

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálů a strojírenské technologie



Diplomová práce

**Mechanické vlastnosti karbonových kompozitů
využívaných v brzdových systémech**

Matyáš Uldrich

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Matyáš Uldrich

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Mechanické vlastnosti karbonových kompozitů využívaných v brzdových systémech

Název anglicky

Mechanical properties of carbon composites used in braking systems

Cíle práce

Cílem diplomové práce je popsání mechanických charakteristik karbonových kompozitních systémů, které nalézají své využití v brzdových systémech dopravních prostředků. Mezi dílčí cíle práce patří provedení literární rešerše, na základě které bude vhodně indikován experimentální program řešící zadanou problematiku. Řešení experimentálního programu povede k vlastnímu hodnocení různých druhů karbonových kompozitů a k návrhu optimalizace kompozitního systému pro brzdové systémy.

Metodika

- Současný stav řešeného problému (literární rešerše).
- Vlastní experimentální program (laboratorní experiment).
- Závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

60 s.

Klíčová slova

Matrice, opotřebení, pevnost v tahu, plnivo.

Doporučené zdroje informací

BERTHELOT, J.: Composite materials: Mechanical behavior and structural analysis, New York: Springer, 1999, 646 s.

Časopisy: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Composites Part B: Engineering, Journal of Adhesion and Adhesives, Wear

HARIK, Vasyl M. Mechanics of carbon nanotubes: fundamentals, modeling and safety. Cambridge, United States; Kidlington, Oxford, United Kingdom; London, United Kingdom; San Diego, United States;:

Academic Press, Elsevier, 2018. ISBN 9780128110713; 0128110716

MESSINA, Giacomo a Saveria SANTANGELO. Carbon: the future material for advanced technology applications. Berlin: Springer, 2006. ISBN 9783540295310; 3540295313

MLEZIVA, J.: Polymery: Výroba, Struktura, Vlastnosti a Použití, 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 537 s. PARK, Soo-Jin. Carbon fibers. Dordrecht: Springer, 2015. ISBN 9789401794770; 9401794774

PARTRIDGE, IVANA K.: Advanced Composites 1. ed. London: Elsevier Applied Science, 1989, 452 s.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Mechanické vlastnosti karbonových kompozitů využívaných v brzdových systémech" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. 3. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Petru Valáškoví a vedoucímu katedry Miroslavu Müllerovi za pomoc při práci na experimentálním programu.

Mechanické vlastnosti karbonových kompozitů využívaných v brzdových systémech

Abstrakt

První část práce se zabývá rešerší druhů karbonových kompozitů využívaných v brzdových systémech dopravních prostředků a zabývá se aplikací těchto materiálů v závodních a sportovních automobilech, letectví a rychlovlacích. Zároveň shromažďuje teoretické informace o možnosti využití karbonových kompozitů pro výrobu brzdových kotoučů na jízdní kolo.

Experimentální část práce zkoumá brzdové kotouče na jízdní kolo z karbonového kompozitu s polymerní matricí. Ruční laminací je vyrobeno 5 variant karbonového kompozitu lišících se skladbou vláken a příměsí karbidu křemíku. Pro porovnání kotoučů jsou stanovena následující měření: maximální brzdový účinek dle normy ISO 4210-4, efektivita brždění, a teplota s opotřebením brzdového kotouče po definovaném sjezdu. Výsledky kompozitů jsou porovnány mezi sebou a s kovovými variantami z hliníkové slitiny a s konvenčním kotoučem z nerezové oceli. Výsledky měření efektivity a maximálního brzdového účinku vyšly pro kompozity velmi pozitivně, naopak při měření teploty došlo při teplotách nad 200 °C k delaminaci a destrukci dvou vzorků.

Závěr zhodnocuje možnost použití karbonových brzdových kotoučů na některé závodní cyklistické disciplíny, kde nedochází k výraznému tepelnému namáhání. Hlavní výhodou kompozitního brzdového kotouče je velmi nízká hmotnost, která je téměř poloviční ve srovnání s nejlehčími konvenčními ocelovými kotouči.

Klíčová slova: karbon, brzdový kotouč, jízdní kolo, tření

Mechanical properties of carbon composites used in braking systems

Abstract

First part of the thesis is a research of carbon composite types used in vehicle brake systems, focusing on the application in racing and sports cars, aviation, and high-speed trains. It also collects theoretical information on the possibility of usage carbon composite material for manufacturing brake disc for a bicycle.

The experimental part of the work examines bicycle brake discs made of carbon fiber with polymer matrix. Five variants of the carbon composite is made by hand laminate, differing in fiber composition and silicon carbide filler. For comparing the discs were chosen experiments investigating: maximum braking performance according to ISO 4210-4 standard, braking efficiency, temperature and wear of the brake discs after defined descent. The results of the composites are compared among themselves and with metallic variants made of aluminium alloy and a conventional stainless-steel disc. The results of maximum braking performance and braking efficiency are very positive for the composites, however during temperature measuring delamination and destruction of two samples occurred at temperatures above 200 °C.

The conclusion evaluates the possibility of using carbon brake discs for certain cycling race disciplines where is no significant thermal stress. The main advantage of composite brake disc is very low weight, which is almost half of lightest conventional steel discs.

Keywords: carbon, brake disc, bicycle, friction

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce.....	2
3 Úvod do karbonových kompozitů	3
3.1 Rozdělení fází kompozitu	4
3.1.1 Výztuž – karbonová vlákna	4
3.1.2 Druhy matric	5
4 Karbonové kompozity využívané v brzdových systémech dopravních prostředků ...	8
4.1 Používané materiály	8
4.1.1 Karbon-polymer	8
4.1.2 Karbon-keramika	11
4.1.3 Karbon-karbon.....	13
4.1.4 Porovnání kompozitů s kovy	16
4.1.5 Materiály brzdového obložení	18
4.2 Aplikace karbonových kompozitů v brzdových systémech dopravních prostředků	20
4.2.1 Letectví	20
4.2.2 Závodní automobily.....	22
4.2.3 Sériově vyráběné sportovní automobily	25
4.2.4 Vysokorychlostní kolejová vozidla	27
4.2.5 Jízdní kola.....	28
5 Metodika výroby a měření brzdových kotoučů na jízdní kolo z karbonového kompozitu.....	30
5.1 Teoretické předpoklady	30
5.1.1 Disciplíny s možností uplatnění karbonových brzdových kotoučů.....	31
5.2 Zvolené varianty materiálu	33
5.2.1 Varianta 1 - bez příměsí.....	33
5.2.2 Varianta 2 - bez příměsí, povrch z plátňové tkaniny	33
5.2.3 Varianta 3 – příměs 5 % SiC F240.....	34
5.2.4 Varianta 4 – příměs 10 % SiC F240	34
5.2.5 Varianta 5 – příměs 2,5 % SiC F1000.....	34
5.2.6 Kovové varianty	35
5.3 Metodika výroby brzdových kotoučů z karbonového kompozitu	36
5.4 Metodika měření brzdových kotoučů	40
5.4.1 Měření maximálního brzdného účinku dle normy	41

5.4.2	Měření efektivity brždění	43
5.4.3	Měření teploty	43
5.4.4	Měření opotřebení.....	44
5.4.5	Obrazová analýza elektronovým mikroskopem	44
5.4.6	Vyhodnocení výsledků	44
6	Výsledky, vyhodnocení a diskuse	45
6.1	Výsledky měření	45
6.1.1	Měření maximálního brzdného účinku dle normy	45
6.1.2	Měření efektivity brždění	46
6.1.3	Měření teploty	47
6.1.4	Měření opotřebení brzdových kotoučů.....	50
6.2	Vyhodnocení hmotnosti karbonových brzdových kotoučů	51
6.3	Vyhodnocení výsledků měření	51
6.4	Vyhodnocení obrazové analýzy elektronovým mikroskopem.....	52
6.5	Zhodnocení využití karbonového kotouče pro jízdní kolo v praxi	55
7	Přínos práce.....	57
8	Závěr	58
9	Seznam použitých zdrojů	59

1 Úvod

Brzdové ústrojí je nutným bezpečnostním prvkem každého dopravního prostředku. U většiny dopravních prostředků vybavených kotoučovými brzdami jsou používány brzdové kotouče z litiny nebo nerezové oceli. Jejich snadná a levná výroba, vysoká životnost a pro většinu aplikací dostatečné tepelné vlastnosti je staví do vhodné pozice pro masové využití.

Pokud jsou však na brzdy kladeny vyšší nároky jako vysoký brzdný účinek, jeho zachování i při vyšších teplotách a nízká hmotnost brzdových komponent, je nutné využít právě kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny. Pomocí těchto materiálů lze dosáhnout kotoučů i desetinové hmotnosti litinových, výrazně větší stability při vysokých teplotách a vyššího brzdného účinku. Daní za tyto benefity je však velmi vysoká pořizovací cena odvíjející se od nákladných výrobních procesů kompozitů s karbonovou a keramickou maticí. Přesto se karbonové kompozity s těmito maticemi hojně využívají v brzdových systémech závodních automobilů, dopravních a vojenských letadlech nebo třeba v rychlovlacích. Bylo však možné karbonový kompozit využít i při konstrukci brzdového kotouče jízdního kola? Právě kvůli vysokým výrobním nákladům nejsou kompozity s keramickou a karbonovou maticí pro brzdové kotouče jízdního kola z ekonomického hlediska vhodné. Jednodušší a levnější výrobu nabízí kompozity s polymerní maticí, které však nedisponují velkými tepelnými odolnostmi. Přesto by pro některé cyklistické disciplíny, kde nedochází k velkému tepelnému namáhání brzdových kotoučů, bylo možné tento materiál pro aplikaci na jízdních kolech použít.

2 Cíl práce

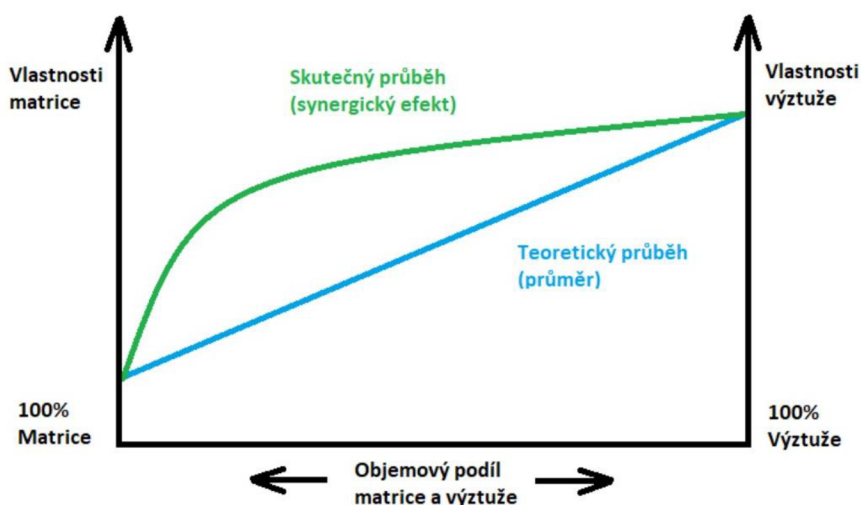
Cílem rešeršní části práce je sumarizovat informace a popsat využívané varianty karbonových kompozitů v brzdových systémech dopravních prostředků.

V experimentální části práce je cílem pomocí zjištěných teoretických podkladů navrhnout a vyrobit brzdové kotouče jízdního kola z karbonového kompozitu. Hlavním cílem experimentu je odlehčení tohoto komponentu oproti konvenčně používanému ocelovému řešení. Mezi dílčí cíle patří měření a následné porovnání výsledků jak různých druhů karbonových kompozitů mezi sebou, tak kompozitů s kovovými alternativami. Výstupem práce je zhodnocení použitelnosti karbonového kompozitu pro tuto aplikaci v praxi.

3 Úvod do karbonových kompozitů

Kompozity obecně jsou materiály složené alespoň ze dvou chemicky odlišných látek. Cílem výroby kompozitu je vytvoření materiálu s unikátními fyzikálními vlastnostmi, které převyšují teoretický poměrný součet vlastností jednotlivých komponent. Tento jev, známý jako synergický efekt, je znázorněn na obrázku č. 1. Principem synergického efektu je možnost získat materiál, který kombinuje pozitivní vlastnosti jednotlivých složek a eliminuje ty negativní. [1, 2]

Obrázek 1 Synergický efekt kompozitu [3]

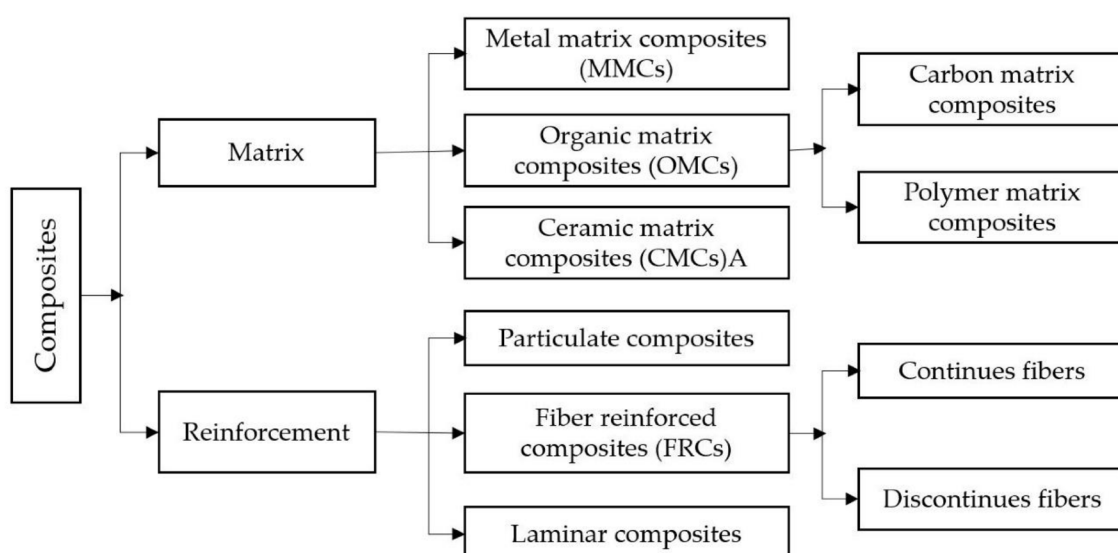


Kompozitů existuje nespočet variant. V první řadě je na výběr z několika používaných typů výztuží a matic. Každá výztuž a matrice má však mnoho podob. Pokud se vezmou v úvahu například karbonová vlákna a polymerní matricí, tak vláken existuje několik druhů s různými mechanickými vlastnostmi a polymerních matic je nespočet typů lišících se chemickým složením a tím dosahujících rozdílných vlastností jak mechanických, tak například chemických a teplotních odolností. Dalším zásadním aspektem ovlivňujícím výsledné vlastnosti kompozitu délka a skladba vláken (typ tkaniny, gramáž tkaniny, vzájemná orientace vláken a počet vrstev). A v neposlední řadě má samozřejmě vliv na charakteristiku finálního dílu zvolená technologie výroby a její jakost. Z výčtu těchto variabilních faktorů je zřejmé, že každý kompozit (i v případě stejné matrice a výztuže) může mít velmi odlišné vlastnosti. Proto se vlastnosti těchto materiálů obecně poměrně špatně kvantifikují. [1, 2]

3.1 Rozdělení fází kompozitu

Každý kompozit se skládá nejméně ze dvou složek, kdy vždy alespoň jedna musí být výztuží a alespoň jedna maticí. Vlastností výztuže je vysoká pevnost v tahu, proto je její úlohou přenášet zatížení. Výztuž má obvykle nespojitý charakter, nejčastěji je tvořena vlákny. Matrice je v zásadě spojitého charakteru a má za úkol výztuž pojit a definovat tvar výrobku. V případě karbonových kompozitů jsou výztuži právě karbonová vlákna, která mohou mít různou podobu. Nejčastěji používanými maticemi jsou epoxidové a polyesterové pryskyřice, ale používají se i matrice například na bázi keramiky, slitin lehkých kovů, jak je zobrazeno na obrázku 2. [1, 4]

Obrázek 2 Základní rozdělení kompozitních materiálů [5]



3.1.1 Výztuž – karbonová vlákna

Výztuž se skládá z karbonových, nebo jinak řečeno uhlíkových vláken, která jsou známa vynikajícími mechanickými vlastnostmi na tah ve směru os vláken, ale výrazně zaostávající únosností v dalších směrech. Používané struktury výztuží z uhlíkových vláken se liší délkou použitých vláken a jejich vzájemným uspořádáním. [6]

Krátká sekaná vlákna (nespojité) jsou finančně nejdostupnější variantou karbonové výztuže. Obvykle jsou používána při náhodné orientaci vláken, kdy má výsledný kompozit téměř izotropní vlastnosti a únosnost srovnatelnou ve všech směrech, jejíž hodnota je ale výrazně nižší než u kompozitu s dlouhými vlákny kladenými cíleně s ohledem na následné zatížení dílu. Tento typ karbonového kompozitu s krátkými vlákny tzv. Forged carbon fiber lze využít

u méně mechanicky namáhaných dílů, nebo dílů s komplikovaným tvarem, pro které nejsou dlouhá vlákna vhodná z výrobního hlediska. [6, 7]

Dlouhá vlákna se používají buďto ve formě tzv. rovingu, což je netkaný pramen o určitém počtu uhlíkových vláken. Tyto prameny se používají obvykle k vyztužení namáhaných míst a spojů, jsou dodávány namotané v cívkách. [7]

Nejrozšířenější formou dlouhých uhlíkových vláken jsou tkaniny, které se mezi sebou liší orientací vláken a vazbou. Jednosměrné tkaniny tzv. unidirectional se skládají z vláken vedoucích pouze jedním směrem, které pohromadě drží kolmé prošívané nitě. Tyto tkaniny se používají u dílů zatížených pouze v jednom směru, nebo v kombinaci s jinými tkaninami. [7]

Dvousměrné tkaniny kombinují vlákna dvou na sebe kolmých směrů a liší se typem vazby. Nejběžnějším typem je vazba plátňová, která nabízí nejvyšší pevnost, ale je nejméně poddajná, hodí se zejména na rovinné díly. Druhou hojně používanou vazbou uhlíkových vláken je kepr. Keprová vazba umožňuje díky své struktuře posuv jednotlivých pramenů vůči sobě, díky kterému je tkanina flexibilnější a lze použít i na tvarově složitější díly. Dalšími používanými vazbami jsou atlasová a saténová, pro speciální aplikace se používají další speciální tkaniny. [7]

Samotná uhlíková vlákna pak rozdělujeme dle původu a výrobní technologie na vlákna na bázi polyakrylonitrilu (PAN), která zastupují většinou část celosvětové produkce. A dále to jsou vlákna vyráběná ze smol, která mívají obvykle horší mechanické vlastnosti a používají se například na zpevnění materiálů jako jsou betony a některé slitiny lehkých kovů. [1]

3.1.2 Druhy matric

Polymerní matrice

Polymerní matrice, jsou jednoznačně nejpoužívanějšími díky své dostupnosti a méně energeticky náročné výrobě oproti ostatním typům matric. U většiny termosetických matric k vytvrzení dojde i při pokojové teplotě, u některých typů je nutné pro dosažení požadovaných vlastností takzvané temperování, které spočívá v přesně definovaném zahřívání v peci. [6]

Jako termosety se nejčastěji používají matrice na bázi epoxidů, které se aktivují smícháním dvou složek (pryskyřice a tužidla). Dané složky musí být spolu kompatibilní a je výrobcem definován jejich hmotnostní poměr pro sloučení a doba zpracovatelnosti konkrétního páru.

