

# Vývoj kompozitního 10" disku pro účely Formule Student

Bc. Jakub Urban

Vedoucí práce: Ing. Michal Vašíček

## Abstrakt

Článek stručně shrnuje vývoj kompozitního disku pro vozidlo Formule Student týmu CTU CarTech. Vývoj se zabýval snahou o splnění parametrů nezbytných pro přínosnou realizaci projektu a splnění technologických požadavků pro výrobitelnost v podmínkách týmu. Konstrukce a skladba disku byla ověřena výpočtem MKP. Pro výrobu disků bylo s výhodou využito FDM technologie 3D tisku plastů. Prototyp disku byl podroben funkčním testům. Celkem bylo vyrobeno 11 disků, na kterých vůz FS.06 najel přes 500km. Po závodní sezóně 2014 byla u disků změřena deformace, jejíž výstup posloužil ke kalibraci vstupů MKP modelu. Pro sezónu 2015 došlo k vývoji evoluce disku za účelem zvýšení tuhosti a spolehlivosti konstrukce. Navržený disk je teoreticky výrazně tužší, přičemž je jeho hmotnost přibližně stejná a to díky inovativnímu využití možností FDM tisku a optimalizaci skladby. Prototyp druhé evoluce disku je úspěšně vyroben a v době konání konference STČ bude podroben dynamickému testu ohybem za rotace.

## Klíčová slova

Formula Student, Disk, Kompozitní materiály, 3D tisk, Experiment, MKP

## 1. Úvod

Tým CTU CarTech stál na podzim roku 2013 před další výzvou- navrhnout a vyrobit lepší vůz než dosavadní FS.05. FS.05 se podařilo prosadit mezi světovou elitou a stala se doposud nejúspěšnějším počinem týmu. V rámci celkové koncepce využívající čtyřválcový motor, hybridní nosnou strukturu s monokokem z uhlíkových vláken doplněným prostorovým trubkovým ocelovým rámem v zadní části vozu, přitlačnými křídly a nápravami s 13" disky se FS.05 svou hmotností dostala na limit realizovatelnosti. Přesto hmotnost vozu a jeho těžkopádnost nebyla uspokojivá a tým se proto rozhodl po letech výrazně změnit koncepci.



Obr. 1 CAD model vozu FS.06

Cílem byla optimalizace nosné struktury z hlediska tuhosti uložení náprav, maximální využití aerodynamiky, snižování hmotnosti, výšky těžiště a hlavně momentů setrvačnosti

vozu. Byl proto zvolen koncept 10“ pneumatik, u nichž bylo na základě naměřených dat rozhodnuto, že se jejich nasazení i přes zhruba 2% ztrátu trakce v celkové dynamice vozu vyplatí. Tato koncepční změna nakonec přinesla snížení hmotnosti o 12 kg a snížení momentů setrvačnosti o 28 % v klopení, 19 % v klonění a 23 % ve stáčení vozu. Hmotnost vozu FS.06 tak nejen díky tomuto kroku činila 197kg, poprvé se tak týmu podařilo dostat se pod 200kg hranici.

## 2. Uhlíkový disk pro vůz FS.06

### 2.1 Motivace

Důsledkem přechodu na 10“ pneumatiky bylo neexistující uspokojivé komerční řešení disků. Jako nejlepší alternativy byly dostupné disky od výrobců BRAID a KEIZER, kde se však hmotnost jednoho disku pohybuje okolo 3kg, což byla oproti doposud používaným 13“ diskům OZ jen 0,8kg úspora hmotnosti a to ještě při nižší tuhosti disku a vyšší pořizovací ceně. Padlo proto rozhodnutí jít cestou výroby disků vlastních. V našich technologických možnostech bylo možno volit disky obráběné ze slitiny hliníku EN AW 7075, což však bylo neúnosné z hlediska finanční náročnosti. Další nabízející se metodou byly disky odlévané, kde však pro změnu nevyhovují dostupné slitiny hliníku či hořčíku z hlediska mechanických vlastností. Poslední možností tak byla cesta kompozitních uhlíkových disků. S kompozity měl tým již poměrně bohaté zkušenosti, široké výrobní možnosti a většinu materiálu dostupného v rámci podpory či alespoň za přijatelnou cenu. Volba proto padla na disky uhlíkové.



*Obr. 2 Uhlíkový disk týmu Joanneum Graz*

### 2.2 Koncepce

Koncepce disku se musela podřít parametrům důležitým pro dynamiku vozu. Jedinou podmínkou, jdoucí proti této filosofii byl požadavek na stejné disky na přední i zadní nápravě vozu. Ačkoli by bylo ideální použití disků o šíři 8“ na přední nápravě a 7“ na zadní nápravě, padlo z důvodů realizovatelné zástavby a kompromisu mezi podélnou a příčnou

dynamikou vozu rozhodnutí o použití disků o šíři 7,5 “. Dalšími omezujícími parametry bylo ET disku, jeho přípojovací rozměry- 3xM12x1,5 na průměru 90 mm, středění na náboj o průměru 65 mm a zástavba vlastního brzdíče maximálně využívajícího prostor 10“ kola. Montáž pomocí kolových šroubů namísto centrální matice, jak je v motorsportu zvykem, byla zvolena kvůli absenci potřeby rychlé montáže a demontáže kola, úspoře hmotnosti na náboji a hlavně kvůli velkému napětí vnesenému do středu disku kuželovou dosedací plochou centrální matice a velkému utahovacím momentu.

