

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Ing. Blanka Tomková

**Modelování termofyzikálních vlastností kompozitů
s tkanou výztuží**

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: **MODELOVÁNÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH
VLASTNOSTÍ KOMPOZITŮ S TKANOU
VÝZTUŽÍ**

Autor: **Ing. Blanka Tomková**

Obor doktorského studia: textilní materiálové inženýrství

Forma studia: kombinovaná

Školící pracoviště: Katedra textilních materiálů

Školitel: Doc. Ing. Bohumila Košková, CSc.

Školitel specialista: Prof. RNDr. Ing. Miloslav Košek, CSc.

Liberec 2006

Obsah autoreferátu:

| | |
|---|----|
| 1. Předmět a cíl práce | 1 |
| 2. Přehled současného stavu problematiky | 1 |
| 3. Použité metody | 5 |
| 3.1 Charakteristika vzorků | 5 |
| 3.2 Obrazová analýza vzorků | 5 |
| 3.3 Tvorba geometrického modelu struktury tkaninového kompozitu | 6 |
| 3.4 Výpočet termofyzikálních parametrů | 10 |
| 3.5 Experimentální měření termofyzikálních parametrů | 11 |
| 4. Přehled dosažených výsledků | 12 |
| 4.1 Přenos tepla v uhlíkovém káblku | 12 |
| 4.2 Přenos tepla v periodické strukturní buňce kompozitu | 12 |
| 4.3 Přenos tepla v kompozitní desce | 13 |
| 5. Zhodnocení výsledků a nových poznatků | 15 |
| 6. Práce autora se vztahem ke studované problematice | 16 |
| 7. Literatura | 17 |
| 8. Summary | 20 |

PŘÍLOHY

1. Předmět a cíl práce

Předložená disertační práce je zaměřena na studium přenosu tepla v porézní struktuře tkaninového kompozitu uhlík-uhlík (C/C) a na studium možností stanovení efektivních hodnot termofyzikálních parametrů pro tento materiál. Cílem práce bylo vytvoření vhodného geometrického modelu, který by zahrnoval významné strukturní imperfekce (skluz jednotlivých vrstev výztuže, nahloučení výztuže, póry a trhliny) a který by bylo možné využít pro výpočet termofyzikálních parametrů studovaného kompozitu.

Pro tvorbu geometrického modelu studovaného kompozitu byla využita metodika vícestupňového modelování struktury a vlastností heterogenních materiálů, pro výpočet termofyzikálních vlastností byl využit systém FEMLab umožňující numerické řešení rovnice vedení tepla.

Výhodou tohoto přístupu je, že vícestupňový strukturní model umožňuje v maximální možné míře zachytit strukturu reálného kompozitu a použitý výpočetní program umožňuje přímé stanovení materiálových parametrů jednotlivých složek a nastavení parametrů výpočtu tak, abychom mohli simulovat reálné podmínky tepelného zatížení.

2. Přehled současného stavu problematiky

Kompozity C/C patří mezi špičkové materiály využívané pro konstrukci strojů a zařízení, kde je vyžadována vysoká tepelná a mechanická odolnost. Mají velmi nízkou tepelnou roztažnost, vysokou tepelnou vodivost a jejich mechanické vlastnosti se zlepšují ještě při teplotách nad 2000°C. Jsou také velmi odolné vůči teplotním šokům a následnému šíření trhlin vlivem extrémních teplotních změn. Bohužel tyto vynikající vlastnosti se projevují pouze v inertní atmosféře nebo ve vakuu. V kyslíkové atmosféře dochází k prudké oxidaci (shoření) uhlíku již při teplotách nad 400°C [29,50].

Kompozity C/C patří mezi heterogenní materiály se složitou porézní strukturou. Dokonce ani na úrovni mikrostruktury zde nenajdeme homogenní materiál. Z tohoto hlediska se jako nejlepší přístup pro výpočet materiálových vlastností kompozitů C/C jeví vytvoření vícestupňového strukturního modelu, kdy strukturu a vlastnosti materiálu popisujeme postupně v nano-, mikro-, mezo- a makropohledu [48,52].

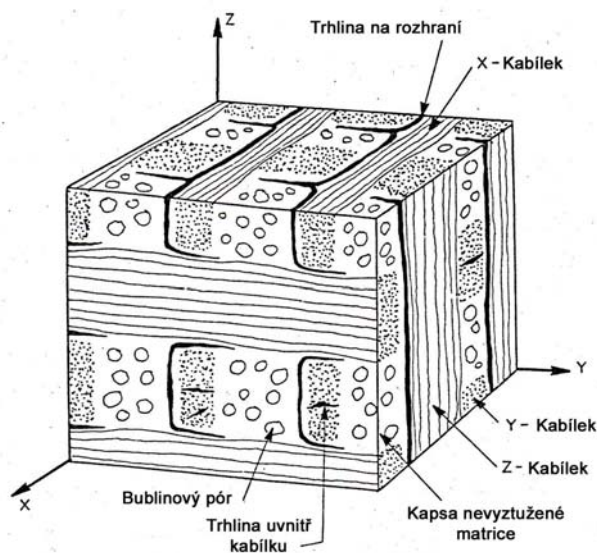
V nanopohledu jsou obvykle charakterizovány struktura a vlastnosti grafenových rovin a jejich rozložení ve struktuře uhlíkových vláken, uspořádání uhlíku v matrici apod. Z těchto charakteristik pak vychází definice vlastností uhlíkových vláken i matrice. V mikropohledu jsou popsány objemové podíly a uspořádání uhlíkových vláken v multifilu (kábílek), pórovitost uhlíkových kábílků, objemový podíl matrice v kábítku aj. V mezostruktuře kompozitu tvoří vlákna ve formě uhlíkových kábílků kompozitní výztuž. Jejich tvar a rozložení závisejí na typu uhlíkové výztuže, která může být 1D (kábílky), 2D (tkaninový laminát) nebo 3D (některé splétané struktury). Makrostrukturu pak tvoří kompozitní deska, jako finální produkt výrobního procesu [50].

Uhlíkové kompozity jsou většinou vystaveny zatížení při extrémních podmínkách a experimentální zařízení pro simulaci těchto podmínek je velmi drahé. Proto jsou neustále zdokonalovány virtuální modely kompozitů, umožňující predikci chování těchto materiálu při extrémním zatížení pomocí počítačových simulací [26,34]. Pro věrohodnost vypočtených hodnot materiálových vlastností a výsledků z počítačově simulovaných zatížení je nezbytné, aby se strukturní a materiálové parametry jednotlivých složek virtuálních kompozitů co nejvíce blížily vlastnostem materiálů reálných. Proto je v posledních letech věnována

mimořádná pozornost tvorbě strukturních modelů, které by zohlednily parametry reálné struktury včetně významných strukturních imperfekcí.

Současné modely tkaninových laminátů jsou tvořeny na základě důkladného studia vnitřní struktury kompozitu zejména pomocí obrazové analýzy vnitřní struktury materiálu. Mikrofotografie jako nejlepší zdroj strukturních dat jsou využívány už poměrně dlouhou dobu. Jejich studium umožňuje přímé vyhodnocení morfologie výztuže, matrice i dutin. Od začátku jejich použití v materiálovém inženýrství jsou řešeny následující otázky: které geometrické parametry měřit a jak tato data zpracovat, abychom získali hlubší poznatky o vztahu mezi technologií výroby, vlastnostmi a strukturou studovaného kompozitního materiálu a abychom mohli tyto vztahy vhodně kvantifikovat.

Jednu z nejstarších prací na dané téma publikoval Jortner [33]. Autor řešil problematiku popisu strukturních imperfekcí v kompozitu C/C. Jako základní prvky struktury byly definovány uhlíkové kabíčky, uhlíková matrice a tzv. makropóry (trhliny a bublinové póry vzniklé v důsledku termomechanického procesu přípravy uhlíkového kompozitu), viz obr.2.1. V závěru práce je diskutován vliv jednotlivých strukturních komponent na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu.

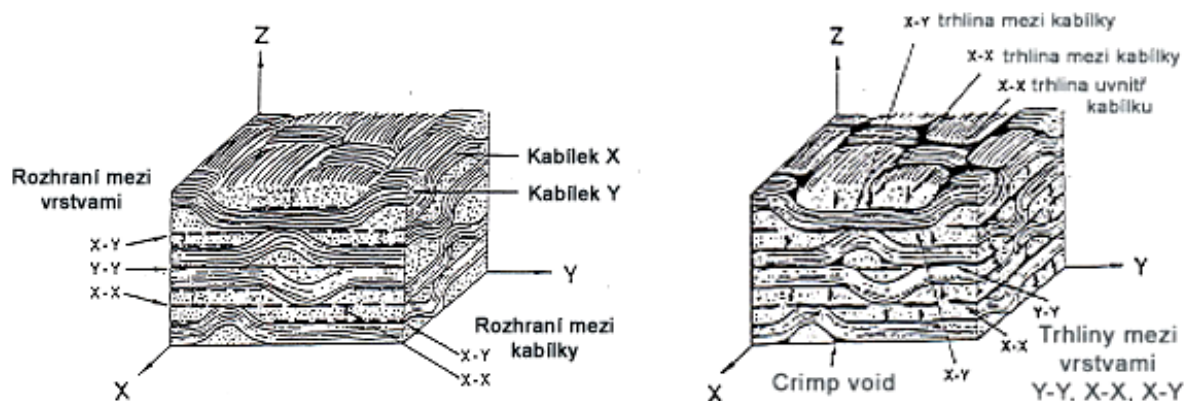


Obr.2.1 Strukturní model kompozitu uhlík-uhlík [33]

Rozvoj zobrazovacích technik umožnil zlepšení metodiky popisu struktury tkaninových kompozitů. Geometrie kompozitní struktury byla kvantifikována v rozmezí od mezo- po nanostrukturu. Yurgartis [55] publikoval přehled metod pro vyhodnocení následujících strukturních parametrů: rozložení vláken v kabíčku, struktura mikrotrhlin, tvar a rozložení tkané výztuže.

Tyto postupy se staly základem pro další zlepšení modelů popisujících mezostrukturu, zejména geometrii tkané výztuže se zahrnutím strukturních imperfekcí, a mikrostrukturu kompozitu, např. rozložení vláken v kabíčku apod. Trhliny a póry byly popisovány nejen podle tvaru a velikosti, ale i s ohledem na jejich pozici ve struktuře (mezisvazkové trhliny, transversální trhliny v kabíčku).

Podrobnou charakteristiku systému dutin v kompozitu C/C prezentoval Gao [30]. Systém dutin je popsán vzhledem k jejich pozici, velikosti a orientaci. Dutiny jsou rozděleny do čtyř skupin: velké trhliny mezi vrstvami výztuže, trhliny mezi káblíky, trhliny a póry uvnitř káblíků, obr. 2.2. Mezi velkými trhlinami jsou zmíněné i tzv. *crimp voids*, dutiny vzniklé v důsledku neprosycení výztuže matricí ve vazném bodě vyztužující tkaniny.



Obr. 2.2 a) 3-D model tkaninového kompozitu C/C, b) popis velkých trhlin a dutin v kompozitu C/C [30].

