

Konstrukční řešení automobilového dílu vyráběného hybridní technologií

Bc. David Thomke

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David THOMKE**
Osobní číslo: **T11581**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Konstrukční řešení automobilového dílu vyráběného hybridní technologií**

Zásady pro vypracování:

- 1.Vlastností a rozdělení kompozitních materiálů
- 2.Hybridní technologie a její použití v automobilovém průmyslu
- 3.Experimentální část- návrh virtuálního modelu a jeho analýza
- 4.Diskuse výsledků
- 5.Závěr

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1.EHRENSTEIN, Gottfried W. Faserverbund-Kunststoffe:Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften.1995

2.FLEMMING, Manfred; ROTH Siegfried. Faserverbundbauweisen. Eigenschaften: Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte.2003

3.SCHÜRMAN, Helmut. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden.2007

4.ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů.2010

5.Internetové zdroje dle doporučení vedoucí práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013


Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: David Thomke..... Obor: Výrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10.5.2013



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy; kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²¹ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní díla).*

²² *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého vsouvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí ke výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukčním řešením nového automobilového dílu vyráběného hybridní technologií.

Teoretická část popisuje vlastnosti, rozdělení a použití nejčastěji používaných kompozitních materiálů a technologií použitou při návrhu hybridního dílu.

V praktické části diplomové práce je vypracován 3D návrh kompozitního dílu a jeho strukturální a tvarovou analýzu pomocí softwaru Abaqus/ CAE Composites Modeler.

Klíčová slova: kompozit, hybridní technologie, Catia V5, Abaqus/ CAE- Composites Modeler.

ABSTRACT

My Thesis describe project and construction of new automotive part. This part will be fabrication by hybrid technology.

Theory describe partition, characteristic and using most used parts from composed materials. Theory describe technology project of construction hybrid part.

Practise of my thesis describe work up 3D project, structural and drapping analysis by using software Abaqus/ CAE Composites Modeler.

Keywords: Compozit, Hybrid Technology, Catia V5, Abaqus/ CAE- Composites Modeler.

Své vedoucí diplomové práce doc. ing. Soně Rusnákové PhD. upřímně děkuji za obětavou a tvůrčí spolupráci a za pečlivé provedení korektur při vzniku této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé manželce Radomíře a dceři Kateřině za trpělivost při mé cestě, než mohla tato diplomová práce vzniknout.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 VÝVOJ VÝROBKU	13
2 DRUHY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU, JEJICH VLASTNOSTI A POUŽITÍ	14
2.1 STRUKTURA KOMPOZITŮ	14
2.1.1 Klasifikace podle charakteru matrice	14
2.1.2 Klasifikace podle charakteru výztuže	14
2.2 VÝZTUŽNÁ VLÁKNA	16
2.2.1 Synergie	16
2.2.2 Rozdělení vláken podle povahy vlákn	16
2.2.3 Rozdělení vláken podle prostorového uspořádání a geometrie	17
2.2.4 Druhy vazeb	18
2.2.5 Rozdělení vláken podle materiálu	19
2.2.6 Vliv orientace vláken (Anisotropie) a obsahu vad na vlastnosti	19
2.2.7 Objem vláken v kompozitu	22
2.3 MATRICE	23
2.3.1 Reaktoplastické matrice	23
2.3.2 Elastomerní matrice	24
2.3.3 Teplotní hranice použití vyztužených plastů	24
2.4 PŘEHLED VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ VLÁKNY VYZTUŽENÝCH PLASTŮ (FRP)	25
2.5 NÁKLADY NA CFK A ALU DÍL	27
2.6 ZHODNOCENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	29
3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	30
3.1 THERMOFORMING- TVÁŘENÍ	30
3.1.1 Vakuové tvarování	30
3.1.2 Tlakové tváření	30
3.1.3 Mechanické tváření	31
3.1.4 Procesní kroky tváření	31
3.2 VSTŘIKOVÁNÍ	32
3.2.1 Vstřikování termoplastu	33
3.2.2 Vstřikování reaktoplastů	33
3.2.3 Zastřikování polotovaru	34
3.2.4 Procesní kroky zastřikování	34
3.2.5 Výhody zastřikování	35
3.3 ZHODNOCENÍ TECHNOLOGIE TVAROVÁNÍ A VSTŘIKOVÁNÍ	35
4 HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE	37
4.1 PROCESNÍ KROKY HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE	38
4.2 ZHODNOCENÍ HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE	38
5 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	42
7 POUŽITÝ SOFTWARE	43

7.1	CATIA V5 R21	43
7.2	ABAQUS CAE	43
8	KONSTRUKČNÍ NÁVRH DÍLU	44
8.1	TECHNICKÝ POPIS DÍLU A JEHO UMÍSTĚNÍ	44
8.1.1	Funkčnost	46
8.2	KONSTRUKČNÍ 3D NÁVRH	46
8.3	VOLBA MATERIÁLU	47
8.3.1	Matrice a materiál pro výztužná žebra	47
8.3.2	Uhlíková tkanina s termoplastickou matricí	48
8.4	VOLBA TLOUŠŤKA STĚNY	49
8.5	STRUKTURÁLNÍ KOLIZNÍ ANALÝZA	49
8.6	TVAROVÁ ANALÝZA VLÁKEN	51
8.6.1	Postup řešení úlohy FEA- Composites Modeler	51
8.6.2	Volba koordinačního systému a referenčního bodu	53
8.6.3	Porušení vláken	55
8.6.4	Druhy deformaci tkanin	55
8.6.5	Napětí a deformace vláken	56
8.6.6	Rozvinutý tvar dílu- Flat Pattern	63
8.7	VÝHODY KOMPOZITNÍHO DÍLU	65
8.8	NEVÝHODY KOMPOZITNÍHO DÍLU	66
8.9	CENA POUŽITÉHO MATERIÁLU	66
8.9.1	Cena použitého materiálu původního dílu	66
8.9.2	Cena použitého materiálu navrženého dílu	66
8.10	ZHODNOCENÍ	67
9	DISKUSE VÝSLEDKŮ	69
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK	80
	SEZNAM PŘÍLOH	81

ÚVOD

V roce 2007 společnost BMW Group zahájila novou éru své existence, když vyhlásila strategii „Number One“, jejímž cílem je zajištění dlouhodobé nezávislosti a ziskovosti. Jasnou cestou k těmto cílům je vývoj moderních dopravních prostředků, které ctí všechny aktuální a zejména budoucí nároky, jež budou zákazníci klást na individuální dopravu. I proto vznikl v rámci BMW Group tzv. projekt i, který sdružuje odborníky z různých oddělení společnosti, jejichž cílem je nejen vývoj samotného automobilu budoucnosti, ale také jeho výrobního zázemí a systému dopravy jako celku.

Nový produkt, který má zatím pracovní označení MCV – Megacity Vehicle- a bude se prodávat v rámci značky BMW, byl vyvinut na základě informací získaných z mnoha společenských průzkumů v oblasti individuální dopravy, a proto bere v potaz také nové společenské trendy, včetně například změn klimatu či demografického vývoje.

Jedná se o velmi propracovaný a moderní automobil, určený zejména pro provoz po světových velkoměstech. Jeho charakteristickými vlastnostmi není pouze čistě elektrický pohon, ale především také zcela nově pojatá konstrukce karoserie, jež využívá nejmodernější materiály. Právě elektrický pohon a jeho specifické prostorové nároky dovolily kompletně přepracovat architekturu automobilu.

Samotné elektrické hnací ústrojí je tvořeno lithium-iontovými akumulátory, které dodávají svoji energii synchronnímu elektromotoru s permanentními magnety, umístěnému přímo mezi hnanými zadními koly. Elektromotor je výsledkem vlastního vývoje BMW Group. Tímto krokem hodlá BMW i nadále pokračovat v pozici výrobce nejmodernějších hnacích jednotek pro osobní automobily, kterou si udržuje již několik desetiletí. Před produkční verze elektrické hnací soustavy pro rok 2013 připravovaného vozu MCV se bude od roku 2011 testovat v sérii elektromobilů postavených na základě studie BMW ActiveE z prosince roku 2009.

Jednou z rozhodujících vlastností, umožňující každodenní použitelnost elektřinou poháněného automobilu, je dojezd. Na něj má značný vliv kromě jiného především hmotnost. BMW Group se proto při vývoji komplexně soustředila na její snižování. I proto vyvinula unikátní konstrukci karoserie nazvanou LifeDrive. Jedná se o spojení dvojice struktur. Základním nosným prvkem je modul Drive, v němž jsou umístěné všechny prvky hnacího systému včetně akumulátoru, podvozkových částí a bezpečnostních deformačních struktur vpředu a vzadu. Na této platformě je umístěna karoserie automobilu vyrobená z

plastu vy-ztuženého uhlíkovými vlákny CFRP (Carbon Fibre-Reinforced Plastic), která se vyznačuje mimořádnou pevností a nízkou hmotností. Materiál CFRP je o 50 procent lehčí než ocel.

V automobilovém průmyslu se jedná o značný unikát, protože výroba karbonových kompozitních dílů v tak masovém měřítku, jako se připravuje pro vozidlo MCV, nemá obdoby. Jedná se o výsledek deset let trvajících postupného vývoje výrobních postupů, materiálů a nářadí. BMW Group je tak jediným výrobcem automobilů na světě, který je připraven zcela soběstačně (od uhlíkového vlákna až po produkci kompletních výrobků), ve velkém a zejména ekonomicky vyrábět díly z CFRP. Ty se proto budou moci využívat nejen pouze pro omezené série speciálních automobilů, ale především jako hlavní stavební materiál pro velkosériové automobily budoucnosti.

Představená dlouhodobá strategie je jasnou ukázkou toho, jak si BMW Group představuje vývoj individuální dopravy v následujících desetiletích. Je však zřejmé, že již v roce 2013 bude na trhu první automobil, který této vizi bude plně odpovídat. Elektromobil MCV je jasnou ukázkou technologické kompetentnosti BMW Group, stejně tak jako vodítkem pro budoucnost a současně zárukou budoucí nezávislosti společnosti BMW Group.

V současnosti je zřejmé, že na individuální mobilitu se kladou stále zvýšené nároky z různých oblastí. Svět je ve stavu neustálých sociálních, environmentálních, ale také ekonomických otřesů a změn. Avšak na jaké proměny se máme zaměřit a jak na ně můžeme reagovat?

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝVOJ VÝROBKU

Vývoj zcela nového vozu nebo nějaké jeho části je dlouhý a složitý proces, při kterém se jedná o velmi odlišné oblasti. Aby bylo možné vytvořit kvalitní produkt, je nutné mít k dispozici dobrou koordinaci mezi jednotlivými odděleními, jinak výrobek ani časový harmonogram nebude splněn včas. Na Obr. 1 je znázorněn konstrukční vývojový proces dílu.



Obr. 1. Vývojový konstrukční diagram

Konstruktor je zodpovědný za až 75% ceny konečného výrobku, což je obrovská zodpovědnost. Špatné rozhodnutí v této fázi, např. špatně zvolený materiál, má velký vliv na konečnou cenu, kvalitu a funkčnost výrobku. Prodloužení času pro uvedení výrobku může

2 DRUHY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU, JEJICH VLASTNOSTI A POUŽITÍ

2.1 Struktura kompozitů

V současnosti je na trhu dostupné relativně široké spektrum kompozitních materiálů lišících se pojivem (pryskyřicí), typem a charakterem výztuží (typ vláken, tkaniny, rohože, rouna) a mnohdy i způsobem výroby (laminace, tažení, navíjení, odstředivé lití, RTM, atd.).

2.1.1 Klasifikace podle charakteru matrice

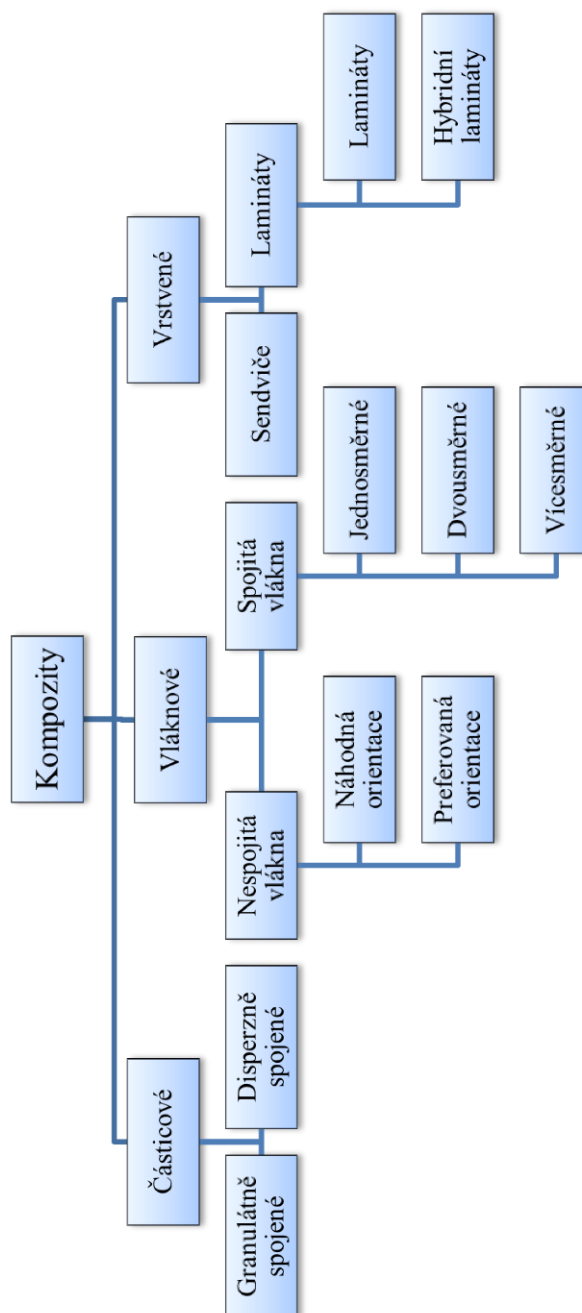
Z hlediska klasifikace matic existují dva základní typy polymerních pryskyřic- pojiv, a to reaktoplasty a termoplasty.

- **Termoplasty**- kterými jsou např. polystyren (PS), polypropylen (PP), polyetylen (PE), polykarbonát (PC), polyetyléntereftalát (PET) a další, jsou tuhé látky, které měknou a tekou při zvýšení teploty. Po ochlazení opět přejdou do pevného skupenství. Charakteristickým strukturním znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek (několik tisíc až několik milionů). [10, 27]
- **Reaktoplasty**- např. epoxidy, nenasycené polyestery, melaminy či fenol formaldehyd, které jsou obvykle dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídké-ho medu tvořené relativně malými molekulami. Následně jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení probíhá buď za pokojové teploty, nebo za zvýšených teplot. Způsob, kterým vytvrzování probíhá, do značné míry ovlivňuje vlastnosti výsledného termosetu. [10, 27]

2.1.2 Klasifikace podle charakteru výztuže

Hlavním hlediskem klasifikace podle povahy výztuže je její struktura, tzn. geometrie a orientace. Klasifikace vychází ze způsobu zpevnění kompozitního materiálu, které může být uskutečněno vlákny nebo částicemi. Odtud pramení pojem vláknový či částicový kompozit.

Další rozdělení je uvedeno v následujícím schématu (Obr. 2):



Obr. 2. Rozdělení kompozitů [25, 27]

2.2 Výztužná vlákna

Rozdělení vláknových kompozitních materiálů je možné podle použité technologie výroby, užitných vlastností nebo složitosti jejich struktury. Jedním z nejčastěji používaných dělicích kritérií je délka vyztužujících vláken, jejich prostorové uspořádání, typ výztužných vláken, jejich kvantita (objemový podíl) a míra jejich zakřivení. [10, 18]

2.2.1 Synergie

Zvýšením pevnosti ve směru vláken se dosáhne uložením paralelních vláken do matrice.

Dojde-li k lomu vlákna, je zatížení přeneseno smykovými napětími na sousední vlákna a kompozit je schopen dále přenášet zatížení. Porušené vlákno se na přenosu zatížení nepodílí pouze v omezené části své délky (v okolí lomu), dochází k synergickému efektu, který je v další části kompozitu nenarušen. O tom, jak je tento synergický efekt silný, rozhoduje

pevnost spojení obou složek. V případě, že neexistuje adheze mezi matricí a vláknem, nepřenáší se žádné zatížení z porušeného vlákna na sousední vlákno a pevnost laminátu odpovídá pevnosti rovingu. V případě, že smykové napětí na rozhraní složek překročí určitou hodnotu, vzniknou při lomu vlákna v matrici trhliny. Když tyto trhliny dosáhnou k sousednímu vláknu, dojde vlivem koncentrace napětí na cele trhliny k předčasnému porušení sousedního vlákna. V matrici vznikají další trhliny, které opět poškozují sousední vlákna, až dojde k poruše laminátu. Vysoká pevnost ve smyku (adheze) tak může vést k vysokému smykovému napětí na konci vlákna, které způsobuje trhliny v matrici, a tím se snižuje pevnost laminátu. Potřeba mechanické energie pro odtržení vlákna od matrice je podstatně vyšší než energie potřebná ke vzniku trhlín v matrici. Z toho plyne, že pro vysoké pohlcení energie je nejpříznivější střední hodnota adheze složek s nízkým smykovým napětím v místě trhliny vlákna. To se projevuje zvláště při rázových zatíženích. [6, 9, 30]

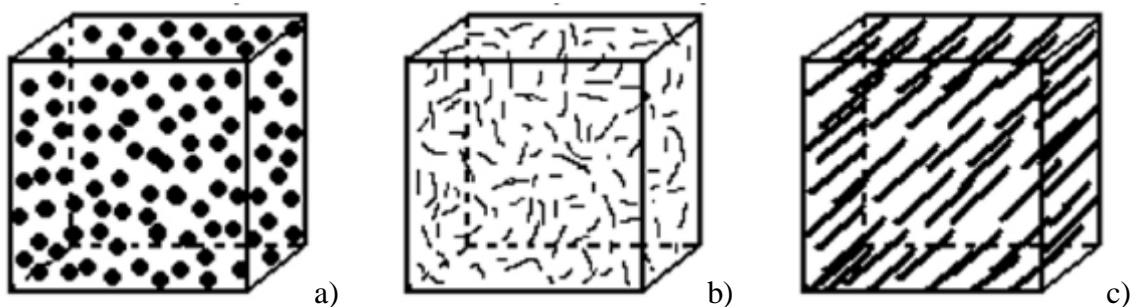
2.2.2 Rozdělení vláken podle povahy vlákna

Částicové vlákna (Obr. 3a)- výrazně nepřesahuje jeden rozměr útvarů výztuže ostatní rozměry. Vyztužující částice pak mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný. [5, 9, 30]

Krátké vlákna (Obr. 3b)- délka vláken je výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku ($L = 0,1$ bis 1 mm). Krátkovláknové kompozity se používají především pro injektované výlisky nebo pro extrudované plastové výrobky. [5, 9, 30]

Dlouhé vlákna (Obr. 3c)- délka srovnatelná s velikostí výrobku ($L = 1$ bis 50 mm).

Nekonečné vlákna- Díly s nekonečným vláknem se používají v podobě roving- u. Tyto díly dosahují vysoké tuhosti a pevnosti ($L > 50$ mm). [5, 9, 30]



Obr. 3. Rozdělení kompozitních materiálů [27]

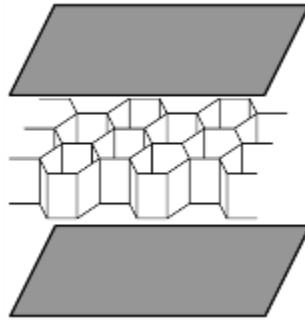
2.2.3 Rozdělení vláken podle prostorového uspořádání a geometrie

a) Jednovrstvé kompozity

- z kontinuálních vláken - jednosměrné (jednosměrné rovingy, prepregy)
 - dvou- až pětidimenzionální (tkaniny, rohože, splétané textilie)
- z diskontinuálních vláken (cca. 5-50 mm dlouhých) s náhodnou nebo preferovanou orientací (rouna, netkané textilie)

b) Vícevrstvé kompozity

- lamináty (tvoří několik vrstev, impregnovaných vhodnou pryskyřicí (nebo jiným lepidlem). Vyrábí se často lisováním za vyšších teplot, tento proces se nazývá laminace).
- sendviče ((Obr. 4) je složen ze dvou vnějších vrstev překrývajících mezivrstvou (jádro) z lehkého materiálu. Vnější části jsou tenké ale tuhé, vnitřní vrstva, tzv. distanční, je tlustší, zpravidla méně pevná hmota).



Obr. 4. Sendvičový prvek [32]

2.2.4 Druhy vazeb

Plátňová vazba (Obr. 5a)- jednoduchá základní vazba a jednoduché zpracování tkaniny vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému otřepu při řezání.

