

Celodřevěné tesařské spoje

Při rekonstrukcích historických dřevěných konstrukcí se v poslední době začínají znovu používat celodřevěné tesařské spoje. Reaguje se tak na požadavky památkové péče na zachování původního materiálu, ale také nemovitého kulturního dědictví, které představuje tradiční tesařské řemeslo. Tesařské spoje jsou preferovány pro své užitné i estetické kvality, nevýhodou však je absence normativních předpisů pro jejich návrh. To se snaží změnit výzkumný projekt zabývající se jejich podrobnou analýzou.

Se stoupající popularitou dřevostaveb a jejich zvyšujícím se počtem se znovu začíná otevírat otázka tesařských spojů. Tento tradiční způsob spojování dřevěných prvků byl dlouhou dobu upozaděn, jelikož jejich návrh se opírá především o zkušenosti řemeslníků, kteří spoje vyráběli. Široká škála různých druhů kovových spojovacích prostředků a jejich použití má velkou oporu v normách, která celodřevěným tesařským spojům chybí. Důvodem je jednoduchost provádění těchto moderních spojů a možnost spočítat jejich únosnost podle norem včetně optimalizace. Problematiku tesařských spojů jako běžné součásti dřevěné konstrukce však oživil nástup CNC strojů, které dokáží spoje vyrobit velmi přesně, spolehlivě a rychle. Přestože tesařských spojů existuje

velké množství, sériově se vyrábějí pouze některé nejběžnější druhy, jejichž spolehlivost a geometrie však ověřila léta praxe.

Kromě dřevěných novostaveb v poslední době narůstá počet rekonstrukcí historických dřevěných konstrukcí, u nichž se požaduje dodržení tradičních technologií výroby a zachování původního materiálu v co možná největší míře. Kvalita zabudovaného dřeva, není-li poškozeno vnějšími činiteli (dřevokazný hmyz, houby), je mnohdy vyšší než u nového materiálu, kterým se historická konstrukce opravuje. Zachování úrovně mechanických vlastností použitého dřeva či dokonce jejich slabý nárůst i po letech v konstrukci ukazují četné studie [1]. Tesařské řemeslo má dlouhou a bohatou tradici, tesaři musejí být nejen fyzicky zdatní, ale také kreativní a schopní číst materiál, se kterým pracují. Přesnost ruční výroby, kterou tradiční tesařské spoje představují, je výhodná i z důvodu práce s různě deformovanými prvky. Původní dřevo bývalo tesané a během života konstrukce reagovalo na dlouhodobé zatížení v konkrétních klimatických podmínkách.

V mnoha případech se v současnosti novým materiálem protézují původní vazné trámy krovů nebo stropní trámy, které mají poškozené konce ve zhlavích, viz obr. 1. Napojení nové části na původní je ideálním případem pro použití celodřevěných nastavovacích tesařských spojů. Jejich dimenzování a optimalizace počtu (dřevěných) spojovacích prostředků, sloužících ovšem pouze k zajištění polohy spojovaných částí či případnému přenesení dodatečných sil, však závisí pouze na konkrétním statikovi a jeho odvaze (příklad viz obr. 2).