### 2.3 Konstrukce

Konstrukce disku se řídí několika základními pravidly. Jako první je třeba vejít se s diskem do rozměrů, jež jsou dané brzdíčem, nábojem kola a pneumatikou. Následně je potřeba tyto definované plochy spojit s co největším průřezem, aby bylo dosaženo sendvičové konstrukce s co největší vzdáleností nosných uhlíkových potahů od neutrální osy průřezu. Aby však nedocházelo k nadměrnému nárůstu hmotnosti, je průřez disku, u něž je majoritním zátěžným stavem ohyb, koncipován jako nosník o stálé pevnosti nebo je alespoň snaha o přiblížení se tomuto stavu.

Jelikož bylo uchycení disku k náboji realizováno pomocí tří šroubů, jevílo se tak zřejmé, že počet paprsků disku musí být kvůli zachování symetrie násobkem tří. S ohledem na podíl potahu žebíř ve směru osy disku a průřezem mezi žebry, který by měl být co největší s ohledem na chlazení brzd, byl zvolen počet šesti žebíř.

Jako nejsložitější se ukázala volba jádra. Pod kolové šrouby bylo potřeba zalaminovat vložky. Ocelové vložky měly při akceptovatelné hmotnosti příliš malou styčnou plochu s maticí a při vyhovující velikosti styčné plochy příliš vysokou hmotnost 280 g. Hliníkové vložky měly malý modul pružnosti a navíc riziko chemické koroze při kontaktu s uhlíkem. Ideální volbou tak byly vložky titanové, které se za použití titanu Ti-6Al-4V vyznačují dostatečnou tuhostí a přitom přijatelnou hmotností 165 g. Problém však spočíval v přenosu zatížení od vložek pod kolovými šrouby do zbytku disku. Jádro muselo být dostatečně pevné a tuhé pro přenos zatížení a pro oporu potahu během vytvrzování při 130 °C. Jako nejlepší varianta se nabízelo vyskládání uhlíkového jádra do středu disku se současným zalaminováním titanových vložek, což však narazilo na technologické problémy kvůli potřebné tloušťce 55 mm. Hrozilo buď nedokonalé vytvrzení prostředních vrstev či silná exotermická reakce. Jako alternativa tak bylo zvoleno obráběné jádro z polyamidu vyztuženého skelnými vlákny, Ertalonu 66-GF30 ve středu disku, zajišťujícího přenos zatížení z titanových vložek do žebíř disku, doplněné ve zbytku středu a žebíř pěnovým obráběným jádrem z tvrzené akrylátové pěny, Rohacell 51 IG. Problémem však byla jak technologie obrábění ertalonu i Rohacellu, což žádný z partnerů týmu nechtěl podstoupit kvůli zanesení obráběcího stroje, tak finanční náročnost, kdy by pořízení a obrobení takového jádra znamenalo náklady přes 40 000 Kč na jeden kus disku.



*Obr. 3 Detail řezu modelem disku a čelní pohled na model*

V době návrhu disku však tým oslovila společnost MCAE systems zabývající se 3D technologiemi, zejména metodou FDM tisku plastů. Po seznámení se s technologickými možnostmi a dostupnými materiály pro 3D tisk se zrodil nápad- vytisknout si jádro disku. Nejenže tak byl odstraněn problém finanční, ale jádro mohlo být mnohem lépe uzpůsobeno dle namáhání disku. Ve středu, kde byla potřeba přenést zatížení, bylo jádro s plným objemem. V žebrech a na obvodu disku, kde je potřeba zajistit jen přenos smykového zatížení mezi uhlíkovými potahy bylo zvoleno jádro s voštinovou šestiúhelníkovou strukturou.

Z dostupných plastů byl jako materiál jádra zvolen ULTEM9085 s výbornými mechanickými vlastnostmi (viz Tabulka 1). Nejprve byly vytištěny zkušební vzorky o rozměru 100x30x4mm, na které byly nalaminovány čtyři vrstvy uhlíku, a následně byl tento spoj na trhačce podroben zatížení na smyk. Jelikož došlo k destrukci mezi vrstvami uhlíku a spoj uhlík-plast vydržel, bylo usouzeno, že povrch jádra není potřeba před zalaminováním nijak upravovat. Kvalita spoje byla dána porozitou tištěného dílu a tím pádem prosáknutím pryskyřice z uhlíkové tkaniny do plastu.

