České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague

Faculty of Civil Engineering

Ing. Martina Eliášová, CSc.

Sklo – materiál pro nosné konstrukce

Glass – material for load-bearing structures

Summary

In modern architecture and civil engineering glass has got more and more importance because of its transparency, filigree appearance and lightens functions. For that reason glass belongs nowadays to one of the most progressive materials with new function. It is not only the filling material but also very often material for the load bearing structural elements, e.g. glass columns, beams, shear panels etc. Application of structural glass in practice enables to use of the significant advantages, such as high strength, durability, resistance to corrosion, no conductivity, resistance to water leakage and environmental properties characterized mainly by its recycling.

Glass behaves in a different way in comparison with other more familiar structural materials. Glass does not yield and it is fragile and that is why designers cannot ignore stress concentrations. Plastic material (steel, aluminium) will yield and flow if it is locally overstressed and therefore stress concentrations are not generally a problem. Contrary to these common materials, which can reach plasticity, glass behaves elastically until it breaks by a brittle fracture without any warning. Insufficient tensile strength of float glass is solved by using of tempering process which enable to produce heat strengthen (partially tempered) or toughened (fully tempered) glass. But increased tensile strength isn't only requirement of safety design. To ensure a reliable and effective design of glass elements as parts of a load-bearing system laminated glass panels should be used.

Souhrn

V současné architektuře nabývá sklo stále většího významu zejména s ohledem na jeho transparentnost, subtilní vzhled a možnost osvětlení. Proto se dnes sklo používá nejen jako výplň otvorů tradičních budov, ale stále častěji jako materiál pro nosné konstrukční prvky, např. skleněné sloupy, nosníky či stěny namáhané smykem, které jsou schopny přenášet zatížení větrem, sněhem, či jiným stálým nebo proměnným zatížením. Konstrukční sklo umožňuje využit mnoha svých příznivých vlastností, jakými jsou vysoká pevnost v tlaku, trvanlivost, odolnost proti korozi, nevodivost, odolnost proti prosakování vody a recyklovatelnost.

Sklo se při zatížení v porovnání s kovovými materiály běžně používanými na nosné konstrukce (ocel nebo hliník) chová pružně až do porušení křehkým lomem, který nastává náhle bez předchozího varování. Nelze tedy uvažovat se zmírněním vlivu lokálních špiček napětí plastifikací ani s redistribucí účinků namáhání, což klade velké nároky zejména na úpravu detailů. Nedostatečná tahová pevnost plaveného skla je kompenzována využitím tepelně upravovaných skel s vyšší pevností v tahu, jako jsou tvrzená (kalená) nebo tepelně zpevněná skla (polokalená skla). Ale samotné zvýšení tahové pevnosti není z hlediska bezpečného návrhu dostatečné. K zajištění větší spolehlivosti navrhované konstrukce je vhodné použít vrstvená skla.

Klíčová slova:

skleněná konstrukce, stavebnictví, materiálové vlastnosti, plavené sklo, tvrzené sklo, vrstvené sklo, mezivrstva, pevnost skla, zkoušení skla, návrhová norma

Key words:

glass structure, civil engineering, material properties, float glass, toughened glass, laminated glass, interlayer, glass strength, glass testing, design code

Obsah

1. Úvod 6

2. Materiálové vlastnosti skla 6

3. Druhy skel pro nosné konstrukce ze skla 9

3.1 Plavené sklo 9

3.2 Tepelně tvrzené (kalené) sklo 9

3.3 Tepelně zpevněné (polo kalené) sklo 11

3.4 Chemicky tvrzené sklo 11

4. Vrstvené (laminované) sklo 10

5. Stanovení pevnosti skla 15

5.1 Zkouška dvojitým soustředným prstencem na plochých vzorcích s velkým zkušebním povrchem 15

5.2 Zkouška se vzorkem podepřeným ve dvou bodech (čtyřbodový ohyb) 16

6. Návrhové normy pro konstrukce ze skla 17

6.1 Zásady navrhování 18

6.2 Návrhová pevnost plaveného skla 18

6.3 Návrhová pevnost upraveného skla 19

6.4 Návrhové postupy pro posouzení vrstvených skel 20

7. Závěr 23

8. Literatura 24

Autor a CV 25

1. Úvod

Sklo se jako výplňový materiál otvorů využívá ve stavebnictví po staletí. Širšímu použití na nosné konstrukce však bránila zejména nedostatečná pevnost skla v tahu a malá spolehlivost vzhledem k porušení skleněných prvků křehkým lomem, ke kterému dochází bez varování. Použití pevnostně upraveného a vrstveného skla zejména v automobilovém průmyslu umožnilo i větší využití tohoto architektonicky zajímavého materiálu ve stavebnictví. V posledních deseti letech byla ve světě realizována řada konstrukcí, ve kterých bylo sklo použito na nosné prvky, jako jsou např. skleněné sloupy, stropní nosníky či výztužná žebra skleněných fasád, přenášející zatížení sněhem, větrem či užitné zatížení. Pro návrh a posouzení takových konstrukcí však stále chybí potřebné znalosti a normativní předpisy a proto je každé použití nového nosného prvku ze skla zpravidla doprovázeno experimentálním ověřením jeho únosnosti.

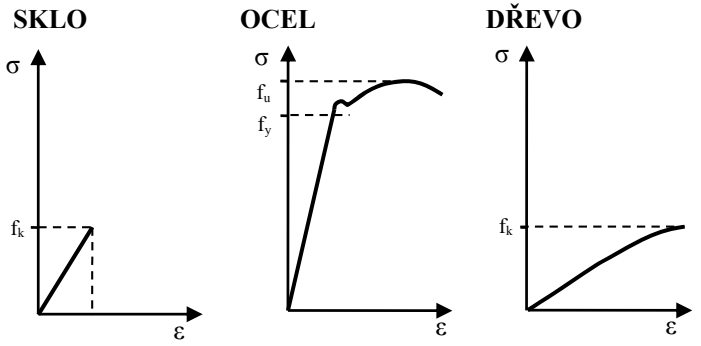
2. Materiálové vlastnosti skla

Sklo je anorganický visko-elastický materiál, který tuhne při pokojové teplotě bez krystalické mřížky, ale při teplotách nad přechodovou oblastí (cca 380°C) je tekutý. Absence krystalické mřížky umožňuje průchod světla bez omezení, což je příčinou průsvitnosti a průhlednosti skla. Transparentnost je tak nejvýznamnější přirozenou vlastností skla, která je v současné architektuře využívána.
Nejdůležitější vlastností z hlediska návrhu nosných konstrukcí ze skla je pevnost a modul pružnosti, viz tab. 2.1. Youngův modul pružnosti je konstantní veličina nezávislá na chemickém složení skla, ve výpočtech ji lze uvažovat hodnotou 70 000 MPa, což je třetinová hodnota při srovnání s modulem pružnosti ocelí, [1].

Tab. 2.1: Materiálové vlastnosti plaveného skla, [1]

vlastnost skla	hodnota	jednotka
hustota ρ	2500	kg/m^3
Youngův modul pružnosti E	70 000	N/mm^2
Poissonova konstanta ν	0,23	-
součinitel teplotní roztažnosti α	9×10^{-6}	1/K
tepelná vodivost λ	1,0	W/(mK)
sálavost (intenzita vyzařování) ε	0,89	-
pevnost v tlaku	více než 1 000	MPa
pevnost v tahu	10 – 100	MPa

Charakteristická pevnost skla v tlaku dosahuje hodnoty až 1 000 MPa a pro posouzení nosných prvků zpravidla není rozhodující. Naproti tomu teoretická pevnost skla v tahu je 100 MPa, ale skutečná experimentálně ověřená hodnota pevnosti dosahuje maximálně 40 – 80 MPa. Obvykle se pro plavené sklo uvažuje při návrhu s charakteristickou hodnotou pevnosti v tahu 45 MPa, [1], [8]. Rozdíl mezi teoretickou a skutečnou pevností skla v tahu je způsoben výrobními vadami, okem neviditelnými mikrotrhlinami, poškrábáním povrchu skla či poškozením vzniklým při výrobě, opracování, přepravě, montáži nebo čištění skleněných tabulí. Pevnost plaveného skla v tahu, která je pro návrh nosných konstrukcí rozhodující, je tedy závislá zejména na kvalitě povrhu a opracování hran, tvaru a velikosti zatěžované plochy, rozdělení napětí po ploše, vlhkosti a délce trvání zatížení. Vliv chemického složení na pevnost skla je zanedbatelný.



