

REKONSTRUKCE TROJROZMĚRNÉ STRUKTURY TKANINOVÝCH KOMPOZITŮ - OPRAVY:

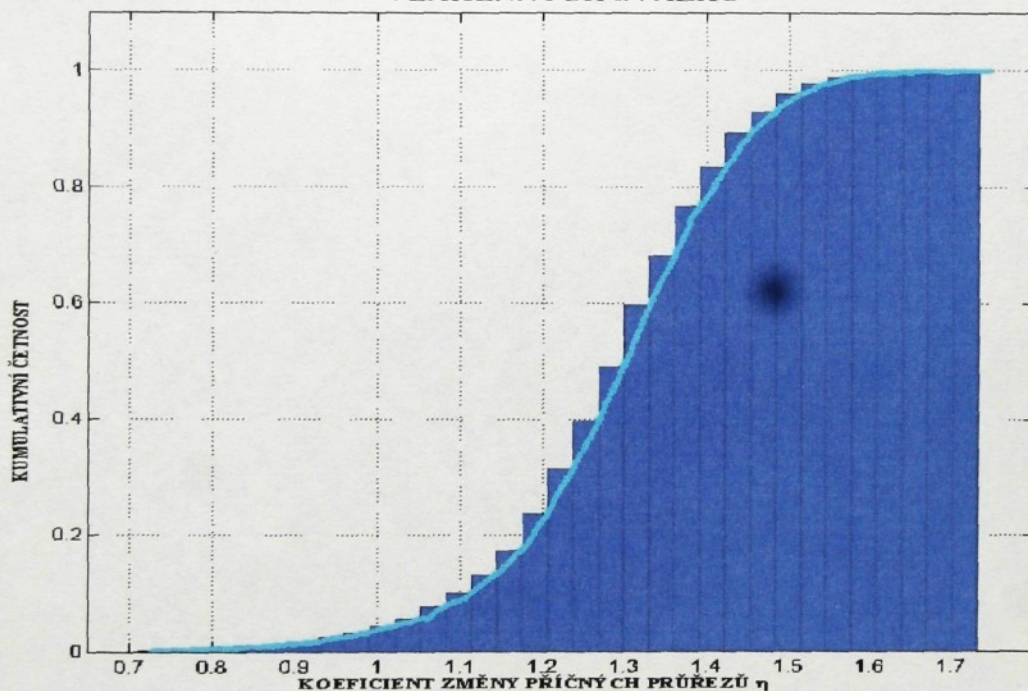
str. 7, 3. odstavec, 4. řádek: k ploše vzorku

str. 25, 1. odstavec, 5. řádek: ... mohly být využity pro predikci jejich fyzikálních vlastností,

str. 34, 4. odstavec, 1. řádek: Označené plochy byly automaticky změřeny.

str. 51, obr. 5.13, horní graf - oprava hodnot koeficientů změny příčných průřezů η

**DIAGRAM KUMULATIVNÍ ČETNOSTI A SOUČTOVÁ
KŘIVKA KOEFICIENTŮ ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ
VLÁKENNÝCH SVAZKŮ**



str. 68, obr. 6.1, popis obrázku: *a - vlasová trhlina, b - pór, c - příčná svazková trhlina*

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2002

BLANKA TOMKOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Katedra textilních materiálů

Obor: 31 - 12 - 8

Textilní materiálové inženýrství

Zaměření:

Textilní materiály a zkušebnictví

**REKONSTRUKCE TROJROZMĚRNÉ STRUKTURY
TKANINOVÝCH KOMPOZITŮ**

**RECONSTRUCTION OF WOVEN COMPOSITE SPATIAL
STRUCTURE**

Blanka Tomková

KTM - 332

Vedoucí práce: Doc. Ing. Bohumila Košková, CSc., FT TU Liberec

Rozsah práce:

Počet stran: 75

Počet obrázků: 58

Počet tabulek: 6

Počet příloh: 5

Rozsah grafických prací:

Rozsah původní zprávy: 45 – 60 stran

Seznam odborné literatury:

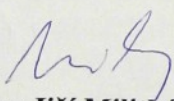
- **Diplomové práce KTM 1999-2001 (Šulcová, Vopička, Kučerová)**
- **WiseTex, Demoprogram pro modelování textilních struktur, Katolická univ Leuven, Belgium, 1999**
- **3D rekonstrukce v systému LUCIA, LIM, s.r.o.2001**

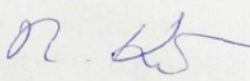
Vedoucí diplomové práce: **Doc.Ing.Bohumila Košková, CSc.**
Konzultant:

Termín zadání diplomové práce: 31.10.2001

Termín odevzdání diplomové práce: 3.6.2002




Prof.Ing.Jiří Militký, CSc.,
vedoucí katedry


Prof.Ing.Radko Kovář, C
děkan

V Liberci, dne 31.10.2001

ANOTACE

Rekonstrukce trojrozměrné struktury tkaninových kompozitů

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi a využitím metody postupného odbrušování a snímání povrchu kompozitních vzorků pro analýzu vnitřní struktury tkaninových kompozitů. V experimentu byly použity vzorky karbonizovaných kompozitů s plátňovou výztuží připravené v Ústavu struktury a mechaniky hornin v Praze. V teoretické části jsou popsány struktura a vlastnosti tkaných výztuží, způsob přípravy tkaninových C-C kompozitů, dále je provedena analýza současného stavu výzkumu v oblasti tvorby geometrických modelů struktury těchto kompozitů, které jsou využívány pro predikci jejich fyzikálních vlastností. V praktické části je popsána metodika tvorby obrazové databáze pro popis prostorové struktury kompozitů, způsob popisu geometrie této struktury pomocí prostorových souřadnic a možnosti jejich rekonstrukce a vizualizace pomocí počítačové grafiky. Dále je provedena analýza změny velikosti a tvaru příčných průřezů vlákenných svazků s cílem zjistit, k jakým změnám strukturních charakteristik uhlíkové textilie dochází po jejím zapracování ve formě výztuže do uhlíkových kompozitů.

ANNOTATION

Reconstruction of Woven Composite Spatial Structure

This thesis presents the opportunity and use of the method of gradual grinding and scanning of the composite specimen surface for the analysis of the woven composite internal structure. For the experiment have been used carbonized woven composite specimen with plain weave reinforcement prepared by the Institute of Rock Structure and Mechanics in Prague. Theoretical part describes the structure and properties of the woven reinforcement, the description of the woven carbon-carbons follows. Next is carried out the current state of art of the analysis of the development of composite structural geometry model used for the physical properties prediction. Practical part introduces the method of the development of the image database used for the composite spatial structure description, then is specified the way of the structural geometry description by the use of spatial coordinates, their reconstruction and visualization by the use of computer graphics follows. Next the yarn cross-section size and shape analysis is done, the effect of carbon fabric processing as an C-C composite reinforcement on its structural characteristic modifications is investigated.

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedených přístrojů a literatury.

V Liberci, dne 20.5.2002

Blanka Tomková

Blanka Tomková

Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce

Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 20.5.2002

Blanka Tomková

Blanka Tomková

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří mi při vypracování diplomové práce poskytli cenné rady a informace. Především děkuji Doc. Ing. Bohumile Koškové, CSc., za odborné vedení mé práce a zejména za cenné a podnětné rady, připomínky a konzultace, pracovníkům Ústavu struktury a mechaniky hornin, Ing. Ivaně Sýkorové, CSc. a panu Ivo Čermákovi za odborné konzultace a technickou pomoc spojenou s postupným odbrušováním kompozitních vzorků a svému manželovi Petru Tomkovi za přípravu softwaru a celkovou podporu při psaní této práce.

Blanka Tomková

OBSAH

1. ÚVOD	3
2. KOMPOZITY S TKANOU VÝZTUŽÍ	4
2.1 VÝROBA TKANIN Z UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	4
2.2 VLASTNOSTI TKANÝCH VÝZTUŽÍ	5
2.2.1 Struktura tkané výztuže	5
2.2.2 Vliv deformace vláknenných svazků ve tkanině na vlastnosti kompozitů	6
2.2.3 Vliv splývavosti na zpracovatelnost tkaniny při přípravě kompozitu	7
2.3 VAZBA TKANIN V KOMPOZITECH	8
2.4 VLIV PŘÍPRAVY TKANINOVÝCH KOMPOZITŮ NA STRUKTURU VÝZTUŽE	9
2.4.1 Tkaninové kompozity s plátňovou vazbou	10
3. SOUČASNÝ STAV VÝZKUMU STRUKTURY KOMPOZITŮ S TKANOU VÝZTUŽÍ	12
3.1 VÝVOJ GEOMETRICKÝCH MODELŮ STRUKTURY KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE VE SVĚTĚ	12
3.1.1 Zhodnocení dosažených poznatků	19
3.2 VÝVOJ GEOMETRICKÝCH MODELŮ STRUKTURY TKANÉ VÝZTUŽE V KOMPOZITECH NA TU LIBEREC	19
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	20
4.1 METODA POSTUPNÉHO ODBRUŠOVÁNÍ POVRCHU KOMPOZITNÍHO VZORKU A JEHO SNÍMÁNÍ POMOCÍ OBRAZOVÉ ANALÝZY	20
4.1.1 Popis použitých kompozitních vzorků	21
4.1.2 Odbrušování povrchu vzorků	22
4.1.2.1 Výběr vzorků	22
4.1.2.2 Postup odbrušování	22
4.1.3 Snímání struktury C-C kompozitu	23
4.1.4 Výsledky zkoumané metodiky	24
4.2 PROSTOROVÁ REKONSTRUKCE STRUKTURY KOMPOZITU	25
4.2.1 Odečet prostorových souřadnic struktury	25
4.2.1.1 Odečet souřadnic podélných vláknenných svazků	26
4.2.1.2 Odečet souřadnic příčných průřezů vláknenných svazků	26
4.2.2 Zpracování prostorových souřadnic struktury	28
4.2.2.1 Síťový graf	28
4.2.2.2 Rekonstrukce prostorových dat pomocí aproximačních funkcí	29

4.2.2.3	Aproximace dat pomocí interpolačních funkcí v programu MATLAB R12	31
4.2.3	Prostorová rekonstrukce tvaru kompozitní výztuže a dutin pomocí vlastního softwaru	32
4.2.4	Prostorová rekonstrukce tvaru kompozitní výztuže a dutin v programu MATLAB R12	32
4.2.4.1	Tvorba grafů v programu MATLAB R12	32
4.2.4.2	Vizualizace naměřených dat	33
4.3	VYHODNOCENÍ ZMĚNY VELIKOSTI A TVARU PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ	34
4.3.1	Metoda měření změn velikosti průřezů	34
4.3.2	Metoda vyhodnocení změn velikosti průřezů	35
4.3.3	Vyhodnocení změny tvaru příčných průřezů	36
5.	VÝSLEDKY EXPERIMENTU	37
5.1	OBRAZOVÁ DATABÁZE PRO TVORBU PROSTOROVÝCH MODELŮ VNITŘNÍ STRUKTURY KOMPOZITU	37
5.2	PROSTOROVÉ MODEL Y VNITŘNÍ STRUKTURY KOMPOZITU	37
5.3	ZMĚNY TVARU A VELIKOSTI PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ	46
6.	DISKUSE VÝSLEDKŮ	63
6.1	VYHODNOCENÍ METODIKY POSTUPNÉHO ODBRUŠOVÁNÍ POVRCHU KOMPOZITNÍHO VZORKU A JEHO SNÍMÁNÍ POMOCÍ OBRAZOVÉ ANALÝZY	63
6.1.1	Zhodnocení získané obrazové databáze	63
6.1.2	Nedostatky zvoleného postupu tvorby obrazové databáze.....	64
6.1.3	Návrhy na jejich odstranění	64
6.2	VYHODNOCENÍ POUŽITÝCH ZPŮSOBŮ PROSTOROVÉ STRUKTURY KOMPOZITNÍHO VZORKU	65
6.2.1	Zhodnocení prostorové rekonstrukce dat pomocí síťového grafu	65
6.2.2	Zhodnocení prostorové rekonstrukce dat pomocí interpolační funkce kubický spline	66
6.3	VYHODNOCENÍ ZMĚNY VELIKOSTI A TVARU PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ	66
6.3.1	Způsob hodnocení změny velikosti příčných průřezů	66
6.3.2	Výsledky hodnocení změny velikosti příčných průřezů	67
6.3.3	Závěr hodnocení změny velikosti příčných průřezů	69
6.3.4	Výsledky vyhodnocení změny tvaru příčných průřezů	69
7.	ZÁVĚR	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74

1. ÚVOD

Výzkum kompozitních materiálů se v posledních letech dostal do popředí zájmu odborníků mnoha profesí. Tento zájem byl vyvolán zejména masovým rozšířením kompozitních materiálů ve výrobě běžných produktů (automobily, sportovní potřeby, nábytek, apod.).

Jejich výhodou je, že mohou zcela nahradit drahé přírodní materiály, jejichž zásoby se povážlivě snižují. Vhodnou volbou jednotlivých složek kompozitu můžeme získat materiály požadovaných vlastností v kvalitě u přírodních materiálů nedosažitelné nebo vytvořit materiály vlastností zcela nových.

Pro zlepšení těchto vlastností je velmi výhodná kombinace plastické polymerní matrice a vysoce tuhých a pevných vláken, což vedlo k rozvoji textilních kompozitů. Tyto materiály, díky možnosti kombinovat širokou škálu vláken, přízí, či textilií s rozdílnou strukturou, splňují i velmi specifické požadavky na materiálové vlastnosti.

Pro využití tkanin jako výztuže kompozitních materiálů hovoří především jejich snadná příprava v požadovaném tvaru, nižší náklady na výrobu a zvýšená odolnost vůči případnému poškození. Tkané zboží, jako meziprodukt, poskytuje vlákna v přijatelné formě pro výrobu kompozitů. Tkaniny jsou velmi variabilní, umožňují projektantům při přípravě lamin použít kombinace nejrůznějších vláken a vazeb a tím vyrobit výztuž požadovaných vlastností v závislosti na konkrétním využití daného kompozitu. Zvýšená pevnost tkané laminy je také významným důvodem pro její použití v kompozitech s křehkou výztuží i maticí, jako jsou kompozity uhlík-uhlík.

Pro zvolení vhodného výrobního postupu kompozitního materiálu je důležitá predikce jeho vlastností. Pro jejich modelování je nezbytná důkladná strukturní analýza kompozitních materiálů. Na základě znalosti vztahů mezi strukturou a vlastnostmi kompozitu lze dosáhnout optimálního využití jednotlivých složek.

Cílem této práce je pro to navržení a vyzkoušení metodiky postupného odbrušování a snímání struktury povrchu vzorků pro výzkum vnitřní struktury kompozitních materiálů a ověření možností její prostorové rekonstrukce s využitím reálných souřadnic této struktury. Pak následuje analýza změny velikosti a tvaru příčných průřezů vlákenných svazků, jejichž průběh pozorujeme v prostorové struktuře kompozitního vzorku.

2. KOMPOZITY S TKANOU VÝZTUŽÍ

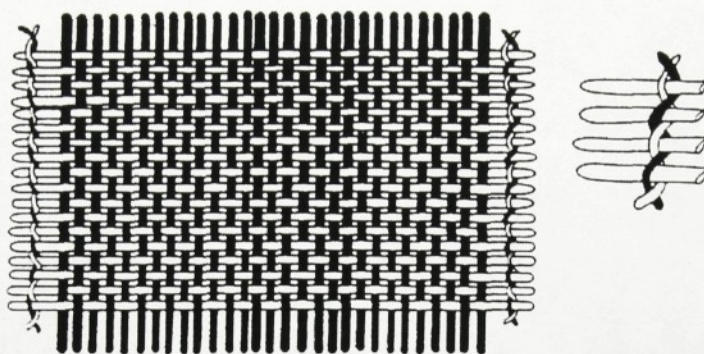
Pojmem C-C kompozity s tkanou výztuží označujeme uhlíkové kompozitní materiály, jejichž matrice i výztuž mají podobnou strukturu na uhlíkové bázi. Výztuž je tvořena uhlíkovou tkaninou, jako prekurzory matrice jsou používány syntetické pryskyřice, uhelné smoly nebo se vyrábějí z plynné fáze metodou termického rozkladu uhlovodíků. Vlivem tepelného působení (karbonizace, grafitizace) se tyto prekurzory transformují do podoby skelného uhlíku. Velmi důležitým předpokladem pro výrobu uhlíkových kompozitů je adheze mezi výztuží a matricí [1].

2.1 VÝROBA TKANIN Z UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Praktická výroba tkaniny z uhlíkových vláken se podstatně liší od normálního tkacího procesu. Uhlíková vlákna jsou mnohem tužší, s velmi nízkou tažností a tak nízkou schopností přirozené lubrikace, že před samotnou výrobou musí být zařazena důkladná příprava materiálu, aby se zabránilo jeho poškození v průběhu tkaní [2].

Nejdůležitější je proces šlichtování, jehož úkolem je omezení oděru materiálu na nejmenší možnou míru a zachování jednotlosti svazku uhlíkových vláken v průběhu tkaní. Příkladem typické šlichty pro uhlíková vlákna je epoxidová pryskyřice, která je na vlákna nanášena v lázni, v množství 1-2 % z celkové hmotnosti materiálu. Tyto šlichty jsou často neslučitelné s matricí kompozitu, proto musí být po ukončení tkacího procesu beze zbytku odstraněny, většinou jsou vypáleny.

Pro výrobu tkanin z uhlíkových vláken jsou z důvodu křehkosti těchto vláken nejvhodnější jehlové tkací stroje. Útkové nitě jsou uchopeny na jedné straně stroje, proneseny skrz osnovní nitě a poté odříznuty. Okraje těchto tkanin musí být zpevněny (např. PES nití, obr.2.1), aby nedošlo k rozvolnění tkaniny při dalším zpracování. Materiál použitý pro zpevnění okrajů je odstraněn v průběhu zpracování tkaniny v kompozitu (vlivem pyrolýzy).



Obr. 2.1 Pevné okraje u tkaniny z uhlíkových vláken

2.2 VLASTNOSTI TKANÝCH VÝZTUŽÍ

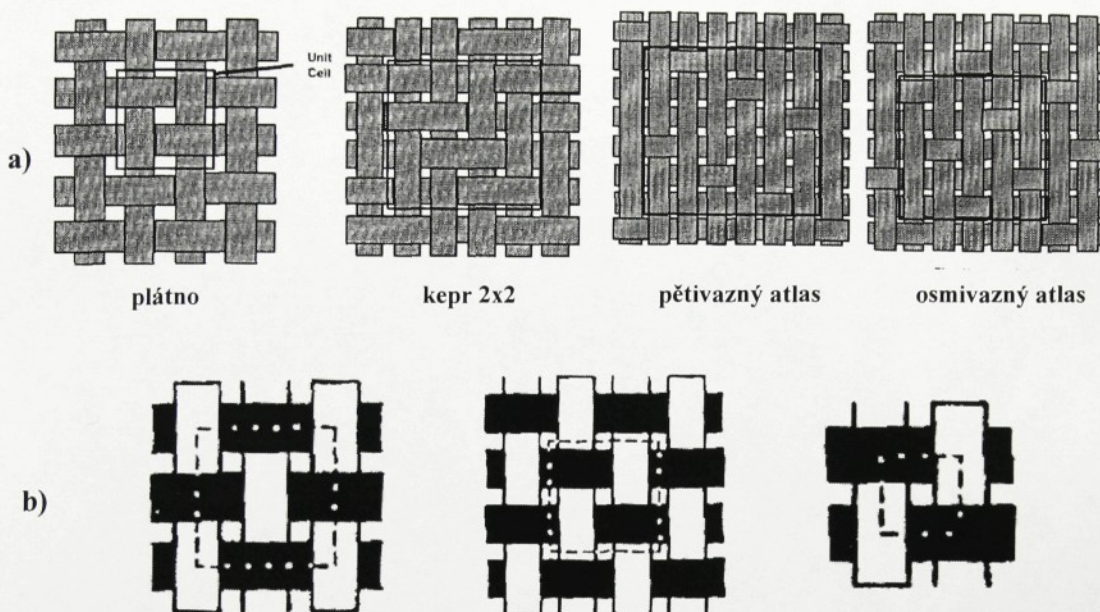
Vlastnosti uhlíkových tkanin používaných v C-C kompozitech jsou ovlivněny celou řadou faktorů. Nejdůležitějšími jsou použitý materiál, zvolená vazba, deformace nití při tkaní (obr.2.3). Tyto faktory přímo ovlivňují mechanické vlastnosti tkaniny (tažnost, pevnost, tuhost), její zaplnění, splývavost apod. Vlastnosti tkanin jsou základním vstupním parametrem pro predikci výsledných vlastností kompozitního výrobku [3].

2.2.1 Struktura tkané výztuže

Kompozitní tkanina vzniká ortogonálním provázáním vláknenných svazků, jež jsou tvořeny několika tisíci elementárních uhlíkových vláken (monofilů). Periodická struktura tkaniny je popsána střídou tkalcovské vazby, což je základní strukturní jednotka tkaniny [4], popisující rozložení vazných bodů v rovině textilie. Pro potřeby kompozitního inženýrství pro ni v roce 1982 zavedli Tsu-Wei Chou a Takashi Ishikawa [6] pojem elementární (základní) buňka (unit cell).

Elementární buňka je definována jako takový strukturní prvek tkaniny, jehož translaci v rovině vznikne požadovaná struktura tkaniny, aniž by bylo třeba tento prvek otáčet nebo zrcadlit (obr.2.2 a)) [3]. U některých vazeb může být definována i několika způsoby, např. u jednoduché plátňové vazby (obr. 2.2 b)) [33]. Její popis je jedním ze vstupních parametrů pro tvorbu mechanických modelů.

Vazný bod vzniká v místě provázání osnovních a útkových vláknenných svazků, kde osnovní (útkové) vláknenné svazky přecházejí z rubu textilie na líc nebo naopak (obr. 2.3).



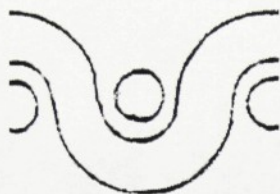
Obr. 2.2 Elementární buňky struktury tkaniny
 a) elementární buňky různých typů vazeb
 b) typy elementárních buněk jednoduché plátnové vazby

Typickým rysem provázaných vláknenných svazků je jejich zvlnění, které snižuje účinnost výztuže. Základní buňka je tedy popsána těmito parametry: délkou a výškou vazné vlny, úhlem provázání, distribucí úhlu sklonu vláknenných svazků a nebo roztečí mezi vláknennými svazky jednoho systému, plochou příčných řezů vláknenných svazků a mezerou mezi sousedními vláknennými svazky jednoho systému [7].

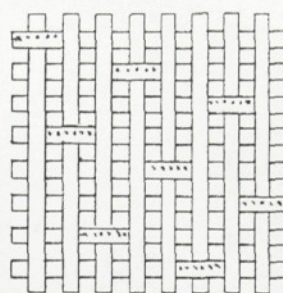
2.2.2 Vliv deformace vláknenných svazků na vlastnosti kompozitů

Při tahovém namáhání kompozitů má tkaná výztuž tendenci vyrovnat deformaci svazků vzniklou jejich provázáním (obr.2.3), což se ve výsledných vlastnostech projeví snížením pevnosti a tuhosti tkaninového kompozitu v porovnání s kompozitem, kde byly použity jednosměrné vláknenné svazky [5].

Jako vhodné řešení tohoto problému se jeví využití vazeb, kde je co největší množství napřímených nití. Těmto požadavkům nejlépe odpovídají vazby atlasové (obr.2.4) [2].



*Obr. 2.3 Deformace vlákenného svazku
vzniklá jeho provázáním ve tkanině*



Obr. 2.4 Osnovní atlas osmivazný

Vazné body atlasové vazby jsou pravidelně rozloženy a nesmějí se vzájemně dotýkat. Atlasové vazby se dělí osnovní a útkové. Vlastnosti povrchu tkaniny s atlasovou vazbou jsou závislé poloze tkaniny, rub a líc jsou odlišné.

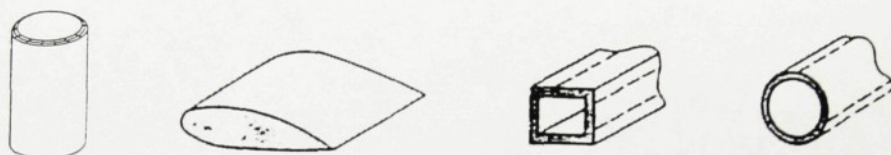
Při kladení těchto tkanin v laminátech je nezbytné, aby bylo přesně definováno kladení jednotlivých vrstev (zda jsou kladeny na osnovní nebo útkovou stranu). Nevýhodou vrstvených atlasových tkanin je, že při výrobě kompozitu z těchto vrstev dochází k mikroskopickému skluzu jednotlivých vrstev po sobě, prohnutí neprovázaných úseků vláknenných svazků (tzv. „flotáží“) a k hromadění výztuže, což vede k výrazně nerovnoměrnému rozložení vláknenných svazků (u kompozitů s plátňovou výztuží je tato nerovnoměrnost menší) [7].

2.2.3 Vliv splývavosti na zpracovatelnost tkaniny při přípravě kompozitu

Splývavost je schopnost textilie přizpůsobovat se požadovanému tvaru. Je ovlivněna vlastnostmi použitého materiálu a vazbou tkaniny. Stanovuje se dle normy ČSN 80 0835. Je charakterizována jako poměr rozdílů mezi plochou zkoušených vzorků a průměrnou plochou průmětů zkoušených vzorků k ploše mezikruží, tj. k ploše vorku způsobilé ke splývání. Uvádí se v procentech.

Pro technické aplikace může být kvantitativně charakterizována počtem provázání osnovních a útkových svazků na přesně stanovené ploše (např. m^2) [2]. S tímto parametrem koresponduje tzv. koeficient provázání tkaniny (viz. kap. 2.3) [2,5].

V kompozitním inženýrství je splývavost důležitá především při formování kompozitní výztuže do požadovaného tvaru (obr. 2.5). Je zřejmé, že nejmenší splývavost vykazují tkaniny s plátňovou vazbou, kde je největší množství provázání na jednotku plochy. Naopak nejmenší počet provázání (a lepší splývavost) najdeme v atlasových tkaninách [2].



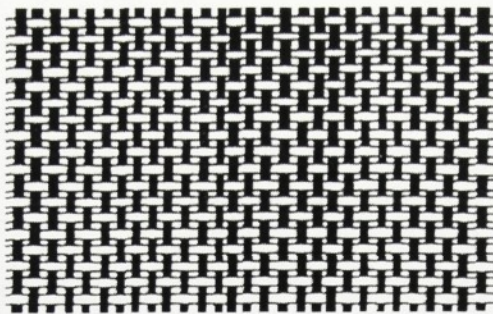
Obr. 2.5 Ukázky tvarování kompozitní výztuže

2.3 VAZBA TKANIN V KOMPOZITECH

Vazba tkanin je tvořena systémem osnova-útek, kde osnovní nitě reprezentují podélný směr tkaniny, zatímco útkové nitě provazují tkaninu v příčném směru. Jednou ze základních charakteristik tkaniny je dostava udávající počet osnovních či útkových nití na jednotku délky.

Tkaniny tvořící kompozitní výztuže jsou nejčastěji vyráběny v základních vazbách - plátňové, keprové a atlasové. Tyto vazby jsou charakterizovány bezrozměrným koeficientem provázání tkaniny κ [5], definovaným dle vztahu $\kappa = \frac{N_v}{N}$, kde N_v je počet vazných bodů vztahený k celkovému počtu N křížících se svazků v elementární buňce (střídě) vazby (plátno $\kappa=1$, kepr $\kappa=0,5$, pětivazný atlas 5HS $\kappa=0,4$, osmivazný atlas 8HS $\kappa=0,25$). Na obrázku 2.6. je zobrazena jednoduchá plátňová vazba s koeficientem provázání tkaniny $\kappa=1$.

Tvoří-li osnovu i útek nitě stejných parametrů je tkanina označována jako souměrná. Jejím opakem je extrémně nesouměrná tzv. „jednoosá“ tkanina, kde je minimální množství útků využito pouze pro zpevnění osnovních nití tak, aby bylo možné s tkaninou manipulovat a zároveň efektivně využít osnovní nitě pro přenos mechanického namáhání [6].

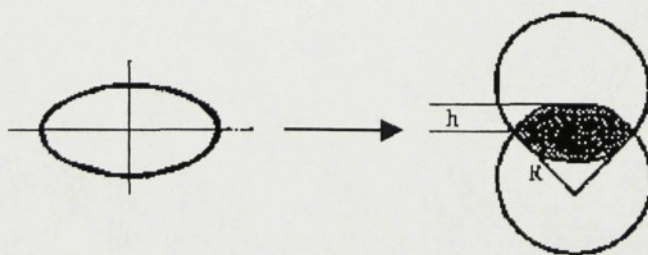


Obr. 2.6 Tkanina s jednoduchou plátnovou vazbou

2.4 VLIV PŘÍPRAVY TKANINOVÝCH KOMPOZITŮ NA STRUKTURU VÝZTUŽE

Kompozitní systémy s tkanou výztuží jsou připravovány prepregovou technologií z několika vrstev tkanin lisováním. Vlivem technologie přípravy dochází ke změnám struktury výztuže, skutečná geometrie vyztužujícího systému je poměrně složitá a značně se liší od geometrie volných tkanin [3].

Při lisování kompozitu může docházet k mikroskopickému skluzu nebo mechanickému zaklínění jednotlivých vrstev výztuže a jejich deformaci, deformaci provazujících vlákenných svazků po celé jejich délce a deformaci tvaru průřezů vlákenných svazků (původně eliptické svazky nabývají čočkovitého tvaru, obr.2.7) [7].

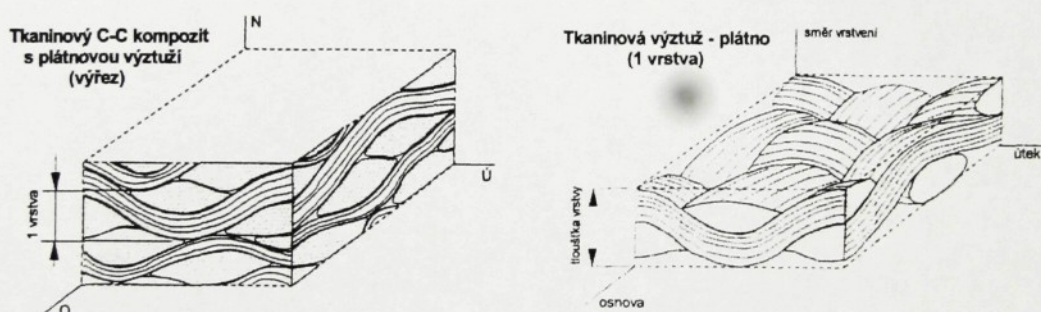


Obr. 2.7 Model deformace průřezů vlákenných svazků

Nejvíce jsou k deformaci náchylné dlouhé volné (neprovázané) úseky vláknenných svazků, tzv. „flotáží“ (keprové a zejména atlasové vazby). Míra mikroskopického skluzu vrstev závisí na hustotě provázání a délce vazné vlny, zvyšuje se s klesající hustotou provázání (zvyšující se délkou flotujících úseků) a rostoucí periodou vazné vlny. S klesající délkou vazné vlny se zvyšuje pravděpodobnost vzniku mechanického zaklínění [34].

2.4.1 Tkaninové kompozity s plátnovou vazbou

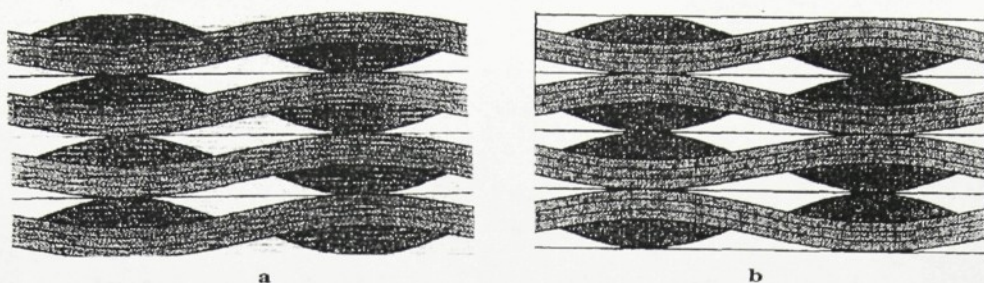
Výztuž s plátnovou vazbou má maximální koeficient provázání a současně nejmenší délku vazné vlny. Struktura textilní výztuže s plátnovou vazbou a schematické znázornění základní buňky jsou znázorněny na obr. 2.6 a 2.2, C-C kompozit s plátnovou výztuží na obr. 2.8.