TYPICAL PROPERTIES <sup>(1)</sup>							
MECHANICAL	Value	Unit	Standard	IMPACT	Value	Unit	Standard
Tensile Stress, yld, Type I, 5 mm/min	84	MPa	ASTM D 638	Izod Impact, notched, 23°C	115	J/m	ASTM D 256
Tensile Stress, brk, Type I, 5 mm/min	74	MPa	ASTM D 638	Izod Impact, notched 80*10*4 +23°C	13	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Tensile Strain, yld, Type I, 5 mm/min	7	%	ASTM D 638	THERMAL			
Tensile Strain, brk, Type I, 5 mm/min	72	%	ASTM D 638	HDT, 1.82 MPa, 3.2mm, unannealed	153	°C	ASTM D 648
Tensile Modulus, 5 mm/min	3440	MPa	ASTM D 638	Vicat Softening Temp, Rate B/120	173	°C	ISO 306
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	138	MPa	ASTM D 790	HDT/Af, 1.8 MPa Flatw 80*10*4 sp=64mm	152	°C	ISO 75/Af
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	2920	MPa	ASTM D 790				
Tensile Stress, yield, 5 mm/min	88	MPa	ISO 527				
Tensile Stress, break, 5 mm/min	71	MPa	ISO 527				
Tensile Strain, yield, 5 mm/min	6.7	%	ISO 527				
Tensile Strain, break, 5 mm/min	50	%	ISO 527				
Tensile Modulus, 1 mm/min	3050	MPa	ISO 527				
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	90	MPa	ISO 178				
Flexural Modulus, 2 mm/min	2750	MPa	ISO 178				

**Obr. 4** Materiálové vlastnosti-ULTEM 9085

Výsledné jádro tvořil plný střed v oblasti titanových vložek s přesahem pro nalisování a voštinová struktura uzavřená 0,508mm silným potahem po celé vnější ploše.

Výsledná hmotnost jádra činila 460g.

### 2.3 Zátěžné stavy

Při určování zatížení bylo vycházeno z několika zátěžných stavů. První a nejvýznamnější je ustálený průjezd zatáčkou, kde je vůz FS.06 schopný dosáhnout díky vysokému aerodynamickému přítlaku bočního přetížení až 2,5G. Rovněž může nastat stav, kdy díky kombinaci poměru stáčivosti a nastavení klopné tuhosti je veškeré zatížení přenášeno jen vnějšími koly vozu. Na kolo tak působí celá hmotnost vozu připadající na danou nápravu, to samé platí i u aerodynamického přítlaku. Pneumatika je s takovouto normálovou silou schopna přenést 1,74 násobek této normálové síly do příčného směru.

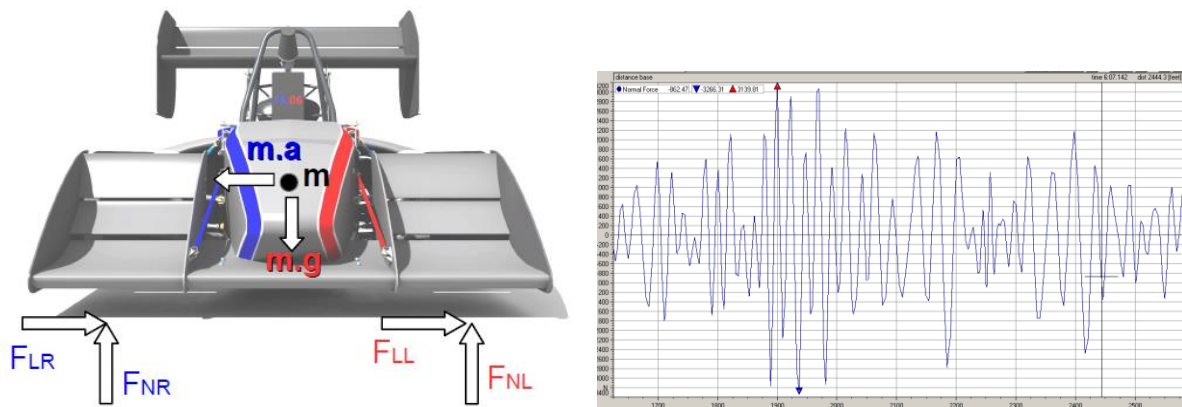
Dalším stavem, který je potřeba brát v úvahu, je přechod z jedné zatáčky do další, například ve slalomu. Zde sice hraje významnou složku zatěžující síly setrvačnost vozu v klopení, nicméně díky velkému přenosu hmot během tohoto přechodového stavu není pneumatika schopna maximální trakce okamžitě, nýbrž se zde projeví konečná tuhost a

tlumení v pneumatice a vývin maximální boční síly je tak oproti normálové síle opožděn. Díky tomuto jevu je tak výsledné zatížení oproti ustálenému průjezdu zatáčkou nižší.

U vozu s aerodynamikou generující vysoký přítlak je potřeba počítat i s vysokým normálovým zatížením kola při maximální rychlosti vozu. V případě FS.06 tak bylo učiněno při rychlosti  $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

V neposlední řadě je navzdory okruhovému charakteru soutěže Formula Student obvyklým jevem skok vozu a dopad na jedno kolo. Z naměřených dat z předešlých let vyplynulo, že tomuto odpovídá vertikální zrychlení přibližně 3G. Pro tento zátěžný stav bylo zanedbáno uvažování přítlaku, jelikož je hodnota zrychlení relevantní pro přední nápravu vozu a přední přítláčné křídlo při náhlé změně jeho výšky nad zemí takřka veškerý přítlak ztratí. Proto ani tento stav není z hlediska zatížení disku horší než ustálený průjezd zatáčkou ani jízda maximální rychlostí.

