

1 SKLO Z POŽÁRNÍHO HLEDISKA - TEPELNÉ VLASTNOSTI SKLA

Sklo patří k materiálům, které významně ovlivňují vývoj stavební techniky a architektury. Nálezy skla pocházející z doby asi kolem 5000 let před naším letopočtem ukazují, že už tehdy byla známá základní technologie výroby skla z křemenného písku, vápna a sody. Z přepychového výrobku, kterým sklo v minulosti bezesporu bylo, vznikl již v minulém století díky svým výhodám často používaný stavební materiál. Kromě technických vlastností jsou pro použití skla důležité i výtvarné přednosti, neboť jeho čírost, čistota, lesk, barva stejně jako možnosti jeho dalšího zušlechťení vytvářejí široké spektrum v návrhu prostorů a budov s vysokou kulturní úrovní. V posledním období jeho progresivní protipožární úpravy dovolují jeho aplikaci i v místech ohrožených vznikem požáru.

1.1 VLASTNOSTI OVLIVŇUJÍCÍ CHOVÁNÍ SKLA V OHNI

Pro chování skla v ohni jsou rozhodující především jeho tepelné a mechanické vlastnosti, kterým je nutno věnovat náležitou pozornost, a proto budou v další části textu analyzovány.

1.1.1 Tepelné vlastnosti

Do tepelných vlastností lze zahrnout zejména délkovou nebo objemovou teplotní roztažnost, odolnost proti náhlým změnám teploty, měrné teplo, tepelnou vodivost, povrchové napětí, vliv krystalizace atd. Tyto vlastnosti se projevují již ve fázi tavení, tvarování, chlazení až po praktické využití.

a) Délková nebo objemová teplotní roztažnost

Součinitel délkové teplotní roztažnosti α je definován vztahem

$$\alpha = \frac{1}{l_o} \cdot \frac{dl}{dt} \quad /1/$$

kde: l_o – délka měřeného vzorku při referenční teplotě t_o ,
 dl – prodloužení měřeného vzorku při změně teploty dt .

Součinitel objemové roztažnosti β je určen vztahem

$$\beta = \frac{1}{V_o} \cdot \frac{dV}{dt} \quad /2/$$

Pro pevné látky s izotropní strukturou, a tedy i pro skla lze vzhledem k nízké hodnotě α určit

$$\beta \approx 3 \alpha \quad /3/$$

kde: α a β jsou rozměry [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Protože je délková teplotní roztažnost obecně funkcí teploty, je nutné uvažovat větší teplotní intervaly k vyjádření vztahu mezi délkou a teplotou, jak je uvedeno vztahem

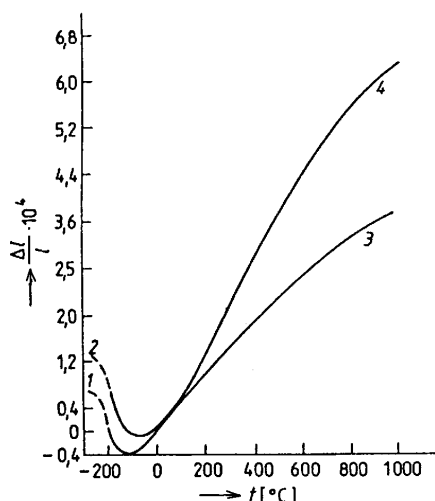
$$l = l_o (1 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2) \quad /4/$$

kde: α_1 a α_2 jsou konstanty.