Obr. 2.8 C-C kompozit s plátnovou výztuží

Plátnová vazba má ze všech textilních vazeb nejmenší sklon k deformacím při lisování (viz. kap. 2.2.3). Velikost skluzu je omezena mechanickým zaklíněním a může dosáhnout maximálně 1/4 délky vazné vlny. Na vznik mechanického zaklínění či deformaci má také vliv způsob a technika kladení vrstev. Rovnoměrné kladení vrstev u plátnových textilních výztuží může být v principu dvojího typu:

- kladení vrstev ve fázi (obr. 2.9 a))
- kladení vrstev ve fázovém posunu 180° (obr. 2.9 b))

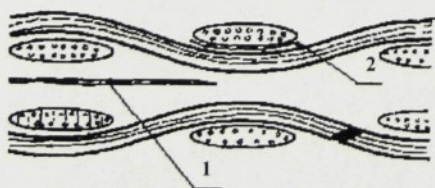


Obr. 2.9 Rovnoměrné rozložení vlákněných svazků tkaninové výztuže s plátnovou vazbou: a) kladení vrstev ve fázi; b) kladení vrstev ve fázovém posunu 180°

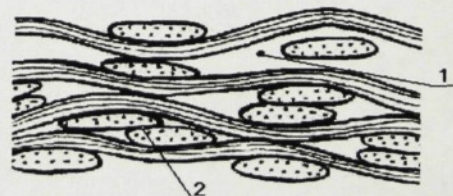
Kladení vrstev ve fázi je ideálním stavem, kterého chceme ve výrobním procesu dosáhnout, předurčuje kompozitu dobré mechanické vlastnosti s minimálním množstvím strukturních defektů [7].

Jsou-li jednotlivé vrstvy kladeny s velkým rozdílem fází, mechanické vlastnosti struktury se naopak zhoršují. V takovém případě dochází při výrobě kompozitu, zejména během vytvrzování a lisování, k mikroskopickému skluzu vrstev po sobě, posunu vlákněných svazků v rovině textile a především k hromadění vlákněné výztuže. Vlivem těchto deformací se vyztužující efekt snižuje a struktura je náchylnější ke vzniku dutin (trhlin a pórů), které mohou vést až k delaminaci kompozitu (obr. 2.10) [7].

Multifilní svazky v důsledku působení sousedících vrstev při lisování hledají prostor pro své umístění ve struktuře kompozitu. Vznikající shluky vlákněných svazků mají tendenci zaujmout prostor s minimální hustotou výztuže. Vzniká tak velmi heterogenní struktura, ve které lze pozorovat na jedné straně nahromadění vlákněné výztuže (yarn nesting) a na druhé straně kapsy nevyztužené matrice (obr. 2.11).



Obr. 2.10 Mechanismy poškození tkaninového kompozitu
1 - delaminace mezi vrstvami
2 - delaminace uvnitř vrstvy



Obr. 2.11 Nepravidelnosti vnitřní struktury kompozitu
1 - kapsy nevyztužené matrice
2 - nahromadění výztuže

3. SOUČASNÝ STAV VÝZKUMU STRUKTURY KOMPOZITŮ S TKANOU VÝZTUŽÍ

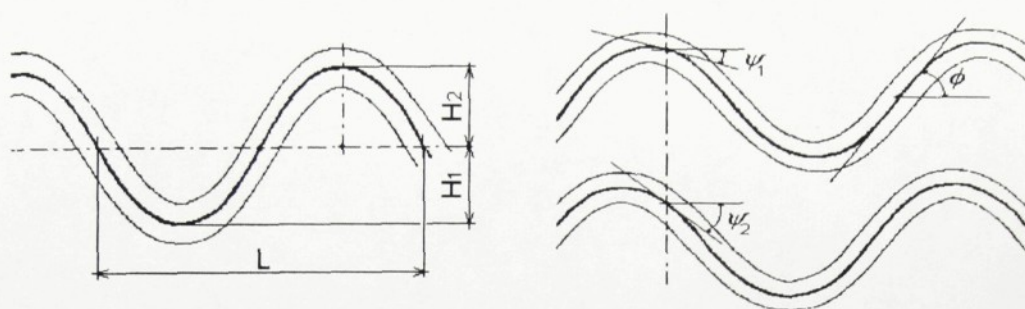
V posledním desetiletí vznikla řada prací na téma: struktura tkané kompozitní výztuže, vztah mezi strukturou a mechanickými vlastnostmi kompozitu, vliv deformace vláknenných svazků ve tkanině na účinnost kompozitní výztuže apod. Tento nebývalý zájem o strukturu a vlastnosti tkaninových kompozitů je podmíněn rozšířením jejich použití do výroby produktů běžné spotřeby. Tkaninové kompozity jsou, díky variabilitě jednotlivých složek, využívány v celé řadě odvětví, od bezpečnostních pásů v automobilech až po velmi drahé vysoce funkční systémy pro špičkové aplikace v letectví nebo kosmonautice.

Vlastnosti materiálů používaných pro výrobu kompozitů jsou poměrně dobře známe, ovšem popis samotné struktury tkaniny a především popis jejích změn při přípravě kompozitu jsou problémem stále ještě nedořešeným. Přitom právě vlastnosti tkaniny tvořící kompozitní výztuž významně ovlivňují celkovou strukturu kompozitu a tím i kvalitu výsledného výrobku.

Řada odborníků se zabývá tvorbou geometrických modelů struktury kompozitních výztuží a jejich využitím pro predikci výsledných vlastností kompozitu, ale tyto modely jsou většinou založeny na idealizaci zkoumané struktury. Jen málo prací se zabývá popisem struktury skutečné. Je to způsobeno náročností takového přístupu. Platí zde: čím věrnější model struktury, tím spolehlivější výsledky, avšak pracnost jejich získávání narůstá úměrně kvalitě těchto výsledků.

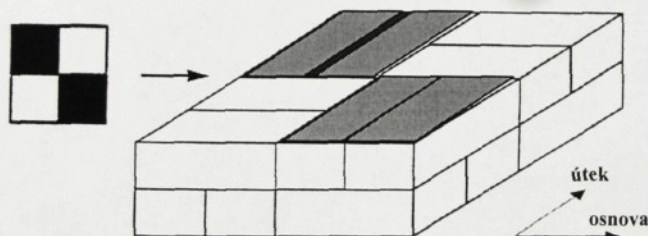
3.1 VÝVOJ GEOMETRICKÝCH MODELŮ STRUKTURY KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE VE SVĚTĚ

Nejjednodušší strukturní modely vycházejí ze známých teoretických poznatků o struktuře tkanin. Počítají s ideální geometrií struktury tkaniny, jejíž základ tvoří elementární buňka vazby tkaniny, která se v celé ploše textilie periodicky opakuje. Mezi základní parametry popisované struktury patří úhel provázání, výška a délka vazné vlny atd. (obr. 3.1). Tyto parametry se liší v závislosti na použité vazbě. Tvar průřezu vláknenných svazků je popisován jako kruhový nebo eliptický [6].



Obr. 3.1 Základní parametry pro popis struktury vazné vlny
 L - délka vazné vlny; H_1 , H_2 - výšky vazných půlvln
 ψ_1 , ψ_2 - úhly sklonu; ϕ - úhel provázání

Často používané jsou i tzv. „mozaikové modely“. Tyto modely vycházejí ze střídavy vazby, používané pro schematické znázornění vazby tkaniny (obr. 3.2). Tyto modely zcela zanedbávají zvlnění vlákených svazků [6,8].



Obr. 3.2 Mozaikový model struktury tkaniny

S rozvojem moderních metod obrazové analýzy se popis vnitřní struktury textilních kompozitů zpřesnil. Obrazová analýza umožnila podrobné studium této struktury, např. detailní průzkum tvaru kompozitní výztuže, zaplnění kompozitu matricí, pozorování a popis nejrůznějších defektů, zejména dutin.

Na základě získaných obrazů povrchu kompozitních vzorků jsou například vyhodnocovány objemové podíly dutin ve struktuře kompozitu a jejich vliv na jeho výsledné vlastnosti. Velká pozornost je věnována zejména vztahu mezi množstvím těchto dutin a destrukcí kompozitu [9,10,11].

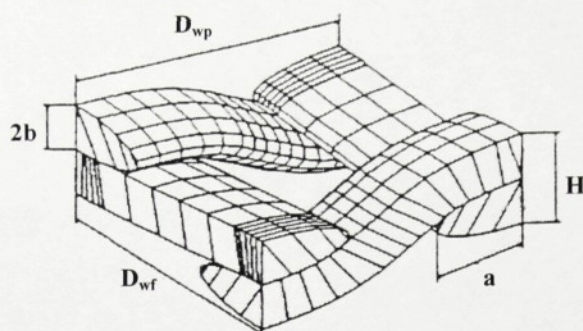
Dále jsou získávána experimentální data pro popis vnitřní struktury kompozitů. Tato data jsou aproximována pomocí moderních matematických metod, umožňujících tvorbu přesnějších geometrických modelů, např. modelu struktury tkaninového kompozitu založeného na přesném popisu tvaru a průběhu jednotlivých vlákenných svazků. Všechny tyto poznatky umožňují přesnější modelování fyzikálních vlastností kompozitů [5,12].

Zásadním přínosem k řešení této problematiky byly práce Jortnera a kol. [5,12], kteří pomocí obrazové analýzy vytvořili rozsáhlou studii na téma popisu struktury uhlíkových kompozitů s textilní výztuží. Jejich popis geometrie vlákenného svazku je založen na aproximaci vazné vlny polynomem. Na mikrofotografii, která je výchozím bodem pro odvození geometrických parametrů struktury tkaninového kompozitu, jsou naměřeny reálné souřadnice vazné vlny v ekvidistantních vzdálenostech.

V práci Jortnera [5] byla naměřená data proložena vybranou polynomicou funkcí a úhly sklonu následně vypočítány jako derivace této funkce v daném bodě. Takto získané rozdělení úhlů slouží ke kvantitativnímu popisu tvaru vazné vlny. Délka vazné vlny a její amplituda ovšem nemohly být spolehlivě vyhodnoceny vzhledem k omezení způsobenému použitým optickým systémem obrazové analýzy, který neumožnil zobrazit plochu přesahující velikost jedné délky vazné vlny.

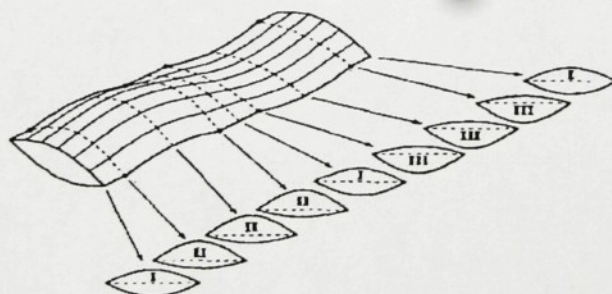
Tyto práce ukázaly nejen možnosti zpřesnění popisu struktury kompozitu s využitím reálných souřadnic, ale také náročnost takového přístupu. To je zřejmě důvod, proč se většina dalších prací omezuje na využití mikrofotografie kompozitu jako pouhé ilustrace. Pokud už je mikrofotografie použita, slouží zpravidla k velmi jednoduchému odvození základních geometrických parametrů elementární buňky. Při tvorbě geometrických modelů je výsledná dvourozměrná či třírozměrná struktura pouhým periodickým opakováním této buňky. Řada geometrických modelů je vytvořena pomocí zjednodušených matematických popisů, ať už tvaru vazné vlny či tvaru příčných průřezů vlákenných svazků.

Bigaud a kol. vytvořili software pro tvorbu modelu elementární buňky, kde je základní struktura popsána pomocí tzv. „sinusového modelu“ (obr. 3.3) [13]. Tento model slouží k predikci elastických vlastností tkaninového kompozitu. Jeho výhodou je možnost tvorby modelu tkanin nejružnějších vazeb, nevýhodou idealizace struktury a její omezení pouze na elementární buňku.



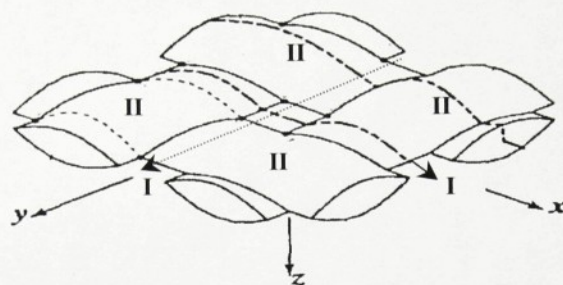
Obr. 3.3 Sinový model elementární buňky: D_{wp} , D_{wf} - délka elementární buňky ve směru osy a útku; H - výška elementární buňky; a , $2b$ - parametry modelu příčného průřezu

Kuhn a Charalambides [14] při tvorbě modelu elementární buňky počítali se změnou tvaru průřezu vláknenných svazků v závislosti na tom, kterou částí elementární buňky daný svazek prochází (obr. 3.4).



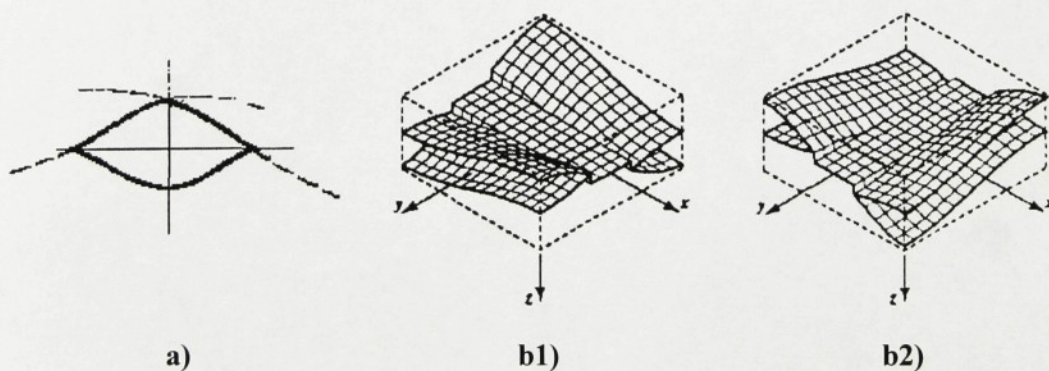
Obr. 3.4 Průběh vláknenného svazku složeného z deformovaných průřezů,
 I - platí pro vláknenný svazek v oblasti přemostění
 II - vláknenný svazek ve vazném bodě leží na lici tkaniny
 III - vláknenný svazek ve vazném bodě leží na rubu tkaniny

Jejich práce vycházela z prací Geneshe a Naika [15], kteří definovali dvě polohy vláknenného svazku. Jednak místo kontaktu mezi osnovou a útkem - vazný bod, jednak fázi přechodu svazku mezi dvěma vaznými body - přechodová oblast. Kuhn a Charalambides přidali k této teorii ještě oblast tzv. přemostění, kde je tvar vláknenného svazku souměrný (obr.3.5).



Obr. 3.5 Struktura elementární buňky podle Kuhna a Charalambides
I - oblast přemostění; II - vazný bod

Tvar příčného průřezu vláknenného svazku je popsán pomocí sinových funkcí (obr. 3.6 a)). Model výsledné struktury elementární buňky je vytvořen složením povrchových grafů těchto funkcí (3.6 b)) [14]. Z mikrofotografií získaných pomocí obrazové analýzy ovšem vyplývá, že i když tento model počítá s určitou deformací tvaru průřezu vláknenného svazku, je vazba na skutečnou strukturu je minimální.



Obr. 3.6 Příklady geometrických modelů struktury tkané výztuže:
a) sinový model příčného průřezu vláknenného svazku
b) model jedné vrstvy tkané kompozitní výztuže, vláknenné svazky
ve směru osnovy -1 a útku - 2

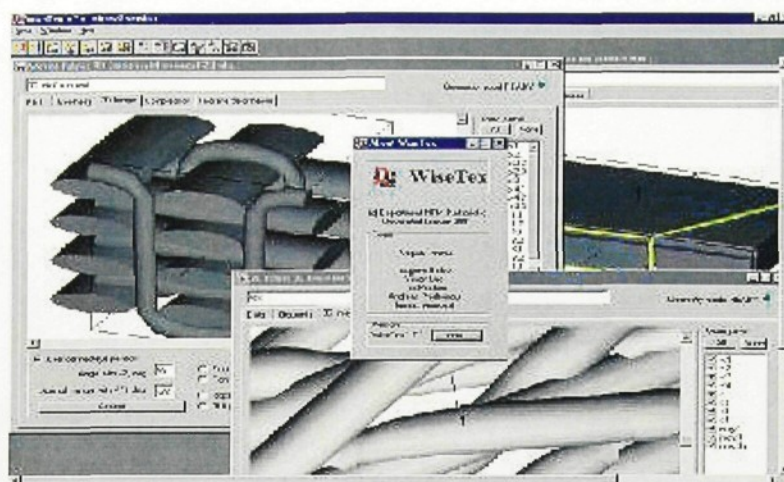
Rozsáhlý výzkum modelování struktury a vlastností skutečné geometrie volné textilie a jejího vztahu k vlastnostem tkaninových kompozitů provádí tým profesora Lomova z Katolické University v Leuvenu (Belgie). Při modelování těchto vlastností vycházejí z předpokladu, že textilie a textilní kompozity jsou hierarchicky strukturované materiály. Při popisu jejich struktury je tedy třeba důsledně zachovávat hierarchii *vlákno - příze - textilie - prepreg - kompozit*. Každá z těchto složek nese vlastní parametry, které v konečném důsledku ovlivňují výsledné vlastnosti celého kompozitu (tab. 3.1) [16].

Tab. 3.1 Hierarchie struktury a modelů jednotlivých složek textilního kompozitu

STRUKTURA	SLOŽENÍ	MODELÝ
<i>Příze Vláknenný svazek</i>	<i>vlákna</i>	<i>Rozložení vláken v přízi a jeho změny při zatížení Mechanické vlastnosti příze</i>
<i>Plošná textilie (tkanina, pletenina...)</i>	<i>příze</i>	<i>Geometrie příze ve tkanině a její změna při zatížení Mechanické vlastnosti textilie při opakovaném složeném zatížení</i>
<i>Elementární buňka kompozitu</i>	<i>textilie matrice</i>	<i>Mechanické vlastnosti textilie (tuhost, pevnost) Tensor propustnosti výztuže</i>
<i>Části kompozitu</i>	<i>elementární buňky (deformované)</i>	<i>Chování elementární buňky v procesu přípravy kompozitu a při zatížení kompozitu Tok matrice</i>

Na tomto principu byl vyvinut program WiseTex (obr. 3.7), který slouží jako integrovaný textilní preprocesor softwarových souborů pro tvorbu strukturních a mechanických modelů kompozitů s textilní výztuží [17].

Tyto modely jsou vytvářeny na základě zadaných strukturních a mechanických parametrů jednotlivých složek a jsou vstupem pro mezo-mechanické modely a modely hydrodynamické propustnosti kompozitů. Jsou základem simulačních programů pro analýzu výroby a vlastností kompozitů.

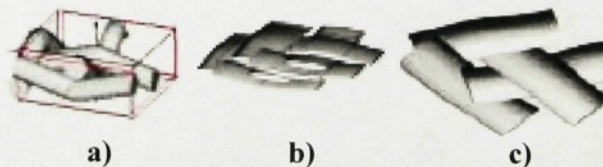


Obr. 3.7 Pracovní prostředí programu WiseTex

Největší výhodou tohoto softwaru je jeho přehlednost, snadná ovladatelnost a možnost aplikace pro široké spektrum textilních struktur. Umožňuje jednoduché zadávání reálných parametrů struktury přízí a textilií na jejichž základě je vytvořen geometrický model textilní výztuže (např. tkaniny, obr. 3.8), využívaný v dalších programech, simulujících například změny parametrů této výztuže při nejrůznějších typech zatížení (tah, tlak, smyk, obr. 3.9).



Obr. 3.8 Geometrický model volné tkaniny



Obr. 3.9 Geometrické modely deformované tkaniny - a) v tahu; b) v tlaku; c) ve smyku

Nevýhodou je, že tento model struktury popisuje geometrické poměry pouze ve volné textilii. V kompozitní struktuře se však geometrie tkané výztuže od volné textilie značně liší [3], takže ani tyto modely dostatečně nepopisují tvar reálné struktury kompozitní výztuže.

3.1.1 Zhodnocení dosažených poznatků

Po prostudování dostupných pramenů lze říci, že výzkum struktury tkané kompozitní výztuže světe je na následující úrovni:

- Parametry elementární buňky jsou obvykle stanoveny ze základních charakteristik vyztužující tkaniny
- Struktura kompozitní výztuže je většinou idealizována, zvlnění vlákenných svazků je popisováno pomocí jednoduchých geometrických modelů, např. sinusovým průběhem
- Obrazová analýza je využívána minimálně, mikrofotografie převážně slouží jako ilustrace
- Možnostem popisu reálné struktury kompozitu pomocí moderních metod obrazové analýzy není věnována dostatečná pozornost.

3.2 VÝVOJ GEOMETRICKÝCH MODELŮ STRUKTURY TKANÉ VÝZTUŽE V KOMPOZITECH NA TU LIBEREC

Na našem pracovišti byl zvolen přístup, který jako prioritu považuje právě věrné modelování reálné struktury kompozitů. Všechna zpracovávaná data byla získána z experimentálních měření geometrie výztuže v kompozitní struktuře.

Pomocí obrazové analýzy byla získána rozsáhlá databáze obrazů povrchů náhodných řezů strukturou kompozitu, jak ve směru osnovy, tak ve směru útku. Tato databáze byla použita pro extrakci dat, popisujících pozorovanou strukturu [18]. Na jejich základě byla vytvořena řada originálních přístupů k popisu vnitřní struktury kompozitů. Příkladem je metoda modelování průběhu vazné vlny v kompozitu pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT) [19], nebo vizualizace tkaninové struktury kompozitu zpracováním experimentálních dat pomocí jazyka VRML [20]. Ukázka dalšího praktického využití modelování vazných vln pomocí DFT je např. v [21,22].

V současné době je předmětem výzkumu tvorba reálného geometrického modelu z dat získaných metodou postupného odbušování povrchu vzorků. Vývoj této metodiky je popsán v experimentální části této diplomové práce.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

„Nikdo ještě nikdy neviděl vnitřek cihly. Pokaždé když cihlu rozlomíte, vidíte jenom povrch. Že má cihla vnitřek, je jednoduchá teorie, která nám pomáhá lépe věcem porozumět.“

Richard P. Feynman
To snad nemyslíte vážně!

Tuto myšlenku vyslovil R.P. Feynman v době svých studií na Princetonu, tedy kolem roku 1940. V té době vypadala strukturní analýza materiálů úplně jinak, neexistovaly personální počítače, tedy ani moderní metody obrazové analýzy. Přesto je tato myšlenka základem následujícího experimentu, jehož výsledkem by měl být co nejvěrnější popis vnitřní struktury kompozitního materiálu. Tento popis je prezentován třírozměrným modelem založeným na prostorové rekonstrukci souřadnic skutečné struktury

4.1 METODA POSTUPNÉHO ODBRUŠOVÁNÍ POVRCHU KOMPOZITNÍHO VZORKU A JEHO SNÍMÁNÍ POMOCÍ OBRAZOVÉ ANALÝZY

Cílem této části experimentu byl vývoj metodiky tvorby obrazové databáze vhodné pro extrakci takových experimentálních dat, která by reprezentovala skutečnou prostorovou strukturu kompozitu. Jejich vizualizací pomocí metod moderní počítačové grafiky vznikne geometrický model reálné struktury kompozitu. Tento model bude využit pro další studium vnitřní struktury kompozitu a pro predikci jeho fyzikálních vlastností.

Nábrusy příčných řezů C-C kompozitů, použité v tomto experimentu, byly připraveny v Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR v Praze v rámci grantového projektu GAČR.

4.1.1 Popis použitých kompozitních vzorků

Jedná se o vzorky tkaninových karbonizovaných C-C kompozit, vyrobených prepregovou technologií. Výztuž studovaných kompozitních vzorků je tvořena 8 vrstvami uhlíkových tkanin v plátňové vazbě. Tyto tkaniny jsou vyrobeny z uhlíkového multifilu **Torayca T 800 HB**. Vybrané parametry tohoto multifilu a uhlíkové tkaniny před tepelně-mechanickým zpracováním jsou v tabulce (tab. 4.1) [23].

Tab. 4.1 Parametry uhlíkového multifilu a uhlíkové tkaniny

MULTIFIL Z UHLÍKOVÝCH VLÁKEN		UHLÍKOVÁ TKANINA	
<i>počet vláken</i>	6000	<i>vazba tkaniny</i>	plátňová Cramer 1/1
<i>délková hmotnost</i>	222 tex	<i>tloušťka tkaniny</i>	0,37 mm
<i>pevnost v tahu</i>	5490 MPa	<i>plošná měř. hmotnost</i>	273 g.m⁻²
<i>modul pružnosti</i>	295 GPa	<i>pórovitost</i>	59%
<i>tažnost</i>	1,9 %	<i>dostava osnovy</i>	60 nití / 100 mm
<i>hustota</i>	1,81 g.cm⁻³	<i>dostava útku</i>	60 nití / 100 mm
		<i>seskání osnovy</i>	1,0 %
		<i>seskání útku</i>	2,0 %

Osm vrstev uhlíkové tkaniny, impregnovaných fenolickou pryskyřicí *Umaform LE*, bylo kladeno na sebe při zachování směru osnovy a útku (0°/90°) a oříznuto na čtverec 120 x 120 mm. Tyto byly následně uloženy do forem a lisovány za tepla při teplotě 120°C a lisovacím tlaku cca 0,3 MPa (vzorky *minimálně lisované, označené číslem 300*). Takto připravené vzorky byly karbonizovány v atmosféře N₂ s maximální teplotou karbonizace 1000°C.

Připravená kompozitní deska o tloušťce cca 2,5 mm byla nařezána speciální pilou na proužky o délce 25 mm a hloubce cca 5 mm. Tyto řezy byly vedeny jak ve směru osnovy (vzorky 300-3) tak ve směru útku (vzorky 300-4). Takto připravené vzorky byly uloženy do novodurových kroužků o průměru 28 mm a výšce 20 mm a zality do epoxidové pryskyřice tak, abychom mohli pozorovat plochu řezu. Po vytvrzení pryskyřice byl povrch vzorků vybroušen a vyleštěn pomocí standardních metalografických metod tak, aby bylo možno snímat strukturu povrchu pomocí obrazové analýzy [24].

4.1.2 Odbrušování povrchu vzorků

Odbrušování povrchu kompozitních vzorků bylo provedeno s laskavou pomocí pracovníků Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR v Praze.

4.1.2.1 Výběr vzorků

Pro experiment byly vybrány čtyři kompozitní vzorky, aby byla maximálně využita kapacita brusné hlavice pro vzorky o průměru 28 mm. Dva vzorky byly v řezu po osnově (300-3/2 a 300-3/12) a dva v řezu po útku (300-4/9 a 300-4/11). Tyto vzorky vykazovaly nejmenší zbroušení vzhledem k původní výšce novodurového kroužku, ve kterém byly vzorky zalaty a který byl odbrušován společně s povrchem vzorků.

Dalším důvodem pro použití více vzorků byl fakt, že při procesu broušení nelze vyloučit poškození, ke kterému může při postupném zbrušování vzorku do hloubky dojít (vliv křehkosti uhlíkových vláken a matrice, póry a trhliny ve struktuře apod.), dále nelze vyloučit poškrábání povrchu vzorku, vylomení části vzorku apod. Lze předpokládat, že k podobným problémům nedojde u všech čtyř vzorků najednou a nebude narušena kontinuita odbrušování jejich povrchu.

4.1.2.2 Postup odbrušování

Před zahájením samotného experimentu bylo potřeba stanovit nejmenší možnou velikost odbroušení povrchů, kterou by bylo možno co nejpřesněji opakovat ve všech dalších krocích.

Přibližnou velikost odbroušení povrchu vzorků lze stanovit z parametrů brusných kotoučů a z počtu otáček brousícího stroje. Přesnou velikost odbroušení povrchu vzorku nelze v průběhu broušení z technických důvodů určit.

Velikost odbroušení vzorku byla vypočtena z rozdílu výšky vzorku před a po broušení. Tyto velikosti byly měřeny pomocí mikrometru. Vzorky byly měřeny vždy ve stejném místě, které bylo v počátku experimentu vyznačeno na spodní straně vzorku.

Velikost vhodného kroku byla určena experimentálně tak, že byl povrch vzorků odbrušován a snímán v několika rozdílných krocích. Nejvíce s krokem cca 0,5 mm, postupně byla velikost kroku snižována asi o 0,05 mm.

Po zhodnocení získaných obrazů povrchu byla zvolena velikost kroku 0,1 mm, neboť je zde zachována značná vizuální podobnost dvou po sobě následujících obrazů a zároveň je již zachycena proměna vnitřní struktury kompozitu (obr. 4.1). Při menším odbroušení se vnitřní struktura vizuálně nezmění, navíc u jednotlivých kroků nelze dodržet požadavek ekvidistance.



**STRUKTURA POVRCHU VZORKU
PŘED JEHO ODBROUŠENÍM**



**STRUKTURA POVRCHU VZORKU
PO JEHO ODBROUŠENÍ**

Obr. 4.1 Změna vnitřní struktury kompozitu při odbroušení povrchu vzorku o cca 0,1 mm

4.1.3 Snímání struktury C-C kompozitu

Použité přístroje:

- odrazový mikroskop NIKON ECLIPSE ME 600
- stolek umožňující horizontální a vertikální posuv vzorku
- barevná RGB kamera JVC TK - 1070 E
- počítač Pentium II, 300 MHz, 64 MB RAM, OS WinNT
- software Lucia G, systém firmy Laboratory Imaging pro zpracování a analýzu obrazu [25]

Obraz povrchu vzorku byl snímán při 2,5 násobném zvětšení objektivu. Při tomto zvětšení je možno na monitoru pozorovat všech osm vrstev tkaniny, tvořících kompozitní výztuž (obr. 4.1 a, b), ale nelze sejmut celý povrch vzorku, vzhledem k jeho délce. Výsledný obraz celého povrchu je složen ze 7-8 dílčích obrazů (obr.4.2). Pro jejich přesné složení bylo použito speciální makro pro skládání obrazů v horizontálním směru - Grabhor.mac [23].



Obr. 4.2 Povrch kompozitního vzorku složený ze sedmi dílčích obrazů

Jedná se o poloautomatické makro pracující tak, že po sejmutí a uložení prvního krajního obrazu je jeho pravá polovina umístěna do levého okraje obrazovky, pak následuje ruční posuv vzorku pomocí posuvného stolku mikroskopu tak, aby obě poloviny obrazu navazovaly. Takto složený navazující obraz je uložen a postup se opakuje až do sejmutí celého povrchu vzorku. Toto makro zároveň zajišťuje, aby některá místa nebyla snímána dvakrát. Barevný obraz vzorku je při ukládání převáděn na šedý. Obrazy jsou ukládány jako bitmapy, aby bylo možné jejich další zpracování i mimo systém LUCIA.

4.1.4 Výsledky zkoumané metodiky

Při postupném odbroušování povrchu vzorků a jejich následném snímání pomocí obrazové analýzy jsme získali celkem 15 obrazů povrchu vzorků řazených za sebou a označených jako VYBRUS 01 - 15. Průměrné velikosti odbroušení povrchu jednotlivých vzorků je v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Průměrné velikosti odbroušení vzorků

Vzorek	300-3/2	300-3/12	300-4/9	300-4/11
Průměrná hodnota odbroušení povrchu [mm]	$0,11 \pm 0,03$	$0,115 \pm 0,029$	$0,099 \pm 0,024$	$0,11 \pm 0,03$

V průběhu experimentu byly získané obrazy vyhodnocovány vizuálně a výsledek plnil naše očekávání. Při zvolené velikosti odbroušení povrchu vzorku bylo možné sledovat postupné změny jednotlivých vláknenných svazků ve struktuře vzorku, např. změny tvaru a velikosti jejich příčných průřezů, jejich deformace, hromadění výztuže nebo kapsy nevyztužené matrice. Dále byl sledován vznik a vývoj trhlin, způsob, jakým se šíří a kdy se naopak ztrácejí.

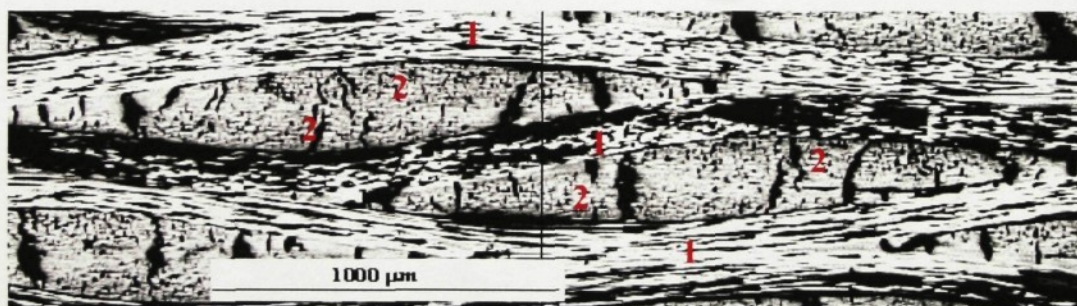
Výsledky vytvořené obrazové databáze pro popis prostorové struktury jsou ukázány v kapitole 5.1 (obr. 5.1 až 5.4.)

