Jaroslav Sandanus[1] – Miloš Slivanský[2]

ANALÝZA ZMIEN KROVU KATEDRÁLY SV. MARTINA V BRATISLAVE POČAS TERMOSANÁCIE

Abstract:
Strain measurement of a timber roof structure of the St. Martin's cathedral chancel in Bratislava was performed during its heat remediation (i.e. thermal remediation). The thermal remediation is a modern method of the treatment of timber structures, which is focused on the elimination of biotic wood-destroying insects by the way of the increased temperature.

1. ÚVOD

Tenzometrické merania na nosnej konštrukcii deveného krovu nad presbytériom Katedrály sv. Martina v Bratislave boli vykonané v rámci tepelnej sanácie (termosanácia) spomenutej drevenej konštrukcie. Termosanácia je moderná metóda sanácie drevených konštrukcií, ktorá je zameraná na likvidáciu drevokazného hmyzu pôsobením zvýšenej teploty.

Obr. 1.1 – Pohľad na strešnú konštrukciu a inštalácia vykurovacích agregátov

1.1 Termosanácia - podstata metódy a technológia

Cieľom tepelnej sanácie je celoplošná likvidácia drevokazného hmyzu a všetkých jeho vývojových štádií v napadnutej drevenej konštrukcii. Aby bolo možné považovať proces termosanácie za úspešne vykonaný, je potrebné dosiahnuť vo vnútri drevnej substancie (jadro prierezov) teplotu minimálne 55°C počas doby trvania minimálne 1 hodinu.
Zvýšenie teploty drevenej konštrukcie sa najčastejšie realizuje vháňaním horúceho vzduchu do priestoru dreveného krovu prostredníctvom teplovzdušného potrubia napojeného na teplovzdušné agregáty. Teplota "vyrábaného" a vháňaného vzduchu podľa veľkosti konštrukcie a dĺžky prívodného potrubia dosahuje 100 až 120°C.
Proces termosanácie krovu bol vzhľadom na rozsah konštrukcie rozdelený na 3 etapy.

1.2 Nosná konštrukcia krovu - nosný systém a meracie miesta

Krov nad presbytériom je štvorpodlažná konštrukcia. Na východnej strane je krov ukončený trojbokou valbou, kde je strecha doplnená konštrukciou vežičky. Deväť plných väzieb je pravidelne osadených

[1] doc. Ing., PhD., e-mail: jaroslav.sandanus@stuba.sk, KKDK SvF STU v Bratislave
[2] Ing., PhD., e-mail: milos.slivansky@stuba.sk, KKDK SvF STU v Bratislave

vo vzdialenosti cca. 4m, prázdne (medziľahlé) väzby sú osadené vo vzdialenosti cca. 1m. Konštrukčný systém prvých dvoch podlaží je vzperadlový rám vo forme ležatej stolice so zdvojeným stĺpikom v osi krovu s funkciou vešadla. Tretie podlažie je väznicová sústava - stojatá stolica s podopretím väzného trámu v strede väzby. V pozdĺžnom smere je krov vystužený krížovými vystužovadlami medzi ležatými stolicami plných väzieb v rovine strechy a vzperkami stojatej stolice v treťom podlaží krovu. Vplyv zmeny teploty počas termosanácie bol sledovaný tenzometrickým meraním, použili sa odporové tenzometre, ktoré boli osadené na povrchu vybraných nosných prvkov.

