkaná textilie)
4. Víceosá výztuž z kontinuálních vláken
5. Krátká vlákna jednosměrně orientovaná
6. Krátká vlákna s náhodnou orientací



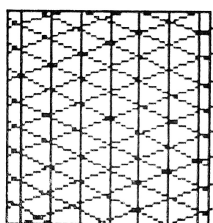
Obrázek 1.1: *Jednosměrné uspořádání*



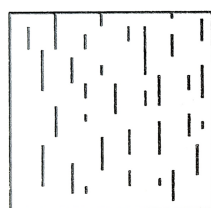
Obrázek 1.2: *Dvouosá orientace*



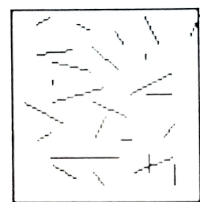
Obrázek 1.3: *Rohož*



Obrázek 1.4: *Víceosá výztuž z kontinuálních vláken*



Obrázek 1.5: *Krátká vlákna jednosměrně orientovaná*



Obrázek 1.6: *Krátká vlákna s náhodnou orientací*

1.4 Rozvoj kompozitních materiálů

Kompozitní materiály mají velice bohatou historii, jelikož se za kompozitní materiál dá považovat téměř vše, co je složeno ze dvou rozdílných materiálů. Nejstarším kompozitem používaným starověkými Egypťany kolem roku 1500 př. n. l., je kombinace slámy a hlíny. To sloužilo jakožto stavební materiál. Následně se zpevňování slámou využívalo i u keramiky a lodí (Nagavally, 2016).

Přibližně o 300 let později začali kompozity využívat i mongolové. Ti ale pozvedli úroveň kompozitů výše tím, že vynalezli první kompozitní luk. Jejich luk se skládal ze dřeva a kostí. Dřevo a kosti byly spojeny „zvřecím lepidlem“ z kůží a kostí a celé tělo luku bylo zabaleno do březové kůry. Tím, že zde bylo zkombinováno více materiálů, dostal luk jedinečné vlastnosti. Byl přesnější a silnější, než byly luky vyráběné doposud. Dle Daďourka (2010) disponovaly dostřelem až 300 metrů (Balasubramanian, 2014).

Dalším významným historickým kompozitním materiálem, který je velice oblíbený zejména v kovářství, nožířství, zbrojířství a tak dále, je damascénská ocel. Damascénská ocel je velice pevná, flexibilní a odolná. Také její vzhled je velice unikátní a každý kus vypadá jinak. Tyto vlastnosti jí propůjčuje spojení tvrdé vysokouhlíkové a houževnaté nízkouhlíkové oceli a jejich mnohonásobné vrstvení v kovářské peci, kde se nataví a následně zkovají do jednoho kusu. Následně se naříznou a znovu přeloží. Jejich počet se tedy vždy zdvojnásobí. Běžná damascénská ocel má 100–500 vrstev. Tímto se získají její výše popsané vlastnosti a také onen jedinečný vzhled nebo vzor, který lze ovlivnit způsobem vrstvení oceli a počtem vrstev. První zmínky o damascénské oceli pochází z 1. poloviny 1. tisíciletí př. n. l. z Indie. Nicméně její název je dle syrského města Damašku, kudy se ocel z Indie vozila do Evropy a dalších oblastí.

(Cídllová et al., 2011; nasenoze.cz, 2023)

Jedním z dalších významných kompozitů pro lidstvo, je dnes stále stále využívaný beton zesílený ocelovou armaturou neboli tzv. železobeton. Železobeton se hojně používá u staveb všech druhů. S železobetonem se totiž setkáme u domů, dopravních staveb, jako jsou například mosty a tunely. Jeho vlastnosti jsou právě pro toto využití ideální. Kombinují totiž pevnost a odolnost betonu s pevností oceli v tahu (Ptáček, 2002).



Obrázek 1.7: Damascénská ocel (damano.cz, 2020)

Co se týče použití uhlíkových vláken u silničních vozidel, tak významným průkopníkem bylo Lamborghini se svým vozem Sesto Elemento, který je tvořen z 80 % kompozity

z uhlíkových vláken. Díky tomu váží těsně pod jednu tunu, konkrétně 999kg a jeho výkon je 562 koní (Pulman, 2010).



Obrázek 1.8: *Lamborghini Sesto Elemento (Pulman, 2010)*

1.5 Technologie výroby kompozitních materiálů

Pro výrobu kompozitních dílců je možno využít několika výrobních technologií. Vhodná technologie je závislá na požadavcích na konkrétní dílec (Sedláček et al., 2022).

1.5.1 Volba výrobní technologie

Volbu výrobní technologie kompozitů ovlivňuje několik faktorů. Určujícím faktorem jsou požadavky na jeho mechanické vlastnosti, mezi kterými je pro získání požadovaných finálních atributů, velmi důležitý obsah a orientace vláknité výztuže v kompozitu. Podle toho je pak volena nejvhodnější výrobní technologie. Špatně zvolený postup může mít fatální následky, jelikož v případě, že je dílec umístěn v konstrukci na důležitém místě, může ji svým selháním celou ohrozit (Sedláček et al., 2022).

Dále je zapotřebí určit, zda bude dílec vyráběn sériově, či se jedná pouze o kusovou výrobu. Pokud se jedná o díl vyráběný v několika málo kusech, je zřejmé, že se nevyplatí volit strojní výrobní postupy. Formy pro strojní výrobní postupy jsou mnohonásobně nákladnější, jelikož jsou určeny pro vícero použití. Proto se u malých sérií volí spíše postupy ruční, které jsou výrazně ekonomicky výhodnější (Sedláček et al., 2022).

Poté je nutno zohlednit také požadavek na kvalitu jeho povrchu. U některých postupů je povrch kvalitní pouze z jedné strany, a to té, která je přitisknuta na formu. Hladká strana bývá většinou z pohledové strany. Kvalitu povrchu určuje forma, která mu dodává požadovaný tvar (Sedláček et al., 2022).

Důležitý je také kýžený tvar dílce. Některé výrobní postupy nejsou příliš vhodné pro výrobu dílců složitějších tvarů, např.: strojní stříkání. Některými technologiemi je možné vytvořit pouze dílce daných tvarů, jako je tomu například u navíjení. (Sedláček et al., 2022)

V neposlední řadě je nutno zohlednit také limit nákladů na jeho výrobu, u kterého hraje velkou roli volba výrobního postupu a úzce souvisí se sériovostí výroby (Sedláček et al., 2022).

U vláknitých kompozitů není důležité pro volbu výrobní technologie, z jakého materiálu jsou daná výztužná vlákna. Dle Sedláčka (2022) nemá na volbu přímý vliv. Důležitý je spíše materiál matrice.

1.5.2 Výroba modelů a forem

Výroba modelu

Výroba modelu je prvním krokem při výrobě dílce. Vyrábí se většinou ze dřeva, překližky, modelářské hlíny, tuhé pěny nebo tmelu. Pokud je nutné povrch modelu vyztužit, tak je k tomuto účelu používána tenká laminátová vrstva. Poté, co má model dokonalý tvar, je zapotřebí ho připravit na teplotu, které bude vystaven při výrobě formy vystaven. Je také žádoucí použití polyuretanových laků, případně polyesterového topcoatu, pro povrchovou úpravu modelu. Následně pomocí speciálních tmelů vytvořit dělicí a ořezové roviny. Pokud se forma bude skládat z více dílů, je vhodné vytvořit také čepy pro sesazení forem tak, aby jednotlivé díly formy do sebe dobře zapadly. A pokud je to nutné, tak osadit ořezové plochy kováním, aby nedošlo k poškození modelu (HavelComposites, 2023).

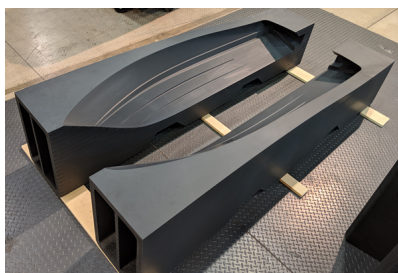
Výroba formy

Materiál formy dělíme podle sériovosti a zvolené výrobní technologie, která bude pro výrobu použita. Pokud vyrábíme formu pouze pro prototyp, který se téměř bez výjimky dělá ručním kladením, jako materiál formy slouží speciální sádra, dřevo, pěny a tmely. Formy pro ruční a injektážní technologie se zhotovují většinou z laminátu, který lze kombinovat s pěny nebo balzovým dřevem. U injektážních technologií se lze setkat i s formami z polymerbetonu nebo kovu. Kovové jsou zejména pro lisovací technologie, navíjení, tažení a odstředivé lití. Pokud je nízký rozpočet a dílec není náročný svým tvarem, tak se jako materiál formy volí sklolaminát, tedy skleněná výztuž a polyesterová pryskyřice (HavelComposites, 2023).

Před samotnou výrobou formy ze sklolaminátu podle modelu je třeba model pokrýt formovým gelcoatem, což je speciální probarvená, nevyztužená povrchová vrstva, o tloušťce 0,3–1,0 mm, která zajišťuje estetiku konečného výrobku a ochranu před okolním prostředím. Tento krok je velice důležitý, jelikož přímo ovlivňuje kvalitu povrchu formy a tím i kvalitu povrchu výrobku. Při tvorbě této sklolaminátové formy je nežádoucí její smrštění, a tím i změna rozměrů vlivem vnitřního pnutí. Aby se tomuto předešlo, je třeba postupovat tak, že se na vytvrzený gelcoat klade kvalitní výztuž o gramáži 225–450 g/m². Tu je následně zapotřebí kvalitně a pečlivě prolít pryskyřicí a odstranit vzniklé vzduchové bubliny. Někdy se přidává jemná povrchová vrstva výztuže, nebo flís o nízké gramáži přímo na model potřený gelcoatem. Tyto vrstvy musí nejdříve vytvrdnout než lze pokračovat v tvorbě formy kladením dalších vrstev, což většinou trvá do druhého dne. Další vrstvy je záhodno také klást s časovou prodlevou po vrstvě předchozí. Díky tomu je výroba sklolaminátové formy velice časově náročnou operací (HavelComposites, 2023).

Někdy je požadována vyšší přesnost formy nebo se počítá s vyšším namáháním formy. V takovém případě se jako hlavní konstrukční materiál nejčastěji používají speciálně formulované termoplasty a modifikované a vysoce plněné polyesterové pryskyřice. U těchto materiálů je rychlejší výroba, jelikož je možno v jednom kroku dosáhnout tloušťky stěny formy 14 mm bez smršťování. Díky tomu se doba výroby formy zkrátí na dva dny, a to včetně zpevnění formy například žebrováním na rubu formy a připevnění manipulačního rámu. Pro snížení rizika smrštění se používají kvalitní pomalu tvrdnoucí epoxidové pryskyřice. Rovněž napomáhají při snižování rizika mechanického poškození formy (HavelComposites, 2023).

Poslední krok před uvedením formy do provozu je její opatření kvalitním a spolehlivým separátorem, který zajistí, že lze dílec z formy snadno vyjmout. Tím se zabrání jeho poškození. Jako separátory slouží tvrdé karnaubské vosky nebo kapalné semipermanentní bezsilikonové separátory (HavelComposites, 2023).



Obrázek 1.9: Dvoudílná forma na výrobu trupu lodi (Sher, 2018)

1.5.3 Technologie výroby polymerních kompozitů

Při výrobě kompozitních dílců s polymerní maticí lze využít několika výrobních postupů (Sedláček et al., 2022).

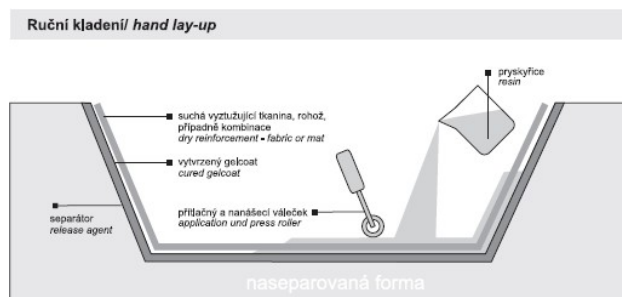
Ruční kladení (hand lay-up)

Ruční kladení je nejstarším a nejjednodušším způsobem výroby výrobků z kompozitů, který patří mezi tzv. otevřené technologie. Díky tomu, že není náročná patří i mezi nejrozšířenější. Při této technologii se používá buď pozitivní forma (patrice), nebo negativní forma (matrice). Ty se po naseparování separátorem pokryjí gelcoatem a to buď ručně nebo strojně stříkáním. Po jeho vytvrzení, kdy gelcoat může být lepkavý, ale nesmí být mazlavý, se kladou do formy jednotlivé vrstvy výztuže dílce a prosycují se štětcem nebo válečkem. Přebytečné pryskyřice se vytlačí rýhovaným válečkem. Při výrobním postupu ručním kladením se nepoužívá při vytvrzování tlaku a probíhá za normální teploty. Pouze při výrobě sendvičových materiálů s lehkými jádrovými materiály, jako jsou pěny, voštiny atd., je možno využít přítlaku vakua pod separační folií a zvýšené teploty, pokud to požaduje výrobce použité pryskyřice (Sedláček et al., 2022).

U ručního kladení se používají výztuže na bázi skleněných, uhlíkových, aramidových a jiných syntetických nebo přírodních vláken. Vlákna jsou většinou utkána do tkanin o různé gramáži. Lišit se kromě gramáže může styl tkaní a orientace vláken, viz kapitola 1.3. Lze se setkat se sendvičovými materiály plnicími, které také plní roli výztuže. (Sedláček et al., 2022).

Co se týče používaných pryskyřic, nejčastěji se používají pryskyřice polyesterové nebo epoxidové. Opět na volbu pryskyřice mají vliv požadavky na daný dílec, takže pryskyřici je nutno volit tak, aby daným požadavkům bylo vyhověno, případně aby jim finální vlastnosti byly co nejbližší. Pryskyřice totiž ovlivňuje nejen pevnost dílce, ale i dobu výroby. Použitou pryskyřicí lze dosáhnout některých speciálních požadavků, jako je odolnost proti chemikáliím, zvýšenou teplotní odolnost nebo snížení smršťování při tvorbě forem. Tyto vlastnosti pryskyřice lze ovlivnit i použitím speciálních tužidel (Sedláček et al., 2022).

