

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE**

2016

**ALEN
ŠAČIROVIČ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šačírovič** Jméno: **Alen** Osobní číslo: **434253**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav:
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce a výroba součástí z plastů a kompozitů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv cyklických změn teploty na vlastnosti kompozitu

Název diplomové práce anglicky:

Influence of cyclic temperature changes on properties of composite materials

Pokyny pro vypracování:

- 1) Úvod - princip kompozitů
- 2) Experimentální studium vlivu teploty na mechanické vlastnosti vzorků kompozitu
- 3) Zhodnocení experimentálních dat
- 4) Závěr

Seznam doporučené literatury:

MACHEK, V.; SODOMKA, J. Polymery a kompozity s polymerní maticí. Praha 6: Nakladatelství ČVUT, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
Časopisecká literatura - vyhledání je součástí práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

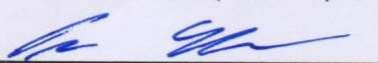
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.07.2019**


Platnost zadání diplomové práce: _____



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24/4
Datum převzetí zadání

[Signature]
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19.07.2019

.....
podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své práce prof. RNDr. Petrovi Špatenkovi, CSc. za vedení a strávený čas. Dále bych chtěl velmi poděkovat Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za trpělivost, rady, konzultace, opravy a pomoc při měření na přístrojích. V neposlední řadě také kolegům z dílny za umožnění výroby vzorečků a také tolerantním kolegům z hotelu.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem cyklických změn teploty na vlastnosti kompozitu. V první části byl popsán materiál použitý k výrobě vzorků (prepreg), který se používá v praxi pro panely karosérií závodních rallye i DTM vozidel včetně krytů motorových prostorů, a následná výroba vzorků. Druhá část se zabývala určením teplot v motorovém prostoru vozidel se spalovacím motorem. Teploty byly naměřeny na samotném motoru i v jeho okolí, a to u vozidel se vznětovým i zážehovým typem motoru, s přeplňováním i bez přeplňování. Z těchto naměřených hodnot jsem určil teplotní intervaly pro následné testování vzorků a poté jednotlivé vzorky podrobil tepelnému zatěžování. Ve třetí části byly zkoumány změny vlastností vzorků po tepelném zatěžování. Konkrétně se jednalo o modul pružnosti v ohybu, mez pevnosti v ohybu, tvrdost, plošná drsnost a vzhled.

Klíčová slova:

Kompozitní materiál, cyklické změny teploty, vlastnosti kompozitu, automobilový průmysl, karosérie, motorsport

Abstract

The diploma thesis deals with the influence of cyclic temperature changes on properties of composite materials. The first part describes the material used for the production of samples (prepreg), which is used in practice for body panels of racing rally and DTM vehicles, including engine compartment covers, and the production of samples. The second part deals with the determination of temperatures in the engine compartment of vehicles with internal combustion engines. Temperatures were measured on the engine itself and in its surroundings, both for diesel and petrol engines, with or without supercharging. From these measured values I determined temperature intervals for testing of samples and then subjected individual samples to thermal loading. In the third part, changes in the properties of samples after thermal loading were investigated. Specifically, it was the flexural modulus, flexural strength, hardness, surface roughness and appearance.

Key words:

Composite materials, cyclic temperature changes, properties of composite materials, car industry, chassis, motorsport

1 Obsah

| | | |
|-----------|---|----|
| 3 | Úvod | 8 |
| 3.1 | Motivace..... | 8 |
| 4 | Teoretická část..... | 9 |
| 4.1 | Kompozitní materiály [03] [05] [34]..... | 9 |
| 4.1.1 | Rozdělení kompozitních materiálů | 10 |
| 4.1.1.1 | Podle typu matrice [03] [34] | 10 |
| 4.1.1.1.1 | Kovová matrice [02] [04] | 10 |
| 4.1.1.1.2 | Polymerní matrice [03] [34] | 10 |
| 4.1.1.1.3 | Keramická matrice [04] | 11 |
| 4.1.1.2 | Podle typu výztuže [03] | 11 |
| 4.1.1.2.1 | Částicová výztuž [06] | 12 |
| 4.1.1.2.2 | Kompozity s vlákny [03] [04] | 12 |
| 4.1.1.2.3 | Sendvičové kompozity [07]..... | 13 |
| 4.1.2 | Prepreg [08] | 14 |
| 4.1.2.1 | Nejpoužívanější výroba prepregu [08]..... | 15 |
| 4.2 | Kompozitní materiály využívané v automobilech | 16 |
| 4.2.1 | Historie [09] [15] | 17 |
| 5 | Experimentální část | 22 |
| 5.1 | Materiál [10] [11] [12] [13]..... | 22 |
| 5.1.1 | Složení materiálu | 23 |
| 5.1.1.1 | Pohledová vrstva – první vrstva..... | 23 |
| 5.1.1.2 | Druhá, pátá a poslední vrstva | 24 |
| 5.1.1.3 | Třetí a čtvrtá vrstva | 24 |
| 5.2 | Postup výroby vzorečků | 25 |
| 5.2.1 | Příprava formy | 26 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 5.2.2 | Pokládání | 26 |
| 5.2.3 | Vytvrzení | 27 |
| 5.2.4 | Následující zpracování..... | 28 |
| 5.3 | Výroba vzorků..... | 29 |
| 5.3.1 | Řezání vzorků | 29 |
| 5.3.2 | Rozměry..... | 30 |
| 5.4 | Průměrné rozměry | 30 |
| 5.4.1 | Teplotní zatěžování..... | 31 |
| 5.4.1.1 | Zvolení teplot | 32 |
| 5.4.1.1.1 | Vznětový motor s přeplňováním | 32 |
| 5.4.1.1.2 | Vznětový motor bez přeplňování..... | 33 |
| 5.4.1.1.3 | Zážehový motor s přeplňováním | 34 |
| 5.4.1.1.4 | Zážehový motor bez přeplňování | 35 |
| 5.4.1.2 | Zvolení intervalů teplot | 36 |
| 5.4.1.3 | Nalezení teplotních intervalů na motocyklu | 36 |
| 5.4.2 | Přípevnění vzorků na motocykl | 36 |
| 5.4.3 | Naměřené teploty..... | 38 |
| 5.5 | Stanovení vlastností | 39 |
| 5.5.1 | Princip ohybové zkoušky [01] | 39 |
| 5.5.2 | Stanovení ohybových vlastností [01]..... | 42 |
| 5.5.3 | Měření modulu pružnosti v ohybu..... | 44 |
| 5.5.4 | Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu..... | 45 |
| 5.5.5 | Měření napětí v ohybu | 46 |
| 5.5.6 | Vyhodnocení napětí v ohybu | 47 |
| 5.6 | Tvrдость [01]..... | 48 |
| 5.7 | Vyhodnocení tvrdosti | 50 |
| 5.8 | Vzhled [14]..... | 51 |

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 5.8.1 | Vyhodnocení vizuální kontroly | 52 |
| 6 | Závěr..... | 54 |
| 7 | Použité literární zdroje | 55 |
| 7.1 | Použité zdroje k obrázkům..... | 56 |
| 8 | Seznam obrázků a tabulek..... | 59 |
| 8.1 | Seznam obrázků | 59 |
| 8.2 | Seznam tabulek | 60 |

2 Úvod

Kompozitní materiály si našly uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu včetně automobilového průmyslu, kde se vyskytují stále častěji. Vyskytují se hojněji nejen díky příznivým mechanickým vlastnostem jako je pevnost či korozivzdornost, ale hlavně díky ekologii. Nejedná se o recyklovatelnost, která je často v porovnání s ocelí náročnější, ale jde zejména o spotřebu paliva automobilu, s čímž souvisí i emise. Díky použití kompozitních materiálů lze snížit celkovou hmotnost vozu, která má zásadní vliv na spotřebu.

Sklobením všech těchto vlastností dostáváme materiál, který by mohl dlouhodobě nahradit stávající tradiční materiály a to nejen v automobilovém průmyslu.

2.1 Motivace

Tato diplomová práce se bude zabývat ovlivněním mechanických vlastností panelů karosérií z kompozitních materiálů při opakovaném teplotním zatěžování. Spalovací agregát automobilů může dosahovat vysokých teplot (v extrémních situacích až 250 °C), proto je důležité, aby kryt motoru dlouhodobě odolával výkyvům teplot. Teploty se pohybují od -30 °C (teplota okolí) až po cca 120 °C (teplota pod kapotou), životnost vozu je 10 let (300 000 km) a to znamená, že kapota z kompozitu projde mnoha cykly za životnost automobilu, kdy se ohřeje z teploty okolí na provozní teplotu. V mé práci se snažím nasimulovat teplotní cyklus zatížení kompozitového dílu a zjistit případnou změnu mechanických vlastností.

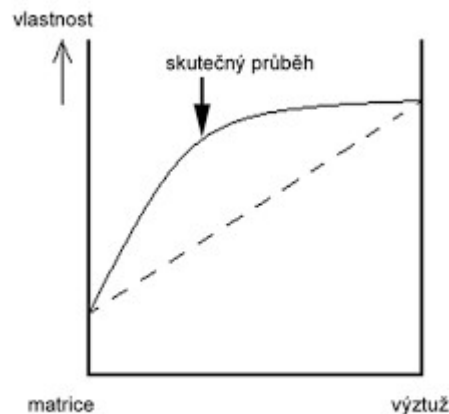


Obrázek 1 - Příklad uhlíkového panelu karosérie [16]

3 Teoretická část

3.1 Kompozitní materiály [03] [05] [34]

Kompozitním materiálem nazýváme systém, který se skládá ze dvou nebo více fází. Obvykle se kompozitní materiály skládají z nespojitě části – výztuže a spojité části – matrice. Matrice a výztuž se vyznačují svými odlišnými fyzikálními, chemickými a mechanickými vlastnostmi. Je snaha, aby se vlastnosti správně vytvořeného kompozitu navzájem doplňovaly a byly vyšší než jejich součet – tzv. synergický efekt.



Obrázek 2 - Synergický efekt [03]

Matrice je spojitá, vyznačuje se většinou vysokou houževnatostí, korozní odolností a je zodpovědná za výsledný tvar kompozitu. Výztuž je nespojitá a zpravidla má mnohem vyšší tvrdost, pevnost, modul pružnosti a přenáší síly. Aby bylo dosaženo požadovaných vlastností výsledného kompozitu je potřeba zajistit dostatečné spojení matrice a výztuže v mezifázi.

3.1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

3.1.1.1 Podle typu matrice [03] [34]

Hlavní funkce matrice je spojení s výztuží a vyplnění prostoru. Po jejím ztvrdnutí vzniká tvarově stálý výrobek. Zprostředkovává také přenos sil a chrání výztuž před okolními vlivy.

Kompozitní materiály můžeme dělit podle těchto typů matrice.

3.1.1.1.1 Kovová matrice [02] [04]

Kompozitní materiály s kovovou maticí jsou většinou izotropní, protože nejčastěji mají částicovou výztuž. Nejvíce používané kovy jsou titan, hořčík a hliník.

V automobilovém průmyslu se takovéto kompozity objevují v komponentech spalovacího motoru jako jsou písty vyztužené ocelovým vláknem.

3.1.1.1.2 Polymerní matrice [03] [34]

Kompozitní materiál s polymerní maticí se dělí do dvou hlavních skupin.

3.1.1.1.2.1 S termoplastickou maticí [02] [03] [34]

Matrice je tvořena termoplastem, který se vyznačuje tím, že opakovaně při zahřívání taje a dostává se do viskózního stavu. Kompozity s termoplastickou maticí mají dobré mechanické vlastnosti, ale jejich použití je limitováno teplotou.

V automobilovém průmyslu se takovéto kompozity hojně vyskytují. Nejčastěji se jedná o polymery vyztužené krátkými skleněnými vlákny, z kterých se dělají výztuhy palubní desky, kryty světlometů a výztuhy nárazníků.

Novým trendem jsou kompozity vyztužené dlouhými vlákny a termoplastickou maticí.

3.1.1.1.2.2 S reaktoplastickou matricí [03] [34]

Matrice je tvořena reaktoplastem, který se po vytvrzení teplem nedá opětovně roztavit a tvoří pevnou strukturu. Jedná se různé epoxidové pryskyřice.

V automobilovém průmyslu se z kompozitů s reaktoplastickou matricí vyrábějí například kola a panely karosérií.

3.1.1.1.3 Keramická matrice [04]

Keramika sama o sobě je křehká, a proto se vyztužuje uhlíkovými nebo keramickými vlákny a částicemi. Tímto vyztužením se odkloní případné trhliny. Dále se keramická matrice využívá ve vysokoteplotních aplikacích s částicovou výztuží jako je MgO, Si₃N₄ nebo ZrO₂.

V automobilovém průmyslu se z takovýchto kompozitů dělají brzdové destičky, obložení spojkových lamel a sítě v katalyzátorech.

3.1.1.2 Podle typu výztuže [03]

Výztuž nazýváme materiál, který je tužší, tvrdší a má vyšší pevnost než matrice. Materiál můžeme nazývat kompozitem, jestli je zastoupení výztuže větší než 5 % z celkového objemu.



