

TEXTILNÉ MEMBRÁNOVÉ ŠTRUKTÚRY

Ing. arch. František Kalesný, Fakulta architektúry STU, Bratislava

Snahou človeka bolo vždy prestrešiť čo najväčšie priestory na zlepšenie nevlúdnej klímy. Táto snaha sa premieta do realizácie veľkých halových objektov. Dnešný halový objekt musí spĺňať náročné požiadavky investora i užívateľa. Objekty tohto charakteru s použitím bežných konštrukčných princípov a materiálov sú finančne náročné. Toto viedlo architektov a projektantov k hľadaniu riešení, ako pri obmedzených podmienkach zrealizovať architektúru spĺňajúcu vysoké funkčné a estetické kritériá. Jednu z možných ciest smerovania v tomto hľadaní naznačili i textilné membránové štruktúry.

Aplikácie foriem

Formu textilných membránových štruktúr podobne ako pri visutých lanových konštrukciách na rozdiel od ostatných konštrukcií oveľa viac určujú statické danosti. Pri hľadaní tvarov musí byť jednou z východiskových požiadaviek čo najpriaznivejšie statické namáhanie umožňujúce preklenúť čo možno najväčší priestor. Čistota tvaru sa tvorí zo statických podmienok – vonkajšia podoba a vnútorný tlak síl navzájom dokonale spolupôsobia. Možností na voľbu vhodnej formy sa ponúka hneď viacerou:

1. Štruktúry vychádzajúce z organických tvarov – pri skúmaní tiel živočíchov v prírode môžeme pozorovať prísne symetrie, nedokonalé asymetrie či rôzne zaujímavé súvislosti medzi kruhom, guľou, valcom a pod., resp. medzi aplikáciou priestorových kriviek ako hyperbola, parabola odskúšaných prírodou. Z antropologického hľadiska ide o prenesenie voľnej organickej formy z formy pôdorysu do podoby kriviek spravidla symetrického tvaru umožňujúcich tvoriť základný princíp navrhovaných stavieb (obr. 1).



Obr. 1 „Diadema“ pavilón Expo 92 Sevilla, SP
dodávateľ: CENO-TEC (membránová strecha pavilónu – aplikácia organickej formy) – pohľad



Obr. 2 Nemecký pavilón Expo 92 Sevilla, SP
dodávateľ: CENO-TEC (membránový baldachýn vstupnej haly – geometrická kompozícia) – pohľad

2. Štruktúry, ktorých forma je založená na použití základných geometrických tvarov ako kruh, elipsa, guľa, valec sú uplatňované predovšetkým pri objektoch, kde stojí v popredí funkčná zložka – sú to väčšinou oválne alebo eliptické riešenia vyvolané požiadavkami dispozície. Uplatňujú sa hlavne pri športových a kultúrnych stavbách, kde sa často využíva oval či elipsa, vyplývajúce z logiky funkčného konceptu a konštrukčného riešenia. Priestor konštrukcie zastrešenia môže kopírovať alebo presahovať dispozíciu (obr. 2).
3. Štruktúry vznikajúce aplikáciou modifikovaných kombinácií geometrických telies, resp. geometrických kriviek (obr. 3).