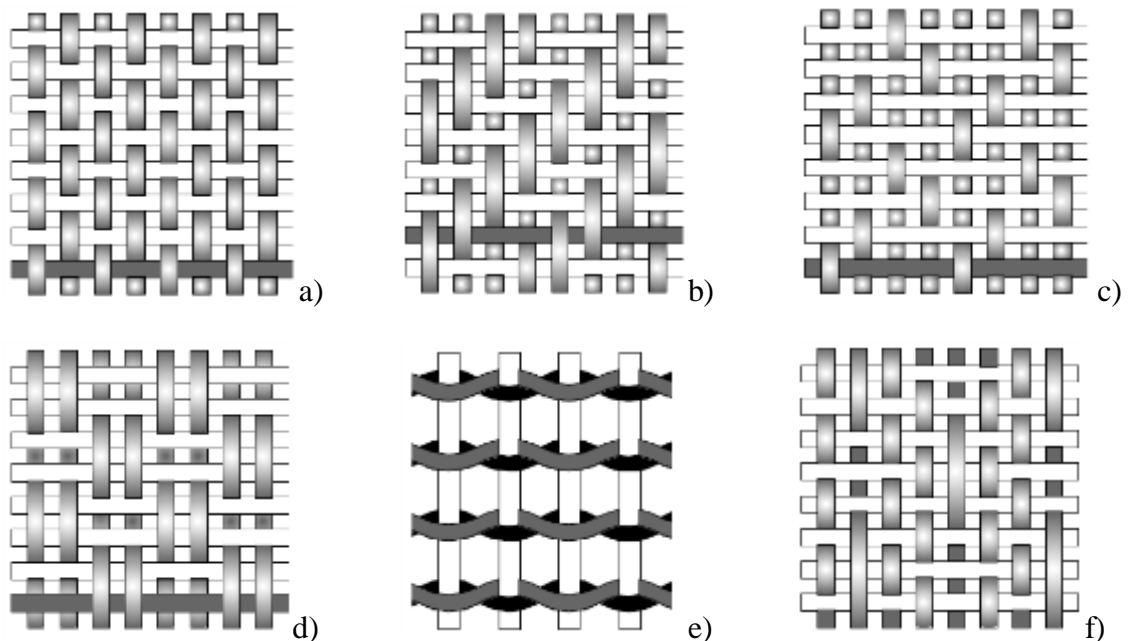
Keprová vazba (Obr. 5b)- vyšší pevnost a tuhost laminátu způsobena menším zvlněním tkaniny. Keprová vazba je vhodná pro tvarované prvky, protože tkanina je ohebnější.

Atlasová vazba (Obr. 5c)- vhodná pro prostorově složitě prvky, protože má velmi dobrou řasitelnost, menší vychýlení vláken než keprová.[5, 6].

Basket (Obr. 5d)

Leno (Obr. 5e)

Mock Leno (Obr. 5f)



Obr. 5. Druhy vazeb vyztužujících tkanin [5, 6]

2.2.5 Rozdělení vláken podle materiálu

Nejčastěji se používají vlákna skleněná, aramidová a uhlíková. Výhodou kompozitů je především úspora hmotnosti. Kompozity mají ve srovnání s ocelí vyšší pevnost a přitom nižší hustotu. Zvolíme-li za srovnávací parametr podíl pevnosti a hustoty, předčí kompozity ocel mnohonásobně (oproti sporné výhodě např. hliníku, který je sice ve srovnání s ocelí lehčí, ale má také nižší pevnost).

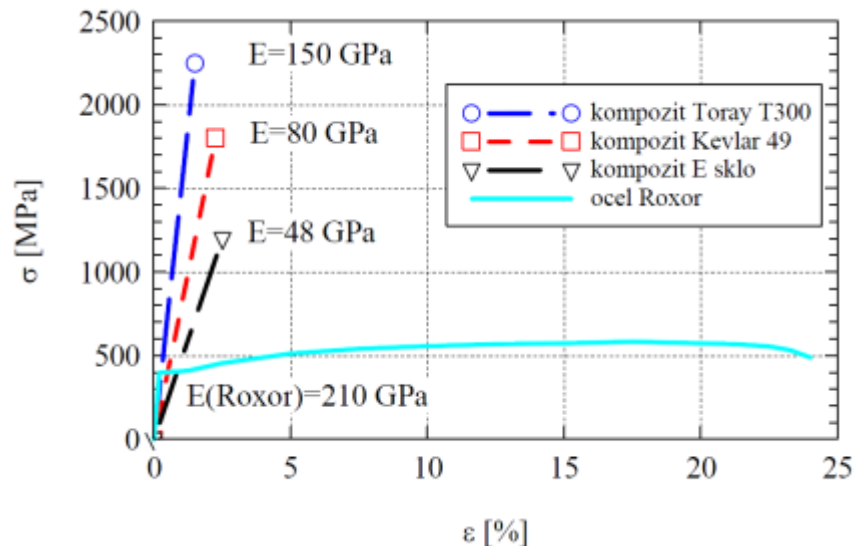
- **Skleněná vlákna-** jsou izotropní (materiálové vlastnosti jsou v podélném i příčné směru totožné), modul pružnosti v tahu (E- modul) je přibližně stejný jako u hliníku. Skleněné vlákno nemá viskoelastické chování. Při dlouhodobém tepelném namáhání (při 250°C) se mechanické vlastnosti nesnižují. Skleněná vlákna jsou ohnivzdorná a součinitel teplotní délkové roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.
- **Aramidová vlákna-** patří k nejlehčím vyztužujícím vláknům, je silně anizotropní (jeho příčné vlastnosti (modul pružnosti v tahu E) jsou velmi rozdílné než v podélném (až 12x menší)) a mez pevnosti v tahu (v podélném směru) je výrazně vyšší než mez pevnosti v tlaku ($\sigma_{PIII} \gg \sigma_{PDIII}$). Jako organické vlákno nemá velkou odolnost proti vysokým teplotám. Vytvrzené konstrukční prvky jsou obtížně obrobitelné.
- **Uhlíková vlákna-** mají progresivní deformační chování (se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota E- modulu). Vysoká pevnost a E- modulu až do teploty 500°C. Mimořádně vysoká korozní odolnost a jsou vysoce anizotropní, kdy anizotropie ovlivňuje součinitele teplotní roztažnosti ($\alpha = -0,1$ až $-1,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ -! **záporná hodnota!**). Uhlíková vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání (lepší i než u např. oceli, hliníku). Rychlost hoření kompozitu s 90% uhlíkových vláken je velmi pomalá.

2.2.6 Vliv orientace vláken (Anizotropie) a obsahu vad na vlastnosti

Důležitou vlastností kompozitů je anizotropie (Obr. 7 a Obr. 8), tj. odlišné mechanické vlastnosti pro různé směry zatížení. Vysoká pevnost platí jen ve směru orientace vláken. V ostatních směrech je pevnost nižší, nejmenší je kolmo na směr vláken. Pro jednoosé zatížení se používají kompozity jednosměrné, kde jsou všechna vlákna rovnoběžná. Pro složitější zatížení se používají kompozity složené z více vrstev s různou orientací vláken

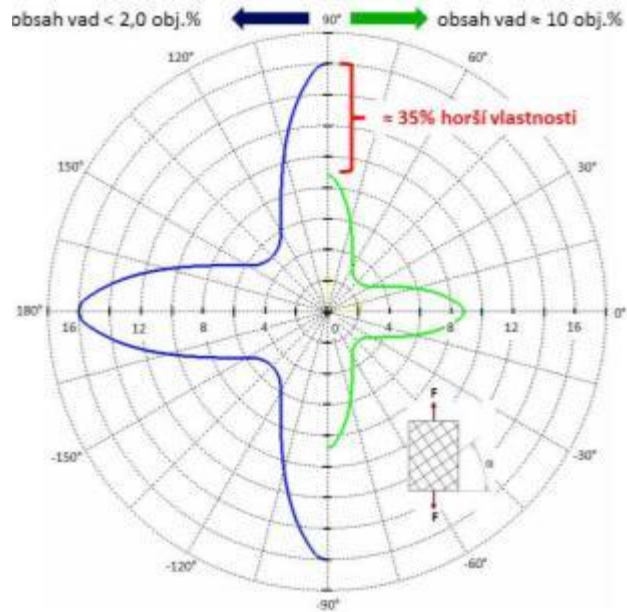
nebo vyztužené tkaninou. Proto při návrhu dílu z kompozitních materiálů je vždy třeba myslet na anizotropní vlastnosti vyztužných vláken.

Na Obr. 6 jsou pracovní diagramy pro jednosměrně vyztužené kompozity a ocel, které ukazují, že jejich chování v jednoosém tahu je až do poruchy pružné a na rozdíl od ocele nevykazují mez kluzu ani plasticitu. Principem vlastního vláknového vyztužení je skutečnost, že vyztužující vlákna, mající o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem (polymerní matricí), se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí.

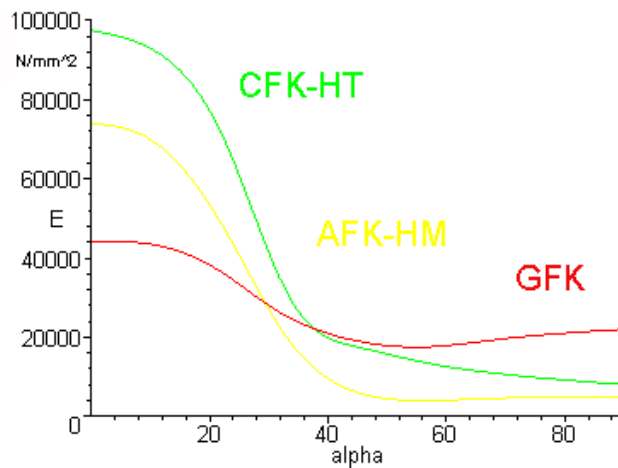


Obr. 6. Pracovní diagramy kompozitů a ocele [18]

Plocha pod pracovním diagramem je relativně malá (práce spotřebovaná na porušení) ve srovnání s mnoha konstrukčně významnými kovy. Tato skutečnost představuje jednu z nevýhod vláknového polymerního kompozitu- nemá možnost přizpůsobit se velkým lokálním napětím rozvojem plastické deformace. Na druhé straně ovšem i návrh kovových konstrukcí obvykle nepřipouští větší poměrné deformace než 0.5%. [18]



Obr. 7. Vliv anisotropie a obsahu vad na pevnost kompozitu v polárních souřadnicích



Obr. 8. Vliv anisotropie na pevnost kompozitu pro různá kompozitní vlákna

Příčná pevnost v tahu je dána vlastnostmi matrice a adhezí k vláknům

Obecné vyjádření

$$R_{ku}^{90} = R_{mu} / S \quad [1]$$

, kde S je pevnostní redukční faktor ($S > 1$). Pro určení S se užívají různé empirické nebo analytické vztahy. Pro malé odchylky od směru vláken (do 4 stupňů) dochází k podélnému porušení vlivem podélné složky zatížení

$$R_{ku} = R_{ku}^0 / \cos^2 \alpha \quad [2]$$

Pro velké odchylky (nad 45 stupňů) dochází k porušení příčnou složkou zatížení

$$R_{ku} = R_{ku}^{90} / \sin^{2\alpha} \quad [3]$$

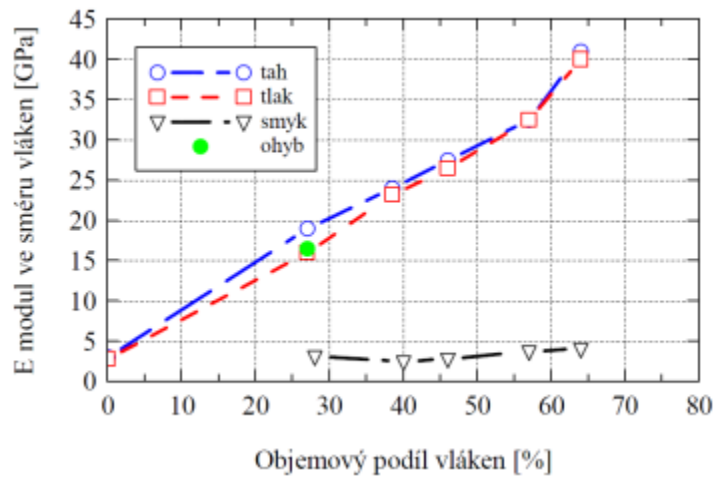
Pro střední odchylky dochází k porušení matrice složkou napětí rovnoběžnou s vlákny

$$R_{ku} = R_{mtu} / \sin 2\alpha \quad [4]$$

, kde R_{mtu} je mez pevnosti matrice ve smyku. [25]

2.2.7 Objem vláken v kompozitu

Čím vyšší podíl vlákna je v kompozitním materiálu, tím jsou lepší jeho mechanické vlastnosti (Obr. 9), kde optimální podíl vlákna závisí na požadované součásti.



Obr. 9. Vliv objemového podílu vláken na modul E [18]

Teoreticky maximální dosažitelný objemový podíl vláken v kompozitu podle uspořádání vláken je možné hexagonálním uspořádáním (Obr.10a), kdy je možné dosáhnout 91% zaplněním v kompozitu nebo čtvercovým uspořádáním (Obr. 10b), kdy dosáhneme 79% zaplněním.



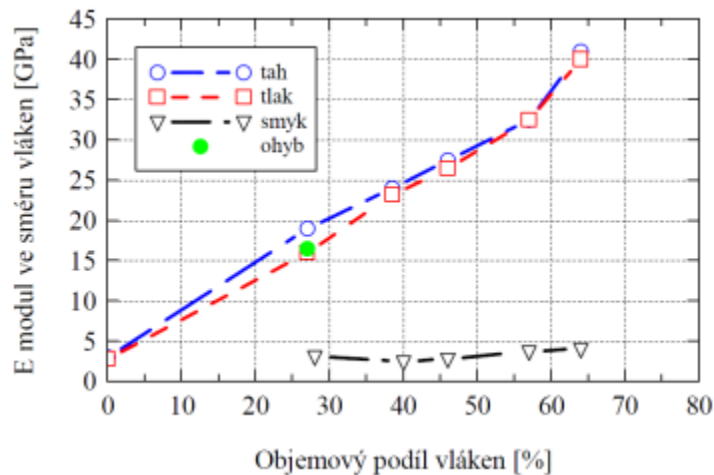
Obr. 10. Vliv uspořádání vláken na objem

Objemový podíl vlákna je počítán podle vztahu:

$$\varphi_f = \frac{V_f}{V_c} = \frac{V_f}{V_f - V_m} = 1 - \varphi_m \quad [5]$$

, kde index **f** je vlákno a index **m** je matrice.

Vliv objemu vláken na modul pružnosti jednosměrně vyztužených vláknových kompozitů pro kompozit E sklo/polyester a základní mechanické zkoušky je na Obr. 10. [18]



Obr. 11. Vliv objemového podílu vláken na modul E [18]

2.3 Matrice

V hromadné výrobě se používají zejména z ekonomických důvodů stále více polotovary s termoplastickými matricemi (krátký výrobní cyklus, nevytvrzují se). Nejlevnější je polypropylen (PP), dražší polyamidy (PA) a lineární polyestery (polyetylen tereftalát (PET), polytetrametylen tereftalát (PBT)). Chemicky a tepelně velmi odolné termoplasty jsou polyfenylsulfidy (PPS), termoplastické polyimidy (polyamidoimid (PAI), polyetherketony (PEK). Maximální teplota použití však nepřesahuje 300°C. [10, 18, 19]

2.3.1 Reaktoplastické matrice

Nejlevnější jsou nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP), jejichž viskozitu lze ovlivňovat podílem reaktivního rozpouštědla (levného styrenu), ztužujícími přísadami a plnivý. Dobu vytvrzování lze měnit v širokém rozsahu volbou vytvrzovacího systému a vytvrzovací teploty. Krátké doby vytvrzování se s výhodou používají při hromadné výrobě. Obvyklý poměr objemového podílu vláken (sklo) a matrice je 0.65/0.35. Kompozit je vhodný pro nenáročné aplikace. Chemicky i tepelně odolnější jsou vinylesterové pryskyřice (VE) (mají vysoké hodnoty kritického přetvoření). Nejlepší mechanické vlastnosti s dostatečnou che-

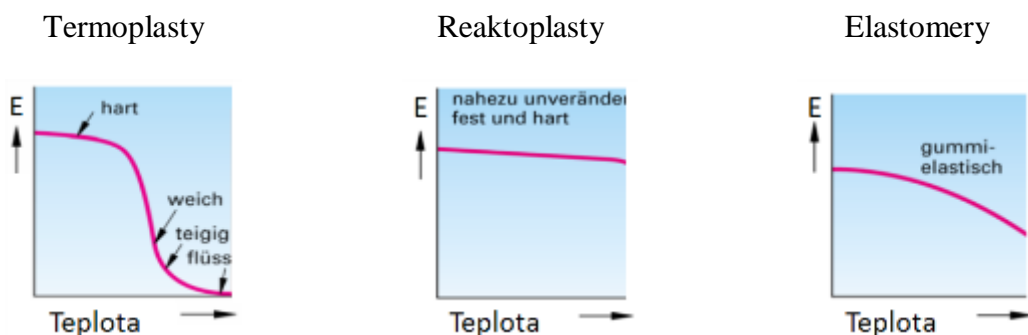
mickou i teplotní odolností mají epoxidové pryskyřice (EP). Fenolické (fenolformaldehydové) pryskyřice mají vynikající odolnost ohni a vykazují při hoření nízký vývin toxických zplodin a kouře (využití pro prvky hromadných dopravních prostředků). Největší tepelnou odolnost mají pryskyřice na bázi imidových polymerů (bimaleimidy (BMI)). [10, 18, 19]

2.3.2 Elastomerní matrice

Elastomery jsou rozměrově stabilní a pružné polymery. Kvůli své nízké tuhosti se dají použít jen jako konstrukční díly na ohebné výrobky, např. hnací klínové nebo ozubené řemeny. Typickými zástupci jsou přírodní kaučuk (NR), styren-butadien kaučuk (SBR), silikonová pryž. [10, 18, 19]

2.3.3 Teplotní hranice použití vyztužených plastů

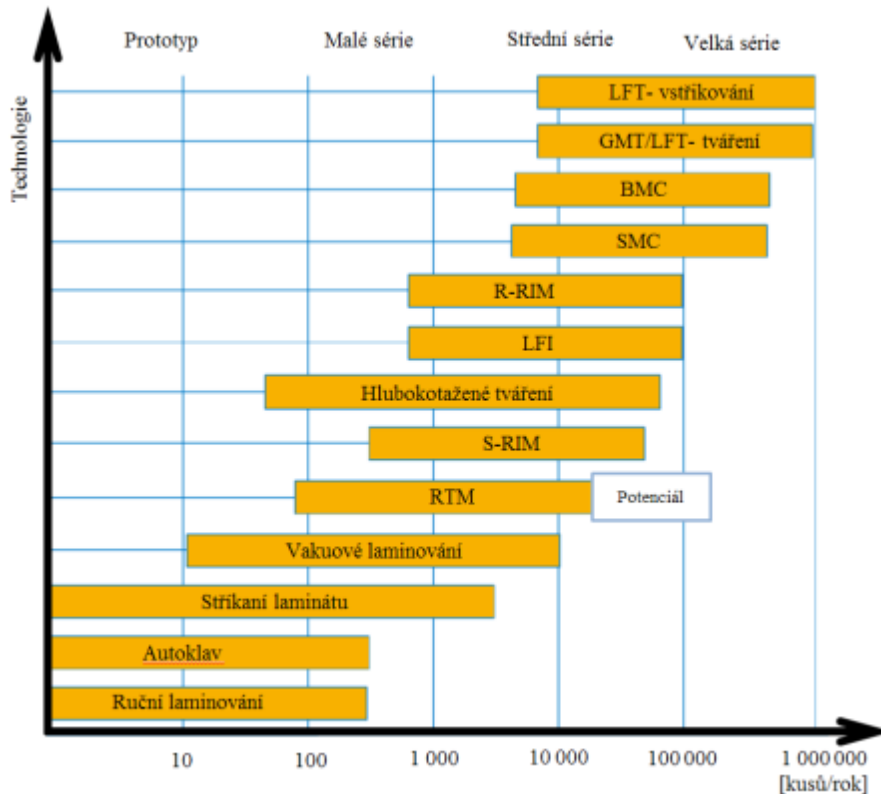
Teplotní hranice použití vyztužených plastů jsou určovány teplotou, při níž dochází ke značné ztrátě tuhosti matrice. Obvyklým způsobem stanovení této hranice je vyšetření závislosti modulu pružnosti na teplotě (Obr. 12). Zatímco modul vláken E_f se s teplotou v oblastech použití prakticky nemění, je u termosetů a termoplastů možný jeho pokles až o 3 řády. Ztráta tuhosti se váže na reverzibilní uvolnění fyzikálních vazeb, přičemž u termosetů chemické vazby zůstávají zachovány. [18]



Obr. 12. Závislost modulu pružnosti na teplotě

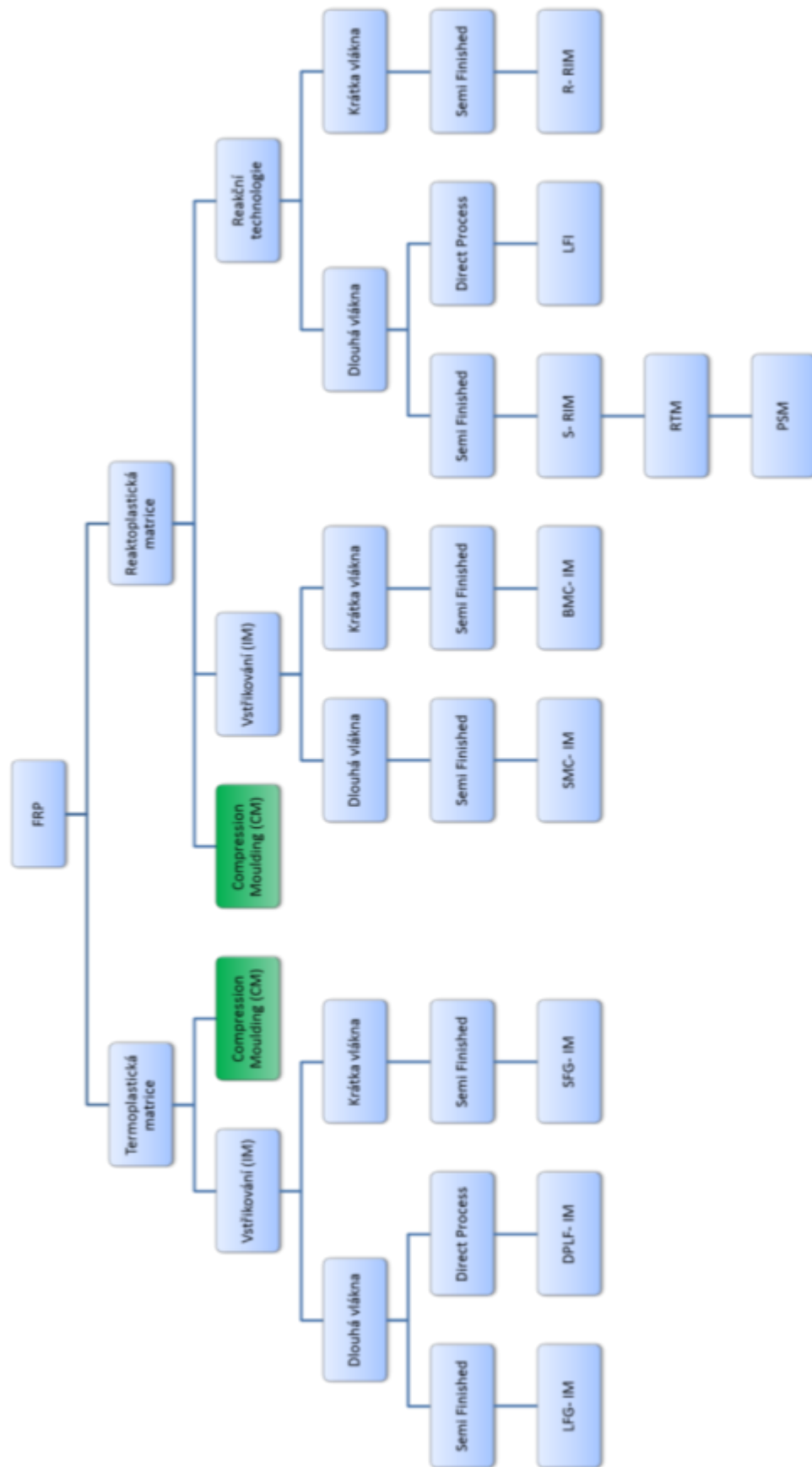
2.4 Přehled výrobních technologií vláknny vyztužených plastů (FRP)

Na Obr. 13 je přehled technologií a jejich možnosti využití podle počtu kusu za rok ve výrobě.



