

TEPLOTNÍ, VLHKOSTNÍ A NAPĚŤOVÁ POLE V HRÁNI ŘEZIVA PŘI SUŠENÍ V ATYPICKÉ KOMOROVÉ KONDENZAČNÍ SUŠÁRNĚ ŘEZIVA

J. Tippner, P. Koňas

Došlo: 20. května 2003

Abstract

TIPPNER, J., KOŇAS, P.: *Temperature, moisture and stress fields in deck in the course of drying process in atypical chamber condensing sawn wood kiln*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2004, LII, No. 1, pp. 159-168

Common parametric model of sawn wood, geometry and finite element and physical parametric model pile sawn wood and its immediate airy environment was introduced. By the help of numerical simulation with Finite Element Method utilization the description of temperature distribution, dampness and stress in wood, in dependence on temperature and moisture distribution in airy environment of sawn wood kiln was included. Discussion about problem of design model, mesh refinement and definition boundary conditions was opened. Results of simulations make possible to propound the optimization of drying process. Direction of next investigation was outlined too.

FEM, sawn wood, kiln, numerical simulation, drying, moisture, temperature, stress, ANSYS

V souvislosti se stále se zvyšujícími nároky na znalost materiálu dřeva není pochyb o nutnosti zabývat se též procesem jeho sušení. Výsledkem práce odborníků zabývajících se touto otázkou je řada matematických modelů, pro jejichž realizaci je s výhodou možné užít postupů numerické analýzy. Spolu s pokroky v oblasti výpočetní techniky se nabízí možnost využití moderních výpočetních systémů využívajících efektivní metody konečných prvků (MKP). Hlavní náplní práce v prostředí těchto systémů je sestavení vhodného výpočtového modelu a jeho využití k numerické simulaci, která zajistí požadované výstupy [Kolář, 1997]. Výstupem simulace procesu sušení v obecné poloze, je popis pohybu fyzikálních polí v okolí dřeva a v návaznosti také ve dřevě samém. Je vhodné zabývat se vlivem vybraných faktorů ovlivňujících rozložení teploty, vlhkosti a napětí ve dřevě a majících tak dopad na proces vysoušení materiálu. Praktická realizace procesu sušení vychází v současnosti především z empirických poznatků získaných na základě experimentů či pozorování. Tyto poznatky

jsou koncentrovány v řadě odborných materiálů a normativních přepisech. V některých případech, především méně obvyklých či modernějších způsobů sušení, jsou tyto poznatky nedostačující a pro konkrétní podmínky jsou upravovány. Teoretická analýza jevů zatím nenachází širšího praktického uplatnění a její vývoj proto sleduje přiblížení se teoretických modelů realitě a tzv. praxi.

CÍL

Výchozí fází práce je analýza fyzikální podstaty problému sušení dřeva. Na jejím základě je, při současném zvážení technického a časového omezení práce, možné zpětně formulovat zadání numerické úlohy. Interpretace v prostředí zvoleného výpočetního systému spočívá v sestavení obecného parametrického modelu hráně řeziva a jejího okolí, tedy modelu aplikovatelného v řadě konkrétních případů, u něhož lze změnou parametrů měnit vstupy, tedy i podobu řešení. Obecně platný model je konkretizován na případ využívané atypické kondenzační komorové

sušárny s konvekčním ohřevem. Z mnoha ovlivňujících faktorů se práce zaměřuje především na vliv uspořádání hraně řeziva na třírozměrný či dvojrozměrný popis teplotního, resp. vlhkostního a napětového pole. Na základě výstupů, jimiž jsou rozložení teploty, analogicky též (vzhledem k fyzikální podstatě popisu děje) rozložení vlhkosti a rozložení napětí ve dřevě, je možné navrhnout postupy optimalizace procesu. Konečně je provedeno zhodnocení sestavení modelu a zvažena možnost jeho dalšího rozvoje z pohledu problematiky modelování vůbec.

METODIKA

Na základě studia fyzikální podstaty dějů je zavedením nutných zjednodušení problému (degradací úlohy) možno formulovat zadání numerické úlohy v prostředí výpočetního systému. K sestavení modelu a numerické simulaci dějů je využito výpočetního systému ANSYS verze 6.1, využívajícího Ritz-Galerkinovy variační metody interpretované v podobě MKP [Kolář, 1997], [Rektorys, 1999]. Problém je algoritimizován ve skriptovacím jazyce APDL (Ansys Parametric Design Language) tvorbou dávkových souborů zajišťujících část preprocesingu, řešení i postprocesingu [Kohnke, 1998]. Z důvodu omezení metodiky zvoleným výpočetním systémem i rozdělení úloh obou souvisejících prací je kompletní model rozdělen do dvou částí. Postup tvorby modelu v preprocesorové části spočívá v tvorbě 1) geometrického modelu, tvorbě 2) KP modelu a 3) fyzikálního modelu. Odděleně je takto vytvořen model hraně a jejího bezprostředního vzdušného okolí, model širšího sušicího prostředí sušárny a jejího okolí [Zejda, 2003]. Oba tyto modely jsou následně sjednoceny a vstupují do řešení. Vzhledem ke skutečnosti, že systém ANSYS nepodporuje současné závislé řešení dějů v tekutinách (CFD FLOTRAN analýzy) a dějů v pevných látkách (pro účely této práce strukturální analýzy a termální analýzy, resp. v jejich vázané podobě jako COUPLED analýzy), je nutné nalézt postup zajištění interakce „pevné“ a „vzdušné“ části modelu, viz níže. Další omezení ze strany zvoleného výpočetního systému spočívá v zamezení řešení současného pohybu teploty a vlhkosti. S tímto problémem se simulace setkává jak v části řešení pohybu polí ve vzduchu, tak v části řešení šíření fyzikálních polí ve dřevě. Reálně dochází ve vzduchu k šíření tepla i vlhkosti současně. Rovněž ve dřevě je obecně popisováno vázané šíření několika fyzikálních polí [Siau, 1995]. V rámci kontinua je vhodné řešit (není-li zohledněn pohyb vody volné ve dřevě – Darcyho zákon) soustavu dvou parciálních diferenciálních rovnic Fourierova a Fickova zákona [Horáček, 2002]. V popisu dějů ve dřevě je simulace zjednodušena do podoby řešení dějů difuze vlhkosti a difuze tepla odděleně, tedy bez vzájemné závislosti.

