

Implementace nekovových membrán do ocelových konstrukcí

Textilní a fóliové membránové konstrukce jsou stále častěji využívány pro zastřešení nejen doplňkových a dočasných staveb, ale i pro zastřešení rozsáhlých staveb trvalých. Použití těchto materiálů jako zároveň konstrukčního prvku i střešního případně stěnového pláště přináší jedinečné výhody. Tyto stavby díky použití membrán vynikají nevšedním tvarem, rozpětím a extrémně nízkou hmotností střešní konstrukce. Nedílnou součástí konstrukcí s textilní nebo fóliovou membránou je nosná konstrukce. Ocelové prvky se používají jednak v podobě kotevních, obvodových, úžlabních a hřebenových lan, jednak v podobě nosné konstrukce a kotvení. Mnohdy jsou však membránové prvky začleněny do rozsáhlejší hlavní ocelové konstrukce pouze jako sekundární prvek.

TYPOLÓGIE MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ

Membránové konstrukce získávají schopnost přenášet zatížení teprve po vnesení předpětí a po dosažení vhodného tvaru. Podle způsobu vnesení předpětí lze konstrukce dělit na mechanicky předepnuté a pneumaticky předepnuté konstrukce. Pneumaticky předepnuté konstrukce jsou často typizovány a dodávány jako systémové prvky.

Mechanicky předepnuté konstrukce

Mechanicky předepnuté membránové konstrukce jsou tvořeny jednovrstvou nebo i vícevrstvou (z tepelně izolačních důvodů) tkaninou. Podle tvaru se dají rozdělit na tři základní typy geometrie:

- bodově uchycené plachty – hyperbolický paraboloid (obr. 1a),
- kuželové membrány (obr. 1b),
- membrány na obloucích (obr. 1c).

Tyto základní tvary bývají často doplňovány ještě tzv. „ridge & valley“, tedy hřebenem a úžlabím, někdy též zvané „wave form“. Další tvary vznikají zpravidla složením nebo kombinací výše uvedených.

Pro tkané plachty se nejčastěji používají skleněná vlákna potažená PTFE (polytetrafluoretylen neboli teflon) a PES (polyester) potažený PVC (polyvinylchlorid) s případným zalakováním akrylovým nebo PVDF lakem. Plachty mají zpravidla větší únosnost ve směru přímých vláken (osnovy) než ve směru vláken vetkaných (útku), v současnosti se již vyrábějí i plachty se shodnou únosností v obou směrech. Toho lze dosáhnout příčným předepnutím základní osnovy tkaniny ve všech fázích výroby. Materiálové charakteristiky uvedených materiálů jsou, co se maximální pevnosti týče, udávány výrobcem (nejúnosnější běžná tkanina ze skelných vláken s PTFE potahem i nejúnosnější běžná tkanina z PES/PVC kolem 170 kN/m). Hodnoty modulů pružnosti ve směrech osnovy i útku se doporučují stanovit pro každou výrobní šarži laboratorně tzv. biaxiálním testem. Pro jednotlivé typy materiálů jsou značně odlišné.

Pro obvodová lana, lana hřebene či úžlabí a lana kotevních se používají zejména vícepramenná spirálově vinutá lana otevřená z vysokopevnostních drátů, nebo vícepramenná uzavřená, což jsou lana vinutá z vysokopevnostních drátů s obvodovými dráty klínového nebo Z tvaru. Ocelová lana mají při prvním zatížení nepružné protažení, které se eliminuje tzv. umrtvením, tedy cyklickým zatěžováním a odlehčováním před vložením do konstrukce.

Pro mechanicky předepnuté membrány je předpětí základní konstrukční zatěžovací stav, který aktivuje jejich geometrickou tuhost a vytvoří schopnost přenést namáhání působící proti směru předpětí (snížením počátečního tahového namáhání). Předpětí se do membránových konstrukcí vnáší buď natažením ve dvou opačně zakřivených směrech vůči sobě (hyperbolický paraboloid), nebo natažením membrány oproti tuhé obvodové konstrukci, resp. konstrukci bodového podepření.

