

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Bakalářská práce

Návrh a výroba přítlačného křídla automobilu

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Novák**  
Osobní číslo: **D12372**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Název tématu: **Návrh a výroba přitlačného křídla automobilu**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Materiály používané pro tyto aplikace.  
Mechanické vlastnosti používaných materiálů.  
Ideový návrh.  
Koncept realizace výroby.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- Bauer, František: Základy proudění, Věd.-techn. nakl. Praha, 1950.
- Niu, Michael C. Y.: Composite Airframe Structures, AD Adaso/Adastra Engineering LLC, 1992, ISBN: 978-1-61344-656-0.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Petr Hanus**

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **22. února 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2016**



doc. Ing. Ivo Drahošský, Ph.D.  
děkan

L.S.



doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 22. února 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 26. května 2016

Jakub Novák

I hereby declare:

This thesis was prepared separately. All the literary sources and the information I used in the thesis are listed in the bibliography.

I was familiar with the fact that rights and obligations arising from the Act No. 121/2000 Coll., Copyright Act, apply to my thesis, especially with the fact that the University of Pardubice has the right to enter into a license agreement for use of this thesis as a school work pursuant to § 60, Section 1 of the Copyright Act, and the fact that should this thesis be used by me or should a license be granted for the use to another entity, the University of Pardubice is authorized to claim from me a reasonable contribution to cover the costs incurred during the making of the thesis, according to the circumstances up to the actual amount thereof.

I agree with the reference-only disclosure of my thesis in the University Library.

This work has been accomplished by using technologies of the Educational and Research Centre in Transport.

In Pardubice on 26<sup>th</sup> May 2016

Jakub Novák

**Poděkování:**

Děkuji Ing. Petrovi Hanusovi, Ph.D. za odborné vedení práce a asistenci při práci v programu SolidWorks. Dále také děkuji panu Vojtěchovi Valentovi z firmy Vojtěch Valenta – V.J.V., za odbornou konzultaci ohledně používaných materiálů.

## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na vývoj přitlačného křídla pro sportovní automobil. Skládá se z teoretické a praktické části. Teoretická část zahrnuje stručnou historii závodního automobilismu, souhrn nejdůležitějších aerodynamických prvků na závodních vozidlech a druhy nejvíce používaných materiálů pro tyto aplikace. Dále jsou popisovány kompozitní materiály, ze kterých jsou tyto prvky nejčastěji vyráběny.

Praktická část se skládá z výroby přitlačného křídla. Jako podpora k vypracování byl použit program SolidWorks až do fáze vytvoření formy pro křídlový prvek. Základní část přitlačného křídla vytvořeného v této bakalářské práci je možné přímo využít k výrobě formy a následné výroby tohoto prvku.

## **Klíčová slova**

přitlačné křídlo, kompozitní materiál, závodní úpravy

## **Annotation**

The bachelor thesis is oriented on development of a car wing for sports car. It contains a theoretical and practical parts. The theoretical part is a brief overview of a race car history, summary of most important aerodynamics race car elements and types of most used materials for these applications. Further there are described composite materials from which these elements are produced.

The practical part consists of a car wing production. The program SolidWorks was used as a support for the wing development until a stage of a wing element form. The element basic part of the car wing creates in this bachelor thesis is possible directly to use for the form production and subsequent production of this element.

## **Key words**

Car wing, composite material, race adjustment

# Obsah

1. Úvod .....	9
2. Aerodynamické prvky .....	10
2.1. Spoiler .....	10
2.2. Splitter .....	10
2.3. Canard .....	11
2.4. Difuzor .....	11
2.5. Vnější prahy .....	12
2.6. Boční kanály .....	13
2.7. Přítlačná křídla .....	13
3. Materiály používané pro výrobu přítlačných křídel .....	21
4. Kompozitní materiály .....	23
4.1. Úvod do kompozitních materiálů .....	23
4.2. Současné požadavky na kompozity .....	24
4.3. Izotropie, anizotropie .....	24
4.4. Výztuže .....	25
4.4.1. Částicová disperze .....	26
4.4.2. Vláknová disperze .....	26
4.5. Adheze v kompozitech .....	26
4.5.1. Mechanické zaklínění .....	26
4.5.2. Fyzikální adheze .....	27
4.5.3. Chemická adheze .....	28
4.6. Vyztužující vlákna .....	29
4.6.1. Přírodní vlákna .....	29
4.6.2. Aramidová vlákna .....	30
4.6.3. Skleněná vlákna .....	31
4.6.4. Uhlíková vlákna .....	31
4.7. Materiály pro stavbu přítlačného křídla v závislosti na hmotnosti .....	32
4.7.1. Uhlíkové vlákno .....	32
4.7.2. Skleněné vlákno (S – strength) .....	32
4.7.3. Slitina hliníku .....	33



5.	Vývoj přitlačného křídla.....	34
5.1.	Křídlový prvek .....	35
5.2.	Výztuha pro uchycení .....	36
5.3.	Úchyt křídla.....	38
5.4.	Boční desky.....	39
5.5.	Forma .....	40
6.	Závěr.....	41
7.	Seznam literatury.....	42

## 1. Úvod

Závody automobilů jsou veřejnosti známé již více než století. V roce 1895 se na trati v Paříži poprvé proti sobě postavily automobily a tento milník je považován za zrod závodního automobilismu. Od té doby se tato disciplína velice rychle vyvíjela a stále vyvíjí.

V polovině třicátých let minulého století bylo zaznamenáno, jaký vliv mají aerodynamické síly na automobily. V letech 1936 až 1939 byla na německých dálnicích snaha firmy Daimler-Benz o vytvoření světového rekordu v rychlosti jízdy automobilu. Při rychlosti přes 320 km / h řidič automobilu zpozoroval sníženou citlivost řízení a přední část automobilu se podle pozorovatelů viditelně odlehčovala. Při rychlosti téměř 400 km / h řidič zcela ztratil kontrolu nad řízením a přední kola automobilu již nebyla v pevném kontaktu s vozovkou [1].

Začátkem šedesátých let se k řešení aerodynamických sil na závodní vozidla uchýlila většina závodních týmů. První, kdo využili efektu přítláčných sil na kola, byli technici firmy Chevrolet/Chaparral. Ti na svůj vůz Chaparral Can-Am E2 v roce 1966 nainstalovali přítláčné křídlo, které produkovalo negativní aerodynamický vztlak přímo na kola vozu. Tento typ přítláčného křídla dokonce disponoval nastavením sklonu náběhu od 0° do 12°. Při zvyšování přítláčné síly prostřednictvím negativního vztlaku se také zvyšuje odpor, který klade prostředí na vozidlo. Proto bylo a také stále je příhodné tento odpor regulovat v závislosti na rychlosti jízdy. V určitých rychlostech není přítlak na kola tolik potřebný, a proto je velký odpor, který klade přítláčné křídlo nežádoucí a vede ke značným rychlostním ztrátám. Například při velmi vysokých rychlostech je odpor ale i přítlak nadměrný a je nutné ho snižovat. V dnešním motoristickém sportu Formule 1 se jedná o systém DRS (Drag Reduction Systém), který pilot manuálně aktivuje, klapka nad zadním křídlem změni úhel náběhu a díky tomu sníží odpor a zvýší maximální rychlost na rovince [2].

Cílem bakalářské práce je návrh, koncepce a příprava technické dokumentace do výroby zadního přítláčného křídla, které bude aplikováno na Škodu Octavii RS 3. generace.

## 2. Aerodynamické prvky

Aerodynamické prvky, které pomáhají udržovat závodní automobil v dostatečně pevném kontaktu s vozovkou, jsou již několik desítek let nedílnou součástí zkoumání a vývoje. Začátkem šedesátých let devatenáctého století byly závodní vozy GT natolik rychlé, že jezdci byli znepokojeni vztlakem, který tvary vozidel vyvozovaly. Proto se začalo uvažovat o aerodynamických tvarech karoserie, které by tento vztlak omezovaly, či přímo vyvozovaly negativní vztlak.

### 2.1. Spoiler

Spoilery jsou rozděleny od těch nejjednodušších, tzn. rovné desky, které jsou pod určitým úhlem k horizontální poloze připevněné na spodní části nárazníku, po různě tvarované, kde tvar a požadovaná intenzita jejich funkce je dána typem vozidla, ale také pravidly, která jsou dána v určité závodní třídě. Jejich úkolem je zamezit nadměrnému proudění vzduchu pod automobil. Díky tomu je dosaženo většího množství vzduchu, který proudí přes karoserii na ostatní aerodynamické prvky. Menší množství vzduchu, které se díky spoileru dostane pod podvozek automobilu, způsobuje urychlení proudění vzduchu a tím i nižšího tlaku. Toto způsobuje sací efekt a přispívá k přitlaku vozidla [3].



Obrázek 1: přední spoiler [16]

### 2.2. Splitter

Splittery jsou podobné spoilerům, ale ve funkčnosti se zásadně liší. Automobily mají přední část vertikální, a proto se při jízdě proudící vzduch v této části zpomaluje. Vzniká proto oblast vysokého tlaku. Umístěním splitteru (rozdělovače) vytvoříme oblast vysokého tlaku pouze nad ním a velice nízkého tlaku ve spodu. Tímto docílíme vysokého přitlaku. Splittery se umísťují horizontálně na spodní část nárazníku, ale jsou oproti spoilerům předsunuté více před automobil. Studie CFD (Computational Fluid Dynamics) na továrním

voze NASCAR ukazují jako nejlepší délku splitteru kolem 10 cm, samozřejmě přesná velikost je dána mimo jiné tvarem přední části automobilu, nebo pravidly dané soutěže. Nicméně při větší velikosti splitteru se v tomto případě přítlak neměnil. Obecně lze jeho účinky zaznamenat od rychlosti kolem 120 Km / h [4].

Další funkcí, kterou ve většině případů splitter plní, je přívod většího množství čerstvého vzduchu do motorového prostoru. U vozu Mercedes-Benz SLS AMG plní splitter primárně tuto funkci.

### 2.3. Canard

Canardy jsou umístovány na strany nárazníků a plní dvě funkce. Svým tvarem vyvozují přítlak, ale také vytvářejí silné víry, které tvoří jakousi bariéru mezi podvozkovou částí nízkého tlaku a částí s vysokým tlakem kolem karoserie. Nicméně canardy nejsou příliš efektivní, protože víry jsou tak silné, že vyvozují velkou odporovou sílu. Využití se pro canardy najde v případě, že je potřeba vylepšit aerodynamické vyvážení vozidla.



Obrázek 2: dva canardy nad sebou [16]

### 2.4. Difuzor

Pod automobil proudí menší množství vzduchu a vzduch, který se pod automobil dostane, má oproti vnějšku menší rychlost. Díky tomu se pod vozem zvyšuje tlak. Aby bylo zabráněno vysokému tlaku vzduchu pod vozem, je do zadních i předních částí podvozku instalován difuzor. Difuzor funguje na principu Venturiho trubice. Trubice, z pravidla čtvercového průřezu, vytvořená z podvozku vozidla má pozvolný náběh z nulových rozměrů a směrem k zádi se rozšiřuje, přičemž tři stěny tvoří samotná konstrukce a spodní stěnu vytváří vozovka. Podle potřeby daného typu vozu může být, a to ve většině případů i bývá, díl difuzoru vytvářen více trubicemi. V některých případech je vyústění vícepatrové.

Vzduch, který prochází rozšiřujícím se průřezem je urychlován, a díky tomu se pod vozidlem zmenšuje tlak a to přispívá k celkovému přitlaku. Další výhodou je, že proud vzduchu, který je hnán difuzorem za zád' vozidla, má značnou rychlost a vyplňuje prostor přímo za zádí vozu, kde usměrňuje víry, které se podílejí na aerodynamickém odporu karoserie. Přední difuzory mají vyústění na přední kola, kde usměrňují víry a i v tomto případě snižují celkový odpor [5].



Obrázek 3: difuzor [16]

## 2.5. Vnější prahy

Tlak vzduchu pod vozidlem je nižší než tlak vzduchu obtékající karoserii vně, a díky tomu se vzduch snaží pod auto dostat. Toto samozřejmě platí u vozů, které jsou vybaveny výše zmíněnými prvky, jako je například spoiler a splitter. Tomuto jevu je třeba zabránit a to je hlavní důvod nízkých prahů vozidel. Ideální velikost mezery mezi vozovkou a prahem je kolem 1,5 cm. Při zvětšování mezery prudce klesá účinnost prahů. (citace competition car aero.)



