

MOŽNOSTI VYUŽITÍ HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ V NUMERICKÉ ANALÝZE LISOVÁNÍ DŘEVOTŘÍSKOVÉHO KOBERCE

V. Sebera, J. Tippner

Došlo: 24. března

Abstract

SEBERA, V., TIPPNER, J.: *Possible use of the hyperelastic material models in numerical analysis of the wood-strand mat compression*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2009, LVII, No. 4, pp. 83–94

The main goal of the work was to evaluate a possibility of using various hyperelastic material models implemented into ANSYS computational system for the numerical analysis of wood-strand mat pressing or wood-based composites. Subsequently, the most suitable hyperelastic model was used as a material model in compression simulation. Pressing itself was modelled as a contact transient analysis with wood-strand mat being defined as a homogenous and isotropic continuum with the chosen material model. In the analysis only displacement degrees of freedom are considered. Output of the simulation is a contact pressure, which is necessary to apply to compress the mat on the required height. The analysis serves as a take-off platform for further research in wood-based composites pressing process.

hyperelasticity, wood-strand mat, finite element method, compression

Problematika kompozitů na bázi dřeva (jejich výroba i vlastnosti) je z pohledu numerického modelování a optimalizace velmi aktuální, jelikož se jedná o velmi používané materiály, které jsou poměrně environmentálně nenáročné a pocházejí z obnovitelné suroviny. Tento obor (i dřevo jako takové) oplývá velmi složitými materiálovými modely, provázaností pohybu fyzikálních polí a vysokou variabilitou vlastností vstupního materiálu – dřeva. V současné době je pro řešení podobných úloh k dispozici jak velmi pokročilý software s širokými možnostmi, tak vysoce výkonné pracovní stanice či výpočetní clustery, které podobné úlohy umožňují řešit. Cílem této práce bylo vytvořit základní numerický model lisování využívaného ve výrobě kompozitních materiálů na bázi dřeva.

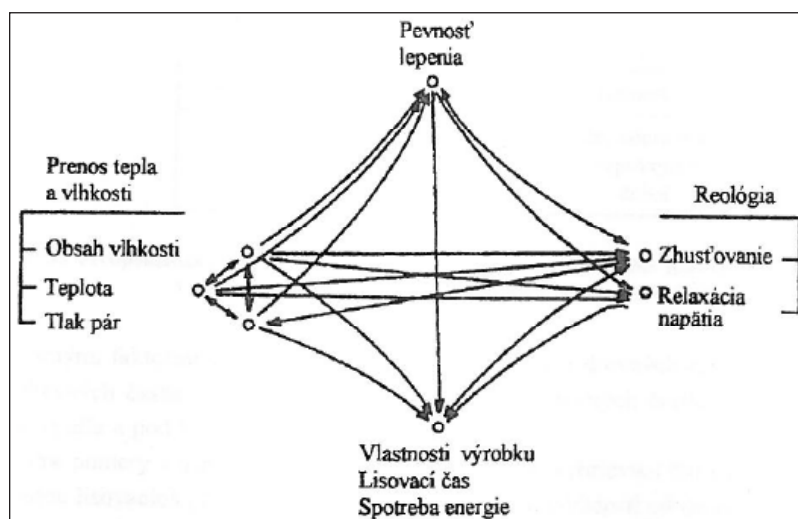
Proces lisování

Proces lisování je v rámci výroby dřevních kompozitů stěžejní operací (Štefka, 2006). Dochází zde k opětovné integraci dřevních částic do celku (desky) pomocí určité matrice (lepidla). V rámci vlastní

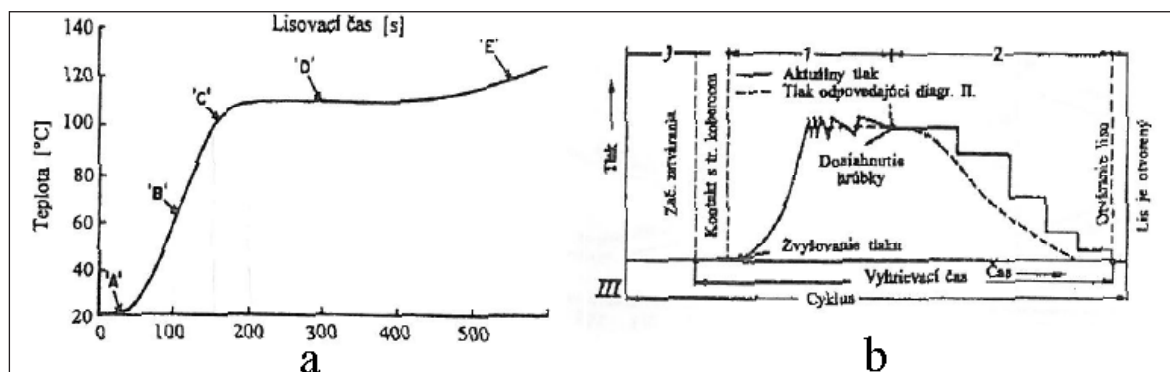
procesu se potom na vytvrzení matrice podílí více fyzikálních polí – teplotní, vlhkostní a deformační. Tyto všechny okrajové podmínky je vhodné vzít při návrhu procesu nebo jeho simulace v úvahu. Vazby jednotlivých lisovacích faktorů, okrajových podmínek a materiálů uvádí Obr. 1.

Z Obr. 1 vyplývá jednak vysoká energetická náročnost procesu, ale zejména jeho komplexnost daná interakcí fyzikálních polí, resp. okrajových a počátečních podmínek. Okrajové podmínky vyjadřují lisovací faktory – lisovací teplotu, lisovací tlak a lisovací čas. Jako počáteční podmínky vystupují vlhkost třísek, teplota třísek či geometrické uspořádání třísek. Lisovací faktory v průběhu času vyjadřuje Obr. 2.

V závislosti na průběhu lisovacích faktorů v čase se vytváří tzv. hustotní profil desky, více viz Hrázský (1998). Hustotní profil desky znázorňuje rozložení hustoty v rámci průřezu desky a je tedy jakýmsi prekursorem pevnostních vlastností výsledného materiálu.



