

COMPRESSION TEST OF A TIMBER CORE – ANSYS MODEL AND MOIRÉ INTERFEROMETRY EXPERIMENT

M. Micka, J. Minster, P. Václavík*

Summary: *This paper presents results of modelling a non-standard compression test of timber, executed on small diameter cores in a special testing device. The test is a semi destructive method friendly to historic timber. The course of the test is modelled in 3D; the influence of individual input characteristics, and also their scatter, is assessed by means of rank-order sensitivity analysis. The results are correlated with experimental data of core base deformations acquired by moiré interferometry. A combined numerical and experimental approach is used in a method enabling the measured displacements of the loading head of the testing device to be converted into technically usable values characterising basic mechanical properties of the assessed timber.*

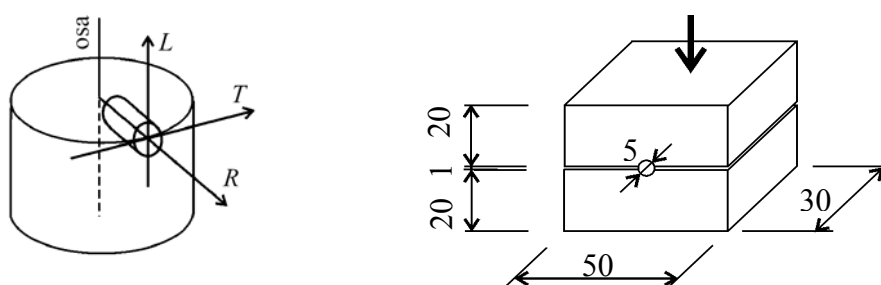
1. Úvod

V souladu s neustále sílícími snahami o ochranu a zachování kulturního dědictví byla v poslední době věnována značná pozornost i historickým dřevěným konstrukcím. K hodnocení stavu těchto konstrukcí a k měření základních mechanických charakteristik historického dřeva in situ byla pro potřeby posouzení a rekonstrukcí použita celá řada různých technik (například Kasal et al. (2003), Drdáký et al. (2005), Minster et al. (2006)). Vzhledem k významu a historické hodnotě sledovaných konstrukcí našly nejširší uplatnění především neinvazivní nedestruktivní nebo semidestruktivní metody, umožňující získat informace o materiálových vlastnostech bez nepřiměřených zásahů do posuzovaného prvku.

Technika zkoumání stavu a vlastností dřeva pomocí jádrových vývrtů je známa již dlouho. Pro potřeby měření pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken ji na vzorcích malých rozměrů použil Kasal (2003). Jde o semidestruktivní metodu. Z dostatečně masivního prvku dřevěné konstrukce je speciálním vrtákem o vnějším průměru 9.5 mm odvrtáno v radiálním materiálovém směru válcové jádro o průměru 5 mm a délce 30 mm (viz obrázek 1) a toto jádro je, náležitě orientováno, zatěžováno tlakem ve směru vláken ve speciálním zkušebním zařízení až do porušení. Hlavními částmi zatěžovacího zařízení jsou dvě konkávní čelisti přenášející zatížení na válcový vzorek. V průběhu zkoušky se měří hodnoty působící tlakové síly a vzájemné posunutí čelistí. Použití této techniky představuje, na rozdíl od požadavků standardních zkoušek na rozměry vzorků pro měření pevnosti dřeva v tlaku, velmi šetrné poškození dřevěných prvků. Výhodou této zkoušky je rovněž skutečnost, že pevnost v tlaku je měřena destruktivním způsobem bez významného oslabení posuzované části.

* Doc. Ing. Michal Micka, CSc., Ing. Jiří Minster, DrSc.: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR; Prosecká 76, 190 00 Praha 9; micka@itam.cas.cz, minster@itam.cas.cz
 Ing. Pavel Václavík: Ústav přístrojové a řídicí techniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6; pavel.vaclavik@fs.cvut.cz

Porovnáním výsledků této zkoušky s výsledky podle normy ASTM (2002) dospěl Kasal (2003) k závěru, že technika jádrových vývrtů malých rozměrů je použitelná k měření pevnosti zdravého dřeva ve směru vláken. Případné odchylky v orientaci ortotropního vzorku vzhledem k působící síle vedou ke konzervativním hodnotám pevnosti. Youngův modul dřeva ve směru vláken nejde touto technikou bezprostředně ze záznamu působící síla – stlačení vzorku určit. Je to dáno zejména skutečností, že jádrové vývrty nejsou po odvrtání přesně válcové (jsou válcovým velmi blízké ale ve skutečnosti jsou mírně konické) a k jejich zatěžování konkávními čelistmi přípravku dochází postupně za nehomogenního stavu deformace. Minster se spolupracovníky (2005) prokázal, že v průběhu zatěžování dochází k rotaci podstav válcového vzorku a směry hlavních normálních deformací nejsou totožné se směrem působení vnější síly.



Obr.1 Orientace vývrtu vzhledem ke směru vláken a umístění vzorku v čelistech

V této práci je pozornost zaměřena na převod informace získané z pracovního diagramu působící síla-stlačení vzorku na použitelné hodnoty Youngova modulu ve směru vláken. K řešení tohoto problému byla použita kombinace modelování průběhu tlakové zkoušky jádrového vývrtu metodou konečných prvků v systému ANSYS a experimentálního měření deformací na podstavě válcového vzorku metodou moirové interferometrie (Václavík & Minster (2001)).

2. Výpočtový model

Po prvotním ověření výpočtu pomocí rovinného modelu (Minster et al. (2005)) byl konečný výpočet proveden ve 3D. Materiál kovových čelistí má materiálové konstanty oceli, tj. $E_o = 210000 \text{ MPa}$ a Poissonovo číslo $\mu = 0,3$. Válcový vzorek byl uvažován jako smrkové dřevo s ortotropními materiálovými vlastnostmi, které byly pro český smrk převzaty z literatury. Orientace os ortotropie je zřejmá z obrázku 1.