Obrázek 3 - Rozdělení kompozitních materiálů podle výztuže [03]

3.1.1.2.1 Částicová výztuž [06]

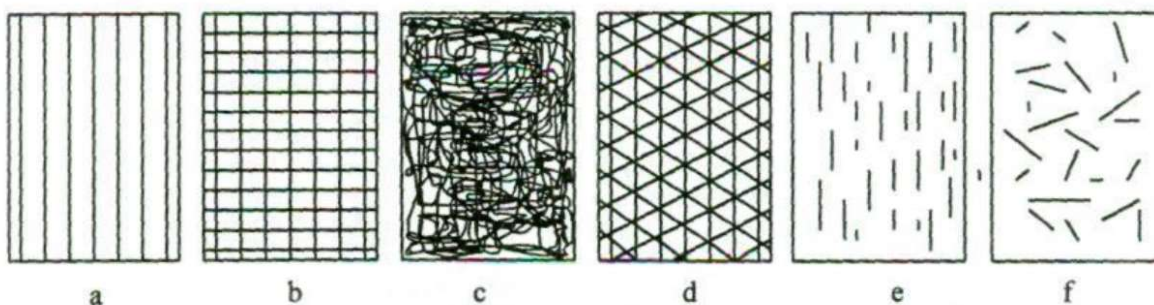
Částicovou výztuží nazýváme tu, která je tvořena částčkami menšími než 1 μm . Objemový podíl částicových kompozitů je menší než u dlouhvláknových, proto výsledné vlastnosti více určuje matrice a také tvar částic. Částic se využívá ke změně mechanických vlastností jako zvýšení/snížení tvrdosti, ořeruvzdornost, odolnosti vůči teplotám a také i jako výplň. Materiály mají často kovovou matrici.

3.1.1.2.2 Kompozity s vlákny [03] [04]

Často se jedná o anizotropické materiály, které mají jiné vlastnosti v různých směrech. Proto ovlivňujícím faktorem z hlediska konstrukce je i orientace vláken. To má své výhody i nevýhody. Nevýhodou je náročná konstrukce, ale výhodou jsou požadované vlastnosti jen tam, kde je potřebujeme.

Orientace vláken může být různá. Rozlišujeme několik typů orientace vláken:

- a) Jednosměrnou orientaci
- b) Dvousměrnou orientaci
- c) Náhodnou orientaci
- d) Vícesměrnou orientaci
- e) Orientovaná krátká vlákna
- f) Náhodně orientovaná krátká vlákna



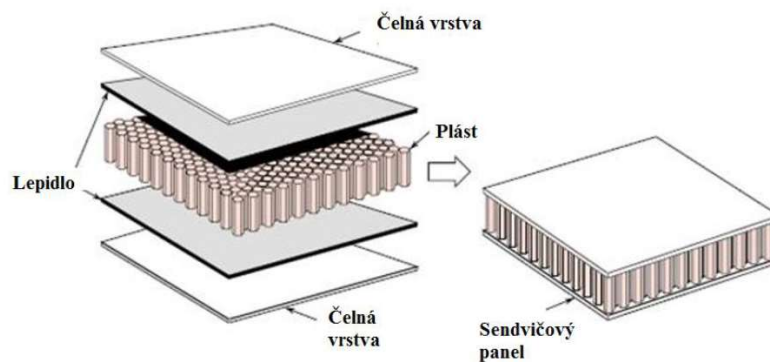
Obrázek 4 - Možnosti uspořádání vláken [03]

Vlákna bývají nejčastěji uhlíková, skleněná, aramidová, ale také z přírodních materiálů, jako jsou kokosová, konopná a jiná vlákna.

3.1.1.2.3 Sendvičové kompozity [07]

Jedná se o materiál, který je tvořený z vnějších pláštů a výplně. Vnější pláště odolávají ohybovému namáhání, zaručují pevnost a ochranu vnitřní výplně. Výplň je materiál o nižší hustotě, který je zodpovědný za chování materiálu při působení smykových sil. Pláště jsou nejčastěji z hliníkových plechů a kompozitních materiálů vyztužených vlákny. Výplň tvoří pěny a voštinové struktury (například napěněný hliník nebo PU). Vrstvy jsou k sobě lepené.

Sendviče se v praxi využívají tam, kde je třeba pevnosti a nízké hmotnosti jako jsou dopravní prostředky.

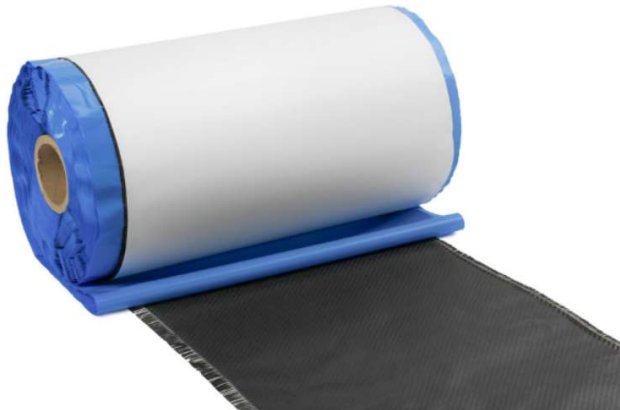


3.1.2 Prepreg [08]

Zkratka prepreg pochází z anglického názvu preimpregnated fibres, to v doslovném překladu znamená prosycená vlákna. Vlákna nejsou jednotlivá, ale ve formě tkaniny nebo rohože. Jedná se o polotovar pro výrobu kompozitů s vláknovou výztuží a reaktoplastickou pryskyřicí. Tkanina z výztuže je prosycená matricí, zabalena mezi dvě vrstvy fólie a navinuta na roli. Důležité je skladování rolí podle předpisů výrobce, protože prepregy mají omezenou životnost a obvykle ji prodlužuje skladování v chladu, čímž se oddálí ztuhnutí.

Vlákna výztuže mohou být z různých materiálů a smí se i kombinovat v jedné vrstvě prepregu. Nejčastěji se používají uhlíková, skleněná a aramidová vlákna. Jako matrice se nejčastěji používají epoxidové, polyesterové a esterové pryskyřice.

Výrobky za použití prepregů kombinují nízkou hmotnost a výborné mechanické vlastnosti. Předností těchto polotovarů je snadná výroba a dimenzování dílu přesně podle potřeb. V různých místech produktu můžeme použít různé počty vrstev prepregu a kombinovat různé vrstvy.

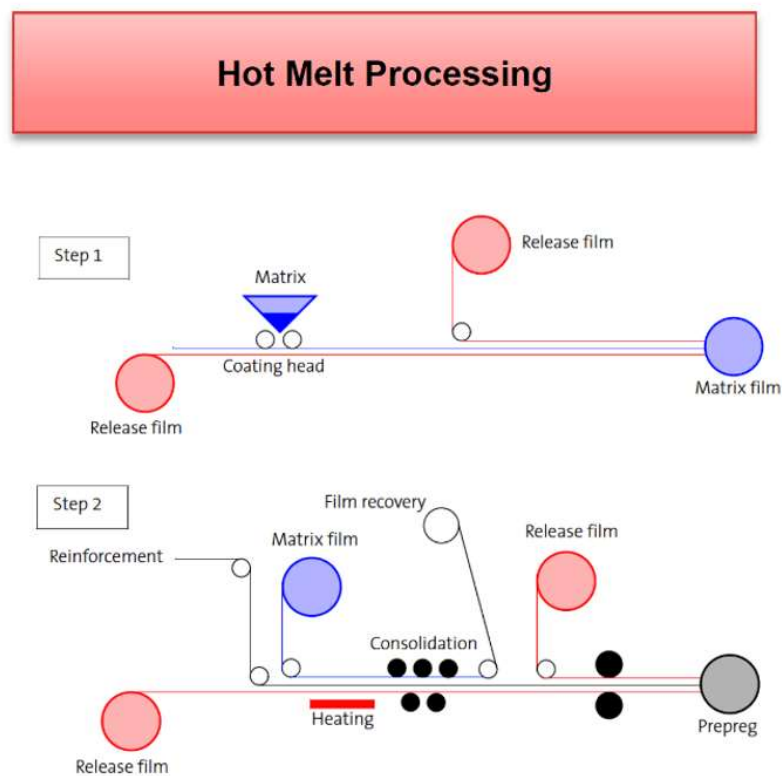


Obrázek 6 - Ukázka role [18]

3.1.2.1 Nejpoužívanější výroba prepregu [08]

HMP – Hot Melt Processing je nejpoužívanější metoda výroby prepregových polotovarů.

Pryskyřice, modifikátory a plniva jsou namíchány a naneseny na tkaninu z výztuže, poté se z obou stran na směs přiloží fólie. Tento „sendvič“ se ohřeje pod teplotu vytvzení a pak je matrice vtlačena do výztuže pomocí systému válců. Tento prepreg je navinut na roli a nechá se uležet.



Obrázek 7 - Schéma výroby metodou HMP [19]

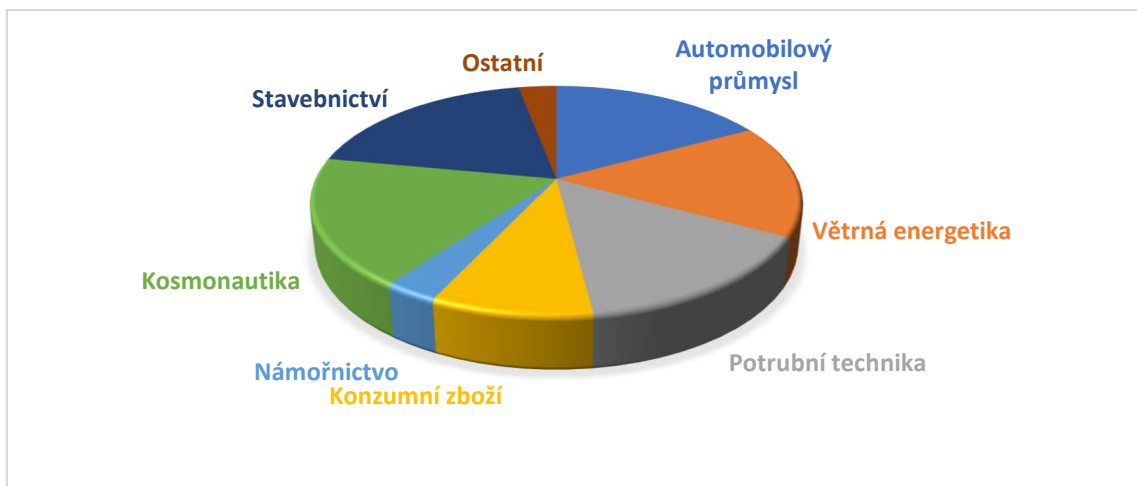


Obrázek 8 - Zařízení k výrobě prepregu [20]

3.2 Kompozitní materiály využívané v automobilech

Automobilový průmysl vytváří značnou část HDP. V roce 2017 se vyrobilo téměř 100 mil. motorových vozidel a v provozu jich je přes 1 miliardu. Kvůli silné konkurenci jsou výrobci nuceni k neustálým inovacím ve všech oblastech. Díky tomu jde pokrok rychle dopředu. Jednou z perspektivních možností vylepšení je aplikace nových materiálů.

Kompozitní materiály byly donedávna výsadou kosmického a letadlového průmyslu, ale díky trendům v automobilovém průmyslu začínají pomalu nahrazovat konvenční materiály jako ocel nebo hliník.



Graf 1 - Zastoupení kompozitních materiálů v různých oblastech průmyslu [35]

Použití kompozitních materiálů (zejména kompozitních materiálů s uhlíkovou výztuží) v automobilovém průmyslu byla donedávna výsada závodních nebo luxusních vozů, které mají oproti levnější produkci technologicky navrch. V dnešní době se kompozitní materiály začínají dostávat i do běžné produkce díky silné konkurenci, modernizaci výroby, nutnosti snížení hmotnosti a s tím spojenou úsporou paliva.

Jedním z hlavních faktorů je právě ekologie, která se dotýká všech výrobců. Díky omezeným zásobám ropy a stále přísnějším emisním normám je nevyhnutelné vylepšovat spotřebu paliva a hmotnost dopravních prostředků je v tomto případě klíčová.

Kompozitní materiály přinášejí celou řadu výhod a vlastností, které konvenčními materiály nelze dosáhnout. Nevýhody jako špatná opravitelnost jsou do jisté míry smazány konzumním způsobem života v dnešní době a zbývá se vypořádat s problémy se sériovou výrobou a obtížnou recyklovatelností.

3.2.1 Historie [09] [15]

Kompozitní materiály jako první v automobilovém průmyslu použil Henry Ford (*když nepočítáme dřevěné vozy*) v jeho experimentálním vozidle nazvaném „SoybeanCar“. Auto si vysloužilo tento název díky pryskyřici, která měla základ v sójovém oleji. Panely karoserie „SójovéhoAuta“ tvořila právě tato pryskyřice a konopná vlákna. Zdroje uvádějí, že tento automobil byl bezpečnější při nárazu než klasický ocelový automobil a také tento materiál líp odolával korozi. Bohužel všechny prototypy tohoto vozu byly před druhou světovou válkou zničeny.



Obrázek 9 - Soybean car [21]

Dalším z milníků expanze kompozitních materiálů v 50. letech byl objev výroby skleněných vláken, která spolu s polyesterovou pryskyřicí dala možnost vzniku dostupného materiálu – dnes známého jako sklolaminát. Prvním automobilem byl Stout Scarab s karoserií tvořenou sklolaminátem. Bohužel zůstalo pouze u prototypu. V roce 1954 se objevily první sériové vozy s panely karosérie ze sklolaminátu – Kaiser Darrin, nebo Singer Hunter. Později u slavného Chevroletu Corvette.



