

Problematika navrhovania nosných konštrukcií zo skla

Miloš Slivanský, Ján Brodniansky

Katedra kovových a drevených konštrukcií
Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
e-mail: slivansky@svf.stuba.sk, brodo@svf.stuba.sk

Abstrakt

The objective of this paper is to study some specific problems concerning structural design of glass structures. Application of fracture mechanics in the determination of the strength of glass and the methods presented in the preparatory European design code for glass structures are introduced.

Kľúčové slová: sklo, pevnosť skla, lomová mechanika, rozvoj trhliny

1 Úvod

V súčasnej dobe sa používanie skla nesmierne rozšírilo a spopularizovalo. Využitie skla sa už neobmedzuje len na funkciu výplne otvorov okien, dverí, prípadne konštrukciu presklených fasád. Sklo ako moderný konštrukčný materiál sa postupne začína uplatňovať v širokom spektre ostatných „bežných“ konštrukčných materiálov, medzi ktoré patria hlavne oceľ, hliník a drevo. Tieto dôvody vedú k skutočnosti, že návrh sklenených nosných konštrukcií a ich častí sa nutne stáva úlohou stavebných inžinierov, statikov. Tu však narážame na hlavný problém, ktorým je neexistencia komplexných technických noriem alebo príručiek pre návrh sklenených prvkov a konštrukcií.

Problematiku zjednotenia kritérií posudzovania sklenených konštrukcií by mal v blízkej budúcnosti vyriešiť príchod pripravovanej Európskej normy. Naďalej však v problematike návrhu sklenených konštrukcií zostávajú oblasti, ktoré nutne vyžadujú ďalší vedecký výskum. Spôsob chovania sa a porušenia skla je v niektorých prípadoch značne odlišný od charakteru správania sa ostatných, dnes už bežných materiálov.

2 Sklo – materiál

Sklo je beztvárý, amorfný materiál, stuhnutý roztok, resp. tavenina. Molekuly sú usporiadané v náhodných reťazcoch a nevytvárajú kryštalickú mriežku. Vďaka tejto vlastnosti je sklo priehľadné. Najčastejšie sa v stavebníctve používa kremičité sklo. Pozostáva z nepravidelnej trojrozmernej siete elementov kremíka (Si) a kyslíka (O). Podiel týchto zložiek je 69 až 74%.

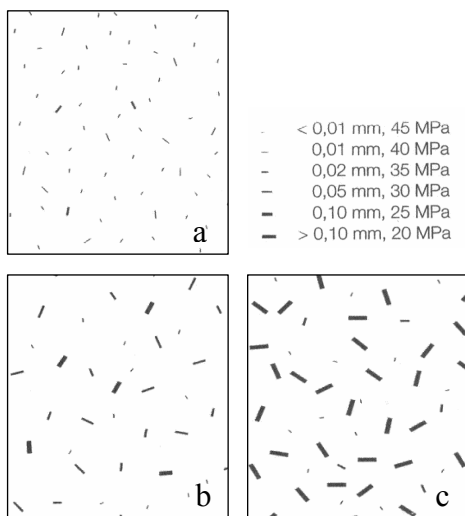
3 Bezpečnosť a navrhovanie

Navrhovanie sklenených prvkov a konštrukcií vyžaduje podrobné znalosti mechanických vlastností tohto pevného, ale zároveň veľmi krehkého materiálu. Sklo sa chová pri zatažení takmer úplne elasticky. Nevykazuje žiadne plastické rezervy a vo väčšine prípadov sú pre návrh sklenených prvkov rozhodujúce koncentrácie napätí, ktoré vznikajú v okolí trhlín, škrabancov alebo rýh na povrchu sklenených prvkov.

