Modelování plněných kompozitních systémů

Bc. Lukáš Válek

Diplomová práce
2016

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Lukáš Válek**
Osobní číslo:	**T14558**
Studijní program:	**N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Výrobní inženýrství**
Forma studia:	**prezenční**

Téma práce: **Modelování plněných kompozitních systémů**

Zásady pro vypracování:

1. **Literární rešerše oblasti kompozitních materiálů a rozdělení kompozitů.**
2. **Výztužné systémy pro kompozity, jejich výroba, výhody a nevýhody.**
3. **Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů – statické a dynamické.**
4. **Model kompozitní struktury pro zadanou aplikaci.**
5. **Vytvoření modelu včetně jeho odůvodnění.**
6. **Experimentální příprava reálné kompozitní struktury, experimentální testování mechanických vlastností.**
7. **Srovnání teoretického a reálného modelu.**
8. **Závěr a diskuse dosažených výsledků.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016

L.S.

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan

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

Příjmení a jméno: Válek Lukáš 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 užít 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 13.05.2016 .....

[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 nevýdělečně 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.

[2)] 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 dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

[3)] 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 dílo:

(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 v souvislosti 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá modelováním kompozitních systémů a ověřením možnosti predikce mechanických vlastností skutečného materiálu. Nejprve byly na trhacím stroji provedeny tahové zkoušky vzorků vyztužených různým typem uhlíkových tkanin. Reprezentativní objemový element kompozitu sestávající z uhlíkových tkanin a epoxidové matrice byl analyzován v programu Digimat a výsledky následně prezentovány v konečnoprvkovém programu Marc Mentat. Cílem práce je zhodnotit možnost využití softwaru k předpovídání vlastností kompozitních materiálů.

Klíčová slova:

Digimat, kompozit, matrice, výztuž, uhlíková tkanina, epoxidová pryskyřice, kepr, plátno

ABSTRACT

This thesis deals with the modeling of composite systems and verification of the possibility predicting the mechanical properties of real materials. At first were performed tensile tests on specimens with different types of carbon fabrics on test machine. The representative volume element of the composite consisting of carbon fabrics and epoxy matrix was analyzed in the Digimat software and then the results were presented of the finite element program Marc Mentat. The aim of this thesis is to evaluate the possibility of using software to predict the properties of composite materials.

Keywords:

Digimat, composite, matrix, reinforcement, carbon fabric, epoxy resin, twill, plain

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat své vedoucí doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za zasvěcení do problematiky tématu a cenné rady při řešení této diplomové práce. Dále děkuji doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. za konzultace k programu Marc Mentat, Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při řešení mechanických vlastností a Ing. Zdeňku Růžičkovi, Ph.D. za odborné rady při práci v softwaru Digimat.

Prohlašuji,

- že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité literární zdroje jsem citoval,
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD **10**
I TEORETICKÁ ČÁST **11**
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY **12**
1.1 DEFINICE KOMPOZITU 12
1.2 SLOŽENÍ KOMPOZITŮ 13
1.2.1 Matrice 14
1.2.2 Výztuž 15
1.3 POŽADAVKY NA KOMPOZITNÍ MATERIÁLY 15
1.4 VÝZNAM A VLASTNOSTI KOMPOZITŮ 16
1.4.1 Synergický efekt 16
1.4.2 Adheze 17
1.4.3 Anizotropie 17
1.5 VÝHODY 18
1.6 NEVÝHODY 18
1.7 POUŽITÍ 19
2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ **20**
2.1 ROZDĚLENÍ PODLE VELIKOSTI ČÁSTIC VÝZTUŽE 20
2.1.1 Makrokompozitní materiály 20
2.1.2 Mikrokompozitní materiály 20
2.1.3 Nanokompozitní materiály 20
2.2 ROZDĚLENÍ PODLE DISPERZE 21
2.2.1 Kompozit prvního typu 21
2.2.2 Kompozit druhého typu 22
2.2.3 Kompozit třetího typu 22
2.3 ROZDĚLENÍ PODLE MATERIÁLU MATRICE 23
2.3.1 Polymerní matrice 23
2.3.2 Skleněné a sklokeramické matrice 25
2.3.3 Kovové matrice 26
2.3.4 Keramické matrice 27
2.3.5 Uhlíkové matrice 28
2.4 ROZDĚLENÍ PODLE GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY PLNIVA 29
2.4.1 Vláknové kompozity 29
2.4.2 Částicové kompozity 31
3 VÝZTUŽNÉ SYSTÉMY PRO KOMPOZITY **32**
3.1 ARAMIDOVÁ VLÁKNA 34
3.2 SKLENĚNÁ VLÁKNA 35
3.3 UHLÍKOVÁ VLÁKNA 36
4 ZKOUMÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITŮ **37**
4.1 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SOFTWARU DIGIMAT 37
4.1.1 Vliv orientace vláken na únavovou pevnost výrobku 38
4.1.2 Tahové chování kompozitu vyztuženého přírodními vlákny 39
4.1.3 Modely kompozitů s náhodně distribuovanými dutinami 39
4.1.4 Analýza přenosu napětí v kompozitech mezi jednosměrnými vlákny 40

II PRAKTICKÁ ČÁST 41
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE 42
5.1 STANOVENÉ CÍLE 42
6 NÁVRH KOMPOZITU A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES 43
6.1 NÁVRH KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU 43
6.1.1 Druh použité výztuže 43
6.1.2 Druh použité matrice 43
6.2 FÁZE PŘÍPRAV 44
6.2.1 Příprava formy 44
6.2.2 Příprava výztuže - uhlíkové tkaniny 44
6.2.3 Příprava matrice - epoxidové směsi 44
6.3 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES 45
6.3.1 Technologie ručního laminování 45
6.3.2 Úprava laminátu na vzorky 46
7 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ 47
7.1 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ 47
7.2 PRŮBĚH TAHOVÉ ZKOUŠKY 48
7.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO TESTOVÁNÍ 49
7.3.1 Kompozit vyztužený tkaninou s plátnovou vazbou 50
7.3.2 Kompozit vyztužený tkaninou s keprovou vazbou 51
7.3.3 Výpočet hustoty kompozitu směšovacím pravidlem 52
7.3.4 Vyhodnocení získaných výsledků 52
8 MODELOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ 53
8.1 DIGIMAT-MF 54
8.2 POSTUP 55
8.2.1 Materiálové parametry 56
8.2.2 Mikrostruktura 58
8.2.3 RVE - Reprezentativní objemový element 59
8.2.4 Simulace vzduchových bublin 60
8.2.5 Nastavení zatížení a zahájení výpočtů 61
8.3 PRÁCE V KONEČNOPRVKOVÉM PROGRAMU 62
9 VÝSLEDKY ANALÝZ 63
9.1 KOMPOZIT VYZTUŽENÝ TKANINOU S PLÁTNOVOU VAZBOU 63
9.1.1 Výsledky simulace vzduchových bublin v kompozitu - plátno 64
9.2 KOMPOZIT VYZTUŽENÝ TKANINOU S KEPROVOU VAZBOU 68
9.2.1 Výsledky simulace vzduchových bublin v kompozitu - kepr 69
10 SROVNÁNÍ REÁLNÝCH A TEORETICKÝCH VÝSLEDKŮ 73
ZÁVĚR A DISKUSE 75
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 76
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 81
SEZNAM OBRÁZKŮ 83
SEZNAM TABULEK 85
SEZNAM PŘÍLOH 86

ÚVOD

V současné době se výrobní procesy bez přestání vyvíjí, vznikají nové technologie a na produkty jsou kladeny čím dál větší požadavky. Díky tomuto faktu nekonvenční materiály stále častěji nahrazují kovy v nejrůznějších průmyslových oblastech. Rozvoj nových materiálů sebou současně přináší nutnost zvýšené pozornosti k tomuto oboru.

Kompozitní materiály jsou známy a užívány již tisíce let, například jako stavby z doby kamenné, které tvořila sláma zapracovaná do hlíny. Novodobým příkladem je pak železobeton, kde jsou tahové síly přenášeny ocelovou výztuží, zatímco tlakové síly betonem. Dosud již vzniklo velké množství nejrůznějších druhů kompozitů a spousta z nich našla v praxi své uplatnění.

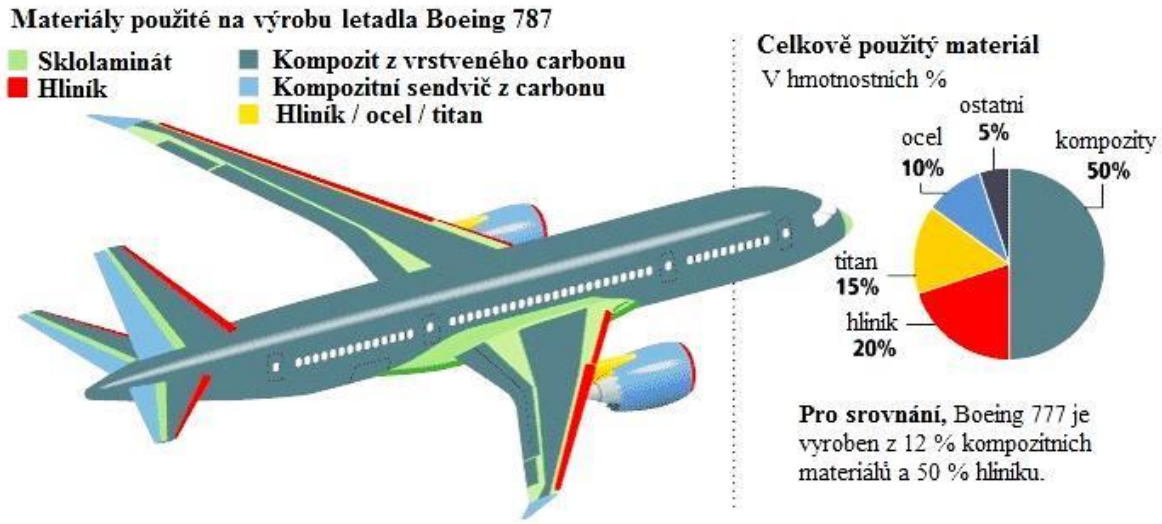
Jelikož kompozity vytlačují stále více klasické materiály, je potřeba umět předpovědět a následně plně využít jejich vlastností. Pro zjištění potřebného chování kompozitní výrobky bývají podrobeny různým zkouškám. To je však mnohdy zdlouhavá a nákladná metoda, z tohoto důvodu byl pro usnadnění vyvinut software určený k virtuálnímu testování kompozitních materiálů a tím snazšímu získání různých vlastností. Na základě znalosti chování jednotlivých fází kompozitu je umožněno simulovat fyzické, mechanické, termomechanické, tepelné, elektrické a jiné charakteristiky zkoumaného vícesložkového materiálu.

Tato diplomová práce se zabývá modelováním kompozitních systémů vyztužených uhlíkovou tkaninou v matrici v podobě epoxydové pryskyřice. Teoretická část bude obsahovat rešerši oblasti kompozitů, jejich dělení, informace o výztužných systémech a popis mechanických vlastností. V praktické části se bude nacházet popis přípravy kompozitních vzorků a experimentální testování tahových vlastností. Dále bude následovat popis modelování kompozitních systémů a prezentace dosažených výsledků. Cílem diplomové práce je ověření schopnosti programu předpovídat vlastnosti kompozitních materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou velmi moderní, ale nepatří mezi univerzální materiály. Vždy bývají navrhovány pro konkrétní aplikaci s cílem maximálního využití veškeré hmoty. Své uplatnění našly kompozitní materiály hlavně v leteckém průmyslu a to díky své tuhosti, vysoké měrné pevnosti, odolnosti proti mrazům a cyklické únavě [1].



Obr. 1.1 Využití kompozitů k výrobě letadla Boeing 787 [6].

1.1 Definice kompozitu

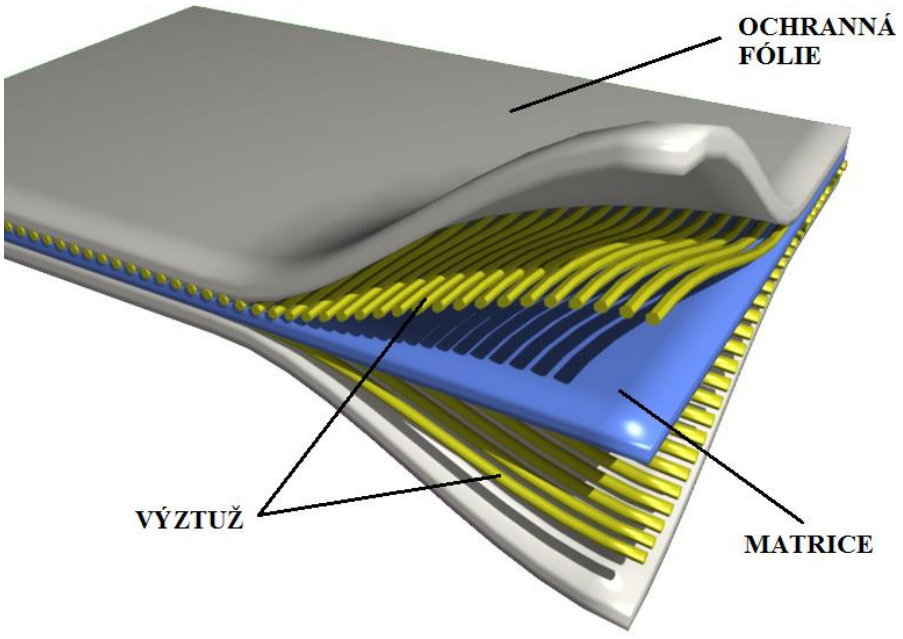
Slovo „kompozitní“ znamená „skládající se nebo vytvořený ze dvou a více odlišných částí“. Jako kompozit označujeme takový materiál, který je složen ze dvou nebo více odlišných materiálových složek neboli fází. To platí, pouze pokud mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti, tím jsou i vlastnosti složeného materiálu výrazně odlišné od vlastností jeho jednotlivých složek a pak takový materiál můžeme označit jako kompozit. Například plasty obsahují malá množství plniv, pohlcovačů ultrafialového záření, apretur a jiných materiálů, stejně tak u kovů se vyskytují téměř vždy slitinové prvky a množství nežádoucích nečistot. Takové materiály však nemohou být pokládány za kompozity, jelikož fyzikální vlastnosti nejsou podstatně ovlivněny těmito příměsemi. Díky tomu označení některých materiálů za kompozit je často zdůvodněno tím, že výsledkem kombinací složek se objevují změny jejich význačných vlastností. Tyto změny vlastností budou obzvlášť znatelné, bude-li jedna z fází ve vlákenné nebo destičkové formě. Přitom vlastnost jedné ze složek by měla být mnohem výraznější (alespoň 5 krát) než je tomu u druhé fáze a minimální objemový podíl složky by měl být větší než 5 % [2, 8].

1.2 Složení kompozitů

Jako kompozity jsou označovány materiály složené ze dvou a více složek (fází), u nichž se navzájem výrazně liší jejich atributy. Spojením těchto složek vznikne materiál s naprosto novými a unikátními vlastnostmi. Pevnější, tužší a tvrdší nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, zastávající funkci pojiva výztuže, je označována jako matrice [3, 24].

MATRICE	**+**	**PLNIVO**	**+**	**TEKUTÁ FÁZE**
pojivo		vlákna nebo částice		plynné póry

Další možnou složkou ve struktuře kompozitu je plynná fáze, ta se vyskytuje u kompozitních systémů například v podobě bublin a různých dutin. Většinou je tato fáze nežádoucí, jelikož přispívá ke snížení mechanických vlastností materiálu, mohou iniciovat trhliny a následnou delaminaci. Vzduchové bubliny se objevují v matrici při zpracování. Jejich množství je závislé na způsobu výroby a velice záleží na důkladnosti laminování, kdy jsou bubliny vytlačovány ze směsi.



Obr. 1.2 Složení kompozitního materiálu [7].

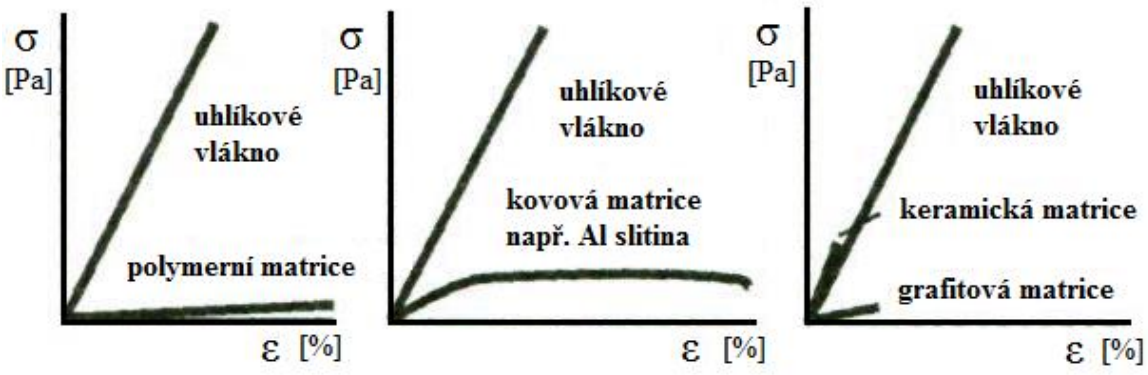
1.2.1 Matrice

Každý kompozitní materiál musí obsahovat jednu složku, která je v celém svém rozsahu spojitá, určuje tvar, rozměry a drží všechny fáze kompozitu pohromadě. Tato složka se označuje jako matrice. Je to tedy materiál prosycený systémem vláken a partikulárních komponent takovým způsobem, aby po zpracování vznikl tvarově stálý výrobek označený jako kompozit [4, 8].

Úkolem matrice je:

- zaručení geometrického tvaru a tvarové stálosti výrobku,
- přenos namáhání z vlákna na vlákno,
- zajištění geometrické polohy vláken,
- přenos namáhání na vlákna,
- zavedení a přenos sil,
- ochrana vláken před okolními vlivy [8].

Základní úlohou matrice je spojování vyztužujících fází a její ochrana před vlivy okolí. Matrice by si měla svou funkci pojiva udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než je mezní prodloužení vláken, ale tento požadavek však splňují pouze kovové a polymerní matrice. Keramické, skelné, sklokeramické i uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna. Na obr. 1.3 jsou znázorněny křivky napětí - poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním uhlíkového vlákna se středními hodnotami modulu pružnosti a pevnosti v tahu [3].



Obr. 1.3 Schématické znázornění napěťových křivek [3].

1.2.2 Výztuž

Výztužný systém je v kompozitech obsažen hlavně z důvodu zajištění lepších fyzikálně mechanických vlastností výsledného výrobku. V porovnání s matricí má výztuž mnohem vyšší hodnoty mechanických vlastností, jako je tvrdost, pevnost, houževnatost, atd., hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení těchto uvedených vlastností. Velice často jsou kompozity z epoxidové pryskyřice, která je plněná skelnými vlákny. Samotná výztuž by bez matrice tyto vlastnosti nedosahovala. Výztuže dělíme podle tvaru a velikosti a podle použitého materiálu [11, 13, 26].

1.3 Požadavky na kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou vytvářeny za účelem splnění požadavků, které u klasických materiálů lze jen velmi těžko dosáhnout nebo vůbec [4].

Mezi tyto zásadní požadavky patří:

- zvýšení pevnosti,
- zvýšení tuhosti,
- redukce hmotnosti,
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti),
- zmenšení teplotní roztažnosti,
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti,
- snížení nasákavosti,
- zvýšení rozměrové stability,
- udržení tuhosti a pevnosti při vysoké teplotě,
- zvýšení teplotní stability (rozšíření teplotního rozsahu použitelnosti),
- modifikace elektrických vlastností,
- zvýšení mechanického tlumení (antihlukové a antivibrační materiály),
- snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny
- snížení negativního dopadu na životní prostředí,
- snížení ceny [4].

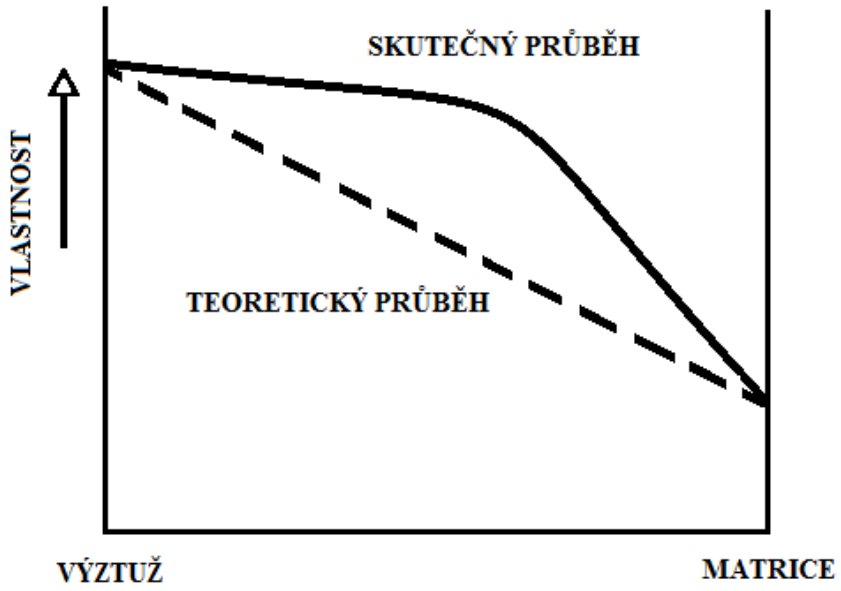
1.4 Význam a vlastnosti kompozitů

Většina doposud vyvinutých kompozitních materiálů je převážně vyráběna za účelem získání lepších mechanických, termo-mechanických, tepelných a elektrických vlastností, jako je například tuhost, pevnost, tažnost a odolnost vůči vysokým teplotám [2].

1.4.1 Synergický efekt

Kompozitní materiál jako celek má vlastnosti, kterých samostatně nedosáhne žádná ze složek a takové vlastnosti nelze získat ani jejich součtem. Odtud také vyplývá označení „synergický efekt“, je to přidaný účinek současného působení dvou nebo více složek ve srovnání se součtem účinků každé složky odděleně. Synergický (spolupracující) účinek neboli efekt má často exponenciální charakter, rostoucí s počtem přispívajících činitelů [4, 5].

Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. Přestože jsou vlákna i matrice samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tedy odolností proti náhlému křehkému porušení. Existence synergismu je velice důležitá, jelikož vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností [4, 5].



Obr. 1.4 Znázornění synergického efektu v kompozitu [4].

1.4.2 Adheze

Je to v kompozitech základní vlastnost zajišťující přenos sil mezi matricí a výztuží. Důležité jsou adhezní síly na rozhraní matrice - disperze. Existují tři základní druhy těchto sil [4].

Mechanické zaklínění

Styková plocha nacházející se mezi matricí a disperzí není nikdy rovná, obsahuje různorodé nerovnosti. Čím drsnější jsou hranice, tím je větší vzájemné zaklínění a styk je poté dokonalejší [4].

Fyzikální adheze

Souvisí s Van der Vaalsovou vazbou mezi částicemi na rozhraní. Tato vazba působí na vzdálenost 0,3 až 0,5 μm a její velikost odpovídá teoretické pevnosti rozhraní 0,7 až 7 GPa. Je-li tato vazba dostatečně silná, pak stačí k velkým adhezním silám na rozhraní. Tato vazba závisí na smáčivosti matrice a disperze. Pokud tvoří kapalná látka tenkou souvislou vrstvu na pevné látce, pak je látka ideálně smáčivá. V opačném případě tvoří kapalná látka na pevném povrchu kuličky, které se dotýkají pevné látky pouze v jednom bodě, v tom případě se jedná o dokonalou nesmáčivost. Platí tedy, že u látek smáčivých drsnost adhezi zlepšuje, zatímco u látek nesmáčivých drsnost adhezi zhoršuje [4].

Chemická adheze

Mezi matricí a výztuží může dojít také ke vzniku chemických vazeb. Tyto vazby mohou působit na vzdálenost až 0,3 μm a jejich velikost odpovídá teoretické pevnosti na rozhraní 7 až 70 GPa. Tyto vazby se mohou uplatnit ve dvou případech. První možností je, že matrice a disperze vzájemně difundují, pak na rozhraní vzniká difuzní mezivrstva se silnou adhezí. V druhém případě matrice a disperze spolu chemicky reagují a vzniká mezivrstva chemické sloučeniny. Chemická adheze může působit i negativně, jelikož chemické i difuzní mezivrstvy mohou mít nežádoucí vlastnosti jako je nízká pevnost nebo křehkost [4].

1.4.3 Anizotropie

Většina technických materiálů jsou zcela izotropní, naproti tomu kompozitní materiály mají anizotropní vlastnosti. Například pevnost ve směru vyztužujících vláken a kolmo na ně se může výrazně lišit. Většina uspořádání kompozitních materiálů je takovým způsobem, že vyvolává jejich anizotropii, s níž je možné se vyrovnat vhodným uspořádáním, příkladem jsou lamináty nebo překližky. Někdy je naopak možné anizotropické chování využít, jako je tomu u lyží nebo luku [4, 5].

1.5 Výhody

Každý kompozitní materiál je vyráběn pro určitou aplikaci tak, aby bylo maximálně využito jeho předností potřebné pro dané použití.

Kompozity mohou mít výhody jako je:

- vysoká pevnost a tuhost,
- nízká hmotnost,
- odolnost proti korozi,
- vysoká houževnatost,
- nízká teplotní dilatace,
- nehořlavost,
- dobré vlastnosti při statickém i dynamickém zatěžování,
- dobré tlumící vlastnosti,
- dlouhodobá tepelná odolnost,
- povrchová rezistivita,
- odolnost proti ultrafialovému záření,
- možnost výroby tvarově složitých dílů [27].

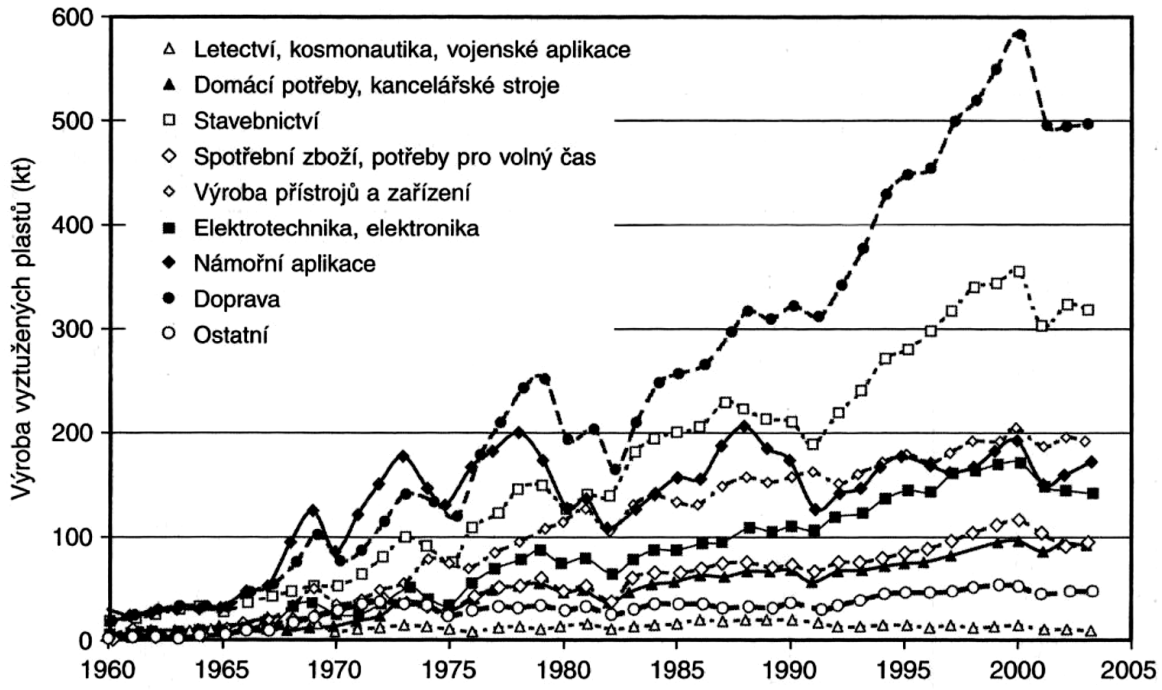
1.6 Nevýhody

Na druhou stranu k nevýhodám kompozitních materiálů patří:

- specifické a mnohdy složité způsoby výroby a zpracování,
- anizotropní chování vláknových kompozitů,
- vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí,
- nesnadná obrobitelnost,
- složitá identifikace a oprava lokálního poškození ve srovnání s konvenčními materiály,
- finanční náročnost,
- obtížná recyklace [27].

