

MODELOVÁNÍ OHYBOVÉHO NAMÁHÁNÍ DEMONTOVATELNÝCH NÁBYTKOVÝCH SPOJŮ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

M. Šimek, P. Koňas

Došlo: 14. října 2008

Abstract

ŠIMEK, M., KOŇAS, P.: *Bending stress modeling of dismountable furniture joints applied with a use of finite element method*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2009, LVII, No. 1, pp. 137–146

Presented work focuses on bending moment stress modeling of dismountable furniture joints with a use of Finite Element Method. The joints are created from Minifix and Rondorfix cams combined with non-glued wooden dowels. Laminated particleboard 18 mm of thickness is used as a connected material. The connectors were chosen such as the most applied kind in furniture industry for the case furniture. All gained results were reciprocally compared to each other and also in comparison to experimental testing by the mean of stiffness. The non-linear numerical model of chosen joints was successfully created using the software Ansys Workbench. The detailed analysis of stress distribution in the joint was achieved with non-linear numerical simulation. A relationship between numerical simulation and experimental testing was showed by comparison stiffness tangents. A numerical simulation of RTA joint loads also demonstrated the important role of non-glued dowels in the tested joints. The low strength of particleboard in the tension parallel to surface (internal bond) is the most likely the cause of the joint failure. Results are applicable for strength designing of furniture with the aid of Computer Aided Engineering.

dismountable joint, case furniture, bending stress, numerical simulation

Cílem této práce je uplatnění Computer Aided Engineeringu (CAE) při výzkumu mechanických vlastností nábytkových spojů korpusového demontovatelného nábytku a pevnostním navrhování nábytku. Korpusový nábytek s demontovatelnými spoji je vyráběn od 18. století. Jeho průmyslová výroba a související masové rozšíření realizovala hlavně firma Ikea, a to od druhé poloviny šedesátých let 20. století. Tento typ nábytku je poměrně mladý a stále rychleji se vyvíjející. Nelze už plně uplatňovat zásady starých zkušených mistrů, neboť dnes už se nábytek nevyrábí jen z masivního dřeva a klasických spojů. Výzkum na poli pevnosti nábytku je doposud nepříliš rozšířený a to zejména proto, že není normami natolik detailně specifikován jako například stavebnictví či doprava.

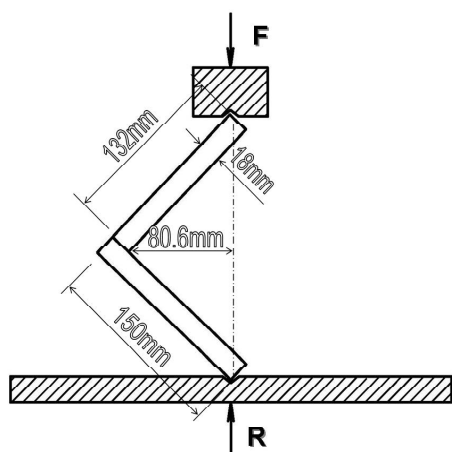
MATERIÁL A METODIKA

Excentrické spoje Minifix a Rondorfix, v kombinaci s nelepenými podélně drážkovanými buko-

vými kolíky, byly vybrány jako nejpoužívanější spoje pro demontovatelný korpusový nábytek. Spojovacím materiálem je laminovaná dřevotřísková deska tloušťky 18 mm. Geometrie vzorků sestávala ze dvou dílců sestavených do tvaru písmene V, přičemž vzorky měly rozměry 150 x 150 mm. Namáhání statickým ohybem v úhlové rovině ve směru tlaku bylo zvoleno k testování vybraných spojů z důvodu nižší únosnosti. Dílce vzorků byly stlačovány směrem k sobě, tzv. zatížení tlakem (obr. 1). Práce je řešena metodou konečných prvků (MKP), s pomocí softwaru Ansys Workbench. Výsledky numerického řešení úloh byly porovnány s experimenty, prostřednictvím dosažené tuhosti spojů t :

$$t = \frac{\Delta M}{\Delta \phi} \left[\frac{\text{n.m}}{\text{rad}} \right],$$

kde: ΔM je rozdíl ohybových momentů v 10 a 40 % maximálního zatížení a $\Delta \phi$ je rozdíl úhlů pootočení dílců v 10 a 40 % maximálního zatížení.



1: Schéma namáhání spojů ohybem v úhlové rovině ve směru tlaku

Modely pro numerickou simulaci vznikly na základě geometrie experimentálních vzorků. Numerické modely byly v některých částech konstrukce zjednodušeny s ohledem na zkrácení výpočtového času. Materiálové konstanty jednotlivých částí vzorku (tab. I) byly převzaty z těchto zdrojů: Wilczinski, Kociszewski; 2003 (dřevotřísková deska), Požgaj, Chovanec, Kuriatko, Babiak; 1997 (bukové dřevo), www.mathweb.com (ocel), www.zinc-diecasting.info (zinková slitina).