Jako poslední případ bylo uvažováno brzdění na mezi adheze. Výsledné zatížení bylo zvoleno jako větší z ustáleného průjezdu zatáčkou a brzděním z maximální rychlosti. Byť brzdění z maximální rychlosti generuje vyšší normálovou sílu na kolo, je výsledný ohybový moment kritický pro namáhání disku menší, jelikož působí na rameni odpovídajícímu přibližně ET disku, které je o řád menší oproti dynamickému poloměru pneumatiky, na kterém působí boční síla při zatáčení. Výsledný ohybový moment vztažený k dosedací ploše disku na náboj činil  $694,2 \text{ Nm}$  a pro výpočet bylo uvažováno  $700 \text{ Nm}$ .



*Obr. 5 Schématické znázornění sil působících na vůz při ustáleném průjezdu zatáčkou a záznam normálové síly na přední kolo při závodě FSG*

## 2.4 Výpočetní model

Výpočetní model byl sestaven za využití softwaru ABAQUS 12.1. Model byl koncipován jako sestava několika těles- skořepinového plošného tělesa reprezentujícího vnější tvar uhlíkového potahu, objemového modelu titanových vložek, objemového modelu plného středu jádra, objemového modelu voštinové části jádra a zjednodušeného modelu náboje kola. Kvůli složitosti voštinové struktury by při jejím věrném modelu vzrostla náročnost výpočtu z hlediska počtu a velikosti elementů zhruba patnáctinásobně. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k nahrazení voštiny plným objemem. Voštinovou povahu pak reprezentoval materiál, kde byl ekvivalent hustoty a modulu pružnosti ULTEMU9085 vynásobeny podílem hmotnosti voštiny ku hmotnosti plného objemu. Toto zjednodušení vycházelo z předpokladu, že voština bude v sendvičové struktuře kompozitu přenášet smyková zatížení mezi potahy jen normálovým zatížením voštiny, což velmi dobře odpovídá skutečnosti. Tím pádem byla tuhost objemového jádra v normálovém směru stejná jako tuhost skutečné voštiny. Titanové vložky i plný střed jádra byly reprezentovány isotropním elastickým materiálem s modulem pružnosti a hustotou dle materiálového listu. Uhlíkový potah byl pomocí modulu composite-layerup reprezentován skladbou respektující počet vrstev prepregu, jejich orientaci a tloušťku.

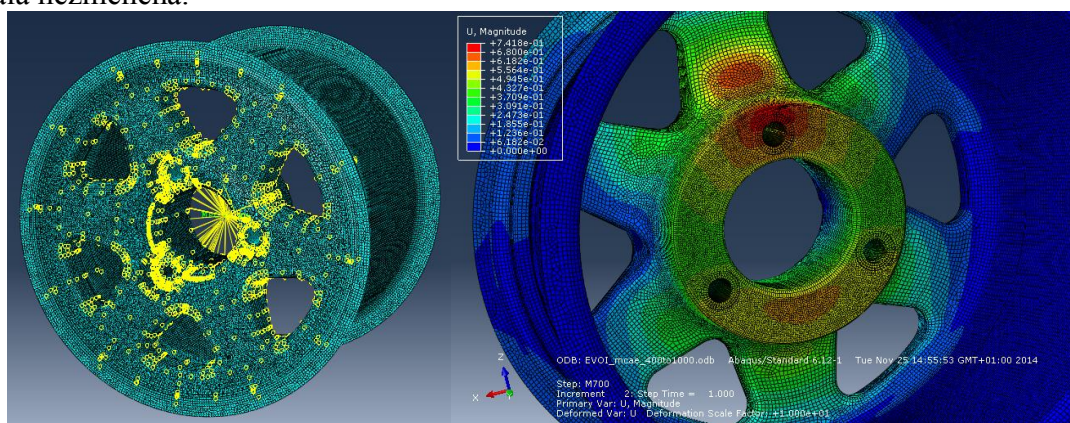
Samotný prepreg byl pak zadefinován jako laminát o hodnotách modulů pružnosti a Poissonovi konstanty dle materiálového listu.

Interakce mezi jednotlivými tělesy byly realizovány pomocí vazby TIE a CONTACT. Okrajové podmínky byly aplikovány jako podmínka pro nulové posuvy i rotace v dosedací ploše náboje. Předepjetí kolových šroubů bylo realizováno pomocí tlakového zatížení dosedacích ploch matic a náboje tak, aby byla celková výslednice nulová a nedocházelo tak ke zkreslení posuvu v důsledku silové nerovnováhy. Zatížení bylo vneseno do bodu styku pneumatiky s vozovkou, který byl pomocí vazby COUPLING spojen s dosedacími plochami pneumatiky na disk na výšce 120 °. Tento způsob definice úlohy měl co nejlépe reprezentovat skutečnost, nicméně tomu tak nebylo, zejména kvůli těžké postihnutelnosti přenosu zatížení z pneumatiky na disk.

**Tabulka 1** Přehled interakcí jednotlivých komponent.

Typ vazby	TIE+contact	TIE+contact	TIE	TIE	TIE	TIE	TIE
master	Náboj kola	CF skořepina	CF skořepina	CF skořepina	vložky	Vnitřní jádro	Bod středu disku
slave	CF skořepina	vložky	Vnitřní jádro	Voštinové jádro	Vnitřní jádro	Voštinové jádro	Náboj

Jako alternativní metoda definice úlohy byla zvolena konvenční metodika dle SAE, podle níž jsou testovány i komerčně vyráběné disky při zkouškách dle EHK. Tato metoda spočívá ve vetknutí, resp. v odebrání všech stupňů volnosti dosedací ploše pneumatiky na vnitřní lem disku po celém obvodu a zanesení zatížení formou momentu do bodu reprezentujícího střed dosedací plochy disku, který byl opět pomocí nepoddajné vazby TIE spojen s dosedací plochou náboje. Definice předepjetí od šroubového spoje pomocí tlaku zůstala nezměněna.