1.7 Použití

Díky pokročilým výrobním postupům a technologiím nacházejí dnes kompozitní materiály uplatnění v mnoha výrobních i provozních oblastech. V oblasti strojírenství získávají nejširší uplatnění v dopravním průmyslu, ať už se jedná o leteckou, námořní nebo silniční dopravu. Důležitou oblastí je pak kosmonautika a své užití nacházejí kompozitní materiály také hojně pro vojenské aplikace. Největší podíl na trhu zaujímají kompozity s matricí z polyesterových nebo vynilesterových pryskyřic. Aplikace těchto materiálů jsou stále častější, což dokazuje i obrázek 1.5, který znázorňuje vývoj použití polymerních kompozitů v USA v letech 1960 až 2005 [8].



Obr. 1.5 Použití polymerních kompozitů v USA v letech 1960 - 2005 [8].

2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Vzhledem k velkému množství existujících kompozitních materiálů se nachází mnoho různých kategorií pro jejich rozdělení. Základní dělení kompozitů je podle následujících čtyřech kritérií:

1. velikosti částic výztuže,
2. disperze,
3. geometrické charakteristiky plniva,
4. materiálu matrice.

2.1 Rozdělení podle velikosti částic výztuže

Kompozity mohou obsahovat vyztužující složky různých rozměrů, od těch nejmenších v nanometrech až po kompozity vyztužené materiály s makroskopickými rozměry.

2.1.1 Makrokompozitní materiály

Tyto kompozity mají největší rozměr vyztužující fáze, tedy délku částice nebo průměr vlákna v rozmezí 1 mm až 100 mm. Jsou používány především ve stavebnictví, kam patří polymerbeton obsahující drcené kamenivo a pryskyřici nebo železobeton vyztužený ocelovými pruty. Za makrokompozity můžeme také považovat plátované kovy nebo vícevrstvé materiály (chodník a vozovka) [3].

2.1.2 Mikrokompozitní materiály

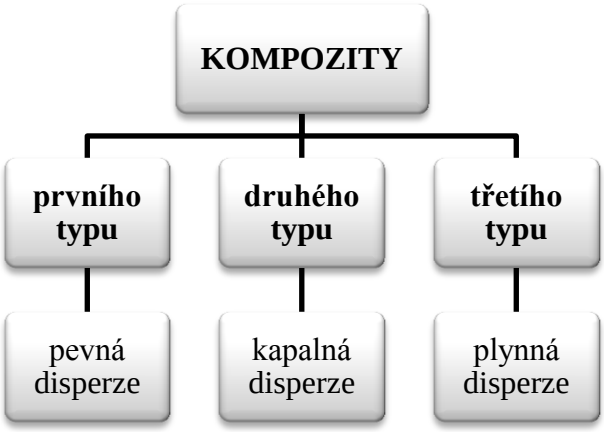
Mikrokompozitní materiály mají ve strojírenství největší význam, kde se příčné rozměry výztuže pohybují v rozmezí 1 μm až 100 μm. Oproti kovům a jejím slitinám mají mikrokompozity používané v průmyslu menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě (tím i k hmotnosti), díky tomu dosahují velké měrné pevnosti R_m/ρ_k a měrného modulu E/ρ_k [3].

2.1.3 Nanokompozitní materiály

Nanokompozity jsou materiály obsahující výztuže s největšími rozměry (délka částice nebo průměr vlákna) v jednotkách až desítkách nanometrů. Jsou to dvoufázové materiály tvořené zpevňující fází v polymerní matrici. Plniva mohou obsahovat jeden (hlinitokřemičitanové nanodestičky), dva (uhlíkové nanotrubice, nanovlákna) nebo tři (syntetické siloxany, silica) rozměry v nanometrech [3, 22].

2.2 Rozdělení podle disperze

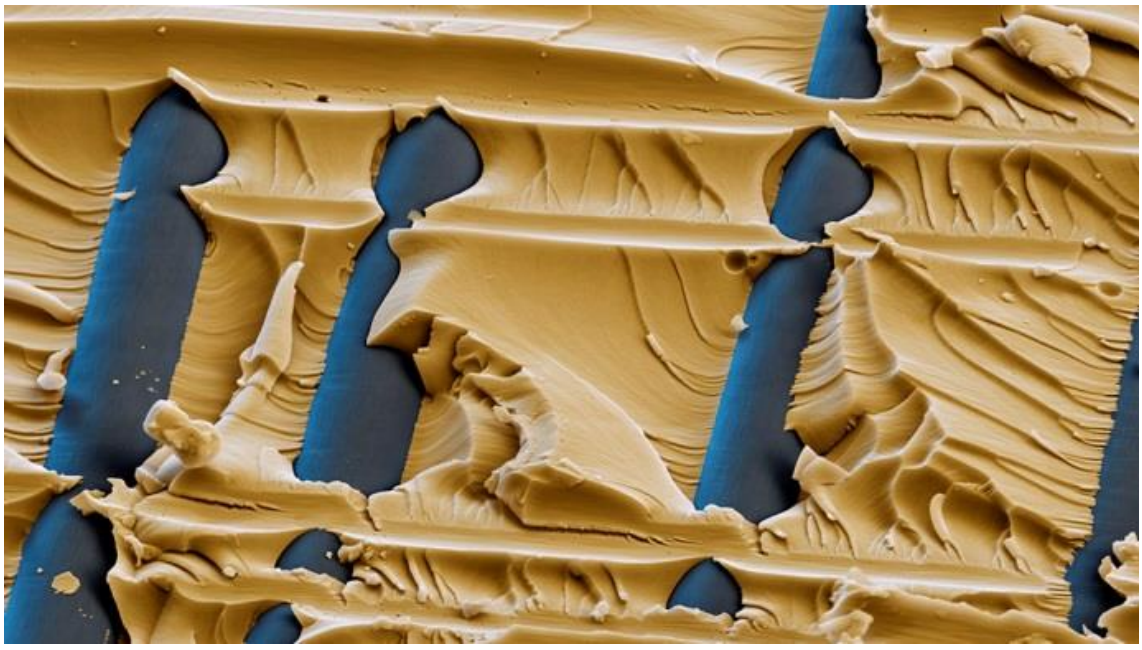
Všechny složky kompozitu jsou v matrici zpravidla rozptýleny neboli dispergovány a proto se označují jako disperze. Tyto složky by měly být v kompozitu rozptýlené co nejvíce rovnoměrně. Existují tři základní typy rozdělení kompozitních materiálů podle disperze [4, 5].



Obr. 2.1 Druhy kompozitů podle typu disperze [4, 5].

2.2.1 Kompozit prvního typu

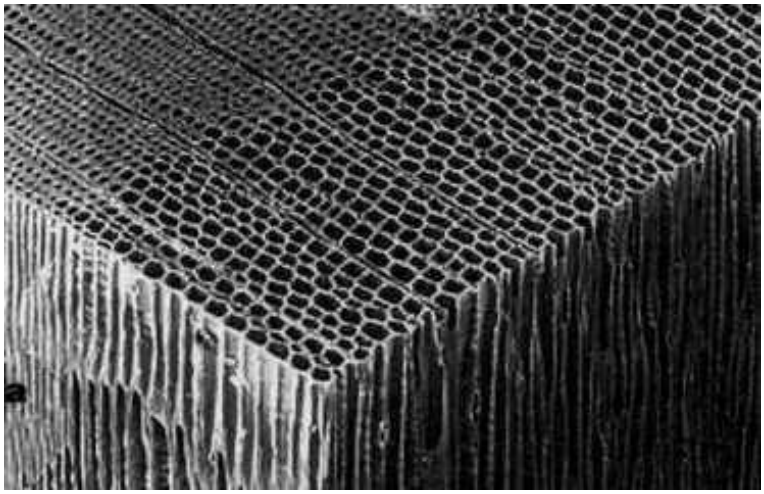
Tyto kompozity jsou v technice nejdůležitější. Materiál má disperze (jednu nebo více) z pevné fáze. Na obr 2.2 je zobrazen kompozit třetího typu, kde zle vidět vláknovou výztuž v pevné matrici [4].



Obr. 2.2 Kompozitní materiál prvního typu [23].

2.2.2 Kompozit druhého typu

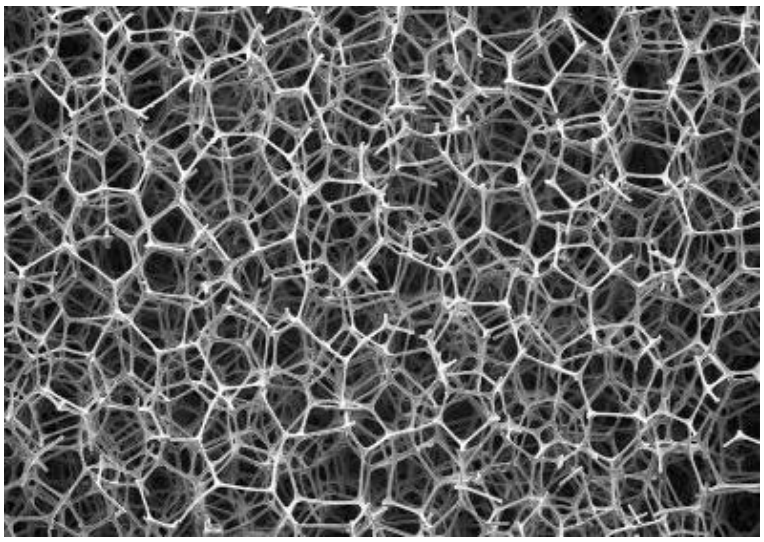
Druh kompozitu, který je poměrně málo využívaný, kdy je disperze kapalného skupenství. Tato kategorie zahrnuje některé pórovité struktury, kapalina může být v otevřených nebo v uzavřených pórech. Póry mohou být vyplněny například mazacím olejem, jedná se převážně o některé materiály samomazných ložisek (spékaný kov s disperzí oleje), nebo spékané kovy pro ložiska vodních strojů (čerpadlo, které musí pracovat pod hladinou). Nejčastěji se však tento typ kompozitu vyskytuje v přírodě v podobě dřeva tvořící systém trubic s mízou nebo jako skořápky mořských živočichů [4, 5].



Obr. 2.3 Mikrosnímek struktury dřeva [5].

2.2.3 Kompozit třetího typu

Tento druh obsahuje plynnou disperzi. Do této kategorie patří pěnové materiály i různé vláknové struktury s vlákny slinutými nebo spojenými malým množstvím pojiva [4].



Obr. 2.4 Struktura melaminové pěny Basotect s otevřenými póry [25].

2.3 Rozdělení podle materiálu matrice

Matrice je materiál tvořící základní stavební prvek výsledného kompozitu [9].

Kompozity je možné dělit podle matrice:

- Kompozity s polymerní matricí (Plastic Matrix Composites - PMC)
- Kompozity s kovovou matricí (Metal Matrix Composites - MMC)
- Kompozity s keramickou matricí (Ceramic Matrix Composites - CMC)
- Kompozitní materiály se skleněnou nebo sklokeramickou matricí
- Kompozitní materiály s uhlíkovou matricí

2.3.1 Polymerní matrice

Polymerní matrice může být z termoplastu nebo termosetu (reaktoplastu). V těchto zmíněných materiálech je značný rozdíl, jelikož se výrobní postupy i vlastnosti kompozitu výrazně liší [9].

Termoplastické polymery

Výhodou termoplastů oproti reaktoplastům je jejich houževnatost. Další předností je, že při zpracování termoplastů probíhá pouze roztavení a ztuhnutí matrice, zatímco u reaktoplastů dochází k chemickému procesu [8].

Nejčastějšími termoplasty použitelnými pro vyztužování vlákny jsou:

- polypropylen (PP),
- polyetylen (PE),
- polyamid (PA) - nylon,
- polykarbonát (PC),
- polysulfon (PSU) [8].

Vlákna vhodná k vyztužení kompozitu s termoplastickou matricí jsou:

- aramidová,
- skleněná,
- uhlíková [8].

Matrice z termoplastického polymeru jsou cenově méně nákladné. Například proti hliníkovým jsou výhodnější až o 50 % a oproti reaktoplastovým dokonce až o 80 % [9].

Reaktoplastické polymery

Díky nižší viskozitě se termosety (reaktoplasty) oproti termoplastům snadněji zpracovávají, lépe prosycují vlákna a snadněji smáčejí. Zpracování reaktoplastů probíhá při podstatně nižších teplotách, díky tomu jsou energetické nároky na prosycování vláken výrazně nižší ve srovnání s termoplasty. Materiály vyztužené vlákny s reaktoplastickou matricí jsou nejčetnějšími konstrukčními kompozity [8].

Nejrozšířenějšími reaktoplastickými polymery použitelnými jako matrice jsou:

- epoxidové pryskyřice,
- fenolické pryskyřice,
- polyesterové pryskyřice,
- melaminové pryskyřice [8].

Nejvhodnější pro kompozity s reaktoplastovou matricí jsou vlákna:

- borová,
- keramická,
- kovová,
- uhlíková [8].

V současnosti jsou vyvinuty speciální polyesterové pryskyřice obsahující adipové kyseliny, kde je styren nahrazen monomerem diallyl - ftalátem. Tyto nové pryskyřice umožňují vytvrzení přibližně za 2 minuty při teplotě 180 °C, vynikají výbornou odolností proti vlhkosti, neodpařují se, jsou levnější a mají dlouhou životnost [9, 10].

Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Jsou to látky v kapalném až pevném skupenství za běžných teplot. Jedná se o sloučeniny obsahující reaktivní epoxidovou skupinu. Epoxidové pryskyřice vynikají svými dobrými mechanickými vlastnostmi, výbornou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Díky svým vlastnostem jsou aplikovány v lepidlech, zalévacích hmotách pro elektroniku, dále se využívají pro výrobu forem, nástrojů a různých povlaků. EP-R jsou charakterizovány epoxidovým ekvivalentem, udávající kolik epoxidových skupin obsahuje váhová jednotka. Epoxidové pryskyřice mají lepší přilnavost k neupravené skleněné výztuži než vinylesterové a také lepší mechanické a elektrické vlastnosti. Vytvrzená EP-R je dobrý elektrický izolant, je odolná vůči vodě, kyselinám, alkáliím a některým rozpouštědlům [8, 11].

Fenolické pryskyřice (PF-R)

Jsou to reaktivní pryskyřice vyrábějící se kondenzací fenolů a až 50 % vodných roztoků aldehydů, hlavně formaldehydu. Tyto reaktoplasty vynikají vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. Fenolické pryskyřice jsou produktem reakce fenolu s formaldehydem. Teploty zpracování jsou podle typu metody a pohybují se v intervalu 150 - 210 °C. Rozeznáváme fenolické pryskyřice dvojího typu a to jednostupňové a dvoustupňové. Používají se jako základ lepidel k laminování dřeva a velká část využití připadá na výrobu překližek a laminovaných papírových panelů. Největší předností fenolických pryskyřic je vynikající elektrická, termomechanická a povětrnostní odolnost [8, 11].

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Tyto bezbarvé roztoky v reaktivních rozpouštědlech je možné vytvrzovat za normální nebo zvýšené teploty bez vzniku vedlejších těkavých produktů. Existuje spousta druhů polyesterových pryskyřic s různorodými vlastnostmi lišící se typem základní molekuly. Při jejich vytvrzování dochází k objemovému smrštění až o 9 % a uvolňuje se reakční teplo. Díky nízké viskozitě, vysoké rychlosti vytvrzování, dobrému smáčení vláken a poměrně nízké ceně jsou nenasycené polyesterové pryskyřice jedním z nejčastěji používaných materiálů pro kompozitní aplikace [8].

2.3.2 Skleněné a sklokeramické matrice

Skla a skleněné matrice mají dobrou odolnost proti vlivu agresivního prostředí, odolnost proti erozi a chemickou stabilitu v rozmezí 600 až 1300 °C. Na druhou stranu však má špatnou odolnost proti tepelným šokům a svou mechanickou pevnost ztrácí již při relativně nízkých teplotách. Tyto negativní vlastnosti mohou být zredukovány vhodným vyztužením, například uhlíkovými vlákny. Další výhodou vyztužení je také úspora hmotnosti [9].

Sklokeramické vláknové kompozity tvoří rohož z uhlíkových vláken (C) nebo z vláken karbidu křemíku (SiC) zalitých do roztaveného skla. Pevnost v tahu se pohybuje přibližně kolem 1000 MPa. Mohou být použity na vzduchu s uhlíkovými vlákny do 600 °C nebo s vlákny karbidu křemíku do 1000 °C. Mezi sklokeramické materiály se řadí sitall nebo skloporcelán, jejich matrice tvoří fosforokřemičité nebo hlinitokřemičité sklo. V porovnání s čistým sklem má sklokeramika větší pevnost v tahu i v ohybu [13, 14].

2.3.3 Kovové matrice

Nejrozšířenější kovovou matricí je hliník a jeho slitiny vyztužované nejčastěji uhlíkovými, borovými popřípadě safírovými vlákny. Dalšími často využívanými matricemi jsou slitiny titanu. Kompozity s titanovou matricí odolávají vyšším teplotám a poskytují tedy možnost jejich využití do 1000 až 1200 °C, což je poměrně velký rozdíl ve srovnání například s kompozity s hliníkovou matricí, která je použitelná do teplot 500 až 600 °C. Vlastnosti a kvalita těchto kompozitů záleží hlavně na výrobních metodách (poruchy vláken, póry, soudržnost, promíšení). Výrobní postup je třeba volit takovým způsobem, aby došlo k dokonalé směsi vláken s matricí bez degradace a mechanického poškození vláken, bez zkřehnutí matrice a s dostatečnou soudržností [9].

Použití kovové matrice pro kompozity má oproti polymerní matrici tyto výhody:

- elektrická vodivost,
- teplotní vodivost,
- nehořlavost,
- odolnost povrchového poškození,
- smyková pevnost [9].

Podle charakteru kovové matrice rozlišujeme tři základní typy kompozitu:

- hliníkové kompozity,
- hořčíkové kompozity,
- titanové kompozity [9].

Kompozity hliníku a jeho slitin

Hliník (Al) patří k nejvyužívanějším kovovým matricím, jelikož dosahuje jako kompozit dvojnásobnou pevnost v tahu oproti základnímu materiálu. Kromě samotného hliníku se používají jeho slitiny s mědí (Cu), křemíkem (Si), vanadem (V) nebo titanem (Ti). Vlákna z karbidu křemíku jsou uváděna jako nejrozšířenější a také nejslibnější výztuž hliníkových kompozitů. K vyztužování matric na bázi slitin Al jsou vhodné SiC whiskery, například tyto slitiny hliníku zpevněné SiC whiskery lze použít na výrobu pístu u spalovacích motorů. Dále se jako výztuž hliníkových slitin využívají bórová vlákna, na která je třeba nanést povlak z keramických materiálů, jelikož bor s kovem vyvolává chemické reakce [12, 14].

Kompozity hořčíku a jeho slitin

Hořčík (Mg) má menší měrnou hmotnost než hliník, je tedy lehčí. Dobře smáčí výztuž a díky těmto vlastnostem je vhodným materiálem pro matrici kompozitního systému. Základní výhodou kompozitu na bázi hořčíku a jeho slitin je jejich vcelku vysoká měrná pevnost. Tyto kompozity se vyznačují kromě vysoké pevnosti také dobrou pružností a používají se proto často jako konstrukční materiály. Díky své nízké měrné hmotnosti nalézají své uplatnění především v automobilovém průmyslu, kde jsou například aplikovány k výrobě hlavy válců a jiných částí motoru. Jako výztuž se využívají borová vlákna, vlákna z karbidu křemíku (SiC) nebo jejich částice [12, 14].

Kompozity titanu a jeho slitin

Kompozity titanu (Ti) jsou využívány pro aplikace v místech se zatížením vyšších teplot. Například v porovnání s hliníkovými kompozity, které mohou být použity pro teploty kolem 300 °C až 400 °C, na kompozity titanu mohou působit teploty cca 900 °C až 1000 °C, zejména s vyztužením vlákny SiC, které teplota prakticky neovlivňuje. Dále je možné pro vyztužení matric na bázi slitin titanu použít také SiC whiskery. Tyto kompozity nachází své využití ve vojenském, leteckém i raketovém průmyslu, například pro výrobu součástí turbokompresoru u turbínových motorů. Kompozity titanu a jeho slitin zajišťují zvýšení žárupevnosti, odolávají vyšším teplotám, dosahují vyšších hodnot pevnosti, modulu pružnosti a tuhosti za normálních teplot [12, 13, 14].

Faktory limitující širší použití kompozitů titanu a jeho slitin jsou:

- cena vyztužujících vláken,
- nákladný proces výroby,
- komplikované druhotné zpracování,
- obtížná recyklace [14].

2.3.4 Keramické matrice

Pojmem keramika je nazýván krystalický materiál na bázi anorganických sloučenin nekovového charakteru, kam řadíme čisté oxidy, nitridy, boridy a karbidy. Keramika je velmi atraktivní materiál zachovávající si velkou pevnost při vysokých teplotách, skvělou odolnost proti oxidaci a poměrně nízkou měrnou hmotnost. Při teplotách přes 1000 °C má keramika SiC, Si_3N_4 a Al_2O_3 vysokou pevnost v tahu a to přibližně 800 MPa [13, 14].

Nejčastěji se pro matrici (odolnou vysokým teplotám) používají:

- oxidy,
- nitridy,
- karbidy prvků Al, Si, Mg [9, 10].

Vyztužením keramické matrice dlouhými vlákny se zvýší lomová houževnatost kompozitu z původních 5 MPa na 30 MPa. To je sice několikanásobné zlepšení, při porovnání s kovy je to však stále nízká hodnota. Díky své křehkosti a nízkým hodnotám lomové houževnatosti je technické využití keramické matrice poměrně omezeno. Vyztužením vlákny lze tyto nežádoucí vlastnosti redukovat. Jako výztuž jsou vhodná vlákna z karbidu křemíku, uhlíku, kolumbiumu (Cb), molybdenu (Mo), wolframu (W), oceli a také safírové whiskery. Vyztužení wolframovými vlákny se výrazně zvýší rázová pevnost (nejméně 10krát) při stejně vysokých teplotách (až 1300 °C), ještě lepších výsledků bývá dosaženo při použití vláken z tantalu (Ta) [9, 13, 14].

2.3.5 Uhlíkové matrice

Uhlík se vyskytuje jako volný prvek, například v podobě grafitu, sazí, uhlí, diamantu a jako sloučeniny uhličitanů, například s vápníkem (Ca) a hořčíkem (Mg).

Kompozitní materiál uhlík - uhlík je systém vytvořený uhlíkovou matricí a uhlíkovými vlákny. Nevýhodou těchto kompozitních systémů je malá odolnost proti oxidaci při teplotě přibližně 500 °C, proto při teplotách nad 500 °C je nutná ochrana povrchu povlakem (například SiC) nebo použitím vhodných antioxidačních aditiv, které jsou zabudovány přímo do struktury [13, 14].

Kompozitní systémy uhlík - uhlík se vyznačují jedinečnými vlastnostmi, jako jsou:

- nízká hustota,
- odolnost proti extrémním teplotám,
- velice dobrá chemická odolnost,
- odolnost proti ionizujícímu záření,
- skvělá odolnost proti teplotním šokům,
- výborná pevnost i ve směru kolmém na vlákna (pevnost roste s teplotou),
- pseudoplasticita (postupné porušování vláken),
- biokompatibilita (snášenlivost materiálů v biologickém prostředí) [14].

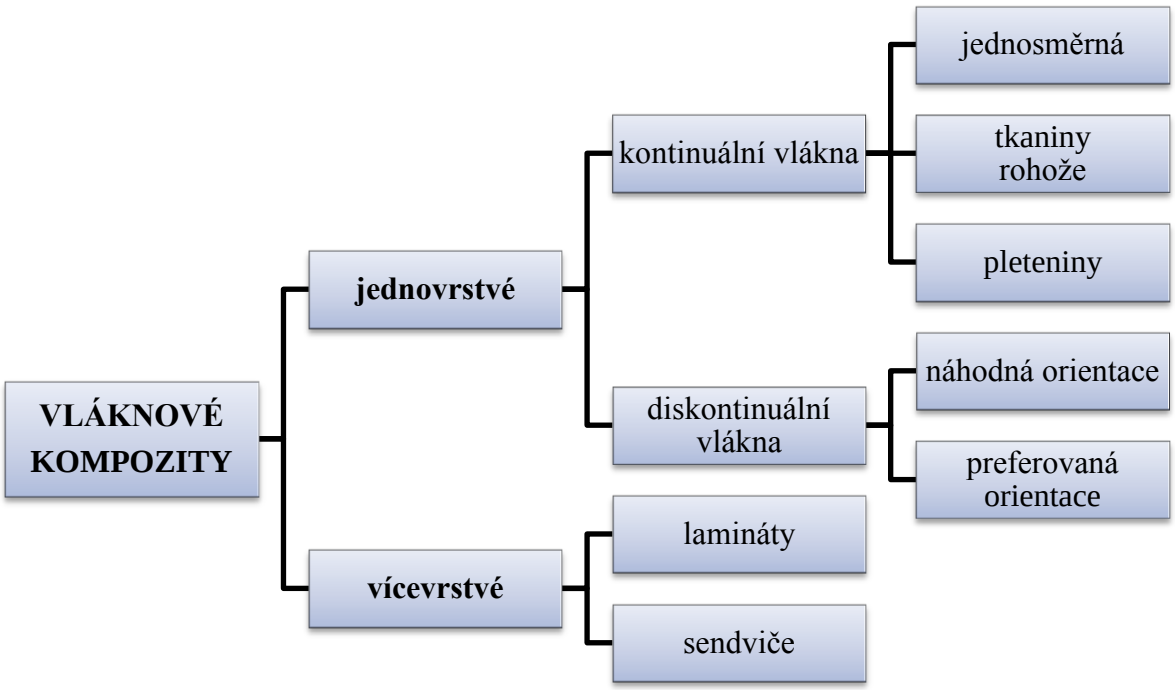
2.4 Rozdělení podle geometrické charakteristiky plniva

Typ a způsob uložení vyztužujícího materiálu má velký vliv na výsledné vlastnosti kompozitu. Podle geometrie výztuže lze dělit kompozity do třech základních skupin:

- vláknové (fibrilární),
- částicové (granulární),
- plošné (lamelární).