I: Materiálové vlastnosti použité pro numerický model spoje

DTD střední vrstva	$E_{x,y} = 1450 \text{ MPa}$ $E_z = 180 \text{ MPa}$	$PR_{yz,xz} = 0,33$ $PR_{xy} = 0,26$	$G_{yz,xy} = 145 \text{ MPa}$ $G_{xy} = 575 \text{ MPa}$
DTD povrchová vrstva	$E_{x,y} = 3830 \text{ MPa}$ $E_z = 400 \text{ MPa}$	$PR_{yz,xz} = 0,36$ $PR_{xy} = 0,28$	$G_{yz,xy} = 1496 \text{ MPa}$ $G_{xy} = 430 \text{ MPa}$
bukový kolík	$E_x = 16278 \text{ MPa}$ $E_y = 1804 \text{ MPa}$ $E_z = 1235 \text{ MPa}$	$PR_{yz} = 0,34$ $PR_{xz} = 0,09$ $PR_{xy} = 0,07$	$G_{yz} = 250 \text{ MPa}$ $G_{xz} = 1244 \text{ MPa}$ $G_{xy} = 1017 \text{ MPa}$
kovový kolík	$E = 180 \text{ GPa}$	$PR = 0,3$	/
excentr ze zinkové slitiny	$E = 85,5 \text{ GPa}$	$PR = 0,27$	/

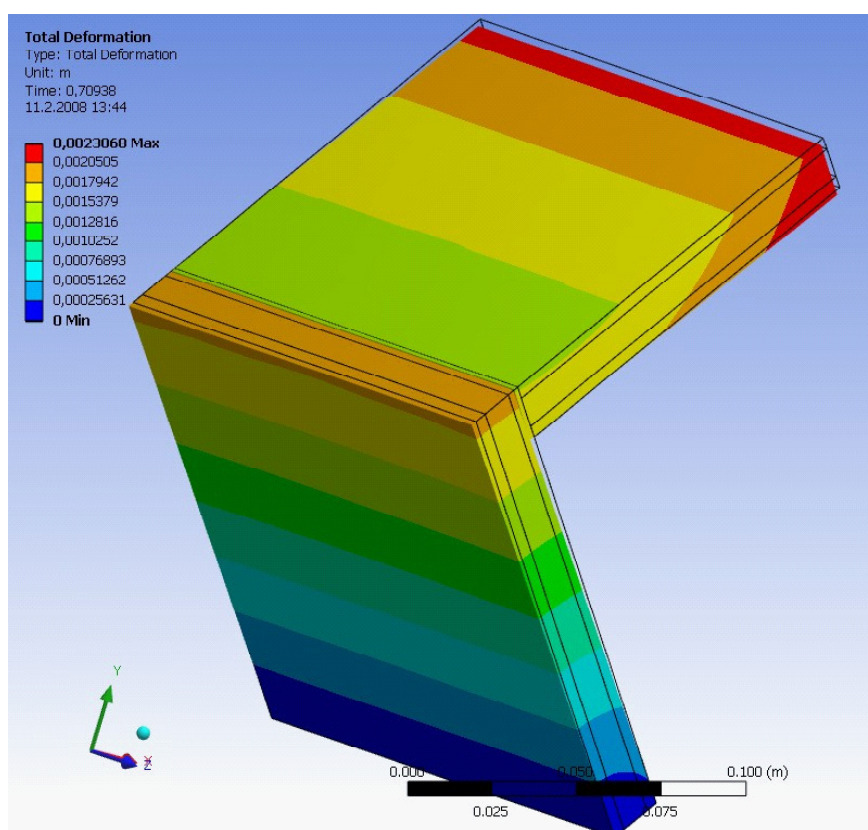
Pro MKP je charakteristické rozsítování spojitě oblasti do množiny samostatných podoblastí, což v praxi představuje rozdělení zkoumané oblasti do mnoha jednoduchých prvků s konečnou velikostí, tzv. konečné prvkové sítě. Modely pro simulaci byly vytvořeny v globální souřadné soustavě v tomtéž programu. Lokální souřadné soustavy, jež byly vůči globální soustavě transformovány, sloužily k definici materiálových vlastností dřevotřískové desky a bukových kolíků. Sít modelu je tvořena elementy typu SOLID186 a SOLID187. Kontakty mezi jednotlivými prvky geometrie modelu byly definovány pro každou kontaktní oblast. Úlohu lze označit jako nelineární, protože většina kontaktů mezi objemy těles jsou nelineárního charakteru (se třením). Okrajové podmínky numerického modelu byly definovány omezením stupňů volnosti a určením velikosti posunutí. Předpětí ve spojovacím kování (dané jejich dotažením) nebylo definováno z důvodu zjednodušení modelu.

VÝSLEDKY

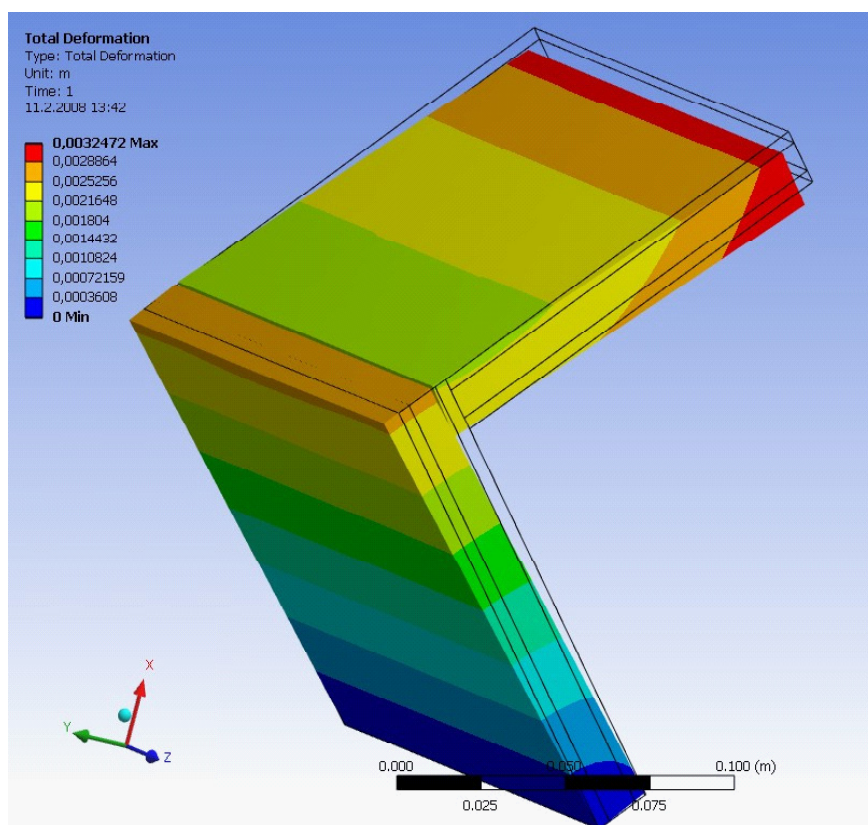
Výsledky numerické simulace jsou znázorněny ve formě grafických výstupů a tabulkových hodnot