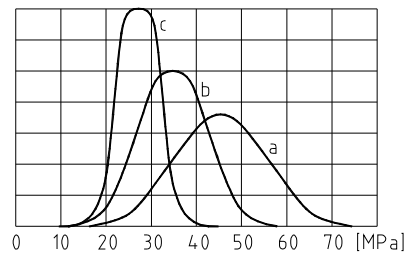
3.1 Pevnosť, mikroštruktúra a lomové vlastnosti skla

Návrhová pevnosť skla, ako konštrukčného materiálu, nie je čisto materiálová vlastnosť. Je to parameter závislý od množstva premenných. Na pevnosť skla vplýva hlavne od stupeň poškodenia povrchu skleneného elementu, druh prostredia a trvanie zaťaženia. Vplyv hĺbky trhliny na pevnosť skla ilustrujú obrázky 1 až 3. Z obrázkov je zjavné, že veľkosť a rozloženie mikroskopických trhlín hrá pritom kľúčovú úlohu – pravdepodobnosť kolapsu sklenej tabule s plochou 10 m^2 je 10 – krát vyššia ako tabule vystavenej rovnakým podmienkam, ale s plochou 1 m^2 .

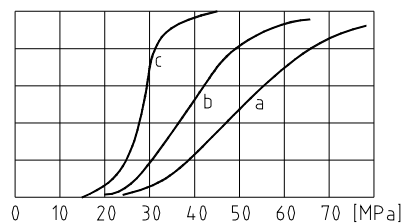
Teoretická pevnosť skla je definovaná odolnosťou molekulových väzieb medzi kremíkom a kyslíkom. Pri kremičitom skle je táto teoretická pevnosť $\sigma_{coh} = 20\,000 \text{ MPa}$, čo je hodnota približne 500 – krát vyššia ako praktická pevnosť skla v ťahu.



Obr.1: Stupeň poškodenia povrchu skla



Obr.2: Krivky rozptylu pevnosti



Obr.3: Kumulatívne krivky pevnosti

Už sklenené tabule priamo z výroby vykazujú veľký rozptyl pevností. Povrch skla je v tomto prípade poškodený mikroskopickými povrchovými trhlínami s hĺbkou $a < 10 \mu\text{m}$. V priebehu skladovania, zabudovania a vlastne počas celej doby životnosti posudzovanej konštrukcie, sa poškodenie skla kumuluje a pravdepodobnosť porušenia skleneného prvku neustále narastá. Stupeň poškodenia povrchu skla v štádiu užívania konštrukcie zodpovedá mikrotrhlínám s hĺbkou $a = 100 \mu\text{m}$. V prípade namáhania povrchu skleneného prvku ťahovými napätiami, dochádza ku výraznej koncentrácii týchto napätí v miestach počiatku mikrotrhliny. Pri

prekročení mezimolekulej pevnosti skla σ_{coh} , dochádza ku porušeniu jednotlivých väzieb a následnému nárastu hĺbky trhliny. Jednotlivé trhliny sa stávajú nestabilné a ich ďalší rozvoj je veľmi rapídny. Prudký nárast rozsahu a množstva trhlín okamžite vedie ku krehkému lomu skleneného elementu.

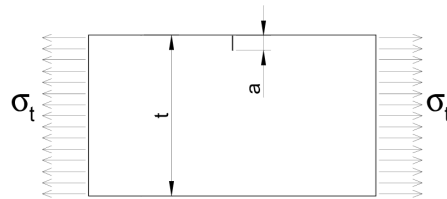
3.2 Napätie v okolí trhliny

Základy teórie lomovej mechaniky, resp. kritéria zlomenia boli odvodené Griffithom v roku 1920. Vzťah medzi faktorom intenzity napätia K_I , veľkosťou trhliny a , nominálnym ťahovým napätím σ_t (určeným v prípade materiálu bez trhlín) a parametrom proporcionality Y je daný vzťahom (1).

$$K_I = Y \cdot \sigma_t \cdot \sqrt{a} \quad (1)$$

Hodnota parametru proporcionality Y je závislá na tvare trhliny, na veľkosti a polohe trhliny vzhľadom na rozmery a namáhanie skleneného prvku. Hodnoty parametru Y sú pre základné prípady získané experimentálne a spracované v tabuľkovej forme.

Často používaným modelom je model uvedený na obrázku 4. Predpokladá namáhanie prvku o hrúbke t konštantným ťahovým napätím σ_t , pričom trhlina s hĺbkou a je na povrchu prvku. Veľkosť trhliny je vzhľadom na hrúbku prvku zanedbateľná ($2a \ll t$).



Obr.4: Výpočtový model

Ak dosadíme do vzťahu (1) za faktor intenzity napätia K_I faktor intenzity kritického napätia K_{IC} , môžeme vyjadriť napätie pri porušení prvku σ_f pre danú hĺbku trhliny a a daný faktor proporcionality Y vzťahom (2).