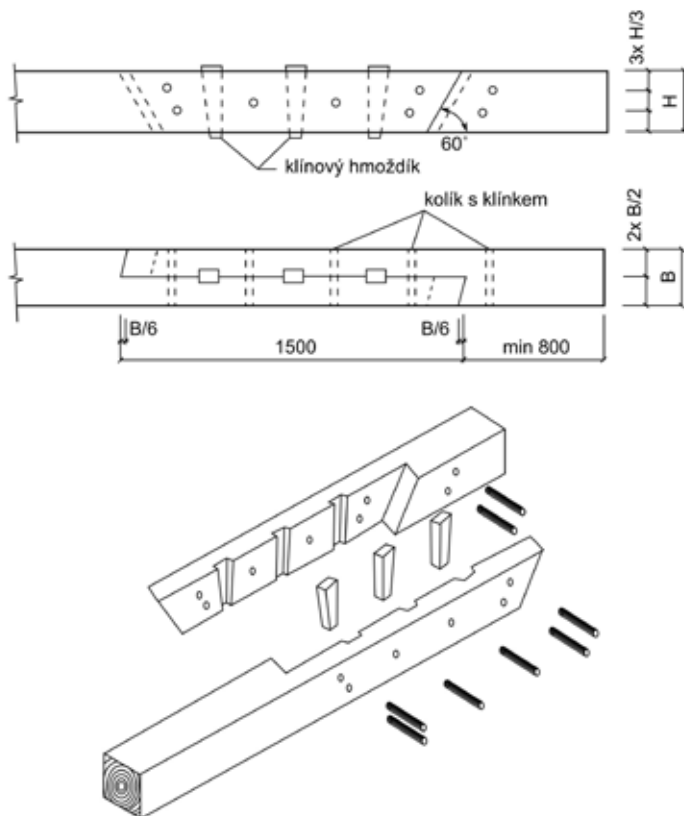
Technické normy v Československu začínaly platit ve třicátých letech 20. století, tedy v době, kdy bylo používání klasických tesařských spojů v útlumu a běžně se používaly spoje s kovovými průmyslově vyráběnými spojovacími prostředky. Nebyla tedy nutná potřeba se jimi v rozvíjejících se normativních podkladech zabývat. V současnosti je tato absence znát. Jako základní dokument pro navrhování dřevěných konstrukcí slouží Eurokód 5, který však navrhování tesařských spojů nepodchycuje komplexně. Přenos sil se v těchto spoích odehrává tlakem a třením na styčných plochách spojovaných částí. V těchto případech se únosnost určuje vzhledem k orientaci vláken, informace o svěrných a třecích silách však chybí. Jako pomůcka alespoň pro základní návrh některých z tesařských spojů (šikmé jednoduché zapuštění, čep, použití dřevěných kolíků) mohou sloužit publikace [2, 3, 4]. Pro správné pochopení chování a následný návrh je tak v současnosti potřeba každý z tesařských spojů samostatně analyzovat. Tím se zabývá projekt Návrh a posuzování dřevěných tesařských spojů historických konstrukcí, který se řeší na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT a Ústavem

▼ Obr. 1. Rekonstrukce krovu kostela Nanebevzetí Panny Marie ve Vranově nad Dyjí



▼ Obr. 2. Použití plátového spoje při rekonstrukci krovu kostela sv. Markéty v Šonově na Broumovsku





▲ Obr. 3. Původní plátový spoj, různé varianty navrženy V. Mláčovským a O. Hrdličkou

nauky o dřevě Mendelovy univerzity v Brně. Projekt má především sestavit metodiku navrhování celodřevěných tesařských spojů a iniciovat změnu normativních předpisů, které se týkají provádění dřevěných konstrukcí, zejména s ohledem na historické konstrukce.

Výzkum chování spoje

Na základě výsledků stavebnětechnických průzkumů mnoha historických dřevěných budov a konzultací s odborníky, kteří se v oboru rekonstrukcí dlouhodobě pohybují, byly stanoveny nejčastěji využívané spoje, jejichž chování se ukazuje natolik komplikované, že neumožňuje triviální návrh. Cílem je definovat principy jejich chování a stanovit metodiku navrhování vzhledem k vlivům geometrie a zatížení spoje. Prvním detailně analyzovaným tesařským celodřevěným spojem v rámci projektu, byl šikmočelný plát spojený pomocí různého počtu kolíků a hmoždíků, viz obr. 3. Jeho různé varianty se v nedávné době použily při rekonstrukcích významných historických staveb po celé ČR, lze jej najít např. na hradě Karlštejn, v konírně zámku v Mnichově Hradišti nebo v krovech sakrálních staveb (kostel Nanebevzetí Panny Marie ve Vranově nad Dyjí či v kostele sv. Martina ve Skorošicích). Spoj se navrhoval v různých variantách lišících se v několika parametrech – sklonu šikmého čela či počtu a umístění kolíků. Otázka ke zkoumání se tedy objevila několik: Jaký vliv na únosnost mají šikmá čela? Jak ovlivňuje tuhost spoje počet spojovacích prostředků a jejich materiál? Jaký je minimální počet použitelných spojovacích prostředků a jejich poloha?