1: Schéma interakcie dejů, lisovacích faktorů, vlastností materiálu a spotřeby energie v procese lisování [z Štefka (2006), orig. z Bolton a Humphrey (1988)]



2: Obecná schémata lisovacích faktorů: a) lis. teplota [z Štefka (2006), orig. z Perlác a Štefka (1995)], b) lis. tlak [z Štefka (2006), orig. z Kollmann, Kuenzi, Stamm (1975)]

Lisovaný materiál – třískový koberec – vykazuje při lisování velké míry poměrné deformace (až 600%), což determinuje i daný materiálový model v numerickém řešení. S tak velkou mírou elasto-plastické deformace se setkáváme pouze u hyperelastických materiálů; příkladem těchto materiálů jsou např. elastomery. Pro popis těchto materiálů existuje několik teoretických modelů. Některé z těchto modelů jsou odvozeny z teorie statistické mechaniky, některé z klasické nauky o pružnosti (elasticity) a ostatní z teorie elastomerů. Do prostředí ANSYS jsou implementovány a v dalším textu budou testovány tyto modely: Neo-Hookeův, Mooney-Rivlinův, Polynomický, Ogdenův potenciál, Arrudy-Boyceov, Gentův a Yeohův model. Protože je třískový koberec zcela jiné povahy než materiály, které jsou pomocí zmíněných modelů popisovány, bylo nutné otestovat všechny uvedené modely a vybrat z nich pro popis třískového koberce nejvhodnější. Letný úvod do teorie hyperelastivity a uvažovaných materiálových modelů je uveden v následujícím textu.

Materiál se nazývá hyperelastickým, pokud existuje hustota deformační energie W , která je skalární

funkcí tenzorů deformací, jejichž derivace vzhledem ke složkám přetvoření určuje příslušnou složku napětí (Kohnke, 1998). To vyjadřuje rovnice 1:

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \equiv 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}}, \quad [1]$$

kde:

S_{ij} jsou komponenty druhého Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí,

W je funkce deformační energie na jednotku nedeformovaného objemu,

E_{ij} jsou komponenty Lagrangeova tenzoru přetvoření,

C_{ij} jsou komponenty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformací.

Vidíme, že hyperelastická již není určena klasikou Hookeovou mechanikou malých deformací (např. modul pružnosti apod.), ale je definována pomocí energie. Dalším rozбором teorie zjistíme, že deformační energie se odvozuje od invariantů přetvoření I_1 , I_2 a I_3 , resp. poměrných deformací. Obecně vyjádřeno rovnicemi:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \text{ nebo } W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3). \quad [2]$$

Formulace invariantů je potom následující:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad [3]$$

kde:

λ_i je poměr mezi konečnou a počáteční délkou, tzv. „stretch ratio“ ($1 + \varepsilon_i$).

Podrobnější rozbor modelů je uveden v Kohnke (1998), kde lze najít i vztahy pro výpočet jednotlivých veličin z daných rovnic, zde jsou z úsporných důvodu vynechány.

Neo-Hookeův model

Je jednou z nestarších a zároveň nejjednodušších formulací hyperelasticity, která vychází z klasického Hookeova zákona. Formulace je pro tuto konkrétní analýzu asi nejméně vhodná, jelikož nabízí přetvoření max. do 30%. Je dána vztahem:

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2, \quad [4]$$

kde:

μ je počáteční smykový modul,
 d je objemový modul pružnosti,
 J poměr objemu před a po deformaci.

Mooney-Rivlinův model

Tento model nabízí několik možností podle počtu parametrů. Může být 2, 3, 5 a 9parametrický. Počet parametrů modelu pak určuje i použitelnost, resp. rozsah poměrné deformace. Dvoupametrický model umožňuje až 100% deformaci v tahu a 30% v tlaku a je dán rovnicí:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2, \quad [5]$$

kde:

C_{10} , C_{01} , d jsou materiálové charakteristiky.

Ogdenův model

Je fenomenologický model založený přímo na hlavních poměrných přetvořeních než na invariantech. Umožňuje definovat neomezený počet parametrů, což mimo jiné umožňuje popisovat daleko větší deformace, a to až do 700%. Velmi často se používá i pro analýzu pěnových materiálů. Je dán rovnicí:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} (J - 1)^{2i}, \quad [6]$$

kde:

N je počet materiálových konstant či stupeň polynomu,
 μ_i , α_i , d_i jsou materiálové charakteristiky.

Polynomický model

Tento model může být opět definován až nekonečným počtem parametrů, což zvyšuje koeficient determinace s experimentálními daty, avšak zpomaluje výpočet. Při počtu parametrů 1 je ekvivalentem 2-parametrického modelu Mooney-Rivlina, při počtu 2 je ekvivalentem 5 pěti-parametrického modelu Mooney-Rivlina atp. Model umožňuje poměrné deformace až 300% a je dán předpisem:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}, \quad [7]$$

kde:

N , C_{ij} , d_k jsou materiálové konstanty.

Model Arrudy-Boyceové

Tento model vychází z teorií statistické mechaniky, což znamená, že byl vytvořen jako statistické „ošetření“ negaussovských řetězců vycházejících ze středu elementu k jeho rohům. Tento model je znám také jako „osmiřetězcový model“ (Kohnke, 1998). Umožňuje přetvoření až 300% a je definován následovně:

$$\begin{aligned} W = \mu & \left[\frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_L^2} (\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_L^4} (\bar{I}_1^3 - 27) + \right. \\ & \left. + \frac{19}{7000\lambda_L^6} (\bar{I}_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_L^8} (\bar{I}_1^5 - 243) \right] + \frac{1}{d} \left[\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right], \quad [8] \end{aligned}$$

kde:

μ je počáteční smykový modul pružnosti,
 λ_L je limitní natáhnutí řetězců,
 d je objemový modul pružnosti.

Gentův model

Je mikromechanický model, podobný modelu Arrudy-Boyceové, který opět vychází z limitní síly natáhnutí řetězců. Umožňuje počítat až 300% přetvoření a je formulován následovně:

$$W = \frac{\mu J_m}{2} \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{J_m} \right)^{-1} + \frac{1}{d} \left(\frac{J_2 - 1}{2} - \ln J \right), \quad [9]$$

kde:

μ je počáteční smykový modul pružnosti,
 J_m je limitní hodnota ($I_1 - 3$),
 d je objemový modul pružnosti.