Obr. 2.1: Porovnání pracovních diagramů pro sklo, ocel, dřevo, [3]

Při zatěžování se sklo chová pružně a po dosažení kritické pevnosti v tahu *(f_k)* dochází k (náhlému) křehkému lomu, který vychází z povrchu skla, obr. 2.1, [2]. Pro popis křehkého lomu lze použít teorii lomové mechaniky, která vychází z procesu šíření trhliny při tahovém namáhání. Trhlinky (řádově o velikosti desítek nm) na povrchu skla jsou důsledkem technologických procesů a jejich výskyt nelze eliminovat. V případě namáhání trhliny o velikosti a tahovým napětím σ působícím kolmo k trhlině dochází k jejímu růstu, je-li $\sigma > \sigma_{cr}$. Velikost kritického Griffithova napětí lze stanovit podle vztahu

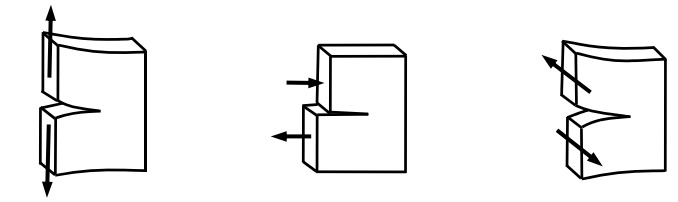
$$\sigma_{cr} = \left(2\gamma \frac{E}{a} \right)^{1/2}, \qquad (2.1)$$

kde E je Youngův modul pružnosti skla,

a délka trhliny na povrchu skla,

γ povrchová energie, řádově o velikosti 1 J/m^2.

Šíření trhliny a následný křehký lom skleněného prvku tedy vycházejí z porušování atomových vazeb na čele trhliny vlivem koncentrace napětí, které se nepřerozdělí zplastizováním materiálu, jako je tomu např. u oceli nebo hliníku.



a) tahové napětí kolmé k rovině trhliny

b) smykové napětí rovnoběžné s rovinou trhliny a kolmé k jejímu okraji

c) smykové napětí rovnoběžné s rovinou trhliny i jejím okrajem

Obr. 2.2: Způsoby rozevírání trhliny

Rychlost šíření trhliny ve skle závisí kromě velikosti působícího napětí i na způsobu rozevírání trhliny, viz obr. 2.2, a na vlhkosti okolního prostředí. Při větší vlhkosti dochází k rychlejšímu růstu trhliny. Vztah mezi časem T potřebným pro dosažení kritické velikosti trhliny a působícím napětím σ lze popsat rovnicí

$$\sigma^n T = const\,, \qquad (2.2)$$

kde n je součinitel zohledňující vliv okolního prostředí, viz tab. 2.2.

Tab. 2.2: Součinitel okolního prostředí, [1]

okolní prostředí	n
voda, 25°C	16,0
50%vlhkost, 25°C	18,1
10% vlhkost, 25°C	27,0
vakuum, 70°C	70,0
roztátý sníh, 2°C	16,0

Další důležitou veličinou, která významně ovlivňuje tahovou pevnost skla, je délka trvání zatížení. Obecně platí, že pevnost plaveného skla v tahu klesá

s délkou trvání zatížení. Doporučené pevnosti skla v tahu, které lze použít pro předběžný návrh nosných konstrukcí ze skla, jsou uvedeny v tab. 2.3.

Tab. 2.3: Doporučené pevnosti skla v tahu v závislosti na délce trvání zatížení [1]

zatížení	délka trvání zatížení	pevnost skla v tahu σ [MPa]
stálé – vlastní tíha	dlouhodobé	7,0
užitné - podlahy	střednědobé	8,4
sníh	střednědobé	10,75
vítr – hrana panelu	krátkodobé	17,8*
vítr – střed panelu	krátkodobé	28,0*

*platné pro plavené sklo o tloušťce $t \geq 10$mm

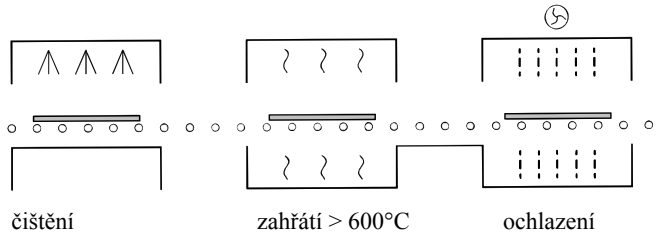
3. Druhy skel pro nosné konstrukce ze skla

3.1 Plavené sklo

Plavené pevnostně neupravované sklo se vyrábí kontinuálním procesem plavení. Základní surovinu tvoří oxid křemíku (SiO_2), který se spolu s dalšími přísadami, tzv. tavivy (oxid vápenatý CaO, soda Na_2O), roztaví při teplotě 1600°C ve sklářské peci. Sklovina natéká z tavící části pece na hladinu roztaveného cínu do plavící lázně. Protože je hustota cínu větší než hustota skloviny, „plave“ sklovina po hladině. Uvedený způsob výroby je v současnosti vzhledem k dosažené kvalitě, vysokému lesku a konstantní tloušťce běžně používán při výrobě plochého skla. Plavené ploché sklo se ve stavebnictví někdy používá na nosné konstrukce i přes nízkou pevnost v tahu, viz tab. 2.1. Typické porušení pro tento typ skla je ve tvaru velkých ostrých střepů, které mohou být nebezpečné uživatelům. Proto se nedoporučuje používat plavené sklo na zasklení nacházející se nad užitným prostorem. Pokud je ale tabule plochého plaveného skla dostatečně upnuta v obvodovém rámu, při porušení z něho nevypadne a konstrukce si zachová jistou míru tzv. zbytkové únosnosti. Běžně se vyrábí plavené ploché sklo v tloušťkách od 4 do 25 mm, maximální velikost tabule skla je nyní omezena možnostmi výrobní linky na rozměr 3,2x 6,0 m, [3], [4], [5], [7].

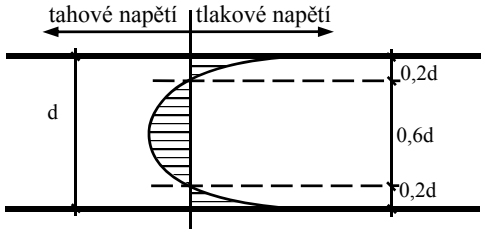
3.2 Tepelně tvrzené (kalené) sklo

Tepelně tvrzené sklo se vyrábí z běžně dostupného plaveného skla, kdy se tabule po očištění zahřeje na teplotu kolem 650°C a následně se rychle ochladí proudem studeného vzduchu z obou stran, viz obr. 3.1. Tímto postupem se na povrchu skleněné tabule vytvoří tlakové napětí, které je v rovnováze s tahovým napětím uvnitř tabule.