Obrázek 4: vnější prahy [16]

## 2.6. Boční kanály

Jeden ze dvou hlavních důvodů, proč jsou v karoserii vytvářeny kanály, je chlazení brzd a v některých případech i motoru. Druhá funkce bočních kanálů je odvod horkých plynů. Většina závodních automobilů používá přední difuzor, který má vyústění na zadní část předního kola. Tento proud vzduchu spolu se vzduchem od motoru a chlazení brzd by vytvářel turbulentní proudy kolem kola a zvyšoval by se aerodynamický odpor. Proto je vhodné tyto proudy usměrňovat a odvádět od kol co nejlepší cestou. Nejen že jsou proudy vzduchu a turbulentní víry odváděny hladkou cestou ven, ale také jsou usměrněny podél vozu a nezasahují do vzduchové bariéry, kterou vytvářejí canardy. Díky této konstrukci je také dosaženo lepšího proudění vzduchu kolem systému chlazení.



Obrázek 5: vyústění bočních kanálů nad kolem [16]

## 2.7. Přítlačná křídla

Vzhledem k tomu, že se budu v praktické části bakalářské práce zabývat návrhem přítlačného křídla, bude tato teoretická část více obsáhlá, než popis předešlých součástí aerodynamické výbavy závodních vozidel. Informace jsou z velké části čerpány z knihy *Competition Car Aerodynamics* – Simon McBeath. V této knize je většinou pojednáváno o dané součásti již od historie jejího vzniku, či používání ve sportovním automobilismu, až po podrobný popis jednotlivých funkcí součástí. V knize jsou také velice názorné obrázky a grafy, které vysvětlují, nebo graficky nastiňují danou problematiku.

Vývoj různých typů spoilerů dával v minulosti jasně najevo, že je to pouze část možného přítlaku, kterého je možné dosáhnout různě tvarovanými aerodynamickými prvky. Se zvyšující se rychlostí vozidel bylo potřeba dosáhnout mnohem vyšších hodnot přítlačných sil a tím hlavně umožnit rychlejší průjezdy zatáček. Jim Hall v pozdních 60. letech zavedl na sportovním voze křídlo, které bylo svým profilem uloženo opačně, oproti křídům letadel.

Díky tomu vytvářelo při jízdě vyšší tlak na vrchu a vyvozovalo přitlak. Pokud se podíváme o nějakých 40 – 50 let zpět, křídla měla velice jednoduchou konstrukci v porovnání s přitlačnými křídly, která se dnes používají v jednomístných závodních speciálech. Nicméně princip fungování je samozřejmě stejný [6].

Přitlačné křídlo, jak již bylo zmíněno, vlastně pochází ze světa letectví. Aerofoil, jinak také profil křídla, je tvarován tak, aby vytvářel vztlak, v našem případě přitlak, a přitom minimalizoval odpor prostředí.

Křídlo může mít po své délce rozdílné rozměry. Rozměr od náběžné hrany po zadní hranu křídla budeme v následujícím textu označovat písmenem „C<sub>1</sub>“. Náběžná hrana křídla je tvarována tak, aby byla stavěna ve správném úhlu k proudu vzduchu v dané oblasti. Přitlačná křídla v přední části vozu mají úhel náběžné hrany vůči vozovce nulový, nebo je úhel maximálně v řádu několika málo stupňů. Křídla na zádi závodního vozidla jsou vystavena proudění vzduchu kolem karoserie, který ještě ke všemu proudí na křídlo pod rozdílným úhlem v závislosti na okamžité rychlosti vozidla. Z tohoto důvodu je uchycení křídel v mnoha případech řešeno tak, aby byla možnost nastavit náběžný úhel pro danou situaci. Jima Halla Chaparral 2E a 2F v letech 1966 a 1967 měl tuto možnost také. Náběžný úhel křídla se dal nastavovat přímo řidičem, a to přes přidavný, třetí pedál (vůz disponoval automatickou převodovkou, takže pedál byl instalován na místě pedálu spojky) [6].



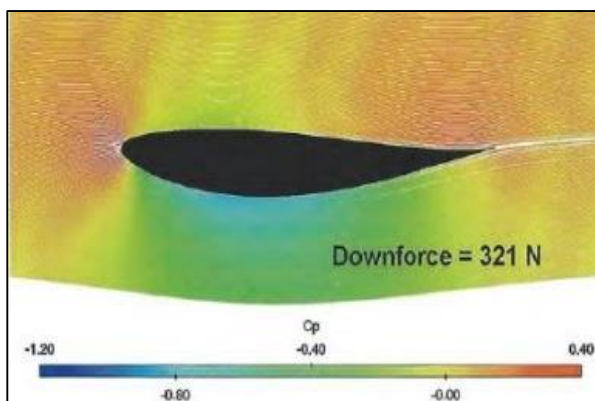
Obrázek 6: první přitlačné křídlo na vozu Chaparral 2F [6]

V dnešní době je ve většině závodních kategoriích povoleno manipulovat s nastavením křídla, ale pouze v boxech, kde manipulaci provádí mechanik. Nicméně Formule 1 využívá systém, u kterého pilot na rovině přepne část zadního křídla do druhé polohy, kde tato část (klapka) zaujímá téměř nulový náběžný úhel, a tím je snížen odpor křídla.

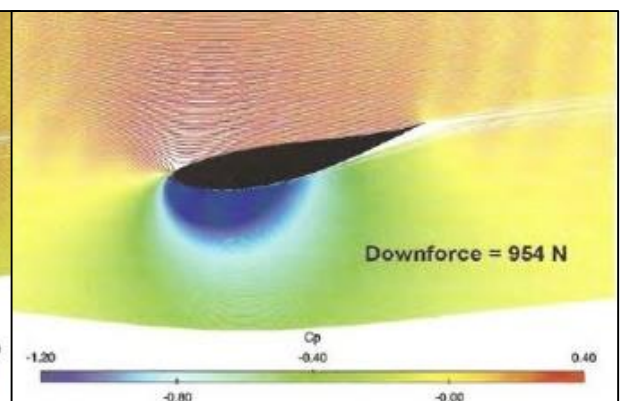
Další jev, který je třeba respektovat, je proudění vzduchu kolem karoserie, která je různě tvarovaná. Na prostřední část křídla proudí vzduch, který je hnán přes střechu, ale na strany křídla dopadá proud vzduchu, který vychází z boků karoserie, nebo zaoblených krajů střechy. To znamená, že v různých místech, po šířce křídla, by mělo mít křídlo náběžný úhel rozdílný.

Přítlak generovaný křídly je tedy ovlivněn mnoha aspekty. Celkové rozměry, profil, úhel náběhu, odklon, tloušťka a také počet křídlových prvků v dané konstrukci.

Vyklenutí profilu křídla je další důležitá stránka problematiky. Jak již bylo řečeno, v místě kde vzduch musí urazit delší trasu (vyklenutí), má proud vyšší rychlost a díky tomu je v místě nižší tlak, než na vrchní straně křídla, které má vyklenutí menší, žádné, nebo dokonce negativní. Celkové vyklenutí křídla, dále jen vyklenutí, znázorňuje prohnutá osa od náběžné hrany po koncovou hranu křídla. Z logiky věci vyplývá, že čím bude vyklenutí větší, tím musí proud vzduchu na spodní straně urazit delší trasu za stejný okamžik a tlak v dané oblasti se o to více sníží. Na následujících obrázcích můžeme vidět závislost mezi hodnotou přítlačné síly a úhlem náběhu, resp. vyklenutí.

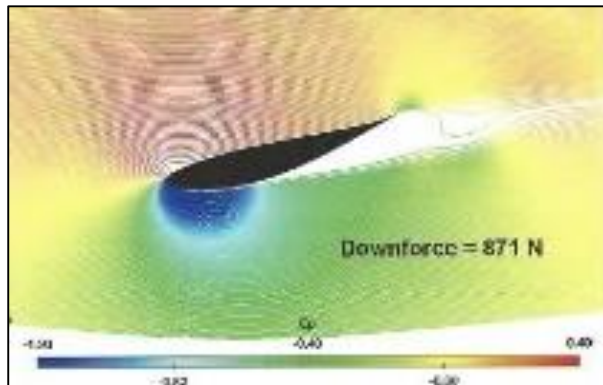


Obrázek 8: úhel náběhu  $0^\circ$  [7]



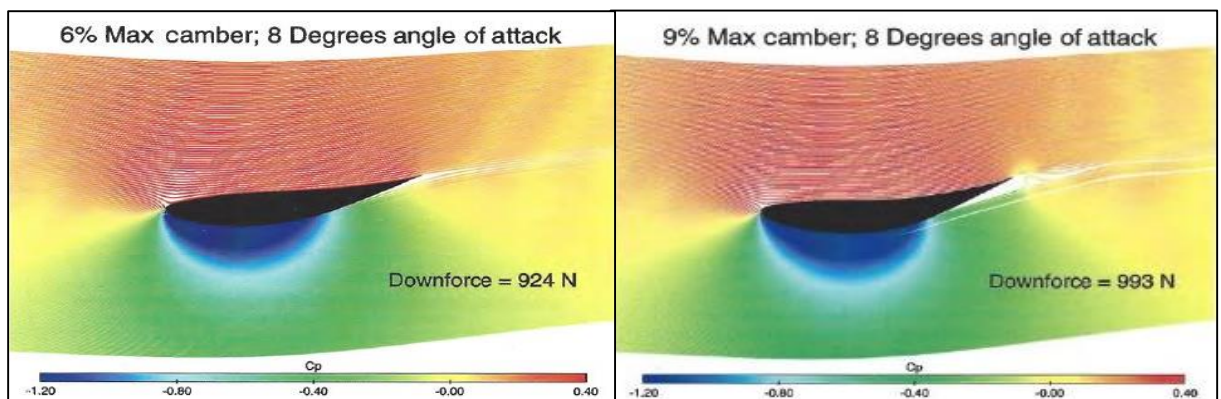
Obrázek 7: úhel náběhu  $12^\circ$  [7]





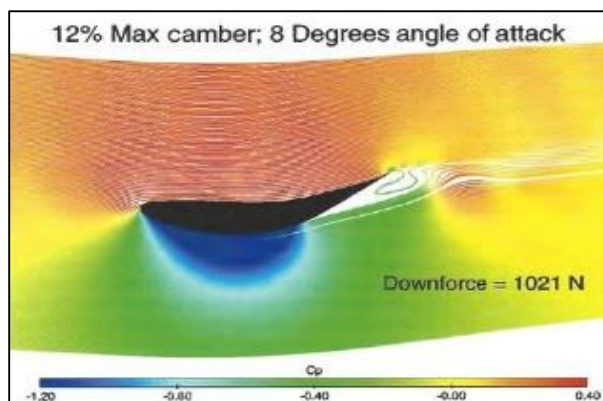
Obrázek 9: úhel náběhu 16° [7]

Jak je zřejmé z obrázků, přítlak od nulového úhlu náběhu roste až po úhel 12°, ale plocha, ve které nízký tlak působí, se s naklápěním zmenšuje. Při naklápění na úhel 16° je plocha na které působí nízký tlak tak malá, že se již celková přítlačná síla snižuje. Odpor se také s naklápěním značně zvětšuje, a tak je další naklápění antiproduktivní. Naproti tomu zvětšování vyklenutí profilu křídla přítlak zvyšuje efektivněji. Již při 8° úhlu náběhu a 9% vyklenutí je přítlak vyšší, než u předchozího případu, kdy bylo křídlo naklopeno na 12°. Při dalším zvyšování vyklenutí se začínají zvětšovat víry za křídlem, což přispívá k celkovému odporu.