Další typ dvousložkové termosetické matrice je na bázi polyesterů. Ty jsou ve srovnání s epoxidy finančně dostupnější, ale nesnesou takové mechanické namáhání. Fenol-formaldehydové pryskyřice se používají v tvz. preprezích. Prepreg je předem výrobcem naimpregnovaná tkanina, jejíž matrice se aktivuje zvýšením teploty a tlaku po uzavření výrobku do formy. [6, 7]

Termoplastické matrice jsou, jak název napovídá, zpracovatelné nad určitou teplotou tání, která je obvykle mezi 300 a 400 °C. Na rozdíl od termosetů jsou opakovatelně přetvořitelné při zahřátí. Krom této recyklovatelnosti mají výhody i v jednoduché výrobě a větší pružnosti, ale nedosahují mechanických únosností srovnatelnými s epoxidy. Nejčastěji používané termoplasty jsou na bázi polyimidů (PI) polyethersulfonů (PES) a polyetherimidů (PEI). [6]

Uhlíková matrice

Uhlíkové matrice jsou používány ve speciální aplikacích, kde je abnormální tepelné namáhání materiálu. Kompozity s touto matricí jsou extrémně náročné na výrobu, a to hlavně z energetického hlediska. Jsou vyráběny opakovaným dlouhodobým zahříváním v inertní atmosféře na vysoké teploty až 3000 °C. Při těchto teplotách dochází k pyrolýze, kdy se postupně odštěpují všechny atomy krom uhlíku. Vzniklý kompozit je nazýván karbon-karbon. Koeficient tepelné roztažnosti tohoto kompozitu se blíží nule a materiál je po ošetření proti oxidaci schopen pracovat v teplotách až 2800 °C. Proto nachází uplatnění hlavně v letectví a kosmonautice jako materiál tepelných štítů, raketových motorů a kotoučových brzd letadel, formulí 1 apod. Více informací o kompozitech karbon-karbon viz kapitola 4.1.3 [1, 6]

Slitiny lehkých kovů

Jako matrici karbonového kompozitu je možné použít i slitiny lehkých kovů jako například hliník, hořčík, titan nebo měď. Uhlíková vlákna ve slitinách lehkých kovů snižují koeficient tepelné roztažnosti a zvyšují tepelnou vodivost. Snížením hustoty a zvýšením pevnosti kompozitu oproti samotné slitině lehkého kovu je možné dosáhnout nižších hmotností součástí při srovnatelných mechanických vlastnostech. Pro kombinaci těchto vlastností jsou tyto kompozity využívány například v elektronice a chladících zařízeních oběžných satelitů. [1, 6]

Nejrozšířenější technologií výroby kompozitů s kovovou maticí je difúze v kontaktu obou materiálů při zvýšeném tlaku nebo teplotě, bez fázové přeměny. Finančně nejvýhodnější metodou je prášková metalurgie, kde je mísí kov s namletým uhlíkem. Třetí metodě výroby kompozitů s těmito maticemi předchází kompozit s polymerní maticí, který je vrstven střídavě s kovem a následně nízkoteplotně lisován tlakem 15–30 MPa bez přítomnosti kyslíku, aby bylo zamezeno oxidaci. Principem další technologie výroby je disperze kovu a vrstev karbonových vláken při lisování za zvýšené teploty. Tato technologie je nejnáročnější, ale díky fázové přeměně kovu dojde k nejlepšímu spojení obou složek a tím je docíleno lepších vlastností než u předchozích dvou metod. [8]

Keramická matrice

Matrice na principu keramiky lze rozdělit na matrice betonové a sádrové, dále skelné, nebo na bázi samotných keramických sloučenin jako MgO , Al_2O_3 a SiC . Volba konkrétního typu závisí na aplikaci a požadavcích na materiál, ale obecně jsou kompozity s keramickou maticí tepelně stabilní podobně jako kompozity karbon-karbon, ale obvykle ne až do tak extrémních teplot. Oproti nim jsou ale odolnější proti oxidaci i při zvýšených teplotách bez nutnosti ošetření. Metod výroby keramických kompozitů je poměrně mnoho, pro různé typy matic se používají různé technologie. Část z nich je podobná výrobě kompozitů s maticí z lehkých slitin kovů jako prášková metalurgie, lisování za běžné nebo zvýšené teploty nebo pyrolýza podobná jako u uhlíkové matrice. [6]

4 Karbonové kompozity využívané v brzdových systémech dopravních prostředků

Brzdný účinek vzniká třením kontaktní plochy brzdového kotouče nebo bubnu s brzdovým obložením. Konvenčním materiálem třecích brzdových systémů dopravních prostředků je litina. Brzdová obložení mohou být z různých materiálů, nejběžnější jsou organické směsi. Kombinace těchto materiálů je finančně dostupná, jednoduchá na výrobu a poskytovaným brzdným výkonem dostatečnými pro většinu aplikací. Ale pokud jsou na brzdy kladeny vyšší nároky, jako vysoký brzdný účinek, jeho zachování i při vyšších teplotách a nízká hmotnost brzdových komponent, je nutné využít právě kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny. [9]

4.1 Používané materiály

Karbonové kompozity využívané v brzdových systémech lze rozdělit dle použité matrice. Právě druh matrice definuje mechanické, a hlavně tepelné vlastnosti výsledného kompozitu a jeho vhodnost pro konkrétní aplikace. [6]

4.1.1 Karbon-polymer

Kompozity s polymerní epoxidovou matricí jsou zdaleka nejpoužívanějšími karbonovými kompozity. Relativně málo energeticky náročná výroba, nízká hustota, vysoká pevnost a tuhost a další pozitivní vlastnosti nahrávají využití těchto materiálů v mnoha aplikacích napříč různými odvětvími. Komponenty z karbon-polymer kompozitů jsou nezbytnou součástí strojů v letectví, armádní technice, závodních automobilech a motocyklech, ale najdeme je hojně v různých sportovních vybaveních (jízdni kola, tenisové rakety, lyže, hokejky, kánoe a mnoho dalších), mimo to ve zdravotnictví, stavebnictví atd. [2]

Pro konstrukci třecích brzd se polymerní kompozity běžně nepoužívají, a to zejména kvůli nízké odolnosti pryskyřic vůči zvýšeným teplotám. Teplo se generuje u třecích brzd vždy (pokud se nejedná o brzdu stacionární) a jeho množství se odvíjí od konkrétní aplikace a zatížení. U některých strojů, kde jsou například nižší třecí rychlosti nebo síly, by však teoreticky bylo využití těchto materiálů pro konstrukci brzdových ploch možné. Teplotní odolnost polymerních pryskyřic se liší na základě jejich složení, ty teplotně odolnější po teplotě při výrobě mohou být odolné teplotám okolo 200 °C, což může být dostatečné pro některá použití. [1]

Na druhou stranu uhlíkový kompozit s polymerní matricí má i pro konstrukci třecích brzd mnoho pozitivních předpokladů. Jak bylo již zmíněno zásadní výhodou je nízká hustota a s ní spojená hmotnost při zachování vysoké pevnosti. Zejména vůči konvenčně používané litině, s hustotou $7,3 \text{ g/cm}^3$ je rozdíl v hmotnosti velmi značný. Hustota samotných uhlíkových vláken se pohybuje okolo $1,8 \text{ g/cm}^3$. U matrice zaleží na konkrétním složení, ale obecně polymerní matrice s hustotou okolo $1,5 \text{ g/cm}^3$ bývají lehčí než ostatní typy. Pro srovnání uhlíkové matrice mívají cca $1,8 \text{ g/cm}^3$, slitiny lehkých kovů okolo $2,7 \text{ g/cm}^3$ a keramika dosahuje největší hustoty kolem $3,3 \text{ g/cm}^3$. [1, 10]

Jelikož při vzájemném tření brzdových ploch vznikají vibrace, další ceněnou vlastností karbonových kompozitů je dobrá schopnost tlumit vibrace. Vibrace dobře pohlcují jak samotná karbonová vlákna, tak i polymerní matrice. Pásmo frekvencí, které karbonové kompozity dobře pohlcují mohou být nespojitá a pro každý kompozit odlišná. Závisí na složení polymerů matrice, jejímu poměru vůči výztuži, použitých vlákních, jejich uspořádání a délce (dlouhá vlákna tlumí lépe než krátká). [6, 11]

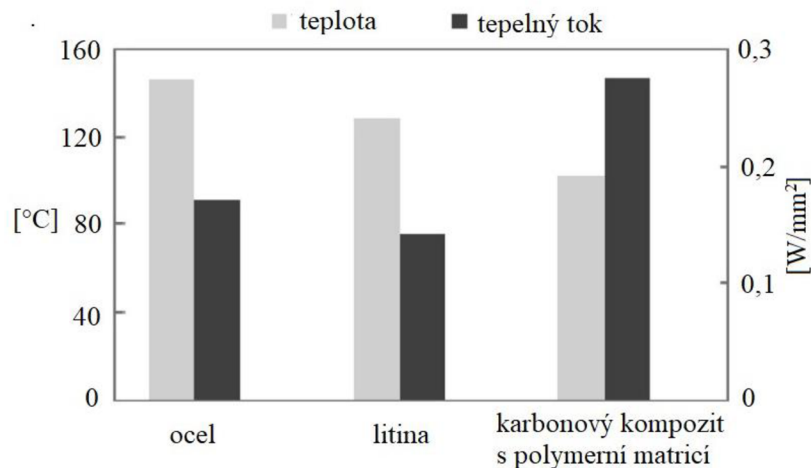
Odolnost proti korozi za normálních teplot je další výhodou oproti konvenčnímu litinovému řešení brzdových kotoučů. Ale při teplotách překračujících $400 \text{ }^\circ\text{C}$ může docházet k oxidaci karbonových vláken, u kompozitů s polymerní matricí má však právě matrice nižší teplotní limit, kdy při jeho překročení začne materiál ztrácet své mechanické vlastnosti. [6]

Další nespornou výhodou je velmi nízká teplotní roztažnost karbonových kompozitů. U kompozitů na bázi polymerní matrice efekt není tak velký, jelikož rozdíly únosných teplot jsou menší než třeba u karbon-karbon kompozitů. [6]

Problém s nedostatečnou tepelnou odolností polymerů částečně řeší poměrně dobrá tepelná vodivost karbonových vláken a jejich vysoká měrná tepelná kapacita, díky které jsou ve srovnání s ocelí/litinou schopny pojmout více tepla vzniklého třením při brzdění. Epoxidové pryskyřice mají také poměrně velkou měrnou tepelnou kapacitu, ale jejich tepelná vodivost je nízká. Zvýšení tepelné vodivosti a odvodu tepla do okolí je možné například vložení grafitového plátu mezi vrstvy tkaniny. [6, 12]

Jak je znázorněno na obrázku 3, dle výpočetních simulací by se brzdový kotouč z karbonového kompozitu s polymerní matricí při stejném tření měl ohřát na nižší teplotu než stejný kotouč z oceli a litiny. [13]

Obrázek 3 Porovnání tepelného chování brzdových kotoučů pomocí počítačové simulace [13]



Výroba karbon-polymerů

Jelikož je mnoho variant karbonových kompozitů s polymerní matricí, existuje i mnoho různých metod jejich výroby. Volba výrobní technologie se odvíjí zejména od sériovosti výroby, tvaru výrobku, nároků na kvalitu výsledného dílu, vybavenosti pracoviště a druhu konkrétních složek kompozitu. [1]

U většiny technologií výroby je zapotřebí forma pro každý konkrétní díl. Pokud není forma dělená, která objímá díl ze všech stran, volí se forma pozitivní nebo negativní podle strany pohledového (nebo funkčního) povrchu dílu. Pro výrobu formy se volí nejrůznějších materiálů zejména podle množství výrobků, na které má forma sloužit. Ze zkušeností autora vyplývá, že pro prototypovou/jednotkovou výrobu, zejména u pozitivních forem, lze použít například extrudovaného polystyrenu, který je jednoduše ručně i strojově opracovatelný. Používá se například i ruční laminace kompozitu ze skelných vláken, který po vytvrzení slouží naopak jako negativní forma. U sériové výroby se nejčastěji používají formy obráběné z bloků hliníkové slitiny. K přenesení tvaru z počítačového 3D modelu slouží CNC obráběcí stroje a 3D tiskárny. [1]

Nejjednodušší metoda výroby karbonových kompozitů s polymerní matricí je smísení krátkých sekaných karbonových vláken s pryskyřicí ve vhodném poměru a následném vytvrzení ve formě při působení tlaku. [6]

Nejstarší a stále nejčastěji používanou metodou, zejména u malosériové výroby je ruční laminace. Při ručním laminování pracovník pokládá do formy kousky karbonových tkanin dle kladenského plánu a mezitím je prosycuje pryskyřicí. O něco sofistikovanější, ale dražší je

práce s prepregem, což je předem od výrobce naimpregnovaná tkanina pryskyřicí, u které následné vytvrzení probíhá při zvýšené teplotě, případně i tlaku. [1, 6]

Technologie využívaná obvykle pro sériovou výrobu nebo pro velké kompozitní výrobky se nazývá Resin Transfer Molding. Při RTM se vyskládá suchá karbonová vlákna do formy a jejich prosycení poté probíhá tlakovým vtačováním matrice do formy, nebo podtlakovým vysáváním vzduchu a nasáváním pryskyřice. [1, 6]

Velmi specifickou technologií výroby kompozitů je navíjení. Je vhodné zejména pro výrobky trubkového tvaru, které se otáčejí na rotačním trnu a postupně navíjejí karbonová vlákna v podobně dlouhého rovingu. Touto technologií lze vyrobit přesně nakonfigurované trubky s konkrétními mechanickými vlastnostmi jako pevností a tuhostí na ohyb, krut, tah apod. Tato metoda se kvůli své omezenosti tvarů pro výrobu komponentů třecích brzd neuplatňuje. [1]

4.1.2 Karbon-keramika

Jak je zmíněno výše, keramických matric existuje více typů, pro využití v brzdových systémech se používá kompozit s keramickou maticí na bázi karbidu křemíku, který je velmi dobrým abrazivem a je chemicky kompatibilní s uhlíkovými vlákny, bez nežádoucích reakcí. [6]

Karbonové kompozity s keramickou maticí se používají jako materiály například pro výrobu brzdových kotoučů některých letadel, vysokorychlostních vlaků, sportovních a závodních automobilů, ale i jako součástky leteckých motorů, palivových čerpadel atd. [14]

Keramika zajišťuje oproti polymerní maticí výrazně vyšší odolnost vůči zvýšené teplotě. Tepelná odolnost se liší dle konkrétního složení kompozitu a výrobního procesu, ale obvykle je nad hranicí 1000 °C. Mezi další pozitivní vlastnosti těchto materiálů patří velmi nízká tepelná roztažnost, vysoká tepelná vodivost a měrná kapacita. Klíčovým faktorem materiálu pro třecí brzdy je koeficient tření, který je pro tyto karbonové kompozity s použitím vhodného brzdového obložení vysoký a poměrně konzistentní i při velkých rozdílech teplot. Díky tomu je brzdný účinek stálý a brzdy nevadnou při vyšších teplotách. [1, 14, 15]

Matrice na keramické bázi je velmi tvrdá a v kombinaci s karbonovými vlákny vysoce odolná vůči otěru. Proto karbon-keramické brzdové kotouče u sportovních automobilů mají násobně delší životnost než litinové. Za životnost takového kotouče se opotřebuje jeho brzdná plocha maximálně o nízké jednotky milimetrů v závislosti na konstrukci kotouče. S ohledem na

plánované zavádění redukce emisí otěrových částic brzd tato vlastnost nabírá na větším významu. Tvrdost materiálu sebou nese i nevýhodu ve ztrátě schopnosti pohlcovat vibrace, což v některých případech vede k nepříjemným zvukovým projevům při brždění. [1, 11, 15]

Keramická matrice má vyšší hustotu ve srovnání s polymerní a karbonovou, přesto výsledný karbon-keramický brzdový kotouč váží přibližně polovinu konvenčního litinového ekvivalentu. [16]

Výroba karbon-keramiky

Největší nevýhodou karbon-keramických kompozitů na bázi SiC je velmi energeticky, a proto i finančně náročná výroba. Technologií výroby je více, ale všechny vyžadují dlouhodobé zahřívání na vysoké teploty vysoko přes 1000 °C. [6]

Jako výztuž jsou používána většinou krátká sekaná uhlíková vlákna. Aby byla výroba těchto materiálů udržitelnější, experimentuje se s využíváním zbytků a odřezků uhlíkových vláken například z produkce polymerních kompozitů. Dle výsledků by se touto cestou mohla stát výroba karbon-keramických brzdových komponentů o něco levnější a ohleduplnější vůči životnímu prostředí. [16]

Nejpoužívanější výrobní technologie pro tyto materiály spočívá ve smísení krátkých karbonových vláken s polymery vhodného chemického složení dle požadovaného druhu keramiky. Nutností je, aby polymery měly velký podíl keramické složky, nízkou viskozitu a dobrou smáčivost vláken. Pro vytvoření keramiky na bázi SiC se používají polysilastyreny a polykarbosilany. Následně při zvýšeném tlaku a teplotách 500–1000 °C dochází k pyrolýze, kdy je materiál zbaven nežádoucích složek polymerů vyjma složky keramické. Dále je materiál vystaven teplotám okolo 1500 °C, kdy se ztvrdí krystalická struktura keramiky. Nevýhodou této metody je rozměrové smrštění materiálu, ke kterému dochází při pyrolýze. [6]

Druhou možností spojení keramiky s uhlíkovými vlákny je přidání křemíkového prášku do směsi s vlákny, která je následně zahřívána. Ve vakuu při teplotě 1420 °C se křemíkový prach roztaví na kapalinu a reaguje s jemnými karbonovými vlákny, která jsou postupně roztaveným křemíkem nasycována. Variace této technologie je používána i k výrobě materiálu zvaného jako karbon-karbon-SiC, který kombinuje karbonovou a keramickou matici. [6]

Třetí, méně používanou metodou je vypařování Methyltrichlorosilanu, navázaného na vodík, do karbonových vláken při teplotě 1000 °C. Tento proces je vhodný i pro delší uhlíková vlákna, ale jeho abnormální časová náročnost (v měsících) ho řadí mezi pouze okrajově používané technologie. [6]

4.1.3 Karbon-karbon

Karbonové kompozity s uhlíkovou maticí vynikají svými vlastnostmi při vysokých teplotách ještě více než karbon-keramické. Oproti keramice je nutné materiály ošetřit proti oxidaci, které podléhají už při teplotě nad 320 °C. Více o ošetření proti oxidaci v podkapitole „Výroba“. Po tomto ošetření jsou kompozity s uhlíkovou maticí schopny pracovat až do teplot 2800 °C dle jejich typu a zpracování. Na obrázku 4 je příklad vlastností tří různých kompozitů karbon-karbon, všech zpracovávaných při teplotě 3000 °C. Výztuž kompozitů A a B je ve formě plsti, což jsou náhodně orientovaná dlouhá vlákna. V případě vzorku A se jedná o 47 hmot. % výztuže z vláken na bázi smol, u vzorku B je to 34 hmot. % vláken PAN z celkové hmotnosti kompozitu. Vzorek C je vyroben pomocí karbonových tkanin z vláken vyrobených z umělého hedvábí. Z mechanických vlastností měřených při různých teplotách je patrné, že pevnostní vlastnosti se zvyšující teplotou zlepšují, což neplatí u ostatních řešených materiálů. [6, 17]

Obrázek 4 Příklady mechanických vlastností karbon-karbon kompozitů [6]

	A ^a	B ^b	C ^c
Bulk density (g/cm ³)	1.68	1.77	1.57
Young's modulus (GPa)	13.5	26.3	17.0
Vickers hardness ^d (MPa)	135	163	–
Bending strength (MPa)	65.7	96.9	–
Tensile strength (MPa)	R.T. 35.7	55.4	68
	800°C 43.4	65.4	88
	1 600°C 42.0	50.4	102
	2 400°C 62.7	83.0	111
Fracture toughness (MPa.m ^{1/2})	R.T. 2.96	3.44	4.0
	800°C 2.82	3.58	5.5
	1 600°C 4.64	6.75	6.1
	2 400°C 5.30	12.9	7.0
Thermal diffusivity (mm ² /sec)	62.4	56.6	–
Thermal shock resistance (W/mm)	≈148	≈155	≈171
Thermal shock fracture toughness (W/mm ^{1/2})	≈779	≈805	≈856

^aPitch carbon-carbon composite.

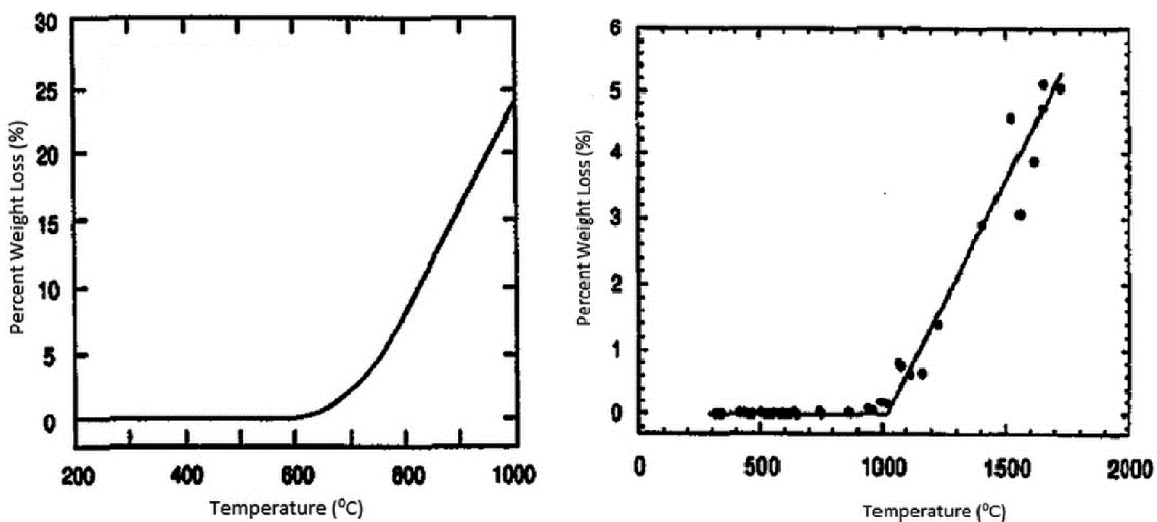
^bPAN carbon-carbon composite.

^cTwo-dimensional rayon carbon-carbon composite.

