

KONEČNĚ-PRVKOVÝ MODEL BAMBUSOVÉHO ČLÁNKU (*Phyllostachys* sp.) A JEHO SROVNÁNÍ S EXPERIMENTEM NA DVOU MECHANICKÝCH ZKOUŠKÁCH

V. Sebera, J. Tippner, P. Horáček, A. Dejmal, M. Beníček

Došlo: 14. prosince 2009

Abstract

SEBERA, V., TIPPNER, J., HORÁČEK, P., DEJMAL, A., BENÍČEK, M.: *Finite element model of bamboo culm (Phyllostachys sp.) and its comparison to two experimental tests*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2010, LVIII, No. 1, pp. 153–160

The main goal of the work was to build up a general parametric finite-element model of a bamboo culm in ANSYS computational system. Subsequently the model was compared to a experimental measurements of chosen mechanical properties – three point bending test and brasil test. A parameter being compared was a force, which is necessary to exert to deform a sample on given strain. In this work two parametric models were created. First one is including dividing barrier – diaphragm. A mesh of the culm wall is mapped and is divided into three layers with different orthotropic material models in cylindrical coordinate system with respect to the culm axis. By contrast the barrier – diaphragm – is represented by free mesh with isotropic material model. Both FE models are fully parametric and three-dimensional. Hence they are very well utilizable for both further research of the bamboo itself and constructions from it.

bamboo, finite element model, brazil test, three-point bending test

Díky svým vlastnostem, které jsou dány unikátní kompozitní strukturou, je bambus v Asii jedním ze základních stavebních materiálů. Jeho dřevnatělá vlákna obsahují nejen celulózu a lignin, ale až 5 % křemičitanů. Ty jsou uloženy zejména ve sklerenchymatických buňkách a dodávají bambusu jeho vysokou tvrdost. Vysoká tvrdost a pevnost bambusu umožňuje jeho využití na armatury do betonu místo oceli (Yu et al., 2003).

Bambusové stéblo svou stavbou splňuje všechny požadavky na fyzikální vlastnosti vynikajícího stavebního materiálu. Je kulaté, lehké, duté a rozdělené přepážkami, je také vodoodpudivé a snese značné namáhání. Díky unikátním vlastnostem, odolnosti, snadné dostupnosti a také rychlé obnovitelnosti se bambus jeví jako ideální přírodní materiál splňující jak technické požadavky, tak i ekologické a ekonomické aspekty (Chung, Yu, 2002).

Stéblo bambusu má jedinečnou strukturu a výstavbový princip. Z bionického pohledu na strukturu bambusového stonku je patrné, že přírodní

principy, v tomto případě mechanické, se zejména odrazily v optimalizaci pružnostně-pevnostních vlastností jednotlivých vrstev stěny bambusu v rámci jeho průřezu. Materiály jako je bambus tak svou stavbou spadají do tzv. FGM materiálů (Functionally Graded Materials), které se vyznačují plynulými přechody „inženýrských“ parametrů v mikrostruktuře a/nebo celkovém uspořádání (Bruck, 2002).

Cílem práce bylo vytvoření jednoduchého numerického (konečně-prvkového) modelu struktury bambusového stonku (*Phyllostachys* sp.) a jeho rámcová verifikace na základě provedení základních experimentů – tříbodého ohybu a tzv. „brazílské“ zkoušky. Ověřený jednoduchý model bude základem pro složitější analýzy sledující uplatnění stonku bambusu v konkrétních situacích. Numerické modelování pak v širším slova smyslu umožňuje rozvinout i alternativní scénáře dané přírodní struktury, tzv. „What If“ konstrukce, např. porovnání částí stébel bez přepážky s přepážkou, s různou skladbou stěny apod.

