

EXPERIMENTAL – COMPUTATIONAL ANALYSIS OF ADHESION AND FRACTURE IN A COMPOSITE "RUBBER – STEEL WIRE ROPE"

Jiří BURŠA¹, Michal REINISCH¹, Františka PEŠLOVÁ², Přemysl JANÍČEK¹

Summary: *The paper deals with experimental and computational evaluation of adhesion between rubber and steel wire or steel wire rope used in production of tyres. The measured rip-out forces for samples with various ropes structures and various joint length show that the forces are influenced only by several millimeters of the joint near the end of the rope. Further, adhesive forces in samples with a steel wire rope are much lower than in samples with only one wire which has the same total dimensions as the rope. Computational models using FEM system ANSYS have shown that the stress state character in the concentration region near the end of the wire is very strange, different from all other composites: the values of all the three principal stresses are nearly the same. The influence on limit states is discussed in the end.*

1. Úvod

Využití výsledků výpočtového modelování napjatostně-deformačního chování kompozitů pryž-ocel je omezeno neznalostí podmínek mezních stavů porušení, ať už v samotné pryži nebo na jejím rozhraní s ocelovým kordem. Kromě toho ani běžně uváděné elastické parametry pryže nejsou vzhledem k jejím velkým deformacím dostačující pro výpočtové modelování. Pro zajištění úrovně vyváženosti výpočtového modelování je třeba především získat řadu dalších materiálových dat a rozšířit znalosti o mezních stavech tohoto specifického kompozitního materiálu (viz [1]). Předkládaný příspěvek prezentuje výsledky jednoho z mnoha typů potřebných experimentů a výsledky jeho výpočtového modelování.

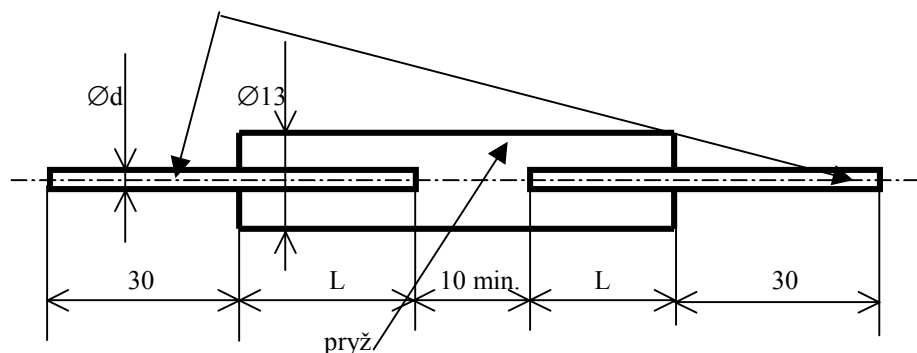
2. POPIS A ANALÝZA PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ

2.1 Posouzení adheze

Posouzení adheze mezi pryží a ocelovým kordem bylo prováděno měřením vytrhovací síly na vzorcích podle obr.1. Vzorky byly vyrobeny v pěti sériích, lišících se vzájemně typem použitého drátu nebo lanka, každá série po devíti kusech. Jako kordová vlákna byly použity drátky nebo lanka z oceli pro výrobu pneumatik u nichž se vysoké adheze mezi pryží a kordem dosahuje pomosazením oceli a vytvořením chemické vazby mezi mosazí a pryží. Před výrobou vzorků byly výpočtovým modelováním tohoto experimentu určovány vhodné délky spoje L. K přenosu zatížení mezi ocelí a kordové vlákno (ocelový drát nebo lanko)