4.2 PROSTOROVÁ REKONSTRUKCE STRUKTURY KOMPOZITU

V této části experimentu byly zkoumány možnosti třírozměrné rekonstrukce tvaru vláknenné výztuže založené na reálných souřadnicích zkoumané struktury, dále rekonstrukce tvaru nejruznějších dutin (trhlin a pórů) a jejich vizualizace pomocí počítačové grafiky. Cílem bylo vytvořit takové geometrické modely, které by co nejlépe popisovaly skutečnou strukturu kompozitů a mohly být využity pro jejich fyzikálních vlastností, zejména mechanických, ale i elektrických, termomechanických, tepelných, apod.

4.2.1 Odečet prostorových souřadnic struktury

Vláknenná výztuž tkaninového kompozitu je tvořena dvěma systémy navzájem kolmých vláknenných svazků (osnovních a útkových). Osovní (útkové) vláknenné svazky pozorujeme v podélném směru a útkové (osnovní) v příčném průřezu (obr. 4.3) . Pro prostorovou rekonstrukci takové výztuže je třeba odečíst souřadnice obou systémů vláknenných svazků.



Obr. 4.3 Vyobrazení podélných (1) a příčných (2) vláknenných svazků

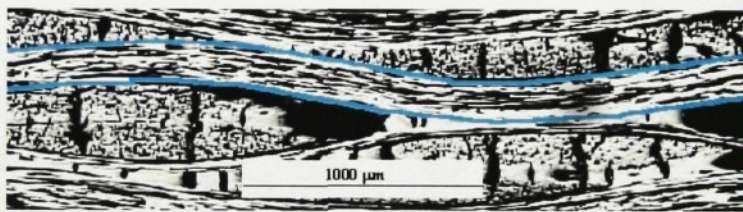
Na patnácti po sobě jdoucích obrazech byly pro jednotlivé pozorované útvary odečítány pouze souřadnice x, y . Souřadnice z je pro každý obraz konstantní a rovná se průměrné velikosti odbroušení povrchu násobenou pořadovým číslem zkoumaného obrazu.

Př: Byly odečteny souřadnice x, y příčného průřezu vláknenného svazku u vzorku 300-2 na obraze VYBRUS_05. Průměrný krok odbroušení pro 300-2 byl $0,11 \text{ mm}$, zkoumaný obraz je *pátý* v pořadí. Velikost z -tové souřadnice tedy bude $z_5 = 0,11 \times 5 = 0,55 \text{ mm}$

4.2.1.1 Odečet souřadnic podélných vláknenných svazků

Pro odečet souřadnic podélných vláknenných svazků byl použit program pro odečet souřadnic vazných vln ing. Martina Myslivce [18], vytvořený původně pro odečet těžnic a aproximaci vazných vln v kompozitu. Program též obsahuje možnost odečtu souřadnic okrajů vazných vln, které lze využít pro požadovanou 3-D rekonstrukci podélných vláknenných svazků.

V jednotlivých obrazech řazených za sebou byly obkresleny vybrané podélné vláknenné svazky, v programu nazývané vrstvy. Program je dimenzován pro odečet souřadnic maximálně osmi vrstev podélných vláknenných svazků najednou, pro přehlednost přísluší každé vrstvě jedna barva (obr. 4.4). Průběh každé vazné vlny je popsán pomocí 128 souřadných dvojic x, y . Získané souřadnice lze uložit jako textový soubor a dále zpracovat.



Obr. 4.4 Odečet souřadnic podélných vláknenných svazků

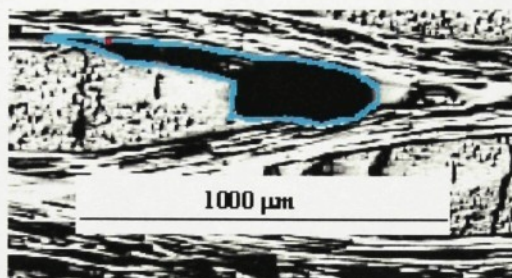
4.2.1.2 Odečet souřadnic příčných průřezů vláknenných svazků

Pro odečet souřadnic příčných průřezů vláknenných svazků bylo třeba vytvořit vlastní software. Ten pracuje následujícím způsobem: Nejprve provedeme kalibraci prostředí, pak načteme obraz povrchu vzorku, obkreslíme vybraný příčný průřez a zvolíme odečet souřadnic. Odečtené souřadnice jsou uloženy jako standardní ASCII soubor (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Odečet souřadnic příčných průřezů vláknenných svazků

Program je nastaven tak, aby odečítal 64 souřadných dvojic x, y . Souřadnice osy z jsou pro každý povrch vzorku konstantní a jejich výpočet je uveden výše (kap. 4.2.1.). Po odečtení souřadnic x, y je měřený objekt označen, aby nedošlo k opakování odečtu souřadnic stejného objektu. Postupně můžeme odečíst souřadnice všech příčných průřezů v obraze. Stejně lze odečíst i souřadnice zkoumaných dutin (viz. obr. 4.6). V jednom obraze je možné odečíst souřadnice více objektů najednou. Všechny souřadnice objektů odečtené z jednoho obrazu, jsou uloženy ve stejném textovém souboru, každý objekt je prezentován dvěma řádkovými vektory velikosti 1×64 . První reprezentuje souřadnice osy x , druhý osy y .



Obr. 4.6 Odečet souřadnic dutiny

Než začne proces odečítání souřadnic příčných průřezů vlákenného svazku je nezbytné důkladně prostudovat strukturu povrchů. Je třeba přesně stanovit, který příčný průřez na jednotlivých po sobě jdoucích obrazech přísluší danému vlákennému svazku (obr. 4.7). Totéž platí o odečtu souřadnic pro jednotlivé dutiny, procházející napříč kompozitním vzorkem. Tento přístup je poměrně pracný a vyžaduje důkladné studium struktury zkoumaných povrchů.



Obr. 4.7 Příčné průřezy jednoho vlákenného svazku na šesti po sobě jdoucích obrazech (vzdálenost mezi obrazy je cca 0,3 mm)

4.2.2 Zpracování prostorových souřadnic struktury

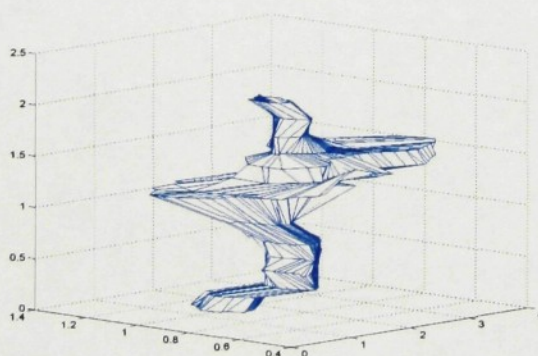
Rekonstrukce prostorového tvaru tkané kompozitní výztuže i tvaru nejrůznějších dutin (trhlin i pórů) z odečtených souřadnic byla realizována dvěma způsoby, využitím vlastního softwaru, vytvořeného pro rekonstrukci odečtených souřadnic pomocí síťového grafu, a využitím softwaru MATLAB R12 na KTM pro aproximaci těchto dat pomocí interpolačních funkcí. Podmínkou úspěšné rekonstrukce je správné seřazení souřadnic podle pořadí obrazů povrchů zkoumaných vzorků.

4.2.2.1 Síťový graf

Prostorová vizualizace třírozměrného pole diskrétních dat pomocí síťového grafu je nejjednodušším způsobem jejich rekonstrukce [26]. Souřadnice x, y, z tvoří uzly, které jsou jednoduše spojeny pomocí úseček.

Každému uzlu je přiřazeno pořadové číslo, podle pozice jeho souřadnic $x_i, y_i, i = 1, \dots, n$, v řádkovém vektoru souřadnic velikosti, kde n je počet sloupců daného vektoru. Tyto uzly jsou v ploše postupně spojeny podle pořadí jejich souřadnic.

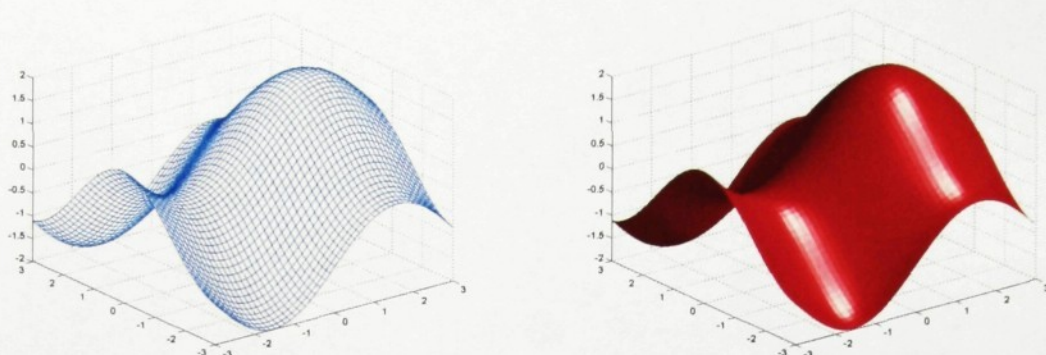
V prostoru jsou spojeny uzly se stejným pořadovým číslem, jejich poloha je určena souřadnicemi x, y, z . Výsledkem je třírozměrná síť, vykreslující geometrii objektu popsaného prostorovými souřadnicemi (obr. 4.8). Tento způsob rekonstrukce je realizován pomocí vlastního softwaru.



4.8 Vizualizace prostorových dat pomocí síťového grafu

4.2.2.2 Rekonstrukce prostorových dat pomocí aproximačních funkcí

Pokud je v třírozměrném grafu na ose z vykreslena funkce dvou proměnných x, y , je výsledkem spojitá síť či plocha podle typu použitého grafu (síťový, plošný, obr. 4.9).



Obr. 4.9 Síťový a plošný graf funkce $z = f(x, y)$

Reálně naměřené souřadnice x, y, z ovšem tvoří sadu diskrétních bodů. Pokud jsou pouze spojeny je výsledkem struktura poměrně hrubých tvarů (obr. 4.8). Proto je vhodné aproximovat tyto křivky (plochy) pomocí hladkých křivek (ploch) zadávaných sítí bodů, které zachovávají geometrické vlastnosti původního tvaru, z něhož byly zadávané souřadnice odečteny [27].

Základní myšlenka aproximačních křivek je jednoduchá: „Protože nemůžeme vyjmenovat všechny body, kterými má křivka procházet, zadáme alespoň některé důležitější - „uzlové body“, např. body, ve kterých se křivka obrací nebo mění směr. Těmito uzlovými body se budeme snažit vést křivku tak, aby splňovala naše další požadavky. Můžeme třeba požadovat hladkost křivky, pokud nechceme, aby se na ní vyskytovaly ostré vrcholy, apod.“

O vedení křivky zadanými body se mluví jako o interpolaci, existuje však i jiný způsob konstrukce - aproximace. Křivka pak nemusí zadanými uzly procházet, jen se snaží probíhat kolem nich a kopírovat je. Při aproximaci nejsou kladeny tak přísné požadavky na průběh křivky, a díky tomu může být dosaženo lepších výsledků, zejména hladšího tvaru. Je známo mnoho různých metod interpolace a aproximace, liší se od sebe především typem používaných vzorců, a tím i geometrickými nebo fyzikálními vlastnostmi výsledných křivek [27].

Vytváření matematických modelů je založeno na mnoha postupech, které vycházejí z metod interpolace a aproximace funkcí či experimentálních dat. Obecně se provádí náhrada funkce $f_{(x)}$, zadané hodnotami $[x_i, y_i]$, $i = 1, \dots, n$, vhodnou aproximující funkcí $g_{(x)}$ [28].

K nejznámějším interpolačním postupům patří polynomická interpolace, pomocí které se hledá polynom $g_{(x)}$ nejmenšího možného stupně tak, aby splňoval podmínku, že v definovaných bodech ξ_i , $i = 1, \dots, n$, nazývaných uzlové body interpolace, jsou $f_{(x)}$ a $g_{(x)}$ spojité ve funkčních hodnotách a hodnotách zvolených derivací (1):

$$f^{(j)}(\xi_i) = g^{(j)}(\xi_i) \quad i = 1, \dots, n \quad j = 0, \dots, r_i \quad (1)$$

$f^{(j)}$... j-tou derivaci

r_i ... maximální derivace v i-tém uzlu, ve které je shodná aproximující i aproximovaná fce

Úloha má právě jedno řešení a hledaný polynom je m-tého stupně (2):

$$m = \sum_{i=1}^n r_i + (n - 1) \quad (2)$$

Polynomická funkce je složena z elementárních funkcí definovaných na celé reálné ose, což vede u vyšších řádů ke vzniku velkého počtu lokálních maxim, minim a inflexních bodů, které neodpovídají průběhu funkce $f_{(x)}$.

U složitých funkcí je nezbytné volit lokálně definované funkce v místě návaznosti (uzlech) spojité ve funkčních hodnotách a hodnotách zadaných derivací. Na tomto principu lze definovat **obecnou polynomickou spline funkci $S_{m(x)}$** [28].

Spline funkcí stupně m pro daných $n+1$ bodů $X_i = (x_i, y_i)$, $i = 0, \dots, n$, kde

$x_0 < x_1 < \dots < x_n$, nazýváme takovou funkci $f_{(x)}$ pro kterou na intervalu $\langle x_0, x_n \rangle$ platí:

a) $f_{(x)} = f_{k(x)}$ na intervalu $\langle x_k, x_{k+1} \rangle$, kde f_k je polynom stupně m (2)

b) $f_{(x)}$ má spojité derivace $f_{(0)}, f_{(1)}, \dots, f_{(m-1)}$

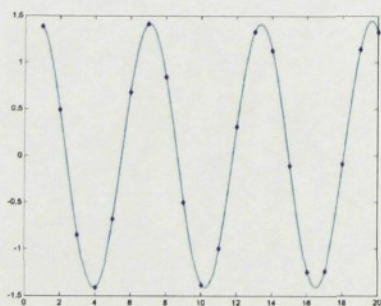
Nejběžněji se používají tzv. kubické spline funkce, kde se stupeň polynomu $m = 3$. Pro vykreslení křivek se používá parametrická spline interpolace, kde každá ze složek je parametrická spline funkce. Platí:

- kubická spline funkce je jednoznačně určená uzlovými body a hodnotami prvních derivací v bodech $\mathbf{X}_0$ a $\mathbf{X}_n$
- kubická spline funkce je jednoznačně určená uzlovými body a hodnotami druhých derivací v bodech $\mathbf{X}_0$ a $\mathbf{X}_n$
- uzavřená spline křivka je jednoznačně určená uzlovými body

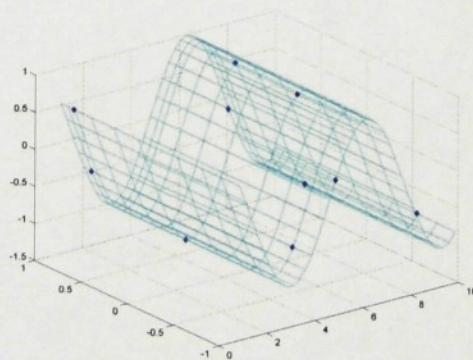
Z bodů kterými má daná spline funkce procházet a z podmínek spojitosti první a druhé derivace dostaneme rovnice, ze kterých lze vypočítat neznámé koeficienty výsledného polynomu [29].

4.2.2.3 Aproximace dat pomocí interpolačních funkcí v programu MATLAB R12

MATLAB R12 umožňuje aproximaci experimentálních dat pomocí několika interpolačních funkcí, např.: *linear*, *spline*, *nearest*, *cubic*. Pro aproximaci souřadnic příčných průřezů byla použita funkce *spline*, realizovaná následujícím příkazem: $\mathbf{yy} = \text{spline}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{yy})$ pro proložení dat hladkou křivkou (obr. 4.10), nebo $\mathbf{zz} = \text{interp2}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{xx}, \mathbf{yy}, 'spline')$ pro proložení dat hladkou plochou (obr. 4.11). Tento příkaz užívá funkce *kubický spline* k vypočtení hodnoty $\mathbf{yy}$ ($\mathbf{zz}$), která je aproximací funkce y (z) v bodech vektoru(ů) $\mathbf{xx}$ ($\mathbf{xx}, \mathbf{yy}$). Vektor $\mathbf{y}$ ($\mathbf{x}, \mathbf{y}$) specifikuje(i) body na kterých jsou dána data $\mathbf{y}$ ($\mathbf{z}$). [30]



Obr. 4.10 Plošná interpolace dat pomocí funkce kubický spline



Obr. 4.11 Prostorová interpolace dat pomocí funkce kubický spline

4.2.3 Prostorová rekonstrukce tvaru kompozitní výztuže a dutin pomocí vlastního softwaru

Tento software přímo navazuje na softwary pro odečet souřadnic (kap.4.2.1). Byl vytvořen speciálně pro zpracování odečtených souřadnic a jejich vizualizaci v třírozměrném prostoru. Tento program je napsán v jazyce Delphi.

Jednotlivé ASCII soubory byly postupně načítány do vizualizačního programu. Jejich pořadí je určeno pořadím obrazu, z něhož byly příslušné souřadnice odečteny (kap.4.2.1). Takto načtené souřadnice byly uspořádány do trojrozměrného pole dat. Toto pole dat bylo pomocí grafické knihovny OpenGL od firmy SGI zobrazováno jako síťový prostorový model geometrie vláknenné výztuže (viz kap 5.2, obr.5.5 - 5.7)

Tento program byl vytvořen pro ověření možnosti tvorby reálného geometrického modelu z dat, získaných metodou postupného odbušování povrchů. Jeho výsledky byly využity především k odhalení nedostatků v předchozích postupech.

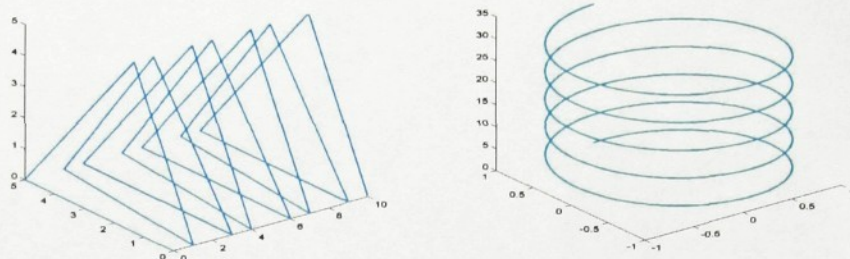
Tento program bude dále upravován souběžně s rozvojem zvolené metodiky tvorby obrazové databáze (kap. 4.1). Výstupem by měl být věrný trojrozměrný model struktury, který bude možné aplikovat i na další typy struktur.

4.2.4 Prostorová rekonstrukce tvaru kompozitní výztuže a dutin v programu MATLAB R12

4.2.4.1 Tvorba grafů v programu MATLAB R12

Pro třírozměrnou rekonstrukci zkoumaných objektů byla v tomto programu využita možnost poměrně snadné tvorby třírozměrných grafů, které lze vykreslit buď jako čárové nebo plošné. Vlastnímu vykreslení grafů ovšem předchází poměrně složitá příprava dat, která lze zadat buď přímo v programu MATLAB, např.: “ $x = [1 \ 2 \ 3 \ 4]$ ”, nebo jsou načtena z datového souboru pomocí příkazu DLMREAD, kde je třeba uvést název souboru a způsob, jakým jsou data oddělena, např.: “*DLMREAD('data.txt','t')*” - data jsou v souboru data.txt a jsou oddělena tabulátorem”. Dále musí být věnována pozornost tomu, aby reálná čísla byla zapsána s desetinou tečkou (2.5) a nikoliv čárkou (2,5), kterou MATLAB neumí přečíst a hlásí chybu [30].

Nakreslit čárový graf v prostoru je velmi jednoduché. Stačí mít k dispozici tři vektory $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $\mathbf{Z}$ stejné délky, které obsahují souřadnice x , y , z , a pomocí příkazu **plot3(x,y,z)** vykreslit požadovaný graf (viz. obr. 4.12).



Obr. 4.12 Čárové grafy realizované příkazem **plot3(x,y,z)**

Vykreslení plochy v prostoru už vyžaduje minimálně matici s hodnotami funkce z , případně ještě vektory hodnot $\mathbf{X}$ a $\mathbf{Y}$ definující síť, ve které jsou funkční hodnoty matice vypočteny. Vlastní vykreslení grafu funkce se provede buď příkazem **mesh** (drátový model) nebo **surf** (stínovaná plocha) [31]. Tyto plochy můžeme dále upravovat (volba barvy, stínování, apod.). Příklady prostorových grafů funkce $z = f(x,y)$ s použitím příkazu **mesh** a **surf** jsou na obrázku 4.9.

4.2.4.2 Vizualizace naměřených dat

Jak už bylo uvedeno v kapitole (4.2.1.2.), souřadnice objektů z každého obrazu byly uloženy jako jeden ASCII soubor. Každý objekt byl prezentován 15 takovými soubory.

Pro snadnější zpracování těchto dat v MATLABu bylo nezbytné získané soubory upravit. Souřadnice definující jeden objekt byly uspořádány do jednoho textového souboru. Tak bylo vytvořeno pole dat, kde byl objekt definován 15-ti maticemi o rozměru 2x64. První řádek obsahoval hodnoty x -ových a druhý řádek y -ových souřadnic.

Byl vytvořen skript pro interpolaci těchto dat funkcí **spline** a vizualizaci těchto dat pomocí plošného grafu. Skript je posloupnost příkazů zapsaná do souboru s extenzí [.m] (např. vizualizace.m). Napíšeme-li jméno tohoto souboru (bez přípony) do příkazové řádky MATLABu, jsou zadane příkazy postupně vykonány, jako bychom je napsali z klávesnice [30]. Výsledkem tohoto postupu byly prostorové modely měřených objektů prezentované v kapitole 5.2 (obr.5.5-5.8).

4.3 VYHODNOCENÍ ZMĚNY VELIKOSTI A TVARU PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ

Deformace vlákených svazků ve tkanině významně ovlivňuje vlastnosti kompozitní výztuže. Zvlášť nepříznivý vliv má na elastické moduly výztuže. V procesu přípravy kompozitu je vlivem lisování a tepelného zpracování tato výztuž dále deformována. Důležitou informací pro predikci vlastností kompozitu je, jak tyto deformace ovlivňují strukturu vlákených svazků, jaké změny v nich v proces přípravy vyvolávají.

4.3.1 Metoda měření změn velikosti průřezů

V patnácti za sebou řazených obrazech povrchů kompozitních vzorků byly měřeny velikosti příčných průřezů náhodně vybraných vlákených svazků pomocí programu LUCIA G. Aby byly získané výsledky statisticky vyhodnotitelné, bylo proměřeno 150 náhodných vlákených svazků, jejichž průběh bylo možné pozorovat na všech 15 obrazech prostorové struktury kompozitu.

Měření pomocí systému obrazové analýzy LUCIA G umožňuje měření s limitující přesností $4,14079 \mu\text{m}$, což je dáno rozlišením $1 \text{ pixel} = 4,14079 \mu\text{m}$ (stanoveno z kalibrace). Vzhledem k malé barevné odlišnosti měřených objektů od okolí nebylo možné provést jejich automatickou segmentaci. Plocha každého měřeného průřezu byla proto vyznačena ručně. Chyba způsobená při ručním měření objektu byla stanovena v rozmezí $0,035 - 3\%$.

Označené byly plochy automaticky změřeny. Plocha příčných průřezů byla vyjádřena v m^2 . Naměřené hodnoty byly uloženy jako ASCII soubory. Pro každý vlákený svazek byly hodnoty velikosti jeho průřezů prezentovány sloupcový vektor o rozměru 15×1 . Takto získaná data byla zpracována v programu MATLAB R12.

4.3.2 Metoda vyhodnocení změn velikosti průřezů

Naměřené hodnoty velikostí příčných průřezů S [m^2] byly porovnány s teoretickou hodnotou velikosti plochy průřezu nedeformovaného vlákenného svazku S_0 [m^2], vypočtenou ze známých parametrů vláken (3). Byl stanoven koeficient změny průřezu η dle vztahu (4):

$$S_0[m^2] = \frac{T[tx]}{\rho[kg \cdot m^{-3}]} \cdot 10^{-6} \quad T = 222 \text{ tex} \quad \rho = 1810 \text{ kg} \cdot m^{-3} \quad (3)$$

T ... délková hmotnost vlákenného svazku

ρ ... hustota vláken

$$\eta = S/S_0 \quad S_0 = 1,23 \cdot 10^{-7} m^2 \quad (4)$$

S [m^2] ... naměřená velikost plochy průřezu vlákenného svazku

S_0 [m^2] ... teoretická velikost plochy průřezu vlákenného svazku

Dále byly zjištěny maximální a minimální hodnoty velikostí průřezů jednotlivých svazků a vypočtena jejich difference. Byl vytvořen skript pro výběr těchto hodnot z každého vektoru velikostí ploch a výpočet hodnot jejich difference. Získané hodnoty byly postupně ukládány v ASCII souborech. Po postupném proměření všech vlákenných svazků a zpracování získaných hodnot byly vytvořeny tři soubory obsahující 150 hodnot maximálních a minimálních velikostí ploch a hodnot diferencí těchto ploch. Získaná data byla prezentována histogramem.

Výsledné velikosti koeficientů změny průřezu vlákenných svazků a hodnoty difference mezi maximální a minimální velikostí jejich průřezu vypovídají o stavu těchto svazků ve výsledném kompozitu. Pozornost byla věnována zejména příčným průřezům s extrémními hodnotami koeficientů změny a vlákenným svazkům s extrémní diferencí velikostí průřezů. Byly prostudovány snímky, kde se tyto průřezy nacházely, zkoumán jejich stav, jejich poloha vzhledem k okolí.

Průběhy svazků s největší a nejmenší diferencí velikostí průřezů byly podrobně zkoumány. Hodnoty velikostí průřezů u těchto svazků byly vyneseny do grafu a proloženy regresní křivkou. Průběhy těchto křivek byly porovnány s průběhy zkoumaných vlákenných svazků v prostorové struktuře kompozitu.

Cílem této analýzy bylo zjistit, jak jsou vlákenné svazky ovlivněny procesem přípravy kompozitu, jaký je vliv deformace tkaniny na jejich strukturu ve finálním výrobku, jak se mění struktura vlákenných svazků v závislosti na jejich poloze, jaký je vliv okolní struktury na geometrii těchto svazků. Výsledky jsou prezentovány v kapitole 5.3.

4.3.3 Vyhodnocení změny tvaru příčných průřezů

Vyhodnocení změny tvaru průřezů vlákenných svazků bylo provedeno vizuálně na základě pozorování kompozitní struktury. Jejich tvary byly zkoumány v závislosti na poloze vlákenných svazků vzhledem k okolní struktuře a rekonstruovány pomocí souřadnic jejich tvaru (obr.5.13). Výsledky těchto pozorování jsou uvedeny v kapitole 5.3, obr. 5.23 a 5.24.



Obr. 4.13 Příčný průřez vlákenného svazku a jeho geometrický model, vytvořený rekonstrukcí reálných souřadnic

5. VÝSLEDKY EXPERIMENTU

5.1 OBRAZOVÁ DATABÁZE PRO TVORBU PROSTOROVÝCH MODELŮ VNITŘNÍ STRUKTURY KOMPOZITU

Obrazová databáze pro rekonstrukci prostorové struktury čtyř kompozitních vzorků je výsledkem experimentálního zkoumání vnitřní struktury kompozitu metodou postupného odbrušování a snímání obrazů povrchů kompozitních vzorků (kap. 4.1). Prostorová struktura každého vzorku je popsána celkem patnácti obrazy řazenými za sebou v ekvidistantních rovinách (kap. 4.1.4).

Na obr. 5.1-5.4 jsou ukázány vybrané obrazy povrchů zkoumaných vzorků. Tyto obrazy byly vybrány tak, aby bylo možné pozorovat změny vnitřní struktury vzorků.

Tvar zkoumaných strukturních prvků (podélné a příčné vláknenné svazky, trhliny apod.) je popsán prostorovými souřadnicemi x, y, z . Tyto souřadnice tvoří třírozměrné pole dat, jehož vizualizací rekonstruujeme tvar zkoumaných objektů.

5.1 PROSTOROVÉ MODEL Y VNITŘNÍ STRUKTURY KOMPOZITU

Na obrázcích 5.5-5.7 jsou strukturní prvky zobrazeny jednak pomocí jednoduchého síťového grafu (kap 4.2.3), jednak pomocí plošného grafu vytvořeného v programu MATLAB R12.

Na obrázku 5.5 je zobrazen tvar vláknenného svazku rekonstruovaného pomocí souřadnic vazných vln - a) síťový graf, b) plošný graf.

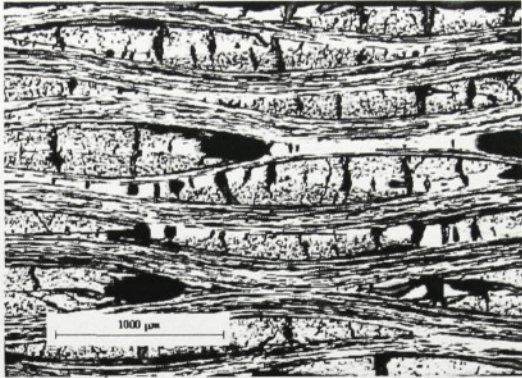
Na obrázcích 5.6 a 5.7 jsou rekonstruovány tvary vláknenného svazku a trhliny využitím souřadnic jejich příčných průřezů. U trhliny je navíc zobrazen i její průběh ve vnitřní struktuře kompozitního vzorku.