Při využití analogie Fourierova a Fickova zákona je pak pozornost soustředěna na volbu materiálových konstant [Požgaj, 1997] při sestavení materiálového modelu a definice okrajových podmínek vlastního řešení. Vzhledem k tomu, že rozhodující úlohu na změny ve dřevě má při procesu sušení pohyb pole vlhkostního, je možné předpoklad zjednodušení přijmout, interpretace konečných výstupů však musí být zmíněným skutečností podřízena. Velkou výhodou simulace zůstává analýza vázaných fyzikálních polí (COUPLED analýza), jejíž pomocí se práce dostává k výpočtu rozložení napětí, posunutí a poměrných deformací v závislosti na řešení rozložení teploty (resp. vlhkosti). Prostředí zvoleného modeláře umožňuje řešení stacionární i transientní analýzy. V obou případech je možné vzájemnou interakci obou prostředí řešit, tj. získat popis pohybu fyzikálních polí, jež jsou oběma částem modelu společná (v tomto případě teplotní, resp. vlhkostní pole). Je v zásadě možné zavést dva postupy. První z nich je odstoupení od časově závislého řešení. Tento postup je možné uplatnit jen v elementárních případech, kdy je možné zanedbat rozvoj sledovaných dějů v čase, což s cíli práce (v kontextu sušení odehrávajícího se v čase, či dokonce řízeného časovými řádami) nekoresponduje. Je nutné zajistit popis děje v čase a zajistit též možnost průběžného zásahu do tohoto děje změnou vstupních parametrů. Nabízí se možnost řešení celkového časového úseku rozdělit na menší časové úseky (snímky) a v jednotlivých snímcích provést jednotlivá řešení (resp. řešení FLOTRAN CFD analýzy a COUPLED analýzy). Řešení každého snímku je vhodné uskutečnit časově závisle. Rozdělením celého časového úseku na dostatečný počet snímků je možné nahradit celkovou ideálně spojitou transientní analýzu řadou dílčích navazujících transientních analýz. V tomto okamžiku vyvstává otázka zajištění vývoje celého řešení, vzájemné návaznosti jednotlivých snímků. Její zodpovězení je postaveno na předpokladu závislosti stavu veličiny v daném okamžiku na jejím stavu v okamžiku předcházejícím. Je-li okamžikem v našem zjednodušujícím pohledu zvolený snímek, je nutné zavést závislost vývoje sledovaných veličin v jednotlivých po sobě jdoucích snímcích. Formulace problému tak spočívá v postavení výsledku předchozího snímku (tj. konečného ustáleného stavu sledované veličiny v případě volby stacionární analýzy) do pozice okrajové (výchozí) počáteční podmínky řešení snímku následujícího. Obecně je možné zavést nehomogenní počáteční rozložení vlhkosti, teploty i napětí v průřezu řeziva jako vstupních počátečních podmínek řešení, odpovídající změnám, kterým byl materiál dosud vystaven. K tomuto účelu byla zvolena alternativa nultého snímku řešení pohybu polí ve dřevě, na základě jehož výpočtu jsou rozložení veličin použity jako počáteční

podmínka řešení snímku nadcházejícího. Rozložení vybraných polí ve dřevě je docíleno řešením snímku s definovanými prvotními okrajovými podmínkami (jednotná teplota, resp. vlhkost na povrchu a uvnitř materiálu, omezení stupňů volnosti posunutí na vybraných entitách hraně).

Obecné zadání tělesa hraně i uspořádání jednotlivých kusů jej tvořících je uskutečněno popisem vnějšího tvaru pomocí zvolených matematických funkcí popisu tvaru hraně. Pro vlastní simulaci bylo použito především obecných lineárních a nelineárních funkcí. Příklady konkrétně užitých funkcí uvádí Tab. I. Předpoklad parametrického zadání celé úlohy naplňuje i možnost určení dimenzí všech objemových entit modelu libovolnými rozměry. Postupně bylo vyloučeno zavádění nelinearit na úrovni geometrie řeziva

(oblina apod.). Program ANSYS nabízí možnost zavádění statistických postupů k definici hodnoty parametru. Jedná se o náhodné generování hodnot čísel metodou Monte Carlo, jejichž rozložení odpovídá rovnoměrnému rozložení, Gaussovu rozložení, rozložení kumulativní četnosti, trojúhelníkovému, beta a gama rozložení [Kohnke, 1998]. Možnosti zavést tento postup bylo využito u tvorby geometrie hraně. Zvoleno bylo rovnoměrné rozložení (tj. s vyrovnanou četností), analogickým postupem však mohou být zavedeny i způsoby ostatní. Generování hodnot je záměrně omezené na generování z předdefinovaných množin čísel a uživatel předem definuje několik přesně vymezených hodnot (tedy dle volby i jedinou), které mohou být parametřům náhodně přiřazeny.