**Obr. 6** Zadefinovaný výpočetní MKP model v softwaru ABAQUS 6.12-1 a výsledek deformace disku.

Ačkoli výrobce udává mez pevnosti uhlíkového kompozitu zaručeně přes  $700 \text{ Nmm}^{-2}$ , byla uspokojivá až ta kombinace skladby a počtu vrstev, jejíž největší napětí nevycházelo přes  $470 \text{ Nmm}^{-2}$ , jelikož se jedná o výrazně dynamicky namáhaný díl a o únavových křivkách kompozitu pro tento případ nemohla být řeč, bylo usouzeno, že pro náš případ, kdy předpokládáme životnost zhruba  $3 \cdot 10^5$  cyklu, kdy je výpočetní hodnota v reálném cyklu dosahována zřídka, bude statická bezpečnost 1,5 dostačující. Další podmínkou byla tuhost, kdy byla jako mezní hodnota ztráty odklonu při maximálním zatížení stanovena na  $0,2^\circ$ .

Skladba vyhovující výše zmíněným podmínkám byla nakonec symetrická ve středu disku a v paprscích o pěti ( $0/45/90/-45/0^\circ$ ), po obvodu disku o deseti a v lemu disku o šestnácti vrstvách prepregu.

## 2.5 Výroba

Výroba jader byla zprostředkována partnerem týmu, společností MCAE systems, metodou FDM technologie 3D tisku termoplastů. Plastové jádro bylo vcelku a jeho výroba na stroji FORTUS 400mc zabrala 19 hodin čistého času.

Výroba titanových vložek probíhala v dílně týmu, kdy se obrábění titanu vyzkoušelo vůbec poprvé. Jediný problém nastal při vrtání, kdy 56mm dlouhý otvor bylo takřka nemožné vrtat HSS vrtákem bez vnitřního chlazení, s čímž si však už poradily karbidové monolitní vrtáky snášející vysoké teploty. Vložky byly následně nalisovány do plastového jádra.

Na laminování kvalitního kompozitního dílu bylo potřeba forem. Pro tak složitý tvar, jako je disk, bylo rozhodnuto o osmidílné hliníkové formě. Hliníkové formy jsou optimální hned ze tří důvodů. Po jemném obrábění stačí jen ručně přebrousit a separovat, přičemž zaručují vysokou kvalitu povrchu výsledného dílu. Dále jde díl díky velké tepelné roztažnosti hliníku oproti záporné, byť malé, tepelné roztažnosti uhlíku po vytvrzení při 130 °C a vychladnutí snáze vyjmout a v neposlední řadě je možné formy použít pro větší počet kusů. Při výrobě forem bylo opět využito 3D tisku, kdy byly použity ABS modely pro zaformování do písku a následné odlití hliníkových polotovarů forem přímo na ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT. Po následném obrobení funkčních ploch odlitků byly formy ručně vybroušeny. Díky plastovým modelům a odlití forem bylo ušetřeno 70 % nákladů oproti variantě obrábění z válcovaných bloků.

Formy byly pomocí závitových tyčí a lícovacích kolíků během laminace postupně smontovány do jednoho celku a celý disk byl vytvrzován v peci. Kvůli vysoké tepelné kapacitě formy byl běžný vytvrzovací čas 2 h na teplotě 130 °C prodloužen na 3,5 h.

Po vylaminování disku bylo potřeba obrobit lemy disku na průměr 278 mm, středící otvor na náboj a vrtat otvor pro ventilék.



*Obr. 7 Obrobené formy a plastové jádro včetně nalisovaných titanových vložek a skládání prepregu.*

## 2.6 Wheel rim CTUv01-10x7,5

První vyrobený disk posloužil jako prototyp pro vyzkoušení montáže a demontáže pneumatiky a těsnosti disku. Po vyladění drobných problémů byl vyroben disk druhý, který již byl otestován ve společnosti TÜV-SÜD dle předpisu EHK 124 dynamickou zkouškou ohybem za rotace. Zátěžný moment byl dle normy s uvažováním aerodynamického přítlaku vozu vypočítán na 598 Nm. Vyvozen byl kmitáním nevyvážku o frekvenci 50 Hz na definovaném rameni. Disk měl pro úspěšné absolvování testu vydržet 250 000 cyklů, což odpovídá zhruba 300 km ujeté vzdálenosti na voze.

Technical Report No.:

Test method:

Manufacturer / Order party:

Product under test:

TÜV SÜD Czech s.r.o.

62061 – 14 - TAC

ECE R No. 124.00

České vysoké učení technické v Praze

Wheel rim CTUv01-10x7,5



4/6

#### Attachment No. 1: Selected photographs

Before test



*Obr. 8 Dokumentace disku v testovacím zařízení TÜV-SÜD*

Během testu však došlo k náhlému nárůstu deformace a testovací zařízení test automaticky ukončilo. Na vině bylo roztržené jádro kolem nalisovaných vložek. Řešení bylo učiněno náhradou lisování za lepený spoj, kdy byly titanové vložky vyrobeny s 0,2mm vůlí, na povrchu zdrsňeny a zalepeny do jádra dvousložkovým epoxidem LOCTITE 9466.