Obrázek 5.8 představuje možnosti rekonstrukce tvaru vláknenných svazků ve vazném bodě. Pro jejich popis byly použity jak souřadnice podélných svazků (černé), tak souřadnice příčných průřezů vláknenného svazku (modré).

povrch vzorku - VYBRUS_01



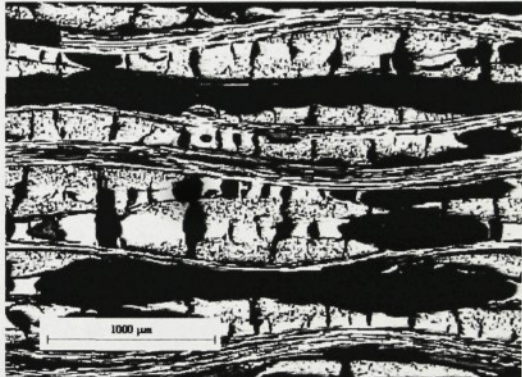
povrch vzorku - VYBRUS_03



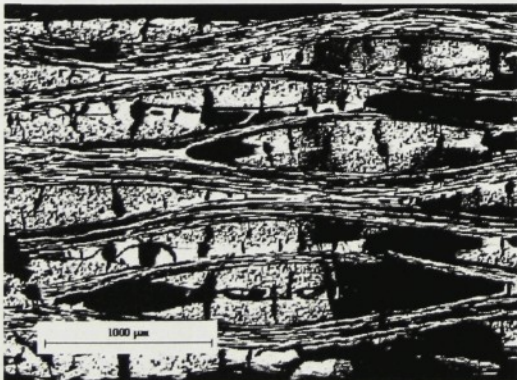
povrch vzorku - VYBRUS_06



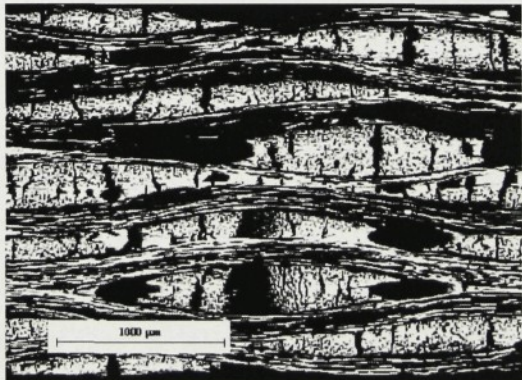
povrch vzorku - VYBRUS_09



povrch vzorku - VYBRUS_12



povrch vzorku - VYBRUS_15



Obr. 5.1 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-3/2

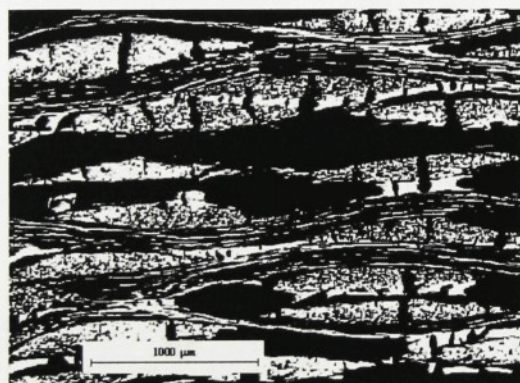
povrch vzorku - VYBRUS_01



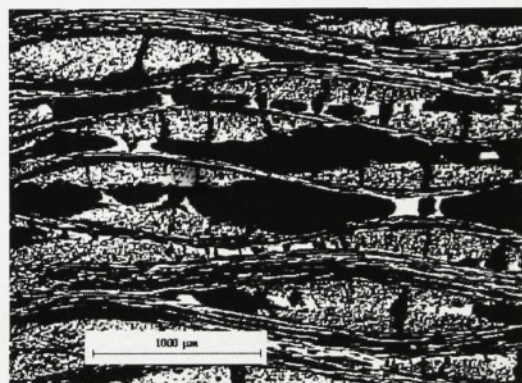
povrch vzorku - VYBRUS_03



povrch vzorku - VYBRUS_06



povrch vzorku - VYBRUS_09



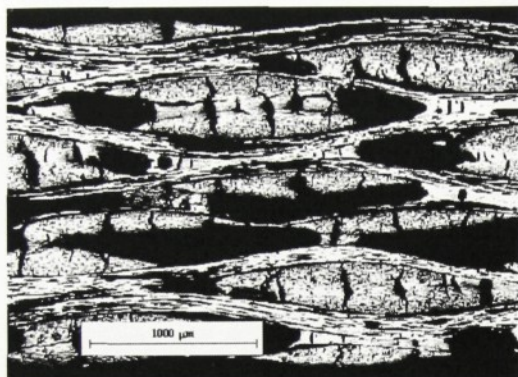
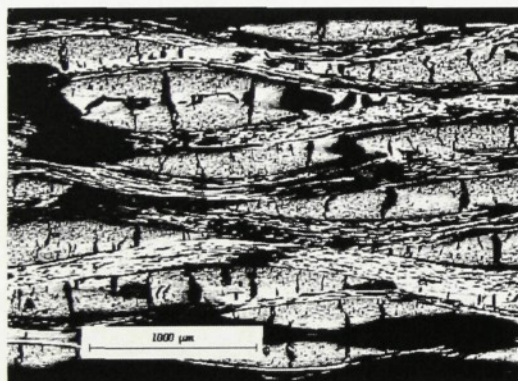
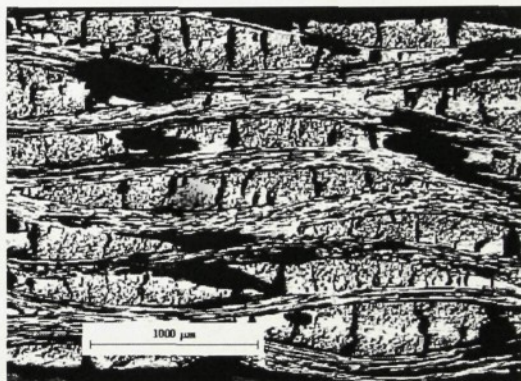
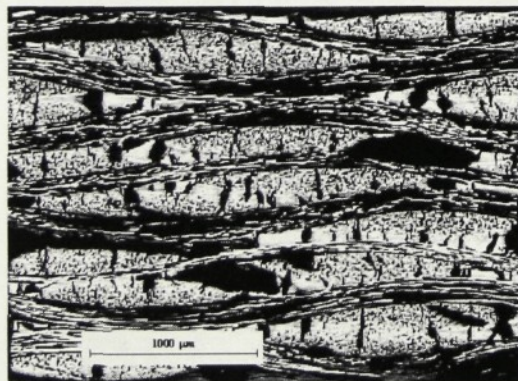
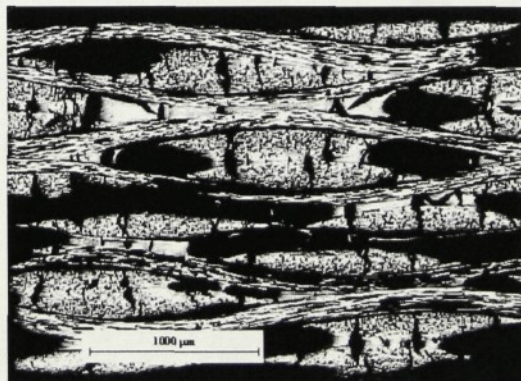
povrch vzorku - VYBRUS_12

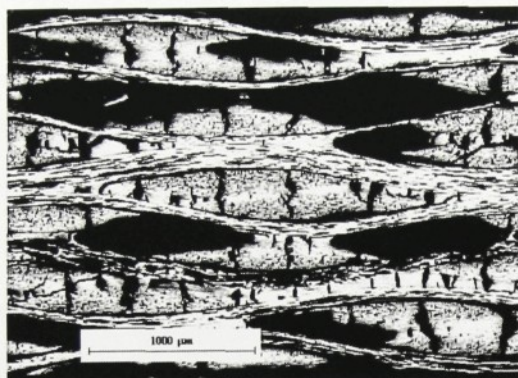
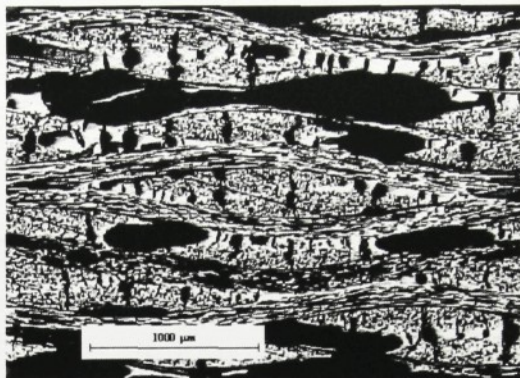
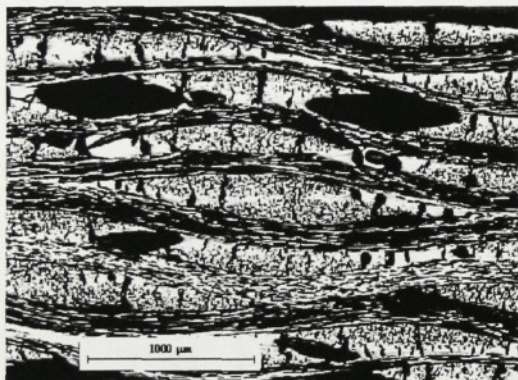
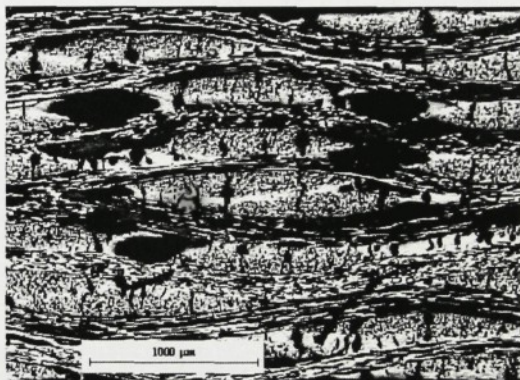
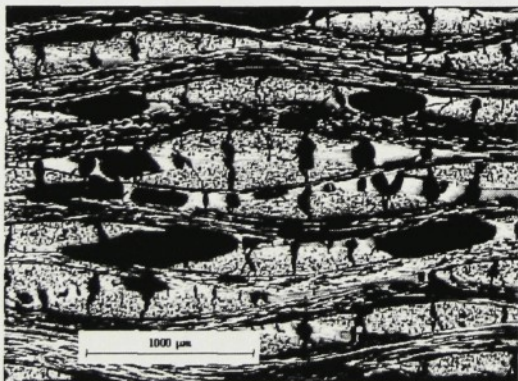
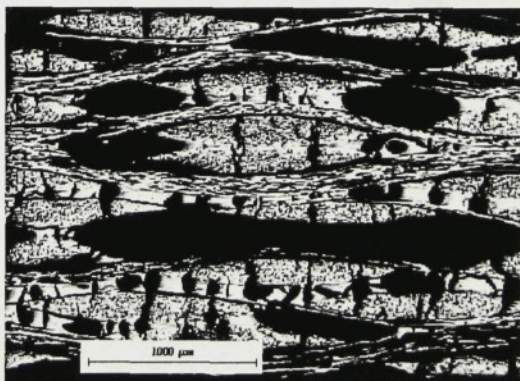


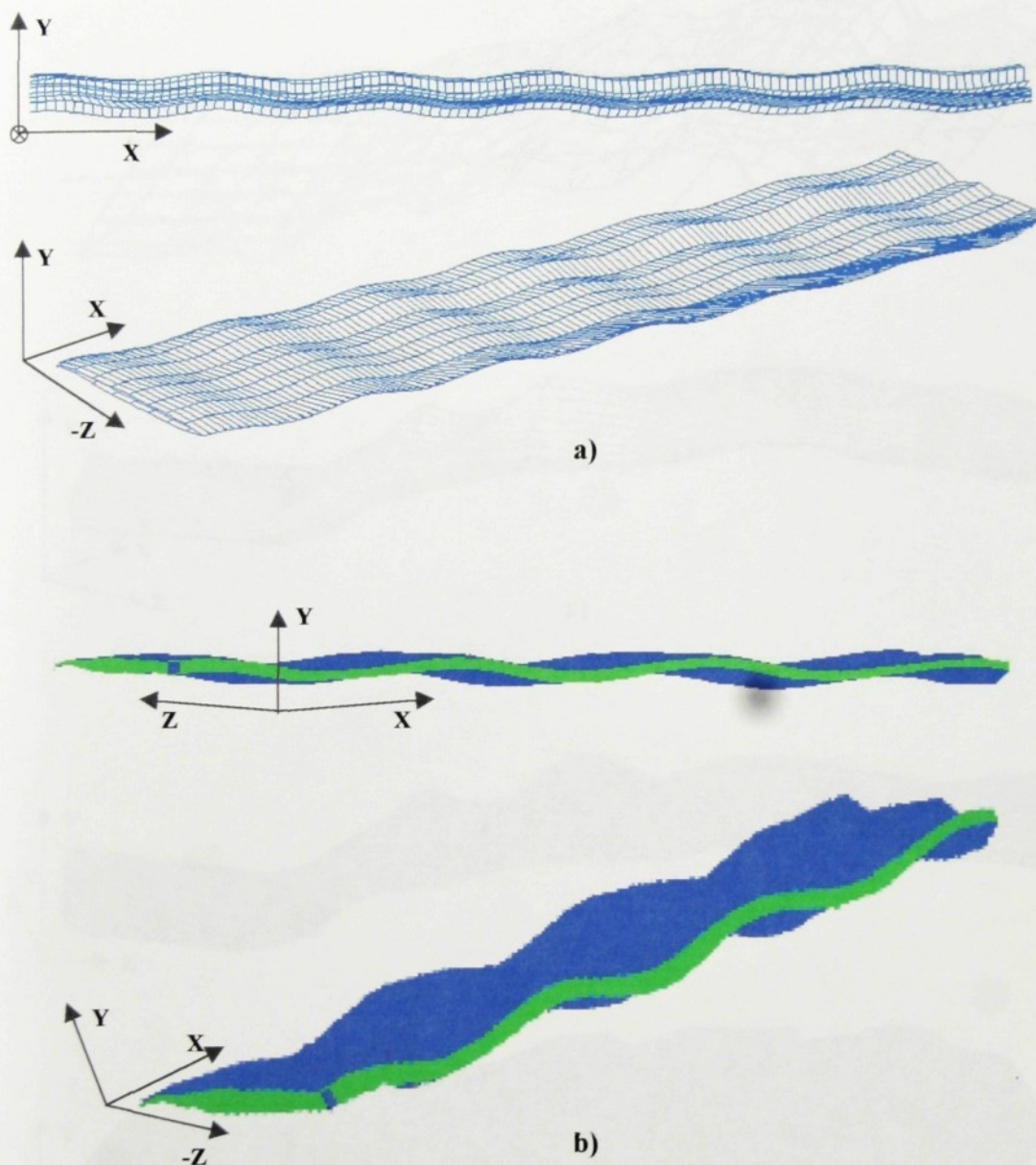
povrch vzorku - VYBRUS_15



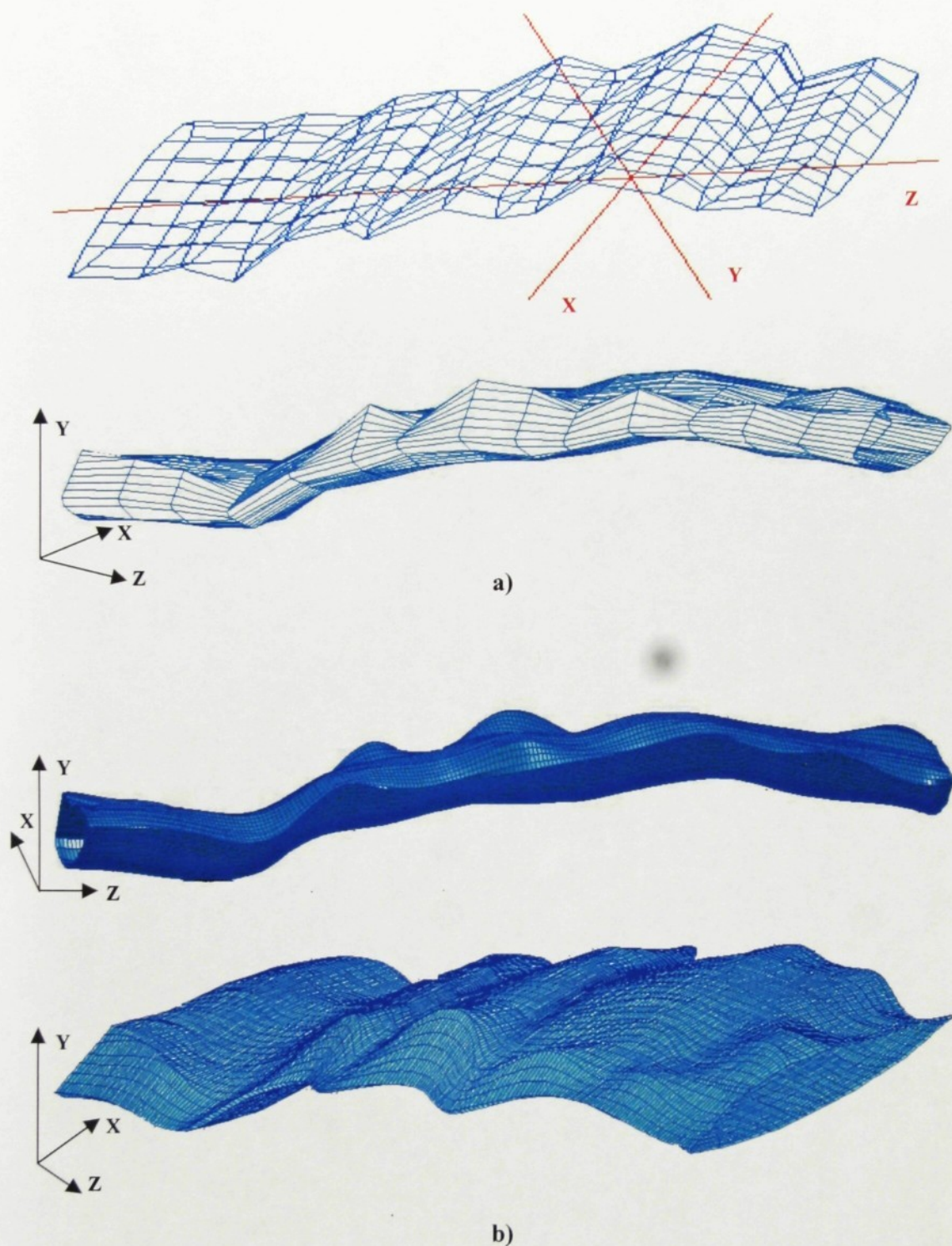
Obr. 5.2 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-3/12

povrch vzorku - VYBRUS_01*povrch vzorku - VYBRUS_03**povrch vzorku - VYBRUS_06**povrch vzorku - VYBRUS_08**povrch vzorku - VYBRUS_11**povrch vzorku - VYBRUS_14**Obr. 5.3 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-4/9*

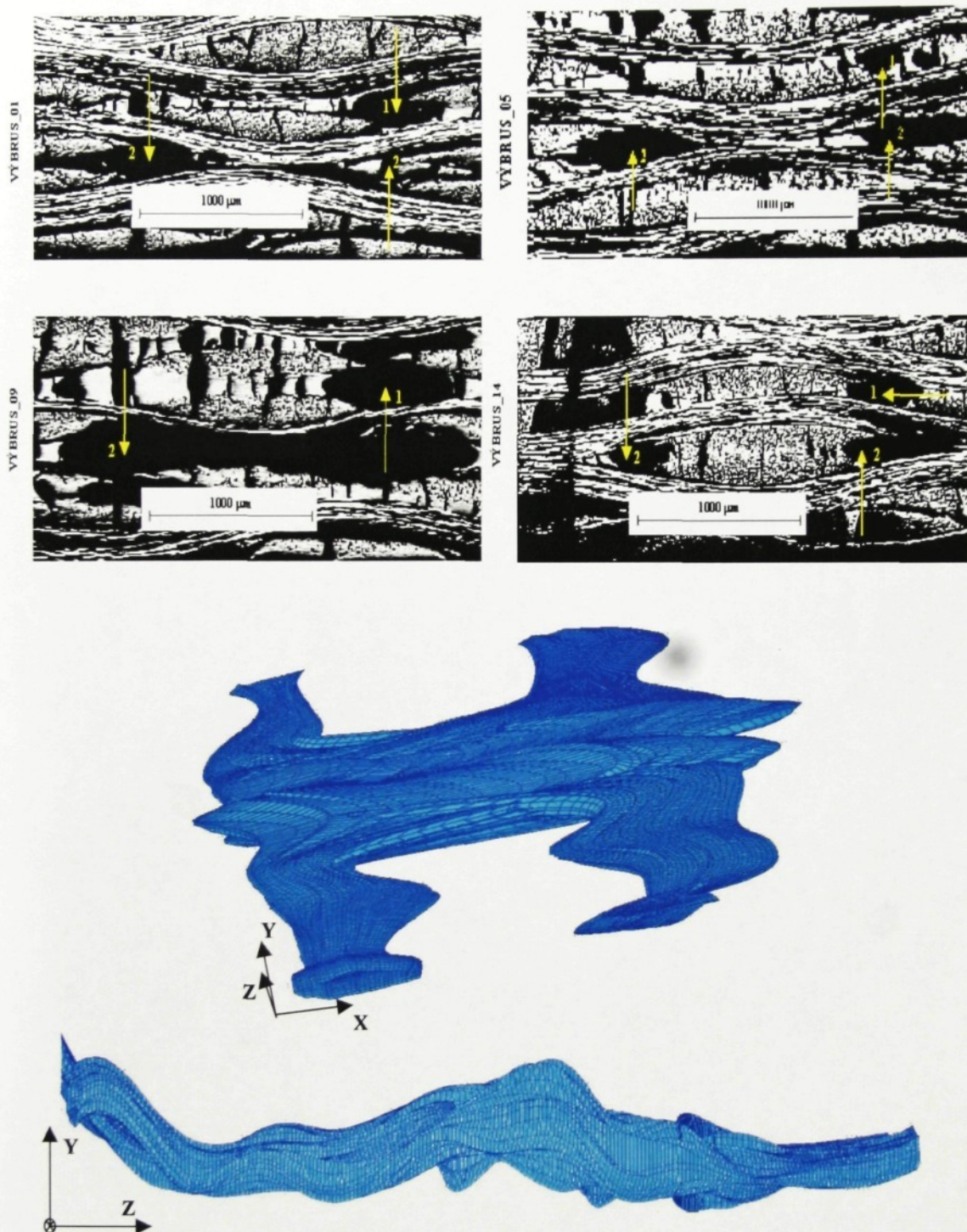
povrch vzorku - VYBRUS_01*povrch vzorku - VYBRUS_03**povrch vzorku - VYBRUS_06**povrch vzorku - VYBRUS_09**povrch vzorku - VYBRUS_12**povrch vzorku - VYBRUS_15**Obr. 5.4 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-4/11*



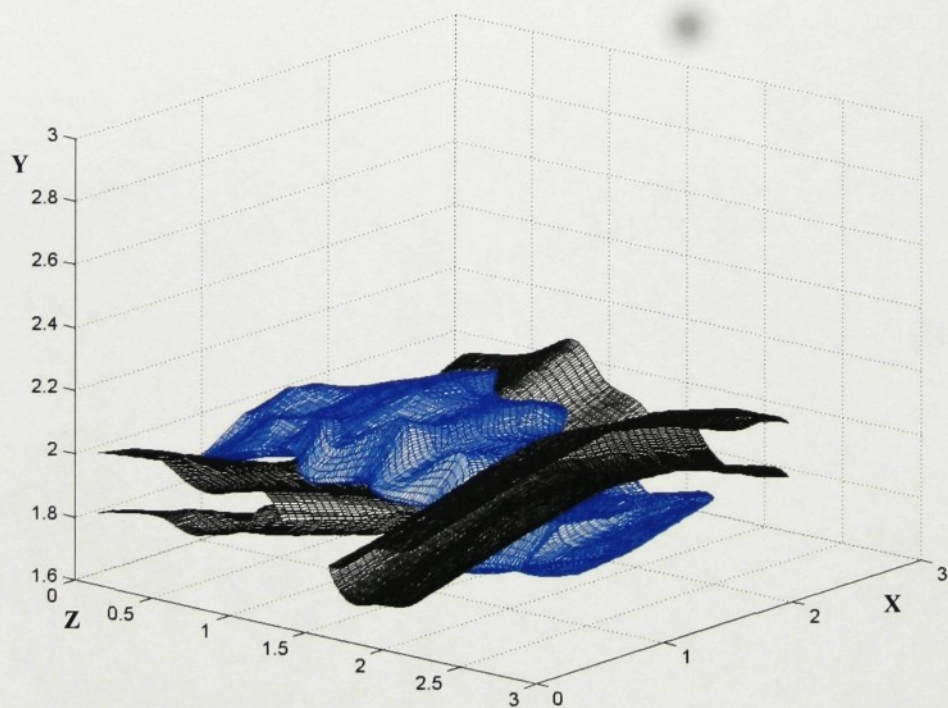
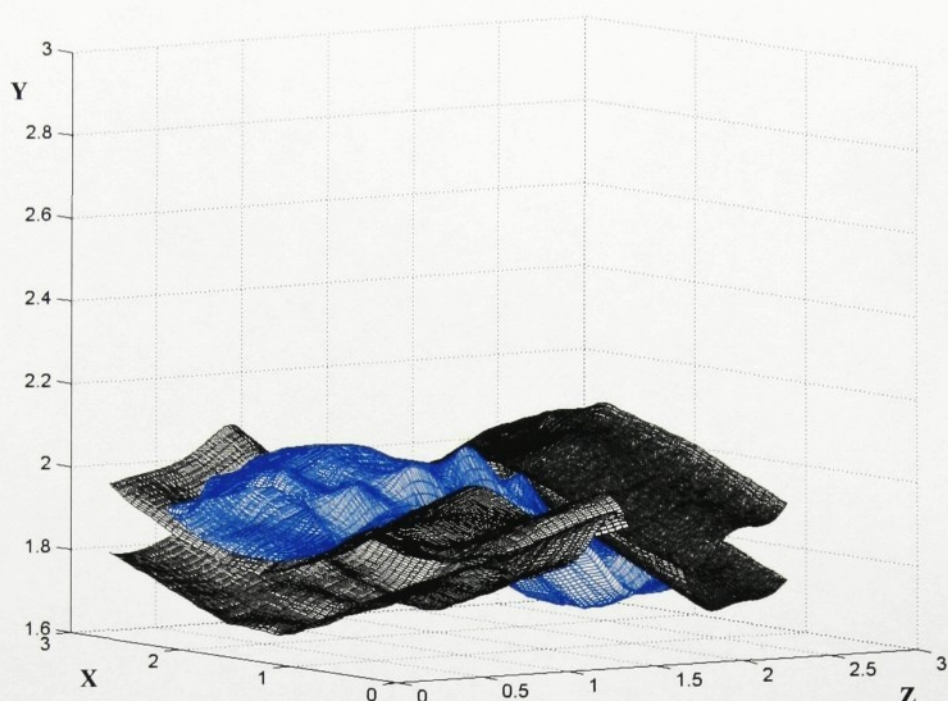
Obr. 5.5 Prostorová rekonstrukce vlákenného svazku pomocí souřadnic vazných vln, vzorek 300-3/2: a) síťový graf; b) plošný graf



Obr. 5.6 Prostorová rekonstrukce vlákenného svazku pomocí souřadnic jeho příčných průřezů - vzorek 300-3/2: a) síťový graf; b) plošný graf



Obr. 5.7 Prostorová rekonstrukce trhliny ze souřadnic jejích příčných průřezů
a) trhlina (1,2) ve struktuře kompozitního vzorku
b) geometrický model tvaru této trhliny



Obr. 5.8 Prostorová rekonstrukce vazného bodu tkaniny v kompozitu
v programu MATLAB R12 - vzorek 3003/2

5.3 ZMĚNY TVARU A VELIKOSTI PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ

Po proměření 150 vláknenných svazků vznikl soubor velikostí příčných průřezů S [m^2] o rozsahu 2250 hodnot (15×150 , viz kap. 4.3.1). Z těchto hodnot byly vypočteny koeficienty změny příčných průřezů $\eta = S/S_0$ [16].

Pro oba soubory byla zjišťována optimální teoretická rozdělení výběrů s použitím programu MATLAB R12 [30]. U obou testovaných souborů se jako nejvhodnější ukázalo Weibullovo rozdělení (obr. 5.9). Toto rozdělení se obecně hodí k popisu systémů, jejichž vlastnosti jsou proměnné v čase [35].

Oba soubory dat byly dále statisticky zpracovány (tab. 5.1, 5.2), jejich hodnoty jsou vyneseny do histogramu (5.10, 5.12) a diagramu kumulativní četnosti (5.11, 5.13). Počet tříd v histogramu byl stanoven ze vztahu (5), délka třídy Δx ze vztahu (6) [28]:

$$K = \text{int}[10 \cdot \log(N)] \quad \text{pro } N > 100, \quad (5)$$

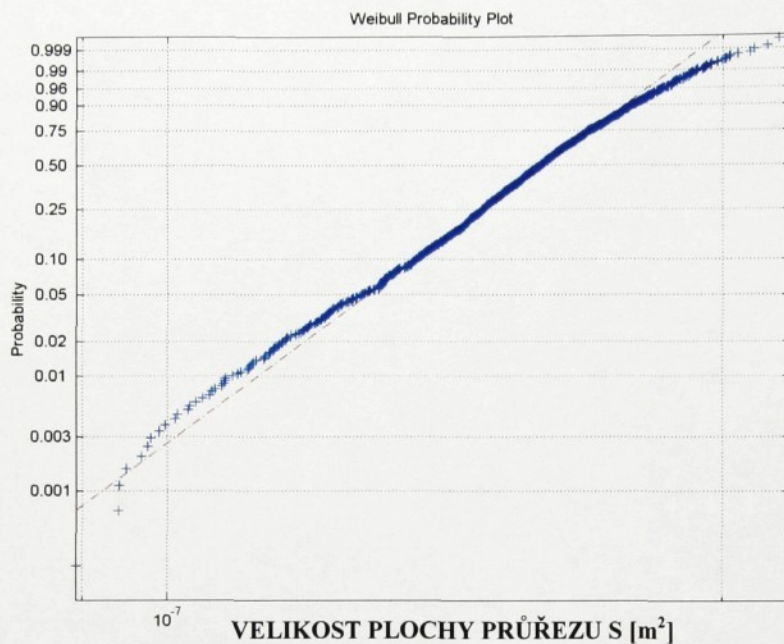
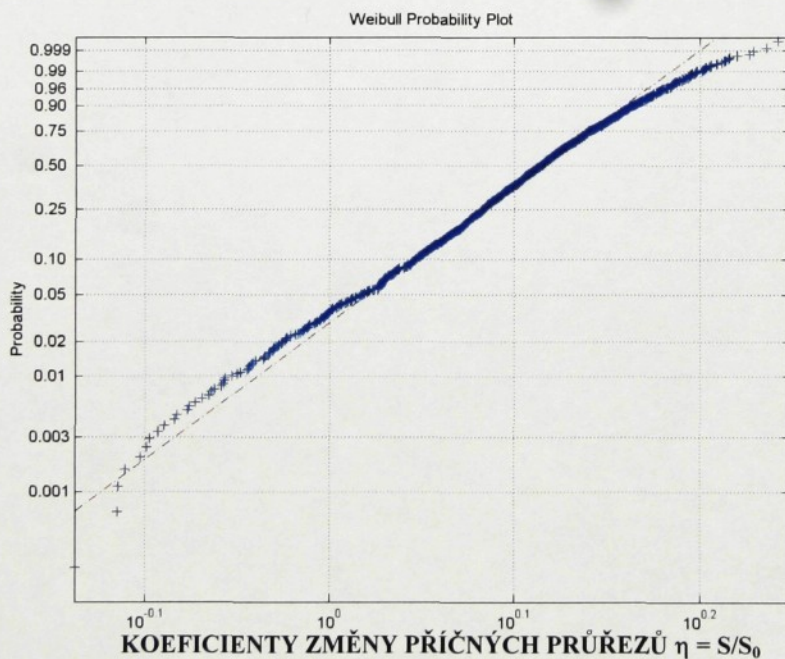
N ... počet naměřených hodnot K ... počet tříd

$$0 \leq K \cdot \Delta x - [x_{(N)} - x_{(1)}] \leq \Delta x \quad \Delta x \dots \text{délka třídy} \quad (6)$$

Na obr. 5.14 je zobrazeno pět průřezů vláknenných svazků s maximální hodnotou koeficientu η , obr. 5.15 pak zachycuje pět průřezů s minimální hodnotou tohoto koeficientu. Tyto obrázky slouží k posouzení vlivu okolní struktury na příčné průřezy zkoumaných vláknenných svazků.

Dále jsou vyhodnoceny maximální a minimální velikosti příčných průřezů každého měřeného vláknenného svazku (celkem 150 hodnot, obr. 5.16). Hodnoty difference maximálních a minimálních velikostí ploch příčných průřezů ukazují, jak se mění průřezy vláknenných svazků při jeho postupu strukturou kompozitu (obr. 5.17).

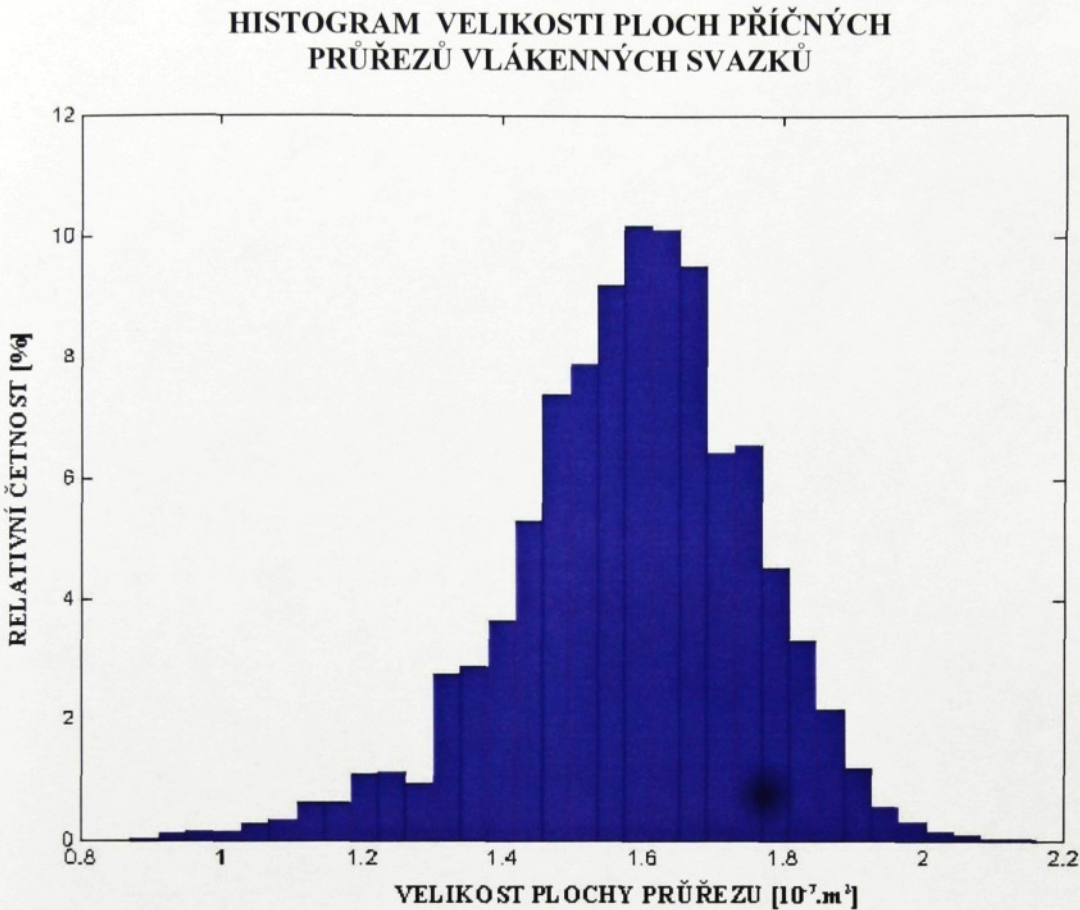
Změny velikostí příčných průřezů ve vybraných vláknenných svazcích jsou ukázány na obrázcích 5.18 až 5.22. Je zde popsána poloha vláknenného svazku v místě s maximální a minimální plochou příčného průřezu vzhledem k okolní struktuře. Tvary příčných průřezů jsou zkoumány z hlediska vlivu okolní struktury na vláknenný svazek (obr. 5.23) a na průběhu jednoho vláknenného svazku, který byl pozorován na patnácti za sebou řazených obrazech (obr. 5.24).

a) SOUBOR VELIKOSTÍ PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ**b) SOUBOR KOEFICIENTŮ ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ**

Obr. 5.9 Testování souborů naměřených dat pomocí Weibullova pravděpodobnostního grafu

a) Soubor velikostí příčných průřezů

b) Soubor koeficientů změny příčných průřezů



Obr. 5.10 Distribuce velikosti ploch příčných průřezů vlákenných svazků (relativní četnost).
Celkový počet měřených svazků je $N = 2250$.
Počet tříd $K = 33$ je stanoven ze vztahu $K = \text{int}[10 \cdot \log(N)]$, pro $N > 100$ [28].