Tabulka1. Materiálové vlastnosti smrku

Směr vláken			Radiální směr			Tangenciální směr		
Poissonova čísla		Modul E_L [MPa]	Poissonova čísla		Modul E_R [MPa]	Poissonova čísla		Modul E_T [MPa]
μ_{RL}	μ_{TL}		μ_{TR}	μ_{LR}		μ_{RT}	μ_{LT}	
0.489	0.557	13650	0.990	0.023	789	0.687	0.014	289

Pro ortotropní materiál musí být splněny známé podmínky $((L, T, R) // (x, y, z))$

$$\frac{\mu_{zx}}{E_x} = \frac{\mu_{xz}}{E_z}; \quad \frac{\mu_{yx}}{E_x} = \frac{\mu_{xy}}{E_y}; \quad \frac{\mu_{yz}}{E_z} = \frac{\mu_{zy}}{E_y};$$

$$1 - \mu_{xy}^2 \cdot \frac{E_y}{E_x} - \mu_{yz}^2 \cdot \frac{E_z}{E_y} - \mu_{xz}^2 \cdot \frac{E_z}{E_x} - 2\mu_{xy}\mu_{yz}\mu_{xz} \frac{E_z}{E_x} > 0 \quad (1)$$

Pro uvažované pravděpodobnostní výpočty bylo pomocí programu ANTHILL (Marek et al. (2003)) ověřeno, zda při změně modulů pružnosti o $\pm 20\%$ tabulkové hodnoty a podobně Poissonových čísel o $\pm 10\%$ je pro jejich libovolnou kombinaci splněna druhá z výše uvedených podmínek (1). Jako vstupní proměnné hodnoty byly zavedeny moduly pružnosti a Poissonova čísla a jako výstupní závislá proměnná hodnota levé strany. Výpočet prokázal, že pro všechny uvažované případy je podmínka splněna.

V průběhu testu bylo předpokládáno ideální kinematické a mechanické chování a symetrie řešení vzhledem k rovině zatížení LR . Dřevěný vzorek byl charakterizován jako ortotropní pružně plastický materiál s předpokladem, že vzájemný poměr pružných modulů ve směrech materiálové symetrie (E_L , E_R a E_T) zůstává v průběhu zatížení zachován. Mezi ocelovými čelistmi a dřevěným vzorkem jsou v modelu zavedeny prostorové nebo liniové kontaktní prvky, u kterých se předpokládá nulové tření.

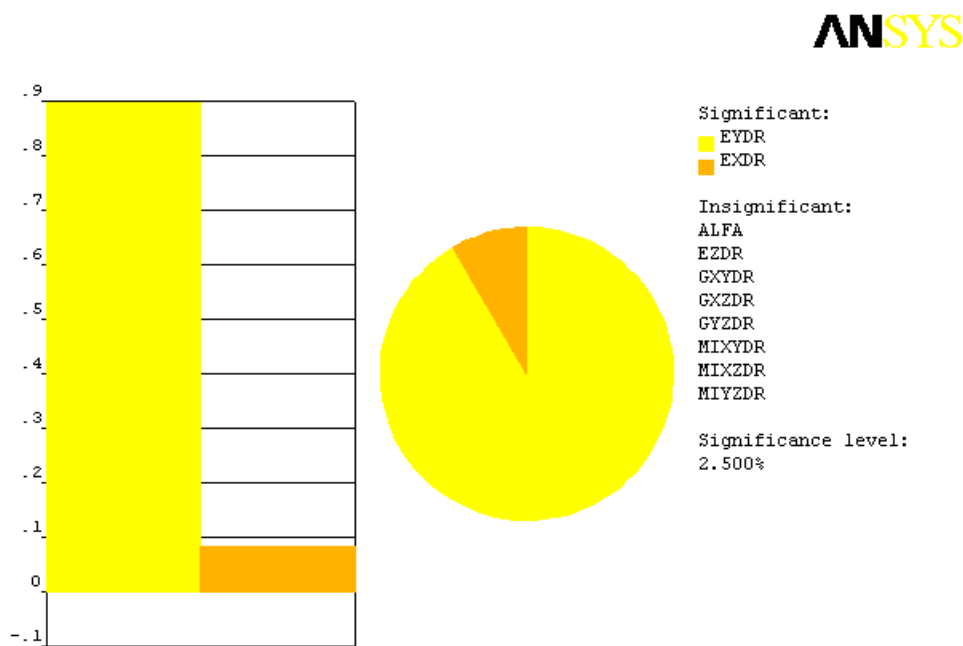
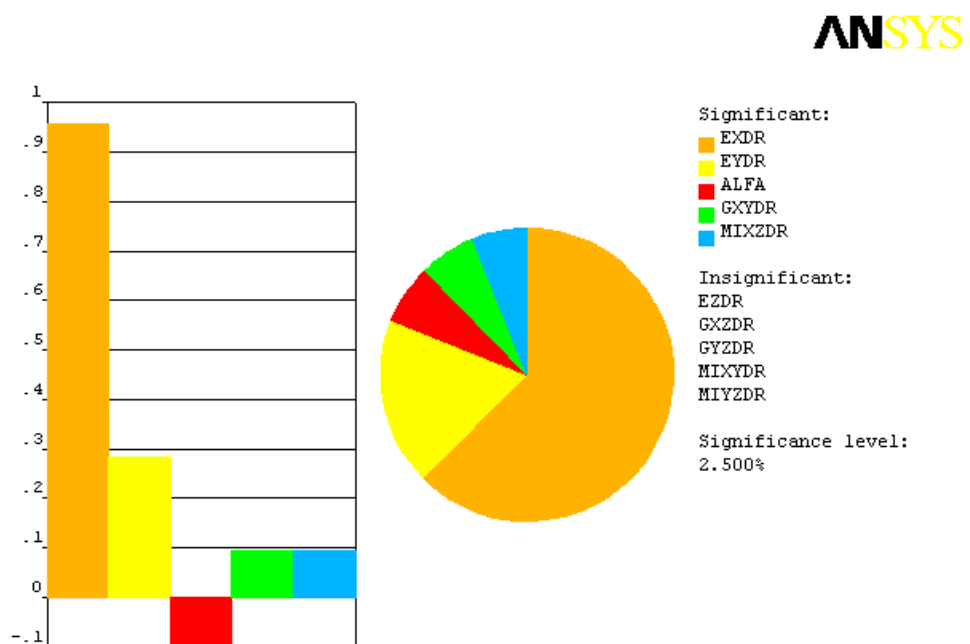
3. Citlivostní analýza