Yeohův model

Je model podobný polynomickému, což znamená, že s rostoucím stupněm polynomu se zvyšuje míra aproximace řešení. Nejběžnější je však kubická forma modelu. Formulace obecného modelu je následující:

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}, \quad [10]$$

kde:

C_{i0} , d_k jsou materiálové konstanty,
 N je počet parametrů.

Pěnový model Blatz-Ko

Tento model je nejjednodušší možností simulace stlačitelných pěnových materiálů a je analogickým s Neo-Hookeovým modelem. Je dán rovnicí

$$W = \frac{\mu}{2} \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right), \quad [11]$$

kde:

μ je počáteční smykový modul pružnosti.

MATERIÁL A METODIKA

Společnost Kronospan, a. s. poskytla materiál nutný na experimentální část výzkumu – povrchové a středové třísky pro výrobu OSB desek, viz Obr. 3. Pro simulaci lisování dřevotřískového koberce bylo nejdříve nutné získat daný hyperelastický materiálový model. Obr. 3 též znázorňuje jednu z navážek třísek, které vstupovaly do zkušebního zařízení ZWICK Z050.

Pro měření hyperelastivity třískového koberce (pracovního diagramu) byly vytvořeny vlastní zkušební přípravky, které je možno upnout do hlav univerzálního zkušebního zařízení ZWICK ZH050. Zatížení se při konečné fázi lisování pohybuje na hraniční hodnotě možností zkušebního zařízení (50 kN). Z tohoto důvodu jsou přípravky velmi robustní (vyrobeny z ocelové pásoviny o tloušťce 12 mm).

Celkem bylo provedeno 11 testů, z čehož tři sloužily k získání představy o odezvě modelu na různé tloušťky lisovaného koberce. Do numerické simulace vstupovalo reprezentativní měření z osmi provedených testů. Z tohoto měření byl proložením křivky pomocí operace „curve fitting“ získán jeden hyperelastický materiálový model, který byl následně zpracován v řešiči ANSYS.

Pro křivkovou aproximaci experimentálních dat byl sestaven skript v jazyce APDL (ANSYS Parametric Design Language). Uživateli tedy stačí zadat číslo materiálového modelu (od 1 do 9), kterým chce aproximovat experimentální data. Dané modely jsou seřazeny následovně: 1 – Yeoh, 2 – Ogden,

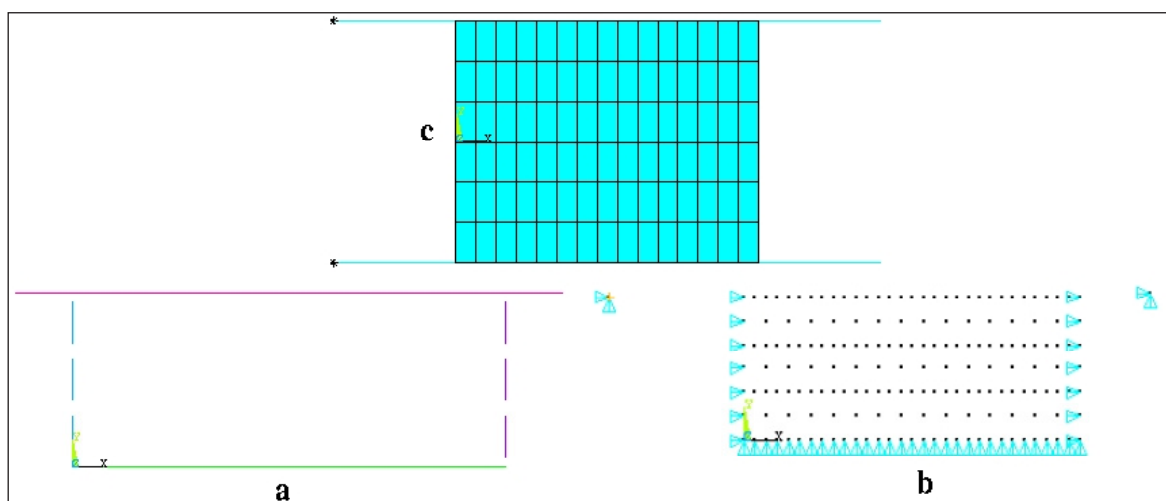
3 – Mooney-Rivlin, 4 – Polynomický, 5 – „Pěnový“, 6 – Arruda-Boyce, 7 – Gent, 8 – Neohook, 9 – Blatz-ko. Po tomto procesu jsou skriptem automaticky dané modely uloženy a spočítány. „Curve fitting“ je de facto nelineární aproximací, tudíž probíhá iteračně. Výstupem jsou grafická proložení experimentálních dat křivkami, ze kterých byl následně vybrán model, který nejlépe experimentální data vystihl, viz výsledková část, příloha 1 a rovnice [12].

Všechny numerické analýzy jsou kompletně napsány v jazyce APDL. V analýzách je definován kontakt mezi plochami nestlačitelného a stlačitelného tělesa (typ „surface to surface“ a „rigid-flexible“) (Kohnke, 1998). Při numerickém výpočtu je žádoucí co největší zjednodušení problému, avšak se zanedbáním jen nepodstatných skutečností (např. geometrické detaily, rozložení fyz. polí mimo hlavní zájmovou oblast, vliv některých faktorů). Jelikož je tuhost vlastního lisu (lisovacích pásů) řádově větší než lisovaného materiálu (třískového koberce), je možné tento druh kontaktu řešit jako interakci dokonale tuhého tělesa (lisovací desky) a deformovatelného tělesa (třískový koberec) – tzv. „rigid-flexible“ kontakt (Kohnke, 1998). Lis samotný je tak představován jako dokonale tuhá struktura vyjádřená linií, která je navíc řízena tzv. „pilotním“ uzlem, ve kterém jsou předepsány okrajové podmínky (zde v podstatě lisovací faktory) a tímto pak zavedeny i do celého lisovacího pásu. Konečně-prvková síť lisu je tak dána pouze pilotním uzlem. Pro definici kontaktního páru bylo použito cílového typu konečného prvku (elementu) TARGE169 a kontaktního elementu CONTA172. Oba elementy mají kvadratickou báзовou funkci.