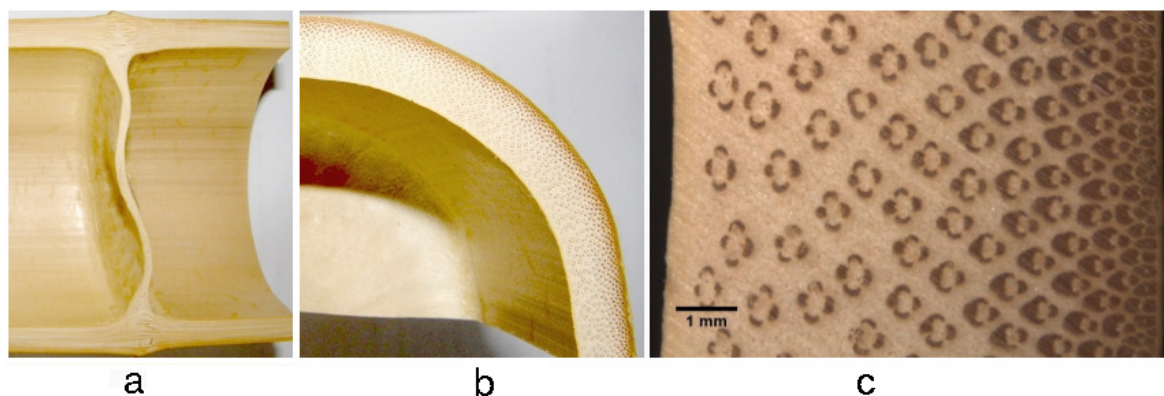
MATERIÁLY A METODIKA

Pro zajištění vstupních parametrů numerického modelu byl bambusový článek rozříznut a byly měřeny základní rozměry, řezy viz Obr. 1. Z literatury (Silva et al., 2006; Obataya et al., 2007) i vlastních měření konkrétního stonku vyplývá, že stěnu bambusu je vhodné uvažovat z několika vrstev lišících se materiálovými vlastnostmi. V představeném modelu byla uvažována stěna stébla bambusu složená ze tří vrstev. Z důvodu obecné použitelnosti modelů v dalším výzkumu byl vytvořen parametrický model umožňující snadnou změnu několika parametrů řešit změny dimenze bambusových stébel a současně snadné změny materiálového modelu každé vrstvy v rámci stěny bambusového stébla.

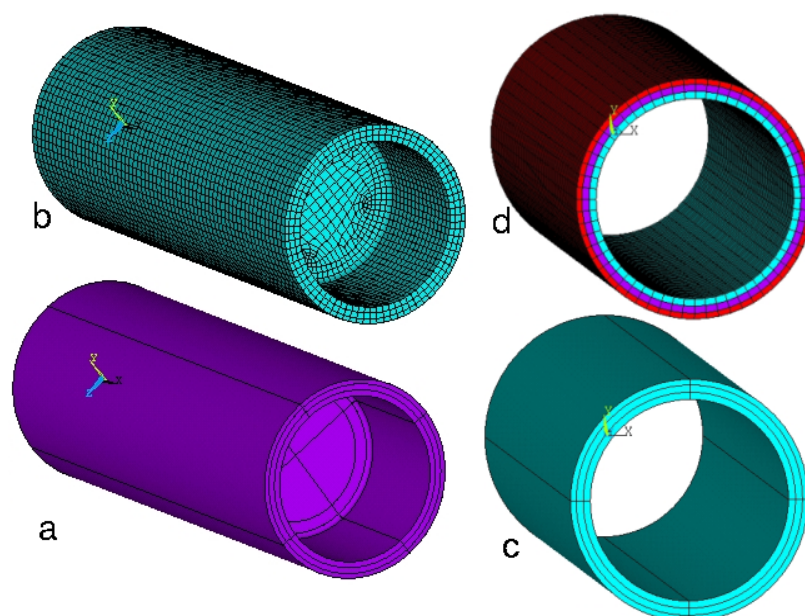
Pro potřeby srovnání numerického modelu s experimenty byly vytvořeny dva numerické modely

části bambusového stébla – model s kolenem (nodem) obsahující dělicí přepážku, viz Obr. 2 a) a b), a model bez přepážky (pouze internodium), viz Obr. 2 c) a d). První model byl vytvořen s využitím rotační symetrie nejprve ve dvourozměrném prostoru s použitím rovinných prvků, poté následnou rotací za současného síťování pomocí kvadratického elementu SOLID95 byl tento model převeden na model třídímní. Dělicí přepážka byla modelována jako rovina. Jediným parametrem dělicí přepážky byl poloměr zaoblení spoje přepážky se stonkem, přičemž bylo zaoblení idealizováno jako dokonale kruhové. Geometrie druhého modelu byla jednodušší (bez přepážky), a proto byl vytvořen pomocí třírozměrných objemových entit a vysítován opět prvkem SOLID95.

Pro diskretizaci oblasti bylo použito mapované síť (stěny bambusového článku) a volné síť (pře-



1: Řez bambusového stonku, a) podélný řez, b) příčný řez, c) detail příčného řezu
1: Bamboo culm cut, a) longitudinal cut, b) cross section, c) cross section in detail



2: Model stonku bambusu: a) geometrický model stonku s přepážkou, b) konečně-prvkový model stonku s přepážkou, c) geom. model mezičlánku, d) konečně-prvkový model mezičlánku s barevně rozlišenými mat. modely jednotlivých vrstev
2: Bamboo culm model: a) geometrical model with diaphragm, b) FE model with diaphragm, c) geometrical model of internodium, d) FE model of internodium with material models of particular layers distinguished in color

pážka) z šestistěnných prvků. Modely jsou plně parametrické a mohou být použity pro široké změny geometrie či fyzikálních podmínek rozměrů a mohou vstupovat do optimalizačních smyček. Jednotlivými parametry modelů jsou: délka článku, tloušťky jednotlivých vrstev stěny, poloměr zaoblení přepážky u stěny, poloměr zaoblení přepážky od okraje článku a tloušťka přepážky. S použitím nástrojů kopírování, translací a Booleovské algebry lze vytvořené modely snadno využít i pro analýzy celých bambusových konstrukcí či složitějších struktur (lešení, armatury v betonu atd.).

Každé z vrstev stěny stébla je přiřazen odlišný materiálový model, který je v případě jednotlivých vrstev stěny bambusu ortotropní v cylindrické soustavě souřadnic se středem v podélné ose stébla. Materiálový model přepážky je izotropní. Použité materiálové vlastnosti jednotlivých vrstev uvádí Tab. I.