K vyšetření vlivu hodnot jednotlivých materiálových konstant na průběh napětí v příčném průřezu nebo posunutí vzorku ve směru působícího zatížení lze použít pravděpodobnostní výpočet v ANSYSu. Za základní průměrné hodnoty byly přijaty tabulkové materiálové konstanty s předpokladem, že moduly pružnosti se mohou měnit v rozmezí $\pm 20\%$ tabulkové hodnoty a Poissonova čísla v rozmezí $\pm 10\%$. Další vstupní proměnou bylo pootočení α příčného řezu vzorku kolem osy R , které modeluje možnou nesprávnou orientaci ortotropního vzorku vzhledem k rovině zatížení. Distribuční funkce hustoty rozdělení byla uvažována konstantní, tj. všechny hodnoty měly stejnou pravděpodobnost výskytu.

Tabulka 2. Hodnoty vstupních parametrů výpočtu

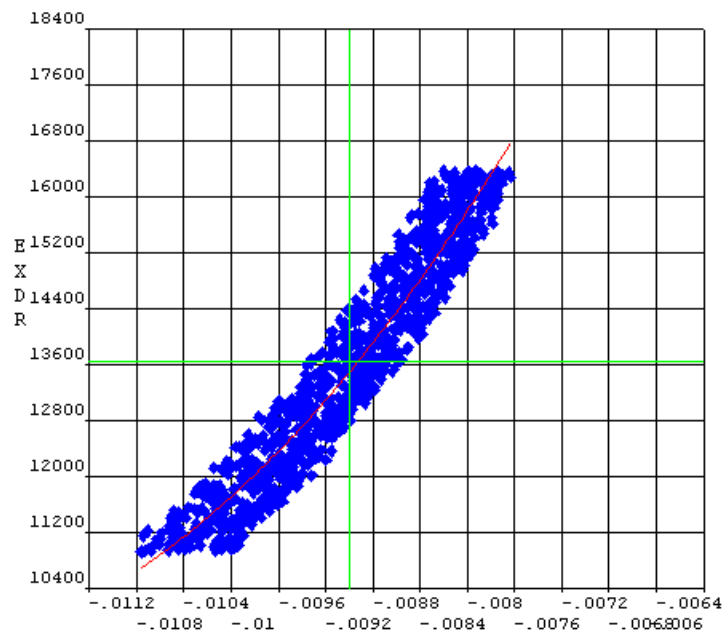
Parametr	Jedn.	Minimum	Průměr	Maximum
α	stupně °	-10	0	10
E_x	Mpa	10920	13650	16380
E_y	Mpa	231	289	347
E_z	Mpa	631	789	947
G_{xy}	Mpa	379	474	569
G_{xz}	Mpa	458	573	688
G_{yz}	Mpa	42	53	64
μ_{xy}		0,0112	0,014	0,0168
μ_{xz}		0,290	0,362	0,435
μ_{yz}		0,0184	0,023	0,0276

Uvažované hodnoty vstupních parametrů výpočtu jsou uvedeny v tabulce 2. Prostorový souřadný systém (x,y,z) je kolineární se systémem materiálové symetrie (L,T,R) .



Obr. 2. Vyjádření vlivu materiálových konstant na celkové stlačení vzorku pro zatížení ve směru vláken a kolmo na vlákna

ANSYS



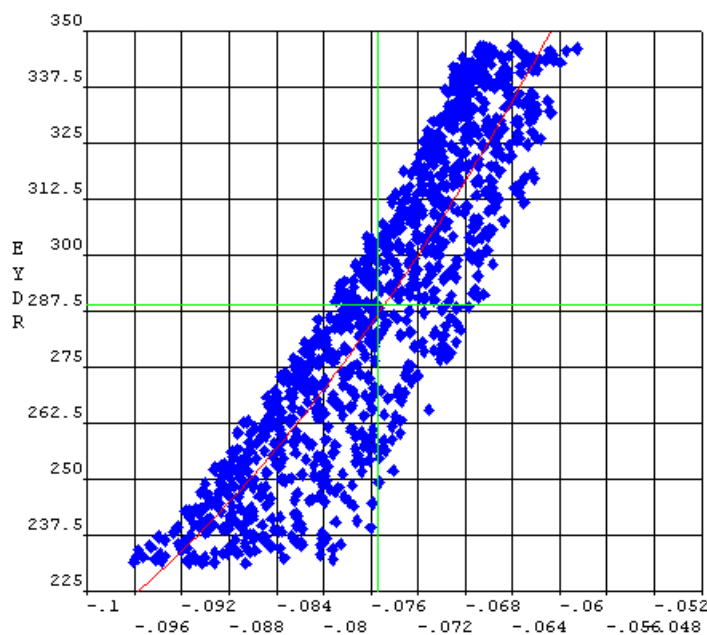
Rank-Order Correlat.
Coefficient 0.9574

Linear Correlation
Coefficient NaN

Trendline Type POLY:
C0 52872
C1 .670E+07
C2 .258E+09

Trendline Accuracy:
CHI2 0.8747E+02
R2 0.9123E+00

ANSYS



Rank-Order Correlat.
Coefficient 0.8985

Linear Correlation
Coefficient NaN

Trendline Type POLY:
C0 783.423
C1 9387
C2 37115

Trendline Accuracy:
CHI2 0.1977E+03
R2 0.8017E+00

Obr. 3. Trend závislosti mezi celkovým stlačením vzorku a moduly pružnosti E_L při zatížení ve směru vláken (nahore) a E_T při zatížení kolmo na vlákna (dole)