I: Přehled užitých matematických funkcí ohraničujících oblast výskytu řeziva v hrani

$y = \sqrt{ h - x^2 }$	$y = \sqrt{(b^2 - b^2 \cdot (x - m)^2 / a^2) - n}$
$y = (-x \cdot i)^n - b$	$y = (-x \cdot i)^n - b$
$y = x / a + b$	$y = -x / a + b$
$y = x / a + b$	$y = x^n - b / + c$
$y = x$	$y = x / a + b$

Diskretizace oblasti na konečný počet entit je v konečné fázi provedena alternativou taženého i volného síťování. Pro tažené síťování pevných těles byl zvolen šestiboký lineární element SOLID5, v případě volného síťování (tvorby konečně prvkové sítě) čtyřboký kvadratický element SOLID98. Pro síťování vzdušné části byl použit element FLUID142. Tvorba fyzikálního modelu spočívá především v určení materiálového modelu a v definici okrajových podmínek řešení. Realizovaný materiálový model je v případě dřeva lineárním ortotropním elastickým kontinuem [Bodig, 1982], [Brdička, 2000] s lineární závislostí materiálových konstant na teplotě (řešení rozložení teploty), resp. jejich bilineární závislostí na vlhkosti se zlomem na mezi nasycení buněčných stěn (řešení rozložení vlhkosti). Materiálový model vozíku bylo možné podstatně zjednodušit (izotropie, teplotní nezávislost, plnostěnný profil). Stanovení okrajových podmínek úlohy je uskutečněno omezením stupňů volnosti posunutí na vybraných entitách (uvažováno několik alternativ) a definicí počáteční teploty (analogicky vlhkosti). Vzájemná interakce těles hraně je uskutečněna dokonale tuhým spojem v ploše průniku.

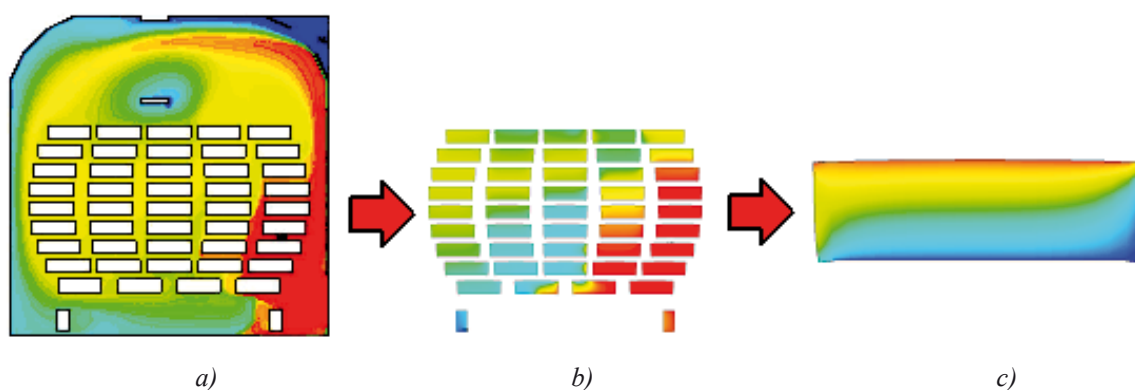
Simulace děje v třidimenzionální podobě se setkává s problémy plynoucími z technického zázemí práce. Výpočet navrženého modelu je přes řadu provedených zefektivňujících kroků stále časově náročný. Kompletní řetězec výpočtů by svými nároky odpovídal moderní výpočetní stanici, kterou pracoviště autora v době realizace nedisponovalo. Na dostupné technické úrovni hardware (PC AMD Athlon 1200, 512 MB RAM, HD 40 GB), je výpočet v přijatelném časovém horizontu (dny až týdny) nemožný. Z tohoto důvodu bylo nutné přistoupit k některým zjednodušením úlohy. Podstatným zjednodušením je tzv. degradace třidimenzionální (3D) úlohy na úlohu dvojdimenzionální (2D). Tento postup si pak vynucuje řadu dílčích degradací z něho plynoucích. Původně sestavený 3D model, je v rámci zmíněných technických omezení použitelný pouze v případě izolovaného snímku řešeného stacionárně. Tímto způsobem je možné popsat pouze jednostranný vliv prostředí na materiál či naopak, nikoliv spojitou vzájemnou interakci. Především pro popis rozložení fyzikálních polí charakteristický pouze v 3D modelu, jež je za pomoci 2D modelu realitě vzdálen (viz níže), bude simulace izolovaného snímku použita. Nabízí