Obr. 13. Využití technologií ve výrobě

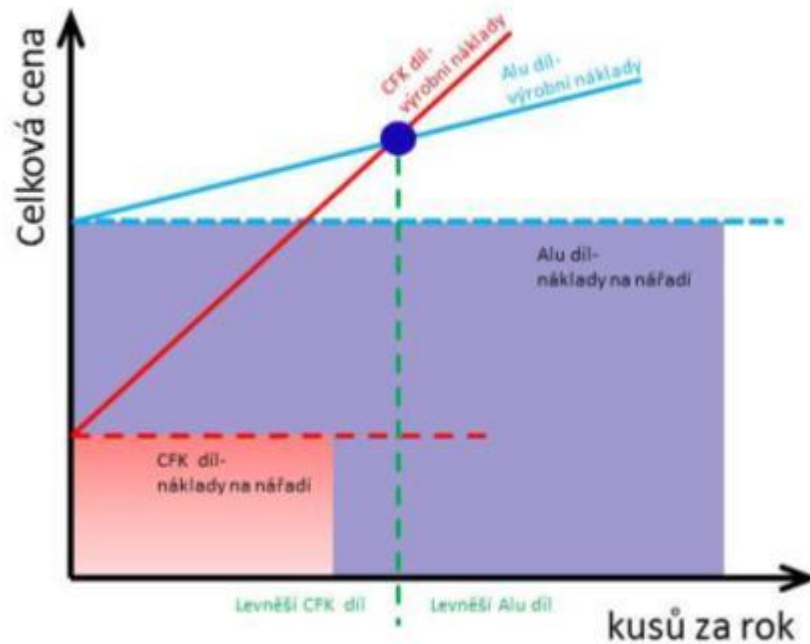
Na Obr. 14 je zobrazen aktuální přehled tykající se technologie výroby kompozitních výrobků. V přehledu kompozitních materiálu není zobrazena technologie lisování (CM) vzhledem k jeho omezení při výrobě složitých trojrozměrných částí automobilových součástí.



Obr. 14. Přehled výrobní procesů komp. materiálů

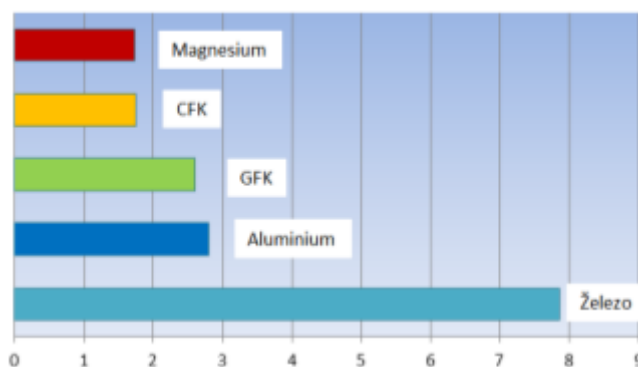
2.5 Náklady na CFK a Alu díl

Nalézt vhodnou výrobní technologii pro kompozitní materiály hraje důležitou úlohu. Trh nabízí mnoho různých technologií (Obr. 14), ale v dnešní době masová výroba kompozitních materiálů je stále v rané fázi. To je v podstatě proto, že procesní náklady představují dvě třetiny celkových výrobních nákladů (Obr. 15).



Obr. 15. Porovnání nákladů na CFK a Alu dílu

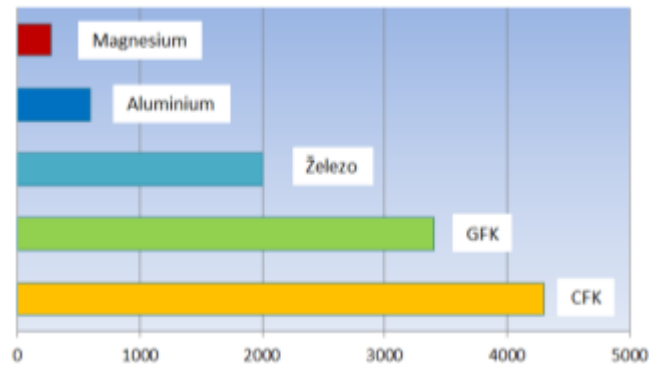
Po výrobních nákladech hraje důležitou roli váha dílu (Obr. 16).



Obr. 16. Porovnání hustoty různých materiálů

Pevnost kompozitního materiálu (Obr. 17) při ohybu je velmi silně závislá na vrstvení. U laminátu s jednoznačným směrem tahového namáhání, proto krajní vrstvy musí mít vlákna orientovaná ve směru tahového napětí. Velkou únosnost při ohybovém namáhání mají tzv.

sendvičové konstrukce, u nichž je mezi dvě laminátové desky vložena distanční vložka vytvořená například z pěnové hmoty, balzy, voštin nebo z distanční skleněné tkaniny. Modul pružnosti v ohybu u laminátu není shodný modulem pružnosti naměřeným při tahovém namáhání a pevnost v ohybu. [10, 12, 18, 19, 20]



Obr. 17. Porovnání pevnosti různých materiálů

Dobrým příkladem zavádění kompozitních materiálů v silniční dopravě je model BMW M3 (E90). Střecha vyrobená z uhlíkového kompozitu, zahájila u BMW novou éru v oblasti lehké konstrukce. Je to budoucího strategie BMW, která je nevyhnutelně spojena s kompozitními materiály pro nové modely jako jsou BMW i3 a i8 (Obr. 18).



Obr. 18. Karoserie BMW i8 z kompozitního materiálu

Hlavním problémem při použití kompozitních materiálů je snížení výrobních nákladů. Bez nových výrobních technologií, bude rozvoj projektů na bázi kompozitních materiálů pro OEM nerentabilní. Proto by jediným možným uplatnění kompozitů vyztužených uhlíkovým vláknem byly malé a střední série (střecha BMW M3 s epoxidovou matricí vyztuženou uhlíkovými vlákny se vyrobí v během patnácti minut metodou RTM. Ve

srovnání s manuální proces Lay-UP je těchto patnáct minut výrobního cyklu krátká doba, ale extrémně velká ve srovnání se vstřikováním termoplastů používaných v sériové výrobě).

2.6 Zhodnocení kompozitních materiálů

Obrovskou výhodou vláknových kompozitů je možnost měnit jejich elastické vlastnosti a pevnost změnou prostorového uspořádání výztuže, jejího druhu (roving, rohož, tkanina, atd.), poměrem mezi obsahem výztuže, pojiva a dále zvolenou výrobní technologií výroby. Použitím stejných základních komponent (vlákna, matrice) můžeme tedy efektivně vyrobit velkou škálu odlišných materiálů. Proto je tedy nutné znát alespoň základní vztahy dovolující kvantifikovat závislost modulu pružnosti kompozitů na obsahu výztuže, její prostorové orientaci a typu. Z výše uvedeného tedy vyplývá i široký rozsah pevnosti, která se pohybuje v rozmezí 250 – 900 MPa. Dále se kompozity vyznačují malou hmotností, nízkou tepelnou roztažností a tepelná odolnost závisí převážně na typu použité matrice. Obecně jsou kompozity dobře odolné vůči vodě, povětrnostním vlivům a většině chemikálií. Tato odolnost je opět nejvíce ovlivňována typem použité matrice. [32, 33]

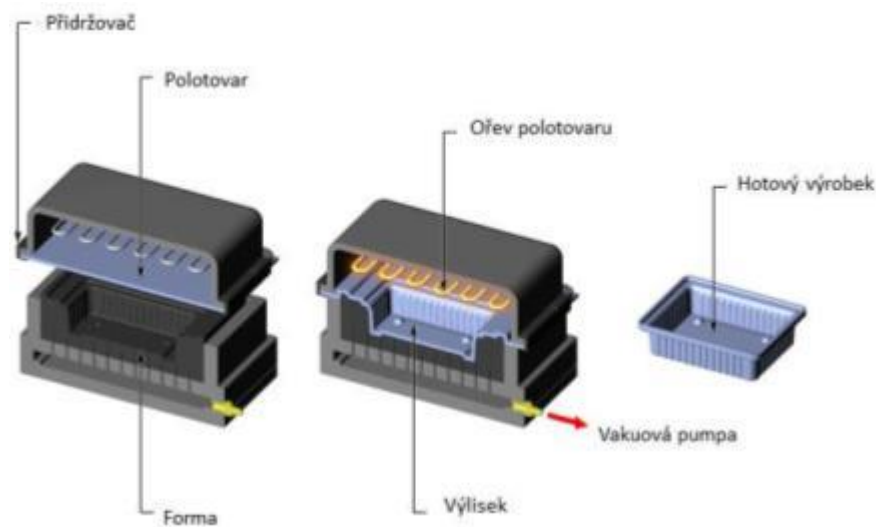
3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

3.1 Thermoforming- tváření

Tvarování je proces, kdy se termoplastický polotovar (folie, deska, ...) přehřeje na požadovanou teplotu tváření pomocí sálavého nebo jiného konvenčního tepla, potom je polotovar napnutý vložen do formy a následně vytvarován pomocí mechanické síly, tlaku vzduchu nebo podtlaku, kdy dojde k vytlisování i těch nejjemnějších tvarů

3.1.1 Vakuové tvarování

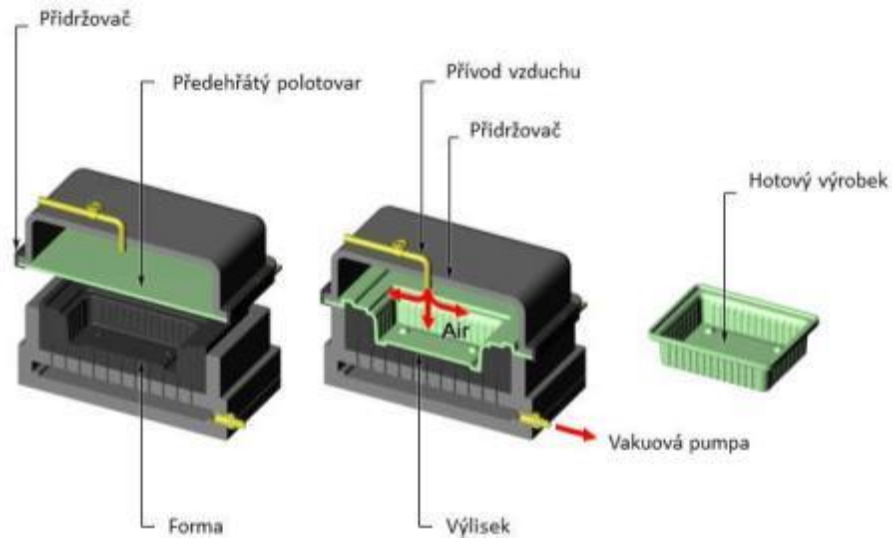
Vakuum se vytváří mezi dutinou formy a termoplastickým materiálem. Materiál se silou podtlaku přizpůsobuje tvaru formy a vytváří tak požadovaný tvar dílu. [31]



Obr. 19. Vakuové tváření [31]

3.1.2 Tlakové tváření

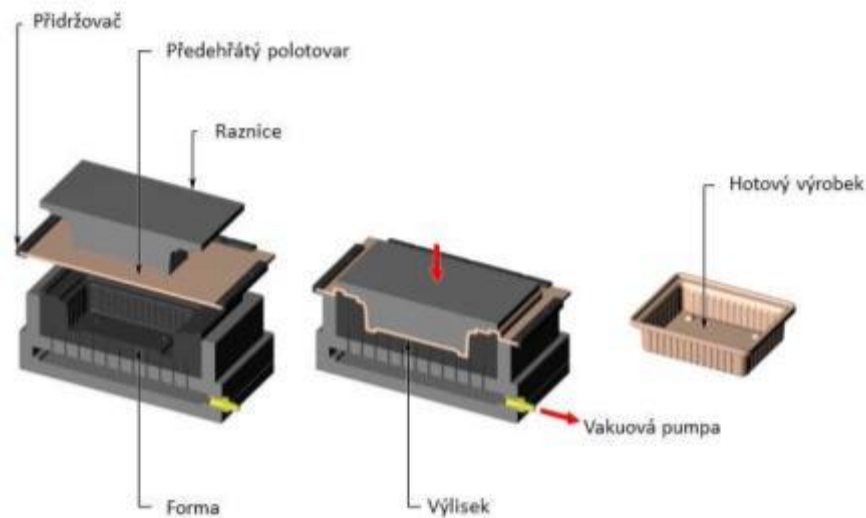
Je doplněním procesu vakuového tváření. Na zadní straně termoplastického materiálu je vyvíjen tlak, pod kterým se materiál tlačí do formy. Tlak je nutno v případě potřeby zvýšit, aby bylo možné za tepla tvářet i materiál o větší tloušťce a vytvářet drobné detaily a textury. [31]



Obr. 20. Tlakové tváření [31]

3.1.3 Mechanické tváření

Termoplastický materiál se mechanicky tlačí do formy přímým kontaktem. Zde se zcela vypouští používání tlaku vzduchu. K tlačení termoplastického materiálu do formy se používá raznice. [31]



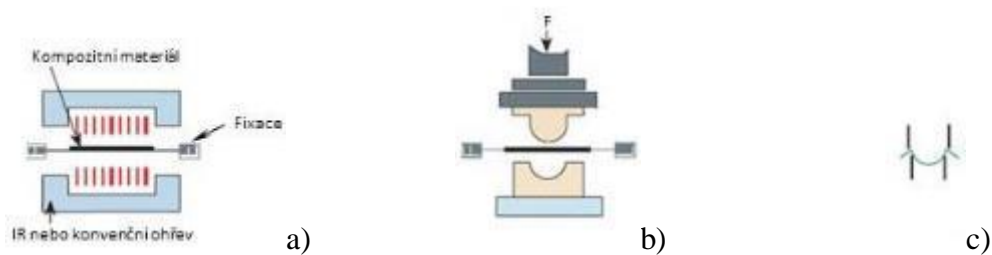
Obr. 21. Mechanické tváření [31]

3.1.4 Procesní kroky tváření

Tvarovací cyklus lze rozdělit do následujících procesních kroků:

1. Výroba polotovaru (rohož, prepregy apod.)
2. Upnutí polotovaru a ohřev (Obr. 22a)
3. Formování (Obr. 22b)

4. Ochlazení na vyhazovací teplotu a otevření formy
5. Dokončovací obrábění (čištění, děrování apod. (Obr. 22c))

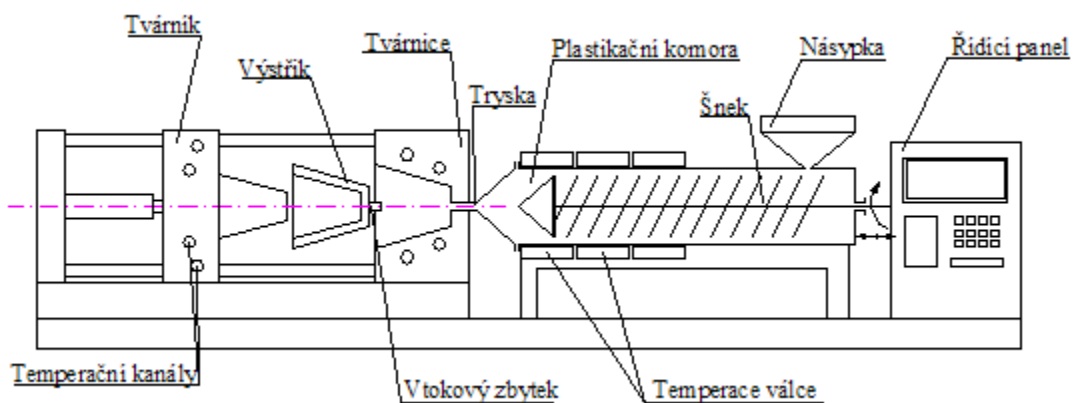


Obr. 22. Procesní kroky tváření

3.2 Vstřikování

Technologie vstřikování patří mezi nejrozšířenější a nejdůležitější způsobem výroby plastových (v poslední době také elastomerních) výrobků. Vyznačuje se složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a vstřikovací forma.

Vstřikování je způsob tváření plastu (ne tvarování), při kterém je zpracovávaný materiál z plastikační jednotky vstříknut do dutiny formy. Plastikační jednotka je součástí vstřikovacího stroje a vstřikovaný materiál se v ní stále během výrobního cyklu doplňuje. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností, dále umožňuje vyrábět výrobky velmi složitých tvarů pro a automobilový, letecký, elektrotechnický průmyslu aj. Jejich tvar může být velice složitý a hmotnost může činit třeba jen zlomky gramu, zatímco nejtěžší výrobky váží až několik desítek kilogramu. Vstřikovací proces probíhá na moderních strojích většinou plně automaticky ovládaných, takže se dosahuje vysoké produktivity práce. K přednostem vstřikování rovněž patří vysoké využití zpracovávaného materiálu, které se často blíží 100 %. Tím se splňují požadavky kladené na bezodpadovou technologii. Pořizovací cena strojního zařízení i vstřikovací formy je však značně vysoká. Technologie je proto vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu. [16, 17, 22]



Obr. 23. Schéma vstříkovacího stroje [16]

3.2.1 Vstříkování termoplastu

Vstříkováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastu. K nejčastěji vstříkovaným termoplastům patří styrenové plasty (ABS, SAN, PS), polyacetal (PA, POM, PC), polyolefiny (PP, PE) a jiné.

3.2.2 Vstříkování reaktoplastů

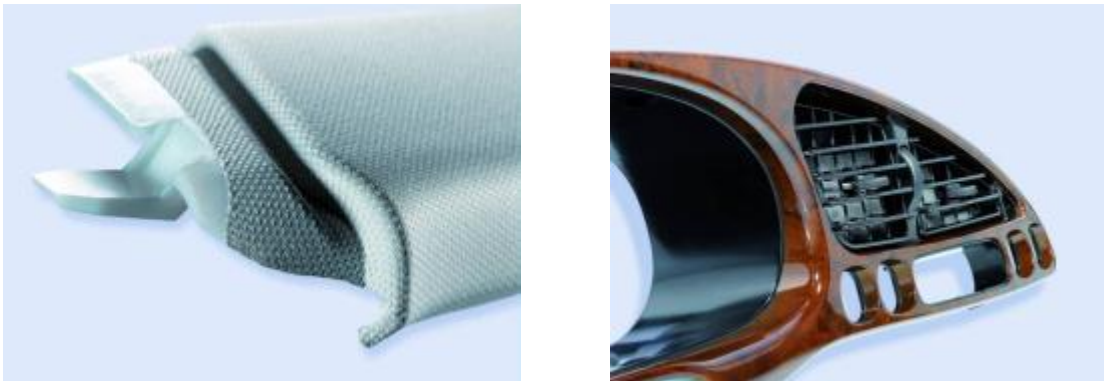
Vstříkováním se v současné době zpracovává asi 30 % reaktoplastů. Vstříkováním lze prakticky zpracovávat veškeré druhy reaktoplastů. Oproti lisování reaktoplastů má vstříkování tyto výhody:

- žádný technologický odpad
- přehřev hmoty
- dávkování, plastikace a vstříkování se uskutečňuje v jedné jednotce
- použití mnohem kratších vytvrzovacích časů
- automatizace

Hlavní rozdíl mezi zpracováním termoplastu a reaktoplastů spočívá jednak v rozdílné závislosti viskozity na teplotě a jednak v tom, že místo doby chlazení je zde doba vytvrzování. Forma je vyhřívána na vytvrzovací teplotu (dle druhu reaktoplastu na 150 až 190°C) a doba cyklu je v podstatě dána dobou vytvrzování. Kromě těchto rozdílů se liší hlavně šnek, který má potlačenou kompresní část, aby nedošlo k velkému smykovému namáhání a tím k předčasnému vytvrzení, dále musí troje vyvinout větší krouticí momenty a také jsou vyšší vstříkovací časy. [16, 17, 22]

3.2.3 Zastříkování polotovaru

Tato technologie umožňuje snížení pracovních operací a tím i výrobních nákladů. Zastříkování folii, tkanin, laminátu apod. je levnější variantou kašírování (Kašírování je trvalé spojení několika vrstev stejných nebo rozdílných materiálů, kterým se má vytvořit na povrchu ochranná nebo dekorativní vrstva a zlepšit užité vlastnosti).