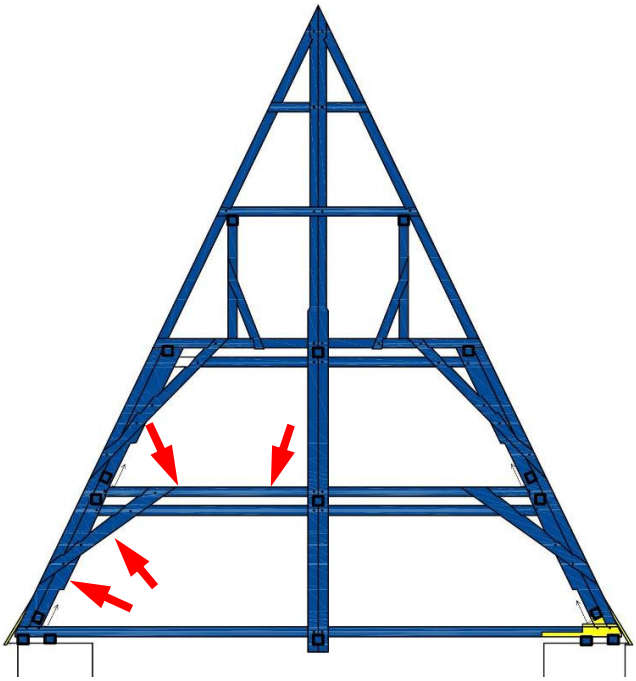
Obr. 1.2 – Nosná konštrukcia krovu nad presbytériom

Lokalizácia meracích miest bola zvolená s ohľadom na nosný systém krovu a dostupnosť pre montáž tenzometrov. Meracie tenzometre boli osadené v plnej väzbe buď na hornej hrane horizontálnej vzpery (hambálok) v úrovni "stropu" prvého poschodia konštrukcie krovu (celkovo 10 meracích miest), alebo na povrchu šikmej vzpery v úrovni prvého poschodia konštrukcie krovu (celkovo 2 meracie miesta). Jeden tenzometer bol osadený mimo konštrukcie - na samostatnej drevenej vzorke. Označenie tenzometrov a ich lokalizáciu na konštrukcii uvádza tabuľka 1.1.

Tab. 1.1 Označenie a lokalizácia meracích tenzometrov

Označenie	Etapa	Väzba	Prvok	Orientácia	Zapojenie
1 kompenzácia	Etapa 1		hambálok uprostred	rovnobežne	kompenzácia
2 kompenzácia			hambálok	rovnobežne	kompenzácia
1 odpor			mimo konštrukcie	rovnobežne	odpor
2 odpor			hambálok	rovnobežne	odpor
3 kompenzácia	Etapa 3		vzpera	rovnobežne	kompenzácia
4 kompenzácia			vzpera	rovnobežne	kompenzácia
3 odpor			hambálok	rovnobežne	odpor
4 odpor			hambálok	kolmo	odpor
5 kompenzácia			hambálok	rovnobežne	kompenzácia
6 kompenzácia			hambálok	kolmo	kompenzácia
5 odpor			hambálok	rovnobežne	odpor
6 odpor			hambálok	kolmo	odpor

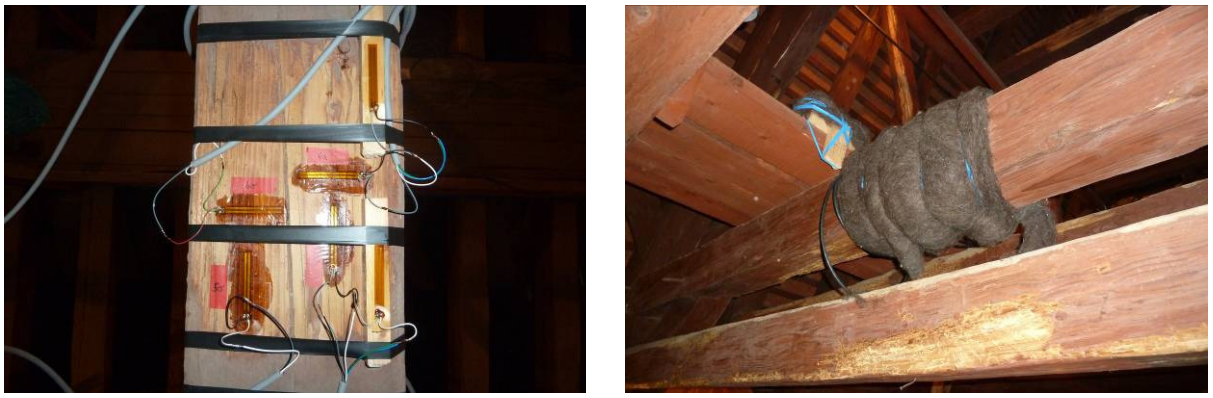
Poznámka:
- orientácia rovnobežne, resp. kolmo označuje polohu tenzometra vzhľadom na smer vláken
- zapojenie s kompenzáciou, resp. s odporom označuje spôsob zapojenia meracieho mosta