Koeficient tření pro karbon-karbon kompozity dosahuje hodnot i přes 0,5, což umožňuje vyvinout velký brzdný účinek. Třecí koeficient ale nabývá této hodnoty až při zvýšené teplotě, obvykle nad 350 °C v závislosti na přesném druhu materiálu. Zároveň při vyšších

teplotách (v závislosti na ošetření povrchu od 700 nebo 1000 °C, jak je vidět na obrázku 5) dochází k výraznému zvýšení oxidačního a abrazivního opotřebení brzdných ploch, proto je klíčové udržovat tyto brzdy v optimálním teplotním intervalu. [17, 18]

Obrázek 5 Graf znázorňující zvýšení opotřebení při překročení teploty meze oxidace [17]



S hustotou uhlíkové matrice okolo 1,8 g/cm³ je hmotnost například brzdového kotouče z karbon-karbon kompozitu přibližně poloviční než u karbon-keramické varianty, což znamená čtvrtinu oproti konvenčnímu litinovému kotouči. [1]

Díky absenci tvrdé keramiky karbon-karbon výrazně lépe pohlcuje vibrace vytvořené třením brzdových elementů. Ve srovnání s polymerní matricí má vyšší rezonanční frekvenci, která závisí i na délce použitých vláken. [6]

Samotná uhlíková vlákna mají velmi dobrou tepelnou vodivost až 1900 W/mK při 25 °C. Proto i kompozit karbon-karbon má ve srovnání s jinými materiály výrazně vyšší tepelnou vodivost (běžně přes 1000 W/mK) Zejména při srovnání poměru tepelné vodivosti k hustotě materiálu, je karbon-karbon nezaměnitelným materiálem. Ve srovnání s litinovým brzdovým kotoučem pojme mnohonásobně více energie a výrazně rychleji ji i odvede viz kapitola 4.2.2 [6]

Výroba karbon-karbonu

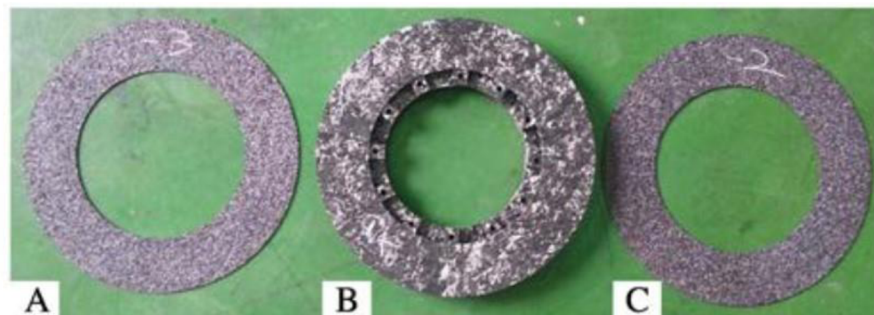
Podobně jako u keramické matrice i u karbonové je jednou z možností prosycení vláken polymerní pryskyřicí, která se následně při pyrolýze mění na karbonovou matrici. Pryskyřice se používají nejčastěji na bázi fenolů a smol. Existují čtyři základní výrobní technologie:

impregnace kapalné fáze (LPI), karbonizační izostatické lisování za tepla (HIPIC), tepelné lisování (HP) a chemická infiltrace par (CVI). [6]

Technologie se mírně odlišují, například v teplotě karbonizace, která se liší dle použité pryskyřice a lisovacího tlaku (obvykle do 1000 °C). Čím větší tlak je vyvinut při karbonizaci, (běžně přes 100 MPa), tím větší je výsledný podíl uhlíku získaného z pryskyřice a výsledný materiál má více izotropní vlastnosti. Proces karbonizace se běžně několikrát opakuje, dle výrobní technologie. Následuje přetvoření chemické struktury pomocí grafitizace, která probíhá při teplotách 2200–3000 °C. [6]

Při výrobě materiálů pro brzdové komponenty se obvykle přidává prášek karbidu křemíku, který zvyšuje koeficient tření, snižuje otěrové opotřebení a chrání před oxidací, což je výraznými benefity i při lehkém zvýšení hustoty materiálu. SiC prášek se opět lisováním za vysokých teplot smísí s materiálem pomocí difúze. Při tomto postupu se používá i výroba separátních brzdných ploch s příměsí SiC (na obrázku 6 vrstvy A a C) a zvlášť nosná část přenášející brzdné síly a absorbující teplo vzniklé při brždění (na obrázku 6 prostřední část B). Následné spojení tří částí je prováděno v hydraulickém lisu při teplotě 170 °C. [19]

Obrázek 6 Jednotlivé vrstvy brzdového kotouče karbon-karbon s příměsí SiC [19]



Jak již bylo zmíněno tento materiál je náchylný na oxidaci, ke které dochází již při teplotách nad 320 °C. Oxidace napadá primárně karbonovou matici a vede k delaminaci a rapidnímu poklesu mechanické únosnosti materiálu. Jako ošetření proti oxidaci se používá nejčastěji SiC a to pomocí několika metod. [6]

Povlak karbidu křemíku lze vytvořit lisováním směsi prášku SiC a samostatného křemíku, která se následně zapeče při teplotě 1600 °C, čímž je vytvořena ochranná vrstva o tloušťce 0,3–0,7 mm. Druhou možností je máčení materiálu v roztoku SiC prášku s alkoholem, který se následně při zahřátí na 1600 °C odpaří. Ochranu lze ještě podpořit aplikací tmelu, který zacelí povrchové póry materiálu. [6]

Poslední metoda ochrany materiálu proti oxidaci spočívá ve vhodné volbě výrobní pryskyřice, ze které se při pyrolýze odštěpí látky, které zůstanou v materiálu a zamezují jeho oxidaci pomocí utěšňování mikroprasklin materiálu a zabránění jeho kontaktu s kyslíkem. [6]

4.1.4 Porovnání kompozitů s kovy

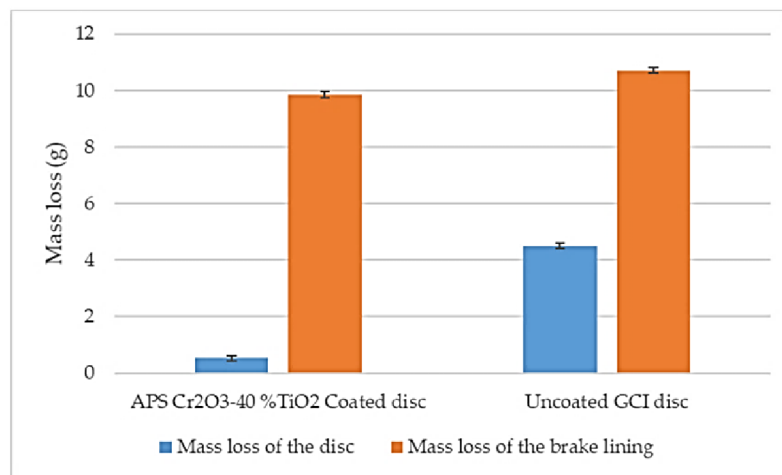
Konvenčním materiálem automobilového brzdového kotouče je šedá litina, kterou tvoří železo s obsahem uhlíku 3,2–3,9 % a další legující prvky viz obrázek 7. Tento materiál se bez větších změn používá pro tuto aplikaci přes 100 let, a to zejména díky své jednoduchosti výroby a s ní spojeným ekonomickým aspektem. Kotouče jsou vyráběny odléváním z dosloužených litinových výrobků. Někteří výrobci nižší jakosti odlévají hotové kotouče, kvalitnější kotouče se po odlití obrábí pro zajištění větší přesnosti a jakosti povrchu. [18]

Obrázek 7 Příklad chemického složení konvenčního litinového brzdového kotouče [18]

Element	Typical mass proportion (%)	Function
Carbon	3.2–3.9	Primary source of graphite
Silicon	1.4–1.9	Graphitising agent
Manganese	>0.4	Added to counteract sulphur
Phosphorus	<0.08	From pig iron or scrap iron
Sulphur	<0.08	Prevents the formation of graphite
Chrome	0.2–0.4	Promotes pearlitic structure, increases strength and hardness
Molybdenum	<0.05	Trace element, promotes pearlite
Nickel	<0.1	Controls pearlitic structure
Copper	0.03–0.3	Increases strength and hardness by promoting pearlitic structure
Tin	<0.01	Promotes pearlitic structure
Titanium	~0.02	Promotes undercooled graphite
Vanadium	~0.01	Increases hardness, reduces wear

Používají se i různé druhy povrchových úprav sloužících k ochraně proti korozi, zlepšení tepelných vlastností, odolnosti vůči otěru nebo úpravě koeficientu tření. Technologie používané pro povrchové úpravy se dělí na tepelné a netepelné, mezi netepelné patří plazmová elektrolytická oxidace, tvrdé chromování a laserové navařování. Tepelné metody jsou atmosférické plazmové navařování (viz obrázek 8), vysokorychlostní nástřik plamenem atd. [20]

Obrázek 8 Porovnání hmotnostního úbytku materiálu opotřebením litinového kotouče s/bez povrchové úpravy pomocí plazmového navařování [20]



Brzdové kotouče z šedé litiny dosahují s organickým nebo metalickým obložením solidního koeficientu tření okolo 0,4 (při teplotě 80 °C), mají poměrně dobrou odolnost vůči opotřebení (pouze karbon-keramické kotouče mají výrazně delší životnost), dobrou schopnost tlumení vibrací, a další pozitivní vlastnosti, které s ohledem na nízké výrobní náklady opodstatňují vhodnost tohoto materiálu na použití pro brzdové komponenty většiny dopravních prostředků. Nedostatečnost brzdových kotoučů z šedé litiny nastává u strojů s vysokými nároky na brzdové systémy, zejména z tepelného hlediska. Bod tání šedé litiny je 1200 °C, ale pokles brzdného účinku a degradace brzdového kotouče nastává už při opakovaném zahřívání na teploty okolo 400–500 °C, což je u vysokorychlostních prostředků běžné. [18, 20]

Další nevýhodou je vysoká hustota materiálu a s ní spojená hmotnost, na kterou je kladen velký důraz zejména u leteckých prostředků nebo sportovních a závodních automobilů (kde se jedná i o nežádoucí neodpruženou a rotační hmotnost, což efekt umocňuje). Z tohoto hlediska je nejlepší volbou karbon-karbon kompozit, u kterého brzdový kotouč může mít v některých případech i desetinu hmotnosti běžného litinového odlitku. [1]

Blízkou alternativou odlévaných litinových kotoučů jsou brzdové kotouče z nerezové oceli, které jsou kvůli výrobním nákladům na opracování o něco dražší, ale i tak nesrovnatelně dostupnější než kompozitní materiály. Nerezová ocel nabízí kompatibilitu s více druhy brzdových obložení a může dosahovat většího koeficientu tření okolo 0,6 při teplotě 80 °C. Zároveň nerezový kotouč je o něco lehčí, nepodléhá korozi a technologie výroby umožňuje lepší řešení chladicích otvorů. Tato varianta se používá u některých sportovních dopravních

prostředků, nejčastěji motocyklů, kde jsou brzdové kotouče slabší ve srovnání s automobilem. [18]

Další kovy, které lze teoreticky použít na výrobu brzdových kotoučů jsou slitiny hliníku. Výhodou hliníkových slitin je nižší hmotnost oproti oceli a dobrý odvod tepla a odolnost proti korozi. Nevýhodou však je nízká teplota tání, takže tyto materiály se používají velmi zřídka a pouze u lehčích vozidel a výhradně na zadních brzdách, které jsou méně namáhané než ty přední. [18]

Ojedinele se používá jako materiál brzdových kotoučů i titanová slitina, která nabízí dobrou tepelnou odolnost, nízkou hmotnost a odolnost proti korozi. Ale negativa jako finančně nákladná výroba, rychlejší opotřebení než u litiny a nižší koeficient tření při nižších teplotách, obvykle pozitivně předčí. Porovnání vlastností zmíněných kovových materiálů a kompozitu karbon-karbon je znázorněno na obrázku 9. [21]

Obrázek 9 Porovnání mechanických a tepelných vlastností šedé litiny, slitin hliníku a titanu a kompozitu karbon-karbon [20]

Material	Melting Point (°C)	Bulk Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/m.K(°C))	Thermal Expansion Coefficient (μstrain/°C)	Vickers Hardness (HV)	Youngs Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
GCI	1200	7.2	50–72	11–13	90–216	80–100	0.27
Al-12SiC	630	2.8	120–130	17.7–18	91–138	94–98	0.3
Ti 6Al-4V	1600	4.43	8–9	8.7–9.1	332–336	113–115	0.34
Carbon-carbon composite	3300	1.7	13–35	1.1–8.4	42–46	71–79	0.32

4.1.5 Materiály brzdového obložení

Na brzdové desky, jako druhý komponent třecího páru vedle brzdového kotouče, jsou kladeny podobné nároky. Dostatečný koeficient tření s brzdovým kotoučem a jeho stabilita ve velkém rozpětí teplot je klíčem ke konzistentnímu brzdnému účinku. Důležitá je také odolnost vůči rychlému opotřebení, dostatečné pevnostní vlastnosti a schopnost absorpce vibrací vzniklých třením, a to vše i při zvýšených teplotách. V poslední době je také kladen čím dál větší důraz na omezení škodlivých emisí z brzdových destiček. Zvolení vhodného materiálu směsi brzdového obložení se odvíjí primárně od materiálu brzdového kotouče a dále požadovaných vlastností, zatížení systému a výrobní/pořizovací ceny. [18]

Brzdové obložení pracující s konvenčními litinovými brzdovými kotouči je nejčastěji tlakem lisovaná směs pojená pryskyřicí. Směs se skládá z abraziv, která zvyšují koeficient tření, funkčních plniv, která zamezují „zakousnutí“ brzd a zvýšeným vibracím, vlákných výztuží, která zajišťují pevnost a odolnost vůči otěru a v poslední řadě plniv, která vyplňují volný

prostor materiálu. Tuto směs pojí pryskyřice obvykle na fenol-formaldehydové nebo epoxidové bázi. [18, 22]

Konkrétní složení brzdových směsí se liší dle výrobců, ale lze je orientačně rozdělit do tří skupin: organické, metalické a semi-metalické. Přibližné složení těchto základních typů brzdových destiček je znázorněno na obrázku 10. [18]

Obrázek 10 hmotnostní skladba základních druhů brzdového obložení pro litinové brzdové kotouče [18]

Constituent type	Non asbestos organic	Low steel	Semi-metallic
Resin binder	5%–15%	5%–10%	5%–10%
Non-metallic reinforcement fibres	10%–25%	5%–20%	<5%
Metal fibres and powders	5%–20%	10%–30%	30%–40%
Abrasives	5%–15%	5%–10%	<15%
Solid lubricants	10%–20%	10%–20%	5%–15%
Friction modifiers	10%–20%	<5%	<10%
Fillers	15%–30%	20%–40%	15%–30%

S brzdovými kotouči z nerezové oceli, které se používají například u sportovních motocyklů nebo jízdnicích kol, se používají krom materiálů zmíněných u litinových kotoučů i sintrované brzdové destičky. Sintrované brzdové desky nabízí konstantní brzdny účinek i při přítomnosti vody a jsou odolnější vůči otěru, ale díky jejich vyšší tvrdosti více opotřebovávají brzdový kotouč, přenáší více vibrací a tepla do brzdového třmenu a mohou mít zvýšený akustický projev při brždění. [18]

Co se týče karbonových kotoučů s keramickou a karbonovou maticí, jsou varianty brzdového obložení různé. V některých aplikacích například F1 a některých letadlech se používají třecí páry stejného materiálu brzdového kotouče i obložení brzdových desek. Tato varianta nabízí vysoké koeficienty tření přes 0,5, které však nejsou stálé a nedochází ke konzistentnímu opotřebování, proto jsou vhodné jen pro některé aplikace. U C/C-SiC kompozitů, které kombinují karbonovou a keramickou maticí je využíváno odlišnosti složení brzdového kotouče, který obsahuje více keramiky a brzdového obložení s větším procentem uhlíku. [23, 24]

K nižšímu (0,36–0,41), avšak konzistentnímu koeficientu tření dochází při kombinaci těchto kompozitních brzdových kotoučů se speciálním metalickým obložení vycházejícím z práškové metalurgie. Základními složkami směsi těchto brzdových desek je železo a měď. Tato varianta se používá hojně u vysokorychlostních železničních vlaků. [23]

4.2 Aplikace karbonových kompozitů v brzdových systémech dopravních prostředků

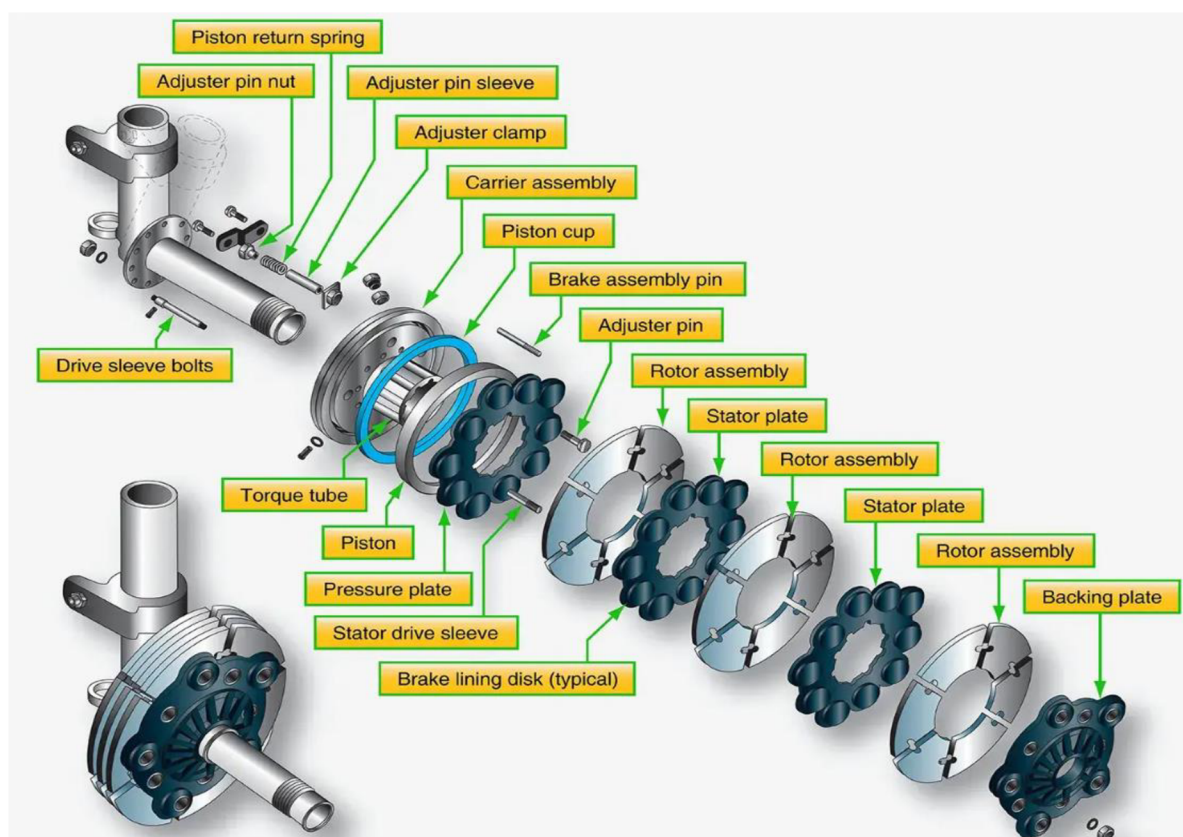
Karbonové kompozity se jako materiály pro výrobu v brzdových kotoučů začaly používat nejprve v letounech. Následně jejich využití expandovalo do závodních a postupně i komerčních sportovních automobilů. Jelikož konstruktéři jízdních kol před lety implementovali na jízdní kola hydraulické kotoučové brzdy, bylo by možné kompozitní brzdové kotouče využít i v cyklo průmyslu. [9]

4.2.1 Letectví

V menší běžné letecké technice se používají kotoučové brzdy podobné těm automobilovým s klasickým litinovým brzdovým kotoučem a třmenem s brzdovým obložením. S narůstající hmotností, nebo rychlostí letounů, se násobně zvyšuje kinetická energie, kterou je potřeba zmařit při jejich brždění a s ní se zvyšují nároky na brzdovou soustavu. [25]

U větších dopravních letounů se nelze obejít bez takzvaných vícediskových brzd. V těchto systémech jsou klasické brzdové kotouče se třmenem a brzdovými deskami nahrazeny střídajícími se statory a rotory, jak je zobrazeno na obrázku 11. Statory slouží jako brzdové obložení, zatímco rotory jsou připevněné na hřídeli společně s otáčejícím se kolem, princip se podobá automobilové spojce s více lamelami. Samotná brzdná síla je vyvolána třením mezi statory a rotory, které jsou k sobě přitlačovány bočním pístem nebo soustavou více menších pístků. Na obrázku se jedná konkrétně o statory segmentované, což znamená, že třecí plocha není souvislá, ale je rozčleněná do segmentů, které umožňují výrazně lepší chlazení. [25, 26]

Obrázek 11 schéma vicediskového segmentového brzdového systému dopravního letounu [26]



Toto řešení lze použít s klasickými ocelovými rotory v kombinaci se statory například s organickým obložením. Postupem času je však ocel hojně nahrazována variantou karbon-karbon. Například u nejrozšířenějšího dopravního letounu na světě Boeingu 737 u řad Next-Generation a Max se v modelech 600, 700, 800 a 900 často přechází z ocelových brzdových systémů na karbonové, a to z několika důvodů. V závislosti na modelu karbonová varianta odlehčí letoun o 250–320 kg, což se pozitivně projevuje na spotřebě paliva a produkci škodlivých emisí. Díky faktům, že karbonové brzdy jsou schopné absorbovat více energie, lépe odvádí teplo do okolí a jsou schopny pracovat i při vysokých teplotách, odpadá nutnost dalšího chlazení, nebo čekání na vychladnutí brzdového systému při rychle navazujících letech nebo větších přejezdech letadla po letištní ploše, na což je nutné brát ohledy u ocelových brzd. Vysoké výrobní náklady na karbonové brzdy se snižují s růstem efektivity výroby, jelikož pro všechny varianty Boeingu 737 vyrábí společnost Safran stejný model brzd. Zároveň vyšší pořizovací cena oproti ocelovým brzdám je částečně vykompenzována vyšší životností karbonových brzd. Výrobce udává, že životnost tohoto systému je okolo 2 200 přistání. V letectví díky finančně náročné údržbě znamená zvýšení servisního intervalu výraznou ekonomickou úsporou. [25, 27]

U velkých mezikontinentálních a vojenských letounů jsou karbonové brzdy nutností, jelikož jejich vysoká kinetická energie nelze zmařit pomocí ocelových brzd. Například při na poslední chvíli zrušeném vzletu, nebo jiném krizovém brždění teplota brzdového systému může jednoduše přesáhnout 1500 °C a lokálně se může blížit i ke 3000 °C, což jsou teploty pro ocel neúnosné. Aby nedocházelo ke zbytečnému nadměrnému opotřebením třecích komponent, jsou naprogramovány jednotlivé režimy brždění optimalizované pro konkrétní využití a maximální brzdny účinek je aktivován pouze v případě nutnosti. [25, 26]

Postupem času byl zjištěn problém s nadměrnou oxidací karbon-karbonových komponent i přes jejich ošetření proti tomuto jevu, jak je zmíněno v kapitole 4.1.3. Výzkum ukázal, že některé látky, které jsou obsaženy v rozmrazovacích a nemrznoucích tekutinách používaných na letištích, mají katalytický efekt na oxidaci karbonových brzdových komponent. Konkrétně prvky vápník, sodík a draslík způsobují mikroskopické delaminace materiálu a jeho postupnou degradaci. Proto je snaha o omezení těchto prvků v nemrznoucích směsích, které jsou nutností při minusových teplotách na letištní ploše, stejně jako u rozmrazovacích kapalin, které jsou aplikovány na povrch letounu před vzletem, aby nebyla negativně ovlivněna jeho aerodynamika. [28]

S ohledem na životní prostředí se některé brzdové systémy dělají zatěsněné, aby se opotřebený uhlíkový prach neuvolňoval do krajiny a ovzduší. Zároveň takto zachycený prach je možné dále využít například jako výztuž do betonu. Utěsněním se eliminuje i zmíněný problém s látkami podporujícími oxidaci materiálu, ale na druhou stranu dochází k omezení chlazení systému proudícím vzduchem. Co se týče recyklace, jsou vyvíjeny technologie umožňující výrobu karbon-karbon kompozitů z dosloužených karbon-polymer kompozitů, ale prozatím jsou obvykle finančně náročnější než samotná výroba karbon-karbon materiálů, ale do budoucna lze očekávat nástup využití těchto technologií. [25, 29]