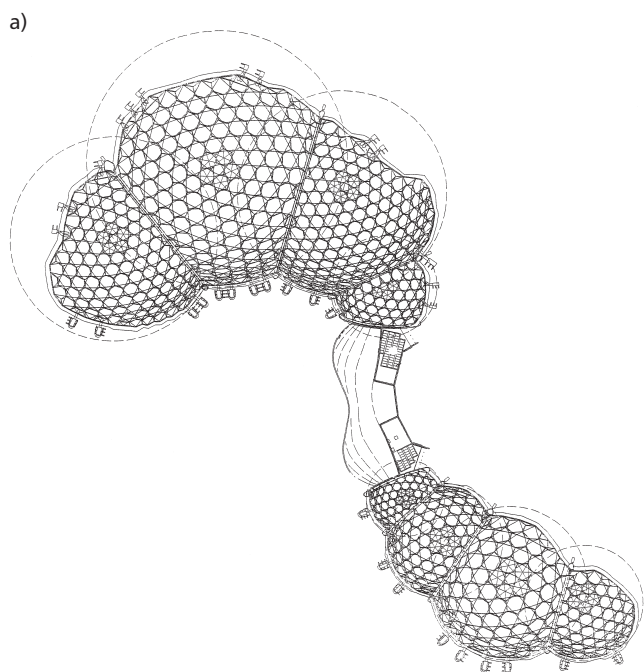
Pri hodnotení ponúkaných možností vystupuje do popredia predovšetkým kruh – predstavuje staticky uzavretý symbol univerza. Kruhovú, resp. polgulovú formu, ktorá sa uplatňuje vo valcovej podobe, alebo inak modifikovaná v exteriéri, poskytuje ideálnu možnosť uzavretia priestoru kupolami značných rozmerov. Domy kruhového pôdorysu sú rozšírené od najstarších čias – vychádzajú z logiky ústredného priestoru a tiež z jednoduchosti konštrukcie. Čistá forma elementárnych geometrických telies sa často uplatňuje aj pri halových membránových objektoch – pri väčšej výpovednej hodnote o unikátnosti objektu viac umožňuje zjednodušenie statiky nosnej konštrukcie ako nečisté geometrické formy.

Väčšinou je na suverénite tvorcu, či sa poddá organickej forme a geometrickým zákonom mnohokrát overených praxou, alebo si zvolí neprehľadné úžiny vlastného hľadania.

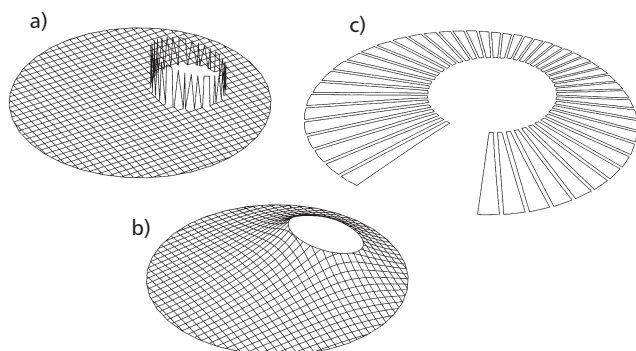
Metódy navrhovania

Forma membránových štruktúr sa musí vzhľadom na špecifické vlastnosti materiálu navrhovať nekonvenčnou cestou. Elasticita materiálu membrány predovšetkým pri mnohostranne predpínaných membránach spôsobuje vplyvom prirodzeného

Halové objekty



Obr. 3 Eden projekt, Cornwall, GB
architekt Nicolas Grimshaw and Partners (membránová štruktúra – aplikácia modifikovaných foriem, forma vyplývajúca z prírodných funkcií s uplatnením vonkajšej hexagonálnej štruktúry) – a) plán zastrešenia, b) pohľad do interiéru



Obr. 4 Príklady počítačovej podpory, overovaco-formovací proces
a) Definícia obvodu, topologická sieť a fixovanie bodov, b) Definovanie formy predpätej membrány, c) Rozdelenie membrány na segmenty, obrázková geometria

napätia zmenu rozmerov oproti návrhu, čo má vplyv na rozmery vonkajšieho obvodu, ale aj na stanovenie polohy vysokých bodov, resp. na rozmiestnenie panelových štruktúr a materiálu. Návrh potrebuje zohľadniť skutočnosť, že materiál môže byť vplyvom ťahového napätia nie celkom stály. Sústredené napätie prenášané predovšetkým do záhybov alebo do preloženia materiálu má za následok skrátenie životnosti materiálu membrány. Tento konštantný zdroj napätia treba udržiavať v rozumných limitoch. V opačnom prípade môže byť životnosť technických prefabrikátov značne redukovaná.