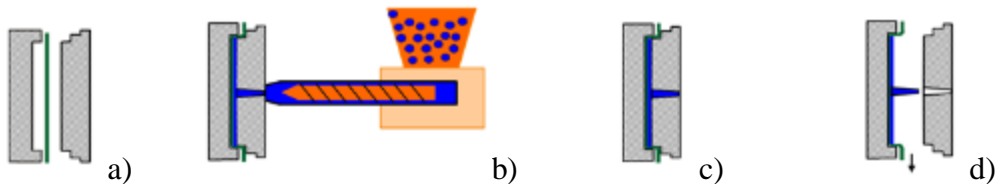


Obr. 24. Ukázky zastříkovaných dílů

3.2.4 Procesní kroky zastříkování

Cyklus zastříkování polotovaru lze rozdělit do následujících procesních kroků:

1. Výroba polotovaru (folii, tkanin apod.)
2. Doprava a upnutí polotovaru ve formě (Obr. 25a)
3. Uzavření formy a vstřikování polymeru (Obr. 25b)
4. Ochlazení na vyhazovací teplotu (Obr. 25c)
5. Otevření formy (Obr. 25d)
6. Dokončovací obrábění (odstranění vtokových zbytku, děrování apod.)



Obr. 25. Procesní kroky zastříkování

3.2.5 Výhody zastříkování

- Odpadá lepení
- Velmi dobrá přilnavost mezi nosičem a dekorativním materiálem
- Nižší počet výrobních operací
- Snížení nákladů zvýšením automatizace
- Zastříknuti dekorativních prvků
- Složité zdobené tvary a povrch
- Velmi flexibilní výměna dekoru

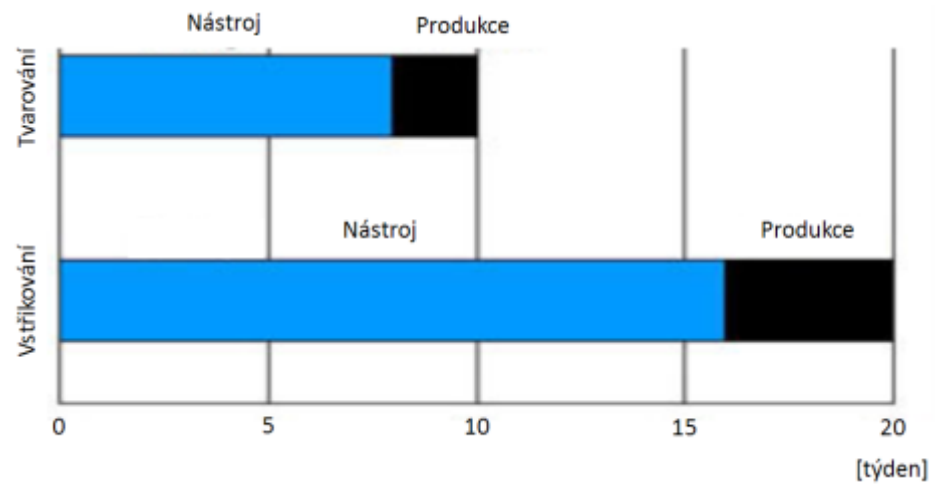
3.3 Zhodnocení technologie tvarování a vstříkování

Mnohé výrobky lze vyrábět tvarováním i vstříkáním. Při rozhodování, které technologii dát přednost, musíme problematiku zhodnotit s ohledem na velikost a složitost výrobku, tloušťku stěn, cenu stroje a nástroje, požadovanou přesnost a sériovost. Tvarování umožňuje výrobu předmětů o ploše až 10 m. Tloušťka stěny při tvarování je v podstatě libovolná (rozmezí 0,1 až 10 mm), kdežto u vstříkání je dána tokovými vlastnostmi použitého polymeru. Vstříkované výrobky mohou být tvarově velmi složité, s různou tloušťkou stěn s nálitky apod., což tvarování neumožňuje. Přesnost výstřiků je velmi vysoká.

Vstříkovací stroj zpracovává granulát, zatímco tvarovací zařízení desky nebo folie, které jsou podstatně dražší. Při tvarování je také větší odpad.

Cena vstříkovacího stroje i cena nástroje je 10 krát vyšší než tvarovacího (Obr. 26), přičemž vstříkání je až 4 krát energeticky náročnější. Tvarování je často jediná použitelná technologie při výrobě velkoplošných výrobků. Výrazně se prosazuje při hromadné výrobě tenkostěnných výrobků (kelímků, obalů aj.). Avšak i v této oblasti se začíná prosazovat vstříkání, zvláště při výrobě některých obalů pro potravinářské účely.

[16, 17, 22, 35]



Obr. 26. Cena vstřikovacího a tvarovacího stroje [35]

4 HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE

V automobilovém průmyslu se stále více využívají hybridní technologie (známé také jako kovy zastříkované polymerní matricí) pro hromadnou výrobu vysoce integrovaných konstrukčních dílů, které i při své nízké hmotnosti vydrží obrovské namáhání. Přední části karosérie mnoha různých automobilů jsou, například, vyrobeny kombinací ocelových plechů a polyamidu 6 zesíleného skleněnými vlákny.

Ve snaze o ještě větší rozšíření oblasti používání a výkonnostního potenciálu hybridní technologie se pracuje také na nahrazení ocelových a hliníkových plechů plechy vyrobenými z plastových kompozitů (Obr. 27). Tento polotovar obsahuje speciální vlákna uložená v matrici s danými směry orientace. Vlákna jsou vyrobena ze skla, Kevlaru nebo se jedná o uhlíková vlákna. Vhodnou termoplastickou matricí je polyamid, mezi jehož výhody patří ta skutečnost, že vykazuje dobrou přilnavost k vláknům.



Obr. 27. Výztužný příčnick

Výrobky vyrobené hybridní technologií jsou lehčí než stejné díly z ocelových plechů a nabízejí vyšší povrchovou tuhost a výrazně vyšší pevnost.

Možné využití lze najít nejen v „klasických“ hybridních dílech, ale především v takových dílech, u kterých se vyžaduje vysoká povrchová tuhost, např. přepážek motorového prostoru, podlahových dílů automobilů nebo opěr sedáků.

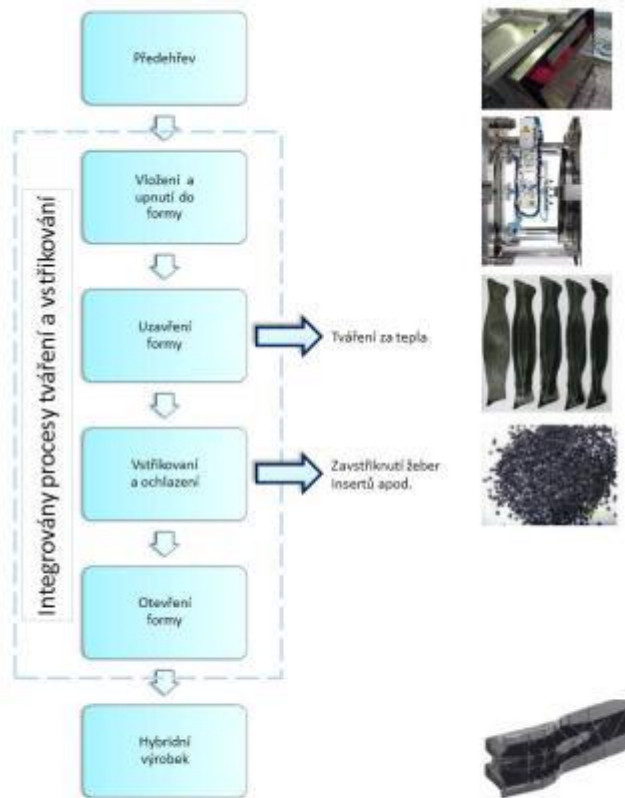
Zastříknutím polymeru daného dílu je možné také začlenit přídatné díly, např. zesílení, upínací body, vedení apod.

U hybridních polymerních dílů odpadá také ochrana proti korozi, která v případě dílů z ocelových plechů představuje dodatečné náklady.

Kompozitní materiály lze využít v různých oblastech i mimo automobilový průmysl. Zde patří, například, bezpečnostní přilby pro sportovce nebo brzdové páčky na jízdní kola. [33, 34, 35]

4.1 Procesní kroky hybridní technologie

Výrobní cyklus hybridní technologie, která je kombinací procesu tvarování za tepla a vstřikování, lze rozdělit do následujících procesních kroků:



Obr. 28. Procesní kroky hybridní technologie [34]

4.2 Zhodnocení hybridní technologie

Díky předehřátí kompozitního materiálu dochází k řádnému přilnutí materiálu k termoplastu po celé kontaktní ploše, čímž je zajištěna účinnost adhezivního spoje nebo svaru.

V porovnání s klasickou hybridní technologií (spojení s tvarovým stykem) zajišťuje tato nová technologie spojení materiálů dvou komponentů díky roztavení povrchu v průběhu zastříknutí. Tím se výrazně zvyšují hodnoty mechanických vlastností dílu jako celku. Formy pro tváření kompozitních materiálů za tepla vyžadují mnohem nižší investice než zápustky pro kovové materiály. Díky tomu se finančně vyplatí vyrábět hybridní díly z

kompozitního materiálu i v menších a středně velkých sériích. Hybridní díl je také výhodný z hlediska recyklace.

Výhody hybridní technologie:

- Malá hmotnost
- Vyšší pevnost a tuhost
- Vysoká absorpce energie (Crash)
- Pro nepohledové díly nejsou potřebné žádné dodatečné povrchové úpravy
- Krátký výrobní cyklus
- Hybridní proces je stabilní a reprodukovatelný
- Žádné investice do dalších nářadí (lisovací apod.)
- Žádná koroze
- Jednodušší recyklace

5 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část byla rozdělena na čtyři kapitoly. První dvě kapitoly popisují vlastnosti, rozdělení a použití nejčastěji používaných kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu. Třetí kapitola se věnuje výrobní technologii, které jsou základem pro návrh automobilového dílu vyráběného hybridní technologií. Čtvrtá kapitola se věnuje základům hybridní technologie, která je použita při návrhu dílu, jež se věnuje následující praktická část diplomové práce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V diplomové práci byly stanoveny následující cíle:

- 1) vypracovat literární studii na téma vlastnosti a rozdělení kompozitních materiálů (teoretická část)
- 2) hybridní technologie a její použití v automobilovém průmyslu (teoretická část)
- 3) návrh virtuálního 3D model dílu a jeho analýza
- 4) Diskuse výsledků
- 5) Závěr

V praktické části bude nejdříve vytvořen 3D model kompozitního dílce, kterým je těleso předního příčnicku do osobního automobilu, jenž je umístěn za předním nárazníkem. Následně bude pro tento díl provedená tvarová analýza vláken, jako je jejich napětí a deformace. Nakonec bude pro navrhovaný díl vytvořen 3D výkres celého navrhovaného dílu.

7 POUŽITÝ SOFTWARE

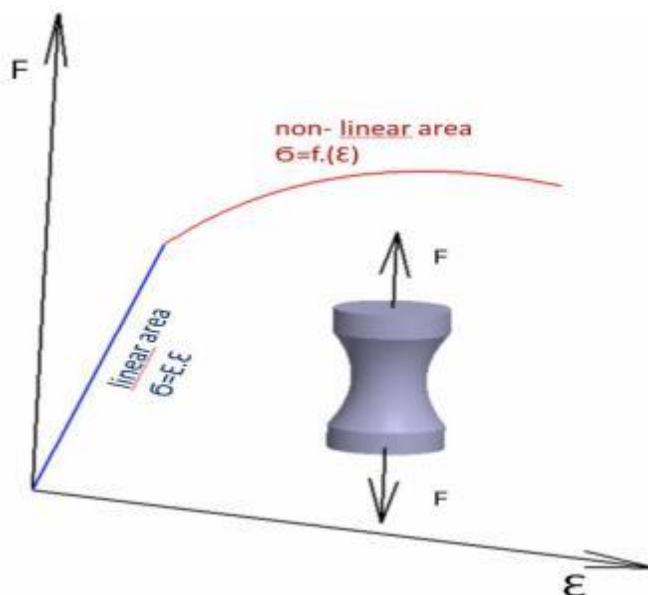
V průběhu práce byly využity tento software.

7.1 Catia V5 R21

Catia V5 zahrnuje vývoj celého výrobku v digitální podobě a integruje všechny fáze výrobního cyklu od zadání koncepce produktu, vývoje, konstrukce (CAD), analýzy (CAE) a výrobu (CAM). Řešení podporuje skutečnou spolupráci na technických úkolech v rámci všech oborů, včetně stylu a návrhu dílu, mechanického návrhu, digitální tvorby modelů, strojového obrábění, analýzy a simulací.

7.2 Abaqus CAE

Abaqus je určen pro statické a dynamické analýzy, kde se využívá nelineárních vlastností materiálu včetně plasticity a hyperelasticity, geometrických nelinearit – analýza velkých deformací a přetvoření (Obr. 23), velkých posuvů a rotací, analýz vlastních frekvencí i v závislosti na předpětí. Program pracuje i s nelineárními okrajovými podmínkami.



Obr. 29. Nelineární vlastnosti materiálu

8 KONSTRUKČNÍ NÁVRH DÍLU

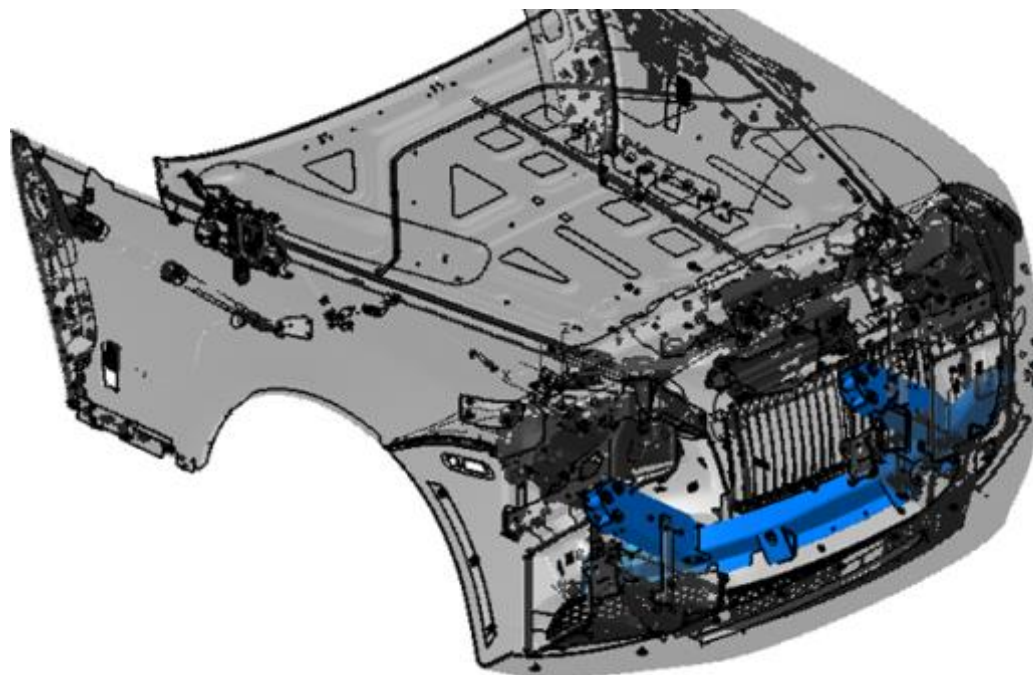
Konstrukční návrh výrobku je rozdělen na několik na sebe navazujících oblastí, které jsou popsány dále v jednotlivých kapitolách.

8.1 Technický popis dílu a jeho umístění

Daným dílem je výztužný příčník do osobního automobilu (Obr. 30) navržený a odzkoušený firmou BMW ve vývojovém středisku FIZ (Forschung und Innovation Zentrum). Výrobek je tvarově složitý a rozmanitý a je tvořen z jednoho kusu z vysoko pevnostního materiálu jakosti S6900QL, který je vyráběn technologií hydrodynamického tvarování. Na výrobek nejsou kladeny vzhledové požadavky, protože výztužný příčník je umístěn za předním nárazníkem automobilu (Obr. 31). Výrobek by měl odolávat běžným venkovním teplotám cca. -40°C až $+80^{\circ}\text{C}$ a koroznímu působení.



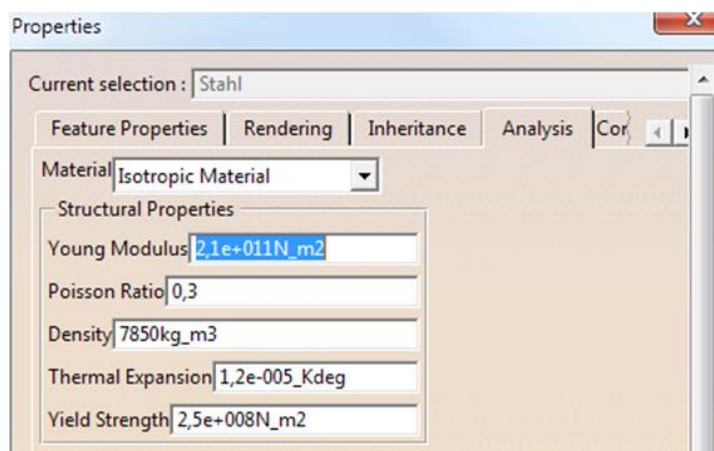
Obr. 30. Ocelový 3D model dílu



Obr. 31. Umístění dílu

Tab. 1 Rozměry dílu

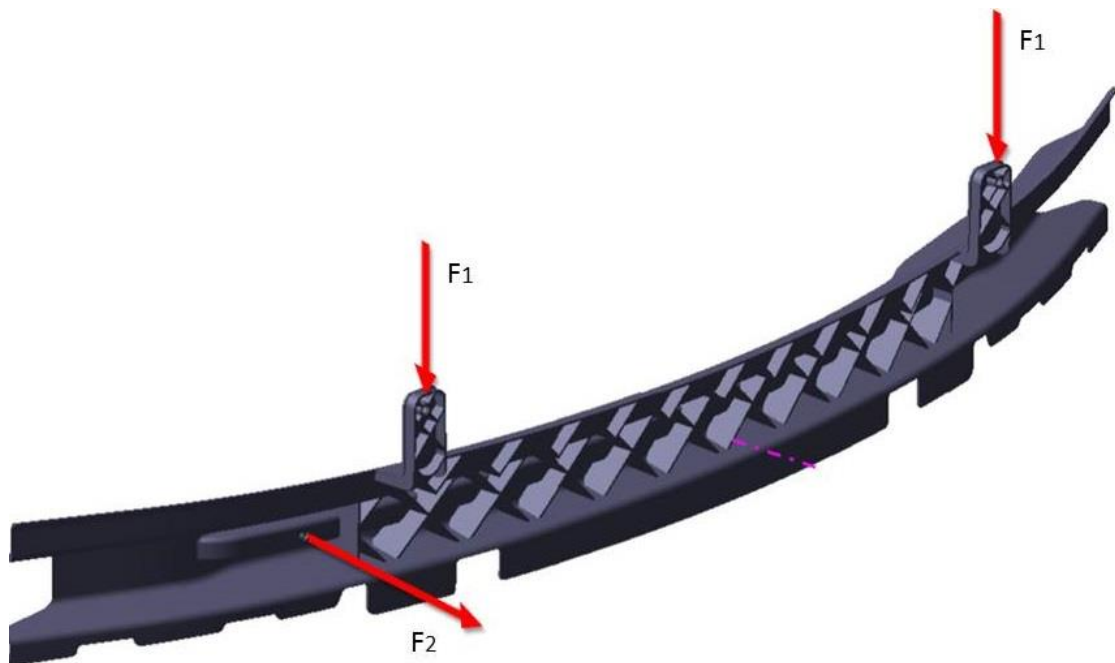
Rozměry (dxšxv)	[m]	1,448x0,194x0,127
Hmotnost	[kg]	5,298
Objem	[m ³]	0,001



Obr. 32. Mechanické vlastnosti dílu

8.1.1 Funkčnost

Na Obr. 33 jsou znázorněny zatěžující síly působící na přední příčník, které vznikají jeho funkčním určením. Tlaková síla F_1 udává celkovou váhu montovaných dílů, jako jsou přední maska, sestavy pro přívod vzduchu k motoru a pod. Tahové napětí F_2 vznikne jako důsledek simulace tažení zavěšeného předmětu (vozidlo, přívěs apod.) a její přenesení tohoto napětí do místa spojů předního příčníku a podélníků, kdy materiál musí odolat proti vytržení připevňovacího elementu.



Obr. 33. Zatížení nosníku

8.2 Konstrukční 3D návrh

Při konstrukci 3D modelu předního příčníku byly zohledněny definované požadavky a předběžný pevnostní výpočet. Dále bylo uvažováno nad ekonomičností případné výroby, a proto byl celý díl navržen tak, aby se minimalizovala technologická náročnost a tím i případné náklady na nástroj vstřikovací formy (např. minimalizace pohyblivých částí vstřikovací formy, nutnost použití insertů, následné opracování apod.). Po rozboru koncepce celého řešení výrobku bylo určeno, že se přední příčník bude skládat z jednoho originálního dílu a skupiny normovaných montážních prvků. Celý základní díl byl navržen s ohledem na výrobní technologii, v tomto případě hybridní technologii- vstřikování a Thermoforming.

8.3 Volba materiálu

Pro volbu materiálů předního příčnicku je kladen velký důraz na splnění požadavků, jako je pevnost a tuhost, minimální výsledná hmotnost, cena výrobku. Také důležitým hlediskem je nabídka používaných materiálu výrobcem.