Metodou Monte Carlo pro 1000 náhodných výběrů proběhl výpočet pro celkové zatížení silou $P=1$ kN jak pro svislou, tak pro vodorovnou orientaci vláken, t.j. pro zatížení ve směru

vláken a kolmo na vlákna. Z výsledků, které jsou uvedeny v grafické podobě na obrázku 2, je vidět, že pro zatížení ve směru vláken L má na celkové stlačení vzorku u_L samozřejmě největší vliv modul pružnosti E_L , menší vliv má E_T a nejmenší modul ve smyku G_{LT} . Ostatní vstupní parametry mají vliv menší než 2.5%. Pro vodorovnou orientaci L vláken má na stlačení vzorku největší vliv modul E_T a malý vliv má smykový modul G_{LT} , ostatní parametry mají opět vliv menší než 2.5%. Z grafu trendu závislostí modulů E_L a E_T je možné zapsat pro dané zatížení vztahy (viz obrázek 3):

pro zatížení ve směru vláken

$$E_L = 5,287195 \cdot 10^4 - 6,7011265 \cdot 10^6 \cdot u_L + 2,5845044 \cdot 10^8 \cdot u_L^2 \quad (2)$$

a pro zatížení kolmo na vlákna

$$E_T = 7,8342295 \cdot 10^2 - 9,3867098 \cdot 10^3 \cdot u_T + 3,7115080 \cdot 10^4 \cdot u_T^2 \quad (3)$$

V rovnicích (2) a (3) jsou moduly E_L a E_T v jednotkách [MPa] a celkové stlačení vzorku odpovídající zatížení $P=1\text{kN}$ (u_L , u_T) se udává v [mm].

4. Křivky závislosti modulu pružnosti na stlačení vzorku

Z pravděpodobnostního výpočtu je patrné, že hlavní vliv na hodnotu celkového stlačení dřevěného vzorku v přípravku mají moduly pružnosti E_L a E_T . Vstupní soubor pro výpočet posunutí lze jednoduchým způsobem upravit na opakovaný výpočet, ve kterém se pro určitý poměr E_T/E_L (resp. E_y/E_x) a dané zatížení $P=1\text{kN}$ mění modul pružnosti E_L . Ostatní materiálové konstanty zůstávají beze změny jako v tabulce 1. V každém cyklu tak lze nalézt hodnotu stlačení vzorku jako hodnotu posunutí horní čelisti zkušebního zařízení pro uvedené zatížení ve směru vláken i kolmo na vlákna.

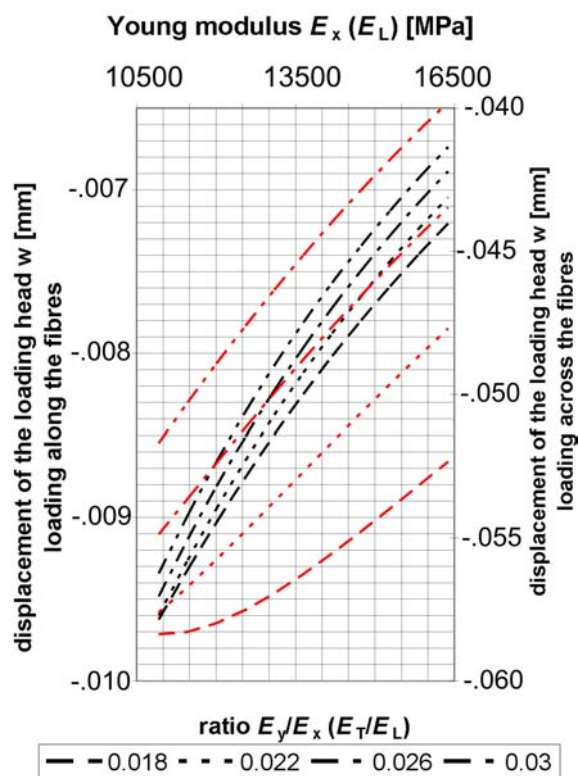
Tab.3. Hodnoty vstupních parametrů pro opakovaný výpočet

Parametr	Jedn.	Minimum	Průměr	Maximum
E_y/E_x		0.0140	0.0240	0.0340
E_x	MPa	10920	13650	16380
E_y	Mpa	231	289	347
E_z	MPa		789	
G_{xy}	Mpa		474	
G_{xz}	Mpa		573	
G_{yz}	MPa		53	
μ_{xy}			0,014	
μ_{xz}			0,362	
μ_{yz}			0,023	

Při opakovaném výpočtu se v ANSYSu vytvoří pole numerických dat, které je zapsáno do výstupních textových souborů. Jejich přenesením do tabulkového procesoru lze sestavit grafy závislosti celkového stlačení vzorku na modulu pružnosti E_L (viz obrázek 4). Trendy závislosti stlačení vzorku na modulech pružnosti v hlavních směrech L a T materiálové

symetrie dřeva získané pravděpodobnostním výpočtem (obrázek 3) a grafy závislosti modulu pružnosti dřeva ve směru vláken, získané opakovaným výpočtem (obrázek 4), lze pro tuzemské smrkové dřevo využít následujícím způsobem: Tlakovým zatížením vzorků v přípravku ve směru vláken a kolmo na tento směr se experimentálně stanoví stlačení vzorku odpovídající zatížení $P=1$ kN a následně poměr modulů pružnosti E_T/E_L . Pro tento poměr se pomocí obrázku 4 hledá optimální hodnota modulu E_L . Stejným způsobem výpočtu by bylo možné připravit grafy pro jiné hodnoty zatížení, resp. pro odlišné průměrné hodnoty modulů pružnosti a jejich poměry nebo jiná Poissonova čísla, t.j. pro další konstrukčně významné druhy dřeva.