Obr. 3.1: Výrobní postup pro tepelně tvrzené sklo, [3]

Napětí má po tloušťce parabolický průběh, viz obr. 3.2, přičemž se jeho úroveň v tlaku pohybuje v rozmezí 90 – 150 MPa. To vede ke zvýšení pevnosti skla v tahu, protože při návrhu nosných konstrukcí ze skla lze počítat s tímto tlakovým povrchovým napětím a vlastní pevností v tahu plaveného skla. Navíc nedochází k rozevírání a růstu trhlinek na povrchu, které jsou pro tahovou pevnost skla rozhodující. Tvrzené sklo rovněž lépe odolává lokálním teplotním rozdílům až 150°C (plavené sklo 40°C). Při porušení dojde k náhlému úbytku energie po celé ploše skleněné tabule, která se roztříští na malé neostré kousky skla. Rozbité tvrzené sklo proto není tak nebezpečné uživatelům jako v případě velkých střepů, které vzniknou při kolapsu skleněné tabule z plaveného skla.



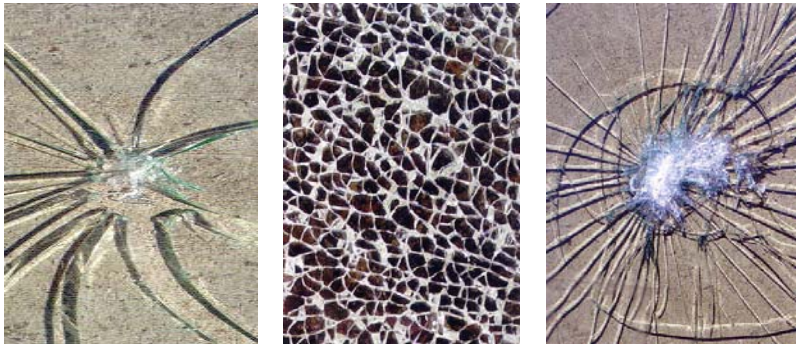
Obr. 3.2: Průběh napětí po tloušťce u tepelně tvrzeného skla

Naopak nevýhodou tvrzeného skla je nulová zbytková únosnost dílců, nezbytnost mechanických úprav (řezání skla na požadované rozměry, vrtání otvorů atd.) před tepelnou úpravou a možnost spontánního kolapsu skleněných dílců, který je způsoben vměstky sulfidu niklu (NiS). Sulfid niklu mění v průběhu tepelné úpravy součinitel tepelné roztažnosti, který je potom větší než součinitel roztažnosti skla. Přítomnost těchto nežádoucích vměstků lze zjistit destruktivní zkouškou teplotním šokem (Heat Soak Test podle DIN 18516-4). Další nevýhodou jsou větší počáteční imperfekce (zvlnění ve tvaru sinusoidy, prohnutí tabule do oblouku, pokles hran), které vznikají při tepelné úpravě nerovnoměrným ochlazováním a posunem tabulí po válcích. Velikost

počátečních imperfekcí tvrzeného skla je možné uvažovat hodnotou L/300 (plavené tepelně neupravované sklo L/2500). Tvrzené sklo se běžně vyrábí do tloušťky 19 mm [4], [5], [6], [7].

3.3 Tepelně zpevněné (polokalené) sklo

Tepelně zpevněné sklo je vyráběno stejným výrobním postupem jako tvrzené sklo, ale pomalejším ochlazováním skleněné tabule je dosaženo na povrchu nižšího tlakového napětí v rozmezí 35 – 55 MPa. Výsledná pevnost v tahu je dvojnásobná ve srovnání s pevností plaveného skla, také odolnost vůči lokálním teplotním rozdílům je větší (100°C). Při porušení se však tepelně zpevněné sklo rozbije podobným způsobem jako sklo plavené, tedy ve tvaru velkých střepů, viz obr. 3.3. Při výrobě nedochází k aktivaci vměstků sulfidu niklu, takže v tomto případě nehrozí spontánní kolaps tabule skla. Naopak, podobně jako u tvrzeného skla, je nutné dílce mechanicky opracovat (řezání na požadovanou velikost, vrtání otvorů, broušení hran) ještě před tepelnou úpravou. Opracování skla po tepelném zpevnění by vedlo k porušení tlakového povrchového napětí a tím i ke kolapsu skleněného dílce, [3], [4].



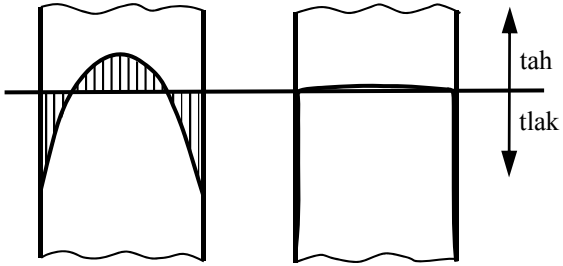
a) plavené sklo b) tvrzené sklo c) tepelně zpevněné sklo

Obr. 3.3: Typické tvary porušení pro různé druhy skla, [3]

3.4 Chemicky tvrzené sklo

Chemicky tvrzené sklo vzniká namáčením tabulí plaveného skla do elektrolytické lázně, ve které jsou vyměněny povrchové ionty sodíku za ionty draslíku, které jsou o 30% větší. V tenké povrchové vrstvě, většinou silné pouze několik desítek mikrometrů, tím vzniká poměrně vysoké tlakové napětí, takže pevnost chemicky zpevněného skla může dosahovat až desetinásobku hodnoty pevnosti v tahu skla plaveného. Vzhledem k velmi nízkému tahovému napětí uvnitř tabule lze takto upravené sklo mechanicky

dále opracovávat, viz obr. 3.4. Další výhodou je možnost zpevnění i velmi tenkých tabulí skla (tloušťka 3 mm) a eliminace počátečních imperfekcí. Hlavními nevýhodami jsou vysoké výrobní náklady a poškození tabule v případě hlubšího vrypu, který může narušit velmi tenkou tlačenou vrstvu.

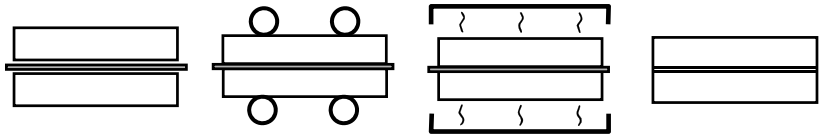


a) tepelně zpevněné sklo b) chemicky zpevněné sklo

Obr. 3.4: Porovnání průběhu napětí pevnostně upravovaného skla

4. Vrstvené (laminované) sklo

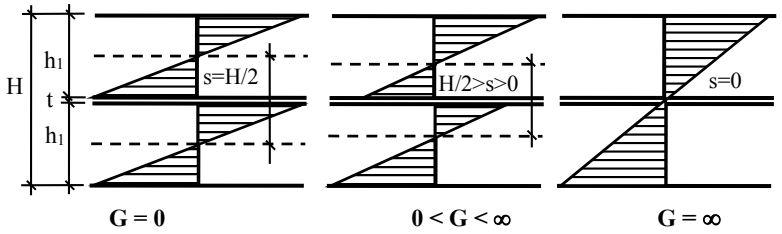
Vrstvené sklo se skládá ze dvou nebo více tabulí plaveného nebo pevnostně upravovaného skla, které jsou vzájemně spojeny pomocí průhledné mezivrstvy. Obvykle se na tuto vnitřní vrstvu používá fólie polyvinylbutyralu (PVB) se základní tloušťkou 0,38 mm. Dalším materiálem, který lze využít, je ethylvinylacetátová fólie (EVA), polyuretan, ionoplast (obchodní název SentryGlass) nebo pryskyřice litá do předem stanovené mezery mezi panely. Při výrobě se očištěné skleněné tabule naskládají na sebe v určeném pořadí s vloženou mezivrstvou PVB fólie nebo jiného materiálu. Následně se předehřejí na teplotu okolo 70°C a slisují mezi válci, kdy je vytlačen přebytečný vzduch. V autoklávu je vrstvené sklo při teplotě okolo 140°C dále lisováno pod tlakem 0,8 MPa, viz obr. 4.1.