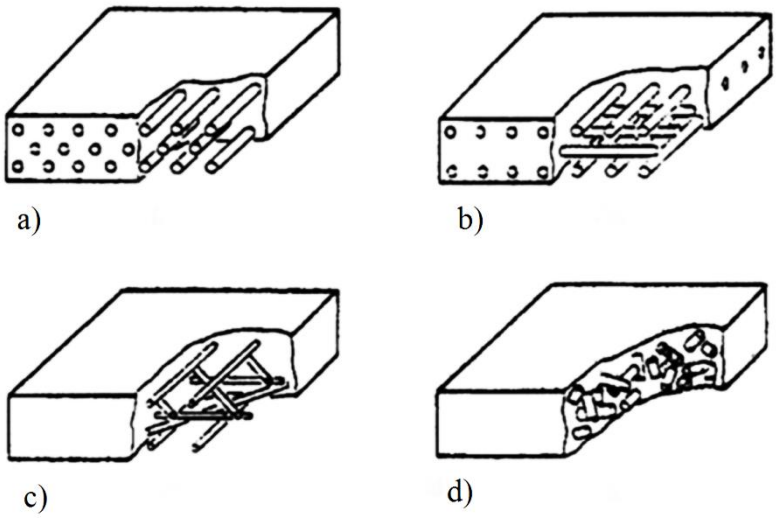
2.4.1 Vláknové kompozity

Vláknové výztuže se vyznačují tím, že jeden rozměr je vždy výrazně větší než dva zbylé, proti částicovým výztužím se tedy liší svojí geometrií. Vlákna mohou být uspořádána v matrici náhodně nebo s určitou orientací. Vyztužující vlákna ovlivňují tvarovou, ohybovou i tahovou pevnost a to jak orientací, tak procentuálním zastoupením vláken v kompozitu. Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, jelikož přirozené defekty struktury jsou u vláken malých průměrů také malé a vady materiálu jsou v nich minimalizovány. Vady se mohou objevovat v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek přednostně orientovaných v podélném směru vlákna. Vlákna jsou nedílnou součástí kompozitu, jelikož nesou zatížení a dodávají kompozitu důležité vlastnosti, jako je pevnost a tuhost. Pevnost závisí pochopitelně také na délce vlákna [11, 12, 13].



Obr. 2.5 Rozdělení vláknových kompozitních materiálů [2, 28].

Vláknová výztuž může být v matrici uspořádána jednosměrně, dvouose, víceose v rovině nebo prostorově (třídimenzionální výztuž) a nahodile. Základní způsoby uspořádání vláknové výztuže jsou zobrazeny na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Příklady uspořádání vláken v kompozitu: a) jednosměrná orientace kontinuálních vláken, b) dvouosé uspořádání, c) nahodilé uspořádání kontinuálních vláken, d) krátká vlákna s nahodilou orientací [11].

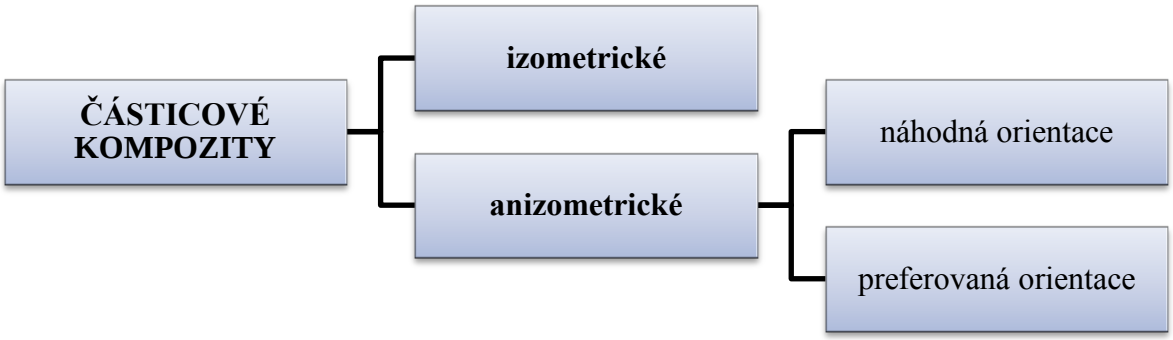
Mezi nejznámější vlákna se řadí:

- aramidová,
- skleněná,
- keramická (SiC, Al_2O_3, Si_3N_4),
- přírodní (rostlinná, čedičová a asbestová),
- polymerní,
- celuóza,
- uhlíková,
- borová,
- proteinová (vlákna pavouků),
- piezoelektrická,
- whiskery.

Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 5 μm do 20 μm, produkty s menšími průměry vláken se obtížně prosycují matricemi. Všechna vlákna jsou dodávána v podobě textilií nebo navinutá na válcovité cívce (roving). Polymerní matrice se nevyztužují kovovými ani keramickými vlákny z důvodu vysoké ceny a také proto, že se jedná o vlákna s větší měrnou hmotností. Pro kovové a keramické matrice zase nelze použít vlákna s malou tepelnou a chemickou odolností. Proto vlákna skleněná, uhlíková, polymerní a přírodní jsou používána pro kompozity s polymerní matricí, zatímco kovová, uhlíková a keramická vlákna jsou využita pro vysokoteplotní aplikace [3, 4, 8, 12].

2.4.2 Částicové kompozity

Kompozitní materiály mohou obsahovat nejrůznější druhy částic například minerálního původu, kdy jsou částice zpracovány mechanickým mletím na požadovaný tvar a velikost nebo jsou vyráběny průmyslově z přírodních zdrojů. Nejčastějším typem jsou keramické částice. Výsledný tvar závisí hlavně na zpracování, díky tomu lze částicové výztuže dělit na izometrické, mající tvar elipsoidu nebo koule, popřípadě anizometrické s jehlicovitým nebo destičkovitým tvarem částic. Vlastnosti kompozitu nejsou závislé na směru výztuží. Použití částicových výztuží vede nejen ke zlepšení mechanických vlastností, ale hlavně ke zlepšení vlastností jako je útlum vibrací, elektrická a tepelná odolnost apod. Použitím anorganických částic se dosahuje zvýšení tuhosti a zlepšení tvarové stálosti. Částice grafitu a sulfidu zlepšují kluzné vlastnosti a zvyšují odolnost proti otěru, zatímco elastomerní částice obsažené v kompozitu zlepšují houževnatost materiálu [4].



Obr. 2.7 Rozdělení částicových kompozitních materiálů [2, 28].

3 VÝZTUŽNÉ SYSTÉMY PRO KOMPOZITY

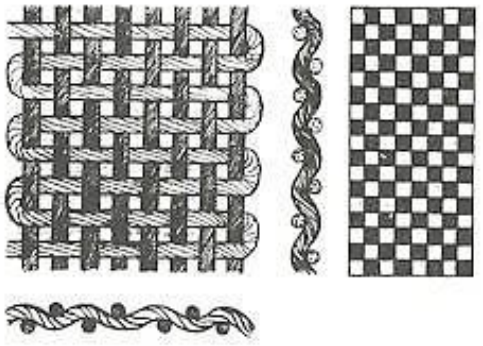
Vláknové výztuže mohou mít dvě základní formy, mohou to být krátká vlákna nebo dlouhá, bez přerušení po celé délce součásti. Vlákna bývají uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo chaoticky. Dále mohou být uspořádána jako tkanina nebo pletenina. Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána pouze ve výjimečných případech. Sdružením elementárních vláken vznikají prameny, ty jsou dále zpracovány na následující polotovary:

- **sekané prameny** - určeny k přípravě vstřikovacích a lisovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebnou délku,
- **mletá vlákna** - zpracování vláken mletím v případě křehkých materiálů,
- **příze** - spřádaná vlákna, která se dále zpracovává na tkaniny, pletené výrobky a pásy,
- **nitě (skaná příze)** - jedny nebo více společně spředených přízí,
- **rovingy** - sdružené prameny jednosměrných vláken s nulovým nebo jen velmi malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů na metr), pro výrobu tažených profilů a jednosměrných prepregů,
- **rohože** - tvoří je v rovině ležící nahodile uspořádaná kontinuální nebo sekaná vlákna délky 25 až 50 mm. Kontinuální vlákna jsou v rohoži vzájemně propletena bez jakékoli orientace v několika vrstvách. Sekaná vlákna jsou uložena do vrstev a spojena pojivy.
- **prepregy** - ploché útvary, jejichž hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Tyto listové polotovary mohou být na sebe vrstveny do požadované tloušťky a ve formách pak dotvarovány a dotvrzeny působením tepla, případně i tlaku.
- **tkaniny** - plošné výrobky tvořené vlákny nebo pramenci pravoúhle uložených v útku a osnově působící výztužně ve dvou směrech. V porovnání s jednosměrně orientovanou výztuží jsou tkaniny snáze zpracovatelné. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken nazývající se vazby [8].

Nejpoužívanějšími polotovary pro výrobu kompozitních produktů jsou rovingy a tkaniny. Tkaniny mohou mít různou textilní vazbu a o použití vhodné vazby rozhoduje tvarová členitost forem i požadavky na tuhost a pevnost výsledného kompozitu. Vzájemné uspořádání útku a osnovy vytváří tři základní typy vazeb [8].

Plátnová vazba

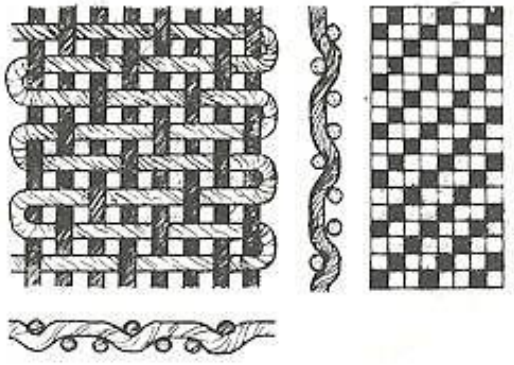
Základní vazba s jednoduchým zpracováním tkaniny, která je nejpevnější, zároveň nejméně poddajná při tvarování v případě, že prameny v osnově i útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramenec útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy, taková je vyvážená plátnová vazba. Volnější a tím poddajnější plátnovou vazbu, nazývající se košíková vazba, tvoří dva a více pramenů útku procházející pod dvěma nebo více nitěmi osnovy [8, 31].



Obr. 3.1 Plátnová vazba [32].

Keprová vazba

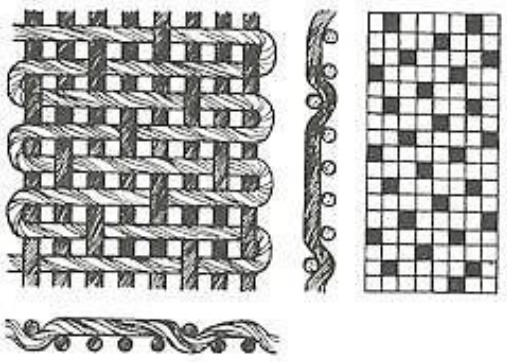
Je vhodná pro tvarové prvky, jelikož jsou tkaniny ohebnější. Keprová vazba vznikne, když útek překříží minimálně dva prameny osnovy, než znovu projde pod jedním nebo více prameny. V další řadě se pak útek posune doleva nebo doprava, vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Tím je na tkanině vytvářen diagonální vzor [8, 31].



Obr. 3.2 Keprová vazba [32].

Atlasová vazba

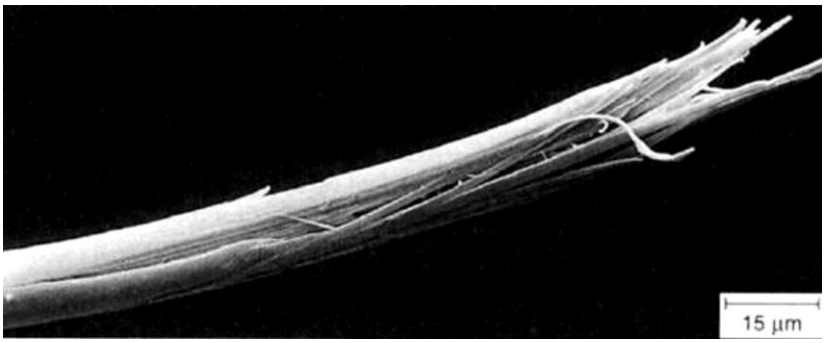
Ze zmíněných vazeb je nejméně pevná. Jeden z pramenů osnovy je překryt jedním pramenem útku ze spodní strany a čtyřmi nebo více prameny shora. Počet pramenů osnovy překrývaných útkem udává tzv. vaznost atlasu, pohybující se v rozmezí 5 až 12. Atlasové tkaniny umožňují dosáhnout velice hladký a lesklý povrch, s dlouhými ploškami, kde vlákna leží rovnoběžně s povrchem. Tato vazba umožňuje získat vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručí minimální zvlnění vláken. Díky tomu je s atlasovou tkaninou možno dosáhnout kompozitu s větší pevností a tuhostí. Je-li použito měkké povrchové úpravy vláken, pak je atlasová tkanina dobře tvarovatelná [8, 31].



Obr. 3.3 Atlasová vazba [32].

3.1 Aramidová vlákna

Aromatická polyamidová vlákna (AF - Aramid Fiber) - zkráceně aramidy, známé pod obchodním názvem „kevlar“, jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Vyznačují se širokým spektrem vlastností, nejvýznamnější je jejich vysoká pevnost, která je často vyšší než u uhlíkových vláken. Další důležitou vlastností je odolnost vůči abrazi a organickým rozpouštědlům [8, 16].



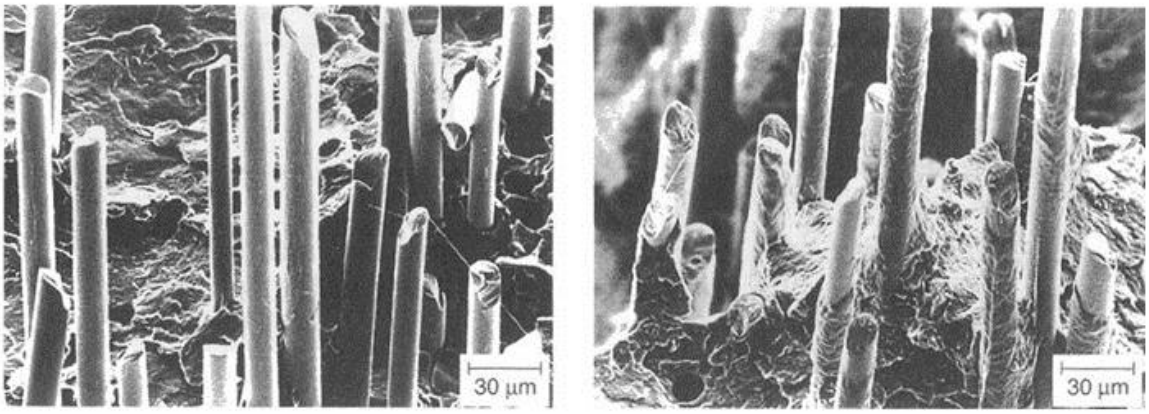
Obr. 3.4 Řez aramidovým vláknem se silným roztřepením v místě lomu [8].

Mezi průmyslově vyráběnými organickými vlákny mají nejvyšší tepelnou odolnost a pokles pevnosti je zaznamenán až při teplotách nad 250 °C. K dalším důležitým přednostem patří vysoká tuhost a nehořlavost. Nedostatkem aramidových vláken je výrazná anizotropie vlastností vyplývající z rozdílů pevnosti mezi kovalentní vazbou (orientace ve směru osy vláken) a pevností podstatně slabší vodíkové vazby (příčně spojená vlákna). Díky tomu je potřeba používat aramidové vlákna především pro aplikace, které jsou namáhané v tahu, naopak se vyvarovat případům namáhání v tlaku. Patří k nejpevnějším, ale zároveň k nejdražším vláknům používaných pro výrobu polymerních kompozitů. Jsou zpracovatelné se všemi reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Kompozity vyztužené těmito vlákny odolávají teplotám až 300 °C, neroztaví se a díky tomu jsou vhodným materiálem na výrobu nejen neprůstřelných vest, ale také protipožárních ochranných obleků [8, 16].

Obr. 3.5 Použití aramidových vláken v reproduktoru [17].

3.2 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna (GF - Glass Fiber) je souhrnný název pro tenká vlákna o průměru 3,5 až 24 μm s pravidelným kruhovým průřezem. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem, mají vysokou prostupnost pro záření a označují se jako E - vlákna (elektrická), jejich sklovina je značena jako E - sklovina. Tento druh skloviny je nejčastěji používaný k výrobě vláken. Tato skleněná vlákna se nejčastěji používají v kompozitech s plastovou matricí [8, 9, 10].



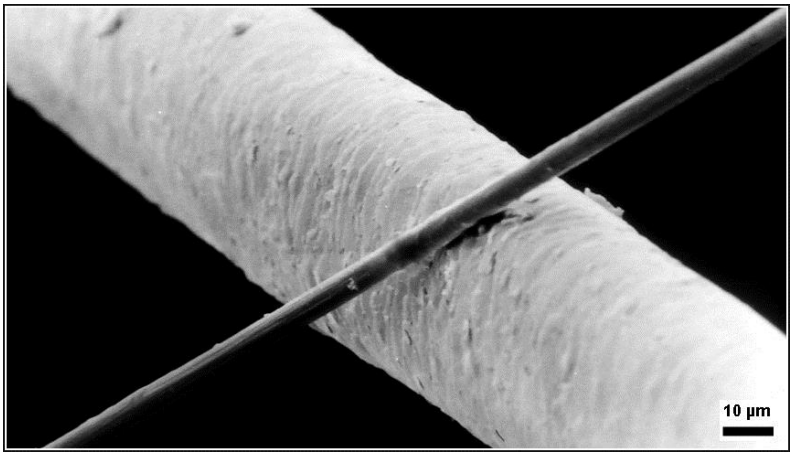
Obr. 3.6 Struktura plastu plněného skleněnými vlákny [18].

Vlákna jsou vyráběna kontinuálně, pak se sdružují do pramene a navíjí. Hlavním důvodem častého použití skleněných vláken je kromě nízké ceny a zároveň vysoké pevnosti, jejich velmi dobrá tepelná a chemická odolnost. Při dlouhodobém působení vysoké teploty nedojde k výraznému snížení hodnot mechanických vlastností. Skleněná vlákna jsou nehořlavá, modul pružnosti v tahu je podobný jako u hliníku a hodnota měrné pevnosti vláken je vcelku vysoká. Mezi nevýhody patří poměrně nízký modul pružnosti, nízká odolnost vůči abrazi a vlhkosti, vysoká měrná hmotnost a také špatná adheze k polymerní matrici [8, 16].

Obr. 3.7 Tažený profil vyztužený skleněnými vlákny [19].

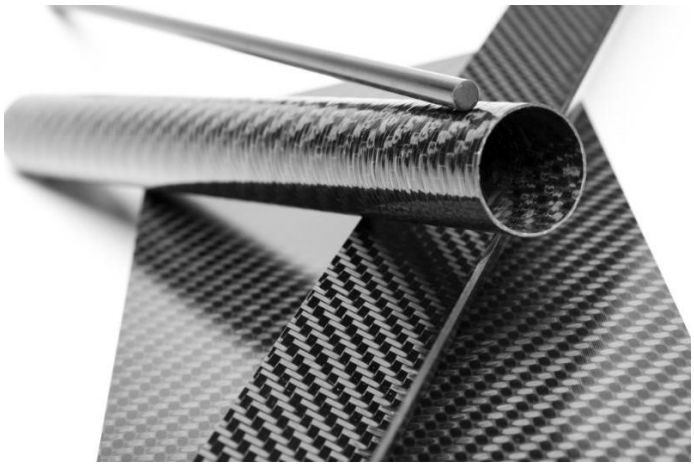
3.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF - Carbon Fiber) jsou vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Mají průměr mezi 5 až 10 μm, vyrábí se při teplotách 800 až 1600 °C a obsahují do 92 % C, při větším obsahu uhlíku jsou tato vlákna už grafitová. Pro výrobu uhlíkových vláken se využívají dva výrobní postupy, první vychází přímo ze surovin bohatých na uhlík, druhý způsob využívá polyakrylonitrilová vlákna (PAN) [8, 16].



Obr. 3.8 Uhlíkové vlákno v porovnání s lidským vlasem [20].

Uhlíková vlákna patří mezi nejpevnější, ale také nejdražší vlákna používané pro výrobu polymerních kompozitů. Přednostmi kompozitů s uhlíkovými vlákny je vysoká korozní odolnost, dobrá tepelná a elektrická vodivost, nevýhodou je možnost ztráty ohebnosti, k níž dochází při delším skladování a tříštivost při destrukci. Dříve se používali především v leteckém a kosmickém průmyslu. Postupně byly zavedené aplikace také do sportovního, automobilového i spotřebního průmyslu. I přes své výjimečné vlastnosti a velký pokles ceny je stále spotřeba uhlíkových vláken na výrobu polymerních kompozitů podstatně nižší než spotřeba skleněných vláken [8, 16].



Obr. 3.9 Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny [21].

4 ZKOUMÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITŮ

Zásadní vliv na chování kompozitů při mechanickém namáhání má především rozložení výztuže, vytvrzení matrice a u vláknových kompozitů je to hlavně množství vláken, jejich zakřivení i orientace. Obecně platí pravidlo, že mechanické vlastnosti kompozitních materiálů stoupají se zvyšujícím se obsahem výztuže až do 80 % podílu. Všechna vlákna musejí být dokonale smočena pojivem. Aby se využily plně pevnosti vláken, musí být zabezpečena dobrá adheze mezi matricí a vlákny, tím je zajištěn dokonalý přenos síly z matrice na výztuž. Díky tomu jsou mnohdy vlákna na svém povrchu chemicky upravována tak, aby se na rozhraní mezi vlákny a matricí vytvořily pevné chemické vazby [8, 29, 30].

4.1 Možnosti využití softwaru Digimat

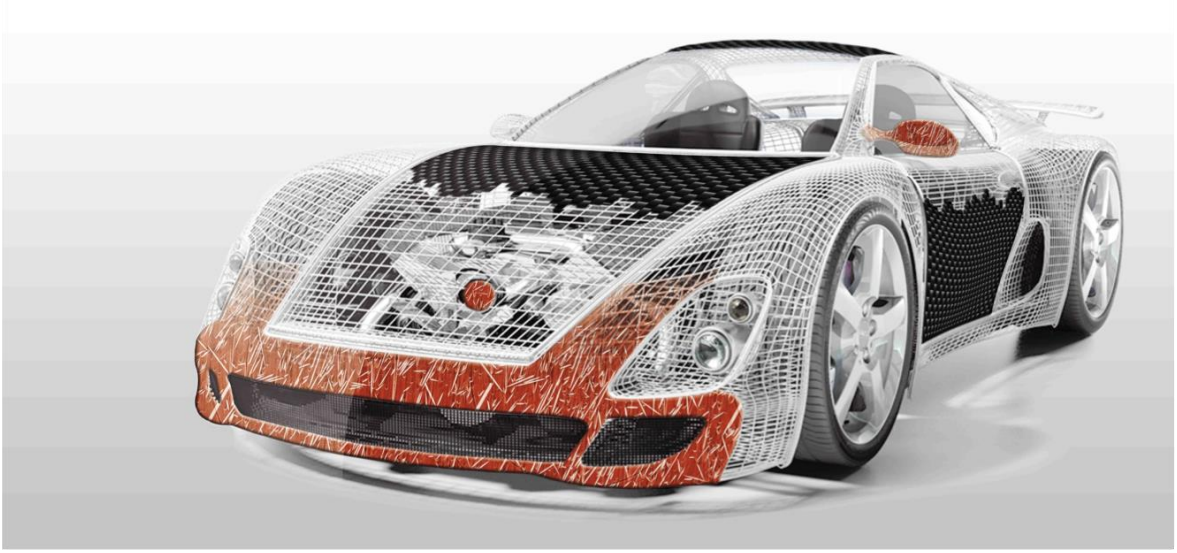
V současné době jsou velmi často produkty z konvenčních materiálů nahrazovány kompozity z důvodů zlepšení vlastností výrobků, podstatnému snížení hmotnosti a prodloužení životnosti. U výrobků z kompozitních materiálů je velice složité předem určit, jaké budou jejich mechanické vlastnosti a to jak statické, tak dynamické. Díky tomuto faktu musí být často kompozity podrobeny různým zkouškám pro získání potřebných informací o vlastnostech a chování vyráběného produktu. Tato metoda je však zdlouhavá a finančně nákladná. Právě pro usnadnění výrobního procesu byl společností e-Xstream Engineering vyvinut unikátní software Digimat pro pokročilé modelování materiálových vlastností a struktur. Tento program urychluje proces vývoje kompozitních materiálů a konstrukcí. Digimat se používá k provádění podrobných analýz materiálů na mikroskopické úrovni a k odvození mechanických materiálových vlastností modelu [33].

Obr. 4.1 Logo softwaru Digimat od společnosti e-Xstream [32].

Digimat je sada nástrojů s anizotropním přístupem k materiálu, který dokáže predikovat mechanické chování, stejně jako chemické, tepelné, elektrické a další vlastnosti. Digimat technologie poskytuje designové nástroje, které dávají uživateli možnost navrhovat a zkoumat chování kompozitních produktů. Díky tomuto programu uživatel získá popis pokročilých materiálových vlastností pro vývoj nových výrobků, generování materiálových struktur a prognóz budoucích vlastností nově vyvíjeného materiálu. Namodelování výrobku umožňuje využít maximální potenciál materiálu [33, 34].

Ve 20. století kompozitním materiálům byla věnována větší pozornost především v oblastech kosmického, vojenského a leteckého průmyslu, později postupně začaly kompozity pronikat i do civilních odvětví. Nyní jednou z hlavních oblastí využívajících kompozitní materiály je automobilový průmysl, kde nachází své uplatnění také program Digimat.

Mnoho kovových součástek vyráběných pro automobilový průmysl je nyní nahrazováno kompozity s termoplastickou matricí vyztužené krátkými skleněnými vlákny. Tento krok je uskutečněn z ekonomických důvodů pro odlehčení konstrukcí. Cílem je zaručit stejnou úroveň spolehlivosti jako u kovových komponentů. Tento vývoj sebou přináší náročný úkol vzhledem k velkému množství faktorů ovlivňujících únavovou životnost. Zejména orientace vláken má vliv na únavovou pevnost a souvisí s dalšími ovlivňujícími faktory [36].



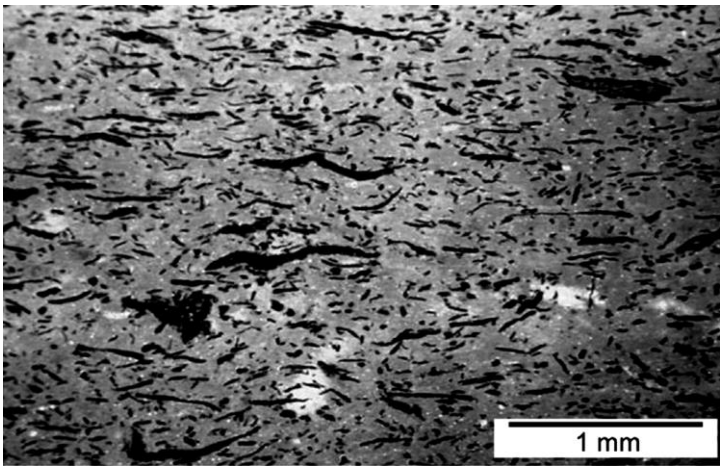
Obr. 4.2 Využití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu [35].

4.1.1 Vliv orientace vláken na únavovou pevnost výrobku

K nalezení vhodného materiálu pro konkrétní výrobek byly provedeny analýzy na různých typech vzorků s různou distribucí i orientací vláken. Hlavní rozdíly mezi těmito vzorky byly velikost, tvar, a výrobní proces vedoucí k odlišné geometrii, povrchové úpravy a rozložení orientace vláken. Tři různé druhy vzorků byly testovány při únavovém zatížení s konstantní amplitudou. Pro odhad životnosti bylo využito také výpočtů různých programů. Rovněž software Digimat předložil takzvaný index zarovnání, který popisuje orientaci vláken ve vztahu k místní napjatosti [36].

4.1.2 Tahové chování kompozitu vyztuženého přírodními vlákny

Rostlinná vlákna jsou stále více preferována v některých aplikacích, jako jsou lehké díly pro automobily a tak mnohdy nahrazují skleněnou výztuž kompozitů. Skleněná vlákna jsou relativně tuhá a zůstávají tyčovitá v průběhu vstřikování, na rozdíl od rostlinných vláken, které bývají různě deformována (zakřivena, přehnutá, apod.). Důsledky těchto rozdílů byly zkoumány u tahových zkušebních vzorků na příkladu kompozitního materiálu vyztuženého vlákny dřeva v polypropylenové matrici [37].



