

## 2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI SKLA

Pevnost skla reprezentující jeho mechanické vlastnosti nejčastěji bývá hlavním parametrem jeho využití. Nevýhodou skel je jejich poměrně nízká pevnost v tahu a rázu (pevnost v tahu je cca 10 x menší než pevnost v tlaku). Pro posouzení mechanických vlastností skla je třeba znát jeho:

- hustotu a složení skla,
- modul pružnosti a Poissonovu konstantu,
- pevnost v tahu, tlaku, ohybu a smyku,
- rázovou houževnatost,
- ostatní faktory (tvrdost, kvalitou povrchu skla, únavu a stárnutí, rozměr a tvar výrobků).

### a) Hustota a složení skla

Hustota je definována jako hmotnost měrného objemu homogenní látky při dané teplotě. Matematicky ji lze vyjádřit jako

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \quad /1/$$

kde:  $\rho_t$  – hustota skla při teplotě  $t$ ,  
 $m$  – hmotnost skla [kg],  
 $V_t$  – objem skla při teplotě  $t$  [m<sup>3</sup>].

Hustota skel závisí na jejich chemickém složení, a to na jednotlivých prvcích vnášených do skla ve formě oxidů. Nejvíce zvyšují hustotu skel těžké kovy (Pb, Bi), méně Zn, Ca, Ba, nejméně Si, B, P, Be, Mg, Al, Na, K, Li.

### b) Modul pružnosti a Poissonova konstanta

Youngův modul pružnosti v tahu  $E$  je určen Hookovým zákonem ve tvaru

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [Pa]} \quad /2/$$

modul pružnosti ve smyku  $G$  pak

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \text{ [Pa]} \quad /3/$$

kde:  $\sigma$  - napětí v tahu [Pa],

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení:  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  ( $\Delta l$ - prodloužení [mm],  $l_0$  – původní délka [mm]),

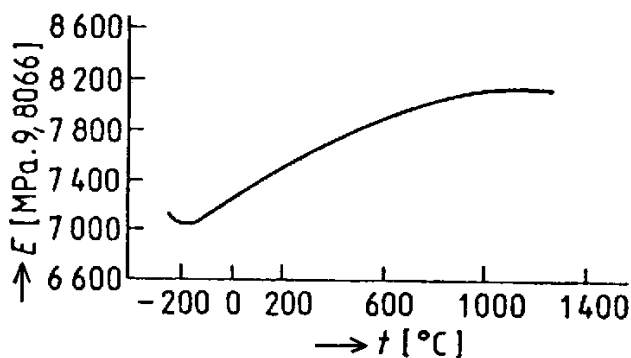
$\tau$  - napětí ve smyku [Pa],

$\gamma$  - poměrné posunutí:  $\gamma = \frac{u}{b}$  ( $u$  – posun horní vrstvy vzorku, v níž působí smykové napětí [mm],  $b$  – výška vzorku [mm]).

Závislost modulu pružnosti  $E$  čirého křemenného skla na teplotě je uvedena na obr. 1. Nevychlazená a zakalená skla vykazují moduly pružnosti v tahu nižší než skla vychlazená, přičemž Youngův modul pružnosti  $E$  zakaleného skla je nižší cca o 7 %. Poissonova konstanta  $\mu$  je konstantou úměrnosti mezi poměrnou deformací ve směru napětí a poměrnou deformací ve směru kolmém k působícímu napětí. Je určena vztahem

$$\mu = \frac{\eta}{\varepsilon} = \frac{E - 2G}{2G} \quad /4/$$

kde:  $\eta$  - poměrná deformace ve směru kolmém ke směru napětí,  
 $\varepsilon$  - poměrná deformace ve směru napětí.



Obr.1: Závislost modulu pružnosti v tahu  $E$  čirého křemenného skla na teplotě [5]

Moduly pružnosti  $E$  vychlazených skel klesají se vzrůstající teplotou tak, že Poissonova konstanta  $\mu$  nepatrně roste. Ve srovnání s kovy je *mez pevnosti při normální pokojové teplotě u skel nižší než mez pružné deformace a při vyšších teplotách se obtížně odlišuje plastická deformace od viskózního toku*. Sklo se vlivem napětí za vyšších teplot trvale deformuje, což je charakteristickou vlastností kapalin. V tabulce 1. jsou uvedeny hodnoty modulu pružnosti v tahu, ve smyku  $G$  a Poissonovy konstanty  $\mu$  nejčastěji vyráběných skel [2].