Technologie ručního kladení má široké využití. Je ji možno použít jak pro malé, tak velké výrobky. Také zde není omezením ani členitost nebo složitost samotného výrobku. Jediným omezením je sériovost, jelikož při vyšším počtu dílů se doba výroby značně prodlužuje. Téměř výhradně se ruční kladení využívá pro výrobu prototypů (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.10: Schéma ručního kladení (Sedláček et al., 2022)



Obrázek 1.11: Ruční kladení v praxi (Luthada, 2022)

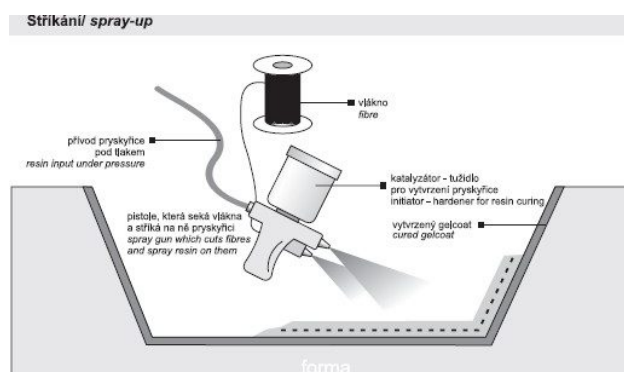
Stříkání (spray-up)

U tohoto výrobního procesu kompozitních dílců se pomocí tlakového vzduchu nanáší na formu speciální pistolí sekaný roving a tlaková pryskyřice. Tato technologie je převážně ruční, ale lze se setkat i s mechanizovaným, počítačem řízeným nanášením (Sedláček et al., 2022).

Formy jsou opět levné a totožné s formami pro ruční kladení. Tudíž jsou většinou ze sklolaminátu. U stříkání se jako výztuž používá skleněný roving, což je nekonečné vlákno o různém texu, což je jednotka hmotnosti vlákna na kilometr. Výjimečně se používá i jiné kontinuální vlákno. Stejně jako u ručního kladení je forma nejprve ošetřena gelcoatem. Následně se nanáší pryskyřice s nasekaným rovingem v několika vrstvách. Každá nanesená vrstva se stlačí rýhovaným nebo štětinovým válečkem, což v jednom kroku vytlačí i nežádoucí vzduchové bubliny (Sedláček et al., 2022).

Technologie stříkáním musí být provedena v dobře odvětraných prostorách, tzv. stříkacích boxech a to zejména kvůli tomu, že pryskyřice používané pro tuto technologii obsahují styren, který je velice nebezpečnou látkou, jelikož je škodlivý při vdechování, způsobuje poškození orgánů (zejména sluchových) při prodloužené nebo opakované expozici a dráždí kůži a oči. Roving pro tuto technologii se vyznačuje tvrdou povrchovou úpravou GunCore. Dělá výrobek lehkým, rázově odolným, ohebným a torzně pevným. Výrobci tento roving využívají i jako vnitřní vrstvu v sendvičových materiálech, což výrazně urychlí a ulehčí jejich výrobu. Při použití tohoto rovingu není tak náročná příprava a sesazování sendvičových materiálů (Sedláček et al., 2022).

Technologie stříkání je vhodná pro výrobu středních až velkých dílů, které ale nesmějí být příliš komplikované a členité. Jejich hlavní použití, kde se s nimi můžeme v běžném životě setkat je např. u sanitárních výrobků, jak jsou vany, umyvadla atd., a to z jejich spodní strany. Touto technologií se také vyrábí i různé boxy, jako jsou např. popelnice a rozvodné skříně nebo třeba i laminátové bazény (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.12: Schéma stříkání (Sedláček et al., 2022)



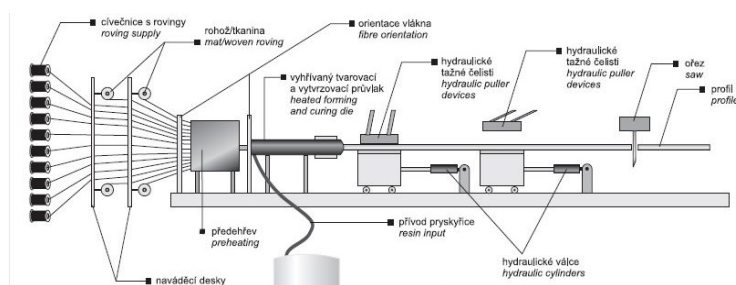
Obrázek 1.13: Stříkání v praxi (Fiberglass, 2021)

Pultruze (tažení)

Tato metoda slouží k výrobě plných i dutých profilů kruhového průřezu, jako jsou dráty a trubky nebo i velmi tenkých pásek na vyztužení např. hokejek. Lze také vyrobit velice rozměrné tlustostěnné desky. Tato metoda se vyznačuje vysokým poměrem výztuže, a to až 80 %. Toho je dosaženo tím, že výztuž (obvykle skleněné nebo uhlíkové vlákno někdy v kombinaci s vlákny z tkanin) je obalena v lázni s pryskyřicí. Poté co se v lázni prosytí, je vyždímána a vtažena do forem (průvlaků), jejichž otvor odpovídá vnějšímu rozměru výrobku. Formy jsou vyhřívány, čímž dochází k zahřátí pryskyřice na vláknech, a tím se vytvrdí v požadovaném tvaru, který určuje forma. Profil je následně odtahován dále po lince, kde se dělí na požadovanou délku. Rychlost odtahu profilu je regulovatelná (Sedláček et al., 2022).

Existuje také takzvaný pulforming, což je obdoba pultruze, jen s tím rozdílem, že výztuž prosycená pryskyřicí je poté tvarována v dvoudílné vyhřívané formě, kde vytvrdne a tím se jí udělí tvar podle formy. Toto se používá např. při výrobě eliptických listových per (s proměnným průřezem) z kompozitu (Sedláček et al., 2022).

Pro tuto metodu se používají pryskyřice, které rychle vytvrzují za zvýšených teplot. Pojiva mají přidané látky pro hladší povrch, případně určuje barvu (Sedláček et al., 2022).



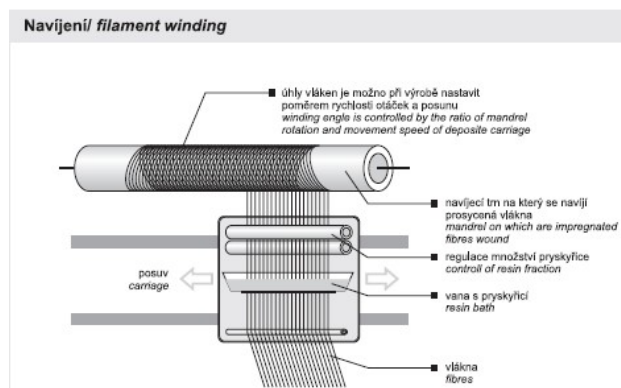
Obrázek 1.14: Schéma pultruze (Sedláček et al., 2022)

Navíjení (filament winding)

Navíjení je jednou z nejdokonalejších technologií pro výrobu dutých kompozitních těles. Pokud je k výrobě použita technologie navíjení, znamená to, že je na trn, který může být nazván také jádro, navíjeno předem impregnované pojivem skleněné, uhlíkové nebo aramidové vlákno. Tímto způsobem se dělají duté dílce, jako jsou například trubky, nádrže, síla a tak dále. Výhodou je, že mohou mít i proměnný tvar (Sedláček et al., 2022).

Navíjení je plně automatizováno. Počítač řídí pohyb ramene, které ukládá vlákna na trn pod nastavitelným úhlem od 0° do 90° . Ten se nastavuje úpravou rychlosti otáčení trnu a posuvu, zejména tedy jejich poměrem. Nulový úhel křížení vláken se využívá k osovému vyztužení hřídelí a trubek, zatímco pravý úhel navíjení se nazývá obvodový. Díky tomu, že je celý proces řízen počítačem, je navíjení velice přesné (Sedláček et al., 2022).

Výztuž prochází impregnačním a naváděcím zařízením. Toto zařízení vlákno nejen impregnuje a navádí, ale vlákno je zde i napínáno, což zvyšuje přesnost navinutí na trn. Trny jsou plně rozebíratelné (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.15: Schéma navíjení (Sedláček et al., 2022)



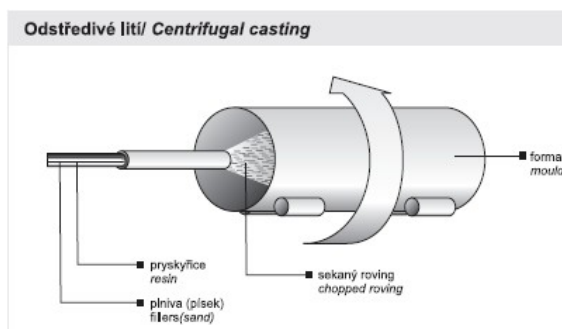
Obrázek 1.16: Trubka z navinutých uhlíkových vláken (Optimum, 2023)

Odstředivé lití (Centrifugal casting)

Tímto způsobem se nejčastěji vyrábí různé trubky, např. vodovodní. Odstředivé lití je podobné strojnímu stříkání, jelikož se využívá stejného postupu, a to nanášení pryskyřice s nasekaným skleněným rovingem. Odstředivé lití funguje tak, že se v duté rotující formě (obvykle trubce) pohybuje stříkací zařízení, které nanáší materiál na stěny formy (trubky) v několika vrstvách. Jednotlivé vrstvy se zhutňují odstředivou silou, která vzniká rychlým otáčením formy. Následně lze trubky díky smrštění snadno vytáhnout z formy. Pokud se jedná o trubky vodovodní nebo odpadní, případně pro jiné použití, kde hrozí koroze, je na vnitřní stěnu trubky nanesen takzvaný liner, což je pružná a chemicky odolná pryskyřice (Sedláček et al., 2022).

Stejně jako při navíjení se i zde vyrábí trubky, tudíž jsou si tyto dvě technologie navzájem konkurencí. Tato technologie je však vhodnější pro silnostěnná potrubí určená k zasypání. Vnitřní průměr trubek se u této technologie pohybuje od 250 do 1 500 mm (Sedláček et al., 2022).

Pokud jde o plniva používaná u technologie odstředivého lití, jedná se o směs křemičitého písku a uhličitanu vápenatého. Pojiva poté zastupují polyesterové pryskyřice ortoftalového typu, jako linery na vnitřních stěnách se využívá vynilesterů. Pokud jde konkrétně o trubky odpadové, zde je využito speciální pryskyřice, které jsou schopny protažení až o polovinu původní délky a jsou odolné vůči abrazivnímu opotřebení od splaškových vod (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.17: Schéma odstředivého lití (Sedláček et al., 2022)

Odlévání

S touto technologií se nelze setkat u dopravních prostředků, ale spíše ve stavebnictví. U této technologie není výsledný výrobek vyztužen jakýmikoliv vlákny. V podstatě se

jedná o pryskyřici smíchanou s plnivou, která představují různé nerosty, jako jsou drcené kameny, uhličitán vápenatý, slída a mnoho dalších. Dále se do pryskyřice míchají také různé pigmenty pro zabarvení, aditiva a iniciační systémy (Sedláček et al., 2022).

Jedním z nejznámějších výrobků vyráběných touto technologií je umělý mramor. Ten vzniká smísením polyesterových pryskyřic s výše zmíněnými plnivou, pigmenty, aditivou a iniciačními systémy. Tato směs se poté lije do formy, ve které je opět aplikovaný čirý gelcoat. Tady ale musí být gelcoat speciální, a to na bázi Isoftalátových/NPG pryskyřic. Jelikož se umělý mramor využívá např. v kuchyni jakožto kuchyňská deska, na barových pultech, v koupelnách a tak dále, musí být odolný vůči teplu, zejména horké vodě a saponátům pro očištění těchto desek a také odolný vůči teplotním změnám (Sedláček et al., 2022).

Umělý mramor musí mít vysoký obsah plniv, což bývá okolo 75–80 %. To je žádoucí jak kvůli vzhledu mramoru, aby se co nejvíce svou estetikou přiblížil mramoru přírodnímu, tak ale i kvůli ceně, jelikož plniva jsou levnější než samotná pryskyřice. Všechny částice plniv musí být dokonale obaleny v pryskyřici. Aby bylo zachováno dobrých licích schopností při současném obalení částic, využívá se různých velikostí částic (granulometrie) v následujícím poměru. Částice o velikosti 0,0–0,1 mm se zde nachází v 16% zastoupení. Částic velkých 0,10–0,25 mm je 9 %. Větších částic 0,25–1,00 mm je 25 % a největších částic které jsou velké od 1 do 4 mm je 50 %. Tím se docílí zachování dobrých licích schopností za současného obalení všech částic plniva (Sedláček et al., 2022).

