

SKLO AKO KONŠTRUKČNÝ MATERIÁL

Sklo ako konštrukčný materiál nesporne ponúka veľa atraktívnych vlastností. Popri jeho vynikajúcich optických vlastnostiach, chemickej odolnosti či takmer 100 % recyklovateľnosti základnej sklenej suroviny má však ako konštrukčný materiál niekoľko zásadných nevýhod.

Ing. Miloš Slivanský, PhD.
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Recenzent: Ing. arch. Eva Vojteková, PhD.
Fakulta architektúry, STU v Bratislave
Foto: archív autora

Odpoveď na otázku, prečo sa sklo využíva ako konštrukčný materiál napriek skutočnosti, že nemá vhodné mechanické vlastnosti, je jednoduchá – cena. Sklo je totiž priemyselne vyrábaný materiál s nízkymi ekonomickými nákladmi na vstupné suroviny a v porovnaní s umelými hmotami je dokonca najlacnejší úplne transparentný konštrukčný materiál vôbec.

Sklo v minulosti a dnes

Tradičné využitie skla v stavebníctve, také ako ho poznáme z minulosti – zasklievanie do rámov okien, dverí a pod., zaznamenalo za posledných 20 rokov výrazný pokrok a aplikácia sklenených prvkov sa stala súčasťou samonosných transparentných konštrukcií alebo ich častí. V súčasnosti je najviac využívaným technologickým procesom výroby plochého skla plavenie (z angl. floating process, float glass). Výsledkom plavenia sú sklené tabule s hrúbkou v rozmedzí 2 – 25 mm. Plavením sa vyrába až 90 % celosvetovej produkcie plochého skla. V stavebníctve sa bežne používa tzv. trojzložkové sodno-vápenaté kremičité sklo (SLSG – Soda lime silica glass). V špecifických prípadoch (požiarna sklo a sklo odolné proti vysokej teplote) sa používa bóro-kremičité sklo (BSG – Borosilicate glass). Chemické zloženie skla sa vyjadruje percentuálnym hmotnostným podielom jednotlivých zložiek, pretože sklo nemá chemický vzorec.

Pevnosť skla

Pri porovnaní skla s inými materiálmi sklo vykazuje amorfnú izotropiu. Pri zaťažení sa správa takmer dokonale elasticky,

nevznikajú žiadne plastické deformácie (pretože nemá kryštalickú štruktúru) a porušuje sa krehkým lomom. Teoretická pevnosť skla je definovaná odolnosťou molekulových väzieb medzi kremíkom a kyslíkom. Praktická pevnosť skla je však rádovo nižšia (až 500-krát) a v prevažnej miere je ovplyvnená mechanickým poškodením povrchu skleneného prvku mikrotrhlinami alebo škrabancami. V priebehu celej doby životnosti konštrukcie sa poškodenie skla kumuluje. Pri namáhaní povrchu skleneného prvku ťahovými napätiami dochádza ku značnej koncentrácii napätí v mieste koreňa trhliny. Po prekročení pevnosti medzimolekulových väzieb sa trhliny stávajú nestabilné a ich rozvoj vedie ku krehkému

Sklo je totiž priemyselne vyrábaný materiál s nízkymi ekonomickými nákladmi

lomu skleneného prvku. Pri namáhaní tlakovým napätím k rozvoju trhlín nedochádza a preto je pevnosť skla v tlaku niekoľkonásobne vyššia ako pevnosť v ťahu. Pri návrhu sklenených prvkov je však pevnosť v tlaku prakticky nezaujímavá, pretože sklo sa vo väčšine prípadov porušuje ťahovými napätiami (napr. ohyb prvku pri strate stability, priečny ťah v mieste lokálneho zaťaženia a pod.). Vplyv hĺbky trhliny na pevnosť skla v ťahu približne ilustruje obr. 3.