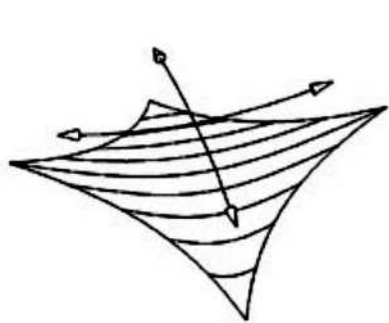
Pneumaticky předepnuté konstrukce

Mezi pneumaticky předepnuté konstrukce patří:

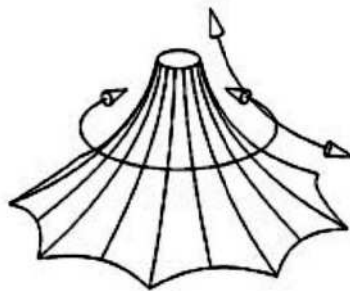
- přetlakové haly, u nichž je celý vnitřní prostor objektu udržován ve stálém přetlaku 300–1 000 Pa, který membránu drží v požadovaném tvaru. Membrána je většinou doplněna lanovou sítí. Tento typ konstrukce je uveden jen pro úplnost, z hlediska ocelových konstrukcí není zajímavý.
- trubicové tensairity konstrukce (obr. 2), které sestávají z tlaceného ocelového prvku, válcové uzavřené membrány s nízkým přetlakem (air-beam) a zpravidla dvou spirálových lan. Tento typ konstrukce je svým působením velmi zajímavý a inovativní, využívá membrány jako konstrukční prvek, z hlediska ocelových konstrukcí však není zajímavý.
- polštáře z fólií se stálým přetlakem (obr. 3a) nebo podtlakem (obr. 3b), které tvoří dvě až pět vrstev fólií (podle požadavku na tepelně-izolační vlastnosti). Jsou uloženy přes hliníkové profily



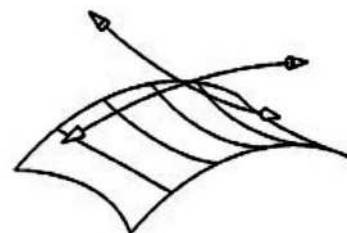
Obr. 2 – Tensairity konstrukce



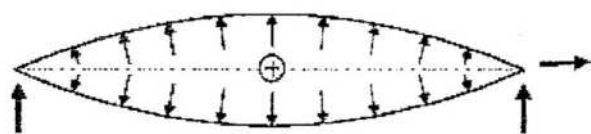
Obr. 1a – Hyperbolický paraboloid



Obr. 1b – Kuželový tvar



Obr. 1c – Sedlový tvar s oblouky



Obr. 3a – Polštář z fólie s přetlakem

na nosný, převážně ocelový, rastr. Pro větší rozpětí polštářů nad cca 3,5 m se používá podpůrná lanová síť. Přetlak či podtlak se mohou regulovat v závislosti na aktuální hodnotě zatížení.

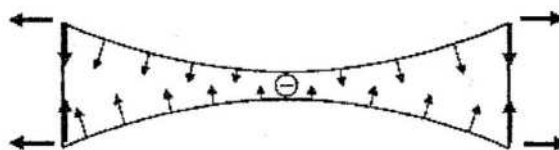
Vodorovné síly, vyvolané přetlakem či podtlakem, působící na vnitřní vazby z obou stran, stabilizují nosnou konstrukci ve vodorovném směru. Krajní vazby jsou ale namáhány vodorovnými silami, které musí přenést. V případě potřeby lze provést vnitřní vodorovnou vrstvu fólie jako předepnutou, čímž se efekt stabilizace zvýší. Polštáře jsou vytvořeny z fólií z materiálu ETFE (ethylen-tetrafluoretylen) v tloušťkách 0,05–0,2 mm. Velkou předností materiálu je skutečnost, že oproti sklu propouští UV záření typu A a naopak filtruje UV záření typu B a C, což je optimální pro použití v prostředí určeném pro živé organismy. Využívá se pro jednovrstvé fólie a také na polštáře. Ty mohou být opatřeny na obou površích různým potiskem tak, aby při regulaci tlaku uvnitř polštáře a tím změně vzdálenosti povrchů docházelo ke změně intenzity propouštěného světla.