Mísení všech složek s pryskyřicí probíhá mixérem, u velkoobjemové výroby v automatizovaných míchacích strojích. Pro dosažení hloubkového tzv. onyx efektu je potřeba mezi plniva přidat i jemně mletý aluminium trihydrát spolu s transparentními pigmenty. Umělý mramor může být na rozdíl od přírodního mramoru nepřírozně zabarvený. Přírodní mramor bývá černý, bílý, šedý, případně lehce zelený (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.18: Umělý mramor (Sedláček et al., 2022)

Dalším kompozitním materiálem vyráběným metodou odlévání je polymerbeton. Je téměř totožný s výrobou umělého mramoru, avšak liší se v jediném bodě a to v tom, že se nepoužívá gelcoat a ani pigmenty. Je totiž určen pro průmyslové využití, a tak se nehledí na estetiku. Díky tomu se také dostává prostoru minimalizaci nákladů na výrobu, jelikož

Lze využít levnější plniva, například písek, kaolin nebo skleněnou drť. Mimo jiné se také kladou nároky na zrychlení výroby, tudíž formy bývají vyhřívány. Jeho využití je zejména na svrchní vrstvy podlah a to jak ve formě dlaždic, nebo přímo lité na podklad. Dále se ve strojírenství polymer beton používá na výrobu odlitků, ze kterých pak lze např. stavět rámy obráběcích strojů (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.19: *Polymerbeton se skleněnou drtí (MaterialDistrict, 2005)*

Posledním výrobkem, který lze udělat technologií odléváním je tzv. Solid surface. Je to velmi tvrdá a odolná obdoba umělého mramoru, která imituje přírodní kámen. Jako základ slouží směs speciálních plniv a pryskyřic, zejména akrylátových nebo polyesterových, které mají vysokou tepelnou a chemickou odolnost a také jsou schopny vysokého vytvrzení. Jako plniva se používají hlavně aluminium trihydrát nebo vločky z vytvrzeného gelcoatu. Pokud je to vyžadováno, je možno přimíchat i pigment. Rozdíly od umělého mramoru jsou dva. Zaprvé se nepoužívá gelcoat a za druhé mísení všech složek probíhá pod vakuem. Vakuum napomáhá tomu, aby vznikl dokonale homogenní, neporézní a velmi tvrdý materiál, který pak lze doladit k dokonalosti broušením a leštěním. Je možné ho řezat, obrábět, lepit a jednoduše opravovat opět leštěním. Solid surface se opět podobně jako umělý mramor využívá v kuchyních, koupelnách nebo při výrobě dlaždic (Sedláček et al., 2022).



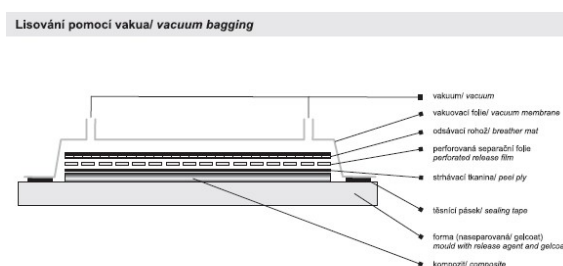
Obrázek 1.20: *Solid surface (RDMarble, 2020)*

Lisování

Lisování lze provádět na mnoho způsobů. Prvním a nejjednodušším způsobem je lisování za studena, působením nízkého tlaku $0,3\text{--}10,0\text{ kg/cm}^2$ za normálních teplot. Formy nejsou

vyhříváné, a tudíž na jejich výrobu mohou být použity levné materiály, jako je laminát, plech, dřevotříska. Formy jsou oboustranné, tudíž povrch je hladký z obou stran. Nejčastěji se pro lisování za studena používají šroubové svěrky nebo hydraulické válce v rámu, které stlačí všechny vrstvy. U lisování za studena se využívá výztuží ve formě tkanin ze skleněných nebo uhlíkových vláken. Tkaniny se mohou lišit gramáží, stylem, jakým jsou utkány, nebo orientací. Pryskyřice se nepoužívají žádné speciální. Mohou být polyesterové nebo epoxidové, avšak důležité je, aby byly tvrdnoucí za normální teploty. Výhodou tohoto způsobu lisování je jeho finanční nenáročnost. Je vhodný pro série do 5 000 kusů (Sedláček et al., 2022).

Pokud je třeba dosáhnout vyššího poměru výztuže nebo do dílce začlenit i tuhé sendvičové materiály jakou jsou pěny nebo voštiny, pak se využívá právě lisování pomocí vakua. Vakuum zde nezastává pouze funkci vytváření tlaku a tím lisování materiálu. Vakuum zde pracuje i jako odsávání přebytečné pryskyřice. Pokud je nutno zakomponovat do výrobku měkké sendvičové materiály, je třeba markantně snížit podtlak. Jako hlavní konstrukční materiál je používána prosycená výztuž, která se vkládá do formy jako při již výše zmíněném ručním kladení. Po položení poslední vrstvy prosycené výztuže se na ni položí tzv. odtrhová/strhávací páska. Ta usnadňuje další operace, jakými může být laminování, lepení nebo různé povrchové úpravy. Pásku totiž lze lehce strhnout a na vzniklém povrchu, který byl páskou chráněn, provádět již zmíněné úpravy. Páska ulehčuje práci zejména tím, že povrch pod páskou není nutné zdršňovat ani odmašťovat. Dále se vkládá separační folie a odsávací rohož, která saje zbytkové pojivo a umožňuje odsát vzduch z pryskyřice, aby v ní nevznikaly nežádoucí bubliny. Nakonec se pokládá pružná vakuovací folie, která se zajistí oboustrannou lepící páskou, případně se přilepí tmelem tak, aby byla zachována funkce vakua. Vakuová pumpa pak vysaje vzduch zpod folie, která slisuje jednotlivé vrstvy podtlakem od 0,3 do 0,9 bar. Formy jsou velmi podobné těm pro ruční kladení, tudíž jsou také stejně finančně nenáročné. Vytvrzení probíhá za normálních teplot, kromě použití prepregů, což jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Tam je třeba dosáhnout vytvrzovací teploty, kterou předepisuje výrobce prepregu. Té se dosáhne vložením formy do vytápěné komory. Vakuové lisování je vhodné pro malé až střední série. Jeho výhodou je, že výsledný dílec je oboustranně hladký, má vysoký poměr výztuže a že náklady na pořízení technologie nejsou vysoké. Jediná větší investice je vakuová pumpa (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.21: Schématické zobrazení lisování za pomoci vakua (Sedláček et al., 2022)

Dalším způsobem výroby kompozitních dílců lisováním je lisování v autoklávu. Je nejtěžší a nejdražší ze všech technologií na výrobu velkorozměrných konstrukcí v leteckém a kosmickém průmyslu, závodních automobilů nebo pro výrobu velkorozměrových panelů karoserie dopravních zařízení. Nicméně je také nejdokonalejším způsobem výroby kompozitních dílců, což vysokou cenu vyváží. Nákladná je zejména z důvodu, že cena technologie je vysoká a také formy jsou velice drahé. Za těchto předpokladů se výroba lisováním v autoklávu vyplatí spíše pro velké série. Jako základ jsou vždy prepregy, které vyžadují vyšší teploty pro vytvrzení. Kompozitní vrstvy jsou zde totožné s vakuovým lisováním. Lisování v autoklávu probíhá tak, že se forma překrytá vakuovou folií vloží do vyhřátého autoklávu. Následně nastane podtlak kolem 0,8 bar, který jednotlivé vrstvy ještě více přitlačí k sobě a vysaje veškerý vzduch z pryskyřice. Poté se autokláv natlakuje na přibližně 6 bar. Výztuž je zde v 60% zastoupení. Prepregy lze klást ručně, případně automatizovaně, když se vyrábí letecké nebo kosmické díly, kde je vyžadována maximální přesnost. Prepregy pro lisování v autoklávech jsou vyrobeny ze skleněných, aramidových nebo uhlíkových vláken. V případě letecké nebo kosmické aplikace se jedná o vlákna borová či siliciumkarbidová. Matrice bývá nejčastěji epoxidová, která vytvrdne při teplotách od 120 do 200°C (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.22: Autokláv (Popov, 2017)

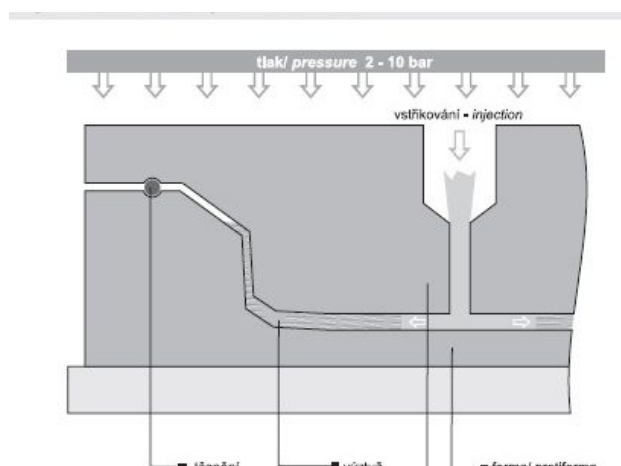
Posledním způsobem lisování je lisování za tepla a tlaku. Při tomto způsobu se využívá dvou nebo vícedílných forem z kovu, které musí mít přinejmenším leštěný povrch, ideálně však tvrdě pochromovaný a musí být také vyhřívány. Každá jejich část je pak upnuta do hydraulických lisů, které jsou schopné vyvinout tlak až 300 kg/cm². Opět, stejně jako u lisování v autoklávech, jsou základem prepregy, mohou se ale použít i lisovací těsta (DMC – dough moulding compounds) nebo lisovací směsi, tzv. premixy (BMC – bulk moulding compounds). Lisování za tepla a tlaku je jednou z nejproduktivnějších metod pro velkosériovou výrobu malých a středních dílů. Jeho nesporným benefitem je rychlost výroby, konzistentnost kvality a možnost kompletní automatizace výroby. Nicméně technologie je to velice drahá, zejména kvůli nákladným formám a hodí se pro větší série (Sedláček et al., 2022).

Injektážní a infuzní technologie

Tato výrobní technologie je řazena mezi tzv. uzavřené technologie. Uzavřené technologie brání odparu nebezpečného styrenu z pryskyřice, čímž také podporují i stále přísnější předpisy na kvalitu pracovního prostředí a snížení emisí do komunálního prostředí. To

nicméně vede k utlačování ručního kladení a stříkání. Vyskytují se 3 modifikace této technologie. Všechny však vychází ze společného základu, a to je prosycování suché výztuže uložené ve formě pomocí injektáže pryskyřice, vakua nebo obojího (Sedláček et al., 2022).

První modifikací je vysokotlaké vstřikování neboli RTM – resin transfer moulding. Formy určené pro tento způsob musí být velice odolné, nejčastěji vyráběné z polymerbetonu nebo kovu, jelikož musí snést vysoké vnitřní tlaky. Forma vytřená gelcoatem se vyloží suchou výztuží přesně podle konstrukčního návrhu, případně pokud se jedná o velkou sérii dílců, vloží se předlisky z materiálu shodného s požadovanou výztuží. Je důležité, aby tento materiál měl strukturu, která umožní bezproblémový tok pryskyřice, aby se dosáhlo prosycení výztuže co nejrychleji. Pak dojde k uzavření formy horním dílem a zabezpečení rychloupínacím zařízením. Formy mají otvor, kudy se vsune vstřikovací pistole. Tou se dopravuje pojivo z vysokotlaké pumpy s říditelným dávkováním iniciátoru. Formy musí být opatřeny také otvory pro kontrolu množství pojiva. Při dostatečném množství uvnitř formy začne vytékat kontrolními otvory ven. Zde je pro volbu pojiva důležitý čas. Vytvrzení musí proběhnout v řádu 10–20 minut, a to za využití exotermu, tedy tepla uvolňovaného pryskyřicí při vytvrzování (Sedláček et al., 2022).



Obrázek 1.23: Schéma vysokotlakého vstřikování (RTM) (Sedláček et al., 2022)

Pro vysokotlaké vstřikování se používají jakožto výztuže nekonečná vlákna a z nich utkané rohože nazývané např. Unifilo nebo prošivané rohože, případně speciální, které kombinují skleněná vlákna a řídkou rohož ze syntetických vláken typu Rovicore nebo Combiflow. Používají se také nízkogramážní rohože na povrch dílce. Co se týče používaných pojiv, jedná se zejména o pryskyřice polyesterové s urychleným vytvrzením. Ty jsou v některých případech doplněny o různá levná plniva, jako je například uhličitan vápenatý. Tato plniva se používají pro úpravu vlastností, konkrétně uhličitan vápenatý pro snížení hořlavosti. Využívá se také pryskyřic nazývané Class A, což jsou pryskyřice se sníženým smrštěním používané zejména pro automobilové díly určené k přímé montáži na vozidlo, bez potřeby jakýchkoliv povrchových úprav. Díky tomu, že výrobní cykly jsou ve srovnání s ostatními systémy krátké a kvalita dílců je konstantní, hodí se pro výrobu dílů ve větších sériích. Ovšem náklady na pořízení technologie jsou velice vysoké. Největší investicí je vstřikovací zařízení, nicméně i formy jsou relativně finančně zatěžující. Cenu formy lze ale snížit použitím distančních voskových folií místo protikusů, které svou silou stěn odpovídají síle stěn dílce. Díky tomu odpadá nutnost výroby nákladného protikusů (Sedláček et al., 2022).

Druhou modifikací je vakuo-injekční technologie. Je velice podobná vysokotlakému vstřikování. Jediným rozdílem je, že k prosycení výztuže pojivem je využito vakuum, které prosycení urychluje. Existuje ve dvou provedeních:

- a) Vstřikování do středu formy, vakuum je aplikováno po obvodu
- b) Vstřikování do obvodového kanálku, vakuum aplikováno ve středu formy

Velkou výhodou této technologie je, že odpadá nutnost dělat formy robustní. To je dáno tím, že zde jsou nízké tlaky od 0,4–1,0 bar. Hodí se zejména na výrobu větších dílců (Sedláček et al., 2022).

Poslední a třetí modifikací vysokotlakého vstřikování je tzv. vakuové prosycování, ve zkratce VIP, což znamená vacuum infusion process. Je podobná RTM, ovšem zcela odpadá injekční zařízení. Samotné VIP má pak další 3 provedení. Tou první je, že vrchní část formy je flexibilní a spodní část formy pevná s odsávacími kanálky. Vrchní část formy svou flexibilitou reguluje přítlak, sílu uzavírání a zajišťuje vakuum o síle 0,6–0,8 bar. Pojivo je přiváděno ze zásobníku, nebo se rozetře na výztuž bezprostředně před uzavřením formy. Vznikne tak oboustranně hladký dílec s možností do něj zakomponovat jádro jako jsou pěny, voštiny a tak dále, pokud je třeba vytvořit sendvičový materiál. Další možností je vakuové prosycování pod pružnou folií. Je velice podobná lisování pomocí vakua. Spodní díl formy je shodný s formou pro ruční kladení, tudíž nenákladná. Místo protikusu je použita právě pružná folie, kterou je nutno připevnit těsníci pásky pro udržení vakua pod ní. Vakuum pod folií přisává pojivo z reservoáru, pokud se jedná o velké dílce, je pojivo rozváděno děrovanými trubičkami do vzdálenějších míst. Vakuum je aplikováno obvodovými kanálky, které tvoří těsnící profily. Poslední modifikací VIP je metoda SCRIMP, která je téměř totožná s prosycováním pod pružnou folií. Od prosycování pod pružnou folií se liší tím, že je pojivo rozváděno pomocí speciální sítky, která je položena po celém povrchu na neprosycené výztuži. Na síť se položí opět pružná folie (Sedláček et al., 2022).