Další disk, tentokrát už s lepenými vložkami, v testu ohybem za rotace obstál. Dostal označení Wheel rim CTUv01-10x7,5, ale jelikož nebylo známo nic o tom, kolik cyklů do destrukce ještě zbývá, sloužil jen pro výstavní účely. Finální verze disku měla hmotnost 1320g. Následně bylo vyrobeno osm dalších disků. Čtyři disky posloužily v testovací fázi, kdy odjely zhruba 300 km, na které byly navrženy a na závody byla nasazena sada disků nových.



*Obr. 9 První disk určený pro použití na voze při první montáži a demonstrace maximálního využití zástavbového prostoru.*

## 2.7 Konec první generace

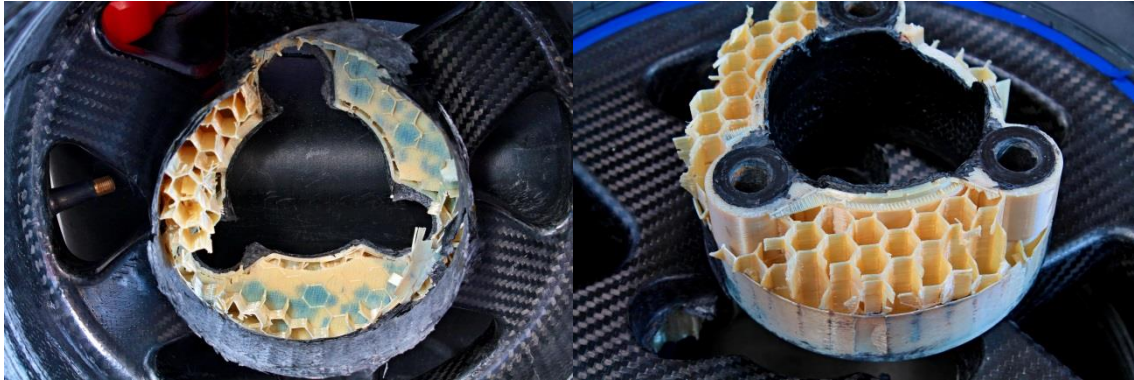
Projekt uhlíkových disků byl úspěch. Na jednom disku bylo oproti FS.05 uspořeno 2,5 kg, tedy 10 kg na voze. A to vše na neodpružených rotačních hmotách, což mělo z hlediska dynamiky vozu velký přínos. Vůz FS.06 dosáhl nejlepšího výsledku týmu v historii- 5. místa na nejprestižnějším závodě světa, německém FSG. Následovalo druhé místo na neoficiálním závodě FS Czech v Hradci Králové. Nicméně osudným závodem se stal ten v maďarském



Györu, kde došlo v závěru závodu k destrukci disku na pravém předním kole a k prvnímu nedokončení závodu po pěti letech.

V době destrukce měl disk ujet 208km v závodním režimu, nicméně jak ukázal záznam dat z vozu, dokázala FS.06 na hladkém maďarském betonu překonat návrhové parametry o více jak 20 % a špička zatížení pravého předního kola byla 1004 Nm.

Závěr byl na první pohled jasný- po 2/3 své životnosti již disk nedokázal přenést takové zatížení, jelikož byl provozován mimo návrhové podmínky.

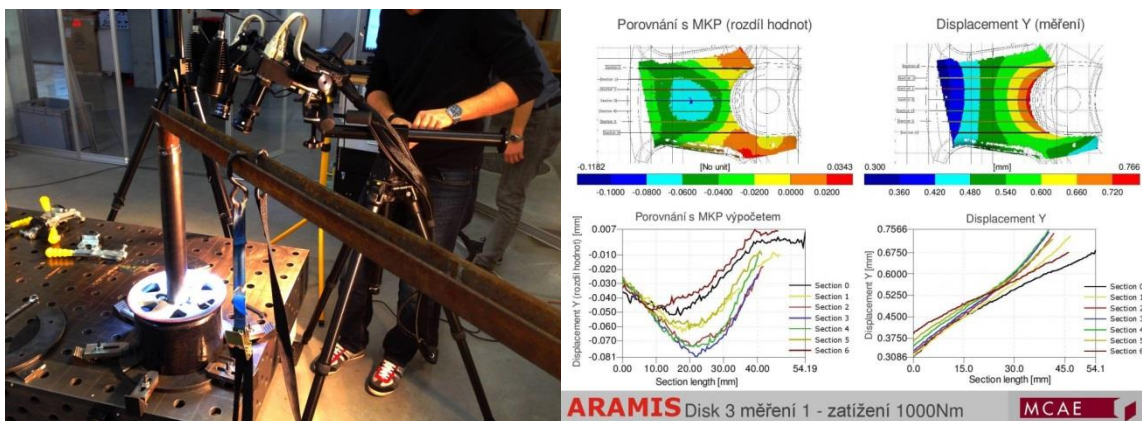


Obr. 9 Zničený disk.