4.2.2 Závodní automobily

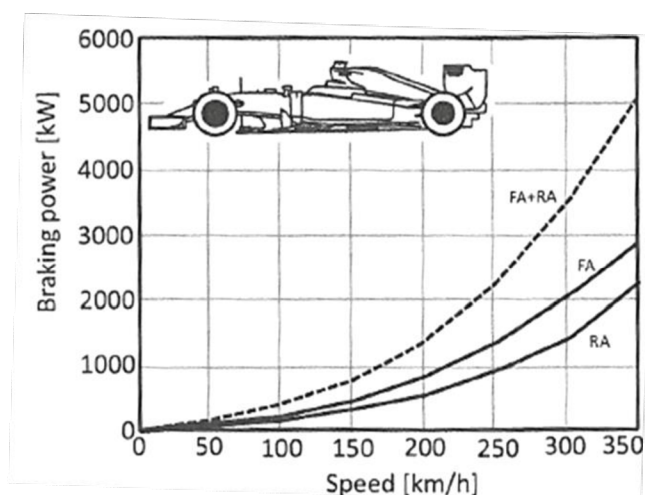
Karbon-karbonové brzdy byly do průmyslu závodních automobilů přeneseny právě z letectví již v 80. letech minulého století. V začátcích byly automobilové brzdy identické s jednokotoučovými karbonovými brzdami menších, zejména vojenských letounů. Ale zanedlouho se díky rozdílným nárokům vyčteným na obrázku 12 začaly vyvíjet odlišným směrem. [30]

Obrázek 12 Rozdíly mezi karbonovými brzdami závodního automobilu a letadla [30]

ITEM	RACING CAR	AIRCRAFT
Rotors x wheel	1	Multiple
Number of cooling holes	Many	None
Pilot force to actuate brakes	Proportional to brake torque	Independent from brake torque
Frequency of stops	Every few seconds	Every few hours
Main mechanical load direction	Flexural	Compressive
Friction coeff. desired at beginning of the brake	High	Low
Product innovation requested by market/rules	Every 1 to 3 years	None for the full aircraft life (decades)

Jedním z nejsložitějších úkolů konstruktérů karbon-karbon brzd závodních automobilů je teplotní management. V ideálním případě by měly brzdy být stále v teplotním rozpětí, přibližně 350–1000 °C. Při nízké teplotě rychle klesá koeficient tření, který je nutný zejména v F1, kde pravidla zakazují použití brzdových posilovačů. I přesto při krizovém brždění, kdy pilot může na brzdový pedál vyvinout sílu až 1500 N, disponuje brzdový systém Formule 1 celkovým brzdícím výkonem až 3500 kW při rychlosti 300 km/h, jak je vidět na obrázku 13. [31]

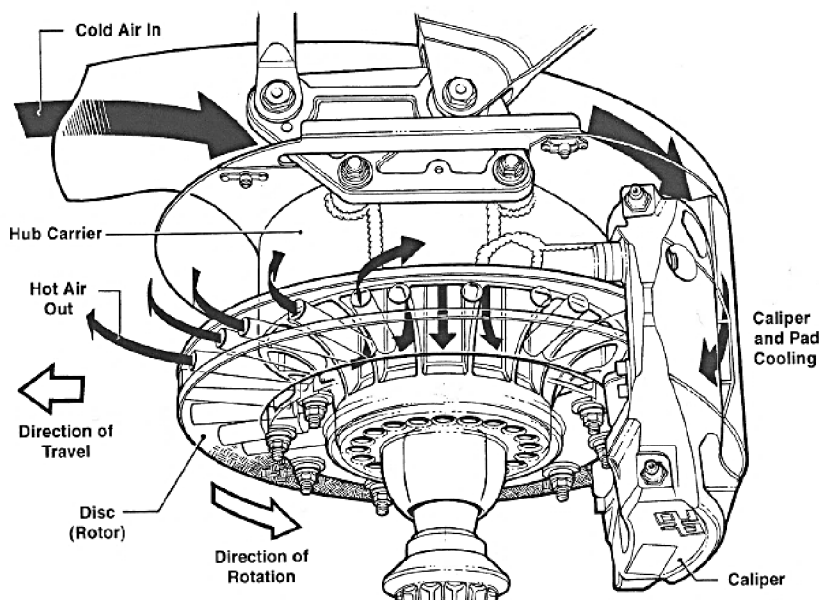
Obrázek 13 Graf brzdícího výkonu monopostu Formule 1 [31]



Při prudkém zpomalení se brzdový systém rychle ohřeje na teplotu přes 1000 °C, kdy brzdy nabízejí stále velký brzdící účinek, ale dochází k výrazně rychlejšímu opotřebení funkčních ploch brzd. K ochlazení brzd slouží kromě chladících otvorů samotných kotoučů i tvar karoserie, který ovlivní proudění vzduchu při jízdě. Otvorem je nasáván vzduch, který proudí nábojem a skrz rotující brzdový kotouč odstředivě ven, zároveň přitom částečně chladí

brzdové destičky a třmen, který je chlazen také přímo nasávaným vzduchem viz obrázek 12. Současný brzdový systém vozu F1 se z teploty 800 °C chladí při jízdě přibližně o 50 °C/s. Pro srovnání konvenční litinový brzdový kotouč osobního automobilu se chladí o cca 3 °C/s. [31, 32]

Obrázek 12 Schéma proudění vzduchu a chlazení přední brzdy Formule 1 [32]



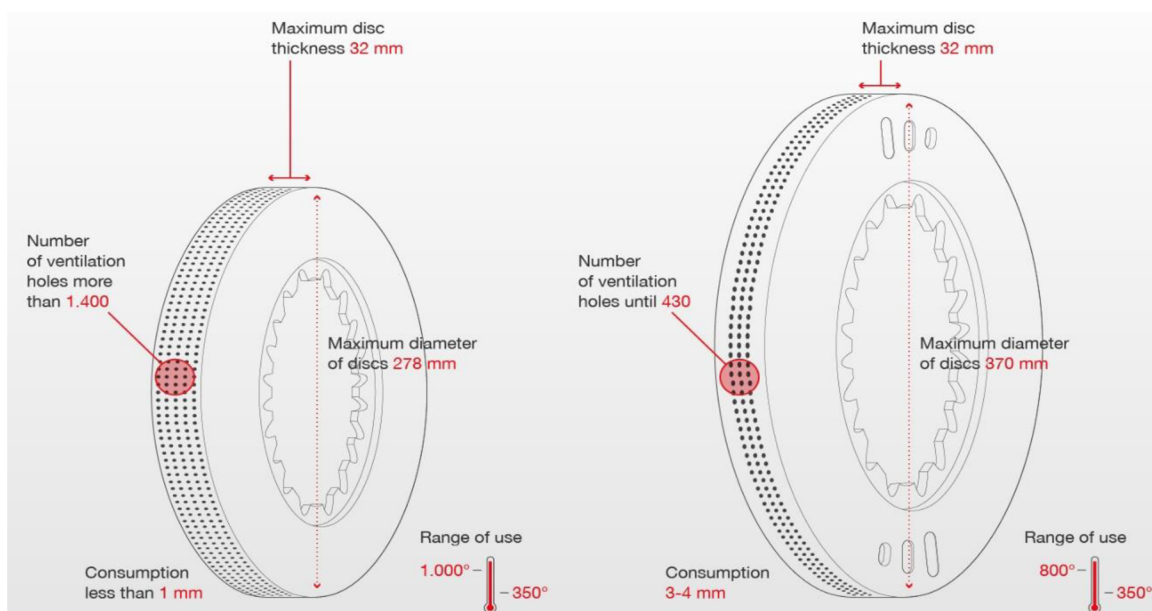
Za poslední desetiletí se téměř ztrojnásobil počet chladících otvorů v brzdovém kotouči vozů Formule 1, čehož bylo možné dosáhnout zdokonalením vrtacích nástrojů. V roce 2022 bylo v F1 zavedeno pravidlo, že minimální průměr chladících otvorů je 3 mm, takže se růst zastavil okolo 1500 děr na jeden brzdový kotouč. S takovým množstvím otvorů souvisí velké nároky na mechanickou pevnost, kterou zajišťuje nahrazení krátkých sekaných vláken, která se používala v minulosti, dlouhými uhlíkovými vlákny. [30]

Teplotní management brzd u vozů Formule 1 zahrnuje i brzdy jako zdroj tepla pro zahřívání pneumatik k dosažení jejich optimální přilnavosti k povrchu vozovky. Pro dosažení tohoto cíle je předpokladem přesná znalost vzniklého tepla třením brzdových ploch a jeho přenos sáláním do pneumatik. Zároveň je nutností vyrovnanost teplot na obou stranách vozu. [30]

Karbon-karbon brzdy však nejsou výhradně součástí vozů Formule 1. Brzdy z těchto materiálů jsou dlouhodobě používány u nejlepších prototypů účastníků se závodů 24 hodin Le Mans a dalších vytrvalostních závodů WEC (World Endurance Championship). Vozy LMP1 mají časovou výhodu, pokud nemusí za celý závod podstoupit výměnu brzdových kotoučů a destiček. Tohoto cíle lze dosáhnout pouze s využitím karbon-karbon kompozitů. Aby však brzdový kotouč vydržel celý 24hodinový závod, je oproti kotouči Formule 1

přepřacovaný. Jelikož pravidla nedovolují větší tloušťku kotouče, musí mít méně chladících otvorů, aby byla zajištěna dostatečná masa materiálu k opotřebení, které je 3–4 mm jak je vidět na obrázku 13. Zároveň na větší disky těchto kategorií lze osadit větší průměr kotouče, což také prodlužuje životnost kotoučů zvětšením jejich brzdné plochy. [33, 34]

Obrázek 14 Rozdíly karbon-karbon brzdových kotoučů vozů F1 (vlevo) a LMP1 (vpravo) [34]



Mimo tyto kategorie se karbon-karbon brzdy používají například ve Formuli E, nebo na motocyklech v nejvyšší soutěži MotoGP. [33]

Mimo tyto nejprestižnější závodní kategorie jsou hojně využívány karbon-keramické brzdy. Hlavními důvody je velmi vysoká pořizovací cena karbon-karbon brzd nebo charakter trati/disciplíny, který se neslučuje s udržením teploty brzd v efektivním intervalu. Karbon-keramické brzdy jsou stále častěji využívány i v silničních supersportovních automobilech viz. následující kapitola, kde jsou tyto brzdy materiály probrány podrobněji. V nejnižších závodních soutěžích, nebo v disciplínách, kde nejsou kladeny na brzdy vysoké nároky se používají litinové brzdové kotouče s více chladícími otvory oproti běžným kotoučům, nebo kotouče z nerezové oceli. [30, 32]

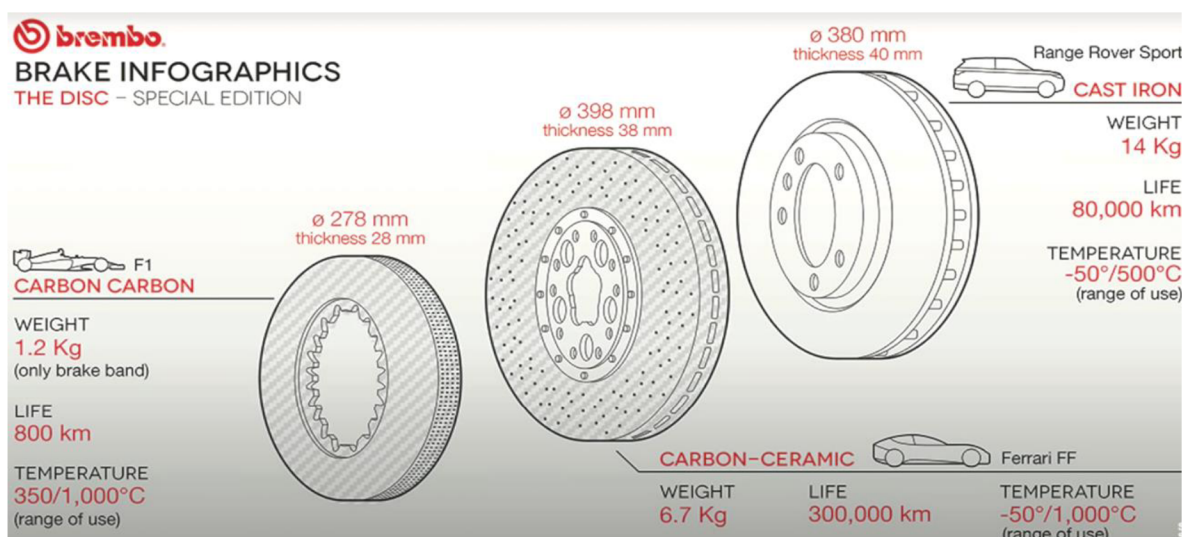
4.2.3 Sériově vyráběné sportovní automobily

U komerčně vyráběných sportovních automobilů se karbon-karbonové brzdy nepoužívají z několika důvodů: v silničním provozu se nezahléjí na provozní teplotu, aby byl koeficient

tření dostatečný, nemají dostatečnou životnost a posledním důvodem je finanční stránka, protože jsou násobně dražší než karbon-keramické brzdy, které také nejsou levnou záležitostí. [30]

Vhodnou alternativou se ukázaly karbon-keramické brzdy, které nabízí téměř srovnatelný brzdný účinek, a to konzistentně od nízkých teplot až po vysoké. Co se týče hmotnosti, nejsou tak atraktivní jako karbon-karbon brzdové kotouče, ale i tak váží přibližně polovinu litinové varianty. Podrobné porovnání všech tří používaných variant je vykresleno na obrázku 15. Z ekonomického hlediska je pořizovací cena karbon-keramických brzd uprostřed mezi litinovými a karbon-karbonovými, kdy je mezi sebou dělí přibližně jeden číselný řád. [1, 30]

Obrázek 15 Porovnání příkladů brzd z karbon-karbonu, karbon-keramika a litiny [1]



Životnost karbon-keramických brzdových kotoučů se samozřejmě odvíjí od namáhání, ale při běžném používání na silničních komunikacích často vydrží bez výměny životnost celého automobilu. Při opakovaném namáhání například na závodním okruhu samozřejmě dochází k rychlejšímu opotřebení. Za celou životnost karbon-keramického kotouče ubude pouze minimum materiálu, proto je tato varianta nejšetrnější k životnímu prostředí z hlediska množství emisí otěrových částic. Rozdílem oproti karbon-karbonovým brzdám, kde se používá brzdové obložení ze stejného materiálu jako brzdový kotouč je, že s karbon-keramickými brzdami se až na výjimky párují metalické nebo organické brzdové desky. Brzdové směsi mají lehce odlišné složení oproti směsím určeným na brzdové kotouče z litiny a nerezové oceli. Brzdové destičky na rozdíl od kotoučů podléhají běžnému opotřebení a je nutné je měnit podobně jako u litinových kotoučů. [30, 33]

Karbon-keramické brzdové kotouče jsou obvykle vyráběny z krátkých sekaných vláken a tento materiál nedosahuje takové pevnosti jako karbon-karbon. Proto nedisponují takovým počtem chladících otvorů jako brzdové kotouče Formule 1. Zároveň snížená pevnost je částečně kompenzována větším průměrem kotouče. Například pokud výrobce nabízí možnost osazení klasických litinových nebo karbon-keramických brzd na konkrétní model vozu, karbon-keramická varianta má obvykle větší průměr brzdového kotouče, což je možné, jelikož na supersportovní vozy se obvykle montují disky o průměru 20“ a více. [1, 30]

Prvními vozidly, která byla osezena karbon-keramickými brzdami a byla homologována pro silniční provoz byly Mercedes-Benz CL 55 AMG F1 Edition v roce 2000 a o rok později Porsche 996 Turbo GT2. Postupně se aplikace těchto brzdových materiálů rozšiřovala a dnes je u nejvyšších modelů supersportovních vozů poměrně častá. Zvýšená hmotnost současně nastupujících hybridních a čistě elektrických pohonů superaut karbon-keramickým brzdám nahrávají svou nízkou hmotností, vysokým brzdícím účinkem i ve velkém rozmezí teplot, schopností absorpce velkého množství energie a poměrně nízkými emisemi otěrových částic. [30, 35, 36]

4.2.4 Vysokorychlostní kolejová vozidla

U většiny železničních strojů jsou dostačující litinové brzdy. V klasickém brzdovém systému starších vlaků se místo tradičního brzdového kotouče s deskami nachází pouze litinový brzdový blok, který je přívodem stlačeného vzduchu přitlačován na plochu obvodu samotného kola, kde dochází ke tření. V moderních stojích se používají i kotoučové brzdy. Mimo to vlaky disponují nouzovými brzdami v podobě elektromagnetů zavěšených na pružinách paralelně s kolejnicemi. V případě krizového brždění dojde, pomocí magnetického pole vyvolaného procházejícím proudem z akumulátorů, k přitisknutí bloků ke kolejnicím, kde dochází ke tření. [37]

U vysokorychlostních železničních souprav je však situace odlišná. Rychlost běžně okolo 400 km/h v kombinaci s vysokou hmotností vyžadují brzdy s možností absorpce velkého množství energie. Část rychlovlaků využívá masivní litinové brzdové systémy, aby se tepelná energie rozložila do velkých brzdových kotoučů, nebo jejich většího počtu. Tyto systémy jsou velmi těžké a zvýšená neodpružená hmota je i zde nežádoucí. Karbon-keramické brzdy umožňují výrazné odlehčení. Zároveň prodloužení servisních intervalů, díky vyšší životnosti, částečně vykompenzuje vyšší pořizovací cenu karbon-keramických brzd. Zajištění brzdného

účinku i při vysokých teplotách zvyšuje bezpečnostní faktor, jelikož při krizovém brždění soupravy z rychlosti 400 km/h se i karbon-keramické brzdy zahřejí na teplotu okolo 900 °C. Většina karbon-keramických brzdových systémů pracuje s organickými nebo metalickými brzdovými deskami, ale u některých rychlovlaků jako TGV-NG nebo Shinkansen byly testovány i oba komponenty z karbon-keramiky, pouze s různým množstvím SiC. [38, 39]

4.2.5 Jízdní kola

I v cyklistickém průmyslu je znatelná snaha o odlehčení komponentů. Jedním z důvodů jsou samotné jízdní vlastnosti a agilnost jízdních kol, ale pro hobby jezdce je výhodou i snadnější manipulace s lehčím strojem. Především nástup 29“ zapletených kol místo tehdejších 26“ a současný nástup elektrokol zapříčiňuje spíše růst hmotnosti jízdních kol a snahou konstruktérů je tento trend pomocí lehčích komponentů eliminovat. Tato snaha zapříčiňuje postupné nahrazování ocelových a hliníkových součástí za díly z karbonových kompozitů. Jedním z komponent, které však zůstávají stále ocelové jsou právě brzdové kotouče. [40, 41]

V některých případech se jedná o kombinaci unášče z hliníkové slitiny, který napomáhá lepšímu odvodu tepla a snížení hmotnosti, ke kterému je pomocí nýtů připevněna část s brzdou plochou z nerezové oceli. Co se týče karbonových kompozitů, je v současné době jedinou variantou brzdový kotouč prémiového výrobce Carbon-Ti, který kombinuje karbonový unášec, titanové nýty, ale vnější část s brzdou plochou zůstává ocelová. [41, 42]

Dle teoretických podkladů by však mohly být karbonové kompozity vhodným materiálem pro brzdový kotouč jízdního kola. Primární výhodou je jednoznačně hmotnost, protože klasický brzdový kotouč vyšší třídy váží okolo 120 g ve velikosti 160 mm. Nejlehčí sehnatelné brzdové kotouče buďto s velkými výřezy materiálu (vedoucími ke snížení brzdného účinku a často k nepříjemným vibracím), nebo s karbonovým unáščem jako byl zmíněn Carbon-Ti váží obvykle okolo 80 g. Zatímco brzdový kotouč z karbonového kompozitu by v závislosti na konstrukci měl vážit pouhých 40–50 g při stejném průměru. Vezmeme-li v potaz, že je to přibližně polovina hmotnosti ocelové varianty a fakt, že se jedná o neodpruženou a rotační hmotu, je to v kontextu závodních podmínek poměrně výrazné vylepšení. [42, 43]

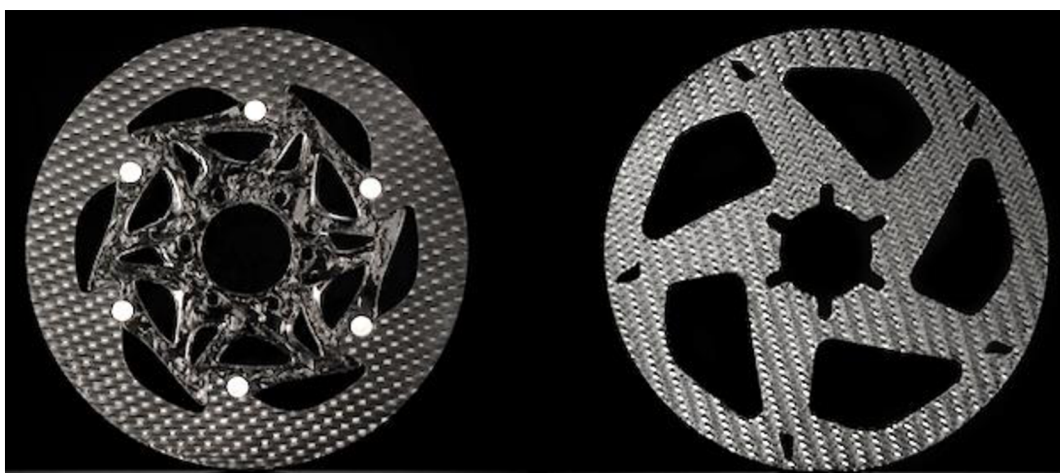
Další výhody jako schopnost tlumení vibrací, vysoká měrná kapacita a téměř nulová tepelná roztažnost jsou popsány v kapitolách 4.1.1 a 4.1.2

Pokud by se jednalo o karbonový kompozit s polymerní maticí, byla by výroba ekonomicky nenáročná, ale u většiny disciplín, kde jsou brzdy více namáhané, by docházelo k většímu

zahřátí, než je schopná odolat polymerní matrice. Naopak s teplotou by nebyl problém u karbon-keramického materiálu, který by měl i lepší tepelné vlastnosti než ocel. Keramická matrice má ve srovnání s polymerní vyšší hustotu, takže hmotnost by lehce narostla, ale hlavní překážkou u tohoto řešení jsou vysoké náklady na energeticky náročný výrobní proces. [43, 44]

Z minulosti je dohledatelná společnost Kettle Cycling, která v roce 2013 nabízela karbonové brzdové kotouče na jízdní kola pod názvem SiCCC rotor. Trojice písmen C stála za Silicon Carbide, Ceramic a Carbon fiber. Kotouče byly nabízeny ve dvou variantách viz obrázek 16, jednodílné celé z jednoho materiálu a dvoudílné, u kterých byl unašeč z karbonového kompozitu bez karbidu křemíku a keramiky kvůli snížení výrobních nákladů. Dle marketingové kampaně společnosti byly kotouče naprosto bezchybné, s extrémní životností, pracující za jakýchkoliv podmínek a s jakýmkoliv brzdovým obložím. Názory několika málo uživatelů, kteří kotouče skutečně obdrželi, z mnoha, kteří si je předobjednali a recenze magazínů však s ambiciózními stanovisky výrobce obvykle nesouhlasily. Nejčastější připomínky byly ohledně rozdílného chování kotoučů s různými typy brzdových destiček, nepříjemné vibrace a akustické projevy, většina recenzí se shodla na použitelném, ale o pár desítek procent nižším brzděm účinku oproti konvenčním kotoučům. Nepopíratelnou výhodou však byla velmi atraktivní hmotnost, která činila 45 g u jednodílného kotouče ve velikosti 160 mm, což je téměř polovina nejlehčích ocelových kotoučů. Společnost Kettle Cycles se po tomto neúspěšném začátku z trhu bez dalších informací vytratila. [45, 46, 47]

Obrázek 16 brzdové kotouče SiCCC (vlevo dvoudílný, vpravo jednodílný) [45]



5 Metodika výroby a měření brzdových kotoučů na jízdní kolo z karbonového kompozitu

Na základě poznatků z rešerše byla stanovena experimentální část diplomové práce na výrobu a následné měření a porovnání brzdových kotoučů na jízdní kolo z karbonového kompozitu.