U všech třech modifikací VIP se využívají stejné výztuže, kterými mohou být vlákna tvořena z různých materiálů, například uhlíková vlákna, skleněná vlákna, aramidová vlákna. Lišit se opět mohou ve stylu tkaní, orientaci a gramáži. Využívají se také speciální prošívání i kombinované rohože jako u první modifikace RTM. Také je možno opět zakomponovat sendvičové výplně (pěny nebo voštiny), případně semisendvičové materiály typu Coremat. Lze použít i odtrhovací pásky jako u výroby kompozitů lisováním nebo povrchové tkaniny. Jako pojiva se využívají řídké polyesterové a epoxidové pryskyřice. V případě velkých rozměrů vyráběného dílu, volí se pojiva s dlouhou dobou vytvrzení. Vakuové prosycování má největší uplatnění při výrobě trupů lodí, kapotáže lokomotiv, také při výrobě lopatek větrných elektráren a mnoho dalších. Ve zkratce tam, kde by jiné metody byly buď extrémně pracné nebo nákladné. Nevýhodou je dlouhý výrobní cyklus, tudíž výroba v menších maximálně středních sériích je nejvýhodnější (Sedláček et al., 2022).

1.6 Příklady aplikací kompozitních materiálů v dopravní technice

Kompozitní materiály patří mezi moderní materiály používané v dopravní technice. Výrobci nahraňují do karet svou lehkostí, kterou pomáhají plnit emisní normy a také zlepšovat jízdní vlastnosti vozu. Pevnost kompozitních materiálů je využita například i v oblasti pasivní ochrany posádky. Ovšem technologie výroby kompozitů je ve srovnání s běžně užívanými výrobky poměrně dražší, tudíž se s nimi lze setkat u levnějších vozidel pouze zřídka, avšak u drahých, vysoce výkonných vozidel nebo u závodních speciálů nalézají stále širší spektrum použití. Nicméně se nevyužívají pouze v pozemní dopravě, ale i v leteckém a kosmickém průmyslu. U leteckého je to opět zejména kvůli ušetření hmotnosti a tím ekonomičtějšímu provozu, oproti tomu v kosmickém průmyslu jejich použití spíše povinností, jelikož jiné, běžné materiály by nebyly schopny zvládnout extrémní podmínky panující při letech do vesmíru (Balasubramanian, 2014).

1.6.1 Karbon-keramické brzdové kotouče

Jednou z nejvýznamnějších aplikací kompozitních materiálů v dopravní technice jsou karbon-keramické brzdové kotouče, ve zkratce CCM. Ty mají obrovskou výhodu nad běžnými ocelovými kotouči, kterou je jejich teplotní odolnost. Mezi další výhody patří odolnost vůči korozi, až o 50 % nižší hmotnost, což napomáhá snížení neodpružené hmotnosti vozidla a tím zlepšuje stabilitu jízdy. Dále je jednou z hlavních výhod obrovský brzdový účinek a delší životnost. Jejich provoz je bezprašný, tudíž nedochází k emisi brzdového prachu do ovzduší, a také nekazí estetickou stránku vozu. Ta je také důležitá, jelikož se nepoužívají na levných vozech, ale na vozech za několik milionů. To je dáno zejména tím, že sada čtyř kotoučů se pohybuje v cenovém rozmezí od 200 do 250 tisíc korun. Cena je určena hlavně výrobou, která je velice složitá a časově náročná. Navzdory výše uvedeným výhodám stojí fakt, že aby bylo dosaženo všech výhod, je třeba brzdy zahřát na provozní teplotu. Karbon-keramické kotouče fungují při nízkých teplotách dokonce hůře než běžné ocelové kotouče. Zajímavostí je, že během výroby mění svou matici. Nejdříve mají matici polymerní, ta se ale postupně změní na matici keramickou. Výrobní proces je podrobněji popsán níže (Běhal, 2023).



Obrázek 1.24: Brembo CCM (Stenquist, 2015)

Historie karbon-keramických kotoučů v dopravní technice

Historie kompozitních materiálů sahá až do 70. let minulého století. Svého prvního užití se dočkaly u brzdových systémů v leteckém a kosmickém průmyslu. Od 80. let se používají u závodních vozidel. V roce 2000 namontovali inženýři ze Stuttgartské automobilky Mercedes-Benz, konkrétně z oddělení AMG, jako první na světě brzdový systém využívající karbon-keramické kotouče. Vůz Mercedes-Benz CL55 AMG F1 Edition se tak stal prvním silničním vozem na světě, využívajícím této technologie. Vyrobeno bylo celkově pouhých 55 kusů této speciální edice. V současnosti se bez karbon-keramických brzdových kotoučů neobejde žádný závodní speciál, motorčky nevyjímaje, ani nespočet rychlých silničních vozů (TheBrakeReport, 2020).



Obrázek 1.25: Mercedes-Benz CL55 AMG F1 Edition (CarPixel, 2023)

Výroba karbon-keramických brzdových kotoučů

Mezi přední výrobce patří italská společnost Brembo SGL Carbon Ceramic Brakes. Ta vznikla spojením společnosti Brembo se společností SGL Carbon. S kotouči od jiných výrobců se lze setkat jen zřídka (Brembo, 2023).

Výroba probíhá v několika krocích. Prvním krokem je výběr materiálů. Materiály jsou dva. Nasekaná karbonová vlákna jako výztuž, a fenolová pryskyřice sloužící jako matrice. Vlákna jsou pečlivě vybírána stejně dlouhá a stejně silná, aby byly zajištěny stejné vlastnosti po celém obvodu kotouče. Fenolová pryskyřice je pak ve formě prachu. Společnost Brembo bohužel více detailů k tomuto kroku neuvádí (Sherman, 2010).

Druhý krok spočívá ve smísení vláken a pryskyřičného prachu. Ty jsou pak automatizovaným strojem a v přesném množství rozprostřeny do poloviny výšky hliníkové formy. Do formy jsou následně vloženy jádra, která budou v kotouči tvořit ventilační kanály, které zajišťují, aby se kotouč nadměrně nepřehříval. Poté se forma dosype druhou polovinou požadovaného množství směsi. Válec nad formou rozprostře směs tak, aby nepřevyšovala formu. Díky přesnému dávkování směsi je minimalizován přebytečný materiál. Ten by bylo totiž složité odstranit, jelikož výsledný kompozit je velice tvrdý (Sherman, 2010).



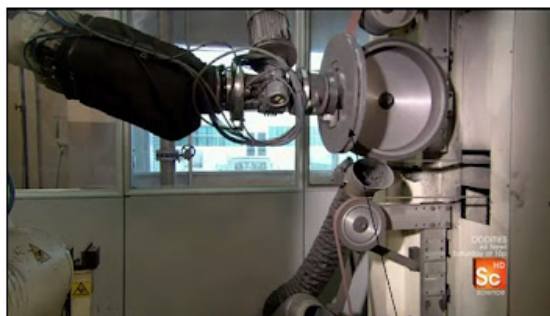
Obrázek 1.26: Forma s vloženými jádry (MechanicalEngineering, 2023)

Poté, co je směs rovnoměrně rozprostřena, je forma uzavřena, její víko lehce stlačeno a celá je vložena do lisu. V lisu je směs ve formě vystavena tlaku 20 000 kg a teplotě 200°C. Jedná se tedy o metodu lisování za tepla a tlaku (viz kapitola 1.5.3). Tlak tlačí vlákna k sobě a teplota přemění pryskyřičný prach na plast. Formy jsou poté ochlazeny a laserový paprsek zkontroluje, zda jsou všechna jádra chladících kanálů vytažena. Pokud ano, je kotouč vyjmut z formy. Počítačem řízený stroj obrousí malé zbytky přebytečného materiálu a vyvrtá do třecí plochy kotouče malé otvory, které napomáhají lepší ventilaci (Sherman, 2010).

Ve třetím kroku jsou kotouče vloženy do pece na dva dny. V peci jsou vystaveny teplotě v průměru 1 000°C. V tomto kroku se díky vysoké teplotě z plastu, vzniklého při předchozím zahřívání z pryskyřičného prachu, stává karbon. Poté se disk vloží do žáruvzdorné tavicí nádoby na podstavce. Doprostřed kotouče se vloží trychtýř, do kterého je nasypán pracovníky křemík ve formě prášku (Sherman, 2010).

Ve čtvrtém kroku je kotouč v žáruvzdorné nádobě vložen opět do pece, ale tentokrát na 24 hodin při teplotě 1 700°C v bezkyslíkovém prostředí. Místo kyslíku je do pece přiváděn dusík. Tato vysoká teplota vede k roztavení křemíku do tekuté podoby. Poté se v peci vytvoří lehký podtlak, který vtáhne roztavený křemík do pórů mezi vlákna. Tím se vytvoří nový, velice tvrdý a teplotně odolný materiál, který se nazývá karbid křemíku, řadí se mezi keramické substance. Pec se nechá vychladnout kontrolovanou rychlostí na pokojovou teplotu a kotouče jsou vyjmuty z pece (Sherman, 2010).

Následující, pátý krok, je ošetření kotoučů ochrannou vrstvou proti oxidaci. Oxidace by byla u karbon-keramických kotoučů kritická, jelikož by kyslík při vysokých teplotách vzniklých brzděním spaloval uhlík, což je nežádoucí. Nátěr se nechá vytvrdit v peci, přičemž za sebou zanechá bílé zbytky, které pak robotická ruka obrousí a třecí plochu vyleští k dokonalosti (Sherman, 2010).

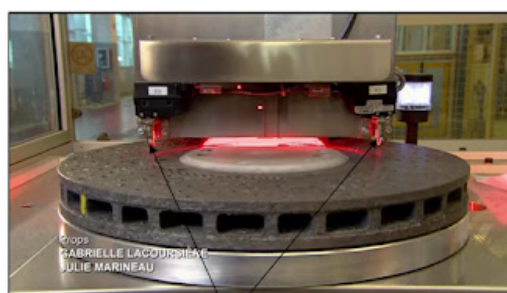


The discring held by a robot arm

Obrázek 1.27: Leštění kotouče (MechanicalEngineering, 2023)

Šestý krok spočívá v nasazení plovoucího středu na kotouč vyrobeného z anodizovaného hliníku (pokud je do středu integrována bubnová ruční brzda, je vyroben z nerezové oceli). Ten se připevňuje ke kotouči šrouby s maticí, které jsou podloženy anti-vibračními podložkami, jelikož otvor na šroub musí být lehce větší než dřík šroubu, kvůli odlišné teplotní roztažnosti obou materiálů. Anti-vibrační podložky dovolují díky tomu pohyb v uchycení středu na kotouč, ale současně zajišťují pevné spojení a brání přenosu vibrací, způsobených vůlí v uložení středu. Po pečlivém utažení všech šroubů držících střed jsou označeny barvou, která značí, že šrouby byly utaženy. Po celou dobu životnosti disku není potřeba tyto šrouby dotahovat (Sherman, 2010).

Posledním krokem je výstupní kontrola strojem, který nafotí stovky fotografií povrchu kotouče ve vysokém rozlišení. Ty jsou poté analyzovány počítačem na úrovni mikronů (Sherman, 2010).



High definition photographs are taken using laser technology

Obrázek 1.28: Kontrola kotouče snímkovacím zařízením (MechanicalEngineering, 2023)

1.6.2 Karbonový monokok

Monokok vychází z řeckých slov „mono“ jeden a „coque“ buňka. Koresponduje tedy s konstrukcí monokoku, jakožto jednodílné buňky. Je základním konstrukčním prvkem automobilu, který spojuje karoserii s podvozkem. Na monokoku jsou přírby na přidělení předního a zadního pomocného rámu, který u většiny vozidel využívajících monokok zároveň slouží jako deformační zóna v případě nárazu. Samotný monokok je pak jakousi ochrannou klecí pro posádku. U běžných vozů se lze s tímto typem konstrukce setkat jen

zřídka. Využívají se zejména tam, kde je zapotřebí malý, pevný a torzně velice tuhý kokpit. Tyto vlastnosti se sledují zejména u závodních automobilů, jako jsou Formule 1 nebo vozy kategorie LMP a mnoho dalších, monokoky ale postupně pronikají i do oblasti silničních automobilů, které však svými výkony nemají daleko k závodním vozům (Garáž.cz, 2023).

Monokoky u produkčních vozů

Takový monokok lze nalézt u nového modelu závodního vozu homologovaného i pro silniční provoz vyráběného na Slovensku. Jmenuje se Praga Bohema. Hlavním konstrukčním materiálem jsou uhlíková vlákna, včetně právě monokoku. Díky tomu je hmotnost Bohemy pouhých 982 kg při 700koňovém výkonu. Romain Grosjean, jezdec F1, který se podílí na vývoji řekl: „Řídit Bohemu je zážitek jako žádný jiný. Nevzpomínám si, že bych řídil jiné silniční legální auto, které by se tak blížilo závodnímu autu. O vzhledu ani nemluvě – je nádherné!“ To jen dokazuje její skvělé jízdní vlastnosti, na kterých má právě monokok nemalý podíl (PragaExport, 2022).



Obrázek 1.29: Praga Bohema (Bovingdon, 2023)

Dalším vozidlem využívajícím monokok, je Venom F5 od amerického výrobce Hennessey. Venom F5 má ambice na nejrychlejší produkční vůz na světě. Proto je také potřeba co nejvíce snížit hmotnost vozu. To konstruktéry vedlo k použití konstrukce s monokokem, který má hmotnost pouhých 86 kg, přičemž disponuje obrovskou torzní tuhostí 52 000 Nm (Gonzalez, 2020).