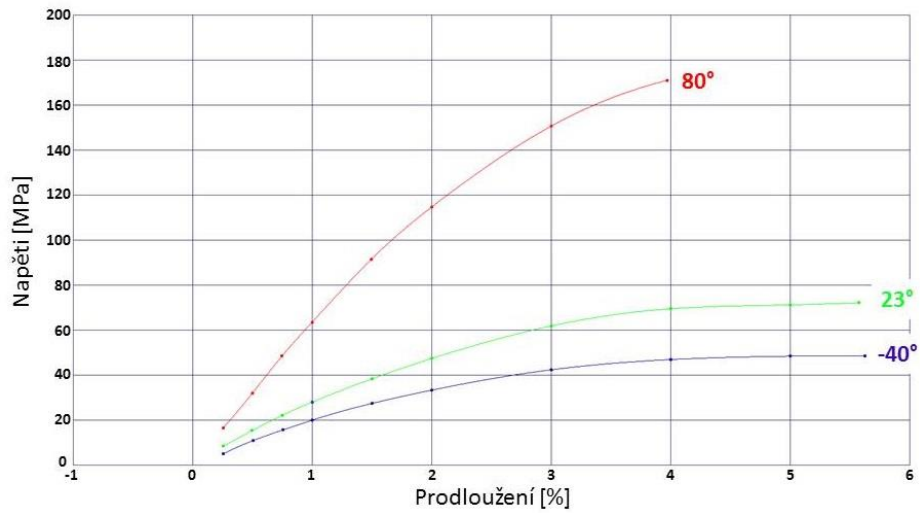
8.3.1 Matrice a materiál pro výztužná žebra

Po zvážení všech kritérií byl vybrán materiál Polyamid (PA6- Polykaprolaktam), který patří k osvědčeným konstrukčním polymerům. Konstrukční vlastnosti PA 6 lze zlepšit přidávkem krátkých skleněných vláken v množství od 15 % do 50%. Nejčastěji se používá PA se 30% vláken, jeho pevnost v tahu je asi 130 MPa a modul pružnosti $E = 7000$ až 9000 MPa. Jsou to hodnoty odpovídající suchému PA. Skleněné vlákno však zhoršuje houževnatost i otěruvzdornost, tvarová stálost se však zvyšuje až na 200°C . [13]

Tab. 2. Vlastnosti PA6 GF14

	PA6 GF14
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,13
Modul pružnosti v tahu [MPa]	38 - 40
Rázová houževnatost [kJm^{-2}]	16 - 20
Teplotní odolnost [$^{\circ}\text{C}$]	140 - 180
Navlhavost [hmot. %]	11

Na Obr. 34. jsou vykresleny křivky napětí při třech různých teplotách, která budou následně použita při CAE simulacích.



Obr. 34. Zátěžové křivky PA6 GF14 při rozdílných teplotách

8.3.2 Uhlíková tkanina s termoplastickou maticí

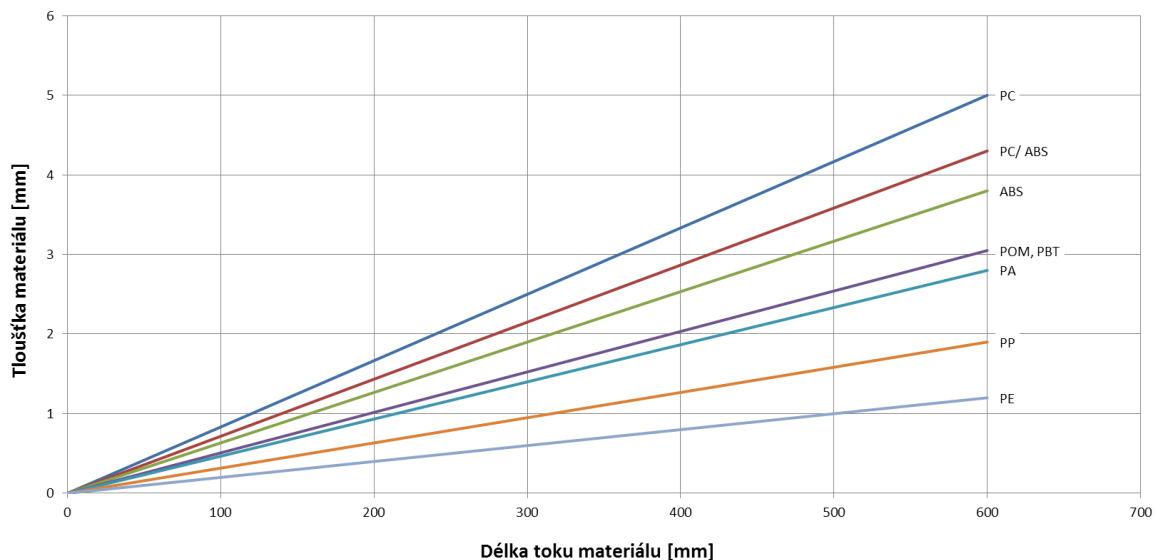
Byl zvolen uhlíkový materiál, který je jednosměrně orientován a je velmi vhodný pro automatickou výrobu.

Tab. 3. Vlastnosti uhlíkové tkaniny

Cena za m ² [\$]	9,2495
Hustota [g.cm ⁻³]	1,75
Napětí v tahu σ_{11} [N*mm ⁻²]	1500
Napětí v tahu σ_{22} [N*mm ⁻²]	100
E modul E_{11} [N*mm ⁻²]	150 000
E modul E_{22} [N*mm ⁻²]	10 000
Poměrná deformace ε_{11} [%]	1,0
Poměrná deformace ε_{11} [%]	1,0
Poissonovo číslo	0,4

8.4 Volba tloušťka stěny

Tloušťka stěny musí zajistit nejlepší pevnost a tuhost spolu s minimální hmotností. Poměr tloušťky stěny k délce toku (Obr. 35) je velmi důležitá a závisí na použitém materiálu (vyhneme se tak nebezpečí např. tvorby studených spojů apod.).



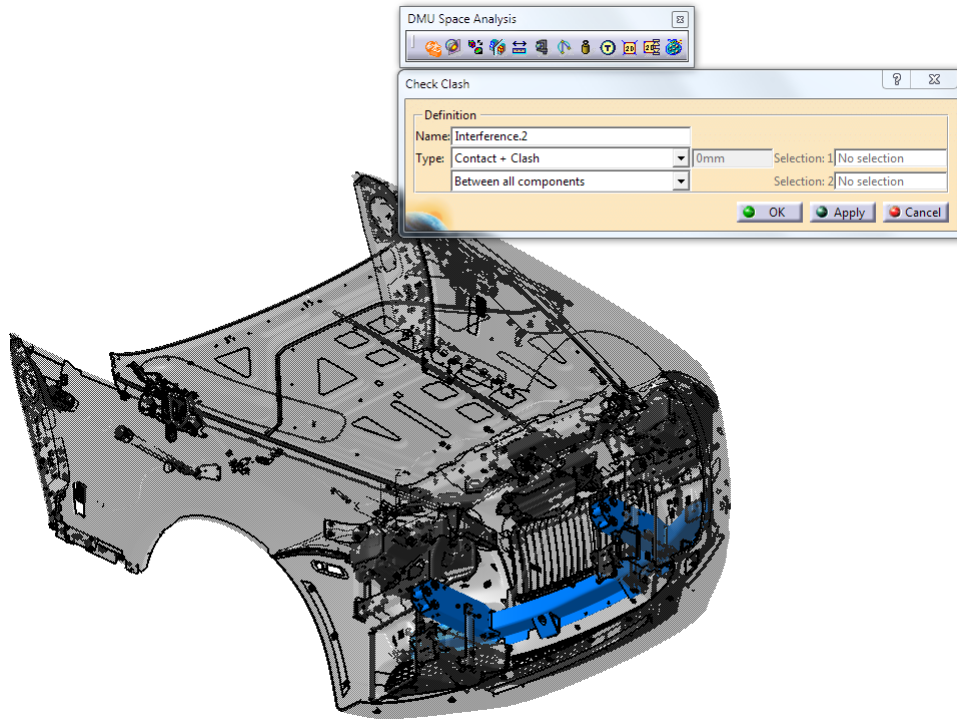
Obr. 35. Tloušťka stěny vs. délka toku

Z důvodu velikosti dílu byla zvolena celková tloušťka dílu 3mm. Dalším a velmi důležitým důvodem bylo zadání, že požadovaná celková úspora by neměla být menší než 90g. Také klíčovou roli hraje zkušenosti s vývojem takto tlustých výrobku, kdy standartně se používá při navrhování polymerních dílu v automobilovém průmyslu tloušťka materiálu 2-3 mm. Dále byly brány v úvahu technologické možnosti výrobce (např. typ a velikost stroje) a zkušenosti s výrobou tlustostěnného výrobku.

8.5 Strukturální kolizní analýza

Důležitou součástí každého nového vývojového procesu je kolizní analýza jednotlivých dílu s okolními díly. V našem případě, a jak je znázorněno v kapitole 8.2. (Obr. 31), je nový hybridní díl umístěn v přední části automobilu s vysokou hustotou součástek. Proto je nutné provádět kolizní analýzy pravidelně v celém průběhu vývoje za pomoci modulu Catia V5 Space Analysis.

Tento nástroj (Obr. 36) je schopen zkontrolovat všechny kolizní stavy a vygenerovat protokol ve formátu „.xml“.



Obr. 36. Space Analysis v Catia V5

Dalším důležitým faktorem je kontrola vůlí, kdy BMW vyžaduje minimální vzdálenosti mezi všemi komponenty 5mm, které musí být zohledňována už při samotném vývoji dílu. Při nedodržení dané tolerance se zobrazí daná analýza jako neúspěšná (Obr. 37).

Definition

Name: Interference.2

Type: Clearance + Contact + Clash 5mm Selection: 1|1 product

Between two selections Selection: 2|2 products

Results

Number of interferences: 127 (Clash:67, Contact:30, Clearance:30)

Filter list: All types No filter on value All statuses

No.	Product 1	Shap...	Product 2	Shap...	Type	Value	Status	Comment
1	VERBINDUNG OBEN HINTEN	I 1 A FRGMOD SP 0	SPREIZNET	K 1 A FRGMOD CA 0	Clash	-6,93	Irrelevant	
2	VERBINDUNG OBEN HINTEN	I 1 A FRGMOD SP 0	SPREIZNET	K 1 A FRGMOD CA 0	Clash	-6,93	Irrelevant	
3	LI VERTIKALVERBINDUNG	E 1 A FRGMOD SP 0	LI LUFTFUEHRUNG BREMSE	G 1 A FRGMOD SP 0	Clearance	3,33	Relevant	
4	LI VERTIKALVERBINDUNG	E 1 A FRGMOD SP 0	LINSENSCHRAUBE MIT FEDERSCHEIBE	B 1 A FRGMOD SP 0	Clash	-7,04	Irrelevant	
5	LI VERTIKALVERBINDUNG	E 1 A FRGMOD SP 0	RE LUFTFUEHRUNG BREMSE	G 1 A FRGMOD SP 0	Clearance	3,33	Relevant	
6	LI VERTIKALVERBINDUNG	E 1 A FRGMOD SP 0	LINSENSCHRAUBE MIT FEDERSCHEIBE	B 1 A FRGMOD SP 0	Clash	-7,04	Irrelevant	
7	LI CRASHBOX UNTEN	Q 1 A FRGMOD SP 0	LI LUFTFUEHRUNG BREMSE	G 1 A FRGMOD SP 0	Contact	0	Irrelevant	
8	LI CRASHBOX UNTEN	Q 1 A FRGMOD SP 0	LINSENSCHRAUBE MIT FEDERSCHEIBE	B 1 A FRGMOD SP 0	Clash	-6,91	Irrelevant	
9	LI CRASHBOX UNTEN	Q 1 A FRGMOD SP 0	RE LUFTFUEHRUNG BREMSE	G 1 A FRGMOD SP 0	Contact	0	Irrelevant	
10	LI CRASHBOX UNTEN	Q 1 A FRGMOD SP 0	LINSENSCHRAUBE MIT FEDERSCHEIBE	B 1 A FRGMOD SP 0	Clash	-6,91	Irrelevant	
11	LI ADAPTERPLATTE VAT	O 1 A FRGMOD SP 0	RE LUFTFUEHRUNG BREMSE	G 1 A FRGMOD SP 0	Clearance	3,26	Relevant	
12	LI ADAPTERPLATTE VAT	O 1 A FRGMOD SP 0	LI LUFTFUEHRUNG BREMSE	G 1 A FRGMOD SP 0	Clearance	3,26	Relevant	

Buttons: Deselect, More >>, OK, Apply, Cancel

Obr. 37. Space Analysis v Catia V5

8.6 Tvarová analýza vláken

8.6.1 Postup řešení úlohy FEA- Composites Modeler

Pro potřebu analýz bylo nejdříve potřeba upravit 3D data (Obr. 38), kdy úprava dat spočívá v odstranění žeber, zaoblení, prolisů a otvorů (Obr. 39), které nemají vliv na samotný výpočtový model.



Obr. 38. 3D model před úpravou



Obr. 39. 3D model po úpravě

Dalším krokem bylo importování 3D modelu v neutrálním formátu „.stp“ a následně se importovaný model musí popsat výpočtovou sítí. Při návrhu výpočtové sítě platí zde několik zásad:

- výpočet je o to náročnější (delší průběh výpočtu), čím více rovnic je v rámci matematického modelu do výpočtu zahrnuto (podle náročnosti a komplexnosti modelu)
- výpočet je o to náročnější, čím více má výpočtová oblast buněk
- výpočet je o to náročnější, čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti
- počet buněk patří k hlavním limitujícím faktorů současného matematického modelování

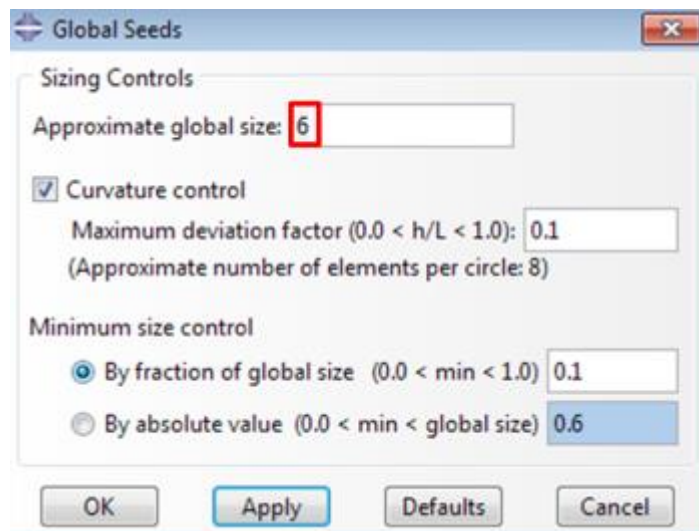
V zájmu přesnosti matematické simulace je nutné provést tomu odpovídající nastavení matematického modelu. Do různých modelovaných fyzikálních jevů mohou svým vlivem zasahovat mnohé jevy další. Toto všechno je třeba v nastavení zohlednit. Ovšem s každým

dalším vlivem vstupujícím do výpočtu přibývají také další rovnice, které matematický model musí řešit. Proto se mohou i při stejně definované výpočtové oblasti i síti časy výpočtu u různých úloh značně lišit.

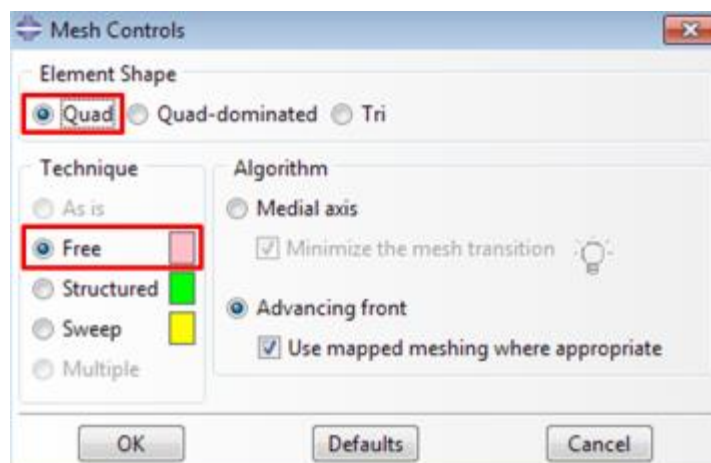
Síťování bylo provedeno v programu Abaqus CAE, kde byl zvolena globální velikost „6“ konečně prvkových elementů (Obr. 40) a čtyř prvková síť s volnými hranami (Obr. 41), v důsledku, že jde o 3D Shell model. Po výpočtu síť následovala kontrola kvality síť, která se posuzuje podle:

- velikosti buněk (s ohledem na modelovaný děj a požadavek na přesnost výpočtu)
- vhodnosti uspořádání buněk v prostoru (např. zhuštění v místech zajímavých z hlediska daného výpočtu) s ohledem na konkrétní typ úlohy.

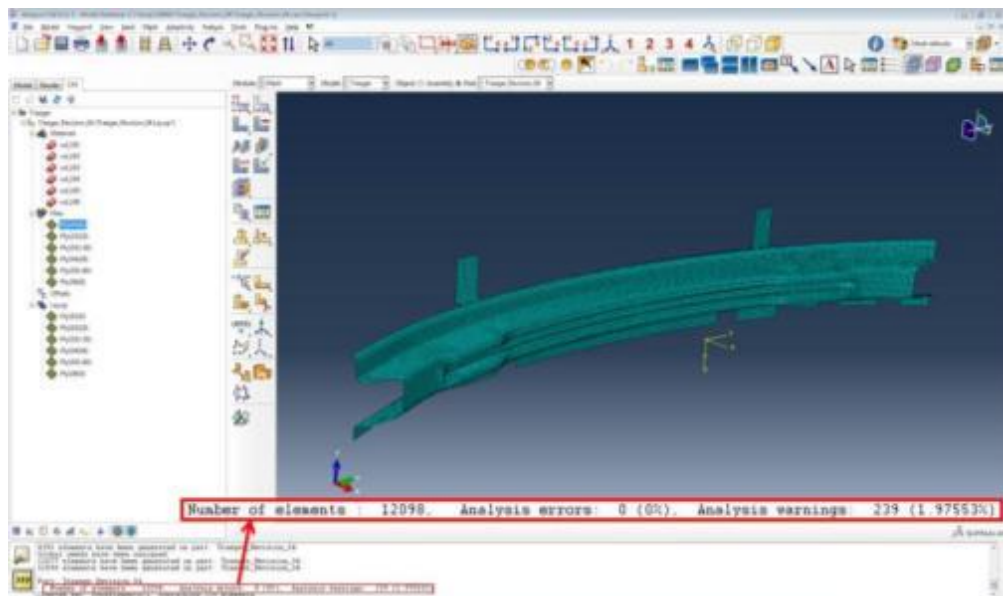
Výsledek kvality síť je vidět na Obr. 42, kdy síť měla okolo 12000 elementu s eventuální chybovosti 1,97%.



Obr. 40. Velikost elementů



Obr. 41. Typ sítě

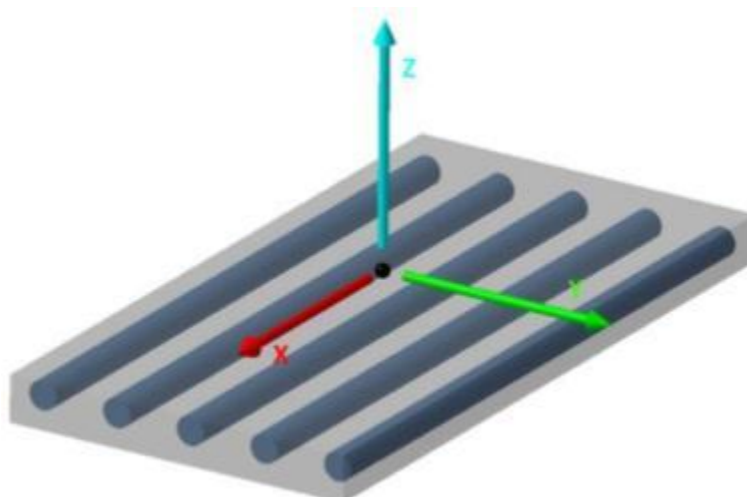


Obr. 42. Kontrola kvality sítě

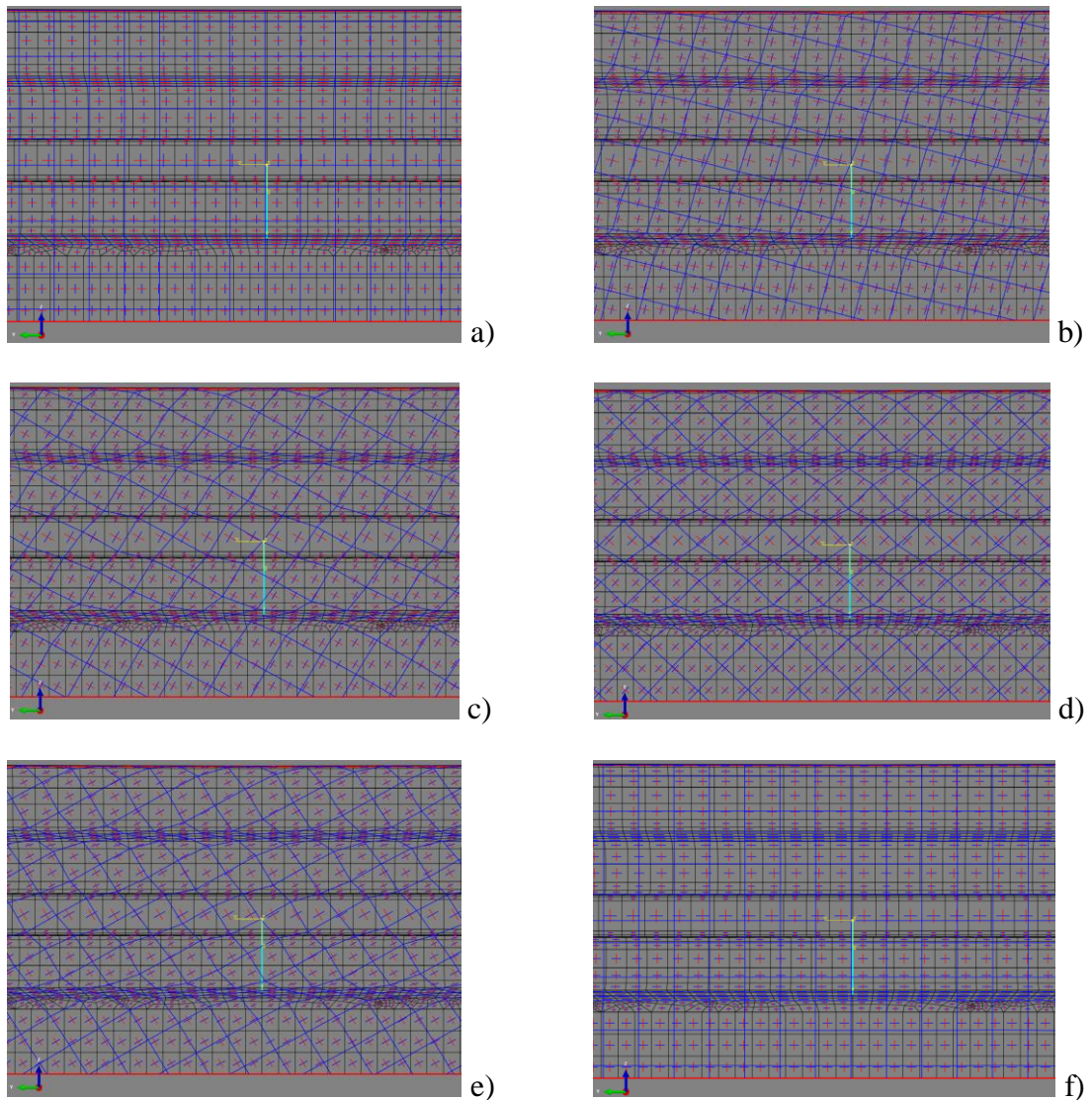
8.6.2 Volba koordinačního systému a referenčního bodu

Musíme zadat materiálové vlastnosti (Obr. 45) v námi definovaném souřadnicovém systému, kdy „Lamina“ je určena rovinou „XY“ a směr „X“ odpovídá směru vláken. Tento souřadnicový systém nám dále také definuje směr tloušťky materiálu a referenční směr pro námi definované úhly vláken (Obr. 43).