Obr. 1 Súčasné trendy vo využívaní skla



Kalenie skla

Praktickú pevnosť skla v ťahu je možné zvýšiť tepelnou úpravou, ktorá sa nazýva kalenie. Mechanicky opracované tabule skla sa ohrejú na teplotu 600 – 700 °C a následne sa prudko ochladia. Tak vzniknú povrchové tlakové napätia a ťahové napätia vo vnútri sklenej tabule. Pokiaľ je ťahové napätie na povrchu skleneného prvku od vonkajšieho zaťaženia menšie ako reziduálne tlakové napätie od kalenia, nedochádza k rozvoju trhlin a prakticky sa teda zvýši odolnosť skla pri namáhaní ťahom. Dôležité je tiež poznamenať, že vplyvom reziduálnych napätí od kalenia sa pri poškodení tabuľa rozpadne na množstvo drobných kúskov a preto kalené sklo nie je možné mechanicky opracovávať (napr. vrtať otvory alebo rezať). Podľa intenzity zakalenia sa rozlišuje sklo úplne kalené (z angl. Fully Tempered Glass = FTG) a sklo čiastočne kalené (z ang. Heat Strengthened Glass = HSG). Vzhľadom na tepelnú úpravu skiel a určitý obsah nečistôt v sklenej tavenine dochádza po zabudovaní skla v niektorých prípadoch k javu, ktorý sa označuje ako „spontánne rozbitie skla“. Riziko spontánneho rozbitia je možné čiastočne eliminovať skúšobnou metódou, ktorá sa nazýva Heat Soak Test (ozn. HST). Typické príklady porušenia pre rôzne typy skiel ilustruje obr. 5.

Zlepšenie vlastností skla

Pri použití skla ako konštrukčného materiálu sa stretávame s niekoľkými špecifickými problémami. Nosné prvky sú veľmi citlivé na koncentrácie napätí a porušujú sa bez toho, aby bolo možné poruchu prvku predvídať. Podstata krehkého pôsobenia je preto rozhodujúca pre návrh sklenených prvkov a ich pripojov. Rovnako je zaujímavé aj riešenie otázky zabezpečenia zvyškovej odolnosti porušeného skleneného prvku, t. j. zabezpečiť odlišný charakter totálneho porušenia ako je porušenie spôsobené krehkým lomom. Sklo nemá vlastnú schopnosť porušovať sa plasticky a zvyškovú odolnosť je možné teda docíliť iba kombináciou s inými (plastickými) materiálmi. Najčastejšie sa v praxi stretávame s tzv. vrstveným (bezpečnostným) sklom. Vrstvené sklo vzniká spájaním skiel prostredníctvom nesklenej, obvykle priehľadnej vrstvy, čím sa dosiahne výrazné zlepšenie vlastností v oblasti zvyškovej odolnosti porušeného skleneného prvku. Úlomky skla sa po porušení tabule neoddeľujú, ale vytvárajú celok. Zo statického hľadiska je nezanedbateľnou výhodou takisto nárast odolnosti skleneného prvku vzájomným spolupôsobením jednotlivých tabúľ. Najčastejšie používaným materiálom pre výrobu medzivrstvy je polyvinyl butyral (ďalej PVB). V skladbe vrstveného skla sa bežne používajú dve alebo štyri fólie pre jednu PVB medzivrs-

Obr. 2 Súčasné trendy vo využívaní skla



tvu s hrúbkami 0,76 alebo 1,52 mm. Vrstvené sklo je schopné naplniť požiadavky určitého stupňa zvyškovej odolnosti spolupôsobením PVB fólie s úlomkami skla, ale len pri splnení určitých okrajových podmienok (podopretie a typ skleneného panela). Dostatočná ťažnosť a ťahová pevnosť PVB fólie umožňujú, aby totálne poškodený sklenený panel fungoval ako membrána bez ohybovej tuhosti. Ak je poškodenie sklenej časti menej rozsiahle, je možné dokonca uvažovať s prenosom zaťaženia ohybovou tuhosťou zloženého systému (obr. 6). Na princípe zloženého systému sú založené aj tzv. vystužené, či kompozitné

prierezy. V kombinácii so skleneným prvkom sa najčastejšie používajú kovové výstužné pásy alebo karbónové vlákna.