Pri navrhovaní je veľmi dôležité stanovenie minimálneho povrchu priestoru s určením obvodovej línie. Membrána rešpektujúca tento princíp bude vždy namáhaná silami napätia, ak sa zmení jej forma. Pri membránach, ktoré nie sú navrhnuté týmto spôsobom, môže prípadná zmena zaťaženia spôsobiť zmenšenie povrchovej plochy, čo spôsobuje vznik záhybov alebo zvlneenie. Dôvodom toho je izotropná povaha materiálu, t. j. že je vystavený rovnakým silovým vplyvom všetkými smermi ako mydlová bublina.

Pri navrhovaní formy membránových štruktúr rozlišujeme experimentálnu a analytickú metódu. V minulosti často používaná experimentálna metóda bola založená na konštruovaní modelov. V súčasnosti používané počítačové metódy vychádzajú z komplexnosti založenej na neoddeliteľnom spôsobe vývoja návrhu formy lanovej sieťovej, resp. konštrukčnej štruktúry (obr. 4). I keď používané matematicko-numerické metódy dokážu v podstate nahradiť model stavby, aj tak je model potrebný v začiatkovej fáze návrhu najmä pri objektoch a halách využívajúcich princíp mnohostranne predpínaných membrán. Pre malú mierku modelu a veľkú plasticitu materiálu, treba estetické a štrukturálne vzťahy navrhovaného objektu odhadnúť skôr.

Analytická metóda návrhu membránových štruktúr, ktoré sú dostupné na tento účel, je podobná v mnohých programoch. V princípe je založená na počiatočnom určení geometrie obvodu, do ktorého rámca sa potom generuje sieť s určitými pevnými bodmi membrány.

Fenomén haly

Stretávame sa s ním v najrôznejších kreatívnych podobách na najrôznejších miestach v podobe zrealizovaných membránových



Obr. 5 Expo Mníchov – expozícia BMW, GBR
architekti ABB Architekten Frankfurt (interiérová membránová štruktúra) – pohľady



Obr. 7 Autobusová stanica, Strasbourg, FR
dodávateľ: FERRARI (použitie princípu vypuklej membrány)



Obr. 6 Hotel Burj Al Arab Dubai, FA
architekti W.S. Atkins, Associates (uzavretie hotelovej haly výškovej stavby membránou PTFE) – pohľad, pohľad z interiéru na uzatvárajúcu membránu



Obr. 8 Národné vesmírne centrum Leicester, GBR
architekti: Nicolas Grimshaw ass. (opláštenie 140 m vysokej „Raketovej haly“ dvojplášťovou vankúšovou membránou) – pohľad

štruktúr – zvnútra i zvonka, v interiéri alebo exteriéri. Či ako baldachýny vytvárajúce otvorené vstupné haly výstavných pavilónov, vložené membránové štruktúry v tele domov pevných konštrukcií – zastrešenie dvorán administratívnych budov, obchodných domov, hotelov alebo ako objekt kultúrnych, športových arén, leteckých hangárov alebo iných druhov stavieb vložených do membrán od zeme po strechu (obr. 5, 6, 7, 8).

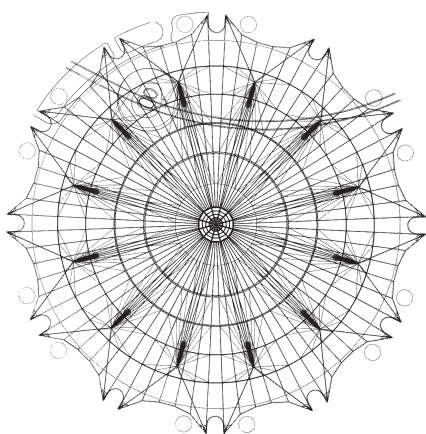
Rozdelenie textilných membránových štruktúr

Podľa spôsobu použitých princípov napnutia membrány rozdeľujeme textilné membránové štruktúry do niekoľkých skupín. Z najčastejšie uplatňovaných princípov sú to: mnohostranne predpínané membrány, membrány predpínané metódou okrajového napätia, membrány napínané metódou rozdielneho tlaku a rotačné membrány. Prvé tri nachádzajú často uplatnenie aj pri realizácii halových textilných membránových štruktúr.