Obr. 4.1: Výrobní postup pro vrstvená skla, [3]

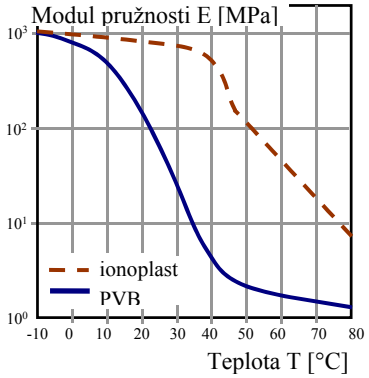
Na chování vrstvených skel při zatížení mají tedy největší vliv materiálové charakteristiky použité fólie, která spojuje jednotlivé skleněné tabule. Modul ve smyku PVB fólie, která je v současnosti nejrozšířenější, se mění s teplotou

a délkou trvání zatížení. Na velikosti modulu ve smyku G závisí průběh napětí od zatížení ve vrstveném skle, viz obr. 4.2. Pro dlouhodobé zatížení se obvykle při návrhu vrstveného skla vliv smykového spojení mezi tabulemi zanedbává. Při posouzení se tedy pouze sčítají tuhosti a pevnosti samostatných jednovrstvých tabulí. Naopak pro krátkodobé zatížení, jakým je např. poryv větru či náraz, lze se smykovým spojením počítat. Vliv modulu ve smyku G na celkovou únosnost vrstveného skla je tedy významný.



Obr. 4.2: Průběh napětí ve dvojvrstvém skle v závislosti na velikosti modulu ve smyku fólie

V porovnání s PVB fólií vykazuje ionoplast (SentryGlass) větší míru spolupůsobení při dlouhodobém zatížení a při vysokých teplotách, viz obr. 4.3, tab. 4.1.



Obr. 4.3: Závislost modulu pružnosti na teplotě PVB fólie a ionoplastu

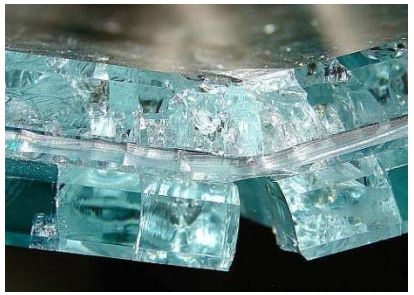
Tab. 4.1: Porovnání smykových modulů PVB fólie a ionoplastu

délka trvání zatížení 1 min.		
modul ve smyku G [MPa]		
teplota	ionoplast	PVB
10°C	225	-
20°C	195	1,64
24°C	173	-
30°C	110	0,75
40°C	30,7	0,46
50°C	11,3	0,29
60°C	3,64	0,21
70°C	1,88	0,05
80°C	0,83	0,0

I při vyšších teplotách je modul ve smyku G ionoplastu dostatečně vysoký, proto lze uvažovat ve výpočtu s vyšší mírou spolupůsobení jednotlivých vrstev laminovaného skla. V případě rozbití tabule si konstrukce zachovává

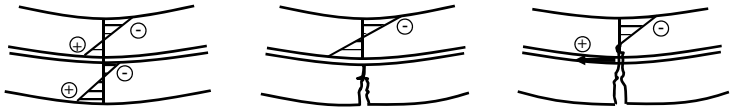
relativně velkou tuhost oproti PVB fólii. Naopak nevýhodou ionoplastové mezivrstvy je delaminace, ke které dochází v případě vkládaných ocelových kotevních prvků mezi jednotlivé tabule. Příčinou je větší smrštění ionoplastu oproti tužším vloženým částem po vychladnutí.

Největší výhodou vrstvených skel je tzv. zbytková únosnost tabule po rozbití, protože roztříštěné úlomky skla zůstanou přichyceny na fólii, obr. 4.4. Vrstvené sklo je tak do jisté míry i po porušení schopno přenášet zatížení, proto se používá na nosné konstrukce (nosníky, sloupy) a na zasklení, které je nad hlavou uživatelů (stropní či střešní panely).



Obr. 4.4: Vrstvené sklo po porušení

Celkem lze v průběhu zatěžování rozeznat tři stádia chování vrstveného panelu z plaveného skla namáhaného ohybem. V prvním stádiu jsou obě vrstvy neporušené, viz obr. 4.5a). Ve druhém stádiu dochází k porušení tabule na tažené straně při překročení pevnosti skla v tahu. Veškeré zatížení přenáší pouze horní tabule skla, obr. 4.5b), [8].



Obr. 4.5: Tři stádia chování tabule z vrstveného skla při namáhání ohybem

Ve třetím stádiu, obr. 4.5c), se porušení rozšiřuje i do horní tabule. Střepy skla ulpívající na mezivrstvě jsou ale stále schopny přenášet tlakové napětí, které je v rovnováze s tahovým napětím v mezivrstvě. Tabule je tak i po porušení schopna přenést alespoň minimální provozní zatížení. Míra zbytkové únosnosti je tedy závislá především na tuhosti a tahové pevnosti použité fólie v mezivrstvě a na druhu skla. Ve srovnání s plaveným nebo tepelně zpevněným sklem, které se porušuje ve velkých střepech, tvrzené sklo

díky porušení v drobných střípcích není schopné ve třetím stádiu přenášet větší tlakové napětí.
Další výrobní metodou vrstveného skla je využití lité pryskyřice, kdy jsou dvě skleněné tabule umístěny ve svislé poloze, předem definovaná mezera o tloušťce 1-2 mm je pak vyplněna pomocí injektáže litou pryskyřicí. Tímto způsobem mohou být vyrobeny tabule vrstveného skla větších rozměrů než za použití autoklávu, jehož velikost omezuje rozměry tabule skla. Vrstvená skla s litou pryskyřicí také mají lepší akustické vlastnosti ve srovnání s vrstveným sklem s PVB fólií, ale nevýhodou je jejich velmi malá nebo nulová zbytková únosnost, protože po porušení střepy nezůstanou přichyceny na mezivrstvě.

5. Stanovení pevnosti skla

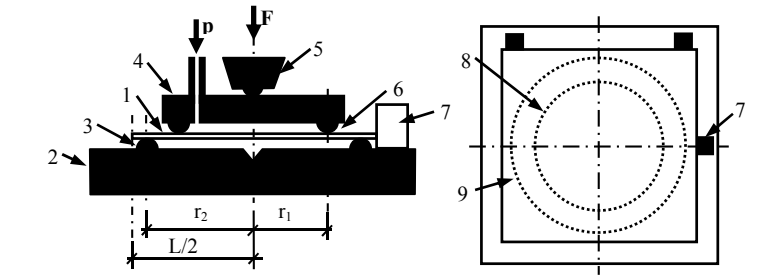
Při zatížení se sklo vždy poruší křehkým lomem v oblasti s maximálním tahovým napětím, pevnost v tlaku proto není rozhodující. Ve stavebnictví se tak jen zřídka setkáváme se skleněnými konstrukčními prvky zatíženými prostým tahem. Nejdůležitější veličinou je pevnost v tahu za ohybu, kterou lze stanovit na základě zkušebních metod podle ČSN EN 1288 Sklo ve stavebnictví – Stanovení pevnosti skla v ohybu, [9], [10], [11], [12], [13]. Norma se skládá z pěti částí, ve kterých jsou popsány různé postupy s ohledem na velikost zkušebních těles a druh zkoušeného skla:

- Část 1: Podstata zkoušení skla,
- Část 2: Zkouška dvojitým soustředným prstencem na plochých vzorcích s velkým zkušebním povrchem,
- Část 3: Zkouška se vzorkem podepřeným ve dvou bodech (čtyřbodový ohyb),
- Část 4: Zkoušení profilovaného skla,
- Část 5: Zkouška dvojitým soustředným prstencem na plochých vzorcích s malým zkušebním povrchem.