Brazilský test byl proveden ve dvou variantách – s dělicí přepážkou a bez přepážky. Ze stonku bambusu byly vyřezány segmenty o délce 30 mm a průměru 31 mm (aritmetický průměr ze všech vzorků), a poté byly podrobeny tlaku ve směru kolmém k ose stonku na univerzálním zkušebním stroji ZWICK ZH050 (Obr. 3 vlevo). Snímány byly síla a posunutí příčnicku stroje během standardního testu. Okrajové podmínky numerického modelu spočívají v aplikaci stupně volnosti posunutí o velikosti 2 mm ve směru působící síly na horní řadě uzlů při současném vá-

zání stupňů volnosti posunutí těchto uzlů ve směru osy X. Zatížení numerického modelu bylo rozděleno do 41 kroků. Ukotvení modelu vzorku bylo provedeno vázáním všech relevantních stupňů volnosti spodní řady uzlů. Okrajové podmínky znázorňuje Obr. 3. Numerický model obsahuje 5 800 konečných prvků a 28 000 uzlů.

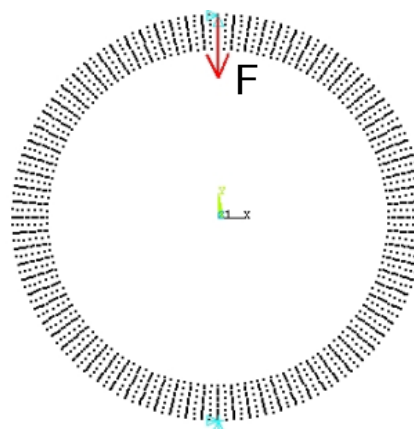
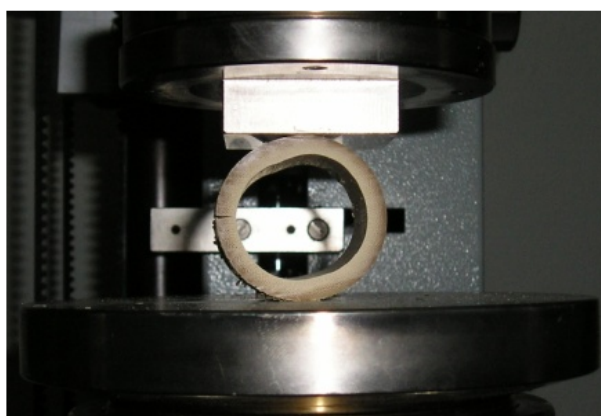
Dalším simulovaným případem byla zkouška části stébla o délce 300 mm a průměru přibližně 15 mm ve standardním tříbodém ohybu. Experiment byl proveden na shodném zkušebním zařízení s odpovídajícími přípravky. Testovány byly vzorky bez nodia a s nodiem umístěným ve středu délky. Deklarace okrajových podmínek v numerickém modelu spočívala ve vázání všech stupňů volnosti v místech spodních podpor a zavedení svislého posunutí (ve směru osy Y) na působící horní podpoře, schematicky viz Obr. 4. Detail geometrie a sítě modelu ilustruje Obr 5. Z numerické analýzy byl vypočten součet všech reakčních sil na podporách v daném kroku řešení jako odezva na zadané posunutí.

Počet elementů (uzlů) v modelu bez přepážky je 7 200 (34 000), v modelu s přepážkou je to 30 000 (145 000). Pro úsporu výpočetního času byl model uvažován jako symetrický, tzn. výpočet je proveden s polovinou elementů (viz Obr. 5).

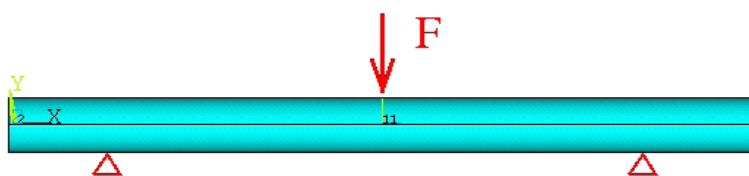
I: Materiálové vlastnosti jednotlivých vrstev stěny bambusového stonku – EX, EY, EZ jsou normálové moduly pružnosti v jednotlivých směrech (osa Z je souběžná se směrem vláken, EX je v radiálním směru, EY je v tangenciálním směru); PRXY, PRXZ, PRYZ jsou Poissonova čísla; GXY, GYZ, GXZ jsou smykové moduly pružnosti

I: Material properties of particular layers of the bamboo culm – EX, EY, EZ – normal elastic moduli (Z axis is parallel with culm axis, EX is a radial direction, EY is a tangential direction); PRXY, PRXZ and PRYZ are Poisson's ratios; GXY, GYZ, GXZ are shear elastic moduli