Mnohostranne predpínané membrány – tento princíp využíva na napínanie membrány viaceré metódy, pričom vzniká bežné mechanické napätie spôsobené vplyvom napínania „kože membrány“ medzi vysokými a nízkymi bodmi definujúcimi obvodovú líniu. Toto namáhanie môže byť ťahovo tlakovým alebo ťahovým. Čím väčšie bude zakrivenie membrány, tým menší



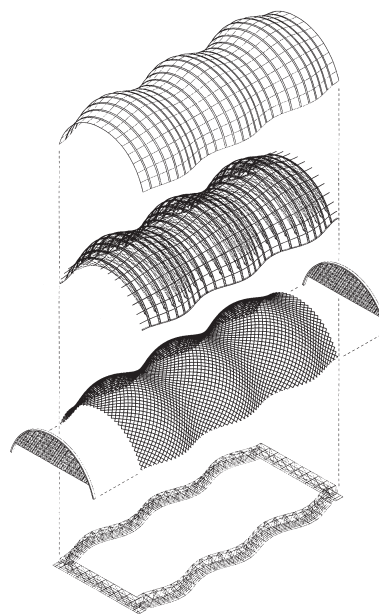
Obr. 9 Events centrum Edinburg, GB
architekti Michael Hopkins & Partner, Londýn (aplikácia mnohostranne predpínanej membrány s dopĺňujúcimi stužujúcimi prvkami) – pohľad



Obr. 10 Hala Milénia Londýn, GB
architekti: Richard Rogers, Partnership (membrána napínaná metódou okrajového napnutia – uplatnenie lanovej skruže) celkový pohľad, pôdorys strechy

bude tlak v membráne a najmenšie reakčné sily v ukotvení okrajov. Ako nosné prvky sa uplatňujú predovšetkým stožiar a nosné lano. Konštrukčne najjednoduchšie riešenie je priame zakotvenie do zeme, prípadne odvedenie obvodových síl cez podpory, ktoré sú lanami prichytené do zeme (obr. 9). Toto riešenie má však zvýšené nároky na priestor. Tuhosť a stabilitu týchto štruktúr možno docieľiť vytvorením plôch dvojitej krivosti. Účinnok sania, ktorý sa prejavuje ako kolísavé zaťaženie od účinku vetra a môže spôsobovať čiastočné deformácie formy, sa odstraňuje použitím dopĺňujúcich vystužujúcich prvkov. Určitou nevýhodou princípu je, že podporné prvky konštrukcie, stožiare, môžu zasahovať do priestoru dispozície.

Jednoduchosť konštrukcie, prakticky žiadne nároky na spodnú stavbu, jednoduchá montáž a demontáž a z toho vyplývajúca mobilita majú za následok, že tieto stavby sa často uplatňujú ako objekty prechodného využitia. Že to nemusí vždy byť pravidlom, ukazujú i mnohé príklady spojenia tradičnej stavby so vzletnou textilnou architektúrou.



Obr. 11 Japonský pavilón Expo 2000, Hanover, GBR
architekti: Shigeru Ban, Tokio (membrána napínaná metódou okrajového napnutia – nosná konštrukcia mrežová štruktúra z recyklovateľného papiera) – uloženie jednotlivých vrstiev nosnej konštrukcie a membrány – pohľad na mrežovú štruktúru nosnej konštrukcie



Obr. 12 Športová hala, Odate, JPN
architekti: Toio-Ito & Ass. Tokio a Takenaka Corporation, Tokio (membrána napínaná metódou okrajového napnutia – nosná konštrukcia mrežová štruktúra z drevených lepených nosníkov) rozpon 142 m – pohľad, pohľad do interiéru haly



Obr. 13 Hangár pre vzducholode fi CARGOLIFTER, GBR
(membrána napínaná metódou okrajového napnutia – nosná konštrukcia oceľová štruktúra) rozpon 210 m – pohľad na montáž haly

Prédipnanie spôsobom okrajového napnutia je jednou z ďalších známych metód uplatňovaných pri realizovaní membránových štruktúr. Týmto spôsobom, t. j. ich vlastnou váhou alebo postupným zaťažovaním môžu byť napínané alebo stabilizované membrány, ktoré majú rovnaké zakrivenie. Ako nosnú konštrukciu

využívajú lanové (obr. 10), drevené, (obr. 12) resp. oceľové mrežové štruktúry (obr. 13), uzatvoreného statického princípu.

