

TEORETICKÁ A EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA SKLENÝCH PRVKOV

M. Slivanský¹ a J. Brodniansky²

ABSTRACT

The use of glass as a building material has grown in popularity in recent years. The reasons for this can be primarily found in developments in glass technology, which have led to higher mechanical strengths.

Designing with glass demands a detailed knowledge of the mechanical properties of this strong but, unfortunately, brittle material.

1 ÚVOD

Metodika návrhu a detailného riešenia konštrukčného systému zahŕňa vo všeobecnosti široké spektrum rôznorodých kritérií a požiadavok, ktoré musí realizovaný projekt spĺňať, resp. po celú dobu svojej životnosti zabezpečovať. Jedná sa hlavne o zabezpečenie funkčnosti, účelu a požadovaných vlastností systému, jeho spoľahlivosti a trvanlivosti, primeranej hospodárnosti a efektívnosti, výtvarného a estetického účinku pri naplnení požiadavok hygieny prostredia, ochrany prírody a zdravia užívateľov, a podobne.

Za posledných desať rokov došlo ku výraznému rozvoju a aplikácii veľkoplošných sklených konštrukčných dielcov v stavebníctve, a to hlavne v prípade rôznych typov skladby a usporiadania sklených fasádnych konštrukcií alebo konštrukcií zastrešenia. Konštrukčné sklo už nie je len súčasťou výplne otvoru steny objektu, ale často tvorí vlastný veľkoplošný transparentný systém ovplyvňujúci výrazne pohodu vnútorného prostredia i architektonický výraz budovy. V porovnaní skla s ostatnými konštrukčnými materiálmi je pôsobenie konštrukčného skla pri účinku zaťaženií doposiaľ do značnej miery nedostatočne teoreticky aj experimentálne rozpracovaným problémom a intenzívny výskum uvedených dielčích otázok

¹ Ing. M. Slivanský – Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra kovových a drevených konštrukcií, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, slivansky@svf.stuba.sk

² Doc. Ing. J. Brodniansky, PhD. - Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra kovových a drevených konštrukcií, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, brodo@svf.stuba.sk

je nezbytným predpokladom zabezpečenia spoľahlivosti, funkčnosti a efektívnosti novodobých moderných zasklených konštrukčných dielcov a stavebných systémov.

2 POUŽITIE SKLA

V súčasnej dobe môžeme sklo pokladať za univerzálny stavebný materiál. S nárastom šírky ponúkaného sortimentu skiel a produktov na báze skla, je dôležité správne vybrať najvhodnejší produkt pre danú aplikáciu. Len špecializovaný odborník vie určiť, resp. predpokladať, ako sa daný materiál správa na základe stanovených okrajových podmienok v skutočnosti. V praxi sa nedá vyhovieť všetkým požiadavkám súčasne, a preto sa často robia kompromisy pri výbere, alebo kombinovaní rôznych sklenených produktov.

2.1 Okná a zasklené fasády

Okná a fasády sú vertikálne prvky, ktoré slúžia ako deliaca konštrukcia medzi exteriérom a interiérom. Musia byť schopné odolávať zaťaženiu vlastnou váhou a zaťaženiu vetrom. Sú komponentmi stavebnej konštrukcie, ktoré nemusia spĺňať žiadne dodatočné bezpečnostné požiadavky, ak takáto požiadavka nie je priamo definovaná účelom objektu. Napriek tomu musí byť ich materiál a skladba zvolená veľmi starostlivo s ohľadom na tepelnú a zvukovú izoláciu konštrukcie.

2.2 Pochôdzne sklo

Sklo umiestnené pod určitým uhlom, vzhľadom na vertikálu, musí byť schopné odolávať zaťaženiu vlastnou váhou, saníu a tlaku vetra, zaťaženiu snehom alebo zaťaženiu vyvolanému prítomnosťou osôb (čistenie a údržba sklenej konštrukcie). Takéto zasklenie sa samozrejme musí s ohľadom na tieto skutočnosti aj navrhnuť.

Typy pochôdznych skiel zaraďujeme do dvoch kategórií:

- sklo s obmedzeným pohybom osôb,
- sklo s neobmedzeným pohybom osôb.

3 NAVRHOVANIE NOSNÝCH KONŠTRUKCIÍ ZO SKLA

Využívanie skla ako stavebného materiálu sa spopularizovalo len v nedávnej minulosti. Hlavným dôvodom je pokrok v technológii výroby skla, ktorý viedol ku konštrukčnému materiálu s vyššou kvalitou a vyššou mechanickou pevnosťou.