MOŽNOSTI STANOVENÍ VNITŘNÍCH SIL V LANECH

Pro správné působení membránových konstrukcí je zásadní správná úroveň předpětí všech částí, tedy kotevních lan nebo táhel, obvodových lan a membrán. Metody měření vnitřních sil těchto prvků lze rozdělit do dvou skupin:

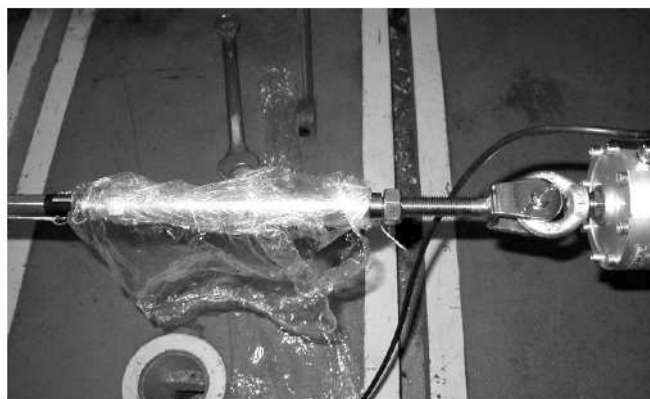
- a) měření na konstrukci před a během montáže,
- b) měření na již předepnuté konstrukci.

První postup je možný pomocí tenzometrického měření nebo měření vloženými dynamometry. Jde o metody výhodnější a přesnější, ne vždy však zhotovitel na zajištění měření předem pamatuje, nebo není z technických nebo koordinačních důvodů možné. Tenzometrické měření na tyčových táhlech pomocí plného můstku (tenzometry na horním a dolním povrchu ve svíslém směru eliminují ohybový moment, další dva jsou kompenzační pro teplotu) jsou spolehlivou prověřenou metodou [2], která může



Obr. 3b – Polštář z fólie s podtlakem

v průběhu přepínacího procesu kontrolovat vnesené vnitřní síly. Problémem u lanových prvků je umístění tenzometrů. Jediné místo, kam se dá tenzometr umístit, je část kruhového průřezu těsně za koncovkou, resp. napínákem. V tomto průřezu však z důvodu přechodu síly z objímky nalisované části na lanu do plného kruhového průřezu není napětí rovnoměrně rozloženo po celém kruhovém průřezu a dochází ke koncentraci na povrchu. Je tudíž nutno provést kalibraci tenzometru. Toto jsme měli možnost vyzkoušet při přípravě předpínání lanové konstrukce zastřešení hospodářského dvora Nosticova paláce v Praze. Kalibrace proběhla v laboratoři Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, ručně vnesená síla pomocí napínací matice byla měřena digitálním dynamometrem a tenzometry nalepenými za napínací matici lana. Získaný poměr skutečné a měřené síly byl jako opravný koeficient nastaven přímo do měřící ústředny a při samotném předpínání tak byly měřeny již reálné síly. Byly použity tenzometry firmy Hottinger-Baldwin rozměru 10 × 10 mm, zapojené do polomostu (obr. 4).



Obr. 4 – Kalibrování vzorku lana s tenzometrickým můstkem a zapojeným dynamometrem

Tab. 1 – Měřené hodnoty kalibrace tenzometrického můstku lana a opravný koeficient

Síla měřená dynamometrem N_D [N]	Síla měřená tenzometricky microstrain [10 ⁶ e]	Síla měřená tenzometricky N_T [N]	Opravný koeficient N_T/N_D	Odchylka od průměru
1 630	52	2 720	1,669	0,015
4 370	136	7 100	1,625	-0,029
7 450	233	12 150	1,631	-0,022
10 050	316	16 480	1,640	-0,013
12 720	401	20 910	1,644	-0,009
15 320	484	25 250	1,648	-0,005
18 000	571	29 820	1,657	0,003
19 920	634	33 150	1,664	0,011
24 290	780	40 670	1,674	0,021
27 660	890	46 500	1,681	0,028
Průměrná hodnota opravného součinitele			1,653	

Možnosti měření hodnot předpětí na aktivované konstrukci spařujeme v následujících metodách:

ba) Stanovení normálové síly z analýzy kmitání daného prvku. Pokud lze na prvku změřit vlastní frekvence, lze pomocí vztahů odvozených z teorie příčného kmitání struny stanovit normálovou sílu v prvku [3]. Je však nutno zohlednit několik faktorů, jako je vliv ohybové tuhosti prvku, osově síly, průřezu, tuhosti uchycení konců prutů a v neposlední řadě také pružnost podpor kolmo na osu prvku, což může v některých případech dosažení relevantních výsledků zkomplikovat. U krátkých lan navíc nelze v případě použití napínacích matic předpokládat rovnoměrné rozdělení hmotnosti po celém prvku.