Výhodou sú nižšie alebo žiadne nároky na priestor v okolí stavby. Dostatočná tuhosť konštrukcie zaručuje ich odolnosť voči nepriaznivým dôsledkom možného sania vplyvom účinku vetra, počasia a umožňuje realizovať stavby s väčším rozpätím bez dodatočných podpôr vstupujúcich do dispozície.

Klenuté kopuly uzatvárajúce výstavné pavilóny, haly a hangáre dosahujú s ich pomocou rozpony i niekoľko 100 m.

Prínosom sú nielen ich invenčné formy, podnetné konštrukčné riešenia, ale často i použitie novovyvinutých experimentálnych materiálov.

Charakteristické sú nielen monofunkčné sólo objekty, ale aj membrány – haly, tvoriace súčasť pevných stavieb.

Metóda rozdielneho tlaku je ďalšia známa metóda napínania membrán, príkladom sú pneumatické štruktúry s najbežnejším druhom s nafukovacou halou s vnútorným pretlakom. Nosný konštrukčný faktor pneumatických štruktúr – rozdielny tlak možno okrem vzduchu dosiahnuť tiež pomocou vody alebo inej náplne. Zaujímavejšia povrchová rozmanitosť sa môže doceliť tým, že sa štruktúra rozdelí na väčšie množstvo samostatných komôr.

Medzi pneumatické konštrukcie často uplatňované pri halových objektoch patria tieto druhy stavieb: stavby nesené vzduchom – pretlakové, skeletové čiže rebrové, vankúšové a kombinované.

Pretlakové a skeletové pneumatické štruktúry – tvoria najrozšírenejšiu skupinu stavieb tohto druhu (obr. 14, 15). Po statickej stránke vykazujú tieto konštrukcie odlišnosti oproti bežným objektom. Zvyčajný tlak konštrukcie na podklad je nahradený ťahom a konštrukciu treba po obvode kotviť alebo dodatočne zaťažiť proti dvíhaniu. Vnútorný pretlak v objekte musí byť väčší ako tlak vyvolaný zaťažením, t. j. vlastnou váhou pláštá, snehom, vetrom. Pôsobením vetra dochádza k zaťaženiu a následne k deformácii tvaru. Jeho vplyvom sa zvyšuje vnútorný tlak, ktorý vracia povrchový plášť do pôvodnej polohy.

Pri objektoch s menšími nárokmi na priestor a s možnosťou častého premiestňovania sa uplatňujú hlavne rebrové pneumatické konštrukcie. Demontážou pri ich sezónnom využívaní je však možné poškodenie pláštá a narušenie jeho nepriedušnosti, čím sa skracaie jeho životnosť.

Architektúra pneumatických konštrukcií nie je obmedzená iba na základné geometrické tvary. Realizáciu rozmanitých tvarov umožňujú konštrukcie s kostrou nahustených nosných prvkov rôzne kombinovaných s pretlakovými a vankúšovými konštrukciami alebo kombinácie konštrukčných prvkov nafukovacích a tuhých na báze dreva, ocele alebo betónu. Tvarovú nepravidlosť a geometrickú neurčitost týchto objektov treba však zabezpečiť pri ich výrobe úpravou plôch jednotlivých dielov.

Na princípe pneumatických konštrukcií alebo v spomenutých kombináciách možno teoreticky zhotoviť priestorovo neobmedzené objekty.