Obr. 1.3 – Priečny rez konštrukcie krovu nad presbytériom (plná väzba) a lokalizácia meracích miest

1.3 Meracie zariadenia

Vzhľadom na charakter a cieľ meraní (vplyv zmeny teploty na napätosť konštrukcie) boli použité 2 typy zapojenia tenzometrov - polomost bez kompenzačného tenzometra (s presným odporom) a polomost s kompenzačným tenzometrom. Meracie miesto sa pred spustením termosanácie obalilo izolačnou vlnou, aby sa zabránilo jeho prípadnému lokálnemu prehriatiu od vháňaného horúceho vzduchu.

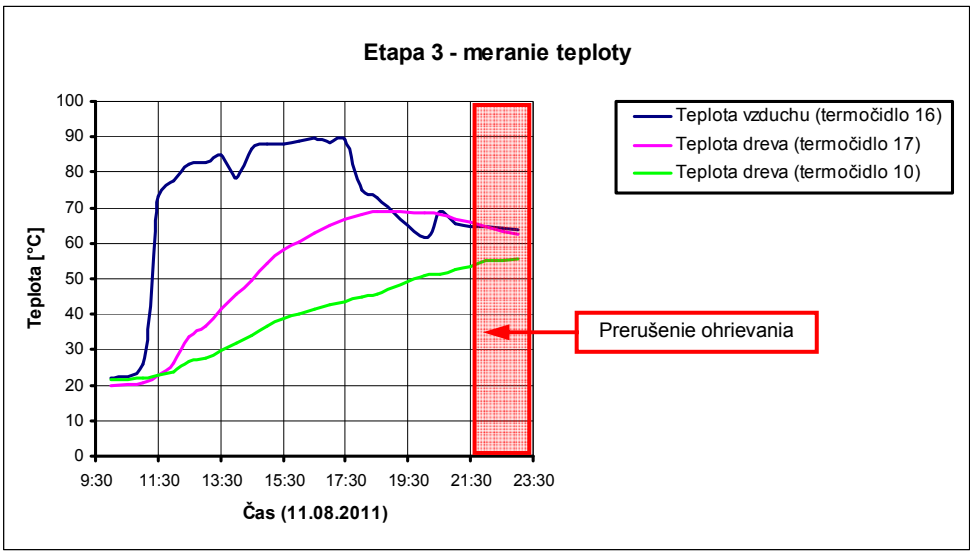


Obr. 1.4 – Osadenie tenzometrov na prvku a prekrytie prekryté izolačnou vrstvou

2 PRIEBEH A VYHODNOTENIE MERANÍ

2.1 Meranie teploty

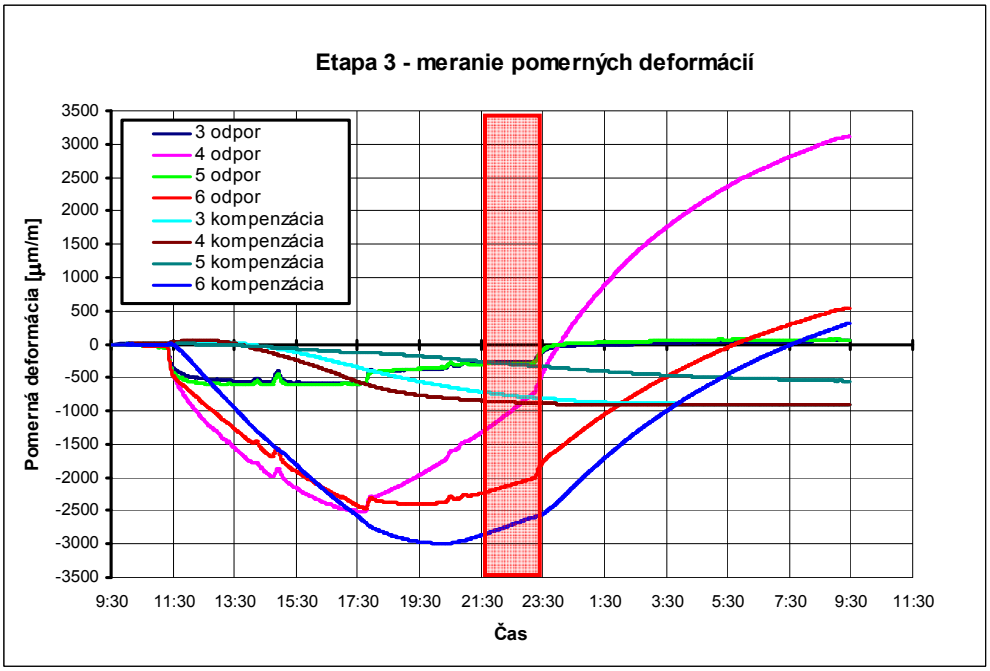