Analýza tesařského spoje byla pojata komplexně – probíhaly destruktivní zkoušky replik spoje i jeho modelů, experimenty se použily k verifikaci numerických modelů vytvořených v konečněprvkovém softwaru ANSYS a zjednodušených analytických modelů. Díky numerickému a analytickému modelování se nemuselo fyzicky zkoušet



▲ Obr. 4. Velká část práce se v minulosti dělala sekerou – dočištění šikmého čela plátového spoje

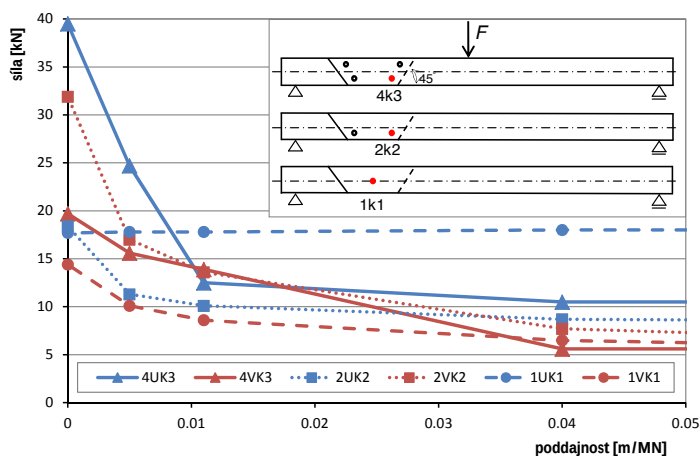
velké množství vzorků, a tak byly jednotlivé série odpovídající různým variantám spoje úměrně zmenšeny. Repliky spojů v měřítku 1 : 1 vznikly tradičními postupy rukou zkušeného mistra tesaře, který k práci používá kopie původních nástrojů (ukázka na obr. 4). Všechny vzorky se vyrábějí ze smrkového dřeva, kolíky ve spojích jsou ocelové, dubové nebo bukové (modely 1 : 4). Materiálové vlastnosti jsou měřeny podle ČSN 49 0110 a zároveň novým zařízením na zjišťování mechanických vlastností in situ (pevnost v tlaku podél vláken), které v nedávné době vyvinul ÚTAM AV ČR, v. v. i. [5].

Vzhledem k tomu, že tento nastavovací spoj se používá při rekonstrukci vazných nebo stropních trámů, bylo nutné zkoumat namáhání ohybem se smykem, dále v kombinaci s tahem nebo tlakem.

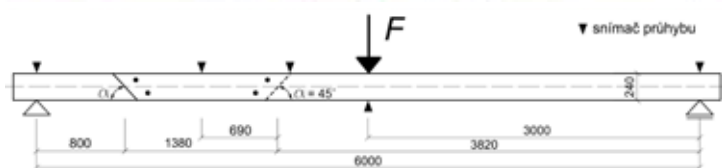
Spoj při svém správném fungování využívá k přenesení zatížení jednak mechanické spojovací prostředky, ale také možnost opření plátu o šikmá čela. Přerozdělování sil pak ovlivňuje jak sklon čel, tak počet i tuhost spojovacích prostředků.

Optimální sklon čel je kompromisem mezi únosností a proveditelností. Příliš ostrý úhel (30°) prodlužuje délku spoje a působí tesařům při řezání potíže, strmější sklon (70°) neposkytuje dostatečnou plochu pro zapojení plátu.

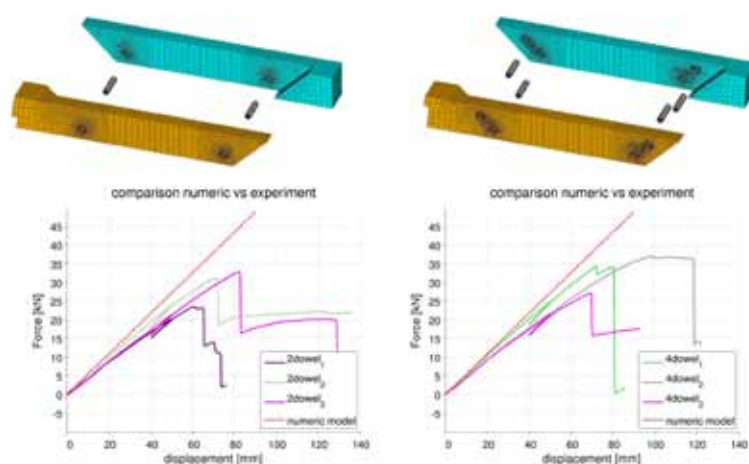
Velký počet nebo velká tuhost spojovacích prostředků způsobí, že se namáhání přenáší pouze kolíky nebo hmoždíky a benefit zapojení šikmých čel nenastane. Velká tuhost spojovacích prostředků dále způsobuje, že se spoj nechová kompaktně. Vznikne ohyb kolmý k rovině zatížení, který rozevřívá pláty od sebe. Studii tuhosti kolíků, danou použitým materiálem