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{Y \cdot \sqrt{a}} \quad (2)$$

Hodnoty faktoru intenzity kritického napätia K_{IC} pre kremičité sklo boli experimentálne overované. Získané hodnoty sa pohybujú v intervale $K_{IC} = (0,72...0,82)$ MPa.m^{1/2}. Bežne používaná hodnota je $K_{IC} = 0,75$ MPa.m^{1/2}.

Dosadením do vzťahu (2) za $K_{IC} = 0,75$ MPa.m^{1/2} a $Y = 1,99$ (pre prípad podľa obrázku 4) dostaneme vzťah pre výpočet napätia pri porušení prvku σ_f , podľa (3).

$$\sigma_f = \frac{0,38}{\sqrt{a}} \cdot \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \quad (3)$$

Vo vzťahoch (1) až (3) bola trhlina uvažovaná ako „ostrá“, teda polomer zaoblenia trhliny na jej počiatku bol považovaný za rovný nule. Existuje však aj výpočtový model, kedy považujeme „koreň“ trhliny za oblý. V tomto prípade má polomer zaoblenia počiatku trhliny ρ výrazný vplyv na hodnotu napätia pri porušení prvku σ_f , ktoré je dané vzťahom (4).

$$\sigma_f = \sigma_{coh} \cdot \frac{\sqrt{\rho}}{2 \cdot \sqrt{a}} \quad (4)$$

Zo vzťahu (4) je zrejmé, že hodnota napätia pri porušení prvku σ_f klesá vzhľadom na zmenšenie polomeru zaoblenia počiatku trhliny ρ . Pri kombinácii oboch modelov ostrej a tupej trhliny, dosadením do vzťahov (2) a (4), dostaneme minimálny polomer nestabilnej trhliny ρ_{min} , podľa vzťahu (5). Vzťah (2) bol uvažovaný ako nutná podmienka a vzťah (4) ako postačujúca podmienka pre porušenie posudzovaného skleneného prvku.

$$\rho_{min} = \left(\frac{2 \cdot K_{IC}}{Y \cdot \sigma_{coh}} \right)^2 \quad (5)$$

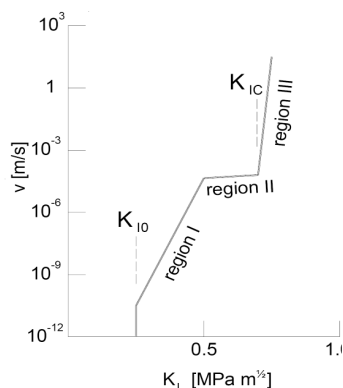
Ak do vzťahu (5) dosadíme vyššie uvedené hodnoty jednotlivých parametrov a premenných, vypočítame hodnotu $\rho_{min} = 1,4$ nm, čo je približne 4 – násobok dĺžky jednej väzby Si–O–Si.

3.3 Mechanizmus rozvoja trhliny

Napriek tomu, že sklo je všeobecne považované za materiál s vysokou chemickou odolnosťou, dochádza ku korózii povrchu sklenených prvkov v prostredí s permanentnou okolitou vlhkosťou. Vplyv korózie je ešte výraznejší v prostredí, kde dochádza ku kontaktu skla s mokrym betónom alebo extrémne alkalickými čistiacimi prostriedkami. Tento úkaz sa zvyčajne nazýva statická únava skla. Dochádza ku fyzikálno – chemickej reakcii medzi molekulami vody H_2O a reťazcom Si–O–Si. Úplné narušenie reťazca Si–O–Si a jeho nahradenie dvomi väzbami Si–O–H nazývame separácia, resp. difúzna hranica. Statická únava je často príčinou „oneskoreného“ porušenia sklenených prvkov dlhodobo namáhaných ťahovými napätiami.