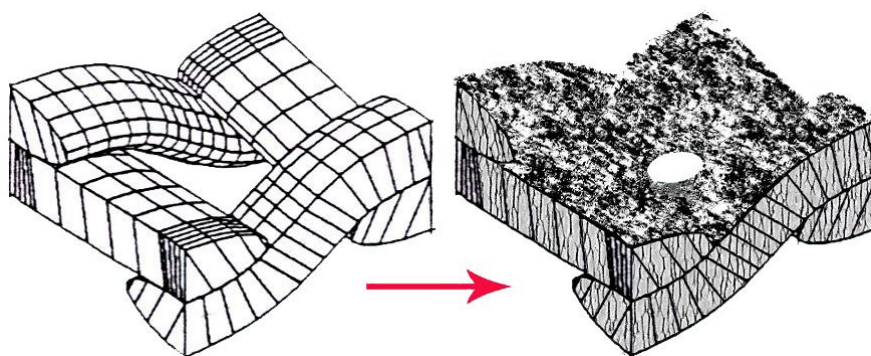
Tyto práce se staly základem rozsáhlého výzkumu věnovaného modelování geometrie tkané kompozitní výztuže. Výzkumná skupina Jortnera se zabývá studiem geometrie tkané výztuže metodami obrazové analýzy [32,56]. Pomocí strukturních mikrofotografií byly získávány souřadnice průběhu vazné vlny, které byly následně aproximovány polynomičnou funkcí. Stanovení úhlů sklonu vazné vlny a jejich rozdělení se staly základem kvantitativního popisu vazné vlny. Věrohodnost určení délky vazné vlny je poněkud snížena kvůli limitované velikosti mikrofotografií studovaných struktur, které nemožnily zachycení průběhu více než jedné vazné vlny.

Práce Jortnera ukázaly na potenciál tvorby strukturních modelů, jsme-li schopni určit souřadnice jednotlivých složek kompozitu, zároveň však odhalily celou řadu problémů souvisejících s tímto přístupem. Tyto problémy vedly k tomu, že strukturní mikrofotografie většinou slouží jen jako zdroj základních geometrických parametrů umožňujících vytvoření jednotkové buňky reprezentující periodickou strukturu tkané výztuže. Výsledná 2D a 3D kompozitní struktura je pak formována pomocí opakování příslušné strukturní buňky. Geometrie výztuže je popsána pomocí jednoduchých matematických funkcí (nejčastěji funkce sinus), ať už popisujeme průběh vazné vlny nebo příčný průřez vlákněného svazku [23,41,43].

Na TU Liberec je vyvíjena metodika rekonstrukce reálného tvaru kompozitní výztuže. Byla připravena rozsáhlá databáze strukturních mikrofotografií, které zachycují povrch náhodných řezů realizovaných ve směru osnovy a útku tkané výztuže. Tato databáze slouží jako zdroj pro odhad strukturních parametrů pomocí původních softwarů. Ty byly vytvořeny pro popis průběhu vazné vlny pomocí Diskrétní Fourierovy Transformace (DFT) z řádově desítky za sebou následujících vazných vln a pro vizualizaci kompozitní výztuže pomocí jazyka VRML [35,38,39,46]. Ucelený popis aplikace DFT je v doktorské práci Vopičky [54], získané poznatky jsou využívány v dalším výzkumu. Výzkumný tým Šejnohy [58] využívá DFT pro popis výztuže ve strukturní buňce, kde jsou zahrnuty i strukturní imperfekce, jako je skluz tkaných vrstev, nahloučení výztuže. Tato buňka slouží pro výpočet mechanických

vlastností kompozitů. Využití vizualizace kompozitní struktury v kompozitním inženýrství jsou diskutovány v [37,44]. Získané poznatky jsou dále využívány při rozvoji a aplikaci vizualizačních technik ve spolupráci s výzkumným týmem Lomova [45].

Nevýhodou předložených modelů je, že do detailu popisují geometrii tkané výztuže, ale víceméně ignorují pórovitost tkaninových laminátů. Ačkoliv je zřejmé, že pórovitost (zejména u tkaninových kompozitů C/C) je důležitou vlastností tohoto typu materiálu [31,49], metody její kvantifikace jsou řešeny v řadě prací [30,57] a dokonce jsou vytvářeny modely prostorového rozložení dutin pomocí vizualizačních technik [25,35], složitost systému dutin stále neumožňuje zahrnutí dutin do strukturních modelů, pokud popis dutin není maximálně zjednodušen, viz. obr. 2.3.



Obr 2.3 Model jednoduché dutiny ve strukturní buňce kompozitu, vytvořený Kuhnem a Charalambidesem [41].

Možným řešením tohoto problému je tvorba vícestupňového strukturního modelu, s úspěchem využívaného pro popis struktury a vlastností řady složitých heterogenních systémů. Tento přístup byl proto využit pro popis struktury studovaných kompozitních vzorků s cílem zachytit systém dutin ve struktuře a zhodnotit jejich vliv na přenos tepla v kompozitu a jeho efektivní termofyzikální vlastnosti (tepelnou vodivost, teplotní vodivost a měrné teplo).

Přenos tepla ve studované kompozitní struktuře je popsán Fourierovou rovnicí vedení tepla [28,42]. Tato rovnice je řešena metodou konečných prvků pomocí modulu *Heat transfer application mode* systému FEMLab [27]. Výsledkem řešení je grafické znázornění rozložení teploty a tepelných toků ve studovaném kompozitním vzorku a efektivní hodnoty jeho termofyzikálních vlastností [16,21,22].

3. Použité metody

3.1 Charakteristika vzorků

V této práci je studována struktura a tepelné vlastnosti kompozitu C/C vyztuženého uhlíkovou tkaninou v plátňové vazbě, kde polymerním prekurzorem matrice byla fenolická pryskyřice UMAFORM LE. Fenolické pryskyřice jsou negrafitizovatelné, po jejich pyrolýze vzniká uhlíková matrice, která zachovává zesíťovanou strukturu původního polymerního prekurzoru. Taková uhlíková matrice je izotropní, její struktura se podobá struktuře skelného uhlíku [29,50].

V důsledku tepelného rozkladu polymerního prekurzoru a jeho transformace do podoby uhlíkové matrice vzniká v kompozitní struktuře nezanedbatelné množství pórů a trhlin. Celková pórovitost finálního grafitizovaného materiálu dosahuje hodnoty až 30 % [14,15,50], z toho 10 až 15 % připadá na pórovitost uhlíkového kabílku. Pórovitost finálního kompozitu C/C je vrozenou vlastností tohoto typu materiálu, proto bychom ji při analýze kompozitní struktury neměli zanedbávat.

3.2 Obrazová analýza vzorků

Struktura vzorků byla studována na příčných řezech kompozitní destičkou v polarizovaném světle. Její snímky byly pořízeny pomocí systému počítačově podporované obrazové analýzy, složeném z následujících komponent:

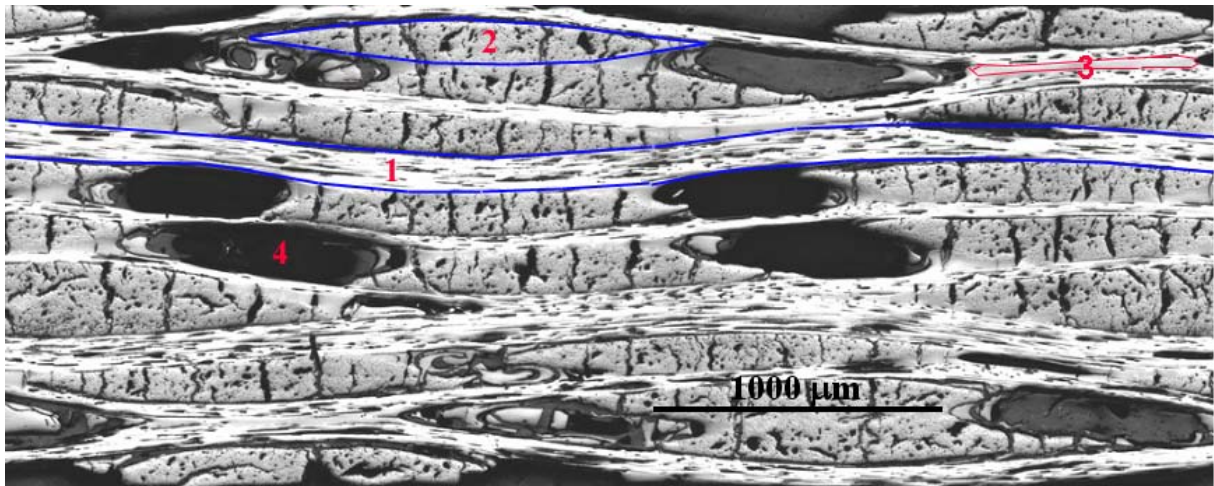
- optický mikroskop NIKON ECLIPSE E 600, automatický posuvný stolek Märzhäuser, digitální kamera VDC 1300C, software LUCIA G

Metodou postupného odbrušování a snímání povrchu příčných řezů byla vytvořena rozsáhlá databáze mikrofotografií zachycujících strukturu kompozitních vzorků v ekvidistantních rovinách. Tento postup nám umožnil udělat si představu o skutečné prostorové struktuře kompozitní destičky, analyzovat morfologii výztuže, i složitěho systému pórů a trhlin.

Další zpracování získaných obrazů, analýza jednotlivých strukturních složek a vyhodnocení strukturních parametrů bylo provedeno pomocí následujících softwarů: LUCIA G, AdobePhotoshop, Matlab R12.

Geometrie výztuže byla popsána s ohledem na informace zmíněné v publikacích [51,54]. Systém pórů a trhlin byl rozdělen do dvou základních skupin podle jejich tvaru, velikosti a polohy v kompozitní struktuře:

- mezisvazkové dutiny (velké vakuoly a delaminační trhliny, které tvoří až 15 - 20% objemu periodické strukturní buňky; velikost plochy velké vakuoly se řádově shoduje s velikostí plochy průřezu uhlíkového kabílku)
- dutiny uvnitř vlákenných svazků (transverzální trhliny a póry; velikost plochy transversální trhliny může být až 1000x větší než průměr uhlíkového vlákna)



Obr. 3.1 Základní strukturní složky kompozitu uhlík-uhlík s tkanou výztuží: 1 - uhlíkové kablíčky v podélném řezu, 2 - uhlíkové kablíčky v příčném průřezu, 3 - uhlíková matrice, 4 - dutiny

Detailní popis systému dutin hraje důležitou roli při formulaci výsledného strukturního modelu. Důkladná analýza geometrie struktury a vlastností jednotlivých strukturních komponent vedla k formulaci vícestupňového modelu geometrie kompozitní struktury, který byl použit jako vstupní parametr pro simulaci přenosu tepla pomocí systému FEMLab.