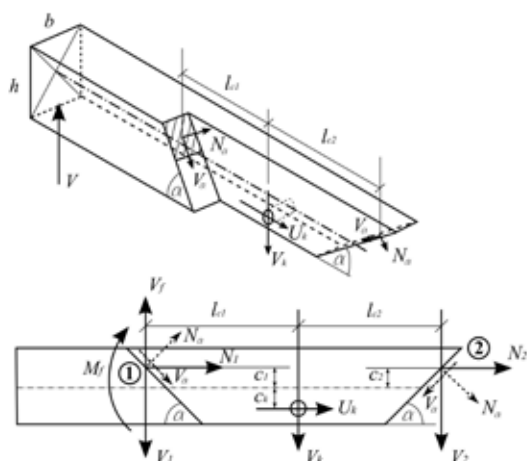
▲ Obr. 5. Na svislé ose jsou vykresleny hodnoty sil v kolících pro spoj s jedním, dvěma a čtyřmi kolíky – vodorovná U_k a svislá V_k (kN). Poddajnosti kolíků p vykresluje vodorovná osa; tuhý spoj $p = 0$ (m/MN), kolík $\phi 40$ mm $\rightarrow p = 0,005$, kolík $\phi 20$ mm $\rightarrow p = 0,01$, kolík $\phi 10$ mm $\rightarrow p = 0,04$.



▲ Obr. 6. Zkouška čtyřkolíkového nastavovacího plátového spoje v třibodovém ohybu v měřítku 1 : 1



▲ Obr. 7. Srovnání tuhostí plátových spojů s různým počtem spojovacích prostředků – experimenty x numerický model



▲ Obr. 8. Síly na jedné části plátu

(ocel, dřevo) a průměrem kolíku zachycuje obr. 5. V grafu jsou vyneseny síly v nejnamáhanějších kolících u plátu s jedním (1UK), se dvěma (2UK) a čtyřmi (4UK) kolíky. Z uvedeného vyplývá, že větší počet tuhých kolíků ve spoji zvyšuje jejich namáhání. Naopak snižování jejich tuhosti vede k vyrovnávání sil. Zajímavé je i to, že méně tuhé kolíky jsou téměř stejně namáhány bez ohledu na jejich počet ve spoji.

Experimenty

Spoje se testují především v třibodovém ohybu, který vhodně kombinuje namáhání posouvající silou a ohybovým momentem. Různé geometrie plátového spoje se nejdříve zkoušejí na modelech v měřítku 1 : 4, aby se odhalily trendy chování příslušné jednotlivým variantám spoje. Poté se přistupuje ke zkoušení v měřítku 1 : 1, rozměry replik spojů tak odpovídají nastavovacím spojům, které se používají při rekonstrukcích velkých průřezů (dimenze zkoušeného vzorku jsou 200 x 240 x 6000 mm). Zkoušky modelů probíhají na hydraulickém stroji MTS a jsou řízeny rychlostí posunu zatěžovacího přičníku, na kterém je umístěn siloměr. Průhyb prvku se odečítá pomocí potenciometrů v daných místech nosníku. Další informace o deformaci prvku poskytují fotografie šikmého čela, které slouží jako podklad pro analýzu pomocí digitální korelace obrazu (Digital Image Correlation – DIC), jež umožňuje detailně zkoumat pole posunutí na snímaném povrchu vzorku opatřeného náhodným vzorem. Tato optická metoda tvoří důležitou součást výzkumu, všechny provedené klasické destruktivní zkoušky jí jsou doplněny. Vzorky v měřítku 1 : 1 o hmotnosti až 200 kg se zkouší pomocí testovací stolice sestavené z montovaných dílů, viz obr. 6.