se několik způsobů této degradace úlohy (především výběr místa vedení řezu 3D modelem). Z tohoto důvodu nastává několik odlišných (a protichůdných) případů geometrického uspořádání modelu. Především je nutné se zabývat alternativou řezu v místě výskytu prokladů a v místě, kde se nevyskytují (tedy prostor, který by zaujímaly proklady, je v tomto případě vyplněn vzduchem). Druhá z možností zajišťuje bezproblémový pohyb fyzikálních polí ve vzdušné části, neumožňuje však reálné stanovení okrajových podmínek omezením stupňů volnosti posunutí v části modelu, složené z pevných těles. Bez jejich věrného stanovení je analýza napětí ve dřevě zavádějící. V případě první alternativy je tomu naopak a nelze v její podobě považovat vliv okolního vzdušného okolí dřeva na jeho vnitřní procesy za realitu skutečných procesů blízký. Z tohoto důvodu by se zdálo vhodným provedení řezů v podélné rovině hraně, ovšem tato možnost neumožňuje stanovení okrajových podmínek řešení FLOTRAN CFD analýzy (především rychlosti na ventilátorech apod.). Východiskem z těchto úvah je tak přinejmenším opodstatnění původní volby 3D modelu a nutnost jeho budoucí kompletní realizace, pro dokonalejší popis dějů na zvolené úrovni pohledu. Nicméně pro popis způsobu zajištění interakce materiálu a jeho prostředí (tedy v prostředí zvoleného výpočetního systému interakce FLOTRAN CFD analýzy a COUPLED analýzy) a důkaz její realizace samé, je 2D model plně dostačující i za předpokladu, že interpretace konkrétních výsledků je ztížena. Na tvorbu geometrického a konečně-prvkového modelu navazuje tvorba modelu, resp. modelu fyzikálních a vlastních uspořádání výpočtů obou analýz, které zajišťuje vazby obou analýz a je tak jádrem problému. Stručně se jedná o definování dvou fyzikálních prostředí, pevné a vzdušné části modelu, v jejichž rámci budou dílčí analýzy probíhat. Vlastní výpočty vzdušné a pevné části probíhají principem nalezení rovnováhy v prostředí, která je narušena zavedením okrajových podmínek. Vlastní výpočet jednoho snímku spočívá ve hledání rovnováhy mezi vzdušným prostředím a prostředím pevných těles iteračním postupem. K zhodnocení existence této rovnováhy je sestrojeno kritérium, které porovnává výstupy na rozhraní obou prostředí. Rovnováha je pak nastolena v situaci, kdy teplotní a deformační rozdíly ve výstupech řešení obou analýz (tj. řešení obou prostředí) nedosáhnou předem definované maximální výše. Splněním podmínky je ukončen cyklus hledání rovnováhy. Porovnávání výstupy jsou získávány probíhajícími transientními analýzami (FLOTRAN CFD a COUPLED) s definovaným počtem vlastních

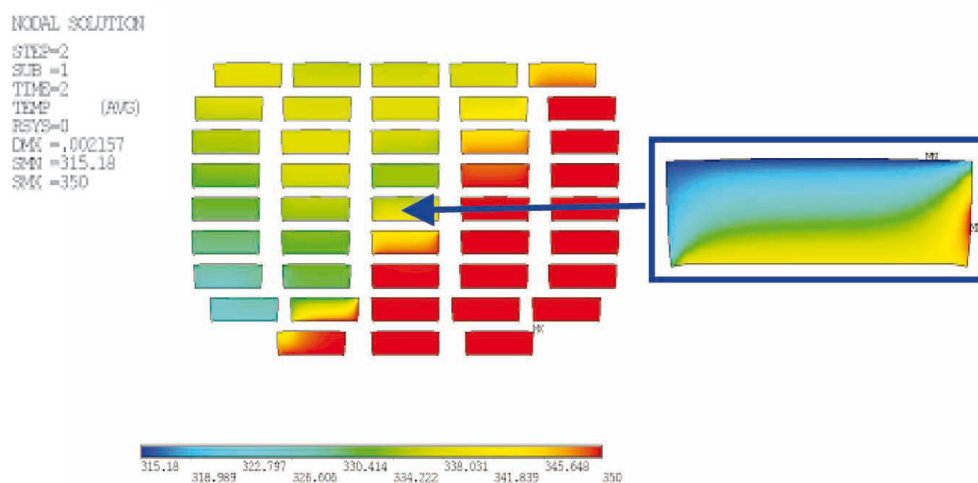
iterací. Tímto komplexním výpočtem jsou získány potřebné výstupy z řešení jednoho snímku. S cíli práce korespondující sestavení režimu vysoušení materiálu, vyžaduje řetězec simulací v několika snímcích. Je uskutečněn hlavním cyklem, nadřazeným iteračnímu cyklu výše popsanému, v počtu opakování rovnajícímu se zvolenému počtu snímků. Charakteristika průběhu sušicího režimu je zajištěna volbou okrajových podmínek řešení FLOTRAN CFD analýzy, tedy řízením ovládacích prvků sušárny. Tímto je sestaven dvojdimenzionální model sušárny a hraně se všemi náležitostmi možností bližšího určení uživatele, definovaných pro model třídimeznionální. Tento model umožňuje provedení řádu simulací, které řeší vzájemnou interakci materiálu a jeho okolí, změnu chování materiálu na základě změn podmínek aj., v časové závislosti, jak vyplývá z požadavku simulace skutečného procesu sušení řeziva v konkrétních zvolených podmínkách.