Vývoj teploty v krove počas termosanácie bol zaznamenávaný pracovníkmi firmy Thermo Sanace s.r.o. na viacerých miestach nosnej konštrukcie krovu. Záznam merania teplôt pre vybrané miesta ilustruje obr. 2.1.



Obr. 2.1 – Meranie teploty v čase vo vybraných prvkoch počas termosanácie v Etape 3

2.2 Pomerné deformácie

Pomerné deformácie vybraných prvkov ε sa merali odporovými tenzometrami nalepenými na povrchu konštrukcie. Vzhľadom na použité 2 typy zapojenia tenzometrov (bez kompenzácie a s kompenzáciou) je potrebné odlišne interpretovať aj výsledky meraní.



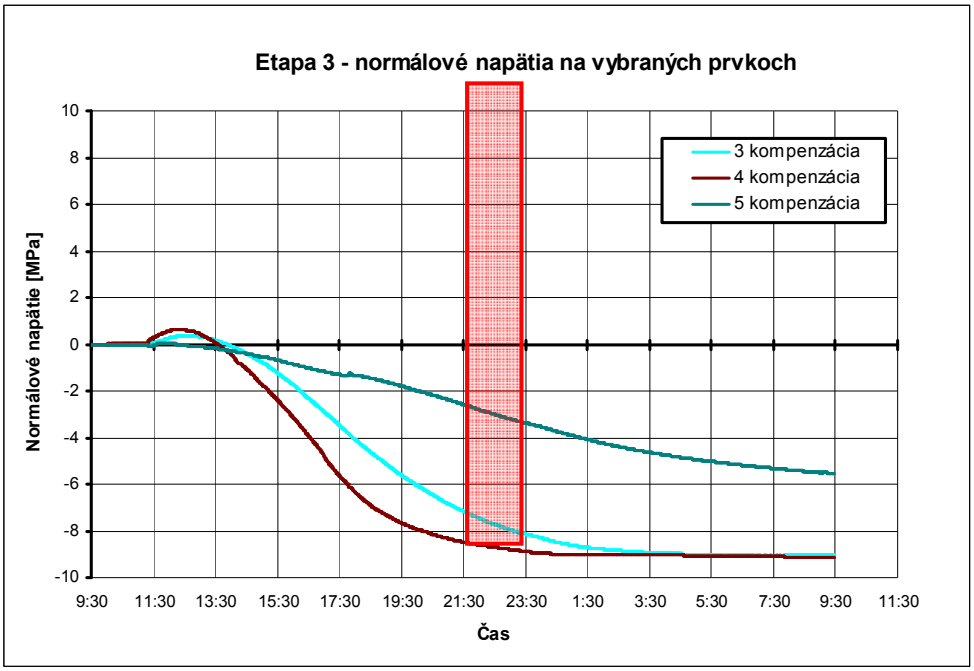
Obr. 2.2 – Meranie pomerných deformácií v čase počas termosanácie v Etape 3