### c) Pevnost v tahu, tlaku, ohybu a smyku

Skla se při namáhání za normální (pokojové) teploty chovají jako materiály křehké, které se do svého porušení deformují pouze pružně a plastickou deformaci je možno zanedbat. V rozsahu pružné deformace platí Hookův zákon ve tvaru

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

/5/

kde:  $\sigma$  - napětí, pro které platí  $\sigma = \frac{F}{A}$  [Pa],

$E$  - Youngův modul pružnosti v tahu [Pa],

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení:  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  ( $\Delta l$  - prodloužení [mm],  $l_0$  - původní délka [mm]),

$F$  - vnější působící síla [N],

$A$  - plocha [m<sup>2</sup>]

Značné rozdíly v pevnosti skel proti rázu, tahu, tlaku a ohybu jsou zanedbatelné s jeho teoretickou pevností. Teoretická pevnost skla je určena soudržností mezi jednotlivými sklotvornými atomy a kyslíkovými můstky. Výsledky experimentů dokázaly předpoklad, že čím méně oxidu sodného sklo obsahuje, tím větší pevnost vykazuje. Orientačně je možno pro pevnost skla učinit předpoklad, že k porušení vazby, tj. k lomu dojde, jestliže se atomy od sebe vzdálí více než 1/5 své původní vazby [9]. V důsledku toho se atomy dostanou do oblasti přitažlivých sil svého nejbližšího okolí a dochází k přerušení původní vazby. Teoreticky by se pak došlo k závěru, že pevnost skla závisí na modulu pružnosti, povrchové energii a atomové vzdálenosti podle vztahu:

$$f_{c,t} = \sqrt{\frac{4E\gamma}{d_a}}$$

/6/

kde:  $\gamma$  - povrchová energie [Pa.m]