5.1 Teoretické předpoklady

Největší potenciál ve využití karbonového kompozitu pro výrobu brzdového kotouče jízdního kola je ve výrazném snížení hmotnosti komponentu oproti konvenční ocelové variantě. Jak je popsáno výše, jedná se o rotační neodpruženou hmotu bicyklu, kde má snížení hmotnosti velký benefit. Další předpoklady karbonového kompozitu pro tuto aplikaci jako je vysoká měrná tepelná kapacita karbonových vláken a jejich dobrá tepelná vodivost, téměř nulová tepelná roztažnost a dobrá schopnost tlumení vibrací jsou rozebrány podrobněji výše, a to zejména v kapitolách 4.1.1. a 4.2.5.

Byla zvolena varianta karbonového kompozitu s polymerní matricí, jelikož keramická a uhlíková matrice byly zavrhnuty kvůli svým extrémně energeticky a finančně náročným výrobním procesům. Byť by díky své tepelné odolnosti byly tyto matrice pro materiál brzdového kotouče vhodnější, z ekonomického hlediska by toto řešení nebylo perspektivní. [10]

Epoxidová matrice nabízí ve spojení s karbonovými vlákny velmi dobrý poměr pevnosti ku hustotě. Nedostatkem epoxidové pryskyřice je ale nízká odolnost vůči zvýšené teplotě, která je u třecích brzd z jejich principu samozřejmostí. [10] Množství vzniklého tepla u brzdového kotouče jízdního kola závisí krom na materiálu například na intenzitě a délce brždění, což se odvíjí obvykle od výškového převýšení, hmotnosti a rychlost jezdce s kolem. U některých cyklistických disciplín, kde tratě nemají velká převýšení je teplotní namáhání brzd výrazně nižší než například u sjezdu horských kol, nebo kopcovitých etap silniční cyklistiky.

Dalším nevýhodným předpokladem je, že brzdový kotouč z karbonového kompozitu s polymerní matricí nebude dosahovat srovnatelné životnosti s ocelovým brzdovým kotoučem kvůli rychlejšímu otěrovému opotřebení. [13] Tento fakt výrazně snižuje atraktivitu karbonové varianty pro běžného uživatele, ale neznemožňuje závodní nasazení, na které je kotouč díky své extrémně nízké hmotnosti primárně určen. Je tedy zřejmé, že brzdový kotouč z karbonového kompozitu není vhodný pro všechna cyklistická odvětví, ale pro některé závodní disciplíny může být atraktivní.

5.1.1 Disciplíny s možností uplatnění karbonových brzdových kotoučů

Jednou z těchto disciplín je cyklokros. Součástí cyklokrosových závodních okruhů typicky nebývají žádná delší klesání, takže nedochází k příliš výraznému tepelnému namáhání brzd. Zároveň specifikem cyklokrosu je, že hlavní závodní sezóna vrcholí v zimním období, což se odráží na přírodních podmínkách závodů. Většina závodů se odehrává v bahně, nebo sněhu, což výrazně zvyšuje odpor jízdního kola a brzdy nejsou používány tak často. Závodníci a mechanici upozorovali, že u běžných děrovaných ocelových kotoučů se často nečistoty dostanou do chladících otvorů v brzdě ploše kotouče a tvoří přídavné tření i když jezdec nebrzdí. Tento efekt by měly karbonové kotouče eliminovat, protože jejich brzdová plocha je souvislá bez chladících otvorů. Zároveň hlavní výhodou v nízké hmotnosti by byla v cyklokrose znatelným benefitem, protože často závodníci seskakují z kola a s kolem na rameni přeskakují překážky nebo vybíhají schody. Pokud by se vzal v úvahu například současný nejvyšší model cyklokrosového kola jednoho z největších výrobců kol na světě, tj. Specialized Crux S-works 2024, který osazen kotouči Sram Centeline XR 160 mm s hmotností 120 g, výměnou za karbonové varianty by bylo možné ušetřit přibližně dvě třetiny hmotnosti, což je v případě součtu obou kotoučů okolo 160 g. Pro uvedení do kontextu, 140 g je přibližný rozdíl hmotností střední a nejvyšší verze samotné rámové sady (rámu s vidlicí), zmíněného modelu, které se od sebe cenově liší přibližně o 40 000 Kč. UCI (Mezinárodní cyklistická unie) sice stanovuje pravidlo, že cyklokrosové a silniční kolo pro elitní závody musí mít minimální hmotnost 6,8 kg, ale zmíněný nejvyšší model Specialized má dle výrobce hmotnost 7,28 kg bez pedálů, které přidají dle typu ještě dalších alespoň 300 g, takže prostor na snížení hmotnosti stále je. Co se týče odolnosti kotoučů, typický závodní cyklokrosový okruh má okolo 3 km a v závislosti na podmínkách trati se jede 6–10 kol, což to by měly z hlediska výdrže karbonové kotouče zvládnout. Navíc elitní závodníci často vystřídají při jednom závodě 2 nebo 3 kola, obvykle kvůli nánosům bahna. [48, 49]

Druhou cyklistickou disciplínou, pro kterou by byl karbonový brzdový kotouč perspektivní je bikros, neboli BMX racing. Bikros je olympijská sprinterská kontaktní cyklistická disciplína, při které se v každé závodní jízdě utká 8 závodníků na 20“ kolech na trati skládající se ze startovního pahorku, čtyř rovin s boulemi a tří asfaltových zatáček o celkové délce okolo 400 m. I u této disciplíny je kladen poměrně velký důraz na nízkou hmotnost kola, protože hlavními technikami překonávání boulí je skok a jízda po zadním kole, při kterých je vyžadována agilnost kola, aby mohl jezdec snadno a rychle s kolem manipulovat. Zároveň svůj vliv má rotační hmotnost, zejména při startu, kde rozhodují mezi soupeři pod startovním

pahorkem pouze centimetry. Moderní bikrosová kola jsou aktuálně hojně osazována hydraulickými kotoučovými brzdami, které nahrazují dříve používané mechanické ráfkové brzdy. Brzda je u bikrosových kol pouze zadní a používá se ideálně jen za cílovou čarou, případně v krizových situacích na trati. Jelikož je brždění realizováno obvykle na rovině, lze předpokládat, že vzniklé teplo nebude příliš vysoké. Záleží, jak daleko se podaří jezdcí v závodě postoupit, ale krom jedné až dvou tréninkových jízd, se účastní jezdec maximálně šesti závodních jízd v jednom závodním dni, na což by měla životnost karbonového kotouče s rezervou dostačovat. [49]

Třetí disciplínou, kde by karbonový kotouč mohl nalézt využití je dirtjump, případně slopestyle. Na rozdíl od dvou předchozích disciplín, kde rozhodoval nejrychlejší čas, zde rozhoduje bodové ohodnocení porotců. Porota hodnotí náročnost, provedení a kreativitu triků, které jezdci předvedou na daných překážkách. Trať se skládá několika na sebe navazujících skoků o délkách 5–10 m s vysokými dřevěnými odrazy a hliněnými dopady, obvykle bývá z mírného svahu pro získání potřebné rychlosti. Systém závodu bývá několikadenní volný trénink a samotný závod se skládá pouze ze dvou hodnocených jízd. Slopestyleové kolo má podobně jako bikrosové pouze zadní kotoučovou brzdu, ale rozdílem jsou větší 26“ kola a odpružená přední vidlice. Brzda se používá pouze k případné lehké regulaci rychlosti mezi jednotlivými skoky a po cílovém skoku pro úplné zastavení. Jelikož triky, které ve vzduchu jezdci předvádí, se převážně skládají z rotací (buďto jezdce s celým kolem, nebo samotného rámu se zadním kolem pod jezdce) je i v této disciplíně snaha o snížení hmotnosti kola na minimum při zachování jeho pevnosti nutné při tvrdých dopadech. Největším nežádoucím účinkem rotační hmotnosti je zde gyroskopický efekt, který ztěžuje rychlé rotace kola, proto si někteří jezdci při specifických rotacích v letu zastavují zadní kolo, aby eliminovali tento efekt. [50]

Poslední disciplínou, pro kterou by mohly být karbonové kotouče ideálním řešením je trial. Tato disciplína spočívá v překonávání přírodních i umělých překážek na speciálním 20“ nebo 26“ kole. Hlavní technikou překonávání překážek jsou přeskoky, kde je téměř každý ušetřený gram na kole výhodou. V této disciplíně neslouží brzdy primárně pro zpomalení pomocí tření, takže nedochází téměř k žádnému tepelnému namáhání. Přesto jsou brzdy v trialu jedním z nejdůležitějších komponent, protože díky nim jezdec udržuje rovnováhu například na zadním kole, aby mohl vyskočit na překážku, nebo se na ní udržel. U 26“ trialových speciálů jsou standardem hydraulické ráfkové brzdy, protože nabízí vysokou přesnost brždění. 20“ trialová kola jsou obvykle vybavená přední ráfkovou brzdou a zadní kotoučovou, jelikož

ráfkové řešení zde není ideální kvůli šířce zadního ráfku a malému prostoru pro brzdu. V případě karbonového kotouče by mohl být použit větší průměr kotouče 180 mm pro větší přesnost vůči běžně používanému 160 mm. I přes zvětšení průměru by karbonová varianta byla lehčí než ocelová. Zároveň plná brzdová plocha karbonového kotouče nabízí větší styčnou plochu a s tím související koeficient tření, který je pro tuto disciplínu stěžejní. [49]

5.2 Zvolené varianty materiálu

Pro všechny zkoumané varianty kompozitu byla zvolena na doporučení experta tepelně odolná epoxidová pryskyřice LH 300 na bázi bisphenolu A v kombinaci s tužidlem H 512, vše od Havel Composites. Tento pár má po temperování v peci na 100 °C vykazovat dle výrobce tepelnou odolnost do 200 °C, ale dle slov experta byl úspěšně testován i při nárazových teplotách blízcích se ke 300 °C. Hustota této kombinace pryskyřice s tužidlem je podle technického listu okolo 1,1 g/cm³. [51]

Co se týče výztuže, jsou používána uhlíková vlákna výrobce Toray verze 3K a to ve dvou různých tkaninách. Jednou je plátno (spletená vlákna v orientacích 0 a 90°) o gramáži 200 g/m² a druhou je biaxiální tkanina z nepletených vláken pod úhly ± 45° v gramáži 600 g/m². Kombinací dvou vrstev biaxiální tkaniny se čtyřmi vrstvami plátna vznikne deska o síle lehce přes 2 mm s téměř vyrovnaným rozložením pevnosti a tuhosti ve všech směrech plochy desky. Celková gramáž použitých karbonových vláken je tedy 2000 g/m².

5.2.1 Varianta 1: bez příměsí

První variantu karbonového kompozitu tvoří v jádru čtyři vrstvy plátnové tkaniny, které z každé strany objímá jedna vrstva biaxiální tkaniny. Vrstvy byly zvoleny takto, jelikož v osách 0 a 90° jsou vlákna o gramáži 4x 200 g/m² tj. dohromady 800 g/m² a v osách ± 45° je součtem dvou biaxiálních vrstev 1200 g/m². Proto při postupném opotřebení biaxiální vrstvy se budou pevnostní vlastnosti ve všech směrech vyrovnávat. Matrice bude standární pryskyřice LH300 s tvrdidlem H512 bez dalších příměsí.

5.2.2 Varianta 2: bez příměsí, povrch z plátnové tkaniny

Varianta dvě má opačnou strukturu čili dvě vrstvy biaxiální tkaniny tvoří střed kotouče a vnější brzdovou plochu zajišťují z každé strany dvojice plátnových tkanin. Takováto

struktura byla zvolená, aby porovnání varianty 1 a 2 znázorňovalo případný vliv směru vláken brzdné plochy na brzdové vlastnosti kotouče. Matrice je identická předchozí variantou.

5.2.3 Varianta 3: příměs 5 % SiC F240

Třetí varianta má stejnou skladbu karbonových tkanin jako varianta 1. Do matrice je však přidán karbid křemíku (SiC), který by měl díky své vysoké tvrdosti (9 na Mohsově stupnici tvrdosti) sloužit jako abrazivo a zvýšit třecí koeficient karbonového kotouče s destičkami. Zároveň by mohl zlepšit absorpci tepla vzniklého třením, jako je tomu například u karbon-keramiky. V této variantě je v matrici 5 hmot. % SiC C49 (zeleného karbidu křemíku) o hrubosti F240 (velikost většiny částic okolo 0,04 mm). [19, 24]

5.2.4 Varianta 4: příměs 10 % SiC F240

Varianta materiálu č. 4 má stejnou strukturu výztuže jako varianty 1 a 3. V matrici je příměs stejného karbidu křemíku jako ve variantě 3 o hrubosti F240, ale tentokrát 10 hmot. % matrice. Množství příměsí variant 3 a 4 byly stanoveny na základě předcházejícího experimentu, kde byla testována příměs v množství 8 a 16 hmot. %. Výsledkem tohoto experimentu bylo znatelné snížení mechanických vlastností u materiálu s 16 % SiC. Proto byla množství příměsí pro finální experiment snížena na 5 a 10 hmot. %.

5.2.5 Varianta 5: příměs 2,5 % SiC F1000

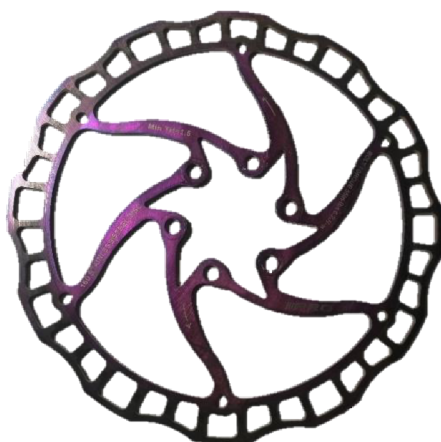
Poslední varianta má opět shodnou strukturu výztuže s přechozími variantami vyjma č. 2. Příměs matrice je SiC C49, ale tentokrát v hrubosti F1000 tj. s částicemi o řád menší velikosti okolo 0,004 mm). Tato příměs byla také součástí předcházejícího experimentu, konkrétně v množství 8 hmot. % matrice. Výsledek byl negativní, jelikož po vyjmutí z pece po temperování se materiál téměř ihned delaminoval na jednotlivé vrstvy. Velké množství malých částic karbidu křemíku nejspíš radikálně snížilo smáčivost pryskyřice a tkanina nebyla dostatečně prosycena. Proto bylo pro finální experiment zvoleno množství pouze 2,5 hmot. % matrice.

5.2.6 Kovové varianty

Nerezová ocel

Pro porovnání kompozitních variant brzdových kotoučů s konvenčně používaným řešením z nerezové oceli byl zvolen jeden z nejlehčích běžně sehnatelných brzdových kotoučů Ashima ARO-08 160 mm. Aby bylo docíleno hmotnosti 78 g je brzdová plocha kotouče poměrně hodně vyfrézovaná, jak je vidět na obrázku 17, což snížením brzdné plochy vede obvykle k o něco nižšímu brzdnému účinku ve srovnání s brzdovými kotouči, u kterých se na hmotnost primárně nesoustředí a mají okolo 120–150 g v této velikosti 160 mm.

Obrázek 17 Zástupce konvenčního brzdového kotouče z nerezové oceli Ashima ARO-08



Slitina hliníku

Naskytla se možnost vyzkoušet zajímavou alternativu v podobě kotouče s brzdovou plochou z hliníkové slitiny Al7075. Toto řešení je u brzdových kotoučů pro jízdní kola ojedinělé. Hliníková slitina má vyšší tepelnou vodivost než ocel, ale také nižší bod tání okolo 500 °C. [18] Jedná se o brzdový kotouč německé značky XLC, konkrétně model BR-X77 shodné velikosti 160 mm. Hmotnost tohoto kotouče je 87 g. Konstrukce zobrazená na obrázku 18 se skládá z hliníkového unašeče se slabou pouze estetickou vrstvou karbonu. Unašeč je pomocí nýtů spojen se samotnou brzdovou plochou z hliníkové slitiny anodizovanou do černé barvy. Tento kotouč, stejně jako karbonový má plnou brzdovou plochu, pouze s pěti malými kanálky pro chlazení a odvod nečistot.

Obrázek 18 Brzdový kotouč XLC RB-X77 z hliníkové slitiny

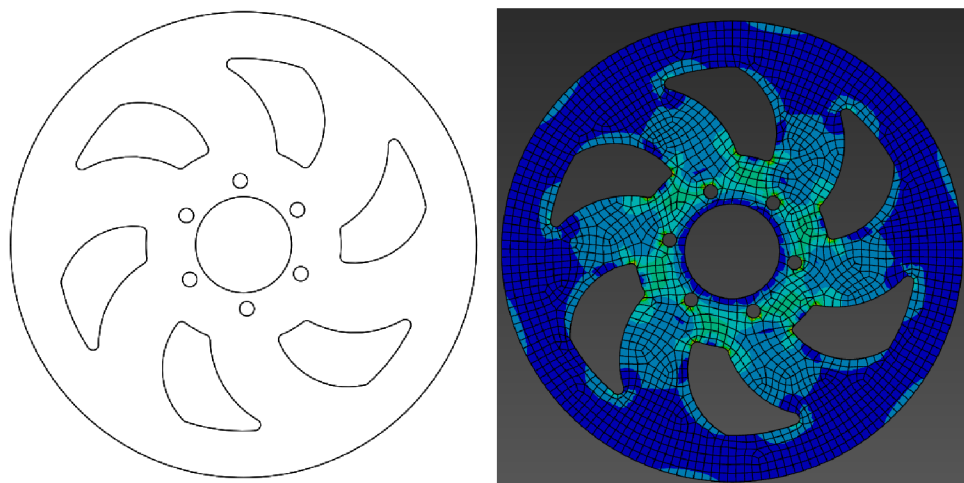


5.3 Metodika výroby brzdových kotoučů z karbonového kompozitu

Pro výrobu brzdových kotoučů z karbonového kompozitu byla zvolena technologie ruční laminace s temperováním v peci a z vyrobené desky byl samotný tvar brzdového kotouče vyříznut pomocí vodního paprsku.

Tvar brzdového kotouče byl navržen jako model v počítačovém programu Autodesk Inventor viz obrázek 19 vlevo. Uchycení brzdového kotouče k náboji kola je realizováno normovaným uchycením ISO 6-bolt. Počet „ramen“ kotouče je shodný s počtem děr, aby bylo zachováno dostatečné množství materiálu v okolí děr na šrouby uchycení. Ramena jsou zakroucená do směru rotace kotouče, aby při brždění převládalo namáhání na tlak. Model brzdového kotouče byl podroben pevnostní simulaci v programu Ansys. Výsledek simulace je znázorněn na pravé straně obrázku 19. Pro lepší rozložení napětí v oblasti uchycení a eliminaci deformace materiálu pod hlavami uchycovacích šroubů bude při montáži kotouče použita hliníková podložka s šesti děrami pro šrouby.

Obrázek 19 CAD model vlevo a pevnostní simulace v programu Ansys Mechanical vpravo



Samotná výroba začíná nanášením vrstvy separátoru na skleněné tabule o rozměrech cca 22x22 cm, aby je bylo možné pro temperování vložit do pece. Jako separátor je použit Loctite Frekote 770-NC. Pomocí mikrovláknové utěrky jsou nanášeny čtyři vrstvy separátoru po deseti minutách. Po zaschnutí je odmaštěn obvod skla o šířce cca jednoho centimetru a je nalepena těsnící páska pro vakuování.

Následně jsou nařezány karbonové tkaniny, pro každý kotouč 2 kusy biaxiální tkaniny a 4 kusy plátna, všechny o velikosti 20x20 cm. Pro čistý řez je použito řezáku s řezným kolečkem. Je vhodné si rovnou připravit i správné velikosti strhovací látky, savé plsti a folie pro vakuování. Jsou vyrobeny 2 vzorky kotoučů pro každou variantu materiálu, aby byl dostatek vzorků pro měření.