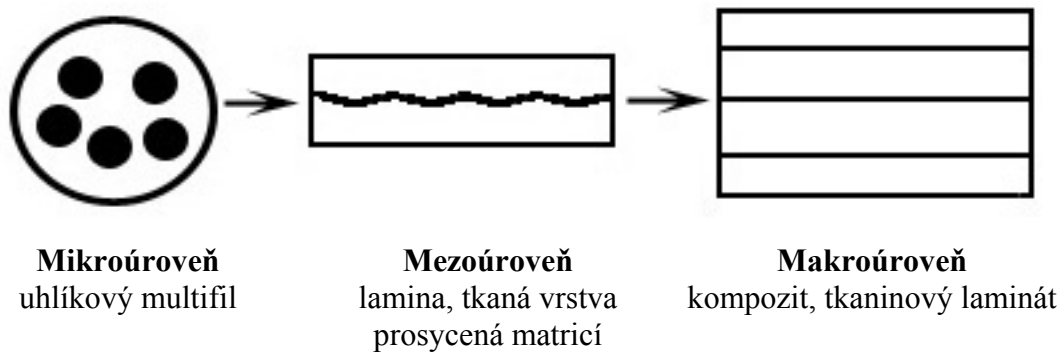
3.3 Tvorba geometrického modelu struktury tkaninového kompozitu

Při tvorbě vícestupňového strukturního modelu vycházíme z následujících předpokladů:

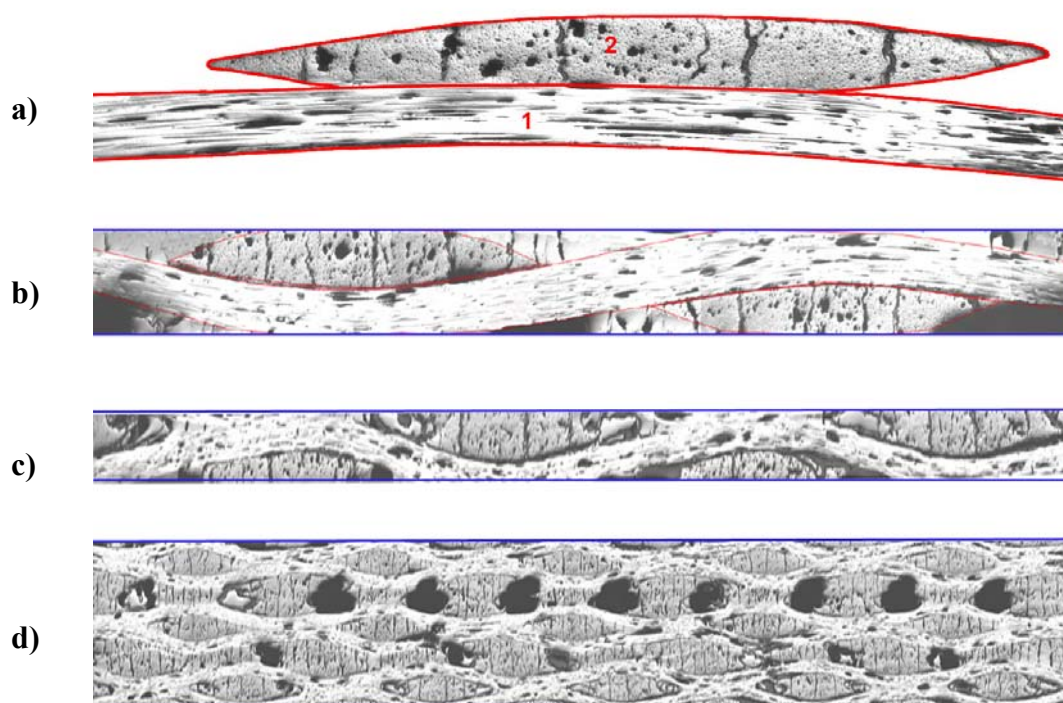
- Pro danou kompozitní technologii jsou základní vlastnosti strukturních složek kompozitu jednoznačně definované (např. základní vlastnosti vláken).
- V procesu přípravy kompozitu se vlastnosti vláken v nanopohledu (např. uspořádání grafenových rovin ve struktuře uhlíkových vláken) prakticky nemění.
- Uhlíková matrice se v průběhu výroby formuje do podoby izotropního uhlíku, který se strukturou a vlastnostmi blíží struktuře tzv. skelného uhlíku [29,50].

Kompozitní technologie ovlivňuje zejména mikro- a mezostrukturu materiálu, kdy při prosycování pryskyřicí, lisování a následném tepelném zpracování kompozitu dochází ke změnám rozložení vláken v kablíčku a ke změnám uspořádání kablíčků ve vyztužující textilií, dále pak k rozvoji pórů a trhlin v kompozitní struktuře.

Vzhledem ke složitosti studované struktury byl připraven vícestupňový strukturní model. Jednotlivé strukturní složky byly definovány postupně na mikro- (struktura uhlíkových kablíčků), mezo- (tканá výztuž v uhlíkové matrici) a makroúrovni (kompozitní destička), viz obr. 3.2. Schéma připraveného vícestupňového strukturního modelu je na obrázku 3.3.



Obr.3.2 Jednotlivé strukturní úrovně kompozitu s tkanou výztuží

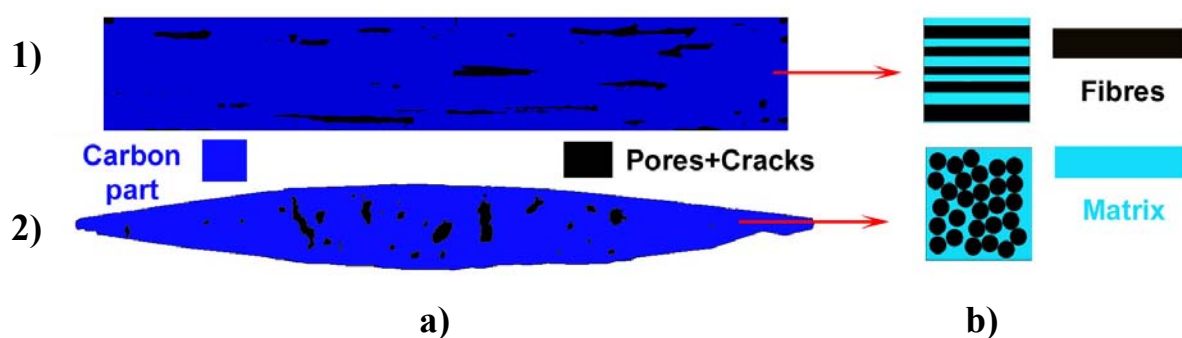


Obr. 3.3 Schéma víceúrovňového strukturního modelu: a) uhlíkový kabílek (1 – podélný řez, 2 – příčný řez), b) strukturní buňka kompozitu, c) kompozitní lamina, d) kompozitní deska

Jednotlivé úrovně vícestupňového strukturního modelu

- **Uhlíkový kabílek**

Model uhlíkového kabíčku představuje kompozitní mikrostrukturu a je nejnižší úrovní vícestupňového strukturního modelu. Struktura uhlíkového kabíčku je modelována pomocí *dvoustupňového geometrického modelu*. Tento model je postaven na předpokladu, že kabílek tvoří dvě fyzikálně odlišné složky – uhlíková část a náhodně rozložené dutiny vyplněné vzduchem. Uhlíkovou část pak tvoří uhlíková vlákna rovnoměrně rozložená v uhlíkové matrici. V první fázi je modelována struktura systému vlákno-matrice a následně jsou počítány jeho termofyzikální parametry. Vypočtené hodnoty termofyzikálních parametrů (tepelné vodivosti, teplotní vodivosti a měrného tepla) uhlíkové části slouží jako vstupní hodnoty pro výpočet termofyzikálních vlastností systému uhlík-dutiny.



Obr. 3.4. Dvoustupňový geometrický model struktury uhlíkového kabíčku
1) podélný řez, 2) příčný řez
a) systém uhlík-dutiny, b) systém vlákna-matrice

- **Periodické strukturní buňky (PUC)**

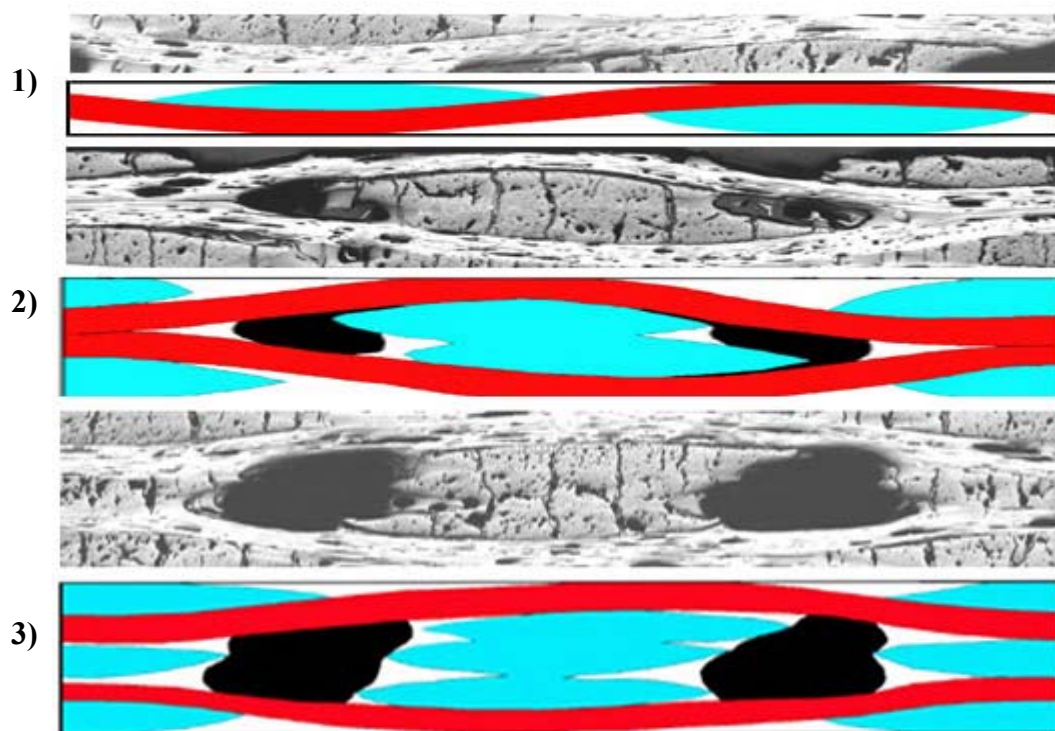
Další krokem je formulace periodické strukturní buňky kompozitu. Zde předpokládáme, že uhlíkové kabíčky tvoří v tkané výztuži periodicky se opakující strukturu. Na základě strukturní analýzy byly definovány tři charakteristické typy periodických buněk reprezentujících strukturu studovaného kompozitu (obr. 3.5). Uhlíkové kabíčky jsou zde prezentovány jako homogenní složka s efektivními vlastnostmi vypočtenými v předchozím kroku.

- **Kompozitní lamina**

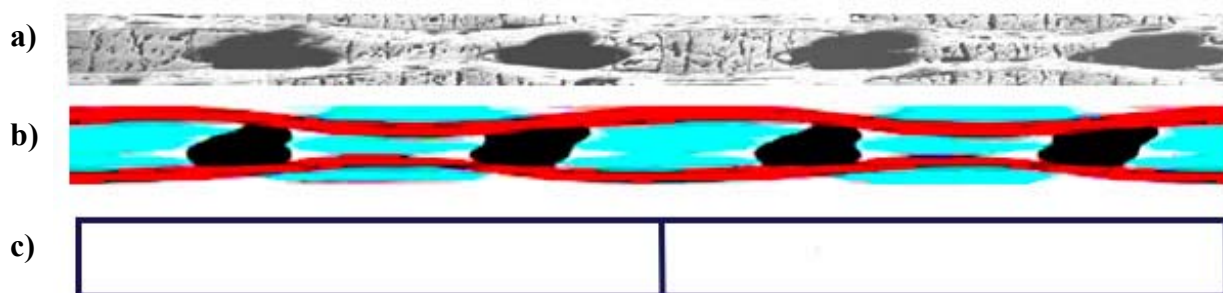
Kompozitní laminy (jedno- i dvouvrstvé) jsou vytvořeny translací příslušných PUC, které jsou v tomto stupni uvažovány jako homogenní kvádr o přesně definovaných rozměrech (obr. 3.6). Počet PUC v lamině je stanoven s ohledem na velikost experimentálně měřených kompozitních vzorků.