Posúdenie odolnosti skla

Pre posúdenie odolnosti sklenených prvkov existuje v súčasnosti viacero metód. Vzhľadom na používanú metódu medzných stavov a parciálnych súčiniteľov spoľahlivosti sa javí ako najkompatibilnejšia predbežná európska norma prEN 13474. Spracované sú zatiaľ dve časti, ktoré sa venujú posúdeniu odolnosti plošných prvkov, prEN 13474-1:1999 a prEN 13474-2:2000. Využíva princípy lomovej mechaniky v kombinácii so

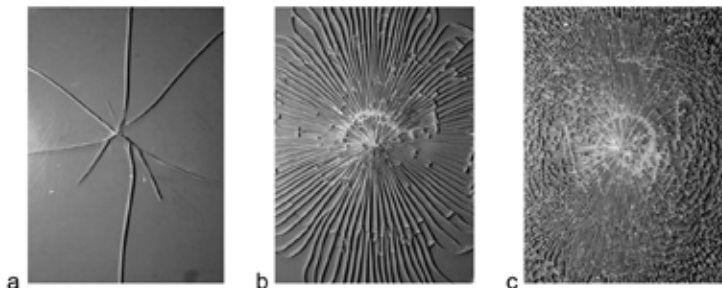
Obr. 3 Vplyv hĺbky trhliny na pevnosť skla



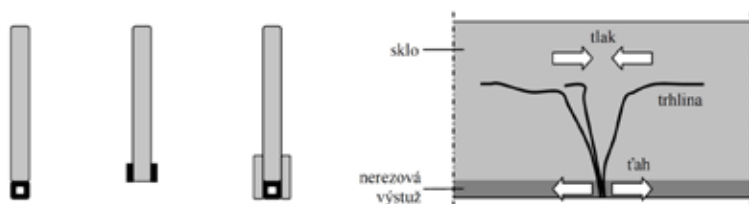
Obr. 4 Princíp zvýšenia ťahovej pevnosti skla kalením [1]



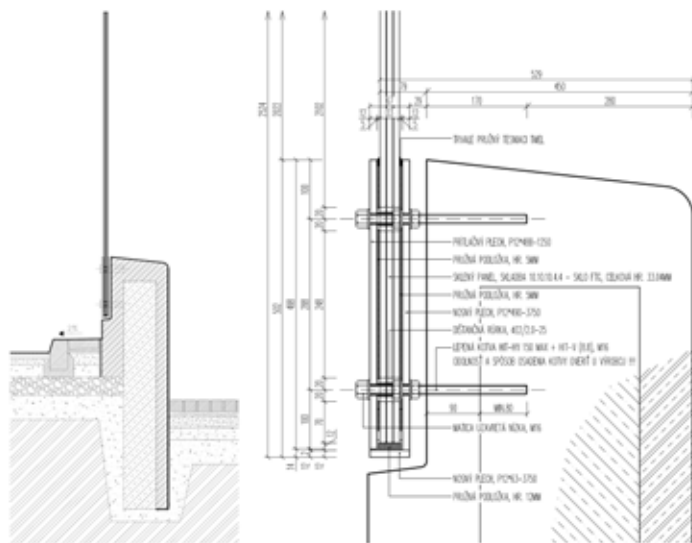
Obr. 5 Porovnanie porušenia rôznych typov skla: a) nezakalené sklo, b) čiastočne kalené sklo, c) kalené sklo



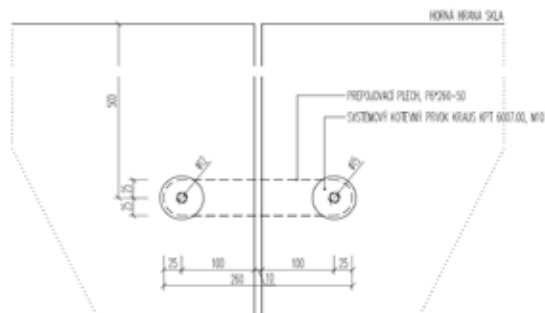
Obr. 6 Vystužené sklené nosníky [4]