Proces porušenia skleneného prvku môžeme rozdeliť do niekoľkých etáp:

- Povrch každého skleneného prvku je poškodený mikrotrhlinami, ktoré vznikli v procese výroby, spracovania alebo zabudovania posudzovaného prvku.
- Pri zaťažení skleneného prvku ťahovým napätím (kolmo na uvažovanú trhlínu) dochádza ku rastu trhliny vplyvom statickej únavy skla. K rozvoju trhliny však musí byť splnená podmienka $K_I > K_{I0}$. Parameter K_{I0} nazývame prahový faktor intenzity napätia a jeho hodnota sa v závislosti od druhu prostredia pohybuje v intervale $K_{I0} = (0,2 \dots 0,3)$. K_{IC} . Minimálna rýchlosť rozvoja trhliny je $v_{min} = 10^{-15}$ m/s. Táto rýchlosť sa postupne zvyšuje s nárastom faktora intenzity napätia K_I . Subkritický rozvoj trhliny pokračuje až pokiaľ nie je dosiahnutá difúzna hranica. V tejto oblasti dosahuje rýchlosť rozvoja trhliny za bežných podmienok hodnoty v intervale $v = (10^{-10} \dots 10^{-2})$ m/s.



Obr.5: Mechanizmus rozvoja trhliny

- Po dosiahnutí difúznej hranice dochádza ku ďalšiemu nárastu hodnoty faktora intenzity napätia K_I , avšak pri konštantnej rýchlosti rozvoja trhliny.
 - V momente, kedy faktor intenzity napätia K_I dosiahne kritickú hodnotu $K_I = K_{IC}$, rýchlosť rozvoja trhliny začína narastať veľmi prudko, čo vedie ku náhlemu porušeniu skleneného prvku. Mechanizmus rozvoja trhliny v sklenom prvku podrobne ilustruje obrázok 5.
- V prípade, že úroveň namáhania skleneného prvku ťahovými napätiami je vysoká, alebo počiatková hĺbka trhliny je príliš veľká, môže faktor intenzity napätia K_I dosiahnuť kritickú hodnotu K_{IC} v okamihu hneď po zaťažení konštrukcie a teda nedôjde ku postupnému, subkritickému rozvoju trhliny. Pre praktické účely je však pre výpočet pevnosti skleneného prvku z hľadiska dlhodobého zaťaženia zaujímavá oblasť subkritického rozvoja trhliny. Rýchlosť rozvoja trhliny v oblasti subkritického pôsobenia skleneného prvku je možné približne určiť podľa vzťahu (6). Vzťah je platný pre rýchlosť rozvoja trhliny $v \leq 10^{-5}$ m/s.

$$v = v_0 \cdot (K_I)^N \quad (6)$$

Hodnoty parametrov v_0 a N sa získavajú na základe experimentálnych skúšok a sú to hodnoty závislé od vlastností okolitého prostredia (relatívna vlhkosť, teplota) a druhu skla. Pre plavené kremičité sklo v prostredí s teplotou 20°C a 50% pomernou vlhkosťou sú tieto parametre stanovené hodnotami $v_0 = 0,45$ a $N = 18$.

Základný vzťah medzi napätím pôsobiacim v čase a nárastom hĺbky trhliny je definovaný podľa rovnice (7).

$$\int_0^t \sigma^N(t) dt = \frac{2}{(N-2) \cdot v_0 \cdot Y^N \cdot a_0^{(N-2)/2}} \cdot \left[1 - \left(\frac{a_0}{a(t)} \right)^{(N-2)/2} \right] \quad (7)$$

Pre prípad konštantného napätia v čase $\sigma(t) = \sigma_0$ bude mať vzťah pre výpočet hĺbky trhliny a v čase t tvar podľa (8), pričom a_0 je počiatková hĺbka trhliny.

$$a(t) = \left[\frac{1}{\frac{1}{a_0^{(N-2)/2}} - \frac{(N-2)}{2} \cdot v_0 \cdot Y^N \cdot \sigma_0^N \cdot t} \right]^{\frac{2}{N-2}} \quad (8)$$

Pre výpočet času porušenia skleneného prvku t_f môžeme použiť vzťah (9), ktorý bol odvodený z rovnice (7). Prakticky platí $a_0 \ll a_f$, pričom a_f je hĺbka trhliny v okamihu porušenia vzorky a vo vzťahu (7) je výraz v hranatých zátvorkách približne rovný jednej.

$$t_f = \frac{2}{(N-2) \cdot v_0 \cdot \sigma_0^N \cdot Y^N \cdot a_0^{(N-2)/2}} \quad (9)$$