- **Kompozitní deska**

Jako poslední krok byla modelována kompozitní deska jako kombinace vybraných lamin. Její rozměry byly zvoleny tak, aby odpovídaly rozměrům studovaných kompozitních vzorků (destička o rozměrech 30x30x2 mm). Schéma finální kompozitní desky je ukázáno na obrázku 3.7.



Obr. 3.5 Periodické strukturální buňky (PUC) reprezentující studovanou kompozitní strukturu:
 1) PUC1 sestává pouze z uhlíkových káblků a matrice bez přítomnosti velkých dutin
 2) PUC2 zachycuje přítomnost velkých dutin spojených s delaminačními trhlinami v místě, kde došlo ke skluzu výztuže, 3) PUC3 zachycuje velké vakuoly v místě, kde došlo v důsledku nerovnoměrného rozložení výztuže k zeslabení vyztužujícího efektu (tzv. přemostění) [23].



Obr. 3.6 Strukturální model kompozitní laminy: a) mikrofotografie laminy, b) schéma laminy, c) cihlový model laminy složený ze dvou PUC



Obr. 3.7 Schéma finální kompozitní desky

3.4 Výpočet termofyzikálních parametrů

Simulace přestupu tepla v kompozitní destičce byla provedena pomocí výpočtového modulu Heat Transfer Mode v systému FEMLab. Předpokládáme-li stacionární okrajové podmínky, žádný vnitřní zdroj tepla a přenos tepla vedením, můžeme přenos tepla ve studovaném kompozitním materiálu popsat diferenciální rovnicí 3.1 (Fourierova rovnice vedení tepla):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) = 0 \quad (3.1)$$

kde ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] představuje hustotu materiálu, c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] představuje měrné teplo a k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] představuje tepelnou vodivost materiálu. Parametry jednotlivých kompozitních složek byly stanoveny na základě dostupných informací o struktuře a vlastnostech kompozitů C/C [29,47,50] a jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Materiálové parametry základních složek kompozitu C/C, které byly použity jako vstupní hodnoty pro numerické řešení rovnice vedení tepla. Hodnoty jednotlivých parametrů byly stanoveny při teplotě 25°C [59,60].

| Kompozitní složky | Tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | Měrné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] |
|--------------------------|--|--|--|
| Uhlíková vlákna | [35; 0.35; 0.35] ¹⁾ | 753 | 1810 |
| Uhlíková matrice | 6.3 ²⁾ | 1256 | 1400 |
| Dutiny vyplněné vzduchem | 0.02 | 1000 | 1.3 |

Simulace přenosu tepla v uhlíkovém kompozitu a výpočet efektivních hodnot termofyzikálních parametrů v systému FEMLab je postaven na numerickém řešení rovnice vedení tepla metodou konečných prvků [27].

Jako počáteční podmínka byla definována nulová teplota v celé ploše vzorku. Tato podmínka určuje rozložení teploty ve vzorku v čase t_0 [s].

$$T(x, t_0) = T_0(x) \equiv 0 \quad (3.2)$$

Na vnější hranici byly definovány následující okrajové podmínky:

- Dirichletova o.p. $T = T_p$

Tato okrajová podmínka popisuje rozložení teploty na hranici

- Neumanova o.p. $\vec{n} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) = 0$

Tato okrajová podmínka simuluje izolaci od okolního prostředí

¹⁾ Uhlíková vlákna jsou transversálně izotropní; tenzor [$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$] představuje hodnoty tepelné vodivosti ve směru rovnoběžném s osou vlákna (λ_x) a ve směrech kolmých k ose vlákna (λ_y, λ_z).

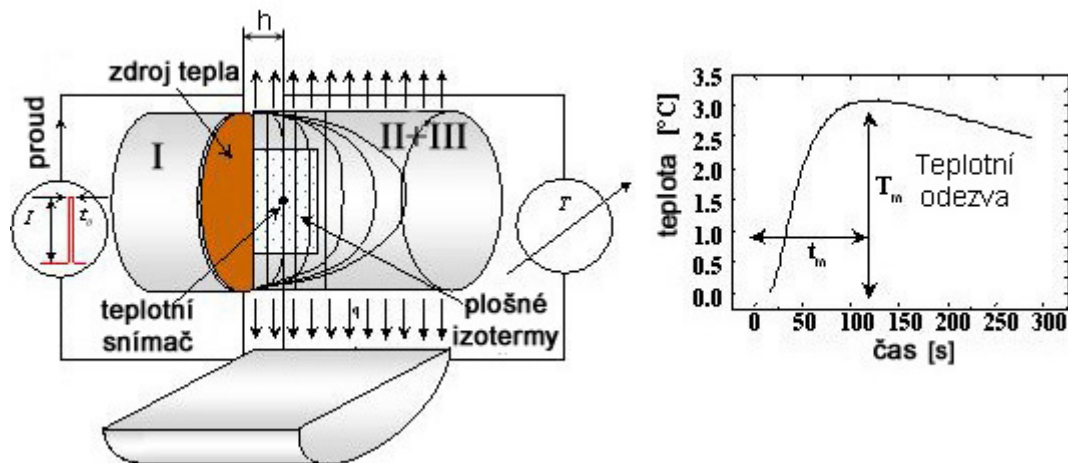
²⁾ Uhlíková matrice je izotropní, strukturou a vlastnostmi se blíží struktuře tzv. skelného uhlíku [29,50].

Uvnitř vzorku máme definovány materiálové parametry jednotlivých složek, pro celý vzorek je generována jedna trojúhelníková síť. Parametry na hranicích složek jsou určovány v průběhu výpočtu. Pro výpočet byl použit lineární Lagrangeův prvek, časový krok pro kabílek byl 0.001s, pro ostatní složky 0.01 s.

Výsledkem výpočtu jsou numerické hodnoty proměnných, jako jsou teplota T , teplotní gradient $\vec{\nabla}T$, tepelný tok \vec{q} , a normálový tepelný tok $\vec{n} \cdot \vec{q}$, které mohou být následně zpracovány do grafické podoby. Dále to jsou efektivní hodnoty parametrů kompozitního materiálu jako je hustota ρ nebo měrné teplo C . Efektivní hodnoty tepelné vodivosti jsou stanoveny ze vztahu $\vec{q} = -k\vec{\nabla}T$.

3.5 Experimentální měření termofyzikálních parametrů

Termofyzikální parametry studovaného kompozitu byly naměřeny v Ústavu fyziky Slovenské akademie věd v Bratislavě. Pro měření byla použita tzv. Impulzní metoda [40]. Princip této metody je ukázán na obrázku 3.8.



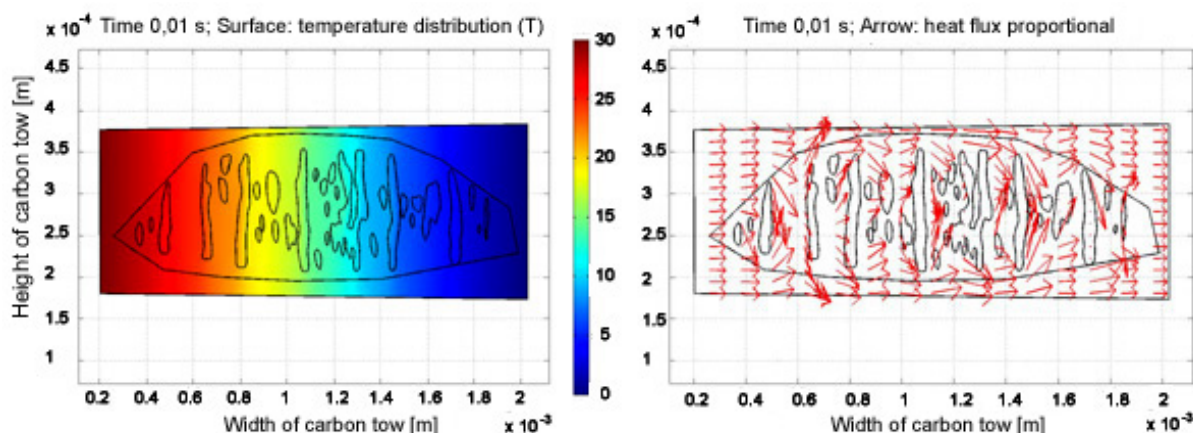
Obr. 3.8 a) Princip impulzní metody měření termofyzikálních parametrů. Šíření tepelné vlny je zachyceno v řezu vzorku. Deformace vlny v důsledku tepelných ztrát je patrná s rostoucí vzdáleností vlny od zdroje tepla b) Příklad teplotní odezvy na tepelný pulz.

Měřené vzorky se skládají ze tří částí (obr. 3.8 a)). Mezi částí I a II je umístěn zdroj tepla. Teplotní snímač je umístěn mezi částí II a III. Část II představuje aktivní část vzorku. Její tloušťka h určuje vzdálenost mezi zdrojem tepla a teplotním snímačem. Teplotní odezva indukovaná tepelným pulzem je měřena pomocí chromel-alumelového termočlánku.

V ideálním případě leží výška teplotní odezvy okolo hodnoty 1°C. Tepelný pulz je generován průchodem elektrického proudu plošným Ni zdrojem v definovaném čase t_0 . Základní termofyzikální parametry (měrné teplo, tepelná vodivost a teplotní vodivost) jsou určeny z časového průběhu teplotní odezvy pomocí tzv. ztrátového výpočetního modelu definovaného např. v [24].

4. Přehled dosažených výsledků

4.1 Přenos tepla v uhlíkovém kablíku



Obr. 4.1 Příklad grafického výstupu ze simulace přenosu tepla v uhlíkovém kablíku. Tepelný tok je indukován ve směru kolmém k ose kablíku; a) rozložení teploty a b) tepelný tok v uhlíkovém kablíku v čase 0.01 s.