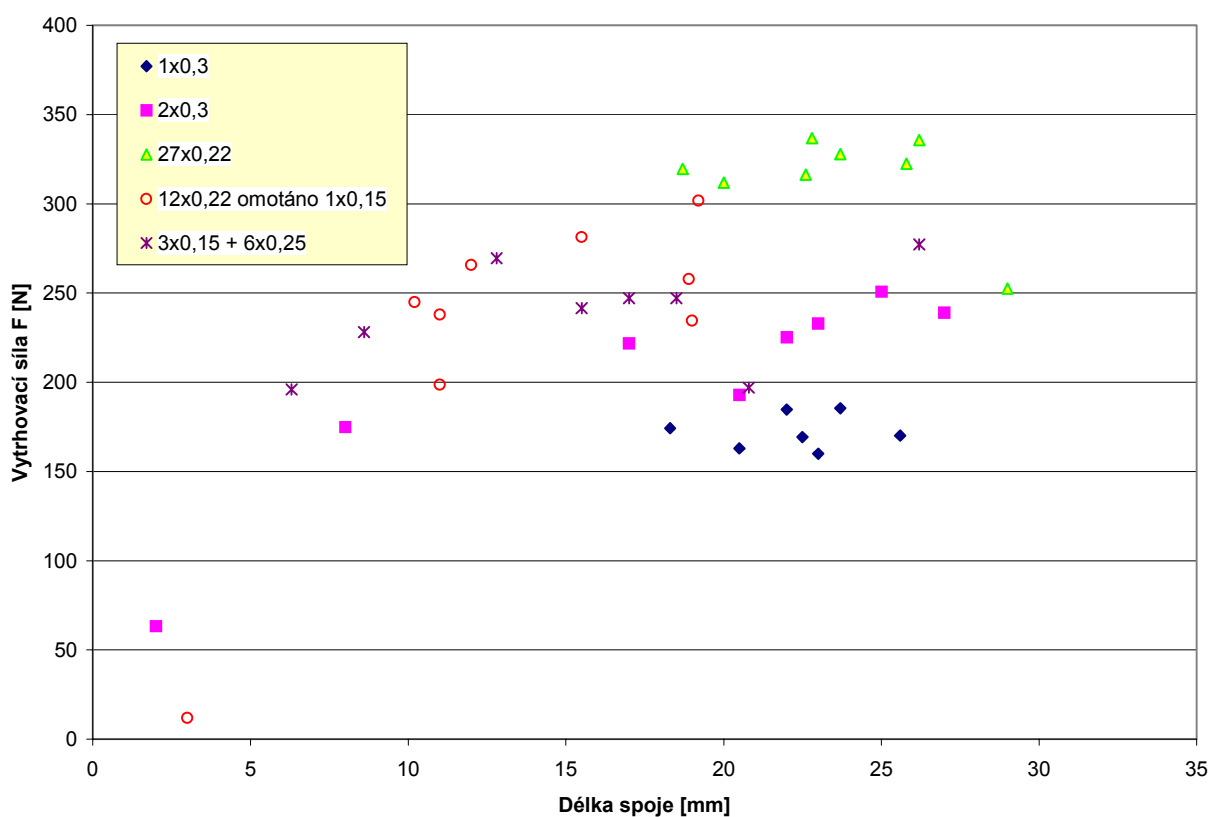
¹Ing. Jiří Burša, PhD., Ing. Michal Reinisch, Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc., VUT FSI Brno, Ústav mechaniky těles, Technická 2, 61669 Brno; tel.: +420.5.41142868, fax: +420.5.41142876; E-Mail: bursa@umtn.fme.vutbr.cz.

²Prof. Ing. Františka Pešlová, CSc., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta J. Pernera, Slovanská 452, 56002 Česká Třebová; tel.: +420.465.533006



Obr. 1: Vzorky pro měření vytrhovací síly

Závislost vytrhovací síly na délce zavulkanizovaného spoje a provedení ocelového kordu



Obr.2: Výsledky experimentů

pryží dochází v poměrně krátké části spoje poblíž konce vlákna. Výsledky výpočtového modelování ukázaly, že pro délky větší než 10 mm se již napjatost v okolí konce vlákna významně nemění. Pro experimentální ověření této skutečnosti byly navrženy vzorky o délkách spoje $L = 5, 10$ a 20 mm. Bohužel praktické problémy s fixací vláken při výrobě vzorků způsobily, že tyto délky nebyly dodrženy a musely být zjišťovány dodatečně po destrukci vzorků. Výsledky experimentů jsou vyneseny v grafu na obr. 2, základní parametry použitých ocelových vláken a střední hodnoty pro jednotlivé série uvádí tabulka 1. Analýza těchto výsledků umožňuje vyslovení následujících závěrů:

- Pro délky spoje $L > 10$ mm nelze pozorovat statisticky významnou závislost mezi délkou zavulkanizování a velikostí vytrhovací síly. Tato skutečnost je ve shodě s výsledky výpočtového modelování.
- Pro délky menší než 10 mm je zjevný výrazný pokles vytrhovací síly, avšak pro kvantifikaci závislosti nebyl počet těchto vzorků dostatečný.
- Zvýšení vytrhovací síly u lanek oproti drátu je podstatně nižší než odpovídá zvětšení obvodu lanka. Tento fakt je možné vysvětlit omezeným zatečením pryže mezi prameny lanka, nebo zanedbatelnou únosností takto tenké vrstvy pryže. Ke kvantifikaci tohoto vlivu však bude rovněž nutné provést další sérii experimentů. Ze zjištěných výsledků lze konstatovat, že tento nárůst vytrhovací síly odpovídá zhruba situaci, kdy by se pouze 40-80% obvodu lanka účastnilo přenosu zatížení mezi lankem a pryží.
- Vyhodnocení vzorků ukázalo, že podle předpokladů k iniciaci trhliny dochází na hraně konce drátu, kde je maximální koncentrace napětí. Trhlina se pak šíří podél vlákna až k okraji vzorku.

Tabulka 1: Typy kordových vláken použité pro měření vytrhovací síly

Pořad. číslo série	Počet drátů x průměr [mm]	Příčný průřez vlákna [mm ²]	Celkový průměr vlákna [mm]	Obvod vlákna [mm]	Střední délka spoje [mm]	Střední hodnota vytrhovací síly [N]	Síla na jednotku obvodu [N/mm]
1	1 x 0,3	0,07	0,3	0,94	22,2	175	186
2	2 x 0,3	0,14		1,54	22,4	227*)	147
3	27 x 0,22, omotáno 1x0,15	1,026	1,35	4,24	23,6	315	74
4	12 x 0,22, omotáno 1x0,15	0,456	0,85	2,67	17,3	268*)	100
5	3 x 0,15 + 6 x 0,25	0,348	0,83	2,60	18,5	241*)	93

*) V této střední hodnotě nejsou započítány vzorky s výrazně menší délkou spoje.

2.2 Posouzení vlivu vrubu

Experimentálně byl vyšetřován **vliv vrubů na pevnost pryže v tahu**. Zkoušky byly prováděny na normalizovaných plochých vzorcích o příčném průřezu 5,8 x 2,75 mm s kruhovým otvorem průměru od 0mm (propíchnutí) do 2mm. Pokles síly při přetržení vlivem otvoru oproti vzorku bez otvoru činil 25 – 35 %. Na poklesu síly se však u větších průměrů otvoru významně podílí zmenšení příčného průřezu, takže pro porovnání je nutné použít hodnotu smluvního nominálního napětí ve vzorku, tedy sílu vztaženou na příčný průřez vzorku ve výchozím nedeformovaném stavu, ale zmenšený o plochu otvoru. Hodnota tohoto napětí klesá se zmenšováním poloměru otvoru a pro minimální průměr otvoru činí cca 70% meze pevnosti plného vzorku. Podobné výsledky byly získány i s oboustranným vrubem tvaru "U" nebo ostré trhliny. Lze tedy konstatovat, že v porovnání s běžnými strojírenskými materiály je **pryž jen málo citlivá na konstrukční vruby**. Vysvětlení je pravděpodobně ve velkých deformacích pryže (stovky procent), takže poloměr zaoblení v kořeni vrubu v okamžiku přetržení je vždy značně velký a málo závislý na původním poloměru vrubu.

2.3 Vlastnosti použité oceli

U vzorků a součástí z kompozitu "pryž-ocelové lanko" namáhaných ohybem dochází ke značným deformacím, u nichž nelze vyloučit překročení meze pružnosti **použité oceli** (označované HT). Pak je pro výpočtové modelování napjatosti a deformace třeba znát i její **závislost napětí-přetvoření**, nejen základní elastické konstanty. Tuto závislost se nám nepodařilo získat a k dispozici jsme měli pouze drátky používané při výrobě pneumatik. Proto jsme místo standardních zkoušek tahem provedli aspoň orientační zkoušky na těchto drátcích ($\varnothing 0,3$ mm), ze kterých vyplynulo následující:

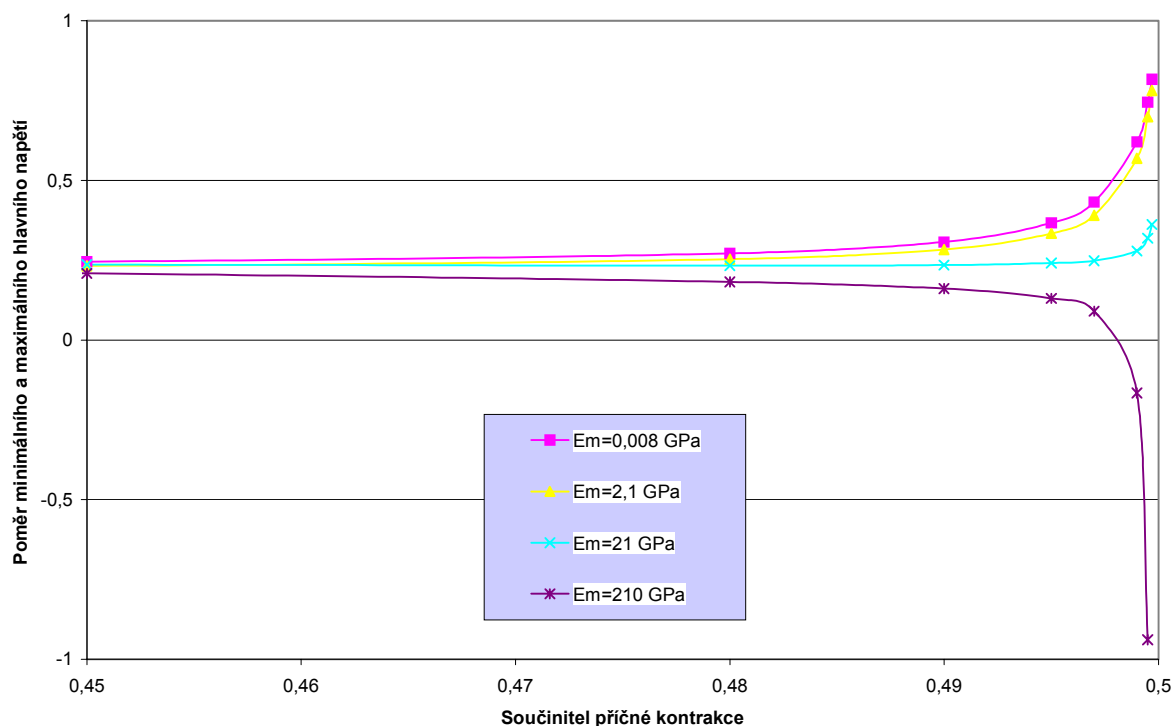
- Modul pružnosti byl naměřen $183,5 \pm 1$ GPa.
- Mez $R_{p0,2}$ této oceli přesahuje 2500 MPa.

Mez pevnosti nelze tímto způsobem určit. U části vzorků došlo k přetržení před dosažením hodnoty $R_{p0,2}$, ale podle očekávání vždy v upínacích čelistech, kde nelze zajistit jednoosou napjatost. K přetržení vzorků přitom docházelo při nominálních hodnotách nominálního napětí blízkých $R_{p0,2}$, nejnižší zjištěná hodnota byla 2400 MPa. Vzhledem k charakteru napjatosti neodpovídají tyto hodnoty mezi pevnosti materiálu, která je zcela jistě vyšší.

Na základě uvedených orientačních zkoušek nelze stanovit potřebné závislosti napětí-přetvoření oceli HT, lze však aspoň konstatovat, že při napětích menších než 2500 MPa (což odpovídá přetvořením přesahujícím jedno procento) je **lineárně elastický model chování této oceli vyhovující**.