Pro správné pochopení výsledků numerického modelu zkoušky na vývrtech dřeva malých průměrů je třeba si uvědomit, že numerický model předpokládá od samého počátku plný kontakt mezi válcovým vzorkem a konkávními čelistmi zkušebního přípravku a materiálové vlastnosti jsou modelovány jako pružně-plastické. Jako celkové stlačení vzorku odpovídající síle $P=1$ kN je tedy pro stanovení Youngova modulu nutno považovat elastickou odezvu vzorku odpovídající uvedené změně zatížení (pro sledovaný typ dřeva jde o mikrony ve směru vláken a desítky mikronů ve směru kolmém na vlákna) a nikoliv měřenou hodnotu stlačení v průběhu zatěžování, která je nutně ovlivněna nedokonalým kontaktem mezi povrchem vzorku a konkávními čelistmi zejména na počátku zatěžování a možným nepružným chováním vzorku.

Obr.4 Youngův modul E_L

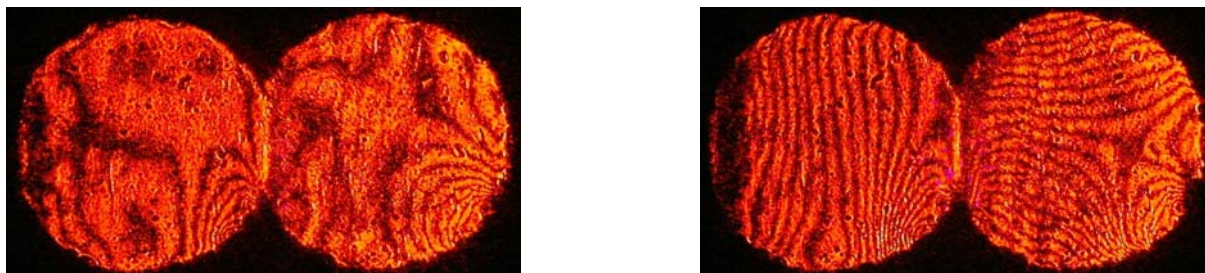
5. Experimentální ověření modelu

Experimentální ověřování modelu probíhalo souběžně s výpočtem prostřednictvím měření přetvárného procesu na podstavě zatěžovaného vzorku metodou moirové interferometrie. Měření proběhla na vzorku s orientací vláken ve směru zatížení i kolmo na tento směr v několika etapách. Základem pro vyhodnocení pole posunutí ve směru kolmém na zatížení (pole U) a pole posunutí ve směru zatížení (pole V) jsou interferogramy obou polí snímané před přitížením a po přitížení. Jejich rozdíl definuje v libovolném bodě sledované plochy pole posunutí U a V odpovídající danému přitížení a zpracováním těchto polí pomocí vztahů

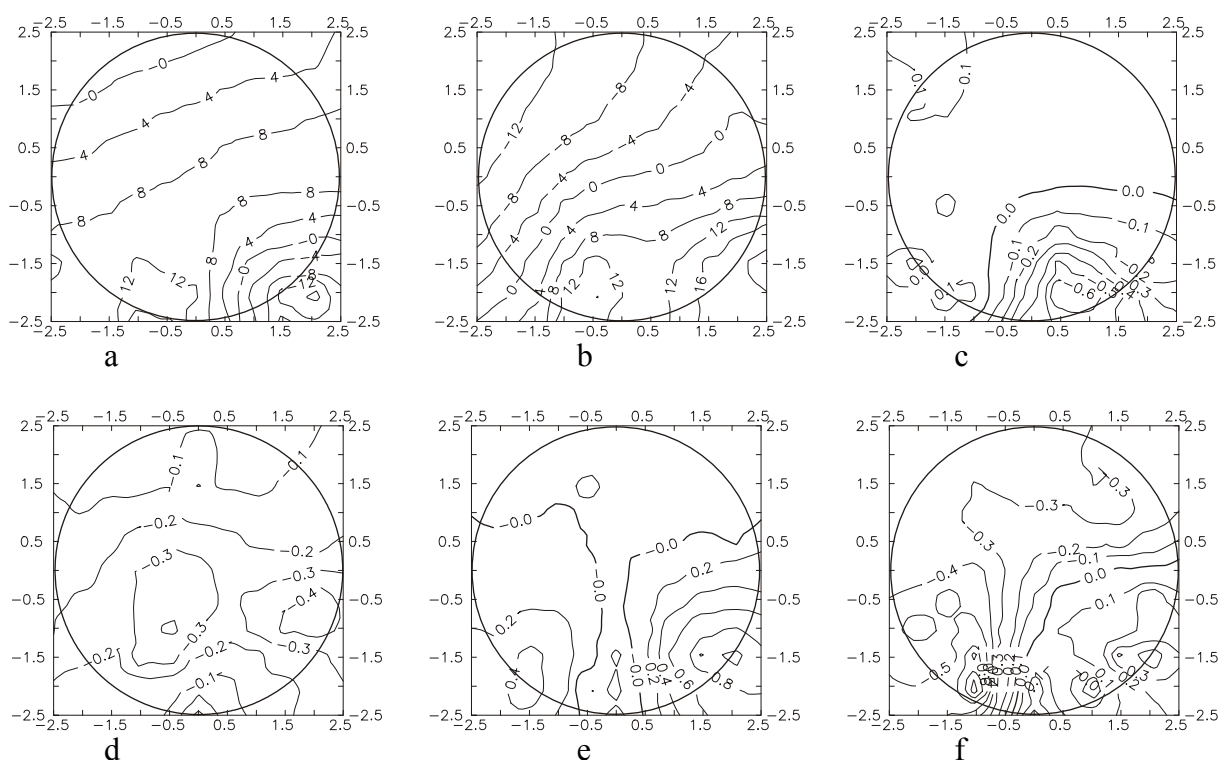
$$e_{xx} = \partial U / \partial x \quad ; \quad e_{yy} = \partial V / \partial y \quad ; \quad \gamma_{xy} = \partial U / \partial y + \partial V / \partial x \quad ; \quad \omega_{xy} = \partial U / \partial y - \partial V / \partial x \quad (4)$$