napětí a posunutí. Grafické výstupy představují celkovou deformaci (obr. 2 a 3) a von Misesův ekvivalent napětí (obr. 4 a 5). Charakter deformace je následující: styčný dílec se opře o průběžný dílec a spoj se rozevře, stejně jako v případě experimentu. U simulace namáhání rohového spoje s kováním Rondorfix a nelepenými kolíky dochází, při posunutí ve směru působení tlaku horního příčnicku (ve srovnání s experimentem) o 3 mm, k celkové deformaci o 0,9 mm nižší než u rohového spoje s kováním Minifix a nelepenými kolíky. Lze tedy konstatovat, že při daných materiálových vlastnostech a při stejném posunutí v ose y se při simulaci rohové spojení Rondorfix s nelepenými kolíky deformuje méně než rohové spojení Minifix s nelepenými kolíky.

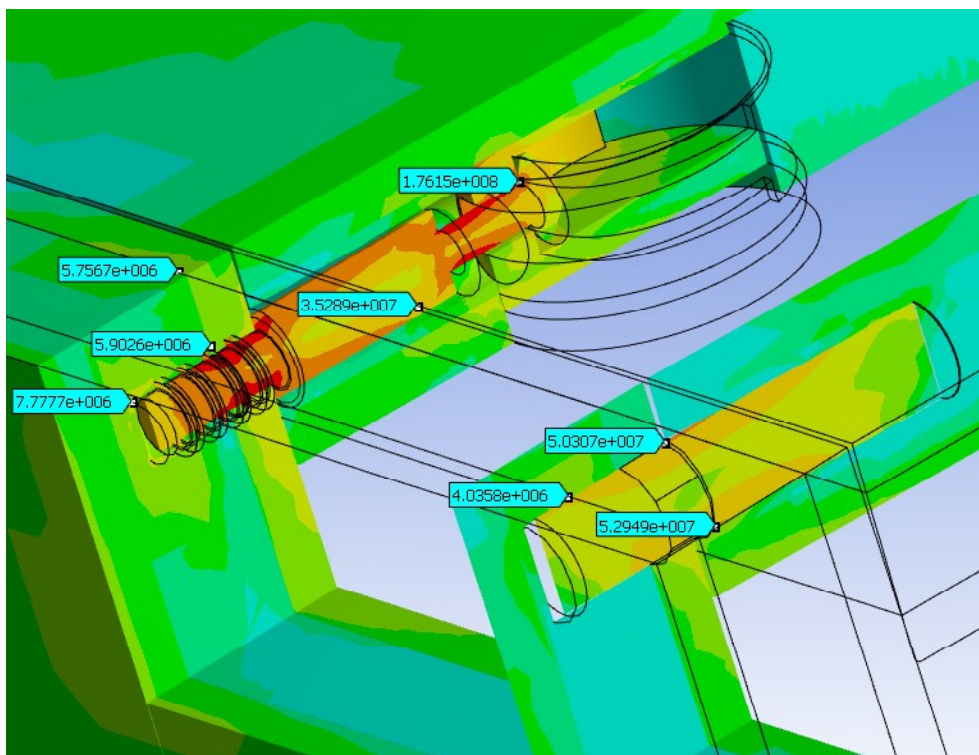
Rozložení napětí v namáhané oblasti, podle něhož lze určit způsob porušení tělesa, vyjadřujeme pomocí energetických kritérií. Von Misesův ekvivalent napětí, jako energetické kritérium, znázorňuje velikosti a lokalizaci napětí v testovaných spojkách vznikajících vlivem vnějších sil, a to jen v lineární oblasti zatěžování. Tento ekvivalent napětí je určen pro izotropní materiály. Pro neizotropní materiály von Misesův ekvivalent napětí zobrazuje pole se zvýšeným napětím, nikoli však kritérium vhodné



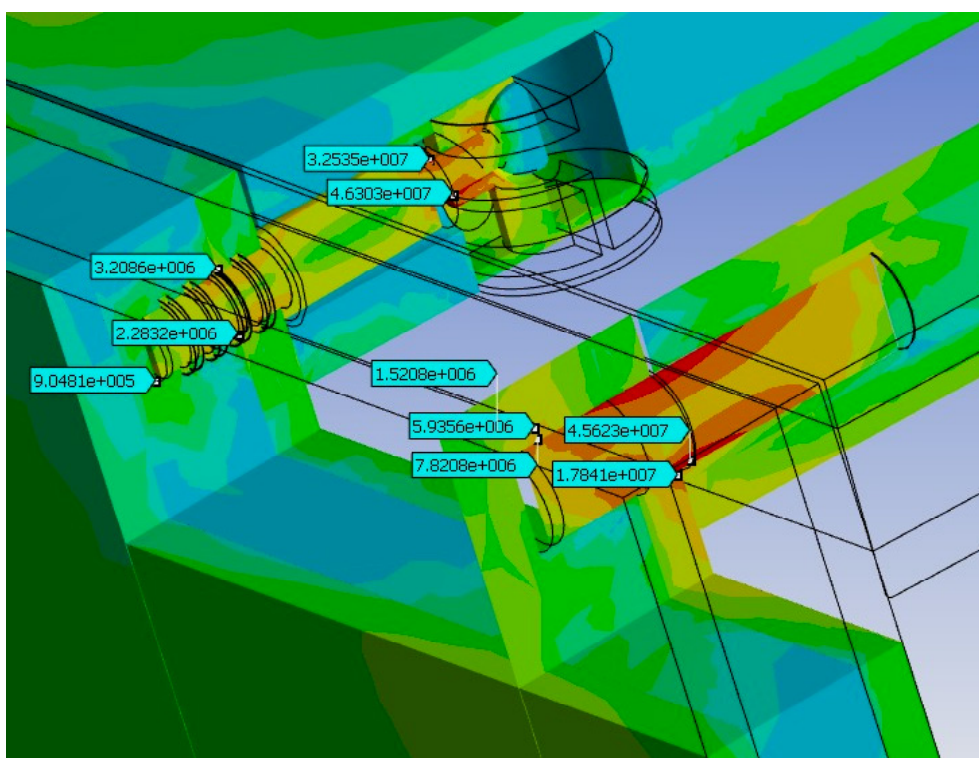
2: Deformace rohového spojení s kováním Rondorfix a dvěma nelepenými kolíky