VÝSLEDKY

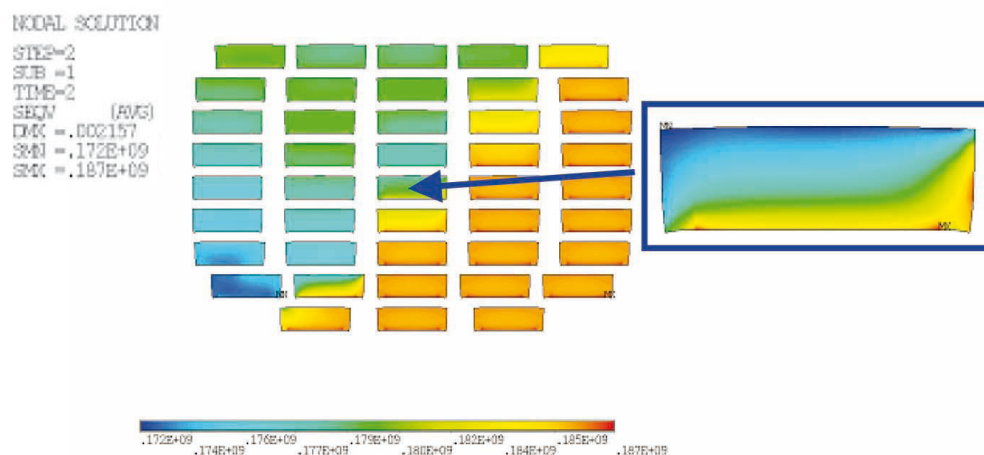
Z množství výsledků, jež v číselné či grafické podobě nabízí výpočetní systém, je třeba se zaměřit na popis vybraných veličin, a to ve vybraných případech sestavení modelu. Požadovanými výstupy jsou především rozložení teploty, vlhkosti, rozložení normálových napětí v příslušných směrech, smykových napětí v daných rovinách, velikosti složek posunutí v jednotlivých směrech a jejich součet, velikosti relativních deformací v jednotlivých směrech. Je použito výpočtu energetického ekvivalentu Von Mises v případě napětí a poměrných deformací. Ve všech sledovaných případech byla nalezena předpokládaná závislost mezi šířením pole teploty a šířením pole napětí. Tato závislost je patrná na úrovni tělesa hraně (jakožto celku), rovněž však na úrovni detailního popisu oblasti vybraného kusu řeziva. Viz např. Obr. 2 vs. Obr. 3. Jak je z obrázků patrné, je kus řeziva vybírán ze středních partií hraně. V těchto místech jsou očekávány hodnoty sledovaných fyzikálních polí na úrovni kusu řeziva blízké průměrným hodnotám těchto polí v měřítku celé hraně. Dle očekávání je z výsledků patrný vliv výstupu kondenzační jednotky (v tomto případě výstup teplého vzduchu do sušicího prostoru) na rozložení teploty v okolí řeziva. Tomuto rozložení následně odpovídá i rozložení teploty na úrovni materiálu hraně, tudíž i rozložení napětí na této úrovni, viz Obr. 1. Detaily v Obr. 2, 3 jsou uvedeny z důvodu popisu charakteru rozložení polí, nikoli jejich absolutních hodnot a legendě hodnot v barevných škálách neodpovídají.



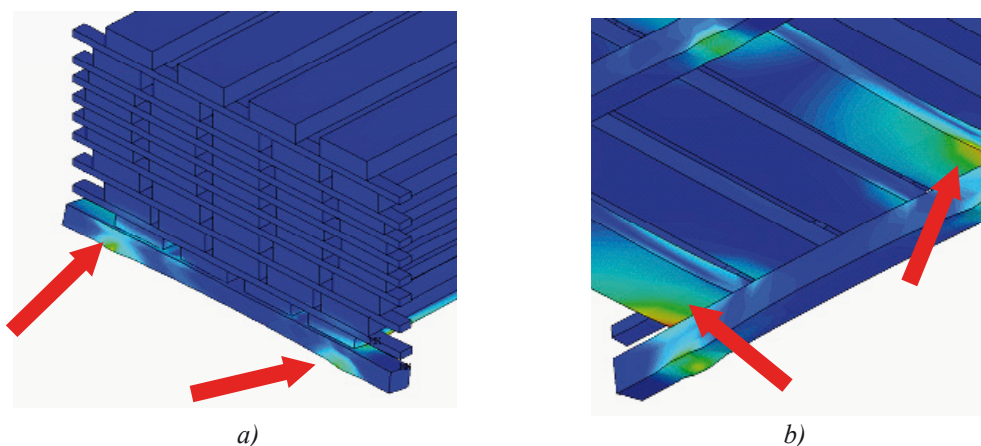
1: Charakter rozložení teploty v okolí hráně (a), v hrani (b) a vybraném kusu řeziva (c) v případě 2D modelu



2: Rozložení teploty v hrani a vybraném kusu řeziva



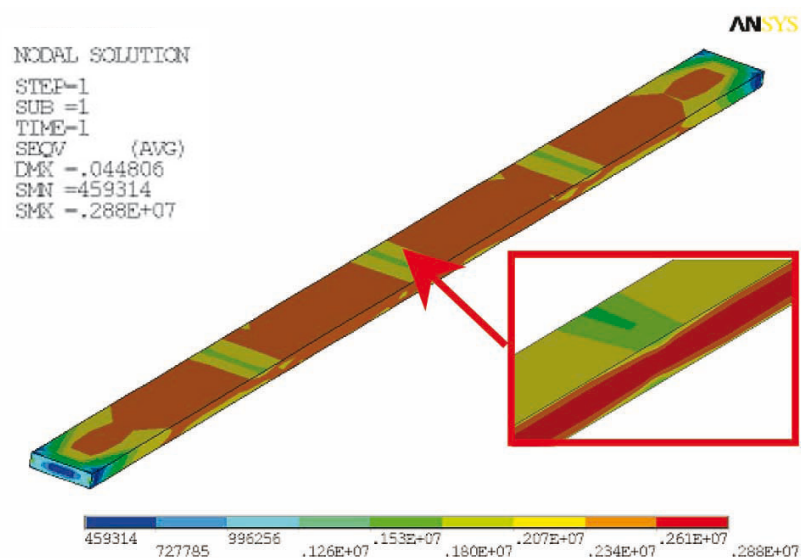
3: Ekvivalent napětí Von Misse v hrani a vybraném kusu řeziva



4: Ekvivalent napětí Von Misse v hrani – identifikace špičkových napětí; pohled z čela (a) a zespod (b) hráně

Jak bylo předpokládáno, je zobrazení rozložení napětí ve dřevě ovlivněno především lokálním výskytem extrémních hodnot (Obr. 4) v místech výskytu koncentrátorů napětí. Tato rozložení napětí však byla očekávána vzhledem k nutné formulaci vzájemné interakce objemů jako dokonalého vetknutí. Jak je později diskutováno jedná se především o místa styku objemových entit prokladů a řeziva, místa omezení

stupňů volnosti posunutí vozíku. Především výsledky v uzlech náležejících sušárenskému vozíku grafické výstupy silně ovlivňují. Postupným výběrem omezeného množství elementů, resp. uzlů pro zobrazení výsledků se dostáváme k detailnějším popisům sledovaných veličin. Např. Obr. 5 znázorňuje rozložení napětí v případě kusu řeziva ze střední části hráně, patrný je především vliv kontaktu s prokladem.