Vzhledem k tomu, že sklo používané pro stavební účely má obvykle velké rozměry je při návrhu těchto konstrukcí při stanovování pevnosti skla nejvhodnější vycházet ze zkušebních metod popsaných ČSN EN 1288 - 2 [10] a ČSN EN 1288 – 3 [11].

5.1 Zkouška dvojitým soustředným prstencem na plochých vzorcích s velkým zkušebním povrchem

Zkouška dvojitým soustředným prstencem podle ČSN EN 1288 - 2 [10] se provádí na čtvercových zkušebních tělesech plochého skla o minimální tloušťce 3 mm s délkou strany 1000 mm. Zkušební těleso je volně umístěno na podpěrný kruhový prstenec o poloměru r_2 = 400 mm a zatíženo silou F pomocí zatěžovacího prstence o poloměru r_1 = 300 mm, obr. 5.1.



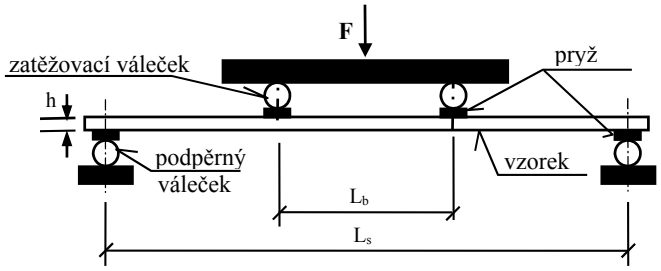
1 zkušební těleso
2 podkladová deska s podpěrným prstencem o poloměru r_2
3 podložka z pryže o tl. 3 mm s tvrdostí (40 ± 10) IRHD
4 zatěžovací prstenec o poloměru r_1
5 přípravek pro přenos zatěžovací síly s kloubovým mechanismem
6 podložka z pryže o tl. 3 mm s tvrdostí (40 ± 10) IRHD
7 zarážka pro centrování vzorku
8 kontaktní kružnice zatěžovacího prstence
9 kontaktní kružnice podpěrného prstence
F zatěžovací síla
P tlak plynu

Obr. 5.1: Uspořádání zkoušky dvojitým soustředěným prstencem

Plocha A, která je vymezena zatěžovacím prstencem je zatížena navíc tlakem plynu p. Zvětšováním síly F a tlaku plynu p se zvětšuje tahové napětí ve středové oblasti vzorku konstantní rychlostí až do lomu, který nastane uvnitř zatěžovacího prstence. Na rozdíl od ohybové zkoušky popsané v [11] je maximálnímu namáhání vystavena pouze kruhová ohraničená plocha zkušebního tělesa. Vliv hran na výslednou pevnost skla v ohybu je tak omezen.

5.2 Zkouška se vzorkem podepřeným ve dvou bodech (čtyřbodový ohyb)

Na provedení jednodušší je zkouška se vzorkem podepřeným ve dvou bodech podle [11]. Zkušební těleso z plochého skla o délce 1100 mm a šířce B = 360 mm je osazeno na dva podpěrné válečky ve vzdálenosti 1000 mm a zatěžováno přes dva zatěžovací válečky umístěné uprostřed rozpětí ve vzdálenosti 200 mm od sebe. Uspořádání zkoušky je znázorněno na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Uspořádání zkoušky čtyřbodovým ohybem

Mezi zkušební těleso a podpěrné, resp. zatěžovací válečky musí být vloženy pruhy z pryže tloušťky 3 mm o tvrdosti (40 ± 10) IRHD. Skleněný panel je zatěžován plynule, rovnoměrně se zvyšujícím zatížením o rychlosti 2,0±0,4 MPa/s až do porušení. Maximálním napětím je při této zkoušce namáhána hrana tabule, což znamená, že při vyhodnocení se berou v úvahu pouze zkušební tělesa, která praskla od hrany. Pevnost v ohybu σ_b se určí podle vztahu

$$\sigma_b = k\left[F_{\max}\frac{3(L_s - L_b)}{2Bh^2} + \sigma_g\right], \qquad (5.1)$$

kde $k = 1$ pro výpočet celkové pevnosti v ohybu včetně hran nebo pro výpočet ekvivalentní pevnosti v ohybu povrchové plochy, včetně hran, ohraničené ohýbacími válečkami,
F_{max} maximální síla při porušení vzorku,
L_s vzdálenost podpěrných válečků, viz obr. 5.2,
L_b vzdálenost zatěžovacích válečků, viz obr. 5.2,
B šířka zkušebního vzorku,
h tloušťka zkušebního vzorku,
σ_g ohybové napětí vyvolané vlastní tíhou vzorku stanovené podle vztahu

$$\sigma_g = \frac{3\rho g L_s^2}{4h}, \qquad (5.2)$$

kde ρ hustota vzorku,
g gravitační zrychlení.

6. Návrhové normy pro konstrukce ze skla

V současné době je návrh skleněných konstrukcí založen na empirických znalostech projektantů, kteří často vycházejí z omezených podkladů a předpisů a kteří jsou závislí zejména na experimentálním poznání problematiky. Evropský výbor pro normalizaci v pracovní skupině CEN/TC129/WG8 připravil pracovní verzi (draft) předběžné evropské normy prEN 16612 „Glass in Buildings – Determination of the load resistence of glass panes by calculation and testing“, [14], a prEN 16613 „Glass in Buildings – Laminated glass and laminated safety glass – Determination of interlayers mechanical properties“, [15]. Obě normy stanovují pravidla pro návrh nenosných monolitických či vrstvených skleněných tabulí a zdvojených izolačních skel, která jsou zatížena rovnoměrným zatížením větrem. Normy prozatím nejsou schválené a nebyly

ani přijaty do soustavy norem ČSN. Normy pro návrh nosných skleněných konstrukcí (např. nosníky, sloupy) a jejich spojů (lepené, šroubované spoje) se teprve připravují, jejich vydání ale není možné očekávat v nejbližších letech. Dále jsou uvedeny některé zásady z připravovaných předpisů, na kterých se autorka podílí.

6.1 Zásady navrhování

Návrhové hodnoty vnitřních sil, momentů, napětí a přetvoření skleněných tabulí se stanoví z návrhových hodnot zatížení, které se určí v souladu s ČSN EN 1990. Posouzení se v mezním stavu únosnosti provede pro maximální tahové napětí vypočtené z návrhových hodnot zatížení podle vztahu

$$\sigma_{max} \le f_{g,d}\,, \qquad (6.1)$$

kde $f_{g,d}$ je návrhová pevnost skla, [14].

6.2 Návrhová pevnost plaveného skla

Návrhová pevnost plaveného skla se určí ze vztahu

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod}\cdot k_{sp}\cdot f_{g,k}}{\gamma_{M,A}}, \qquad (6.2)$$

kde $f_{g,k}$ je charakteristická pevnost plaveného skla ($f_{g,k}$ = 45 MPa),
$\gamma_{M,A}$ dílčí součinitel spolehlivosti materiálu, viz tab. 6.1,
$k_{s,p}$ součinitel povrchu skla, viz tab. 6.2,
k_{mod} součinitel zohledňující délku trvání zatížení.

Tab. 6.1: Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu $\gamma_{M,A}$, [14]

druh skla	součinitel γ_M v MSÚ
plavené sklo	$\gamma_{M,A}$ = 1,8
pevnostně upravené sklo	$\gamma_{M,v}$ = 1,2

Součinitel k_{mod} délky trvání zatížení se pro plavené sklo stanoví podle vztahu

$$k_{mod} = 0{,}663 t^{-\frac{1}{16}}, \qquad (6.3)$$

kde t je délka trvání zatížení v hod.

Typické hodnoty součinitele k_{mod} jsou uvedeny pro vybrané zatěžovací stavy v tab. 6.3.