Obr. 4.3 Mikroskopický snímek struktury kompozitu [37].

Tahové vlastnosti byly měřeny mechanickým testováním za použití stroje Instron 5566. Kromě experimentálního testu byl použit software Digimat a výsledky tahové zkoušky byly poté srovnány s hodnotami získanými virtuální metodou [37].

Tahová křivka vyhodnocená programem Digimat se nejdříve držela v těsné blízkosti s křivkou získanou experimentální cestou. Mezi křivkami začala vznikat mezera až při vyšších hodnotách namáhání. Odchylka mezi výstupem ze softwaru Digimat a experimentální metody byla přičítána neelastickou deformací výztuže [37].

4.1.3 Modely kompozitů s náhodně distribuovanými dutinami

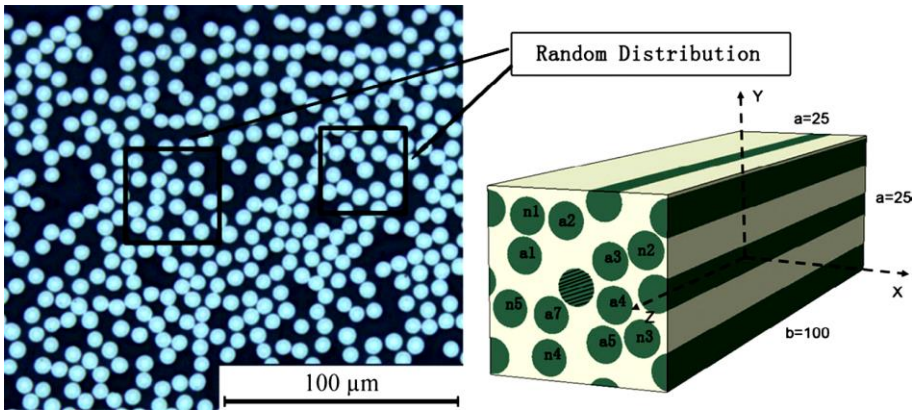
Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny a epoxydovou matricí byl použit pro zkoumání přesnosti simulované metody, ta byla ověřena porovnáním numerické predikce pomocí analytických a experimentálních výsledků. U kompozitů vyztužených vlákny jsou vlastnosti silně ovlivněny vadami zavedenými z výrobního procesu, zejména dutinami. Numerickou metodou byla zkoumána interakce mezi ultrazvukovými vlnami a vlákny kompozitů s póry. Software Digimat byl použit k modelaci kompozitu obsahující dutiny, nejprve tedy program vytvořil mikrostrukturu s náhodně distribuovanými dutinami [38].

Ultrazvukové nedestruktivní testování je považováno za nejběžnější vyšetřovací metodu pro charakterizaci kompozitních závad a poškození v důsledku jeho vysoké citlivosti, přesnosti a jednoduchosti. To znamená, že je silně rostoucí potřeba prozkoumat vliv dutin u dílů z kompozitů na ultrazvukovém útlumu během procesu hodnocení kvality. Dalším krokem byla samotná simulace procesu, vyhodnocení a porovnání výsledků [38].

Přesnost predikce této numerické metody byla zkoumána porovnáním s analytickými a experimentálními přístupy. Zjednodušení tvaru dutin, zanedbávání nepravidelné distribuci a existence dutin se berou v úvahu jako rozdíl mezi výsledky numerické a experimentální metody. Navzdory tomu, že výsledky simulace jsou nižší, než tomu je u experimentálního řešení, ukázalo se, tento simulovaný postup může být nejen efektivní návod pro výrobní proces, ale také poskytuje teoretický základ pro snížení stupně dutin, aby se zvýšila výkonnost kompozitů [38].

4.1.4 Analýza přenosu napětí v kompozitech mezi jednosměrnými vlákny

U jednosměrných kompozitů má zásadní vliv na přenos napětí mezi vlákny jejich porušení. Dále se napětí přenáší z porušených vláken do nejbližšího okolí na matrici. V důsledku toho se zde koncentruje napětí, které je postupem na nejbližší vlákna snižováno [39].



Obr. 4.4 Vymodelovaný kompozit v porovnání se skutečnou strukturou [39].

Trojrozměrný reprezentativní objemový element (RVE) kompozitů s jednosměrně orientovanými a náhodně distribuovanými vlákny byl vytvořen pomocí softwaru Digimat-FE. Byly zkoumány účinky napětí kompozitu v místě porušení vláken a rozptyl přenosu napětí do vzdálených míst od místa defektu. Studie prokázala, že při zvyšujícím se poměru vlákno/matrice dochází k postupnému snižování tuhosti matrice a zvýšení napětí v místě kolem porušení vláken [39].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je ověřit shodu experimentálně získaných vlastností zvoleného kompozitního systému s analytickým modelem.

Kompozitní vzorky s dlouhovláknovou výztuží o známých vlastnostech budou impregnovány epoxidovou matricí. Takto připravené zkušební objekty budou podrobeny experimentálnímu testování v podobě tahové zkoušky.

Současně tato struktura kompozitu bude vymodelována a následně zanalyzována pomocí softwaru Digimat.

Nakonec takto získané tahové vlastnosti analytického modelu budou porovnány s výslednými hodnotami experimentální metody.

5.1 Stanovené cíle

- Návrh kompozitního systému se zvolenou orientací.
- Příprava zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 527 - 4.
- Experimentální testování kompozitů.
- Vyhodnocení získaných výsledků.
- Modelování kompozitních systémů v programu Digimat.
- Pozorování jednotlivých modelů.
- Závěr diplomové práce a diskuse dosažených výsledků.

6 NÁVRH KOMPOZITU A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Kompozitní systém byl nejdříve navržen a poté proběhla výroba zkušebních těles.

6.1 Návrh kompozitního systému

Pro ověřování vlastností kompozitu byl zvolen systém složený z výztuže v podobě uhlíkové tkaniny nasycené epoxidovou pryskyřicí. Vyrobeny byly dva druhy vzorků obsahující rozdílný typ tkaniny, který se liší svoji vazbou.

6.1.1 Druh použité výztuže

Jako výztužný systém byly aplikovány uhlíkové tkaniny od společnosti Kordárna plus a.s. s označením KORDCARBON CC 200 (technické listy v příloze I a II).

Použité byly uhlíkové tkaniny obsahující plátnovou a keprovou vazbu s jednotnou gramáží 200 g/m^2. Pramence v osnově i útku obsahují vlákna s označením Toray 3K 200 tex.

Obr. 6.1 Uhlíková tkanina CC 200 T - 100.

6.1.2 Druh použité matrice

Tkaniny byly impregnovány epoxidovou pryskyřicí Havel L 285 (technický list v příloze III) tvrzenou tužidlem H 285 v míchacím poměru 100 : 40 a viskozitou 600 až 900 mPa·s při teplotě 25 °C.

6.2 Fáze příprav

Před zahájením samotné výroby kompozitu je důležitou a nedílnou součástí příprava jednotlivých etap výroby.

6.2.1 Příprava formy

Kvalitní příprava formy je jednou ze základních etap pro výrobu kompozitu bez povrchových vad. Každá nerovnost formy nebo její nedostatečné navoskování se projeví na výrobku, jelikož forma je přesným negativem budoucího produktu.

K výrobě zkušebních těles poslouží rovná skleněná plocha, která musí být pečlivě očištěna a separována voskem určeným k těmto účelům. Proces leštění a nanášení separačního vosku se opakuje pětkrát po pěti minutách, podle doporučení výrobce.

6.2.2 Příprava výztuže - uhlíkové tkaniny

Nejdříve byla uhlíková tkanina měřena a nastříhána, podle počtu vyráběných zkušebních tělísek a také s ohledem k rozměrům formy, na čtverce o velikosti 320 x 320 mm. Při manipulaci s uhlíkovou tkaninou je důležité opatrné zacházení v důsledku možnosti způsobení poškození a tím vytvoření neopravitelných vad kompozitu, které mohou mít podstatný negativní vliv na jeho chování.

6.2.3 Příprava matrice - epoxidové směsi

Základním parametrem pro výrobu epoxidové směsi je hmotnost prosycované tkaniny. Získanou hodnotu je nutné vynásobit bezpečnostním koeficientem nacházejícím se v rozmezí 20 až 40 %. Výsledkem je hmotnost potřebné epoxidové směsi.

Epoxidová pryskyřice Havel L 285 byla smíchána v poměru 100 : 40 s tužidlem H 285. Míchací proces musí být velmi důkladný, v opačném případě je nebezpečí vzniku nevytvrzených míst v produktu nebo ztráty požadovaných vlastností.

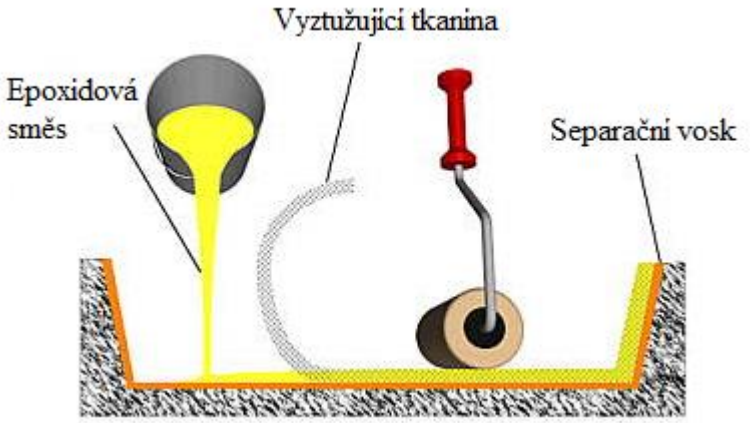
Smícháním směsi končí veškeré přípravy a následuje proces laminování, ten je nutný stihnout ukončit než epoxidová směs začne gelovatět, kdy je již nezpracovatelná. Tato doba se nazývá Gel-time, stanovuje ji výrobce a liší se podle druhu pryskyřice.

6.3 Výroba zkušebních těles

Po důkladné přípravě je možné přistoupit k samotné výrobě zkušebních těles z kompozitního materiálu pro tahovou zkoušku.

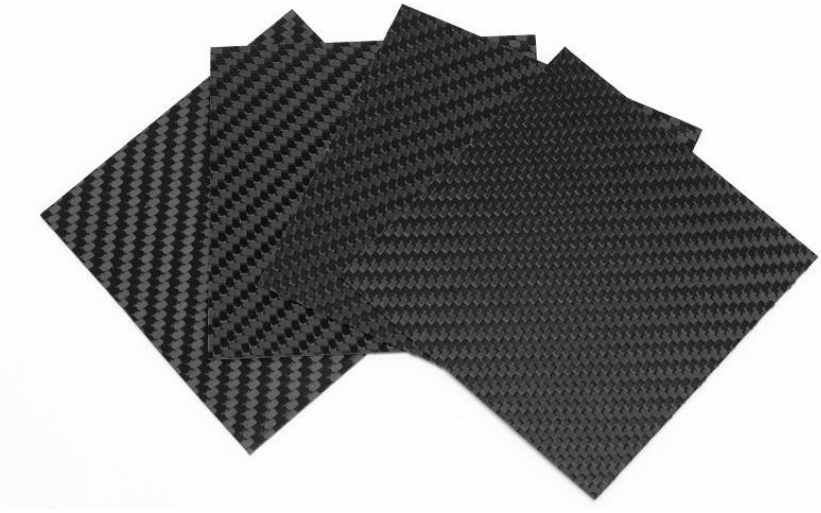
6.3.1 Technologie ručního laminování

Nejprve se nachystaná epoxidová směs nanese na připravenou formu, kde musí být rovnoměrně rozprostřena po celé ploše. Na tuto vrstvu směsi se položí tkanina, na kterou je opět nanesena epoxidová směs a pomocí kovového válečku se působením přiměřeného tlaku vytlačí vzduchové bubliny obsažené ve směsi.



Obr. 6.2 Proces ručního laminování kompozitu [40].

Podle plánovaného počtu vrstev kompozitu je tímto způsobem opakováno kladení uhlíkové tkaniny. Po poslední vrstvě se laminát nechá nejlépe 24 hodin vytvrdit a poté je kompozitní systém připraven k odformování.

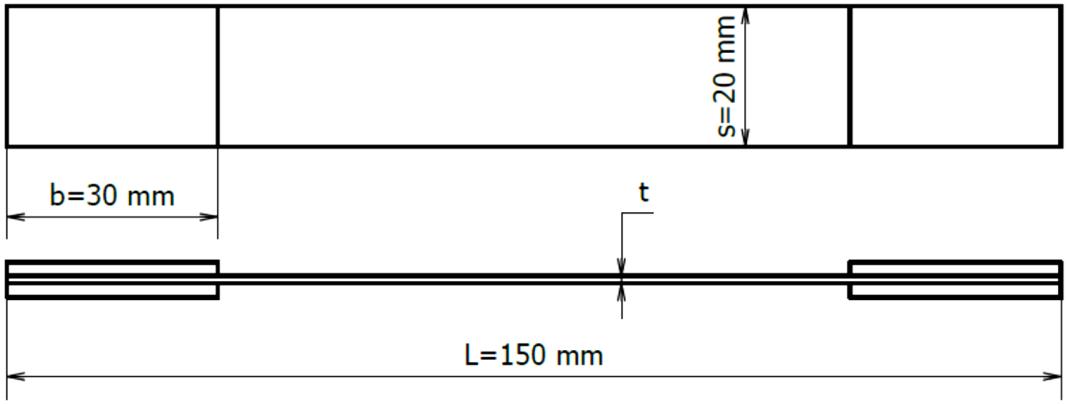


Obr. 6.3 Pláty uhlíkových kompozitů [41].

6.3.2 Úprava laminátu na vzorky

Vytvrzené a odformované laminátové pláty byly nejdříve upraveny ořezáním okrajů, následně byly naměřeny a orýsovány vzorky pro zkoušku tahem podle normy ČSN EN ISO 527 - 4. Dále byly tyto zkušební tělíska vyřezány pomocí úhlové brusky.

Bylo vyrobeno 15 zkušebních tělísek obsahující jednu vrstvu uhlíkové tkaniny s plátnovou vazbou o rozměrech 150 x 20 mm a o tloušťce 0,35 mm. Dalších 15 vzorků bylo z kompozitu s jednou vrstvou uhlíkové tkaniny s vazbou kepr o stejných rozměrech 150 x 20 mm jako v předchozím případě jen s rozdílnou tloušťkou 0,41 mm.



Obr. 6.4 Základní rozměry kompozitního vzorku pro tahovou zkoušku.

Podle normy ČSN EN ISO 527 - 4 byly konce vzorků opatřeny potřebným zesílením z důvodu zamezení možného porušení čelistmi a tím způsobení nechtěného roztržení zkušebních těles v místě uchycení do sklíčidel stroje. Pro zesílení těchto konců vzorků byly na obou stranách nalepeny kompozitní výložky o normou předepsaných tloušťkách vyztužené uhlíkovou tkaninou KORDCARBON CC 200.

Obr. 6.5 3D model zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku.

7 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ

Po dokončení výroby všech zkušebních těles proběhla zkouška tahem za účelem získání vlastností kompozitních systémů experimentální cestou.

7.1 Použité zkušební zařízení

K získání výsledků experimentálním testováním kompozitních výrobků byl použit univerzální zkušební stroj ZWICK 1456. Tento stroj je schopný provádět zkoušky také na tlak nebo ohyb a zkoušený vzorek dokáže zatěžovat staticky nebo dynamicky.

Obr. 7.1 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456.

Tab. 7.1 Technické parametry stroje ZWICK 1456.

Parametr stroje	Hodnota
Maximální zkušební síla	20 kN
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Strojová výška	1 284 mm
Celková výška	2 012 mm
Celková šířka	630 mm
Hmotnost	150 kg

7.2 Průběh tahové zkoušky

Nejprve se umístilo zkušební těleso do sklíčidel ve vertikální poloze a poté byly konce vzorku pevně uchyceny čelistmi stroje.

Pro získání tahových vlastností byly na kompozit umístěny senzory ve vzdálenosti 30 mm, pak stačilo v obsluhujícím programu zadat rozměry vzorku a informace nutné pro spuštění tahové zkoušky.

Po zatížení silou se začne zkušební těleso deformovat a v důsledku toho měnit své rozměry až do celkové destrukce vzorku v podobě přetržení kompozitu (viz. obr. 7.2). Prodloužením zkušebního tělesa se mění jeho původní délka a vzniklá délková změna se definuje jako poměrné neboli relativní prodloužení.

Obr. 7.2 Sklíčidla stroje ZWICK 1456 po roztržení zkušebního vzorku [42].

7.3 Výsledky experimentálního testování

Získané výsledky z tahové zkoušky byly zaznamenávány, zobrazeny a vyhodnocovány v testovacím softwaru testXpert II od společnosti Zwick Roell.

Účelem experimentální tahové zkoušky bylo získání těchto tahových vlastností kompozitu:

- **Youngův modul pružnosti (modul pružnosti v tahu)** - je definován jako poměr napětí a vyvolané deformace, vyjádřen vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad [GPa]$$

- **Poměrná (relativní) deformace** - poměr prodloužení zkušebního tělesa ΔL k jeho původní délce L_0:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \qquad [\%]$$

- **Maximální napětí na mezi pevnosti** - je to největší dosažené napětí, které lze vypočítat jako poměr maximální síly dosažené při tahové zkoušce F_m a počátečního průřezu zkušebního tělesa S_0:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} \qquad [MPa]$$

Ke zjištěným hodnotám těchto vlastností byla následně vypočtena jejich střední aritmetická hodnota (aritmetický průměr) $\bar{x}$ a směrodatná odchylka **s**.

Vzorec pro výpočet aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{1}{n} \cdot \left(x_1 + x_2 + ... + x_n \right)$$

Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x} \right)^2}$$

Díky nedostatečné síle ve sklíčidlech a tím zapříčiněnému prokluzu, musely být použity hodnoty experimentálního testování tahového chování z diplomové práce Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny z roku 2014 psanou Václavem Leciánem [42].

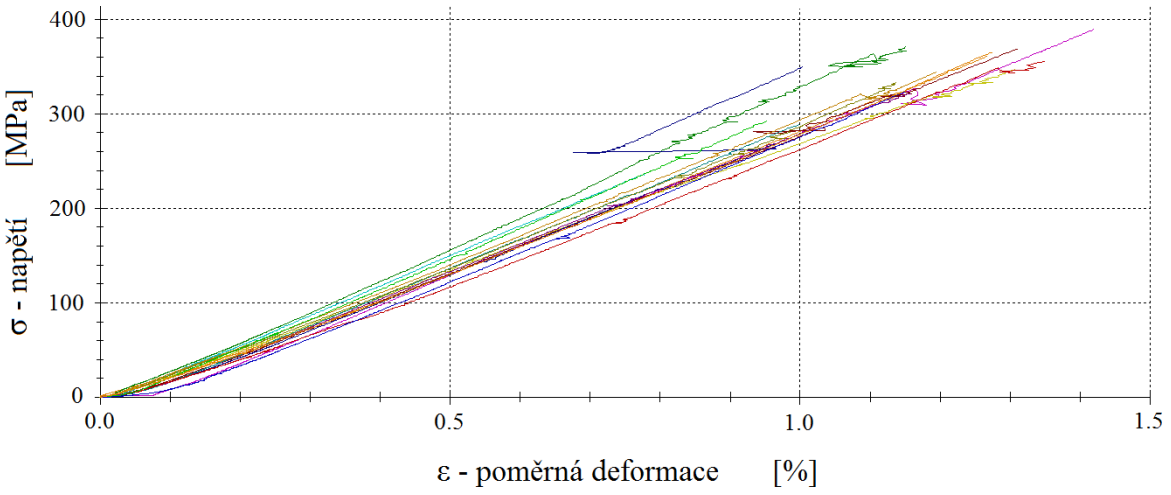
7.3.1 Kompozit vyztužený tkaninou s plátnovou vazbou

První z testovaných kompozitních systémů byly vzorky obsahující jednu vrstvu tkaniny s plátnovou vazbou v epoxidové pryskyřici Havel L285.

Tab. 7.2 Tahové vlastnosti kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s vazbou plátno.

n - číslo zkušebního tělesa	σ_m - napětí na mezi pevnosti [MPa]	ε - poměrná deformace [%]	E - modul pružnosti v tahu [GPa]
01	365,0	1,3	27,2
02	389,0	1,4	30,7
03	236,0	0,8	30,6
04	347,0	1,3	26,3
05	369,0	1,3	25,6
06	371,0	1,2	29,7
07	350,0	1,0	28,8
08	345,0	1,2	27,6
09	321,0	1,2	26,4
10	288,0	1,0	27,5
11	334,0	1,1	27,3
12	356,0	1,3	24,8
13	293,0	1,0	30,0
14	324,0	1,2	29,0
15	361,0	1,3	27,6
$\bar{x}$	**337,0**	**1,2**	**28,0**
s	**39,5**	**0,2**	**1,8**

Z výsledků tahové zkoušky je zřejmé, že hodnota aritmetického průměru maximálního napětí je 337 MPa při poměrné deformaci 1,2 %. Průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu u kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s plátnovou vazbou vyšla 28 000 MPa. Prodloužení zkušebních těles působením síly F_m = 2 670 N vyšlo průměrně ΔL = 1,42 mm.



Obr. 7.3 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu - plátnová vazba.

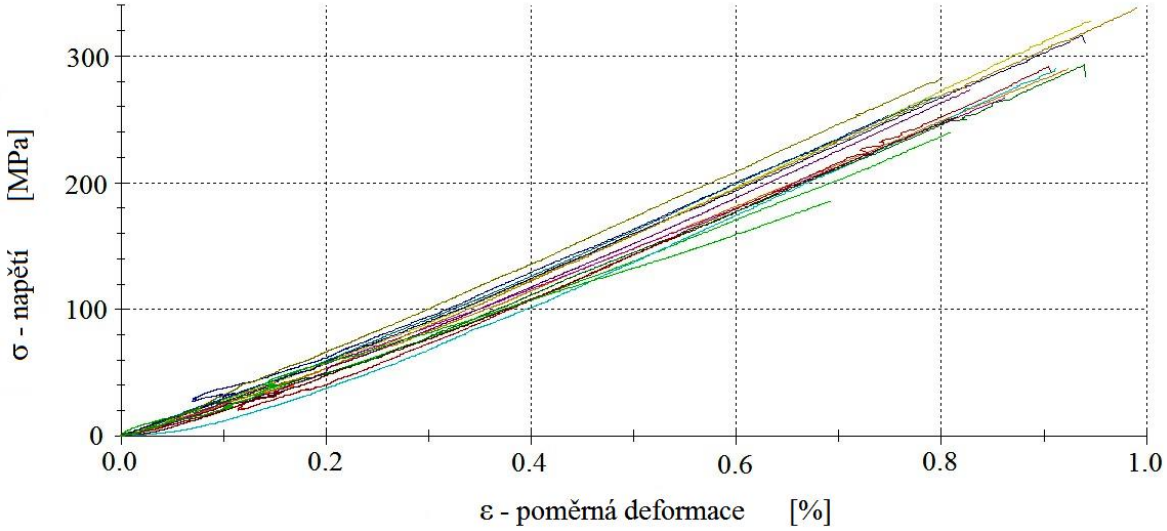
7.3.2 Kompozit vyztužený tkaninou s keprovou vazbou

Druhý typ zkušebních kompozitních vzorků podrobený experimentální tahové zkoušce byl složen z jedné vrstvy tkaniny s keprovou vazbou v epoxidové pryskyřici Havel L285.

Tab. 7.3 Tahové vlastnosti kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s vazbou kepr.

n - číslo zkušebního tělesa	σ_m - napětí na mezi pevnosti [MPa]	ε - poměrná deformace [%]	E - modul pružnosti v tahu [GPa]
01	240,0	0,8	29,0
02	261,0	0,8	33,7
03	290,0	0,9	30,6
04	267,0	0,9	29,9
05	290,0	0,9	31,9
06	328,0	0,9	29,7
07	252,0	0,8	27,3
08	293,0	0,9	31,2
09	316,0	0,8	30,0
10	338,0	1,0	29,8
11	273,0	0,8	28,6
12	268,0	0,8	30,8
13	283,0	0,8	35,3
14	292,0	0,9	33,5
15	185,0	0,7	28,9
x	**278,0**	**0,9**	**30,7**
s	**37,4**	**0,1**	**2,1**

Výsledek aritmetického průměru maximálního napětí je 278 MPa a průměr relativní deformace vyšel 0,9 %. Youngův modul pružnosti u kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s keprovou vazbou se pohybuje kolem 30 700 MPa. Průměrné prodloužení kompozitních vzorků při zatížení maximální silou F_m = 2 350 N bylo ΔL = 1,68 mm.



Obr. 7.4 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu - keprová vazba.

7.3.3 Výpočet hustoty kompozitu směšovacím pravidlem

Posledním ze zkoumaných parametrů je měrná hmotnost (hustota) kompozitu, která byla vypočítána pro oba případy směšovacím pravidlem pomocí vzorce:

$$\rho_C = \rho_v \cdot \frac{V_v}{V_c} + \rho_m \cdot \frac{V_m}{V_c} \qquad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

kde je: ρ_C …… hustota kompozitu V_C …… objem kompozitu

ρ_v …… hustota výztuže V_v …… objem výztuže

ρ_m …… hustota matrice V_m …… objem matrice

Výpočet hustoty kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s plátnovou vazbou:

$$\rho_{Cp} = \rho_v \cdot \frac{V_v}{V_c} + \rho_m \cdot \frac{V_m}{V_c} = 1{,}76 \cdot \frac{113{,}6}{350} + 1{,}2 \cdot \frac{236{,}4}{350} = 1{,}382 \ \frac{g}{cm^3} = 1382 \ \frac{kg}{m^3}$$

Výpočet hustoty kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s keprovou vazbou:

$$\rho_{Ck} = \rho_v \cdot \frac{V_v}{V_c} + \rho_m \cdot \frac{V_m}{V_c} = 1{,}76 \cdot \frac{113{,}6}{410} + 1{,}2 \cdot \frac{296{,}4}{410} = 1{,}355 \ \frac{g}{cm^3} = 1355 \ \frac{kg}{m^3}$$

7.3.4 Vyhodnocení získaných výsledků

V experimentálním testování bylo zkoušeno 15 vzorků z každého typu kompozitu pro získání dostatečné přesnosti výsledků. Ze zjištěných hodnot i vykreslených grafů je patrné, že výsledky u obou druhů zkoumaných kompozitů jsou dostatečně reprezentativní díky malému rozptylu hodnot a minimální odchylce od průměru.

Je známo, že plátnová vazba je pevnější oproti vazbě keprové, bylo tedy podle očekávání nutné vyvinout větší sílu (a tím vyvolat vyšší napětí) pro přetržení kompozitního systému vyztuženého uhlíkovou tkaninou s plátnovou vazbou. Napětí, které bylo potřeba k porušení kompozitu vyztuženým jednou vrstvou tkaniny s keprovou vazbou, bylo o 17,5 % nižší než u kompozitu s jednou vrstvou tkaniny o vazbě plátno.

Naopak Youngův modul neboli modul pružnosti v tahu byl vyšší u kompozitu s keprovou vazbou a to přibližně o 8,8 %.