Obrázek 11: 6% vyklenutí, 8° náběh [7]

Obrázek 10: 9% vyklenutí, 8° náběh [7]



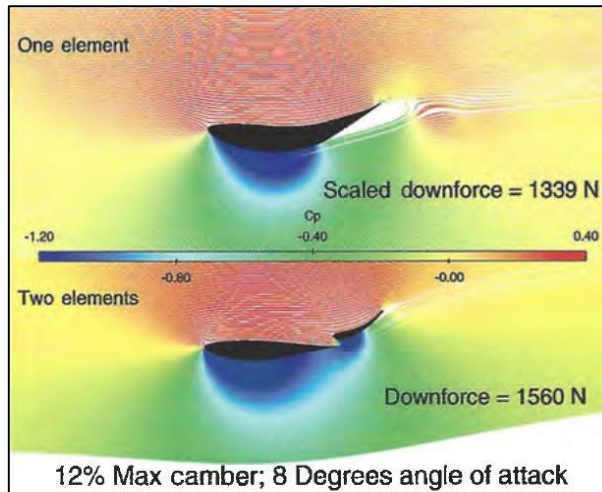
Obrázek 12: 12% vyklenutí, 8° náběh [7]

Ve znázorněných příkladech byla vždy maximální hodnota vyklenutí na 50% vzdálenosti od přední hrany k hraně zadní. V praxi se tato vzdálenost mění. Například pro větší přítlak u křídla s menším náběžným úhlem se poloha maximálního vyklenutí posouvá vpřed. Konkrétní případ samozřejmě závisí mimo jiné na druhu a tvaru uvažovaného vozidla [7].

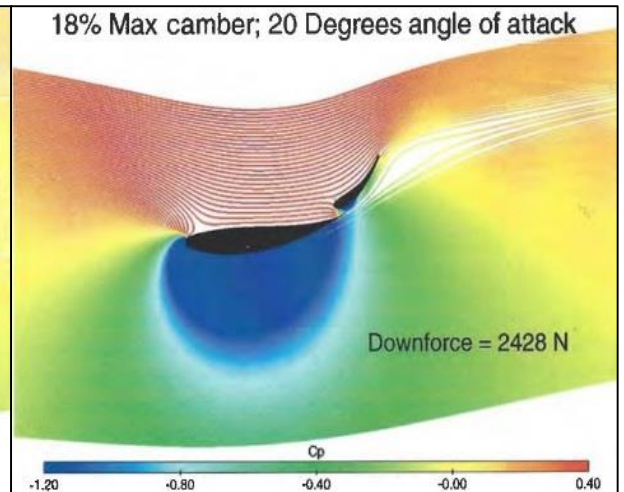
Křídla s více prvky v konstrukci s sebou přináší další výhody, jako jsou například další možnosti nastavení pro zvýšení celkové přítlačné síly, nebo zmenšení odporu. Hlavní velkou výhodou je, že při zachování rozměrů hlavního křídla, úhel náběhu a vyklenutí, se díky klapce znatelně zvětší výkon křídla ve všech ohledech. Nejjednodušší variantou je křídlo se dvěma prvky. Skládá se ze základního prvku, kterým je prvotní křídlo a z klapky. Klapka je umístěna nad základním křídlem v zadní části. Z testování v aerodynamickém tunelu bylo zjištěno ideální usazení klapky. Mezera mezi hlavním křídlem a náběžnou hranou klapky je ideálně 1% až 3,8% rozměru  $C_1$  (rozměr od náběžné hrany ke koncové u hlavního křídla). Překrytí zadní části hlavního křídla s náběžnou částí klapky se pohybuje od 1% do 5,2% rozměru  $C_1$ . Rozměr  $C_2$  klapky je v první řadě závislý na velikosti potřebného přítlaku a nejčastěji se pohybuje v mezích od 25% do 40% rozměru  $C_1$ . Na obrázku č.: 14 je znát jak velký je rozdíl v přítlaku mezi jednoduchým křídlem a křídlem ze dvou prvků. Přičemž osa dvouprvkového křídla, která spojuje náběžnou hranu primárního křídla a odtokovou hranu klapky, dosahuje stejného procenta vyklenutí, jako osa vyklenutí jednoduchého křídla [7].

Dvouprvkové křídlo není vždy využíváno pouze pro zvýšení přítlaku, ale instalovaná klapka odebírá vzduch z vysokotlaké části, který je urychlován v mezeře mezi svou náběžnou hranou a hlavním křídlem. Díky tomu je dosaženo vyšší rychlosti vzduchu na odtokové hraně primárního křídla a z části se eliminují víry, které mají za následek vyšší aerodynamický odpor. Proud vzduchu je nejen urychlen, ale také se vzduch dostává do rotace a to pozitivně zvětšuje náběžný úhel celého křídla. Urychlením vzduchu na obou plochách křídla a hlavně na odtokové hraně se snižuje možnost, že by proudy vzduchu jdoucí od rotace kol narušovaly správnou činnost křídla (toto platí v případě vozů s odhalenými koly například Formule 1). V případě, že klapka bude mít značné vyklenutí, může se mezera od její náběžné hrany dále zmenšovat. Díky tomu roste tlak mezi klapkou a křídlem, který za prvé napomáhá udržení stability klapky a za druhé je díky vyššímu tlaku v nejužším místě ještě více urychlen proud v místě rozšíření [7].

Další veliký rozdíl mezi jednoprvkovým a dvouprvkovým křídlem je zřetelný z obrázku číslo 13, kde je jasné, jak významného nárůstu výkonu křídla se zadní klapkou jsme schopni dosáhnout, pokud zvýšíme vyklenutí primárního křídla. Oproti změnám přítlaku, kterých bylo dosaženo změnou vyklenutí u jednoduchých křídél, je tento nárůst razantní.



Obrázek 14: rozdíl mezi jednoprvkovým a dvouprvkovým křídlem [7]



Obrázek 13: velice silný přítlak při 18% vyklenutím a 20° náběhu [7]

V následující tabulce jsou uvedeny procentuální rozdíly v přítlaku mezi jednoprvkovými a dvouprvkovými přítlačnými křídly s různými procenty vyklenutí a různým úhlem náběžné hrany.

Tabulka 1: velikosti přítlačných sil v závislosti na úhlu náběhu a vyklenutí [7]

Úhel náběhu [stupně]	Vyklenutí [%]	Jednoprvková křídla - přítlačná síla [N]	Dvouprvková křídla - přítlačná síla [N]	Přírůstek přítlaku [%]
4	9	1107	1122	1,4
8	9	1302	1452	10,3
12	9	1501	1784	15,8
4	12	1158	1237	6,4
8	12	1339	1560	14,1
12	12	1410	1886	25,3

Přítlačná křídla se třemi i více prvky jsou také hojně využívána, například u Formule 1. Přidáním další klapky vzroste přítlačná síla. Většinou se obě klapky dají podle potřeby nastavovat, ale pouze v boxu, nebo před samotným závodem. Toto záleží na pravidlech dané soutěže, ale nastavení řidičem by bylo složité, jak na provedení křídla, tak i na odhadu pilota. Mechanismus na nastavení klapek bývá spojen, takže se nastavují obě najednou. Mezera mezi první klapkou a primárním křídlem je zpravidla větší, než mezera mezi první a druhou klapkou. Co se týče úhlu náběhu jednotlivých klapek, bývá zde rozdíl, který je převážně dosti velký. U první (spodní) klapky je ideální úhel náběhu od  $25^\circ$  do  $30^\circ$  ale u druhé klapky je tento úhel mnohem větší a dosahuje až  $70^\circ$ . Tyto úhly jsou udávány od osy primárního křídla, a pokud je primární křídlo usazeno s kladným úhlem náběhu, celkový úhel náběhu klapky k vozovce je tedy ještě větší. Kolem roku 1997 měli v soutěži IndyCar některé vozy vrchní klapku s úhlem náběhu i více než  $90^\circ$ .

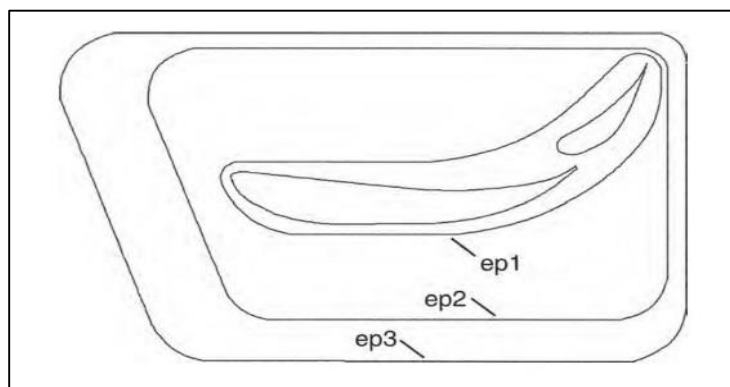
Některá křídla, dimenzována na vysoký výkon, trpí tím, že se vzduch proudící na spodní straně křídla velice brzy odděluje od povrchu a nekopíruje vyklenutí křídla. Tímto negativem disponují hlavně vysoko výkonnostní křídla s velkým vyklenutím, nebo s velkým úhlem náběhu. Tento jev se dá eliminovat přidáním další klapky, která je uchycena před primární křídlo a je natočená ostrou hranou na opačnou stranu, než je tomu u klapky umístěných vzadu (obrázek č.: 15). Takto uchycená klapka pomáhá usměrňovat proud vzduchu na spodní stranu křídla. Nicméně ve většině soutěží pravidla povolují jen omezený počet klapky, které mohou být na křídlo osazeny, a proto se jejich maximální počet dimenzuje pro přidání přitlaku. Proto je nutné přistoupit ke kompromisu a řešit tento negativní jev převážně změnou polohy, či vyklenutí primárního křídla [8].



Obrázek 15: přítlačné křídlo se čtyřmi prvky [8]

Vícevrstvá křídla jsou další možností, jak zvýšit výkon přitlačného zařízení. Nejvíce je toto uspořádání využíváno ve Formuli 1, kde má křídlo značně omezenou šířku. Vrchní část celku bývá tvořena primárním křídlem a více zadními klapkami, jak bylo popisováno v předchozích odstavcích. Navíc je ale pod toto uspořádání zařazeno další primární křídlo, většinou bez přídavných klapek. Pod spodní stranou vrchního křídla vzniká oblast nízkého tlaku vzduchu, a proto nemůže být spodní křídlo tak efektivní, aby se výsledek přitlaku zdvojnásobil. Jak je zřejmé, v tomto uspořádání není spodní křídlo schopno dosáhnout velkého tlaku na své vrchní straně. Nicméně je dokázáno, že se přitlak i za těchto okolností navýší a vzhledem k omezené šířce křídla je u některých vozů toto vícevrstvé skládání křidel potřebné.

Boční koncové desky (end plates) neslouží pouze jako dobře viditelná plocha na reklamy, ale efektivně napomáhají přitlačnému účinku křídla. Vzduch, který proudí okolo křídla, má mnohonásobně nižší tlak, než vzduch proudící přes křídlo. Pokud by tomu nic nebránilo, vzduch z vyšší tlakové zóny by se „vyléval“ z krajů křidel do stran, do zóny s nižším tlakem. Boční desky tomuto jevu brání. Přitlak je také závislý na velikosti těchto desek. Na obrázku číslo 16 je znázorněno několik variant velikosti desek a v tabulce číslo 2 můžeme vidět nárůst přitlačné síly. Síla, která působí na křídlo díky nízkému tlaku vzduchu ve spodní části. Tato síla se s přírůstkem desek mírně zmenšuje, ale přitlak i tak narůstá.



Obrázek 16: různé velikosti bočních desek (end plates) [9]

Tabulka 2: síly působící na křídlo v závislosti na velikosti bočních desek (end plates) [9]

Typ boční desky	Přitlačná síla na křídlo [N]	Tah od nízkého tlaku pod křídlem [N]
ep0	769,2	194,8
ep1	786,7	188,3
ep2	873,4	183,8
ep3	900,1	178,1

Boční desky do určité míry oddalují vzdušné víry od desky křídla. Z obrázků číslo 17 a 18 je vidět, kde se soustřeďuje počátek vírů u křídla bez desek respektive s deskami. U křídla, které disponuje deskami, se víry začínají tvořit na vrchním rohu desek a mají menší vliv na výkon křídla. Jak již bylo popsáno, desky udržují vyšší tlak nad křídlem, ale pokud jsou desky protaženy i pod křídlo, udržují nízký tlak pod křídlem, což je ještě více efektivní. Toto můžeme přirovnat k funkci vnějších prahů sportovních automobilů, o kterých bylo pojednáno v kapitole „Vnější prahy“. Křídla jsou také v mnoha případech pomocí bočních desek uchycena ke karoserii, a proto je protažení desek směrem dolu realizováno i za tímto účelem [9].