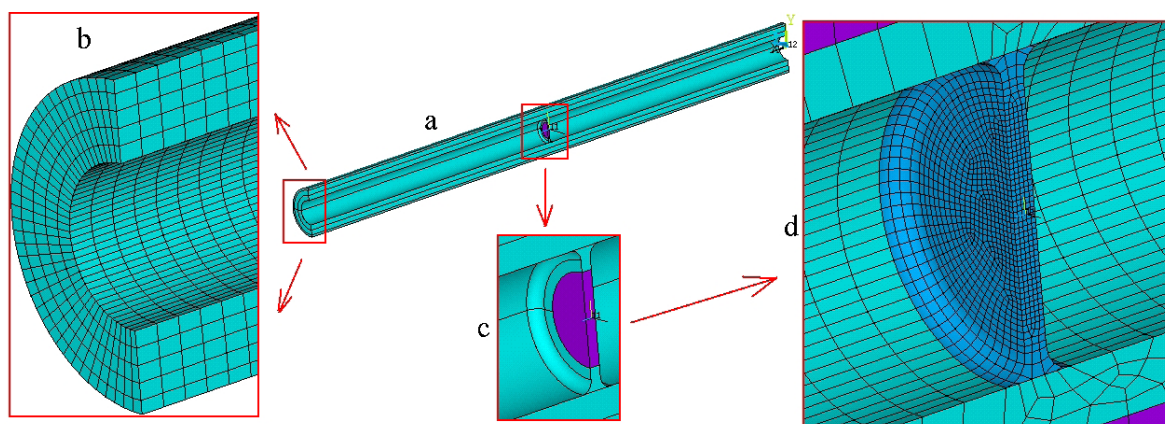
Materiálové vlastnosti bambusu									
	EX [MPa]	EY [MPa]	EZ [MPa]	PRXY [-]	PRXZ [-]	PRYZ [-]	GXY [MPa]	GYZ [MPa]	GXZ [MPa]
Vnitřní vrstva	8 000	7 000	14 000	0.28	0.27	0.3	400	300	500
Střední vrstva	10 000	8 000	18 000	0.28	0.27	0.3	500	600	700
Vnější vrstva	11 000	10 000	24 000	0.27	0.26	0.29	700	800	900
Přepážka		3 000			0.25			-	



3: Brazilský test – okrajové podmínky ve zkušebním stroji (vlevo) a v systému ANSYS
3: Brazil test – boundary conditions in the experiment (left) and in the ANSYS



4: Simulace zkoušky tříbodým ohybem – okrajové podmínky numerického modelu
4: Simulation of the three-point bending test – boundary conditions of the numerical model



5: Geometrický a konečně-prvkový model celého bambusového stonku pro ohybový test, a) celkový pohled, b) detail mapované sítě, c) detail přepážky, d) konečně-prvková síť

5: Geometrical and FE model of the bamboo culm for three-point bending test, a) global look, b) mapped mesh in detail, c) diaphragm in detail, d) FE mesh

II: Výsledky brazilského testu – aritmetické průměry, směrodatné odchylky (v závorce) a statistická významnost rozdílů středních hodnot (- statisticky nevýznamný rozdíl, * statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 95%, ** statisticky velmi významný rozdíl na hladině významnosti 99%, *** statisticky velmi významný rozdíl na hladině významnosti 99,9%)

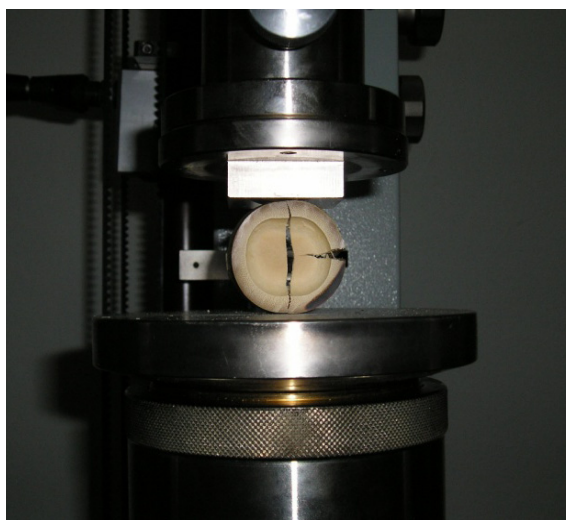
II: Brazil test results – means, standard deviations (in parentheses), and statistical significance of mean values differences (- statistically insignificant difference, * 95% level of statistical significance, ** 99% level of statistical significance, *** 99,9% level of statistical significance)

		Internodium	Nodium s přepážkou	t-test
n	[-]	20	6	-
G	[kg.m ⁻³]	1 064 (75.5)	1 315 (97.5)	***0.0001
F	[N]	546 (168.3)	1 960 (276.5)	***0.0001
u	[mm]	1.3 (0.3)	1.7 (0.3)	**0.007