### 3. Vývoj 2.generace disku

#### 3.1 Příčina selhání

Na podzim 2014 bylo rozhodnuto o pokračování vývoje uhlíkových disků. Nejdříve bylo potřeba jednoznačně odhalit příčinu selhání disku první generace. Byl zvolen postup kalibrace MKP modelu pomocí experimentálního měření deformace disku. Měření proběhlo na dvou discích, kdy oba měly odjetu naprosto stejně jako disk, který praskl. Měření bylo realizováno opět za podpory MCAE systems pomocí optického měřicího systému ARAMIS, kdy bylo vyvozeno statické ohybové zatížení, odpovídající definici modelu v MKP. Měření probíhalo u obou disků v rozsahu zatížení 400-1000 Nm a u jednoho disku až do destrukce, která nastala při zatížení 1842 Nm. Výstupy z MKP simulace a experimentálního měření byly vzájemně porovnány. Výstupní ODB soubor byl pomocí pythonovského skriptu exportován do formátu dynain, který obsahoval informace o geometrii nedeformovaného disku a uzlové posuvy ve všech souřadnicích a který sloužil jako vstup pro software společnosti GOM ARAMIS, který již zvládl sjednotit souřadné systémy virtuálního modelu a fyzického měření a vzájemně porovnat posuvy obou případů. Výsledky měření posloužily pro nastavení materiálových vlastností MKP modelu, aby odpovídal již nacyklovanému disku.



Obr. 10 Optické měření deformace disku systémem ARAMIS a protokol porovnání s MKP modelem.

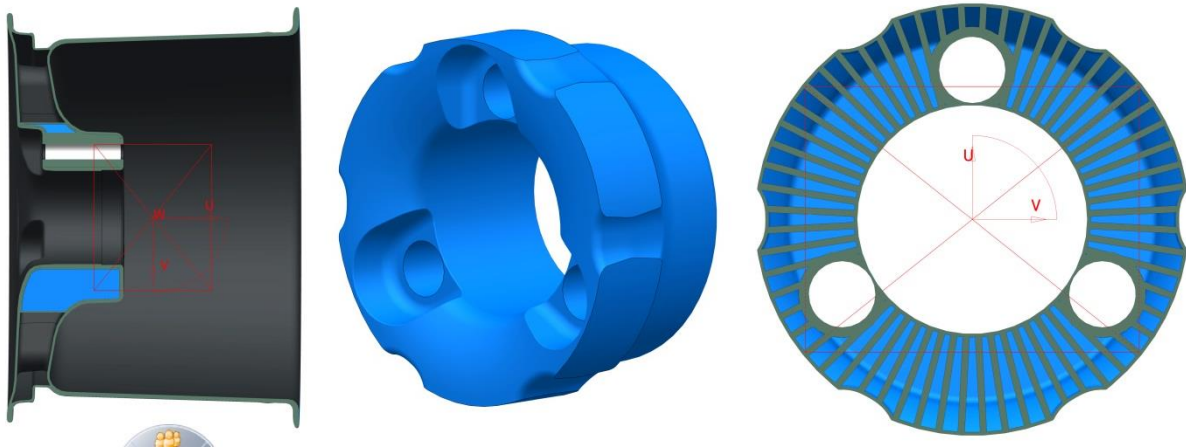
Jak fyzický test, tak MKP simulace ukázaly kritický bod ve shodném místě, kde disk praskl i při závodě, nicméně ani v jednom případě by nemělo dojít k fatální destrukci. Závěrem bylo usouzeno, že na vině je kombinace dvou faktorů- nedostatečného dotlačení vrstev potahu, které mělo v kombinaci s jednorázovým vysokým zatížením za následek delaminaci dvou vrchních vrstev. Po delaminaci řádově narostla deformace disku, což mělo za následek destrukci.

### 3.2 Nové řešení

Cílem nové generace disku bylo dosažení vyšší statické bezpečnosti oproti mezi pevnosti a zvýšení tuhosti konstrukce. Na základě zkušeností z předchozího vývoje byl zvolen přístup zesílení středu jádra disku, zvýšení počtu vrstev uhlíku a náhrada sendvičové struktury v paprscích a vnější části disku za dutou.

Jádro středu disku zůstalo nadále z ULTEMu 9085, nicméně jeho struktura byla pozměněna a namísto tenkých voštinových buněk byla zvolena silnější radiální žebra a silnější vnější skořepina.

Vložky pod kolové šrouby byly rovněž upraveny. Změna se týkala jednak zvýšení vnějšího průměru, zmenšení průměru malého (kvůli použití kolových šroubů o menším průměru) a jako materiál byla zvolena hliníková slitina EN AW 7075, jelikož se ukázalo, že životnost disku nebude zřejmě nikdy taková, aby se stačila projevit chemická koroze mezi hliníkem a uhlíkem. Vložky byly do jádra opět vlepeny dvousložkovým epoxidem LOCTITE 9466.