Obrázek 10 - Stout Scarab, první vůz používající sklolaminát [22]



Obrázek 11 - Kaiser Darrin [23]



Obrázek 12 - Singer SM1500 [24]

Ke konci 50. a začátkem 60. let se objevila první auta se samonosnou karoserií (ve formě monokoku) ze sklolaminátu – Rochdale Olympic, Mini Marcos nebo Lotus Elite. V této době zaznamenal sklolaminát velký rozmach, ale díky nedokonalé technologii jej nebylo možné využívat ve velkovýrobě a tak zůstal výhradou luxusních/sportovních vozů.

V druhé polovině 50. let se začal prodávat legendární východoněmecký automobil Trabant (obr. 12), který měl blatníky, střechu, kapotu a kufr z Duroplastu. Duroplastová hmota se skládá ze syntetické pryskyřice a plniva v podobě bavlněného odpadu. Tato hmota se za vysokého tlaku a teploty lisuje v panely karosérie. Výhody užití této umělé hmoty v automobilovém průmyslu nabízí: nízkou cenu, nízkou hmotnost, odolnost vůči korozi, dobré tlumící schopnosti a snadnou možnost oprav.



Obrázek 13- Trabant 601 [25]

Díky dopadu ropné krize v 70. letech byly automobilky nuceny snižovat hmotnost vozidel. Tehdy vznikla technologie SMC (sheet moulding composite). Jedná se o kompozitní materiál složený z rektoplastické matrice a výztuže z nasekaných skleněných vláken, který se za působení tepla a tlaku formuje a lisuje. Touto technologií se dosáhlo až 30 % úspory hmotnosti oproti doposud používaným ocelovým panelům. Díky dobrým mechanickým vlastnostem a odolnosti vůči korozi se touto technologií dělají např. korby pickupů.

Další z milníků byl rok 1979, kdy se poprvé objevilo uhlíkové vlákno v automobilovém průmyslu a to ve Formuli 1. Jednalo se o tým Brabham s vozem BT49, který měl hliníkový rám vyztužený uhlíkovými vlákny a později i brzdy z uhlíkového kompozitu.



Obrázek 14 - BT49 [26]

Na začátku 80. let byl vyvinut první vůz s monokokem z uhlíkových a kevlarových vláken. Jedná se o legendární McLaren MP4-1. Jednalo se o převrat ve Formuli 1. Lehká a pevná konstrukce znamenala začátek nové éry využití uhlíkových kompozitních materiálů u všech závodních automobilů a jejich přechod uhlíkových kompozitů do oblasti luxusních sportovních automobilů jako bylo Ferrari F40 viz. obr. 16.



Obrázek 15 - Uhlíkový monokok MP4-1 [27]



Obrázek 16 - Uhlíkový kompozit v interiéru Ferrari F40 [28]

Další roky znamenaly rozmach kompozitních materiálů z motorsportu mezi produkční vozy. Od přelomu milénia se zejména rozmohl vliv CFRP (Carbon-fibre-reinforced-polymer) a tento trend pokračuje dodnes, kdy můžeme pozorovat tento materiál i na běžně dostupných vozech jako BMW M3, M5 nebo M6.

4 Experimentální část

Tato diplomová práce se bude zabývat ovlivněním mechanických vlastností panelů karosérií z kompozitních materiálů při opakovaném teplotním zatěžování. Spalovací agregát automobilů může dosahovat vysokých teplot (v extrémních situacích až 250°C), proto je důležité, aby kryt motoru dlouhodobě odolával výkyvům teplot. Teploty se pohybují od -30°C (teplota okolí) až po cca 120°C (teplota pod kapotou), životnost vozu je 10 let (300 000 km) a to znamená, že kompozitní kapota projde mnoha cykly za životnost automobilu, kdy se ohřeje z teploty okolí na provozní teplotu.

4.1 Materiál [10] [11] [12] [13]

Díky spolupráci s firmou XRacing, která dodává kompozitní díly pro závodní a sériové vozy všech značek včetně Škoda Motorsport, byl za materiál vybrán polotovar složený z prepregů, z kterého se vyrábí panely karosérií – včetně krytů motorových prostorů.

Tento prepreg je sestaven z běžně dostupných produktů na trhu a skládá se celkem z šesti vrstev. Označení vrstev udávané výrobcem:

1. Vrstva – Carbon MTC510-C285-4X4T-42%RW-1250
2. Vrstva – Carbon HEXPLY-M79/42%/285T2/CHS-12k/1250mm
3. Vrstva – Carbon aramid SIGRAPREG® H W215-TW2/2-E320/45%
4. Vrstva – Carbon aramid SIGRAPREG® H W215-TW2/2-E320/45%
5. Vrstva - Carbon HEXPLY-M79/42%/285T2/CHS-12k/1250mm
6. Vrstva - Carbon HEXPLY-M79/42%/285T2/CHS-12k/1250mm

4.1.1 Složení materiálu

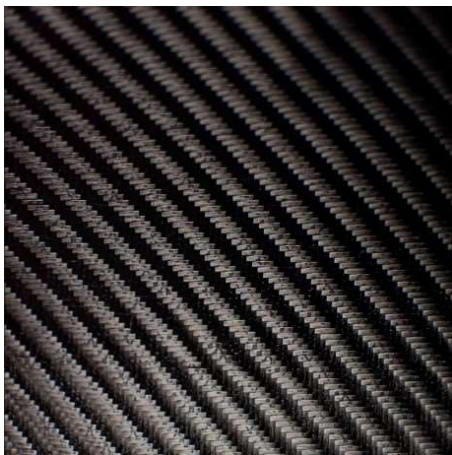
V této kapitole vysvětlím označení materiálu a uvedu, v které vrstvě byl použit.

4.1.1.1 Pohledová vrstva – první vrstva

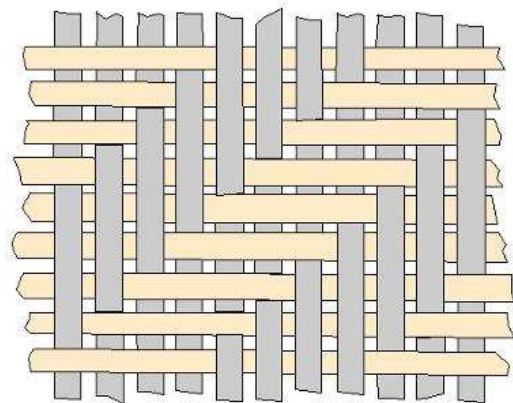
Jedná se o pohledovou vrstvu, která se brousí a leští, případně se může i lakovat, barvit nebo polepit. Požaduje se dobrá odolnost proti poškrábání a odletujícím předmětům a UV stabilita.

Carbon MTC510-C285-4X4T-42%RW-1250

- MTC510 je značení pro epoxidovou pružnou matrici, která se používá pro pohledové díly
 - o vytvrditelná mezi 90 a 120°C
- C285 je značení pro vrstvu uhlíkových vláken s hmotností 285 g/m²
- 4X4Twill je značení pro uspořádání tkaniny (-45°/45°)
- 42%RW je značení pro procentuální zastoupení pryskyřice
- 1250 je značení pro šířku role v mm



Obrázek 18- 4x4Twill pattern ukázka [11]

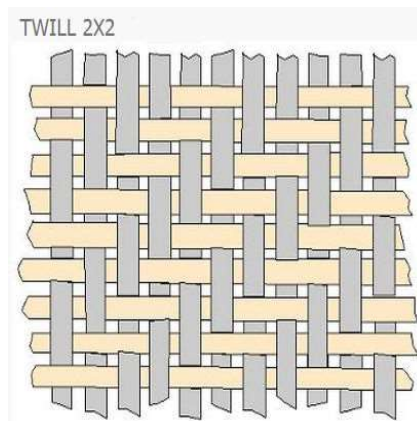


Obrázek 17 - 4x4Twill pattern schéma [11]

4.1.1.2 Druhá, pátá a poslední vrstva

Carbon HEXPLY-M79/42%/285T2/CHS-12k/1250mm

- Hexply-M79 je značení epoxidové matrice určené pro uhlíková, skleněná a aramidová vlákna
 - o Vytvrditelná od 70 do 100 °C, používaná v námořnictví a pro lopatky ventilátorů
- 42% je značení zastoupení matrice v procentech
- 285T2 značí hmotnost výztuže 285g/m² a její upořádání/tkaninu 2X2Twill (0°/90°)
- CHS-12K je značení pro Carbon High Strength 12k
- Proč byla použita tkanina 2x2



Obrázek 19 - 2x2 Twill pattern [11]

4.1.1.3 Třetí a čtvrtá vrstva

Třetí a čtvrtá vrstva jsou stejné, jen na sebe natočené. Kombinují aramidová a uhlíková vlákna.

Carbon+aramid SIGRAPREG® H W215-TW2/2-E320/45%

- Sigrapreg je jméno společnosti
- H je označení, že se jedná o hybridní tkaninu (uhlík a aramin)
- W je značení pro tkaninu
- 215 je hmotnost tkaniny v g/m²
- TW2/2 je značení uspořádání v tkanině 2x2Twill (0°/90°)
- E320 je značení epoxidové pryskyřice
 - o Teplota vytvrzení je od 80 do 140 °C
- 45% je zastoupení matrice v procentech

4.2 Postup výroby vzorečků

Spolu se zakázkou na výrobu firma obdržela CAD model výrobku, podle které si nechala tento díl vyfrézovat ze dřeva. Z dřevěného modelu se následně ručně vyrábí negativ ze sklolaminátu sloužící jako forma pro kompozitní díly.

- Dřevěný model se natře separátorem, který se nechá zaschnout
- Smícháme pryskyřici s tvrdidlem a připravíme si skelnou tkaninu na formu
- Štětcem nanášíme připravenou směs s tvrdidlem na tkaninu
- Nanášíme tak dlouho, než budeme mít silnou vrstvu kolem 15 mm
- Je důležité mít silnou vrstvu, aby forma byla dostatečně pevná
- Po vytvrzení vyjmeme dřevěný model ze sklolaminátové formy
- Okraje formy se ořežou



Obrázek 20 - Forma krytu motorového vozidla

4.2.1 Příprava formy

Takto zhotovená forma má povrch plný nepřesností a vad, které by byly na konečném výrobku vidět. Povrch formy se brousí, leští, vrypy a propadliny se tmelí a opět brousí. Na formu s perfektně připraveným povrchem se nanášejí separátory pomocí štětců a špachtlí. Tyto separátory pomáhají oddělit kompozitní výrobek od formy, aniž by ji nebo sebe poškodil.



Obrázek 21 - Příprava formy

4.2.2 Pokládání

Kladení prepregových tkanin tohoto dílu probíhalo ručně. Tkaniny jsou skladovány v lednici a jejich pokládání je poměrně náročné, a proto si pomáháme dřevěnými špachtlemi, válečky a horkovzdušnou pistolí. Problematická místa při spojování jednotlivých vrstev jako jsou rohy a různá zaoblení můžeme přilepit malým množstvím lepidla, které nebude po vytvrzení vadit ve funkčnosti dílu.

Dělení tkanin se provádí pomocí nožů, nůžek a elektrických nůžek se speciálním ostřím (ty jsou potřeba zejména pro aramidové tkaniny).

4.2.3 Vytvrzení

Vytvrzení kompozitního dílu s epoxidovou matricí probíhá v autoklávu. To je reaktor pro reakce probíhající za vysokého tlaku a teploty. Před vložením formy s položenou tkaninou do autoklávu je nejprve třeba zabalit díl do vakuového pytle a odsát vzduch. Tím zamezíme vzniku bublin a vytečení pryskyřice.

Výrobky se zpracovávaly v autoklávu firmy LA Composite po dobu 300 minut, tlaku 0,3 MPa a teplotě 100 °C. To je v souladu se všemi podmínkami pro použití epoxidové matrice. Delší doba byla zvolena kvůli počtu vrstev.



Obrázek 22 - Autokláv

4.2.4 Následující zpracování

Vyjmutí dílů z formy probíhalo ručně za použití nemalé síly. Po vyjmutí se musí ořezat a zabrousit hrany dílu, povrch zbrousit a vyleštit. Poté nastupují na řadu povrchové úpravy jako barvení, lakování nebo aplikace různých barevných fólií. Avšak v diplomové práci byl díl s matricí s UV stabilizátory a po vyleštění byl připravený pro odběratele.



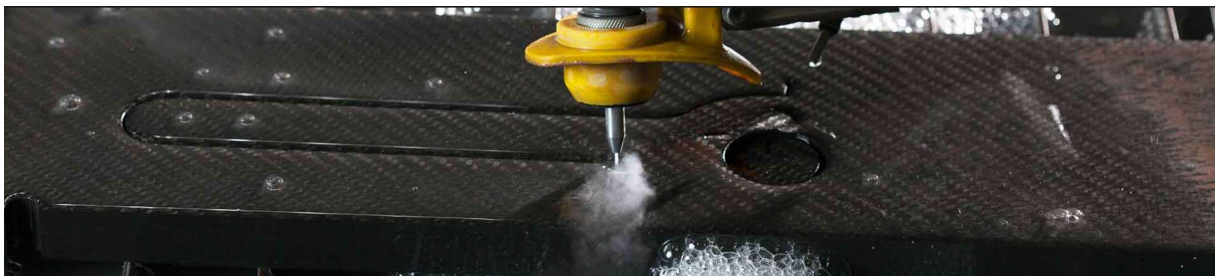
Obrázek 23 - Dveřní výplň před broušením a leštěním

4.3 Výroba vzorků

4.3.1 Řezání vzorků

K výrobě vzorků byla použita výplň dveří z řidičovi strany ze závodního rally vozu, která byla vhodná díky svému tvaru. Složení prepregu výplně dveří je shodné se složením ostatních dílů karoserie včetně kapoty vozu.