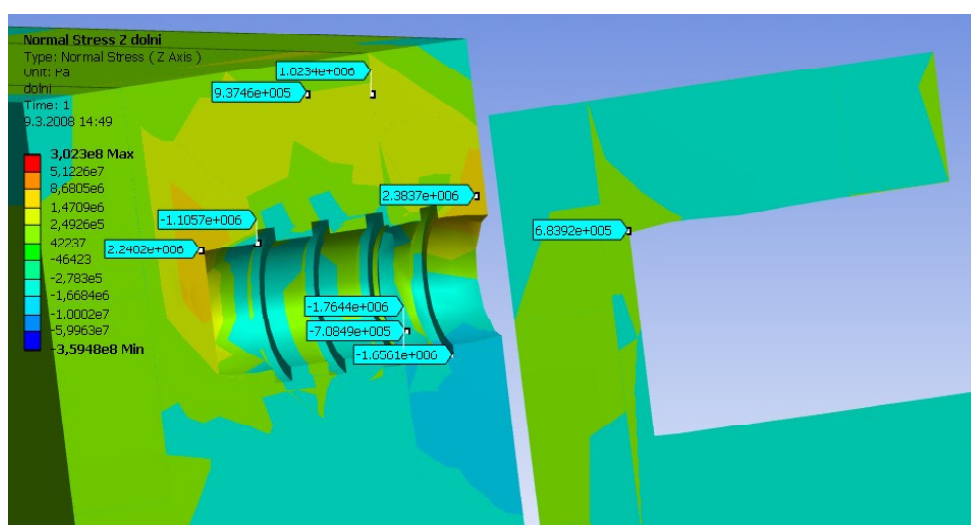
3: Deformace rohového spojení s kováním Minifix a dvěma nelepenými kolíky



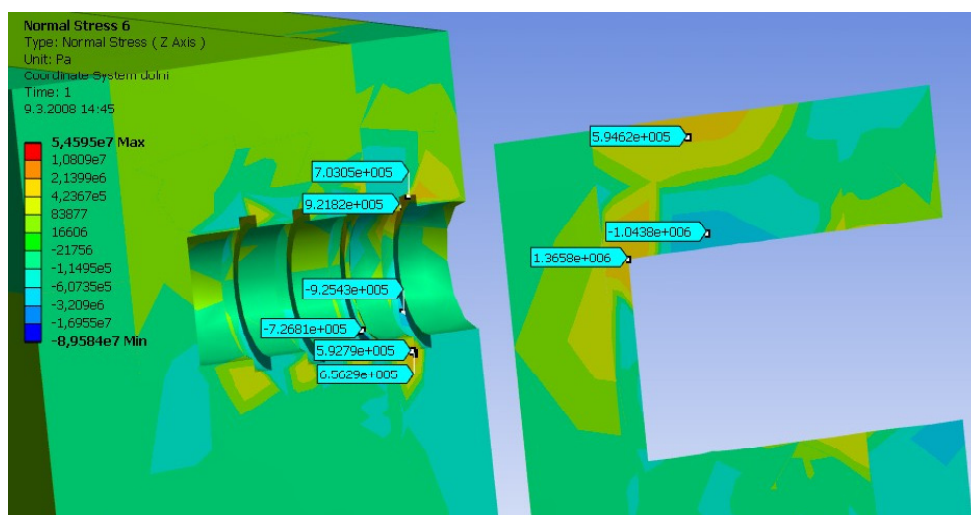
4: Ekvivalent napětí (von Mises) kování Rondorfix – detail řezu s hodnotami napětí



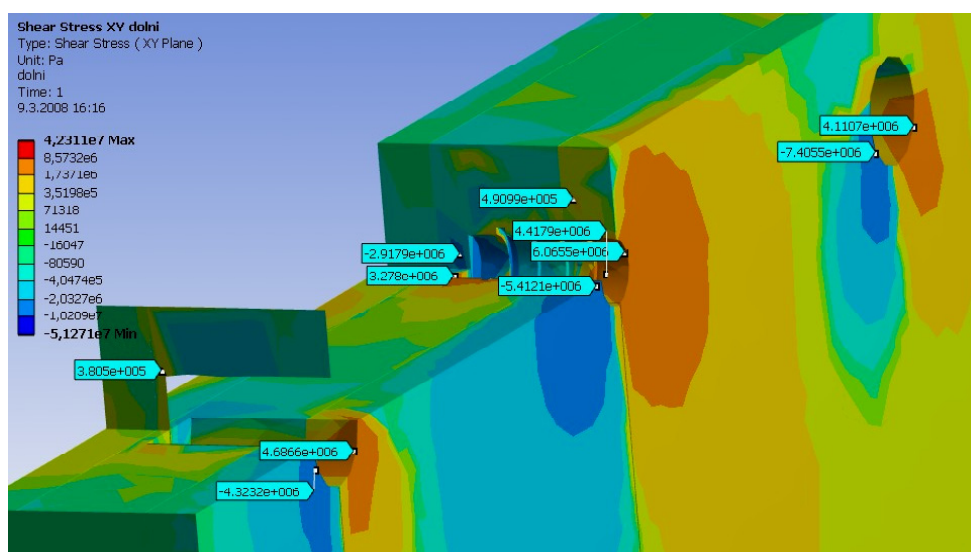
5: Ekvivalent napětí (von Mises) kování Minifix – detail řezu s hodnotami napětí