Lisovaný materiál (třískový koberec) je modelován jako 2D izotropní kontinuum, které je flexibilní (má svou tuhost danou zvoleným hyperelastickým materiálem, resp. experimentálními daty). Abychom i dále ušetřili výpočetní čas a úlohy zjednodušili, byly oba modely uvažovány jako symetrické, přičemž osou symetrie je osa X (podélná osa modelu lisovaného koberce). Jako element byl zvolen osmiuzlový PLANE183 s kvadratickou báзовou funkcí a U-P formulací (Kohnke, 1998).



3: Třískový koberec



4: Numerické modely dřevotřískového koberce, a) liniový geometrický model, b) uzlový model s okrajovými podmínkami, c) expandovaný konečně-prvkový m.

Geometrický liniový model je uveden na Obr. 4a), síť uzlů vyjadřuje Obr. 4b), konečně prvkový model expandovaný dle osy symetrie je uveden na Obr. 4c).

VÝSLEDKY

Experimentální měření materiálového modelu

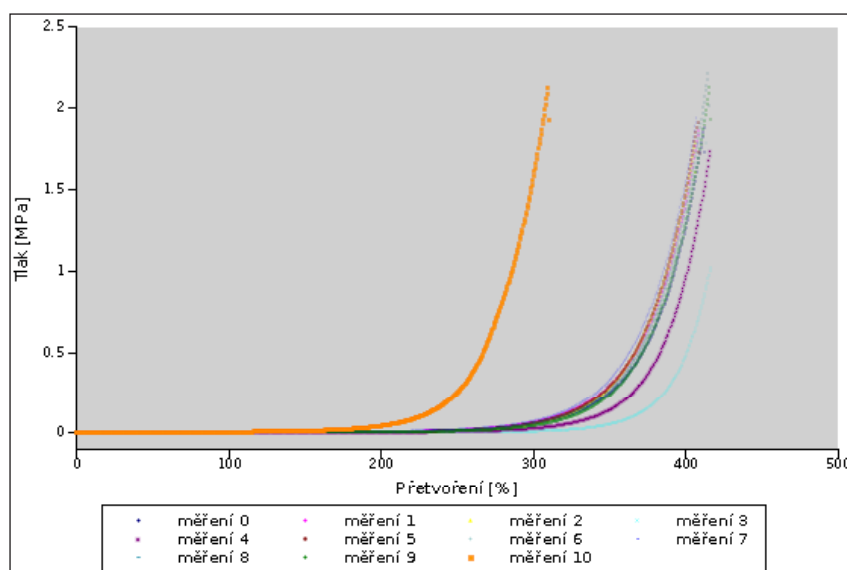
Graf č. 5 znázorňuje pracovní diagramy experimentálních měření hyperelastického materiálového modelu. Měření č. 5, 7 a 10 mělo za cíl popsat odezvu diagramu na jiné tloušťky třískového koberce (oranžová křivka nejvíce vlevo a 2 křivky nejvíce vpravo). Dané odezvy byly zcela dle předpokladů. Zejména v tom, že dané pracovní diagramy (křivky) těchto modelů se posouvaly po ose X (poměrné

deformace), ale jinak vykazovaly stejný trend jako ostatní měření – exponenciální závislost.

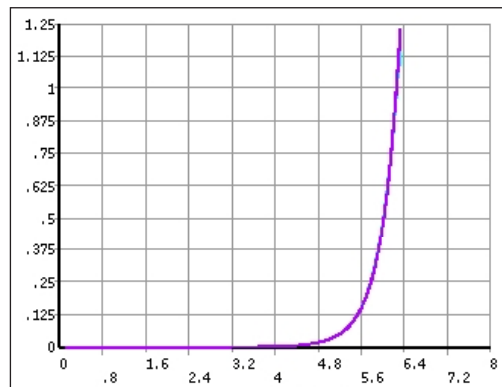
Z „curve fittingové“ analýzy bylo zjištěno, že nejvhodnějším hyperelastickým materiálovým modelem je devítiparametrický Yeohův model, viz graf 6. Ten danou zkoušku vystihuje nejlépe, křivky proložení a experimentu téměř splývají (a to pro všechna měření). Výsledky z operace „curve fitting“ pro ostatní hyperelastické materiálové modely jsou uvedeny v příloze 1.

Hyperelastický materiálový model (Graf 6) vychází z rovnice [10], ve které je druhý člen z důvodu zjednodušení zanedbán (stlačitelnost), potom nabývá následující formulace:

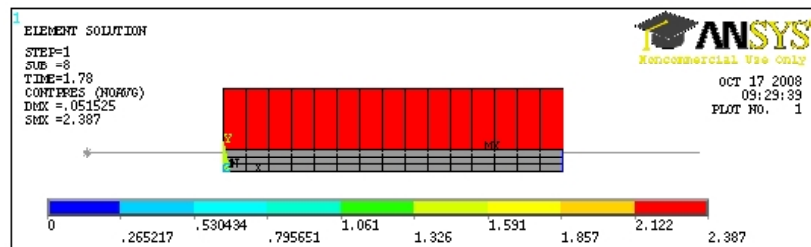
$$W = 1,0045e-5 (\bar{I}_1 - 3) - 4,3829e-6 (\bar{I}_1 - 3)^2 + 1,2609e-6 (\bar{I}_1 - 3)^3 - 1,905e-7 (\bar{I}_1 - 3)^4 + 1,7587e-8 (\bar{I}_1 - 3)^5 - 9,3584e-10 (\bar{I}_1 - 3)^6 + 2,8616e-11 (\bar{I}_1 - 3)^7 - 4,6304e-13 (\bar{I}_1 - 3)^8 + 3,2026e-15 (\bar{I}_1 - 3)^9. \quad [12]$$