Námi navržený počet vrstev je 6 s orientací 0° , 15° , 30° , 45° , 60° a 90° (Obr. 44), kdy dané vrstvy jsou naskládány jednotlivě za sebou rovnoměrně přes celý díl. Počet vrstev a jejich orientace se může průběžně měnit podle tvarových, mechanických a technologických analýz.



Obr. 43. Souřadnicový systém



Obr. 44. Směr natočení vláken

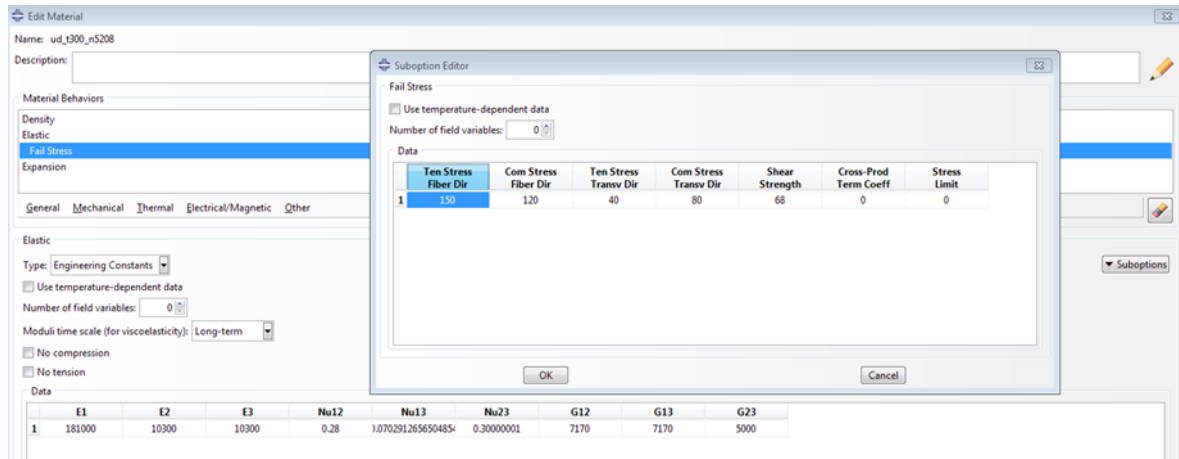
a) 0°, b) 15°, c) 30°, d) 45°, e) 60°, f) 90°

Lineární elastický materiál je definován pro elastické deformace (obvykle méně než 5%), kdy materiál je izotropní, ortotropní nebo zcela anizotropní a může mít vlastnosti, které jsou závislé na teplotě a dalších proměnných.

Definice lineárního elastického chování materiálu je:

$$\sigma = D^{el} \cdot \varepsilon^{el} \quad [6]$$

Pokud by elastické deformace byly větší, je nutné použít hyperplastický model.



Obr. 45. Definice materiálu v programu Abaqus

8.6.3 Porušení vláken

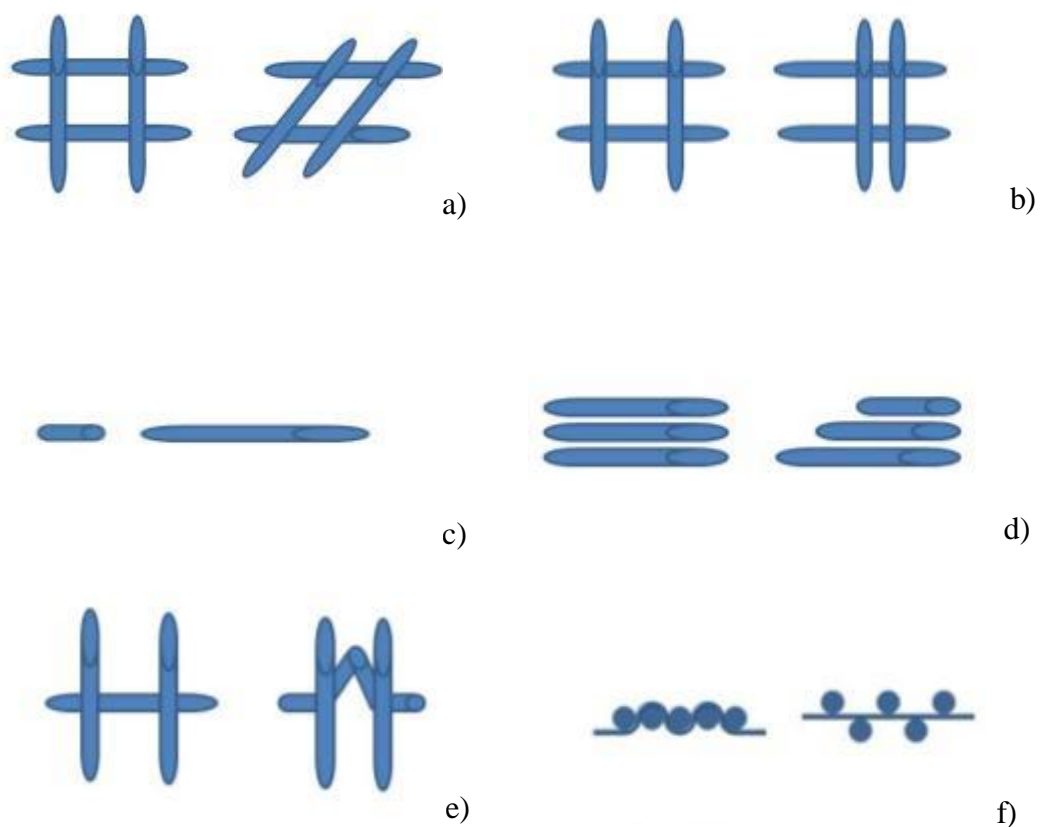
Máme čtyři způsoby porušení vláken:

- porušení vlákna při tahovém namáhání
- porušení vlákna- vzpěr a ohyb při tlakovém namáhání
- porušení matrice- příčný tah a střih
- porušení matrice- příčný tlak a střih

8.6.4 Druhy deformaci tkanin

Ve všech vrstvách tkaniny důsledkem tvarování vzniká smyková nebo biaxiální namáhání. Biaxiální namáhání je namáhání ve dvou na sebe vzájemně kolmých směrech. Probíhá-li zatěžování v hlavních osách symetrie, dochází k deformaci v obou směrech. Jeho vliv se projeví výrazně v případě namáhání v jiných než hlavních směrech materiálu. Abychom odstranili smykové namáhání tkaniny, museli bychom měnit orientaci vláken až do okamžiku souhlasné orientace vláken s působícími silami nebo do okamžiku dosažení maximálního střížného úhlu, tzv. „locking angle, která závisí na struktuře vlákna.

Tato napětí ovlivňují uspořádání vláken, pórovitost a propustnost a také mechanické vlastnosti kompozitů. Charakteristické uložení vláken způsobuje místní deformační efekty (Obr. 45).

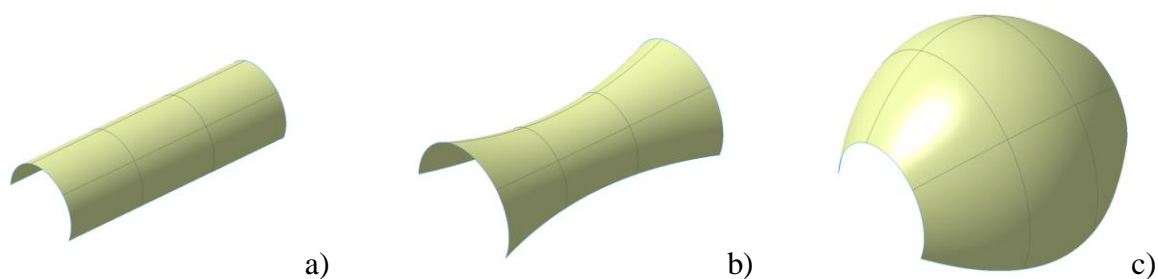


Obr. 46. Deformace tkaniny

a) Shearing, b) Slipping, c) Stretching, d) Inter Slipping e) Wrinkling, f) Straightening

8.6.5 Napětí a deformace vláken

Tkaniny kopírují povrch 3D modelu postupně, kdy jednotlivé vrstvy střídají křivosti od 0 (Obr. 46a) přes konvexní (Obr. 46b) až po konkávní (Obr. 46c).



Obr. 47. Druhy křivosti

a) nulová křivost, b) konvexní, c) konkávní




Protože tkanina musí kopírovat svým tvarem navržený díl, tak se mění její vlastnosti v průběhu celé struktury.

Největší vliv na vlákna, tkaniny nebo prepregy má biaxiální namáhání (vícesměnné). Tato napětí nám způsobují nejen deformace tkanin a prepregu, ale můžou vest i k porušení dílu během své životnosti.

Na obrázcích vidíte namáhání jednotlivých vrstev kompozitní struktury, které jsou postupně orientovány od 0° (svisle uložení osnovy), 15° , 30° , 45° ; 60° a 90° (vodorovné) otáčeny proti směru hodinových ručiček.

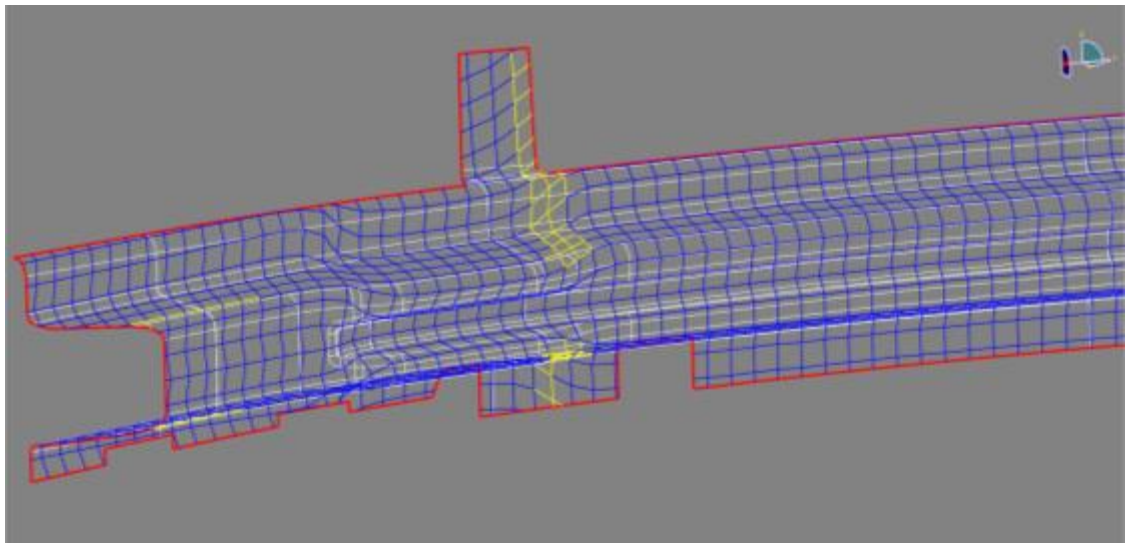
Místa, kde vznikají největší napětí a možné důsledky jsou znázorněny na obrázcích 43.

Legenda znázorňuje procentuálně namáhání vláken:

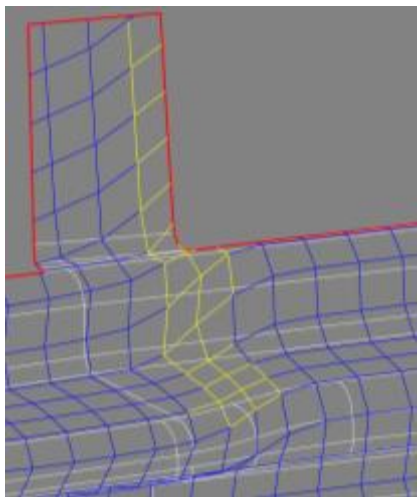
-  < 50% maximálního napětí
-  50- 100% maximálního napětí
-  > 100% maximálního napětí

Směr vláken je rovnoběžný s koordinačním systémem XY. Z tohoto důvodu je křivost modelu rovnoběžná s hlavním směrem zakřivení, kde proto vznikají pouze malé smykové napětí (Obr. 47 a, b). Od těchto smykových napětí nám to může způsobit na krajích deformace typu Inter Slipping (Obr. 47c).

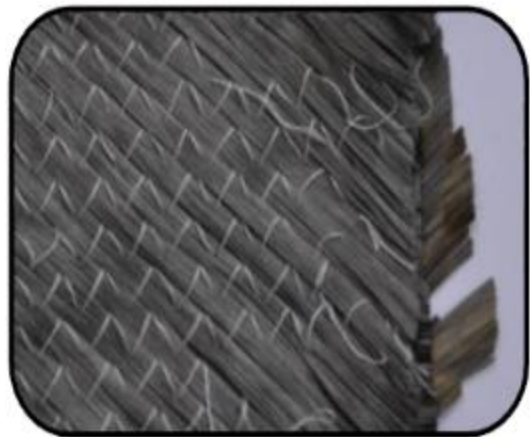
Se zvětšujícím se úhlem natočení vláken a také se zvětšujícím se poloměrem zakřivení ve směru „Z“ a také s náhlým přechodem křivosti s konkávního na konvexní a naopak se nám začínají zvětšovat smyková napětí ve vláknech, která mají za následek jednotlivé deformace (Obr. 48c, 49c, 50c, 51c) nebo kombinací jednotlivých deformací, které mohou mít za následek buď nevyrobitelného dílu nebo kvalitativně nevyhovujícího nebo může dojít až k jeho poškození při používání.



a)

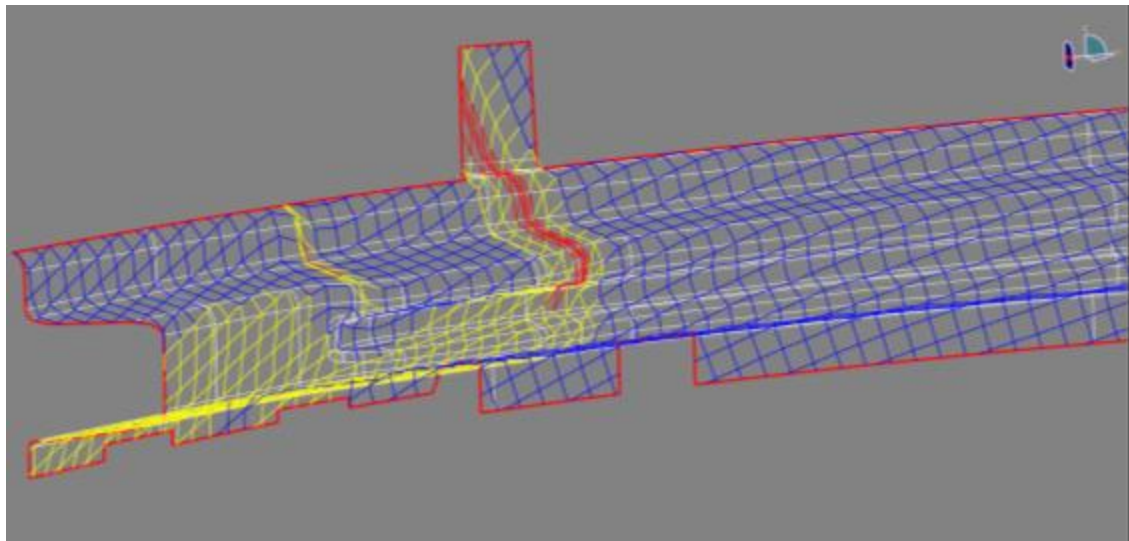


b)

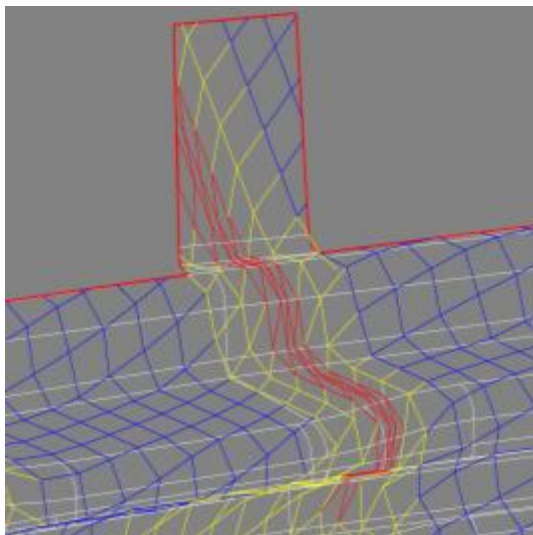


c)

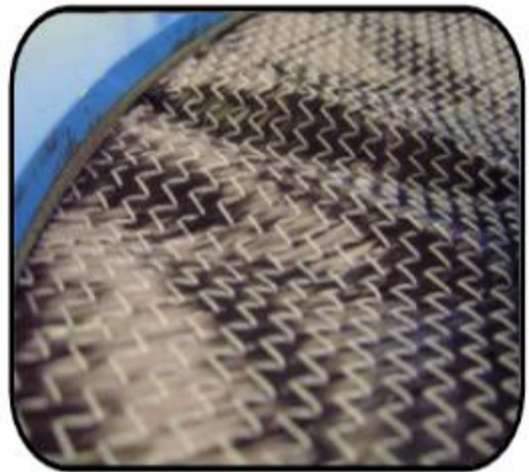
Obr. 48. Napětí ve vláknech a deformace- 0° natočení



a)

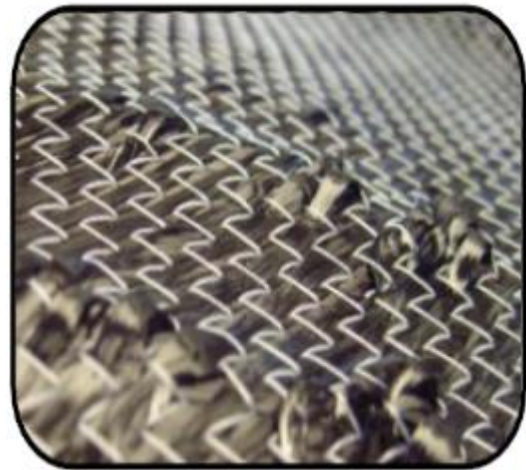
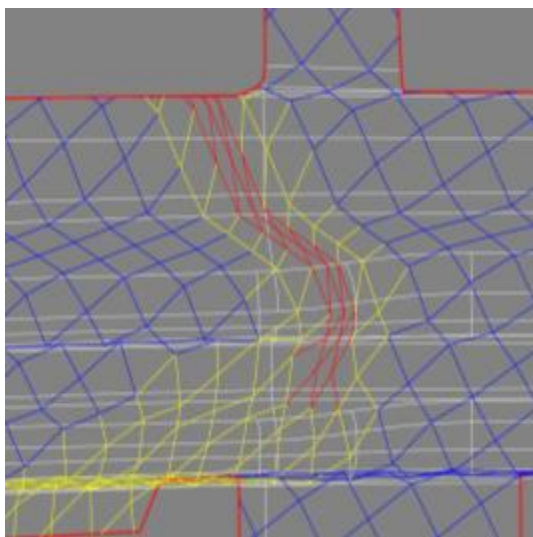
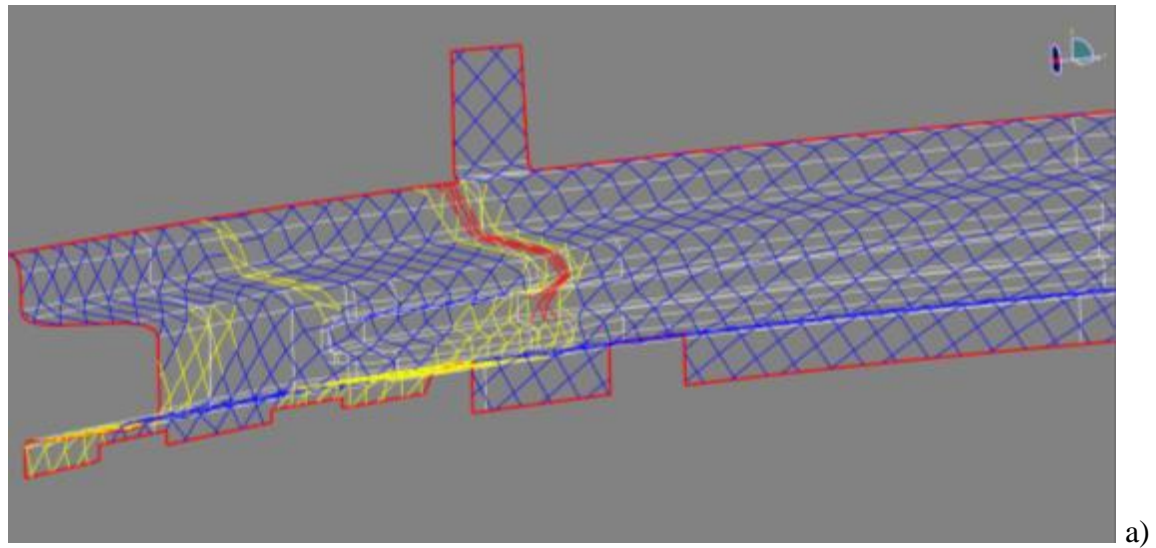


b)