Obrázek 1.30: Monokok Hennessey Venom F5 (Gonzalez, 2020)

Monokoky u Formule 1

Karbonové monokoky jsou však nejvíce spjaty s vozy Formule 1. Rozdíl oproti monokoku silničních vozů je zejména velikost, a také absence ochrany hlavy jezdce. To bylo vyřešeno prvkem zvaným Halo, což je rám vyrobený z titanu, obalený v uhlíkových vláknech a připevněný k monokoku (Le Poidevin, 2022).



Obrázek 1.31: Ochrana hlavy, tzv. Halo (FIA, 2016)

Se zvyšující se rychlostí na trati roste i riziko zranění jezdců při nehodách. Dá se říci že monokok je nerozbitný. Vznikl totiž za účelem minimalizovat rizika vážných zranění jezdců a mimo jiné také napomáhá minimalizovat množství odlomených částí monopostu při nehodě, jelikož by mohly ohrozit ostatní závodníky projíždějící bezprostředně kolem (Chronicle, 2022).

Úplný předchůdce monokoků u monopostů F1 byla stáj Lotus. Jejich designér a šéf stáje Colin Chapman jako první sestrojil něco, co se podobá dnešním karbonovým monokokům. Tehdejší formule byly vybaveny trubkovým hliníkovým rámem. Chapman se odlišil tím, že místo trubek použil lehký, nýtovaný kov. Stalo se tak u monopostu Lotus 25 v roce 1962. To byl rok, kdy byl poprvé využit monokok v F1. Tým Lotus nadále experimentoval s dalšími materiály (Chronicle, 2022).

Prvním monopostem F1, který použil karbonovou monokokovou konstrukci byl McLaren MP4/1 v roce 1981. Jako materiál byl použit sendvičový kompozit složený z několika vrstev uhlíkových vláken, mezi které byly vloženy voštiny ze slitiny kovů. Tento monokok byl vyroben tzv. metodou "Cut and Fold", což znamená naříznutí sendvičového kompozitu z jedné strany, čímž ho lze ohnout do požadovaného úhlu. V roce 1983 přišel přelom v podobě výroby monokoku ručním kladením do formy a následným lisováním. Tento monokok už se velice podobá monokokům dnešním a byl jím vybaven monopost MP14/1C. V současné době jsou však navíc umístěny do autoklávu po ručním kladení do formy na vytvrzení (Chronicle, 2022).



Obrázek 1.32: Monokok monopostu McLaren MP4/1 (Piola, 2021)

1.6.3 Kovaný karbon

Vývoj tzv. kovaného karbonu započala v roce 2007 automobilka Lamborghini, za účelem nahradit kovaná hliníková ramena zavěšení, snížit náklady na výrobu kompozitů a časovou náročnost. Slovo kovaný v názvu není tak úplně přesné. Jedná se spíše o pozůstatek z cíle nahradit kované dílce. Cílem Lamborghini bylo vyvinout materiál, který není tak pružný jako hliník, odolný vůči poškození, vlhkosti a únavě a také, aby umožnil konstruktérům nová řešení. Vznikl z nápadu vyřadit z výroby použití autoklávu, který výrobu zpomaluje. Tak Lamborghini vyvinulo a patentovalo technologii Forged Composites, která proces výroby udělala jednodušším a rychlejším.

Nejen že výroba je jednodušší a rychlejší, ale kovaný karbon má také spoustu dalších výhod, mezi které nesporně patří jeho pevnost. Je například pevnější než titan, avšak mnohem lehčí, poněvadž má jen třetinovou hustotu. Jeho vysokopevnostní struktura vláken, která je dána vzájemně propletenými a složenými listy atomů uhlíku, jež jsou zarovnané s délkou vlákna, mu propůjčuje onu mimořádnou pevnost, která je zratelná zejména v ohybu. Tato vlákna se nazývají turbostratická. Díky tomu, že vlákna nejsou v dlouhých pramenících, je možné je formovat do velice komplikovaných i třídimenzionálních tvarů. V neposlední řadě je výhodou také vzhled, který je díky nahodilému uspořádání vláken velice netradiční (KarbonMAX, 2023).

Výroba kovaného karbonu

Výroba probíhá pouze ve dvou jednoduchých fázích. První fází je naplnění vyhřívané ocelové formy nasekanými a pryskyřicí prosycenými uhlíkovými vlákny. V druhé fázi se forma vloží do vysokotlakého lisu, kde je dosaženo tlaku 1 200 až 1 500 psi za dané teploty. Jedná se tedy o lisování za tepla a tlaku. Forma s výrobkem je v lisu pouze 3 minuty. Pak je možné výrobek, který je již plně vytvrzený, vyjmout a ihned s ním dále pracovat. Kovaný karbon je tedy vylepšenou rychlejší technologií výroby s výztuží z uhlíkových tkanin. Rozdíl je v tom, že pokud se při výrobě používá uhlíková tkanina, tak je pryskyřicí prosycována až při pokládání jednotlivých vrstev do formy. Oproti tomu kovaný karbon začíná jako směs nasekaných uhlíkových vláken a pryskyřice ve formě pasty. Obsah uhlíkových vláken je přibližně 500 000 nasekaných vláken na čtvereční palec. Pasta se jen vlije do formy, vytlačí lisem do požadovaného tvaru a teplem vytvrdí (KarbonMAX, 2023).



Obrázek 1.33: Kovaný karbon v interiéru Lamborghini Huracán Performante (Stoy, 2017)

Použití kovaného karbonu

Kovaný karbon zajímavě využila automobilka Koenigsegg při vývoji nového čtyřmístného modelu jménem Gemera. Gemera ve vrcholné specifikaci kombinuje elektromotor a spalovací motor o objemu pěti litrů s osmi válci a dvojitým přeplňováním turbodmychadly. Celkový výkon je 2 335 koňských sil, z čehož 800 koní připadá právě elektromotoru s názvem Dark Matter. Tento elektromotor vyniká zejména svou nízkou hmotností, která je pouhých 39 kilogramů. Tu získal díky použití právě kovaného karbonu. Koenigsegg jako první použil kovaný karbon jak na rotor, tak na stator, což bohužel vede k použití mnohem větších permanentních magnetů, ale i přes to je tento elektromotor nejlepší v poměru výkonu ku váze (Markus, 2023).



Obrázek 1.34: Elektromotor Dark Matter (Markus, 2023)

1.6.4 Ráfky z kompozitních materiálů

Hmotnost disků kol je důležitá pro zajištění stability vozu. Snížením jejich hmotnosti lze dosáhnout poměrného snížení hmotnosti neodpružených prvků, stejně jako je tomu výše u karbon-keramických kotoučů. Proto se výrobci výkonných vozů někdy uchylují k použití kompozitních materiálů na výrobu kol (Lažanský, 2016).

Ráfky z hořčíkové slitiny

Hořčíkové slitiny patří mezi kompozity s kovovou maticí. Jsou používány ve všech odvětvích dopravní techniky, zejména z důvodu úspory hmotnosti, jelikož slitiny hořčíku patří mezi velice lehké materiály (Balasubramanian, 2014).

Kola z hořčíkových slitin jsou nejlehčí ze všech kol vyrobených z kovových slitin. Jejich hmotnost se pohybuje v závislosti na velikosti od 5 do 9 kilogramů. Díky jejich nízké hmotnosti se začaly hojně používat u závodních automobilů, případně sportovních modelů automobilek, jako je například Porsche Carrera GT. Oproti výhodě hořčíkových kol co se týče váhy, stojí několik zásadních nevýhod. Nejzásadnější nevýhodou, kvůli které se od hořčíkových kol ustupuje a na některých automobilových soutěžích jsou zakázané, je jejich vysoká hořlavost, kterou způsobuje právě hořčík, který se řadí mezi vysoce hořlavé prvky a navíc je velmi obtížné ho uhasit. Hořící hořčík totiž po kontaktu s vodou exploduje. Další nevýhodou je vysoká cena a tzv. neviditelná koroze. Hořčíková kola totiž nerezavějí zvenku, ale zevnitř, tudíž je nutná pravidelná kontrola rentgenem. Pokud by se pravidelné kontroly neprováděly, mohlo by dojít až k prasknutí disku, což může vést až k nehodě s možnými fatálními následky (Lažanský, 2016).



Obrázek 1.35: Detail na ráfek z hořčíkové slitiny na voze Porsche Carrera GT (Delgado, 2019)

Ráfky z polymerních kompozitů

Ráfky z polymerních kompozitů jsou používány zejména u automobilů, motocyklů nebo také v cyklistice. Ačkoliv se mohou jevit jakožto výrobek posledních let, tak jejich kořeny jsou datovány do roku 1971, kdy Michelin vyrobil první karbonové ráfky pro Citroen SM v rallye úpravě, za účelem snížit hmotnost, jelikož jejich vůz byl moc těžký a hliníková kola by rallyové nasazení nevydržela. Proto byl do hry vtažen Michelin, který přímo pro Citroen SM vyvinul kola z karbonu o polovinu lehčí, než kola standardní. Z počátku se kola potýkala s problémy, jako jsou nestandardní šrouby nebo jiný středový otvor (Delgado, 2019).

Jako druhým na světě a zároveň prvním v USA, kdo použil kompozitní kola, byl Carroll Shelby, který se spojil s automobilkou Dodge, aby v 80. letech vyrobili model CSX. Jejich vrcholná verze potom nabízela kola ze sklolaminátu. Poté se dlouho kompozitní kola nikde neobjevila, až do roku 2013, kdy automobilka Koenigsegg vyrobila první karbonová kola z jednoho kusu pro produkční vůz, konkrétně Koenigsegg Agera One:1.

Jejich výroba probíhá ručním kladením do ocelové formy a následným vložením do autoklávu. Jediným výrobcem karbonových kol, který si je vyrábí pouze pro své vozy, je v současné době automobilka Porsche. Ostatní automobilky využívají externího výrobce Carbon Revolution. Ten například v současné době dodává karbonová kola automobilce Ford pro vozy Shelby GT350R a Ford GT (Delgado, 2019).

Ráfky z uhlíkových vláken mají několik výhod. Pravděpodobně nejdůležitější výhodou je jejich hmotnost. Jsou až o polovinu lehčí ve srovnání s hliníkovými disky se stejnou tuhostí. Redukce hmotnosti vede opět ke snížení neodpružených hmot, která vede ke zlepšení stability. Spolu s neodpruženými hmotami vede snížení hmotnosti také ke snížení rotačních hmot, což zajišťuje lehčí manévrovatelnost vozu, včetně brzdění, jelikož lehčí kolo nemá tak vysokou setrvačnost. Společně s tím se také zlepšuje akcelerace. Opět kvůli menší rotační hmotnosti, jelikož kolo lze rychleji uvést do pohybu. Díky tomu, že karbon je velice lehkým materiálem, se výrobci mohou uchýlit k osazení větších kol, aniž by ovlivnili stabilitu vozu zvýšením hmotnosti neodpružených hmot. Karbonová kola mají velkou budoucnost u elektrovozdů, poněvadž redukuje energii potřebnou k rozjetí vozu, čímž zvyšují dojezd elektromobilu, který je dnes stále zásadním nedostatkem (CarbonRevolution, 2023).

Další výhodou je jejich vysoká boční tuhost, díky čemuž lze využít výhod negativního odklonu kola, který zajišťuje nižší opotřebení pneumatik a lepší kontakt pneumatiky s vozovkou (CarbonRevolution, 2023).

Karbonové ráfky napomáhají také aerodynamice, která úzce koresponduje s plochou vnější, pohledovou plochou kol a co nejmenším počtem otvorů v nich. Díky tomu, že je uhlíkový kompozit lehký, je možné vyrábět aerodynamická kola, při zachování nízké hmotnosti, jelikož lze z něj vyrobit tenké aerodynamické prvky disku. Je samozřejmé, že tato kola by bylo možno vyrobit i z hliníkové slitiny, ovšem byla by násobě těžší (CarbonRevolution, 2023).

Poslední výhodou je jejich schopnost tlumit zvuk a vibrace od vozovky. Zatímco konvenční hliníková kola zvoní vibracemi a rázy, karbon takové vlastnosti nemá. Tato vlastnost je nejvíce poznat u elektromobilů, kde je provoz absolutně tichý a lze slyšet jen hluk od kol jedoucích po vozovce případně pak aerodynamický hluk ve vyšších rychlostech (CarbonRevolution, 2023).



Obrázek 1.36: Ráfek z uhlíkových vláken na vozu Ford GT (Matai, 2018)

Hybridní ráfky

Mezi kompozitní ráfky lze zařadit také hybridní ráfky, které kombinují límec z uhlíkového kompozitu a kovový střed, nejčastěji však z kovaného hliníku nebo hořčíkové slitiny. Toto revoluční řešení představila automobilka BMW, která jako první vyrobila ráfky kombinující hliníkovou slitinu a karbon. Tímto technologickým řešením se kombinují ty nejlepší vlastnosti obou materiálů a navíc jsou o přibližně 40 % lehčí než běžná hliníková kola a o 25 % lehčí než kovaná kola. Karbonový límec tlumí rázy a vibrace od vozovky a hliníkový kovaný střed přidává svou tuhost a bezpečnost. A také díky tomu, že je středová část na límec napojená šroubovým spojem, je možné středové části měnit dle libosti a tím dosáhnout nepřehledného množství designových řešení (Team, 2022).



Obrázek 1.37: *Hybridní ráfek MVForged MR-525 (MVForged, 2024)*

2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je zjistit, jakou pevnost má uhlíkový kompozit v tahu oproti pevnosti v ohybu a oba výsledky porovnat. Tyto výsledky mohou pomoci určit vhodnost určitých aplikací ve vozidlech. K získání výsledků je využito tahové a ohybové zkoušky, pro které bude nutno vyrobit zkušební vzorky. Zjištěné výsledky pak budou uvedeny do kontextu s použitím v dopravní technice.