Obrázek 20 Příprava laminace: naseparovaná skla, nalepena vakuovací páska a nařezané tkaniny



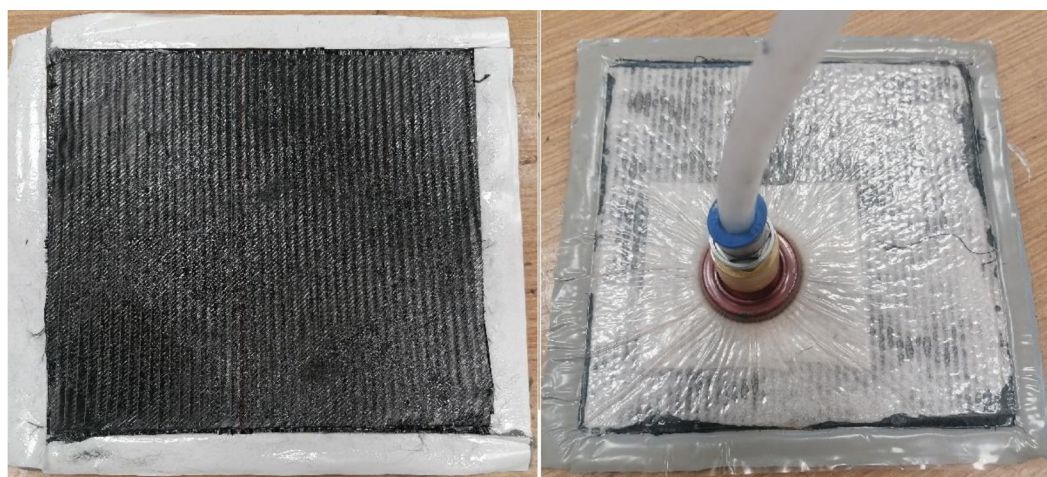
Laminaci předchází příprava matrice. Dle technického listu se míchá pryskyřice LH 300 s tužidlem H512 v hmotnostním poměru 100:23. [51] Z předešlých laminací je známo, že pro dvojici desek je dostačující množství okolo 100 g matrice. Pro čistou matrici je smícháno 80 g pryskyřice a 18,4 g tužidla. U variant 3, 4 a 5 je přidáno příslušné množství karbidu křemíku a směs je důkladně promíchána viz obrázek 21.

Obrázek 21 Jednotlivé složky matrice, v tomto případě varianty 3. Zleva: pryskyřice LH300 80 g, tužidlo H512 18,4 g, SiC C49 F240 5 g a vpravo výsledná matrice.



Samotná laminace začíná potřením skla matricí a postupné kladení a prosycování vrstev tkanin v pořadí podle vyráběné varianty kompozitu. Při prosycování tkanin pomocí štětce je kladen důraz na rovnoměrnost a v případě silnější biaxiální tkaniny na dostatek matrice. Na obrázku 22 vlevo je zobrazené závěrečné stádium laminace v podobě prosycení všech vrstev tkanin, po kterém následuje pokládka strhovací látky se savou plstí. Pokračuje se přilepením vakuovací folie, instalací podtlakového zpětného ventilu a připojením hadice vakuové pumpy, jak je vidět na obrázku 22 vpravo. Použita je vakuová pumpa Elitech V900. Celý proces probíhá v odvětrávané laboratoři se stálou teplotou 20 °C.

Obrázek 22 Vlevo prosyceny vrstvy karbonových tkanin, vpravo vakuování



Přibližně po 15 minutách, kdy je dosaženo maximálního podtlaku se odpojí vakuová pumpa a sestava skla s kompozitem včetně vakuové folie je vložena do pece v hliníkové misce, jak je vidět na obrázku 23. Jako pec je použita horkovzdušná sušárna Memmert UN30m. Mosazný

zpětný ventil zajišťuje udržení podtlaku ve formě a je odolný vůči zvýšené teplotě v peci. Pec je dle doporučení experta a technického listu nejprve na necelou hodinu zahřáta na 60 °C, což zajistí většinové vytvrzení kompozitu. Následně je postupně teplota zvýšena na 100 °C, která je udržována po dobu tří hodin a poté postupně klesá, jak je vyobrazeno též na obrázku 23. Tento proces se nazývá temperování a díky němu kompozit nabývá zvýšené tepelné odolnosti. [51]

Obrázek 23 Vzorky při temperování v horkovzdušné sušárně a graf průběhu teploty



Po vyjmutí z pece je odstraněna folie, plst' a strhovací tkanina a výsledná kompozitní deska je odlepena ze skla. Případné nedokonalosti povrchu ze strany, kde byla strhovací látka, je možné lehce zbrousit například vibrační bruskou. Na obrázku 24 je vidět karbonová deska připravená na vyříznutí.

Obrázek 24 Vyrobená kompozitní deska



V posledním stádiu výroby karbonová deska putuje na pracoviště s AWJ (Abrasive Water Jet), neboli řez vodním paprskem, kde je z desky vyříznut samotný brzdový kotouč. Konkrétně byl použit stroj AW-CT 0806 od společnosti AWAC. Jako abrazivo byl použit křemíkový prášek. Na obrázku 25 vlevo je zobrazena trajektorie řezu. Proces řezání je zobrazen na obrázku 25 uprostřed. Případné nedokonalosti řezu jsou odstraněny jemným zabroušením. Na obrázku 25 vpravo je vidět výsledný karbonový brzdový kotouč.

Obrázek 25 Vlevo trajektorie řezu, uprostřed řez vodním paprskem, vpravo finální výrobek brzdového kotouče



5.4 Metodika měření brzdových kotoučů

V rámci fakulty nebyla možnost realizace laboratorního experimentu, kde by byl připevněn brzdový kotouč k dynamometru a byl z něj odečítán brzdný výkon. Proto bylo zvoleno měření přímo na jízdním kole. Celkově byla stanovena čtveřice měření: měření maximálního brzdného účinku za sucha a mokra dle normy, měření efektivity brždění při nižší síle na brzdovou páku a v poslední řadě měření teploty a opotřebení kotoučů po definovaném sjezdu.

Měření všech variant brzdových kotoučů bylo realizováno na dirtjumpovém jízdním kole poskládaném na zakázkovém rámu Titan Bikes viz obrázek 26. Veškeré měření se odehrávalo pouze na zadní brzdě, protože ta je nejčastěji používaná a například u bikrosového a dirtového kola obvykle i jediná. Samotnou brzdu zastupuje již nevyroběná, Formula R1 carbon zobrazená též na obrázku 26 dole. (jedna z nejlehčích hydraulických kotoučových brzd). Brzdové destičky jsou v režii Sting BPX carbon (karbonová zadní část pro snížení hmotnosti a omezení vibrací) s běžnou organickou brzdovou směsí. Tato kombinace brzdy a destiček s ocelovým brzdovým kotoučem Ashima nenabízí příliš vysoký brzdný účinek, ale je

orientována primárně na co nejnižší hmotnost. Pro disciplíny bikros a dirtjump, případně slopestyle je však brzdový účinek dostačující. Určením se tato brzda s destičkami shoduje s myšlenkou karbonového brzdového kotouče, proto je pro měření vhodná, i když je zcela jasné, že kdyby byla použita například čtyřpístková brzda, byl by brzdový účinek vyšší.

Obrázek 26 Testovací jízdní kolo s hydraulickou brzdou Formula R1



5.4.1 Měření maximálního brzdného účinku dle normy

Měření maximálního brzdného účinku je realizováno na základě porovnávání délek brzdných drah. Z velké části je toto měření provedeno podle normy ČSN ISO 4210-4 (Zkušební metody pro brždění). Některé části jsou oproti normě lehce zjednodušeny. Dle normy je zvolena testovací dráha v ulici Zámečnická v Praze s vhodným hladkým asfaltovým povrchem a se stoupáním do 0,2 %. [52]

Jako rychloměr byl zvolen bezdrátový cyklopočítač Cateye Strada Slim, který byl zkalibrován na příslušný průměr předního kola s pláštěm. Systém pro indikaci ovládní brzdné páky a zařízení pro záznam rychlosti při zahájení brždění jsou vynechány. Rychlost byla udržována

dle rychloměru cyklopočítače a brždění bylo zahájeno vždy ve stejném bodě označeném na vozovce. Vodní skrápěcí zařízení pro simulaci testu brzd za mokra bylo zjednodušeno absencí ovládání na řídítkách, ale průtok a dvojice trysek je dle normy vyhovující viz obrázek 27. Norma udává, že soustava jezdce s jízdním kolem musí mít hmotnost 100 kg. Jelikož hmotnost testovacího jezdce je 73 kg a testovací kolo váží pouze 8,3 kg, musel být jezdec na měření vybaven závažím v podobě 19 kg batohu na zádech. [52]

Obrázek 27 Vyrobený skrápěcí vodní systém pro simulaci brždění za mokra podle normy ISO 4210-4



Měření předchází záběh brzdných ploch definovaný normou. Samotné měření se skládá z pěti validních měřených jízd. Jízda není započítaná, pokud dojde k nadměrné ztrátě trakce zadního kola, kdy jezdec musí dát nohu na zem, nebo rychlost při začátku brždění se od požadované rychlosti liší o více než 1 km/h. Při jízdách za sucha je požadovaná rychlost při začátku brždění 25 km/h a se skrápěcím systémem je podle normy rychlost snížena na 16 km/h. Před jízdami „za mokra“ je třeba podstoupit dvě aklimatizační jízdy, ze kterých se výsledky nezaznamenávají. Výsledkem měření je pětice vzdáleností brzdných drah za mokra a za sucha pro každou měřenou variantu brzdového kotouče. Při každé výměně brzdového kotouče byl zkontrolován stav brzdového obložení a případně vyměněny brzdové destičky, aby nebylo měření negativně ovlivněno nedostatkem brzdové směsi. Za celé měření byly téměř opotřebovány dva páry brzdových desek. [52]

5.4.2 Měření efektivity brždění

Maximální brzdny účinek je samozřejmě nezbytný z hlediska bezpečnosti, ale z hlediska uživatelského komfortu je důležitá i efektivita brždění. To znamená poměr mezi silou vyvinutou na brzdovou páku jezdce a výsledným brzdny účinkem. Do velké míry se efektivita brždění odvíjí od koeficientu tření mezi materiálem brzdového kotouče a směsí brzdových destiček.

Měření efektivity brždění je na stejném principu brzdny vzdáleností jako předchozí měření. Toto měření již nepodléhá normě, takže parametry měření byly stanoveny autorem. Měřeno je pouze brždění za sucha, protože je jednodušší a při vyšší rychlosti by byly brzdny dráhy velmi dlouhé z důvodu snížení koeficientu tření za mokra. Rychlost při začátku brždění byla zvolena na 20 km/h. Testovací jezdec s jízdním kolem, bez další zátěže váží 80 kg. Zkušební trať je identická s předchozím měřením. Konstantní síla na brzdovou páku je realizována pomocí pružného gumového kroužku na řídítkách, který působí na brzdovou páku silou 22 N v místě určeném pro prst, 9 cm od bodu otáčení páčky. Velikost této síly byla ověřena před a po každé pěti měření pomocí digitální závěsné váhy. Při rozjezdu byla síla gumy ručně přetlačena, aby byla brzda uvolněna a kolo uvedeno do rychlosti 20 km/h. V daném bodě označeném na povrchu komunikace byla páka brzdy uvolněna a guma zajišťovala konstantní brzdny účinek.

5.4.3 Měření teploty

Pro testování brzd při větším zatížení, byla stanovena druhá zkušební dráha, a to v Praze na spojnici ulic Pod Šancemi a Mezitrašová. Zkušební dráha má délku 100 m s převýšením 16 m, což činí průměrné klesání 16 %. Povrch komunikace je hladký asfalt. V době měření byla teplota okolního vzduchu 5 °C. Testovací jezdec s kolem váží 80 kg. V případě zanedbání třecího a aerodynamického odporu, které jsou minimální, lze jednoduše vypočítat energii, kterou brzda za jednu testovací jízdu musí zmařit.

$$E = m * g * h = 80 * 9,81 * 16 = 12\,557\text{ J [53]}$$

Přibližně 12,5 kJ energie je při jedné jízdě brzdou přeměněno na teplo.

Zkušební jízda je zahájena rozjezdem pouhým uvolněním brzdové páky a cca po deseti metrech, kdy je dosaženo rychlosti okolo 20 km/h, je zahájeno brždění. Rychlost indikuje stejný cyklopočítač jako u přechozích měření. Rychlost okolo 20 km/h je udržována po celou dobu sjezdu a ke konci je postupně zastaveno v definovaném bodě. Co nejrychleji po dobrždění (cca 2 s) je pořízen snímek brzdového kotouče termokamerou. Použita je

termokamera Flir E5. Druhý snímek je vyfocen 20 sekund po předchozím, aby bylo možné zjistit rychlost chladnutí kotouče. Byla odečítána vždy nejvyšší teplota zobrazená na škále vpravo, jelikož bylo obtížné například u ocelového kotouče s malou brzdou plochou nasměrovat středový terč termokamery na vhodné místo.

V plánu bylo naměřit pětici jízd s každým brzdovým kotoučem jako u předchozích měření, ale vzhledem k delaminaci některých vzorků musel být snížen počet testovacích jízd na dvě. Delaminace je jev, při kterém matrice ztrácí své vlastnosti, což vede k odloučení jednotlivých vrstev kompozitu od sebe.

5.4.4 Měření opotřebení

Krom teplot je zkoumáno i opotřebení jednotlivých brzdových kotoučů po dvou těchto jízdách. Opotřebení je stanoveno rozdílem hmotností kotouče před a po měření. Ke stanovení hmotností slouží váha Reteck o přesnosti 0,01 g. Zároveň stejným způsobem bylo zaznamenáno opotřebení brzdových destiček.

Mimo to proběhlo na jednom karbonovém kotouči měření limitu opotřebení. Konkrétně při jaké tloušťce brzdové plochy dojde k destrukci kotouče při krátkodobém maximálním brzděném zatížení s minimálním teplotním namáháním.

5.4.5 Obrazová analýza elektronovým mikroskopem

Vzorek o rozměrech cca 1x3 cm byl uříznut z vyrobené desky kompozitního materiálu č. 4 s největším podílem příměsi SiC. Následně byl proveden boční lom vzorku, aby byly exponovány jednotlivé vrstvy materiálu.

Příprava vzorku začala přilepením materiálu na hliníkový terčik pomocí pásky. Následné naprášení zlatem pomocí pozlacovacího zařízení Quorum Q150R ES proběhlo ve dvou cyklech. Poté byl vzorek vložen do elektronového mikroskopu Tescan Mira3 a byly nastaveny vhodné parametry pro snímání. Přiblížení jednotlivých snímků je zobrazené v popisu pod každým snímkem.

5.4.6 Vyhodnocení výsledků

K vyhodnocení výsledků byly použity statistické metody jako aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační koeficient a podmíněné formátování v počítačovém programu MS Excel.

6 Výsledky, vyhodnocení a diskuse

Tato kapitola se věnuje vyhodnocení a interpretaci výsledků jednotlivých měření, které jsou následně podklady k závěrečnému zhodnocení použitelnosti karbonových kotoučů pro jízdní kola v praxi.

6.1 Výsledky měření

6.1.1 Měření maximálního brzdného účinku dle normy

Norma stanovuje maximální délky brzdných drah pro různé typy jízdních kol. Při použití samotné zadní brzdy je limitní brzdná dráha za sucha pro horská kola 10 m a pro závodní kola 12 m. Při brždění za mokra je tato délka pro oba typy kol shodná a to 10 m. Tyto vzdálenosti všechny měřené typy brzdových kotoučů splňují. [52]

Nejblíže se k limitu 10 m přiblížil hliníkový brzdový kotouč při měření za sucha s průměrnou brzdnou dráhou 8,8 m. U této varianty byl dle slov testovacího jezdce brzdný účinek hraničící s nebezpečností, nebyl dostatečný ani k zablokování zadního kola při jízdě.

Naopak nejkratší brzdné dráhy byly dosaženy s karbonovými kotouči, a to konkrétně u variant 1, 4 a 5, jak je vidět v tabulce 1. Ve srovnání s ocelovým brzdovým kotoučem byly brzdné dráhy v průměru přibližně o 20 % kratší. Směrodatné odchylky jednotlivých měření nebyly nijak výrazné a koeficient variability dosahoval hodnot 2,1–5,8 %, z čehož lze usoudit, že výsledky měření byly poměrně konzistentní. Výsledky brzdných drah nenaznačují žádnou zásadní závislost obsahu příměsi SiC nebo orientace vláken na maximálním brzdném účinku.

Tabulka 1 Výsledky měření brzdných drah podle normy ČSN ISO 4210-4 za sucha

m	Délky brzdných drah při brždění za sucha z rychlosti 25 km/h					Ø	σ	v
ocel	7,7	7,9	8	7,6	7,9	7,8	0,16	2,1 %
hliník	9,1	8,8	8,8	8,3	9,1	8,8	0,33	3,7 %
karbon 1	6,1	6,9	6,3	6,6	6	6,4	0,37	5,8 %
karbon 2	7,1	7	6,9	6,6	6,9	6,9	0,19	2,7 %
karbon 3	6,8	7,3	7,5	7,2	7,2	7,2	0,25	3,5 %
karbon 4	6,5	6,3	6,2	6,5	6	6,4	0,21	3,3 %
karbon 5	6	6,5	6,4	6,4	6,8	6,4	0,29	4,5 %

Dle slov testovacího jezdce byl projev karbonových vzorků oproti ocelovému výrazně odlišný. Karbonové brzdové kotouče neměly konzistentní brzdný účinek, což bylo cítit zejména při dobrzdění v malé rychlosti, protože koeficient tření se po obvodu kotouče liší v závislosti na orientaci vláken. Tento jev byl částečně omezen u varianty 2, kde brzdnou

plochu tvoří plátňová tkanina. Oproti tomu ocelový brzdový kotouč měl stálý brzdný účinek po celém obvodu, ale brzda přenášela do páky poměrně výrazné vibrace doprovázené lehkým akustickým projevem, které byly způsobeny velkými výřezy v brzdné ploše kotouče.

V tabulce 2 jsou vyobrazeny výsledky měření za mokra, při kterém se žádný vzorek nepřiblížil k limitu brzdné dráhy 10 m. Nejlepších výsledků dosáhly karbonové varianty 1 a 5. Rozdíly výsledků mezi kompozity a kovovými materiály při brždění za mokra nebyly tak výrazné, jako u měření za sucha. Směrodatné odchylky a variační koeficient opět neznázorňují velké rozdíly mezi jednotlivými naměřenými hodnotami. Z těchto výsledků je možné usoudit, že příměs hrubšího SiC F240 ve variantách 3 a 4 má spíše negativní vliv na koeficient tření při brždění za mokra.

Tabulka 2 Výsledky měření brzdných drah podle normy ČSN ISO 4210-4 za mokra

m	Délky brzdných drah při brždění za mokra z rychlosti 16 km/h					Ø	σ	v
ocel	5,1	5,4	5,2	5,1	5,4	5,2	0,15	2,9 %
hliník	5	5,2	5,2	5,4	5,2	5,2	0,14	2,7 %
karbon 1	4,5	4,3	4,5	4,7	4,6	4,5	0,15	3,3 %
karbon 2	5,1	4,8	4,4	4,5	4,6	4,7	0,25	5,4 %
karbon 3	4,8	4,9	5	5,2	5	5	0,15	3,0 %
karbon 4	5,3	4,9	5,4	5,2	5,3	5,2	0,19	3,7 %
karbon 5	4,4	4,4	4,2	4,5	4,6	4,4	0,15	3,4 %

Brždění všech vzorků doprovázel akustický projev v podobě pískání. U všech karbonových variant byl zvuk podobný, ne příliš hlasitý. Ocelový brzdový kotouč byl o něco hlasitější, ale ne dramaticky. Naopak velmi hlasitý a agresivní byl zvukový projev při brždění mokrého hliníkového kotouče.

6.1.2 Měření efektivity brždění

Při měření efektivity brždění vyšel jednoznačně nejhůř brzdový kotouč z hliníkové slitiny. Z toho lze usoudit, že koeficient tření organických brzdových destiček s tímto kotoučem je nízký. Zajímavé by bylo porovnat chování brzdového kotouče po opotřebení eloxované vrstvy na brzdné ploše.

Druhé nejdelší brzdné dráhy byly naměřeny s ocelovým brzdovým kotoučem. Průměrná brzdná vzdálenost tohoto kotouče je 18,9 m viz tabulka 3.

Naopak nejlepší výsledek efektivity brzdného účinku vykazuje karbonový brzdový kotouč ve variantě 4, tedy s největším množstvím příměsi karbidu křemíku. Zajímavé je, že varianta 3, která má poloviční množství stejné příměsi má výsledky z karbonových materiálů nejhorší. Obecně lze tvrdit, že s těmito brzdovými destičkami je koeficient tření u karbonových brzdových kotoučů větší než u konvenčního ocelového kotouče. Konkrétně jsou brzdné vzdálenosti kratší o od přibližně 7 % u variant 1 a 3 až po 30 % u varianty 4. Směrodatná odchylka a koeficient variability je nejvyšší u hliníkové varianty, ale opět nepřesahuje 6 %.

Tabulka 3 Výsledky měření efektivity brždění při konstantní síle na páku

m	Délky brzdných drah při konstantní síle 22 N					ø	σ	v
ocel	18	18,8	20,3	19	18,4	18,9	0,87	4,6 %
hliník	23,2	24,4	21,6	22	21,3	22,5	1,28	5,7 %
karbon 1	16,6	17,3	17,6	17,8	17,2	17,3	0,46	2,6 %
karbon 2	14,9	16,1	16,1	15,6	15,9	15,7	0,50	3,2 %
karbon 3	16,7	17,9	18,5	18	17,5	17,7	0,67	3,8 %
karbon 4	12,6	12,9	13,2	13,9	13,5	13,2	0,51	3,8 %
karbon 5	13,6	14,1	15	14,2	14,5	14,3	0,52	3,6 %

6.1.3 Měření teploty

Při měření teploty a opotřebení došlo při druhé zkušební jízdě k delaminaci prvních dvou variant karbonových kotoučů, proto bohužel nebylo možné provést více opakování měření než 2. Proto byla bohužel snížena vypovídající hodnota výsledků a nebyly proto použity statistické metody pro vyhodnocení.

Ocelový brzdový kotouč Ashima se po definované jízdě zahřál pouze na přibližně 90 °C, jak je vidět v tabulce 4. Po 20 s se ochladil přibližně na teplotu 50 °C (u prvního měření byl znatelný poryv chladného větru, který pravděpodobně kotouč schladil rychleji). Nízká teplota oproti ostatním materiálům je dána pravděpodobně chladícími otvory, které odvádějí vzniklé teplo již při brždění. Vliv na výsledky může mít výrazně menší měřená plocha pro detekci termokamery, která může být na menší ploše nepřesná, i když byla snaha o přiblížení termokamery blíže ke kotouči. Snímek teploty ocelového kotouče je na obrázku 28.