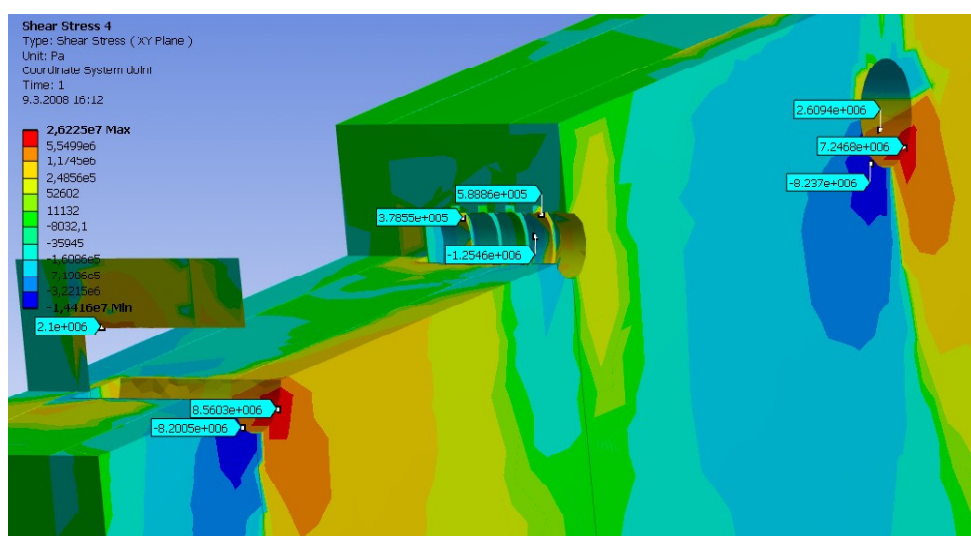
6: Normálového napětí kolmo k rovině desky u spojení Rondorfix – detail řezu



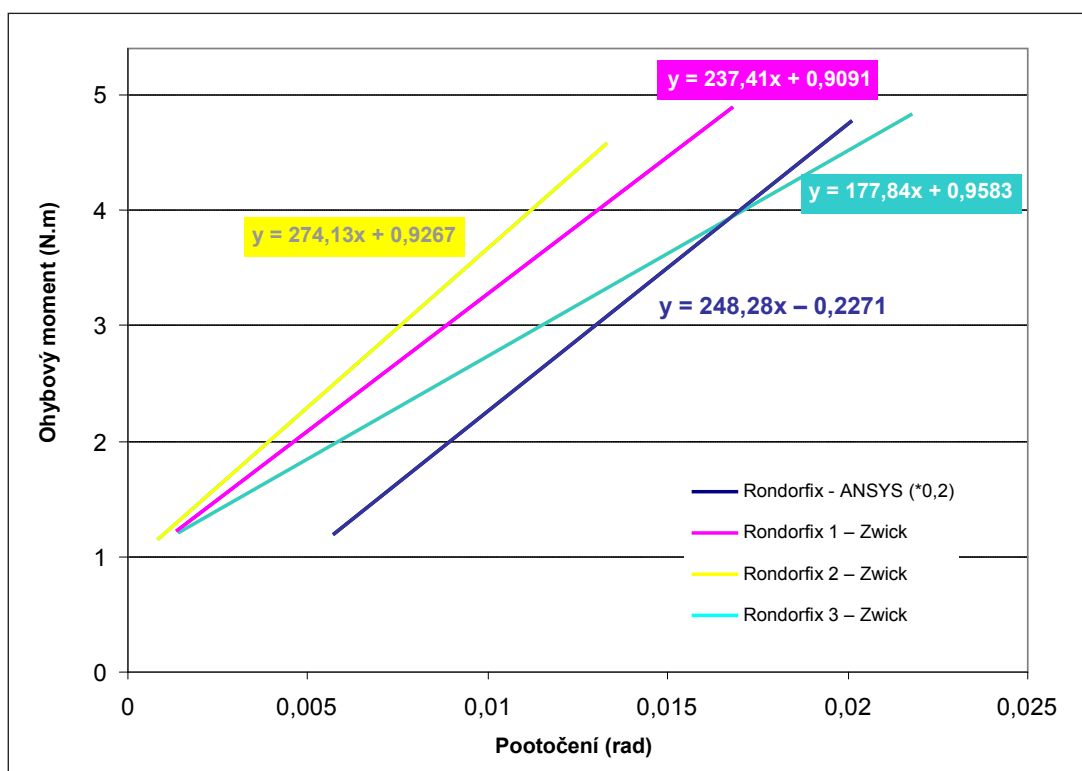
7: Normálového napětí kolmo k rovině desky u spojení Minifix – detail řezu