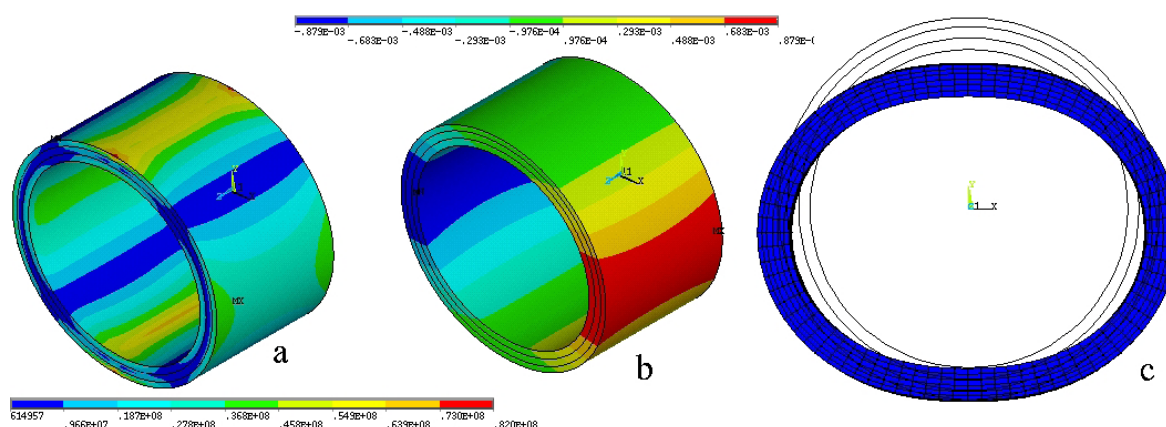
VÝSLEDKY

Experiment prokázal významný vliv kolene během zatížení při brazilském testu. Vzorky s kolenem byly schopny přenášet v příčném směru průměrně 3,6x větší sílu (1 960 N) než vzorky bez přepážky (546 N). Přesto, že rozdíl odpovídajících přetvoření byl také statisticky významný, nárůst deformovatelnosti se u vzorků s nodiem nejeví jako příliš významný, viz tab. II, zde n je počet měření, G je hustota, F síla při porušení, u posunutí odpovídající F . V závorkách jsou uváděny směrodatné odchylky. Charakter porušení zkušebních těles je zřejmý z Obr. 6. Zejména přítomnost nodia vede ke zpevnění, což má za následek křehké chování se vznikem lomu.

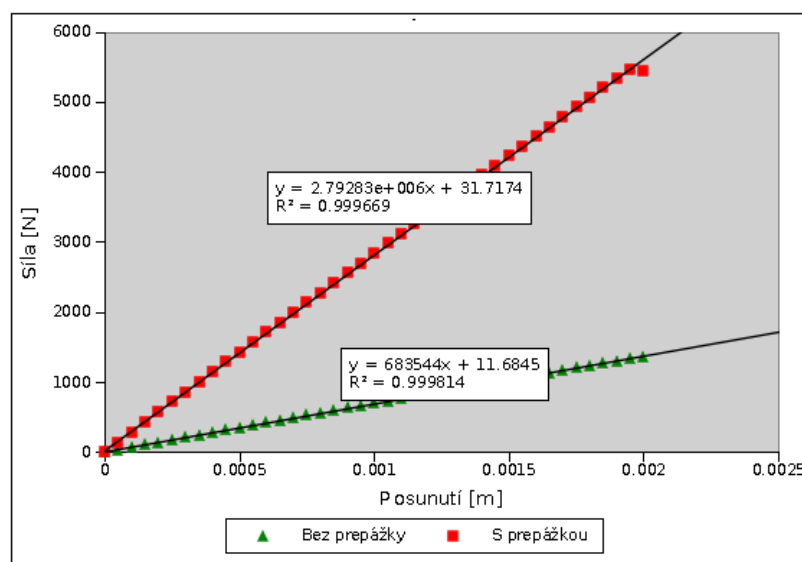
Zpracování výsledků numerické analýzy brazilského testu sestávalo ze zjištění stavu napjatosti v článku bambusu, viz Obr. 7, a ze stanovení tuhosti zjištěním směrnice silového přírůstku k da-



6: Porušení vzorku nodia během měření brazilským testem
6: Fracture of the bamboo specimen during the Brazil test



7: Výsledky simulace brazilského testu, a) ekvivalentní napětí von Misesa, b) posunutí X, c) deformace průřezu (měřítko deformací 5:1)
 7: Results of the Brazil test simulation, a) von Mises stress, b) displacement in X-axis direction, c) cross section deformation (scale 5:1)



8: Závislost celkových reakčních sil na posunutí sestavená z výsledků numerické analýzy
 8: Dependence of the total reaction forces on displacement (numerical analysis)

němu posunutí (2 mm), viz Obr. 8. Tento vypočtený pracovní diagram dokonale pružné oblasti zatížení byl porovnáván s experimentálním měřením bambusového článku při brazilském testu. Z výsledků, zejména posouzení posunutí uzlů modelu v jednotlivých směrech, lze usuzovat na správné určení okrajových podmínek řešení. Výsledky rozložení napětí odpovídají všeobecným předpokladům o chování průřezu stonku a odpovídají také chování během první fáze zatížení segmentů na zkušební stroji. Výsledky modelu lze v tomto ohledu považovat za správné a odpovídající zvolenému materiálovému modelu stěny stonku.