Tab. 6.2: Součinitel povrchu skla $k_{s,p}$ [14]

druh skla	součinitel povrchu skla $k_{s,p}$	
	bez úprav	úprava povrchu pískováním
plavené sklo	1,0	0,6
tažené sklo	1,0	0,6
smaltované plavené nebo tažené sklo*)	(1,0)	(0,6)
vzorované sklo	0,75	0,45
smaltované vzorované sklo*)	(0,75)	(0,45)
sklo s drátěnou vložkou	0,75	0,45
vzorované sklo s drátěnou vložkou	0,6	0,36

*) Tento typ se běžně nevyrábí z plaveného skla, ale součinitel je požadován pro výpočet návrhové pevnosti upravených skel

Tab. 6.3: Součinitel délky trvání zatížení k_{mod} [14]

zatěžovací stav	délka trvání zatížení	k_{mod}
zatížení lidmi	krátkodobé, jednorázové[1)]	0,89
vítr	jednorázový poryv[2)]	1,0
vítr	krátkodobé, násobné[2)]	0,74
sníh	střednědobé[3)]	0,44
denní změna teploty - 11 hod.	střednědobé	0,57
roční změna teploty 6 měsíců	střednědobé	0,39
vlastní tíha, stálé zatížení	dlouhodobé	0,29

[1)] hodnota k_{mod} = 0,89 je stanovena pro zatížení lidmi s délkou trvání 30s. Další hodnoty je třeba uvažovat v závislosti na druhu zatížení lidmi a využití budovy.

[2)] hodnota k_{mod} = 0,74 vypočtená pro ekvivalentní délku trvání zatížení 10 min. představující účinek bouřky, která může trvat několik hodin. Pro vítr mohou být uvažovány vyšší hodnoty k_{mod}.

[3)] hodnota k_{mod} = 0,44 představuje zatížení sněhem o délce trvání mezi 1 týdnem (k_{mod} = 0,48) a 3 měsíci (k_{mod} = 0,41). V závislosti na místních podmínkách mohou být použity i jiné hodnoty k_{mod} mohou být

6.3 Návrhová pevnost upraveného skla

Návrhová pevnost skel, která jsou tepelně nebo chemicky upravená, se vypočte ze vztahu

$$f_{g,d} = \frac{k_{\mathrm{mod}} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v \left(f_{b,k} - f_{g,k} \right)}{\gamma_{M,v}}, \qquad (6.4)$$

kde k_v je součinitel způsobu výroby, viz tab. 6.4,

$\gamma_{M,v}$ dílčí součinitel spolehlivosti materiálu pro upravovaná skla, viz tab. 6.1,

$f_{b,k}$ je charakteristická pevnost upraveného skla, viz tab. 6.5.

Tab. 6.4: Součinitel způsobu výroby k_v [14]

způsob výroby	součinitel k_v
horizontální způsob tvrzení (nebo jiný způsob bez použití kleští či jiného zařízení pro uchycení skla)	1,0
vertikální způsob tvrzení (za použití kleští či jiného zařízení pro uchycení skla)	0,6

Tab. 6.5: Charakteristická pevnost upravovaných skel [14]

druh skla	charakteristická pevnost skla $f_{b,k}$ [MPa]		
	tepelně tvrzené sklo	tepelně zpevněné sklo	chemicky zpevněné sklo
plavené nebo tažené sklo	120	70	150
vzorované sklo	90	55	100
smaltované plavené nebo tažené sklo	75	45	-
smaltované vzorované sklo	75	45	-

6.4 Návrhové postupy pro posouzení vrstvených skel

V případě konstrukčních prvků z vrstveného skla, které jsou namáhány ohybem, je třeba ve výpočtu uvažovat plastické či visko-elastické materiálové vlastnosti mezivrstev mezi jednotlivými tabulemi s ohledem na teplotu a délku trvání zatížení, viz kap. 4. Pro posouzení lze kromě numerického modelu za pomoci metody konečných prvků použít i zjednodušenou metodu založenou na představě účinné tloušťky h_{eff}. Skutečná tloušťka souvrství se přepočte na účinnou tloušťku s ohledem na smykový modul použité mezivrstvy, teplotu a délku trvání působícího zatížení. Skleněný prvek o účinné tloušťce h_{eff} se následně posoudí jako jednovrstvý prvek.

Účinná tloušťka pro výpočet deformace se stanoví jako

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega\left(\sum_i h_k h_{m,k}^2\right)} \qquad (6.5)$$

a účinná tloušťka pro výpočet napětí v *j*-té vrstvě skla se určí ze vztahu

$$h_{ef,\sigma,j} = \sqrt{\frac{\left(h_{ef,w}\right)^3}{\left(h_j + 2\omega h_{m,j}\right)}}, \qquad (6.6)$$

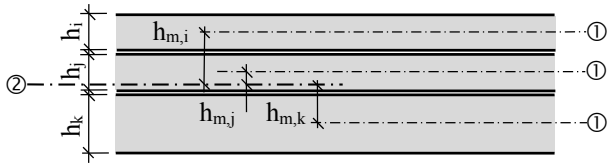
kde ω je součinitel přenosu smykových sil mezivrstvy, který nabývá hodnot od 0 do 1 (ω = 0 pro nulový přenos smykových sil, ale maximálně ω = 1 v případě úplného spřažení), viz tab. 6.6,

h_k, h_j tloušťky jednotlivých skleněných vrstev, viz obr. 6.1,

$h_{m,k}$, $h_{m,j}$ vzdálenost těžišťové osy skleněné vrstvy j, resp. k od těžiště vrstveného skla, viz obr. 6.1.

Tab. 6.6: Součinitel přenosu smykových sil ω [14]

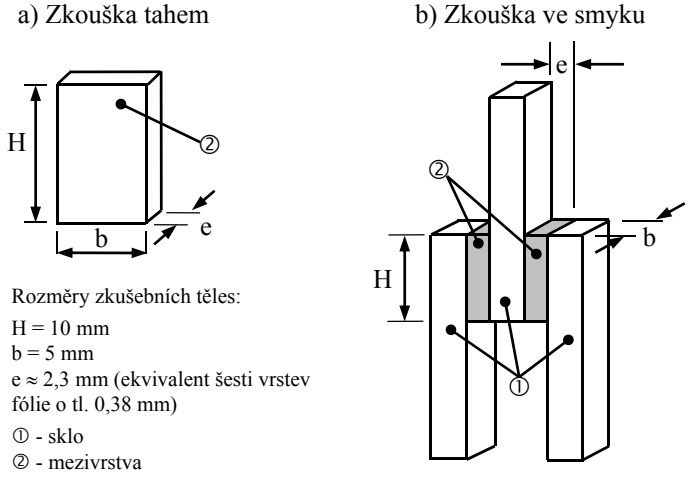
zatížení	délka trvání zatížení	teplota	skupina			
			0	1	2	3
vítr	3 s	0°C < θ < 20°C	0	0,1	0,3	0,7
zábradlí – normální provoz	30 s	0°C < θ < 30°C	0	0	0,1	0,5
zábradlí – hustý provoz	5 min	0°C < θ < 30°C	0	0	0	0,3
pochozí sklo pro údržbu	30 min	0°C < θ < 40°C	0	0	0	0,1
sníh – externí markýzy, a střechy nevytápěných budov	3 týdny	-20°C < θ < 0°C	0	0	0,1	0,3
sníh – zastřešení vytápěných budov	5 dnů	-20°C < θ < 20°C	0	0	0	0,1
stálé	50 let	-20°C < θ < 60°C	0	0	0	0