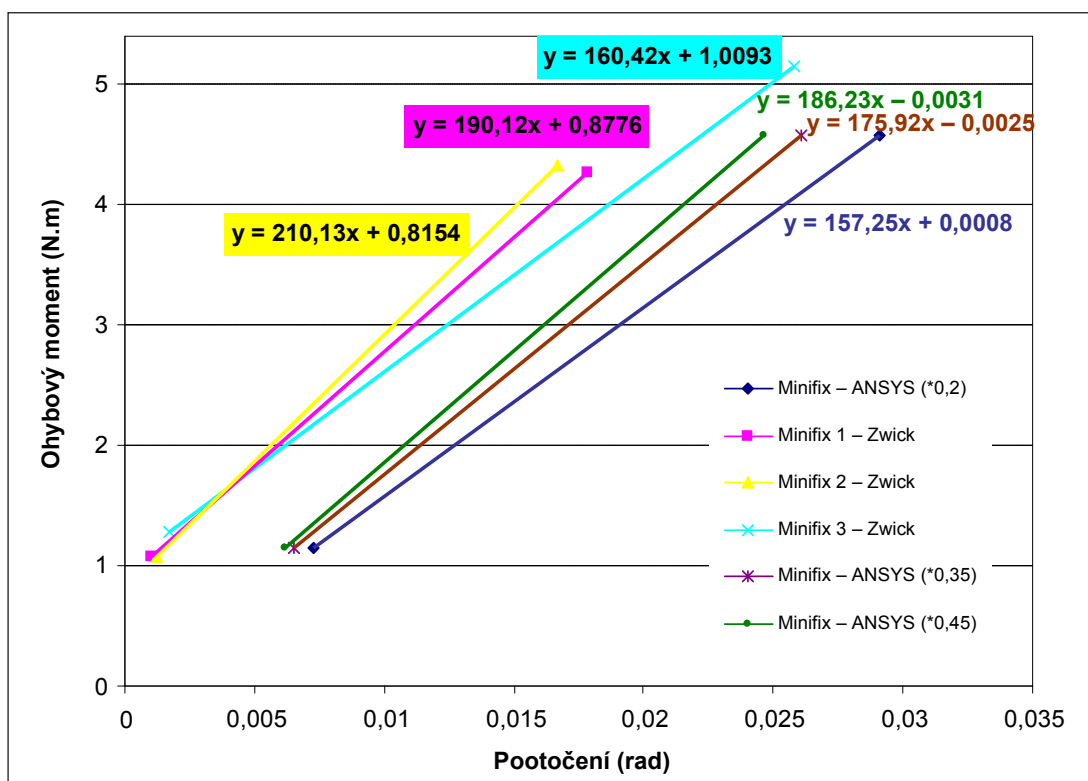
8: Smykové napětí rovnoběžně s rovinou desky u spojení Rondorfix – detail řezu



9: Smykové napětí rovnoběžně s rovinou desky u spojení Minifix – detail řezu



10: Směrnice (koeficienty tuhosti) experimentů a numerické simulace rohového spoje s kováním Rondorfix a nelepěnými kolíky (*koeficient tření mezi nelepěnými kolíky a DTD) spolu s regresními rovnicemi jednotlivých zkoušek



11: Směrnice (koeficienty tuhosti) tří experimentů a numerických simulací rohového spoje s kováním Minifix a nelepenými kolíky (*koeficient tření mezi nelepenými kolíky a DTD) spolu s regresními rovnicemi jednotlivých zkoušek

II: Porovnání výsledků koeficientů tuhosti experimentů a numerické simulace (*koeficient tření mezi nelepenými kolíky a DTD)

		Tuhost (N.m/rad)	Max. ohybový moment (N.m)
Experiment (Zwick)	Rondorfix 1	237,4	12,25
	Rondorfix 2	274,1	11,45
	Rondorfix 3	177,8	12,09
	Rondorfix (ar. průměr)	229,8	11,93
	Minifix 1	190,1	10,68
	Minifix 2	210,1	10,80
	Minifix 3	160,4	12,87
	Minifix (ar. průměr)	186,9	11,45
Simulace (ANSYS)	Rondorfix (*0,2)	248,3	/
	Minifix (*0,2)	157,3	/
	Minifix (*0,35)	175,9	/
	Minifix (*0,45)	186,2	/

pro zhodnocení možností porušení. U obou spojů je zvýšené napětí lokalizováno v kovovém kolíku, litinovém odlitku, v bukových kolících a v jejich okolí v DTD (obr. 4 a 5). Zvýšené hodnoty u kovového kolíku i litinového odlitku dosahují bezpečných hodnot vzhledem k pevnosti těchto materiálů (níže). K určení odpovídajících hodnot napětí v těchto místech u neizotropních materiálů je třeba zobrazit normálové napětí v lokální souřadné soustavě.

Nejnižší hodnotu pevnosti má dřevotřísková deska při namáhání v tahu kolmo k rovině desky. Jedná se o tzv. rozlupčivost, jejíž limitní hodnota je přibližně 0,5 MPa. Při zobrazení normálového napětí v ose kolmé na plochu desky a v odpovídající lokální souřadné soustavě (osa Z), jež odpovídá orientaci materiálových vlastností daného DTD dílce (průběžného dílce), zjistíme, že:

- pro rohový spoj s kováním Rondorfix dosahují hodnoty napětí přibližně trojnásobku uvedeného limitu (obr. 6),
- pro rohový spoj s kováním Minifix dosahují hodnoty napětí přibližně dvojnásobku uvedeného limitu (obr. 7).

Druhou nejnižší hodnotu pevnosti má dřevotřísková deska při namáhání ve smyku rovnoběžně s rovinou desky. Limitní hodnota tohoto namáhání ve smyku je 1,6 MPa (Koželouh, 1998). Při zobrazení smykového napětí v ose rovnoběžné s plochou desky, v odpovídající lokální souřadné soustavě (rovina XY), jež odpovídá orientaci materiálových vlastností daného DTD dílce (průběžného dílce), zjistíme, že:

- pro rohový spoj s kováním Rondorfix dosahují hodnoty napětí téměř čtyřnásobku uvedeného limitu, zejména kolem kovového kolíku (obr. 8),
- pro rohový spoj s kováním Minifix dosahují hodnoty napětí okolo pětinašobku uvedeného limitu, zejména u nelepéných kolíků (obr. 9).