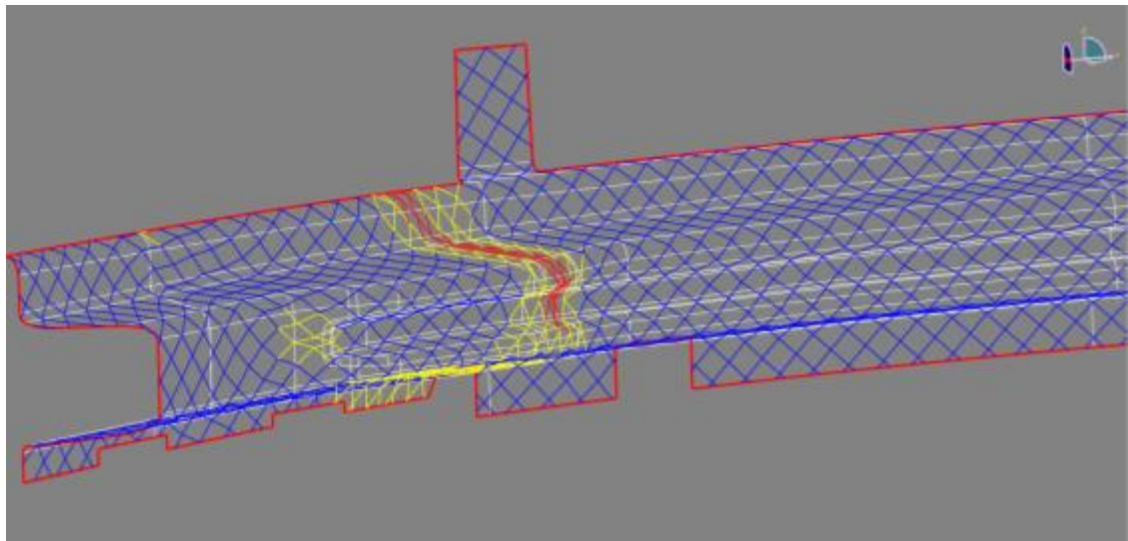


c)

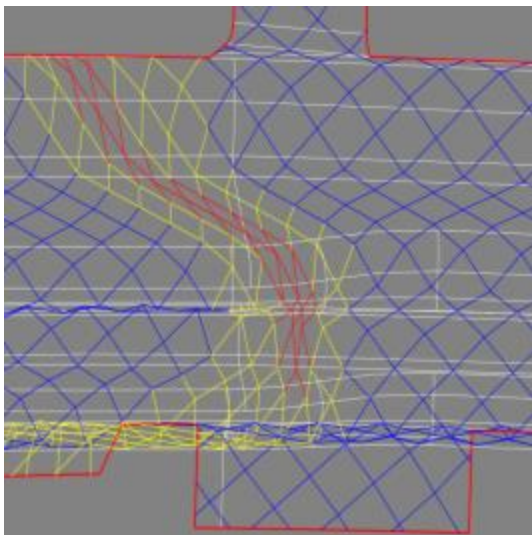
Obr. 49. Napětí ve vláknech a deformace- 15° natočení



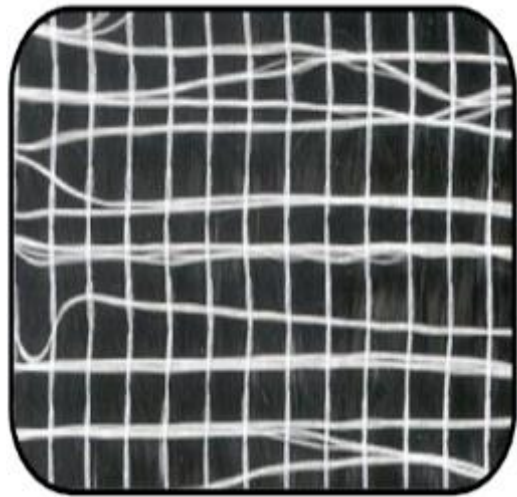
Obr. 50. Napětí ve vláknech a deformace- 30° natočení



a)

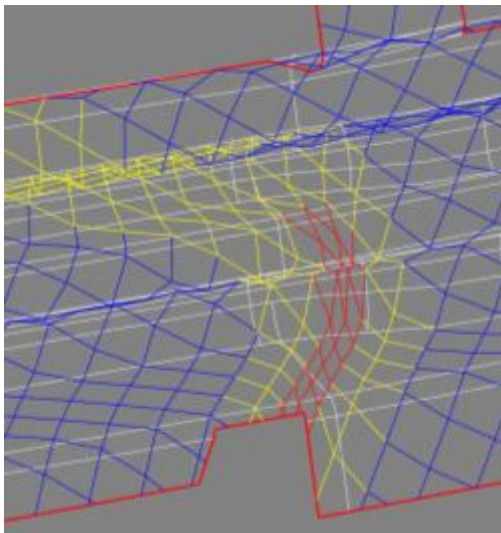
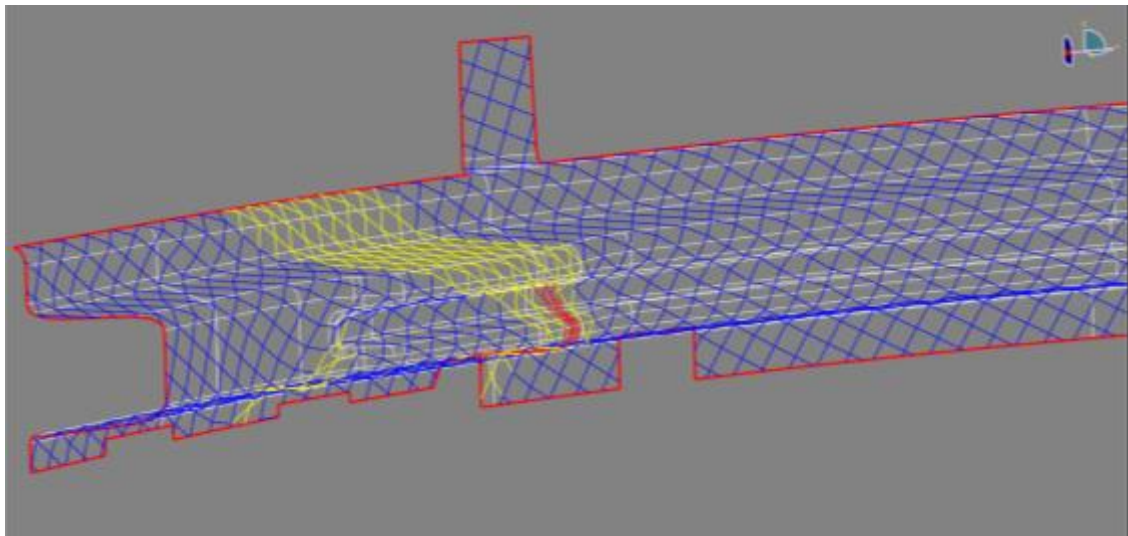


b)



c)

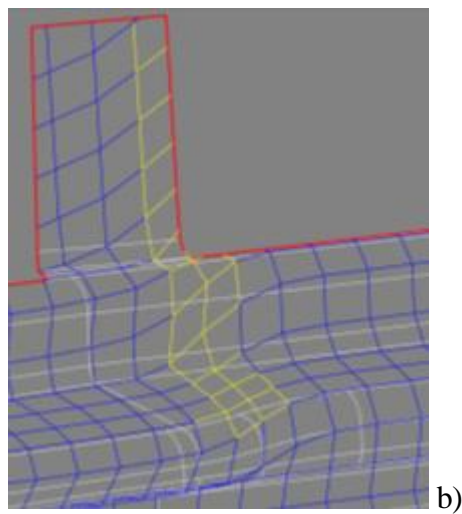
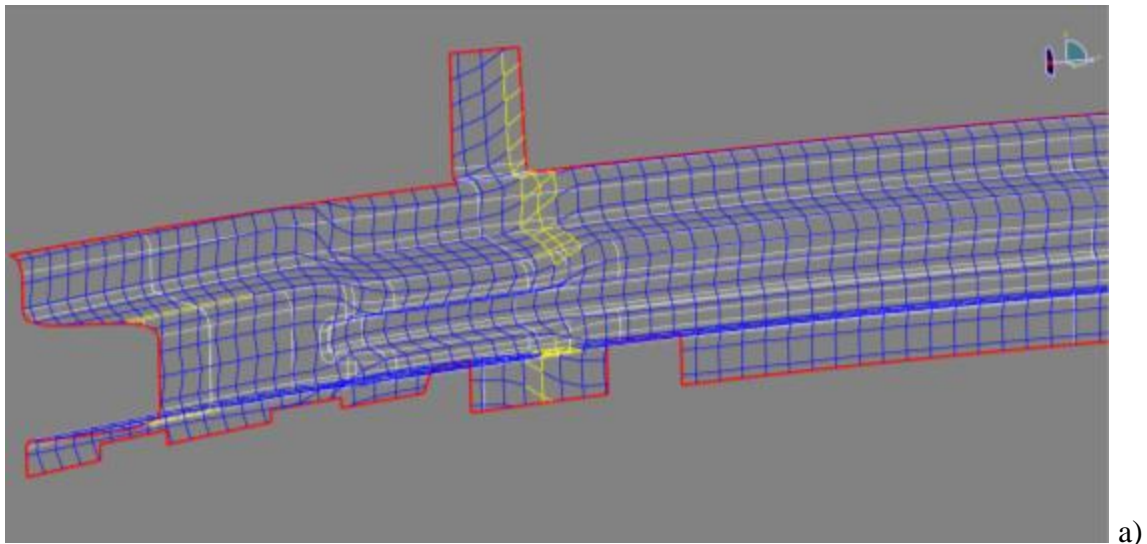
Obr. 51. Napětí ve vláknech a deformace- 45° natočení



c)

Obr. 52. Napětí ve vláknech a deformace- 60° natočení

V tomto případě (Obr. 53 a, b) má poloměr zakřivení modelu směr vláken, a proto se nám zde vyskytují mále deformace a smyková napětí.

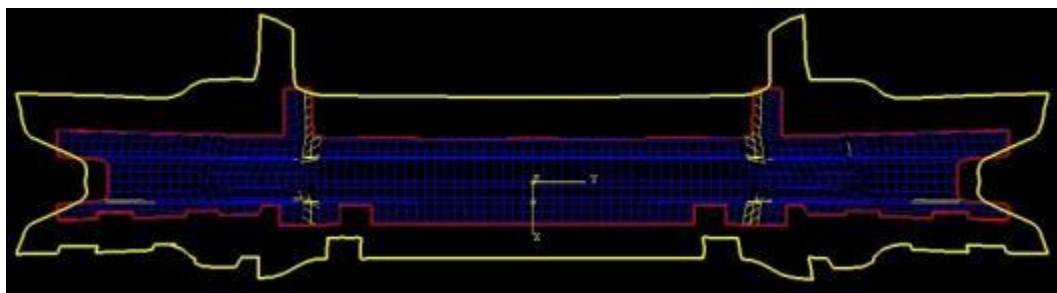


Obr. 53. Napětí ve vláknech a deformace- 90°natočení

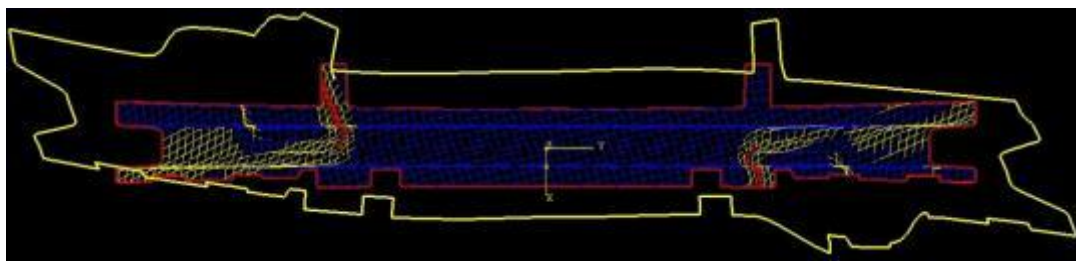
8.6.6 Rozvinutý tvar dílu- Flat Pattern

Pomocí funkce Flat Pattern byly z modelu vygenerovány rozvinuty tvar jednotlivých vrstev dílce, kde je patrné, že pro každou jednotlivou vrstvu je nutné udělat jiný nástřihový

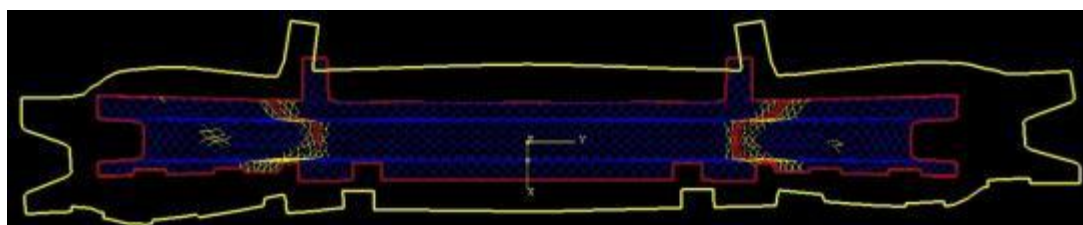
plán. Vygenerovány soubory do formátu *. dxf usnadňuje export do jiných aplikací, kdy je použita jako šablona například pro software na programování laserového řezání nebo dělení materiálu vodním paprskem.



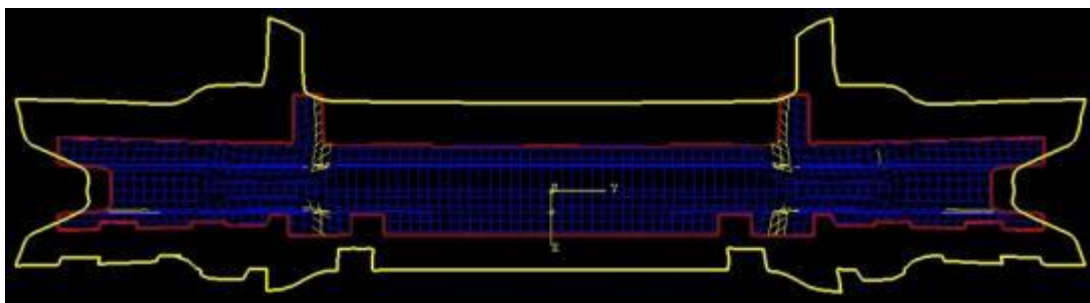
Obr. 54. Rozvinutý tvar prepregu- 0°natočení



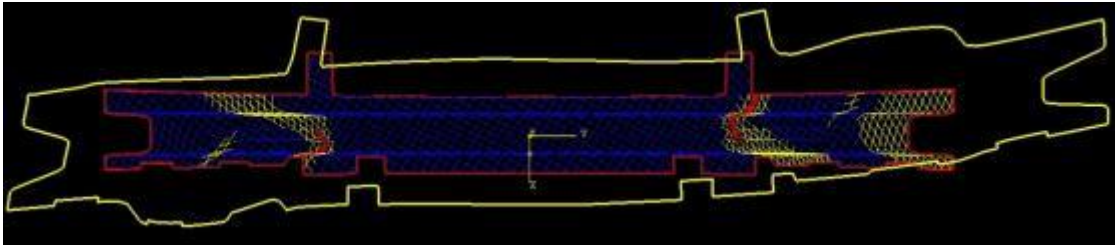
Obr. 55. Rozvinutý tvar prepregu- 15°natočení



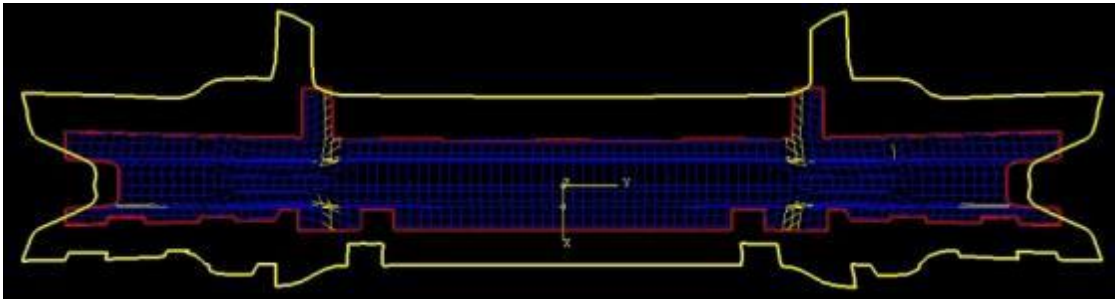
Obr. 56. Rozvinutý tvar prepregu- 30°natočení



Obr. 57. Rozvinutý tvar prepregu- 45°natočení



Obr. 58. Rozvinutý tvar prepregu- 60°natočení



Obr. 59. Rozvinutý tvar prepregu- 90°natočení

8.7 Výhody kompozitního dílu

Výhody kompozitního dílu jsou popsány v následujících odstavcích:

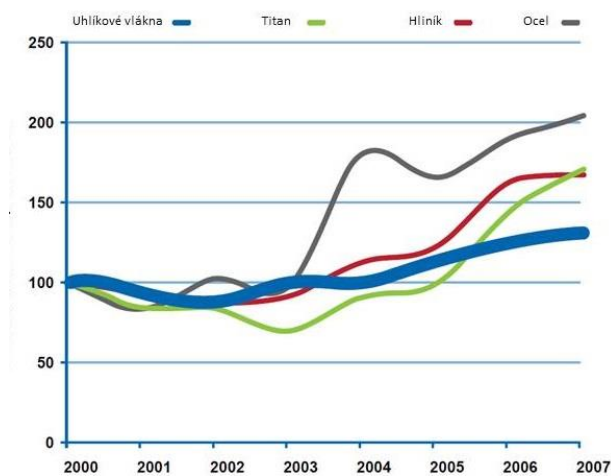
- trvanlivost (vysoká odolnost proti korozi a únavě materiálu)
- nízká hmotnost
- vysoká pevnost
- nižší nebo srovnatelné náklady na údržbu po dobu životnosti
- vysoce kvalitní výrobní proces v kontrolovaném prostředí
- nízká hmotnost (váha na m³)
- není nutné barvení po vstřikování (vysoká škála barev)
- viscoelasticita (high elastic range at deformation)
- elektrické izolační vlastnosti
- zaformování více dílu
- nízká cena za objem požitého materiálu
- nízká výrobní cena vstřikovaného dílce
- není nutné dodatečného opracování
- není nutná dodatečná povrchová úprava
- vyztužení je možné jen na potřebných místech
- vysoká korozní odolnost

8.8 Nevýhody kompozitního dílu

- nízký E- Modul
- teplotní citlivost
- zaformování insertů

8.9 Cena použitého materiálu

8.9.1 Cena použitého materiálu původního dílu



Obr. 60. Cena oceli na světových trzích

H_d - Hmotnost dílu = 7,85 kg

C_o - Cena vysoko pevnostní oceli S690QL za 1kg= 1,619 \$

Celková cena dílu= $H_d * C_o = 7,85 * 1,619 = 12,71$ \$

Celková cena použitého materiálu je 12,71 \$ za díl.

8.9.2 Cena použitého materiálu navrženého dílu

P_d - Plocha dílu= 0,351 m²

O_d - Objem dílu = 0,001 m³

C_k - Cena karbonového prepregu za 1m²= 9,25 \$

Z- Počet vrstev prepregu= 6

t- Tloušťka prepregu= 406 μm

C_{PA} - Cena PA6GF14 za 1kg= 2-4\$

C_k - Cena použitého karbonu= $(P_d * Z) * C_k = (0,351 * 6) * 9,25 = 19,48$ \$

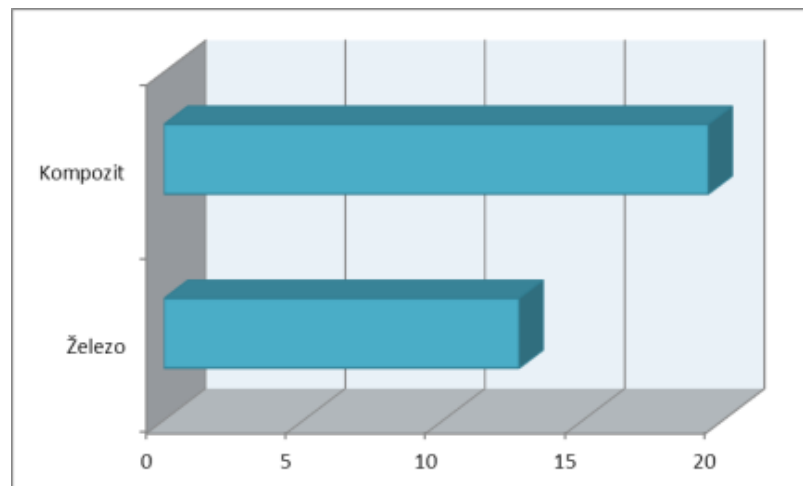
C_p - Cena použitého PA6GF14 = $(O_d - (P_d * t * Z)) * 2 = 0.001 - (0.351 * 0.00406 * 6) \approx 0,002$ \$

Celková cena dílu = $C_k + C_p = 19.48 + 0.002 = 19,48$ \$

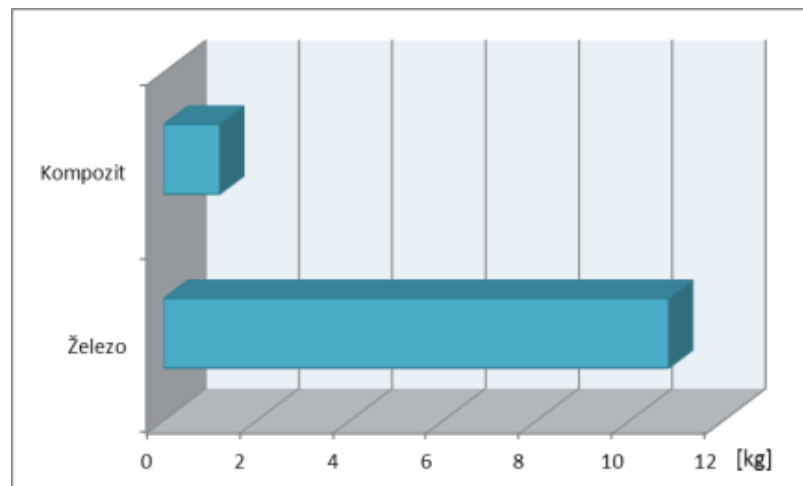
Celková cena použitého materiálu je 19,5 \$ za díl.