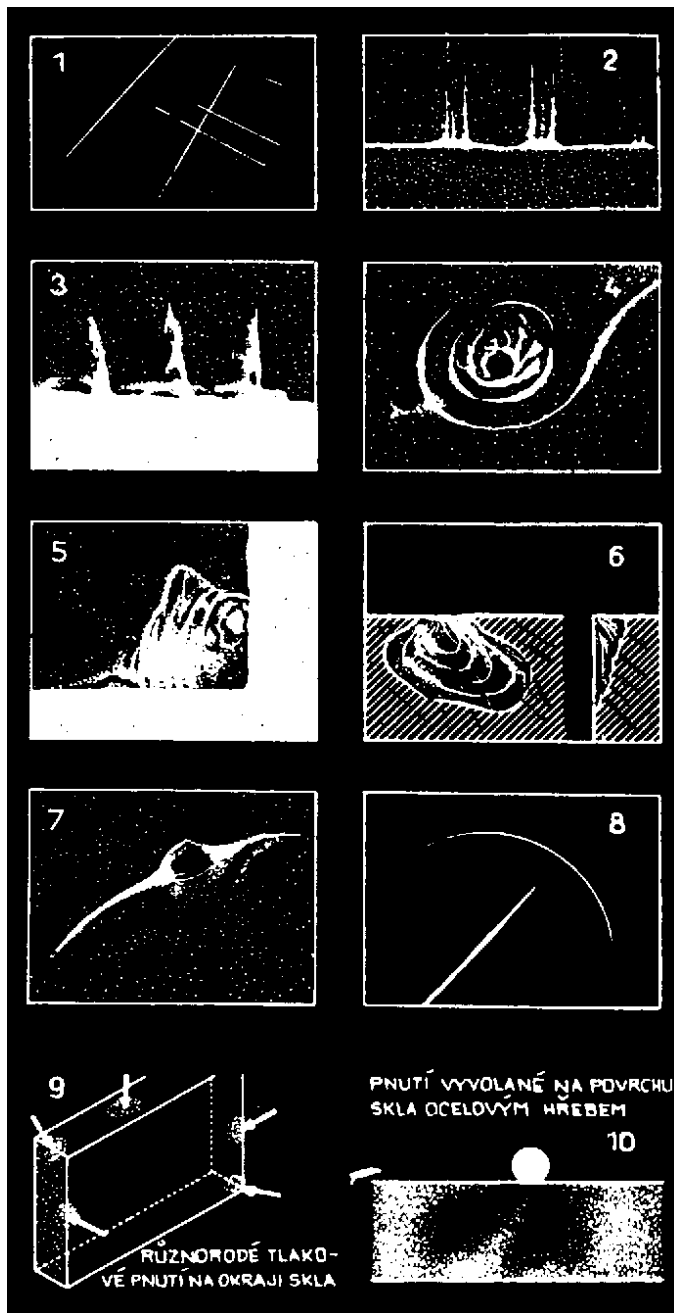
$d_a$  - atomová vzdálenost [m],

$E$  - Youngův modul pružnosti [Pa],

$f_{c,t}$  - maximální teoretická pevnost [Pa].

Typ skla	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$\mu$
sodnodraselný křišťál	66 851	27 458	0,217
olovnaté sklo (21 % PbO)	58 417	24 133	0,211
ploché sklo	72 479	29 753	0,220
Sklo Simax	62 918	26 722	0,176

Tab. 1: Modul pružnosti  $E$ ,  $G$  a Poissonova konstanta  $\mu$  u nejčastěji používaných skel



Obr.2: Nejčastější závady na skleněných tabulích, vzniklé mechanickými a tepelnými vlivy: 1 – jemné škráby, 2 – vyštípnutí okraje skla, 3 – řezové trhlinky na hraně tabule, 4 – průběh prasklin při nárazu na povrch skla, 5 – roztržštěný roh, 6 – lasturový lom na okraji tabule, 7 – popraskání skla lokálním prudkým ohřátím, 8 – praskliny na skleněných tabulích

Skutečná pevnost skla nezávisí na pevnosti vazeb, ale hlavně na pevnosti nejtenčích míst, jimiž jsou např. mikrotrhlinky, povrchové trhlinky, škráby apod. (obr.2). Při hodnocení lomu skla je možno vycházet z hypotézy, že Hookův zákon platí pro skleněný materiál až do lomu a eventuální plastické přetvoření se projevuje pouze v těsné blízkosti trhliny. Lom skla tak vzniká vytvořením trhlinky a procesem jejího šíření. Podle lineární lomové mechaniky každý materiál má svoji kritickou hodnotu součinitele intenzity napětí, při které se trhlina nešíří a tudíž je stabilní, a k rozvoji dalších trhlinek dochází až nad touto hodnotou, tzv. lomovou houževnatostí.

V případě ideální, homogenní mikrostruktury a povrchového nepoškození, by teoretická pevnost skla po dosažení do vzorce /6/ dosáhla pevnosti vazeb - řádově 2 až  $3 \cdot 10^4$  MPa. Strukturální nehomogenity a porušení povrchu však snižují pevnost skla v tahu na 40 až 100 MPa, v tlaku pak na 500 až 2000 MPa [2]. Značné rozdíly v hodnotách pevnosti jsou tedy v podstatě zanedbatelné vzhledem k pevnosti teoretické.

Griffithova teorie [9] vychází z předpokladu, že ve skle, zejména pak na jeho povrchu, jsou četné úzké, ale dlouhé a hluboké trhlinky, jejichž rozměry jsou řádově v několika desítek nm. Kdyby se podařilo tyto trhlinky odstranit, mělo by sklo pevnost min. 10krát větší a blížilo by se pevnosti teoretické. V důsledku tahových sil se tyto trhlinky zvětšují dokud nedojde k lomu. Koncentrované pnutí, které se pak soustřeďují ve vrcholcích trhlínek, může několikanásobně překročit vnější namáhání. Mez pevnosti je podle Griffitha dána výrazem:

$$f_{c,G} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi \cdot c}} \quad /7/$$

kde:

- E - Youngův modul pružnosti [Pa],
- $\gamma$  - povrchová energie skla [Pa.m],
- c - délka trhlinky [m],
- $f_{c,G}$  - mezní pevnost [Pa].