Obrázek 18: Vzdušné víry za křídlem bez bočních desek [9]

Obrázek 17: Vzdušné víry za křídlem s bočními deskami [9]

### 3. Materiály používané pro výrobu přítlačných křídel

Aerodynamické prvky, které jsou aplikovány na závodní vozy, mimo jiné zvyšují jejich hmotnost. Jelikož je zvyšování hmotnosti vozidla velmi negativní jev, inženýři řadí snahu o výrobu co nejlehčích prvků mezi primární požadavky. Co se týče kovových materiálů, je výhodné používat slitiny hliníku, které disponují relativně nízkou hmotností při dostačující pevnosti. Slitiny hliníku se používají na vnitřní výztuhy křídla, na boční desky (end plates), nebo také na uchycení křídla ke karoserii. To může být řešeno buď samostatným

úchytem blíže ke středu křídlového prvku, nebo může být křídlo uchyceno na karoserii pomocí velkých bočních desek, které v této aplikaci zastávají dvě funkce naráz.

Další materiály, které se hojně využívají, jsou kompozity. Křídlový prvek samotný se z pravidla vyrábí z kompozitního materiálu, kde základní materiál tvoří skelné vlákno (S - strength), nebo v případě dražších a také téměř po všech stránkách výkonnějších křidel, uhlíkové vlákno. Hlavní výhodou kompozitů je vysoká pevnost při zachování velmi nízké hmotnosti.

Úchyty křidel bývají řešeny pomocí ocelových konstrukcí. Úchyt křídla musí nejen zajistit vysokou pevnost a stabilitu křídla při vysokém silovém namáhání. Ale také jde o prvek, který u drahých sportovních vozů, jako je například Pagani Zonda R (vyobrazena na obrázcích aerodynamických prvků), pomáhá vytvořit designově povedený automobil. Používá se například chromování ocelového povrchu, nebo u hliníkových součástí to může být eloxování. Povrchové úpravy kompozitů bývají různé, hlavně v závislosti na použité disperzi (vlákno v kompozitu). Prvky ze skleněného vlákna bývají lakovány, protože vzhled tohoto materiálu bez povrchové úpravy není povedený. Na rozdíl od skleněného vlákna, uhlíkové vlákno se v nejvyšší míře povrchově neupravuje. Kompozitní materiál z uhlíkových vláken dodává vozu mimo jiné sportovní a velmi inovativní vzhled.



Obrázek 20: Zavěšení předního kola vozu F1 značky Lotus z uhlíkového kompozitu [17]



Obrázek 19: deska kompozitního materiálu ze skelných vláken [18]

## 4. Kompozitní materiály

### 4.1. Úvod do kompozitních materiálů

Využívání vlastností celku tvořeného ze skládání materiálů o rozdílných vlastnostech je hojně využíváno v přírodě, bez jakéhokoliv zasahování člověka. Takovýto jev můžeme pozorovat například v řezu stromů, kde je kompozitního jevu využíváno ve struktuře dřeva. Kompozity jsou pro svoje vlastnosti využívány velmi často v moderní výrobní technologii. Využitím této technologie se dosahuje velmi vysokých hodnot mechanických vlastností (např. modulu pružnosti, pevnosti v tahu, atd.), při velmi nízké hustotě, čili nízké hmotnosti prvku, nebo součásti.

Kompozit je vytvořen ze dvou či více složek a fází, které se významně liší chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Tužší a tvrdší nespojitá fáze se nazývá disperze (výztuž). Obvykle poddajnější a spojitá fáze, která je použita jako pojivo výztuže, se nazývá matrice. V současné době se za kompozity označují materiály, které v určité míře splňují následující podmínky. Podíl disperze je minimálně 5%. Chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti složek a fází se od sebe výrazně liší, vytvoření kompozitu je připraveno mechanickým mísením složek a fází. Kompozitní materiály se vyznačují takzvaným synergismem, což znamená, že vlastnosti prvků v celku jsou lepší, než „součet“ vlastností prvků, které jsou situovány zvlášť.

Jediná, všeobecně uznávaná a jasná definice kompozitu neexistuje. Definice, používaná v USA, kterou vytvořila NASA ve spolupráci s americkým vojenským vývojovým centrem: **Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn., vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní [10].**

Další definice G. F. Milтона:

**Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (staticky) homogenní [10].**



## 4.2. Současné požadavky na kompozity

Cílevědomé vytváření nových kompozitních materiálů má za svůj účel splnění některých požadavků, které u klasických materiálů jsou jen těžko splnitelné. Jde zejména o tyto požadavky. :

- zvýšení tuhosti (zvláště specifické tuhosti – poměru Youngova modulu a hustoty)
- zvýšení pevnosti (zvláště specifické pevnosti – poměru meze pevnosti a hustoty)
- zvýšení rozměrové stability
- zvýšení stability
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti)
- zvýšení teplotní stability (rozšíření teplotního intervalu použitelnosti)
- zvýšení mechanického tlumení (antivibrační a antihlukové materiály)
- snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny
- modifikace elektrických vlastností (zvýšení resp. snížení elektrické vodivosti)
- snížení nasákavosti
- zmenšení teplotní roztažnosti
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti
- udržení tuhosti nebo pevnosti při vysoké teplotě
- snížení negativního dopadu na životní prostředí
- redukce hmotnosti (snížení hustoty)
- snížení ceny

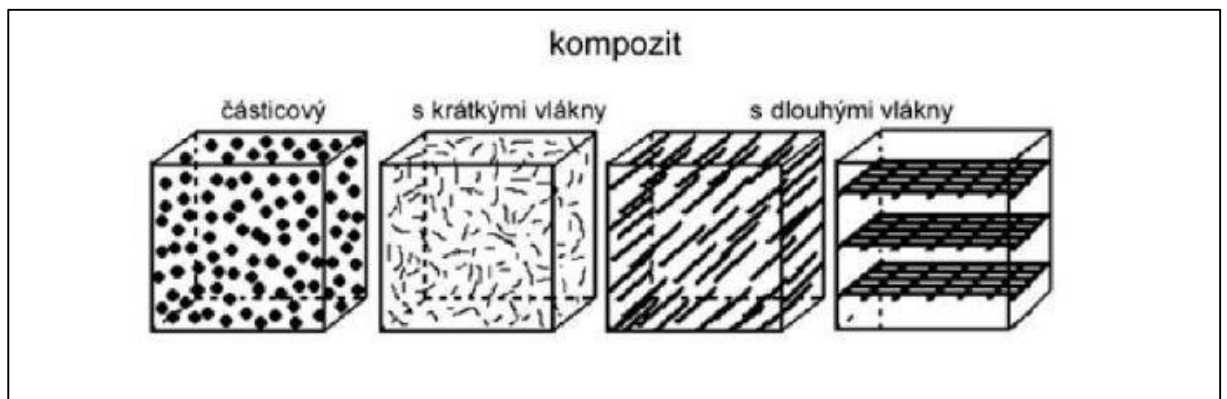
## 4.3. Izotropie, anizotropie

Kompozitní materiály jsou ve většině případů silně anizotropní, na rozdíl od běžných technických materiálů, jako jsou například slitiny kovů, které jsou většinou zcela izotropní, nebo vykazují jen nepatrnou anizotropii. Vlastnosti izotropního materiálu jsou ve všech směrech namáhání stejné. Naproti tomu materiál anizotropní bude vykazovat ve všech směrech, ve kterých bude namáhán, zcela rozdílné vlastnosti. Pseudoizotropní materiály mají stejné elastické vlastnosti ve třech na sebe kolmých osách. Ortotropní materiály mají vlastnosti symetrické ve třech na sebe kolmých rovinách, nicméně v každé z rovin jsou izotropní. Poslední typ je příčně izotropní materiál, který má tři roviny symetrie, ale jen v jedné rovině vykazuje izotropní vlastnosti.

#### 4.4. Výztuže

Výztuže u kompozitu mají různé rozměry, podle toho k jakému účelu je součást používána a jaké od ní požadujeme vlastnosti. Nejmenší příčné rozměry výztuže v kompozitech jsou v řádech nanometrů a mluvíme zde o takzvaných nanokompozitech. Ve strojírenství se nejvíce používají mikrokompozitní materiály, kde se příčný rozměr výztuže ve většině případů pohybuje kolem hodnoty 20  $\mu\text{m}$ . V případě přítláčného křídla automobilu budeme uvažovat rozměry výztuže kompozitního materiálu kolem hodnoty 20  $\mu\text{m}$  v závislosti na materiálu, u skelných vláken může být příčný rozměr až 24  $\mu\text{m}$ , ale u karbonových vláken je to pouze v rozmezí 5 – 10  $\mu\text{m}$ . Nicméně zde stále uvažujeme o kompozitech v mikroskopickém měřítku, kde se příčný rozměr vlákna pohybuje v mezích kolem 100  $\mu\text{m}$ . O makrokompozitech mluvíme nejčastěji ve stavebnictví. Zde se příčný rozměr výztuže pohybuje v řádu milimetrů (například železobeton, kde výztuž představují železné dráty či sítě).

Podle tvaru se určují výztuže využitím takzvaného štíhlostního poměru. Tedy jako podíl největšího a nejmenšího rozměru výztuže.



Obrázek 21: Typy výztuží v kompozitech [12]

Nejmenšího zpevnění kompozitu dosáhneme u kulových částic. Nárůst zpevnění přichází s použitím částicové výztuže ve tvaru destiček a největší pevnosti dosáhneme použitím vláknových výztuží. Nicméně z logiky věci vyplývá, že s rostoucím zpevněním kompozitu také roste anizotropie materiálu.

#### 4.4.1. Částicová disperze

Částicová disperze je buď izometrická, kde je materiál z pravidla izotropní, nebo neizometrická, kde je materiál ve formě destiček nebo jehliček a disperze je v celku orientována systematicky, nebo náhodně.

#### 4.4.2. Vlákenná disperze

Podélný rozměr o několik řádů převyšuje rozměr příčný a vlákna nedisponují ohybovou pevností.

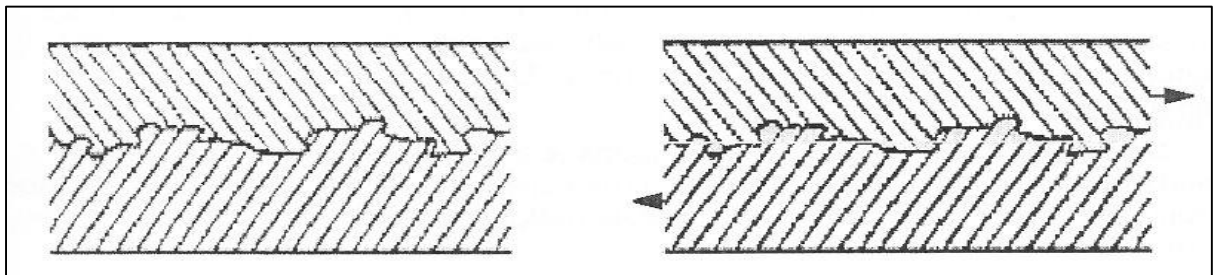
- Spojitá vlákna jsou vedena po celém rozměru kompozitu bez přerušování. Jsou situována do jednoosého uspořádání, nebo dvouosého uspořádání (například ve formě tkaniny nebo pleteniny).
- Dlouhá vlákna jsou delší, než je kritická délka a při lomu kompozitu se přetrhají. Situována jsou do jednoosého uspořádání, dvouosého uspořádání, ale také do tříosého uspořádání, kde jsou náhodně prostorově rozptýlena.
- Krátká vlákna jsou kratší, než je kritická délka a při lomu se vytahují. Situována jsou stejnými způsoby, jako předchozí varianta.

### 4.5. Adheze v kompozitech

Tato vlastnost kompozitu je dána mechanickým mísením složek. Díky rozdílným materiálům, které na sebe navazují, vznikají na jejich površích adhezní síly. Tyto síly se nezanedbatelně podílejí na výsledných parametrech kompozitu.