Tab. 5.1 Základní statistické charakteristiky měřeného souboru velikostí ploch příčných průřezů vlákenných svazků

VELIKOST PLOCH PŘÍČNÝCH PRŮŘEZU VLÁKENNÝCH SVAZKŮ			
Průměrná hodnota [m^2]	$1,58 \cdot 10^{-7}$	Šikmost	-0,51
Rozptyl výběru [m^4]	$3 \cdot 10^{-16}$	Špičatost	3,77
Směrodatná odchylka [m^2]	$0,17 \cdot 10^{-7}$	Minimum [m^2]	$0,8924 \cdot 10^{-7}$
Variační koeficient [%]	10,9	Maximum [m^2]	$2,1425 \cdot 10^{-7}$
Medián [m^2]	$1,59 \cdot 10^{-7}$	Počet měřených hodnot	2250
Modus [m^2]	$1,60 \cdot 10^{-7}$	95% IS střední hodnoty [$10^{-7} \cdot m^2$]	$\langle 1,57; 1,59 \rangle$

DIAGRAM KUMULATIVNÍ ČETNOSTI A SOUČTOVÁ KŘIVKA VELIKOSTI PLOCH PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ

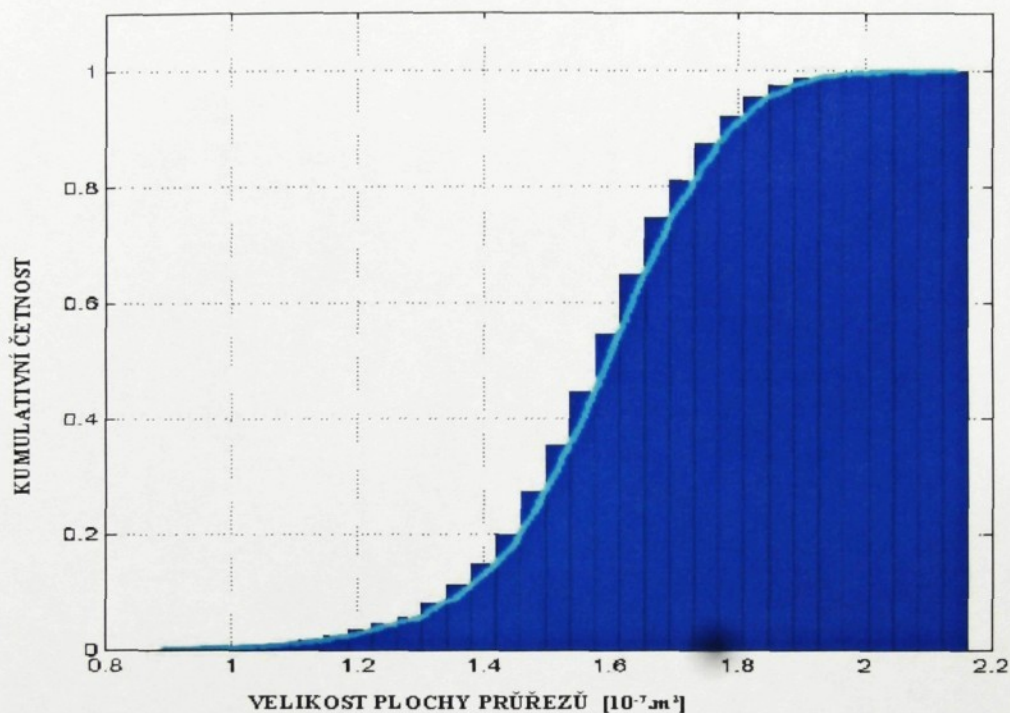
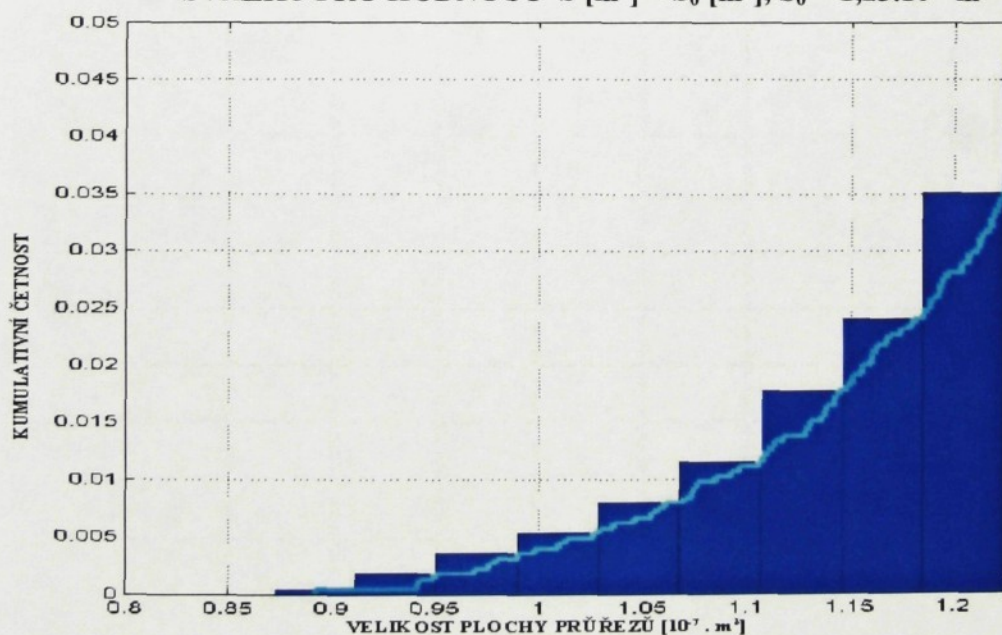
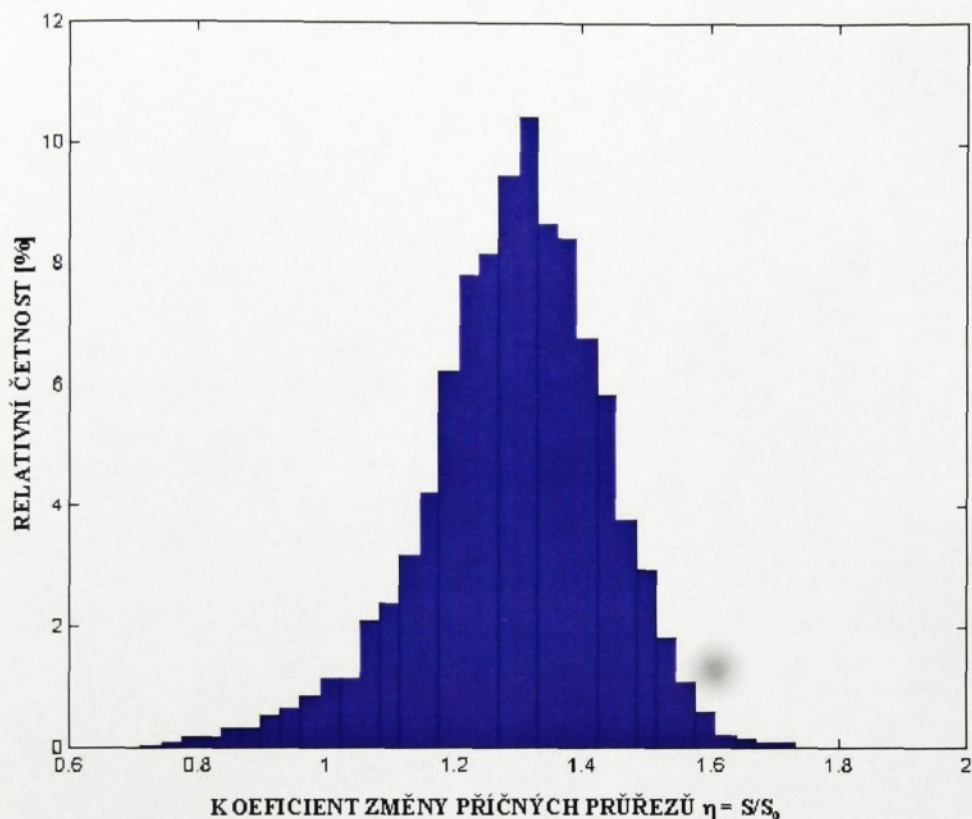


DIAGRAM KUMULATIVNÍ ČETNOSTI A SOUČTOVÁ KŘIVKA VELIKOSTI PLOCH PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ PRO HODNOTY $S [\text{m}^2] < S_0 [\text{m}^2]$, $S_0 = 1,23 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$



Obr. 5.11 Distribuce velikosti ploch příčných průřezů vlákených svazků (kumulativní četnost). Celkový počet měřených svazků je $N = 2250$.

HISTOGRAM KOEFICIENTŮ ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ



Obr. 5.12 Distribuce koeficientů změny příčných průřezů $\eta = S/S_0$ (relativní četnost).

Vypočteno pro 2250 velikostí příčných průřezů $S [m^2]$

Počet tříd $K = 33$ je stanoven ze vztahu $K = \text{int}[10 \cdot \log(N)]$, pro $N > 100$ [28].

Tab. 5.2 Základní statistické charakteristiky souboru koeficientů změny
příčných průřezů vlákených svazků η

HODNOTY KOEFICIENTŮ ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZU η			
Průměrná hodnota	1,29	Šikmost	-0,51
Rozptyl výběru	0,02	Špičatost	3,77
Směrodatná odchylka	0,14	Minimum	0,7276
Variační koeficient [%]	10,9	Maximum	1,7468
Medián	1,30	Počet měřených hodnot	2250
Modus	1,31	95% IS střední hodnoty	$\langle 1,28; 1,30 \rangle$

DIAGRAM KUMULATIVNÍ ČETNOSTI A SOUČTOVÁ KŘIVKA KOEFICIENTŮ ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ

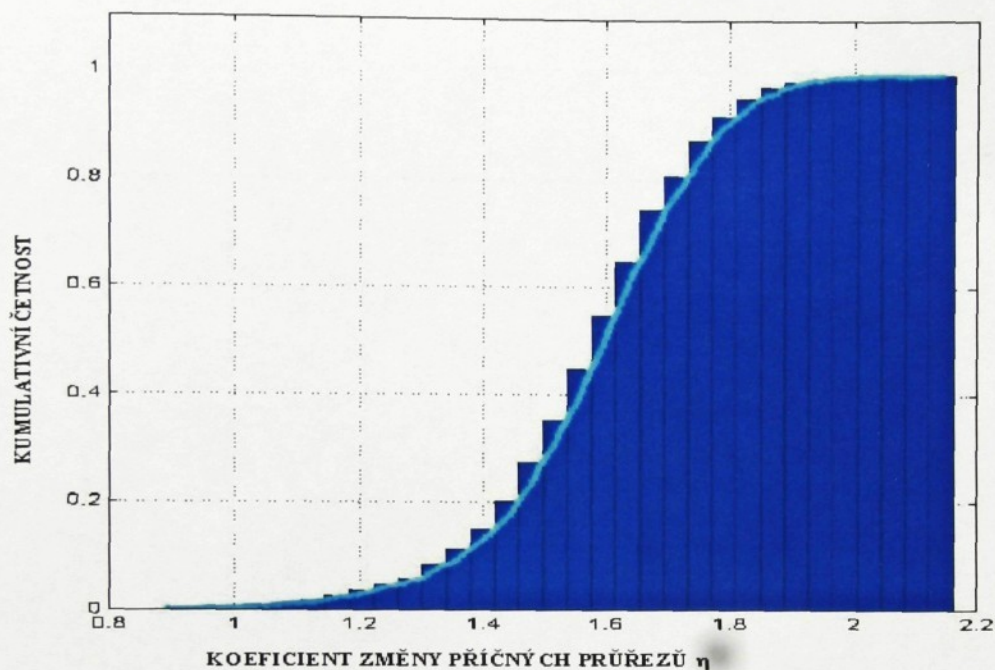
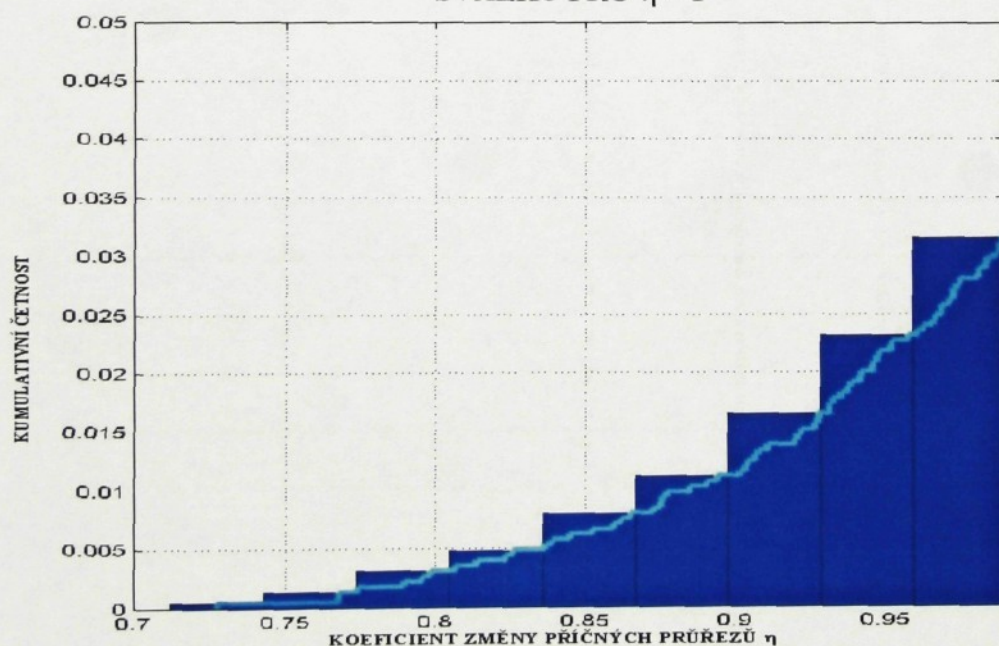


DIAGRAM KUMULATIVNÍ ČETNOSTI A SOUČTOVÁ KŘIVKA KOEFICIENTŮ ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ PRO $\eta < 1$

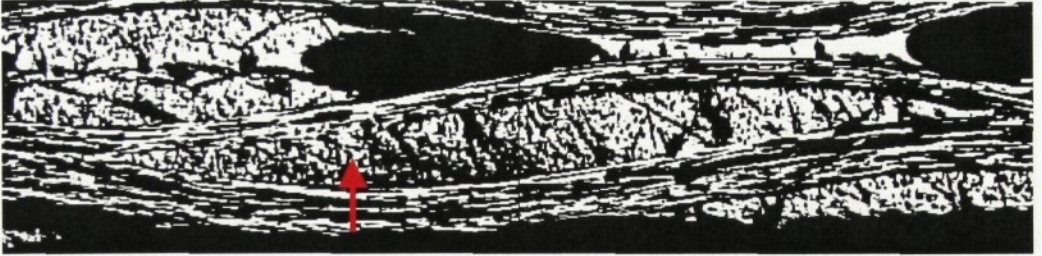


Obr. 5.13 Distribuce koeficientů změny příčných průřezů $\eta = S/S_0$ (kumulativní četnost). Vypočteno pro 2250 velikostí příčných průřezů S [m^2]

VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,7468$



VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,721$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6939$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,686$

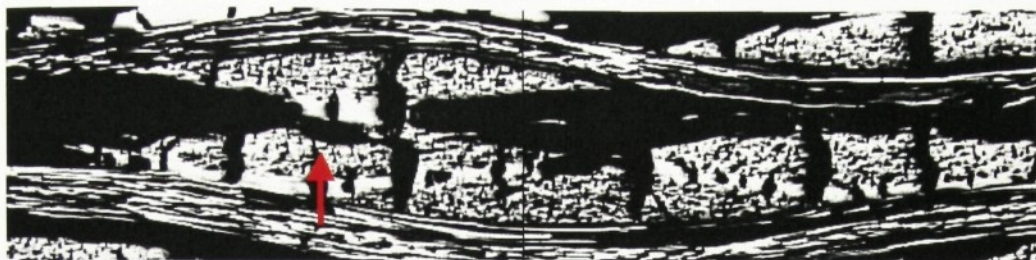


VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6599$

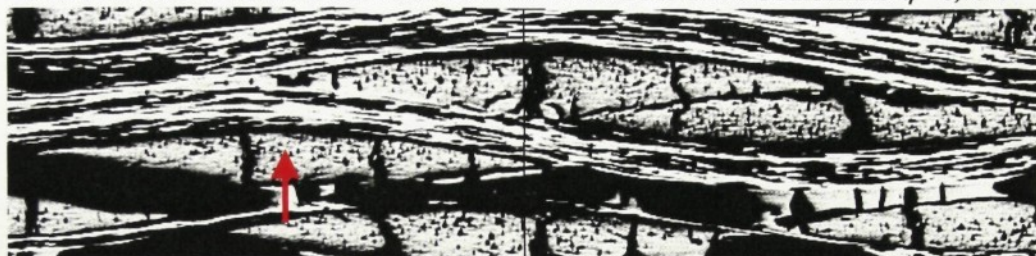


Obr. 5.14 Příčné průřezy vláknenných svazků s maximální hodnotou koeficientu změny příčných průřezů η

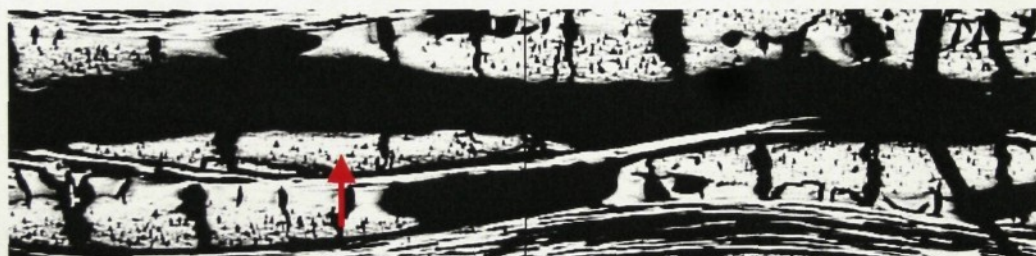
VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,7276$



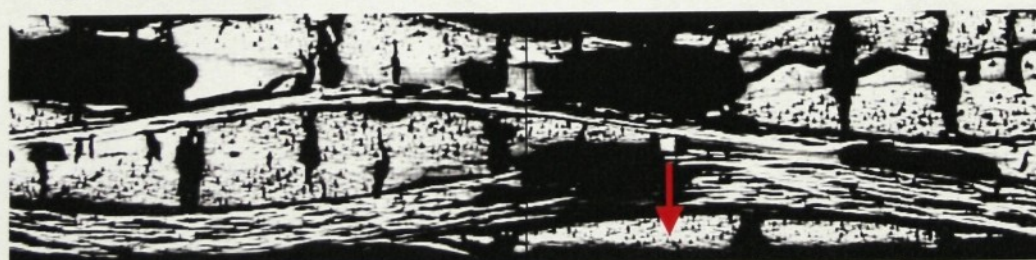
VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,7675$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,7681$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,7743$

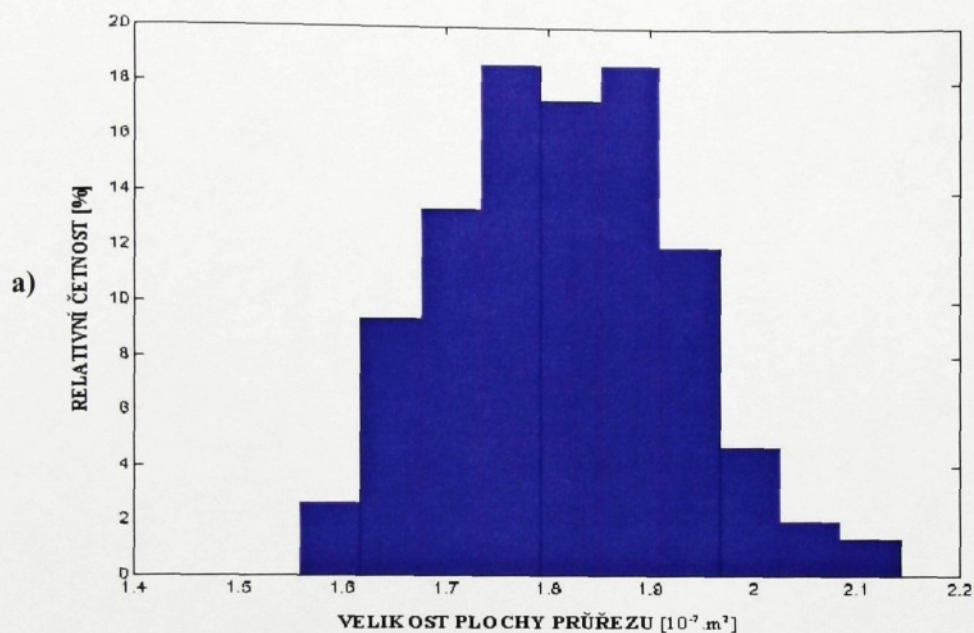


VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,7899$

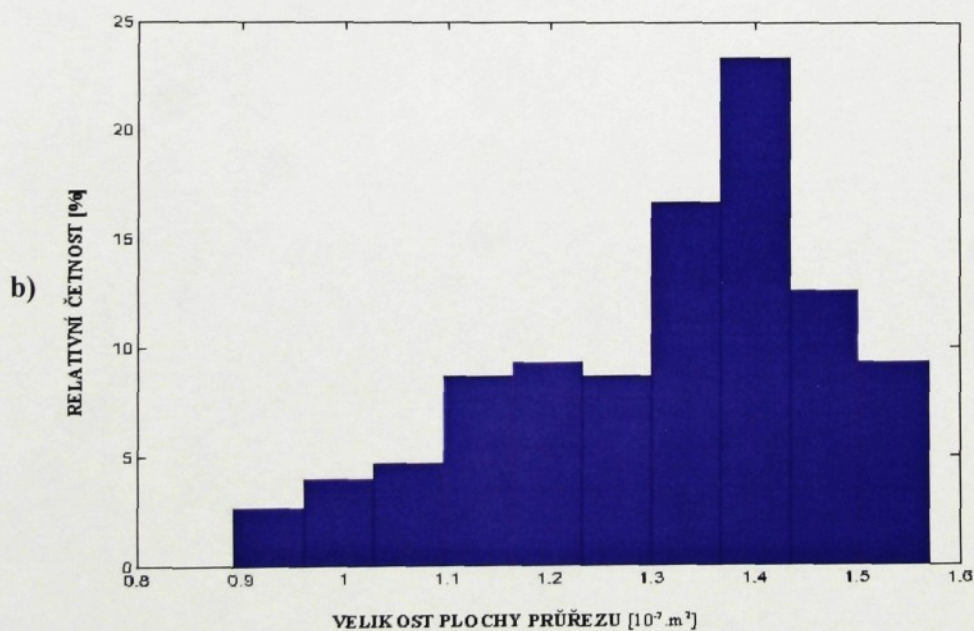


Obr. 5.15 Příčné průřezy vlákných svazků s minimální hodnotou koeficientu změny příčných průřezů η

HISTOGRAM MAXIMÁLNÍCH VELIKOSTÍ PLOCH PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ 150 VLÁKENNÝCH SVAZKŮ



HISTOGRAM MINIMÁLNÍCH VELIKOSTÍ PLOCH PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ 150 VLÁKENNÝCH SVAZKŮ

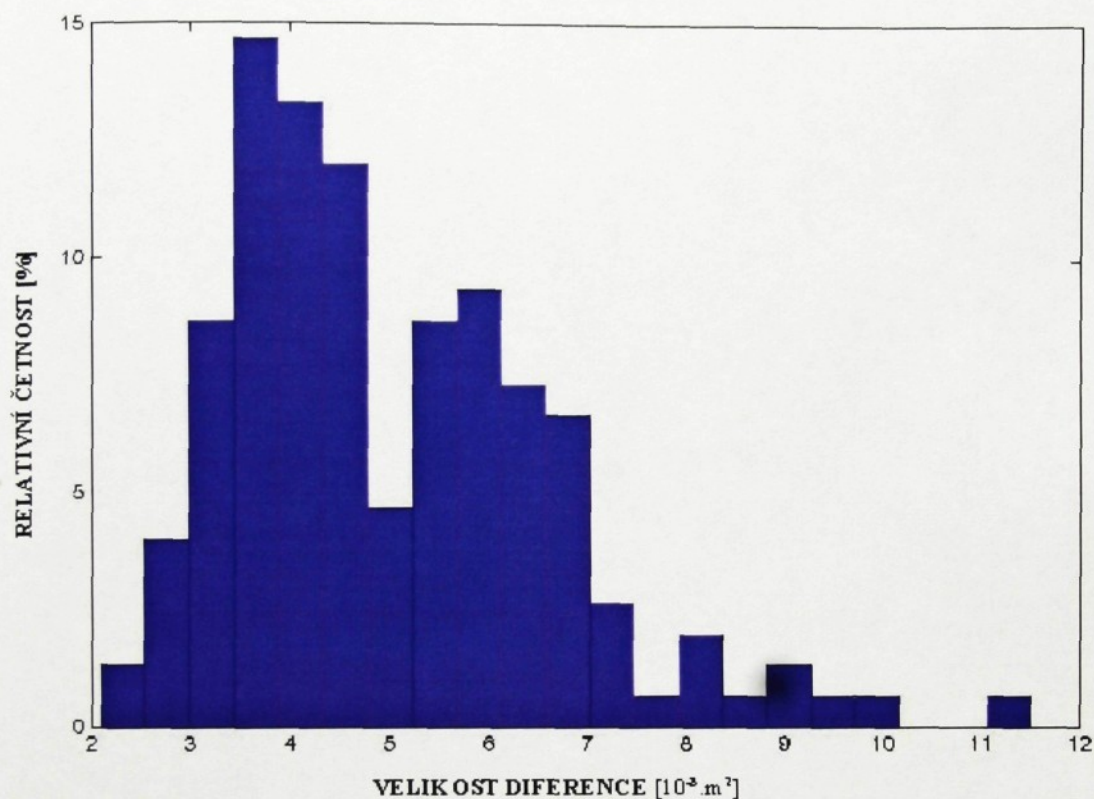


Obr. 5.16 Srovnání maximálních a minimálních velikostí ploch příčných průřezů vlákených svazků. Třídy jsou stanoveny automaticky v programu MATLAB R12.

a) hodnoty maximálních velikostí ploch

b) hodnoty minimálních velikostí ploch

HISTOGRAM DIFERENCE MAXIMÁLNÍCH A MINIMÁLNÍCH VELIKOSTÍ PLOCH PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ 150 VLÁKENNÝCH SVAZKŮ

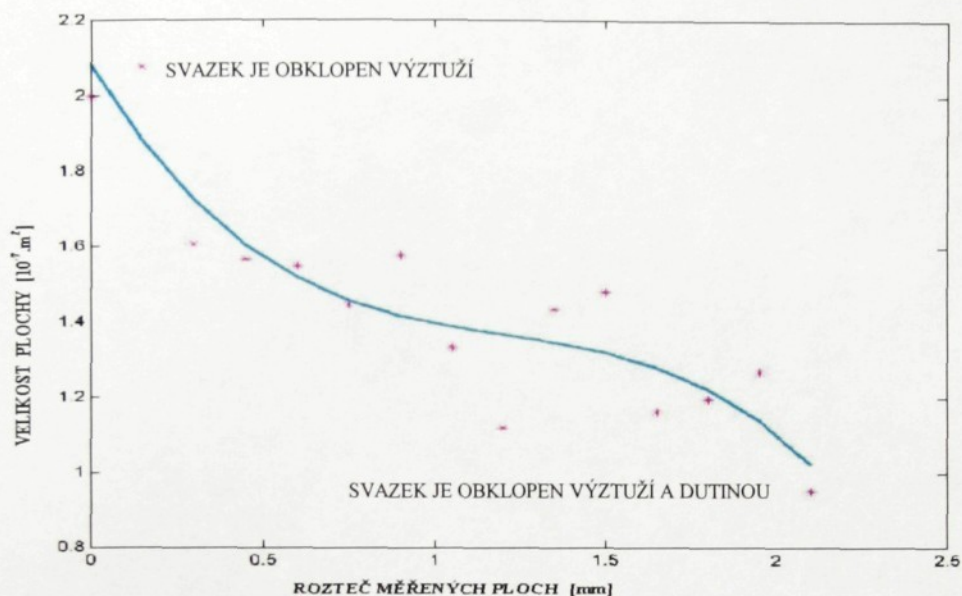


Obr. 5.17 Hodnoty difference maximálních a minimálních velikostí
ploch příčných průřezů 150 vlákených svazků; $N=150$
Počet tříd $K = 21$ je stanoven ze vztahu $K = \text{int}[10 \cdot \log(N)]$, pro $N > 100$ [28].