3 Materiál a metody

3.1 Zkušební materiál

Pro potřeby zkoušek byl dodán materiál ve formě 1,2 mm silné, jednostranně hladké karbonové desky od českobudějovické společnosti Kopp-Voráček s.r.o. Dvouose orientovaná vlákna (twill), použitá v desce jako výztuž, jsou kombinací dvou hustot 240 a 600 gsm (gramů na čtvereční metr). Pojivem je pak epoxidová pryskyřice LG120 a vytvrzena pomocí tvrdidla HG356 od společnosti GRM Systems. Celá deska je vyrobena technologií vakuové infuze neboli VIP (Vacuum Infusion Process), spadající pod injektážní a infuzní technologie (viz. kapitola 1.5.3).

3.1.1 Výroba vzorků

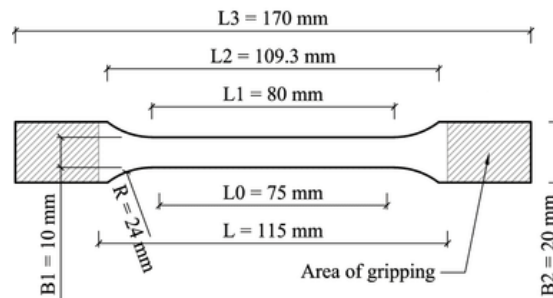
Vzorky pro zkušební účely byly vyřezány z dodané desky ve společnosti Profitek s.r.o. sídlící v Lišově. K výrobě vzorků z desky byl použit profesionální frézovací stroj STEP-CRAFT Q.404. Tato metoda přináší pro výrobu vzorků několik výhod, mezi které patří rychlost a přesnost výroby.



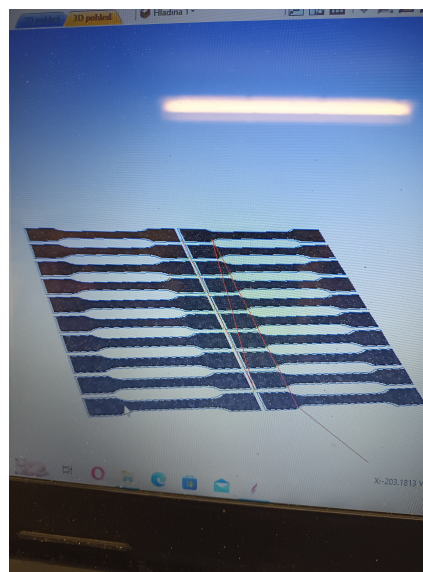
Obrázek 3.1: Frézovací stroj STEP-CRAFT Q.404 (Profitek.cz, 2024)

Programování frézovacího procesu probíhalo prostřednictvím softwaru Vectric Aspire 11.016 (dále jen Vectric). Jako první krok bylo nutné vytvořit výkres vzorku pro frézu v kreslicím nástroji zabudovaném přímo v programu Vectric tak, aby svým tvarem a rozměry (kromě tloušťky) odpovídal normě ČSN EN ISO 527-2 Type 1A. Jelikož kreslení je v daném programu opravdu jednoduché, intuitivní a dílec není nikterak složitého tvaru, nakreslení vzorku tak trvalo několik málo minut. Po nakreslení dílce se zadaly rozměry základního materiálu (desky) a požadovaný počet dílců a Vectric již sám umístil dílce

na desku. Zbývalo jen zadat do jaké hloubky má fréza frézovat. Jelikož tloušťka desky je 1,2 mm, nastavená hloubka byla zvolena na 1,4 mm, aby bylo zajištěno profrézování materiálu. Jako poslední Vectric automaticky vypočítal dráhy frézování a soubor byl připraven na nahrání do softwaru frézy.

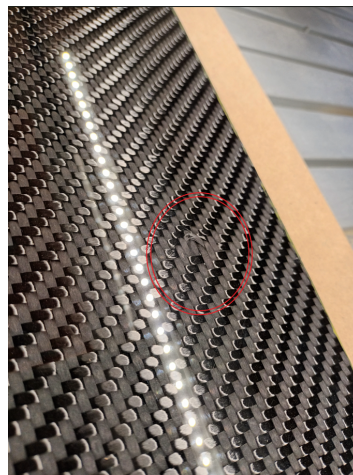


Obrázek 3.2: *Nákres vzorku (Silvestru et al., 2022)*



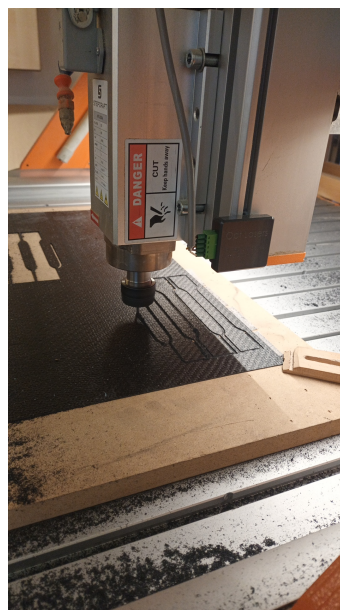
Obrázek 3.3: *Rozložení vzorků s naplánovanými drahami*

Následovala příprava na frézování a následně frézování samotné. Fréza byla nejprve naprázdno puštěna na nízké otáčky, aby se prohřálo mazivo a nedocházelo k nadměrnému opotřebování vnitřních komponent. Mezitím se připravovalo vše potřebné pro frézování. Nejprve bylo nutné zvolit vhodnou podkladovou desku na kterou se oboustrannou lepicí páskou přilepila deska z uhlíkových vláken, aby se zamezilo zvedání desky při frézování. K uchycení desky samozřejmě slouží hlavně úchyty, tudíž lepicí páska je pouze pomocné zajištění. Následně se v softwaru frézy nastavil manuálně počáteční bod a pole frézování, což umožnilo vyhnout se kazu na desce a vzorky frézovat z jiné části. Po nastavení pole frézování a dostatečném zajištění desky ještě zbývalo změřit délku nástroje ve sklíčidle pomocí speciálního zařízení s mikropsínačem, tzv. presetteru, kdy po dotyku nástroje se v softwaru CNC frézy automaticky vypočítá délka nástroje. Poté již bylo možné spustit frézu na plné otáčky a začít frézovat.



Obrázek 3.4: *Kaz na desce*

Frézování zpočátku probíhalo bez problému, avšak po prvních dvou vyfrézovaných vzorcích se nejspíše vlivem vibrací od řezného nástroje začala odlepovat deska od podkladu, což zapříčinilo, že se fréza zabrousila do vzorku, naštěstí však nijak významně a do oblasti uchycení do čelistí trhacího stroje, která nemá vliv na pevnost vzorku. Proces byl tedy přerušen a bylo nutné upravit uchycení. Znovu byla použita oboustranná lepicí páska, tentokrát ale na hladkou stranu desky. To zřejmě zajistilo lepší adhezní podmínky lepicí pásky a deska se při dalším frézování již nenadzvedla. Jelikož 5 vzorků bylo hotových, bylo zapotřebí v programu Vectric upravit počet požadovaných vzorků a také upravit rozložení. Zbýlých 15 vzorků se tedy frézovalo za sebou v jedné řadě. Celý proces pak proběhl v naprostém pořádku a všech 20 vzorků bylo dokonale vyfrézováno za přibližně osm minut čistého času.



Obrázek 3.5: *Frézování*

Hotové vzorky byly následně očištěny a rozděleny na dvě sady pro tahovou a ohybovou zkoušku. Každý vzorek byl označen číslem a písmenem T či O dle toho, zda se jednalo

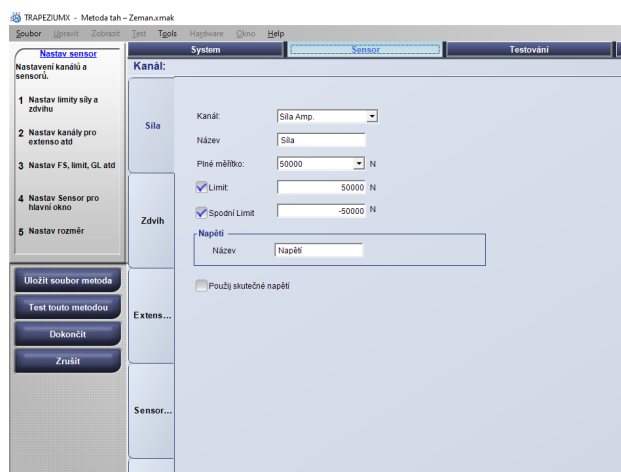
o vzorek na tahovou nebo ohybovou zkoušku. Z každé sady byl vyčleněn jeden vzorek na testovací pokus, což znamená, že na každou pevnostní zkoušku bylo k dispozici 9 kusů vzorků.



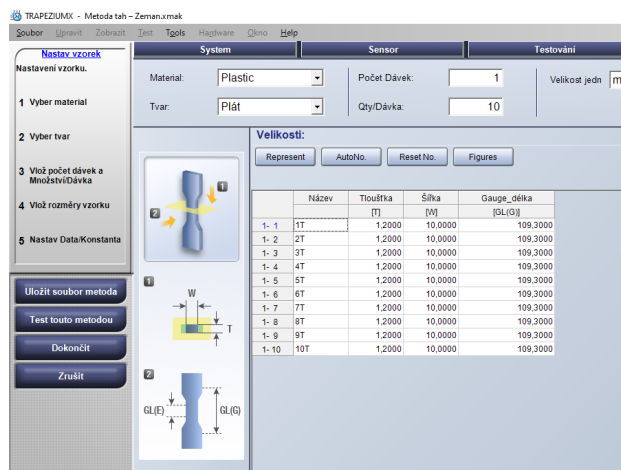
Obrázek 3.6: Sady vzorků

3.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem probíhala na univerzálním trhačím stroji Shimadzu AGS-X plus 50kN na Fakultě zemědělské a technologické Jihočeské univerzity. Jako první bylo potřeba do stroje upnout uchycovací čelisti na ploché vzorky. Následovalo nastavení trhačímho stroje a rozměrů vzorku v softwaru Trapezium-X.



Obrázek 3.7: Nastavení limitů



Obrázek 3.8: Nastavení rozměrů vzorku

Nastavené hodnoty pro tuto zkoušku byly:

1. Typ testu: Tah
2. Limit síly: 50 000 N
3. Limit zdvihu: 500 mm
4. Materiál vzorku: Plast
5. Tvar vzorku: Plát
6. Rozměry vzorku: $1,2 \times 10 \times 109,3$ mm
7. Rychlost posunu: 5 mm/min

Po nastavení všech hodnot bylo možné přejít k testovacímu pokusu. Zkušební vzorek byl upnut do čelistí a zajištěn v nich utažením stranovým klíčem. Po upnutí byla vynulována poloha a síla na ovladači stroje a poté přístroj zkalibrován. Nulování polohy, síly a kalibrace stroje probíhala vždy, před každým vzorkem. Už nezbývalo nic jiného, než spustit zkušební metodu. Po chvíli bylo zjištěno, že vzorek kvůli velmi hladkému povrchu vykluzuje a čelisti musely být dotaženy. Po dotažení již síla narostla tak, že testovací vzorek byl přetržen, nicméně na utažení je potřeba značná síla. Po testovacím pokusu bylo možné přejít k testování jednotlivých vzorků. Jelikož problémy s utažením vzorku v čelistech stále přetrvávaly, stranový klíč byl od 5. vzorku vyměněn za akumulátorový rázový utahovák, což částečně problém vyřešilo, ale ne úplně. Nebyla k dispozici konkrétní hodnota momentu utažení, tudíž dotažení záleželo pouze na citu s ohledem na závit, aby nebyl zničen. To zapříčinilo, že vzorek nebyl dotažen vždy naprosto stejně.



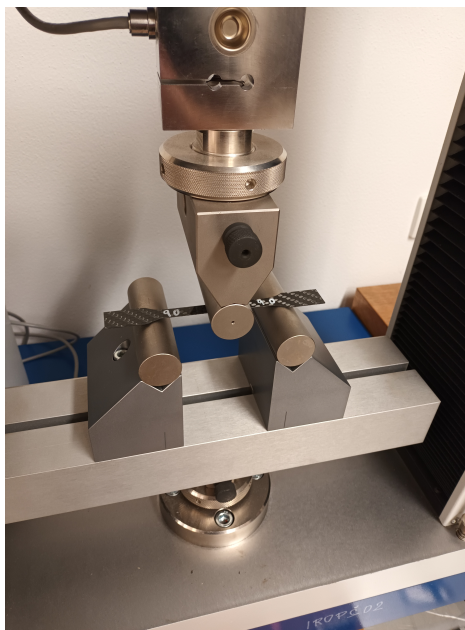
Obrázek 3.9: Testovací vzorek v přístroji

3.3 Zkouška ohybem

Zkouška tříbodovým ohybem probíhala na VOŠ, SPŠ, automobilní a technické v Českých Budějovicích, na zkušební stroji TIRAtest 2850. Nejprve bylo třeba upravit vzdálenost podpěr vzorku, aby nedošlo ke skluzu vzorku při ohybu, jelikož byl očekáván velký průhyb. Kvůli malé délce vzorků bylo zapotřebí podpěry otočit, aby je bylo možné upevnit blízko sebe. Dále proběhlo nastavení trhacího stroje v softwaru TIRAtest, který trhací stroj využívá. Nastavené hodnoty byly:

1. Zkušební rychlost: 100 mm/min
2. Dráha chodu stroje: 70 mm
3. Vzdálenost podpěr: 100 mm (do softwaru se nenastavuje)

Po nastavení všech hodnot bylo možné přejít k samotnému testování. Veškeré pokusy probíhaly bez problémů a vzorky se povedlo úspěšně přelomit.



Obrázek 3.10: Testovací vzorek na tah v přístroji

4 Výsledky

4.1 Výsledky tahové zkoušky

Pro lepší čitelnost byly výsledky v grafech rozděleny na dvě části. Z grafů je patrné, že u vzorků 2, 4, 5 a 9 došlo k výraznému prokluzu vzorku v čelistech, který je znatelný jako prudký propad křivky. Z grafů lze tudíž vyhodnotit pouze maximální dosaženou sílu v tahu a průběh silového působení.