① - těžišťová osa každé tabule skla
② - těžišťová osa souvrství

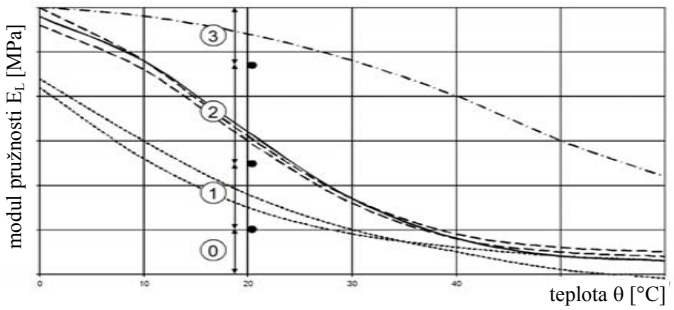
Obr. 6.1: Geometrie vrstvené tabule skla pro určení účinné tloušťky h_{ef}

Součinitel přenosu smykových sil ω se pro použitý typ mezivrstvy určí na základě experimentů, které jsou provedeny v souladu s ustanoveními uvedenými v prEN 16613 [15]. V případě isotropních materiálů, kam lze zařadit většinu používaných fólií, se modul pružnosti E_L stanoví pomocí tahové zkoušky, viz obr. 6.2a). Pro mezivrstvy z materiálů, které nejsou isotropní, je třeba provést zkoušky ve smyku podle obr. 6.2b).
Zkoušky se provedou nejméně pro 15 různých teplot v rozsahu od -20°C do +60°C a s různou délkou trvání zatížení. Na základě modulu pružnosti E_L pro danou teplotu a délku trvání zatížení lze mezivrstvu podle tabulek uvedených v [15] zařadit do jedné ze čtyř skupin, do kterých jsou mezivrstvy rozděleny, viz obr. 6.3.



Rozměry zkušebních těles:
H = 10 mm
b = 5 mm
e ≈ 2,3 mm (ekvivalent šesti vrstev fólie o tl. 0,38 mm)
① - sklo
② - mezivrstva

Obr. 6.2: Geometrie zkušebních těles pro stanovení materiálových charakteristik mezivrstvy, [15]



Obr. 6.3: Závislost modulu pružnosti mezivrstvy E_L na teplotě θ při frekvenci zatížení 1 Hz pro skupiny mezivrstev ⓪ až ③, [15]

Pro nosné konstrukční prvky z vrstveného skla se v praxi nejčastěji používá transparentní fólie PVB (polyvinylbutyral), kterou lze v celém rozsahu teplot a pro jakoukoliv délku trvání zatížení zařadit do skupiny ②.

7. Závěr

Mechanické vlastnosti skla neumožní větší využití tohoto atraktivního materiálu na nosné konstrukce, vzhledem k transparentnosti však bude mít sklo ve stavebnictví vždy nezastupitelné místo, zejména v případě návrhu architektonicky exponovaných staveb. Ačkoliv jsou v posledních letech nosné skleněné konstrukce předmětem intenzivního vývoje a výzkumu na mnoha evropských i světových pracovištích, stále nejsou k dispozici normy pro jejich spolehlivý návrh. Koncem roku 2014 je možné předpokládat schválení evropských norem prEN 16612 a prEN 16613, které se týkají návrhu nenosných konstrukcí: skleněných tabulí velkoplošných fasád či zasklení s využitím izolačních dvojskel. V roce 2013 začala příprava evropské normy pro navrhování nosných konstrukcí ze skla, ale její dokončení nelze očekávat před rokem 2020.

8. Literatura

[1] The Institution of Structural Engineers.: *Structural use of glass in buildings*. SETO, 1999, London, ISBN 1-874266-51-4.

[2] Fanderlik I.: *Vlastnosti skel*. Informatorium s.r.o., s. 313, 1996, ISBN 80-85427-91-5

[3] Wurm, J. *Glass Structures*. Birkhäuser, 2007, s. 255, ISBN 978-3-7643-7608-6.

[4] Schittich Ch., Staib G., Balkow D., Schuler M., Sobek W.: *Glass Construction Manual*. Birkhäuser, Edition Detail, 1999, s. 327, ISBN 3-7643-6077-1.

[5] Krewinkel H. W.: *Glass Buildings – Material, Structure and Detail*. Birkhäuser, 1998, s. 155, ISBN3-7643-5650-2.

[6] Florián M.: *Inteligentní skleněné fasády*. ČVUT v Praze, 2005, s. 190, ISBN 80-01-03195-0.

[7] Nijsse R.: *Glass in structures*. Birkhäuser, 2003, s. 160, ISBN 978-3-7643-6439-7.

[8] Haldimann M., Luible A., Overend M.: *Structural Use of Glass*. 1.vyd. Zurich: IABSE-AIPC-IVBH, 2008. ISBN 978-3-85748-119-2.

[9] ČSN EN 1288-1 – Sklo ve stavebnictví – Stanovení pevnosti skla v ohybu – Část 1: Podstata zkoušení, ČNI 2001.

[10] ČSN EN 1288-2 – Sklo ve stavebnictví – Stanovení pevnosti skla v ohybu – Část 2: Zkouška dvojitým soustředným prstencem na plochých vzorcích s velkým zkušebním povrchem, ČNI 2001.

[11] ČSN EN 1288-3 – Sklo ve stavebnictví – Stanovení pevnosti skla v ohybu – Část 3: Zkouška se vzorkem podepřeným ve dvou bodech (čtyřbodový ohyb), ČNI 2001.

[12] ČSN EN 1288-4 – Sklo ve stavebnictví – Stanovení pevnosti skla v ohybu – Část 4: Zkoušení profilovaného skla, ČNI 2001.

[13] ČSN EN 1288-5 – Sklo ve stavebnictví – Stanovení pevnosti skla v ohybu – Část 5: Zkouška dvojitým soustředným prstencem na plochých vzorcích s malým zkušebním povrchem, ČNI 2001.

[14] Draft prEN 16612 – Glass in building – Determination of the load resistence of glass panes by calculation and testing, CEN 2013.

[15] Draft prEN 16613 – Glass in building – Laminated glass and laminated safety glass – Determination of interlayer mechanical properties, CEN 2013.

Autor a CV

Ing. Martina Eliášová, CSc.
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, ČVUT v Praze – fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 –Praha 6
e-mail: eliasova@fsv.cvut.cz
datum a místo narození: 8. března 1964, Praha

Vzdělání:

1983 – 1988 Fakulta stavební ČVUT v Praze, studijní obor: Pozemní stavby podle individuálního studijního plánu s rozšířeným obsahem i rozsahem studia se zaměřením na konstrukční soustavy – komplexní technicko – fyzikální analýza, (Ing.)

1988 – 1994 Kloknerův ústav ČVUT, studijní obor: Teorie a konstrukce inženýrských staveb, disertační práce: Tuhoplasticitní analýza ocelových desek s konstrukční ortotropií, (CSc.)

Zaměstnání:

1988 - 1991 vědecký aspirant ve vědním oboru "Teorie a konstrukce inženýrských staveb", Kloknerův ústav ČVUT, Šolínova 7, 166 08 Praha 6 - Dejvice

1991 - 1995 odborný pracovník v oddělení konstrukcí, Kloknerův ústav ČVUT, Šolínova 7, 166 08 Praha 6 - Dejvice

1995- dosud odborný asistent na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí, ČVUT v Praze, fakulta stavební, Thákurova 7, Praha 6

Pedagogická činnost:
Přednášky: Nosné konstrukce ze skla, Glass structures, Ocelové a dřevěné konstrukce (ODKG), Navrhování konstrukcí při provádění staveb, Ocelové konstrukce 3
Dále: vedení diplomových a bakalářských prací, vedení projektů, cvičení a laboratorních cvičení.

Oblasti výzkumu:
Materiálové vlastnosti skla, šroubované a lepené spoje konstrukcí ze skla, hybridní konstrukce ze skla, stabilita skleněných nosných prvků.

