

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF STRESS-STRAIN DEPENDENCE OF NON-STANDARD MATERIALS

D. Vavřík^{*}, M. Drdácý^{*}

Summary: *The paper presents experimental determination of mechanical properties of different types of animal hairs. Mortars reinforced by thin fibres have promising properties for application in cultural heritage protection. Theoretical research is based on mathematical modelling of composite materials with inorganic (quasi-brittle) matrix and differential types of reinforcement fibres - natural as well as man made polymeric fibres. For these models, knowledge of mechanical properties of the fibres is needed. An optical method developed especially for this purpose will be introduced in this paper.*

1. Úvod

K restaurování a záchraně kulturního dědictví z pórovitých anorganických materiálů jsou často využívány maltové směsi s přídavkem organických i anorganických vláken [1]. Optimální složení směsi je studováno jak teoreticky, tak experimentálně. Základním požadavkem je zabránění vzniku a vývoji trhlin spolu se zachováním materiálové kompatibility s restaurovaným objektem. Pro teoretické výpočty je třeba znát základní mechanické vlastnosti používaných vláken, mimo jiné zvířecích chlupů. Ty jsou relativně tenké a krátké, typicky $\approx 0,1 \times 45$ mm. Proto je jejich proměrování poměrně obtížné. Zatěžující síly se v okamžiku porušení pohybují kolem jednoho N. Standardní metody měření pomocí tenzometrů či extenzometrů jsou nepoužitelné. Předmětem předkládané práce je představení optické experimentální techniky, vyvinuté k tomuto účelu.

2. Optická metoda korelované masky s aktualizací

Měření mechanických vlastností chlupů je obtížný úkol. Zejména proto, že nemáme k dispozici dostatečně dlouhé vzorky vláken pro klasické zkoušky na k tomu určených specializovaných zařízeních. U nich je obvykle vyžadována možnost navinutí konců vláken tak, aby vlákna v čelistech neprokluzovala. Jen v takovém případě lze totiž považovat měření zjištěná z posunu čelistí za věrohodná. Zatěžovací zařízení musí být s ohledem na zatěžovací síly schopné měřit s dostatečnou přesností v rozsahu nula až jednotky N. V popisovaném případě bylo jednoduché zatěžovací zařízení sestaveno z laboratorních vah.

U vzorků nebylo počítáno se zaručeně fixním uchycením konců vláken v čelistech. Z toho vyplývá problém vlastního měření protažení subtilního vlákna, na které nelze upnout žádný snímač. Proto bylo rozhodnuto měřit opticky, v našem případě pomocí digitální černobilé

^{*} Ing. Daniel Vavřík, PhD., Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9, Česká republika; tel.: +420.286 882 121, fax: +420.286 884 634; e-mail: vavrik@itam.cas.cz,
Ing. Miloš Drdácý, DrSc., e-mail: drdacky@itam.cas.cz

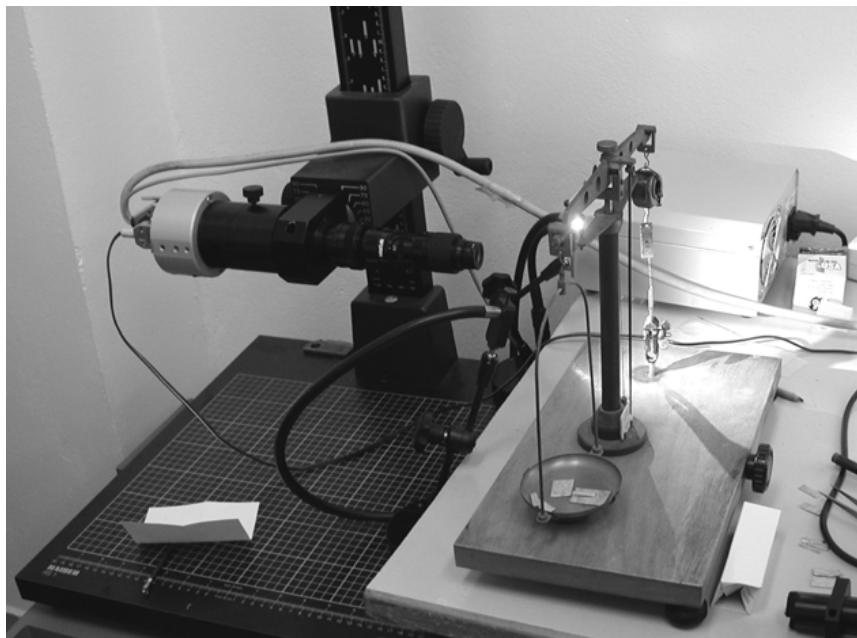
1.3 Mpixel CCD kamery s makroobjektivem. Zaznamenané snímky byly vyhodnocovány metodami analýzy obrazu.