Obr. 7 Ochranná stena, celkový rez a detaily kotvenia



Obr. 8 Detail prepojenia panelov



štatistickým rozdelením pravdepodobnosti, čo umožňuje zohľadniť špecifické podmienky, ktoré ovplyvňujú návrh a životnosť sklenených prvkov. V zmysle normy prEN 13474 je možné podmienky pôsobenia skleneného prvku rozdeliť na:

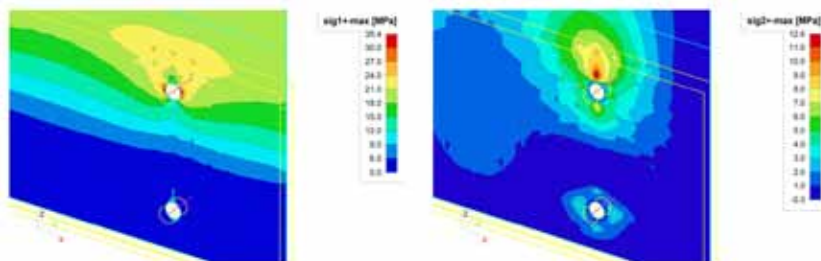
- vplyv rozloženia napätia na povrchu skleneného prvku,
- vplyv dodatočnej úpravy skla (kalenie),
- vplyv dĺžky trvania zaťaženia,
- vplyv veľkosti posudzovaného prvku.

Z praktického hľadiska je najväčšou nevýhodou, že v uvedenej predbežnej norme nie je rozpracované navrhovanie iných ako doskových prvkov. Absenciu dostatočného teoretického pozadia musí preto zatiaľ nahrádzať experimentálny a teoretický výskum skutočných konštrukcií.

Konkrétne príklad sklenej konštrukcie

Na záver tohto príspevku je uvedené jedno konkrétne riešenie sklenej konštrukcie ochrannej steny. Projekt ochrannej steny na Staromestskej ulici v Bratislave bol vypracovaný v spolupráci s architektonickým ateliérom TOTALSTUDIO s. r. o., jeho autorom a hlavným projektantom je Mgr. art. Tomáš Tokarčík. Ochranná stena oddeľuje pomerne frekventovanú cestnú komunikáciu od susedného historického objektu – Dóm Sv. Martina a chodníka pre chodcov. Hlavným zámerom výstavby tejto steny je preto plánované zvýšenie ochrany príľahlej fasády Dómu Sv. Martina od vplyvu frekventovanej dopravy v tesnej blízkosti. Celková rozvinutá dĺžka konštrukcie je približne 44 m. Výška ochrannej steny meraná od chodníka pre chodcov je približne 3,2 m. Sklené panely sú kotvené do čela jestvujúceho železobetónového múru, ktorý počas výstavby ochrannej steny prejde rekonštrukciou a zosilnením. Pri návrhu sklenených panelov boli zohľadnené nielen všetky špecifické požiadavky návrhu sklenených prvkov, ako boli spomenuté v predchádzajúcich častiach príspevku, ale takisto aj požiadavky plynúce z účelu konštrukcie a súvisiacich technických noriem. Keďže ochranná stena nebola objednávatelom klasifikovaná ako „zariadenie na zníženie hluku z cestnej dopravy, norma STN EN 1794-1 a STN EN 1794-2“, vychádzalo sa z požiadaviek na zaťaženie a mechanickú odolnosť uvedených v normách STN EN 1990 Zásady navrhovania konštrukcií, STN EN 1991-1-4 Zaťaženia konštrukcií, Všeobecné zaťaženia, Zaťaženie vetrom, STN EN 1993-1-1 Navrhovanie ocelových konštrukcií, Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy, prEN 13474-1:1999 Glass in building, Design of glass panes, Part 1: General basis of design a prEN 13474-2:2000 Glass in building, Design of glass panes, Part 2: Design for uniformly distributed loads. Typický segment je panel obdĺžnikového tvaru s rozmermi 1 250 x 2 500 mm. Sklený panel tvorí vrstvené úplne kalené