Zvýšené hodnoty smykového napětí u povrchových vrstev DTD (průběžných dílců) nelze brát jako kritické, neboť numerický model oproti reálnému modelu postrádá laminovou vrstvu. Vrstva laminátu na DTD výrazně zvyšuje mechanické vlastnosti povrchu a zmíněná smyková napětí jsou tímto povrchovým materiálem zachycena. Ostatní zvýšená smyková napětí působící dále od povrchu se pak podílejí, společně s tahovými silami v ose kolmé na plochu, na destrukci spoje.

Pevnostní limity (meze pevnosti) pro bukové dřevo jsou: při namáhání v ohybu 124 MPa, v tahu rovnoběžně s vlákny 134 MPa, v tlaku rovnoběžně s vlákny 57 MPa (Požgaj, 1997). Pevnostní limit u surového DTD (tloušťky 15 až 19 mm) při namáhání v ohybu kolmo na rovinu desky je 13 MPa (EN 310). Mez pevnosti pro automatovou ocel třídy 11.109 (kovový kolík) je v rozmezí od 410 do 570 MPa (Fülbacher, Seidl; 1999). Meze pevnosti pro slitinu ZnAl4Cu1 / Zamak5 (excentr) jsou: v tahu 275 MPa a v tlaku 598 MPa (ČSN 423560).

Numerická simulace (program Ansys) spolehlivě stanovuje průběhy napětí v daných materiálech

u nízkých napětí, díky čemuž můžeme získat směrnici napětovo-deformačního diagramu – tuhost spoje (obr. 10 a 11). Ke stanovení směrnice bylo třeba znát či odhadnout maximální ohybový moment. Jelikož daná metoda neumožní získat celý průběh závislosti napětí a deformace (pootočení) spoje, byly hodnoty maximálního ohybového momentu použity z experimentálního měření. Při porovnání daných směrnic (jak číselných hodnot, tak grafických výstupů), resp. koeficientů tuhosti numerických simulací s experimenty vybraných rohových spojů zjistíme, že jsou velmi podobné (tab. II). Nejvíce se odlišují spoje s kováním Minifix (*0,2) a to o 16%. Potvrzení podobnosti numerického modelu s experimentem bylo před porovnáním směrnic ověřeno velikostí silové reakce. Numerický model byl zatěžován posunutím (místo silového působení), jež způsobilo napětí ve spoji a silovou reakci v místě vetknutí spoje, jež řádově odpovídala velikosti působících sil experimentu při daném posunutí.

Vliv nelineární analýzy a s ní související použití koeficientů tření mezi materiály na úhel sklonu směrnice ukazuje obr. 11. U simulace rohového spojení s kováním Minifix (výpočetně jednodušší) byla úloha pro porovnání navíc spočtena se dvěma dalšími koeficienty tření (0,35 a 0,45) mezi nelepénými kolíky a DTD. Je zřejmé, že čím vyšší je koeficient tření, tím vyšší je tuhost – ne však výrazně.

DISKUSE A ZÁVĚR

Výsledky práce ukázaly rozložení napětí v obou testovaných spojkách. Byla potvrzena významná funkce nelepéných kolíků – přenášet ohybové namáhání, čímž je odůvodněno jejich použití v kombinaci s testovanými excentrickými spojovacími.

Z porovnání numerické simulace a experimentů je patrná jejich poměrně významná shoda. Simulace potvrzuje významný vliv tahu kolmo na plochu DTD na porušení, v místě vetknutí (zašroubování) kovového kolíku. Z výsledků simulace je zároveň patrné, že spolu s tahem kolmo na plochu se na porušení spoje podílí i smykové napětí. Oba tyto druhy namáhání jsou způsobeny navozeným ohybovým namáháním. Výrazně zvýšené napětí v okolí vetknutí kovového kolíku ukazuje na místo destrukce spoje, čímž se shoduje s výsledky provedených i publikovaných experimentů. Zvýšené tahové napětí kolmo na plochu DTD je simulací odhaleno i v okolí nelepéných dřevěných kolíků – v průběžném díli. Vzhledem k předpokládanému místu porušení lze navíc zmínit, že ještě lepší než von Misesovo kritérium a zobrazení jednotlivých složek napětí by bylo Hoffmanovo kritérium (určeno pro ortotropní materiály). Řešič Ansys Workbench však Hoffmanovým kritériem zatím nedisponuje. Provedená numerická simulace postihující i nelineární chování dokazuje, že velikost tření na nelepéných kolících ovlivňuje určitým způsobem tuhost daných spojů. Čím vyšší je tření na nelepéných kolících, tím více tyto prvky přenášejí napětí při zatížení, a tím více klesá celkové napětí ve spoji, jež je přenášeno převážně excent-

rickým kováním. Napětí je lépe distribuováno mezi všechny prvky ve spoji. Díky vyššímu tření na nelepených kolících tedy roste jak únosnost (maximální ohybový moment), tak i tuhost spoje. Podle názoru autorů je ale tento vliv tření nejmarkantnější jen na počátku namáhání spoje, neboť v této fázi je malý ohybový moment. V další fázi namáhání rostoucí ohybový moment tření podstatně zvyšuje, a to téměř na maximum. V neposlední řadě je také vhodné zdůraznit, že zavedené simulace spojů dále nabízejí např. materiálovou optimalizaci samotných spojo-

vačů nebo geometrických charakteristik složitějších dílců.