Na studovaných zvířecích chlupech byly permanentním fixem, či bílou barvou, vyznačeny kontrastní proužky. Z důvodů malých rozměrů a povrchových vlastností zkoumaných chlupů bylo nemožné tyto proužky vytvořit dostatečně kontrastní, pravidelné a subtilní. Nebylo proto možné detekovat hrany, respektive středy zmíněných proužků hledáním jejich hran, či středů, pomocí jednoznačně definované funkce rozdělení.

V nezatíženém stavu byly na sledovaném vlákne vybrána dvě protilehlá místa (značky), která se vyznačovala výraznou strukturou. Ve většině případu se jednalo o nehomogenitu nanesené barvy. Poloha značek byla detekována vlastním programem vyvinutým v prostředí programovacího jazyka Matlab 6.1.

Měřicí značka a její blízké okolí byly v zatěžovacím stavu -1 vzaty jako maska o rozměrech 45x45 pixelů. V následujícím zatěžovacím stavu bylo v obrázku hledáno místo, ve kterém byl mezi maskou a výřezem obrázku o stejném rozměru zjištěn nejmenší rozptyl. Obrázek byl skenován pouze v nevelké oblasti 30x30 pixelů, okolo souřadnice, kde se nacházela maska v předchozím stavu. Hodnoty úrovní šedí pixelů masky byly normovány střední hodnotou (mediánem) úrovní šedí aktuálního výřezu. To bylo nutné s ohledem na nízké hodnoty šedí mimo zkoumané vlákno. Po nalezení značky byla maska i poloha značky aktualizována. Vzhledem k relativně velkým deformacím vlákna se totiž významně změnila struktura a rozměry nanesených značek.

Přesnost popisované optické metody „Metoda korelované masky s aktualizací“ je na úrovni jednoho obrazového pixelu. Měřicí vzdálenost se pohybovala okolo 900 pixelu, tomu odpovídá přesnost měření vzdálenosti značek 0.11 %. Vzhledem k tomu, že měřené hodnoty oscilovaly v rozmezí 1 pixel okolo skutečné hodnoty, lze považovat zjištěné tahové diagramy „relativní prodloužení-síla“ (deformace-síla) za věrohodné.



Obr. 1: *Uspořádání experimentu*

3. Experimentální výsledky

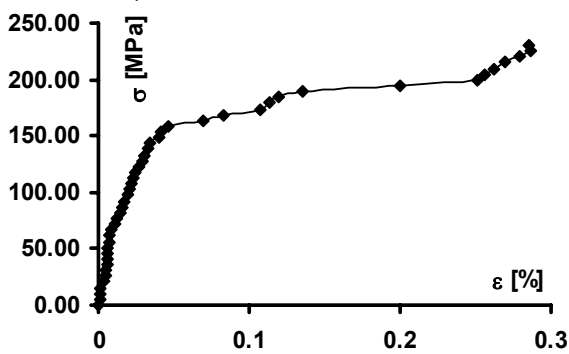
Pro tahové zkoušky bylo vyrobeno po pěti vzorcích od obou typů vlákna: kozí a koňské chlupy. Konce vláken byly pomocí epoxidové pryskyřice vlepeny mezi dva plíšky. Na

chlupech byly vyznačeny kontrastní značky. Spodní koncovka byla uchycena do pevných čelistí z hodinářské svěrky a horní koncovka zavěšena na rameno vahadla laboratorních vah, které bylo posléze vyváženo. Experimentální uspořádání viz. obr. 1.

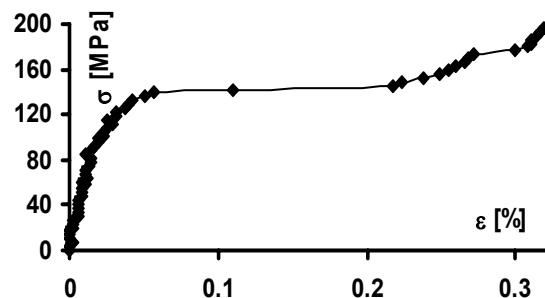
Vzorek byl poté postupně přitěžován přes vahadlo s krokem 0.002 N až do porušení vzorku, pomocí pomalého zvyšování počtu kalibrované zátěže z ocelových kuliček o hmotnosti 2 g. Experiment byl zaznamenáván a vyhodnocován výše uvedeným způsobem.

Vlákna byla zalita do pryskyřice a na výbrusech změřeny charakteristické rozměry průřezu. Fotografie průřezu byly 1000x zvětšeny. Plocha průřezu byla změřena pomocí čtvercové sítě o velikosti strany čtverce, odpovídající 1 μ m. Naměřená závislost „deformace-síla“ tak mohla být přepočítána na závislost „deformace-napětí“ (přesněji „smluvní napětí“). Posléze tak byl určen elastický modul, tažnost a pevnost zkoumaných vláken.