Vzorky byly nařezány vodním paprskem firmou Vodamělník sídlící na Mělníku. Výsledný rozměr potřebný pro měření, který je předepsán pro ohybovou zkoušku pro jednosměrné a vícesměrné kompozity, je 100x15x2mm (ČSN EN ISO 14125). Při řezání bylo dbáno také na dodržení stupně směrnosti orientace vláken všech vzorků. V praxi řezání probíhalo bez sebemenších problémů, řezy byly rovné, čisté, bez otřepů a jakýchkoliv známek vad.



Obrázek 24 - Ilustrační obrázek řezání kompozitu vodním paprskem [29]



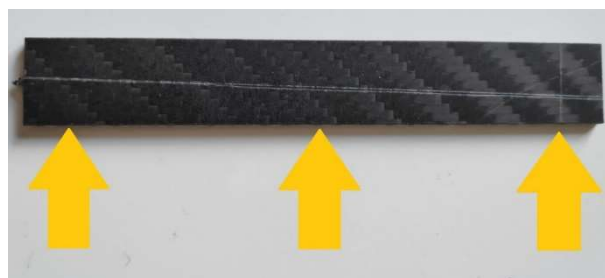
Obrázek 25 - Výplň dveří rally vozu [29]

4.3.2 Rozměry

K naměření rozměrů jsem použil mikrometr, který patří k přesným dotykovým měřidlům. Chyba měření se zpravidla pohybuje v intervalu 0,005 až 0,01 mm.



Obrázek 27 – Mikrometr [31]



Obrázek 26 - Místa měření rozměrů na vzorečku

- Šířka a tloušťka každého vzorečku byla měřena na třech místech.

4.4 Průměrné rozměry

V následující tabulce jsou průměrné hodnoty jednotlivých sérií vzorků. Z rozměrů si můžeme udělat představu o přesnosti vodního paprsku při řezání kompozitu. Ve výpočtech se braly v úvahu rozměry každého vzorečku.

Tabulka 1 - Průměrné rozměry

| Vzorek | Referenční | <80-120> | | | <130-170> | | | <200-240> | | |
|------------------|------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| Opakování | 0x | 14x | 36x | 60x | 14x | 36x | 60x | 14x | 36x | 60x |
| Šířka [mm] | 14,97 | 14, 92 | 14,95 | 15,02 | 15,02 | 15,07 | 15,01 | 15,04 | 14,93 | 15,04 |
| Tloušťka [mm] | 2,04 | 2,0 7 | 2,11 | 2,20 | 2,03 | 2,01 | 2,04 | 1,99 | 2,02 | 2,03 |

- Směrodatná odchylka šířky je 0,049 mm

4.4.1 Teplotní zatěžování

Jako prostředek k testování opakovaného teplotního zatížení jsem zvolil motocykl značky Yamaha XT 600 Z Ténéré z roku 1988. Pro testování se obzvláště hodí, protože má vzduchem chlazený motor. Vzduchem chlazené motory mají o cca 17 % vyšší provozní teplotu, díky čemuž se rozšíří interval použitelných teplot pro testování.

Vzorky byly po pěti kusech připevněny na různá místa motoru motocyklu s rozdílnou provozní teplotou. Byly použity tři série vzorků. Každá ze sérií byla ponechána na motoru různou dobu zatěžování.



Obrázek 28 - Motocykly Yamaha XT600Z 3AJ, které byly použity pro testování

Teploty byly měřeny infračerveným teploměrem značky: Solight, model: TE47. Jedná se o bezkontaktní teploměr určený pro měření povrchových teplot v rozsahu -50 až 380 °C.



Obrázek 29 - Použitý teploměr [32]

4.4.1.1 Zvolení teplot

Vybrání intervalů požadovaných teplot bylo obzvlášť důležité a zajímavé, proto jsem se rozhodl k vlastnímu měření teplot pod kapotou různých vozů. Zvolil jsem jednoho zástupce z každé kategorie:

- Vznětový motor s přeplňováním
- Vznětový motor bez přeplňování
- Zážehový motor s přeplňováním
- Zážehový motor bez přeplňování

Hledal jsem nejvyšší teploty v motorovém prostoru bezprostředně po zátěži (po jízdě) na povrchu komponent motoru (krycích štítů) a okolí motoru čili povrch karosérie motorového prostoru (nosníky, čelo, dělicí stěna, kapota, vnitřní strana blatníků).

4.4.1.1.1 Vznětový motor s přeplňováním

Jako zástupce této kategorie jsem zvolil Mercedes-Benz E-Class W213 220d vyrobený v roce 2016, který je vybaven vznětovým řadovým čtyřválcem uloženým podél o objemu 1950cc, výkonem 143kW, turbodmychadlem a katalyzátorem v motorovém prostoru. Nejvyšší teploty byly naměřeny v okolí katalyzátoru.



Obrázek 30 – Pohled do motorového prostoru w213 220d

Tabulka 2 - Naměřené teploty v motorovém prostoru w213 220d

| MB W213 220d | Komponenty motoru | Okolí |
|--------------|-------------------|-------|
| Teplota [C°] | ~220 | ~90 |

4.4.1.1.2 Vznětový motor bez přepřňování

V dnešní době již není v produkci žádný automobil, který by takovýmto pohonným ústrojím disponoval (vyjma pracovních strojů), a tak bylo nezbytné zvolit starší typ vozidla, kterým byl VW LT28 2.4D z roku 1996. Jedná se o trambusový typ vozidla s řadovým šestiválcem o objemu 2383 cc, výkonu 51kW, bez přepřňování a katalyzátoru.



Obrázek 31 - Pohled do motorového prostoru VW LT28 D24 ACT

Tabulka 3 - Naměřené teploty v motorovém prostoru VW LT D24 ACT

| VW LT D24 ACT | Komponenty motoru | Okolí |
|---------------|-------------------|-------|
| Teplota [C°] | ~140 | ~90 |

4.4.1.1.3 Zážehový motor s přeplňováním

Benzínový motor s turbodmychadlem jsem zvolil legendární 4G63 v Mitsubishi Lancer Evolution IX z roku 2007. Jedná se o řadový napříč uložený čtyřválec 1997 cc a výkonu 214kW. Z vozu byl odstraněn sériově montovaný katalyzátor. Dále na vozu bylo provedeno několik úprav, proto můžeme očekávat vyšší výkon a rovněž vyšší teploty.



Obrázek 32 – Pohled do motorového prostoru 4g63 Evo ix

Tabulka 4 - Naměřené teploty v motorovém prostoru 4g64 Evo ix

| 4G63 Evo IX | Komponenty motoru | Okolí |
|--------------|-------------------|-------|
| Teplota [C°] | ~240 | ~120 |

4.4.1.1.4 Zážehový motor bez přeplňování

V poslední kategorii je motor od BMW M54B22 v modelu e46. Jedná se o celohliníkový řadový šestiválec s výkonem 125kW, objemem 2171 cc, s variabilním časováním obou vaček a nepřímým sekvenčním vstřikováním.



Obrázek 33 – Pohled do motorového prostoru M54B22 BMW e46

Tabulka 5 - Naměřené teploty v motorovém prostoru M54B22 BMW e46

| BMW e46 320i | Komponenty motoru | Okolí |
|---------------------|--------------------------|--------------|
| Teplota [C°] | ~200 | ~110 |

4.4.1.2 Zvolení intervalů teplot

Ze zjištěných hodnot jsem zvolil tři následující intervaly. Kryty a štíty motoru plní dobře svojí funkci a i v bezprostřední blízkosti (~5 cm) od výfukových svodů jsem nenaměřil na karoserii vyšší teplotu než 120 °C a ani teploty na samotných krytech a štítech nepřesáhly 240 C°.

Zvolené intervaly pro teploty:

- <80; 120> nízké teploty
- <130;170> střední teploty
- <200;240> vysoké teploty

4.4.1.3 Nalezení teplotních intervalů na motocyklu

Na motocyklu jsem našel místa, do kterých zapadají následující teplotní intervaly. Bylo nutné, aby teplota nepřesahovala horní a dolní hranici intervalu, nekolísala a aby se místo zahřálo na požadovanou teplotu co nejrychleji.

Místa odpovídající všem požadavkům se jeví tato:

- <80;120>, tlumič výfukového potrubí
- <130;170>, hlava válců v blízkosti svodů
- <200;240>, výfukové svody

4.4.2 Připevnění vzorků na motocykl

Vzorky jsem připevnil na motocykl pomocí vázacího drátu a poté jsem vzorky přelepil hliníkovou fólií, abych je uchránil před povětrnostními vlivy.

Takto vznikl „sendvič“: fólie → vzorek → motor



Obrázek 34 – Vzorky připevněné na motocyklu

Cykly

Počet opakování teplotního zatěžování jsem zvolil na 14, 36 a 60 opakování. Pro každý cyklus byly zaznamenány teploty z okolí, doby ohřevu, výdrže na požadované teplotě a zchladnutí.

Dodržoval jsem pravidla pro jednoznačnost pokusu a případnou opakovatelnost.

- Každý cyklus začínal se studeným motorem, tj. teplota okolí.
- V jednom dni jsem proto zopakoval maximálně dva cykly.
- Dále jsem si dával pozor, abych cyklus nepřerušil v době ohřevu, ale až na požadované teplotě.
- Výdrž na požadované teplotě byla různá. Nikdy však menší než 5 minut.
- Před vypnutím motoru jsem si změřil a zapsal dosažené teploty v cyklu.
- Doba chladnutí nikdy nebyla kratší než 8 hodin.
- V dešti nebo jiných nepříznivých podmínkách jsem netestoval.

V praxi to vypadalo tak, že jsem ráno a večer brával motocykl na pravidelnou projížďku v rozmezí 10 až 15 km.

4.4.3 Naměřené teploty

Tabulka 6 - Naměřené teploty v jednotlivých cyklech

| T [C°] | Počet opakování | | | | | | | | |
|---------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 1x | 2x | 3x | 4x | 5x | 6x | 7x | 8x | 9x |
| <80-120> | 100 | 120 | 80 | 80 | 100 | 90 | 120 | 80 | 100 |
| <130-170> | 160 | 140 | 150 | 160 | 135 | 130 | 130 | 130 | 140 |
| <200-240> | 200 | 220 | 220 | 210 | 200 | 200 | 200 | 215 | 210 |
| T [C°] | 10x | 11x | 12x | 13x | 14x | 15x | 16x | 17x | 18x |
| <80-120> | 90 | 90 | 120 | 100 | 80 | 100 | 80 | 115 | 80 |
| <130-170> | 160 | 150 | 150 | 150 | 150 | 160 | 160 | 130 | 130 |
| <200-240> | 220 | 220 | 220 | 215 | 200 | 205 | 215 | 215 | 200 |
| T [C°] | 19x | 20x | 21x | 22x | 23x | 24x | 25x | 26x | 27x |
| <80-120> | 120 | 80 | 80 | 100 | 80 | 125 | 70 | 100 | 100 |
| <130-170> | 140 | 130 | 160 | 140 | 130 | 150 | 145 | 140 | 140 |
| <200-240> | 220 | 225 | 225 | 210 | 200 | 225 | 215 | 220 | 230 |
| T [C°] | 28x | 29x | 30x | 31x | 32x | 33x | 34x | 35x | 36x |
| <80-120> | 100 | 80 | 80 | 80 | 110 | 120 | 100 | 90 | 100 |
| <130-170> | 150 | 150 | 140 | 150 | 150 | 150 | 145 | 130 | 150 |
| <200-240> | 225 | 200 | 230 | 220 | 200 | 230 | 220 | 200 | 240 |
| T [C°] | 37x | 38x | 39x | 40x | 41x | 42x | 43x | 44x | 45x |
| <80-120> | 90 | 80 | 115 | 90 | 110 | 70 | 80 | 80 | 80 |
| <130-170> | 130 | 140 | 130 | 150 | 150 | 140 | 150 | 145 | 145 |
| <200-240> | 230 | 230 | 230 | 210 | 230 | 215 | 215 | 230 | 215 |
| T [C°] | 46x | 47x | 48x | 49x | 50x | 51x | 52x | 53x | 54x |
| <80-120> | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 115 | 100 | 100 | 80 |
| <130-170> | 140 | 145 | 100 | 140 | 150 | 150 | 130 | 145 | 150 |
| <200-240> | 215 | 230 | 215 | 230 | 215 | 230 | 215 | 230 | 230 |
| T [C°] | 55x | 56x | 57x | 58x | 59x | 60x | | | |
| <80-120> | 90 | 90 | 80 | 80 | 80 | 80 | | | |
| <130-170> | 130 | 150 | 150 | 140 | 150 | 150 | | | |
| <200-240> | 220 | 230 | 230 | 200 | 230 | 215 | | | |