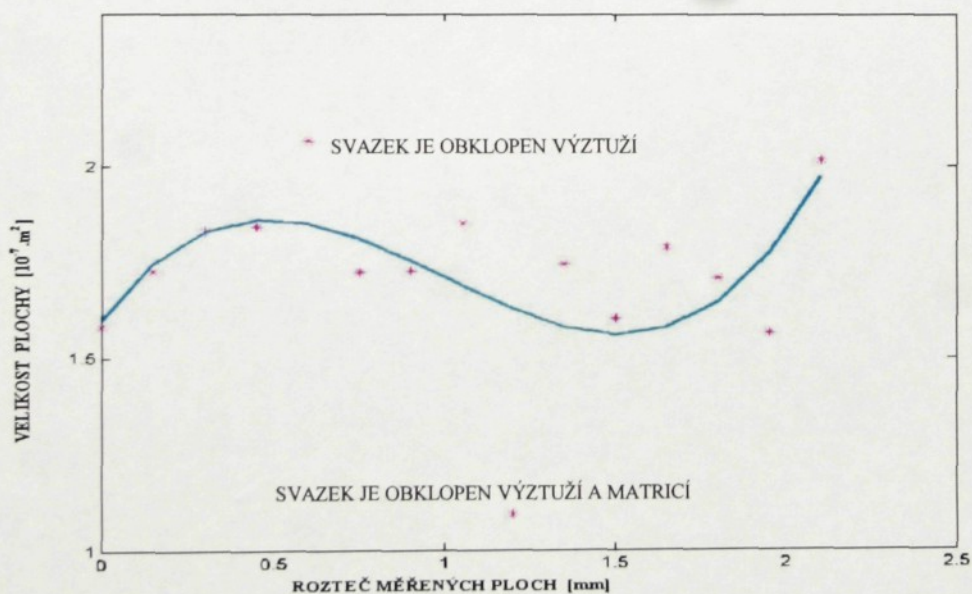
Tab. 5.3 Absolutní četností difference maximálních a minimálních velikostí
ploch příčných průřezů

číslo třídy	1	2	3	4	5	6	7
třídní znak [10 ⁻⁸ .m ²]	2,32	2,77	3,22	3,67	4,11	4,56	5,01
absolutní četnost	2	6	13	22	20	18	7
číslo třídy	8	9	10	11	12	13	14
třídní znak [10 ⁻⁸ .m ²]	5,46	5,91	6,35	6,80	7,25	7,70	8,14
absolutní četnost	13	14	11	10	4	1	3
číslo třídy	15	16	17	18	19	20	21
třídní znak [10 ⁻⁸ .m ²]	8,59	9,04	9,49	9,93	1,04	1,08	1,12
absolutní četnost	1	2	1	1	0	0	1

SWAZEK 1 - difference velikosti ploch $1,128 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12

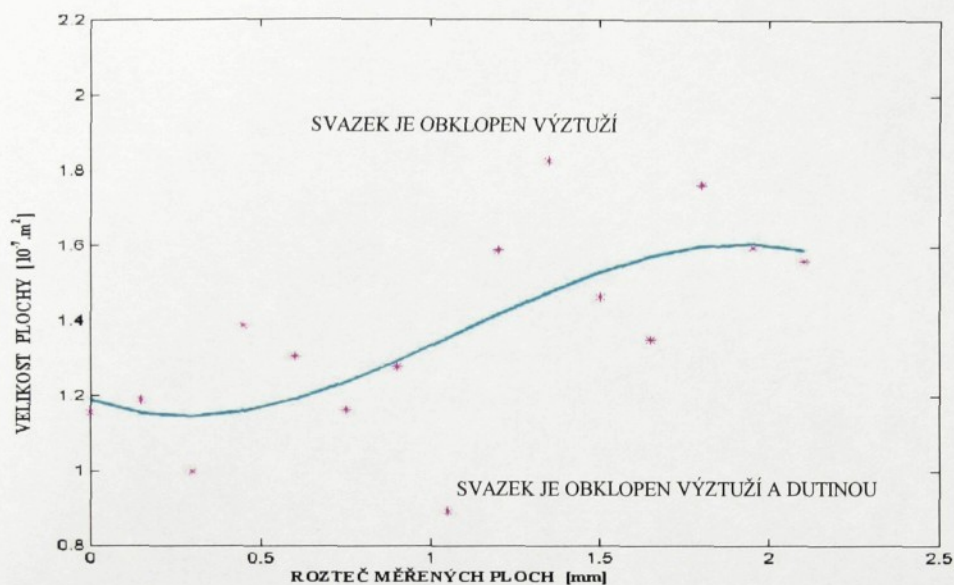


SWAZEK 2 - difference velikosti ploch $0,975 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12

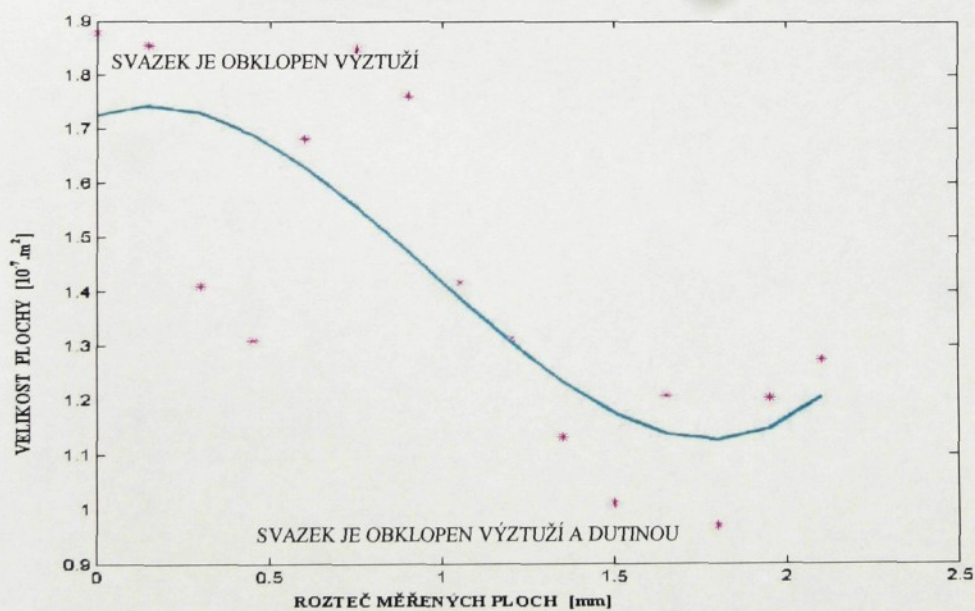


Obr. 5.18 Průběhy vláknenných svazků s maximální diferencí velikosti plochy průřezu. Určení typu okolí svazků v místě s maximální a minimální plochou průřezu. Rozteč měřených ploch je rovna vzdálenosti jednotlivých obrazů prostorové struktury kompozitního vzorku, seřazených tak, jak byly snímány (viz. kap. 4.2.1).

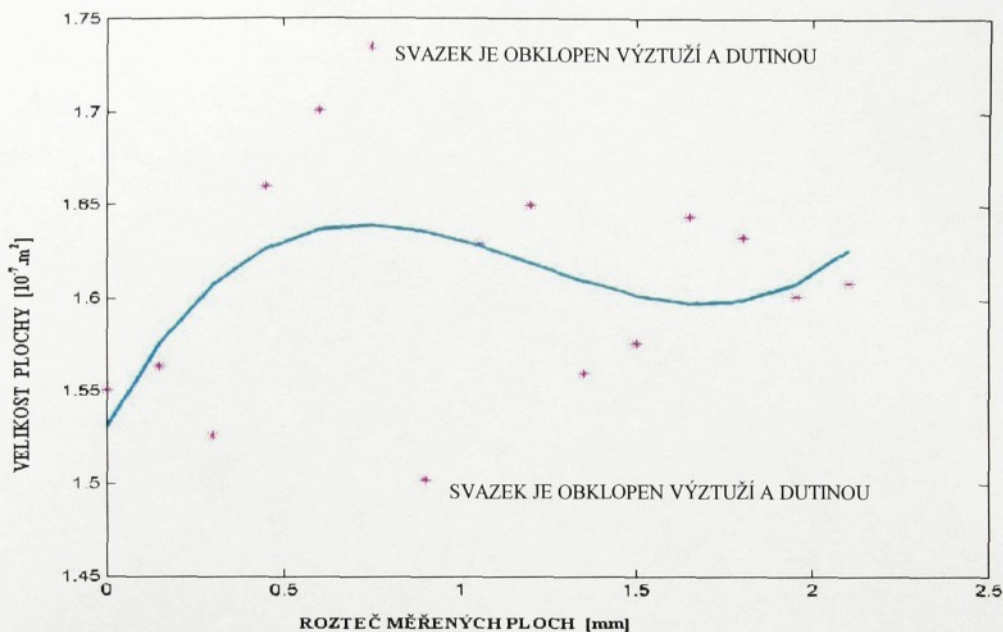
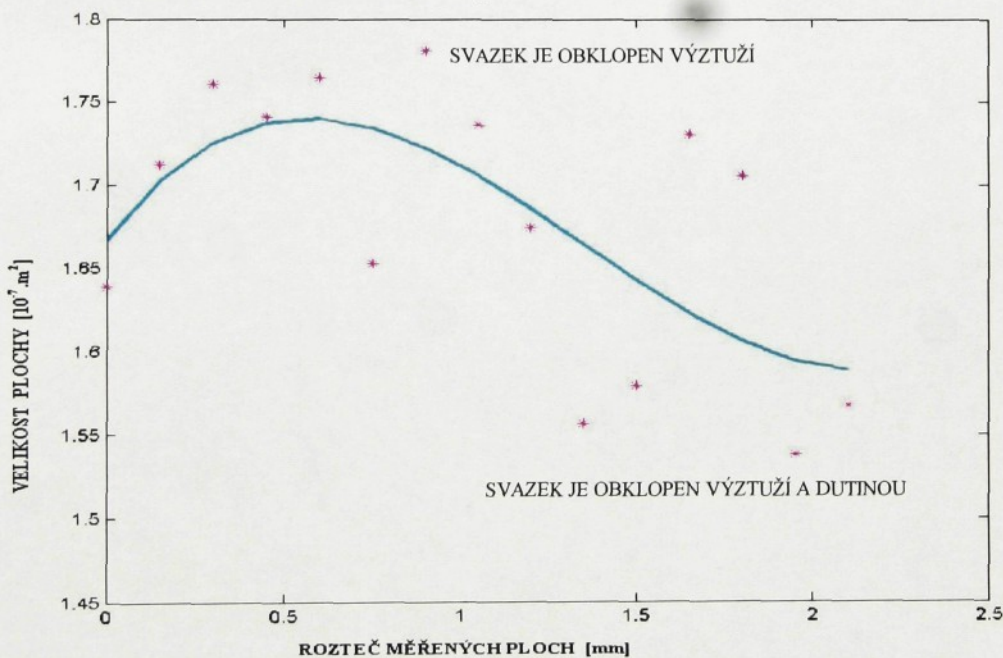
SVAZEK 3 - difference velikosti ploch $0,934 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/2



SVAZEK 4 - difference velikosti ploch $0,909 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/2

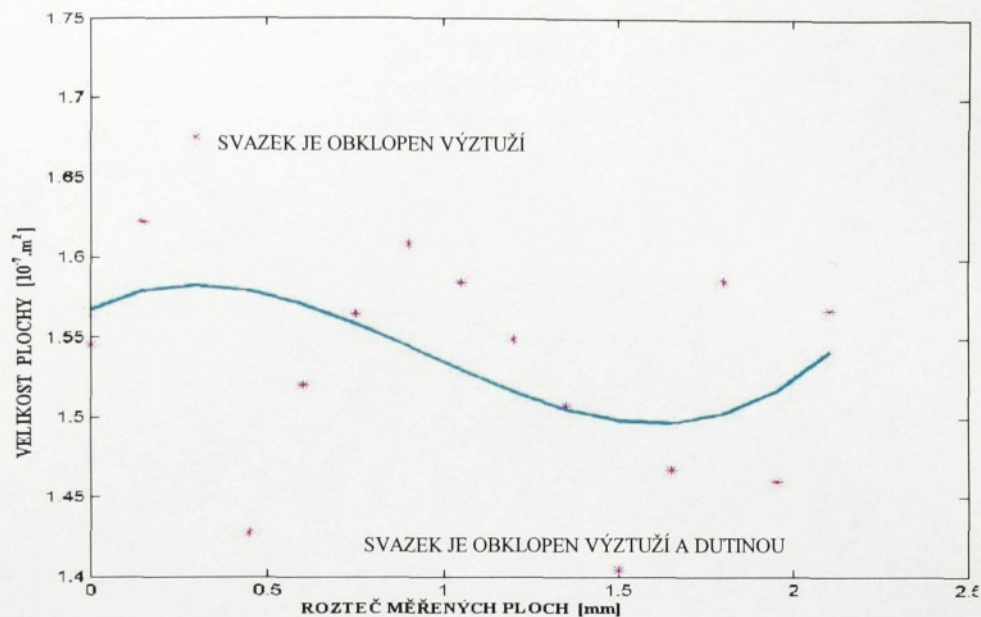


Obr. 5.19 Průběhy vláknenných svazků s maximální diferencí velikostí plochy průřezu. Určení typu okolí svazků v místě s maximální a minimální plochou průřezu.

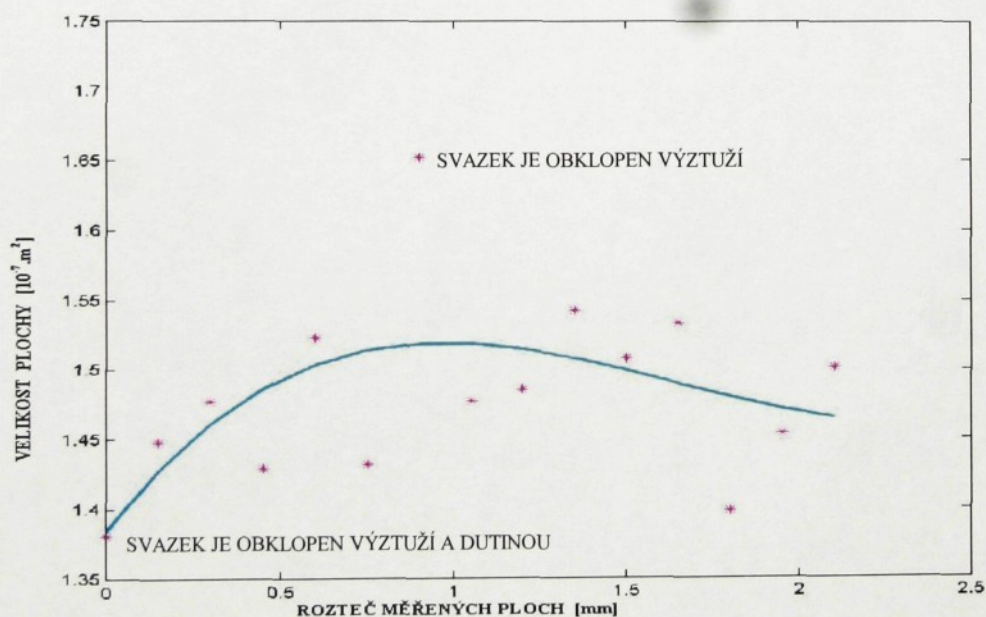
SVAZEK 1 - difference velikosti ploch $0,232 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/2

SVAZEK 2 - difference velikosti ploch $0,243 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-4/11


Obr. 5.20 Průběhy vláknenných svazků s minimální diferencí velikostí plochy průřezu. Určení typu okolí svazků v místě s maximální a minimální plochou průřezu.

SWAZEK 3 - difference velikosti ploch $0,271 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-4/11

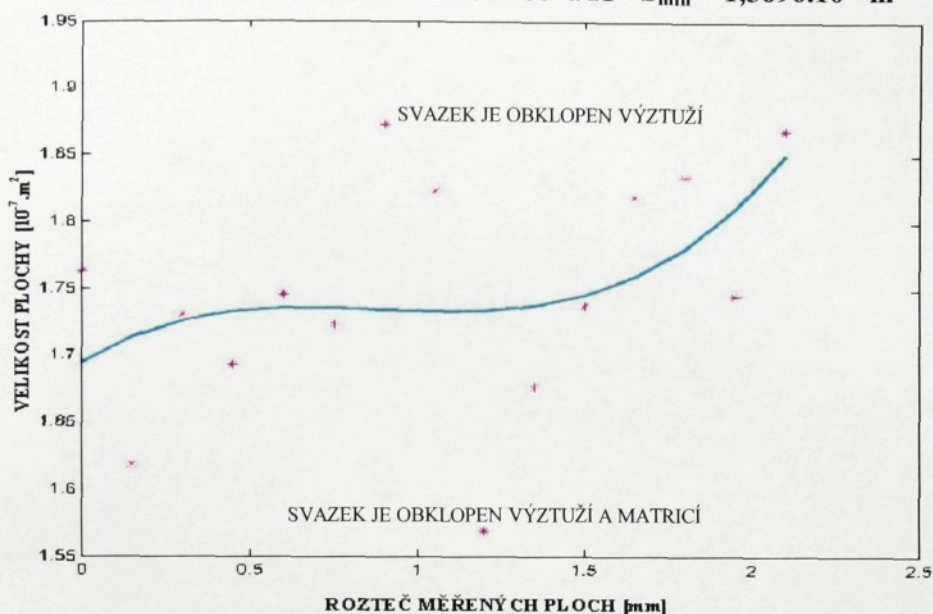


SWAZEK 4 - difference velikosti ploch $0,272 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-4/11

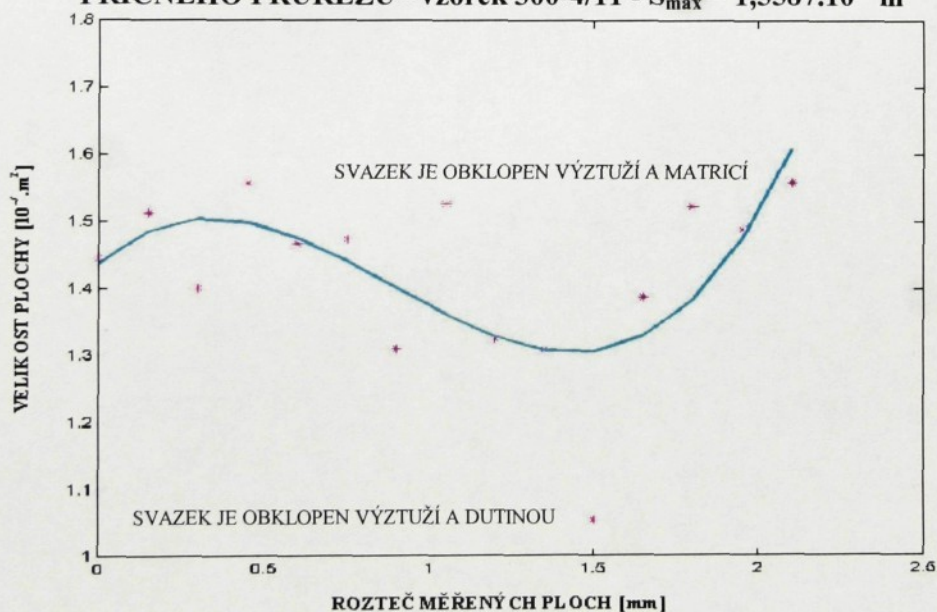


Obr. 5.21 Průběhy vlákněných svazků s minimální diferencí velikostí plochy průřezu. Určení typu okolí svazků v místě s maximální a minimální plochou průřezu.

a) SVAZEK S NEJVĚTŠÍ MINIMÁLNÍ HODNOTOU VELIKOSTI PŘÍČNÉHO PRŮŘEZU - vzorek 300-4/11 - $S_{\min} = 1,5696 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$



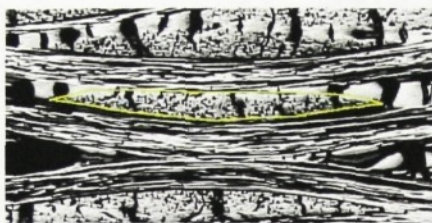
b) SVAZEK S NEJMENŠÍ MAXIMÁLNÍ HODNOTOU VELIKOSTI PŘÍČNÉHO PRŮŘEZU - vzorek 300-4/11 - $S_{\max} = 1,5587 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$



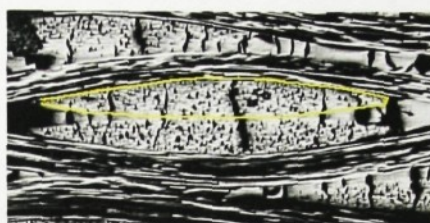
Obr. 5.22 Průběhy vlákněných svazků:

- a) svazek s největší minimální hodnotou velikosti plochy příčného průřezu
 b) svazek s nejmenší maximální hodnotou velikosti plochy příčného průřezu
 Určení typu okolí svazků v místě s maximální a minimální plochou průřezu.

*Rovnoměrné kladení výztuže:
kladení ve fázi*



*Rovnoměrné kladení výztuže:
kladení ve fázovém posunu 180°*



*Místo s nahromaděnou výztuží
(yarn nesting)*



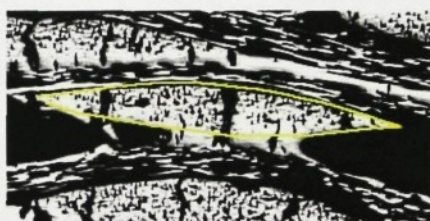
*Volný svazek v matrici, bez
kontaktu s okolní výztuží*



*Vláknenný svazek mezi
výztuží a matricí*



*Dutiny mezi tkaninovými
vrstvami*



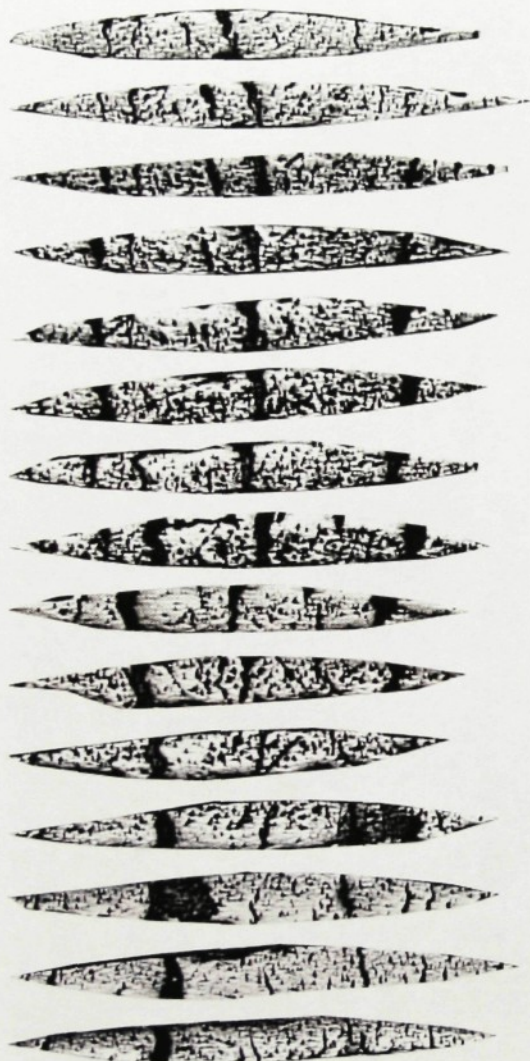
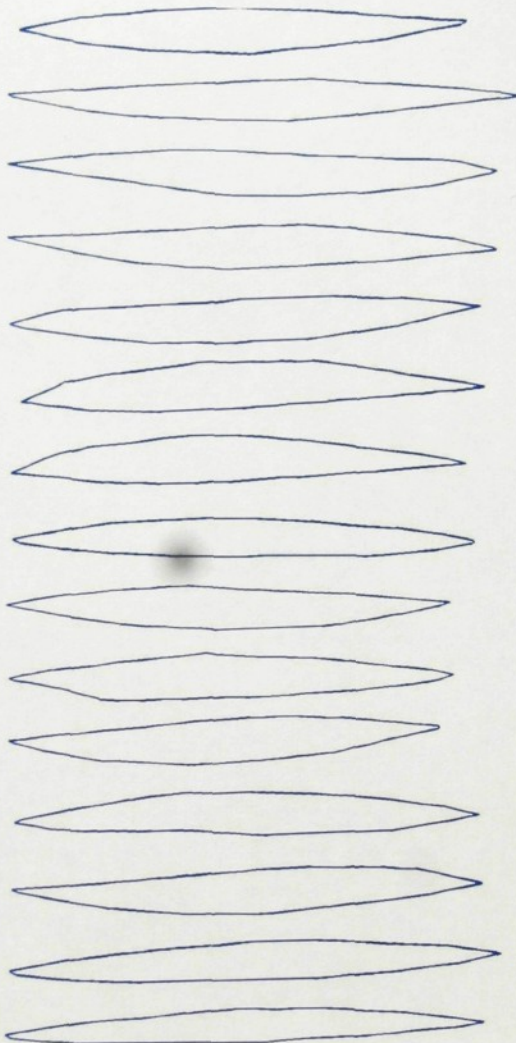
*Delaminační trhлина mezi
tkaninovými vrstvami*



*Vláknenný svazek v místě
vyhoření matrice*



Obr. 5.23 Tvary příčných průřezů vláknenných svazků v závislosti na okolní struktuře

**SKUTEČNÝ TVAR
PŘÍČNÉHO PRŮŘEZU****TVAR PŘÍČNÉHO PRŮŘEZU
REKONSTRUOVANÝ POMOCÍ
ODEČTENÝCH SOUŘADNIC**

Obr. 5.24 Tvary příčných průřezů jednoho vlákenného svazku pozorovaného na patnácti za sebou řazených obrazech

6. DISKUSE VÝSLEDKŮ

6.1 VYHODNOCENÍ METODIKY POSTUPNÉHO ODBRUŠOVÁNÍ POVRCHU KOMPOZITNÍHO VZORKU A JEHO SNÍMÁNÍ POMOCÍ OBRAZOVÉ ANALÝZY

Výsledkem této metodiky strukturní analýzy vzorků tkaninových kompozitů bylo vytvoření databáze obrazů rovinných řezů ve směru osnovy i útku, které umožňují nový pohled na prostorové uspořádání vnitřní struktury kompozitu. Dále byly zhodnoceny možnosti využití této databáze pro tvorbu reálných geometrických modelů zkoumané struktury.

6.1.1 Zhodnocení získané obrazové databáze

Každý ze zkoumaných vzorků byl popsán pomocí patnácti obrazů rovinných řezů, které řazeny za sebou tvoří prostorovou strukturu daného vzorku. Při jejich pozorování je možné sledovat postupné změny jednotlivých vláknenných svazků v prostorové struktuře vzorku, např. změny tvaru a velikosti jejich příčných průřezů, jejich deformace, postupné hromadění výztuže nebo tvorbu kapes nevyztužené matrice. Také sledování vzniku a vývoje trhlin a pórů, způsob jakým se šíří a kdy se naopak ztrácejí, přináší některé nové poznatky (obr. 5.1 - 5.4). Tato pozorování vypovídají o poměrech uvnitř vzorku, vzájemném vlivu jednotlivých textilních vrstev na celkovou strukturu kompozitu, o vztahu mezi strukturou výztuže a tvarem a množstvím pozorovaných dutin apod.

Tento způsob zkoumání prostorové struktury kompozitu tak přináší nové možnosti studia vnitřní struktury těchto materiálů. Při hodnocení strukturních parametrů vycházíme z vývoje struktury jednoho vzorku, nepozorujeme náhodně vybrané povrchy více vzorků. Jevy, které zkoumáme na jednotlivých obrazech povrchu, závisí vždy na celkovém uspořádání pozorovaného vzorku. Vhodným popisem těchto jevů získáme obraz skutečné struktury vzorku, založený na pozorování nikoliv na předpokladech a domněnkách.

6.1.2 Nedostatky zvoleného postupu tvorby obrazové databáze

Už při tvorbě obrazové databáze se projevovaly nedostatky ve zvoleném postupu, jejichž závažnost se plně projevila při pozdějším zpracování experimentálních dat, zejména při prostorové rekonstrukci tvaru vlákněné výztuže.

Největším problémem bylo zajištění shodných podmínek snímání povrchů vzorků v jednotlivých krocích. Nepřesné umístění vzorku pod mikroskopem, pootočení kamery, nerovnoměrný posuv stolku mikroskopu při snímání celého povrchu (viz. kap. 4.1.3), rozdílné osvětlení vzorku, všechny tyto faktory významně ovlivnily kvalitu výsledné databáze. Tyto chyby způsobily nepřesnosti při řazení jednotlivých obrazů za sebou a projevíly se při rekonstrukci zkoumaných vlákněných svazků, zejména pomocí síťových grafů (obr. 5.5 - 5.8)

Dalším nepříznivým faktorem při tvorbě prostorových modelů se ukázala být velikost zvoleného kroku odbroušení a odchylky jednotlivých kroků od střední hodnoty. Tyto chyby se projevíly především v jednoduchém síťovém grafu, vytvořeném spojením diskrétních bodů.

6.1.3 Návrhy na jejich odstranění

Nejprve byly zkoumány možnosti umístění vzorku pod mikroskopem tak, aby jeho poloha byla totožná s polohou vzorku při předchozím měření. Jako nejvhodnější řešení se jeví umístění orientačních značek v nábrusech kompozitních vzorků. Pomocí těchto značek by byla poloha vzorku před každým snímáním struktury přesně nastavena. Tyto značky by byly společně s kompozitním vzorkem umístěny v novodurovém kroužku a zality v epoxidové pryskyřici.

Je potřeba, aby tyto značky byly v okolí vzorku jasně rozpoznatelné (výrazně barevně odlišné od okolí apod.) a aby použitý materiál vydržel stupňované odbrušování povrchu kompozitního vzorku. Realizace tohoto postupu bude uskutečněna při přípravě nových vzorků v Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd v Praze (ÚSMH AV).

Co se týče problematiky změn v nastavení parametrů obrazové analýzy, řešením by byla rezervace pracoviště obrazové analýzy po celou dobu experimentu. Tak lze minimalizovat cizí zásahy do nastavených parametrů a zajistit tak konstantní podmínky po celou dobu přípravy obrazové databáze.

Problémy s ovládáním posuvného stolku mikroskopu a s nimi spojené nepřesnosti ve skládání dílčích obrazů povrchu vzorku by bylo možné řešit použitím motorizovaného stolku s automatickým ostřením [32]. Toto zařízení ovšem není na našem pracovišti k dispozici, tak nezbyvá než věnovat patřičnou pozornost pečlivému seřízení mechanického stolku před každým měřením.

Poměrně obtížné bude řešení snížení velikosti kroku odbroušení povrchu. Tento postup je závislý technických možnostech používaného zařízení. Velikost odbroušení povrchu vzorku je závislá na druhu použitých brusných kotoučů a délce broušení.

Jediným řešením zatím zůstává snížení doby broušení, především při použití hrubších brusných kotoučů. Tyto kotouče ovšem zajišťují nejen hrubé odstranění povrchu, ale také jeho zarovnání, které je důležitým předpokladem pro kvalitní vyleštění. Otázkou tedy zůstává, nakolik je možné dobu hrubého zbroušení povrchu zkrátit, aniž by byla ovlivněna kvalita leštění. A dokonale vyleštěný povrch vzorku je základním předpokladem pro získání kvalitního snímku. Nejmenší možné snížení velikosti odbroušení povrchu vzorku bude třeba stanovit experimentálně.

Realizace návrhů na odstranění zmiňovaných nedostatků je předmětem dalšího výzkumu. Tento problém bude řešen ve spolupráci s odbornými pracovníky ÚSMH AV v Praze.

6.2 VYHODNOCENÍ POUŽITÝCH ZPŮSOBŮ PROSTOROVÉ REKONSTRUKCE STRUKTURY KOMPOZITNÍHO VZORKU

6.2.1 Zhodnocení prostorové rekonstrukce dat pomocí síťového grafu

Tento způsob rekonstrukce prostým spojením experimentálně naměřených bodů je citlivý na jakékoliv odchylky, proto se zde v největší míře projeví nedostatky zmíněné v kapitole 5.1.2. Pomocí tohoto přístupu byly získány základní údaje o možnostech vizualizace prostorových souřadnic reálné struktury, byly odhaleny chyby v přípravě obrazové databáze a zjištěn optimální počet souřadnic pro zlepšení přesnosti jejich prostorové rekonstrukce. Výsledky tohoto přístupu jsou na obrázcích 5.5 - 5.8.

6.2.2 Zhodnocení prostorové rekonstrukce dat pomocí interpolační funkce kubický spline

Výsledkem aproximace experimentálních dat pomocí interpolační funkce kubický spline bylo hladší propojení dat ve výsledném modelu (obr. 5.5 - 5.8).

Po vytvoření skriptu pro interpolaci a vizualizaci experimentálních dat v prostředí programu MATLAB R12 byly získány obrazy příčných průřezů vlákenných svazků, dále byly rekonstruovány tvary pórů a trhlin. Výsledné objekty byly vizuálně lepší než při prostém propojení dat, jejich fyzikální význam zůstal stejný.

Nevýhodou tohoto způsobu vizualizace dat je fakt, že jsou zde křivky opět vedeny všemi experimentálními body jako o prostého síťového grafu. Proto se i zde ve velké míře projeví nedostatky z kap. 5.1.2.

Do budoucna by proto bylo vhodné, kromě odstranění nedostatků při tvorbě obrazové databáze, najít pro rekonstrukci experimentálních dat aproximační funkce, které takové nepřesnosti eliminují. Aproximační křivky zadanými body neprocházejí, jen kolem nich probíhají a kopírují je. Díky tomu dávají lepší výsledky, zejména hladší tvar. Jednotlivé aproximační křivky se od sebe liší především typem používaných vzorců, a tím i geometrickými nebo fyzikálními vlastnostmi výsledných křivek. Nalezení nejvhodnější funkce pro aproximaci experimentálních dat a fyzikální popis vnitřní struktury kompozitu bude předmětem dalšího výzkumu.

6.3 VYHODNOCENÍ ZMĚNY VELIKOSTI A TVARU PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ VLÁKENNÝCH SVAZKŮ

6.3.1 Způsob hodnocení změny velikosti příčných průřezů

Změny velikosti průřezů vlákenných svazků vypovídají o tom, jak se vlákenné svazky v průběhu zpracování deformují, jaký je vliv jejich deformace ve tkanině (ohyb, stlačení ve vazném bodě) na výslednou strukturu těchto svazků v kompozitní výztuži, dále ukazují vliv technologie přípravy kompozitu na strukturu výztuže.

Hodnoty velikostí všech měřených příčných průřezů (celkem bylo proměřeno 2250 průřezů) byly zobrazeny pomocí histogramu (obr. 5.10), diagramu kumulativní četnosti (obr. 5.11) a statisticky vyhodnoceny (tab. 5.1),

Byly vypočteny a statisticky vyhodnoceny koeficienty změny měřených příčných průřezů (obr. 5.12, 5.13, tab. 5.2). Hodnoty velikostí naměřených koeficientů se pohybovali v intervalu $(0,7276 - 1,7468)$. Pozornost byla věnována zejména průřezům s okrajovými hodnotami těchto koeficientů ve vztahu ke struktuře kompozitu. Byly prostudovány snímky, kde se tyto průřezy nacházely, zkoumán jejich stav, jejich poloha vzhledem k okolí (obr. 5.14, 5.15).

Dále byly určeny hodnoty maximálních a minimálních velikostí průřezů u jednotlivých vlákenných svazků (celkem 150 svazků, pro každý měřeno 15 hodnot velikostí příčných průřezů, obr. 5.16) a vypočteny velikosti difference mezi maximální a minimální plochou průřezu vlákenného svazku (obr. 5.17, tab. 5.3). Opět byly zkoumány vlákenné svazky s maximální a minimální hodnotou této difference. Průběhy velikostí jejich průřezů byly vyneseny do grafu a jejich proložení regresní křivkou ukázalo, jak se tyto hodnoty mění (obr. 5.18 - 5.22). Průběhy byly hodnoceny i vizuálně pomocí obrazů povrchů zkoumaných vlákenných svazků. Bylo zjišťováno, jaký vliv má poloha vlákenného svazku ve vztahu k okolní struktuře na změnu jeho průřezu.