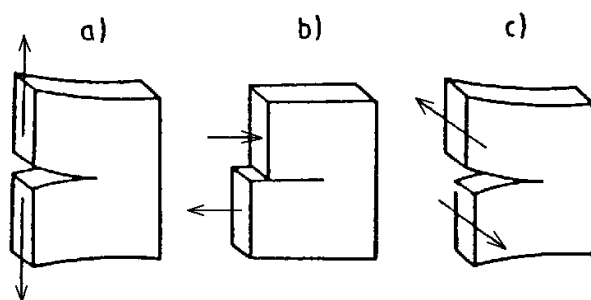
Ze vztahu /7/ vyplývá, že:

- Youngův modul pružnosti je přímo úměrný mechanické pevnosti,
- s rostoucí délkou (hloubkou) trhlinek se snižuje mechanická pevnost,
- ostatní účinky, podporující vznik trhlinek směřují ke snížení mechanické pevnosti.

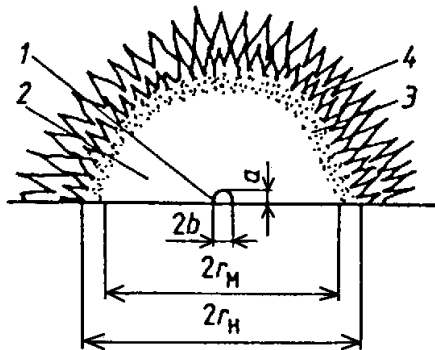
Ploché sklo vykazuje vždy určité trvalé pnutí, které je přibližně rovnoměrně rozloženo v tloušťce skla. Na povrchu je vždy napětí tlakové, parabolicky přecházející přes nulovou čáru do napětí tahového. Při zatěžování skla je nutno nejprve překonat tlakové napětí v povrchové vrstvě. Potom dojde ke vzniku napětí tahového, jehož překročením nastává lom skla. Při delších zatěžovacích intervalech se pokles pevnosti zmenšuje, jelikož se společně s únavou začíná projevovat i vliv stárnutí. Pro tvrzené sklo je charakteristická vysoká pevnost, která je dána právě vysokou hodnotou tlakového napětí v povrchové vrstvě skla.

Ke zvýšení pevnosti skla přispívá:

- vznik tlakového napětí v povrchové vrstvě,
- korozivní účinek vody, při kterém u silově nenamáhaného skla nastává postupné zaoblování povrchových Griffithových trhlinek,
- částečné snížení křehkosti v technologii skla např. částečnou krystalizací za vzniku skelně krystalických hmot,
- vhodná ochranná vrstva na povrchu skla.



Obr.3: Způsoby rozevírání trhlinky [10]



Obr.4: Znázornění lomového zrcátka [11]:  
 1 – počáteční trhlinka, 2 – hladká lomová ploška, tzv. zrcátko, 3 – matovaná oblast, 4 – drsná oblast,  
 a – hloubka počáteční trhlinky, b – poloviční šířka počáteční trhlinky,  $r_M$  – vnitřní poloměr zrcátka,  
 $r_H$  – vnější poloměr zrcátka

Sklo vykazuje křehkost tím, že je zabráněno vzniku plastické deformace při působení smykových napětí bez možnosti lokálních kluzů. Proto se u skla při překročení jeho mezního napětí vyskytuje jen **křehký lom** nestabilní, kde iniciátorem lomu jsou ve skle přítomné mikrotrhlinky. Křehký lom závisí na mikrostruktuře materiálu, způsobu výroby, tvaru a rozměru zkušebních vzorků, na velikosti a druhu přiloženého napětí, na teplotě a charakteru prostředí, na rychlosti zatěžování vzorku apod.

Lom skla se projevuje vznikem trhlinky, která se postupně šíří dál. U skel se vychází z předpokladu tzv. Griffithových trhlinek ve skle ještě před zatížením. Tyto trhlinky rozměru řádově desítek nm se vytvářejí na povrchu skla vlivem technologického procesu výroby skla. Trhlinka může být zatěžována a rozevřána:

- tahovým napětím kolmým k rovině trhlinky (obr.3a),
- smykovým napětím rovnoběžným s rovinou trhlinky a kolmým k jejímu okraji (obr.3b),
- smykovým napětím rovnoběžným s rovinou trhlinky i jejím okrajem (obr.3c).

Charakteristický vzhled povrchu vzniklého lomem v blízkosti jeho počátku je uveden na obr.4.