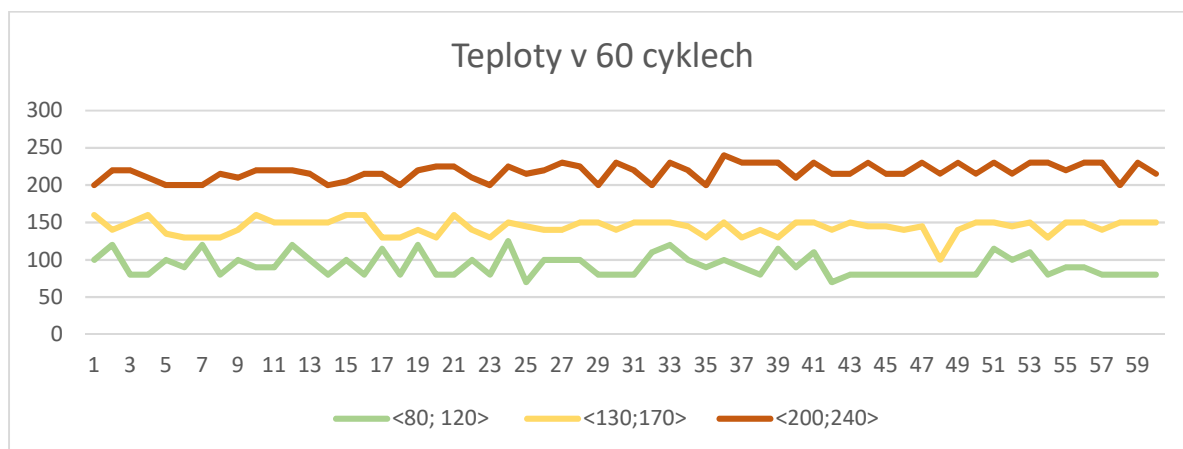


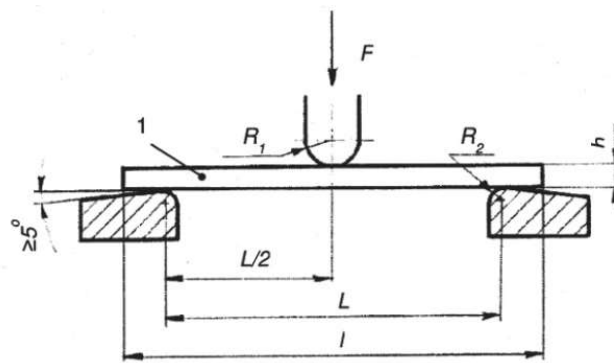
Figure 2 - Spojnicový graf závislosti opakování na teplotách

4.5 Stanovení vlastností

Ohybová zkouška se v tomto případě jeví jako nejvhodnější pro testování kompozitní „desky“. Zkouškou zjistíme chování zkušebních těles při namáhání ohybem, stanovení pevnosti v ohybu, modul pružnosti v ohybu a další závislosti mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Pro porovnání naměřených a zjištěných hodnot je důležité dodržet rozměry vzorků a orientaci vláken ve všech vzorcích.

4.5.1 Princip ohybové zkoušky [01]

Vzorek se položí na dvě podpěry a uprostřed mezi nimi se zatěhuje silou F dokud se těleso nezlomí. Při zkoušce se zaznamenává závislost mezi působící silou a průhybem vzorku.



Obrázek 35 - Schéma principu ohybové zkoušky [01]

Zkouška je vhodná pro porovnání vlivu teplotní zátěže na testovaných vzorcích.

Tabulka 7 - Rozměry vzorků pro zkoušku ohybem [01]

| Třída materiálu | Materiál | Délka tělesa (<i>l</i>) | Vzdálenost podpěr (<i>L</i>) | Šířka (<i>b</i>) | Tloušťka (<i>h</i>) |
|-----------------|--|---------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------|
| I | Termoplasty a termoplasty vyztužené krátkými vlákny | 80 | 64 | 10 | 4 |
| II | Plasty vyztužené rohožemi a tkaninami a smíšenými výztužemi | 80 | 64 | 15 | 4 |
| III | Příčné (90°) jednosměrné kompozity, jednosměrné (0°) a vícesměrné kompozity (např. systémy se skleněnými vlákny) | 60 | 40 | 15 | 2 |
| IV | Jednosměrné (0°) a vícesměrné kompozity (např. systémy s uhlíkovými vlákny) | 100 | 80 | 15 | 2 |
| | Tolerance | -0 +10 | ±1 | ±0,5 | ±0,2 |

Můj materiál spadá do třídy IV – Jednosměrné a vícesměrné kompozity. Vzdušenost podpěr nastavíme na 80 mm, vzorek se umístí symetricky na dvě podpěry a rychlost zatěžování byla zvolena na hodnotu 0,5 (viz. obrázek č. 34), abychom stihli odečítat hodnoty z číselníkového indikátoru. Bylo dbáno, aby zvolené podmínky byly u všech měření stejné.

Počet vzorků pro statické vyhodnocení je předepsán normou na nejméně 5. Pokud se vzorek zlomí mimo střední třetinu, je nutné použít další a výsledek se nebere v úvahu. Dále je potřeba dodržet teplotu v laboratoři a vlhkost.

Vyhodnocení vzorků bylo provedeno na stroji *Plastics Bending Tester Type: AS-102* v laboratořích ČVUT na Karlově náměstí.



Obrázek 36 - Měřící stanoviště



Obrázek 37 - Plastics Bending Tester
Type: AS-102



Obrázek 38 – ovládací panel

4.5.2 Stanovení ohybových vlastností [01]

Stroj umožňuje odečítat velikost zatěžující síly F a průhyb s , což je vzdálenost, o kterou se vychýlí plocha vzorku uprostřed mezi podpěrami oproti své původní pozici.

Z křivky síla/průhyb se určí napětí, průhyby a deformace. Z naměřených hodnot lze spočítat napětí v ohybu σ .

Rovnice 1 - Napětí v ohybu [01]

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad [\text{MPa}]$$

- F [N] je použitá síla, L [mm] je vzdálenost podpěr, b [mm] je šířka vzorku a h [mm] je tloušťka vzorku

Dále z naměřených hodnot vypočteme deformace ohybem ε , což je poměr změny délky povrchu vzorku ku vzdálenosti mezi podpěrami.

Rovnice 2 - Deformace ohybem [01]

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2}$$

- kde s [mm] je průhyb, h [mm] je tloušťky vzorku
- zjišťujeme deformace ohybem v okamžiku lomu

Pro vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu E je třeba znát průhyby s_1 a s_2 pro předepsané hodnoty deformace ohybem $\varepsilon=0,0005$ a $\varepsilon=0,0025$ podle rovnice:

Rovnice 3 - Předepsané průhyby [01]

$$s_i = \frac{\varepsilon_f L^2}{6h} \quad [\text{mm}]$$

- s_i je jeden z průhybů, ε je odpovídající deformace, L je vzdálenost podpěr, h je tloušťka vzorku
- pomocí těchto průhybů se z deformačního diagramu odečtou odpovídající síly a vypočte se napětí σ

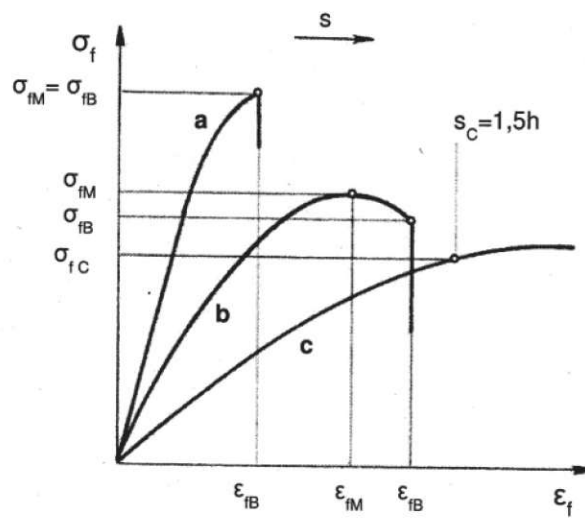
Pro modul pružnosti v ohybu E pak platí vztah:

Rovnice 4 - Modul pružnosti v ohybu [01]

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad [\text{MPa}]$$

- kde σ_{fi} je napětí v ohybu, měřené při průhybu s_i

Tyto rovnice popisují ohybové vlastnosti v oblasti lineárního vztahu mezi napětím a deformací. Pro většinu případů tyto rovnice platí pouze v oblasti malých průhybů. Lze je však použít pro účely srovnání, což je i můj případ.



Graf 3 - Závislost mezi napětím a deformací pro různé případy průhybů [01]

4.5.3 Měření modulu pružnosti v ohybu

Při měření modulu pružnosti v ohybu jsem zaznamenával jednotlivé hodnoty průhybů s [mm] při konkrétních silách F [N]. Tyto hodnoty jsem vynesl do grafu a určil spojnicí trendu.

- Hodnoty do 0,2 mm průhybu byly vyřazeny z důvodu přesnosti měření
- Podpěry byly nastaveny ve vzdálenosti 80 mm
- Rozměry každého vzorečky byly použity pro konkrétní hodnotu
- Rychlost byla nastavena na stupeň 0,5 dle stupnice na (viz. obrázek 33)

Rovnice 5 - Modul pružnosti v ohybu [01]

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta s} * \frac{L^3}{4bh^3}$$

- Kde E je modul pružnosti v ohybu [MPa], F je síla [N], s je průhyb [mm], L je vzdálenost podpěr [mm], b je průměrná šířka každého vzorečku zprůměrovaná ze tří měření [mm] a h je průměrná tloušťka každého vzorečku [mm]

Tabulka 8 - Moduly pružnosti v ohybu E pro jednotlivé série vzorečků

| Vzorek | Referenční | <80-120> | | | <130-170> | | | <200-240> | | |
|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Opakování | 0x | 14x | 36x | 60x | 14x | 36x | 60x | 14x | 36x | 60x |
| E [GPa] | 26.9 | 27.1 | 28 | 26.8 | 29.1 | 30.3 | 29.3 | 30.6 | 29.5 | 29.9 |

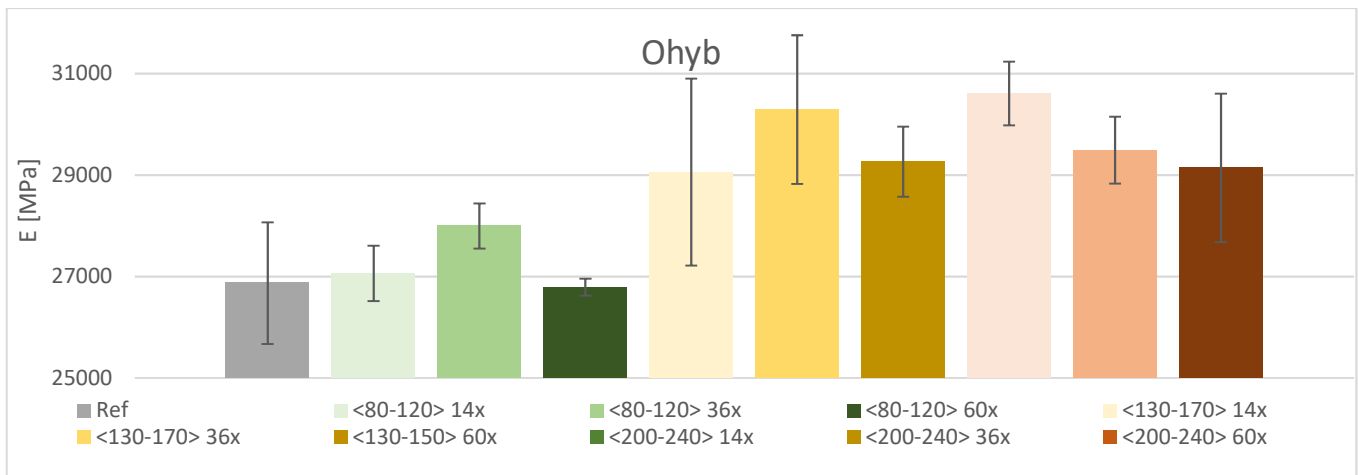


Figure 4 - Modul pružnosti v ohybu, seřazeno podle teplot

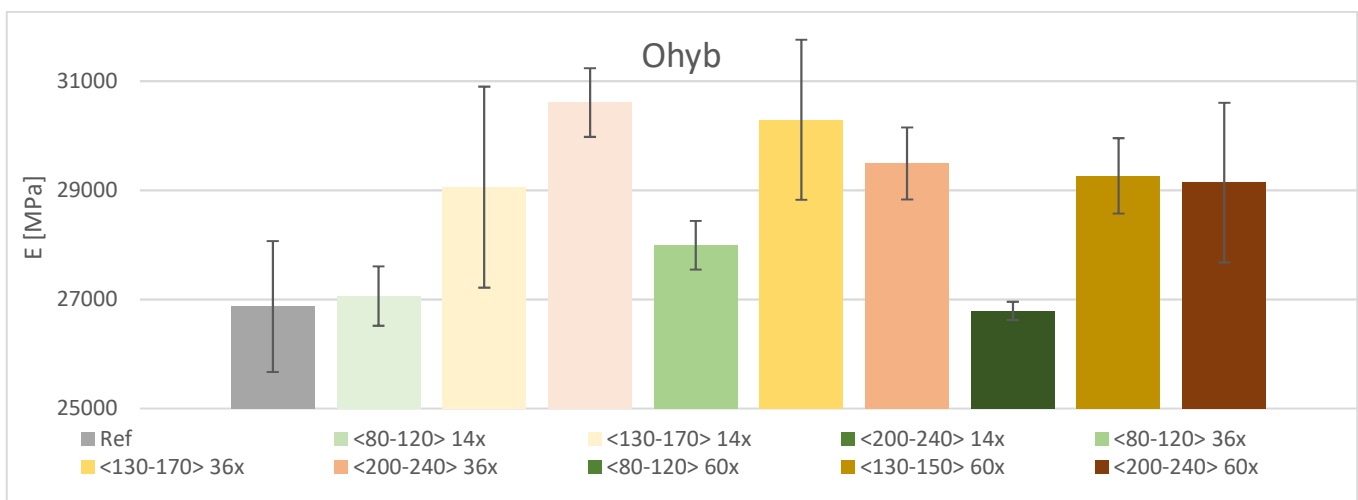


Figure 5 - Modul pružnosti v ohybu, seřazeno podle cyklů

4.5.4 Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu

- Modul pružnosti v ohybu byl naměřen od 26 GPa do 32 GPa
- Po 14 cyklech zatěžování E roste ve všech třech teplotních intervalech
- Po 36 cyklech zatěžování E roste v první dvou teplotních intervalech (80 až 120 °C, 130 až 170 °C) a v posledním teplotním intervalu (200 až 240 °C) E začíná klesat
- Po 60 cyklech zatěžování E klesá ve všech třech teplotních intervalech

Z naměřených hodnot lze konstatovat, že při tepelné zátěži dochází pravděpodobně k dalšímu vytvrzení materiálu a modul pružnosti v ohybu roste. Avšak s delší dobou zatěžování materiál začíná pomalu degradovat a modul pružnosti v ohybu klesá. Ve všech případech jsou hodnoty modulu pružnosti vyšší nebo rovny hodnotám referenčních vzorků.