5: Ekvivalent napětí Von Misse pro vybraný kus řeziva, detail rozložení v místě interakce s prokladem - řez

DISKUSE

V diskusi není vhodné omezit se pouze na výsledkovou část. Především je vhodné (a to i na základě výsledků) zabývat se celkovým problémem navrzení a sestavení modelu a zvážit jednotlivé degradace úlohy na úrovni geometrické, konečně-prvkové a fyzikální. Celková koncepce simulace vyplývá především z možností výpočetního systému. S výhodou je uplatněna možnost provést analýzu pohybu vázaných fyzikálních polí, i když je omezena na popis polí párových (v konkrétním případě napětí a teploty, resp. napětí a vlhkosti). Vhodnější se jeví v této práci nedosažená úroveň popisu současného pohybu vlhkosti a tepla spolu s popisem mechanického chování dřeva. Požadavek časové závislosti řešení byl splněn. Přínosem je zejména samotné sestavení modelu popisujícího vzájemnou interakci materiálu a jeho vnějšího prostředí. Pozitivní je především obecnost sestaveného modelu. Při jeho konkrétní realizaci nebyly zdaleka vyčerpány možnosti obecnosti sestaveného modelu. Na základě výsledků získaných řešením tělesa hraně jako celku je možné stanovit okrajové podmínky pro řešení např. skupiny kusů řeziva, či jednotlivých kusů řeziva. S ohledem na detailnější popis napětí ve dřevě by bylo možné např. aplikovat již realizovaný model vidličkové zkoušky či zavést vliv stavby dřeva na makroskopické i mikroskopické stavby [Koňas, 2002]. Podobné „vize“ se však jeví především jako předčasné. Patrně nejdůležitější částí přiblížení se modelu „pevné části“ realitě je zatím vyřešení otázek vzájemné interakce těles hraně i vazby celého tělesa hraně (viz níže).

Proudění sušícího média v okolí hraně s oblastí výskytu řeziva ohraničenou v příčné rovině rovnici kružnice a tvarů hraně tomuto případu blízkým je nejvíce podobné způsobu proudění vzduchu v sušárně obecně (případ komory prázdné či s jednoduchým obtékaným tělesem). Tímto dochází k nedostatečnému proudění, především ve vnitřních oblastech tělesa hraně. Míra pohybu fyzikálních polí ve vzduchu uvnitř hraně je však výrazně ovlivněna především mocností vrstev vzduchu (tj. tloušťkou prokladů, rozestupem kusů řeziva aj.) a je též ovlivněna mírou jemnosti síťování při diskretizaci úlohy (tedy bohužel i způsobem sestavení modelu). Z tohoto důvodu jsou podmínky plynoucí z rozložení teploty a vlhkosti ve vzduchu, na jejichž základě probíhá i rozložení těchto veličin ve dřevě, nejvhodnější z pohledu zabezpečení mírnosti jejich působení, tedy předpokladu sušícího procesu sledujícího udržení jakosti materiálu v největším možném podílu z celkového množství materiálu v hrani. Tento závěr se však střetává se skutečností, že použití hraně těchto tvarů snižuje celkové využití sušícího prostoru (především v porovnání s pravoúhlým tvarem hraně rozměrů blízkých maximálním rozměrům sušícího prostoru) a především se skutečností,

že dosažené gradienty vlhkosti jsou až příliš nízké, čímž se režim stává nepříjemně mírným. Naopak tvary hraně vyznačující se ostřejší geometrií (především v horní části hraně) jsou základem k průběhu intenzivnějšího sušícího procesu. V místech hraně, kde její geometrie v příčné rovině výrazně vystupuje z pomyslného tvaru kruhu v horních částech hraně, ve kterých je pohyb vlhkosti, resp. teploty ve vzduchu intenzivní, jsou gradienty poměrně strmé. Lze zde očekávat, především v případech tvrdších režimů, zhoršení jakosti materiálu.

Z hlediska vlastní simulace procesů k nimž dochází v hrani, je třeba diskutovat především alternativy definice okrajových podmínek. Jedná se jednak o způsob omezení stupňů volnosti posunutí, jednak o definici okrajové, resp. počáteční podmínky teploty či vlhkosti. Jednou z dalších, v této souvislosti metodickou práce zmiňovaných možností přiblížení se realitě skutečných procesů, je *kontaktní analýza*. Přiblížení, jež přináší, je možné požadovat v místech vzájemného dotyku všech objemových entit (představujících desky řeziva, proklady, podkladní hranoly a vozík), především ale (vzhledem k zaměření modelu) mezi entitami prokladů, resp. hranolů a řeziva. V těchto místech ve skutečném ději dochází ke tření. Zavedení kontaktní analýzy do klasické strukturální analýzy, (jejíž je součástí, a která je na současné úrovni tohoto modelu jako součást COUPLED analýzy řešení), je technicky racionálně uskutečnitelné (zvýšení složitosti modelu) pouze na úrovni subřešení jednotlivých kusů řeziva. Tento proces vyžaduje mimo jiné i zásadnější změny v modelu (hraně jako celku a zejména na úrovni vybraných kusů řeziva), a to již na úrovni geometrické a úrovních následujících (konečně-prvkové, fyzikální). Jeho zavedení v tomto okamžiku by však nepřineslo očekávaný efekt zpřesnění.