Tab. 4.1 Vypočtené hodnoty termofyzikálních parametrů uhlíkového kablíku

| Termofyzikální vlastnosti | Systém vlákna-matrice | Uhlíkový kablíček |
|--|-----------------------|-------------------|
| Tepelná vodivost ¹⁾ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | [22; 1.94; 2.1] | [19.1; 1.73; 1.6] |
| Měrné teplo [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | 948 | 954 |
| Teplotní vodivost *10 ⁻⁶ [m ² .s ⁻¹] | [14.4; 1.3; 1.4] | [13.9; 1.2; 1.2] |

4.2 Přenos tepla v periodické strukturní buňce kompozitu

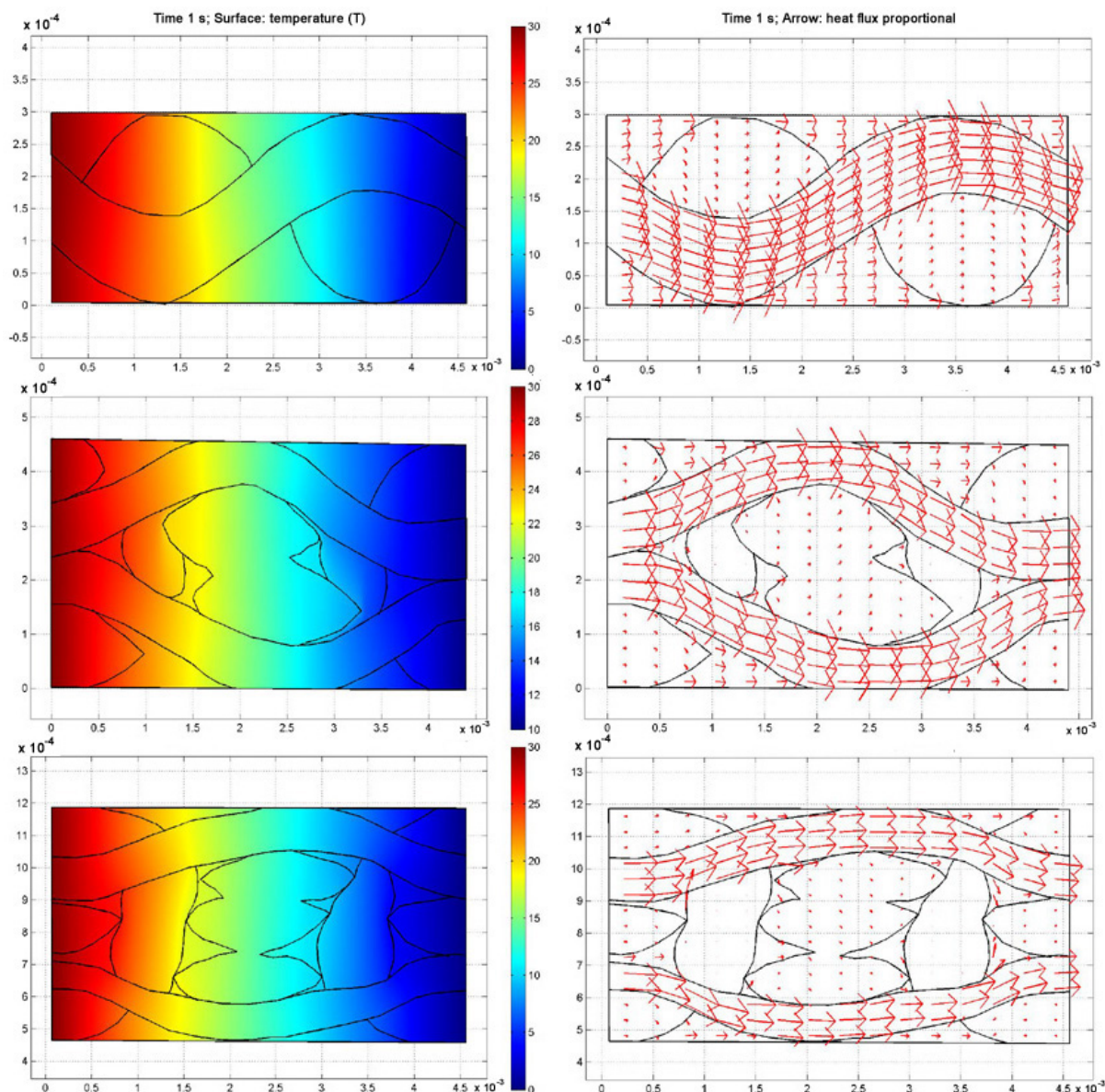
V periodické strukturní buňce je uhlíkový kablíček brán jako homogenní entita. Jeho efektivní termofyzikální vlastnosti jsou určeny pomocí výpočtu prezentovaného v kap. 4.1.

Tab. 4.2 Vypočtené hodnoty termofyzikálních parametrů jednotlivých strukturních buněk

| Termofyzikální vlastnosti | PUC1 | PUC2 | PUC3 |
|--|------------|------------|-------------|
| Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹) ²⁾ | [9.1; 2.3] | [7.4; 1.8] | [6.6; 1.75] |
| Měrné teplo [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | 960 | 983 | 989 |
| Teplotní vodivost *10 ⁻⁶ [m ² .s ⁻¹] | [6.6; 1.7] | [6.2; 1.5] | [4.9; 1.3] |

¹⁾ Tenzor [$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$] představuje hodnoty tepelné vodivosti ve směru rovnoběžném s osou vláken (λ_x), ve směru kolmém k ose vláken ale rovnoběžném s rovinou tkané výztuže (λ_y) a ve směru kolmém k ose vlákna i k rovině tkané výztuže (λ_z)

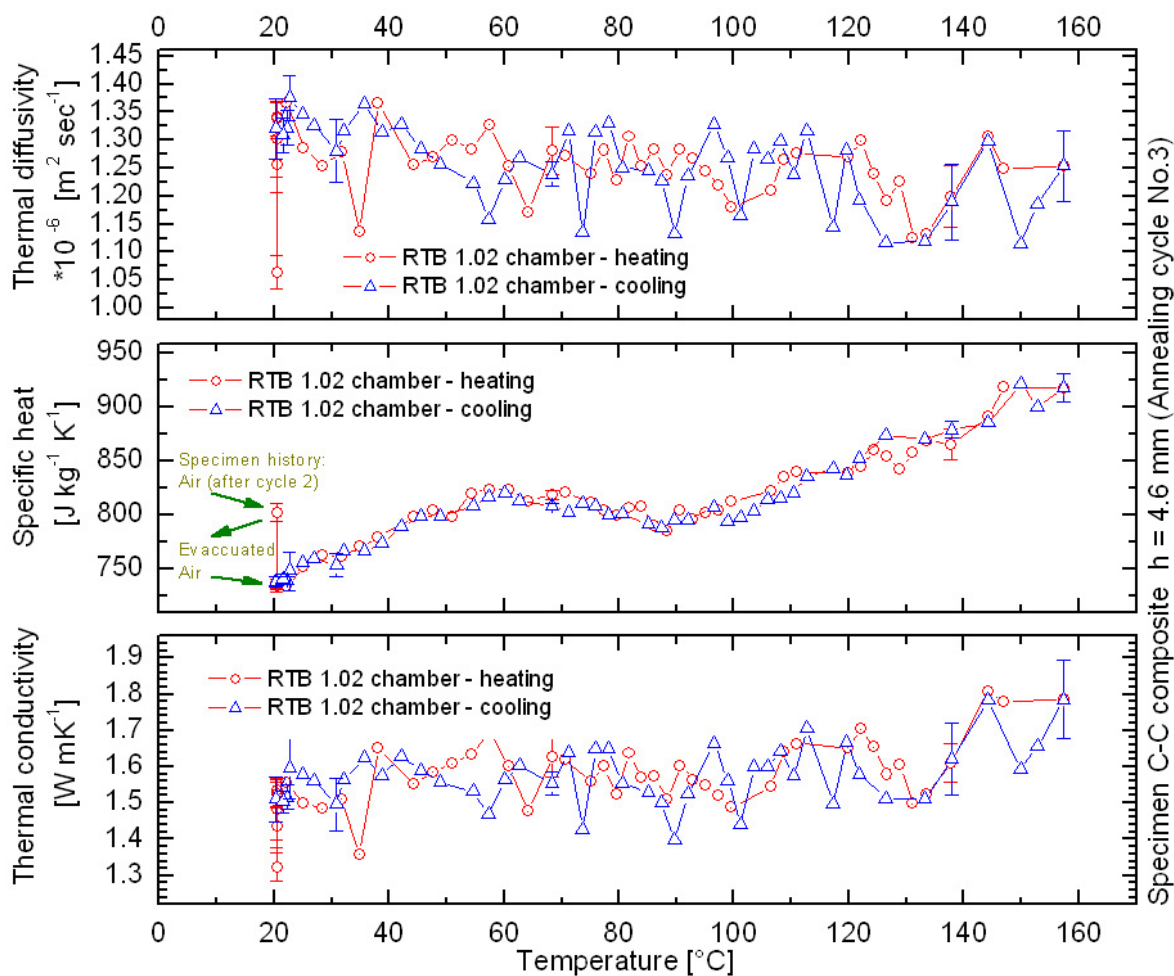
²⁾ Tenzor [λ_x, λ_y] představuje hodnoty tepelné vodivosti ve směru rovnoběžném s rovinou vyztužující tkaniny (λ_x) a ve směru kolmém k rovině vyztužující tkaniny (λ_y)



Obr. 4.2 Simulace přenosu tepla v periodických strukturních buňkách a) rozložení teploty, b) tepelný tok ve směru rovnoběžném s rovinou vyztužující tkaniny (s plochou kompozitní desky) 1) PUC1, 2) PUC2, 3) PUC3.

4.3 Přenos tepla v kompozitní desce

Termofyzikální parametry kompozitní desky byly stanoveny jako finální hodnoty získané pomocí prezentovaného modelu. Vypočtené hodnoty byly porovnány s hodnotami zjištěnými experimentálně při teplotě 25°C, neboť parametry základních kompozitních složek byly stanoveny pro tuto teplotu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.3. Výsledky experimentálního měření jsou ukázány na obrázku 4.3 [24].



Obr. 4.3 Termofyzikální parametry měřené ve směru kolmém k ploše kompozitní desky pro rozsah teplot 20°C – 160°C, třetí měření [24].

Tab. 4.3 Výsledné hodnoty termofyzikálních parametrů kompozitní desky určené ve směru rovnoběžném a kolmém k ploše této desky

| Termofyzikální parametry | Počítané | Měřené |
|--|------------|------------|
| Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] ¹⁾ | [8.3; 1.8] | [10; 1.6] |
| Měrné teplo [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | 970 | 775 |
| Teplotní vodivost *10 ⁻⁶ [m ² .s ⁻¹] | [5.9; 1.3] | [6.5; 1.3] |

Porovnáním měřených a vypočtených hodnot termofyzikálních parametrů kompozitu jsme ověřili věrohodnost počítaných parametrů. Vzhledem k dobré shodě mezi získanými údaji můžeme předpokládat vhodnost zvoleného postupu. Jeho přednosti a nedostatky jsou diskutovány dále.

¹⁾ Tensor $[\lambda_x, \lambda_y]$ představuje hodnoty tepelné vodivosti ve směru rovnoběžném s rovinou kompozitní výtzuže (s plochou kompozitní desky) (λ_x) a ve směrech kolmém k rovině kompozitní výtzuže (λ_y)

5. Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Největším přínosem předložené práce je možnost přímého sledování vlivu jednotlivých strukturních složek a jejich morfologie na výsledné vlastnosti kompozitního materiálu se složitou porézni strukturou. Navržený postup pro modelování geometrie struktury kompozitu C/C a následná simulace přestupu tepla v této struktuře přinesly zajímavé informace o vztahu mezi finálním kompozitem, jeho vnitřní strukturou a vlastnostmi vstupních složek.

Jak jsem předpokládali, hlavní vliv na výsledné hodnoty termofyzikálních parametrů mají parametry uhlíkových vláken a následné uspořádání uhlíkových kábílků. Překvapivým zjištěním je, že velké mezisvazkové dutiny, jejichž průměrná velikost je srovnatelná s velikostí plochy průřezu uhlíkových kábílků, a které jsou zastoupeny ve strukturních buňkách, ovlivňují termofyzikální vlastnosti výsledného kompozitu jen minimálně (více Přílohy, obr. 1).