4.5.5 Měření napětí v ohybu

Měření napětí v ohybu bylo poslední měření, protože došlo k přelomení vzorečků a jejich zničení. Přelomení probíhalo na stejném stroji jako měření modulu pružnosti v ohybu. Byla zaznamenána síla při přelomení F [N] a následně vypočteno napětí v ohybu.

- Podpěry byly ve vzdálenosti 80 mm
- Rychlost byla nastavena na stupni 2
- Rozměry každého vzorečky byly použity pro konkrétní hodnotu

Rovnice 6 - Napětí v ohybu [01]

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

- Kde σ_f je napětí v ohybu [MPa], F je síla [N], L je vzdálenost podpěr [mm], b je šířka vzorečku [mm] a h je tloušťka vzorečku [mm]

Tabulka 9 -Průměrné napětí v ohybu pro jednotlivé série

| Vzorek | Referenční | <80-120> | | | <130-170> | | | <200-240> | | |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Opakování | 0x | 14x | 36x | 60x | 14x | 36x | 60x | 14x | 36x | 60x |
| σ_f [MPa] | 537 | 491 | 490 | 500 | 486 | 555 | 499 | 562 | 530 | 577 |

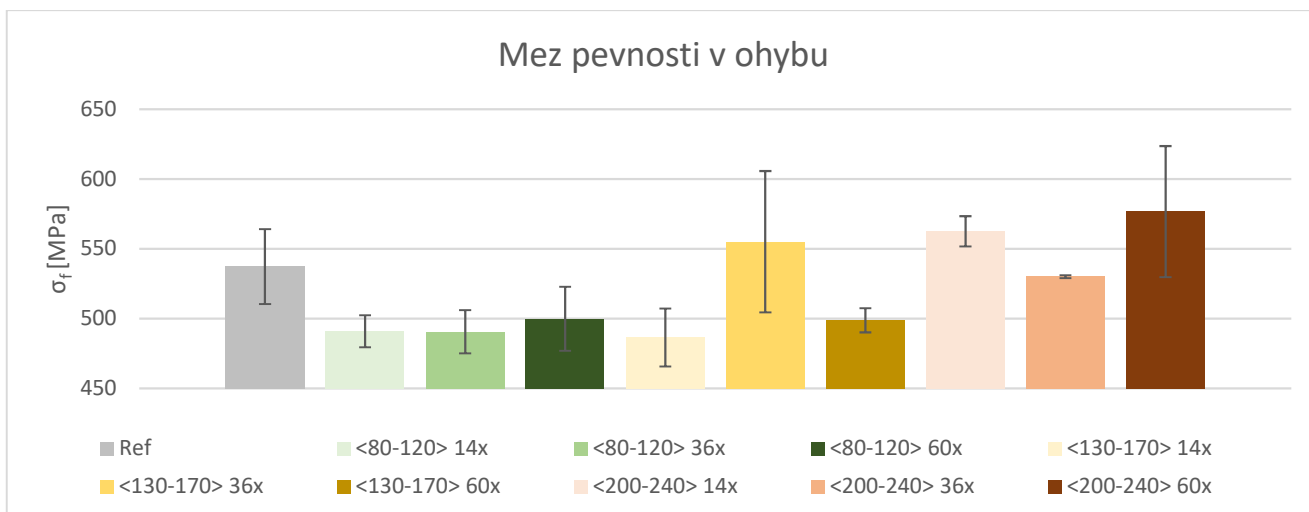


Figure 6 - Napětí v ohybu, seřazeno podle teplot

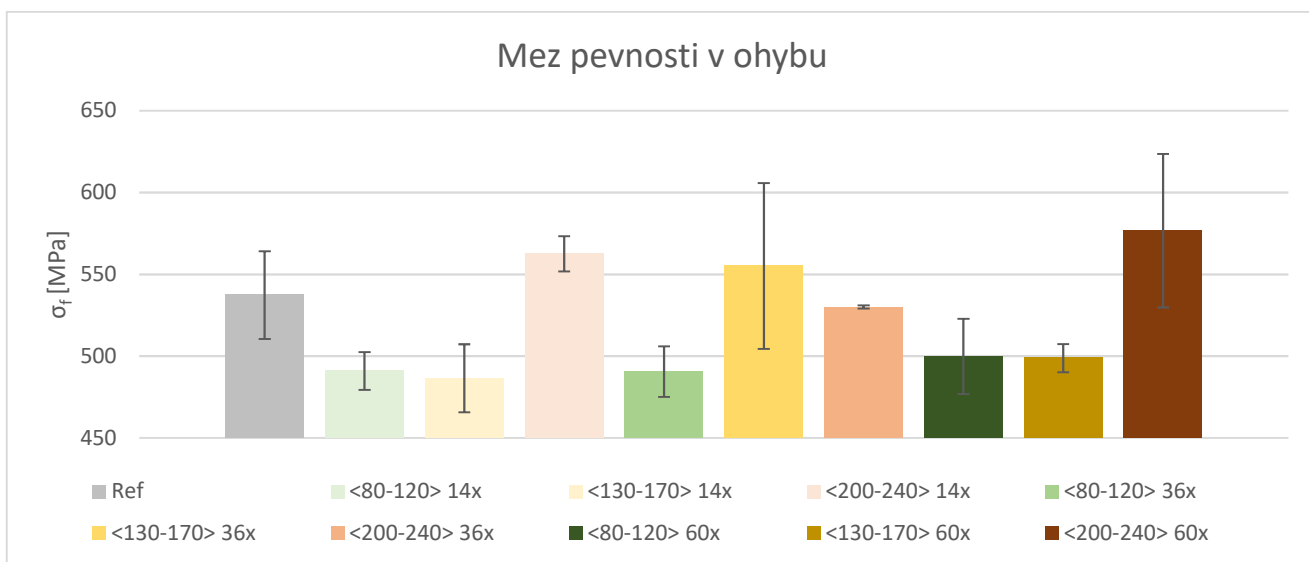


Figure 7 - Napětí v ohybu, seřazeno podle cyklů

4.5.6 Vyhodnocení napětí v ohybu

- Napětí v ohybu bylo naměřeno od 465 do 623 MPa
- Ve většině případů došlo ke snížení napětí v ohybu

Na rozdíl od modulu pružnosti v ohybu a tvrdosti došlo ke snížení hodnot napětí v ohybu oproti referenčním vzorkům. Dá se předpokládat, že dochází k určitému vytvrzení a zkrěhnutí vlivem tepelného zatěžování.

4.6 Tvrdość [01]

K určení tvrdosti jsem použil Brinellovu metodu. V tomto případě byla nevhodnější díky velikosti indentoru, který zanechá největší plochu vtisku. Díky tomu neměříme rozdílné hodnoty tvrdosti v různých místech tkaniny.

Princip zkoušky spočívá ve vtlačování kuličky do povrchu vzorečků zátěžnou silou po určité době zatěžování. Jako indentor byla použita kulička z tvrdokovu o průměru 10 mm, zátěžná síla 750 N a doba zatěžování 10 s. Po odlehčení se změří průměr v tisku ve dvou navzájem kolmých směrech a vypočítá se střední průměr vtisku d .

Tvrdość podle Brinella se značí HBW a spočítá se jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku:

Rovnice 7 - Tvrdość podle Brinella [01]

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

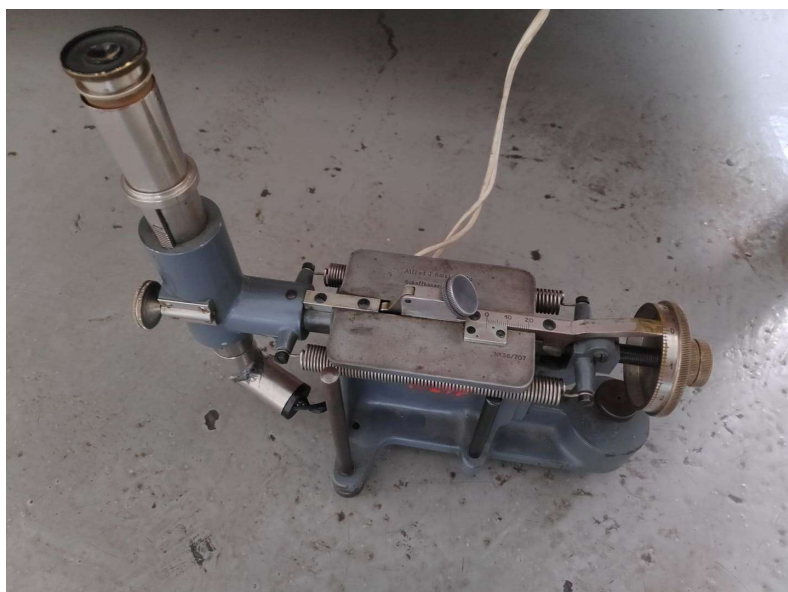
- Kde F [N] je zkušební zatížení, D [mm] je průměr kuličky a d [mm] je střední průměr vtisku

Označení HBW předchází hodnota tvrdosti a za touto hodnotou následují podmínky při zkoušce v tomto pořadí: průměr kuličky v mm, zatížení v kilopondech a doba zatížení pokud je jiná než 10 až 15 s.

Měření tvrdosti probíhalo na stroji *Aktiebol.Alpha Stockholm* a odečítání vtisků na dílenském mikroskopu.



Obrázek 39 - Tvrdoměr Aktiebol.Alpha Stockholm



Obrázek 40 - Dílenský mikroskop

4.7 Vyhodnocení tvrdosti

- Tvrdost byla naměřena v rozmezí 64 až 76 HBW 10/750/10
- Po tepelném zatěžování byla tvrdost větší ve všech případech
- Největší tvrdosti bylo dosaženo při teplotách 200 ° až 240 °C a nejkratší době zátěže
- V rozmezí 80 ° až 120 °C tvrdost roste s dobou zátěže
- V rozmezí 130 ° až 170 °C tvrdost neroste a začíná mírně klesat s dobou zátěže
- V rozmezí 200 ° až 240 °C tvrdost klesá s dobou zátěže

Z naměřených hodnot jsem konstatoval, že při tepelném zatěžování dochází k dalšímu vytvrzení materiálu. U teplot nad 130 °C materiál začíná pomalu degradovat s delší dobou zatěžování. Ve všech případech jsou hodnoty tvrdosti vyšší nebo rovny hodnotám referenčních vzorků.