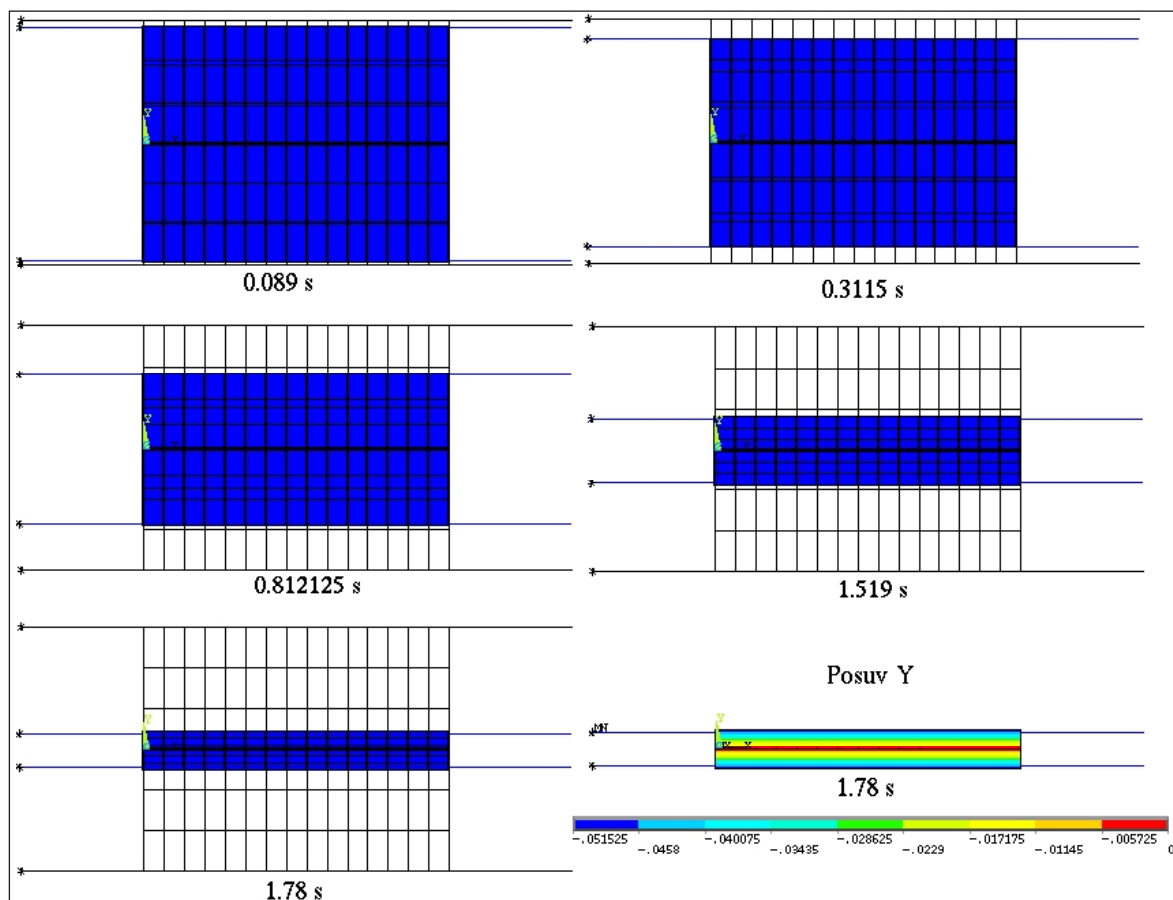
5: Pracovní diagramy – hyperelastický materiálový model



6: „Curve fitting“, Yeohův devítiparametrický hyperelastický model, modře – experimentální data, aproximace – fialově (křivky se překrývají)



7: Kontaktní tlak při maximálním slisování třískového koberce [MPa]



8: Deformace třískového koberce v čase a posunutí ve směru kolmém k rovině desky na konci řešení

Lisování

V této analýze se jedná o slisování materiálu bez uvažování teploty. Výsledky této analýzy slouží k ověření materiálového modelu a současně nastavení kontaktního páru a ostatních podmínek řešení. V konečné fázi lisování (maximální přiblížení lisovacích desek – 15 mm) bylo dosaženo kontaktních tlaků od 1,8 do 2,387 MPa, což jsou hodnoty, které se shodují s tlaky lisu v reálných podmínkách výroby dřevních kompozitů, např. fi. Kronospan a. s., i ve zkušebním stroji, na kterém byl zjišťován materiálový model. Co se týče lisovacího tlaku, je tedy shoda výsledků numerické simulace se skutečností výborná. Jeden z výstupů kontaktního napětí znázorňuje Obr. 7.

Výsledky z této analýzy v podobě deformace koberce v průběhu času znázorňuje Obr. 8.

DISKUSE

Měření hyperelastického materiálového modelu na experimentálním zařízení probíhalo za standardních podmínek. Z důvodů popisu pracovního diagramu lisování třískového koberce různých tloušťek byly testovány vyšší i nižší nánosy třísek. Byla potvrzena hypotéza, že charakter materiálové zkoušky se nemění, tj. zůstává exponenciální, přičemž se mění pouze přetvoření na ose X pracovního diagramu, viz Obr. 5. Na základě toho je možné pro další tloušťky koberce materiálový model dokonce s dostatečnou přesností kvalifikovaně odhadnout. Pro precizní kvantifikaci této změny přetvoření je však vhodné provést více měření. Pro účely této práce je však počet měření (11) plně dostačující – jednalo se spíše o sestavení obecného a parametrického numerického modelu než citlivostní analýzu vlivu nánosu třísek na materiálový model.

Funkce „curve fitting“ ve výpočetním prostředí ANSYS je plně dostačující k posouzení vhodnosti aplikace konkrétního hyperelastického materiálového modelu, ačkoliv jde pouze o posouzení grafické, tj. ANSYS neuvádí korelační koeficienty dané aproximace, navíc nedává uživateli možnost si křivku v podobě dat (např. ASCII) exportovat. Tato funkce počítá pouze materiálové vlastnosti v podobě parametrů C_{10} a dk , viz rovnice [10]. Z daných materiálových modelů se ukázal jako nejvhodnější model Yeohův, dále potom model polynomický. To plyne z formulací modelů, které jsou postaveny na polynomické aproximaci, kdy se zvyšujícím se řádem polynomu pochopitelně roste koeficient determinace. S rostoucím řádem materiálového modelu ovšem roste i výpočetní čas jak během „curve fittingu“, tak zejména v průběhu výpočtu. V případě

modelů s větším počtem elementů (např. ve 3D) by se mohlo jednat o rapidní nárůst výpočetního času.