*Obr. 11 CAD model nového disku-řez, jádro a řez jádrem.*

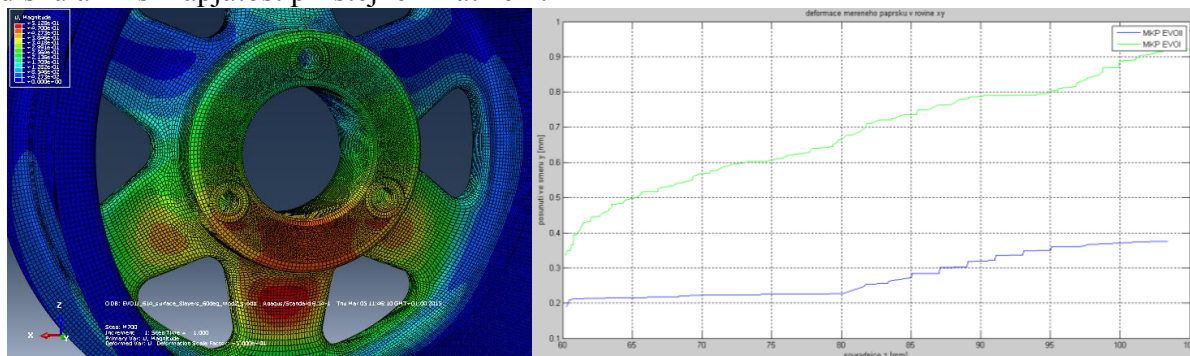
Největší změny doznala skladba. Namísto pěti vrstev bylo ve vnitřní části disku zvoleno vrstev sedm, které byly ve středu, tedy kritickém místě, vyztuženy ještě vrstvou osmou. Skladba po  $45^\circ$  byla v oblasti sedmi vrstev rovněž nahrazena skladbou  $0/120/60/0/60/120/0^\circ$ , tedy vyrovnaný symetrický kompozit, resp.  $0/120/60/0/60/120/0/0$  v oblasti 8 vrstev, kde bylo dosaženo pouze kompozitu vyrovnaného. Ve zbytku disku zůstala skladba zachována.

Takto upravený disk by měl splnit oba požadavky za cenu malého nárůstu hmotnosti.

### 3.3 MKP výpočet druhé generace disku

MKP model disku byl v principu zdefinován shodně jako disk první generace. Jádro bylo počítáno jako věrný objemový model skutečného výtisku bez zjednodušení. Paprsky a vnější část disku zůstaly duté. Skladba byla rozdělena do dvou Composite-layupů, jeden pro střed kola se skladbou po  $60^\circ$  a druhý pro vnějšek disku se skladbou po  $45^\circ$ . Okrajové podmínky zůstaly stejné.

Výsledek výpočtu byl porovnán jak s výpočtem prvního disku, tak s experimentálním měřením. Z porovnání vyplývá výrazně vyšší tuhost konstrukce (o cca 30%), hlavně ve středu disku a nižší napjatost při stejném zatížení.



**Obr. 11** Deformace disku dle MKP výpočtu a porovnání deformace první a druhé generace disku.

### 3.5 Výroba druhé generace disku

Pro výrobu byly opět využity hliníkové formy, na kterých proběhly jen drobné úpravy, vedoucí ke snadnější montáži a demontáži. Změny, ovlivňující disk se omezily na osazené vložky kvůli menšímu průměru kolových šroubů a zvětšení radiusu v kritickém místě, které bylo realizováno vyplněním tekutým kovem a ručním zarovnáním radiusovou měrkou.

Realizace dutého kompozitu byla vyřešena opět pomocí 3D tisku plastů. Tentokrát bylo využito polykarbonátu SR100, o dostatečných mechanických vlastnostech a teplotní odolnosti, který je zároveň ve speciálním solném roztoku rozpustitelný.



**Obr. 12** Dvoudílné plastové jádro nového disku.

### 3.6 Zkoušení disku

V období konání STČ 2015 je prototyp disku druhé generace již vyroben. Během následujícího týdne bude disk opět zkoušen ohybem za rotace v TÜV-SÜD dle předpisu EHK 124, tentokrát však bude disk na klíčových místech oplepen 6 tenzometry, díky kterým bychom měli získat závislost deformace disku na počtu zátěžných cyklů.

Původní plán počítal s nasazením podobného měření jako varianty health monitoringu přímo na voze. Nicméně toto řešení zůstane zřejmě z finančních důvodů nerealizováno.

#### 4. Závěr

Projekt uhlíkových disků běží již druhým rokem. Během prvního roku byl vyvinut uhlíkový disk splňující všechny požadavky. Nicméně se ukázal jako nedostatečný kvůli nepředpokládaným provozním podmínkám, což vedlo k vývoji disku druhé generace.

Během vývoje druhého disku bylo provedeno experimentální měření disku první generace, které posloužilo k identifikaci příčiny destrukce a kalibraci MKP modelu. Na základě kalibrovaného MKP modelu byl napočítán druhý disk jako výrazně tužší a s vyšší statickou bezpečností.

Druhý disk je vyroben a nachází se ve fázi testování prototypu. V případě úspěšných testů pak bude vyrobeno dalších 8 kusů, které poslouží jako disky na testování a závody vozu FS.07.

#### *Seznam použité literatury*

- [1] MILLIKEN, Douglas L., MILLIKEN, William F . Race car vehicle dynamics, SAE 1995. ISBN 978-1560915263
- [2] FSAE Tyre Test Consortium, Milliken Research Associates, USA  
  
<http://www.millikenresearch.com/fsaettc.html>
- [3] SAE standards J2530, Wheel, Passenger Cars and Light Truc, Performance Requirements and Test Procedures, SAE 2011,.
- [4] MAREŠ, Tomáš, Podklady k přednáškám z předmětu Mechanika kompozitních materiálů, ČVUT 2014