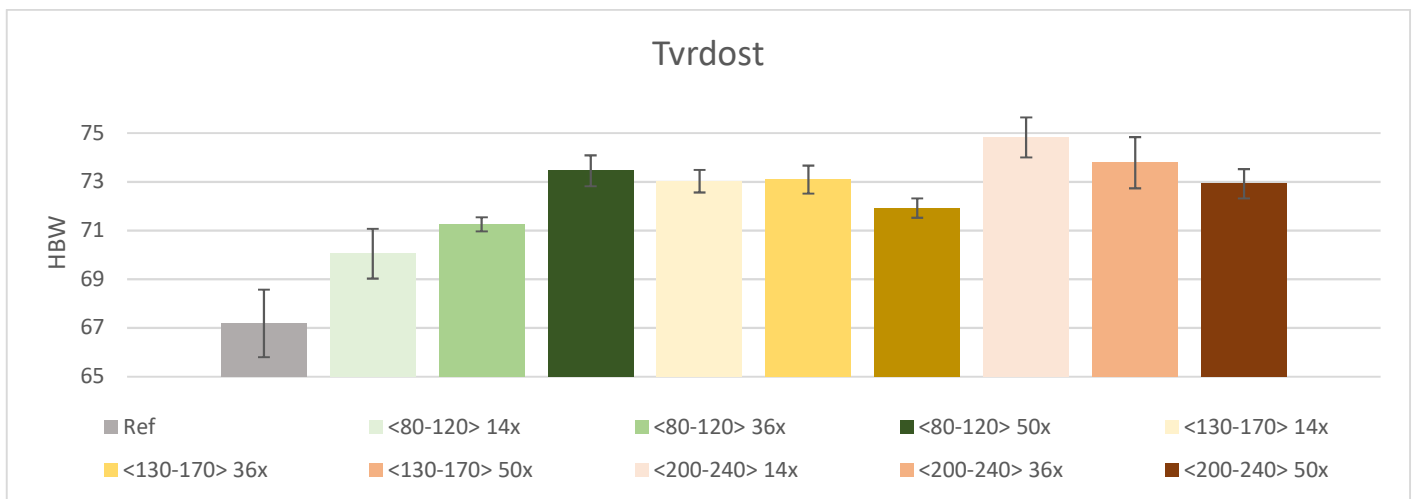


Figure 8 - Tvrdost, seřazeno podle teplot

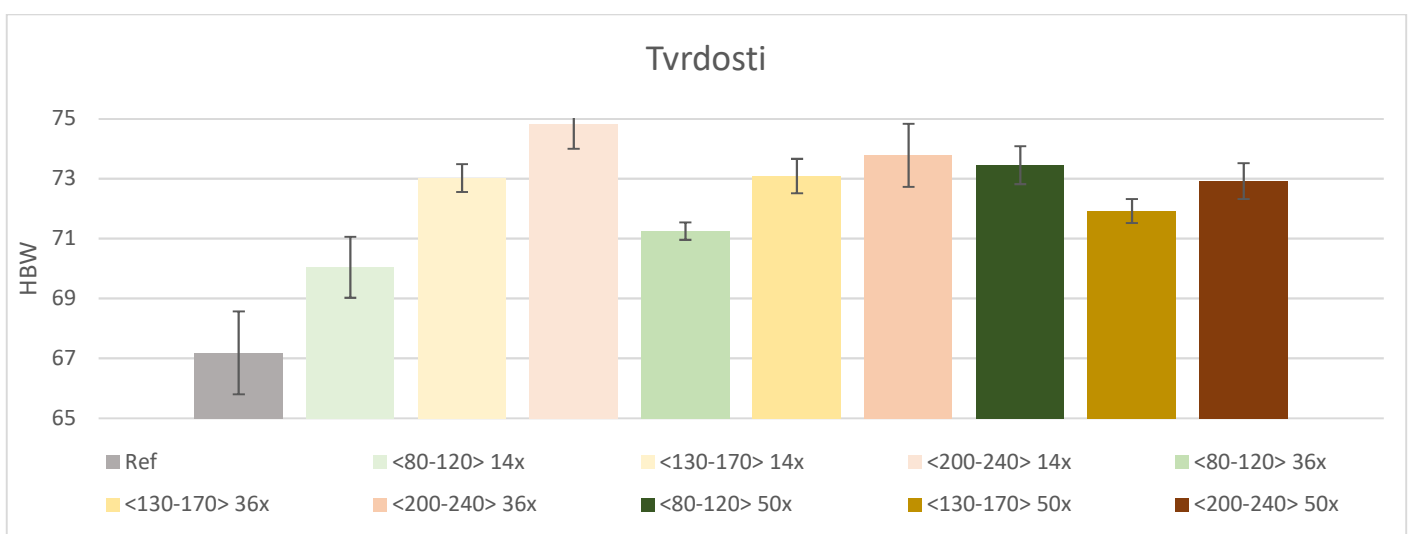


Figure 9 - Tvrdost, seřazeno podle cyklů

4.8 Vzhled [14]

Vizuální porovnávání probíhalo na konfokálním laserovém mikroskopu *Olympus Lext OSL5000*. Tento mikroskop dokáže nedestruktivním způsobem měřit objekty ve 3D rozměrech s velmi vysokým rozlišením. Touto technologií jsme změřili plošnou drsnost Sa [μm]. Mikroskop *Olympus Lext OSL5000* také disponuje bílou diodou, díky které je možné pozorování v reálných barvách. Díky této technologii můžeme vidět změnu barvy u vzorků po tepelném namáhání.

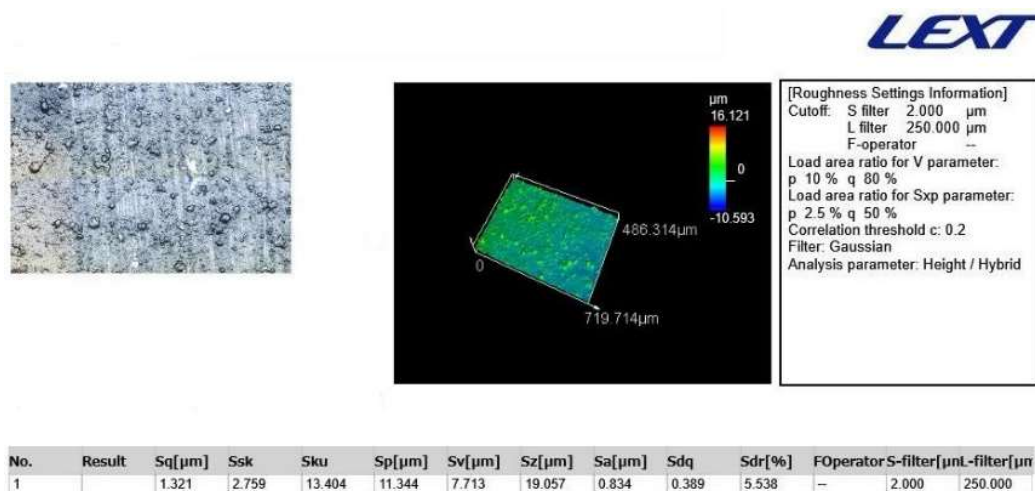
Měření probíhalo v laboratořích na ČVUT FS v Dejvicích. Cílem bylo porovnání referenčního vzorečku bez tepelného namáhání a vzorečku po tepelném namáhání. Aby rozdíly mezi vzorečky byly co nejvíce vidět, tak byl vybrán referenční vzorek a vzorek z nejvíce namáhané série – tj. teplotní interval <200 až 240 °C> a počet cyklů 60x.



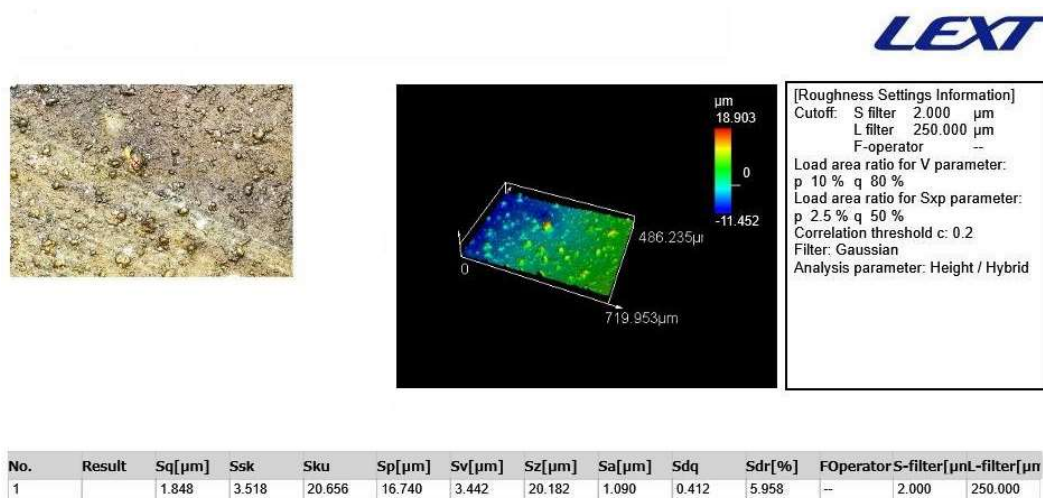
Obrázek 41 - Olympus LEXT OLS5000 [33]

4.8.1 Vyhodnocení vizuální kontroly

U vzorku po tepelném namáhání bylo pozorováno výrazné zbarvení do žluta a změna plošné drsnosti viz. následující protokoly:



Obrázek 42 - Protokol měření pro referenční vzorek



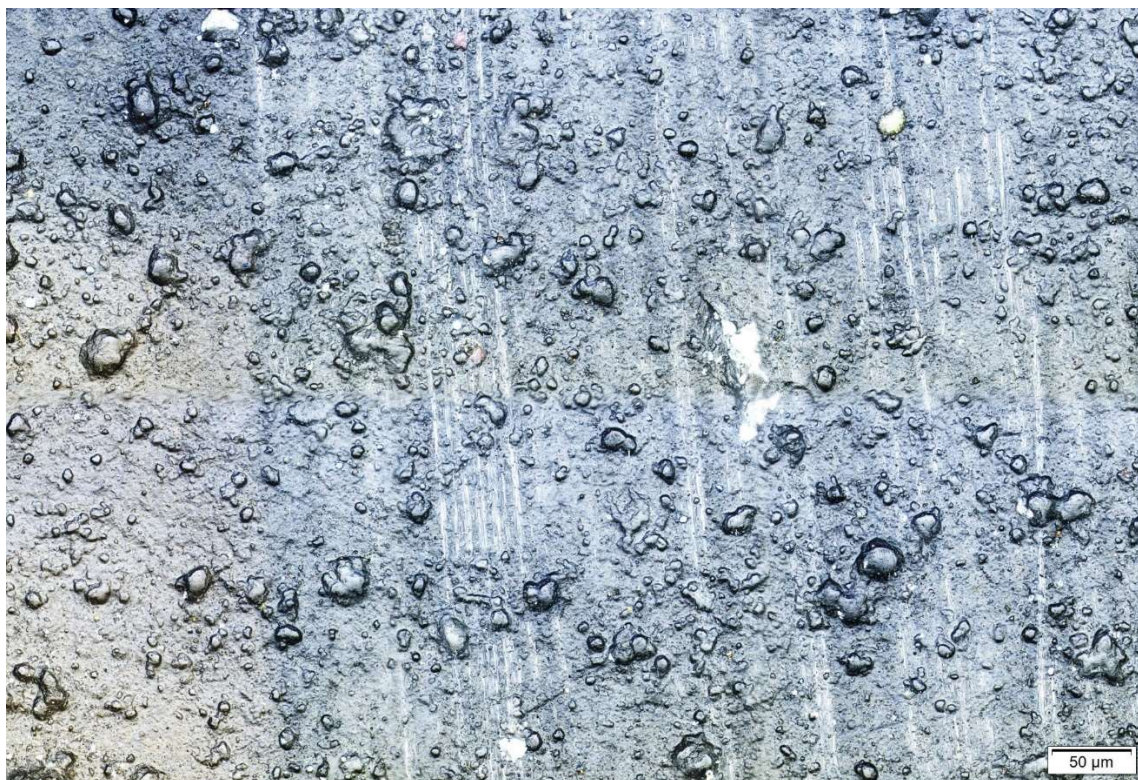
Obrázek 43 - Protokol měření pro namáhaný vzorek

Tabulka 10 - Drsnost

| Drsnost | Ref | <200-240> |
|----------------------|--------------|--------------|
| Sa [μm] | 0,834 | 1,090 |

Plošná drsnost vzrostla z původní hodnoty 0,834 μm u referenčního vzorku na hodnotu 1,090 μm u namáhaného vzorku. Byla vyhodnocena na ploše o velikosti 720 x 486 μm , která zahrnovala hranice vláken.

Na následující straně je vidět výrazné zbarvení do žluta u namáhaného vzorku.



Obrázek 44 - Referenční vzorek



Obrázek 45 - <200-240> 60x vzorek

5 Závěr

Cíle práce byly splněny.

- Byl popsán materiál k výrobě vzorků
- Byly určeny teploty v motorovém prostoru
- Byly vytvořeny teplotní intervaly pro testování vzorků
- Bylo provedeno měření. Byl zjištěn modul pružnosti exponovaných vzorků, byla naměřena mez pevnosti v ohybu, tvrdost a plošná drsnost.
- Byl vyhodnocen vzhled.

Na základě tohoto experimentu, i praktických zkušeností s používáním daného materiálu, lze říct, že teplota při dlouhodobém zatěžování by neměla překročit 120 °C. K bližšímu určení degradace by byl potřeba chemický rozbor jednotlivých vrstev prepregu, což je nad rámec této diplomové práce.