#### 4.5.1. Mechanické zaklínění

Místo, kde se dotýká matrice a disperze není nikdy dokonale rovné a hladké, ale objevuje se zde určitá drsnost povrchu. Na obrázku 2 je znázorněno zaklínění obou materiálů. Tato drsná styková plocha zajišťuje, že se disperze s matricí vůči sobě nepohybuje, a to přispívá k pevnosti celku.

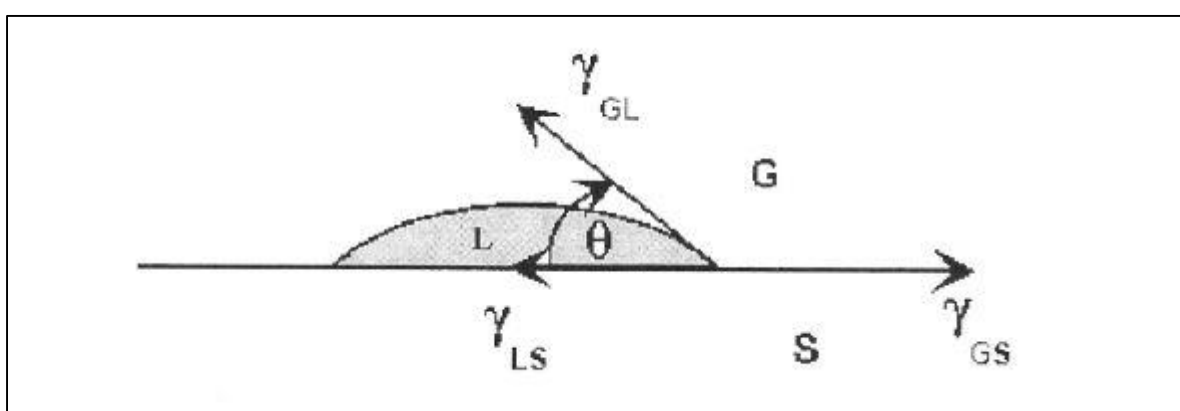


Obrázek 22: Mechanické zaklínění matrice a disperze [11]

#### 4.5.2. Fyzikální adheze

Mezi částicemi a rozhráním vzniká takzvaná Van der Waalsova vazba. Vzniká v rozmezí od 0,3 do 0,5 nm a teoretická pevnost vazby je až 7 GPa. Pokud se podaří dosáhnout této hodnoty pevnosti, je vazební síla považována za dostatečně velkou a rozhrání vhodné pro použití v kompozitu. Tato vazba souvisí se smáčivostí matrice s disperzí.

Smáčivost dvou látek, ze kterých jedna je kapalná a druhá tuhá (v případě kompozitu zpravidla kapalná je matrice a tuhá disperze), je možné vyjádřit s pomocí povrchového napětí nebo povrchové energie. Základní poměry na rozhrání znázorňuje následující schéma [12].

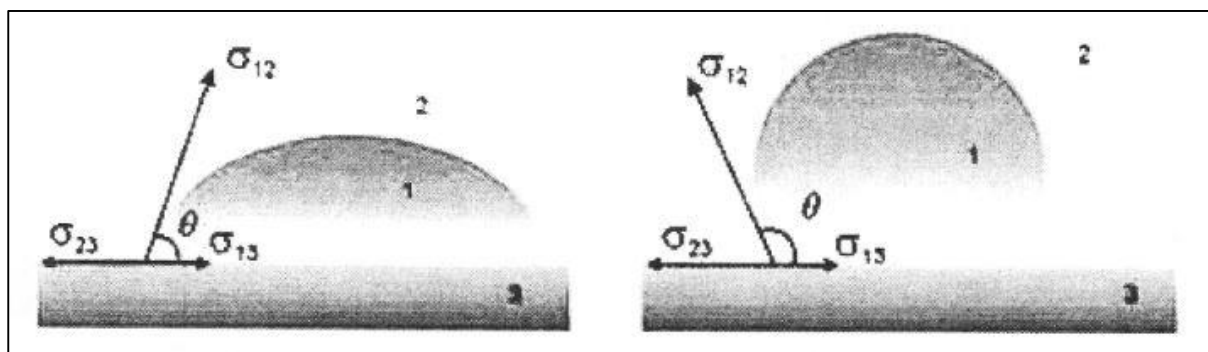


Obrázek 23: základní schéma smáčivosti [12]

Při snižování celkové povrchové energie mezi disperzí a matricí se zmenšuje úhel  $\theta$  a zvětšuje se smáčený povrch mezi pevným a kapalným prostředím. Pokud se úhel  $\theta$  pohybuje v rozmezí 0 – 90 stupňů, jedná se o látky vzájemně smáčivé. V případě úhlu  $\theta$  většího než 90 stupňů je povrchové napětí větší, smáčená plocha mezi disperzí a matricí je menší a mluvíme zde o látkách vzájemně nesmáčivých. V případě nulového úhlu  $\theta$  ( $\theta = 0$  stupňů) je napětí v rozhrání taktéž nulové, smáčená plocha maximální a mluvíme zde o látkách vzájemně ideálně smáčivých.

Dosud jsme uvažovali pouze ideálně hladké povrchy prostředí. Drsné povrchy zákonitě úhel smáčivosti mění. U látek vzájemně smáčivých adheze narůstá přímo úměrou, se zvyšující se drsností povrchu. Naopak tomu je u látek vzájemně nesmáčivých, kde se adheze s drsností povrchu značně snižuje.

Například kapalina s dobrou smáčivostí na běžných površích (například různé druhy plastů) je líh, nebo ether. Kapalina, která je na většině površích nesmáčivá, je například rtuť, která vytváří kuličky a úhel  $\theta$  se blíží 180 stupňům.



Obrázek 24: Kapka smáčivé (vlevo), nesmáčivé (vpravo) kapaliny na pevném povrchu [12]

Vlákna používaná v kompozitech (skleněná, uhlíková) se vyznačují velmi nízkou adhezí, a proto se při výrobě musejí upravovat. U skleněných vláken probíhá, jako jeden z posledních procesů výroby, lubrikace vláken, která zvyšuje jejich smáčivost. U grafitových vláken je dosažení lepší smáčivosti výrazně složitější.

#### 4.5.3. Chemická adheze

Jestli-že vznikne na rozhraní matrice a disperze chemická vazba, bývají vazební síly ještě větší než u fyzikální adheze. Vazby vznikají na vzdálenost 0,1 až 0,3 nm a odpovídají teoretické pevnosti 7 až 10 GPa. Jsou dva typy chemických vazeb, které se na rozhraní objevují. Matrice a disperze vzájemně difundují (vzniká difuzní mezivrstva s velmi silnou adhezí), nebo spolu vzájemně chemicky reagují (vzniká vrstva chemické sloučeniny). Z hlediska adheze jsou tyto jevy příhodné, nicméně při velmi silné difuzi, či velmi silné chemické reakci může docházet k nezanedbatelnému úbytku disperze, čímž je narušena pevnost disperze a kompozitu jako celku. Například u vláknových kompozitů (případ u přitlačných křídel automobilu a jiných kompozitových součástí karoserie automobilu) se používá mezi maticí a disperzí mezivrstva. Mezivrstvy vytvořené difuzí nebo chemickou reakcí mohou dosahovat nízké pevnosti, nebo mohou být křehké a dochází v této mezivrstvě k předčasnému porušení a následnému znehodnocení kompozitu.

## 4.6. Vyztužující vlákna

V kompozitech se používají nejrůznější druhy vláken. V zásadě je můžeme roztřídit na následující skupiny:

- přírodní vlákna
- skleněná vlákna
- uhlíková vlákna a grafitová vlákna
- aramidová vlákna a silonová vlákna
- keramická vlákna
- kovová vlákna
- whiskery

Průřez vláken je zpravidla kruhový, jejich průměr se pohybuje v širokém rozmezí (pro porovnání – průměr lidského vlasu je okolo 0,05 mm, pavoučího vlákna 0,015 mm) :

- do průměru 100 nanometrů – tzv. nanovlákna
- 0,1 až 1 mikrometrů – mikrovlákna (například whiskery)
- 1 až 20 mikrometrů – střední vlákna (uhlíková, skleněná, textilní)
- nad 20 mikrometrů – hrubá vlákna (B, TiB<sub>2</sub>, SiC a podobně) [13]

### 4.6.1. Přírodní vlákna

Některá přírodní vlákna mají velice dobré vlastnosti při použití v kompozitních materiálech. Pro vyztužování plastů jsou ale vhodná pouze vlákna rostlinná, která obsahují jako základ celulózu. Mezi ně spadá například konopí, len, sisal, juta, ramie a bavlna. Hlavní výhodou těchto vláken je odolnost vůči stárnutí. Zajímavá je jejich velká pevnost v tahu v závislosti na jejich hmotnosti, a proto jsou velice vhodná pro použití do obzvláště lehkých konstrukcí.

## **Výhody**

- nízká hustota
- malá abrazivita při mechanickém opracování
- výhodná likvidace spalováním

## **Nevýhody**

- změna vlastností vláken na podmínkách růstu
- citlivé na vlhkost
- nebezpečí rozkladu vláken při vyšší teplotě zpracování s matricí (odolnost přibližně do 200 °C)
- nákladná úprava před použitím matrice
- omezená délka vláken
- náchylné na biologické napadení

### **4.6.2. Aramidová vlákna**

Aramidová vlákna jsou vlákna a na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Odhadovaná teoretická pevnost je kolem  $200\,000\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít až 70% jejich skutečné pevnosti, při zvláště tažné matrici dokonce ještě více. Hlavními oblastmi použití jsou, náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuže pro pneumatiky, balistické aplikace a světlovodné kabely [14].

Aramidové kompozity jsou vhodné pro použití v lehkých konstrukcích namáhaných tahem. Vzhledem k jejich silné anizotropii nejsou vhodné v konstrukcích namáhaných ohybem, nebo tlakem.

#### 4.6.3. Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou vyráběna v různém složení, a to podle způsobu použití. Na trhu mají nejvyšší zastoupení (téměř 90%) vlákna s označením E-vlákna. Je to bezalkalická sklovina, která je vynikajícím elektrickým izolantem a také se vyznačuje vysokou propustností záření. Sklovina s vyšším obsahem  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  má až o 70% vyšší pevnost a označuje se jako S-sklovina. Tento typ skloviny se používá ve vysokopevnostních kompozitech. Při výrobě přitlačného křídla a jiných prvků automobilů se právě tato sklovina používá. Další typy jsou například, C-sklovina pro chemické aplikace a A-sklovina, která se využívá jako tepelná izolace [15].

Mez pevnosti v tahu S-vláken je přibližně  $4\,400 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a E-modul přibližně  $86\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ .

#### 4.6.4. Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale nízkou tažností. Výchozí surovina pro výrobu uhlíkových vláken s nejvyšší možnou pevností a tuhostí je polyakrylonitril (PAN). Vlákna se skládají z více než 90 % z uhlíku, < 7 % dusíku, < 1 % kyslíku, < 0,3 % vodíku.

Výchozí organické sloučeniny jsou nejprve ve vláknitém stavu karbonizovány a přitom se ostatní prvky, mimo uhlíku, téměř celkově odštěpí. Mechanické vlastnosti se se zvyšující teplotou zlepšují, až do teploty  $1\,800^\circ\text{C}$ . Průměr vláken dosahuje od 5 do 10  $\mu\text{m}$ . Mez pevnosti v tahu je více než  $5\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a E-modul více než  $400\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  [15].



## 4.7. Materiály pro stavbu přítláčného křídla v závislosti na hmotnosti

Prvky křídla je možné vyrobit z mnoha různých materiálů. Výroba prvků z jednotlivých materiálů je různě složitá. V tabulce číslo 3 je znázorněna závislost hmotnosti křídla na použitých materiálech křídlového prvku a prvku uchycení.

Tabulka 3: závislost použitých materiálů na hmotnosti křídla

Materiál křídla	Materiál uchycení	Hmotnost celku [kg]
uhlíkové vlákno	ocel	15,448
uhlíkové vlákno	slitina hliníku	14,410
skelné vlákno (S - strength)	ocel	18,252
skelné vlákno (S - strength)	slitina hliníku	17,215
slitina hliníku	ocel	20,005
slitina hliníku	slitina hliníku	18,968

Z tabulky je zřejmé, že jako nejvhodnější řešení se jeví použití uhlíkového vlákna na křídlový prvek a hliníkové slitiny pro uchycení. Nicméně je na místě pevnostní zkouška uchycení křídla. Toto ideální řešení, použití hliníku na uchycení, je vhodné pro snížení celkové hmotnosti, která na rozdíl od ocelové konstrukce klesne více než o 1 kg, ale nemuselo by být vhodné při značném zatížení, které prvek musí přenášet na karoserii automobilu.