Pro další vyhodnocení výsledků modelu byl vytvořen skript v jazyce APDL (Ansys Parametric Design Language) pro zjištění odezvy struktury v místech, kde byl model kotven. Vypočten byl součet reakčních sil ve směru osy Y (směr zatížení) z jednotlivých ukotvených uzlů a to v každém zatěžovacím kroku analýzy, tj. kroku odpovídajícím požadované

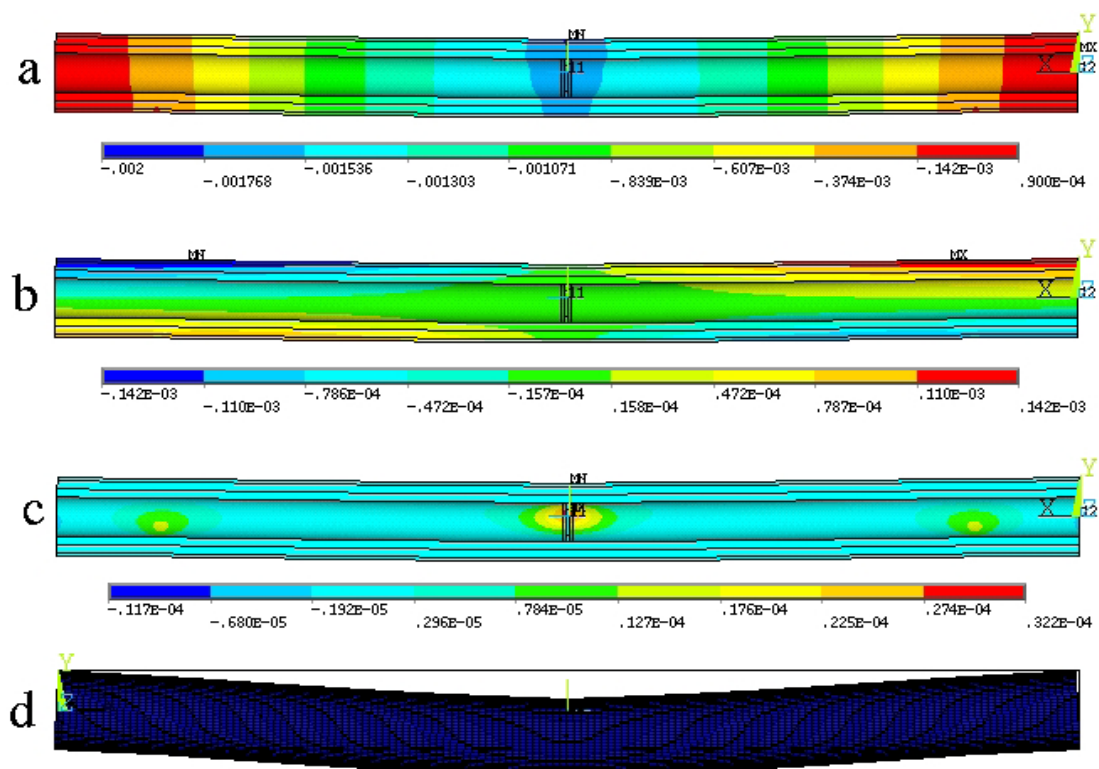
deformaci průřezu. Z těchto výsledků byl sestaven diagram závislosti síly na dosaženém posunutí a to pro oba numerické modely, viz Obr. 8. Z výsledků je patrný vývoj síly potřebné pro požadovanou deformaci v případě nodia a internodia. Zřejmý je též výrazný rozdíl v tuhostech nodií a internodií.

V případě experimentálního ověření stébel tříbodým ohybem se vliv přepážky neprokázal. Jak mez pevnosti, tak i modul pružnosti se u vzorků s nodiem a bez nodia statisticky významně neliší, viz Tab. III, kde: n je počet měření, σ_p mez pevnosti a E je modul pružnosti. Statické moduly pružnosti se pohybovaly v intervalu 11 000–13 000 MPa. Maximální síla odpovídající mezi pevnosti u stébla byla průměrně 567 N u stébla bez nodia a 592 N u stébla s nodiem. Odpovídající maximální průhyb se pohyboval v okolí 2,5 mm. Statisticky významný rozdíl mezi deformovatelností stébla s nodií a bez nodií zjištěn nebyl. Rozdíl v průměrných hodnotách byl pouze 3–5 % ve prospěch stébla s nodií.

III: Výsledky ohybové zkoušky – aritmetické průměry, směrodatné odchylky (v závorce) a statistická významnost rozdílnosti středních hodnot (- statisticky nevýznamný rozdíl)

III: Three-bending test results – means, standard deviations (in parentheses) and level of statistical significance (- statistically insignificant difference)

		Internodium	Nodium s přepážkou	t-test
n	[-]	15	20	-
σ_p	[MPa]	204 (36.2)	214 (43.1)	-
E	[MPa]	11 066 (4123)	11 443 (3555)	-



9: Výsledky simulace zkoušky tříbodým ohybem: a) posunutí ve směru Y, b) posunutí ve směru X, c) posunutí ve směru Z, d) zobrazení deformovaného a nedeformovaného modelu (měřítko deformace 5:1)