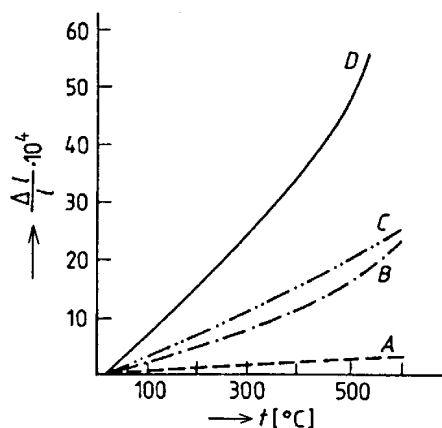
Vztahem /3.1/ je definován tzv. *pravý součinitel délkové teplotní roztažnosti*, který charakterizuje relativní změnu délky tělesa se změnou teploty o dt při dané teplotě t . Pro malé teplotní intervaly lze však α považovat za konstantní hodnotu, takže potom *střední součinitel teplotní roztažnosti* je možno určit výrazem

$$\alpha_{t_o,t} = \frac{1}{l_o} \cdot \frac{l - l_o}{t - t_o} = \frac{\Delta l}{l_o \Delta t} \quad /5/$$

Tento součinitel udává relativní změnu délky vzorku měřeného skla při změně teploty o 1°C v teplotním intervalu (t_0 ; t). Délková teplotní roztažnost souvisí s vnitřní strukturou skla, především s vazbou Si – O. *Například u velmi čistého křemenného skla jsou tyto vazby tak pevné, že jeho délková teplotní roztažnost je nejmenší z běžných typů technických skel.* Jeho teplotní roztažnost však závisí na fiktivní teplotě (obr.1) [1], tj. sklo zahřáté na definovanou teplotu a rychle ochlazené (sklo nestabilizované). Jeho srovnání s ostatními typy skel je patrné z obr.2 [1].



Obr.1: Délková teplotní roztažnost čistého křemenného skla v závislosti na fiktivní teplotě [1]: 1,3 – fiktivní teplota 1000°C , 2 – fiktivní teplota 1720°C , fiktivní teplota 1530°C



Obr.2: Délková teplotní roztažnost křemenného skla v porovnání s technickými skly [1]: A – křemenné sklo, B – boritokřemičité sklo Pyrex, C – boritokřemičité sklo pro zátav, D – sodnovápenaté sklo pro žárovky

Teplotní závislost délkové roztažnosti je obvykle vyjadřována tzv. **křivkou teplotní roztažnosti**. Křivka teplotní roztažnosti skla vytvrzeného (prudce ochlazeného) nebo špatně vychlazeného má jiný průběh než křivka skla vychlazeného. **Vytvrzené sklo má nižší hustotu než sklo chlazené**, čímž se více přibližuje sklovině s větší vzdáleností strukturních částic a v důsledku toho i nižší hustotou. Se vzrůstem teploty dochází ke strukturním změnám a stabilizaci struktury, sklo lze považovat za vychlazené a křivky teplotní roztažnosti jsou dále přibližně rovnoběžné.

b) Odolnost proti náhlým změnám teploty

Tepelná odolnost skel závisí na vlastnostech materiálu, především součiniteli teplotní roztažnosti α [K^{-1}], pevnosti v tahu σ [Pa], Youngově modulu pružnosti E [Pa], Poissonově konstantě μ atd., jak to dokládá následující výraz pro prudce ochlazené sklo

$$\Delta t = \frac{\sigma(1 - \mu)}{\alpha \cdot E} \quad /6/$$

kde: Δt - největší rozdíl teplot, o který je možno zahřátý výrobek ochladit, popř. vychladlý výrobek zahřát, aniž praskne [$^{\circ}\text{C}$]

Dále je ovlivněna homogenitou skleněného výrobku, neporušeností jeho povrchu, tloušťkou stěny, vychlazením, rozměry výrobku apod. Z uvedených vlastností **má největší význam součinitel délkové teplotní roztažnosti α** , pro který platí zásada, že **čím je jeho hodnota nižší, tím je sklo odolnější**. Vlivem teplotní roztažnosti se při náhlém ochlazení sklo smrští a vytvoří se v něm **vnitřní**

napětí, a to v teplejších vrstvách **tlakové** (teplejší vrstvy by se roztahovaly více než chladnější, které tomu brání), ve studených naopak **tahové**.