3.4 Charakteristická a návrhová pevnosť skla

V predbežnej Európskej norme, je uvažovaná ako charakteristická hodnota pevnosti plaveného skla hodnota $f_{g,k} = 45$ MPa. Táto hodnota zodpovedá trvaniu statického zaťaženia 1,5 s. Zavedením parciálneho súčiniteľa spoľahlivosti materiálu $\gamma_m = 1,8$ pre medzný stav únosnosti, dostaneme hodnotu pravdepodobnosti porušenia $p_f = 5 \cdot 10^{-4}$. Na základe vzťahu (2), dosadením parametrov $K_{IC} = 0,75$ MPa.m^{1/2} a $Y = 1,99$, je možné vypočítať, že 1,5 – sekundová návrhová pevnosť skla $f_{g,d} = 25$ MPa zodpovedá trhline s hĺbkou $a = 0,23$ mm.

Návrhová pevnosť plaveného skla $f_{g,d}$ sa na základe predbežnej Európskej normy stanoví podľa vzťahu (10).

$$f_{g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_m \cdot k_A} \cdot \gamma_n \quad (10)$$

Parametre k_{mod} a k_A zohľadňujú dĺžku trvania zaťaženia a veľkosť posudzovaného skleneného prvku. Koeficient γ_n je parameter, ktorého hodnotu by mala stanoviť národná príloha normy ($\gamma_n \sim 1,0$).

Ako bolo už spomenuté, prakticky najväčší význam pre stanovenie pevnosti skla, má intenzita a rozsah porušenia povrchu skleneného prvku. Preto je pravdepodobnosť sformovania kritickej trhliny pri prvku s väčšou plochou vyššia ako pri prvku v rovnakých podmienkach, ale s plochou menšou. Faktor veľkosti posudzovaného prvku k_A vypočítame podľa vzťahu (11).

$$k_A = A^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

Vo vzťahu (11) parameter A reprezentuje plochu skleneného prvku a parameter β je tvarový koeficient dvojparametrickej Weibullovej funkcie, ktorý reprezentuje spodnú hranicu rozptylu pevnosti skla. Pre nepoškodené sklo má tento parameter hodnotu $\beta = (7...8)$, bežne sa však používa hodnota $\beta = 25$.

Vzhľadom na statickú únavu skla, sklenené prvky vykazujú nižšie hodnoty pevnosti pre dlhodobé zaťažovacie účinky ako pre účinky krátkodobé. Z tohto dôvodu je pri výpočte návrhovej pevnosti skla zavedený parameter k_{mod} , ktorý zohľadňuje dĺžku trvania rozhodujúceho zaťaženia. Jeho hodnoty sú stanovené $k_{mod} = 0,72$ pre krátkodobé zaťaženie (napr. vietor), $k_{mod} = 0,36$ pre zaťaženia so strednou dobou trvania (napr. sneh) a $k_{mod} = 0,27$ pre dlhodobé a stále zaťaženia.

Je pravdepodobné, že výpočtové postupy pre určenie návrhovej pevnosti skla podľa pripravovanej Európskej normy budú metodicky veľmi blízke uvedenému výpočtovému postupu, spracovanému podľa predbežnej Európskej normy.

4 Záver

Určenie skutočnej pevnosti skla je nesmierne zložitá záležitosť. Pre praktické využitie má skutočný význam pevnosť skla v ťahu. Pri porovnaní s ostatnými materiálmi, experimentálne získané pevnosti skla na rôznych vzorkách vykazujú značný rozptyl. Preto sa hodnoty návrhových pevností skla, uvedené v technických normách a rôznych dimenzačných príručkách, javia ako značne konzervatívne. Platí to ale len v prípade nepoškodeného skla. V prípade skla vystaveného podmienkam okolitého prostredia sa uvedené hodnoty pevností nejavia ako príliš podhodnotené a je zrejmé, že určenie skutočného stupňa bezpečnosti sklenej konštrukcie je značne komplexná problematika.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Vuolio Aki. Structural behaviour of glass structures in facades. *Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 27*, 2003.
- [2] Porter Mark. Aspects of structural design with glass. *Doctor of Philosophy thesis, The University of Oxford*, 2001.