jsou definovány hodnoty normálních a smykových poměrných deformací (e_{xx} , e_{yy} , γ_{xy}) a rotací ω_{xy} na sledované ploše. Souřadnému systému (L, T, R) odpovídá v tomto případě

sořadný systém (y,x,z) . Příklad interferogramů nezatíženého a zatíženého stavu silou $\Delta P=310$ [N] ve směru vláken je uveden na obrázku 5. Pole posunutí V je na jednotlivých snímcích vlevo, vnější zatížení směřuje nahoru. Počítačovým zpracováním interferogramů lze v diskretních bodech sledované oblasti stanovit hodnoty deformací a rotací podle rovnic (4) a těmito body proložit splinové plochy. Příklad vyhodnocených posunutí, deformací a rotace pro zatížení $\Delta P=2400$ [N] je uveden na obrázku 6.



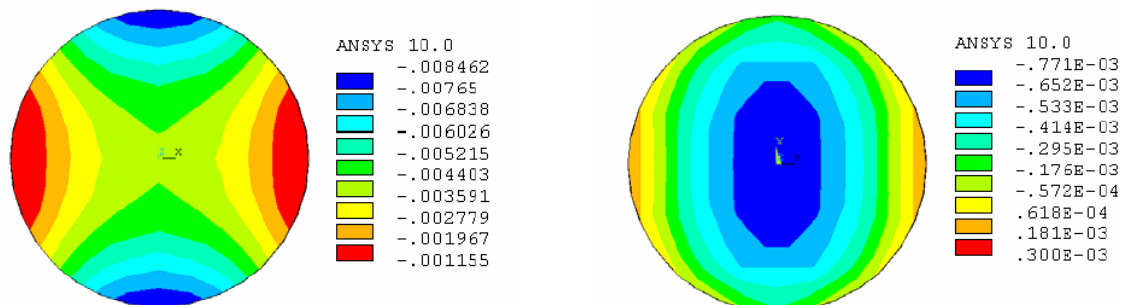
Obr.5 Interferogramy pole posunutí U a V před přitížením (vlevo) a po přitížení. $\Delta P=310$ [N]; pole posunutí U jsou na jednotlivých snímcích vpravo, vnější zatížení směřuje zdola nahoru.



Obr.6 Pole posunutí U (a) a V (b) [řád proužku], normální poměrné deformace e_{TT} [%] (c), e_{LL} [%] (d), smykové deformace γ_{LT} [%] (e) a rotace ω_{LT} [%] (f) pro přitížení $\Delta P=2400$ [N].

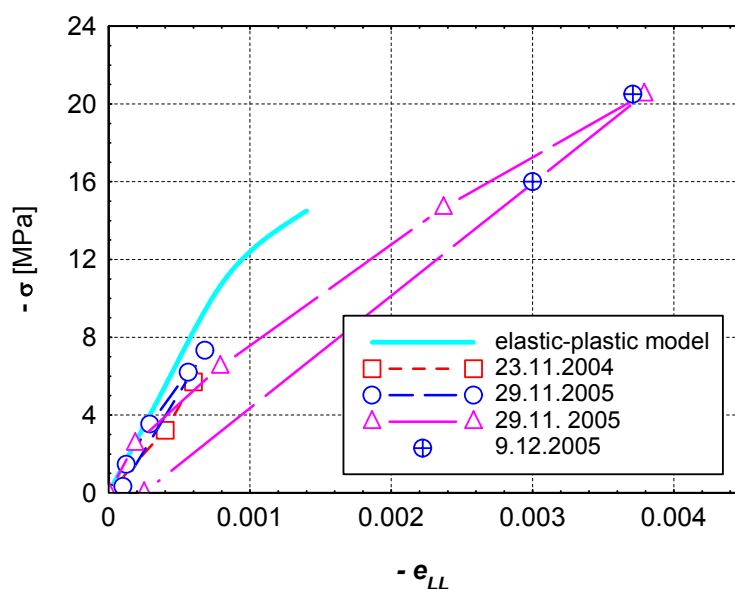
Z obrázků 5 a 6 je zřejmé, že předpoklad symetrie posunutí, deformací a následně i napětí vzhledem k rovině zatížení LR není splněn. Horní čelist, na kterou působí vnější tlaková síla (na obrázcích působí zdola nahoru), vnáší do způsobu zatížení poruchy, třebaže

úroveň zatížení je relativně nízká (v situaci na obrázku 5 činí pouze 530 N a tvoří tak zhruba 1/12 maximálního možného zatížení). Srovnání pole deformací e_{TT} a e_{LL} při zatížení ve směru vláken podle experimentu (viz obrázek 5c, d) a výpočtového modelu (viz obrázek 7) vykazuje velmi dobrou shodu, zejména pro druhou složku.



Obr. 7 Průběh poměrné deformace e_{TT} a e_{LL} pro jednotkové zatížení ve směru vláken.