Navrhovanie sklenených prvkov resp. konštrukcií vyžaduje podrobné znalosti mechanických vlastností tohto pevného, ale bohužiaľ veľmi krehkého materiálu. Sklo sa chová pri zaťažení takmer úplne elasticky. Nevykazuje žiadne plastické rezervy a v množstve prípadov sú pre návrh sklenených prvkov rozhodujúce koncentrácie napätí, ktoré vznikajú v okolí trhlín, škrabancov alebo rýh na povrchu sklenených prvkov. Spoznanie týchto faktorov viedlo, a neustále vedie, ku vzniku nových metód pre návrh a posudzovanie nosných elementov vyrobených zo skla.

Najčastejšie je sklo využívané v stavebnom priemysle ako priehľadný resp. priesvitný komponent oddeľujúci vnútorný priestor, charakterizovaný klimatickými, akustickými a inými požiadavkami, od vonkajšieho priestoru. V takomto prípade zasklenie spĺňa funkciu bariéry či filtra medzi dvomi odlišnými prostrediami a má za úlohu blokovat' alebo odrážať vybrané fyzikálne toky.

V dnešnej dobe je však nevyhnutné zaoberať sa otázkou, v akých prípadoch je možné považovať sklenený prvok za nosný konštrukčný element alebo za časť nosného systému. Preto vzniklo počas histórie navrhovania sklenených prvkov niekoľko spôsobov, ktorými je možné popísať mechanické vlastnosti a pôsobenie skla ako konštrukčného materiálu. Väčšina týchto metód je zaužívaná nielen pri návrhu sklenených, ale tiež betónových, železobetónových, oceľových a drevených konštrukcií.

3.1 Návrhové metódy

Existuje niekoľko prístupov ako popísať mechanické chovanie a fungovanie skla. Na základe týchto metód boli neskôr odvodené metódy navrhovania a posudzovania sklenených konštrukcií. Nasledujúce tri metódy sa síce vzájomne líšia špecifickým teoretickým prístupom, ale napriek tomu nie sú protichodné a teda môžu byť vhodným spôsobom kombinované.

Metóda dovolených namáhani

Navrhovanie je založené na báze dovolených napätí. Výhodou tohto výpočtového prístupu je v prvom rade jeho jednoduchosť. Aby boli obsiahnuté všetky neznáme, všetky pravdepodobnosti porušenia konštrukcie a v rovnakom čase dosiahnutý aj adekvátny stupeň bezpečnosti, je nutné používať pomerne vysoké stupne bezpečnosti. Pre bežné typy skiel sú stupne bezpečnosti 2,5 až 3,0 krát vyššie, ako je charakteristická pevnosť skla získaná pri experimentálnych skúškach.

Navrhovanie na základe pravdepodobnosti prasknutia, resp. zlomenia

Na popísanie štatistickej podstaty použiteľnej pevnosti skla sa využíva lomová mechanika. Uvedená metóda zohľadňuje vplyv trvania zaťaženia a okolitej vlhkosti. Veľmi dobre popisuje skutočné chovanie skla. Je presnejšia ako metóda dovolených namáhani, ale bohužiaľ je takisto oveľa viac komplikovaná.

Metóda medzných stavov

Prístup na základe metodiky medzných stavov využíva štatistické spracovanie vstupných hodnôt na strane pevnosti materiálu a strane zaťaženia. Okrem toho obsahuje rôzne modely porušenia konštrukcie. V súčasnosti je najpoužívanejšou metódou nielen pri návrhu sklenených konštrukcií.

Koncepcia návrhu a posúdenia konštrukcie na základe metódy medzných stavov vyžaduje bezpodmienečnú garanciu vzhľadom na porušenie ktoréhokoľvek nosného prvku, bez ohľadu na funkciu elementu v konštrukcii.

Návrh podľa metódy medzných stavov musí zabezpečiť podmienky prevádzkyschopnosti posudzovanej konštrukcie z hľadiska:

- medzného stavu únosnosti – schopnosť prvku vyhovieť všetkým napätiam, ktorými je daný prvok namáhaný,
- medzného stavu použiteľnosti – schopnosť prvku vyhovieť maximálnym prípustným deformáciám.

Pri návrhu sklenených prvkov je navyše nevyhnutné posúdiť konštrukciu v prípade porušenia. Posudzujú sa nasledovné vlastnosti:

- zvyšková únosnosť porušeného skleneného prvku vzhľadom na náhle zrútenie,
- zvyšková stabilita konštrukcie ako celku.