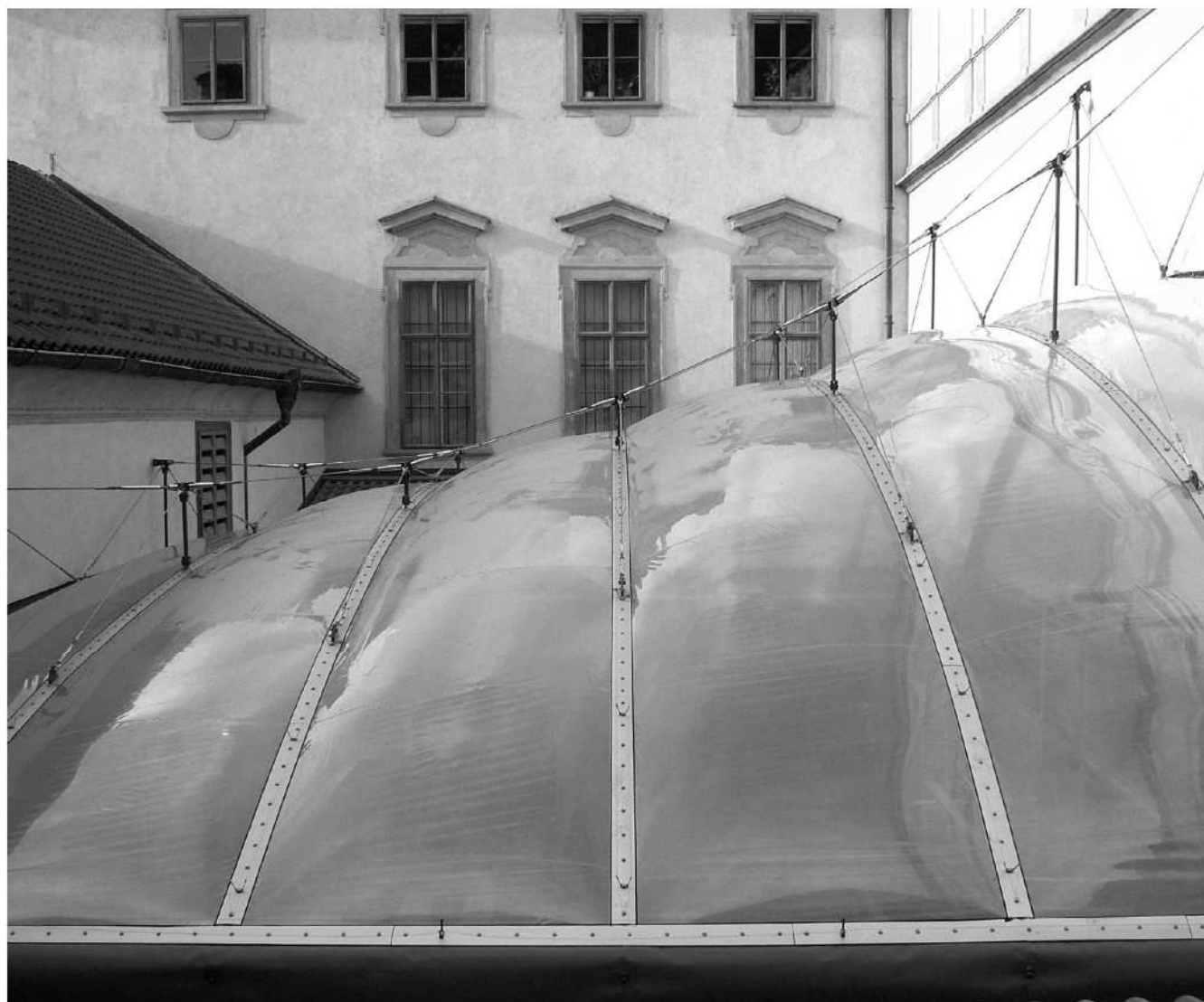
bb) Stanovení normálové síly z naměřeného průhybu, vyvolaného známou silou zkušebního zařízení. Pomůcka o dané vzdálenosti podpor zatlačí uprostřed rozpětí na prvek a změří se výchylka. Je zapotřebí laboratorně kalibrovat dané typy prvků na daný rozsah zatížení.