6 Použité literární zdroje

- [01] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, ISBN isbn978-80-01-05550-2
- [02] BENEŠ, Libor. *Technické materiály (nejen) pro dopravní techniku*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010, ISBN isbn978-80-7395-248-8
- [03] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, ISBN isbn978-80-86960-29-6
- [04] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, ISBN isbn978-80-01-04167-3
- [05] CHUNG, Deborah D. L. *Composite materials: science and applications*. 2nd ed. New York: Springer, c2010, ISBN isbn9781848828308
- [06] KRATOCHVÍL, Bohumil, ŠVORČÍK a VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, ISBN isbn80-708-0568-4
- [07] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, ISBN 80-720-4248-3
- [08] HEXCEL Corporation, HexPly Prepreg Technology, 2015, dostupné na webu: <https://www.hexcel.com/Resources/Technology-Manuals>
- [09] TUCKER, Nick a Kevin LINDSEY, *An introduction to automotive composites*, Shrewsbury, U.K.: Rapra Technology, 2002, ISBN9781859572
- [10] SCABRO, Epoxy Component Prepreg MTC510, 2013, dostupné na webu: [http://www.scabro.com/images/companies/1/\[WEBSHOP\]%20TDS/SHD%20Composites/MTC510_TDS.pdf?1456393309957](http://www.scabro.com/images/companies/1/[WEBSHOP]%20TDS/SHD%20Composites/MTC510_TDS.pdf?1456393309957)
- [11] CARBON.EE, Carbon Fiber Patterns, 2015, dostupné na webu: <https://www.carbon.ee/en/n/carbon-fiber-all-patterns-explained>
- [12] HEXCEL Corporation, HexPLY M79-Product Data, 2014, dostupné na webu: http://www.abic.se/pdf/M79_eu.pdf
- [13] SIGRAPREG, Pre-impregnated Materials Made from Carbon, Glass and Aramid Fibres, 2017, dostupné a webu: <https://www.sgllcarbon.com/pdf/SGL-Brochure-The-Simplifiers-EN.pdf>
- [14] OLYMPUS, LEXT OLS5000, 2018, dostupné na webu: <https://www.holgerhartmann.no/getfile.php/1319506->

1515075597/Produkter/Materialtesting/Mikroskop/Konfokalt%20laserskanning%20mikroskop/LEXT%20OLS5000.pdf

[15] DEKOJ V., Der Deutsche Strassenverkehr, 1962, dostupné na webu:

<http://www.trabant.cz/clanky/historie/dsv-9-62-duroplast-je-trumf>

[34] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Praha:

Nakladatelství ČVUT, 2008 ISBN 978-80-01-03927-4, dostupné na webu:

<http://www.digitalniknihovna.cz/ntk/view/uuid:a5ff49f2-29e3-4bc0-a908-3aa7574cbb8e?page=uuid:08b52d58-9a8f-443d-bc7a-5bb86b6efdaa>

6.1 Použité zdroje k obrázkům

[16] Obrázek 1: Příklad uhlíkového panelu karosérie, staženo dne 1.1.2019, dostupné na webu:

https://seiboncarbon.com/media/catalog/product/cache/1/thumbnail/1000x/17f82f742ffe127f42dca9de82fb58b1/h/d/hd0809sbimp-cw_01.jpg

[17] Obrázek 2: Schéma sendvičového kompozitu, staženo dne 1.1.2019, dostupné na webu: http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/kkp_soubory/image052.jpg

[18] Obrázek 6: Ukázka role, staženo dne 1.1.2019, dostupné na webu:

<http://cz.haxhoneycombcore.com/uploads/201817201/prepreg-carbon-fiber-sheets12047375884.jpg>

[19] Obrázek 7: Schéma výroby metodou HMP, staženo dne 1.1.2019, dostupné na

webu: <https://image.slidesharecdn.com/unitiiiimanufacofadvcomp-120902014014-phpapp01/95/unit-iii-manufac-of-adv-comp-30-728.jpg?cb=1346550198>

[20] Obrázek 8: Zařízení k výrobě prepregu, staženo dne 1.1.2019, dostupné na webu:

https://www.santexrimar.com/wp-content/uploads/2019/06/CAVIPREG_Prepreg-machine.png

[21] Obrázek 9: Soybean car, staženo dne: 19.1.2019, dostupné na webu:

<https://todayinhistorydotblog.files.wordpress.com/2018/08/soybeancar.jpg?w=678>

- [22] Obrázek 10: Stout Scarab, staženo dne: 19.1.2019, dostupné na webu:
<https://c8.alamy.com/compfr/hhbw4k/1936-automobile-monospace-scarab-concu-par-william-stout-hhbw4k.jpg>
- [23] Obrázek 11: Kaiser Darrin, staženo dne: 19.1.2019, dostupné na webu:
https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTOY1_dsxODbz5wANJS2DTD_6WtgrxjcmwGJSEcETxVeiRF2IRV
- [24] Obrázek 12: Singer SM1500, staženo dne: 19.1.2019, dostupné na webu:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Singer_SM1500_Saloon.JPG
- [25] Obrázek 13: Trabant 601, staženo dne: 15.5.2019, dostupné na webu:
https://img2.auto.cz/img/29/normal690/3932204_trabant-601-1963-1990-zastaraly-a-vysmivany-modrofuk-je-dnes-kultem-v0.jpg?v=0
- [26] Obrázek 14: BT49, staženo dne: 19.1.2019, dostupné na webu:
<https://www.mediastorehouse.com/p/745/long-beach-california-usa-28-30-march-1980-8894735.jpg.webp>
- [27] Obrázek 15: Uhlíkový monokok MP4-1, staženo dne: 19.1.2019, dostupné na webu: <https://cdn-1.motorsport.com/images/mgl/2erZBKlY/s8/fl-giorgio-piola-technical-analysis-2016-mclaren-mp4-1-monocoque.jpg>
- [28] Obrázek 16: Uhlíkový kompozit v interiéru Ferrari F40, staženo dne: 19.1.2019, dostupné na webu:
<https://thumbor.forbes.com/thumbor/960x0/https%3A%2F%2Fblogs-images.forbes.com%2Fkbrauer%2Ffiles%2F2017%2F07%2FFerrari-F40-Interior.jpg>
- [29] Obrázek 24: Ilustrační obrázek řezání kompozitu vodním paprskem, staženo dne: 5.2.2019, dostupné na webu:
https://www.flowwaterjet.cz/FlowWaterjet/media/Flow/6_Learn/Benefits%20of%20Waterjet/Versatility/Composites/Header%20images/CompositeHeader4.jpg?ext=.jpg
- [30] Obrázek 25: Výplň dveří rally vozu, staženo dne: 2.5.2019, dostupné na webu:
<http://skoda.tj/SiteCollectionImages/experience/concepts/fabia-r5-combi/gallery-05.jpg>
- [31] Obrázek 27: Mirkometr, staženo dne: 7.3.2019, dostupné na webu:
<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiZtpahxtjiAhV>

[PJVAKHcyzDVkQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Feshop.mbcas.cz%2Fmikrometry-trmenove-mechanicke%2Ftrmenovy-mikrometr-mitutoyo-0-25mm%2F&psig=AOvVaw14ijxI5O_VhnDCV5tX3a7S&ust=1560037375494875](https://www.mbcas.cz/mikrometry-trmenove-mechanicke%2Ftrmenovy-mikrometr-mitutoyo-0-25mm%2F&psig=AOvVaw14ijxI5O_VhnDCV5tX3a7S&ust=1560037375494875)

[32] Obrázek 29: Použitý teploměr, staženo dne: 7.3.2019, dostupné na webu:

<https://im9.cz/iR/importprodukt-orig/a8a/a8aaa1025a1c034a3de8d87b8dfd1c9a--mmf250x250.jpg>

[33] Obrázek 41: Olympus Lext OLS5000, staženo dne: 20.4.2019, dostupné na webu:

https://static1.olympus-ims.com/data/Image/IE/ols5000/specifications/product_ols5000_specifications_00.jpg?rev=3D3E

[35] Graf 1: Zastoupení kompozitních materiálů v různých oblastech průmyslu , staženo dne: 7.3.2019, dostupné na webu:

<http://www.oica.net/category/industry/materials/composites-materials>

7 Seznam obrázků a tabulek

7.1 Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| OBRÁZEK 1 - PŘÍKLAD UHLÍKOVÉHO PANELU KAROSÉRIE [16] | 8 |
| OBRÁZEK 2 - SYNERGICKÝ EFEKT [03] | 9 |
| OBRÁZEK 3 - ROZDĚLENÍ PODLE VÝZTUŽE [03] | 11 |
| OBRÁZEK 4 - MOŽNOSTI USPOŘÁDÁNÍ VLÁKEN [03] | 12 |
| OBRÁZEK 5 - SCHÉMA SENDVIČOVÉHO KOMPOZITU [17] | 13 |
| OBRÁZEK 6 - UKÁZKA ROLE [18] | 14 |
| OBRÁZEK 7 - SCHÉMA VÝROBY METODOU HMP [19] | 15 |
| OBRÁZEK 8 - ZAŘÍZENÍ K VÝROBĚ PREPREGU [20] | 15 |
| OBRÁZEK 9 - SOYBEAN CAR [21] | 17 |
| OBRÁZEK 10 - STOUT SCARAB, PRVNÍ VŮZ POUŽÍVAJÍC SKLOLAMINÁT | 18 |
| OBRÁZEK 11 - KAISER DARRIN [23] | 18 |
| OBRÁZEK 12 - SINGER SM1500 [24] | 18 |
| OBRÁZEK 13- TRABANT 601 [25] | 19 |
| OBRÁZEK 14 - BT49 [26] | 20 |
| OBRÁZEK 15 - UHLÍKOVÝ MONOKOK MP4-1 [27] | 20 |
| OBRÁZEK 16 - UHLÍKOVÝ KOMPOZIT V INTERIÉRU FERRARI F40 [28] | 21 |
| OBRÁZEK 18- 4X4TWILL PATTERN UKÁZKA [11] | 23 |
| OBRÁZEK 17 - 4X4TWILL PATTERN SCHÉMA [11] | 23 |
| OBRÁZEK 19 - 2X2 TWILL PATTERN [11] | 24 |
| OBRÁZEK 20 - FORMA KRYTU MOTOROVÉHO VOZIDLA | 25 |
| OBRÁZEK 21 - PŘÍPRAVA FORMY | 26 |
| OBRÁZEK 22 - AUTOKLÁV | 27 |
| OBRÁZEK 23 - DVEŘNÍ VÝPLŇ PŘED BROUŠENÍM A LEŠTĚNÍM | 28 |
| OBRÁZEK 24 - ŘEZÁNÍ KOMPOZITU VODNÍM PAPRSKEM [29] | 29 |
| OBRÁZEK 25 - VÝPLŇ DVEŘÍ RALLY VOZU [29] | 29 |
| OBRÁZEK 26 - MÍSTA MĚŘENÍ ROZMĚRŮ NA VZOREČKU | 30 |
| OBRÁZEK 27 – MIKROMETR [31] | 30 |
| OBRÁZEK 28 - MOTOCYKLY, KTERÉ BYLY POUŽITY PRO TESTOVÁNÍ | 31 |
| OBRÁZEK 29 - POUŽITÝ TEPLOMĚR [32] | 31 |
| OBRÁZEK 30 – POHLED DO MOTOROVÉHO PROSTORU W213 220D | 32 |
| OBRÁZEK 31 - POHLED DO MOTOROVÉHO PROSTORU VW LT28 D24 ACT | 33 |

| | |
|---|----|
| OBRÁZEK 32 – POHLED DO MOTOROVÉHO PROSTORU 4G63 EVO IX | 34 |
| OBRÁZEK 33 – POHLED DO MOTOROVÉHO PROSTORU M54B22 BMW E46 | 35 |
| OBRÁZEK 34 – VZORKY PŘIPEVNĚNÉ NA MOTOCYKLU | 37 |
| OBRÁZEK 35 - SCHÉMA PRINCIPU OHYBOVÉ ZKOUŠKY [01] | 39 |
| OBRÁZEK 36 - MĚŘÍCÍ STANOVIŠTĚ | 41 |
| OBRÁZEK 37 - PLASTICS BENDING TESTER TYPE: AS-102 | 41 |
| OBRÁZEK 38 – OVLÁDACÍ PANEL | 41 |
| OBRÁZEK 39 - TVRDOMĚR AKTIEBOL.ALPHA STOCKHOLM | 49 |
| OBRÁZEK 40 - DÍLENSKÝ MIKROSKOP | 49 |
| OBRÁZEK 41 - OLYMPUS LEXT OLS5000 [33] | 51 |
| OBRÁZEK 42 - PROTOKOL MĚŘENÍ PRO REFERENČNÍ VZOREK | 52 |
| OBRÁZEK 43 - PROTOKOL MĚŘENÍ PRO NAMÁHANÝ VZOREK | 52 |
| OBRÁZEK 44 - REFERENČNÍ VZOREK | 53 |
| OBRÁZEK 45 - <200-240> 60X VZOREK | 53 |

7.2 Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| TABULKA 1 - PRŮMĚRNÉ ROZMĚRY | 30 |
| TABULKA 2 - NAMĚŘENÉ TEPLoty V MOTOROVÉM PROSTORU W213 | 32 |
| TABULKA 3 - NAMĚŘENÉ TEPLoty V MOTOROVÉM PROSTORU VW LT | 33 |
| TABULKA 4 - NAMĚŘENÉ TEPLoty V MOTOROVÉM PROSTORU 4G64 | 34 |
| TABULKA 5 - NAMĚŘENÉ TEPLoty V MOTOROVÉM PROSTORU M54B22 | 35 |
| TABULKA 6 - NAMĚŘENÉ TEPLoty V JEDNOTLIVÝCH CYKLECH | 38 |
| TABULKA 7 - ROZMĚRY VZORKŮ PRO ZKOUŠKU OHYBEM [01] | 40 |
| TABULKA 8 - MODULY PRUŽNOSTI V OHYBU E PRO JEDNOTLIVÉ SÉRIE | 44 |
| TABULKA 9 -PRŮMĚRNÉ NAPĚTÍ V OHYBU PRO JEDNOLIVÉ SÉRIE | 46 |
| TABULKA 10 - DRSNOST | 52 |