8.10 Zhodnocení

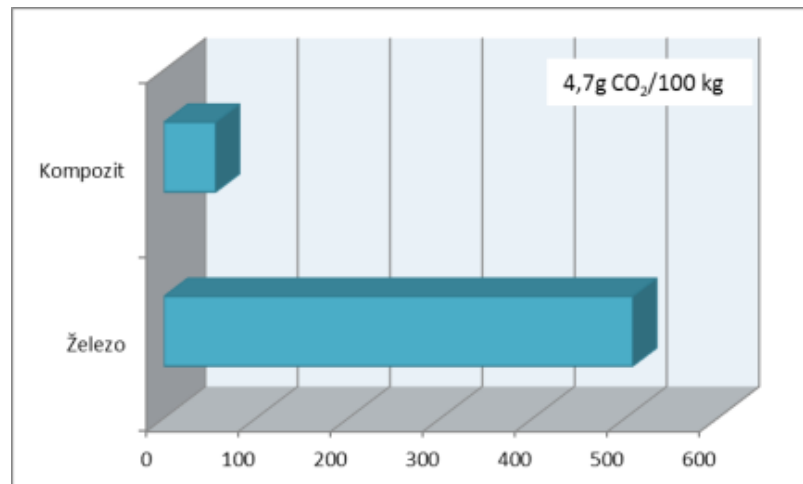
Na následujících grafech je porovnána cena použitého materiálu (Obr. 61), kdy celková cena kompozitového dílu je o 55% vyšší než cena původního dílu. Dále došlo k úspoře hmotnosti asi o 89% (Obr. 62) což v přepočtu na hmotnost vypouštěného CO₂ na 100 kg hmotnosti (Obr. 63) je úspora, jenž znamená zvýšení zákonného požadavku na snížení emisí CO₂ (v roce 2012 bylo 120g/km a v roce to už bude 80 g/km). Je zřejmé, že při použití kompozitních materiálu převazují z velké části kladné vlastnosti nad zápornými (viz. Kapitola 8.8 a 8.9).



Obr. 61. Porovnání ceny dílu



Obr. 62. Porovnání hmotnosti



Obr. 63. Porovnání vypouštěného CO₂

9 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem předního příčnicku pro automobil BMW.

Pro tento díl předního příčnicku byl zvolen hybridní materiál skládající se z tvarovaného kompozitního materiálu- PA6 GF14 (polyamid 6 plněný 14 % skleněných vláken). Tento materiál byl zvolen na základě definovaných požadavků a s ohledem na vlastnosti vybraného materiálu.

Při konstrukčním návrhu dílu byly dodržovány zásady konstrukce vstřikovaných výrobků, jež byly popsány v teoretické části mé bakalářské práce (Inovace interiérového automobilového dílu) [36]. Celý díl byl navržen s ohledem na výrobní technologii, v tomto případě hybridní technologii- kombinace Thermoforming a vstřikování.

Pro optimalizaci mechanických a tvarových vlastností navrženého dílu i množství potřebného materiálu bylo využito analýzy metodou konečných prvků v programu Abaqus CAE. Pomocí programu Composites Modeler jsem namodeloval model, kdy bylo simulováno napětí ve vláknech a jejich deformace. Z následných analýz pro jednotlivé vrstvy byly určeny místa s největšími napětími a deformacemi, kde se formulovaly dané problémy, jež vznikají při tvářecích pochodech, které následně ovlivňují optimalizaci výrobního procesu. Z analýz vyplývá, že natočení vláken velmi ovlivňuje tvorbu napětí a z nich následně vyplývajících deformací. Nejmenší deformace a napětí vznikají, pokud vlákna jsou rovnoběžná nebo kolmá na koordinačním systémem XY. Z tohoto důvodu je křivost modelu rovnoběžná nebo kolmá s hlavním směrem zakřivení. Dalším důvodem vzniku negativních jevů jsou velké a náhle změny křivosti, kdy při přechodu z konkávní na konvexní a naopak se nám tkanina ve formě deformuje a z toho vyplývá, že problémové regiony lze upravit vhodnou volbou uložení vláken.

Navržený díl je z hlediska hmotnosti velmi dobře navržen, kdy došlo k úspoře hmotnosti k původnímu dílu o 89% a při přepočtu na úsporu vypouštěného CO₂ na hmotnost vychází snížení emisí o 90%. Negativem použitého karbonového materiálu je prozatím cena, ale vzhledem k jeho stabilní ceně na světových trzích (Obr. 59) a zvětšujícímu se využití v automobilovém průmyslu a obecně ve strojírenství oproti kovovým materiálům je velmi pravděpodobné, že dojde k výraznému snížení ceny uhlíkových vláken.

Při použití hybridní technologie dochází k úspoře finančních prostředků na vývoj a výrobu nástroje pro technologii tváření za tepla (Thermoforming), protože je již zapracována do technologického cyklu vstřikování (viz. Kapitoly 3 a 4).

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ve stručnosti ukázat postup při navrhování kompozitního dílu s využitím konstrukčních a FEM softwaru, kdy tento postup umožňuje konstrukčnímu týmu sledovat a předpovídat chování dílu a následně optimalizovat výrobní proces a jeho parametry.

Diplomová práce se skládá ze dvou částí, teoretické a praktické. V teoretické části jsou popsány základní vlastnosti používaných kompozitních materiálů a problematika výrobní technologie při návrhu tohoto dílu.

Hlavní náplní praktické části byl návrh 3D prototyp předního příčnicku z kompozitního materiálu pro automobil BMW. V první fázi byl vyhotoven časový plán vývoje. Dále byl vyhotoven technický popis modelu z hlediska funkčnosti a umístění a zvolen vhodný polymerní materiál pro tuto aplikaci. Na tyto kroky navazovala samotná konstrukce 3D prototypu. V průběhu konstrukce 3D prototypu byly prováděny kontrolní strukturální simulace v programu Abaqus / CAE 6.12- Composites Modeler a Catia V5. Tyto simulace umožňovaly zjistit choulostivá místa 3D modelu a tím z hlediska konstrukce a vyrobitelnosti optimalizovat celou část modelu. V dalším bodu jsem provedl celkové zhodnocení dílu.

Další částí tohoto konstrukčního návrhu by mohla být optimalizace modelu z hlediska toku polymeru, deformací, vibrací, tokové analýzy, konstrukce nástrojů apod.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografické publikace

- [1] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů: 1.díl- Vstřikování termoplastů*. 2.upr. vydání. Brno: Uniplast, 1999. 134 s.
- [2] BRAST, Karsten. *Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren*. Aachen, 2001. Disertační práce. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- [3] DADOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1 (brož.).
- [4] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2. Praha: VŠCHT Praha, 2006. 278 s. ISBN 80-7080-617-6
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Mit Kunststoffen konstruieren : Eine Einfuehrung*. 1.Auflage. Muenchen: Carl Hanser Verlag Muenchen Wien, 1995. 253 s. ISBN 3-446-18347-7
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. vyd.1. Praha: Nakladatelství Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [7] ERHARD, Gunter. *Konstruieren Mit Kunststoffen . 2.Auflage*. Muenchen: Carl Hanser Verlag Muenchen Wien, 1999. xiv, 466 s. ISBN 3-446-21016-4.
- [8] ENDRUWEIT, Andreas. *Investigation of the Influence of Local Inhomogeneities in*. Würzburg, 2003. Disertační práce. Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Germany.
- [9] FLEMMING, Manfred; Siegfried ROTH. *Faserverbundbauweisen. Eigenschaften: Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte*. Auflage: 2. Berlín: Springer, 2003. Auflage: 1. 616s. ISBN 978-3-540-00636-7.
- [10] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 2004. 1. vydání Brno: FCH VUT v Brně, 2004, 194 s. 1. ISBN 80-214-2443-5.
- [11] JAROSCHEK, Christoph. *Spritzgiessen fuer Praktiker*. 1.Auflage. Muenchen: Carl Hanser Verlag Muenchen Wien, 2003. 229 s. ISBN 3-446-214000-3
- [12] KÁNOCZ, Alexander a Miroslav ŠPANIEL. *Metoda konečných prvků v mechanice poddajných těles*. Praha: ČVUT, 1998. 128 s. ISBN 80-01-01283-2.

- [13] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. vyd.2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. 250 s. ISBN 80-7083-449-8
- [14] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. vyd.1. Praha: VŠCHT Praha, 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3
- [15] MACHEK, Václav; SODOMKA, Jaromír. *Polymery a kompozity s polymerní matricí*. vyd.1. Praha: Česká technika- nakladatelství ČVUT, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4
- [16] MAŇAS, M., TOMIS, F. *Výrobní stroje a zařízení, gumárenské a plastikářské stroje I*. Brno: VUT, 1987.
- [17] MAŇAS, M., HELŠTÝN, J. *Výrobní stroje a zařízení, gumárenské a plastikářské stroje II*. Brno: VUT, 1990. ISBN 80-214-0213-X.
- [18] MINSTER, J. *Mají špičkové kompozitní materiály ve stavebnictví budoucnost?* Inženýrské stavby, ročník 41, 10/1993, 349-350
- [19] MLEZIVA, Josef; ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery*. vyd.2. Praha: Sobotáles, 2000. 544 s. ISBN 80-85920-72-7
- [20] SCHÜRMAN, Helmut. *Konstruieren mit Faser- Kunststoff- Verbunden*. Auflage: 2. Berlín: Springer, 2007. Auflage: 2. 672s. ISBN 978-3-540-72190-1.
- [21] *SIMVEC Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2010*. Baden- Baden: VDI Verlag GmbH, 2010. ISBN 978-3-18-092107-5.
- [22] ŠANDA, Štěpán. *Vliv vlastností polymerů a kvality tokových kanálů na zatékavost taveniny*. Zlín, 2012. Disertační práce. UTB ve Zlíně.
- [23] VALENTA, František a kolektiv. *Pružnost a pevnost III*. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01278-6.
- [24] VOZKOVÁ, Pavla. *Víceúrovňové modelování mechanických vlastností textilních kompozitů*. Liberec, 2008. Disertační práce. TU v Liberci.

WWW stránka- elektronická publikace

- [25] DAĐOUREK, Karel. *Pevnost kompozitů* [online]. TU v Liberci, 2010 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NKM/10ostatni-pevnost.pdf. TU v Liberci.

- [26] *Technische Kunststoffe und deren Eigenschaften* [online], 2011 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1513&lng=1>
- [27] KOŘÍNEK, Zdenek.: *Kompozity* [online]. [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [28] <http://www.csm-kompozity.wz.cz/stav.pdf>
- [29] MICHNA, Stefan. *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie/kompozitni_materialy.pdf
- [30] Vláknové kompozity. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2012-12-15]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 13. 10. 2012. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1knov%C3%A9_kompozity#Recyklace_vl%C3%A1knov%C3%BDch_kompozit.C5.AF
- [31] <http://www.modding.cz/?p=75>
- [32] Composites: A Vision for the Future. In: BISWAS, MITTAL a SRIKANTH. *Technology Information, Forecasting and Assessment Council* [online]. 2009 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: http://www.tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=539:composites-a-vision-for-the-future&catid=85:publications&Itemid=952
- [33] Organoblech– die Innovation in der Hybridtechnik. LANXESS [online]. 2012 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/docguard/TI_2009-003_DE_thermoplastische_Faserverbundwerkstoffe.pdf?docId=12427922
- [34] Thermoforming. In: *Custompart* [online]. 2009 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: http://www.google.de/imgres?imgurl=http://www.custompartnet.com/wu/images/thermoforming/vacuum-forming.png&imgrefurl=http://www.custompartnet.com/wu/thermoforming&h=480&w=640&sz=69&tbnid=xKiWJAvBG0pDBM:&tbnh=78&tbnw=104&prev=/search%3Fq%3Dthermoforming%26tbn%3Disch%26tbo%3Du&zoom=1&q=thermoforming&usg=__gZliGEgwGHEYuPSVbh48R_D0Hqc=&docid=RRjeivP9cL0Z0M&hl=cs&sa=X&ei=GkHMULPGNYHVswajyoDwAg&sqi=2&ved=0CE4Q9QEwBA&dur=1

- [35] The Thermoforming Process: *Plastic Thermoforming Process vs. Injection Molding - How to Choose?* [online]. 2012[cit. 2012-12-15]. Dostupné z: http://www.google.de/imgres?q=development+product+cycle&start=261&hl=cs&sa=X&tbo=d&biw=1541&bih=1007&tbm=isch&tbnid=Wfp8P8basldQSM:&imgrefurl=http://www.productiveplastics.com/processes.asp&docid=Lz2n7DsveWXLmM&imgurl=http://www.productiveplastics.com/images/product-dev-cycle.jpg&w=350&h=259&ei=cPTMUJb_L83DtAbowoGgAg&zoom=1&iact=rc&dur=471&sig=114825445807698340383&page=6&tbnh=140&tbnw=189&ndsp=51&ved=1t:429,r:95,s:200,i:289&tx=99&ty=58
- [36] THOMKE, David. *Inovace interiérového automobilového dílu*. 2011. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AFK		Aramid Faser Kunststoff
BMW	-	Bayerische Motoren Werke
CAD		Polykaprolaktam
CAM		Computer Aided Manufacturing
CFK		Carbon Faser Komposit
CFRP		Carbon Fibre Reinforced Plastic
CM		Composites Modeler
C_o	$\$*kg$	Cena vysoko pevnostní oceli
C_k	$\$*m^2$	Cena karbonového prepregu
C_{PA}	$\$*kg$	Cena PA6GF14
C_k	$\$$	Cena použitého karbonu
C_p	$\$$	Cena použitého PA6GF14
E_{11}	$N*mm^2$	Modul pružnosti v tahu v podélném směru
E_{22}	$N*mm^2$	Modul pružnosti v tahu v příčném směru
GFK		Glass Faser Komposit
H_d	kg	Hmotnost dílu
PA6		Polykaprolaktam
PC		Polykarbonát
P_d		Plocha dílu
PE		Polyetylén
PET		Polyetyléntereftalát
PP		Polypropylen
PS		Polystyren
MCV		Mega City Vehicle.

MKP		Metoda konečných prvků (ang.: Finite Element Metod)
O_d	m^3	Objem dílu
R_{ku}		Příčná pevnost v tahu
R_{mu}		
R_{mtu}		Mez pevnosti matrice ve smyku
RTM		Injekční vstřiková
S		Pevnostní redukční faktor
t		Tloušťka prepregu
V_c	%	Celkový objemový podíl
V_f	%	Objemový podíl vlákna
V_m	%	Objemový podíl matrice
Z		Počet vrstev prepregu
3D		Trojrozměrný model
α	K^{-1}	Teplotní roztažnost
ε_{11}	%	Podélná deformace v podélném směru
ε_{22}	%	Příčná deformace v příčném směru
ρ	$g \cdot cm^{-3}$	Hustota.
σ_{11}	$N \cdot mm^2$	Napětí v tahu v podélném směru
σ_{22}	$N \cdot mm^2$	Napětí v tahu v příčném směru

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Vývojový konstrukční diagram.....	13
Obr. 2. Rozdělení kompozitů [25, 27].....	15
Obr. 3. Rozdělení kompozitních materiálů [27]	17
Obr. 4. Sendvičový prvek [32].....	18
Obr. 5. Druhy vazeb vyztužujících tkanin [5, 6].....	18
Obr. 6. Pracovní diagramy kompozitů a ocele [18]	20
Obr. 7. Vliv anisotropie a obsahu vad na pevnost kompozitu v polárních souřadnicích	21
Obr. 8. Vliv anisotropie na pevnost kompozitu pro různá kompozitní vlákna	21
Obr. 9. Vliv objemového podílu vláken na modul E [18]	22
Obr. 10. Vliv uspořádání vláken na objem	22
Obr. 11. Vliv objemového podílu vláken na modul E [18]	23
Obr. 12. Závislost modulu pružnosti na teplotě.....	24
Obr. 13. Využití technologií ve výrobě	25
Obr. 14. Přehled výrobní procesů komp. materiálů	26
Obr. 15. Porovnání nákladů na CFK a Alu dílu.....	27
Obr. 16. Porovnání hustoty různých materiálů	27
Obr. 17. Porovnání pevnosti různých materiálů	28
Obr. 18. Karoserie BMW i8 z kompozitního materiálu	28
Obr. 19. Vakuové tváření [31]	30
Obr. 20. Tlakové tváření [31]	31
Obr. 21. Mechanické tváření [31]	31
Obr. 22. Procesní kroky tváření	32
Obr. 23. Schéma vstřikovacího stroje [16]	33
Obr. 24. Ukázky zastříkovaných dílů.....	34
Obr. 25. Procesní kroky zastříkování	34
Obr. 26. Cena vstřikovacího a tvarovacího stroje [35].....	36
Obr. 27. Výztužný příčník	37
Obr. 28. Procesní kroky hybridní technologie [34].....	38
Obr. 29. Nelineární vlastnosti materiálu.....	43
Obr. 30. Ocelový 3D model dílu	44
Obr. 31. Umístění dílu	45
Obr. 32. Mechanické vlastnosti dílu.....	45

Obr. 33. Zatížení nosníku	46
Obr. 34. Zátěžové křivky PA6 GF14 při rozdílných teplotách.....	48
Obr. 35. Tloušťka stěny vs. délka toku	49
Obr. 36. Space Analysis v Catia V5.....	50
Obr. 37. Space Analysis v Catia V5.....	50
Obr. 38. 3D model před úpravou	51
Obr. 39. 3D model po úpravě.....	51
Obr. 40. Velikost elementů	52
Obr. 41. Typ sítě.....	53
Obr. 42. Kontrola kvality sítě	53
Obr. 43. Souřadnicový systém	54
Obr. 44. Směr natočení vláken.....	54
Obr. 45. Definice materiálu v programu Abaqus.....	55
Obr. 46. Deformace tkaniny	56
Obr. 47. Druhy křivosti	56
Obr. 48. Napětí ve vláknech a deformace- 0°natočení.....	58
Obr. 49. Napětí ve vláknech a deformace- 15°natočení.....	59
Obr. 50. Napětí ve vláknech a deformace- 30°natočení.....	60
Obr. 51. Napětí ve vláknech a deformace- 45°natočení.....	61
Obr. 52. Napětí ve vláknech a deformace- 60°natočení.....	62
Obr. 53. Napětí ve vláknech a deformace- 90°natočení.....	63
Obr. 54. Rozvinutý tvar prepregu- 0°natočení.....	64
Obr. 55. Rozvinutý tvar prepregu- 15°natočení.....	64
Obr. 56. Rozvinutý tvar prepregu- 30°natočení.....	64
Obr. 57. Rozvinutý tvar prepregu- 45°natočení.....	64
Obr. 58. Rozvinutý tvar prepregu- 60°natočení.....	65
Obr. 59. Rozvinutý tvar prepregu- 90°natočení.....	65
Obr. 60. Cena oceli na světových trzích	66
Obr. 61. Porovnání ceny dílu	67
Obr. 62. Porovnání hmotnosti.....	67
Obr. 63. Porovnání vypouštěného CO ₂	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozměry dílu	45
Tab. 2. Vlastnosti PA6 GF14	47
Tab. 3. Vlastnosti uhlíkové tkaniny	48

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Technické parametry PA6

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÉ PARAMETRY PA6

nylon pa6

Ningbo Eagle New Material Co., Ltd

Model NO. – HGS3030

Color – Natural

Properties		ASTM	Units	Test Data
Mechanical Properties				
Tensile Strength		D638	MPa	173
Tensile Modulus			MPa	/
Elongation at Break			%	3.5
Bending Strength		D790	MPa	245
Bending Modulus			MPa	7890
IZOD Impact Strength	1/4	D256	KJ/m ²	13.2
	1/8			14
Thermal properties				
Melting Point		D	°C	/
Heat Deflection Temperature(1.82Mpa)		D648	°C	200
Melting Index		D1238	g/10min	35
Flame Retardant Property		UL94	HB	HB
Physical Properties				
Density		D792	g/cm ³	1.36
Ash Content		ISO3451	%	30±2
Water Absorption (24H/23°C)		D570	%	/
Molding Reduction		D955	10 ⁻³ mm/mm	1.8-2.8
Electrical Properties				
Dielectric Strength		IEC 60243-1	KV/mm	/
Volume Resistivity		IEC 60093	Ω·m	/
Surface Resistivity		IEC 60093	Ω	/
Remark			Experimental Condition:	
1. Molding Reduction test size: 129×12.7×3.2mm.			1 Temperature:23°C	
2. This is a typical property report, just for reference only.			2 Relative Humidity (RH): 60%	