### 4.7.1. Uhlíkové vlákno

Nejvhodnější řešení, co se týče hmotnosti, je kompozitový materiál s disperzí z uhlíkového vlákna. Co se týče výroby této konstrukce, jsou zde další značné oproti ostatním. Rohož z uhlíkových vláken je vkládána do formy a následně pojena maticí z epoxidové pryskyřice. Po vytvrzení je z formy vyjmut hotový díl, který není potřeba dále povrchově upravovat. Další povrchové úpravy, jako je například nanášení vyrovnávacího tmelu, nebo různých nástřiků a nátěrů proti okolním vlivům by jen zvyšovalo hmotnost celku a také prodlužovalo a prodražovalo výrobu. Nevýhoda uhlíkového vlákna je, stejně jako u mnoha jiných materiálů, náchylnost na UV záření, to ale může být řešeno přidáním složek do matrice v kapalném stavu, které zabraňují pronikání záření na vlákna disperze.

### 4.7.2. Skleněné vlákno (S – strength)

Skleněné vlákno typu „strength“ je nejpevnější skelné vlákno, které se v těchto konstrukcích používá. Jak je patrné z tabulky, hmotnost celku se po použití tohoto typu kompozitního materiálu zvýší téměř o 3 kg, což je už značný přírůstek. Tento kompozitní

materiál dosahuje až dvakrát nižší pevnosti v tahu a dokonce až třikrát nižšího modulu pružnosti. Nicméně je skelné vlákno na rozdíl od uhlíkového výrazně méně anizotropní.

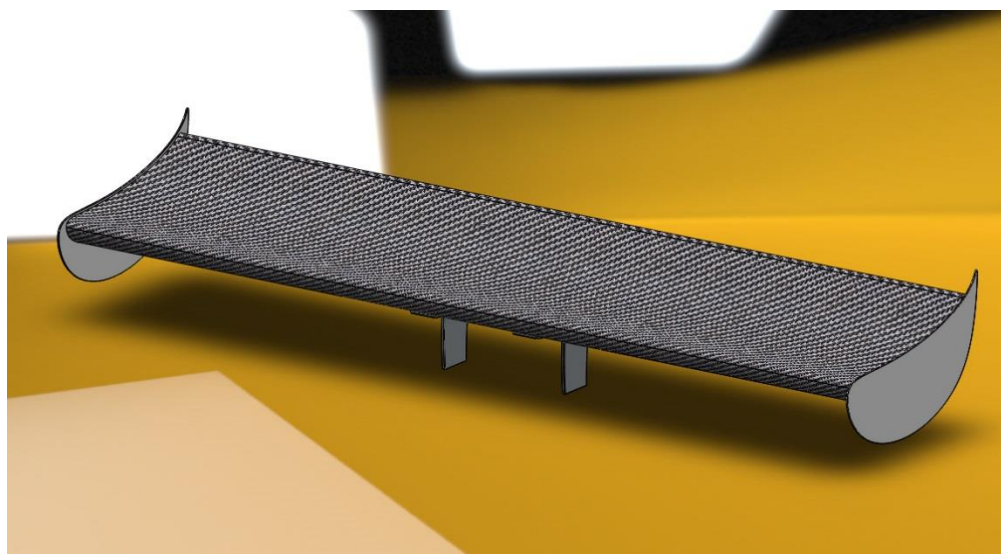
Velkou nevýhodou je včetně hmotnosti také výroba tohoto kompozitního materiálu. Po vyndání z formy se povrch dále upravuje. Povrch se dále vyrovnává vyrovnávacími tmely a poté se nanáší vrchní barva. Konstrukce ze skleněných vláken je křehčí, těžší, ale také levnější a proto se využívá hlavně k výrobě levnějších automobilových prvků, z největší části pro amatérské tuningové úpravy sériových automobilů.

#### 4.7.3. Slitina hliníku

Použití slitiny hliníků je pro křídlový prvek nevhodné. Hmotnost prvku, jak je vidět v tabulce, vzroste oproti uhlíkovému kompozitu o více než 4,5 kg. Celková hmotnost křídla 20 kg je již značná a velice negativně se bude podepisovat na výkonu sportovního automobilu.

Výroba této konstrukce z hliníkové slitiny by byla řešena jako odlitek do formy, buď jako dvě oddělené poloviny (vrchní část a spodní část) a následně svařena, nebo odlita jako celek. Odlitek by musel být dále upravován broušením a leštěním. Následně by musel být povrchově upraven proti okolním vlivům například eloxováním.

Tento typ materiálu, jak již bylo řečeno, se ke konstrukci nehodí, nicméně nám toto řešení ukazuje, jaké hmotností rozdíly mezi jednotlivými materiály jsou.



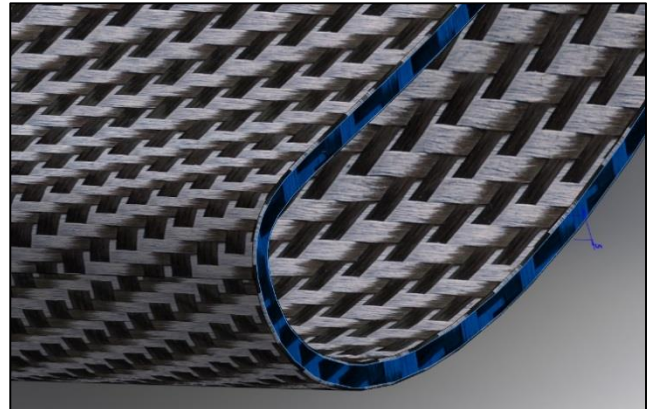
Obrázek 25: přitlačné křídlo

## 5. Vývoj přitlačného křídla

Materiál, který je použit při návrhu a následně výrobě hlavního prvku křídla, je kompozitní materiál z uhlíkových vláken pojených epoxidovou pryskyřicí. Tento typ materiálu byl zvolen ve spolupráci s firmou „Vojtěch Valenta - V.J.V“, která se zabývá vývojem a výrobou funkčních modelů letadel. Firma vyrábí primárně z kompozitních materiálů se skleněnou, ale také s karbonovou disperzí. Uhlíková vlákna byla pro tento projekt vybrána díky jejich vysoké pevnosti, ale hlavně z důvodu snížení hmotnosti.

Při vývoji byl brán zřetel na zkušenosti odborníků v této problematice. Není cílem této bakalářské práce zkoumat silové účinky od působení tlaku vzduchu na křídlo. Nicméně základní stavební kámen je dán zkušenostmi práce s uhlíkovými vlákny pro aerodynamicky namáhané součásti automobilů a letadel.

Na zadní přitlačné křídlo při vysokých rychlostech působí síla, která se mnohdy rovná až jeden a půl násobku váhy vozu. Proto je nutné použití materiálů s vysokou pevností, což nám kompozit z uhlíkových vláken pojených epoxidovou pryskyřicí jednoznačně nabízí.



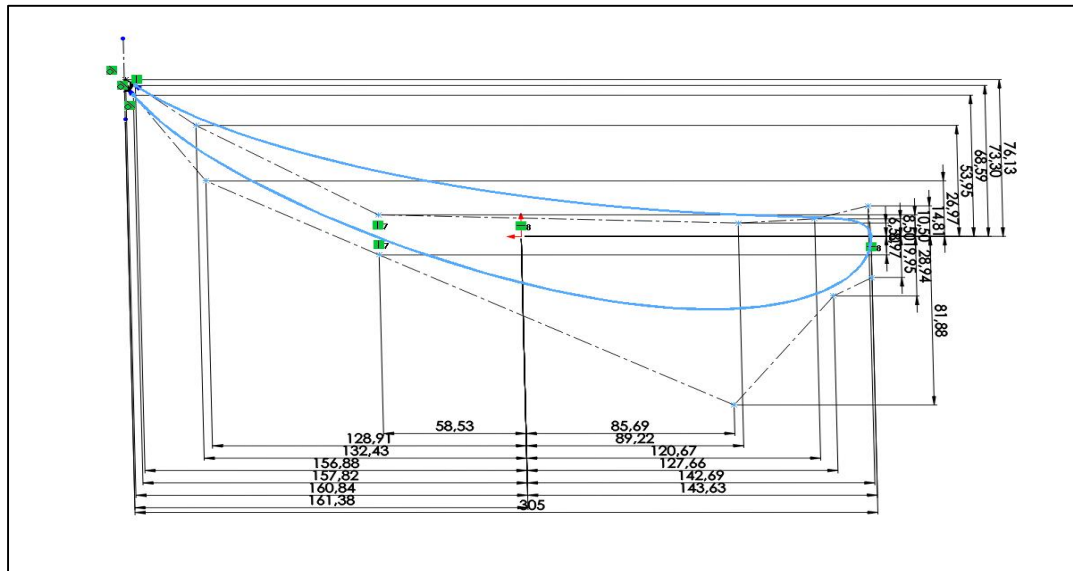
Obrázek 26: detail materiálu křídlového prvku

Materiály použité v celé konstrukci musejí odolávat všem negativním vlivům prostředí. Kovové materiály, ze kterých je vyrobena vnitřní výztuha, boční desky (end plates) a uchycení křídla na karoserii automobilu, musejí mít schopnost odolávat korozi a elektrolytické oxidaci, být dobře svařitelné, obrobitelné a v neposlední řadě odolné při silovém namáhání. Materiál křídlového prvku musí být odolný nejen na silové namáhání. Použitím správné pryskyřice se musí dosáhnout dobré chemické odolnosti a hlavně odolnosti proti UV záření, které by mohlo způsobit křehnutí materiálu. Za tímto účelem jsou v poslední době do pryskyřice přidávány nanočástice, které odolnost proti UV záření velmi zvyšují.

Jako podpora k vypracování projektu byl zvolen program SolidWorks student edition, ve kterém byly nakresleny všechny komponenty od křídlového prvku, přes boční desky až po formu, která bude následně vyrobena ve výše jmenované firmě.

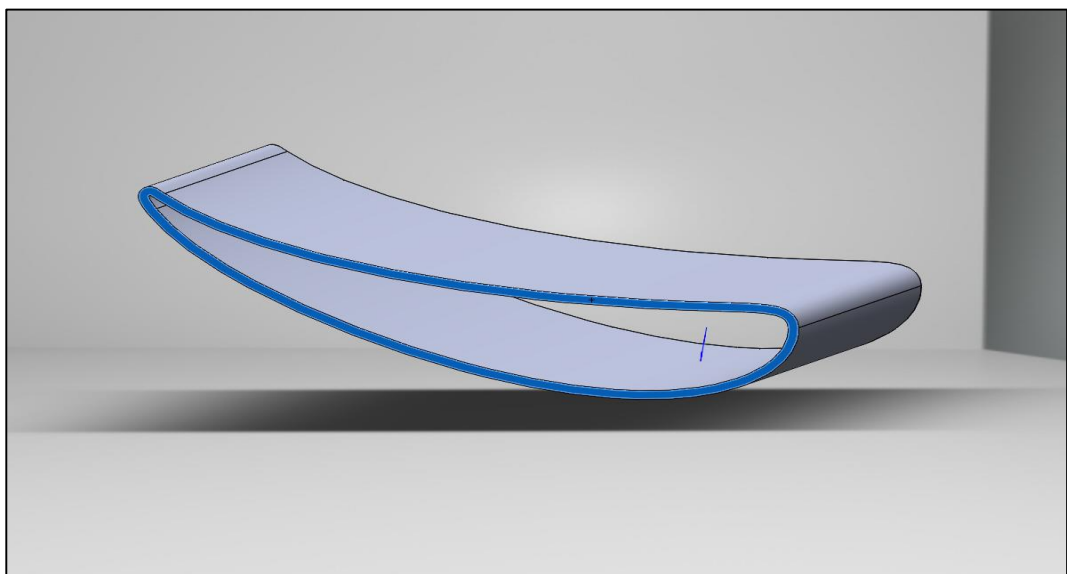
## 5.1. Křídlový prvek

Profil křídla je nadefinován pro nulový stupeň náběhu vzduchu, což bude docíleno správnou instalací na karoserii, a také pro relativně vysoký přítlak. Jak již bylo zmiňováno v dřívějším textu, vypouklá spodní část křídlového prvku umožňuje delší trasu pro vzduch plynoucí spodem a díky tomu se v těchto místech vytváří oblast nízkého tlaku vzduchu.