Řešitelka externích grantů:
2011 – 2013 grant MŠMT v programu COST č. LD11037 „Experimentální a numerická analýza kompozitních konstrukcí ze skla“
2009 – 2010 institucionální podpora MŠMT č. 7C09033 k zahraničnímu projektu „Development of innovative steel-glass structures in respect to structural and architectural design“

2005 - 2007 grant GAČR 103/05/0417 „Zvýšení spolehlivosti konstrukcí ze skla“
2005 grant MŠMT v programu COST č. 1P05OC067 „Šroubové styčníky nosných prvků ze skla“
2003-2005 grant MŠMT v programu KONTAKT č. RC_3_48 „Použití skla v nosných konstrukcích pozemního stavitelství“
Spoluřešitelka zahraničního grantu za ČR: projekt RFSC č. RFSR-CT-2007-00036 „Development of innovative steel-glass-structures in respect to structural and architectural design“ - INNOGLAST.

Členství v organizacích a komisích:
CEN TC250 / WG3 Structural Glass
člen Management Committee za ČR v COST Action TU 0905 "Structural Glass- Novel Design Methods and Next generation Products"
člen Management Committee za ČR v COST Action C13 " Glass and interactive building envelopes "
EU-GLASS-LABS - The European Federation of Structural Glass Laboratories, http://eu-glass-labs.org/

Vybrané publikace 2009 – 2013:

Eliášová, M: *Skleněné konstrukce*. In: K navrhování ocelových, dřevěných a skleněných konstrukcí 1. vyd. Praha: ČVUT, 2012. 146 s., ISBN 978-80-01-05082-8.

Eliášová, M. - Podval, J.: *Členěný prut*. In Softwarová podpora návrhu ocelových a dřevěných konstrukcí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, s. 58-67. ISBN 978-80-01-04610-4.

Eliášová, M.: *Členěný prut*. In: Ocelové a dřevěné konstrukce, Praha, Česká republika, ČVUT v Praze, s. 78 -87, 2009, ISBN 978-80-01-04398-1.

Netušil, M. - Eliášová, M.: *Design of the Composite Steel-Glass Beams with Semi-Rigid Polymer Adhesive Joint*. In: Journal of Civil Engineering and Architecture. 2012, vol. 57, no. 6, p. 1059-1069. ISSN 1934-7359.

Netušil, M. – Eliášova, M.: *Behaviour of the glued joint in hybrid steel-glass beam*. In: Pollack Periodica, Volume 5, Number 1/April 2010, s. 97-108, ISSN 1788-1994 (Print) 1788-3911 (Online).

Eliášová, M. – Netušil, M.: „Analysis of bonded connection for hybrid steel-glass beam“. In: „Budownictwo i inżinieria środowiska“ Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, z. 53, s. 65 – 72, Rzeszow 2009, Poland, ISSN 0209-2646.

Eliášová, M.: *Navrhování konstrukcí ze skla podle evropských norem*, In: Konstrukce. 2012, roč. 11, č. 6, s. 85-91. ISSN 1213-8762.

Machalická, K. - Eliášová, M.: *Lepené spoje pro nosné konstrukce ze skla***,** In: Konstrukce. 2012, roč. 11, č. 4, s. 48-54. ISSN 1213-8762.

Machalická, K. - Eliášová, M.: *Influence of various factors to mechanical properties of glued joint in glass*. In: 2nd International Conference on Structures and Architecture - Structures and Architecture, Concepts, Applications and Challenges. Leiden: CRC Press/Balkema, 2013, p. 321-328. ISBN 978-0-415-66195-9.

Fremr, T. - Netušil, M. - Eliášová, M.: *Analytical models of adhesively bonded steel-glass beams*. In: 2nd International Conference on Structures and Architecture - Structures and Architecture, Concepts, Applications and Challenges. Leiden: CRC Press/Balkema, 2013, p. 335-342. ISBN 978-0-415-66195-9.

Netušil, M. - Eliášová, M. - Bouška, P. - Vokáč, M.: *Use of single layered toughened glass for sound barriers***.** In: COST Action TU0905 Mid-term Conference on Structural Glass. 2013, p. 17-23. ISBN 978-1-138-00044-5.

Machalická, K. - Eliášová, M.: *Influence of Various Factors on Mechanical Properties of Adhesive Joint in Glass Structures*. In: Challenging Glass 3. Amsterdam: IOS Press, 2012, p. 267-279. ISBN 978-1-61499-060-4.

Netušil, M. - Eliášová, M.: *Structural Design of Composite Steel-Glass Elements*. In: Challenging Glass 3. Amsterdam: IOS Press, 2012, p. 715-724. ISBN 978-1-61499-060-4.

Machalická, K. - Eliášová, M.: *Glued connection in glass structures***.** In: Eurosteel 2011, 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Brussels: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2011, vol. 1, s. 387-392. ISBN 978-92-9147-103-4.

Netušil, M. - Eliášová, M.: *Hybrid steel-glass beam with semi-rigid polymer adhesive*. In: Eurosteel 2011, 6th European Conference on Steel and Composite Structures. Brussels: ECCS, 2011, vol. 3, s. 2019-2024. ISBN 978-92-9147-103-4.

Netušil, M. - Eliášová, M.: *Hybrid steel-glass beams with polymer adhesive*. In: Glass Performance Days 2011. Tampere: Glass Performance Days, 2011, s. 294-298. ISBN 978-952-5836-02-8.

Netušil, M. - Eliášová, M.: *Experimental and Numerical Analysis of Glued Steel-Glass Joints*. In: sborník „Challenging Glass 2", Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Faculty of Architecture, Delft University of Technology, 20. – 21. května 2010, Netherlands, editors: Bos, Louter, Veer, Wöhrmann Print Service, s. 269 - 276, 2010, ISBN 978-90-8570-524-6.

Netušil, M. - Eliášová, M.: *Analýza lepeného spoje pro hybridní nosníky ze skla a oceli*. In: sborník „Ocelové konstrukce a mosty 2009", 22. česká a slovenská konference, Brno, Česká republika, 23. – 25. září 2009, akademické nakladatelství Cerm s.r.o., s. 219-224, 2009, ISBN 978-80-7204-635-5.

Užitné vzory, funkční vzorky

Machalická, K. - Eliášová, M.: „Skleněný nosník I". Užitný vzor Úřad průmyslového vlastnictví, č. UVZ 24262, 2012-09-03.

Fremr, T. - Eliášová, M. - Netušil, M.: „Hybridní nosník ze skla a oceli", Užitný vzor, Úřad průmyslového vlastnictví, č. UVZ 24264, 2012-09-03.

Fremr, T. - Eliášová, M. - Netušil, M.: „Hybridní nosník ze skla a oceli II". Užitný vzor Úřad průmyslového vlastnictví, č. UVZ 24265, 2012-09-03.

Eliášová, M. - Netušil, M.: „Hybridní nosník ze skla a oceli", užitný vzor, Úřad průmyslového vlastnictví, č. UZV 22142, 2011-04-28.

Eliášová, M. - Netušil, M.: „Hybridní nosník ze skla a oceli II", užitný vzor, Úřad průmyslového vlastnictví, č. UZV 22143, 2011-04-28.

Machalická, K. - Eliášová, M.: „Skleněný lepený nosník profilu I", funkční vzorek, 2012.

Eliášová, M. - Fremr, T. - Netušil, M.: „Hybridní nosník ze skla a oceli s dělenou stojinou**",** funkční vzorek, 2011.

Machalická, K. - Eliášová, M. - Netušil, M.: „Zařízení pro zatěžování lepeného spoje sklo - kov smykem", funkční vzorek, 2011.

Ciniburk, V. - Eliášová, M. - Vraný, T. - Kořen, J. – Gregorik, J.: „Navrhování lanových chmelnicových konstrukcí". Metodika schválena Ministerstvem průmyslu a obchodu dne 7. 1. 2009 pod č. j. 705/09/03400/1214, vydána v publikaci Metodika pro praxi 02/09,Chmelařským institutem s.r.o., ISBN 978-80-87357-01-9.