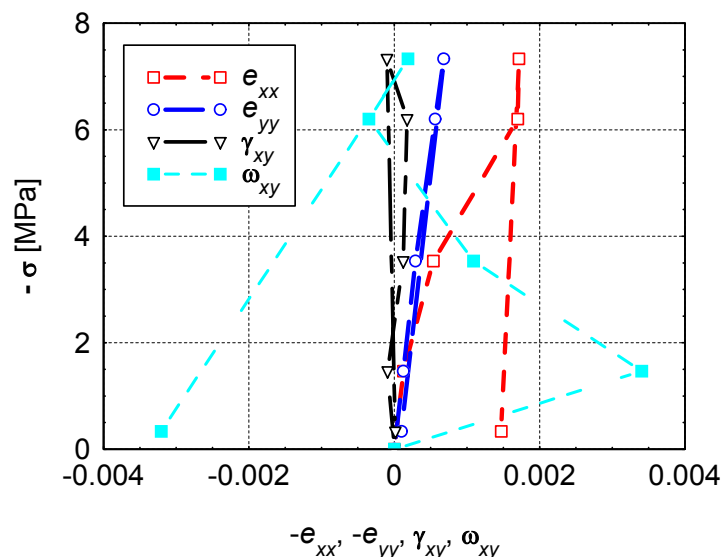
Od působišť vnějších sil je nejvíce vzdálen střed podstavy válcového vzorku. Na obrázku 8 je pro tento bod a zatížení ve směru vláken provedeno srovnání pracovního diagramu napětí – poměrné přetvoření použitého pružně-plastického modelu s experimentálními výsledky. Pro pružně-plastický model byla zvolena tabulková hodnota Youngova modulu $E = 13650$ MPa, pro experimentální výsledky v lineární oblasti pružného chování lze naměřenými daty smyčky zatížení – odtížení ze dne 29.11.2005 proložit regresní přímku a stanovit Youngův modul zkoušeného vzorku hodnotou $E = 11200$ MPa při koeficientu korelace 0.992. Z obrázku 8 je zřejmé, že i experimentální data v oblasti pružně-plastického chování kvalitativně odpovídají, při celkově nižších hodnotách napětí, použitému modelu.



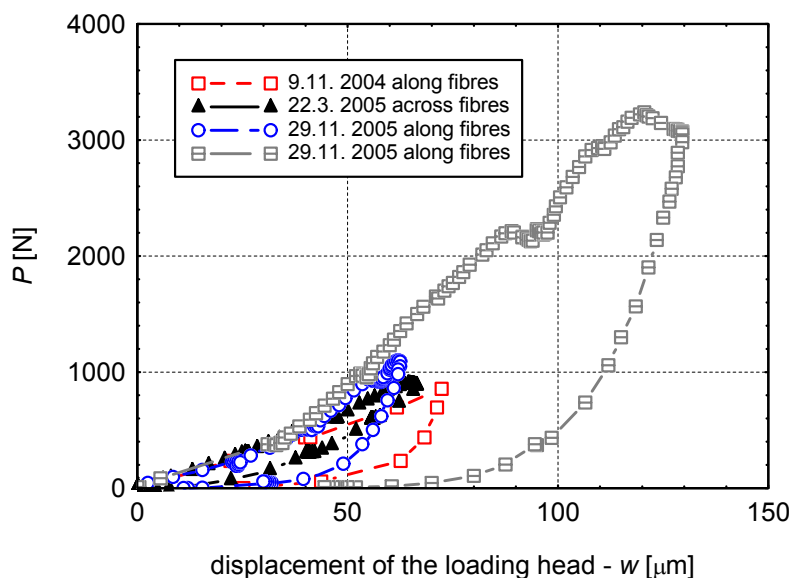
Obr. 8 Srovnání pracovního diagramu napětí – poměrné přetvoření pro zatížení ve směru vláken použitého pružně-plastického modelu s experimentálními výsledky.

Průběhy normálních a smykových deformací a rotace uprostřed podstavy válcového vzorku pro postupné zatěžování a odtížení ve směru vláken na úrovně tlakové síly P [N] = 0, 220, 530, 930, 1100 a 50 jsou uvedeny na obrázku 9. Souřadný systém os materiálové

symetrie (L , T , R) je zde kolineární se souřadným systémem (y , x , z). Jde o jedno ze čtyř provedených měření tohoto typu. Obrázek ukazuje pružné chování zkoušeného vzorku ve směru vláken při zatížení v tomto směru (viz průběh složky e_{yy}). Ve směru kolmém ($x//T$) se zkoušené dřevo chová pružně-plasticky a po odtížení vykazuje zbytkovou deformaci (e_{xx}). Smyková deformace je uprostřed podstavy válcového vzorku prakticky zanedbatelná, okolí tohoto bodu se ovšem v průběhu zatěžování a odtížení otáčí jako tuhé těleso s maximální odchylkou od roviny zatěžování LR rovnou $\alpha = 11'21''$.



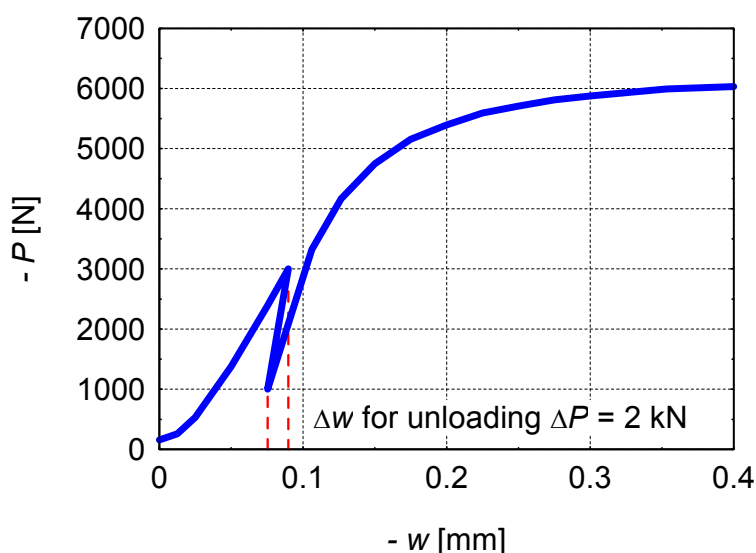
Obr. 9 Průběh normálních a smykových deformací a rotace uprostřed podstavy válcového vzorku pro postupné zatěžování a odtížení na úrovně tlakové síly $P = 0, 220, 530, 930, 1100, 50$ [N].



Obr.10 Závislost posunutí horní čelisti na tlakové síle pro zatížení – odtížení.