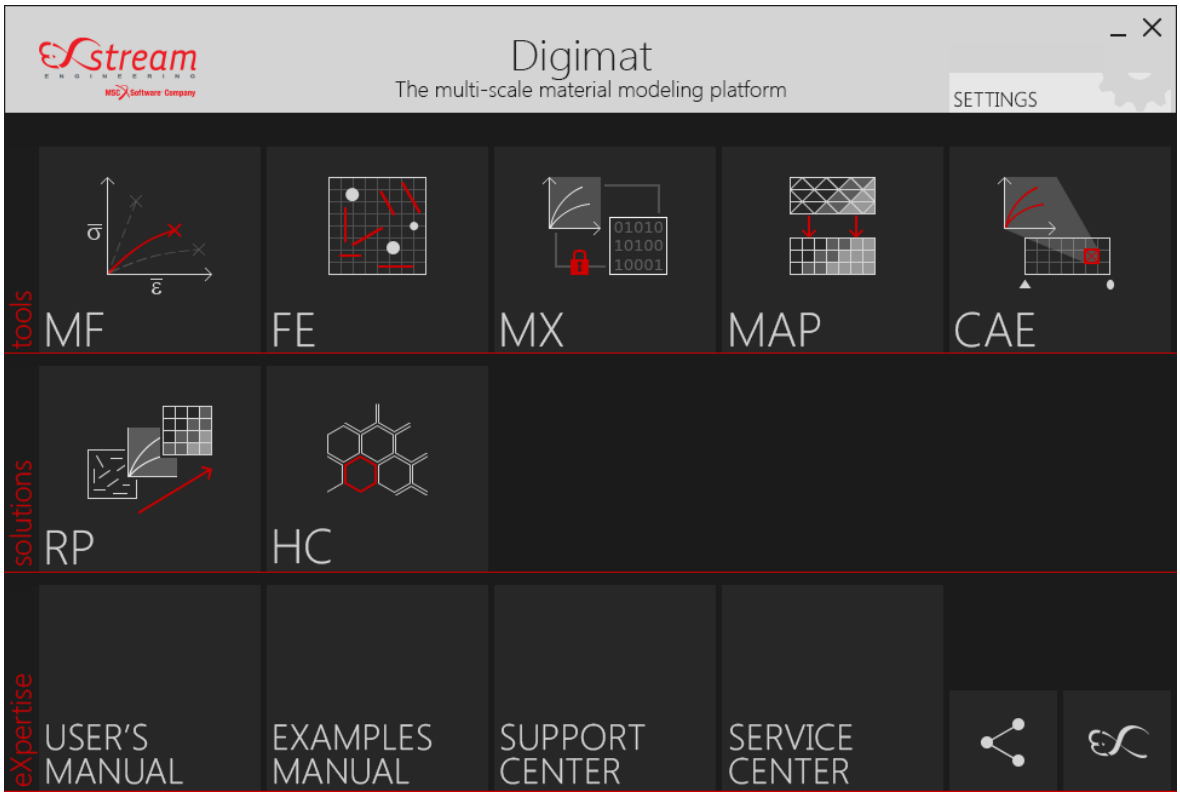
Pro oba druhy tkanin platí jednotná gramáž (200 g/m^2 ± 3 %), ale vzorky s vazbou plátnovou měly menší tloušťku, díky tomuto faktu vyšla měrná hmotnost nepatrně nižší u kompozitu vyztuženého tkaninou s keprovou vazbou.

8 MODELOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ

Společnost e-Xstream engineering již vyvinula, díky neustálému zdokonalování a vylepšování svého produktu, několik verzí softwaru Digimat. V současné době je na trhu nejnovější forma programu s označením 6.0.1. Z důvodu možného přístupu je v této diplomové práci popisován a využíván Digimat 5.1.2.

Bezprostředně po otevření softwaru se objeví úvodní okno programu (obr. 8.1) rozdělené do třech základních kategorií:

- **Tools** - Kompletní sada interoperabilních softwarových produktů se zaměřením na expertní využití pro účely materiálového inženýrství.
  Do této kategorie patří MF (Mean Field), FE (Finite Element), MX (Material eXchange), MAP (mapping) a CAE (Computer Aided engineering).
- **Solution** - Uživatelsky přívětivá technologie Digimat s plně integrovaným grafickým rozhraním pro snadné řešení konkrétních úkolů.
  Zde se nachází RP (Reinforced Plastics) a HC (HoneyComb).
- **eXpertise** - Dokumenty popisující mikromechanické modelování s názornými příklady a přístupem k e-Xstream podpoře a školení včetně webového fóra.



Obr. 8.1 Úvodní okno programu Digimat.

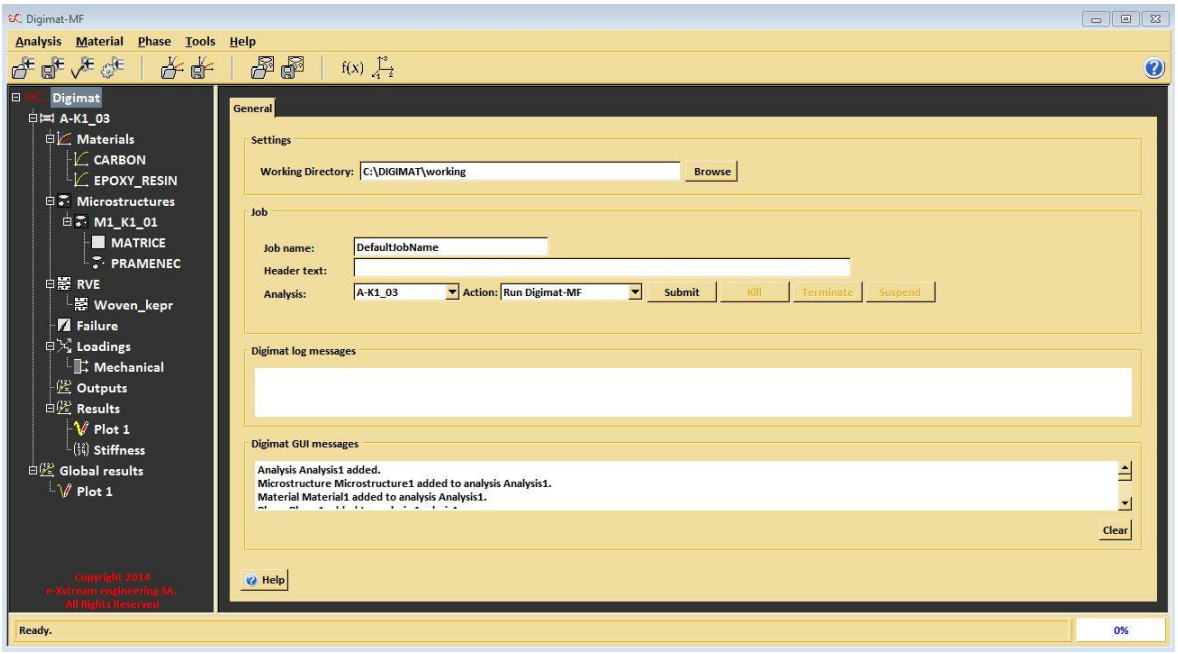
8.1 Digimat-MF

Pro modelování kompozitních systémů a k následné analýze pro získání mechanických vlastností byla využita sekce MF (Mean Field) ze softwarové sady Digimat.

Digimat-MF je nástroj pro homogenizaci struktury a rychlý výpočet makroskopického chování kompozitních materiálů. K získání těchto výsledků se využívá známých vlastností jednotlivých fází a definované mikrostruktury kompozitů. Digimat-MF se zaměřuje převážně na realistické předpovědi nelineárního, konstitutivního chování vícefázových materiálů [33].

Pracovní prostřední MF (obr. 8.2) má stejnou nebo velice podobnou strukturu jako ostatní nástroje softwaru Digimat a skládá se z těchto třech klíčových segmentů:

- **Panel nástrojů** - Je základní částí programu obsahující lištu nabídek v kombinaci s pásem ikon vlastnící funkce jako je například otevření, uložení, kontrola nebo spuštění analýzy, načtení či uložení materiálového nastavení a mnoho dalších možností usnadňující práci v softwaru.
- **Syntaktický strom** - Nachází se pod hlavním panelem na levé straně programu.
- **Hlavní plocha** - Je v pravé oblasti programu a zaplňuje největší prostor pracovního okna.



Obr. 8.2 Pracovní prostředí nástroje Digimat-MF.

8.2 Postup

Celý proces začíná vytvořením nové analýzy, v níž následně probíhá tvorba modelu reprezentativního objemového elementu. Po jejím založení se objeví hierarchický strom s množstvím položek nezbytných pro vytvoření úplné studie.

První a základní položka ve stromu má název „Digimat“. V horní části hlavního prostoru je možné nastavit pracovní adresář, kam se ukládají všechny výsledné soubory. Dále se zde nachází kolonka pro zadání pracovního pojmenování analýzy. Následující pole s názvem „Header text“ umožňuje uživateli přidávat jakékoli informace, které nemají žádný vliv na průběh analýzy ani na výpočty. Specifickou oblastí jsou dvě výstupní pole v tomto okně určené k zobrazení informativních zpráv a odesílání údajů o stavu prováděné akce. Závisí na tom, zda je spuštěn výpočet nebo jestli probíhá kontrola správného nastavení analýzy.

Následující položka v syntaktickém stromě zahrnuje dvě karty na hlavní ploše a je pojmenována podle názvu tvořené analýzy. Ve složce zabývající se obecnými parametry se nachází možnost výběru materiálového modeláře.

Prostřednictvím nástroje Digimat-MF mohou být provedeny čtyři typy analýzy, jsou to mechanické, termo-mechanické, tepelné a elektrické. Zvolený typ určuje materiálové možnosti, které jsou uživateli k dispozici při definování analýzy. Například cílem tepelné a elektrické analýzy je výpočet tepelné nebo elektrické vodivosti kompozitu.

Dále je zde připravena možnost zapnutí nebo vypnutí Mean Field homogenization (MFH), což lze přeložit jako střední pole homogenizace. Tuto volbu je nutné vypnout v případě, že materiálový výpočet je třeba provést na homogenním materiálu a tehdy bude brána v úvahu při výpočtu pouze fáze matrice.

Druhá karta této položky se zaměřuje na integrační parametry, kde jsou ovládány následující proměnné:

- Časové intervaly provozu analýzy.
- Tolerance homogenizačního schématu.
- Vkládání prvků ovládajících rovnováhu.
- Úroveň integračního systému.
- Volba orientace tenzorové diskretizace (náhrada spojitého prostředí systémem diskrétních bodů).

8.2.1 Materiálové parametry

Důležitým bodem ve stromu Digimat je položka „Materials“, kde se vytvoří jednotlivé fáze všech použitých materiálů přítomných v kompozitu. Po přidání nového materiálu se zobrazí na hlavní ploše dvě karty. V kartě Model lze zadat jméno materiálu a dále je nutné určit konstitutivní zákon.

Materiál výztuže

V případě uhlíkové výztuže byl zvolen elastický model a izotropní chování materiálu. Stisknutím tlačítka „Validate“ program provede přesun na kartu parametrů, kde jsou určovány konkrétní materiálové vlastnosti.

Zadané údaje o karbonové výztuži získané z materiálového listu:

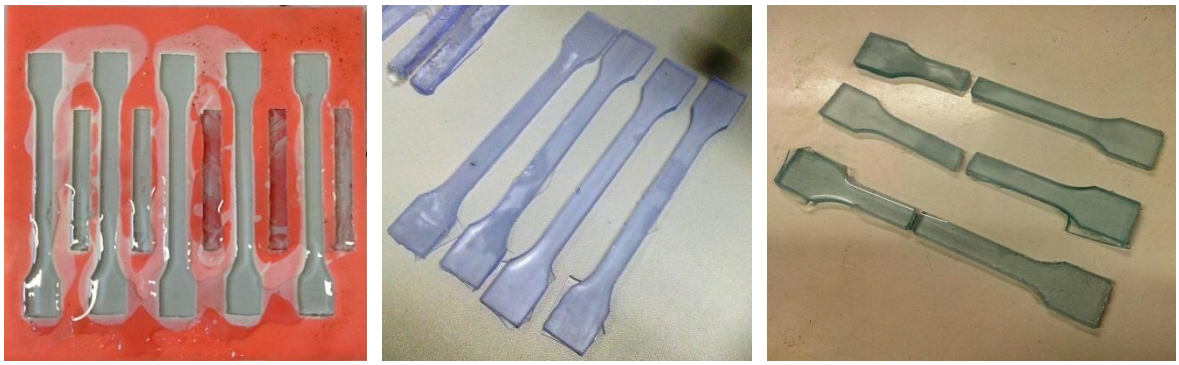
- Hustota - 1,76 g/cm^3
- Youngův modul - 232 GPa
- Poissonovo číslo - 0,2

Po definování měrné hmotnosti a elastických parametrů, jako je modul pružnosti v tahu a Poissonovo číslo, vykreslí software Digimat materiálovou křivku se závislostí napětí na deformaci.

Tlačítkem „Create“ se pak potvrdí správnost zadaných hodnot a materiál je tím vytvořen.

Materiál matrice

Stejně jako u výztuže je nutné také u fáze matrice z epoxidové pryskyřice použít model elastický, jelikož software Digimat při tvorbě kompozitních systémů vyztužených tkaninou pracuje výhradně s materiály s elastickým chováním. Pro získání vlastností matrice byly vyrobeny zkušební tělesa z epoxidové pryskyřice a následně vykonána tahová zkouška.



Obr. 8.3 Proces výroby a testování zkušebních těles z pryskyřice Havel L 285.

Nejprve byla epoxidová pryskyřice Havel L 285 smíchána v poměru 100 : 40 s tužidlem H 285. Po důkladném mísení se tato tekutá směs odlila do připravené silikonové formy a nechala ztuhnout. Vyjmutím vytvrzených zkušebních těles z formy byly vzorky připraveny k testování tahových vlastností.

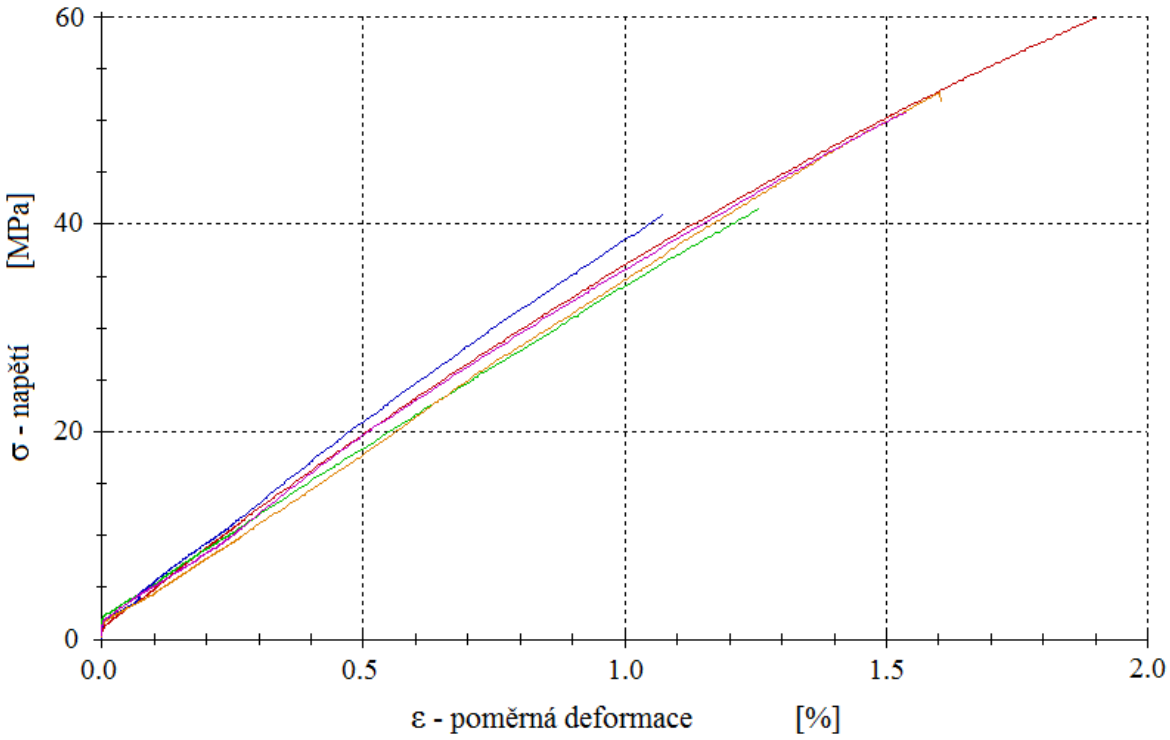
K získání výsledků byl opět použit univerzální zkušební stroj ZWICK 1456. Vzorky byly jednotlivě umísťovány do sklíčidel stroje a zatěžovány silou až do úplného přetržení. Před testováním bylo každé zkušební těleso z epoxidové pryskyřice změřeno, jelikož rozměry šířky a výšky musely být zadány do softwaru testXpert II pro přesný výpočet vlastností materiálu.

Podle získaných hodnot a díky grafu závislosti napětí na deformaci epoxidové matrice (obr. 8.4) byly do programu zadány potřebné údaje.

Definované parametry epoxidové matrice získané testováním a z materiálového listu:

- Hustota - 1,2 g/cm^3
- Youngův modul - 3,3 GPa
- Poissonovo číslo - 0,33

Po definování parametrů vykreslí software Digimat materiálovou křivku, která by se měla podobat závislosti napětí na deformaci matrice získané experimentálním přístupem.



Obr. 8.4 Graf závislosti napětí na deformaci matrice z pryskyřice Havel L 285.

8.2.2 Mikrostruktura

Dalším krokem analýzy je vytvoření odpovídající mikrostruktury, nacházející se v Digimat stromu hned pod položkou „Materials“.

Vytvářenou mikrostrukturu je třeba pojmenovat, stejně tak je vhodné zadat název vypracovávané fáze. Poté se již určí typ fáze a přiřadí vhodný materiál.

Fáze matrice

V případě vytváření fáze matrice byl typ označen jako Matrix a zvolen materiál v podobě epoxidové pryskyřice. Stiskem tlačítka „Create“ byla první složka kompozitu dokončena.

Fáze výztuže

Druhou přidanou fází byla výztuž. Po pojmenování byl zvolen typ „Yarn“ označující přízi a materiál karbon. Ve chvíli označení příze se zobrazí na pracovní ploše druhá karta s názvem „Parameters“, kam se lze přesunout stisknutím políčka „Validate“. Ve složce týkající se parametrů software nabízí volbu mezi základním nebo pokročilým typem příze. Pro získání přesných výsledků byla zvolena možnost „Advanced yarn“ neboli pokročilá příze.

Prvním potřebným údajem byla hustota, zde se nachází možnost výběru mezi zadáním lineární hustoty příze nebo počtu vláken. Díky známému počtu nekonečných vláken v přízi program již sám dopočítal lineární hustotu, která vyšla 203,198 tex (g/km). Dále byl zadán průměr vlákna a rozměry příčného průřezu příze. Vložením těchto informací byl zobrazen objemový podíl vláken 0,3675.

Definované parametry příze z uhlíkových vláken získané měřením a z materiálového listu:

- Počet vláken - 3000
- Průměr vlákna - 0,007 mm
- Výška příze - 0,2 mm
- Šířka příze - 2 mm

Po zadání uvedených hodnot zobrazil software Digimat model a tabulku s vypočítanými materiálovými vlastnostmi příze:

- Axiální (osový) Youngův modul - 87 381 MPa
- Rovinný Youngův modul - 7 774,7 MPa
- Rovinný Poissonův poměr - 0,44428
- Příčný Poissonův poměr - 0,26481
- Příčný modul pružnosti ve smyku - 3051,3 MPa

8.2.3 RVE - Reprezentativní objemový element

Na základě všech zadaných parametrů vytvoří program Digimat reprezentativní objemový element (RVE) testovaného materiálu, pro který je pak vytvořena analýza a získány požadované vlastnosti.

Modelování tkanin

Pro získání reprezentativního objemového elementu byly nejprve vytvořeny modely obou typů tkanin. Tkaniny se pojmenují, vloží počet vrstev, vybere vytvořená mikrostruktura, jednotlivé fáze osnovy i útku a určí velikost vazby.

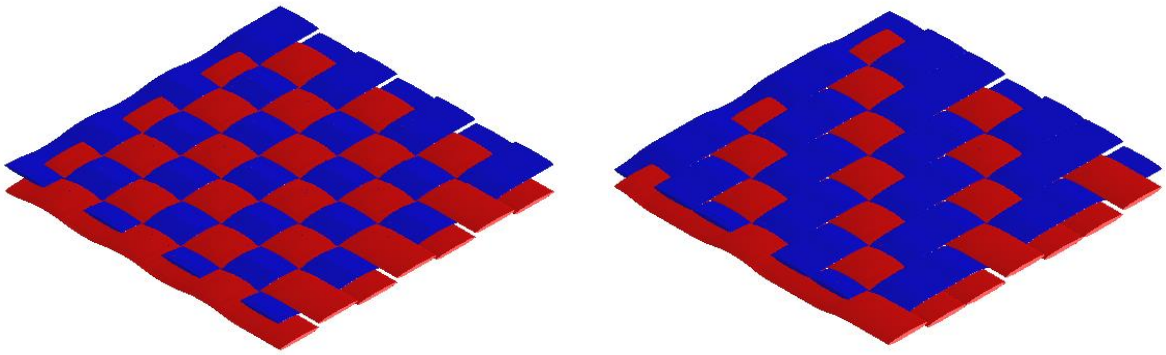
V případě keprové i plátnové tkaniny je pět přízí v osnově i v útku na centimetr. Po zadání údajů byl vytvořen vzor tkanin a jednotlivé modely byly vytvořeny (obr. 8.5). Software pro kontrolu i lepší představu vizualizoval vymodelované tkaniny a vypočetl následující parametry:

Plátnová vazba

- Plošná hustota - 204,41 g/m^2
- Pórovitost (mezi přízemi) - 0,209918
- Objemový podíl vláken - 0,290355

Keprová vazba

- Plošná hustota - 204,006 g/m^2
- Pórovitost (mezi přízemi) - 0,211479
- Objemový podíl vláken - 0,289781



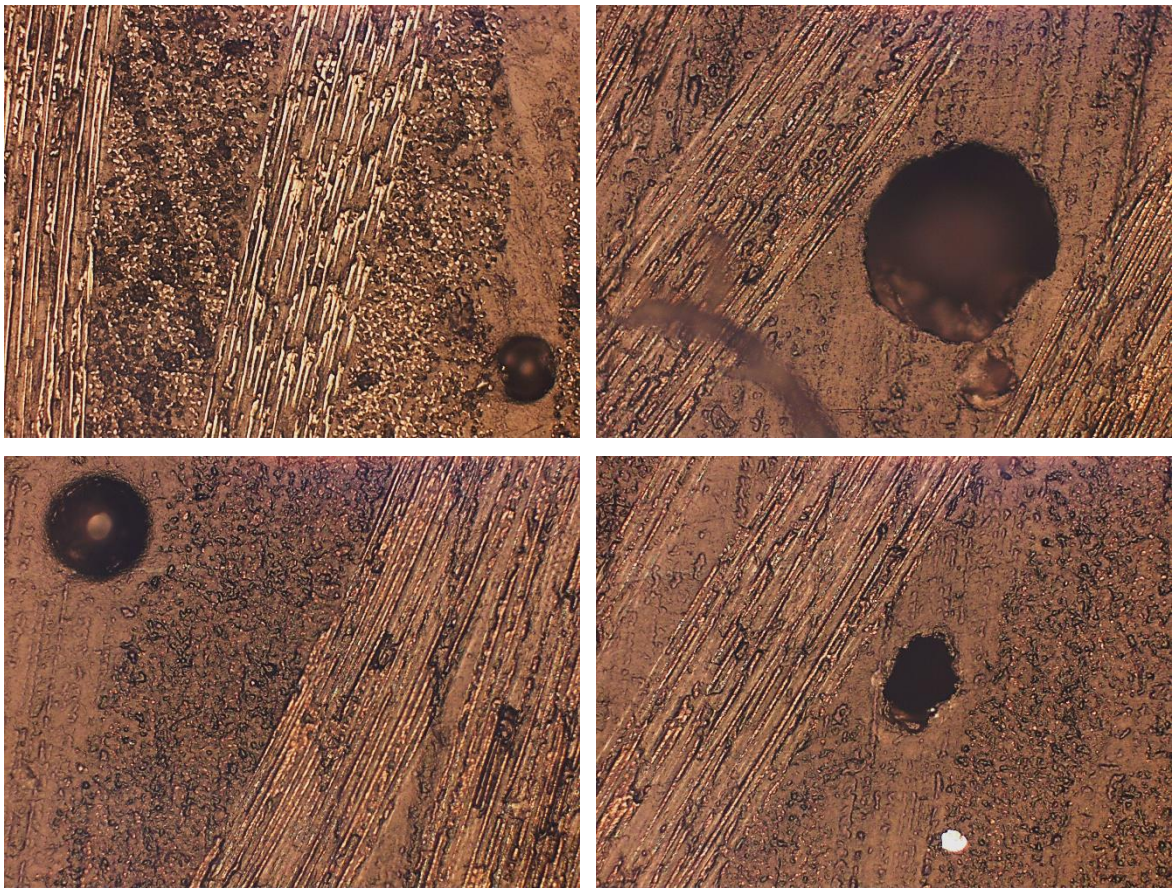
Obr. 8.5 Model tkaniny plátno (vlevo) a kepr (vpravo).

Vytvořením modelů tkanin byla zpřístupněna volba analýzy jedné z vytvořených vrstev RVE. V této záložce je současně možná tvorba vícevrstvého kompozitu, kde lze kombinovat různé typy vrstev nebo stejné druhy s rozdílnou tloušťkou či orientací. Při modelování kompozitních systémů vyztužených tkaninou však Digimat 5.1.2 tuto volbu nenabízí, nebylo proto možné simulovat vícevrstvé kompozity zkoumaného druhu.

8.2.4 Simulace vzduchových bublin

Vymodelované kompozitní systémy obsahují pouze matrici a výztuž. Takový materiál by byl ideální, je však nereálný, struktura skutečného kompozitu zahrnuje také nechtěnou fázi, kterou je vzduch uzavřený v matrici v podobě bublin.

Na obr. 8.6 je zobrazen příčný řez zkušebním tělískem kompozitu vyztuženého uhlíkovou tkaninou v epoxidové matrici. Plocha řezu zkušebního vzorku byla vybroušena, pomocí optického mikroskopu 200krát zvětšena a následně byla zobrazená mikrostruktura zachycena kamerou.



Obr. 8.6 Snímky mikrostruktury kompozitu s uhlíkovou tkaninou - 200x zvětšení.

Na snímcích je dobře vidět střídání podélných a příčných vláken v kompozitu, kromě matrice a výztuže si lze na obrázku všimnout stopy po vzduchových bublinách, které jsou v porovnání s průměrem uhlíkových vláken (7 μm) několikanásobně větší.

Takových bublin se ve struktuře kompozitu nachází hned několik s různorodým tvarem i velikostí. Jsou rozmístěny v kompozitním systému nepravidelně a mají velmi negativní vliv na vlastnosti kompozitního materiálu.

Dosud prezentované modely RVE nejsou tedy ovlivněny těmito vzduchovými bublinkami, které se dostávají do epoxidové směsi při jejím zpracováním. Množství vzduchu obsaženého v kompozitním systému záleží na důkladnosti při ručním laminování, kdy byly pomocí kovového válečku vytlačovány vzduchové bubliny ze směsi.

Tuto situaci dokáže program Digimat nasimulovat přidáním fáze „Void“, pomocí níž jsou do modelovaného kompozitu vloženy vzduchové bubliny. Jejich množství se zadává v objemovém poměru, pak už jen stačí zvolit velikost a tvar bublin a popřípadě i směr.

S ohledem na zkoumanou mikrostrukturu skutečného kompozitního systému bylo zjištěno, že zastoupení vzduchové fáze v objemu kompozitu je přibližně 7,5 až 12,5 procenta.

Z důvodu nejasného množství vzduchových bublin obsažených v kompozitním systému, byla programem simulována spodní hranice, střed i hodní hranice odhadovaného objemového podílu této fáze. Tvar bublin byl zadán v podobě koule o průměru velikosti 0,08 mm.