Tím, že pevnost skla v tahu je mnohem menší než pevnost v tlaku, skleněné tabule snáze prasknou při prudkém ochlazení působením tahového napětí na jeho povrchu. Za normálních podmínek a při tloušťce stěny skla 1 až 2,5 mm je pro křemenné sklo $\Delta t = 1000$ až 1100 °C. Desky z křemenného skla tloušťky 20 až 30 mm odolávají několikanásobné ochlazení ve vodě a $\Delta t = 450$ až 500 °C. Jelikož při překročení teploty cca 1000 °C může dojít ke krystalizaci čirého křemenného skla a s ní spojenému praskání skla při ochlazení pod asi 300 °C, nedoporučuje se překračovat při provozním namáhání křemenného skla teplota 600 až 1000 °C.

Je-li nutno při použití vztahu /6/ zahrnout bezpečnostní faktor, je vhodné dosadit za pevnost skla v tahu hodnotu cca o 30 % nižší než je jeho průměrná pevnost (v běžných případech se pevnost v tahu uvažuje hodnotou 70 až 80 MPa). Pevnost v tahu závisí též na prostředí, v němž se sklo po předeřtání ochlazuje (teplota ochlazovacího média bývá volena 20 °C).

Odolnost proti náhlým změnám teploty se zvyšuje s tvrzením podle vztahu

$$\Delta P = \frac{P_{tv}}{P_o} = \frac{\alpha \cdot E}{10^2(1 - \mu)} \cdot (t - 20) \quad /7/$$

kde: P_{tv} - pevnost (odolnost Δt) tvrzeného skla,
 P_o - pevnost (odolnost Δt) chlazeného skla,
 ΔP - podíl pevnosti (odolnosti Δt) skla tvrzeného a chlazeného

Je-li skleněná deska vystavena trvalému rozdílu teplot tak, že oba její povrchy jsou udržovány na hodnotách t_1 (vyšší) a t_2 (nižší), dochází mezi oběma povrchy k lineárnímu teplotnímu spádu. Povrchy jsou při tom pod stálým namáháním stejné velikosti, ale opačného znaménka (teplejší povrch je pod tlakem, chladnější pod tahem). Potom platí pro napětí:

$$\text{a) v tlaku: } \sigma_1 = \frac{-\alpha \cdot E(t_1 - t_2)}{2(1 - \mu)} \quad /8/$$

$$\text{b) v tahu: } \sigma_2 = \frac{+\alpha \cdot E(t_1 - t_2)}{2(1 - \mu)} \quad /9/$$

$$\text{takže } \Delta t = \frac{P \cdot 2(1 - \mu)}{\alpha \cdot E} \quad /10/$$

kde: σ_1 - napětí na teplejším povrchu [Pa],
 σ_2 - napětí na chladnějším povrchu [Pa],
 α - součinitel lineární délkové teplotní roztažnosti skla [K^{-1}],
 E - Youngův modul pružnosti v tahu [Pa],
 μ - Poissonova konstanta,
 P - přípustná pevnost skla v tahu [Pa].

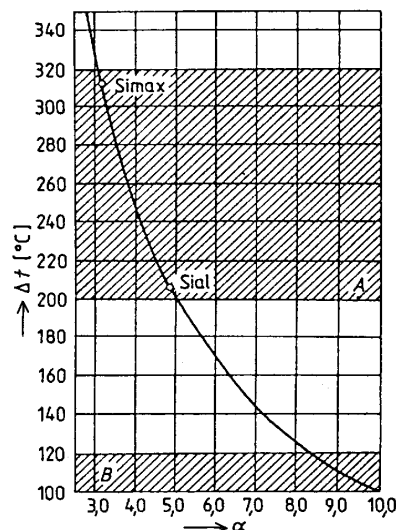
Při zahřívání nebo ochlazování konstantní rychlostí, kdy se ve skleněné desce ustálí pravidelně rozložené vnitřní napětí, je možno toto napětí vypočítat podle vztahu [12]

$$\sigma = \frac{1}{3} \cdot \frac{E \cdot \alpha}{a(1 - \mu)} v \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad /11/$$

kde: σ - napětí na povrchu [Pa],
 μ - Poissonova konstanta,
 α - součinitel délkové teplotní roztažnosti [K^{-1}],
 E - Youngův modul pružnosti v tahu [Pa],
 a - teplotní vodivost [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 v - rychlost zahřívání nebo ochlazování [$K \cdot s^{-1}$],
 d - tloušťka skla [m].