4 TEORETICKÉ OVEROVANIE SKLENÝCH KONŠTRUKCIÍ

Experimentálne overovanie moderných konštrukcií a materiálov je jedným z najdôležitejších zdrojov poznania skúmanej problematiky. Avšak nie vždy je možné, vzhľadom na rozsah a možnosti experimentu, skúmať danú problematiku komplexne. Komplexným skúmaním sa rozumie sledovanie vzájomnej interakcie medzi vyšetrovanou konštrukciou, prípadne materiálom a veľmi širokým spektrom ovplyvňujúcich parametrov. Príprava a realizácia laboratórnych skúšok je navyše vo väčšine prípadov značne časovo aj finančne nákladná a z tohto dôvodu je nevyhnutné zaoberať sa otázkami korektnej tvorby teoretických modelov a ich aplikáciou na praktické úlohy.

V dnešnej dobe výpočtovej techniky umožňujú výkonné počítače a výpočtové programy veľmi podrobné simulovanie laboratórnych experimentov, stavebných konštrukcií a podobne. Hlavnou výhodou tohto prístupu je, že sa dajú modelovať aj pomerne rozsiahle konštrukcie efektívne, bez zvýšených priestorových alebo finančných nárokov. Jednoduchšie je taktiež spracovávať rôzne parametrické štúdie.

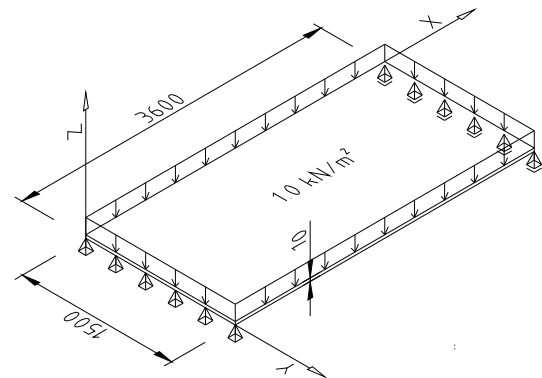
Pri analýze napätosti a pretvorení plošných dielcov vyrobených z konštrukčného skla je potreba zväžiť podstatnú odlišnosť od bežných stavebných doskových dielcov. Stavebné prvky vystavené vonkajšiemu zaťaženiu sa často posudzujú na základe Kirchhoffovej teórie malých deformácií (teória prvého rádu). Priehyby sklenej dosky však bežne môžu byť násobkom jej hrúbky, takže základný predpoklad Kirchhoffovej teórie tenkých dosiek s malými priehybmi nie je splnený. Ku riešeniu je teda nutné použiť Karmánovu nelineárnu teóriu dosiek s veľkými priehybmi, pri ktorej sú klasické ohybové a šmykové napätia doplnené membránovými zložkami napätosti.

Vnútorne sily, resp. napätia určené na základe Kirchhoffovej teórie malých deformácií sú obyčajne vyššie pre konštrukcie s väčšími rozponami, ako napätia vypočítané Karmánovou teóriou veľkých deformácií. Vznik membránových napätí je totiž obyčajne spojený so zmenšením napätí od ohybu. Pri použití teórie malých deformácií sa membránový efekt zanedbáva, čo vedie ku návrhu sklenených elementov s väčšími hrúbkami.

V praxi je pri návrhu sklenených prvkov možné používať množstvo tabuliek a grafov pre rôzne rozmery, zaťaženie a štandardné podoprenie prvkov. Je nutné si však uvedomiť, že takéto výsledky ponúkajú len približné určenie vnútorných síl a napätí, pretože v skle, ako neplastickom materiále, vznikajú v okolí otvorov a bodových podpier lokálne koncentrácie napätí, ktoré sú niekedy rovné 2,5 až 3,0 násobku medziľahlých napätí.

4.1 Modelovanie sklených panelov

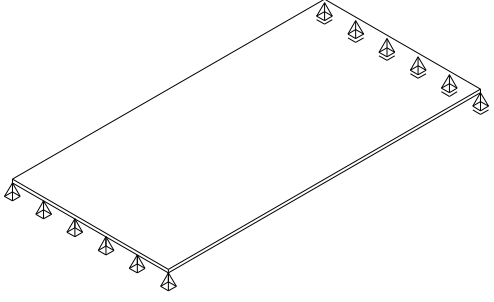
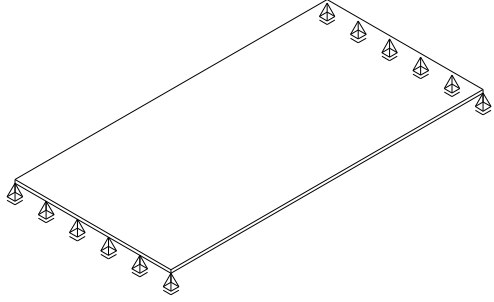
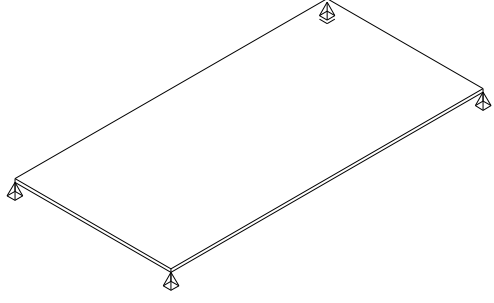
Uvedená výpočtová úloha sa zaoberá modelovaním sklených tabúľ Metódou konečných prvkov. Výpočet je zameraný na modelovanie vplyvu rôznych okrajových podmienok podopretia tabule na jej deformačné a napätostné správanie. Na jednoduchých príkladoch je tiež badateľný značný rozdiel vo výsledkoch dosiahnutých na základe lineárneho a nelineárneho výpočtu.