8.2.5 Nastavení zatížení a zahájení výpočtů

Software je schopen simulovat zatížení ve všech osách i pod jakýmkoli úhlem.

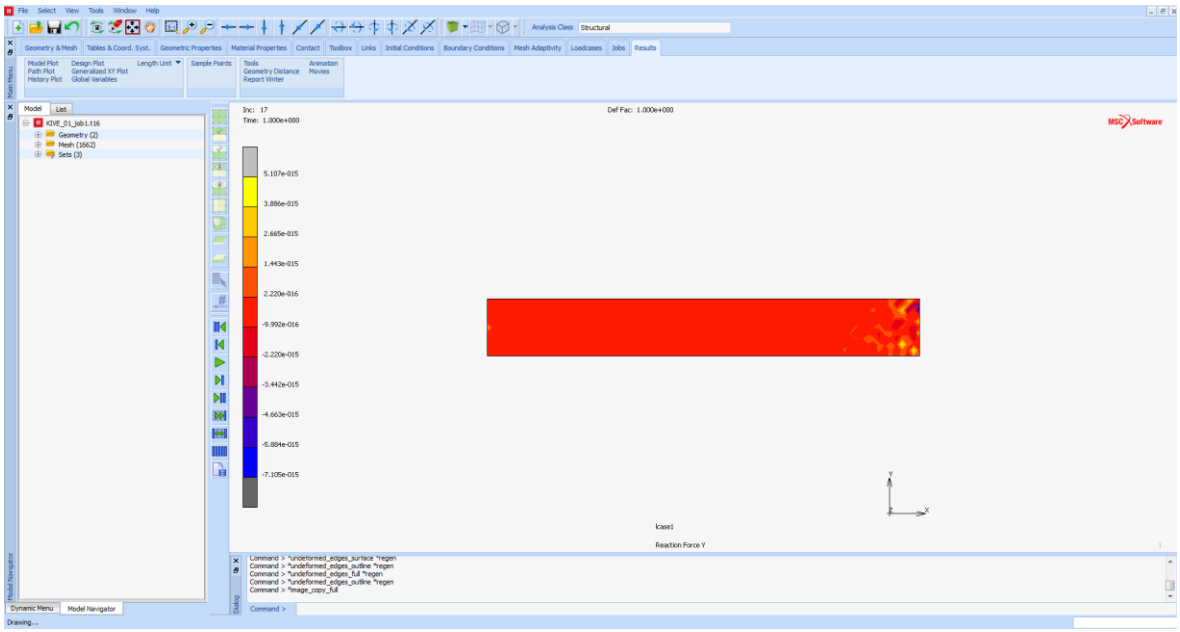
V hierarchickém stromě pod záložkou „Mechanical“ byl vybrán vhodný druh a směr zatížení. Jako typ zatížení elementu bylo zvoleno monotónní jednoosé napětí ve směru určeném úhly theta $\theta = 90°$ a phi $\varphi = 0°$.

Nastavením všech popsaných parametrů je program připraven na spuštění analýzy, ještě dříve je vhodné zkontrolovat její správnost kliknutím na ikonu umístěnou na panelu nástrojů nebo stiskem F4. Pokud se objeví okno s hlášením o úspěšné kontrole dat, je možné přistoupit k samotnému zahájení analýzy. Software Digimat provede potřebné výpočty a prostřednictvím okna informuje uživatele o zdařilém dokončení analýzy.

8.3 Práce v konečnoprvkovém programu

Pro simulaci tahové zkoušky vzorků s rozměry skutečných zkušebních těles byly vlastnosti reprezentativního objemového elementu, získané ze softwaru Digimat-MF, převedeny do konečnoprvkového programu Marc Mentat 2014.1.0.

Jedná se o konečnoprvkový (MKP) software, který je zaměřen zejména na nelineární kontaktní výpočty s uvažováním velkých deformací a posuvů. Marc Mentat je produkt firmy MSC Software, která je výrobcem spousty dalších programů, jako je například MSC Nastran, MSC Adams nebo MSC Dytran.



Obr. 8.7 Pracovní prostředí softwaru Marc Mentat 2014.1.0.

Prvním krokem při modelování byla tvorba geometrie vzorků. V softwaru proto nejprve byla vytvořena přímka rovnoběžná s osou X o délce skutečného vzorku. Tato přímka se pak rozdělila na 75 identických elementů, které byly následně rozšířeny v ose Y a tím vytvořena strukturální síť ze 750 prvků o velikosti 8 mm^2. Dále byla dokončena geometrie zadáním tloušťky zkoumaného vzorku. Materiálové vlastnosti získané z programu Digimat byly vloženy každému elementu vytvořenému modelu.

K provedení úspěšné simulace je nutné zadat krajové podmínky a následně zatěžující sílu, která byla zjištěna při experimentálním testování kompozitních systémů. U vzorků vyztužených vrstvou tkaniny s keprovou vazbou vyšla síla potřebná k přetržení 2 350 N, zatímco u zkušebních těles s tkaninou vazby plátno bylo nutné vyvinout sílu 2 670 N. Před zahájením výpočtů byly vybrány potřebné atributy a následně již mohla být analýza spuštěna.

9 VÝSLEDKY ANALÝZ

Zkoumaný materiál je ortotropní, což znamená, že jeho mechanické a teplotní vlastnosti jsou jedinečné a nezávislé ve třech vzájemně kolmých směrech. Mechanické vlastnosti jsou proto vyjádřeny v podélném, radiálním a tečném směru.

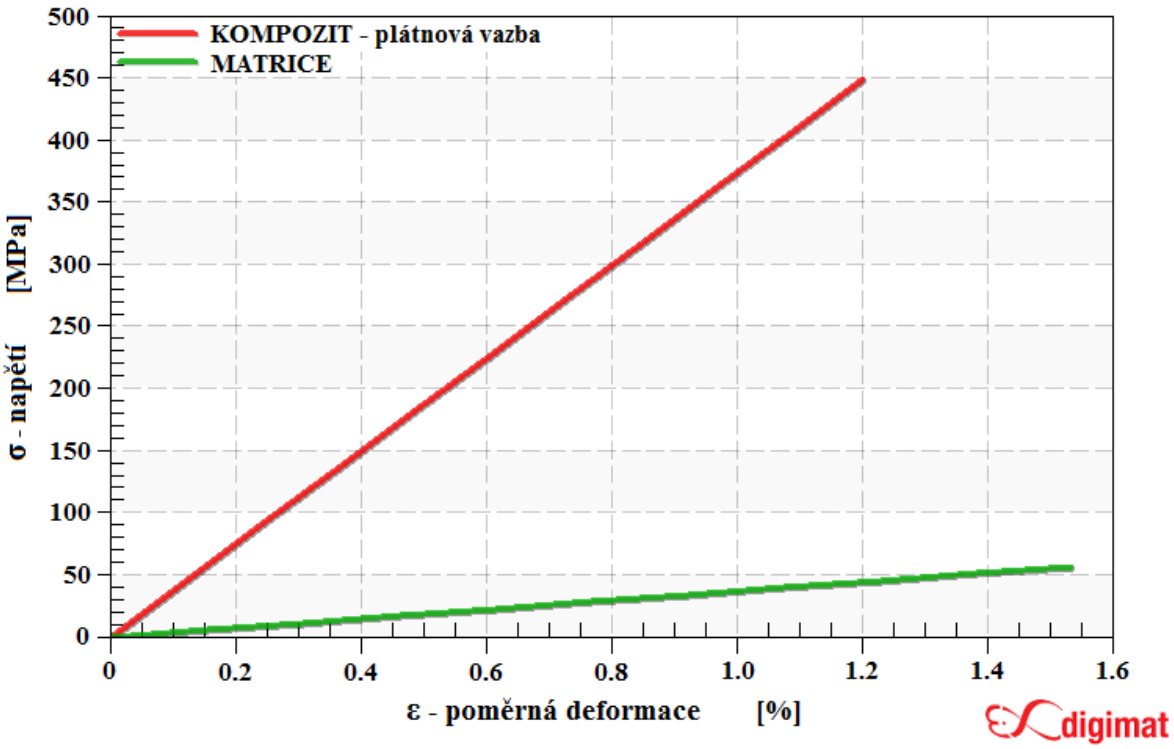
9.1 Kompozit vyztužený tkaninou s plátnovou vazbou

Prvním virtuálně testovaným kompozitem je systém vyztužený jednou vrstvou tkaniny s plátnovou vazbou. Tab. 9.1 obsahuje hodnoty vlastností, které Digimat-MF vypočítal pro zkoumaný ortotropní materiál.

Tab. 9.1 Mech. vlastnosti RVE kompozitu vyztuženého tkaninou s plátnovou vazbou.

Youngův modul pružnosti	Poissonův poměr	Modul pružnosti ve smyku
E_1 = 37 370 MPa	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0,062215	G_{12} = 2 481 MPa
E_2 = 37 370 MPa	$\nu_{13} = \nu_{23}$ = 0,4695	G_{13} = 2 822 MPa
E_3 = 6 896,6 MPa	$\nu_{31} = \nu_{32}$ = 0,086646	G_{23} = 2 822 MPa

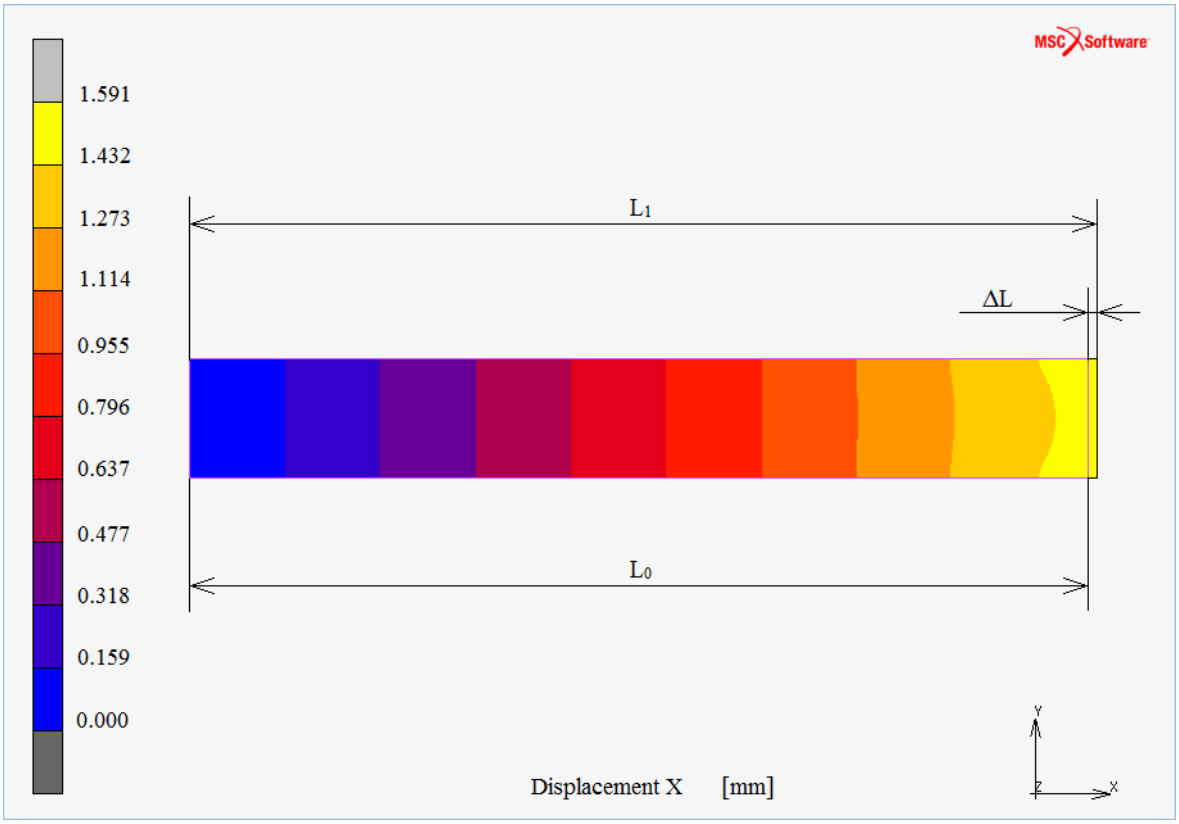
Program dále vykreslil graf závislosti napětí na deformaci materiálu (obr. 9.1), odkud lze vyčíst, že při poměrné deformaci ε = 1,2 % je napětí σ = 448,44 MPa. Pro porovnání je v grafu vykreslena i závislost napětí na deformaci pro samotnou matrici kompozitu.



Obr. 9.1 Graf závislosti napětí na deformaci - plátnová vazba.

Další vlastností vypočtenou softwarem byla měrná hmotnost (hustota) kompozitu, která vyšla ρ_{Cp} = 1385,6 kg/m^3.

V programu Marc Mentat bylo zkoumáno prodloužení simulovaného vzorku pro možnost srovnání se skutečným protažením kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny o vazbě plátno.



Obr. 9.2 Simulované prodloužení vzorku s ideální strukturou - plátnová vazba.

Na obrázku 9.2 je zobrazen model zkušebního tělesa s rozměry podle skutečných vzorků zatížený silou 2 670 N. Díky barevnému rozdělení zle názorně vidět prodloužení v jednotlivých částech vzorku, maximální prodloužení vzorku vyšlo 1,591 mm.

9.1.1 Výsledky simulace vzduchových bublin v kompozitu - plátno

Software potvrdil, že vzduchové bubliny ve struktuře kompozitu podle očekávání negativně ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu.

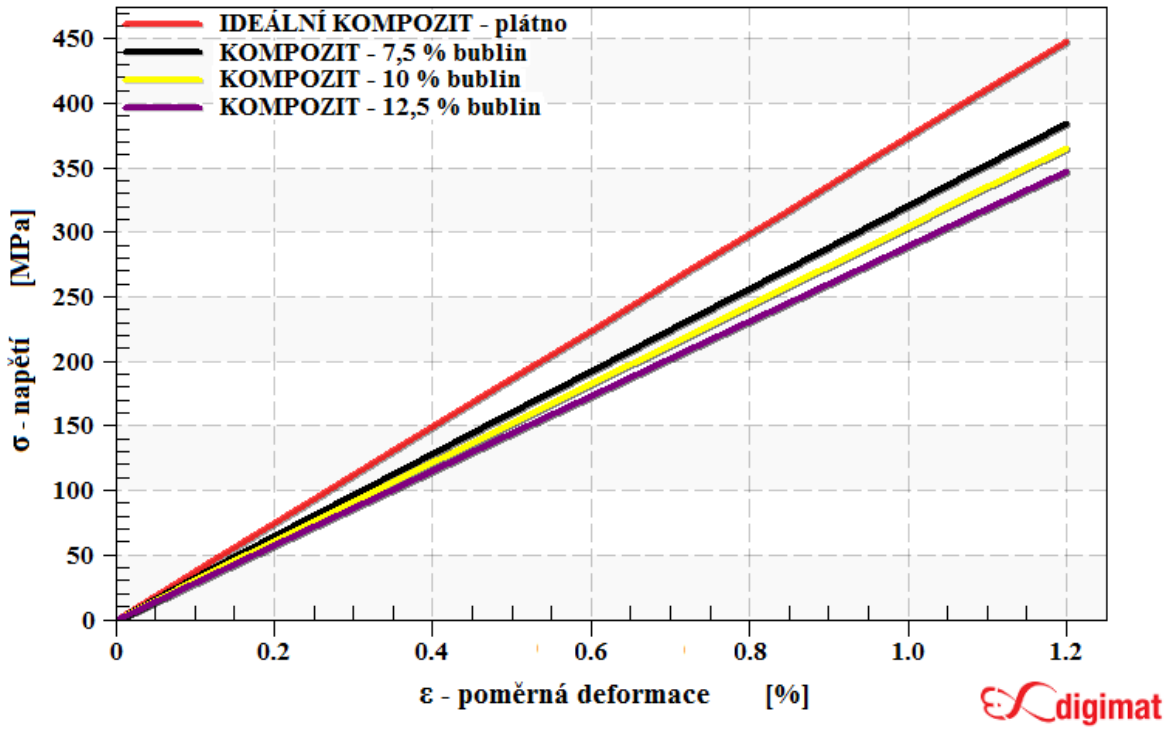
V programu byl porovnáván ideální kompozit bez obsahu vzduchu ve struktuře s materiály se 7,5 %, 10 % a 12,5 % vzduchových bublin. V tabulce 9.2 se nachází získané hodnoty modulu pružnosti, napětí v materiálu při deformaci 1,2 % a modulu pružnosti ve smyku všech typů kompozitů se zmíněnou strukturou.

Tab. 9.2 Ovlivnění mech. vlastností kompozitu vzduchovými bublinami - plátno.

vlastnost / kompozit	E - Youngův modul pružnosti [MPa]	σ_m - maximální napětí [MPa]	G - modul pružnosti ve smyku [MPa]
ideální kompozit	37 370	448,44	2 822,0
7,5 % bublin	32 089	384,99	2 434,5
10 % bublin	30 492	365,82	2 316,7
12,5 % bublin	28 967	347,53	2 204,0

Z tabulky lze vyčíst, že zvyšující se množství bublin v kompozitu způsobuje zhoršení mechanických vlastností materiálu. Nejvýraznější pokles hodnot zkoumaných atributů byl u materiálu obsahující 12,5 % bublin. Výsledné mechanické vlastnosti byly zhoršeny přibližně o 22,5 % v porovnání s ideálním kompozitním systémem vyztuženým jednou vrstvou tkaniny s plátnovou vazbou.

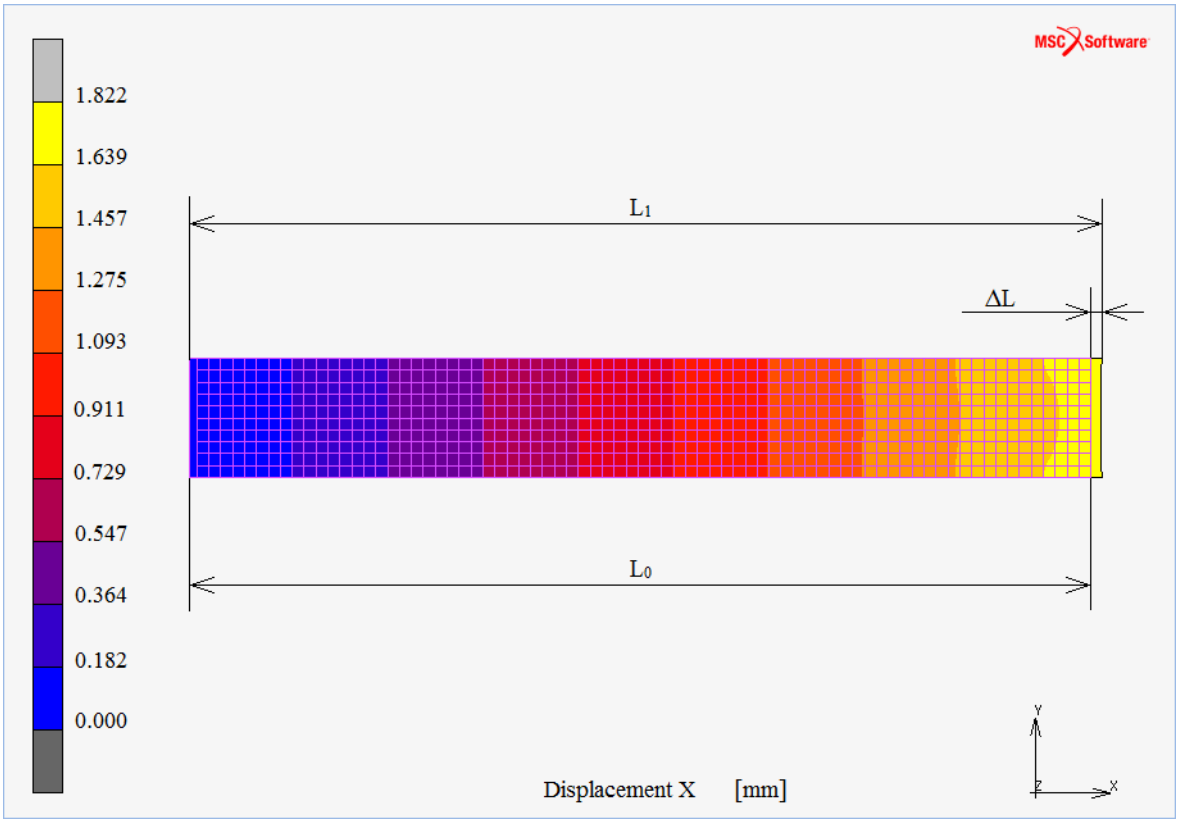
Negativní vlivy vzduchových bublin na vlastnosti kompozitního materiálu jsou zobrazeny na obrázku 9.3, kde je vidět závislost napětí na deformaci simulovaného kompozitu. Ideální kompozitní systém je znázorněn červenou barvou, černá představuje materiál obsahující 7,5 % bublin, žlutou barvou je zobrazen kompozit s 10 % vzduchu a fialová barva značí kompozitní materiál s 12,5 % vzduchových bublin ve struktuře.



Obr. 9.3 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu s bublinami - plátnová vazba.

S ohledem na získané výsledky byl s konkrétními rozměry skutečných těles dále v konečnoprvkovém programu vymodelován vzorek s 12,5 % vzduchových bublin. Tento materiál byl vybrán pro další vyhodnocování z důvodu největšího přiblížení k hodnotám mechanických vlastností skutečných zkušebních těles.

V softwaru Marc Mentat bylo pozorováno prodloužení vymodelovaného vzorku, výsledek je možný vidět na obrázku 9.4.

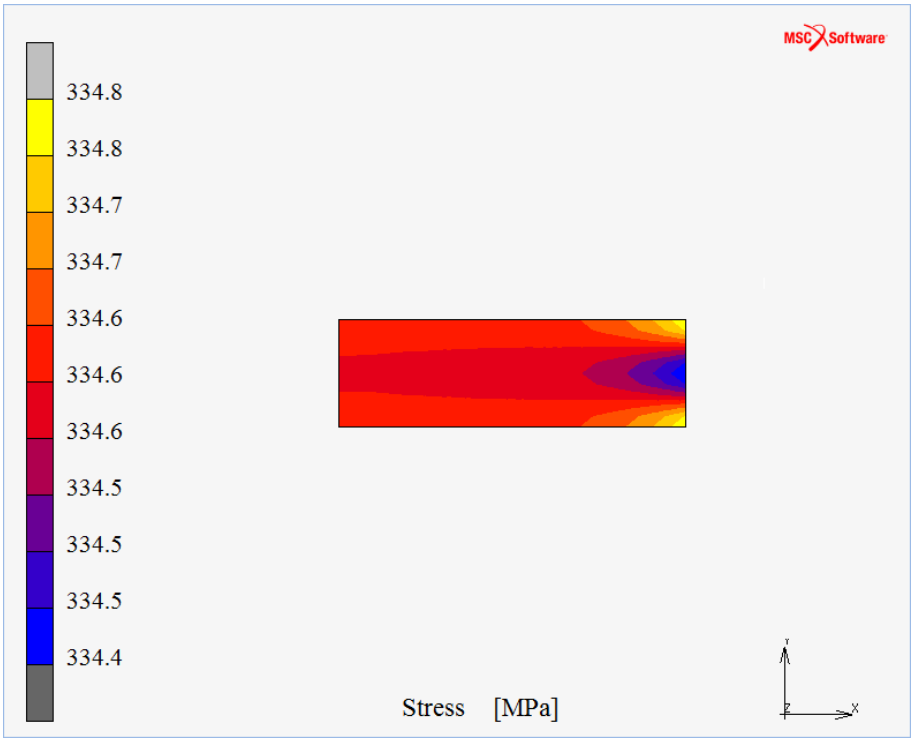


Obr. 9.4 Simulované prodloužení vzorku s 12,5 % bublin ve struktuře - plátno.

Maximální dosažené prodloužení vymodelovaného vzorku kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s plátnovou vazbou obsahující 12,5 % vzduchových bublin v objemu byl programem vypočten na 1,822 mm.

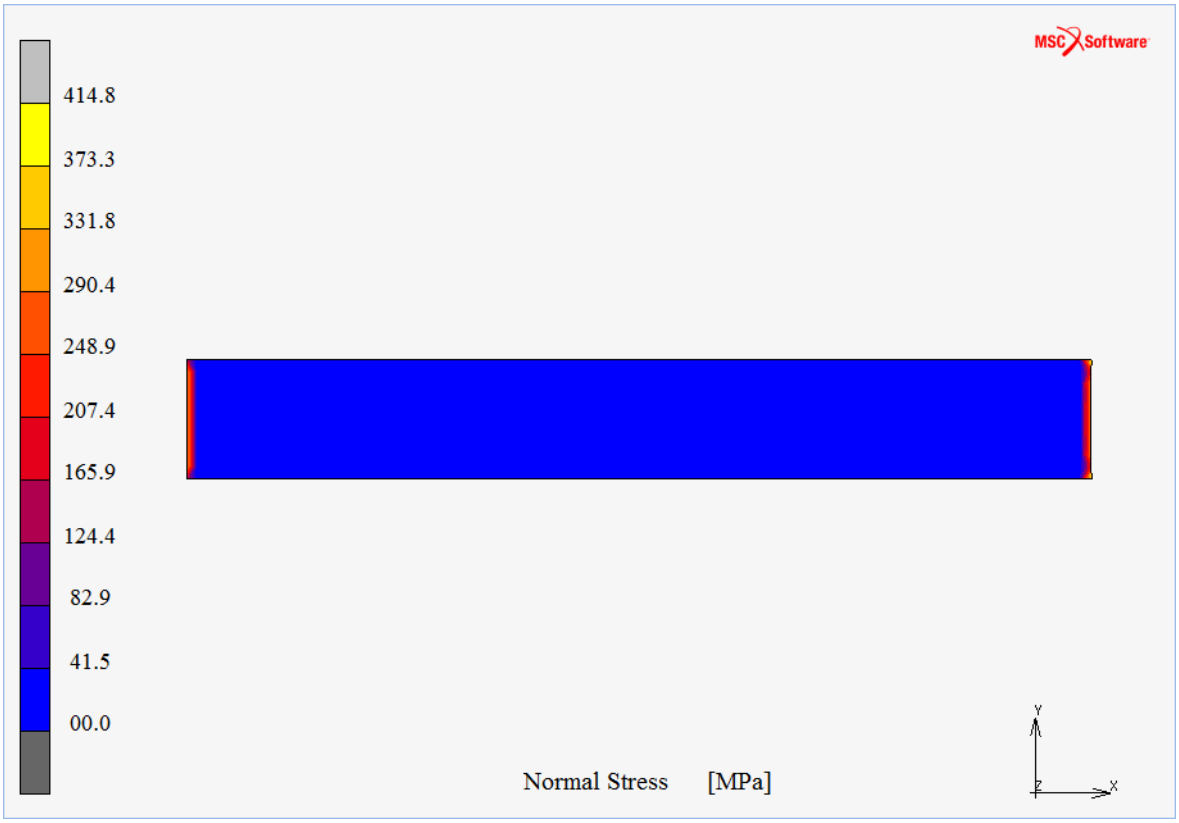
Dalším ze zkoumaných atribut v simulačním programu je napětí na zatíženém vzorku. To je zobrazeno na obrázku 9.5, kde lze vidět část vymodelovaného zkušebního tělesa a barevně znázorněné rozložení napětí v materiálu v průběhu namáhání tahovou silou.

V každém libovolném příčném řezu působí stav napjatosti, který je charakterizován normálovým napětím σ_n. Zmíněné normálové napětí uvnitř kompozitního vzorku s 12,5 % bublin ve struktuře je vykresleno na obrázku 9.6.



Obr. 9.5 Napětí na vzorku s 12,5 % bublin ve struktuře - plátnová vazba.

Největší napětí na vzorku o velikosti 334,8 MPa je znázorněno žlutou barvou a vyskytuje se v rozích na straně působící síly. Normálové napětí má maximální hodnotu 414,8 MPa a objevuje se na obou koncích vymodelovaného tělesa.