bc) Stanovení normálové síly pomocí měření elektromagnetické permeability je metoda použitelná pro tyčová táhla. Je však nutné laboratorně vyšetřit vzorek materiálu.

bd) Stanovení napjatosti membrán. Výrobci membrán bylo vyvinuto zařízení schopné stanovit sílu v plachtě. Pracuje na principu měření odezvy akustického buzení spektra frekvencí při známých okrajových podmínkách. Ze získané odezvy se stanoví první vlastní frekvence a následně v závislosti na materiálových podmínkách vnitřní síla.

MODELOVÁNÍ OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ S TEXTILNÍMI MEMBRÁNY

Po autorech návrhu ocelových konstrukcí bude zřejmě stále častěji požadována integrace membránových částí nosné konstrukce ať už v menším, nebo větším rozsahu. Proto je snahou tohoto příspěvku analyzovat možné nedostatky řešení takovýchto konstrukcí a nabídnout postup k jejich minimalizaci. V praxi je běžné oddělené modelování membránových a okolních ocelových nosných konstrukcí. Samotná membránová část je navržena odbornou kanceláří a stanovené účinky se vnesou do ocelové konstrukce. Takový postup nevede ke zkreslení reálného působení pouze při zachování několika podmínek. Předně je to dostatečně výstižný vstup pro zpracovatele membrán – kromě přesné geometrie je nezbytné znát tuhosti podpor a spolupůsobících prvků (např. podporujících oblouků). Pokud nejsou podpory a kotvení membrány zadány pružné (samozřejmě pouze pokud tak ve skutečnosti působí), nelze zjistit deformaci nosné konstrukce realizovanou před dosažením potřebného předpětí membrány. Samotnou hodnotu reakce a předpětí zjednodušení neovlivní v případě, že je předpětí membrány zadáno přímo hodnotou velikosti normálové síly, což ale některý software neumožňuje. V případě zadání předpětí např. pružným zkrácením dojde k dalšímu zkreslení výsledků, výsledné předpětí a tudíž i reakce budou vyšší. Dalším předpokladem dosažení správných výsledků je, aby způsob zadání předpětí odpovídal alespoň zhruba možnostem vnesení předpětí v nosné konstrukci. Je rozdíl mezi tím, pokud je membrána v modelu i v konstrukci předepnuta natažením samotné plachty na



Obr. 5 – Dokončené zastřešení ETFE polštáři se závěsným lanovým systémem hospodářského dvora Nosticova paláce



všech okrajích, nebo zda je předpětí vneseno pouze posunem jednoho bodu uchycení. Naopak na ocelovou konstrukci by neměly být vneseny pouze reakce od membránových prvků, v modelu by měla být zohledněna i tuhost plachtových částí a posuny vyvolané předpětím.

Při společném modelování ocelové konstrukce s membránami, což je postup jistě správnější a při dnešních možnostech softwaru běžně možný, je předpětí člen, který konstrukci uvede do konfigurace, kdy je schopna přenášet další zatížení dle očekávání. Je nezbytné, aby předpětí bylo vneseno do výpočtu jako vstupní parametr před působením dalšího proměnného zatížení. Předpětí je třeba zavést tak, aby v žádném bodu membrány nevznikal tlak, což je možno ověřit předběžným lineárním výpočtem. Pro výpočet konečných kombinací zatížení musí být zpravidla použit nelineární výpočet II. řádem, např. pomocí Newton-Raphsonovy metody. Dle zkušenosti je dobré první výpočet provést s minimálním počtem uvolnění a prutových nelinearit (např. pruty pouze tažené), které je možné doplnit, pokud je výpočetní model stabilní a konverguje. Pokud i přesto není numerické řešení stabilní, je ke zlepšení možné použít „vylepšení“, např. podepřením problematického místa (bod singularity) málo tuhou pružnou podporou tak, aby významně neovlivnila výsledky. Výpočty numericky komplikovaných modelů

konstrukcí s membránami a nosnou ocelovou konstrukcí zpravidla vyžadují podrobnou znalost působení konstrukce a statické funkce jednotlivých částí.