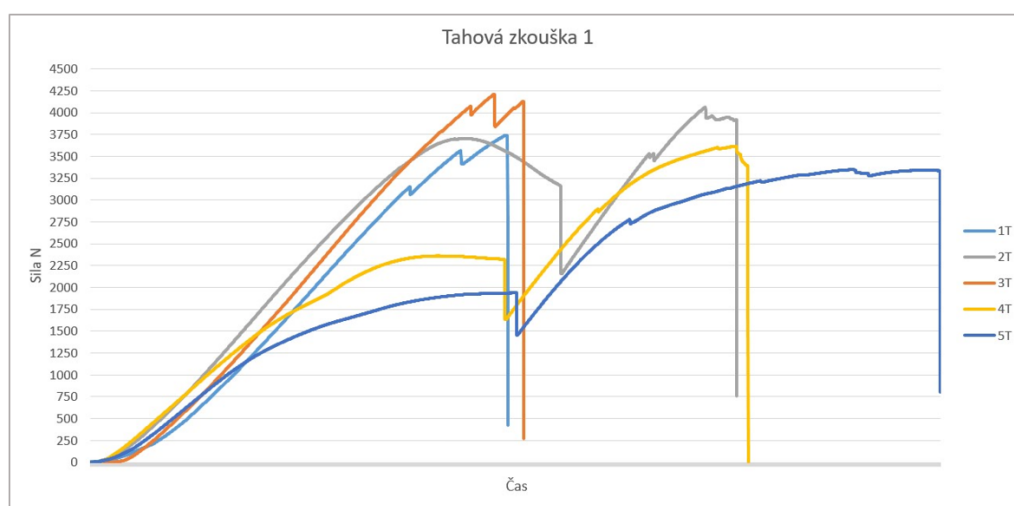
Maximální hodnoty síly bylo dosaženo u vzorku 3T a naopak nejnižší hodnoty dosáhl vzorek 5T, u kterého došlo k prokluzu vzorku v čelistech a zároveň zkouška u něj trvala z první pětice nejdelší dobu. Dle mého je to dáno právě delší dobou namáhání, kdy po prokluzu opět narůstala síla a v posledních momentech se křivka výrazně zploštila, což může naznačovat opět prokluz nebo praskání jednotlivých vrstev. Vzorek 3T, který dosáhl nejvyšší hodnoty, měl naopak dokonale lineární nárůst zatěžovací síly. V horní části, blízko maximální hodnoty síly se křivka výrazně zvlňila. To dle mého pravděpodobně bylo způsobeno opět prokluzem, kdy se vzorek skokově posouval v čelistech trhacího stroje, případně pak je možné, že vlivem konstrukce uhlíkových kompozitních materiálů, které jsou nejčastěji složeny z jednotlivých vrstev výztuže, praskají jednotlivé vrstvy a až poté dojde ke konečnému přetržení. Tento jev lze sledovat u vzorku 1T, který měl téměř shodný průběh nárůstu síly. Podobný jev, ne však stejný, se vyskytl i u vzorků 8T a 9T. U vzorku 8T je zvlnění poměrně méně výrazné a trvá delší dobu. U vzorku 9T pak je zvlnění pouze v konečné části, shodně se vzorky 1T a 3T, ovšem po prvním poklesu téměř nedošlo k opětovnému nárůstu síly.

Bohužel výsledky velmi zkresluje ono několikrát zmíněné prokluzování vzorků, nicméně vlivem velice tvrdého povrchu, podomácku vyrobených čelistí a nestejného utahovacího momentu, bylo velice složité prokluzování zabránit.

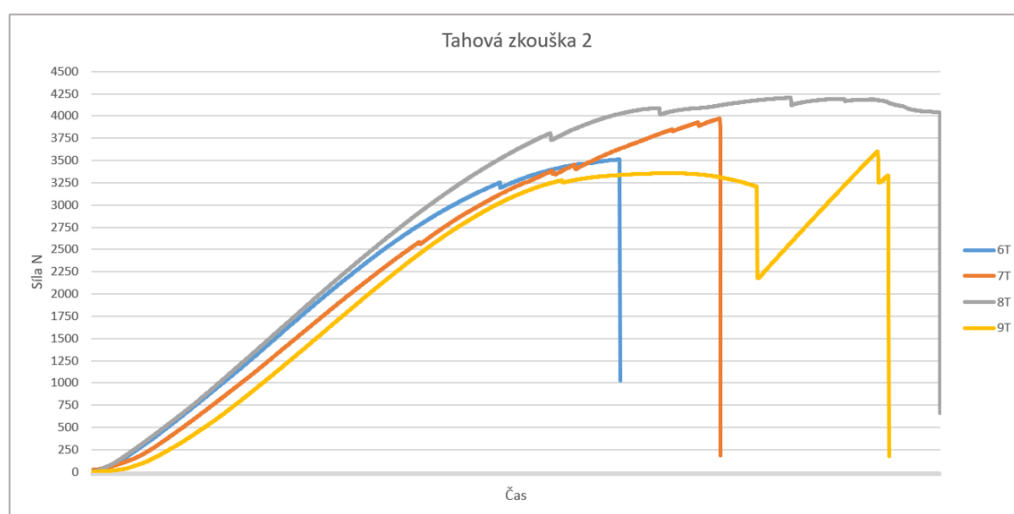
U všech vzorků si lze všimnout, že se vzorky pokaždé přetrhly přibližně na stejném místě a to těsně za přechodem na zúženou část. To může být způsobeno tím, že se na daném místě nacházel přechod mezi jednotlivými rohožemi výztuže. Jediné vzorky, které se liší, je vzorek 7T, který se přetrhl nadvakrát, avšak opět na kraji. Vzorek 3T je druhým který se liší, a to hlavně v tom, že navíc praskl zhruba v polovině, což mohlo být podle mého názoru zapříčiněno nesouosostí upínacích čelistí, jelikož je nebylo jak zajistit vůči otočení.



Obrázek 4.1: Přetrhané vzorky tahem



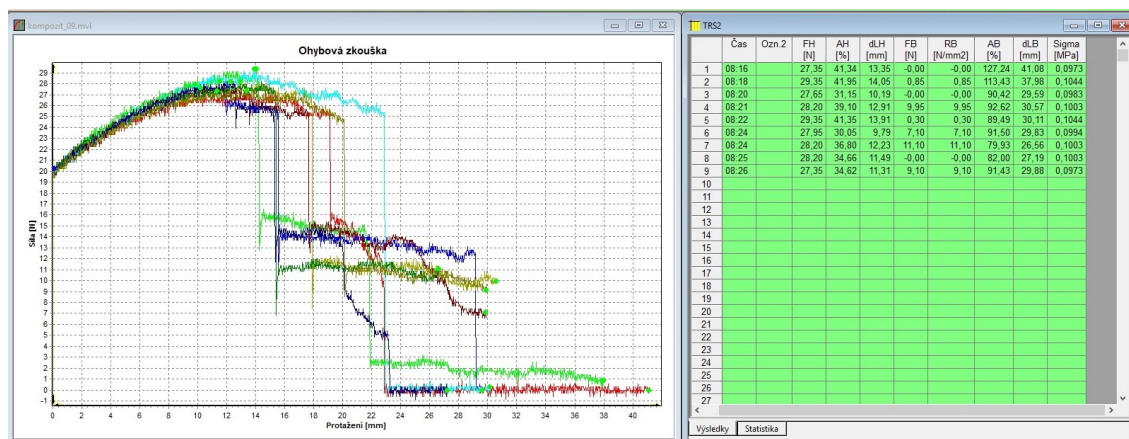
Obrázek 4.2: Graf výsledků vzorků 1 - 5



Obrázek 4.3: Graf výsledků vzorků 6 - 9

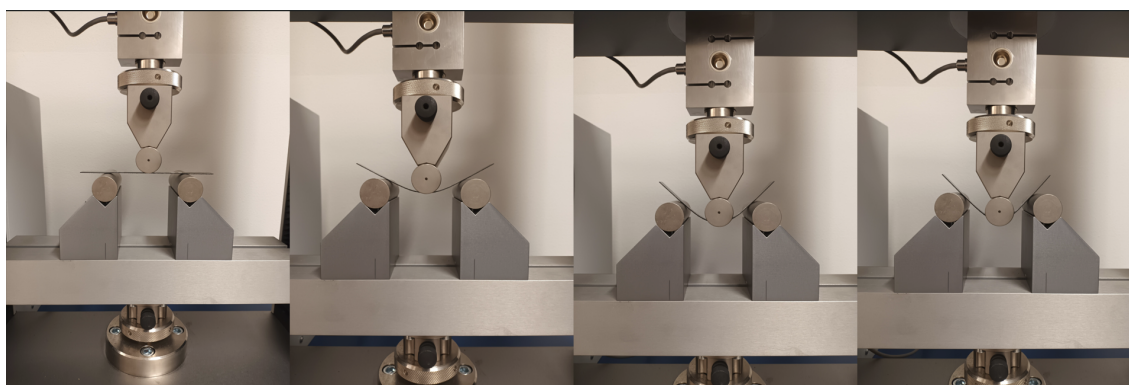
4.2 Výsledky ohybové zkoušky

Bohužel z technických důvodů nebylo možné vyexportovat data tak, aby z nich bylo možno vytvořit graf nebo získat podrobné výsledky, tudíž vyhodnocovat výsledky je možné pouze z hodnot uvedených v zelené tabulce na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Výsledky ohybové zkoušky v programu TIRAtest

Jak si lze všimnout, maximální síla, kterou vzorky zvládly udržet, zde označená FH, je velice konstantní, což ostatně dokazují i překrývající se křivky grafu. Odchytky mezi jednotlivými vzorky jsou minimální. Dále je zřejmé, že materiál zkušebních vzorků je relativně pružný. To dokazují hodnoty průhybu dLH v bodě maximálního zatížení. Za tímto bodem už dochází k nevratným deformacím a poškození struktury vzorku, zejména tedy oddělování jednotlivých vrstev od sebe a jejich praskání, čímž je pozdější pevnost vzorku výrazně oslabena.



Obrázek 4.5: Průběh ohýbání od začátku do lomu



Obrázek 4.6: Přelámané vzorky ohybem

4.3 Porovnání

Pro potřeby porovnání pevností v tahu a ohybu je nutné udělat ze všech hodnot aritmetický průměr. To nám umožní hodnotit obě pevnosti jako celek pro daný materiál a nejen pro jednotlivé vzorky.

Tabulka 4.1: Výsledky zkoušek

Vzorek - tah č.	Pevnost [N]	Vzorek - ohyb č.	Pevnost [N]
1T	3 741,530	1O	29,35
2T	4 063,916	2O	27,65
3T	4 210,250	3O	28,20
4T	3 616,643	4O	29,35
5T	3 348,295	5O	27,95
6T	3 510,825	6O	28,20
7T	3 973,691	7O	28,20
8T	4 205,600	8O	27,35
9T	3 601,424	9O	27,35
Průměr	3 808,019	Průměr	28,18

Na základě dat z tabulky je jasně vidět, že kompozit z uhlíkových vláken má přibližně 130krát vyšší pevnost v tahu, než v ohybu. V tahu je 10 mm široký a 1,2 mm silný vzorek schopen udržet v průměru 3 808 N, což odpovídá 380 kilogramům zátěže. Naopak v ohybu dokáže udržet pouze 28 N, což odpovídá zatížení pouhými 2,8 kilogramy. Zeleně jsou v tabulce zvýrazněny maximální hodnoty a červeně pak ty minimální.

Tak vysoká pevnost v tahu je dle mého názoru způsobená tím, že zatížení tahem působí v ose vzorku, zatímco při ohybu působí zátěž kolmo na vzorek. Při ohybu tudíž

dochází k nerovnoměrnému rozložení zatížení, kdy největší zátěž nese nejspodnější vrstva výztuže, která se nejvíce napíná a její vlákna se trhají jako první a takto je to s každou další vrstvou. Pevnost díky tomu postupně s každou další porušenou vrstvou klesá. Materiál se tak nechová jako homogenní, jako je tomu u zatížení v tahu, kde zátěž nesou všechny vrstvy výztuže společně. Díky tomu v tahu snese uhlíkový kompozit, s výztuží v podobě dvouose uspořádaných (twill) vláken, mnohem více.

5 Diskuse

V experimentálním pokusu, který byl součástí praktické části, byl zjištěn velký rozdíl mezi pevností v tahu a pevností v ohybu. Konkrétně, co se týče pevnosti v tahu, se jednalo přibližně o 130násobek pevnosti v ohybu. Tento výsledek vypovídá o tom, že vzhledem k vrstevnaté struktuře většiny vláknitých kompozitů, kromě kovaného karbonu uvedeného v kapitole 1.6.3, mají velmi omezenou pevnost v ohybu. Toto omezení pramení zejména ze směru působení zatěžovací síly, tedy kolmo na vzorek, na rozdíl od zatížení v tahu, kde je působení shodné s osou vzorku.

Bohužel, vlivem prokluzování vzorku v čelistech při tahové zkoušce bylo možné měřit pouze maximální pevnost v tahu, nikoliv dobu k přetržení nebo velikost prodloužení, které by jistě byly také důležitými výsledky. Stoprocentně relevantní není ani křivka nárůstu síly, jelikož může být její průběh ovlivněn opět prokluzem vzorku. Upínání vzorku bylo tedy kritickým bodem tohoto experimentu, který se nepodařilo naprosto vyřešit, ovšem prokluz byl použitím akumulátorového rázového utahováku omezen. Maximální rozdíl v pevnosti dvou vzorků byl 862 N, což opět mohlo být dáno prokluzováním a od toho se odvíjející delší dobou namáhání.

Pevnostní zkouška ohybem, na rozdíl od tahové zkoušky, proběhla v pořádku a rozdíly pevností mezi jednotlivými vzorky jsou minimální, což je rozhodně vítané a dokazuje to kvalitu použitého materiálu, který je při namáhání ohybem velice stabilní.

Tyto výsledky bohužel nelze porovnat s jinými pracemi, jelikož se při mém výzkumu se objevily jak technické chyby, jako bylo prokluzování vzorku, tak porovnání brání i nestejný materiál, který se lišil buďto využitou výztuží, či rozměry vzorku.