6.3.2 Výsledky hodnocení změny velikosti příčných průřezů

Z diagramu kumulativních četností velikosti ploch příčných průřezů vlákenných svazků lze zjistit (obr. 5.11), že většina naměřených hodnot (cca 92 %) se pohybuje v rozmezí $(1,3 - 1,9) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Svědčí to o faktu, že u většiny vlákenných svazků nedošlo k jejich zploštění, ale naopak k rozšíření, (ale soudržnost svazků nebyla porušena (obr. 5.14)). Toto zjištění potvrzují i hodnoty koeficientů změny příčných průřezů vlákenných svazků (obr. 5.12, 5.13), kde hodnota η odpovídající zploštění ($\eta < 1$) odpovídá jen 3,3 % z celkového množství 2250 měřených příčných průřezů.

Znamená to, že vliv zpracování vlákných svazků ve tkanině (zploštění ve vazném bodě, apod.) je narušen vlivem zpracování kompozitu, zejména procesem pyrolýzy, kdy při dochází ke smrštění matrice v důsledku jejího vyhoření. Tyto změny ve struktuře kompozitu vedou k porušení struktury vlákných svazků. V těchto svazcích pak vznikají příčné svazkové trhliny (obr. 6.1), které významně ovlivňují celkovou velikost plochy příčných průřezů.



Obr. 6.1 Strukturní defekty uvnitř vlákného svazku:
1 - vlasová trhlina, 2 - pór, 3 - příčná svazková trhlina

Histogramy maximálních a minimálních velikostí příčných průřezů všech zkoumaných vlákných svazků (obr. 5.16) ukazují, v jakém rozmezí se tyto extrémní hodnoty pohybují. Lze pozorovat, že v rozmezí $(1,5-1,6) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ se hodnoty maximálních a minimálních velikostí ploch překrývají. Svědčí to o vlivu deformace jednotlivých vlákných svazků a jejich polohy v kompozitu na jejich výslednou strukturu, jak vyplývá z grafu jejich průběhů (obr. 5.22).

Histogram difference maximálních a minimálních hodnot velikostí ploch vlákných svazků opět ukazuje vliv deformace a průběhu vlákných svazků na změnu velikosti jejich příčných průřezů (obr. 5.17). Následující grafy průběhů vlákných svazků s maximální a minimální diferencí popisují, jaký byl vliv deformace okolí těchto svazků na velikost jejich příčné průřezy, zda významně (obr. 5.18-5.22).

6.3.3 Závěr hodnocení změny velikosti příčných průřezů

Porovnáním naměřených hodnot s polohou vláknenných svazků v kompozitní struktuře byla získána řada nových poznatků o chování vláknenných svazků v tkané kompozitní výztuži. Zejména při vyhodnocování závislosti velikosti příčných průřezů vláknenného svazku na okolní struktuře byly pozorovány některé zajímavé skutečnosti.

Při zkoumání polohy svazků s koeficientem změny příčných průřezů $\eta < 1$ (zploštění svazků) bylo zjištěno, že většina těchto svazků ležela mezi ortogonálně provazujícím vláknenným svazkem a dutinou, vzniklou vyhořením matrice. Působením tlaku pyrolytických plynů v procesu karbonizace, tedy nedošlo k roztržení vláknenného svazku, jak se původně předpokládalo, ale k jeho přitlačení k okolní výztuži (viz. obr. 5.15). Naopak největší koeficient změny příčných průřezů většinou vykazovaly svazky, u kterých byl očekáván pravý opak, totiž ty, které ležely v místě s nahromaděnou výztuží (viz. obr. 5.14). Jedná se o jev zcela neočekávaný, proto bude podroben dalšímu zkoumání.

Porovnáním grafických průběhů vláknenných svazků (obr. 5.18-5.22) se skutečnou polohou svazku ve struktuře kompozitu bylo zjištěno, že vliv deformace svazků ve tkanině se výrazně projeví i po jejich zpracování v tkaninovém kompozitu.

Technologie zpracování tkaniny v kompozitu tedy neodstraňuje vliv deformace vláknenných svazků v této tkanině. Naopak může způsobit deformace další, zejména v místech výraznou nepravidelností vnitřní struktury výztuže (skluz vrstev po sobě, hromadění výztuže, vznik trhlin). Dochází zde k většímu poškození vnitřní struktury vláknenných svazků. Vzniku těchto defektů lze tedy předcházet pečlivou přípravou kompozitu, zejména přesným kladením jednotlivých vrstev, rovnoměrným prosycením maticí apod.

Pečlivost v procesu přípravy je sice časově i finančně náročná, ale významně ovlivňuje konečnou strukturu tkané výztuže v kompozitu a tím i jeho výsledné vlastnosti, zejména mechanické.

6.3.4 Výsledky vyhodnocení změny tvaru příčných průřezů

Na obrázku 5.23 jsou ukázány příčné průřezy vláknenných svazků v nejružnějších místech vnitřní struktury kompozitu, na obr. 5.24 příčné průřezy jednoho vláknenného svazku. Z vizuálního zhodnocení jejich tvaru vyplývá, že tyto svazky nezávisle na velikosti příčného průřezu, okolí svazku, či přítomnosti příčných svazkových trhlin zachovávají přibližně čočkovitý tvar po celé délce vláknenného svazku.

7. ZÁVĚR

V této diplomové práci byla navržena a ověřena nová metodika analýzy prostorové struktury C-C kompozitů s tkanou výztuží.

Metodou postupného odbrušování a snímání povrchu kompozitních vzorků byly vytvořeny základy databáze systematických informací o prostorové struktuře tkaninových kompozitů. Geometrie této struktury je popsána pomocí prostorových souřadnic, které jsou vstupním parametrem pro sestavení geometrického modelu, zachycujícího všechny podstatné rysy skutečné trojrozměrné struktury kompozitního vzorku.

Možnosti prostorové rekonstrukce a vizualizace zkoumané struktury na základě souřadnic její geometrie byly ověřeny pomocí některých jednodušších metod (rekonstrukce tvaru prostým spojením prostorových souřadnic, aproximací dat pomocí interpolační funkce kubický spline). Předmětem dalšího výzkumu bude nalezení vhodného algoritmu pro tvorbu kvalitního geometrického modelu zkoumané struktury a jeho vizualizace pomocí moderních metod počítačové grafiky.

Výsledky analýzy změny velikosti a tvaru příčných průřezů vlákenných svazků přinesly zajímavé poznatky o vlivu technologie výroby kompozitu na vlákenné svazky v kompozitní výztuži. Vlivem vyhoření a srážení matrice v procesu karbonizace vznikají velká napětí, která vyvolávají vznik příčných svazkových trhlin ve vlákenných svazcích, což vede ke zvětšení velikosti plochy jejich příčných průřezů a může způsobit až roztržení těchto svazků.

Přesto u 3,6 % svazků došlo k jejich zploštění. Překvapivé je zjištění, že k němu ve velké většině došlo u svazků ležících v místě průchodu pyrolitických plynů. Naopak svazky ležící v místě s nahromaděnou výztuží vykazovaly největší zvětšení této plochy. Tento poznatek neodpovídá původnímu předpokladu, že k největšímu stlačení vlákenných svazků dochází v místě s nahromaděnou výztuží (yarn nesting) a že vlivem tlaku pyrolitických plynů dochází k roztržení vlákenných svazků. Tento výsledek analýzy velikosti příčných průřezů je nečekaný a proto bude této problematice věnována pozornost v dalším výzkumu.

Výsledkem této práce nejsou jen nové poznatky v oblasti strukturní analýzy. Samotný experiment odhalil některé nedostatky v tvorbě obrazové databáze, které ovlivňují přesnost geometrického modelu. Tyto nedostatky budou v dalším výzkumu eliminovány a povedou k získání přesnějšího popisu vnitřní struktury kompozitů.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1 Pevné okraje u tkaniny z uhlíkových vláken
- Obr. 2.2 Elementární buňky struktury tkaniny (plátno, kepr 2x2, pětivazný a osmivazný atlas)
- Obr. 2.3 Deformace vlákenného svazku, vzniklá jeho provázáním ve tkanině
- Obr. 2.4 Osnovní atlas osmivazný
- Obr. 2.5 Ukázky tvarování kompozitní výztuže
- Obr. 2.6 Tkanina s jednoduchou plátnovou vazbou
- Obr. 2.7 Modely deformace průřezů vlákenných svazků
- Obr. 2.8 C-C kompozit s plátnovou výztuží
- Obr. 2.9 Rovnoměrné rozložení vlákenných svazků tkaninové výztuže s plátnovou vazbou
- Obr. 2.10 Mechanismy poškození tkaninového kompozitu
- Obr. 2.11 Nepravidelnosti vnitřní struktury kompozitu
- Obr. 3.1 Základní parametry pro popis struktury vazné vlny
- Obr. 3.2 Mozaikový model struktury tkaniny
- Obr. 3.3 Sinový model elementární buňky
- Obr. 3.4 Průběh vlákenného svazku složeného z deformovaných průřezů
- Obr. 3.5 Struktura elementární buňky podle Kuhna a Charalambidese
- Obr. 3.6 Příklady geometrických modelů struktury tkané výztuže
- Obr. 3.7 Pracovní prostředí programu WiseTex
- Obr. 3.8 Geometrický model volné tkaniny
- Obr. 3.9 Geometrické modely deformované tkaniny
- Obr. 4.1 Změna vnitřní struktury kompozitu při odbroušení povrchu vzorku o cca 0,1 mm
- Obr. 4.2 Povrch kompozitního vzorku, složený ze sedmi dílčích obrazů
- Obr. 4.3 Vyobrazení podélných a příčných vlákenných svazků
- Obr. 4.4 Odečet souřadnic podélných vlákenných svazků
- Obr. 4.5 Odečet souřadnic příčných průřezů vlákenných svazků
- Obr. 4.6 Odečet souřadnic dutiny
- Obr. 4.7 Příčné průřezy jednoho vlákenného svazku na šesti po sobě jdoucích obrazech (vzdálenost mezi obrazy je cca 0,3 mm)

- Obr. 4.8 Vizualizace prostorových dat pomocí síťového grafu
- Obr. 4.9 Síťový a plošný graf funkce $z = f(x,y)$
- Obr. 4.10 Plošná interpolace dat pomocí funkce kubický spline
- Obr. 4.11 Prostorová interpolace dat pomocí funkce kubický spline
- Obr. 4.12 Čárové grafy realizované příkazem plot3(x,y,z)
- Obr. 4.13 Příčný průřez vlákenného svazku a jeho geometrický model, vytvořený rekonstrukcí reálných souřadnic
- Obr. 5.1 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-3/2
- Obr. 5.2 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-3/12
- Obr. 5.3 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-4/9
- Obr. 5.4 Prostorové změny struktury kompozitního vzorku - vzorek 300-4/11
- Obr. 5.5 Prostorová rekonstrukce vlákenného svazku pomocí souřadnic vazných vln
- Obr. 5.6 Prostorová rekonstrukce vlákenného svazku pomocí souřadnic jeho příčných průřezů
- Obr. 5.7 Prostorová rekonstrukce trhliny ze souřadnic jejích příčných průřezů
- Obr. 5.8 Prostorová rekonstrukce vazného bodu tkaniny v kompozitu v programu MATLAB R12 - vzorek 3003/2
- Obr. 5.9 Testování souborů naměřených dat pomocí Weibullova pravděpodobnostního grafu
- Obr. 5.10 Distribuce velikosti ploch příčných průřezů vlákenných svazků (relativní četnost).
- Obr. 5.11 Distribuce velikosti ploch příčných průřezů vlákenných svazků (kumulativní četnost).
- Obr. 5.12 Distribuce koeficientů změny příčných průřezů $\eta = S/S_0$ (relativní četnost).
- Obr. 5.13 Distribuce koeficientů změny příčných průřezů $\eta = S/S_0$ (kumulativní četnost).
- Obr. 5.14 Příčné průřezy vlákenných svazků s maximální hodnotou koeficientu změny příčných průřezů η
- Obr. 5.15 Příčné průřezy vlákenných svazků s minimální hodnotou koeficientu změny příčných průřezů η
- Obr. 5.16 Srovnání maximálních a minimálních velikostí ploch příčných průřezů vlákenných svazků
- Obr. 5.17 Hodnoty difference maximálních a minimálních velikostí ploch příčných průřezů 150 vlákenných svazků
- Obr. 5.18 Průběhy vlákenných svazků s maximální diferencí velikostí plochy průřezu (svazek 1,2)

- Obr. 5.19 Průběhy vláknenných svazků s maximální diferencí velikostí plochy průřezu (svazek 3,4)
- Obr. 5.20 Průběhy vláknenných svazků s minimální diferencí velikostí plochy průřezu (svazek 1,2)
- Obr. 5.21 Průběhy vláknenných svazků s minimální diferencí velikostí plochy průřezu (svazek 3,4)
- Obr. 5.22 Průběhy vláknenných svazků největší minimální a s nejmenší maximální hodnotou velikostí plochy příčného průřezu
- Obr. 5.23 Tvar příčných průřezů vláknenných svazků v závislosti na okolní struktuře
- Obr. 5.24 Tvary příčných průřezů jednoho vláknenného svazku pozorovaného na patnácti za sebou řazených obrazech
- Obr. 6.1 Strukturní defekty uvnitř vláknenného svazku

SEZNAM TABULEK

- Tab. 3.1 Hierarchie struktury a modelů jednotlivých složek textilního kompozitu
- Tab. 4.1 Parametry uhlíkového multifilu a uhlíkové tkaniny
- Tab. 4.2 Průměrné velikosti odbroušení vzorků
- Tab. 5.1 Základní statistické charakteristiky měřeného souboru velikostí ploch příčných průřezů vláknenných svazků
- Tab. 5.2 Základní statistické charakteristiky souboru koeficientů změny příčných průřezů vláknenných svazků η
- Tab. 5.3 Absolutní četnosti difference maximálních a minimálních velikostí ploch příčných průřezů

SEZNAM LITERATURY

- [1] BUCKLEY, J.D., EDIE, D.D.: Carbon-Carbon Materials and Composites, Noyes Publication, New Jersey, 1993
- [2] SAVAGE, G.: Carbon-carbon composites, Chapman & Hall, London, 1993
- [3] COX, B.N., FLANAGAN, G.: Handbook of Analytical Methods for Textile Composites, NASA Contractor Report 4750, Hampton, Virginia, 1997
- [4] LORD, P.R., MOHAMED, M.H.: Weaving: Conversion of yarn to fabric, Merrow Publishing Co. Ltd., Watford, 1973
- [5] JORTNER, J.: Microstructure of cloth-reinforced carbon-carbon laminates, Carbon, Vol. 30, No.2, 1992, 153-163
- [6] CHO, TSU-WEI, KO, F.K.: Textile structural composites, Elsevier Sci. Pub. B.V., Amsterdam, 1989
- [7] KOŠKOVÁ, B., VOPIČKA, S.: Geometrické aspekty struktury tkaninových kompozitů, Sb. konf. Vyztužené plasty, Karlovy Vary, 2001
- [8] VANDEURZEN, P., IVENS, J., VERPOEST, I.: Extended analytical modeling of the elastic properties of woven fabric composites, Euromech 334, Lyon, 1995, 140-153
- [9] YURGARTIS, S.W., MACGIBBON, B.S., MULVANEY, P.: Quantification of microcracking in brittle-matrix composites, J. of Materials and Science 27, 1992, 6679 - 6686
- [10] FENG, G., PATRIC, J.W., WALKER, A.: The characterisation of cracks and voids in two-dimensional Carbon-Carbon Composites, Carbon, Vol. 31, No.1, 1993, 103-108
- [11] POLLOCK, P.B., A KOL.: Crack development in a Carbon-Carbon laminate, Carbon, Vol. 31, No. 6, 1993, 992-996
- [12] 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
- [13] BIGAUD, D., a kol.: A geometric modelling software for reinforced Textile Composites, Euromech 334, Lyon, 1995
- [14] KUHN, J.L., CHARALAMBIDES, P.G.: Modeling of planar weave fabric composite geometry, J. of Composite Materials, Vol.33, No.3, 1999, 188-220
- [15] GANESH, V.K., NAIK, N.K.: Failure behavior of plain weave fabric laminates under on axis uniaxial tensile loading: I - laminate geometry, J. of Composite Materials, Vol.30, No.16, 1996, 1748-1778
- [16] LOMOV, S.V., a kol.: Textile composites modelling strategies, Composites: part A32, 2001, 1379-1394
- [17] LOMOV, S.V., VERPOES, J.: Modelling of the internal structure and deformability of textile reinforcements: WiseTex software, www.kuleuven.ac.be, 2002

- [18] KOŠEK, M., MYSLIVEC, M.: Simple graphical system for determination of actual yarn geometry of textile composites, Proc. of Spring Conference on Computer Graphics SCCG, Budmerice, Slovakia, 1999, pp. 25-26
- [19] KOŠEK, M., KOŠKOVÁ, B.: Analysis of yarn wavy path periodicity of textile composites using discrete Fourier transform., Proc. of International Conference on Composite Engineering, ICCE/6, Orlando, Florida, 1999, 427 - 428
- [20] KOŠEK, M., VOPIČKA, S.: Visualization of Textile Composite Structure, Proc. of ICCE/7, Denver, 2000, 475-476
- [21] KOŠKOVÁ, B., VOPIČKA, S.: Influence of Composite Pressing Degree on Woven Reinforcement Geometry, Proc. of ICCE/7, Denver, 2000, 899-900
- [22] ČERNÝ, M., GLOGAR, P., KOŠKOVÁ, B., VOPIČKA, S.: Influence of Actual Yarn Pattern on Elastic Properties of Fabric Reinforced Carbon-Carbon Composites, Eurocarbon abstracts, Vol.II, Berlin, 2000, 749-750
- [23] JALŮVKOVÁ, K.: Diplomová práce, KTM-TM-374, TU Liberec, 2001
- [24] VOPIČKA, S.: Diplomová práce, KTM-TM-335, TU Liberec, 1998
- [25] LIM: LUCIA G manuál, Laboratory Imaging s.r.o., Praha, 1999
- [26] ŽÁRA, J., a kol.: Počítačová grafika - principy a algoritmy, GRADA a.s., Praha, 1992
- [27] PELIKÁN, J.: PC - prostorové modelování, Grada a.s., Praha, 1992
- [28] MELOUN, M., MILITKÝ, J.: Statistické zpracování experimentálních dat, Plus, Praha, 1994
- [29] SOBOTA, B.: Počítačová grafika a jazyk C, Kopp, České Budějovice, 1996
- [30] Matlab Help, Mathworks, Inc., Massachusetts, US, 2000
- [31] DUŠEK, F.: Úvod do používání MATLAB, Univerzita Pardubice, 1999
- [32] LIM: systém LUCIA G, Laboratory Imaging s.r.o., Praha, 2001
- [33] BOGDANOVICH, A.E., PASTORE, C.M.: Mechanics of Textile and Laminated Composites, Chapman & Hall, Cambridge, 1996
- [34] VOPIČKA, S.: Strukturní analýza tkané výztuže kompozitů uhlík - uhlík, písemná práce ke zkoušce z PGS, TU Liberec, 1999
- [35] MILITKÝ, J., SALAČ, O.: Statistické metody v textilní praxi I. - Základní statistické metody, Dům techniky ČSVTS, Pardubice, 1982

PŘÍLOHY

**REKONSTRUKCE TROJROZMĚRNÉ STRUKTURY
TKANINOVÝCH KOMPOZITŮ**

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: **Prostorová rekonstrukce vazného bodu tkaniny**

PŘÍLOHA 2: **Příčné průřezy vláknenných svazků s koeficientem změny průřezu $\eta < 0,9$**

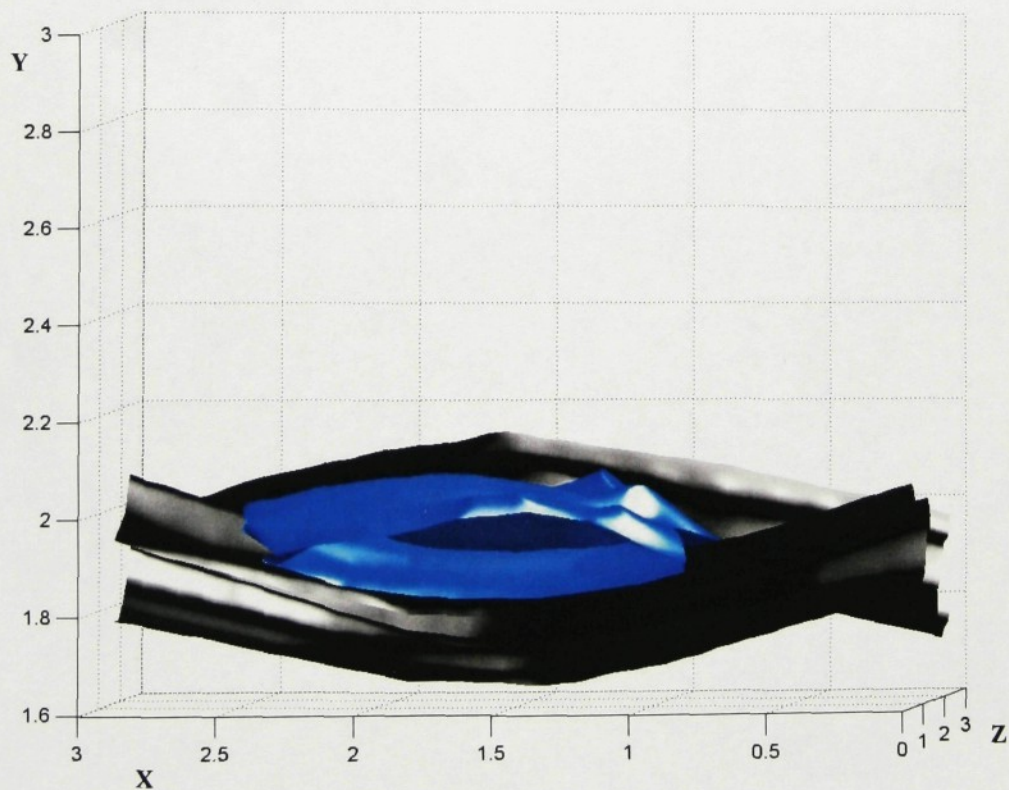
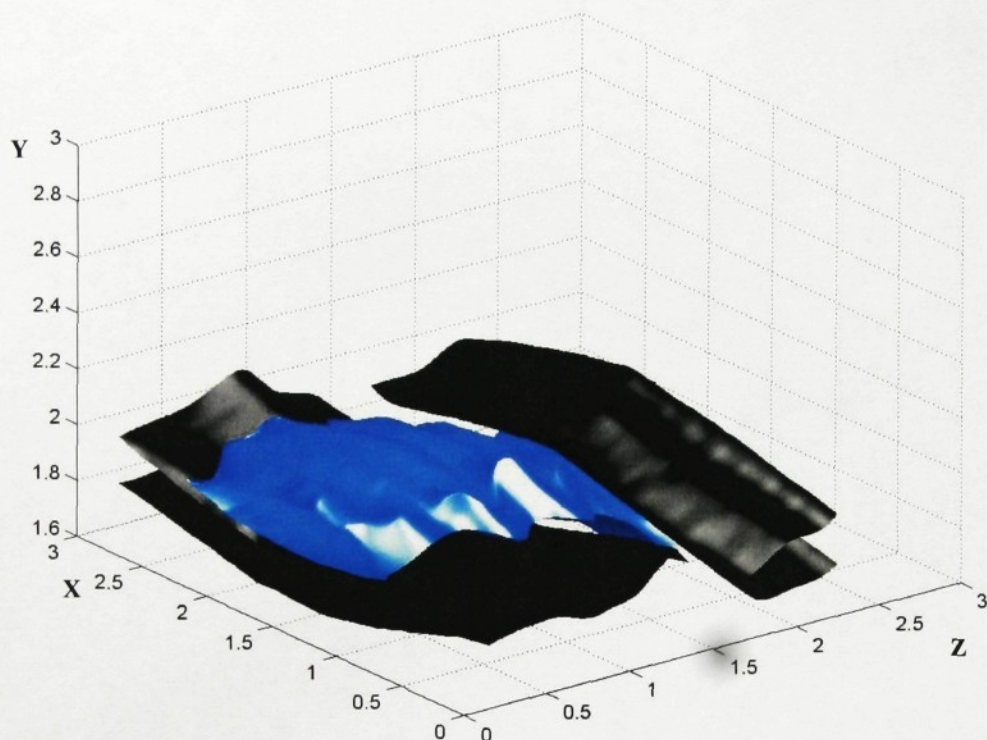
PŘÍLOHA 3: **Příčné průřezy vláknenných svazků s koeficientem změny průřezu $\eta > 1,6$**

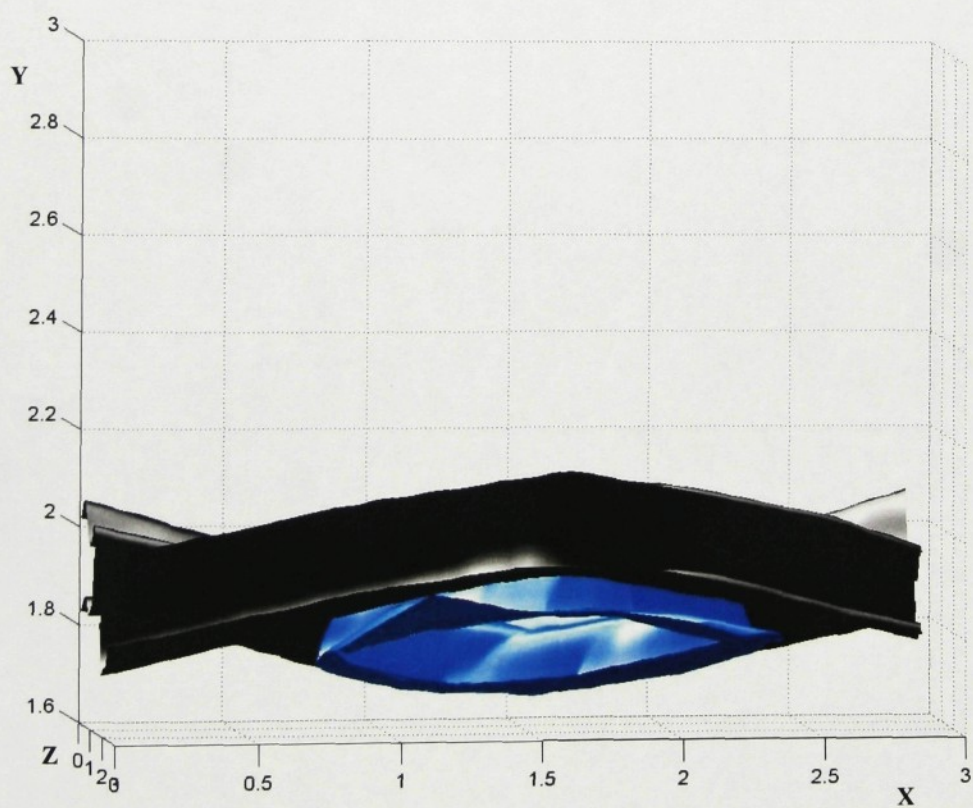
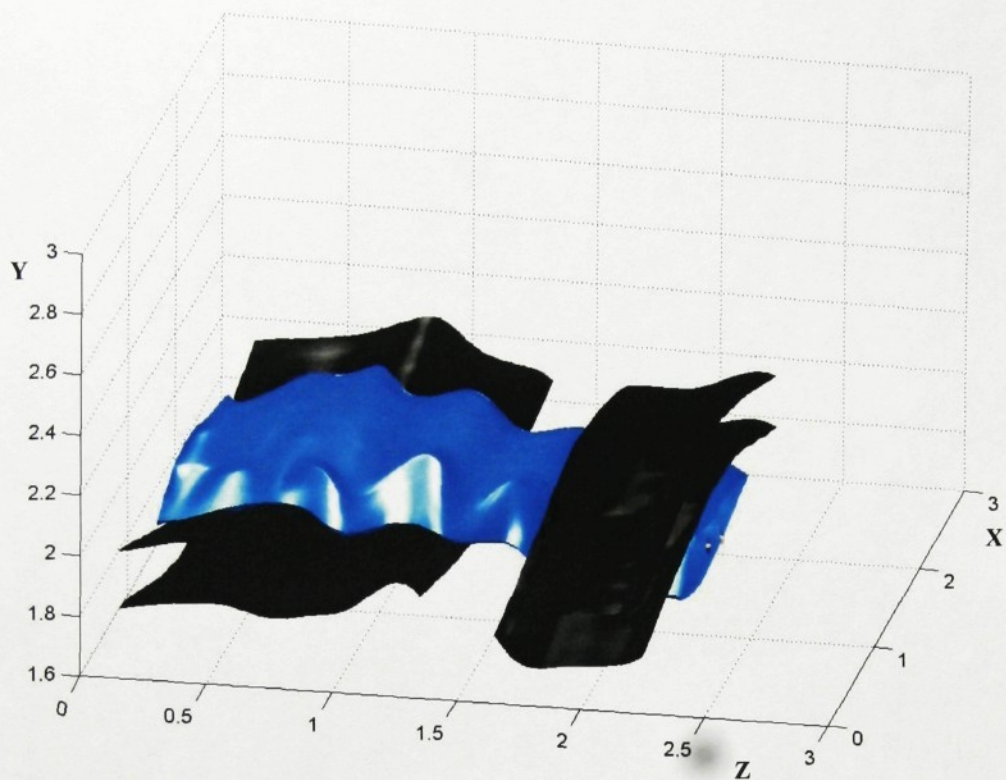
PŘÍLOHA 4: **Průběhy vláknenných svazků s maximální diferencí velikosti příčných průřezů ve struktuře kompozitu**

- a) Svazek 1 - difference velikosti ploch $1,128 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12
- b) Svazek 2 - difference velikosti ploch $0,975 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12
- c) Svazek 3 - difference velikosti ploch $0,934 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12
- d) Svazek 4 - difference velikosti ploch $0,909 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12

PŘÍLOHA 5: **Průběhy vláknenných svazků s minimální diferencí velikosti příčných průřezů ve struktuře kompozitu**

- a) Svazek 1 - difference velikosti ploch $0,232 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12
- b) Svazek 2 - difference velikosti ploch $0,243 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12
- c) Svazek 3 - difference velikosti ploch $0,271 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12
- d) Svazek 4 - difference velikosti ploch $0,272 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12

PŘÍLOHA 1: Prostorová rekonstrukce vazného bodu tkaniny



PŘÍLOHA 2: Příčné průřezy vláknenných svazků s koeficientem změny
průřezu $\eta < 0,9$

VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,7956$



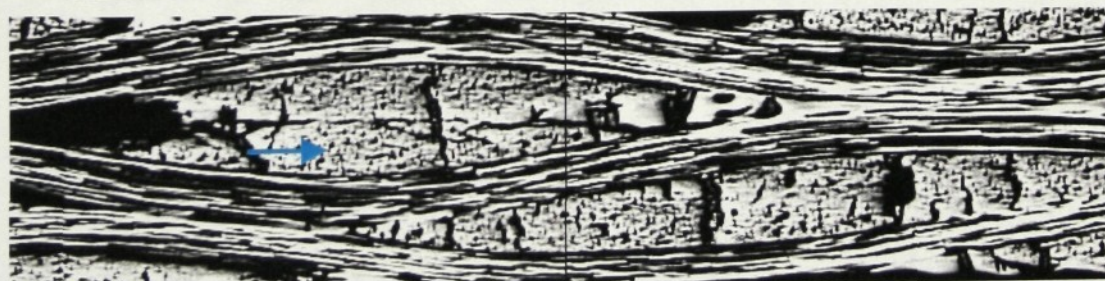
VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,7985$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8069$



VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8137$



VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8232$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,826$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8368$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,839$



VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8450$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8527$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8596$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8619$



VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8652$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8728$



VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8756$



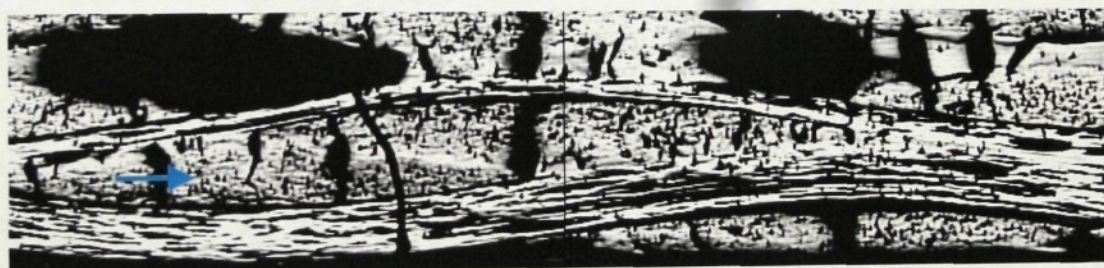
VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,876$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8775$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8848$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8907$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 0,8942$



PŘÍLOHA 3: Příčné průřezy vláknenných svazků s koeficientem změny průřezu $\eta > 1,6$