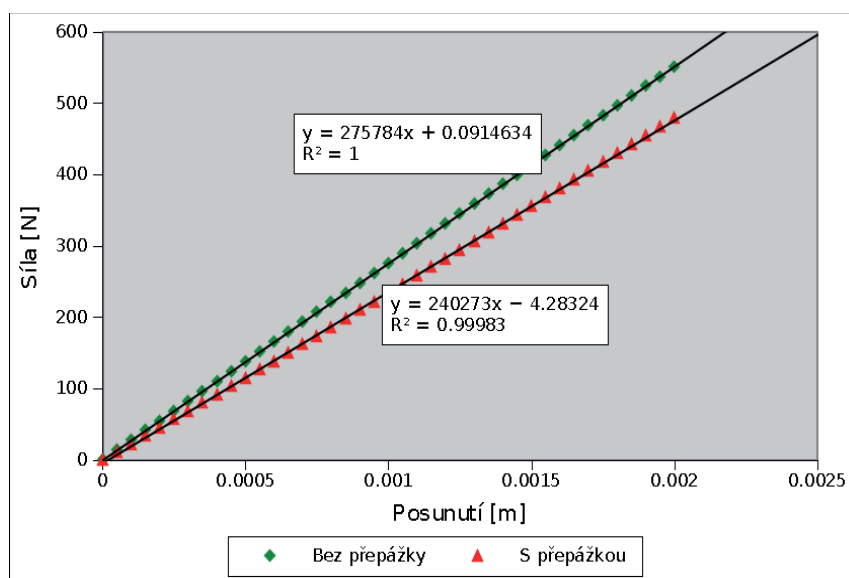
9: Results of the three-point bending test: a) Y-axis displacement, b) X-axis displacement, c) Z-axis displacement, d) deformed and undeformed model (scale 5:1)

Obr. 9 uvádí další grafické výsledky numerické analýzy ohybové zkoušky. Odezvy v posunutích prokazují vhodnost volby skladby stonku a nastavení okrajových podmínek řešení, zaznamenan je vliv podpor odpovídající reálné situaci při experimentu. Z pohledu distribuce posunutí i jejich absolutních hodnot lze modelem poměrně věrně popsat experiment. Analogicky k vyhodnocení simulace brazilského testu bylo provedeno silové vyhodnocení pomocí součtu reakčních sil v ukotvených uzlech a to v každém zátěžovém kroku analýzy. Z výsledků reakcí byl sestaven diagram závislosti síly potřebné na dosažení daného průhybu pro numerický model stébla s přepážkou a bez ní, viz Obr. 10.

Z diagramu na Obr. 10 je patrné, že rozdíl v tuhosti vzorků s přepážkou a bez přepážky je zanedbatelný. Z výsledků numerických simulací vy-

plývá, že vzorek s přepážkou dokonce vykazuje mírně nižší tuhost než vzorek bez přepážky, což je v rozporu s výsledky experimentálních měření, kde byl zaznamenan velmi malý statisticky nevýznamný rozdíl (3–5 %) v tuhostech ve prospěch stébla s přepážkou. Porovnání experimentů s numerickými modely na základě odečtení síly odpovídající hodnotě posunutí 2 mm uvádí Tab. IV. Numerický model se na základě tohoto porovnání experimentům blíží v případě zkoušky tříbodým ohybem, naopak v případě brazilského testu se experiment s numerickým výpočtem rozchází.

Největší shody numerického modelu s experimentem bylo tedy dosaženo v rámci simulace tříbodého ohybu (relat. chyba 0,67–23 %). V tomto případě lze konstatovat, že numerický model je pro tyto způsoby zatížení dostatečně věrohodný. Velká



10: Závislost celkových reakčních sil na posunutí (z numerické analýzy)
 10: Dependence of total reaction forces on displacement (numerical analysis)

IV: Srovnání výsledků experimentu a numerického řešení (relativní odchylky jsou vztahovány k experimentálně zjištěným hodnotám)
 IV: Comparison of results of experiment and numerical solution (relative deviation related to experimental values)

		Experiment		Numerický model	
		Interodium	Nodium s přepážkou	Internodium (rel. chyba)	Nodium s přepážkou (rel. chyba)
Brazilská zkouška	Síla [N]	546	1960	900 (65 %)	4780 (144 %)
Zkouška tříbodým ohybem	Síla [N]	567	592	689 (23 %)	596 (0,67 %)

relativní odchylka byla zaznamenána při porovnání brazilského testu (65–144 %). Tato odchylka je způsobena několika faktory. Během experimentálního hodnocení byla pozorována poměrně velká křehkost vzorků (lom i šíření trhliny) způsobená strukturou samotného materiálu a výskytem přirozených imperfekcí. Numerický model je však dokonale kruhovitý, symetrický a bez imperfekcí. Uvážíme-li, že tlakové zatížení segmentu bambusového stonku v tlaku je blízké zatížení ve vzpěru, blíží se okrajové podmínky a zadání numerické úlohy problémům stabilitním, tedy analýzám, do kterých se určité imperfekce úmyslně zanášejí s cílem absolutní (numerickou) symetrii narušit. Tyto analýzy nebyly předmětem této práce, v dalším výzkumu však mohou ke zpřesnění významně přispět. Pro další zvýšení věrohodnosti modelů by bylo vhodné pracovat s nelineárními materiálovými modely, v tomto stadiu vyloučenými díky nedostatku experimentálních dat pro sestavení modelů jednotlivých vrstev stěny stonku. Představený numerický model také nezahrnuje popis procesu vzniku a šíření trhliny, tedy faktory výrazně ovlivňující chování vzorků během prováděných brazilských zkoušek. Do výsledků numerické analýzy stébla s přepážkou zřejmě zavádí nejistotu i samotný zjednodušený model přepážky.