Z výsledků analýzy dále vyplývá, že se podařilo aplikovat teorii a simulaci hyperelastického materiálu na dané okrajové podmínky, tj. lisování bez uvažování teploty. Kvantitativně to vyplývá ze shody kontaktního napětí a napětí v reálných podmínkách a při měření materiálového modelu, které se pohybuje kolem 1,8–2,5 MPa a to v závislosti na typu materiálu. Teplota při lisování hraje důležitou roli v procesu vytvrzování lepidla a zvýšení plastifikace materiálu, avšak interakce samotných fyzikálních polí v materiálu (deformačního a teplotního) zde v čisté podobě neprobíhá – jinými slovy vznikají zde zanedbatelné deformace vlivem teplotního pole. Teplota tedy deformační pole ovlivňuje nepřímo skrze zvyšování plastičnosti dřeva (snížení tuhosti dřevitého materiálu) a zvyšování tuhosti pojiva (vytvrzování lepidla).

Z hlediska konvergence úlohy největší potíže činí samotná hyperelasticita. Metoda konečných prvků je velmi vhodná metoda pro elasticko-plastické úlohy, avšak pro úlohy hyperelasticity s deformací konečných prvků kolem 600 % (přímým lisováním) se nejvíce jako ideální. K analýze je nutné přistupovat velmi obezřetně a kontrolovat často konvergenční kritéria a nastavení řešiče. Často totiž dochází k neočekávaným selháním metody jako takové, zejména z důvodů samotné formulace konečného prvku. Pro úlohy hyperelasticity se proto doporučuje U-P formulace konečného prvku, která je založená na hydrostatickém tlaku. Ta eliminuje vliv limitní hodnoty Poissonova čísla o velikosti 0,5. V dalším výzkumu velkých deformací při lisování by se mohla s výhodou využít i některá z tzv. „bezšitových“ metod, např. tzv. Material Point Method (Nairn, 2006).

ZÁVĚR

Pro účely analýzy lisování bez uvažování teploty se podařilo sestavit obecný parametrický model (APDL skript), který zahrnuje jak velké deformace (až 600 %), tak kontakt s lisovacími plechy. Provedená analýza slouží jako výchozí bod pro další výzkum a je zejména vhodná pro odlaďování problémů s hyperelastickým materiálovým modelem a celkovým nastavením řešení. Z uvedených výsledků lze také konstatovat, že se v určité míře daný hyperelastický model podařilo využít i pro aplikaci lisování dřevotřískového koberce. Je však nutné zmínit, že sestavený model v současné podobě předpokládá značnou zjednodušení skutečného lisovacího procesu, tj. zejména zanedbává účinek ostatních fyzikálních polí (teplotní a vlhkostní).

SOUHRN

Cílem práce bylo posoudit možnost využití hyperelastických materiálových modelů implementovaných do výpočetního systému ANSYS v numerické analýze lisování dřevotřískových koberců, resp. třískových kompozitních materiálů. Nejvhodnější hyperelastický model byl následně využit jako materiálový model v simulaci lisování. Lisování bylo řešeno jako kontaktní transientní úloha, přičemž třískový koberec byl modelován jako ryze homogenní a izotropní kontinuum se zvoleným materiálovým modelem. V úloze bylo uvažováno se stupni volnosti posunutí. Výstupem simulace je kontaktní tlak, který je třeba vyvodit, abychom daný třískový koberec slisovali na požadovanou tloušťku. Analýza slouží jako odrazový můstek pro další výzkum a analýzu procesu lisování dřevních kompozitů.

hyperelastická, dřevotřískový koberec, metoda konečných prvků, lisování

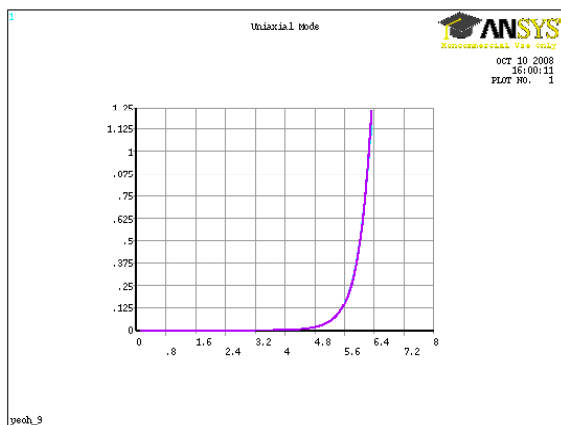
Práce vznikla za finanční podpory grantového projektu IGA 54/2008 – KonLis LDF MZLU. Za poskytnutí materiálu patří poděkování i firmě Kronospan, a. s., jmenovitě ing. Z. Dokoupilovi.

LITERATURA

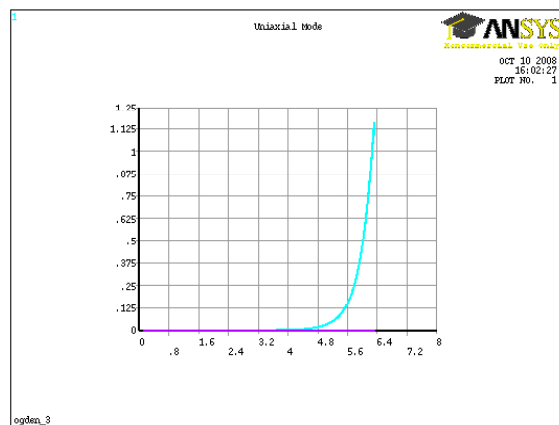
- KOHNKE, P., 2002: ANSYS theory reference. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA
- BODIG, J., 1993: Mechanics of wood and wood composites. Malabar: Krieger Publish. Comp., 712 s, ISBN 0-89464-777-6
- CLOUSTON, P. L., 2001: Computational modelling of strand-based wood composites. University of British Columbia, 149 s.
- HRÁZSKÝ, J., 1998: Rozložení plošné hmotnosti v třískových deskách a její vliv na úroveň fyzikálních a mechanických vlastností. Doktorská práce. MZLU v Brně: MZLU 1998. 162 s.
- HUNT, M. O., SUDDARTH, S. K., 1974: Prediction of Elastic Constants of Particleboard. Forest Prod. J., 24(5), pp. 52–57, ISSN 0015-7473
- MADENCI, E. GUVEN, I., 2006: The finite element method and applications in engineering using ANSYS. Springer 686 s. ISBN: 0-387-28289-0 (HB)
- NAIRN, A. JOHN. 2006: Numerical Simulations of Transverse Compression and Densification in Wood. Wood and Fiber Science, 38 4),
- POŽGAJ, A. et al., 1997: Štruktúra a vlastnosti dreva, 2. vyd. Bratislava: PRÍRODA, a. s., 448 s. ISBN 80-07-00960-4
- SEED, G. M., 2000: Strenght of materials: An undergraduate text. Edinburgh: Saxe-Coburg, 541 s. ISBN 1-874672-12-1
- ŠTEFKA, V., 1999: Lisovací proces trieskových dosák a prenosové javy. Zvolen: Technická univerzita, 61 s. ISBN 80-228-0813-X
- TRICHE, M. H., HUNT M. O., 1993: Modeling of Parallel-Aligned Wood Strand Composites. Forest Products J., 43 (11/12), pp. 33–44, ISSN 0015-7473