Závislost posunutí horní čelisti na působící tlakové síle pro tři měřené případy zatížení – odtížení ve směru vláken a jeden případ zatížení kolmo na vlákna je uvedena na obrázku 10. Pro nejvyšší zatížení, které dosahovalo zhruba jedné poloviny maximální tlakové síly na

vzorek jsou zřetelné jednotlivé stupně přítěžování. Na těchto úrovních (podobně ve zbývajících případech) byla v průběhu testu prováděna korekce orientace zrcátek interferometru a snímání interferogramů. Z obrázku je patrné, že počáteční část fáze zatěžování se pro případy zatěžování ve směru vláken a kolmo k nim významně neliší. Pro potřeby pravděpodobnostního výpočtu podle rovnic (2) a (3) je však možné z uvedených pracovních diagramů najít hodnoty pružné deformační odezvy vzorku odpovídající odtížení $\Delta P = 1$ kN o velikostech $\Delta w_L = 10.52 \pm 1.54$ [μm] (odhad průměru z pěti měření, variační koeficient 14.7%) pro zatížení ve směru vláken a $\Delta w_T = 40$ [μm] (průměr ze dvou měření) pro zatížení kolmo na vlákna. Podle rovnic (2) a (3) těmito hodnotám odpovídají průměrné hodnoty $E_L = 10981$ [MPa] a $E_T = 467$ [MPa]. Jejich poměr je $E_T / E_L = 0.0425$. Přijatelnou extrapolací křivek závislosti Youngova modulu na stlačení na obrázku 4 lze pro daná stlačení a poměr modulů pružnosti odhadnout pro zatížení ve směru vláken pravděpodobnou hodnotu $E_L \approx 9500$ [MPa] a pro zatížení ve druhém směru pak $E_L \approx 11750$ [MPa]. Jako optimální hodnotu Youngova modulu ve směru vláken lze pro zkoušený vzorek dřeva volit průměr obou hodnot, tedy $E_L \approx 10625$ [MPa], což je ve shodě s hodnotou stanovenou užitím nominálního napětí a poměrné deformace (viz obrázek 8).



Obr.11 Pracovní diagram síla – stlačení s částečným odtížením.

Pro praktické provádění zkoušky jádrových vývrtů tlakem na popsaném zkušebním zařízení je pro stanovení Youngova modulu zdravého dřeva ve směru vláken potřeba odměřit pružnou odezvu vzorku na změnu vnějšího zatížení ve směru jeho působení pro oba hlavní směry materiálové symetrie. Toho lze s výhodou dosáhnout částečným odtížením vzorku v průběhu zkoušky z úrovně zatížení, kdy již lze předpokládat plný kontakt tělesa vzorku s konkávními čelistmi. Pro smrkové dřevo je průběh zkoušky v tlaku ve směru vláken naznačen na obrázku 11. Přirozeně, jádrové vývrty nesmí být po odebrání až do zkoušky ovlivněny způsobem, který by změnil jejich fyzikální vlastnosti. Nejvýznamnějším vlivovým faktorem je vlhkost (viz například Frankl et al. (2006)).

6. Závěr

Kombinovaným přístupem numerického modelování metodou konečných prvků systémem ANSYS a experimentální analýzy pomocí moirové interferometrie bylo prokázáno, že

nestandardní semidestruktivní tlakovou zkoušku zdravého dřeva na jádrových vývrtech malých rozměrů lze využít i ke stanovení hodnot Youngova modulu dřeva ve směru vláken. Pravděpodobná hodnota modulů pružnosti ve dvou hlavních směrech materiálové symetrie se pro české smrkové dřevo stanoví podle rovnic (2) a (3) na základě znalosti pružné odezvy vzorku na změnu zatížení $\Delta P = 1 \text{ kN}$ ve směru jeho působení. Optimální hodnota Youngova modulu se pro daný poměr E_T / E_L stanoví z nomogramu na obrázku 4. Numerický model je parametrický. Experimentální analýza prokázala, že tento postup dává pro smrkové dřevo použitelné výsledky a dá se předpokládat, že použitý experimentálně ověřený model bude možno s odpovídajícími vstupy využít i pro jiné technicky významné druhy konstrukčního dřeva.

7. Poděkování

Autoři vděčí za podporu projektu 103/03/0581 Grantové Agentuře ČR a Akademii věd ČR za podporu prostřednictvím výzkumného záměru AV0Z 20710524.

8. Literatura

- ASTM. (2002) *Annual Book of ASTM Standards, Section 4. Construction. 04.10 Wood*. ASTM, Philadelphia, PA.
- Drdácký, M. F., Jirovský, I. & Slížková, Z. (2005) On structural health and technological survey of historical timber structures. In (G. Tampone, ed.), *Conservation of Historic Wooden Structures*; Proc. (1), pp. 278-284. Collegio degli Ingegneri della Toscana, Florence.
- Frankl, J., Kloiber, M., Bryscejn, J. (2006) Non-destructive inspection of a historical wooden structure damaged by fire. *Engineering Mechanics 2006*, 15.-18. 5. 2006, Svratka, připraveno pro publikaci.
- Kasal, B. (2003) Semi-destructive method for in-situ evaluation of compressive strength of wood structural members. *Forest Product Journal*, 53 (11/12), pp. 55-87.
- Kasal, B., Drdácký, M. & Jirovský, I. (2003). Semi-destructive methods for evaluation of timber structures. *Proceed. STREMAH VIII*, Vol. 15 : 835-842. WIT Press.
- Marek, P., Brozzetti, J., Guštar, M. & Tikalsky, P. (2003) *Probabilistic assessment of structures using Monte Carlo simulation*. 2nd ed. Prague: ITAM.
- Minster, J., Drdácký, M., Jirovský, I., Kloiber, M., Micka, M. & Slížková, Z. (2006) Diagnostic techniques to assess mechanical characteristics of historical timber. *Heritage, Weathering and Conservation, A.A. Balkema Publishers – Taylor & Francis The Netherlands*, in print.
- Minster, J., Micka, M., Václavík, P. (2005) Assessment of mechanical properties of timber on small specimens. *22nd Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*. Monticelli Terme – Parma – Italy. pp. 166-167
- Václavík, P., Minster, J. (2001) Biaxial four-beam polarisation interferometer with simultaneous recording of both displacement fields. *Fine Mechanics and Optics* 1: 16-21