Ing. David Jermoljev,
jermoljev@excon.cz,
EXCON, a. s.

prof. Ing. Josef Macháček DrSc.,
machacek@fsv.cvut.cz,
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí,
Fakulta stavební, ČVUT

LITERATURA:

- Foster B. a Mollaert M. *European Design Guide for Tensile Surface Structures, TensiNet*, 2004, ISBN 90 8086 871
- [2] Polák M. *Experimentální ověřování konstrukcí 10*, ČVUT 1990, ISBN 80 01020 320
- [3] Koloušek V. a kol. *Stavební konstrukce namáhané dynamickými účinky, SVTL Bratislava*, 1967
- Fajman P. *Modelování a výpočty lanových a plachtových konstrukcí, Ocelové konstrukce*, č. 5, roč. 3, 2001, s. 25–28, ISSN 1212-7388

Nonmetallic membranes to steel structures implementation

The tailored and foil membrane structures are worldwide more and more used not only for the temporary structures and the secondary adjacent buildings, but also for the permanent roof structures. Due to use of membranes these structures feature the interesting and uncommon shapes with potential large spans and low weights. Basic shape and load capacity function are achieved by prestress, which has to be introduced into calculation as input parameter and its level should be verified on site during structure assembly.

■ Lehké deliace konstrukcie z hľadiska akustiky

Jedným z dôležitých parametrov ľahkých deliacich priečok je ich vzduchová nepriezvučnosť vytvárajúca akustickú pohodu oddeleného priestoru. Je preto dôležité brať do úvahy tento parameter nielen pri samotnej realizácii či materiálovom riešení, ale už vo fáze konštrukcie. V nasledujúcom článku si ozrejmieme základné faktory, ktoré vzduchovú nepriezvučnosť ovplyvňujú.

DVOJITÉ KONŠTRUKCIE Z ĽAHKÝCH DOSIEK

Požadované zvukovoizolačné vlastnosti vnútorných priečok možno dosiahnuť buď zvýšením plošnej hmotnosti materiálu, vhodnejšie je ale použiť ľahké dvojité konštrukcie. Každá takáto konštrukcia sa skladá z nosného systému (drevených alebo kovových profilov) a z obojstranného opláštenia doskami (jednoduché alebo dvojité opláštenie systémovými doskami s plošnou hmotnosťou jednej dosky nižšou ako 40 kg/m²), ktoré sú oddelené vzduchovou medzerou vyplnenou pružnou minerálnou izoláciou.

Vzduchovú nepriezvučnosť dvojitej priečky z ľahkých dosiek najviac ovplyvňujú:

Plošná hmotnosť a ohybová tuhosť čiastkových dosiek.

S vyššou plošnou hmotnosťou dosky rastie aj jej nepriezvučnosť. Plošnú hmotnosť pri ľahkých doskách možno zvýšiť použitím väčšej hrúbky dosiek, použitím ťažších dosiek, napr. požiarnych, alebo zložením plášte z dvoch alebo viacerých vrstiev ľahkých dosiek. Ak je však čiastková doska ohybovo mäkká a má vysokú plošnú hmotnosť, zhoršujú sa tlmiace účinky tejto vrstvy silným rozkmitaním dosky. Tento jav pomôže odstrániť asymetrická realizácia opláštenia konštrukcie.

Jednoduché alebo viacnásobné opláštenie

Na opláštenie sa používajú dosky na báze drevnej hmoty (cementotrieskové, cementoštiepkové, drevotrieskové) a sadry (sadrkartónové, sadrovláknité). Na ľahké zdvojené priečky možno jednoznačne odporučiť asymetrickú realizáciu opláštenia konštrukcie. Tým dôjde k odstráneniu alebo aspoň utlmeniu rezonančných

efektov, ako aj k zlepšeniu akustických vlastností priečky. Pri ľahkej sadrokartónovej priečke to znamená použiť rozličné hrúbky dosiek na plášťoch priečky alebo dosiahnuť asymetriu zdvojením dosiek na jednej strane priečky. Význam vplyvu asymetrie je zrejmý z výsledkov meraní – zdvojením i druhého plášte priečky síce zvýšime hmotnosť konštrukcie, ale zároveň dôjde k strate asymetrie a vý-



Ilustračné foto