Numerické modelování

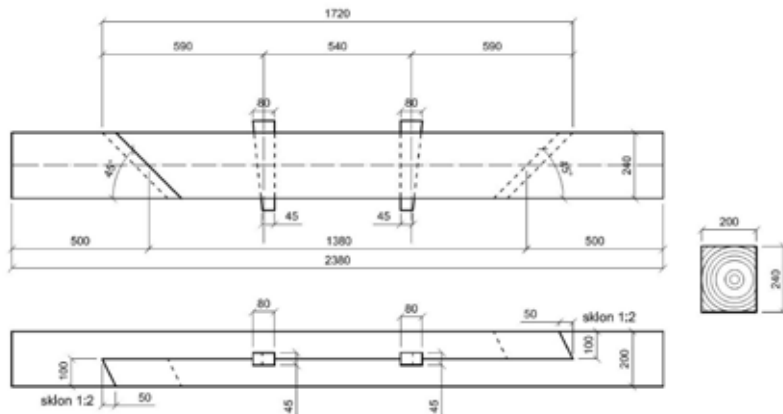
Numerické modely jsou vytvořeny pomocí konečněprvkového softwaru ANSYS, a to včetně modelování kontaktů se třením mezi kolíky a částmi plátů či mezi šikmými čely spoje. Materiálové vlastnosti se přiřazují na základě změřených dat na vzorcích odebraných ze zkoušených spojů. Výsledky numerické analýzy dovolují odhad tuhosti spoje při různých konfiguracích – poloha spoje v rámci rekonstruovaného prvku, profil konstrukčního prvku, materiálové vlastnosti spojovaných dřev. Aplikace složitých kritérií porušení dovoluje i odhad únosnosti spoje, který verifikují experimenty. Ukázka srovnání experimentálně dosažených hodnot a výsledků numerických analýz je na obr. 7.

Zjednodušené analytické řešení

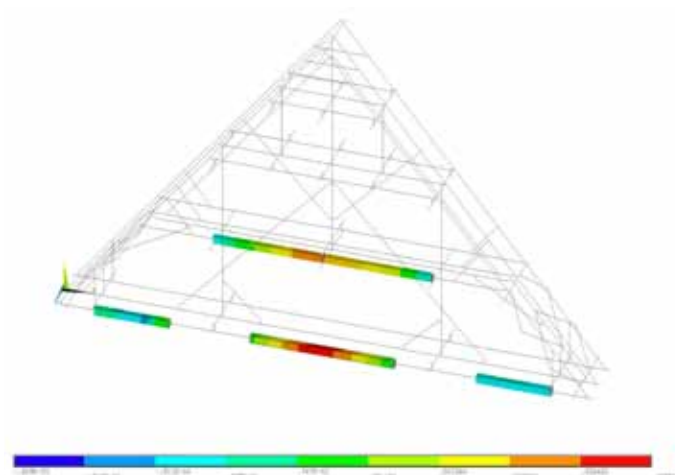
Při hledání teoretického řešení za určitých zjednodušujících podmínek lze vyjít z výslednic napětí na čelech, které dají představu o chování daného spoje. K přesnému určení všech sil působících ve spoji je nutno dodat další informace, které lze zjistit z experimentů. Při použití výslednic se lze vyhnout nepříjemným otázkám kolem rozložení napětí v čele plátu. Zároveň odvozené vztahy platí pro lineární i materiálově nelineární chování čela i kolíku. Při podmínce malých deformací lze namáhání v daném prvku zjednodušit podle obr. 8. Na čelo plátu působí normálová a třecí síla a na kolík posouvající síly. Tyto síly vytvářejí momenty, které vzdorují zatížení. Pro výpočet sil lze použít silovou metodu s jednou neznámou, např. síla N_1 nebo vodorovná síla v kolíku U_k . Do výpočtu je zavedena i tuhost kolíku, závislá na směru vláken, více v [6].

Optimalizace spoje

Během výzkumu se postupně optimalizuje geometrie plátového spoje. Z první varianty s jedním masivním ocelovým, tj. velmi tuhým kolíkem, na které se ověřovala role šikmých čel, se přes vícekolíkové spoje vývoj dostal k variantě plátového spoje, který využívá klínových hmoždíků, viz obr. 9. V takovém případě musejí být šikmá čela navíc podkosená, aby se zabránilo rozevírání spoje. Optimální sklon šikmého čela činí 45°, poskytuje dostatečnou opěrnou plochu pro zapojení čel při přenosu namáhání a zároveň je dobře proveditelný. Spojovací prostředky, hmoždíky



▲ Obr. 9. Funkční vzorek dvouhmoždíkového spoje s šikmými čely a podkosenou šikou: a) rozměry, b) během experimentu



▲ Obr. 10. Model části krovu kostela sv. Jakuba v Brně s několika plátovými spoji vytvořený v softwaru ANSYS

i kolíky, jsou z tvrdšího dřeva odolnějšího především ve smyku, zároveň mají dostatečnou poddajnost, aby zaručily kompaktní chování plátu. Jejich počet je optimalizován vzhledem ke spolupůsobení šikmých čel, z hlediska celkové tuhosti spoje (průhyb rekonstruovaného prvku) a také s přihlédnutím k bezpečnosti použití v konstrukci.