PŘÍLOHY

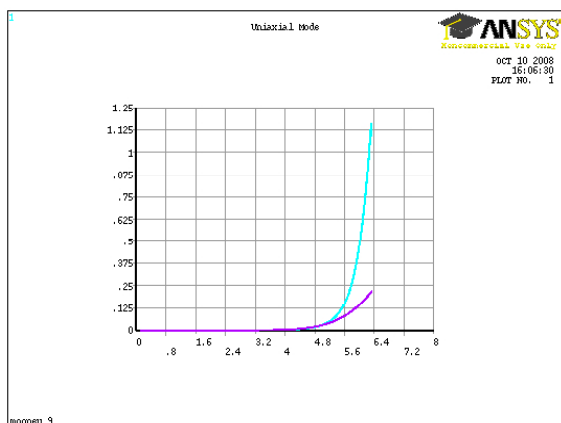
Příloha 1 – Výsledky aproximace experimentálních dat v prostředí ANSYS



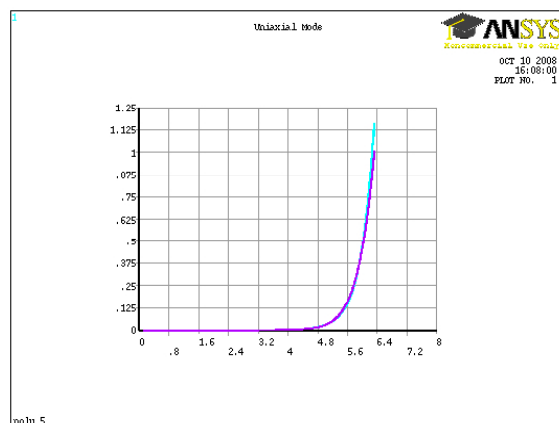
Yeohův devítiparametrický hyperelastický model



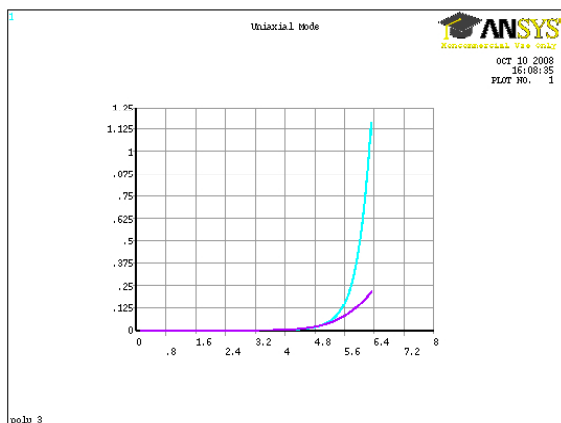
Ogdenův tříparametrický hyperelastický model



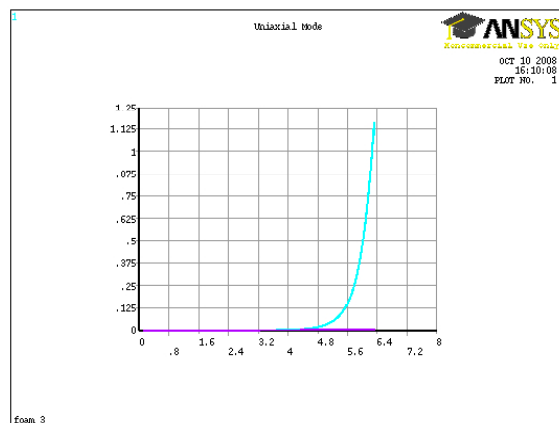
Mooney-Rivlinův devítiparametrický hyperelastický model



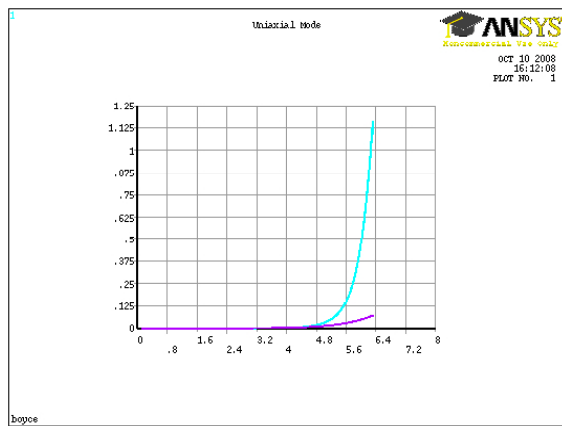
„Polynomický pětiparametrický hyperelastický model