Další cíle výzkumu vedoucí ke zpřesnění modelu lze proto spatřovat zejména ve zpřesnění popisu vlastností přepážky a nelineárního chování materiálu jednotlivých vrstev stěny stonku na základě experimentů, např. tahové zkoušky jednotlivých vrstev bambusové stěny.

ZÁVĚR

Předmětem práce bylo posouzení vybraných mechanických vlastností přírodního materiálu – bambusu (*Phyllostachys* sp.). Mechanické vlastnosti byly testovány pomocí standardní tříbodé ohybové zkoušky bambusových stébel malých průměrů (přibližně 15 mm) a brazilského testu bambusových článků větších průměrů (průměrně 31 mm). Mechanické zkoušky byly simulovány ve výpočetním systému ANSYS, přičemž experimenty sloužily jako verifikace vzniklých numerických modelů. Z výsledků plyne relativně vysoká shoda experimentů a simulací při tříbodém ohybu (odchylka 0,67–23 %), naopak při brazilském testu bylo dosaženo shody nízké (odchylka 65–144 %). Sestavené konečně-prvkové modely jsou plně parametrizované, což umožňuje jejich využití v dalším výzkumu bambusu.

SOUHRN

Cílem této práce bylo vytvořit základní obecný parametrický konečně-prvkový model stébla bambusu ve výpočetním systému ANSYS. Vytvořený model byl porovnán s experimentálními zkouškami – zkouškou tříbodým ohybem a brazilským testem. Srovnávacím parametrem numerického modelu a experimentu byla síla, kterou je třeba vyvinout pro konkrétní přetvoření. Byly sestaveny dva základní numerické modely. První model zahrnuje dělicí přepážku ve stonku. Stěna stonku je tvořena třemi vrstvami s různými ortotropními materiálovými modely v cylindrické souřadné soustavě s osou v ose stébla. Materiál přepážky je izotropní. Oba modely jsou plně parametrické a třírozměrné a jsou uplatnitelné pro další výzkum chování stonků bambusu či konstrukcí z bambusu.

bambus, konečně-prvkový model, brazilský test, zkouška tříbodým ohybem

Práce vznikla za finanční podpory grantového projektu IGA 46/2008 – Bionický průzkum kreativního využití bambusu. Aplikace bionického potenciálu do designu kompozitních materiálů – výrobků.

LITERATURA

- AMADA, S. et al., 1997: Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo. *Composites Part B* 28B: 13–20
- AMADA, S., LAKES, R. S., 1997: Viscoelastic properties of bamboo. *Journal of Mater Science* 32: 2693–2697, ISSN 0022-2461
- BODIG, J., JAYNE, B. A., 1993.: *Mechanics of woods and woods composites*. Krieger Pub. Co. 712 s. ISBN 0-89464-777-6
- BRUCK, H. A. et al., 2002: The role of mechanics in biological and biologically inspired materials. *Experimental mechanics* 42, No. 4: 361–371 ISSN 0014-4851
- CHUNG, K.F., YU, W. K., 2002: Mechanical properties of structural bamboo for bamboo Scaffoldings. *Engineering Structures* 24 (2002): 429–442: ISSN 0141-0296
- ISO/TC 165: *Laboratory Manual on Testing Methods for Determination of physical and mechanical properties of bamboo*. Technical Committee ISO/TC 165. International Network for Bamboo and Rattan. 2001
- JULES, J. A., 1991: *Mechanical properties of bamboo*. Kluwer Academic Publisher. 134 s., ISBN 0792312600
- LI, X., 2004: Physical, chemical and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. M.Sc. Thesis. Graduate Faculty of the Louisiana State University. Agriculture and Mechanical College. 68 p.
- LO, T. Y., CUI, H. Z., TANG, P. W. C., LEUNG, H. C., 2008: Strength analysis of bamboo by microscopic investigation of bamboo fiber. *Construction and Building Materials* 22: 1532–1535, ISSN 0950-0618
- NOGATA F., TAKAHASHI H.: Intelligent functionally graded materials: bamboo. *Composites Engineering*, Vol. 5, No. 7 (1995): 743-751 ISSN 0961-9526
- OBATAYA, E., KITIN, P., YAMAUCHI, H., 2007: Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. *Wood Science and Technology* 41: 385–400, ISSN 0043-7719
- SILVA, N. E. C., WALTERS, M. C., PAULINO, G. H., 2006: Modeling bamboo as a functionally graded material: lessons for the analysis of affordable materials. *Journal of Materials Science* 41: 6991–7004, ISSN 0022-2461
- YU, W. K., CHUNG, K. F., CHAN, S. L., 2003: Column buckling of structural bamboo. *Engineering Structures* 25: 755–768, ISSN 0141-0296

Adresa

Ing. Václav Sebera, Ing. Jan Tippner, doc. Dr. Ing. Petr Horáček, Ing. Aleš Dejmál, Ph.D., Ing. Bc. Martin Beníček, Ústav nauky o dřevě, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: seberav@gmail.com