Porovnáním hodnot termofyzikálních vlastností počítaných pro porézni a ideální kompozitní strukturu, jsme zjistili, že zahrnutí dutin do struktury zvyšuje přesnost vypočítaných hodnot porovnáme-li je s hodnotami získanými v experimentálním měření, zejména u hodnot určených pro směr kolmý k ploše kompozitní desky. Toto srovnání potvrdilo nezanedbatelný vliv pórovitosti na vlastnosti výsledného materiálu.

Nejhodnotnějším výsledkem ovšem jsou grafické výstupy, reprezentující rozložení teplot ve struktuře vzorku a chování tepelného toku v závislosti na uspořádání této struktury, které umožňují hodnotit vliv struktury na chování kompozitního materiálu při tepelném zatížení. (Přílohy, obr. 2). Můžeme tak například určit místa, kde dochází k lokálnímu přehřívání kompozitu, a kde je při dlouhodobém zatížení největší pravděpodobnost porušení materiálu.

Užitečným výstupem je také možnost určení rychlosti ohřevu vzorku na požadovanou teplotu (Přílohy, obr. 3) , nebo určení rychlosti stabilizace teplotního pole po indukcii tepelného toku (Přílohy, obr. 4) apod.

V průběhu výzkumu se samozřejmě vyskytly některé problémy, které nebyly spolehlivě dořešeny a které ukazují možnost dalšího postupu. Jsou to :

- Časová náročnost řešení – zejména získávání mikrofotografií, analýza kompozitní struktury, extrakce obrazových dat a jejich zpracování je zdlouhavá manuální činnost vyžadující přítomnost zkušeného operátora. Automatizace některých postupů (např. automatické odlišení jednotlivých složek kompozitu, označení jejich hranice a odečet souřadnic) by tuto činnost výrazně urychlila.
- Zanedbání prostorového uspořádání struktury kompozitu
- Spolehlivost vstupních materiálových parametrů – problematické určení vstupních materiálových parametrů matrice, kde tyto parametry nemůžeme spolehlivě měřit.

Přes výše zmíněné problémy je největší výhodou realizovaného modelu jeho aplikovatelnost na širokou škálu materiálů, pokud jsme schopni získat kvalitní mikrofotografie jejich struktury a stanovit materiálové parametry vstupních složek.

Použití softwaru FemLab umožňuje stanovení celé řady materiálových parametrů v závislosti na vybraném výpočetním modulu [27]. Výsledné hodnoty materiálových parametrů a grafické výstupy simulující odezvu materiálu na aplikované zatížení mohou být velmi užitečným zdrojem informací při návrhu složení nových materiálů, určených pro konkrétní aplikace, a volbě vhodné technologie jejich přípravy, umožňující např. řízení pórovitosti, jež je dlouhodobým cílem technologií, zabývajících se přípravou kompozitů C/C.

6. Práce autora se vztahem ke studované problematice

- [1] Košková,B., Tomková,B.: Česko-anglický výkladový slovník odborných pojmů z textilního materiálového inženýrství , TU Liberec, 2003, ISBN 80-7083-700-4.
- [2] Tomková,B.: Proces přípravy tkaninových kompozitů C-C, práce ke zkoušce z PGS, TU Liberec, 2003.
- [3] Tomková,B.: Změny geometrie příčného průřezu pramenců po tepelně-mechanických procesech přípravy tkaninových kompozitů, Sb. konf. „VYZTUŽENÉ PLASTY'03“, Karlovy Vary , 2003, 90-95.
- [4] Tomková,B.: Influence of Composite Technology on Carbon Tow Cross-Section Shape, Proc. of ICCE/10, New Orleans, USA, 2003, 729-730.
- [5] Tomková,B.: Influence of woven technology on carbon tow cross-section, Proc. of International Conference „TEXSCI'03“, TU Liberec, 2003, 129-132.
- [6] Košek,M., Macurová,K., Tomková,B.: 3D Visualization and Evaluation of Real Structure of Composite Materials. Proc. of International Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals, TU Liberec, 54-58.
- [7] Tomková,B., Košek,M.: 3D Visualisation of Real Structure of Composites. Proc. of Spring Conference on Computer Graphics, Budmerice, 2003, 27-28.
- [8] Tomková,B.: Application of Wisetex Software in Textile Material Study, Proc. of International Conference STRUTEX 10, TU Liberec, 2003, 71-78.
- [9] Tomková,B., Macurová,K.: Preparation of 3D Textiles for Structural Research, Proc. of International Conference STRUTEX 10, TU Liberec, 2003, 95-98.
- [10] Tomková,B.: Manuál pro použití SW WiseTex, práce pro grantový projekt FRVŠ 351/2003, TU Liberec, 2003, 1-15.
- [11] Tomková,B.: Studium porézní struktury kompozitu C/C a její aplikace v modelu tepelné vodivosti, práce ke zkoušce z PGS, TU Liberec, 2003.
- [12] Tomková,B., Grégr,J.: Voids Development in Woven Composite Structure, Proc. of International Conference “Reinforced Plastics'2004”, Hungary, 2004.
- [13] Tomková,B.: Study of Porous structure of C/C Composites, Proc. of International Conference on Applications of Porous Media 2004, Evora, Portugal, 2004, 379-387.
- [14] Tomková,B., Košková,B.: The porosity of plain weave C/C composite as an input parameter for evaluation of material properties, Proc. of International Conference Carbon 2004, Providence, USA, 2004, 50.
- [15] Tomková,B.: Struktura uhlíkového káblku v kompozitu C/C a její vliv na výslednou tepelnou vodivost káblku, práce ke zkoušce z PGS, TU Liberec, 2005.
- [16] Tomková,B., Tomek,P.: Heat Transfer in Carbon Tow in Woven Reinforced C/C Composites, Proc. of International Conference on Computational Heat and Mass Transfer 2005, Paris-Cachan, France, 2005, 1005-1007, ISBN 2-7430-0801-6.
- [17] Tomková,B.: Modelování tepelných vlastností textilních kompozitů, Teze dizertační práce ke SDZ, 2005.

- [18] Tomková,B.: Determination of Thermal Properties of Carbon Tow processed into Woven Composites, Proc. of 4th Central European Conference, Liberec, 2005.
- [19] Tomková,B.: Modelování tepelných vlastností textilních kompozitů, práce k SDZ, TU Liberec, 2005.
- [20] Tomková,B.: Influence of Porosity on Thermal Properties of Carbon Fabric Reinforced Carbon Composite, Proc. of International Conference Carbon 2006, Aberdeen, UK, 2006, 167.
- [21] Tomková,B., Tomek,P.: Modeling of heat transfer in porous C/C composite reinforced with woven fabric, Proc. of European Conference on Composite Materials 12, přijato k publikaci.

7. Literatura

- [23] Bigaud,D. at al.: A geometric modelling software for reinforced Textile Composites, Euromech 334, Lyon, 1995.
- [24] Boháč,V.: Measurement of thermophysical properties of C/C composite, internal report SAV, Bratislava, 2005, (in Slovak).
- [25] Coindreau,O., at al.: Direct 3D microscale imaging of carbon-carbon composites with computed holotomography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 200, 2003, 308-314.
- [26] Cox,B.N., Flanagan,G.: Handbook of Analytical Methods for Textile Composites, NASA Contractor Report 4750, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 1997.
- [27] FEMLAB, User's Guide and Introduction, Version 2.3, COMSOL AB, 2002.
- [28] Feynman,R.P, Leighton,R.B., Sands,M.: The Feynman Lectures on Physics 1-3, FRAGMENT, Havlíčkův Brod, 2000-2002, (in Czech).
- [29] Fitzer,E., Manocha,L.M.: Carbon reinforcement and Carbon-Carbon Composites, Springer verlag, Berlin, 1998.
- [30] Gao,F., at al.: The characterisation of cracks and voids in two-dimensional carbon-carbon composites, Carbon, Vol.31, No.1, 1993, 103-108.
- [31] Jiquao,L. at al.: Influence of porosity and total surface area on the oxidation resistance of C/C composites, Carbon, Vol. 40, 2002, 2483-2488.
- [32] Jortner,J.: Microstructure of cloth-reinforced carbon-carbon laminates, Carbon, Vol.30, No.2, 1992, 153-163.
- [33] Jortner,J.: Macroporosity and interface cracking in multi-directional carbon-carbons, Carbon, Vol.24, No.5, 1986, 603-613.
- [34] Klett,J.W. at al: Finite-element modeling of heat transfer in carbon-carbon composites, Composites Science and Technology, Vol.59, 1999, pp. 593-607.
- [35] Košek,M., Seják,P.: Visualization of voids in actual C/C woven composite structure, accepted for publication on 12th European Conference on Composite Materials, to be held in Biarritz, France, 29.8 - 1.9. 2006.

- [36] Košek,M., Mikolanda,T.: Visualization of Textile Structures Using Virtual Reality, Proc. of Spring Conference on Computer Graphics, Budmerice, Slovakia, 2005, pp. 33-34.
- [37] Košek,M.: Efficient Application of Signal Processing Methods in Textile Science, Proc. of International Conference AEE'05, Praha, 2005, 155-159.
- [38] Košek,M., Seják,P.: Analysis of Stochastic Character of Yarn Waviness in Woven Composites, Proc. of International Conference ICCE 11, Hilton Head Island, USA, 2004.
- [39] Košek,M., Seják,P.: Efficient Automated Approximation of Real Yarn Axis Using Discrete Fourier Transform, Proc. of STRUTEX 11, Liberec, 2004, 117-124.
- [40] Kubičár,L.: Fast method of measuring basic thermophysical parameters, VEDA, SAV publishing, Bratislava, 1988, (in Slovak).
- [41] Kuhn,J.L., Charalambides,P.G.: Modeling of planar weave fabric composite geometry, J. of Composite Materials, Vol.33, No.3, 1999,188-220.
- [42] Lienhard,J.H.: A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 2004.
- [43] Lomov,S.V. at al.: Textile composites: modelling strategies, Composites: Part A 32, 2001, pp. 1379 – 1394.
- [44] Matas,J., Chum,O., Vodolan,J., Košek,M.: Automated Composition of Structure Microphotographs, Proc. of 5th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia, 2005, 327-330.
- [45] Mikolanda,T., Lomov,S.V., Košek,M., Verpoest,I.: Simple Use of Virtual Reality for Effective Visualization of Textile Material Internal Structures, CODATA Prague Workshop, Praha, 2004, 23-27.
- [46] Mikolanda,T., Lomov,S.V., Košek,M.: VRTex – a System for 3D Visualization of Textile Structures, Proc. of International Conference STRUTEX 11, Liberec, 2004, 109-116.
- [47] Ohlhorst,C.W. at al.: Thermal Conductivity Database of Various Structural Carbon-Carbon Composite Materials, NASA Technical Memorandum 4787, Lanley Research Center, Hampton, Virginia 1997.
- [48] Piat,R., Schnack,E.: Hierarchical material modeling of carbon/carbon composites, Carbon, 41, 2003, 2121-2129.
- [49] Pollock,P.B. at al.: Crack development in a carbon-carbon laminate, Carbon, Vol.31, No.6, 1993, 992-996.
- [50] Savage,G.: Carbon-carbon composites, Chapman & Hall, London, 1993.
- [51] Seják,P., Košek,M.: Yarn Shape Description by the Use of DFT, STRUTEX 10, TU Liberec 2003, 71-78.
- [52] Torquato,S.: Random Heterogeneous Materials, Springer-Verlag, New York, 2002.
- [53] Vix-Guterl,C. at al.: Carbon-carbon composites with heat-treated pitches II. Development of porosity in composites, Carbon, Vol.39, 2001, 673-683.
- [54] Vopička,S.: Popis geometrie vyztužujícího systému v tkaninových kompozitech, disertacní práce, TU Liberec, 2004.