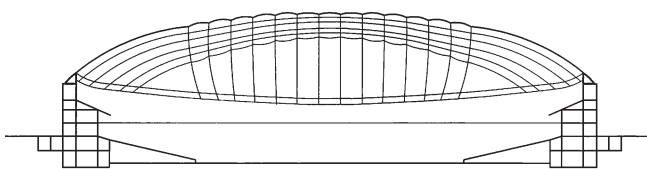
Realizácia membránovej štruktúry

Postavenie membránovej štruktúry vzhľadom na rovinný charakter jednotlivých panelov si vyžaduje postupný proces. Napnutý povrch membrány vytvára v skutočnosti trojrozmerné zakrivenie pozostávajúce z narezaných rovinných plátov priestorovo nenapnutých panelov pospájaných spoločne spôsobom,

Halové objekty



Obr. 14 US Pavilon, Svetová výstava Osaka 1970
architekti : Davis Brody, Geiger Berger Ass (membrána napínaná metódou vnútorného pretlaku) rozpon 142 m – pohľad na strechu



Obr. 15 Tokio – Dome, Tokio 1988
architekti : Nikken-Sekkei/Takenaka (kombinácia membrány napínanej vnútorným pretlakom so sieťovou štruktúrou) rozpon 201 m – rez, pohľad do interiéru

ktorý bude predvídať formu po napnutí. So zväčšujúcim sa rozmerom vyúsťuje stvárnenie trojrozmernej formy do zakrivenia, najmä smerom ku krajom jednotlivých pásov. Membrány väčších plôch sa musia rozdeliť na menšie segmentové časti – membránové prefabrikáty, ktoré sa strihajú, keď nie sú napäté. Po vztýčení konštrukcie je strecha vystavená napínaniu, ktoré prebieha postupným procesom vyvažovania (obr. 16).

Z pohľadu hrúbky materiálu sú membránové štruktúry veľmi citlivé v bodoch zaťaženia. Všetky spájacie techniky by preto mali zabezpečiť, aby rozdelenie zaťaženia bolo vyrovnané. Tu vystupuje základný rozdiel medzi spojmi zhotovenými vo výrobe a pripravenými a zhotovenými na mieste. Pri kompletácii sú jednotlivé segmenty membrány spájané dohromady vo väčších priestoroch alebo na väčších priestranstvách. Používa sa zošívanie a zváranie švíkov alebo ich kombinácia. Pretože je zošívanie švov relatívne drahé, používa sa iba v odôvodnených prípadoch, t. j. hlavne na miestach väčšieho zaťaženia. Určitou nevýhodou procesu zošívania membrány je jej perforácia, čo môže vyvolať



Obr. 16 Hala Milénium, Londýn
(proces vyvažovania konštrukcie a napínania membrány)

problémy s vodonepriepustnosťou membrány alebo sklolaminátových prefabrikátov. Zošité miesta sa preto pokrývajú poistnými pásmi. Polyesterové prefabrikáty z PVC sa zvyčajne spájajú spôsobom vysokofrekvenčného spájania švov. Zváranie alebo zošívanie na mieste je pomerne nákladné a používa sa zvyčajne počas aditívneho postupného zapečatenia polohy (obr. 17). Spoje membrán sú zvyčajne umiestnené z vonkajšej strany membrán spolu s uzatváracími pásmi. Okraje membrán sú zatvorené pripojením panelov – prefabrikátov k pevnému obvodu membrány tak, že lano (hadica) je umiestnené v priebežnom



Obr. 17 Hala Milénium, Londýn
(proces uzatvárania membránových prefabrikátov)

púzdre (vo vreci) prebiehajúcom po obvode prefabrikátu. Tento detail je značne namáhaný trením a vplyvom kolísania teploty dochádza i k jeho navlhaniu. Preto by mali byť laná a pevné spojenia membrán z nehrdzavejúcej ocele alebo v galfonovom opláštení. Pri väčších zaťaženiach sa používajú na spájanie v švoch spojovacie remene, ktoré bývajú namáhané tangenciálnymi silami. Do určitej miery zaťaženia môže byť zakončenie pomocou spojovacích remeňov dostačujúce. Pri veľkom zaťažení sa používajú na spájanie ukončenia membrán – prítlačné platne. Spojovacie prítlačné platne zvierajú membránu obojstranne a nechávajú tak membránu intaktnú čím sa ohraničuje veľkosť napätia. Miestom, kde sa sústreďuje najväčšie napätie, sú najvyššie a najnižšie body uchytenia. V najvyšších bodoch zakončenia býva membrána spravidla podopretá lanovou skružou, ktorá prenáša zaťaženie z prefabrikátov do závesných častí. Jej celkový stabilizačný systém dopĺňajú podopretia klenutými priehradovými nosníkmi. Systém je tak stabilizovaný interakciou – stlačením medzi membránou a stlačenou klenbou.