Obrázek 28 Snímek z termokamery ocelového kotouče



Hliníkový brzdový kotouč, ač by dle teoretické části měl absorbovat větší množství tepla a zahřát se na menší teplotu než ocelový, vykazoval opačné chování. Příčinou je pravděpodobně téměř plná brzdná plocha, která stejně jako u karbonových kompozitů odvádí méně tepla do okolí. Co se týče chladnutí, také nebyla potvrzena schopnost hliníkové slitiny rychlejšího odvodu tepla do okolí.

Tabulka 4 Maximální teploty brzdových kotoučů po sjezdu a po 20 s chladnutí

°C	teploty po brždění		teploty po 20 s	
ocel	90	87	40	52
hliník	114	128	83	98
karbon 1	176	196	109	130
karbon 2	168	159	110	113
karbon 3	177	174	108	115
karbon 4	171	173	90	128
karbon 5	174	193	110	137

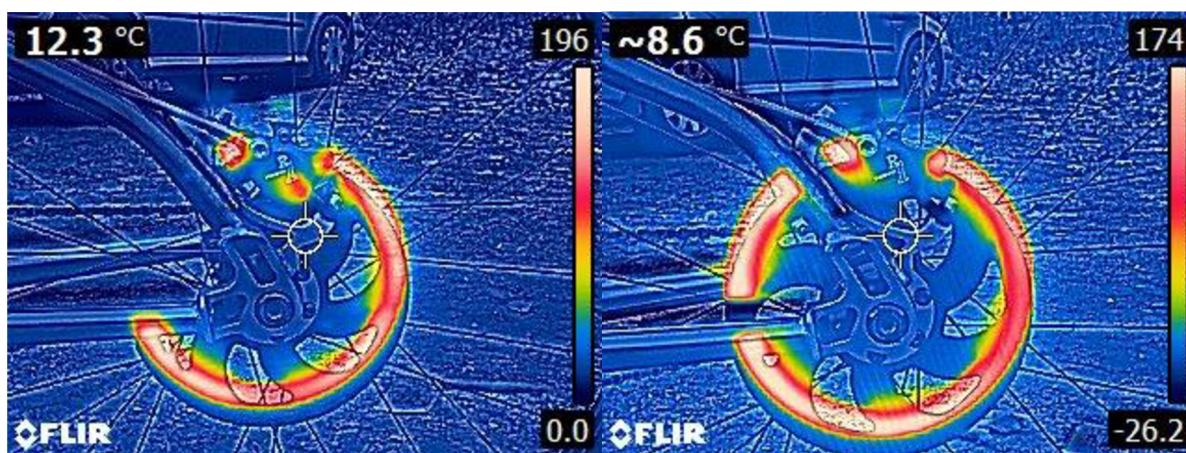
Jak již bylo zmíněno, u prvních dvou karbonových variant došlo při dobrždování do měřeného místa k delaminaci a destrukci kotoučů viz obrázek 29. Teploty naměřené po delaminaci jsou v tabulce označeny červenou barvou. Při delaminaci byla větší prodleva v pořízení snímku termokamerou, takže pravděpodobně teplota při delaminaci první varianty se mohla blížit až 250 °C a u varianty 2 okolo 200 °C. Z toho lze teoreticky usoudit, že tření o plátňovou tkaninu varianty 2 generuje menší množství tepla, ale jelikož matrice byla u obou variant identická, mělo by k jejímu poškození a delaminaci dojít při podobné teplotě.

Obrázek 29 Delaminace kotoučů variant 1 a 2



U ostatních karbonových variant byly maximální teploty až na výjimky podobné, a to okolo 170 °C. Co se týče postupného chladnutí, nelze z naměřených dat usuzovat výrazné rozdíly mezi různými variantami příměsi SiC. Zřejmé je, že u variant 3, 4 a 5 nedošlo k delaminaci, ale otázkou je, zda to bylo zásluhou právě příměsi karbidu křemíku, nebo se teplota zastavila pouze těsně před hranicí delaminace materiálu. Snímky karbonových brzdových kotoučů z termokamery jsou na obrázku 30.

Obrázek 30 Snímky z termokamery vlevo delaminace kotouče varianty 2, vpravo kompozit varianty 3



Pravděpodobnou nepřesnost měření termokamery naznačuje fakt, že na některých snímcích je minimální teplota okolí nebo rámu kola okolo -25 °C, což není možné. Nejspíše by v tomto ohledu pomohlo zaměřit vždy kameru na chvíli mimo kotouč a zpět a počkat na kalibraci, ale to by výrazně ovlivnilo výsledky, jelikož kotouč chladne o několik °C/s.

Co se týče závislosti koeficientu tření na teplotě, nebyl při brždění u kompozitních materiálů znatelný žádný jeho přírůstek, ani pokles. Oproti tomu u hliníkového a ocelového kotouče byl

znatelný lehký pokles koeficientu tření, který se projevoval nutností vyvinout větší sílu na brzdovou páku k udržení stejné rychlosti při sjezdu. Pokles třecího koeficientu byl znatelný i přesto, že rozdíl v teplotách nebyl tak vysoký jako u karbonových kotoučů.

6.1.4 Měření opotřebení brzdových kotoučů

Co se týče opotřebení, nebylo možné korektně zvážit kotouče varianty 1 a 2 z důvodu delaminace kompozitu. Odpovídající pole jsou v tabulce 5 opět vyznačena červeně. Z ostatních dat je zřejmé, že kompozitní brzdové kotouče se dle očekávání opotřebovávají násobně rychleji než kovové vzorky. Při porovnání získaných výsledků opotřebení kompozitních materiálů, lze pozorovat nejnižší opotřebení kotouče u varianty 4 s největším množstvím příměsi karbidu křemíku. Zároveň je u této varianty nejvyšší úbytek materiálu brzdových destiček. To poukazuje na skutečnost, že předpoklad karbidu křemíku jako abraziva by mohl být potvrzen.

Tabulka 5 Hmotnostní úbytky jednotlivých brzdových kotoučů a destiček po dvou definovaných jízdách

g	kotouč	destičky
ocel	0,15	0,08
hliník	0,09	0,11
karbon 1		0,15
karbon 2		0,13
karbon 3	1,29	0,17
karbon 4	0,85	0,22
karbon 5	1,04	0,17

Zároveň proběhlo vedlejší měření limitu opotřebení u jednoho brzdového kotouče, konkrétně varianty 1. Kotouč byl postupně obrždován bez většího teplotního namáhání a průběžně byla pomocí posuvného měřidla měřena síla brzdné plochy. K odlomení brzdné plochy od ramen kotouče došlo při tloušťce materiálu brzdné plochy 1,1 mm. Neopotřebovaný kotouč měl tloušťku 2,2 mm. Pro srovnání výsledků předchozího měření 1 g hmotnostního úbytku se rovná necelým dvěma milimetrům opotřebení brzdné plochy kotouče. Při měření opotřebení bylo subjektivně pozorováno, že při zvýšených teplotách dochází k výrazně rychlejšímu opotřebení než při nízkých teplotách, což bylo i předpokládáno.

6.2 Vyhodnocení hmotnosti karbonových brzdových kotoučů

Primárním cílem bylo snížení hmotnosti brzdového kotouče oproti standartnímu ocelovému řešení. Hmotnosti jednotlivých kompozitních vzorků se mírně liší z podstaty ruční laminace, při které nelze zaručit přesné a identické nanášení matrice mezi vrstvami tkanin. Zároveň příměs karbidu křemíku zvýšila hustotu matrice a s tím i celého kompozitu. Varianty 1 a 2 bez příměsi mají hmotnost okolo $42,5 \text{ g} \pm 0,7 \text{ g}$, varianty materiálu s příměsemi jsou o pár gramů těžší. Konkrétně nejvyšší hmotnost okolo 46 g má dle očekávání varianta 4, která obsahuje největší množství SiC. Přesto dosahují karbonové varianty přibližně 55 % hmotnosti testovaného ocelového kotouče Ashima a při srovnání s průměrným ocelovým kotoučem váží karbonový pouze okolo 35 % hmotnosti. Tímto lze stanovený cíl ohledně hmotnosti kotoučů označit za úspěšně splněný.

Pro korektnost by bylo vhodné připočítat ke karbonovým variantám 5 g v podobě podložky pod šrouby, která byla použita pro lepší distribuci napětí od uchycovacích šroubů a eliminaci deformace materiálu pod hlavami šroubů. Zároveň však kotouč karbonové varianty 5, který subjektivně dosahoval nejnižší mechanické pevnosti díky jemné příměsi, byl testován i bez montáže zmíněné podložky pod šrouby. Při opakovaném skokovém nárůstu brzdné síly, kdy došlo ke zablokování zadního kola, nebyly pozorovány žádné známky lomu nebo poškození, ani v oblasti uchycení kotouče pomocí šroubů.

6.3 Vyhodnocení výsledků měření

První polovina měření se skládala z trojice měření, všech na rovinné testovací dráze bez převýšení. První bylo měření dle normy ISO 4210-4 (maximální brzdný účinek při brždění za sucha a následně za mokra). Odlišnosti provedeného měření od normy byly minimální a lze předpokládat, že výsledky by se nijak zvlášť nelišily ani v případě striktního dodržení normovaného vybavení. Tuto dvojici měření lze považovat za úspěšnou, protože nedocházelo k extrémním výkyvům mezi brzdnými dráhami a pětice výsledků ke každému materiálu by měla být dostatečná k poskytnutí směrodatných dat pro porovnání jednotlivých brzdových kotoučů. Výsledky karbonových variant lze také hodnotit pozitivně, zejména při testování maximálního brzdného účinku za sucha, kdy s použitím všech variant kompozitních kotoučů bylo dosaženo kratších brzdných drah než u kovových brzdových kotoučů.

Následovalo měření efektivity brždění (délka brzdné dráhy při nižší konstantní síle na brzdovou páku). I u tohoto měření vykázaly karbonové varianty pozoruhodně dobré výsledky.

Ve srovnání s ocelovým kotoučem bezesporu nahrává plná brzdná plocha kompozitního kotouče a oproti hliníkovému kotouči nabízejí karbonové varianty v kombinaci s organickými destičkami výrazně vyšší koeficient tření. Vhodné by však bylo provést komplexnější měření i s jinými typy směsí brzdového obložení a v ideálním případě navrhnout a vyrobit brzdové destičky optimalizované přímo pro použití s karbonovými brzdovými kotouči.

Naopak druhá část měření, která zkoumá opotřebení a teploty, na které se jednotlivé brzdové kotouče zahřejí při definovaném zatížení, nebyla příliš úspěšná. Kvůli delaminaci dvou vzorků musel být snížen počet opakování měření a s ním i jeho vypovídací hodnota. Přesto z měření lze vyvodit určité informace a otázky. Například je zajímavé, že k delaminaci došlo pouze u kotoučů bez příměsí karbidu křemíku. Pro potvrzení této závislosti by však bylo nutné opakovat experiment s více vzorky. Nicméně krom rozdílu delaminace mezi teplotami jednotlivých kotoučů nebyly zásadní rozdíly.

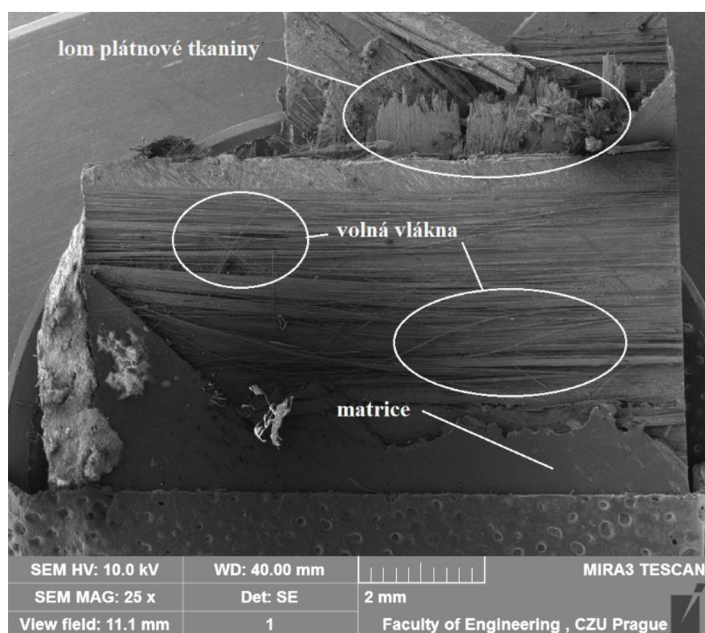
V případě měření opotřebení je situace podobná. Vypovídající hodnota měření není dostatečná, aby bylo možné tvrdit, že větší množství SiC F240 je důvodem větší živostnosti kotouče s variantou materiálu č. 4, byť na to výsledek měření poukazuje.

6.4 Vyhodnocení obrazové analýzy elektronovým mikroskopem

Pro získání informací o skladbě vyrobeného materiálu byl jeden vzorek podroben analýze na elektronovém mikroskopu. Konkrétně byl zvolen vzorek číslo 4 kvůli většímu množství příměsí SiC.

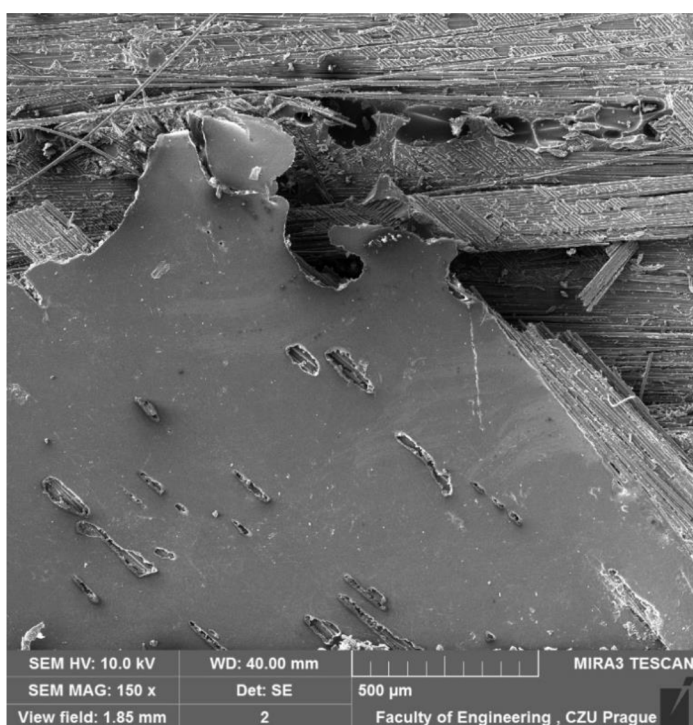
Obrázek 31 je přehledový snímek znázorňující snímaný vzorek a jeho lom ve zvětšení 25x. Směrem zespodu od pásky držící vzorek na terčíku je vidět nejprve matrice, potom lom v první vrstvě biaxiální tkaniny a v horní části vertikální vlákna jádra tvořené plátnovou tkaninou a v pozadí druhou vrstvou biaxiální tkaniny. Na první vrstvě biaxiální tkaniny jsou zřetelně vidět volná karbonová vlákna. Z toho lze usoudit, že i přes snahu dostatečného prosycení silné 600 g/m² biaxiální tkaniny, nebylo prosycení matricí dostatečné, alespoň tedy u tohoto vzorku v tomto zkoumaném místě. Na tento jev mohlo mít negativní vliv právě velké množství příměsí částic karbidu křemíku.

Obrázek 31 Přehledový snímek zkoumaného vzorku materiálu varianty 4



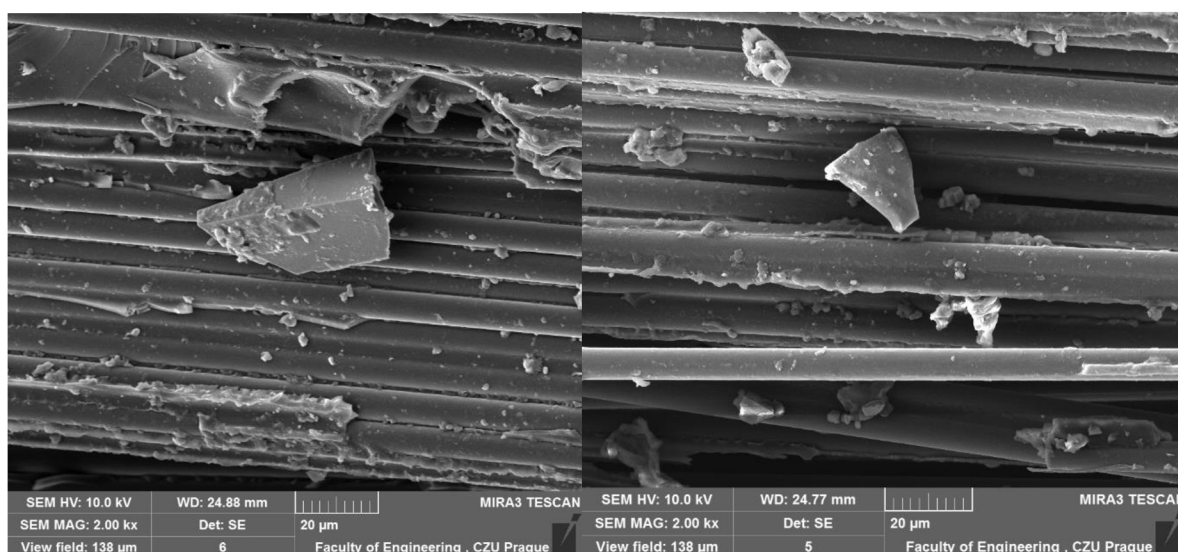
Na obrázku 32 je v přiblížení 150x zobrazena matrice, která byla při výrobě v kontaktu s plochou skla. Je zřejmé, že je téměř celistvá. Přechod vyznačuje lom a první vrstvu vláken.

Obrázek 32 Snímek matrice a jejího lomu



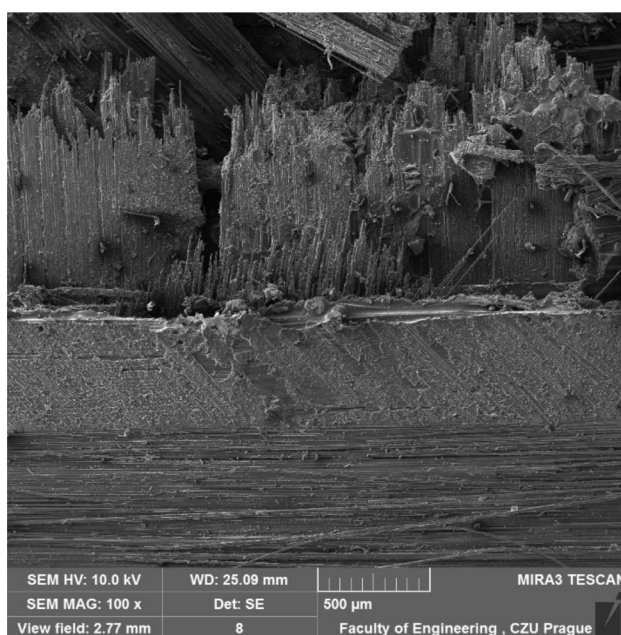
I v části s částečně nedostatečným prosycením vláken lze zřetelně nalézt zrna karbidu křemíku zobrazené na obrázku 33 při zvětšení 2000x. Jejich velikost je přibližně od 20 do 40 μm a mají poměrně ostrý tvar, který je pro abrazivní účely žádoucí.

Obrázek 33 Snímky zrn karbidu křemíku při zvětšení 2000x



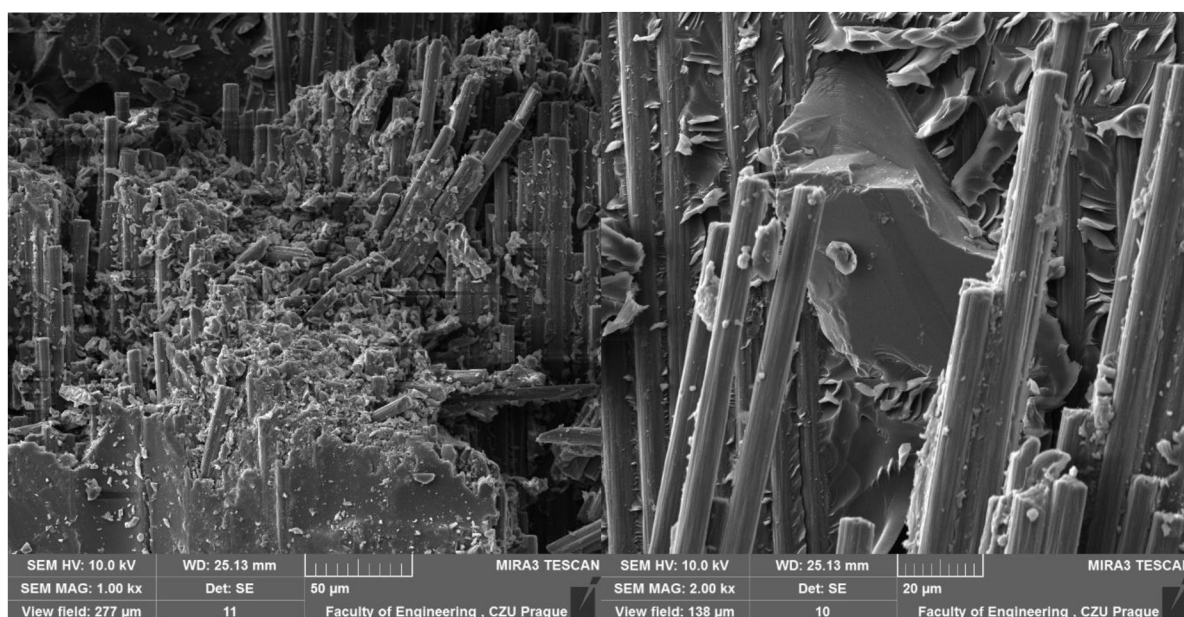
Následuje obrázek 34 zobrazující přehledový snímek přechodu biaxiální tkaniny a lomu vertikálních vláken plátnové tkaniny při zvětšení 100x.