Daná práce mapuje jednu z oblastí spojů používaných v nábytkářství, přičemž její výsledky jsou uplatnitelné jak při běžném dimenzování, tak i při dalším výzkumu na poli pevnosti nábytku. Porovnáním směrnice diagramu zatěžování experimentu a numerické simulace lze konstatovat významnou shodu. Úspěšné porovnání experimentu se simulací je předpokladem pro další uplatnění získaných výsledků.

SOUHRN

Práce je zaměřena na modelování ohybového namáhání demontovatelných nábytkových spojů pomocí metody konečných prvků. Spoje sestávají z excentrického kování Minifix a Rondorfix, kombinovaného s nelepenými bukovými kolíky. Spojovaným materiálem je laminovaná dřevotřísková deska tloušťky 18 mm. Modely pro numerickou simulaci vznikly na základě geometrie experimentálních vzorků. Spoje byly vybrány jako v současnosti nejpoužívanější v nábytkářském průmyslu na daný typ nábytku. Výsledky namáhání spojů jsou vzájemně porovnány a dále také srovnány s experimenty pomocí tuhosti. Simulace potvrzuje významný vliv tahu kolmo na plochu DTD na porušení, v místě vetknutí kovového kolíku. Z výsledků simulace je zároveň patrné, že spolu s tahem kolmo na plochu se na porušení spoje podílí i smykové napětí. Oba tyto druhy namáhání jsou způsobeny navozeným ohybovým namáháním. Byla potvrzena významná funkce nelepených kolíků – přenášet ohybové namáhání. Provedená numerická simulace postihující i nelineární chování dokazuje, že velikost tření na nelepených kolících ovlivňuje určitým způsobem tuhost daných spojů. Uvedené výsledky jsou uplatnitelné při pevnostním navrhování nábytku, využívajícím Computer Aided Engineering. Porovnáním směrnice diagramu zatěžování experimentu a numerické simulace lze konstatovat významnou shodu. Úspěšné porovnání experimentu se simulací je předpokladem pro další uplatnění získaných výsledků.

demontovatelný spoj, korpusový nábytek, namáhání ohybem, numerická simulace

SUMMARY

The current trend of the world's global furniture industry is the production of dismountable furniture. Presented contribution focuses on bending moment stress modeling of dismountable furniture joints with a use of Finite Element Method. By an analysis of the stress and the displacement, originated from the joint load, the weak points of the joint have been examined to better understand the structural-mechanical interactions. The simple analysis of the loads on furniture can show the presumed joint stresses. In addition, based on the procedures specified by FEM it is possible to determine the optimal joint for the specific type and size of the stress. The joints are created from Minifix and Rondorfix cams, combined with non-glued wooden dowels. Laminated particleboard 18 mm of thickness is used as a connected material. The connectors were chosen such as the most applied kind in furniture industry for the case furniture. All gained results were reciprocally compared to each other and also in comparison to experimental testing. The non-linear numerical model of chosen joints was successfully created using the finite element solver Ansys Workbench. The detailed analysis of stress distribution in the joint was achieved with non-linear numerical simulation. A relationship between numerical simulation and experimental testing was showed by comparison stiffness tangents. A numerical simulation of RTA joint loads also demonstrated the important role of non-glued dowels in the tested joints. The low strength of particleboard in the tension parallel to surface (internal bond) is the most likely the cause of the joint failure. Presented results are applicable for strength designing of furniture with the aid of Computer Aided Engineering. These tests can lead to improved quality in furniture design (safety, durability, price etc.).

Tato práce byla realizována díky podpoře Fulbright-Masarykova grantu ME 659 a Výzkumnému zámeru LDF, MZLU v Brně MSM 6215648902.

LITERATURA

- ČERNOK, A., JOŠČÁK P., LANG, M., 2004: Výpočtový model kolíkového spoja. In: Nábytok 2004, DF, TU vo Zvolene, 12 s.
- ČSN 42 3560, 1992: Slitina zinku na odlitky 42 3560 ZnAl4Cu1. Český normalizační institut, Praha, 4 s.
- ČSN EN 310 (49 0147), 1995: Desky ze dřeva – Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. Český normalizační institut, Praha, 8 s.
- FÜRBACHER, I., STEIDL, J., 1999: Lexikon technických materiálů. [CD-ROM] Verlag Dashöfer, Praha.
- JOŠČÁK, P., 1999: Pevnostné navrhovanie nábytku, DF, TU vo Zvolene, 246 s.
- KOŽELOUH, B., 1998: Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5. Step 1. Navrhování a konstrukční materiály. KODR, Zlín.
- NICHOLLS, T., CRISAN, R., 2002: Study of the stress-strain state in corner joints and box-type furniture using Finite Element Analysis (FEM). In: Holz als Roh- und Werkstoff, Springer-Verlag, Vol. 60, p. 66–71.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M., 1997: Štruktúra a vlastnosti dreva, Bratislava, Príroda, a. s., 488 s.
- SMARDZEWSKI, J., PREKRAD, S., 2002: Stress distribution in disconnected furniture joints. In: Electronic journal of Polish agricultural universities, vol. 5, issue 2, series Wood technology, 8 s.
- ŠIMEK, M., 2005: Furniture joint testing – purpose, methods and types. In: MendelNet 2005, FLD, MZLU v Brně, p. 121–125.
- WILCZINSKI, A., KOCZISZEWSKI, M., 2003: Elastic properties of particleboard as heterogenous material. [online] citováno 24. září 2008. Dostupné na: www.ejpau.media.pl/series/volume6/issue2/wood/art-03.pdf

Adresa

Ing. Milan Šimek, Ph.D., Ústav nábytku, designu a bydlení, Ing. Petr Koňas, Ph.D., Ústav nauky o dřevě, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: simek@mendelu.cz, konas@mendelu.cz