Obr. 9 Normálové napätia na sklenom paneli, detail



sklo so skladbou 3 x 10 mm. Jednotlivé tabule skla sú spájané PVB fóliou hrúbky 1,52 mm. Do čela železobetónového múru je sklený panel kotvený prostredníctvom oceľového zasklievacieho profilu. Vzhľadom na rozmery a podopretie, sklené panely staticky pôsobia ako jednosmerne nosná konzolová doska votknutá v mieste zasklievacieho profilu. Zasklievací profil pozostáva z 2 častí – pevná časť v tvare nerovnoramenného L profilu s úložným nosom a prítlačná priama časť. Obidve časti budú vyhotovené z plechu hrúbky 12 mm. Zasklievací profil bude kotvený do čela železobetónového múru prostredníctvom lepených kotiev M16 v počte 2+2 ks na jeden typický segment (spolu 4 ks). Poloha skleného panelu a prenos zaťažovacích účinkov do zasklievacieho profilu je realizovaný cez priebežné kotevné skrutky, prítlačný plech a diaščanú podložku kontrolovaným dotiahnutím koncovkej matice. Zvyšková odolnosť sklených panelov, resp. stabilita konštrukcie pri totálnom porušení skleného panelu vplyvom mimoriadneho zaťaženia (napr. náraz automobilu) je zabezpečená prepojením susedných panelov pri hornom okraji systémovým prvkom a oceľovou príložkou (obr. 7). Pri totálnom

porušení niektorého segmentu sa predpokladá jeho „vyvesenie“ na susedné nepoškodené polia a dôjde tak k minimalizovaniu rizika vzhľadom na bezpečnosť osôb v okolí ochrannej steny. Pre analýzu konštrukcie pomocou výpočtu MKP bol zostavený priestorový dosko-stenový model. Spolupôsobenie medzi sklom a oceľovým zasklievacím profilom bolo modelované nelineárnymi kontaktnými prvkami. Pri statickej analýze bola vykonaná optimalizácia hrúbky skleného panelu a hrúbky prítlačných plechov zasklievacieho profilu. Bolo zostavených viacero výpočtových modelov s rozdielnymi hrúbkami materiálu a rozdielnou geometriou, či počtom kotevných prvkov. Pre návrh hrúbky sklenených panelov boli pre všetky prípady rozhodujúce špičky normálových napätí v okolí otvorov pre kotevné skrutky (obr. 9). Bezrámové riešenie transparentnej časti ochrannej steny je návrh, ktorý zasahuje do jestvujúceho výrazu riešenej pamiatkovej lokality (Bratislava – Staré Mesto) veľmi citlivo, ale súčasne sleduje najmodernejšie trendy v riešení podobných konštrukcií. Realizácia ochrannej steny je plánovaná pravdepodobne na rok 2014, v súčasnej dobe prebieha výber dodávateľa.

Literatúra:

- [1] Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008), *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich 2008
- [2] Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008), *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich 2008
- [3] Kott, A., Vogel, T. (2003), *Remaining Structural Capacity of Broken Laminated Safety Glass*, *Glass Processing Days 2003*
- [4] Louter, C. (2007), *Adhesively bonded reinforced glass beams*, *HERON Vol. 52, No. 1/2, 2007*



Ing. Miloš Slivanský, PhD.

Je absolvent Stavebnej fakulty STU v Bratislave, člen SKSI a IASS. V súčasnosti pôsobí ako odborný asistent na Katedre kovových a drevených konštrukcií. Venuje sa navrhovaniu a diagnostike nosných konštrukcií pozemných stavieb, je aktívny v oblasti výskumu moderných nosných konštrukcií..

ICT STAVEBNÉ KONŠTRUKCIE

Nerez – Oceľ – Sklo

Návrh, dizajn, výroba a montáž konštrukcií a prvkov pre stavebníctvo a modernú architektúru

ICT industrial construction technologies s.r.o.
 Robotnícka 2192
 017 01 Považská Bystrica

Info: +421 911 540 140
 info@ict-slovakia.sk
 www.ict-slovakia.sk