Montáž a demontáž pneumatikých membrán je pomerne jednoduchá. Povrchový plášť sa spojí do jednotného celku a objekt sa starostlivo zakotví. Po skončení týchto prác a napojení dúchadiel sa môže celá konštrukcia vztýčiť. Veľké rozmery pretlakových hál zvyčajne spôsobujú, že celková váha objektu je dosť veľká. Preto sa z konštrukčných dôvodov postavenia objektu, ako aj manipulácie s ním plášť delí zvyčajne na niekoľko dielov, ktoré umožňujú ručnú manipuláciu.

Na spájanie jednotlivých častí sa používa viacero spôsobov. Spoje však nie vždy zaručujú vzduchotesnosť.

Druhy a vlastnosti materiálov

Textilné membrány dnes využívajú na opláštenie širokú škálu materiálov, ako sú zlepšené bavlnené tkaniny, textilné membrány zo syntetických a prírodných vlákien (PVC, polyester, sklolaminát, sklo), ale i metalické poťahy skladané z tenkých oceľových alebo hliníkových plachiet, fóliové povlaky, resp. sendvičové viacvrstvové panely. Zo spomenutých materiálov sa asi najčastejšie používajú materiály na báze polyesteru. Veľkou výhodou je ich svetelná priepustnosť, ktorá sa môže pri rôznej skladbe materiálu pohybovať v rozmedzí 15 – 65 %. Mimoriadne vhodné sú

flontexové sklené sieťové membrány z tkaniny PTFE. Špeciálnou vložkou nadobúdajú tieto tkaniny vyšší tepelnoizolačný štandard. Sklená tkanina z PTFE nie je horľavá, odpudzuje nečistotu a má dlhú životnosť a odolnosť proti agresívnym vplyvom životného prostredia a ultrafialovému žiareniu. Materiál sa musí voliť so zreteľom na zaťaženie vetrom a snehom a musí poskytovať dostatočnú statickú istotu.

Doteraz nedoriešeným problémom membránových textílií je ich obmedzená životnosť, ktorá pri sklolaminátových tkaninách PTFE dosahuje vo vonkajšom prostredí minimálne 20 rokov.

Záver

Membránové štruktúry patria k najľahším stavebným druhom. Ľahkosť a subtilnosť zrealizovaných konštrukcií, pri cenách, ktoré sú asi o 30 – 70 % nižšie oproti stavbám postaveným bežným spôsobom na báze tradičných materiálov a pri pneumatikých štruktúrach približne len 20 – 30 % nákladov na porovnateľné jednotky obyčajných objektov, utvára pre tento charakter stavieb značný priestor. Tento spôsob stavania sa dnes uplatňuje v širokej škále architektonických a stavebných typov, umožňuje architektom realizovať s relatívne malou materiálovou bázou veľkoplošné tvary a objekty s dostatočnou bezpečnosťou. Rozsiahle uplatnenie nachádza pri objektoch halového typu amfiteátroch, výstavných pavilónoch, športoviskách, ale i pri zastrešeniach hangárov.

Krátky čas realizácie, materiálová a cenová dostupnosť, kreativita foriem vznášajúcich sa nad zemou, ale i neobvyklé rozpätia gigantických hál pripútaných k zemi, postavených na báze recyklovateľných materiálov sú jednou z možných ciest k vyriešeniu problémov naznačených v úvode tohto článku.

Foto: archív autora

Literatúra

1. REIN, A. – WILHELM, V.: Membrane construction. In: Detail, 2000, č. 6.
2. DOLEŽEL, K.: Geometrické krivky v architektúre. In: Architekt, 2000, č. 9.
3. *Bauen mit Glasgewerbe – Membranen*, In: Detail, 1998, č. 6.
4. KALESNÝ, F.: *Textilná architektúra*. Príspevok na medzinárodné sympóziu Globalization and us. Dunajská Streda: 2001.