Pro řešení rozložení pole fyzikálních a mechanických veličin nebyla řešena oblast vlivu volné vody. Přímý vliv pohybu vody volné na rozložení napětí (jež je konečným praktickým výstupem simulace) je prakticky zanedbatelný. Výjimku tvoří speciální případy chování dřeva (kolaps dřeva), které případně mohou být předmětem spíše samostatných analýz a simulací.

Vlastní proces optimalizace sušícího řádu je možné velmi rámcově navrhnout několika postupy. Vlastní využití nástroje optimalizace, který zvolený výpočetní systém nabízí (např. pro poměrně jednoduché úlohy strukturální analýzy), je patrně technicky nemožné. Důvodem je především volba objektivní (posuzované) funkce, která je např. pro sestavení podoby geometrického modelu (vnější tvar, výška prokladu, šířka vzduchové mezery) velmi variabilní. Rovněž zařazení této procedury do výpočtu je v práci dosažené složitosti nemožné. Je však možné navrhnout postup, kdy na základě posouzení výstupů (např. výsledků

výpočtu Hoffmanova kritéria aj.), budou měněny okrajové podmínky řešení FLOTTRAN CFD analýzy (tj. především zapínání ventilátorů, přídavných topných těles, odvětrávání komory aj. změny parametrů sušicího prostředí). Tuto úlohu je možné algoritmirovat (zavést přímou změnu vybraného parametru či několika parametrů), či ji provádět individuálním přístupem (tj. subjektivním posouzením výsledků a změnou parametrů) uživatele. Na základě posouzení rozložení napětí hraně je možné doporučit např. místa odběru sušících vzorků. Především není vhodné provádět odběr vzorků z horní části hraně v místech vzdálenějších od stěny sušárny, na níž je umístěna kondenzační jednotka. Taktéž není možné považovat za reprezentativní vzorek odebíraný z oblastí hraně ovlivněných výstupem z kondenzační jednotky. Pro konkrétní závěry je však nutné provést detailnější analýzu pohybu fyzikálních polí v konkrétním případě zvoleného tvaru, uspořádání hraně aj. Na této úrovni sestavení modelu jsou podobné závěry spíše intuitivní. Tyto postupy obecnost modelu umožňuje, rozsah a zaměření této práce nikoli.

Je nutné diskutovat použití energetického kritéria Von Misse. Autoři si jsou vědomi jeho určení především pro popis chování izotropních materiálů. Přesto bylo využito pro účel tohoto modelu, který pracuje s ortotropním modelem materiálu. Vzhledem ke skutečnosti, že zmíněné energetické kritérium nebylo využito k formulaci přímých závěrů, (např. posouzení dimenzí podkladních hranolů apod.), ale pouze k orientačním účelům (především identifikace koncentrátorů napětí aj.), je možné jeho volbu pro tyto účely opodstatnit. Důvodem k použití tohoto kritéria byla i zmíněná skutečnost, že je standardní součástí aparátu zvoleného výpočetního systému. Naopak vhodnější Hoffmanovo energetické kritérium je nutné aplikovat dodatečně, což především v případě náročných 3D modelů výrazně zvyšuje technickou náročnost simulace. Výpočet Hoffmanova kritéria je však pro další konkrétní užití výsledků strukturální části analýzy nezbytný.

Další možný vývoj v oblasti numerické simulace vybraných dějů v prostředí zvoleného výpočetního systému je závislý na zvýšení úrovně technické části výpočtu (hardware), především v případě dalšího zjemnění pohledu na stavbu materiálu. Postupy dalšího zpřesňování popisu na makroskopické úrovni (substrukturace úlohy aj.) byly naznačeny. V případě setrvání na úrovni teorie homogenního kontinua se jeví ideálním prostředkem k docílení popisu složitých jevů, k nimž ve dřevě dochází, náročný dlouhodobý úkol sestavení vhodného typu konečného prvku.

Využití výsledků práce lze rozdělit do několika základních rovin. První z nich se nachází v oblasti vztahů k vlastnímu modelování procesů. Z tohoto pohledu je nutné uvést především hledání způsobu řešení vzájemné interakce „fluid“ a „solid“ elementu.

Bylo docíleno sestavení modelu popisující tuto interakci a jeho realizace v třírozměrném prostoru. Tento model řeší základní otázky rozložení teploty a rychlostí v prostoru sušárny, s hrubým převodem okrajových podmínek studovaných fází, bez dosažení rovnovážného stavu daného vzájemnou interakcí obou studovaných podoblastí. Matematicky konzistentní převod parciálních řešení difuzních a transportních procesů na hranici mezi „vzdušnou“ a „pevnou“ částí modelu byl realizován dvourozměrnou alternativou, kde bylo rovněž dosaženo požadovaného nestacionárního řešení. Současně byly vzneseny požadavky na hlubší řešení dějů, především v rámci oblasti dřeva a byly identifikovány problematické části procesu modelování, odvolávající se především na detailní popis vycházející z experimentálních technik stanovení podmiňujících parametrů prostředí (způsob ukotvení pevné části, vzájemná interakce hraně s vozíkem a další parametry vyplývající z definice kontaktních problémů mezi jednotlivými entitami). Vzhledem ke stupni současného technického rozvoje i konkrétní úrovni vybavení tohoto záměru je nadále podrobnější simulace dějů se zohledněním reálnějších podmínek ve dřevě ztížená. V otázce praktické realizace simulace tohoto problému je možné konstatovat, že parametrický model sušicího prostoru vyhovuje dané skupině sušáren. Je pro ně mimo toho možné model bez náročných úprav přizpůsobit. Pro sušárny modelu vzdálenější (především geometrii) je úprava modelu možná, bohužel však pro svou náročnost ke splnění operativních požadavků praxe je zatím méně vhodná. Výhodnější je pozice modelu sušeného materiálu, který je ve své podstatě částí (v některých případech absolutně) schopný takového přenosu.