## Literatura

- [1] Fanderlík, I. A kol.: Křemenné sklo a jeho využití v praxi, Praha, SNTL, 1985,
- [2] Fanderlík I.: Vlastnosti skel, Informatorium, spol.s r.o., Praha, 1996
- [3] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: Technická fyzika, Praha, SNTL, 1961
- [4] Jelínek, F.: Konstrukce obvodového pláště budov z plochého skla, SNTL Praha, 1982
- [5] Kupilík, V.: Čirá protipožární skla pro stavební účely, Tepelná ochrana budov, ISSN 1213-0907, 3, 2000, č.4, str.3-12
- [6] Kupilík, V.: Konstrukce pozemních staveb 80 - Požární bezpečnost staveb, Učební texty ČVUT, Praha, 1998, str.87-94
- [7] Kupilík, V.: Stavební konstrukce z požárního hlediska, Grada Publishing Praha, 2006, ISBN80-247-1329-2
- [8] Kupilík, V.: Závady a životnost staveb, Grada Publishing Praha, 1999, ISBN 80-7169-581-5
- [9] Lederer, J.: Příspěvek k mechanické pevnosti skla se zřetelem na jeho použití ve stavebnictví, 7. Informační bulletin stavebního skla, Sklo Union Teplice, březen 1971, str.13-20
- [10] Menčík, J.: Úvod do lomové mechaniky skla a keramiky. Sklář a keramik, roč.32, 1983, č.2, str.283 – 292
- [11] Vích, M., Novotný, Vl.: Nové přístupy ke sledování pevnosti skla, Informativní přehled SVÚS Hradec Králové, roč.XXVI, 1983, č.2 – 3
- [12] Volf, M.B.: Sklo ve výpočtech, Praha, SNTL, 1984,
- [13] Volf, M.B. a kol.: Tepelné vlastnosti skel, Praha, SNTL, 1968

## QUALITY RECORD

<b>Název</b>	Mechanické vlastnosti skla
<b>Popis</b>	Vlastnosti skla určující jeho chování při požáru. V této části jsou zmíněny mechanické a fyzikální vlastnosti skla, kterými jsou především hustota a složení skla, modul pružnosti, pevnost skla v tahu, tlaku a ohybu.
<b>Kategorie</b>	Sklo z požárního hlediska
<b>Název souboru</b>	3-2_Mechanické_vlastnosti_skla.pdf
<b>Datum vytvoření</b>	5. 11. 2006
<b>Autor</b>	Doc. Ing. Václav Kupilík, CSc. Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze
<b>Klíčová slova</b>	Napětí; Vlastnosti materiálů; Prosklené konstrukce; Odolnost skla; Modul pružnosti skla; Závady skleněných tabulí; Povrchová energie skla; Pevnost v tlaku.
<b>Literatura</b>	<p>Fanderlík, I. A kol.: Křemenné sklo a jeho využití v praxi, Praha, SNTL, 1985</p> <p>Fanderlík I.: Vlastnosti skel, Informatorium, spol.s r.o., Praha, 1996</p> <p>Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: Technická fyzika, Praha, SNTL, 1961</p> <p>Jelínek, F.: Konstrukce obvodového pláště budov z plochého skla, SNTL Praha, 1982</p> <p>Kupilík, V.: Čirá protipožární skla pro stavební účely, Tepelná ochrana budov, ISSN 1213-0907, 3, 2000, č.4, str.3-12</p> <p>Kupilík, V.: Konstrukce pozemních staveb 80 - Požární bezpečnost staveb, Učební texty ČVUT, Praha, 1998, str.87-94</p> <p>Kupilík, V.: Stavební konstrukce z požárního hlediska, Grada Publishing Praha, 2006, ISBN80-247-1329-2</p> <p>Kupilík, V.: Závady a životnost staveb, Grada Publishing Praha, 1999, ISBN 80-7169-581-5</p> <p>Lederer, J.: Příspěvek k mechanické pevnosti skla se zřetelem na jeho použití ve stavebnictví, 7. Informační bulletin stavebního skla, Sklo Union Teplice, březen 1971, str.13-20</p> <p>Menčík, J.: Úvod do lomové mechaniky skla a keramiky. Sklář a keramik, roč.32, 1983, č.2, str.283 – 292</p> <p>Vích, M., Novotný, V.I.: Nové přístupy ke sledování pevnosti skla, Informativní přehled SVÚS Hradec Králové, roč.XXVI, 1983, č.2 – 3</p> <p>Volf, M.B.: Sklo ve výpočtech, Praha, SNTL, 1984</p> <p>Volf, M.B. a kol.: Tepelné vlastnosti skel, Praha, SNTL, 1968</p>