3. ANALÝZA VÝSLEDKŮ VÝPOČTOVÉHO MODELOVÁNÍ

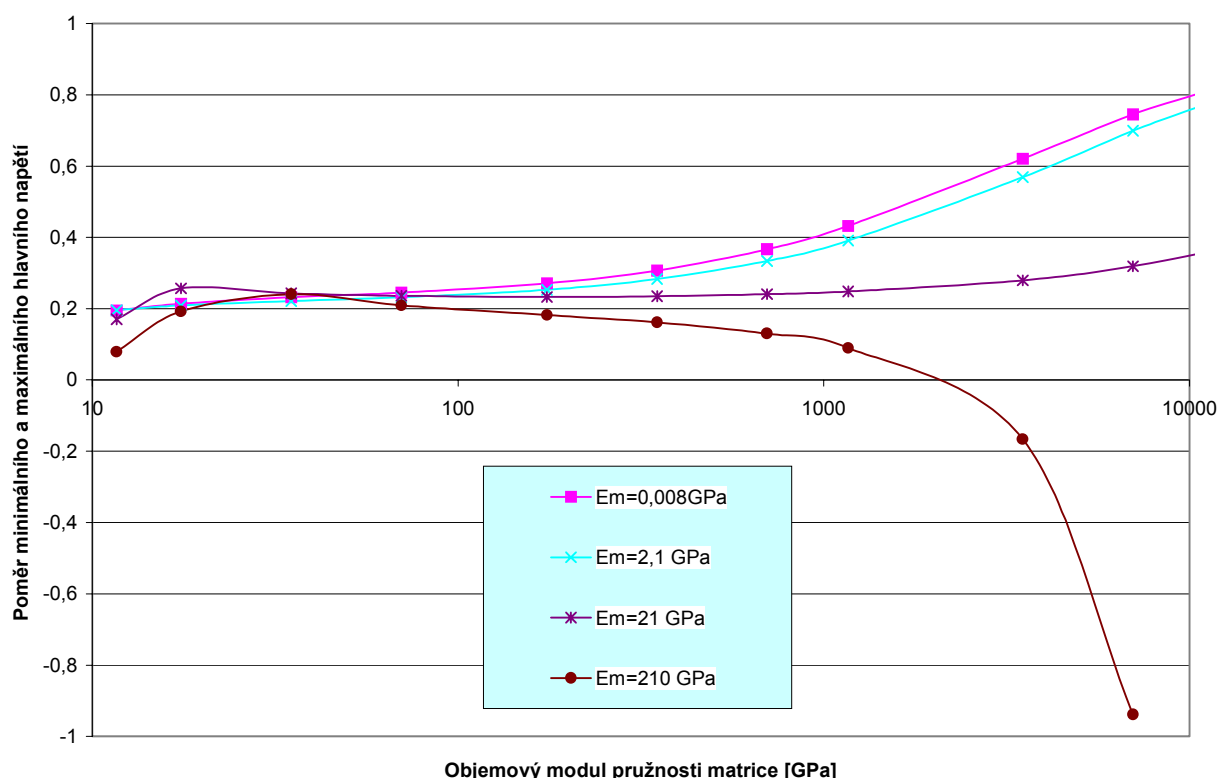
Pro určení napjatosti a deformace ve vzorku byly experimenty modelovány numericky pomocí programového systému MKP ANSYS. Přitom bylo zjištěno, že vypočtená napjatost v gumě v okolí konce drátu, kde dochází k nejvyšší koncentraci napětí, se blíží **trojosé rovnoměrné tahové napjatosti**. Takováto napjatost nebyla podle dostupných informací dosud u krátkovláknových kompozitů zjištěna a u klasických strojírenských materiálů je považována za velmi nebezpečnou, protože významně zvyšuje sklon materiálu k porušení křehkým lomem. Proto byly hledány veličiny, které vyvolávají vznik tohoto typu napjatosti. K tomu účelu byla provedena řada testovacích výpočtů, při nichž byly měněny elastické parametry matrice při konstantních parametrech vláken (modul pružnosti 210 GPa a Poissonovo číslo 0,3). K jejímu hodnocení byl zaveden **součinitel rovnoměrnosti napětí** σ_3/σ_1 , tedy poměr nejmenšího a největšího hlavního napětí v daném bodě. Výsledky jsou graficky zpracovány na obr. 3.



Obr.3: Závislost součinitele rovnoměrnosti napětí na Poissonově čísle pro různé moduly pružnosti matrice E_m a konstantní modul pružnosti vláken $E_f=210$ GPa.

Na rozdíl od lineárně elastických materiálů se při výpočtech ukázal **významný vliv velikosti zatížení**. Proto jsou všechny výsledky uváděny pro stejnou relativní velikost zatížení, pro niž nominální napětí v ocelovém vlákně dosahuje asi 50% hodnoty modulu pružnosti matrice. Z výsledků lze učinit následující závěry:

- Rozhodujícím faktorem pro nárůst součinitele rovnoměrnosti je nestlačitelnost matrice. Až při hodnotách Poissonova čísla $\mu > 0,49$ dochází k výraznému nárůstu tohoto součinitele, který se pak blíží hodnotě 1.
- K nárůstu hodnoty σ_3/σ_1 dochází pouze u materiálů s poměrem modulů pružnosti vlákna a matrice aspoň dvou řádů. Proto nebyl tento jev zjištěn u běžných krátkovláknových kompozitů, u nichž se tato kombinace vlastností obvykle nevyskytuje.
- Součinitel rovnoměrnosti napětí určený výpočtem dosahoval maximální hodnoty cca 0,85, přičemž s rostoucím zatížením hodnota tohoto součinitele narůstá. U velmi poddajných matic, kde nominální napětí ve vlákně může i několikanásobně přesáhnout hodnotu modulu pružnosti matrice, lze tedy v pryži v okolí konce vlákna očekávat ještě rovnoměrnější napjatost. Výpočtově se vyšší hodnoty součinitele rovnoměrnosti napětí zatím nepodařilo potvrdit, protože vznikají problémy s konvergencí výpočtu při vysokých hodnotách zatížení a vysokých hodnotách Poissonova čísla.
- Pro téměř nestlačitelný materiál vede i malá změna μ ke značným změnám napjatosti a úloha je tím špatně podmíněná. Proto je vhodnější materiálovou charakteristikou objemový modul pružnosti K .



Obr.4: Závislost součinitele rovnoměrnosti napětí na objemovém modulu pružnosti a Youngově modulu pružnosti matrice

Pokud přepočítáme Poissonovo číslo matrice na její objemový modul pružnosti podle známého vztahu

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}$$

pak je možné výsledky z obr. 3 zpracovat do podoby grafu na obr. 4.

Ukazuje se, že k výraznému zvýšení součinitele σ_3/σ_1 dochází pouze tehdy, jestliže matrice přes svůj výrazně nižší modul pružnosti v tahu (aspoň o dva řády) má objemový modul pružnosti vyšší než vlákna (pro ocel $K=175$ GPa). Pro věrohodné výpočtové modelování napjatosti v kompozitu pryž-ocel není proto možné se spokojit s konstatováním, že pryž je objemově téměř nestlačitelná. To je sice pravda v porovnání s jejím modulem pružnosti v tahu, ale zcela jinak může situace vypadat při porovnání s elastickými konstantami oceli u kompozitu pryž-ocelové vlákno. Určování Poissonova čísla při tahové zkoušce nemá dostatečnou přesnost. Má-li se dosáhnout věrohodného výpočtového modelování napjatosti v soustavě pryž-ocel, je třeba experimentálně určovat objemový modul pružnosti pryže.

4. ZÁVĚR

- Provedené experimenty ukázaly, že mezní síla vytržení ocelového vlákna z pryže závisí na délce spoje pouze pro malé délky spoje a u lanka je výrazně nižší než u drátu srovnatelných rozměrů.
- Výpočtovým modelováním experimentu bylo zjištěno, že v oblasti koncentrace napětí v pryži poblíž konce drátu vzniká napjatost velmi blízká **trojosé rovnoměrné tahové napjatosti**. Analýza ukázala, že k tomu dochází u krátkovláknového kompozitu tehdy, jestliže Youngův modul pružnosti matrice je o několik řádů nižší než vláken, a přitom objemový modul pružnosti matrice je oproti vláknům naopak vyšší. Z tohoto důvodu je objemový modul pružnosti pryže významným faktorem ovlivňujícím věrohodnost výsledků výpočtového modelování napjatosti v kompozitu pryž-ocel.
- Nevyřešenou otázkou pro budoucnost zůstává posuzování mezních stavů, jejichž podmínky nejsou u pryže dosud dostatečně propracovány, takže není možno vliv víceosé napjatosti na mezní stavy spolehlivě hodnotit.

5. LITERATURA

- [1] Burša J., Pešlová F., Janíček P.: Evaluation of fatigue tests of fiber composites undergoing large deformations. Conference Engineering mechanics 2000, Svratka, Vol. IV, pp.75-80.
- [2] MacLaughlin T.F., Barker R.M.: Effect of Modulus Ratio on Stress Near a Discontinuous Fiber. Experimental Mechanics, April 1972, pp. 178-183.
- [3] Agarwal B.D., Bansal R.K.: Plastic Analysis of Fibre Interactions in Discontinuous Fibre Composites. Fibre Science and Technology, Applied Science Publishers Ltd., England, 1977, 10., pp. 281-297.

Práce byla provedena v rámci Výzkumného záměru MŠMT č. CEZ:322/98:262100001