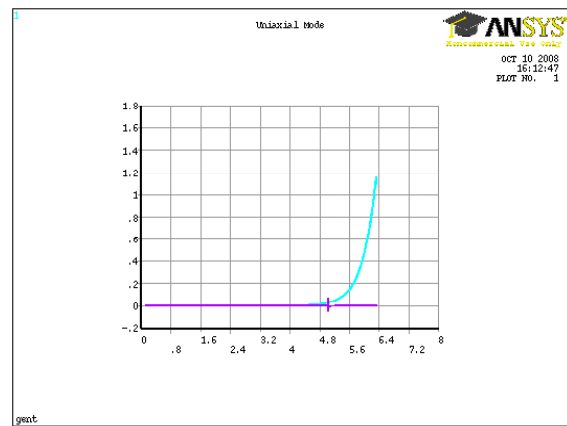
Polynomický tříparametrický hyperelastický model



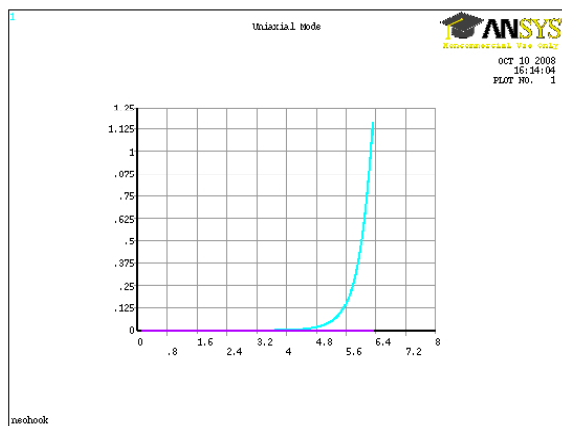
Pěnový tříparametrický hyperelastický model



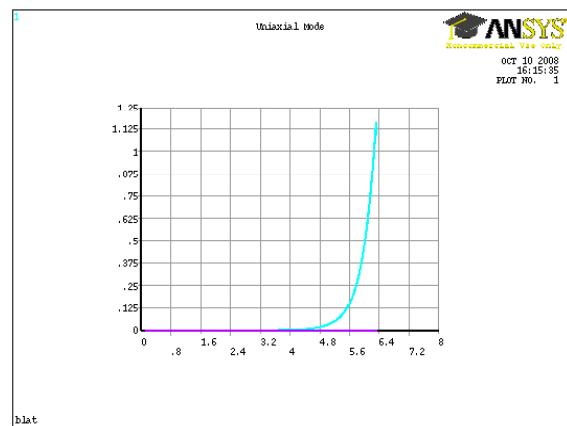
Arrudy-Boyceové hyperelastick  model



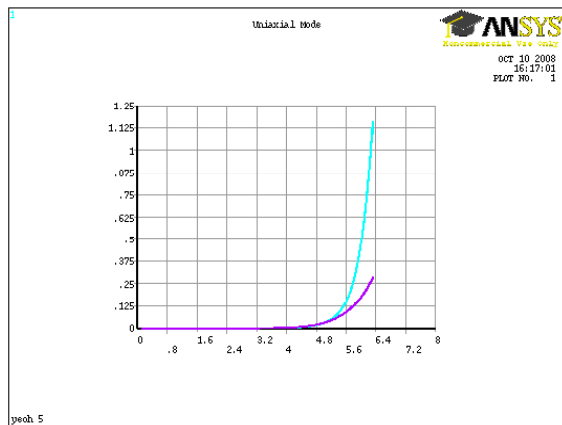
Gent v hyperelastick  model



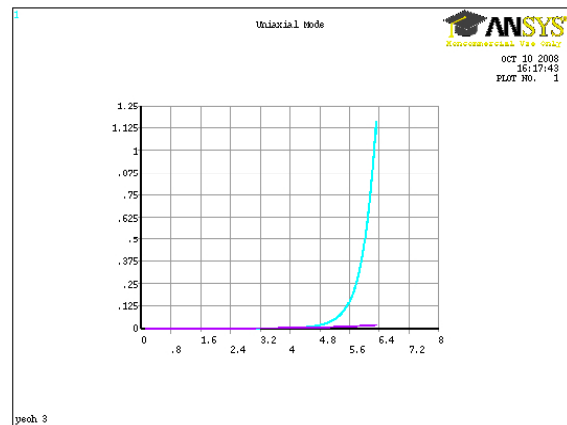
Neohook v hyperelastick  model



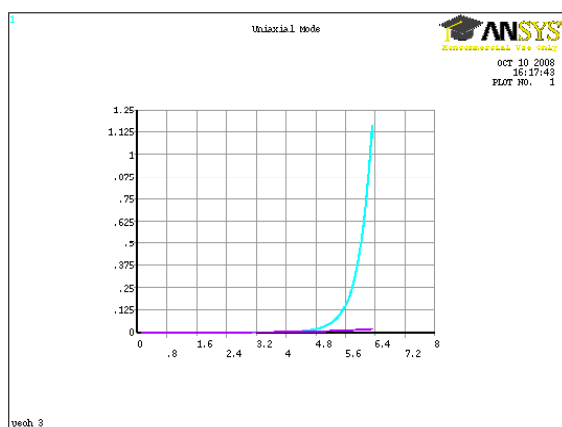
Blatz-Ko hyperelastick  model



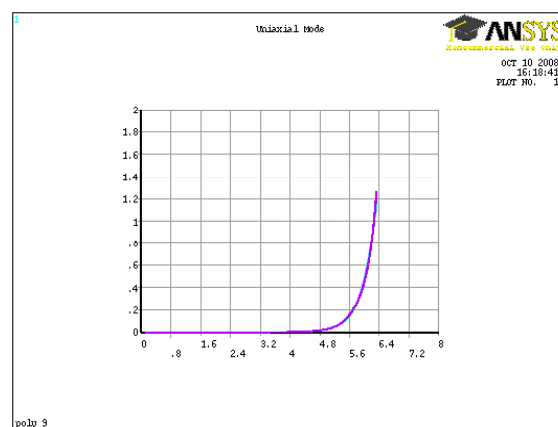
Yeohův p t parametrick  hyperelastick  model



Yeohův t t parametrick  hyperelastick  model



„Curve fitting“, Yeohův tříparametrický hyperelastický model



„Curve fitting“, Polynomický devítiparametrický hyperelastický model

Adresa

Ing. Václav Sebera, Ing. Jan Tippner, Ústav nauky o dřevě, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: seberav@gmail.com, tippner@centrum.cz; <http://wood.mendelu.cz>