Simulace dějů jsou po úpravách aplikovatelné v mnoha i vzdálenějších oblastech (např. jiné způsoby hydrotermické úpravy dřeva, odezva materiálu na změnu podmínek obecně atd.). Numerické simulace podobného charakteru, nejsou-li shledány plnohodnotnou alternativou, mohou výrazně zefektivnit průběh budoucích nákladnějších experimentů. Díky volbě konkrétního případu sušicího zařízení model umožňuje zabývat se změnou parametrů procesu sušení i změnou parametrů souvisejících s jeho konstrukcí (aerodynamické prvky sušárny apod.), a tím i realizovat proces optimalizace parametrů. Je možné posoudit libovolný případ sestavení hraně a libovolný případ dimenzí vysoušeného řeziva.

ZÁVĚR

Jedním z obecných závěrů je skutečnost, že bylo docíleno sestavení parametrického modelu na poměrně podrobné makroskopické úrovni, umožňujícího numerickou simulaci chování materiálu v závislosti na změnách podmínek prostředí, které jej obklopuje. Výstupem je tedy časově závislý popis pohybu

vybraných fyzikálních polí v materiálu a prostředí, které jej obklopuje, přičemž je simulována vzájemná interakce tohoto prostředí a materiálu. Vytvořen byl dvourozměrný model, u něhož bylo dosaženo interakce materiálu a okolí v čase. Třírozměrný model byl z důvodů technických omezení práce realizován pouze pro vybraný časový okamžik děje. Rozšíření problému z 2D do 3D je však uskutečnitelné. Podařilo se prokázat a popsat vliv šíření fyzikálních polí ve vnějším prostředí hraně na šíření polí v jejím vnitřním prostředí a následně i prostředí samotného materiálu. Byl sestaven obecný geometrický model hraně, na

jehož základě byl sledován vliv vybraných možností uspořádání hraně a jejího vnějšího tvaru. Sestavený model je kompromisem podrobnosti a přehlednosti. Výrazným korigujícím faktorem byla technická realizovatelnost modelu. Z tohoto důvodu jsou uplatněna nutná zjednodušení. Řada dílčích problémů, na něž lze celý sledovaný proces rozdělit, nemohla být z pochopitelných důvodů (především omezení rozsahu práce) plně realizována. Postupy naplnění některých z nich však byly v práci rozpracovány, nebo alespoň naznačeny, na svou realizaci dosud čekají a jsou výzvou pro pokračování vývoje v této oblasti.

SOUHRN

Práce je zaměřena na modelování procesu sušení dřeva za pomoci numerické simulace. Využívá metody konečných prvků. Zabývá se popisem rozložení teploty, vlhkosti a napětí ve dřevě v závislosti na rozložení teploty a vzdušné vlhkosti ve vzdušném prostředí modelované sušárny. Práce se soustředí na vývoj parametrického modelu řeziva, geometrického a konečně-prvkového modelu hraně a jejího bezprostředního vzdušného okolí. Model vytvořený tímto způsobem je na závěr použit pro simulaci děje sušení dřeva. Obecný parametrický model umožňuje určení tvaru hraně a substrukturování řeziva v hrani. Rovněž je schopen sledovat parametry ovlivňující proces sušení. Práce se zabývá i vhodným rozložením jednotlivých kusů řeziva vzhledem k základním typovým tvarům hraně. Výsledkem práce je návrh a verifikace modelu, umožňujícího popis pohybu zmíněných fyzikálních polí spolu s návrhem efektivnějšího procesu sušení, jeho optimalizace na základě realizovaných výpočtů.

FEM, řezivo, sušárna, numerická simulace, sušení, vlhkost, teplota, napětí, ANSYS

Autoři děkují Dr. Ing. Petru Horáčkovi a pracovníkům Ústavu nauky o dřevě LDF MZLU v Brně za podporu a mnohé cenné připomínky.

LITERATURA

- BODIG, J., JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood composites, New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. ISBN 0-89464-477-6.
- BRDIČKA, M. et al. Mechanika kontinua 2.vyd. Praha: Academia, nakladatelství AVČR, 2000. 799 s. ISBN 80-200-0772-5.
- HORÁČEK, P. Grant - Termodynamický model sušení dřeva, 2002
- KOLÁŘ, V., NĚMEC, I., KANICKÝ, V. FEM Principy a praxe metody konečných prvků. Praha: Computer Press, 1997. 401 s. ISBN: 80-7226-021-9
- KOHNKE, P. ANSYS Theory Reference, Release 5.5 ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA, 1998.
- KOŇAS, P.: Vliv submikroskopické struktury dřeva na proces sušení, sborník konference MendelNET 02, ISBN: 80-7157-597-6, MZLU Brno, 2002
- POŽGAJ, A. et al. Štruktúra a vlastnosti dreva 2.vyd. Bratislava: PRÍRODA, a. s., 1997. 448 s. ISBN 80-07-00960-4.
- REKTORYS, K. Variační metody v inženýrských problémech matematické fyziky. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-200-0714-8
- SIAU, J. F. Wood. Influence of moisture on physical properties, NY Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995, 227 str.
- ZEJDA, J. Numerická simulace procesu sušení v atypické komorové kondenzační sušárně řeziva – diplomová práce, Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2003

Adresa

Ing. Jan Tippner, Ing. Petr Koňas, Ph.D., Ústav nauky o dřevě, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká republika