Obrázek 34 Přehledový snímek lomu plátnové tkaniny



Na dalším obrázku č. 35 jsou zobrazeny detailní snímky lomu plátnové tkaniny. Je zřetelné dostatečné množství matrice rozložené mezi vlákny. Na levém snímku při zvětšení 1000x zrna příměsi karbidu křemíku zanikají ve struktuře matrice, oproti tomu na pravé straně je zobrazeno při zvětšení 2000x pravděpodobně právě zrno SiC.

Obrázek 35 Přibližné snímky lomu vláken plátňové tkaniny



6.5 Zhodnocení využití karbonového kotouče pro jízdní kolo v praxi

Výsledky prvních měření ukazují, že s brzdným účinkem není u karbonového brzdného kotouče problém a je dostačující. Druhá část měření potvrzuje teoretické podklady ohledně rychlého opotřebení a nízké teplotní odolnosti vedoucí k delaminaci. [9] Delaminace kotoučů je samozřejmě naprosto nepřijatelná z bezpečnostního hlediska. Proto by při případné aplikaci v praxi bylo nutné zamezit vystavení kotouče vysokým teplotám. Čili zajistit případné použití striktně pouze na disciplíny, nebo závodní tratě, kde nedochází k velkému tepelnému namáhání materiálu.

Dle výpočtu energie zmařené při zkušební jízdě z kopce bylo přeměněno na teplo přibližně 12,5 kJ energie. Pokud se vezme v úvahu brždění na rovině z rychlosti 50 km/h do zastavení při hmotnosti jezdce s kolem 100 kg, vychází energie přeměněná na teplo pod 7 kJ, což by rozhodně nemělo být dostatečné teplo vedoucí k delaminaci kompozitu. [53] Vhodné je poukázat i na fakt, že na většině běžných jízdních kol, kromě tedy bikrosových a dirtjumpových speciálů, se nachází brzdy dvě, takže energie může být distribuována mezi dvojicí kotoučů. Případnou alternativou, například pro zmiňovaná cyklokrosová kola, by byla varianta například předního kotouče z karbonového kompozitu, protože přední brzda se obecně používá méně a zadní by byl konvenční ocelový pro zvýšení bezpečnosti při sjezdech. Zároveň je třeba poukázat na fakt, že k delaminaci došlo pouze u prvních dvou vzorků bez příměsi karbidu křemíku. Ale z pouhých dvou měřených jízd nelze usuzovat, jestli je to

důsledkem právě přítomnosti příměsi karbidu křemíku. Problém s teplotou by bylo teoreticky možné řešit například pomocí chladících otvorů v brzdné ploše, ale ty by měly negativní vliv na pevnost, životnost a pravděpodobně brzdný výkon. Nejlepším řešením by bylo použití více teplotně odolné matrice například jako DURALCO[®] 4703, která má deklarovanou odolnost do 340 °C. Zároveň je ale tato matrice náročnější na výrobu, protože temperování probíhá po dobu 16 h při teplotě 230 °C.

Co se týče opotřebení, bylo potvrzeno výrazně rychlejší opotřebení kompozitního brzdového kotouče ve srovnání s ocelovým. Jelikož poměry brzdových ploch vůči plochám zbytku kotouče jsou odlišné u ocelového a karbonového kotouče, nelze z výsledků opotřebení přesně stanovit rozdíl životnosti těchto dvou řešení. Přibližný odhad dle výsledků by mohl být, že ocelový má cca 10x delší životnost oproti karbonovému, ale jelikož míra opotřebení je u karbonového závislá na teplotě, je to jen orientační tvrzení. Pokud by měl být z výsledků měření vybrán kompozitní materiál s nejlepší odolností vůči opotřebení, byla by to varianta 4 s největším podílem příměsi SiC.

Výsledkem vedlejšího měření, byla zjištěna hranice tloušťky brzdné plochy před rozlomením kotouče na 1,1 mm z původních 2,2 mm tloušťky kotouče. Bezpečně použitelný limit tloušťky kotouče by mohl být stanoven na 1,6 mm, tím by byla zohledněna bezpečnost koeficientem 1,83. U ocelových kotoučů je tento limit obvykle 1,5 mm. Problém s opotřebením by se mohl teoreticky řešit větší počáteční tloušťkou kotouče, ale nad tloušťku přibližně 2,5 mm by bylo nutné modifikovat brzdový třmen, aby nedocházelo k drhnutí. Vyšší životnost by bylo možné docílit volbou většího rozměru kotouče (standardizované jsou průměry 180 a 203 mm), ale to by znamenalo zvýšení hmotnosti. Rychlejší opotřebení karbonových kotoučů není překážkou v jejich využití, ale je nutné s nižší životností počítat při výběru konkrétní aplikace.

Z ekonomického hlediska by díky polymerní matrici neměla být výroba karbonových kotoučů nijak zvlášť nákladná. Vstupní materiály jsou pouze karbonové tkaniny, pryskyřice s tužidlem, prášek karbidu křemíku, separátor a materiál na vakuování, případně lze brát v úvahu elektrickou energii. Pokud by šlo o sériovou výrobu, bylo by vhodné používat velké tabule skla například o velikosti 1x1 m, ze kterých by následně mohlo být vyříznuto 36 nebo 42 kotoučů o velikosti 160 mm. Díky jednoduchosti tvaru by laminace mohla být realizována i automatizovaně. Energetická náročnost by se odvíjela zejména od teploty a doby temperování použité matrice.

7 Přínos práce

Přínosem práce v teoretické části je zejména sumarizace informací týkajících se karbonových kompozitních materiálů používaných v brzdových systémech dopravních prostředků. Zpracované teoretické předpoklady a popsané vlastnosti různých karbonových materiálů mohou sloužit ke zhodnocení použitelnosti těchto kompozitů pro konstrukce různých brzdových systémů.

Experimentální část je ojedinělá zkoumáním kompozitu karbon-polymer, jako materiálu pro využití v konstrukci brzdových kotoučů, na rozdíl od drtivé většiny prací, které se zabývají materiály s karbonovou nebo keramickou maticí.

Přínosem výsledků prvních částí měření je poznatek, že brzdové kotouče z karbonového kompozitu nabízí větší brzdný účinek oproti zkoumanému ocelovému kotouči. Zároveň druhá část měření, která se zabývala opotřebením a teplotami brzdových kotoučů po brždění, potvrzuje teoretické předpoklady k rychlému opotřebení a nízké teplotní odolnosti kompozitních materiálů.

Přesto by bylo možné v některých specifických cyklistických disciplínách jako cyklokros, bikros, dirtjump/slopestyle a trial tyto karbonové brzdové kotouče skutečně používat. Bylo by však nutné případné uživatele důkladně obeznámit s vhodností kotouče pro konkrétní použití. Tento produkt by byl primárně orientován na závodní použití, kde je jeho hlavní benefit v nízké hmotnosti nejvíce žádaný. Hmotnost karbonových kotoučů je přibližně poloviční ve srovnání s nejlehčími konvenčními kotouči.

Co se týče ekonomické stránky, neměl by v případě sériové výroby být problém se dostat s výrobními náklady přibližně k úrovni výrobních nákladů ocelových brzdových kotoučů.

Mimo konkrétních brzdových kotoučů na jízdní kolo, výsledky experimentální části práce poskytují náhled na rozdíly mezi zkoumanými variantami karbonových kompozitů pro brzdové systémy obecně. Tyto informace lze využít při návrhu konstrukce kotoučových brzd pro různé aplikace, kde není předpokládáno velké tepelné namáhání.

8 Závěr

Primárním cílem práce byl návrh a výroba brzdových kotoučů na jízdní kolo z karbonového kompozitu za účelem snížení hmotnosti tohoto komponentu. Tento cíl byl splněn kotouči, které váží přibližně polovinu hmotnosti nejlehčích konvenčních ocelových alternativ. Mezi dílčí cíle patřilo porovnání pěti variant karbonových kompozitů mezi sebou a s ocelovým řešením.

Výsledky ukázaly, že karbonové kotouče dosahují vyššího brzdného účinku v porovnání s ocelí, což je pravděpodobně způsobeno výrazně větší styčnou plochou u karbonových kotoučů. Mezi samotnými karbonovými variantami nebyly naměřeny žádné zásadní rozdíly, nicméně nejlepší brzdný efekt při brždění za sucha vykazovala varianta materiálu č. 4 s největším podílem příměsi karbidu křemíku (10 hmot. % matrice).

Výsledky měření teplot a opotřebení potvrdily výrazně rychlejší opotřebení karbonových kotoučů ve srovnání s ocelí. Nejnižší opotřebení bylo naměřeno též u varianty kompozitu č. 4. U prvních dvou variant materiálu došlo k delaminaci a destrukci kotouče (přibližně při teplotách 200–250 °C). U ostatních variant s příměsí karbidu křemíku k tomuto jevu nedošlo, ale nelze tuto závislost považovat za potvrzenou z důvodu nedostatku opakování měření právě z důvodu delaminace.

Na základě získaných poznatků by mohl být brzdový kotouč pro jízdní kolo optimalizován. Využití více teplotně odolné pryskyřice například DURALCO® 4703 by zvýšilo výrobní náklady, ale zajistilo by teplotní stálost do 340 °C. Při laminaci by byl kladen větší důraz na dostatečné prosycení silnějších tkanin, aby byl omezen počet volných vláken, která odhalil elektronový mikroskop. Bylo by využito příměsi SiC o hrubosti F240 v množství 10 hmot. % matrice jako u varianty 4, která disponovala nejlepšími výsledky z provedených měření. Pro prodloužení životnosti cca o 30 % by bylo možné vyrobit kotouče o šířce 2,4 mm, což by zvýšilo hmotnost kotoučů o přibližně 10 %.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] ULDRICH, Matyáš. *Využití karbonových kompozitů v konstrukci závodních automobilů*. Bakalářská práce. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2022.
- [2] THOMAS, Sabu. *Polymer Composites: Volume 1: Macro-and Microcomposites*. Weinheim: Wiley-VCH, c2012-2014. ISBN 9783527326242
- [3] VESELKA, Filip. *Hierarchické biodegradovatelné kompozitní systémy s 3D textilní výztuží*. [online]. Liberec, 2020. [cit. 2023-09-20]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/3510dcd4-1d00-4925-880f-b4e7555036ad/content>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 9788086073828.
- [5] AYYAPPA, Atmakuri. Review of Hybrid Fiber Based Composites with Nano Particles—Material Properties and Applications. Online. *Polymers*. 2020, roč. 2020, č. 12, s. 1-3. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/9/2088>. [cit. 2024-09-23]
- [6] CHUNG, Deborah. *Carbon Fiber Composites* [online]. Elsevier Science & Technology, 1994 Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1318195&pq-origsite=summon> [cit. 2023-09-25]. ISBN 9780080500737.
- [7] NOVOTNÝ, Petr. *Vývoj a konstrukce uhlíkových ráfků pro automobilový průmysl* [online]. Zlín, 2016 [cit. 2023-09-25]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37901/novotn%c3%bd_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [8] SHIRVANIMOGHADDAM, Kamyar. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties. *Composites: Part A* [online]. 2016, **2016**(92), 76-90. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X16303591> [cit. 2023-09-29].
- [9] GADOW, R. Carbon fiber reinforced carbon composites for aircraft brakes. *American Ceramic Society Bulletin* [online]. 2019, **2019**(98), 1-7 [cit. 2023-09-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Miguel-Jimenez-35/publication/337482105_Carbon_fiber-reinforced_carbon_composites_for_aircraft_brakes/links/5ddad3da92851c1fedaf5347/Carbon-fiber-reinforced-carbon-composites-for-aircraft-brakes.pdf
- [10] CHUNG, Deborah. *Composite Materials: Science and Applications*, 2. New York: Springer London, 2010. ISBN 9781848828315.
- [11] CHUNG, Deborah. Material for vibration damping. Online. *Journal of materials science*. 2001, roč. 2001, č. 36, s. 1-3. Dostupné z: <https://www.acsu.buffalo.edu/~ddlchung/Materials%20for%20vibration%20damping.pdf>. [cit. 2023-10-10].
- [12] This carbon-fiber composite material is good at dissipating heat. Online. *Chemical Engineering*. 2021, roč. 2021, č. 7, s. 1. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/2555431861?accountid=119841&parentSessionId=PIYDee2irJ1MCy7wOwBywUvUdyJpm78VQKRGy1%20BJY0I%3D&pq-origsite=summon>. [cit. 2023-10-12].

- [13] PRANTA, M.H. a RABBI, M.S. A computational study on structural and thermal behavior of modified disk brake rotors. Online. *Alexandria Engineering Journal*. 2022, roč. 2022, č. 61, s. 8-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821004816> [cit. 2023-12-12].
- [14] MANOCHA, L.M. Carbon-Ceramic Composites for Friction Applications. Online. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2014, roč. 2014, č. 21, s. 1. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15376494.2013.834095?casa_token=0dUU9Bp7c0MAAAAA%3Av0JcBFCGo8FBPNcfQIZUNmPH8PW6df5fWeDtwhtuQJjXSTd8OwcytRPnL-2AQyWV0FhySht47zg. [cit. 2023-12-25].
- [15] CHICKTEY, Aladil. Analysis of Brake Rotor Material. *International Journal of Research in Engineering* [online]. 2018, **2018**(1), 1-3 [cit. 2023-12-26]. Dostupné z: https://www.ijresm.com/Vol_1_2018/Vol1_Iss10_October18/IJRESM_V1_I10_150.pdf
- [16] BIANCHI, Iacopo. Life cycle assessment of carbon ceramic matrix composite brake discs containing reclaimed prepreg scraps. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2023, roč. 2023, č. 413, s. 1-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0959652623016955>. [cit. 2023-12-28].
- [17] PARSHANT, Kumar. A Review on Wear and Friction Performance of Carbon–Carbon Composites at High Temperature. Online. *Applied Ceramic Technology*. 2016, roč. 2016, č. 13, s. 702-710. Dostupné z: https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ijac.12538?casa_token=rAjzp6wqvTIAAAAA%3AAAniQx-OWYTN1LbtJIO1FQDleSd5EkyN2CvB41J0sQk9ZOQ4Kn4ODozDFixYkKmsg3xMAAS7ViLRl0. [cit. 2024-01-11].
- [18] DAY, Andrew a David BRYANT. *Braking of road vehicles*. 2. Elsevier, 2022. ISBN 978-0-12-822005-4.
- [19] BYEONG-CHOON, Goo. Development and Characterization of C/C-SiC Brake Disc. Online. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016, roč. 2016, č. 31, s. 979-988. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/10426914.2015.1019112?needAccess=true>. [cit. 2024-01-13].
- [20] ARANKE, Omkar. Coatings for Automotive Gray Cast Iron Brake Discs: A Review. Online. *Coatings*. 2019, roč. 2019, č. 7, s. 1-15. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/9/552>. [cit. 2024-01-15].
- [21] BLAU, Peter. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. Online. *Wear*. 2016, roč. 2016, č. 263, s. 1202-1211. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0043164807002645?via%3Dihub>. [cit. 2024-01-15].
- [22] KOPECKÝ, František. *Vozidlové třecí brzdy, jejich materiály a brzdové kapaliny*. Online, Bakalářská práce. Pzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20278/1/Frantisek%20Kopecky%20-%20Bakalarska%20prace.pdf>. [cit. 2024-01-19].
- [23] MA, Xu. *Comparison of braking behaviors between iron- and copper-based powder metallurgy brake pads that used for C/C–SiC disc* [online]. 2021, **2021**(154), 1-3 [cit. 2024-01-19].

- [24] LI, Gen. The Stability of the Coefficient of Friction and Wear Behavior of C/C–SiC. Online. *Tribol Lett.* 2015, roč. 2015, č. 58, s. 1-6. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.techlib.cz/article/10.1007/s11249-014-0461-6>. [cit. 2024-01-19].
- [25] KROES, Michael. *Aircraft maintenance and repair*. 7. The McGraw-Hill Companies, 2013. ISBN 9780071801508.
- [26] *Aircraft Brakes*. Online. Aeronautics Guide. 2023. Dostupné z: https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes_9081.html. [cit. 2024-01-24].
- [27] ALLEN, Tim. Operational Advantages of Carbon Brakes. Online. *Aero Quarterly*. 2018, roč. 2018, č. 3, s. 16-18. Dostupné z: http://www.boeing.ch/commercial/aeromagazine/articles/qtr_03_09/pdfs/AERO_Q3_09_article05.pdf. [cit. 2024-01-24].
- [28] BEVILACQUA, M. A review of the catalytic oxidation of carbon-carbon composite aircraft brakes. Online. *Carbon*. 2015, roč. 2015, č. 95, s. 861-869. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622315302037?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=850531f36d924138. [cit. 2024-01-26].
- [29] GUO, Wenjian. A new strategy for high-value reutilization of recycled carbon fiber: Preparation and friction performance of recycled carbon fiber felt-based C/ C-SiC brake pads. Online. *Ceramics International*. 2019, roč. 2019, č. 45, s. 16545-16553. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884219313045>. [cit. 2024-01-26].
- [30] CIVIDINI, Omar. Brake Systems and Composite Rotors: How Racing can be a Vision for High Performance Cars. Online. *SAE International*. 2022, roč. 2022, č. 4, s. 1379-1386. Dostupné z: <https://saemobilus-sae-org.ezproxy.techlib.cz/content/2022-01-1174>. [cit. 2024-02-01].
- [31] FRÖMMIG, Lars. *Basic Course in Race Car Technology*. 1. Springer Vieweg, 2023. ISBN 9783658384692.
- [32] WRIGHT, Peter. *Formula 1 Technology*. 1. Society of Automotive Engineers, 2001. ISBN 0768002346.
- [33] Here's why carbon is unavoidable for the discs and brake pads in the top competitions. *Brembo* [online]. 2018 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.brembo.com/en/company/news/carbon-discs-and-brake-pads-in-the-top-competitions>
- [34] Formula 1 vs Le Mans: a comparison of Brembo braking systems. *Brembo* [online]. 2019 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.brembo.com/en/company/news/24-hours-le-mans-2016-and-f1-brembo-brakes>
- [35] *2000 Mercedes-Benz was the First Road Car with Ceramic Brakes*. Online. The Brake Report. 2020. Dostupné z: <https://thebrakereport.com/2000-mercedes-benz-was-the-first-road-car-with-ceramic-brakes/>. [cit. 2024-02-04].
- [36] *The Carbon Ceramic Brakes History*. Online. Brembo / SGL Carbon. 2020. Dostupné z: <https://www.carbonceramicbrakes.com/en/company/Pages/history.aspx>. [cit. 2024-02-04].
- [37] HAVRÁNEK, Michal. *Dvounápravové podvozky osobních vozů* [online]. Parubice, 2011 [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/39796/HavranekM_Dvounappravove%20podvozky%20_AH_2011.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Parubice.
- [38] QU, Junsheng. Thermomechanical Modelling and Strength Assessment of C/C-SiC Composite Brake Disc. Online. *Junsheng*. 2023, roč. 2023, č. 30, s. 1547-68. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.techlib.cz/article/10.1007/s10443-023-10136-6>. [cit. 2024-02-06].

- [39] MA, Xu. Investigation on braking performance and wear mechanism of full-carbon/ceramic braking pairs. *Tribology International* [online]. 2015, **2020**(42), 1-14 [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X19304992>
- [40] WILSON, David. *Bicycling Science*. 4. The MIT Press, 2020. ISBN 9780262538404.
- [41] LIVESEY, Andrew. *Bicycle Engineering and Technology*. 1. Routledge. ISBN 97803674972.
- [42] *X-Rotor SteelCarbon 3 160*. Online. Carbon-Ti. Dostupné z: <https://www.carbon-ti.com/products/brake-disk-and-bolt-kits/x-rotor-steel-carbon-3/x-rotor-steelcarbon-3-160>. [cit. 2024-02-10].
- [43] NAVEED, Nida. Design Analysis of Bicycle Brake Disc for Carbon Fibre -Lightweight Material. Online. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTEGRATED ENGINEERING*. 2019, roč. 2019, č. 9, s. 91-109. Dostupné z: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/4568/3220>. [cit. 2024-02-10].
- [44] *Why are brakes still steel and not carbon-fibre?* Online. BRANQUINHO, Lance. Bike Perfect. 2019. Dostupné z: <https://www.bikeperfect.com/features/why-are-brakes-still-steel-and-not-carbon-fibre>. [cit. 2024-02-10].
- [45] SiCCC Bicycle Brake Rotor: Silicon Carbide-Ceramic-Carbon. *Kickstarter* [online]. [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/kettlecycles/siccc-bicycle-brake-rotor-silicon-carbide-ceramic/faqs>
- [46] CLIFFORD, Lee. *INITIAL IMPRESSIONS: KETTLE CYCLES SICCC SUPER FEATHER LIGHT DISC BRAKE ROTOR REVIEW*. Online. Cyclocross. 2013. Dostupné z: <https://www.cxmagazine.com/cyclocross-kettle-cycles-sfl-siccc-ceramic-carbon-disc-brake-rotors>. [cit. 2024-02-12].
- [47] BENEDICT, Tyler. *First Impressions: Kettle Cycles SiCCC SFL Carbon Disc Brake Rotors & More News!*. Online. Bike Rumor. 2013. Dostupné z: <https://bikerumor.com/first-impressions-kettle-cycles-siccc-sfl-carbon-disc-brake-rotors-more-news/>. [cit. 2024-02-12].
- [48] *Specialized*. Online. Specialized. 2024. Dostupné z: <https://www.specialized.com/cz/cs/s-works-crux/p/221367?color=363369-221367>. [cit. 2024-02-20].
- [49] *UCI*. Online. UCI. 2024. Dostupné z: <https://www.uci.org/disciplines/all/2tLnZMo6WrUBplRXDxyEi7>. [cit. 2024-02-20].
- [50] *FMB*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.fmbworldtour.com/>. [cit. 2024-02-20].
- [51] *Havel Composites*. Online. Havel Composites. 2024. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/epoxidova-pryskyrice-lh-300-odolna-do-160-0c-659-9648>. [cit. 2024-02-25].
- [52] ČSN EN ISO 4210-4, *Jízdní kola – Bezpečnostní požadavky na jízdní kola – Část 4: Zkušební metody pro brždění*. 2023.
- [53] *Mechanická energie*. Online. Encyklopedie fyziky. 2024. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/49-mechanicka-energie>. [cit. 2024-02-26].