Závěr

Tato bakalářská práce čtenáři přiblížila kompozitní materiály, jakými způsoby se vyrábí, z čeho se skládají a také jejich historii. Poté se zaměřila na konkrétní využití v dopravní technice, aby demonstrovala široké možnosti využití, které právě kompozitní materiály skýtají, společně s výhodami a nevýhodami v porovnání s běžně používanými materiály na výrobu dané součásti.

V praktické části byl proveden zkušební experiment, kterým bylo zjištěno, že součásti z uhlíkového kompozitu jsou mnohem pevnější při namáhání v tahu a to přibližně 130krát. Z toho vyplývá, že pokud budou součásti vyráběné z běžného uhlíkového kompozitu namáhané na ohyb, jako jsou například ramena náprav, je potřeba danou součást profilovat a stěny dílce zesílit nebo vyztužit jiným materiálem tak, aby byla zvýšena pevnost a při případném náhlém zatížení (například při nárazu) nedošlo k narušení struktury a tím snížení pevnosti, pokud to není žádoucí. Deformace je žádoucí například v deformačních zónách monokoků vozů F1, aby došlo k co největšímu pohlcení energie z nárazu. Mimo deformační zóny se pak monokoky vyztužují jinými materiály, aby nedošlo k ohrožení pilota (viz kapitola 1.6.2).

U součástí namáhaných na tah je díky vysoké pevnosti v tahu možné ušetřit nejvíce hmotnosti za současného zachování požadované pevnosti. Mezi součásti namáhané na tah patří například táhla řízení a podobně. Je však jasné, že u většiny dílců se jedná o kombinaci různých směrů zátěží najednou, tudíž při navrhování dílů je nutné určit zóny, kde je díl namáhan na ohyb a tam ho zesílit, naopak kde je dílec namáhan na tah, je možné ponechat stěnu tenčí a tím ušetřit na hmotnosti. Případně zvážit zvolení použití kovaného karbonu, který je velice pevný i v ohybu (viz kapitola 1.6.3).

Seznam použitých zdrojů

- Balasubramanian, M. (2014). *Composite Materials and Processing*. CRC Press. ISBN:978-1-4398-7935-1.
- Bovingdon, J. (2023). Praga Bohema 2023 review – 713bhp/ton hypercar put to the test. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.evo.co.uk/praga/bohema>.
- Brembo (2023). Karbon-Keramické Kotouče. [online], Brembo S.p.A. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.brembo.com/cz/auto/prvovyroba/produkty/karbon-keramicke-kotouce>.
- Běhal, R. (2023). Znáte výhody a nevýhody Karbon-KERAMICKÝCH BRZD? dražší totiž Vždycky Nemusí znamenat lepší. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.autoweb.cz/vyhody-a-nevyhody-karbon-keramickych-brzd-aneb-drazsi-neznamena-vzdy-lepsi/>.
- CarbonRevolution (2023). Carbon Fiber Wheel Benefits. [online]. [cit. 2023-08-30], Dostupné z: <https://www.carbonrev.com/wheels/benefits/>.
- CarPixel (2023). 2000 Mercedes-Benz CL 55 AMG F1 Limited edition. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.carpixel.net/cs/wallpapers/11554/2000-mercedes-benz-cl-55-amg-f1-limited-edition.html>.
- Chronicle (2022). What is a monocoque?: F1 news. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://f1chronicle.com/what-is-a-monocoque/>.
- Cídllová, H., Kohoutková, B., Křivánková, P., Štěpánek, K., a Valová, B. (2011). Historie Chemie - Damascénská ocel. [online], Mendelova univerzita. [cit. 2023-06-29], Dostupné z: <https://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hist/chemlat/damascenskaocel.html>.
- Dařourek, K. (2010). Kompozitní materiály. [online], Katedra materiálu Strojní fakulta Technická univerzita v Liberci.
- damano.cz (2020). Co Je to damašková ocel a jak poznat pravou?: Přečtěte Si Více na Damano.cz. [online]. [cit. 2023-06-29], Dostupné z: <https://www.damano.cz/magazin/co-je-to-damaskova-ocel-a-jak-poznat-pravou/>.
- Delgado, J. (2019). The history of carbon fiber wheels. [online], VeloSpinner. [cit. 2023-08-30], Dostupné z: <https://www.velospinner.com/blogs/news/the-history-of-carbon-fiber-wheels>.

- FIA (2016). Halo breaks cover in Barcelona. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.fia.com/news/halo-breaks-cover-barcelona>, journal=Federation Internationale de l'Automobile.
- Fiberglass, M. (2021). Employment and training. [online]. [cit. 2023-08-28], Dostupné z: <https://www.milesfiberglass.com/employment-and-training/>.
- Garáž.cz (2023). Monokok. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.garaz.cz/tag/monokok-66500>.
- Gonzalez, M. (2020). All-new Hennessey venom F5 Carbon Fiber Chassis. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.venomgt.com/all-new-hennessey-venom-f5-carbon-fiber-chassis/>.
- HavelComposites (2023). Technologie výroby kompozitů. [online], Havel Composites. [cit. 2023-07-10], Dostupné z: <https://www.havelcomposites.com/uploads/files/Technologie>
- KarbonMAX (2023). Co je to karbon? [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.karbonmax.cz/cz/co-je-to-karbon.html>, journal=Kvalitní karbonové díly.
- Lažanský, M. (2016). 6 typů automobilových Kol: Která Jsou nejlepší a jak se vyrábějí? - 2. Kapitola. [online], AutoRevue.cz. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/6-typu-automobilovych-kol-ktera-jsou-nejlepsi-a-jak-se-vyrabeji/ch-60029>.
- Le Poidevin, O. (2022). F1 British Grand Prix: What is halo and how does it save lives? [online], BBC. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/newsbeat-62037334>.
- Luthada, P. (2022). What are the fundamental steps of composites manufacturing? [online], Addcomposites. [cit. 2023-08-28], Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/fundamentals-of-composites-manufacturing>.
- Markus, F. (2023). The Koenigsegg Gemera's dark matter motor makes 800 hp, weighs 86 pounds. [online], MotorTrend. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/koenigsegg-gemera-dark-matter-motor-v8-hybrid-supercar/>.
- Matai, S. (2018). Ford GT Carbon Series is a lightweight version of Ford's Supercar. [online]. [cit. 2023-08-30], Dostupné z: <https://doubleapex.co.za/ford-gt-carbon-series/>.
- MaterialDistrict (2005). *Polymer concrete glass*. MaterialDistrict. [cit. 2023-08-28], Dostupné z: <https://materialdistrict.com/material/polymer-concrete-glass/>.
- MechanicalEngineering (2023). [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <http://newengineeringpractice.blogspot.com/2011/08/manufacturing-of-brake-disc.html>.
- MVForged (2024). DYMAG collection - MV forged: Bespoke wheels. [cit. 2024-03-09], Dostupné z: <https://mvforged.com/dymag-collection/>.

- Nagavally, R. R. (2016). Composite Materials - History, Types, Fabrication, and Applications; Techniques, Advantages, and Applications. [online], Kakatiya Institute of Technology and Science. [cit. 2023-06-29], Dostupné z: https://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/2-405-151143701282-87.pdf.
- nasenoze.cz (2023). Historie Damascenské oceli - www.nasenoze.cz. [online]. [cit. 2023-06-29], Dostupné z: <https://www.nasenoze.cz/historie-damaskove-oceli/>.
- Optimum (2023). Home. [online]. [cit. 2023-08-28], Dostupné z: <https://optimumct.com/composite-tubes/>.
- Piola, G. (2021). The mclaren that changed formula 1 history. [online], Motorsport.com. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/the-car-that-changed-formula-1-history/4779400/>.
- Popov, M. (2017). Autokláv. [online]. [cit. 2023-08-28], Dostupné z: <http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>.
- PragaExport (2022). Praga Bohema – the ultimate track focused hypercar. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://pragaglobal.com/cars/praga-bohema/>.
- Profitek.cz (2024). Stepcraft. [online]. [cit. 2024-03-08], Dostupné z: <http://www.profittek.cz/stepcraft/>.
- Ptáček, L. (2002). *Nauka o materiálu II*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. ISBN: 80-7204-130-4.
- Pulman, B. (2010). Lamborghini Sesto Elemento (2010): The all-carbonfibre concept car. [online], Bauer Media. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/first-official-pictures/lamborghini/lamborghini-sesto-elemento-2010-the-all-carbonfibre-concept-car/>.
- RDMarble (2020). Benefits of solid surface countertops for your home: R & D marble. [online]. [cit. 2023-08-28], Dostupné z: <https://www.rdmarble.com/blog/bathroom-countertops/benefits-of-solid-surface-countertops-for-your-home/>.
- Sedláček, R., Ščerba, M., a Padovec, Z. (2022). Technologie výroby kompozitů. [online]. [cit. 2023-07-10], Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/category/technologie/>.
- Sher, D. (2018). Thermwood validates direct additive manufacturing of yacht hull molds. [online]. [cit. 2023-08-28], Dostupné z: <https://www.voxelmatters.com/thermwood-validates-direct-additive-manufacturing-of-yacht-hull-molds/>.
- Sherman, D. (2010). Carbon ceramic brake rotors - automobile magazine. [online], MotorTrend. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.motortrend.com/news/carbon-ceramic-brembo-brake-rotors/>.
- Silvestru, V.-A., Deng, Z., Michels, J., Li, L., Ghafoori, E., a Taras, A. (2022). (PDF) application of an iron-based shape memory alloy for ... [cit. 2024-03-08], Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/361942128_Application_of_an_iron-based_shape_memory_alloy_for_post-tensioning_glass_elements.

Stenquist, P. (2015). Carbon diet for brakes: Short stops at high cost. [online]. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.record-eagle.com/news/>.

Stoy, A. (2017). Lamborghini Huracan Performante: Five things to know. [online], Autoweek. [cit. 2023-08-29], Dostupné z: <https://www.autoweek.com/news/sports-cars/a1822871/lamborghini-huracan-performante-five-things-know/>.

Team, W. (2022). The benefits of carbon fiber wheels for electric vehicles. [cit. 2024-03-09], Dostupné z: <https://www.electrichybridvehicletechnology.com/opinion/the-benefits-of-carbon-fiber-wheels-for-electric-vehicles.html>.

TheBrakeReport (2020). 2000 Mercedes-Benz was the first road car with ceramic brakes. [online]. [cit. 2023-08-30], Dostupné z: <https://thebrakereport.com/2000-mercedes-benz-was-the-first-road-car-with-ceramic-brakes/>.

Seznam obrázků

1.1	Jednosměrné uspořádání	11
1.2	Dvousá orientace	11
1.3	Rohož	11
1.4	Víceosá výztuž z kontinuálních vláken	11
1.5	Krátká vlákna jednosměrně orientovaná	11
1.6	Krátká vlákna s náhodnou orientací	11
1.7	Damascénská ocel (damano.cz, 2020)	12
1.8	Lamborghini Sesto Elemento (Pulman, 2010)	13
1.9	Dvoudílná forma na výrobu trupu lodi (Sher, 2018)	15
1.10	Schéma ručního kladení (Sedláček et al., 2022)	16
1.11	Ruční kladení v praxi (Luthada, 2022)	17
1.12	Schéma stříkání (Sedláček et al., 2022)	18
1.13	Stříkání v praxi (Fiberglass, 2021)	18
1.14	Schéma pultruze (Sedláček et al., 2022)	19
1.15	Schéma navíjení (Sedláček et al., 2022)	19
1.16	Trubka z navinutých uhlíkových vláken (Optimum, 2023)	20
1.17	Schéma odstředivého lití (Sedláček et al., 2022)	20
1.18	Umělý mramor (Sedláček et al., 2022)	21
1.19	Polymerbeton se skleněnou drtí (MaterialDistrict, 2005)	22
1.20	Solid surface (RDMarble, 2020)	22
1.21	Schématické zobrazení lisování za pomoci vakua (Sedláček et al., 2022)	23
1.22	Autokláv (Popov, 2017)	24
1.23	Schéma vysokotlakého vstříkávání (RTM) (Sedláček et al., 2022)	25
1.24	Brembo CCM (Stenquist, 2015)	27
1.25	Mercedes-Benz CL55 AMG F1 Edition (CarPixel, 2023)	28
1.26	Forma s vloženými jádry (MechanicalEngineering, 2023)	29
1.27	Leštění kotouče (MechanicalEngineering, 2023)	30
1.28	Kontrola kotouče snímkovacím zařízením (MechanicalEngineering, 2023)	30
1.29	Praga Bohema (Bovingdon, 2023)	31
1.30	Monokok Hennessey Venom F5 (Gonzalez, 2020)	31
1.31	Ochrana hlavy, tzv. Halo (FIA, 2016)	32
1.32	Monokok monopostu McLaren MP4/1 (Piola, 2021)	33
1.33	Kovaný karbon v interiéru Lamborghini Huracán Performante (Stoy, 2017)	34
1.34	Elektromotor Dark Matter (Markus, 2023)	34
1.35	Detail na ráfek z hořčkové slitiny na voze Porsche Carrera GT (Delgado, 2019)	35
1.36	Ráfek z uhlíkových vláken na vozu Ford GT (Matai, 2018)	36
1.37	Hybridní ráfek MVForged MR-525 (MVForged, 2024)	37

3.1	Frézovací stroj STEPCRAFT Q.404 (Profitek.cz, 2024)	39
3.2	Nákres vzorku (Silvestru et al., 2022)	40
3.3	Rozložení vzorků s naplánovanými drahami	40
3.4	Kaz na desce	41
3.5	Frézování	41
3.6	Sady vzorků	42
3.7	Nastavení limitů	43
3.8	Nastavení rozměrů vzorku	43
3.9	Testovací vzorek v přístroji	44
3.10	Testovací vzorek na tah v přístroji	45
4.1	Přetrhané vzorky tahem	47
4.2	Graf výsledků vzorků 1 - 5	47
4.3	Graf výsledků vzorků 6 - 9	47
4.4	Výsledky ohybové zkoušky v programu TIRAtest	48
4.5	Průběh ohýbání od začátku do lomu	48
4.6	Přelámané vzorky ohybem	49

Seznam tabulek

4.1	Výsledky zkoušek	49
-----	----------------------------	----