Na základe výsledkov nameraných pomerných deformácií je možné konštatovať, že vzhľadom na objemové zmeny materiálu sa pravdepodobne na povrchu výraznejšie prejavuje zmena objemu vplyvom zmeny vlhkosti (vysychanie, napučiavanie) ako zmena objemu vplyvom teplotnej rozťažnosti materiálu. Keďže zmena vlhkosti drevených prvkov nebola počas termosanácie meraná, nie je možné vyhodnotiť priamu závislosť medzi jej zmenou a meranými pomernými deformáciami. Vzhľadom na fyzikálne vlastnosti dreva je však možné takisto očakávať výraznejší vplyv zmeny

vlhkosti ako vplyv zmeny teploty na jeho objemové zmeny (súčinitele objemovej rozťažnosti vplyvom zmeny vlhkosti sú približne 10^4 krát väčšie ako súčinitele teplotnej rozťažnosti).
Taktiež sa výraznejšie prejavila zmena objemu prvkov v smere kolmo na vlákna v porovnaní so smerom rovnobežným s vláknami. Namerané hodnoty pomerných deformácií kolmo ku vláknam (4 odpor, 6 odpor, 6 kompenzácia) sú niekoľkonásobne väčšie ako pomerné deformácie merané rovnobežne s vláknami. Takáto tendencia rovnako korešponduje s teoretickými údajmi o objemovej rozťažnosti dreva, kde sa obecne udáva pomer medzi jednotlivými smermi α_{Tan}: α_{Rad}: α_{Lin} = 15:10:1 (približne rovnaký pomer platí aj pre zmenu objemu vplyvom vlhkosti aj pre teplotnú rozťažnosť).
Výraznejšie objemové zmeny sa pravdepodobne objavili iba v povrchových vrstvách materiálu, pretože vo väčšine prípadoch výsledky pomerných deformácií relatívne verne sledujú zmenu teploty v krove v procese jeho termosanácie (nárast teploty = nárast pomerných deformácií) a po ochladení krovu sa postupne vytrácajú. Treba však poznamenať, že výsledky z meracích miest bez kompenzácie (označenie zapojenia "odpor") sú zaťažené aj vplyvom teploty na merací obvod (tenzometer, napájacie káble a pod.), preto je možné sledovať skôr tendencie meraných údajov ako vyhodnocovať presné numerické výsledky.