Obrázek 27: profil křídla definovaný skicou

Síla stěny křídlového prvku je stanovena na 5 mm. Pro správnou funkci je velmi podstatné, aby si křídlo zachovávalo v ideálním případě stále stejný tvar, i když se na něj působící síla bude zvyšovat.

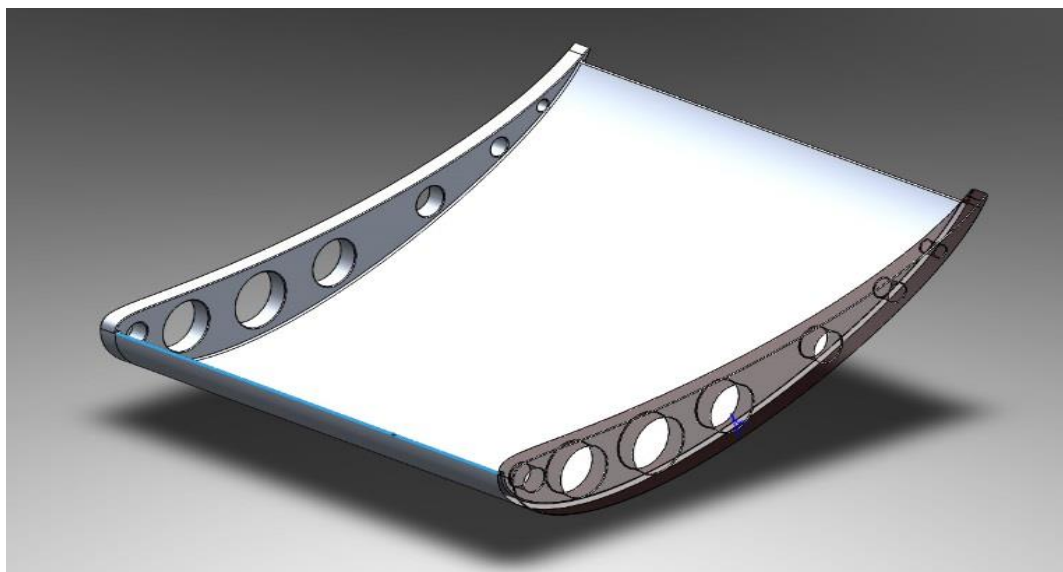


Obrázek 28: Přidání tloušťky křídlového prvku

Křídlový prvek je v programu SolidWorks definován skicou v pravé rovině. Profil je vytvořen ve 2D skice pomocí nástroje „splajn stylu“, který je následně upravován do ideálního tvaru, který zaručí vysokou přítláčnou sílu. Profil vytvořený ve skice je následně vytažen skořepinou povrchu po ose  $x$ , která je kolmá na pravou rovinu. Tento vytažený povrch je poté definován svou tloušťkou, která je 5 mm. Následně je celému prvku určen materiál, a to kompozit tvořený uhlíkovým vláknem a epoxidovou pryskyřicí „Thornel Mat VMA“. V disperzi kompozitu jsou vlákna pletená ve dvou, na sebe kolmých, směrech. Použité zapletení pramenů vláken disperze je vhodné pro tvarování a záhyby. Pramen jde vždy přes dvě vlákna vrchem a následně pod dvěma vlákny spodem. Stejně je tomu v sobou směrech pletení. U disperze, kde se pletení střídá pouze ob jeden kolmý pramen, je vytváření záhybů při výrobě složitější a v některých případech znemožňuje správnou aplikaci.

## 5.2. Výztuha pro uchycení

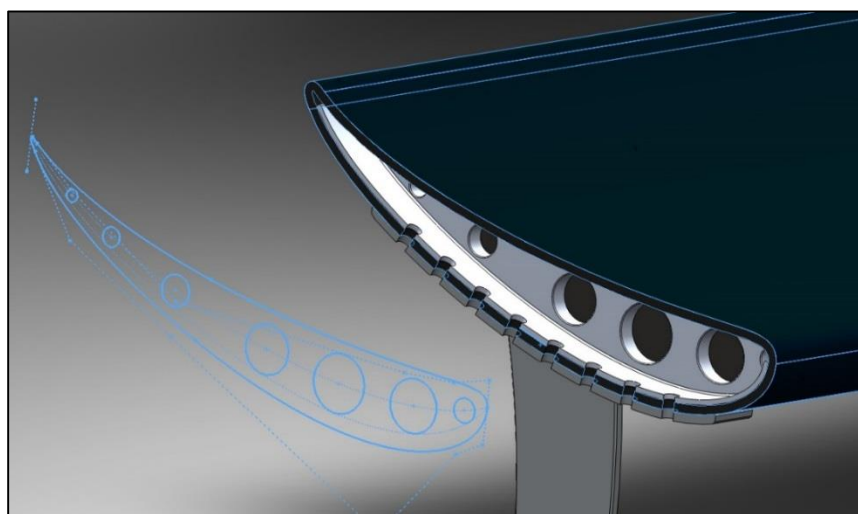
Uchycení křídlového prvku je řešeno v jeho prostřední části. Je realizováno pomocí nerezových nýtů o průměru 8 mm. Nýty nemohou být zataženy přímo na plochu kompozitního materiálu z důvodu, že by povrch materiálu poškodily. Na povrchu by se při zatažení nýtu vytvořil vrub, ve kterém by se při namáhání koncentrovalo napětí a mohlo by dojít k lomu a následné destrukci křídla. Proto je uvnitř křídlového prvku vložena podložka, která je navíc doplněna o dvě žebra, která zaručují vyšší pevnost celku v místě uchycení. Podložka s žebry je svařenec ze slitiny hliníku.



Obrázek 29: hliníková výztuha

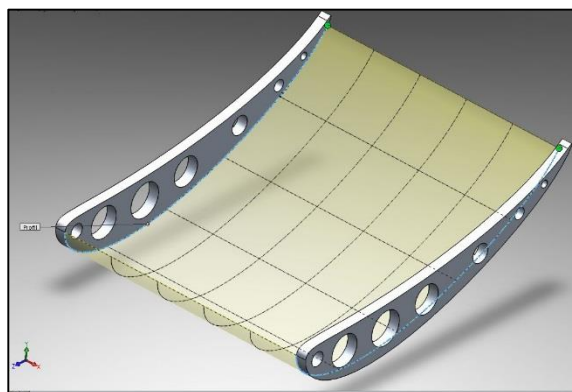
Uchycení křídla je tedy řešeno sendvičovou konstrukcí, kde je na vnitřní straně hliníková podložka, na vnější straně samotný úchyt křídla na karoserii, vyrobený z chromované oceli a mezi sebou tyto dva prvky pomocí nýtů svírají kompozitové křídlo.

Mezi kompozitním materiálem a hliníkovou slitinou podložky může docházet k elektrochemické korozi a ta může mít za následek degradaci obou prvků. Proto je spojení mezi kompozitovým povrchem a hliníkovou podložkou navíc řešeno souvislou vrstvou lepidla, které zabraňuje vzájemnému dotyku obou materiálů.



Obrázek 30: řez křídlem s výztuhou a uchycením v místě děr pro nýty

Výztuha je vytvořena ze dvou stejných skic, které jsou přeneseny do dvou rovin, rovnoběžných s pravou rovinou celku. Základ pro tvar žeber, a tedy správné zaoblení podložky, je tvořen skicou z výroby křídlového prvku, pouze je skica doplněna o sedm otvorů. Otvory budou technologicky řešené vyvrtáním a slouží pro odlehčení celku. Skica v obou vytvořených rovinách je vytažena pomocí „přidat vysunutím“ na rozměr 10 mm.



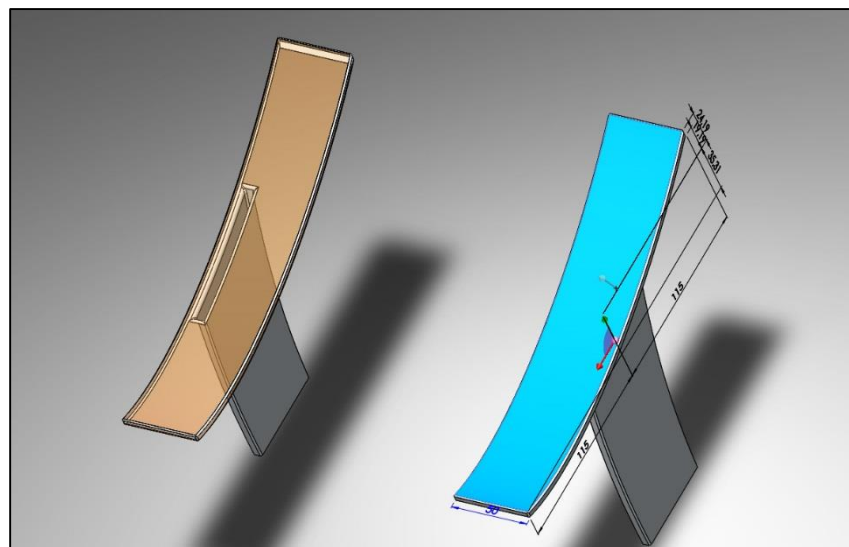
Obrázek 31: povrch podložky s výztuhami

Podložka je tvořena vysunutím skořepiny povrchu mezi spodními hranami obou skic a je zde přidána tloušťka 3 mm. Technologicky jsou tyto tři díly ze slitiny hliníků svařené.

### 5.3. Úchyt křídla

Křídlo je potřeba uchytit ke karoserii. Toto spojení musí být obzvláště pevné, aby křídlo pod narůstajícím tlakem drželo stále stejnou pozici. Změnou pozice křídla vlivem prohýbání úchytu by se měnil úhel náběhu vzduchu na křídlový prvek, a díky tomu by se měnily vlastnosti křídla. Jak bylo zmíněno dříve, na křídlo působí síla, která může dosahovat až jeden a půl násobku hmotnosti vozidla.

Úchyt je tvořen ze dvou shodných, v rovině zrcadlově otočených prvků. Každý prvek je tvořen ze dvou ocelových plechů. První díl z prohnutého plechu o síle 4,5 mm, který přesně kopíruje povrch prohnuté spodní části křídla v místě uchycení. Druhý má tloušťku 6 mm. Prvek je tedy svařenec ze dvou plechů rozdílné tloušťky a stejného materiálu. Povrchově je úchyt upraven chromováním. Chrom zajišťuje prvku velmi dobrou ochranu proti korozi, také zajišťuje povrchovou tvrdost, stálost a v neposlední řadě jde také o velmi zdařilý designový prvek. Design je v dnešní době v popředí žebříčku priorit výrobců drahých sportovních automobilů.



Obrázek 32: úchyty pro křídlo na karoserii vozidla

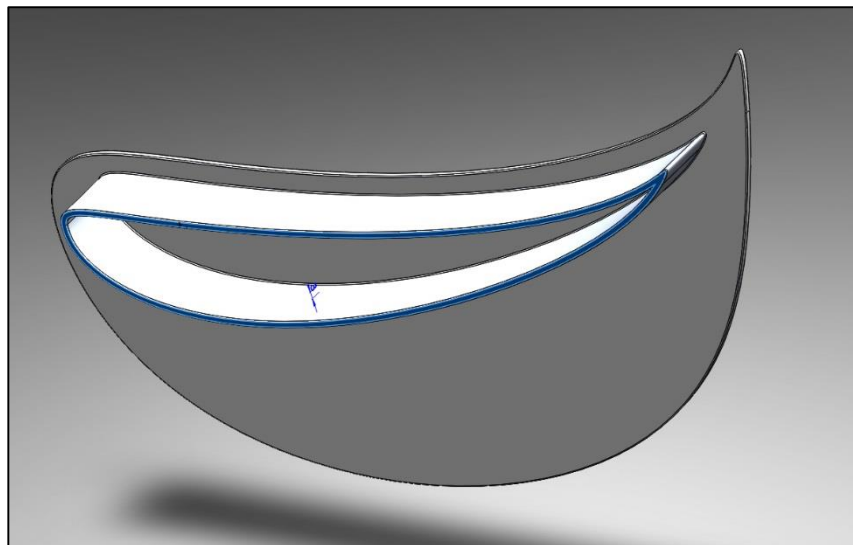
Spojení křídla s úchytem je realizováno pomocí nýtů, jak již bylo pojednáváno v kapitole „Výztuha pro uchycení“. Celkově šestnáct nýtů o průměru 8 mm (na každé části držáků osm nýtů) se stará o pevné spojení mezi křídlem a úchytem.