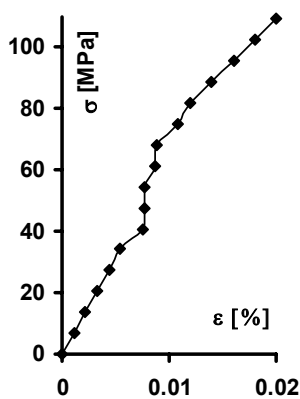
Při experimentech byly zjištěny dva typy pracovních diagramů. U prvních docházelo ke změně poddajnosti a vytvoření prodlev analogických plastické deformaci. Po nich nastalo krátké zpevnění a přetržení vlákna. Pružnou fázi pracovního diagramu lze charakterizovat jako bilineární s vysokým počátečním modulem pružnosti do cca 25-30 % pevnosti., potom zhruba polovičním modulem pružnosti do úrovně napětí okolo 60-70 %. Pracovní diagram se pak stává nelineární. Na obr. 2 je ukázán typický diagramy tohoto typu pro kozí chlup, na obr. 3 pro koňský.



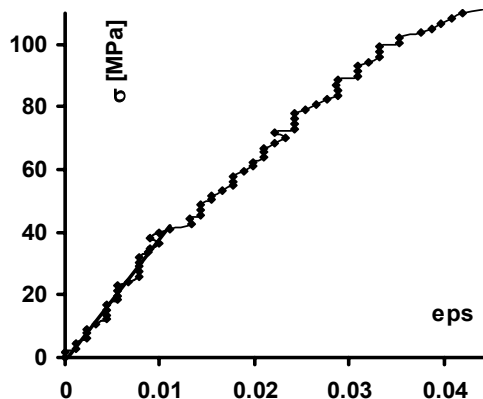
Obr. 2.: závislost deformace-napětí pro kozí chlup s bilineárním charakterem.



Obr. 3.: závislost deformace-napětí pro koňský chlup s bilineárním charakterem.



Obr. 4.: závislost deformace-napětí pro kozí chlup bez fáze „plastické prodlevy“..



Obr. 5.: závislost deformace-napětí pro koňský chlup bez fáze „plastické prodlevy“.

U druhého typu byl pracovní diagram shodný až do fáze plastické prodlevy, ke které zde nedocházelo a po většinou velmi krátké nelineární fázi nastalo porušení. První větev bilineární závislosti dosahovala do úrovně napětí okolo 30 % až do 35 % pevnosti vlákna.

U těchto typů porušení byly vesměs naměřeny přibližně poloviční pevnosti vláken, oproti vláknům s pracovním diagramem s prodlevou. Typická závislost je uvedena na grafu obr. 4. pro koží chlup, na obr. 5 pro koňský.

Zjištěné moduly pružnosti se pohybovaly v mezích 3890 MPa až 5100 MPa pro koňské chlupy a 6200 MPa až 7700 MPa pro koží chlupy.

4. Závěry

Představená optická „metoda korelované masky s aktualizací“ se pro měření mechanických vlastností tenkých vláken ukázala jako zcela vyhovující. Její přesnost a citlivost nám dává věrohodné experimentální výsledky v určování elastického modulu, tažnosti a pevnosti zkoumaných vláken.

Dosažené pevnosti zvířecích vláken jsou dostatečně vysoké pro účinné zapojení vláken jako mikrovýztuže zvyšující tahovou pevnost kompozitu po zatvrdnutí matrice.

První větev bilineárního typu pracovního diagramu je typická pro úroveň napětí, která značně přesahuje tahovou pevnost vápenné matrice malty.

Materiály nevykazují homogenní chování a jejich pracovní diagramy ukazují na výraznou závislost na uspořádání pevnostních fibril uvnitř vlastní struktury chlupu. Prodleva se zpevněním je typickým fenoménem přeorientování pevnostně silnějších a méně deformovatelných fibril během pokročilé deformace vlákna. Je třeba si uvědomit, že i zvířecí chlup- vlákno je kompozitní systém, složený z vláknitých fibril a spojovací matrice.

Popisovaná metoda se ukázala jako velmi vhodná i pro jiné případy, kdy nejsou běžné metody měření materiálových charakteristik použitelné. Jedním z takových případů je právě probíhající měření mechanických vlastností vzorků, vyrobených z „čerstvých“ kostí, které jsou nutné pro potřeby biomechanických analýz. Zmíněné vzorky jsou značně materiálově nehomogenní. Zároveň je jejich povrch velmi drsný, případně i mastný. Je tedy možné nanést pouze nepříliš dobře definované značky, které jsou však zcela vyhovující pro tuto metodiku.

4. Literatura

[1] Drdácký M. a kol.: Maltovinové směsy vyztužené vlákny pro obnovu a záchranu uměleckých památek, *Zpráva ÚTAM AV ČR*, ÚTAM Praha 1998. - 145 stran, Grant MK ČR č. PK00P04OPP015-2000/2002

5. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantu Ministerstva kultury ČR č. PK00P04OPP0150 (2000-2002), grantu EK 5.RP Centra excelence ARCCHIP č. ICA1-CT-2000-70013 a grantu GA ČR č. 106/01/0535.