- [55] Yurgartis,S.W.: Techniques for the quantification of composite mesostructure, Composite Science and Technology, Vol. 53, 1995, 145-154.
- [56] Yurgartis,S.W., Morey,K., Jortner,J.: Measurement of yarn shape and nesting in plain weave composites, Composites Science and Technology, Vol.46, No.1, 1993, 39-50.
- [57] Yurgartis,S.W., at al.: Quantification of microcracking in brittle-matrix composites, J. of Materials and Science 27, 1992, 6679-6686.
- [58] Zeman,J., Šejnoha,M.: Homogenization of Plain Weave Composites with Imperfect Microstructure: Part I. – Theoretical Formulation, International Journal of Solids and Structures, vol. 41, no. 22-23, 2004, 6549-6571.
- [59] GoodFellow online source: Carbon-Vitreous - Material Information, www.goodfellow.com, 2004.
- [60] Technical Data Sheet, Torayca T800, Toray Carbon Fibers America, www.torayusa.com, 2004.

8. Summary

The thesis is concerned with reliable prediction of effective thermophysical properties for woven C/C composite with complex porous structure. The objectives of the thesis were to formulate suitable geometry model respecting the real composite structure applicable for numerical solution of final composite thermophysical properties.

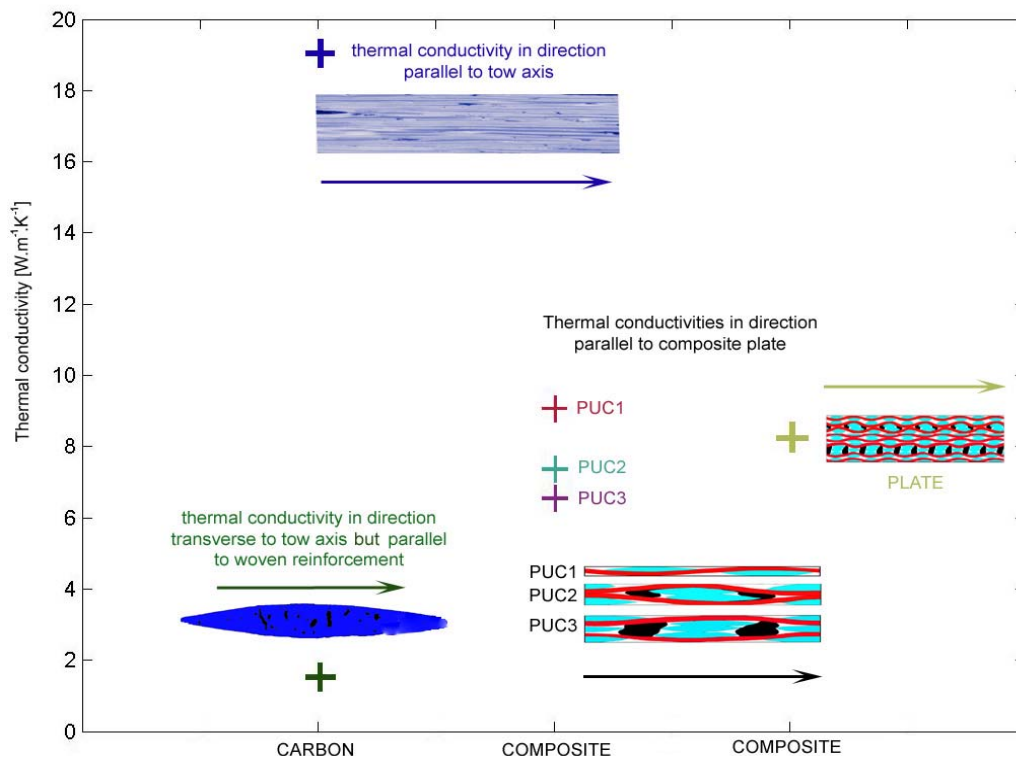
The real composite structure was scrutinized, main structural components were defined, their material properties were specified. Formulation of geometry model as well as further numerical solution of thermophysical parameters were realized with the use of commercially available softwares. Computed results are in good agreement with the experimental ones despite the rough formulation of input thermophysical properties, and simplifications in structural geometry description.

The advantage of the computer simulation in comparison to experimental work is that it allows us to study the influence of individual structural components on the heat flux behaviour inside complex composite structure. The method enables us to observe the phenomena inside composite structure which are not otherwise evident from experimental measurements.

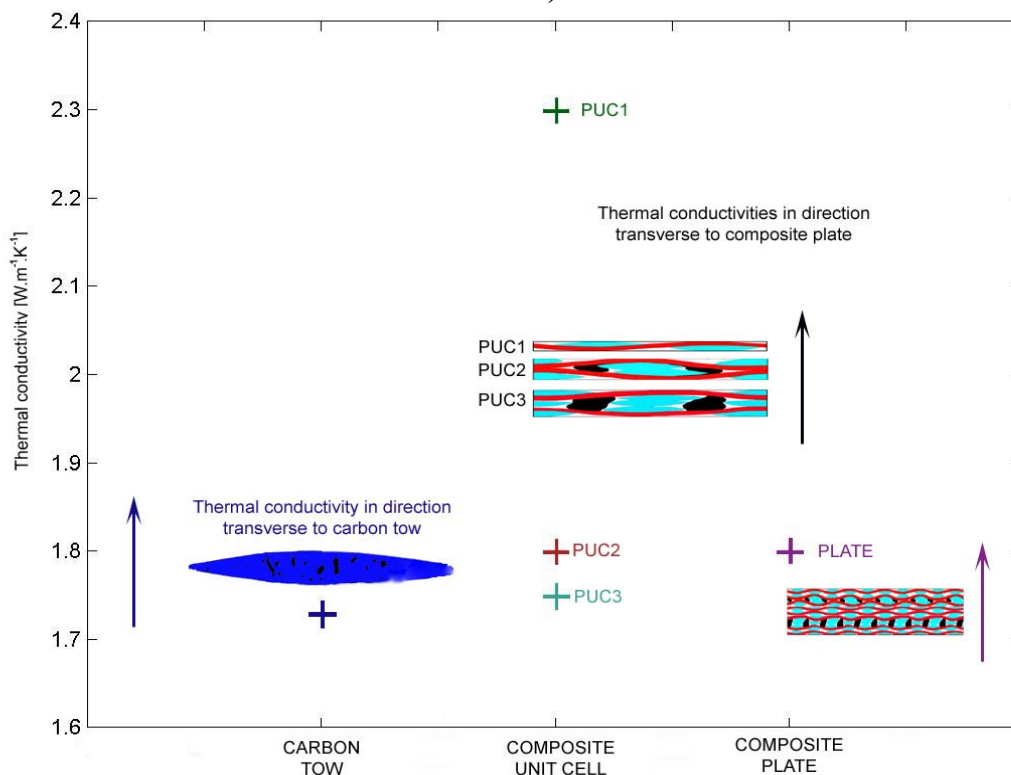
Except it is faster and cheaper than experimental work, it gives the possibility to design composite structures of specific features, prepared for the particular purpose, as long as we are able to define structural geometry and material properties of basic components.

The results of computer simulation produce detailed information on the heat flux behavior inside complex woven composite and indicate the reasons for deviation of theoretical results from experimental ones. Thorough analysis of the difference contributes to improvement in the theory of heat transfer phenomena considering complex porous structures, and increases reliability of effective thermophysical properties prediction.

PŘÍLOHY

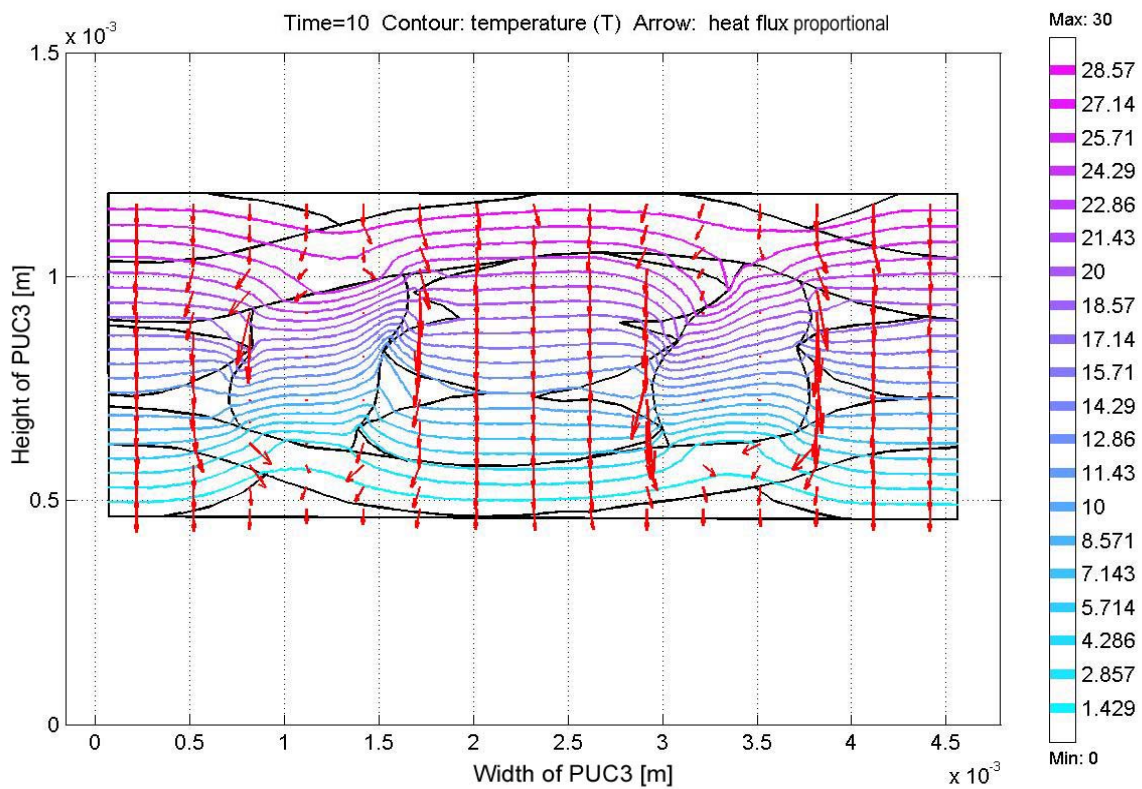
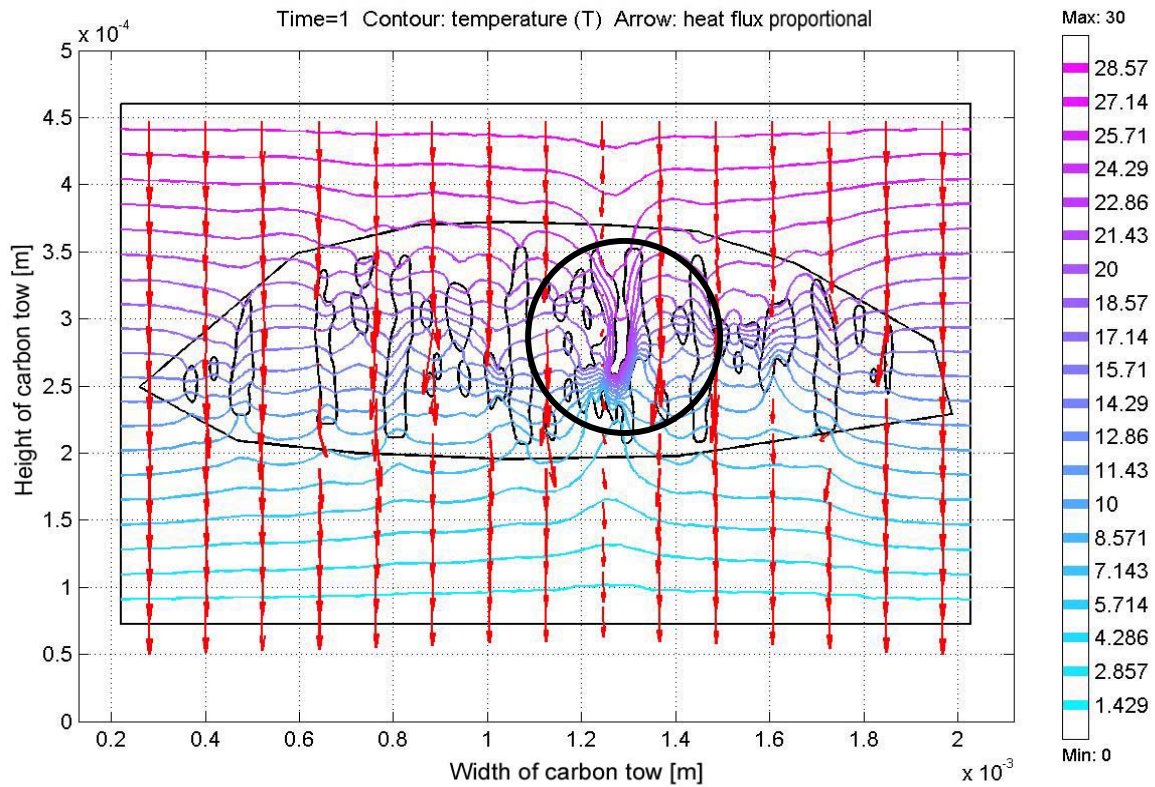