Obr. 9.6 Normálové napětí vzorku s 12,5 % bublin ve struktuře - plátnová vazba.

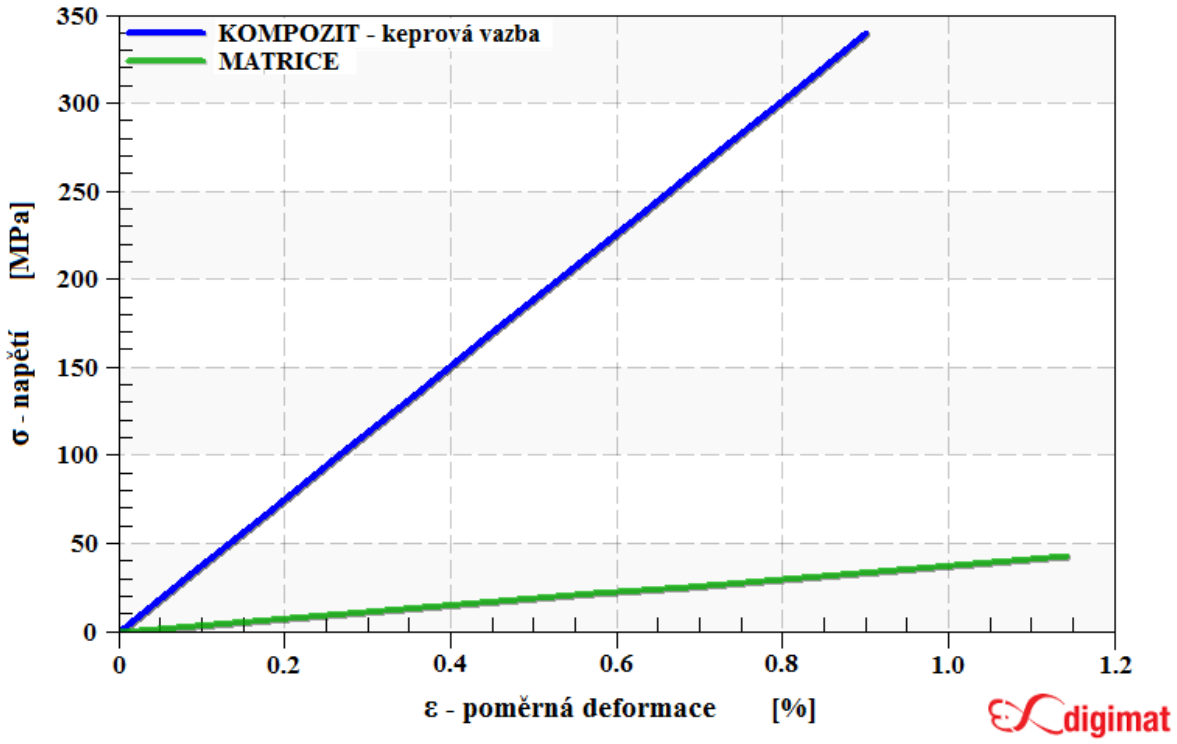
9.2 Kompozit vyztužený tkaninou s keprovou vazbou

Mechanické vlastnosti ortotropního materiálu, tedy tři Youngovy moduly pružnosti, šest Poissonových poměrů a tři moduly pružnosti ve smyku jsou uvedeny v tab. 9.3, které byly získány analýzou vymodelovaného reprezentativního objemového elementu kompozitu vyztuženého jednou vrstvou uhlíkové tkaniny s keprovou vazbou.

Tab. 9.3 Mech. vlastnosti RVE kompozitu vyztuženého tkaninou s keprovou vazbou.

Youngův modul pružnosti	Poissonův poměr	Modul pružnosti ve smyku
E_1 = 37 732 MPa	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0,064723	G_{12} = 2 477,3 MPa
E_2 = 37 732 MPa	$\nu_{13} = \nu_{23}$ = 0,4547	G_{13} = 2 699,9 MPa
E_3 = 6 714,9 MPa	$\nu_{31} = \nu_{32}$ = 0,08331	G_{23} = 2 699,9 MPa

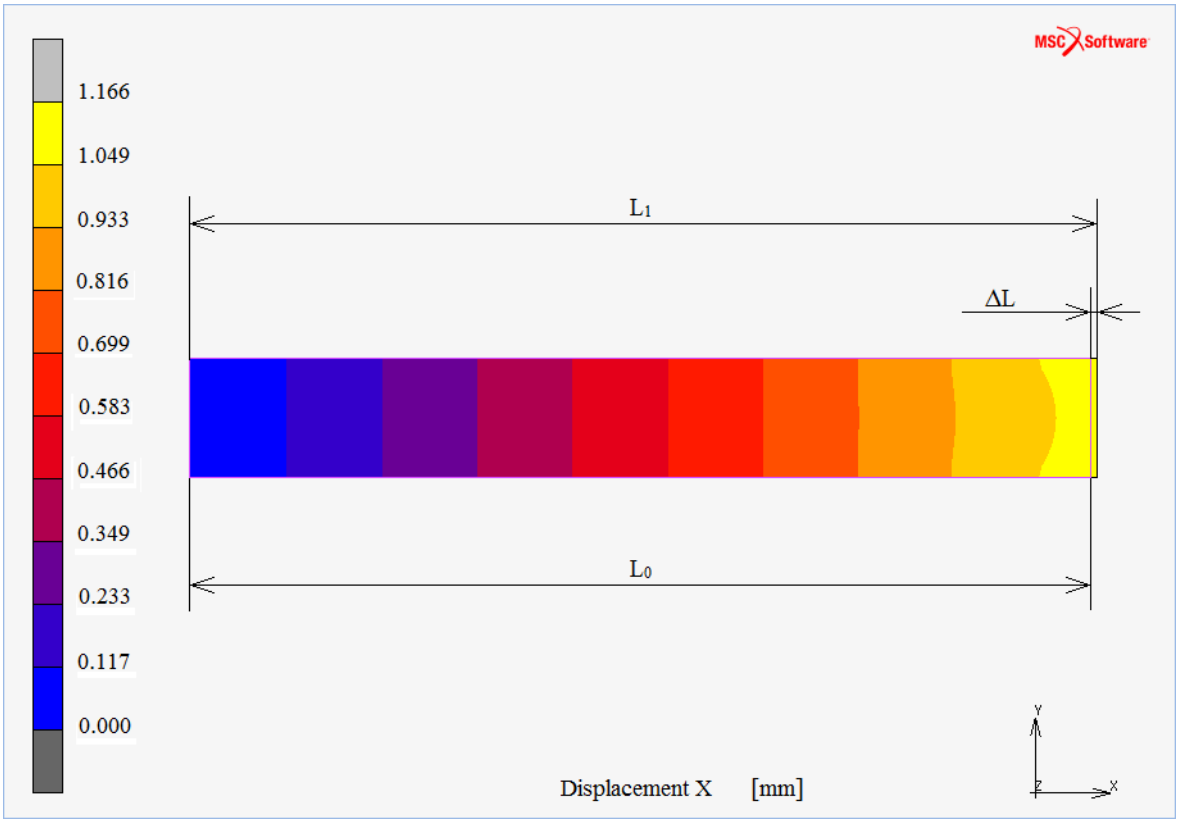
Na obr. 9.7 je zobrazeno tahové chování virtuálního materiálu. Zatímco zelenou barvou je vykreslena závislost napětí na deformaci použité matrice, modrá čára představuje chování kompozit. Při dosažení poměrné deformace ε = 0,9 % je napětí v kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s keprovou vazbou σ = 339,59 MPa. Při porovnání tahových křivek kompozitu s matricí je zřejmé, že matrice dosahuje vyšší relativní deformace ε = 1,15 %, ale hodnota napětí se pohybuje pouze kolem 40 MPa, což je proti kompozitu výrazně nižší.



Obr. 9.7 Graf závislosti napětí na deformaci - keprová vazba.

Měrná hmotnost kompozitního systému vyztuženého jednou vrstvou tkaniny s keprovou vazbou byla určena programem v hodnotě ρ_{Ck} = 1358,4 kg/m^3.

V softwaru Marc Mentat bylo nasimulováno zatížení vzorku skutečnou silou F = 2 350 N. Po analýze program vykreslil prodloužení zkušebního tělesa v ose zatížení. Na obrázku 9.8 je znázorněna původní velikost L_0, prodloužení ΔL i délka vzorku po zkoušce L_1.



Obr. 9.8 Simulované prodloužení vzorku s ideální strukturou - keprová vazba.

Na levé straně obrázku je barevná stupnice, podle které zle snadno určit prodloužení v každém místě vymodelovaného vzorku. Stupnice je označena konkrétními hodnotami, které jsou v milimetrech. Celkové prodloužení modelu kompozitu ideální struktury vyztuženého vrstvou tkaniny s keprovou vazbou bylo programem vypočteno na 1,166 mm.

9.2.1 Výsledky simulace vzduchových bublin v kompozitu - kepr

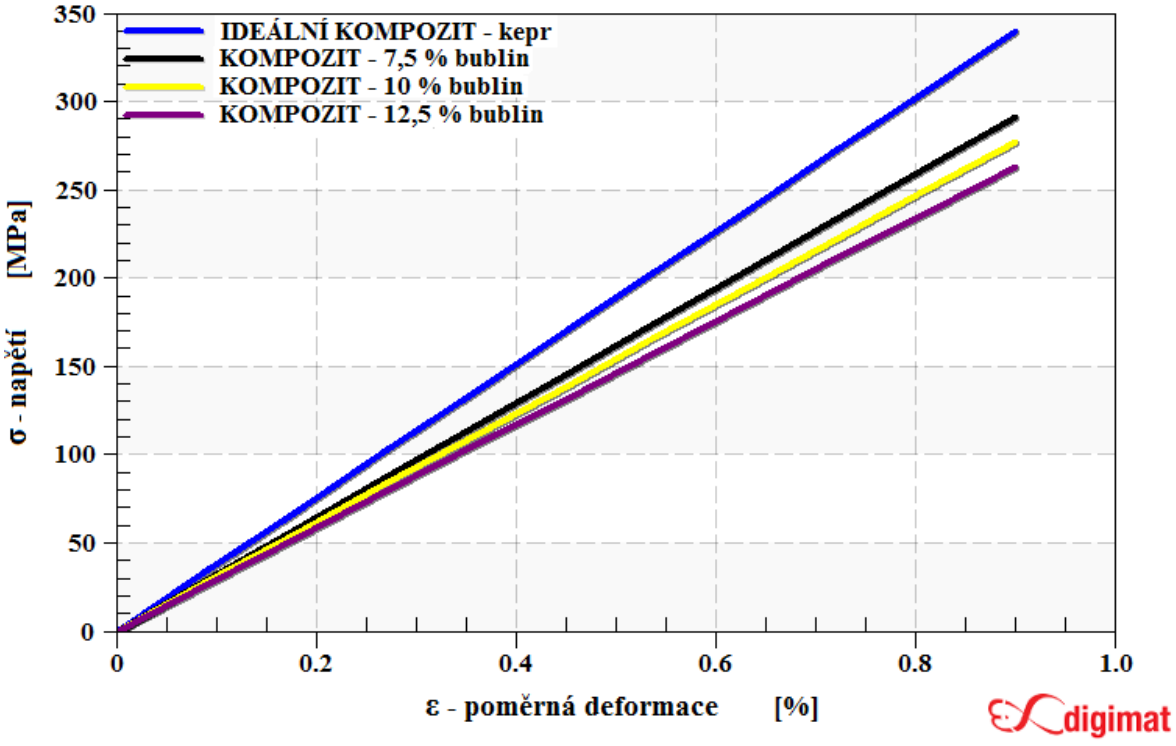
Také v případě kompozitu vyztuženého jednou vrstvou tkaniny s keprovou vazbou byl porovnáván ideální materiál s kompozity obsahující 7,5 %, 10 % a 12,5 % vzduchových bublin. Výsledné hodnoty modulu pružnosti, napětí v materiálu při deformaci 0,9 % a modulu pružnosti ve smyku uvedených typů kompozitů jsou zaznamenány v tabulce 9.4.

Tab. 9.4 Ovlivnění mech. vlastností kompozitu vzduchovými bublinami - kepr.

vlastnost / kompozit	E - Youngův modul pružnosti [MPa]	σ_m - maximální napětí [MPa]	G - modul pružnosti ve smyku [MPa]
ideální kompozit	37 732	339,59	2 699,9
7,5 % bublin	32 398	291,53	2 329,3
10 % bublin	30 785	277,01	2 216,6
12,5 % bublin	29 245	263,15	2 108,7

Výsledky opět dokazují negativní ovlivnění mechanických vlastností způsobené výskytem bublin v kompozitním materiálu. Stále platí, že při zvyšujícím se množství vzduchových bublin klesají hodnoty zkoumaných vlastností. Díky tomuto faktu materiál s 12,5 % bublin má nejhorší výsledky z testovaných kompozitních systémů vyztužených jednou vrstvou tkaniny s keprovou vazbou a to přibližně o 22 % nižší ve srovnání s ideálním kompozitem.

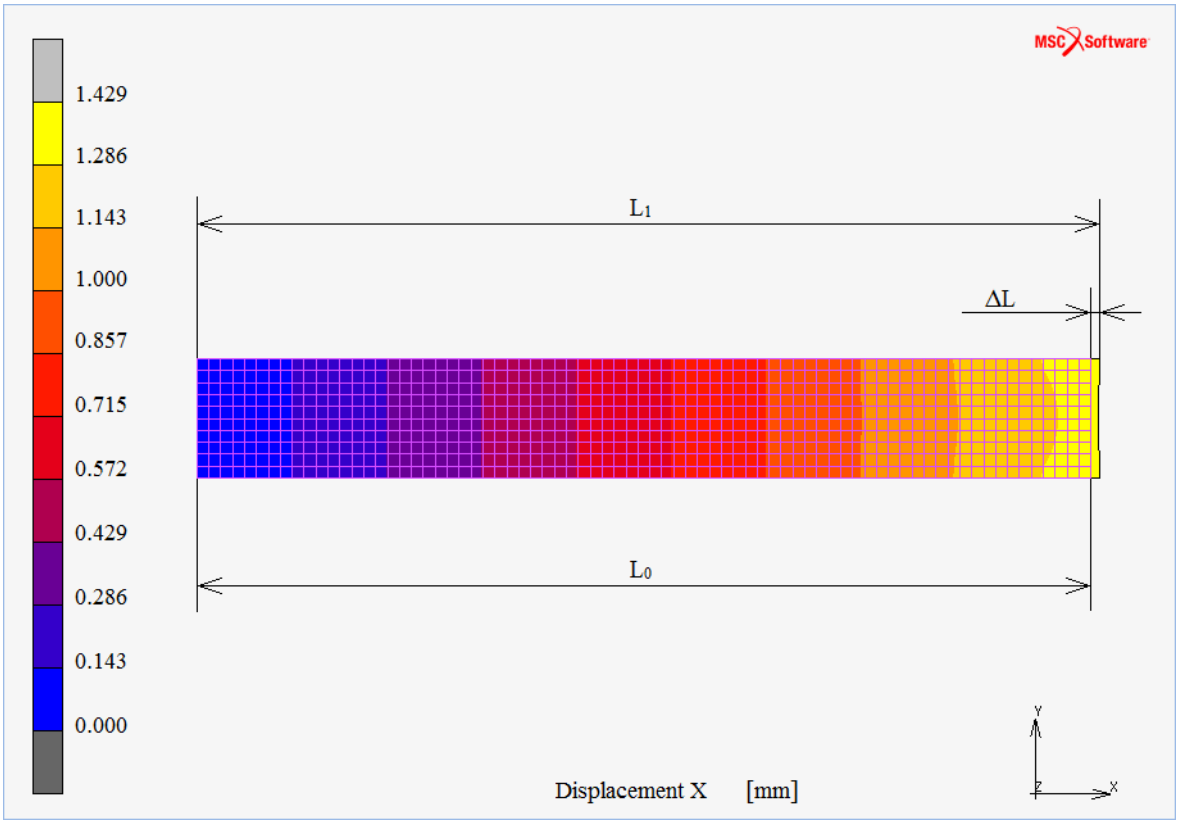
Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu vyztuženého jednou vrstvou uhlíkové tkaniny s keprovou vazbou obsahující bubliny se nachází na obrázku 9.9. Zde je zobrazen modrou čarou kompozit s ideální strukturou, stejně jako v přechozím případě černá představuje materiál obsahující 7,5 % bublin, žlutá značí kompozitní systém s 10 % vzduchu a materiál se simulovanými 12,5 % vzduchových bublin ve struktuře je znázorněn fialovou barvou.



Obr. 9.9 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu s bublinami - keprová vazba.

Díky hodnotám blížícím se skutečným vlastnostem proběhla simulace v konečnoprvkovém softwaru Marc Mentat u materiálu s 10 % objemu vzduchu ve struktuře.

V programu bylo opět zjišťováno prodloužení ΔL vymodelovaného vzorku, pro možné porovnání se skutečným prodlužením kompozitních těles vyztužených uhlíkovou tkaninou s keprovou vazbou.

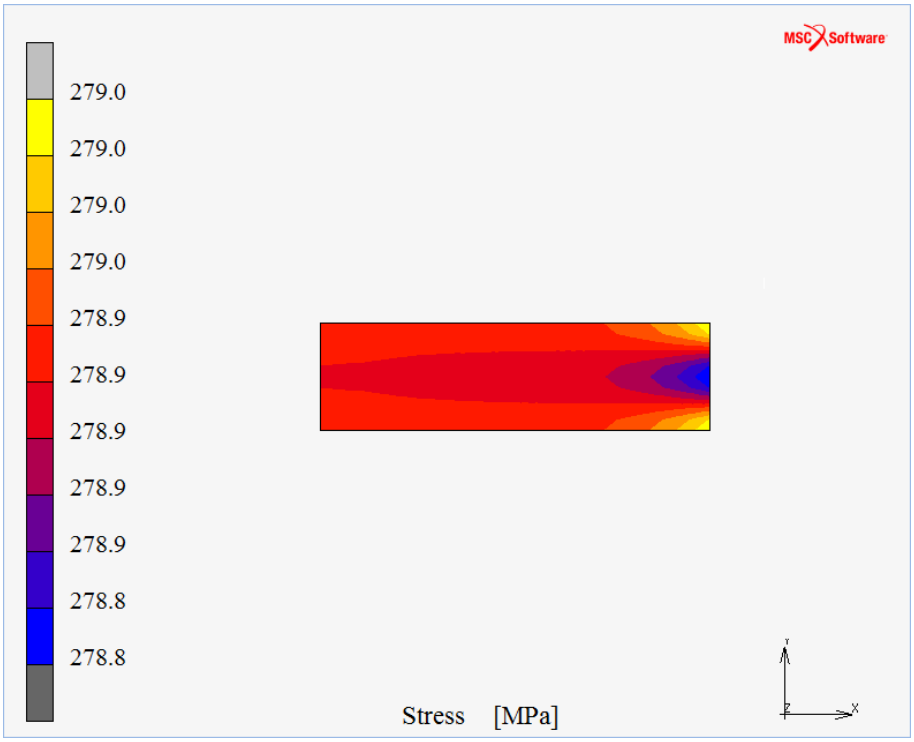


Obr. 9.10 Simulované prodloužení vzorku s 10 % bublin ve struktuře - kepr.

Na obrázku 9.10 je vidět model po zatížení skutečnou silou F = 2 350 N a jeho prodloužení v milimetrech. Původní velikost vzorku je navíc vysíťována tak, aby byly zobrazeny jednotlivé elementy, z nichž se model skládá. Celkové prodloužení bylo softwarem určeno na hodnotu ΔL = 1,429 mm.

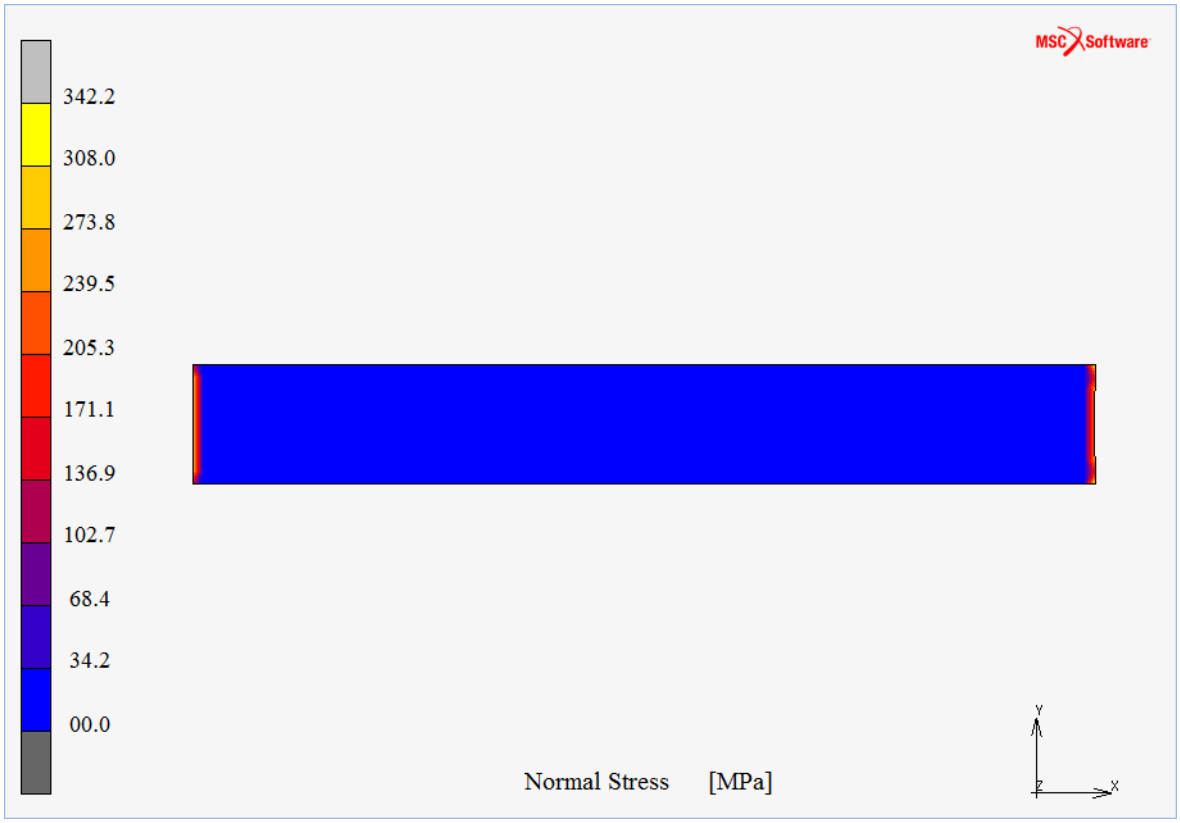
Distribuce podélného tahového napětí na povrchu vzorku vyvolané zatěžující silou je znázorněno na obrázku 9.11.

Díky síle působící kolmo na plochu příčného řezu kompozitu o obsahu S lze charakterizovat normálové napětí σ_n. Obr. 9.12 vykresluje tohle normálové napětí působící uvnitř kompozitního tělesa s 10 % objemu vzduchových bublin ve struktuře.



Obr. 9.11 Napětí na vzorku s 10 % bublin ve struktuře - keprová vazba.

Maximální napětí 279,8 MPa se objevuje v rozích modelu a postupně klesá až ke středu vzorku v horizontální ose. Největší normálové napětí o velikosti 342,2 MPa působí opět na koncích vymodelovaného zkušebního tělesa.



Obr. 9.12 Normálové napětí vzorku s 10 % bublin ve struktuře - keprová vazba.

10 SROVNÁNÍ REÁLNÝCH A TEORETICKÝCH VÝSLEDKŮ

Hodnoty mechanických vlastností z analýzy ideálního kompozitu se od výsledků experimentálního testování poměrně liší, jak je patrné z tabulky 10.1. V případě kompozitu vyztuženého jednou vrstvou uhlíkové tkaniny s plátnovou vazbou byl softwarem Digimat určen Youngův modul pružnosti o 9 370 MPa vyšší než byl zjištěn tahovou zkouškou. Pochopitelně i napětí ve struktuře modelu ideálního kompozitu dosahuje vyšších hodnot a to přibližně o 33 %. Také v případě kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s keprovou vazbou byl vypočtený modul pružnosti v tahu vyšší. Rozdíl 7 032 MPa není sice tak výrazný jako v předchozím případě, přesto 22 % je vcelku vysoké číslo. O stejný počet procent je nepřesný také odhad napětí v kompozitu.

Vlastnosti ideálního kompozitního materiálu se tedy u obou případů výrazně lišily od těch skutečných. Ve struktuře kompozitu se totiž nachází kromě výztuže a matrice ještě jedna fáze v podobě vzduchových bublin. S touto nechtěnou složkou kompozitního systému se v modelačním programu nepočítalo, a proto získané výsledky byly tak vzdálené od těch skutečných. Díky nejistému množství této fáze v materiálu byly pro každý typ zkoumaného kompozitního systému analyzovány tři druhy struktur s různým procentem vzduchu v objemu. V případě kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s plátnovou vazbou se hodnoty mechanických vlastností přibližovali k těm reálným u modelu s 12,5 % bublin. Modul pružnosti v tahu i napětí vyšlo přibližně jen o 3 % vyšší než u skutečných vzorků. U kompozitního systému obsahující tkaninu s keprovou vazbou bylo vypočtené napětí a Youngův modul pružnosti nejblíže ke struktuře s 10 % vzduchu v objemu. Zde se rozdíl ve výsledcích pohyboval v pouhých desetinách procent.

Tab. 10.1 Srovnání reálných a teoretických vlastností zkoumaných kompozitů.

vlastnost / kompozit	**E - modul pružnosti v tahu [MPa]**	**σ_m - maximální napětí [MPa]**	**$\sigma_{0,5}$ - napětí při ε = 0,5% [MPa]**	**ΔL - prodloužení [mm]**
reálný - vazba plátno	28 000	337,00	130	1,420
ideální - vazba plátno	37 370	448,44	185	1,591
s 12,5 % bublin - plátno	28 967	347,53	142	1,822
reálný - vazba kepr	30 700	278,00	150	1,680
ideální - vazba kepr	37 732	339,59	188	1,166
s 10 % bublin - vazba kepr	30 785	277,01	153	1,429

Zkoumané maximální napětí u testovaných kompozitních systémů není zcela optimálním parametrem k posuzování shody s výsledky z modelačního softwaru. Závislost napětí na deformaci u experimentálního testování není po celou dobu lineární jako u virtuálního materiálu. Navíc ve chvíli přetržení kompozitního vzorku často dochází k prudkému poklesu napětí a tím značnému ovlivnění výsledků. Z těchto důvodů jsou v tabulce 10.1 také srovnávány hodnoty napětí při poměrné deformaci $\varepsilon = 0{,}5$ %.

Výsledky napětí při relativní deformaci 0,5 % potvrzují shodu experimentálního testování s analytickým modelem obsahující vzduchové bubliny pouze s nepatrnými odchylkami. U kompozitu vyztuženého jednou vrstvou tkaniny s plátnovou vazbou je rozdíl 12 MPa a u kompozitu s tkaninou vazby kepr dokonce jen 3 MPa.

Software Marc Mentat poté výsledné napětí na zkušebních tělesech potvrdil a názorně vykreslil. Zatímco prodloužení získané simulací v tomto programu se u obou zkoumaných kompozitů lišilo od skutečných hodnot. U vymodelovaných materiálů obsahující vzduchové bubliny program počítal s nižšími hodnotami mechanických vlastností oproti ideálnímu materiálu a díky tomu předpovídal větší prodloužení zkušebního tělesa. Software však nebral v úvahu možnost rychlejší destrukce způsobené narušením struktury v podobě vzduchu a tím dřívějšího přetržení vzorku. Navíc při tvorbě modelů jednotlivých vzorků byly zadávány skutečné rozměry a analýza proběhla s jednotnými vlastnostmi v celém objemu zkušebních těles. Program tedy počítal s kompozitem vyrobeným v ideálním poměru matrice - výztuž. Nebyl uvažován možný nepoměr těchto fází a tím i výrazného ovlivnění podélné deformace vzorku.