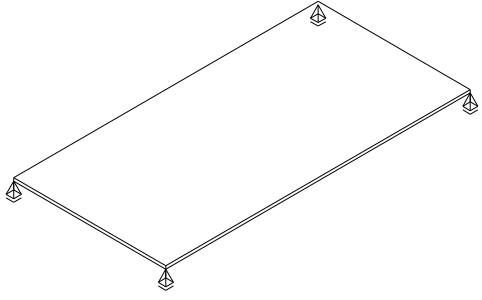
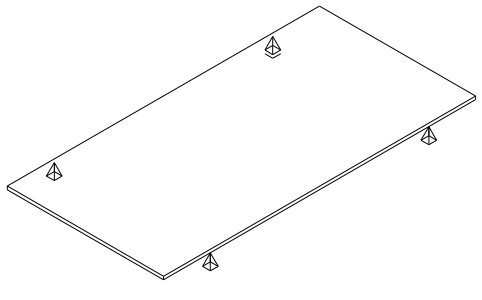
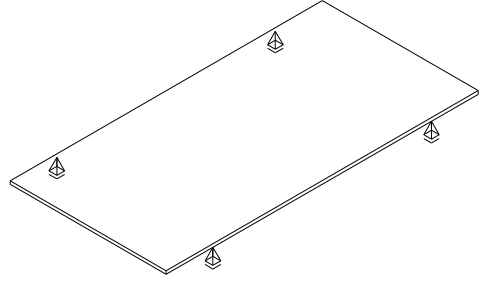


Obr.1: Geometria a zaťaženie tabule

Na výpočet bol použitý výpočtový program firmy SCIA – Nexis 32, verzia 3.60.15, lineárny výpočet a nelineárny výpočet (geometrická nelinearita).

Tabuľka 1: Zhrnutie a porovnanie výsledkov výpočtu MKP

Model konštrukcie	Výpočet	U_z [mm]	R_x [kN]	R_y [kN]	R_z [kN]
	lineárny	366,35	0,00	0,00	1,80
	nelineárny	324,29	0,00	0,00	1,76
	Doska prosto líniovo podopretá.				
	lineárny	366,35	0,00	0,00	1,80
	nelineárny	21,99	68,83	0,00	1,77
	Doska neposuvne líniovo podopretá.				
	lineárny	377,88	0,00	0,00	1,35
	nelineárny	277,02	0,00	0,00	1,19
	Doska prosto bodovo podopretá.				

	lineárny	377,88	0,00	0,00	1,35
	nelineárny	30,06	37,66	25,60	1,34
	Doska neposuvne bodovo podopretá.				
	lineárny	30,87	0,00	0,00	1,35
	nelineárny	30,08	0,00	0,00	1,25
	Doska s previslými koncami prasto bodovo podopretá.				
	lineárny	30,87	0,00	0,00	1,35
	nelineárny	14,32	9,56	25,24	1,30
	Doska s previslými koncami neposuvne bodovo podopretá.				

LITERATÚRA

- [1] Sedlacek, G., Blank, K., Laufs, W., Gúsgen, J.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn, Berlin 1999
- [2] Schittich, Ch., Staib, G., Balkow, D., Schuller, M., Sobek, W.: Glass Construction Manual, Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel 1999
- [3] Nijssse, R.: Tragendes Glas, Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel 2003
- [4] Eekhout, M.: Research in the structural use of glass, The Cost 13 Conference on Dual Glass Facades, Graz 2003
- [5] Kallioniemi, J.: Joints and fastening in steel – glass facades (Master's Thesis), Helsinki University of Technology, Helsinki 1999
- [6] Melcher, J.: Problems with design and experimental evaluation of glass facades construction, Sustainable Building & Solar Energy, 2001
- [7] Brodniansky, J., Ároch, R.: Teoretické a experimetálne overenie strešných sklených tabúl z lepeného skla (ZoD č. 04 – 122 – 00), Stavebná Fakulta STU Bratislava, Bratislava 2000
- [8] Brodniansky, J.: Konštrukcie z ocele a skla, príspevok v rámci projektu Vega č. 1/7139/20, Bratislava 2001