a)

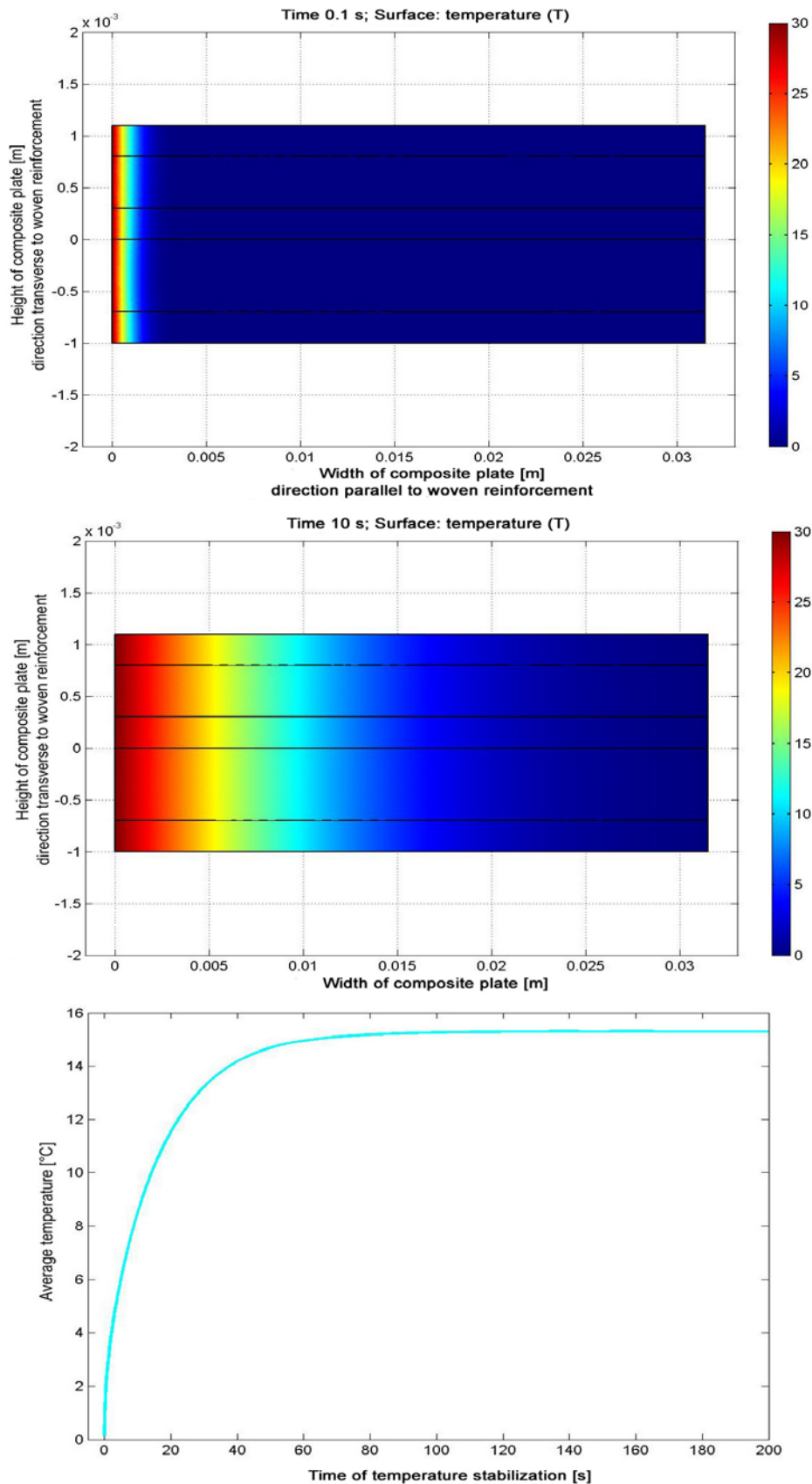


b)

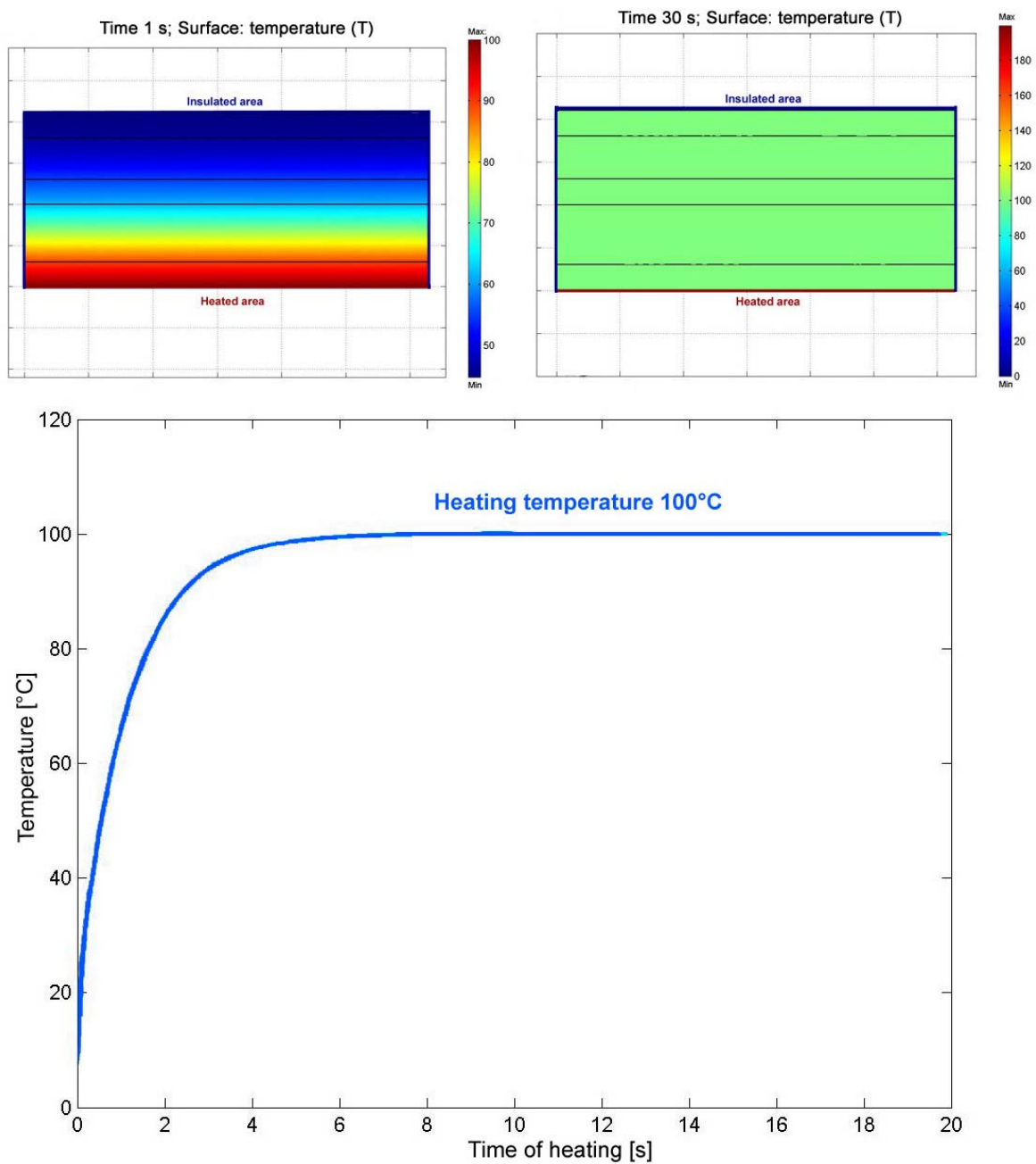
Obr.1 Změny hodnot tepelné vodivosti vypočtené na jednotlivých úrovních strukturního modelu: a) ve směru rovnoběžném s plochou kompozitní desky, b) ve směru kolmém k ploše kompozitní desky



Obr. 2 Teplotní pole a tepelné toky v uhlíkovém káblíku a ve strukturní buňce PUC3. Můžeme sledovat vliv struktury na rozložení teplotního pole a na intenzitu tepelného toku ve vzorcích. Např. na horním obrázku je vyznačeno místo, kde dochází k lokálnímu přehřívání vzorku.



Obr.3 Stabilizace teplotního pole v kompozitní destičce po vyvolání tepelného toku při stálých hodnotách teplotního spádu. Jsou zde ukázány změny teplotního pole v časech 0.1 s a 10 s.



Obr.4 Doba ohřevu kompozitní destičky, teplotní pole v časech 1s a 30s. Graf ukazuje, že ohřev kompozitní desky o rozměrech 30x30x2 mm zabere přibližně pět sekund.

Vydala Textilní fakulta, Technické univerzity v Liberci
jako interní publikaci pod pořadovým číslem
DFT/4/2006 v počtu 20 výtisků