## 5.4. Boční desky

Takzvané „end plates“ slouží k tomu, aby se do spodní části křídla nedostával vyšší tlak vzduchu z okolních míst. Podrobněji o tom bylo pojednáváno v kapitole „Přítlačná křídla“ v teoretické části práce.

Boční desky jsou pro výkon křídla velmi důležité, avšak je to další prvek, který zvyšuje celkovou váhu křídla. Proto je nutné použití lehkých materiálů. Já jsem ve své práci použil slitinu hliníku 3.3549 (EN-AW 5182) pro zachování co nejnižší hmotnosti. Nicméně povrch hliníku špatně odolává okolním vlivům, a proto je nutná jeho povrchová úprava. Ideální pro tuto aplikaci je použití eloxování. Eloxovaná hliníková slitina dodává povrchu tvrdost, povrch je lesklý a chrání hliník od okolních vlivů. Uchycení bočních desek je řešeno lepidlem, které zajistí nejen pevné spojení bez nutnosti zvyšování hmotnosti o konstrukční prvky, ale také oddělí materiál hliníku od kompozitu souvislou vrstvou. Tímto se zabrání elektrochemické korozi, která by způsobila degradaci materiálů.

Vývoj desek je dán dvěma skicami, v místě uchycení desky na křídlo je použita skica, která určovala tvar křídlového prvku a druhá skica zajišťuje tvar celé desky. Jak již bylo v teorii pojednáváno, hlavní funkci deska zastává na spodní části křídla, proto je její převážná část soustředěna pod křídlo. Optimální tvar zadržuje nízký tlak vzduchu pod křídlem a zároveň zbytečně nezvyšuje hmotnost prvku. Tloušťka desky je stanovena na 3 mm, které jsou dostačující, aby hliníkový materiál vydržel namáhání, které dosahuje zanedbatelných hodnot, oproti namáhání jiných prvků křídla. Síla materiálu uchycení desky na křídlo je také 3 mm a celý prvek je svařenec dvou profilů.



Obrázek 33: boční deska (end plate) s uchycením do křídla

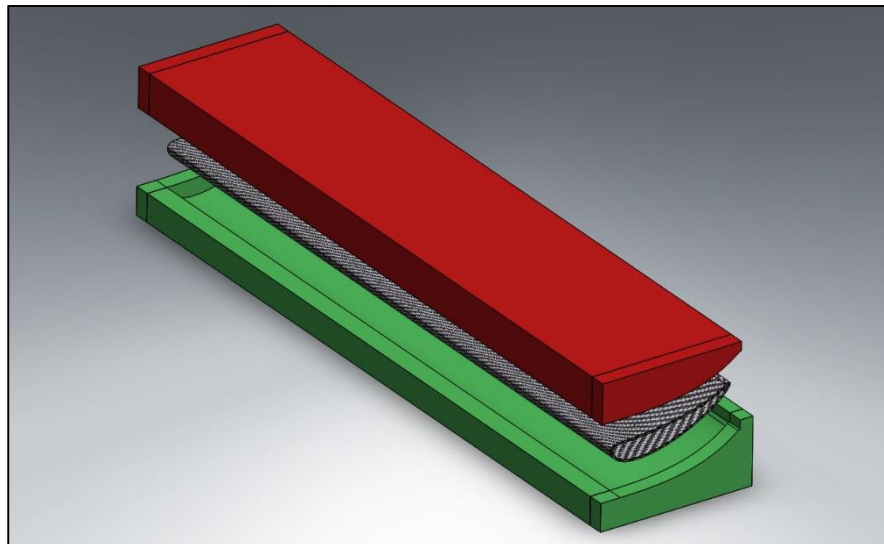


## 5.5. Forma

Křídlový prvek, vyrobený z kompozitu z uhlíkového vlákna, je vyráběn ve formě. Podle toho, kolik kusů bude potřeba vyrobit, se určí materiál na výrobu formy. Pro jednorázové použití se forma vyrábí z polyuretanové pěny o nižší hustotě, cca  $640 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Při vyjmutí výrobku z této formy se její povrch znehodnocuje a do každého dalšího kusu výrobku by se již přenášely nedokonalosti, které by mohli celý výrobek znehodnotit. Pro výrobu více kusu v jedné formě se používá pevnější, ale také dražší materiál, polyuretanová pěna o hustotě vyšší, cca  $1\,400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Forma je vyrobena pomocí skici v rovině, která je rovnoběžná s rovinou horní, přidání vysunutím“ skrz celý křídlový prvek vznikne kvádr, který svými rozměry odpovídá síle desky, ze které je forma následně vyráběna. Následné odebrání materiálu je řešeno „odebrat plochou/rovinou“ a dalšími funkcemi a prací v plochách.

Tímto způsobem získáme plochy, jejichž souřadnice se naprogramují do programu CNC stroje, který následně vyfrézuje do desek přesný tvar.



Obrázek 34: forma pro výrobu kompozitového křídlového prvku

## 6. Závěr

První část mé práce je zaměřena na aerodynamické prvky, které jsou aplikovány na závodní vozy. Každý z těchto prvků má svůj význam a přispívá svou funkcí a výkonností do celkového přítlaku jinou měrou. Specifické aerodynamické prvky jako splittery nebo canardy, které většinou najdeme na závodních speciálech, spíše jen doplňují hlavní aerodynamické prvky. Můžeme je ale častěji najít na automobilech v kategorii „tuning“, kde mají pouze okrasnou funkci. Naproti tomu existují prvky, které do výkonu přispívají velkou měrou, např. zadní přítláčné křídlo.

Dále jsou zde popsány kompozitní materiály. Využíváním těchto materiálů se dosahuje velmi vysokých hodnot mechanických vlastností (např. modulu pružnosti, pevnosti v tahu, atd.), při velmi nízké hustotě, čili nízké hmotnosti prvku, nebo součásti.

Praktická část se zabývá samotným návrhem přítláčného křídla, což byl hlavní cíl práce. Celá koncepce přítláčného křídla byla vymodelována ve 3D pomocí programu SOLIDWORKS, z něhož pochází i většina vyobrazených dílů v této bakalářské práci.

Zvolený profil křídla, podle nastudované literatury [7] má předpoklad vysokého přítlaku vůči komerčně dostupným produktům.

Po bližším zkoumání, hmotnostních rozdílů, pevnosti, finanční i technické náročnosti na výrobu byl zvolen kompozit z uhlíkových vláken, který se běžně používá pro tuto aplikaci.

Výstupem této bakalářské práce je návrh, koncepce a příprava dokumentace pro výrobu přítláčného křídla, které bude aplikováno na automobil Škoda Octavia RS 3. generace.

## 7. Seznam literatury

- [1] Historical Note on Vehicle Dynamics Development. MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, c1995, s. 413-470. ISBN 1560915269.
- [2] Drag Reduction System. *Formula 1* [online]. FIA Sporting Regulations, 2016 [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: [https://www.formula1.com/content/fom-website/en/championship/inside-f1/rules-regs/Drag\\_Reduction\\_System.html](https://www.formula1.com/content/fom-website/en/championship/inside-f1/rules-regs/Drag_Reduction_System.html)
- [3] Airdams, splitters and spoilers. MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006, s. 57-64. ISBN 1844252302.
- [4] Airdams, splitters and spoilers. MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006, s. 64-67. ISBN 1844252302.
- [5] Airdams, splitters and spoilers. MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006, s. 68-72. ISBN 1844252302.
- [6] Wings. MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006, s. 81-85. ISBN 1844252302.
- [7] Wings. MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006, s. 85-103. ISBN 1844252302.
- [8] Wings. MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006, s. 103-104. ISBN 1844252302.
- [9] Wings. MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006, s. 104-107. ISBN 1844252302.
- [10] Současná definice kompozitů. DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, s. 7. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [11] Mechanické zaklínění. DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, s. 15. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [12] Fyzikální adheze. DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, s. 16. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [13] Vlákna v kompozitech. DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, s. 26. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [14] Vyztužující vlákna. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, s. 49-55. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [15] Vyztužující vlákna. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, s. 37-61. ISBN 978-80-86960-29-6.

- [16] Pagani Zonda R. *Pagani Automobili S.p.A.* [online]. 2009 [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: [http://www.pagani.com/zonda/zonda\\_R/default.aspx](http://www.pagani.com/zonda/zonda_R/default.aspx)
- [17] Lotus F1 Team and Boeing partners on 3D printing carbon. *4erevolution* [online]. 2014 [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <http://www.4erevolution.com/en/lotus-f1-boeing-impression-3d-carbone/>
- [18] Fun with Fiberglass. *Rv Pilot* [online]. [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <http://www.rvpilot.com/Fiberglass/fiberglass.html>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: přední spoiler [16] .....	10
Obrázek 2: dva canardy nad sebou [16].....	11
Obrázek 3: difuzor [16].....	12
Obrázek 4: vnější prahy [16] .....	12
Obrázek 5: vyústění bočních kanálů nad kolem [16] .....	13
Obrázek 6: první přitlačné křídlo na vozu Chaparral 2F [6].....	14
Obrázek 7: úhel náběhu 12° [7] .....	15
Obrázek 8: úhel náběhu 0° [7] .....	15
Obrázek 9: úhel náběhu 16° [7] .....	16
Obrázek 10: 9% vyklenutí, 8° náběh [7].....	16
Obrázek 11: 6% vyklenutí, 8° náběh [7].....	16
Obrázek 12: 12% vyklenutí, 8° náběh [7].....	16
Obrázek 13: velice silný přitlak při 18% vyklenutím a 20° náběhu [7].....	18
Obrázek 14: rozdíl mezi jednovprvkovým a dvouprvkovým křídlem [7] .....	18
Obrázek 15: přitlačné křídlo se čtyřmi prvky [8] .....	19
Obrázek 16: různé velikosti bočních desek (end plates) [9].....	20
Obrázek 17: Vzdušné víry za křídlem s bočními deskami [9].....	21
Obrázek 18: Vzdušné víry za křídlem bez bočních desek [9] .....	21
Obrázek 19: deska kompozitního materiálu ze skelných vláken [18] .....	22
Obrázek 20: Zavěšení předního kola vozu F1 značky Lotus z uhlíkového kompozitu [17] ....	22
Obrázek 21: Typy výztuží v kompozitech [12] .....	25
Obrázek 22: Mechanické zaklínění matrice a disperze [11].....	26
Obrázek 23: základní schéma smáčivosti [12] .....	27
Obrázek 24: Kapka smáčivé (vlevo), nesmáčivé (vpravo) kapaliny na pevném povrchu [12] 28	
Obrázek 25: přitlačné křídlo .....	33
Obrázek 26: detail materiálu křídlového prvku .....	34
Obrázek 27: profil křídla definovaný skicou .....	35
Obrázek 28: Přidání tloušťky křídlového prvku .....	35
Obrázek 29: hliníková výztuha .....	36
Obrázek 30: řez křídlem s výztuhou a uchycením v místě děr pro nýty .....	37
Obrázek 31: povrch podložky s výztuhami .....	37
Obrázek 32: úchyty pro křídlo na karoserii vozidla .....	38

Obrázek 33: boční deska (end plate) s uchycením do křídla .....	39
Obrázek 34: forma pro výrobu kompozitového křídlového prvku .....	40

### **Seznam tabulek**

Tabulka 1: velikosti přítláčných sil v závislosti na úhlu náběhu a vyklenutí [7].....	18
Tabulka 3: síly působící na křídlo v závislosti na velikosti bočních desek (end plates) [9].....	20
Tabulka 4: závislost použitých materiálů na hmotnosti křídla .....	32