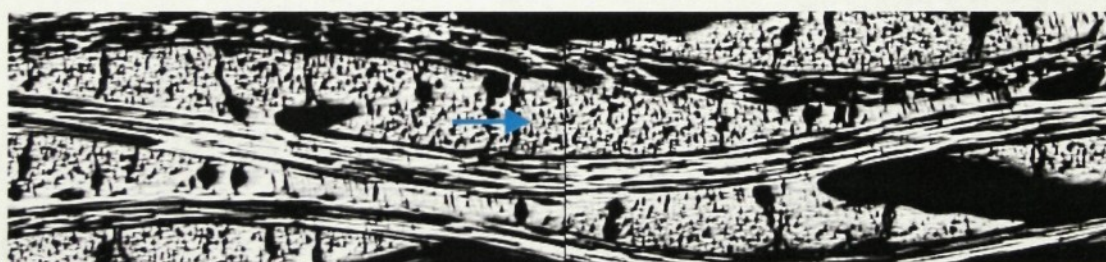
VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6035$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,607$



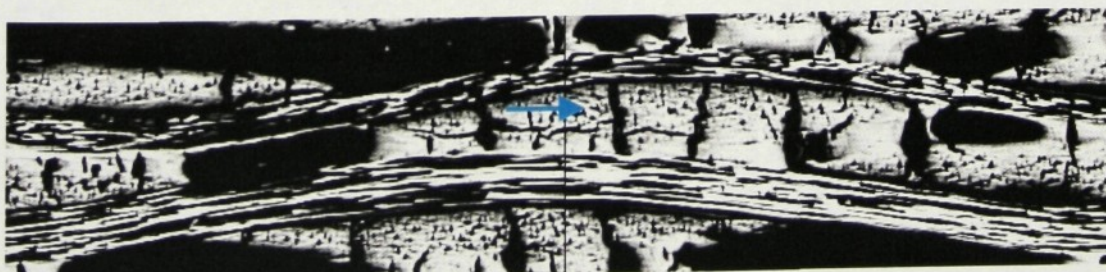
VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6074$



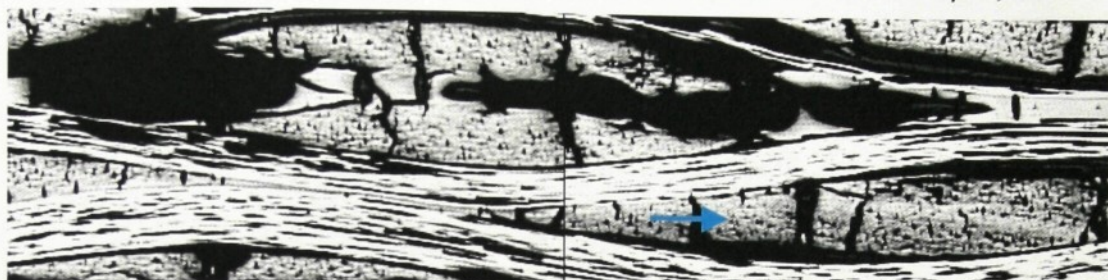
VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6181$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6195$



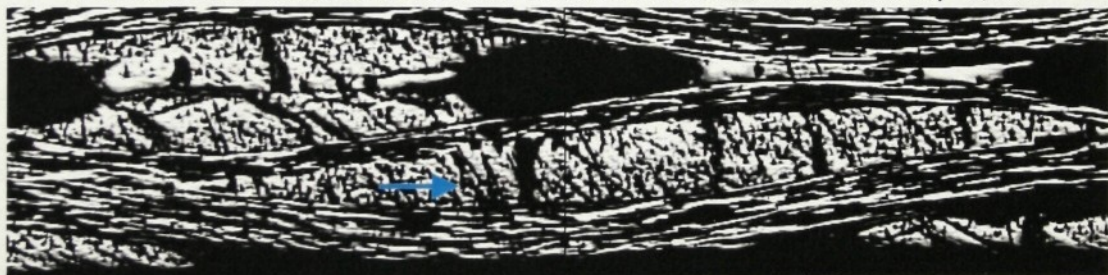
VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6288$



VZOREK 300-4/11 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6336$



VZOREK 300-3/2 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6357$



VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,6433$



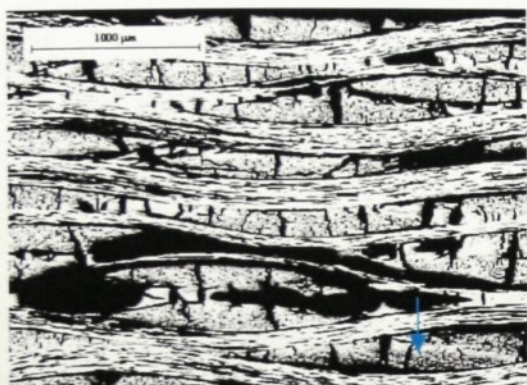
VZOREK 300-3/12 - HODNOTA KOEFICIENTU ZMĚNY PŘÍČNÝCH PRŮŘEZŮ $\eta = 1,644$



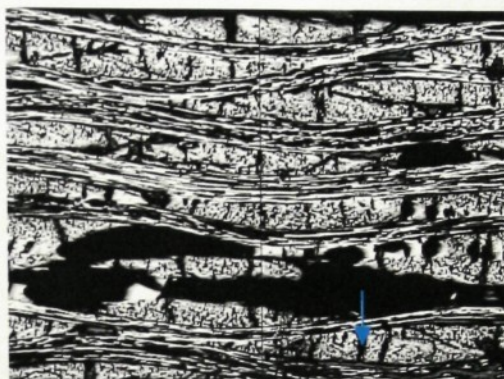
PŘÍLOHA 4: Průběhy vláknenných svazků s maximální diferencí
velikosti příčných průřezů ve struktuře kompozitu

a) Svazek 1 - difference velikosti ploch $1,128 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12

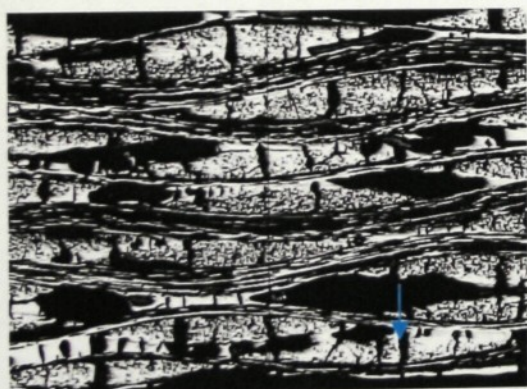
povrch vzorku - VYBRUS_01



povrch vzorku - VYBRUS_02
největší plocha průřezu



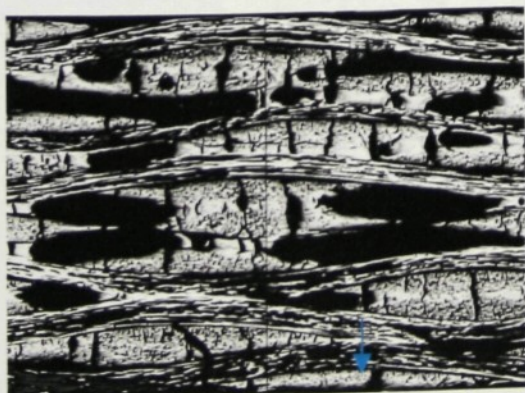
povrch vzorku - VYBRUS_06



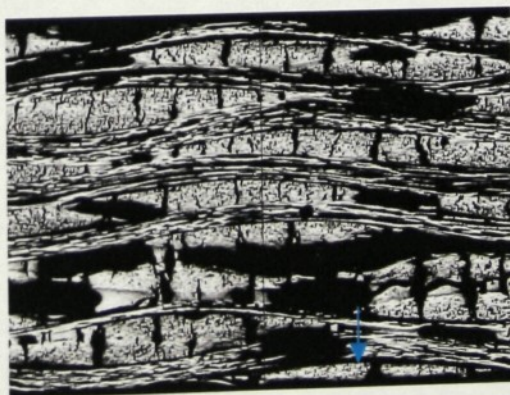
povrch vzorku - VYBRUS_09



povrch vzorku - VYBRUS_12

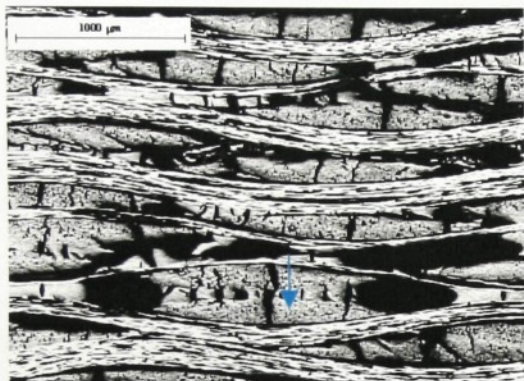


povrch vzorku - VYBRUS_15
nejmenší plocha průřezu

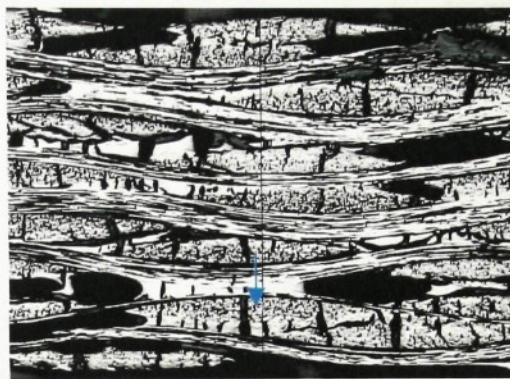


b) Svazek 2 - difference velikosti ploch $0,975 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/12

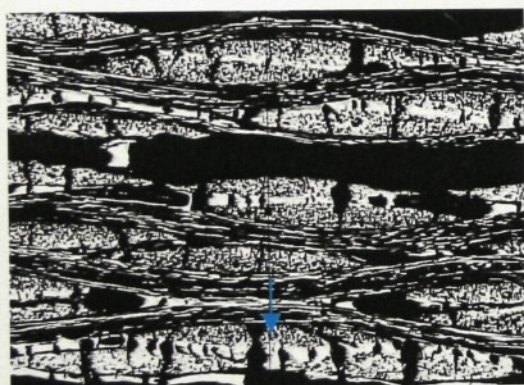
povrch vzorku - VYBRUS_01



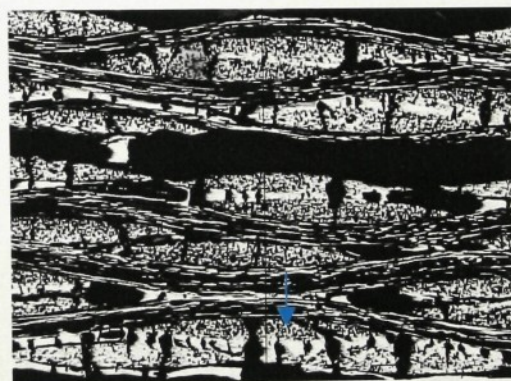
*povrch vzorku - VYBRUS_05
největší plocha průřezu*



povrch vzorku - VYBRUS_07



*povrch vzorku - VYBRUS_09
nejmenší plocha průřezu*



povrch vzorku - VYBRUS_12

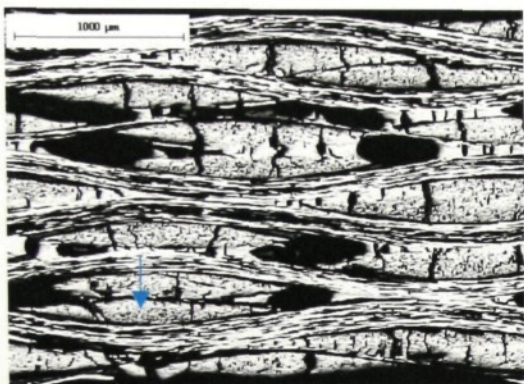


povrch vzorku - VYBRUS_15

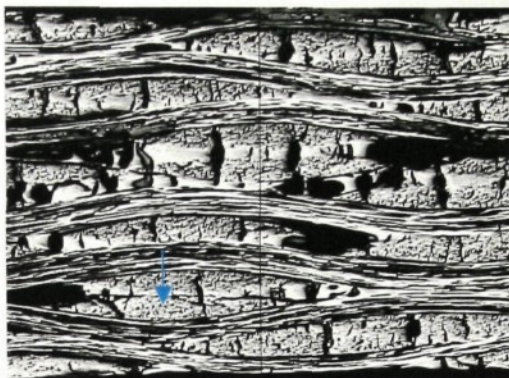


c) Svazek 3 - difference velikosti ploch $0,934 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/2

povrch vzorku - VYBRUS_01



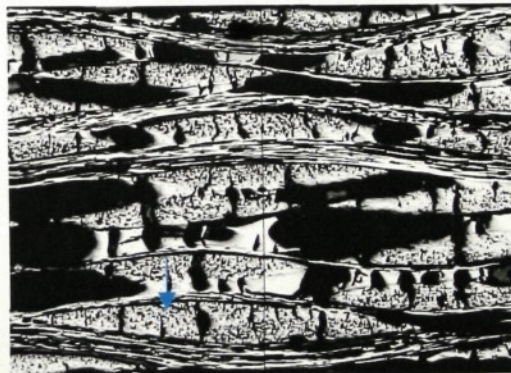
povrch vzorku - VYBRUS_04



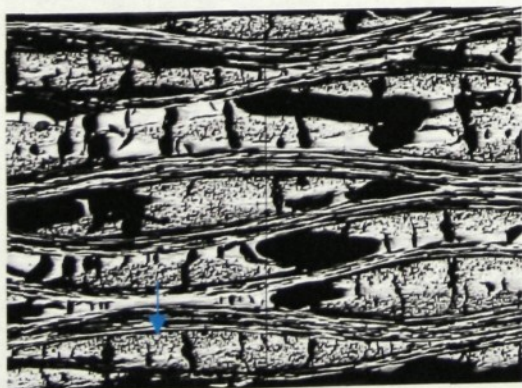
povrch vzorku - VYBRUS_08
nejmenší plocha průřezu



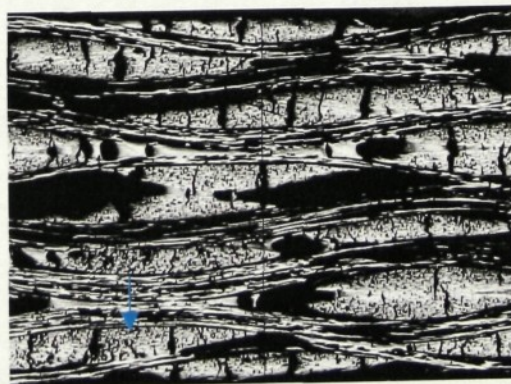
povrch vzorku - VYBRUS_10
největší plocha průřezu



povrch vzorku - VYBRUS_12

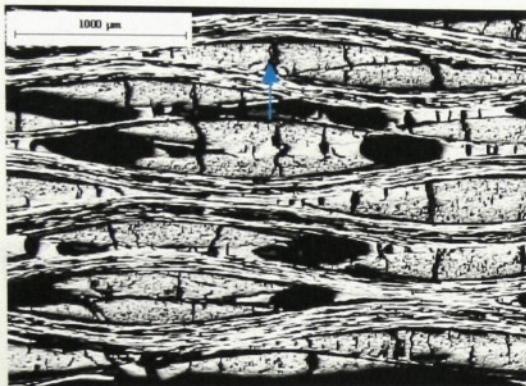


povrch vzorku - VYBRUS_15

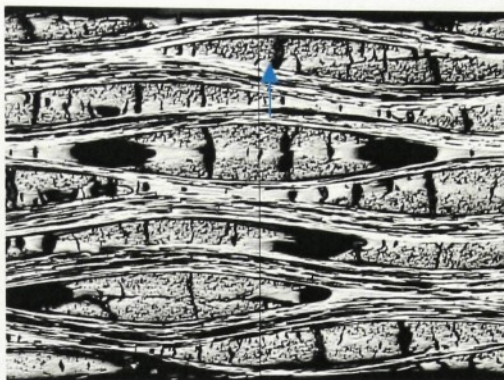


d) Svazek 4 - difference velikosti ploch $0,909 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/2

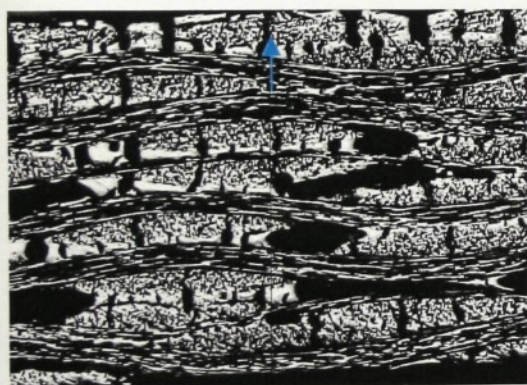
povrch vzorku - VYBRUS_01
největší plocha průřezu



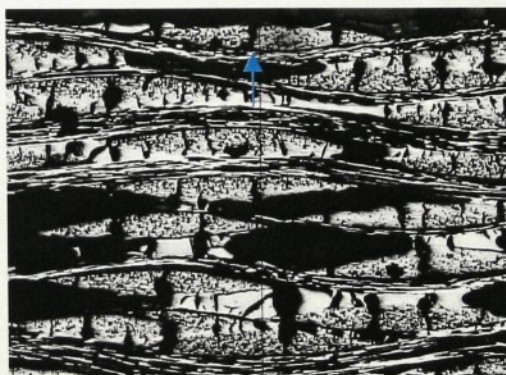
povrch vzorku - VYBRUS_03



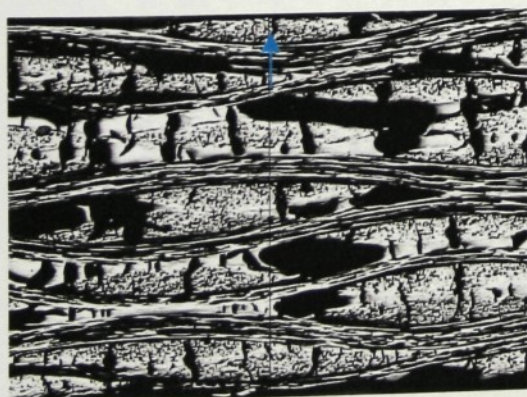
povrch vzorku - VYBRUS_06



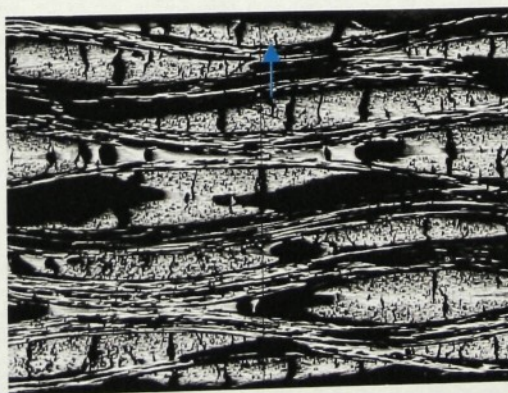
povrch vzorku - VYBRUS_09



povrch vzorku - VYBRUS_12
nejmenší plocha průřezu



povrch vzorku - VYBRUS_15



PŘÍLOHA 5:

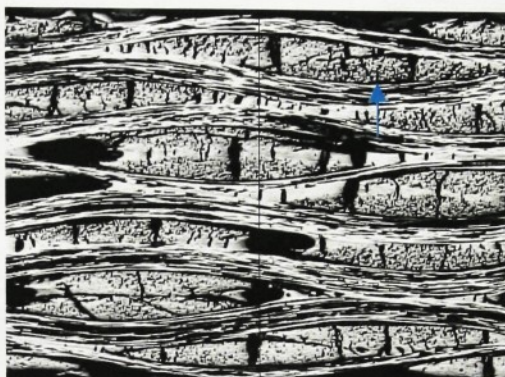
Průběhy vláknenných svazků s minimální diferencí velikosti příčných průřezů ve struktuře kompozitu

a) Svazek 1 - difference velikosti ploch $0,232 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-3/2

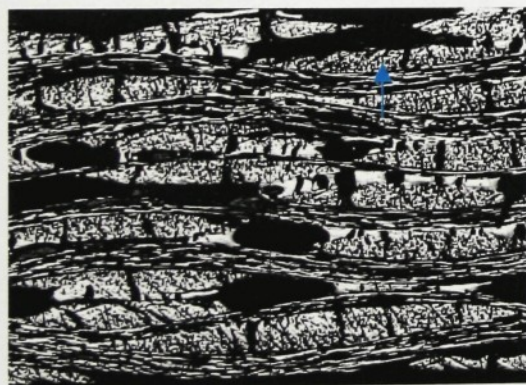
povrch vzorku - VYBRUS_01



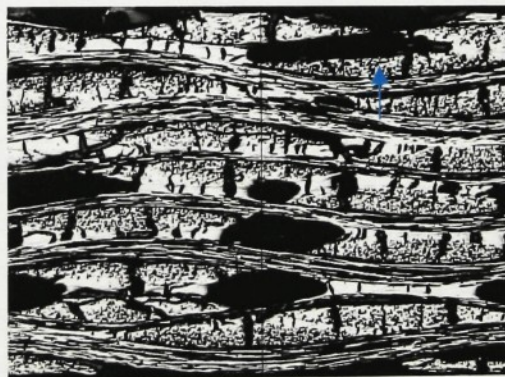
povrch vzorku - VYBRUS_03



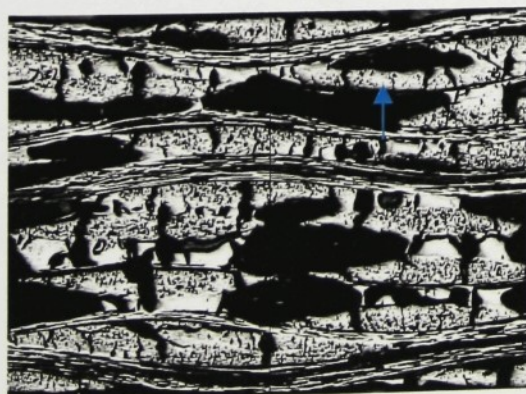
povrch vzorku - VYBRUS_06
největší plocha průřezu



povrch vzorku - VYBRUS_07
nejmenší plocha průřezu



povrch vzorku - VYBRUS_10

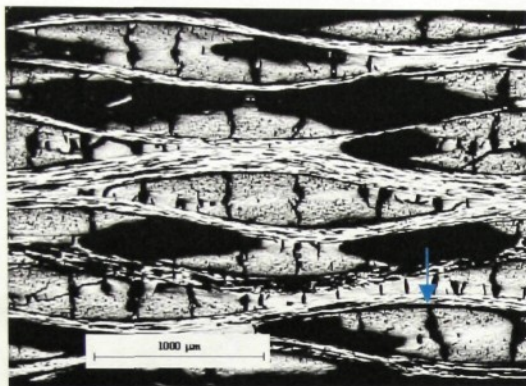


povrch vzorku - VYBRUS_14

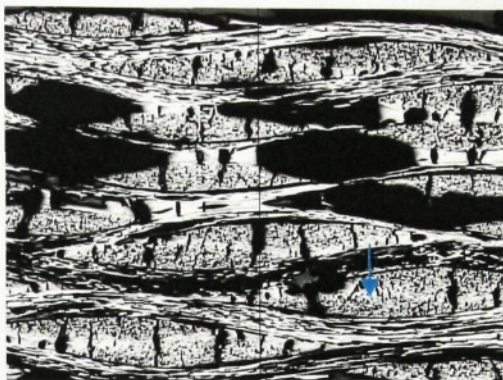


b) Svazek 2 - difference velikosti ploch $0,243 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-4/11

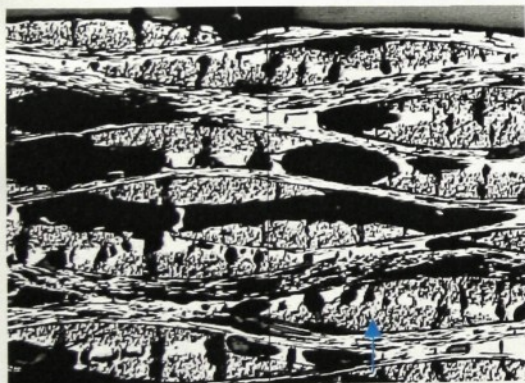
povrch vzorku - VYBRUS_01



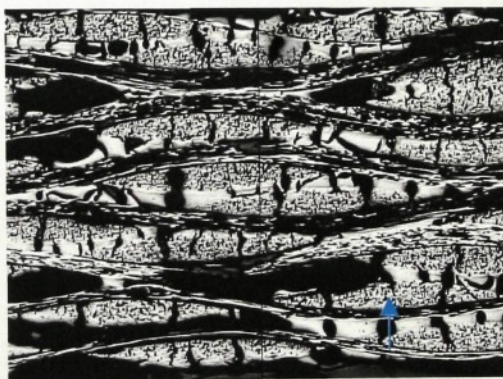
povrch vzorku - VYBRUS_04



povrch vzorku - VYBRUS_07
největší plocha průřezu



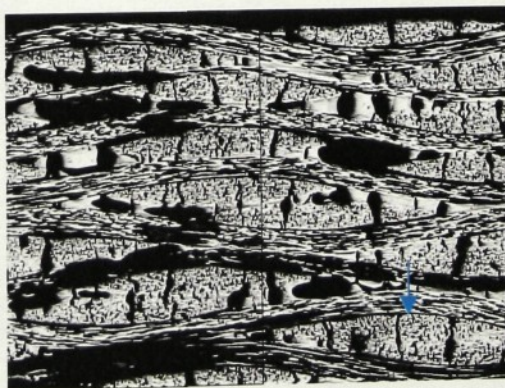
povrch vzorku - VYBRUS_10
nejmenší plocha průřezu



povrch vzorku - VYBRUS_12

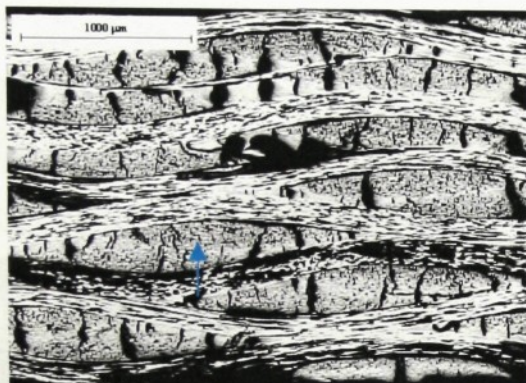


povrch vzorku - VYBRUS_15

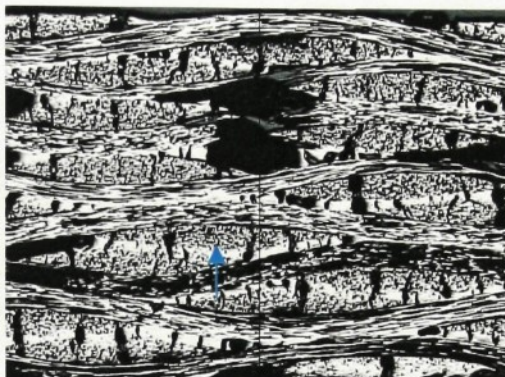


c) Svazek 3 - difference velikosti ploch $0,271 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-4/11

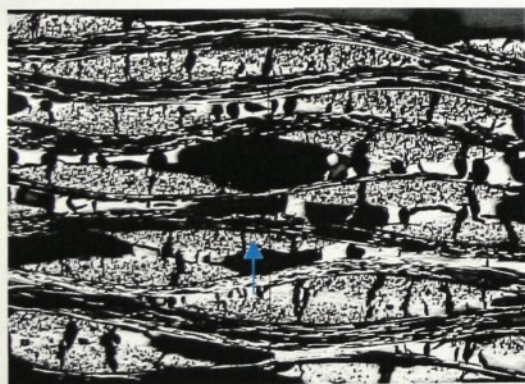
povrch vzorku - VYBRUS_01



povrch vzorku - VYBRUS_03
největší plocha průřezu



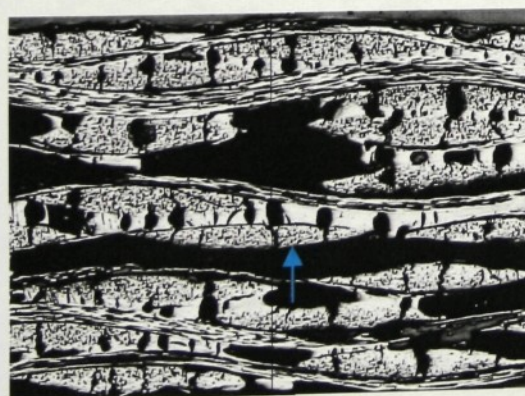
povrch vzorku - VYBRUS_06



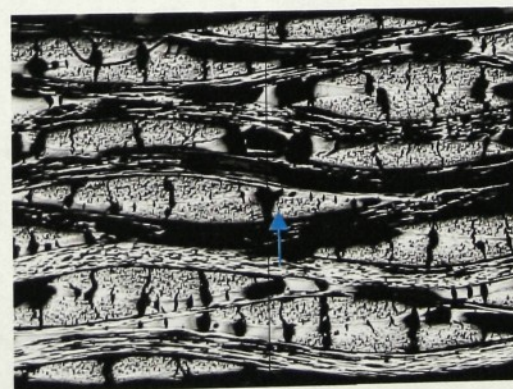
povrch vzorku - VYBRUS_09



povrch vzorku - VYBRUS_11
nejmenší plocha průřezu

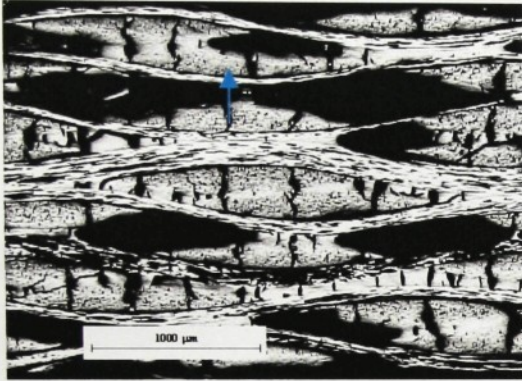


povrch vzorku - VYBRUS_14

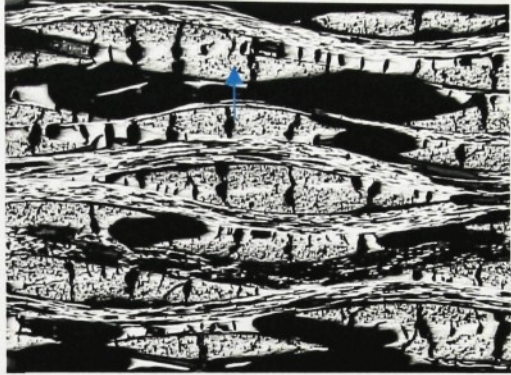


d) Svazek 4 - difference velikosti ploch $0,272 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ - vzorek 300-4/11

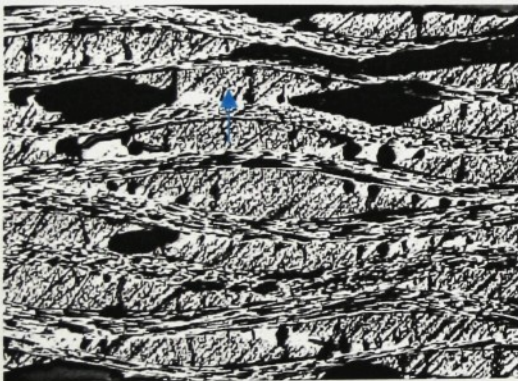
povrch vzorku - VYBRUS_01
nejmenší plocha průřezu



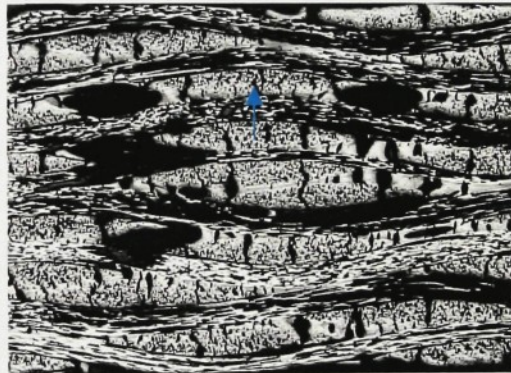
povrch vzorku - VYBRUS_04



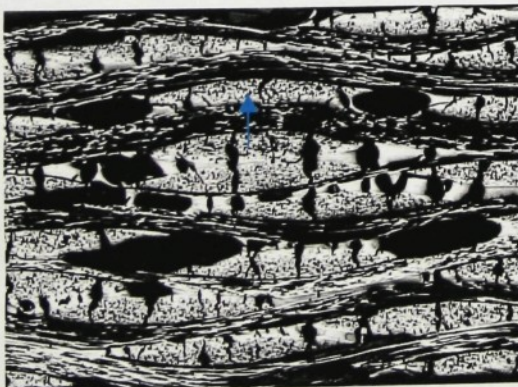
povrch vzorku - VYBRUS_07
největší plocha průřezu



povrch vzorku - VYBRUS_10



povrch vzorku - VYBRUS_12



povrch vzorku - VYBRUS_15