Hodnoty měrné hmotnosti získané softwarem Digimat-MF byly téměř shodné s výsledky vypočtenými směšovacím pravidlem. Hustota kompozitního systému vyztuženého jednou vrstvou karbonové tkaniny s plátnovou vazbou byla díky směšovacímu pravidlu vypočtena jako $\rho_{Cp} = 1382$ kg/m^3, výsledek získaný pomocí modelačního programu je 1385,6 kg/m^3. U kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s keprovou vazbou byla získána směšovacím pravidlem hodnota měrné hmotnosti $\rho_{Ck} = 1355$ kg/m^3 a softwarovou analýzou je zjištěná hustota rovna 1358,4 kg/m^3. Lze tedy konstatovat, že v obou případech zkoumaných kompozitních systémů byly rozdíly mezi hustotami reálného a teoretického modelu pouze v jednotkách kg/m^3.

ZÁVĚR A DISKUSE

V teoretické části diplomové práce se nachází popis kompozitních materiálů, jejich složení a rozdělení podle různých kritérií. Dále je zde obsažena charakteristika výztužných systémů, následuje popis mechanických vlastností kompozitů a možnosti využití simulačního softwaru s názornými příklady.

Praktická část se zabývá charakteristikou přípravy kompozitních vzorků a jejich experimentálnímu testování v podobě tahové zkoušky. Dále následuje popis jednotlivých kroků při modelování kompozitních systémů v programu Digimat, přenos získaných výsledků do konečnoprvkového softwaru Marc Mentat a jejich prezentace.

Software provedl analýzy materiálů s různým množstvím negativně působících vzduchových bublin ve struktuře. V simulacích však nebyla zahrnuta možnost porušení vláken ani základní vlastnost zajišťující přenos sil mezi matricí a výztuží v kompozitech, kterou je adheze. Digimat totiž neumí počítat se špatným prosycením výztuže matricí a díky tomu neuvažuje narušení důležitých adhezních sil na rozhraní matrice - disperze, které mají velký vliv na vlastnosti kompozitů. Je tedy pravděpodobné, že dosažené výsledky mohou být ovlivněny tímto faktem.

Cílem diplomové práce bylo posouzení možnosti předpovědi mechanických vlastností kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovou tkaninou dvou typů vazeb (plátno a kepr) s matricí v podobě epoxidové pryskyřice Havel 285. Experimentálně získané tahové vlastnosti v podobě napětí a Youngova modulu pružnosti se blížily k výsledkům analýz modelů obsahující určitá procenta vzduchových bublin ve struktuře kompozitu. Stejně tak měrné hmotnosti zkoumaných materiálů vypočtené směšovacím pravidlem se téměř shodovali s hodnotami získanými modelačním programem.

I přes některé nedostatky se dají hodnoty získané simulací považovat za vyhovující a je proto možné prohlásit, že v případě známé kompozitní struktury zkoumaného materiálu a s dostatečnými informacemi o vlastnostech jednotlivých fází je software Digimat schopen predikovat výsledné atributy kompozitního systému s dostatečnou přesností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SKOČOVSKÝ, P. a kol.: Konštrukčné materiály. Žilina: EDIS, 2000.

[2] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 294 s.

[3] 6. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. In: *Ústav materiálového inženýrství* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf

[4] DAĎOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 80-737-2279-8

[5] DAĎOUREK, Karel. Kompozitní materiály: definice a rozdělení. In: *Katedra materiálu: Technická univerzita v Liberci*[online]. Liberec, 2008 [cit. 2016-01-19]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf

[6] GRANDINE, Thomas A. Surface Modeling for Composite Materials: Background. In: *SIAG GD* [online]. Seattle: The Boeing Company, 2014 [cit. 2016-01-19]. Dostupné z: http://siags.siam.org/siaggd/problems/grandine/

[7] Composite material. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-01-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material

[8] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. Vydání 1. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

[9] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. SNTL - Praha 1: Nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s. ISBN 04-734-88.

[10] HARRIS, Bryan (1999). *Engineering Composite Materials (2nd Edition)*. Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining. Online version available at: http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpECME0001/engineering-composite/engineering-composite

[11] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vydání 1. Brno: VUT v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.

[12] KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY - Ing. Zdenek Korinek, CSc [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: http://mujweb.cz/zkorinek/

[13] JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J.: *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.

[14] TOMÁŠKOVÁ, Tetjana. *Perspektivni kompozity pro elektrotechniku* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11025/3930. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Kučerová Eva.

[15] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.

[16] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol ALEXY, Ernest GONDÁR a Viera KHUNOVÁ. *Polymérne konštrukčné materiály: Odborná publikace* [online]. 2012 [cit. 2016-01-22]. Dostupné z: http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf

[17] Blu-Ray domácí kina. *DNO elektro s.r.o.* [online]. Havířov, 2015 [cit. 2016-01-22]. Dostupné z: http://www.dno.cz/blu-ray-domaci-kina/lg-bh9540tw/

[18] LENFELD, Petr. Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. In: *Technologie II* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm

[19] FILIP, Miloš. Prefa Kompozity bilancuje a zároveň plánuje budoucnost. *Stavební noviny* [online]. Zlín, 2016 [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: http://tvstav.cz/clanek/2032-prefa-kompozity-bilancuje-a-zaroven-planuje-budoucnost

[20] Carbon Fiber Facts. *Carbon Fiber Designs* [online]. Toronto, Ontario, Canada, 2016 [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: http://www.carbonfiberdesigns.com/carbon-fiber-facts.html

[21] PRODUCTS: The Things we create. *Composite resources* [online]. Lakeshore, Rock Hill [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: http://composite-resources.com/custom-order

[22] WYPYCH, GEORGE. Handbook of Fillers: A Definitive User's Guide and Databook. 2nd ed. ChemTec Publishing, 2000. 909 s. ISBN 1-884207-69-3.

[23] Kompozity. *Kompozity - vyztužené plasty: Alternativa k tradičním materiálům* [online]. Tišnov, Česká republika: YCNEGA technologies [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf

[24] Automotive Lightweight Composites: Innovative composite materials from BASF are helpful in automotive lightweighting and reducing carbon emissions. *BASF* [online]. BASF SE, 2015 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: https://www.basf.com/en/company/research/our-focus/lightweight-composites.html

[25] ABUŠINOV, Alexandr. Tepelně tvarovatelné lehké pěny Basotect. *Průmyslové spektrum* [online]. 2007, 2007(7), 54 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-tvarovatelne-lehke-peny-basotect.html

[26] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.

[27] Zekan poklopy: Výhody kompozitních materiálů. *CWS* [online]. Czech republic, 2014 [cit. 2016-01-30]. Dostupné z: http://www.cws.cz/data/produkty/komory-zekan/Zekan_hatchs_CZ.pdf

[28] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004, 154 s. ISBN 80-7043-273-X.

[29] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. *Havel composites* [online]. Česká republika: Havel Composites CZ s.r.o., 2010 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html

[30] Vlastnosti kompozitních materiálů. *WALLMA CZ* [online]. Zlín: WALLMO CZ s.r.o, 2013 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: http://www.wallmocz.cz/data/vlastnosti.pdf

[31] ROVINGOVÉ TKANINY: Vazby Skelných Tkanin. *Altima Bohemia* [online]. Brno: Altima Bohemia s.r.o., 2012 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: http://www.altimabohemia.cz/rovingove-tkaniny.html

[32] Z historie čalounických materiálů: Druhy vazeb klasických čalounických textilií. *Nábytek dnes*[online]. Letohrad: Super QC, 2010 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: http://nabytek-dnes.cz/z-historie-calounickych-materialu-tkane-textilie-p144

[33] *MSC Software* [online]. Newport Beach, California: MSC Software Corporation, 2016 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: http://www.mscsoftware.com/

[34] Digimat. *Simul Plast* [online]. Lipník nad Bečvou: Simulplast s.r.o., 2014 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: http://www.simulplast.cz/digimat.php

[35] Nonlinear Multi-Scale Modeling of Composite Materials and Structures: DIGIMAT Webinar. *Altair* [online]. USA: Altair Engineering, 2016 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: http://www.altair.com/(X(1)S(mmte4ccrhj1zzuckdpulrinb))/EventDetail.aspx?event_id=3057&

[36] Influence of Fiber Orientation and Multiaxiality on the Fatigue Strength of Unnotched Specimens – Lifetime Estimation. WILMES, Andreas a Kurt HORNBERGER. *Procedia Engineering* [online]. 6th Edition. Renningen: ELSEVIER, 2015, s. 148-160 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815045610

[37] Micromechanical modelling for wood–fibre reinforced plastics in which the fibres are neither stiff nor rod-like. NEWMAN, Roger H., Philippe HEBERT, Alan R. DICKSON, Damien EVEN, Alan FERNYHOUGH a David SANDQUIST. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. New Zealand: Scion, 2014, 57-63 [cit. 2016-02-05]. ISBN 1359-835X. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X14001547

[38] A mesoscale ultrasonic attenuation finite element model of composites with random-distributed voids. YU, Yalin, Jinrui YE, Yang WANG, Boming ZHANG a Guocheng QI. *Composites Science and Technology* [online]. Revised 3. Beijing, China: Beihang University, 2013, 44-51 [cit. 2016-02-06]. ISBN 0266-3538. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353813003680

[39] Stress transfer analysis of unidirectional composites with randomly distributed fibers using finite element method. YU, Yalin, Boming ZHANG, Zhanwen TANG a Guocheng QI. *Composites: Part B: Engineering* [online]. II. Beijing 100191, China: School of Materials Science and Engineering, Beihang University, 2014, s. 278–285 [cit. 2016-05-17]. ISBN 1359-8368. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836814004375

[40] Forming: Describe the process of hand lay-up. *Design Technology Wiki* [online]. USA: IB Design Technology, 2012 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: http://www.ruthtrumpold.id.au/designtech/pmwiki.php?n=Main.Forming

[41] High Gloss Carbon Fiber Sheet Sample Pack - 4 Piece Pack. *Carbon Fiber Gear: Luxury Carbon Fiber Products* [online]. © dpitMedia, LLC, 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://store.carbonfibergear.com/high-gloss-carbon-fiber-sheet-sample-pack-4-piece-pack#description

[42] LECIÁN, Václav. *Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014, 112 s. Dostupné také z: http://hdl.handle.net/10563/28574. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Žaludek, Milan.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
3D	Three Dimensional (prostorový).
CAE	Computer Aided engineering.
CMC	Ceramic Matrix Composites (kompozity s keramickou matricí).
ČSN	Česká státní norma.
EN	Evropská norma.
EP-R	Epoxidové pryskyřice.
FE	Finite Element.
GF	Glass Fiber.
HC	HoneyComb
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci.
MAP	Mapping.
MF	Mean field.
MKP	Konečnoprvkový program.
MMC	Metal Matrix Composites (kompozity s kovovou matricí).
MSC	MicroSoft C.
MX	Material eXchange.
PA	Polyamid.
PAN	Polyakrylonitril.
PC	Polykarbonát.
PE	polyetylen
PF-R	Fenolické pryskyřice.
PMC	Plastic Matrix Composites (kompozity s polymerní matricí).
PP	polypropylen
PSU	Polysulfon.
RP	Reinforced Plastics.
RVE	Representative volume element (reprezentativní objemový element).
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice.

Symbol	Jednotka	Popis
ΔL	[mm]	Prodloužení.
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti.
F	[N]	Síla.
F_m	[N]	Maximální síla.
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku.
L_0	[mm]	Původní velikost vzorku.
L_1	[mm]	Velikost vzorku po deformaci.
R_m	[MPa]	Pevnost v tahu.
s	[-]	Směrodatná odchylka.
S_0	[mm^2]	Počátečního průřez zkušebního tělesa.
t	[mm]	Tloušťka.
V_C	[m^3]	Objem kompozitu.
V_m	[m^3]	Objem matrice.
V_v	[m^3]	Objem výztuže
$\bar{x}$	[-]	Střední aritmetická hodnota.
ε	[%]	Poměrná (relativní) deformace.
θ	[°]	Úhel theta.
ν	[-]	Poassonův poměr.
ρ_C	[kg/m^3]	Hustota kompozitu.
ρ_{Ck}	[kg/m^3]	Hustota kompozitu vyztuženého tkaninou s keprovou vazbou.
ρ_{Cp}	[kg/m^3]	Hustota kompozitu vyztuženého tkaninou s plátnovou vazbou.
ρ_m	[kg/m^3]	Hustota matrice.
ρ_v	[kg/m^3]	Hustota výztuže.
σ	[MPa]	Napětí.
σ_m	[MPa]	Maximální napětí.
σ_n	[MPa]	Normálové napětí.
φ	[°]	Úhel phi.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Využití kompozitů k výrobě letadla Boeing 787 [6]. 12
Obr. 1.2 Složení kompozitního materiálu [7]. 13
Obr. 1.3 Schématické znázornění napěťových křivek [3]. 14
Obr. 1.4 Znázornění synergického efektu v kompozitu [4]. 16
Obr. 1.5 Použití polymerních kompozitů v USA v letech 1960 - 2005 [8]. 19
Obr. 2.1 Druhy kompozitů podle typu disperze [4, 5]. 21
Obr. 2.2 Kompozitní materiál prvního typu [23]. 21
Obr. 2.3 Mikrosnímek struktury dřeva [5]. 22
Obr. 2.4 Struktura melaminové pěny Basotect s otevřenými póry [25]. 22
Obr. 2.5 Rozdělení vláknových kompozitních materiálů [2, 28]. 29
Obr. 2.6 Příklady uspořádání vláken v kompozitu: a) jednosměrná orientace kontinuálních vláken, b) dvouosé uspořádání, c) nahodilé uspořádání kontinuálních vláken, d) krátká vlákna s nahodilou orientací [11]. 30
Obr. 2.7 Rozdělení částicových kompozitních materiálů [2, 28]. 31
Obr. 3.1 Plátnová vazba [32]. 33
Obr. 3.2 Keprová vazba [32]. 33
Obr. 3.3 Atlasová vazba [32]. 33
Obr. 3.4 Řez aramidovým vláknem se silným roztřepením v místě lomu [8]. 34
Obr. 3.5 Použití aramidových vláken v reproduktoru [17]. 34
Obr. 3.6 Struktura plastu plněného skleněnými vlákny [18]. 35
Obr. 3.7 Tažený profil vyztužený skleněnými vlákny [19]. 35
Obr. 3.8 Uhlíkové vlákno v porovnání s lidským vlasem [20]. 36
Obr. 3.9 Kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny [21]. 36
Obr. 4.1 Logo softwaru Digimat od společnosti e-Xstream [32]. 37
Obr. 4.2 Využití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu [35]. 38
Obr. 4.3 Mikroskopický snímek struktury kompozitu [37]. 39
Obr. 4.4 Vymodelovaný kompozit v porovnání se skutečnou strukturou [39]. 40
Obr. 6.1 Uhlíková tkanina CC 200 T - 100. 43
Obr. 6.2 Proces ručního laminování kompozitu [40]. 45
Obr. 6.3 Pláty uhlíkových kompozitů [41]. 45
Obr. 6.4 Základní rozměry kompozitního vzorku pro tahovou zkoušku. 46
Obr. 6.5 3D model zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku. 46

Obr. 7.1 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456. 47
Obr. 7.2 Sklíčidla stroje ZWICK 1456 po roztržení zkušebního vzorku [42]. 48
Obr. 7.3 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu - plátnová vazba. 50
Obr. 7.4 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu - keprová vazba. 51
Obr. 8.1 Úvodní okno programu Digimat. 53
Obr. 8.2 Pracovní prostředí nástroje Digimat-MF. 54
Obr. 8.3 Proces výroby a testování zkušebních těles z pryskyřice Havel L 285. 56
Obr. 8.4 Graf závislosti napětí na deformaci matrice z pryskyřice Havel L 285. 57
Obr. 8.5 Model tkaniny plátno (vlevo) a kepr (vpravo). 59
Obr. 8.6 Snímky mikrostruktury kompozitu s uhlíkovou tkaninou - 200x zvětšení. 60
Obr. 8.7 Pracovní prostředí softwaru Marc Mentat 2014.1.0. 62
Obr. 9.1 Graf závislosti napětí na deformaci - plátnová vazba. 63
Obr. 9.2 Simulované prodloužení vzorku s ideální strukturou - plátnová vazba. 64
Obr. 9.3 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu s bublinami - plátnová vazba. 65
Obr. 9.4 Simulované prodloužení vzorku s 12,5 % bublin ve struktuře - plátno. 66
Obr. 9.5 Napětí na vzorku s 12,5 % bublin ve struktuře - plátnová vazba. 67
Obr. 9.6 Normálové napětí vzorku s 12,5 % bublin ve struktuře - plátnová vazba. 67
Obr. 9.7 Graf závislosti napětí na deformaci - keprová vazba. 68
Obr. 9.8 Simulované prodloužení vzorku s ideální strukturou - keprová vazba. 69
Obr. 9.9 Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu s bublinami - keprová vazba. 70
Obr. 9.10 Simulované prodloužení vzorku s 10 % bublin ve struktuře - kepr. 71
Obr. 9.11 Napětí na vzorku s 10 % bublin ve struktuře - keprová vazba. 72
Obr. 9.12 Normálové napětí vzorku s 10 % bublin ve struktuře - keprová vazba. 72

SEZNAM TABULEK

Tab. 7.1 Technické parametry stroje ZWICK 1456. 47
Tab. 7.2 Tahové vlastnosti kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s vazbou plátno. 50
Tab. 7.3 Tahové vlastnosti kompozitu vyztuženého vrstvou tkaniny s vazbou kepr. 51
Tab. 9.1 Mech. vlastnosti RVE kompozitu vyztuženého tkaninou s plátnovou vazbou. 63
Tab. 9.2 Ovlivnění mech. vlastností kompozitu vzduchovými bublinami - plátno. 65
Tab. 9.3 Mech. vlastnosti RVE kompozitu vyztuženého tkaninou s keprovou vazbou. 68
Tab. 9.4 Ovlivnění mech. vlastností kompozitu vzduchovými bublinami - kepr. 70
Tab. 10.1 Srovnání reálných a teoretických vlastností zkoumaných kompozitů. 73

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technický list tkaniny KORDCARBON s plátnovou vazbou

Příloha P II: Technický list tkaniny KORDCARBON s keprovou vazbou

Příloha P III: Technický list pryskyřice Havel 285

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST TKANINY KORDCARBON S PLÁTNOVOU VAZBOU

KORDCARBON

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0056101

Material Code:	TOR000102
Material Designation:	**CC 200 P - 100**
Manufacturing Date:	5.5.2014
Article no.:	CA0001-641-0002
Test roll No.:	C0056101
Finish:	loomstate
Kind of material - warp	Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft	Toray 3K 200 tex
Compatibility	Epoxi resin
Binding	plain

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000102

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 504	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 504	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,32	0,27	0,37	* 0.36	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	200	190	210	203	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 99.9	DIN EN 1773
Density	g/cm3	1,76				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C00561

KORDÁRNA
KORDÁRNA PLUS A.S.

Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří,+420 518 312 528
+ 420 518 329 302,kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST TKANINY KORDCARBON S KEPROVOU VAZBOU

KORDCARBON

Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0057101

Material Code:	TOR000202
Material Designation:	**CC 200 T - 100**
Manufacturing Date:	12.5.2014
Article no.:	CA0004-641-0002
Test roll No.:	C0057101
Finish:	loomstate
Kind of material - warp	Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft	Toray 3K 200 tex
Compatibility	Epoxi resin
Binding	twill 2/2

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000202

Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 506	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 504	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,38	0,35	0,41	* 0.40	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	200	190	210	202	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100.2	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C00571

KORDÁRNA
KORDÁRNA PLUS A.S.

Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří,+420 518 312 528
+ 420 518 329 302,kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE HAVEL 285

Havel L285

Laminating resin L 285
Hardener 500

Ein Unternehmen der Bakelite Gruppe

Characteristics

Approval:	--
Application:	Production of composite structures Boat and shipbuildung Sports equipment Model airplanes Moulds and tools
Operational temperature:	-60°C --> +50 - 60°C (-75°F -->+ 120 - 140°F) without heat treatment
Processing:	At temperatures between 10°C and 40°C (50-105°F) All usual processing methods
Special properties:	Extremely good physiological compatibility Good mechanical properties Very short curing times even at low temperatures
Special modifications:	L 285 T: Thixotropic L 285 W: White

Application

Low-viscosity laminating resin system not containing solvents or fillers, intended for processing and curing at room temperature. Suitable for production of parts with glass, carbon and aramide fiber reinforcements featuring high static and dynamic loadability.
The pot live is approx. 10 - 15 min. Laminating resin L 285 combined with hardener 500 is distinguished by very short curing times even at low temperatures (good curing is assured at temperatures starting at +10 °C). Non-tacky, high-gloss surfaces are obtained even with unfavorable curing conditions, such as lower temperatures or high relative humidity.

The mixing viscosities have been adjusted such that the resin will not run out of wide-meshed fabrics on vertical surfaces.

Thanks to their excellent adhesive properties, this system can also be used as adhesives for wood, metal, glass, concrete and numerous plastics. The thixotropic modification (e.g. laminating resin L 285 T) is to be preferred for thicker adhesive joints and vertical surfaces. Fillers (e.g. metal powder, talcum, cotton flakes, etc.) may be admixed to obtain special system properties.
Due to the elongation of 4-7%, which is advantageous for use as a laminating resin, the shear strength and peel resistance are somewhat lower than those of our special adhesive resins:
Adhesive resin L 135 / K2 and
Adhesive resin A 10 / A 20.

As a general rule applicable to all adhesives, thorough preparation of the intended adhesion surface is a fundamental prerequisite for good adhesion. Parting agent residue and contamination, such as dust, grease or water residue, will prevent effective bonding.

Storage

The resins and hardeners can be stored for at least 12 months in their carefully sealed original containers. The resins and hardeners may crystallize at temperatures below +15°C(60°F). The crystallization is visible as a clouding or solidification of the contents of the container. Before processing, the crystallization must be removed by warming up. Slow warming up to approx. 50 - 60°C (120-140°F) in a water bath or oven and stirring or shaking will clarify the contents of the container without any loss of quality. Use only completely transparent products. Before warming up, open containers slightly to permit equalization of pressure. Caution during warm-up! Do not warm up over an open flame! While stirring up use safety equipment (gloves, eyeglasses, respirator).

Processing details — *Caractéristiques de mise en oeuvre*

	Laminating resin L 285 *Résine L 285*	Hardener 500 *Durcisseur 500*
Average EP -Value *Valeur moyenne EP*	0,63	–
Average amine equivalent *Équivalent moyen d'amine*	–	62

Mechanical data of unreinforced resin — *Données mécaniques de la masse de résine non renforcée*

Density *Densité*	lbs/gal g/cm³	9.8 – 10 1,18 - 1,20
Flexural strength *Résistance à la flexion*	psi x 10³ N/mm²	17 - 20 120 - 140
Modulus of elasticity *Module d'élasticité en flexion*	psi x 10⁵ kN/mm²	4.8 - 5.1 3,3 - 3,5
Tensile strength *Résistance à la traction*	psi x 10³ N/mm²	10 - 11.5 70 - 80
Compressive strength *Résistance à la pression (Dureté)*	psi x 10³ N/mm²	18 - 20 120 - 140
Elongation *Allongement*	%	5 - 6,5
Impact strength *Résistance aux chocs*	Nmm/mm²	40 - 50
Shore hardness *Dureté / Shore*	D	86 - 90
Water absorption % *Absorption d'eau %*	24 h 23°C (75°F) 7 d/23°C (75°F)	0,10 - 0,20 0,20 - 0,50
Fatigue strength under reversed bending stresses acc. to DLR Brunsw. *Tenue à la flexion alternée selon DLR Braunschweig*	10% 90%	exp. 2 X 10⁶ exp. 2 X 10⁶
Curing: **24 h at 23°C (75°F)** **+ 15 h at 60°C (140°F)** ***Durcissement:*** ***24 h à 23°C*** ***+ 15 h à 60°C***		
Representative data according to **WL 5.3203 Parts 1 and 2** of the German Aviation Materials Manual.		***Données représentatives*** *établies d'après les régulations* ***WL 5.3203 parts 1 et 2*** *prises du manual sur les matières de l'aviation allemande*

Specifications

		Laminating resin L 285 *Résine L 285*
Density *Densité*	lbs/gal / 77°F g/cm³ / 25°C	9.85 - 10.26 1,18 - 1,23
Viscosity *Viscosité*	cps / 77°F mPas / 25°C	600 - 900
Epoxide equivalent *Équivalent époxy*	–	165 - 170
Epoxide value *Valeur EP*	–	0,59 - 0,65
Colour *Coloration selon*	Gardner	max 3

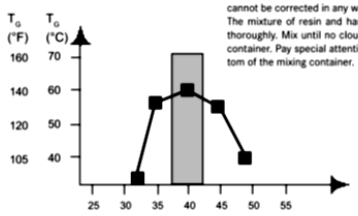
		Hardener 500 *Durcisseur 500*
Density *Densité*	lbs/gal / 77°F g/cm³ / 25°C	8.34 - 8.84 1,00 - 1,06
Viscosity *Viscosité*	cps / 77°F mPas / 25°C	200 - 350
Amine value *Indice d'amine*	mg KOH / g	350 - 400
Colour *Coloration selon*	Gardner	max 5

Laminating resin L 285 - Hardener 500 ***Résin L 285 - Durcisseur 500***	
Max T_G for curing at 18°C (65°F) *Max T_G à 18°C durcissement*	100 - 110°F 40 - 45°C
Max T_G for curing at 25°C (80°F) *Max T_G à 25°C durcissement*	120 - 150°F 50 - 60°C
Max T_G for heat treatment at 50°C (120°F) *Max T_G à 50°C traitement thermique*	140 - 150°F 60 - 65°C

Mixture ratio

	Resin L 285 : Hardener 500 *Résines L 285 : Durcisseur 500*
Parts by weight ***Parts de poids***	**100 : 40 +/-2**
Parts by volume ***Parts de volume***	**100 : 50 +/-2**

Mixing ratio <--> glass transition temperature



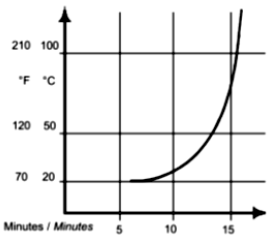
.....Parts by weight of hardener 500 to 100 parts by weight of laminating resin L 285
Curing: 14 days at 25°C (80°F)

The specified mixing ratios must be observed as exactly as possible. Adding more or less hardener will not effect a faster or slower reaction - only incomplete curing which cannot be corrected in any way.
The mixture of resin and hardener must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and the bottom of the mixing container.

Temperature rise

Quantity: 100 g/20°C (70°F)

The optimal processing temperature is in the range between 20 and 25°C (70-80°F). Higher processing temperatures are possible, but will shorten pot life. A rise in temperature of 10 °C (20°F) will halve the pot life. Water (for example very high humidity or contained in fillers) causes an acceleration of the resin/hardener reaction. Different temperatures and humidities during processing have no significant effect on the strength of the cured product.
Do not mix large quantities, especially from this highly reactive system. The heat flow from the mixing container is very low, so the contents will be warmed up very fast because of the reaction heat (exothermic resin-hardener reaction). This can cause temperatures >200°C (400°F) which may cause smoke intensive burning of the resin-hardener mixture.



Gel time

Film thickness 1 mm at different temperatures

70 - 80°F 20 - 25°C	app. 45 - 60 min. env. 45 - 60 min.
105-115°F 40 - 45°C	app. 20 - 30 min. env. 20 - 30 min.