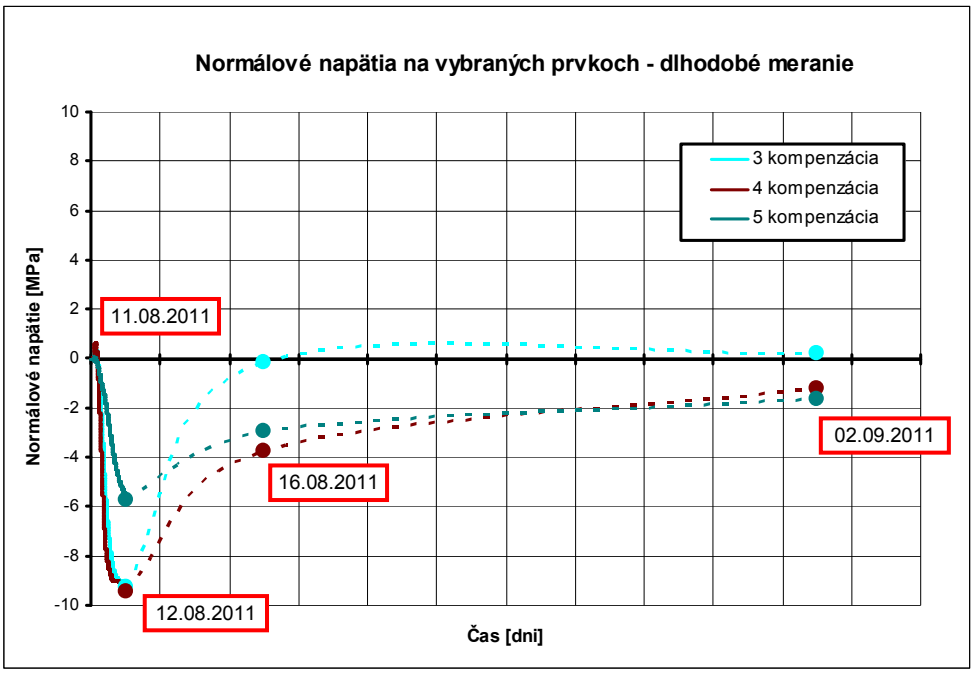
2.3 Normálové napätia

Napätosť nosnej konštrukcie bola vyhodnotená iba pre meracie miesta s kompenzáciou a orientáciou tenzometrov rovnobežne s vláknami (označenie 1 - 5 kompenzácia).



Obr. 2.3 – Vyhodnotenie normálových napätí v čase počas termosanácie v Etape 3

Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že vplyvom objemových zmien vznikajú vo vybraných prvkoch nosnej koštrukcie (hambálok, vzpera) prevažne tlakové napätia, ktoré pravdepodobne súvisia s teplotnou dĺžkovou rozťažnosťou materiálu, nakoľko ich nárast a pokles nesleduje vývoj okolitej teploty v krove, ale má určitý fázový posun, podobne ako pri priebehu teplôt meraných v jadre prierezov a ani v čase ukončenia tenzometrického merania (niekoľko hodín po ukončení ohrievania) nie sú normálové napätia úplne vymiznuté (obr. 2.3 a obr. 2.4).
Podľa výsledkov dlhodobých meraní na vybraných prvkoch však možno konštatovať, že normálové napätia postupne poklesli až na úroveň napätosti konštrukcie pred jej termosanáciou (obr. 2.4).



Obr. 2.4 – Vyhodnotenie normálových napätí v čase podľa výsledkov dlhodobých meraní

2.4 Vizuálna obhliadka konštrukcie

Pred zahájením termosanácie a takisto po jej ukončení bola vykonaná vizuálna obhliadka drevenej konštrukcie. Na kontrolovaných prvkoch a ich spojoch neboli viditeľné žiadne poruchy, ktoré by bolo možné spájať s ohrievaním strešnej konštrukcie (nové alebo neprimerane roztvorené trhliny, uvolnenie tesárskych spojov a pod.). Rovnako neboli spozorované počas procesu termosanácie žiadne iné prejavy vzniku porúch nosného systému (zvuky otrasy a pod.).

3 FORMULÁCIA ZÁVEROV

Na základe výsledkov meraní počas termosanácie strešnej konštrukcie nad presbytériom Katedrály sv. Martina v Bratislave je možné formulovať tieto závery:

- výrazná zmena (nárast) teploty v konštrukcii ovplyvňuje napätosť nosnej konštrukcie v dôsledku jej objemových zmien iba dočasne, po ochladení konštrukcie sa tento vplyv postupne vytráca,
- objemové zmeny v smere kolmom na vlákna sa prejavujú niekoľkokrát výraznejšie ako objemové zmeny v smere rovnobežnom s vláknami,
- objmemové zmeny spôsobené teplotnou rozťažnosťou materiálu sú na povrchu prvkov pravdepodobne zanedbateľné vzhľadom na objemové zmeny súvisiace zo zmenou vlhkosti dreva (vysúšanie, napúčanie),
- pri vizuálnej kontrole stavu konštrukcie pred a po termosanácii neboli spozorované žiadne poruchy, ktoré by bolo možné prisudzovať nadmernému zvýšeniu teploty alebo neúmernému vysúšaniu drevenej konštrukcie (trhliny, uvolnenie spojov a pod.).

Vzhľadom na počet meraní je treba poznamenať, že sa išlo o pilotný projekt na Slovensku a na formuláciu všeobecných záverov by bolo potrebné urobiť väčší počet experimentálnych meraní, ktoré by vytvorili štatisticky hodnotiteľný súbor. Uskutočnené merania sú však dobrým predpokladom pre ďalší rozvoj termosanácie a výskum jej vplyvu na nosnú konštrukciu pri historicky významných objektoch.