Jestliže se dosadí vztahu /3.11/ střední hodnota pro pevnost v tahu a pro modul pružnosti a člen $(1 - \mu)$ se vynechá, potom maximální rozdíl teplot Δt je přibližně roven

$$\Delta t = \frac{10000}{\alpha \cdot 10^7} \quad /12/$$



Obr.3: Závislost odolnosti proti náhlým změnám teploty na součiniteli délkové tepelné roztažnosti pro desku skla tloušťky 1 mm [13]:
A – tepelně odolná skla, B – běžná sodnovápenatá skla

vztahující se k tloušťce desky 1 mm nebo stejné tloušťky při zanedbání vlivu tvaru. Graf závislosti Δt na součiniteli délkové tepelné roztažnosti α je uveden na obr.3 [13]. Odolnost proti náhlé změně teploty skla je nepřímo úměrná jeho tloušťce. To znamená, že s narůstající tloušťkou stěny d [mm] se zmenšuje jeho odolnost Δt při ochlazování podle vzorce:

$$\text{a) z jedné strany: } \Delta t_d = \frac{\Delta t}{d} \quad /13/$$

$$\text{b) z obou stran: } \Delta t_d = \frac{\Delta t}{\sqrt{\frac{1}{2}d}} \quad /14/$$

kde: Δt_a - odolnost při tl. stěny d [mm],
 Δt - odolnost při tl. stěny $d = 1$ mm.

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

Název	Tepelné vlastnosti skla
Popis	Vlastnosti skla určující jeho chování při požáru. V této části jsou zmíněny tepelné vlastnosti skla, kterými jsou především délková a teplotní roztažnost a odolnost proti náhlým změnám. Tyto vlastnosti jsou do značné míry ovlivňovány složením (strukturou) skla.
Kategorie	Sklo z požárního hlediska
Název souboru	3-1_Tepelne_vlastnosti_skla.pdf
Datum vytvoření	5. 11. 2006
Autor	Doc. Ing. Václav Kupilík, CSc. Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze
Klíčová slova	Napětí; Vlastnosti materiálů; Tepelná roztažnost; Součinitel délkové teplotní roztažnosti; Odolnost skla.
Literatura	Fanderlík, I. A kol.: Křemenné sklo a jeho využití v praxi, Praha, SNTL, 1985 Fanderlík I.: Vlastnosti skel, Informatorium, spol.s r.o., Praha, 1996 Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: Technická fyzika, Praha, SNTL, 1961 Jelínek, F.: Konstrukce obvodového pláště budov z plochého skla, SNTL Praha, 1982 Kupilík, V.: Čirá protipožární skla pro stavební účely, Tepelná ochrana budov, ISSN 1213-0907, 3, 2000, č.4, str.3-12 Kupilík, V.: Konstrukce pozemních staveb 80 - Požární bezpečnost staveb, Učební texty ČVUT, Praha, 1998, str.87-94 Kupilík, V.: Stavební konstrukce z požárního hlediska, Grada Publishing Praha, 2006, ISBN80-247-1329-2 Kupilík, V.: Závady a životnost staveb, Grada Publishing Praha, 1999, ISBN 80-7169-581-5 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 Menčík, J.: Úvod do lomové mechaniky skla a keramiky. Sklář a keramik, roč.32, 1983, č.2, str.283 – 292 Vích, M., Novotný, V.: Nové přístupy ke sledování pevnosti skla, Informativní přehled SVÚS Hradec Králové, roč.XXVI, 1983, č.2 – 3 Volf, M.B.: Sklo ve výpočtech, Praha, SNTL, 1984 Volf, M.B. a kol.: Tepelné vlastnosti skel, Praha, SNTL, 1968