Použití v konstrukci

Projekt má za úkol kromě analýzy samotných spojů také posoudit chování krovových konstrukcí s vloženým plátovým spojem. Na obr. 10 je prostorový model části krovu kostela sv. Jakuba v Brně, který se v současné době rekonstruuje. Numerický model je vytvořen ve výpočetním softwaru ANSYS. Pracuje s výsekem tří vazeb, jedné plné a dvou jalových, hambalkové krovové soustavy s vaznými trámy. Do jednoho z nich jsou implementovány plátové spoje. Zkoumá se vliv polohy spoje na výslednou tuhost spoje a konstrukce jako celku při kombinaci zatížení (vlastní tíha, stálé zatížení, zatížení sněhem a větrem). Využitím metody substrukturace je umožněno současné podrobné řešení detailu spoje v rámci zevrubného řešení celé plné vazby krovu. Detailnější informace o řešení modelu lze nalézt v [7].

Závěr

Podrobná analýza tesařských spojů by měla vyústit ve vytvoření metodiky pro navrhování a posuzování celodřevěných tesařských spojů a také v památkový postup pro opravy a rekonstrukce historických dřevěných konstrukcí, při kterých se tyto spoje používají. Tyto výstupy by se měly stát do budoucna pomůckou pro projektanty i prováděcí firmy, protože budou obsahovat např. výrobní tolerance. Cílem je také snaha iniciovat změnu normy, konkrétně ČSN 73 2810 o provádění dřevěných konstrukcí.

Kromě praktického dopadu v oblasti navrhování dřevěných konstrukcí je snahou udržet a popularizovat tradiční tesařské technologie, které tvoří cennou součást tuzemského kulturního bohatství. Historie řemesla sahá hluboko do minulosti a jeho zachování především pro použití v památkové péči je důležité. Konkrétní provedení některých spojů a typů krovů ve středoevropském regionu ukazuje, jak rychle a jak daleko se nové poznatky a trendy ve stavitelství v minulosti dokázaly rozšířit a jak s nimi tehdejší řemeslníci dokázali pracovat.

Postup výzkumu byl ukázán na celodřevěném nastavovacím plátovém spoji. Dalšími vyhodnocovanými spoji jsou rybinový plát nebo krytý podélný čep se šikmými čely, vhodný při rekonstrukci stropních trámů zdobených malbami, které je potřeba zachovat s ohledem na jejich památkovou hodnotu. Více informací lze nalézt na www.itam.cas.cz/spoje. ■

Poděkování

Výzkum probíhá za finanční podpory grantu Ministerstva kultury NAKI DF12P01OVV004 Návrh a posuzování dřevěných tesařských spojů historických konstrukcí, na jehož řešení se podílejí ÚTAM AV ČR, v. v. i., Stavební fakulta ČVUT v Praze a Lesnická a dřevařská fakulta (Ústav nauky o dřevě) Mendelovy univerzity v Brně.

Použitá literatura:

- [1] Drdáký, M.; Binda, L.; Kasal, B.: In-Situ Evaluation and Non-Destructive Testing of Historic Wood and Masonry Structures. ÚTAM AV ČR, 2007. 253 s. ISBN 978-80-86246-36-9.
- [2] Gerner, M.: Tesařské spoje. Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0076-X.
- [3] Koželouh, B.: Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí, komentář k ČSN 73 1702:2007. ČKAIT, 2008. ISBN 978-80-87093-73-3.
- [4] Příručka 1 – Dřevěné konstrukce. 2008. [cit. 29. 12. 2014], http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook_1_CZ_final.pdf.
- [5] Drdáký, M.; Kloiber, M.: In-situ Compression Stress-Deformation Measurements along the Timber Depth Profile. Advanced Materials Research. Vol. 778, s. 209–216. Trans Tech Publications, 2013. ISSN 1022-6680.
- [6] Fajman, P.: Vliv tuhosti svorníku na síly v plátovém spoji. Stavební obzor – 7,8, s. 115–120. ČVUT, 2014. ISSN 1210-4027.
- [7] Tippner, J.; Milch, J.; Sebera, V.; Kunecký, J.; Kloiber, M.; Navrátil, M.: Finite-element Analysis of a Historical Truss Reconstructed with a Traditional Allwooden Joints. Conference Proceedings of 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. Mexico City, Instituto de Ingenieria, 2014.

Autoři:

Ing. Hana Hasníková,

Ing. Jiří Kunecký, Ph.D.,

Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i.

doc. Ing. Petr Fajman, CSc.,

České vysoké učení technické v Praze